

ESPUMAS FLEXIBLES PARA LA SUSTITUCIÓN DE ESPUMAS DE PULIDO
UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA LOCAL
- CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA -

ANDRÉS FELIPE VÉLEZ VELÁSQUEZ
JUAN SEBASTIÁN JARAMILLO SERNA

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE PLÁSTICOS
MEDELLÍN
2008

ESPUMAS FLEXIBLES PARA LA SUSTITUCIÓN DE ESPUMAS DE PULIDO
UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA LOCAL
- CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA -

ANDRÉS FELIPE VÉLEZ VELÁSQUEZ
JUAN SEBASTIÁN JARAMILLO SERNA

Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Asesora

Nora Catalina Restrepo Zapata

M.Sc., I.P

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE PLÁSTICOS
MEDELLÍN
2008

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado muy especialmente a nuestros padres, cuyo esfuerzo y dedicación fueron fundamentales para conseguir lo que hasta ahora hemos logrado y para llegar hasta este punto de nuestras vidas. A ellos todos los esfuerzos, todos los traspasos, todas las horas de trabajo y sacrificio por culminar una carrera profesional y por sacar adelante un trabajo investigativo tan exigente como lo es este proyecto de grado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primero que todo a Dios, por darnos la fortaleza para afrontar los momentos difíciles y por permitirnos disfrutar de cada uno de los logros obtenidos durante la carrera universitaria.

A nuestra familia y seres queridos por darnos siempre ese apoyo incondicional que tanto necesitamos. Sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

A nuestra asesora M.Sc., I.P Nora Catalina Restrepo, por haber aceptado con tanto entusiasmo y entrega, el compromiso de acompañarnos, guiarnos y asesorarnos durante todo el desarrollo de este proyecto.

A Locería Colombiana Grupo Corona S.A y en especial a los Ingenieros José Roberto García y Juan Carlos Escobar, por habernos ayudado con tanto entusiasmo y tan desinteresadamente, por estar siempre disponibles a resolver todas nuestras dudas y por proveernos de toda la información y herramientas necesarias para la ejecución de este proyecto.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|------|
| 0. INTRODUCCIÓN | 15 |
| 0.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA | 15 |
| 0.2 JUSTIFICACIÓN | 16 |
| 0.3 OBJETIVO GENERAL | 17 |
| 0.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 17 |
| 0.5 ALCANCE | 17 |
| 0.6 METODOLOGÍA EMPLEADA..... | 18 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 19 |
| 1.1 POLÍMEROS..... | 19 |
| 1.1.1 Termoplásticos..... | 20 |
| 1.1.2 Termoestables | 20 |
| 1.1.3 Elastómeros | 20 |
| 1.2 ESPUMAS | 21 |
| 1.2.1 Proceso de espumado | 23 |
| 1.2.2 Morfología | 27 |
| 1.2.2.1 Densidad..... | 27 |
| 1.2.2.2 Estructura..... | 28 |
| 1.2.2.3 Distribución de tamaño de celda..... | 28 |
| 1.2.2.4 Anisotropía..... | 28 |
| 1.2.3 Propiedades mecánicas..... | 29 |
| 1.3 PROCESAMIENTO DE CERÁMICOS..... | 30 |

| | |
|--|----|
| 1.4 TRIBOLOGÍA | 39 |
| 2. MATERIALES Y EQUIPOS..... | 42 |
| 2.1 ESPUMAS | 42 |
| 2.1.1 Espuma Corona | 42 |
| 2.1.2 Espuma PU Nacional..... | 43 |
| 2.1.3 Espuma PU Importada..... | 43 |
| 2.1.4 Espuma PE | 44 |
| 2.2 EQUIPOS..... | 44 |
| 2.2.1 Balanza..... | 44 |
| 2.2.2 Estereoscopio. | 44 |
| 2.2.3 Máquina Universal de Ensayos para plásticos..... | 45 |
| 2.2.4 Rugosímetro. | 45 |
| 2.2.5 Espectrómetro Infrarrojo. | 45 |
| 2.2.6 Secadero FSE03..... | 45 |
| 3. FABRICACIÓN DE LOS CUERPOS DE PRUEBA | 46 |
| 3.1 ENSAYOS DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN | 46 |
| 3.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN..... | 47 |
| 3.3 ENSAYOS DE DESGASTE Y ABRASIÓN IN SITU..... | 47 |
| 4. ENSAYOS..... | 49 |
| 4.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE ESPUMAS POR FTIR | 49 |
| 4.2 ENSAYO DE DENSIDAD..... | 50 |
| 4.3 ENSAYO DE ABSORCIÓN..... | 51 |
| 4.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN..... | 52 |
| 4.5 MORFOLOGÍA..... | 53 |

| | |
|--|----|
| 4.6 ENSAYOS DE DESGASTE Y ABRASIÓN IN SITU..... | 55 |
| 4.6.1 Medición de rugosidad..... | 56 |
| 5. RESULTADOS..... | 57 |
| 5.1 LISTADO DE PROVEEDORES..... | 57 |
| 5.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA POR FTIR..... | 58 |
| 5.2.1 Espuma Corona..... | 58 |
| 5.2.2 Espuma PU Importada..... | 59 |
| 5.3 ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN..... | 60 |
| 5.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN..... | 63 |
| 5.5 MORFOLOGÍA..... | 64 |
| 5.5.1 Densidad de celda..... | 64 |
| 5.5.2 Tamaño de celda..... | 65 |
| 5.6 ENSAYOS DE DESGASTE Y ABRASIÓN..... | 66 |
| 5.6.1 Desgaste..... | 66 |
| 5.6.1.1 Espuma de PU Nacional..... | 68 |
| 5.6.1.2 Espuma de PE..... | 68 |
| 5.6.1.3 Espuma de PU importada..... | 69 |
| 5.6.2 Medición de rugosidad..... | 69 |
| 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 71 |
| 6.1 PROPIEDADES DE LA ESPUMA ACTUAL..... | 71 |
| 6.2 PROPIEDADES DE LAS ESPUMAS ALTERNATIVAS..... | 71 |
| 6.2.1 PU Nacional..... | 71 |
| 6.2.2 PE..... | 72 |
| 6.2.3 PU Importada..... | 72 |

| | |
|--|----|
| 6.3 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES | 73 |
| 6.3.1 Ponderación..... | 73 |
| 6.3.2 Parámetros de calificación | 74 |
| 6.3.3 Calificación..... | 75 |
| 7. CONCLUSIONES | 77 |
| 8. TRABAJOS FUTUROS..... | 79 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 80 |
| BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA..... | 82 |
| ANEXO 1 | 83 |
| ANEXO 2 | 84 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Sistemas típicos de dos fases..... | 21 |
| Tabla 2. Productos espumados comunes..... | 22 |
| Tabla 3. Métodos de implementación de gases..... | 26 |
| Tabla 4. Métodos de ensayo para materiales espumados..... | 29 |
| Tabla 5. Dimensiones de probeta para cada material..... | 46 |
| Tabla 6. Especificaciones del análisis por FTIR..... | 49 |
| Tabla 7. Listado de proveedores..... | 57 |
| Tabla 8. Datos y resultados del ensayo de densidad..... | 61 |
| Tabla 9. Datos y resultados del ensayo de absorción..... | 62 |
| Tabla 10. Resultados del ensayo de densidad de celda..... | 65 |
| Tabla 11. Resultados del ensayo de medición de celda..... | 66 |
| Tabla 12. Datos de rugosidad de platos pulidos..... | 70 |
| Tabla 13. Propiedades de la Espuma Corona..... | 71 |
| Tabla 14. Propiedades de la espuma PU Nacional..... | 71 |
| Tabla 15. Propiedades de la espuma PE..... | 72 |
| Tabla 16. Propiedades de la espuma PU Importada..... | 72 |
| Tabla 17. Formato de ponderación..... | 73 |
| Tabla 18. Ponderación de propiedades..... | 74 |
| Tabla 19. Parámetros de calificación..... | 75 |
| Tabla 20. Calificación de las espumas..... | 76 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|------|
| Figura 1. Clasificación de los plásticos según estructura molecular | 19 |
| Figura 2. Tipos de cadenas macromoleculares | 20 |
| Figura 3. Representación del gas en la matriz..... | 26 |
| Figura 4. Tipos de comportamientos reológicos en una suspensión cerámica | 31 |
| Figura 5. Distribución de tamaño de partículas Pasta Loza PUL..... | 32 |
| Figura 6. Roller de platos..... | 33 |
| Figura 7. Esquema de secado cuero en secaderos Lippert de platos | 35 |
| Figura 8. Modelo de contracción..... | 36 |
| Figura 9. Proceso de secado | 37 |
| Figura 10. Secadero cuero de platos | 38 |
| Figura 11. Pulidora de secaderos Lippert de platos..... | 38 |
| Figura 12. Propiedades determinantes del comportamiento de un tribosistema ... | 40 |
| Figura 13. Probetas de ensayo de abrasión y desgaste | 48 |
| Figura 14. Espectro FTIR de la Espuma Corona | 58 |
| Figura 15. Comparación con biblioteca de espectros FTIR del ICIPC | 59 |
| Figura 16. Espectros FTIR Espuma Corona y Espuma PU Importada | 59 |
| Figura 17. Comparación ensayo de compresión al 80%..... | 63 |
| Figura 18. Comparación ensayo de compresión al 50%..... | 64 |

LISTA DE ECUACIONES

| | pág. |
|--|------|
| Ecuación 1. Balance de presiones..... | 25 |
| Ecuación 2. Balance de presiones en un líquido | 25 |
| Ecuación 3. Radio crítico de burbuja | 27 |
| Ecuación 4. Densidad relativa..... | 27 |
| Ecuación 5. Fracción de vacío | 28 |
| Ecuación 6. Tamaño de celda..... | 28 |
| Ecuación 7. Ecuación de Archard..... | 41 |
| Ecuación 8. Gravedad específica aparente. | 51 |

LISTA DE FOTOGRAFIAS

| | pág. |
|--|------|
| Fotografía 1. Espuma Corona..... | 42 |
| Fotografía 2. Espuma de poliuretano nacional..... | 43 |
| Fotografía 3. Espuma de poliuretano importada..... | 43 |
| Fotografía 4. Espuma de polietileno | 44 |
| Fotografía 5. Probetas de ensayo de densidad y absorción | 46 |
| Fotografía 6. Probetas de ensayo de compresión | 47 |
| Fotografía 7. Montaje del ensayo de densidad | 50 |
| Fotografía 8. Ensayo de absorción | 52 |
| Fotografía 9. Escurrido de una probeta | 52 |
| Fotografía 10. Ensayo de compresión | 53 |
| Fotografía 11. Demarcación del área estándar..... | 54 |
| Fotografía 12. Montaje del ensayo de abrasión y desgaste..... | 55 |
| Fotografía 13. Espuma de PU Nacional puliendo | 67 |
| Fotografía 14. Pedazo desprendido de espuma PU Nacional | 68 |
| Fotografía 15. Espuma de PE dañada..... | 69 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---------------|----|
| ANEXO 1 | 83 |
| ANEXO 2 | 84 |

GLOSARIO

VOLUMEN ESPECÍFICO APARENTE: es la relación entre la masa (peso en el aire) de un volumen dado de material a una determinada temperatura, generalmente a 25°C, y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas a la misma temperatura.

DENSIDAD APARENTE: es la masa de material por metro cúbico (o pie cúbico) del material a 25°C (77°F).

0. INTRODUCCIÓN

0.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La industria de procesamiento de materiales cerámicos emplea en sus diferentes procesos de formado y pulido, materiales espumados para dar forma y acabado a las piezas producidas. El uso de materiales espumados en dichos procesos se favorece debido a varias características:

- Baja dureza.
- Capacidad de adsorción y fácil limpieza ya que a medida que la pieza cerámica se pule por la espuma, esta retiene el exceso de material, el cual debe ser eliminado de forma efectiva por medio de un enjuague con agua.
- Capacidad de recuperación elástica en el proceso de enjuague, porque después de ser humedecida la espuma se comprime, por lo que una buena memoria es fundamental para continuar con el proceso de pulido.
- Resistencia a la abrasión, como los cerámicos son materiales muy abrasivos y se encuentran en contacto permanente con la espuma, esta debe durar muchas horas de trabajo sin romperse ni rasgarse.

Sin embargo, cualquier espuma no puede ser usada debido al intervalo tan amplio de propiedades y morfología que estas poseen, por ejemplo, una espuma rígida por su dureza deformaría el producto crudo y una de poro cerrado no sería fácil de limpiar.

Actualmente en Colombia, la Organización CORONA produce una gran variedad de artículos cerámicos, que van desde vajillas hasta sanitarios y lavamanos. Se sabe que esta empresa tiene un alto consumo de espuma importada, lo cual aumenta el costo de procesamiento. En el presente proyecto de grado se estudiará la morfología, propiedades físicas y mecánicas de la espuma utilizada en

la actualidad y se comparará con las espumas flexibles disponibles en el medio colombiano, con el fin de encontrar una opción económica y factible para el proceso de pulido.

0.2 JUSTIFICACIÓN

Locería Colombiana S.A. (Vajillas Corona) consume cantidades significativas de una espuma que importa desde Inglaterra, que de ahora en adelante se llamará “Espuma Corona”; esta posee características especiales que la hacen ideal para el pulido de la obra antes de ser cocida en los hornos. La Espuma Corona ha demostrado que cumple con casi todos los requisitos que una espuma debe tener para trabajar en una planta productora de artículos cerámicos, y no sólo en la planta localizada en el municipio de Caldas, Antioquia, sino en varias locerías alrededor del mundo como en las ubicadas en Stoke on Trent, Inglaterra, pueblo gemelo en oficio a Caldas.

A pesar de sus cualidades y su desempeño óptimo a la hora de pulir cientos de platos y pocillos, la Espuma Corona presenta un inconveniente que la aleja de ser la espuma “perfecta” para la Organización Corona: sólo se consigue en Europa por lo que deben importarla; las espumas son traídas hasta Colombia en contenedores por vía marítima, lo que significa tiempos de entrega muy prolongados (entre 75 y 80 días) lo que exige que la gestión del departamento de compras sea muy bien ejecutada y en coordinación con producción, para que siempre exista disponibilidad de esta espuma. Además, debido a sus características físicas, el transporte de las espumas se convierte en algo no tan sencillo y por ende costoso, por el gran volumen que ocupan y el poco peso que poseen.

0.3 OBJETIVO GENERAL

Determinar las características de las espumas usadas en el pulido de cerámicos, con el fin de encontrar una opción factible.

0.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer las propiedades mecánicas, físicas y morfología de la espuma actual para pulido, con el fin de identificar las condiciones (valores) del sistema.
- Identificar las espumas flexibles disponibles en el medio.
- Caracterizar mecánica, física y morfológicamente las espumas.
- Realizar pruebas piloto de abrasión.
- Comparar características para determinar las condiciones óptimas para el proceso de pulido, y seleccionar una espuma que las cumpla.

0.5 ALCANCE

Una vez finalizado el proyecto se planea obtener los siguientes resultados palpables:

- Una compilación de información pertinente y completa acerca de espumas poliméricas flexibles, que incluya conceptos básicos así como teoría de formas de procesamiento y fabricación.
- Una recopilación de las normas necesarias para desarrollar apropiadamente los ensayos y pruebas que caracterizan materiales espumados.
- Protocolo de ensayos y procedimientos de las pruebas realizadas.
- Un análisis de los resultados obtenidos que conlleve a las conclusiones finales sobre las propiedades y características de las espumas flexibles.

0.6 METODOLOGÍA EMPLEADA

La metodología de este proyecto se basa en dos grandes secciones:

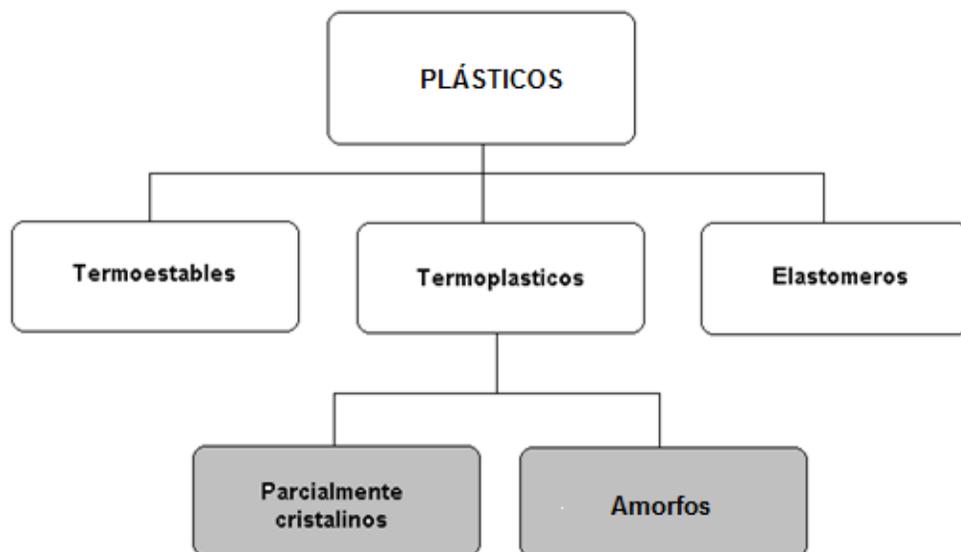
- Consulta bibliográfica (libros, artículos, revistas, otros proyectos de grado, etc.) con el fin de dar soporte teórico al desarrollo del proyecto.
- Ensayos y análisis en los laboratorios de la universidad o de otras instituciones, si es el caso, de muestras de las espumas utilizadas en el proceso de pulido de cerámicos y de espumas flexibles escogidas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 POLÍMEROS

Un polímero es una sustancia compuesta por moléculas que poseen gran masa molecular y que están compuestas por unidades estructurales repetitivas, o monómeros, conectadas por enlaces químicos covalentes (Wikipedia, 2008). Según esta estructura macromolecular se pueden identificar 4 grupos: termoplásticos semicristalinos, termoplásticos amorfos, termoestables o termofijos y elastómeros (Paris, 2007-2). En la Figura 1 se muestra esquemáticamente esta división.

Figura 1. Clasificación de los plásticos según estructura molecular

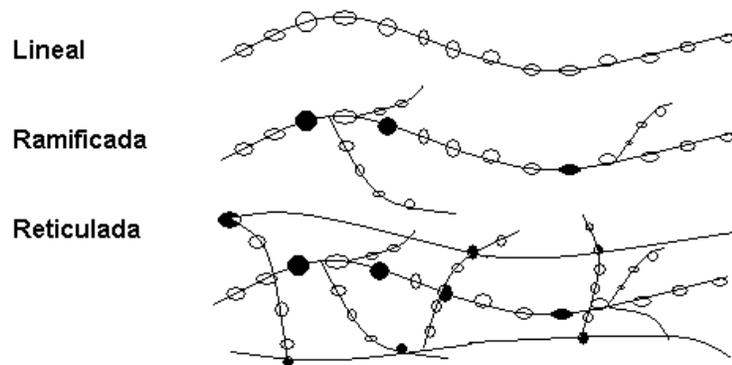


(Paris, 2007-2)

Los polímeros pueden presentar diferentes tipos de cadenas macromoleculares, las cuales se pueden observar en la Figura 2. Cada tipo de estructura

macromolecular afecta las propiedades físicas y mecánicas macroscópicas del material.

Figura 2. Tipos de cadenas macromoleculares



(Paris, 2007-2)

1.1.1 Termoplásticos. Un termoplástico es un plástico el cual a temperatura ambiente es plástico o deformable (Wikipedia, 2008). Los termoplásticos ofrecen muchas ventajas sobre los materiales tradicionales, incluyendo: baja energía para su manufactura, bajos costos de procesamiento, y la habilidad de hacer relativamente fácil formas complejas (Furness, 2005).

1.1.2 Termoestables. Los polímeros termoestables o termofijos son aquellos que solamente son blandos o "plásticos" al calentarlos por primera vez. Después de enfriados no pueden recuperarse para transformaciones posteriores (Netto, 2000). Son plásticos reticulados, es decir presentan enlaces transversales (puentes), presentan estructuras irregulares de cadenas moleculares tridimensionales y tienen una alta densidad de entrecruzamientos o reticulación. Estos polímeros no se funden, no se disuelven y no se hinchan (Paris, 2007-2). Son termoestables: silicona, resinas fenólicas, resinas melamínicas, etc.

1.1.3 Elastómeros. Un elastómero es un polímero que a temperatura ambiente puede ser deformado y estirado, y volver a su estado inicial una vez el esfuerzo es

retirado. Presentan moléculas dispuestas aleatoriamente y tienen densidad de entrecruzamiento baja. No funden, no se disuelven pero sí se hinchan (Paris, 2007-2). Algunos cauchos sintéticos como el NBR (caucho de nitrilo butadieno) entran en esta categoría.

1.2 ESPUMAS

Conceptos básicos. Una espuma es básicamente una sustancia que se forma cuando muchas burbujas de un gas son atrapadas en un líquido o en un sólido. Existen un sinnúmero de productos espumados comunes tanto naturales como artificiales, que van desde la piedra pómez hasta cojines para asientos. La Tabla 1 muestra un resumen de mezclas típicas de gas/líquido y gas/sólido (Lee, Park, & Ramesh, 2007) y en la Tabla 2 se observa la naturaleza de las espumas y sus aplicaciones más comunes.

Tabla 1. Sistemas típicos de dos fases

| Sistemas típicos de dos fases | |
|--|---------------------|
| Fenómeno | Terminología |
| Burbujas de gas en la superficie del líquido | Espuma líquida |
| Burbujas de gas dispersas en líquido | Burbuja de emulsión |
| Burbujas líquidas en líquido | Líquido de emulsión |
| Burbujas líquidas en sólido | Gelación |
| Burbujas de gas en sólido | Espuma |

(Lee, Park, & Ramesh, 2007)

Las espumas plásticas, también conocidas como plásticos expandidos o espumas de plástico, generalmente consisten de un mínimo de dos fases, una matriz polimérica sólida y una fase gaseosa derivada de un agente espumante. Puede haber más de una fase sólida presente, como en el caso de una mezcla de polímeros.

Tabla 2. Productos espumados comunes

| Productos espumados comunes | |
|-----------------------------|---|
| Natural: | Piedra pómez, tronco de árbol, madera, corcho, organismos |
| Sintética: | |
| Comida: | Arroz al vapor, masa de harina, cereal inflado... |
| Plásticos: | Cojín de asiento, chaleco salvavidas, tabla de aislamiento... |
| Automotriz: | Apoya brazos, volco, bumper... |
| Deportes: | Relleno de casco, protección de rodilla, tabla de surf... |
| Médicos: | Cinta, sellos... |

(Lee, Park, & Ramesh, 2007)

Las espumas pueden ser flexibles o rígidas, dependiendo de si su temperatura de transición vítrea está por debajo o por encima de la temperatura ambiente, la cual a su vez depende de la composición química, el grado de cristalinidad y el grado de entrecruzamiento de las moléculas. Entre las espumas flexibles y las rígidas se encuentran las espumas semirrígidas o semiflexibles. Además la morfología de la espuma es una característica crítica: la geometría de la celda puede ser abierta (túneles entre las celdas), o cerrada. Las espumas de celda cerrada son más aptas para aislamiento térmico y son generalmente rígidas, mientras que las espumas de celda abierta son las mejores para cojinería, muebles, colchones y aislamiento acústico, entre otros usos, y son generalmente flexibles (Klempner & Frisch, 1991).

Una espuma polimérica posee propiedades físicas, mecánicas, y térmicas únicas, las cuales son regidas por la matriz polimérica, la estructura de celda y la composición del gas. Cuando una fase gaseosa se dispersa en forma esférica dentro de una matriz polimérica, la estructura de un compuesto es formada naturalmente, y las propiedades de este compuesto son determinadas por sus constituyentes y sus distribuciones. Dado que el peso del gas es despreciable, las

propiedades del compuesto gas/polímero a menudo dependen volumétricamente de los componentes participantes. La densidad es un ejemplo típico de esto, especialmente en casos donde la fase de burbujas es predominante. Sin embargo, las propiedades termodinámicas como el calor específico, la constante de equilibrio y la conductividad térmica, dependen gravimétricamente de los elementos individuales, como por ejemplo el peso de cada elemento.

Las características de las espumas poliméricas son determinadas por los siguientes parámetros estructurales: densidad de celda, coeficiente de expansión, distribución de tamaño de celda, contenido de celda abierta e integridad de celda. Estos parámetros estructurales de celda son gobernados por la tecnología de espumado usada en el procesamiento, y la tecnología de espumado por lo general depende enormemente del tipo de polímero utilizado. Diferentes espumas tienen diferentes propiedades, que pueden ir desde un módulo bajo (flexible) a uno alto (rígido), de un comportamiento resiliente a uno duro, de una histéresis baja a una alta, y de una distribución de celda mono a una multi-modelo (Lee, Park, & Ramesh, 2007).

1.2.1 Proceso de espumado. El proceso de espumado ocurre cuando moléculas de gas libres son convertidas en burbujas esféricas, y sucede por lo general cuando las condiciones que rodean al sistema cambian muy abruptamente para permitir una respuesta suave del mismo. Aunque, a cambios moderados, la difusión molecular podría ser adecuada para restaurar el estado de equilibrio, cambios drásticos usualmente no permiten alcanzar el equilibrio a través de mecanismos convencionales de transporte como la difusión y la vaporización. Por lo tanto, el proceso de espumado, puede ser entendido como una forma de disipar las perturbaciones en un ambiente dado. Sin embargo, el proceso de espumado también puede ser visto como una transición de un estado estable (homogéneo) a un estado inestable (heterogéneo). Por ejemplo en el caso de hervir un líquido, cuando este se está calentando pasa de un estado estable a un burbujeo inestable

el cual se detendrá cuando el líquido pase a formar un estado de vapor homogenizado (Lee, Park, & Ramesh, 2007).

La fase densa que rodea las burbujas de gas puede fortalecerse aún más (por enfriamiento) para retener los efectos útiles del intenso proceso de espumado y así obtener productos espumados estables. El proceso de endurecimiento debe ocurrir más rápido que el proceso de condensación de la fase gaseosa, de otra forma las burbujas podrían retornar a un estado líquido. En ciertos casos, el medio circundante podría ser inadecuado para mantener la contracción inducida por vacío. Éste tiende a colapsar de regreso al estado no espumado. En otras palabras el manejo del tiempo es muy importante.

El proceso de espumado de materiales poliméricos puede llevarse a cabo ya sea por medios mecánicos, químicos o físicos. Algunos de los métodos más usados comúnmente son los siguientes (Klempner & Frisch, 1991):

1. Descomposición térmica de agentes espumantes químicos, generando ya sea nitrógeno, dióxido de carbono o ambos; por medio de la aplicación de calor o como el resultado del calor liberado en la reacción exotérmica durante la polimerización.
2. Agitación mecánica de gases en un sistema de polímero, el cual se endurece ya sea por acción catalítica, calor o ambas, atrapando así las burbujas de gas en la matriz.
3. Volatilización de líquidos de bajo punto de ebullición (como los fluorocarbonos y el cloruro de metileno) dentro de la masa de polímero como resultado del calor exotérmico de la reacción o por aplicación de calor.
4. Expansión de gas disuelto en una masa de polímero en la reducción de presión del sistema.

La metodología del proceso de espumado usualmente consiste en introducir una fase gaseosa en un sistema líquido, luego espumar el gas, y subsecuentemente

solidificar el líquido antes de que las burbujas de gas se condensen o colapsen. Las burbujas de gas son generadas en una forma esférica, como se observa en la Figura 3, ya sea por nucleación o insuflación. Siempre y cuando esta forma esférica tenga la energía superficial más baja para un volumen dado, será la forma ideal para que la fase débil (gaseosa) se mantenga dentro de una fase densa (líquida o sólida). Como se muestra en la Ecuación 1, el gas es considerado la fase débil, y por lo tanto tiene que contrarrestar la suma de la presión circundante y la fuerza estructural, F , con el fin de sobrevivir en forma de burbuja. Por lo tanto:

Ecuación 1. Balance de presiones

$$P_B = P + \frac{F}{A}$$

(Lee, Park, & Ramesh, 2007)

Donde P_B , P y A , denotan la presión de la burbuja, presión circundante y área superficial de la burbuja respectivamente. Cuando la fase circundante se encuentra en un estado líquido, la ecuación se convierte a:

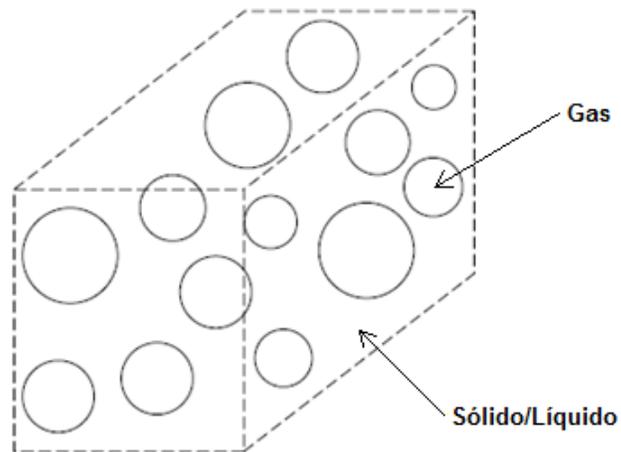
Ecuación 2. Balance de presiones en un líquido

$$P_B = P + \frac{2\sigma}{R_B}$$

(Lee, Park, & Ramesh, 2007)

Donde σ y R_B , representan la tensión superficial y radio de burbuja respectivamente. Como se indica en la Tabla 3, existen varias posibles formas de introducir moléculas externas de gas en un volumen dado ocupado por líquidos o sólidos. Cuando un gas existe en una matriz densa, las moléculas del gas son lo suficientemente pequeñas para estabilizarse en los orificios estructurales del líquido o sólido circundante.

Figura 3. Representación del gas en la matriz



(Lee, Park, & Ramesh, 2007)

Tabla 3. Métodos de implementación de gases

| Métodos de implementación de gases en líquidos y sólidos |
|--|
| Disolución de gas por presión y/o mezcla en el sólido o líquido. |
| Soplado del gas en la fase líquida, como en: moldeo por inyección asistido por gas. |
| Reacción química para envolver gas en líquido. |
| Descomposición parcial del polímero fundido. |
| Mezcla del gas encapsulado en el polímero en el sólido o líquido para una expansión aún mayor en el procesamiento. |
| Reacción con el líquido para formar burbuja, como el bicarbonato de sodio en agua. |
| Entrada de aire en el líquido para un procesamiento a alta temperatura o baja presión (vacío). |

(Lee, Park, & Ramesh, 2007)

Sin embargo, para que una burbuja sea producida, un número suficiente de moléculas de gas tienen que reunirse con el fin de vencer la resistencia de la

matriz circundante. En este contexto, un parámetro importante conocido como *Radio Crítico de Burbuja* (R_{CR}), puede ser determinado de acuerdo a la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Radio crítico de burbuja

$$R_{CR} = \frac{2\sigma}{(P_B - P)}$$

(Lee, Park, & Ramesh, 2007)

Así, si el radio de la burbuja es más pequeño que el radio crítico, se puede inferir que la fuerza de tensión superficial es lo suficientemente grande para que las agrupaciones de gas colapsen. En un estado de “equilibrio último”, P_B debería ser igual a P , y por lo tanto, R_{CR} tendería al infinito. Esto indica que una forma esférica podría no conseguirse porque cualquier tamaño de burbuja es más pequeño que el radio crítico infinito. Pero cuando el equilibrio es destruido, el sistema atravesará una serie de estados de no-equilibrio para alcanzar otro de equilibrio, y en este proceso la formación de burbujas podría ocurrir.

1.2.2 Morfología

1.2.2.1 Densidad. El primer parámetro microestructural para describir una espuma es la cantidad de material que ésta contiene. Esta característica se define como la densidad absoluta, densidad relativa ρ_r , o la fracción de vacío de la espuma f . Generalmente se determina por el método de Arquímedes. La densidad relativa y la fracción de vacío se definen en las ecuaciones 4 y 5:

Ecuación 4. Densidad relativa

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_o}$$

(Lee, Ramesh, & Gendron, 2005)

Ecuación 5. Fracción de vacío

$$f = 1 - \rho_r$$

(Lee, Ramesh, & Gendron, 2005)

1.2.2.2 Estructura. El siguiente parámetro usado para describir una espuma es la fracción de celdas abiertas y cerradas que contiene. Las cerradas son medidas generalmente comparando el volumen externo de una muestra de espuma con el diferencial de volumen del gas presurizado, medido cuando la espuma es puesta en una cámara hermética. Si ambos volúmenes son equivalentes, la espuma tiene una estructura 100% de celda cerrada. Si estos volúmenes son diferentes, su diferencia se atribuye a la fracción de celda abierta, la cual permite la penetración del gas en la espuma.

1.2.2.3 Distribución de tamaño de celda. La distribución de tamaño de celda se obtiene de observaciones cuantitativas de las celdas de las espumas, las cuales se observan en la superficie fracturada de la espuma. Por medio de un análisis de imagen, el área de la superficie de celdas individuales, A_i , es medida y el tamaño de celda correspondiente, d_i , es calculado del diámetro equivalente de un círculo de área A_i , tal como se muestra en la siguiente ecuación.

Ecuación 6. Tamaño de celda

$$d_i = 2\sqrt{\frac{A_i}{\pi}}$$

(Lee, Ramesh, & Gendron, 2005)

1.2.2.4 Anisotropía. Espumas producidas como paneles extruidos generalmente exhiben anisotropía morfológica, la cual afecta el comportamiento mecánico de las mismas. Dependiendo de la aplicación, puede ser necesario obtener la distribución de tamaño de celda, relación de aspecto promedio, y orientación en tres direcciones ortogonales. Estos tres parámetros microestructurales cuentan para la anisotropía morfológica de estas espumas (Lee, Ramesh, & Gendron, 2005).

1.2.3 Propiedades mecánicas. Las espumas, como materiales de ingeniería, ahora son usadas en todos los sectores industriales y representan una clase extraordinaria de materiales. Se utilizan para embalaje, aislamiento térmico y eléctrico, aplicaciones de flotabilidad, y en usos estructurales como cubiertas, pavimentos, paneles, etc. Este carácter extraordinario proviene de sus diversas propiedades como lo son: rigidez, fuerza, resistencia al impacto, resistencia dieléctrica y térmica, y permeabilidad, entre otros, que pueden ser personalizados para obtener propiedades que se extienden más allá de los límites de las otras clases de materiales de ingeniería.

Las espumas poliméricas son comúnmente caracterizadas en términos de su desempeño mecánico, mediante diferentes tipos de ensayos mecánicos convencionales. Los ensayos más comunes están resumidos en la Tabla 4. Mientras estas técnicas de caracterización mecánica pueden ayudar a producir una espuma que funcione según ciertas exigencias, todavía existe un trabajo adicional para entender el origen de su desempeño. Para alcanzar esto, la relación entre la morfología de las espumas de ingeniería y su comportamiento funcional, tiene que ser definido. Hasta ahora, la relación entre la morfología y el desempeño ha sido abordada según el acercamiento propuesto por Gibson y Ashby, 1997, que relaciona las propiedades mecánicas de las espumas con su densidad. Sin embargo, al basarse *exclusivamente* en la densidad de la espuma, no se tienen en cuenta las características morfológicas detalladas de la espuma, como su distribución de tamaño de celda y la anisotropía (Lee, Ramesh, & Gendron, 2005).

Tabla 4. Métodos de ensayo para materiales espumados

| Método | Descripción |
|------------|--|
| Compresión | Muestra de sección constante (cuadrada o circular), comprimida a una velocidad nominal constante hasta la falla de la muestra o hasta que la deformación alcanza la fracción de vacío nominal. |

Tabla 4. (Continuación)

| | |
|--|---|
| Flexión | Muestra de sección rectangular constante, sometida a tres o cuatro puntos de flexión hasta la falla de la muestra. |
| Impacto de dardo en caída | Placa de muestra sujeta a una plataforma circular, impactada por un dardo en caída equipado con una celda de carga y un transductor de desplazamiento (el impacto debe generar la falla de la muestra). |
| Amortiguamiento de choque dinámico (Impacto de hoja plana) | Muestra de sección constante (cuadrada o circular), impactada por un objeto plano a alta velocidad hasta la falla de la muestra o hasta que la deformación alcanza la fracción de vacío nominal. |

(Lee, Ramesh, & Gendron, 2005)

1.3 PROCESAMIENTO DE CERÁMICOS

Las pastas cerámicas tienen varios componentes que se pueden clasificar en dos grupos: arcillosos y duros. En el primer grupo se encuentran las arcillas, caolines, arcillolitas y los demás minerales que aportan plasticidad a la pasta por su naturaleza; en el segundo grupo se encuentran la arena (cuarzo), feldspatos, dolomita, alúmina y otros compuestos y óxidos carentes de plasticidad pero aportantes de otras características necesarias en las pastas, y que generalmente se presentan como granos secos; se conocen también como materiales premolidos, que son sólidos (cristalinos) de alta densidad y cero plasticidad (propiedad exclusiva a las arcillas). En la etapa de ensamble de pastas se realiza la mezcla de los dos tipos de materiales; es fundamental que se garantice una buena homogeneidad y uniformidad de toda la masa; es por ello que se prefiere un medio de suspensión líquido como lo es el agua; así se puede realizar más efectivamente la mezcla y llevar a cabo etapas subsiguientes del proceso. En el

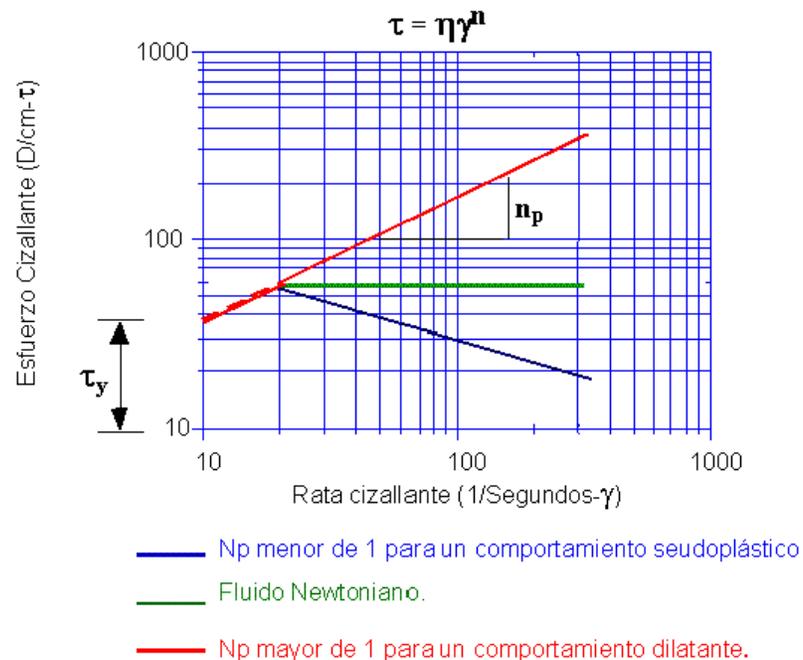
ensamble de pasta como se ha descrito anteriormente se generan suspensiones cerámicas.

En las suspensiones cerámicas existen dos tipos de comportamientos reológicos:

1. Dilatancia: A mayor cizalladura, mayor esfuerzo. Al hacer mayor trabajo mecánico la pasta opone más esfuerzo a deformarse, a fluir, a moverse, etc.
2. Seudoplasticidad: A mayor cizalladura, menor esfuerzo.

Laseudoplasticidad y la dilatancia se pueden explicar gráficamente así:

Figura 4. Tipos de comportamientos reológicos en una suspensión cerámica



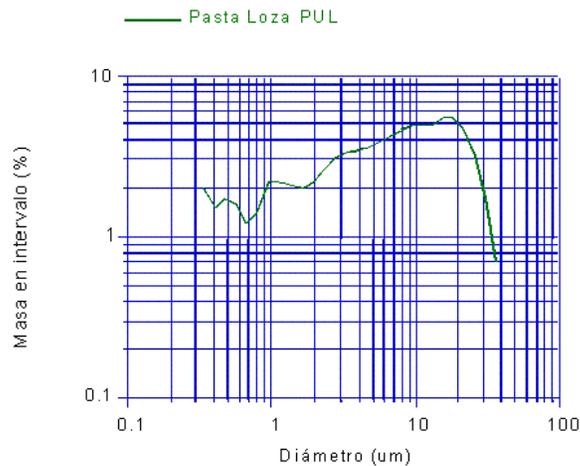
(Locería Colombiana, 2008)

Dilatancia: Este comportamiento debe evitarse al máximo en la industria cerámica, pues dificulta el trabajo con pastas de esta naturaleza, en casos tales donde una pasta ha llegado a romper el eje de una amasadora por dicha razón. Una pasta se compone de un 50-55% de premolidos. Una suspensión de pasta con un 50-55% de materiales premolidos es una suspensión muy congestionada de partículas de

alta densidad. A medida que sube el peso por litro de la suspensión, la cantidad de agua que hay entre partículas de materiales premolidos disminuye. Sin embargo, este factor de poca agua entre partículas no lo controlan ni el peso por litro ni la viscosidad de la pasta. Estas dos últimas son propiedades físicas que ponen en evidencia la dilatancia. El verdadero causante de la dilatancia es una pésima distribución de tamaño de partículas de la pasta después del ensamble unida a una alta concentración de sólidos y una viscosidad baja.

La figura de Distribución de Tamaño de Partículas que se muestra para la pasta PUL (Pasta Loza) demuestra que el 71% de las partículas tiene un tamaño entre los 3-18 μm . Hacia el lado de los mayores tamaños (22-43 μm) existe un 12.0% y por último hacia el lado fino de la distribución se aprecia un 36.0% que corresponde a tamaños entre los 0.35-3 μm . El comportamiento contrario u opuesto llamado plasticidad podría definirse como la capacidad de un fluido, suspensión o masa de dejarse deformar bajo la acción de un esfuerzo y de conservar la forma después de que el esfuerzo ha cesado. Ahí puede inferirse claramente la importancia que este concepto tiene en el desempeño de las pastas en los procesos de formación.

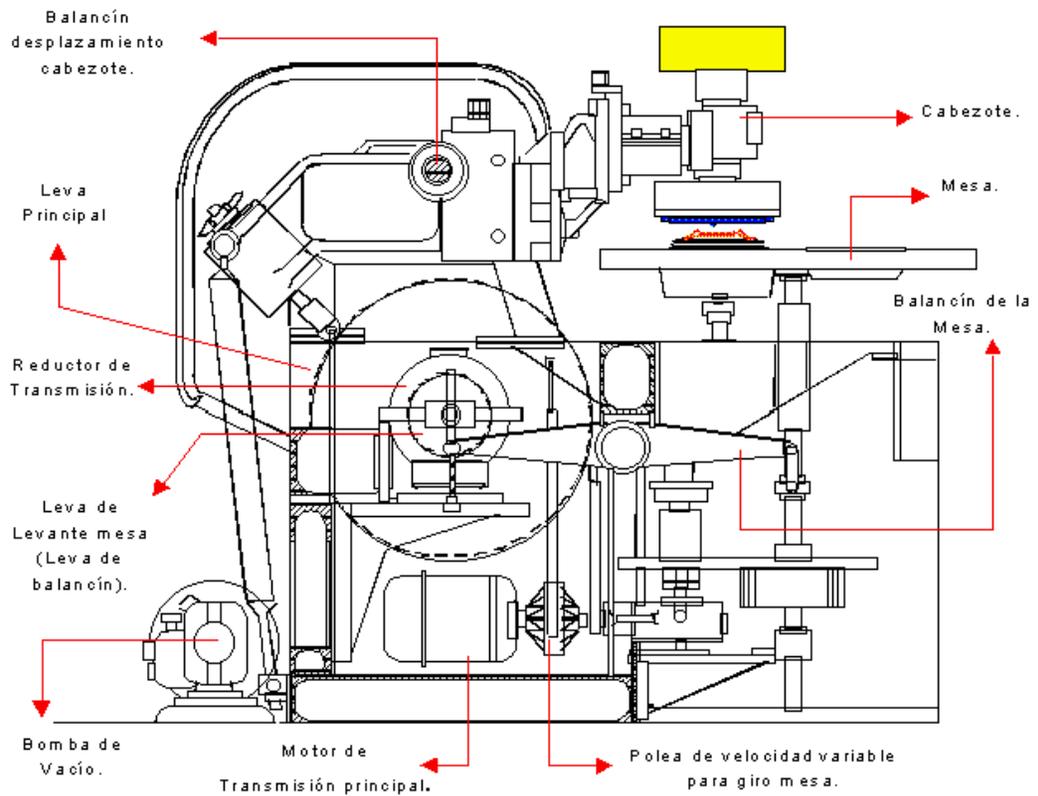
Figura 5. Distribución de tamaño de partículas Pasta Loza PUL



(Locería Colombiana, 2008)

El proceso de formación por forjado (*roller*) depende mucho de la plasticidad de la pasta. Durante el proceso una rodaja de pasta es colocada sobre un molde de yeso y rotada a 400 rpm mientras se empuja contra este una herramienta (*roller* en epóxica) con el perfil de la pieza. Esta herramienta define la superficie y forma la superficie superior de la pieza.

Figura 6. Roller de platos



(Locería Colombiana, 2008)

Después de ser formada la pieza, esta debe pasar por una serie de procesos de secado, necesarios para luego poder ser cocinada en los hornos. El secado en cerámica requiere de 2 aspectos:

- Retirar el agua física, lo cual genera pérdida de peso y tamaño.
- Gradiente de humedad.

Estos dos aspectos requieren de 4 ayudas (condiciones) básicas:

1. Agua.
2. Aire.
3. Tiempo.
4. Temperatura.

Para que haya secado existe un requisito que es primordial e inamovible: Debe haber una diferencia de humedad, es decir un "Gradiente".

En Locería Colombiana S.A. existen 3 procesos de secado conocidos y aplicados, así:

1. Secado por atomización.
2. Secado al ambiente.
3. Secado forzado.

El proceso de secado forzado más común en Locería Colombiana S.A. son los secaderos Lippert. Para cumplir con la condición antes mencionada de un "gradiente", los secaderos Lippert cuentan con dos ayudas principales:

1. Movimiento de aire húmedo.
2. Temperatura.

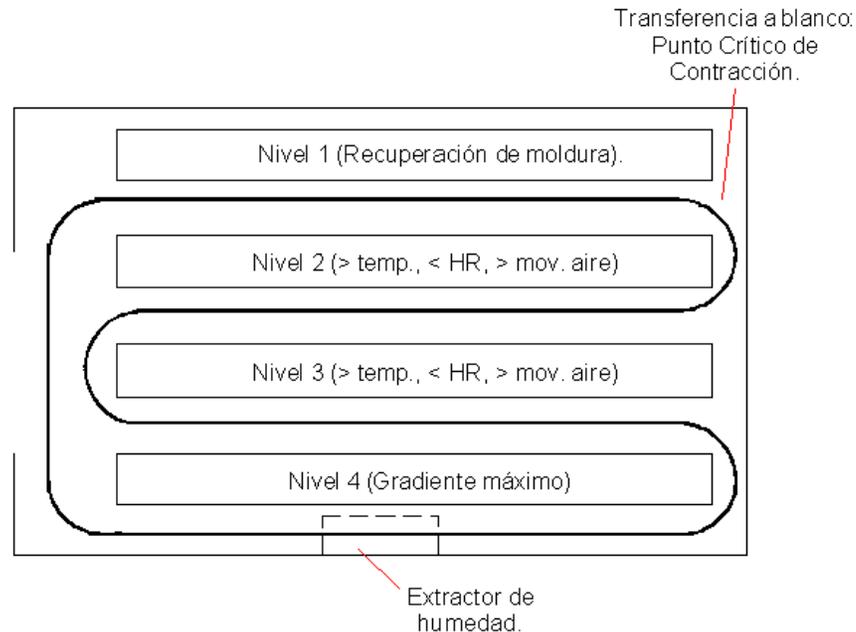
En la cerámica se deben retirar tres tipos de agua:

1. Agua de la superficie de las partículas.
2. Agua de los intersticios o poros.
3. Agua químicamente ligada.

El agua descrita en los numerales 1 y 2 es agua ligada físicamente, más no químicamente.

La Figura 7 muestra un esquema del proceso de secado cuero que se lleva a cabo en los secaderos marca Lippert.

Figura 7. Esquema de secado cuero en secaderos Lippert de platos



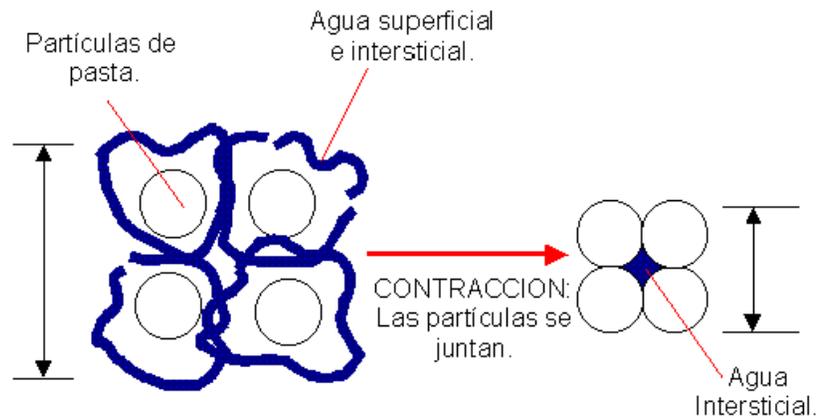
(Locería Colombiana, 2008)

Para garantizar el "Gradiente", el primer nivel (Nivel 4) donde entra la obra luego de ser forjada, se genera un ambiente de mucha humedad y poca temperatura. Con este ambiente se genera un intercambio entre las piezas que están más húmedas y el ambiente. Esta migración de agua superficial e intersticial desde las piezas hacia la atmósfera del nivel 4 del secadero, satura de humedad el ambiente y por ello se debe extraer mediante el extractor de humedad cuya boca está ubicada en el centro del nivel 4. En caso de no extraer la humedad en el ambiente esta migraría de nuevo a las piezas rehumiectándolas y haciendo ineficiente el proceso de secado. Otro aspecto que se debe tener en cuenta es que el calentamiento en el nivel 4 no debe ser brusco. Si fuese brusco, con alta temperatura y ambiente seco, podrían suceder 2 cosas:

1. Obra que se revienta.
2. Los iones de los defloculantes salen a la superficie y tapan los poros de los intersticios. Esto ocasiona que la pieza se vuelva frágil.

Luego de su paso por el nivel 4, la pieza pasa a los niveles 3 y 2. Allí la pieza se enruta hacia lo que se conoce como el Punto Crítico de Contracción. Esto se da gracias a una alta temperatura, menos humedad y el mayor movimiento de aire, ayudas todas necesarias para propiciar un buen secado. En estos dos niveles sucede la mayor contracción, es decir, la salida casi por completo del agua superficial y el agua intersticial. Al salir estas dos aguas, las partículas se juntan y la pieza se contrae entonces. Más o menos así:

Figura 8. Modelo de contracción



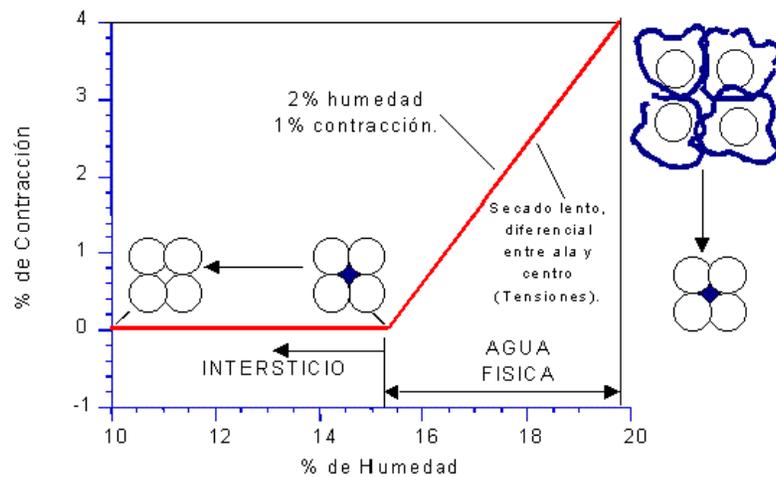
(Locería Colombiana, 2008)

Dícese entonces que en la transferencia del secado “cuero” al secado blanco, la pieza debe estar en su punto crítico de contracción, es decir donde la contracción que tome lugar ya es poca. En el secado blanco todavía hay salida del agua, pero es agua intersticial que permaneció allí por el tamaño de los intersticios y además el secado debido a la salida de agua químicamente ligada. Por ello el secado en blanco se hace con alta temperatura y una poca humedad relativa del ambiente.

Estas variables de secado, en específico el Punto Crítico de Contracción, se pueden determinar fácilmente y le pueden dar al Controlador de Proceso una base para su operación del secadero y a su vez conocer su materia prima para hacer

recomendaciones directas al proveedor. El Punto Crítico de Contracción se encuentra midiendo la contracción que simultáneamente se da en la pieza a medida que esta pierde humedad. El Punto Crítico de Contracción es aquel donde la pieza no contrae más y por ende no existen más fuentes de tensiones entre el ala y el centro de la pieza, motivo por el cual el secado puede ser más violento y con mayor temperatura. Es por ello que el porcentaje de humedad que lleva la pieza en el momento de la transferencia es muy importante saberlo, pues la pieza podría agrietarse en el secadero blanco. Esto aparte de una deformación natural debido a las chupas de transferencia actuando sobre la pasta aún lejos de su punto crítico de contracción y muy húmeda para ser manipulada.

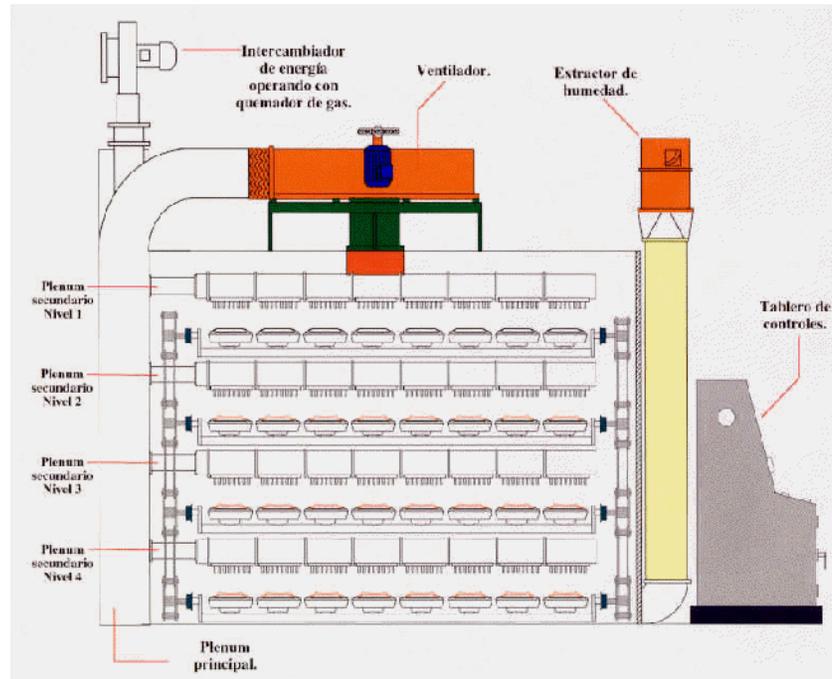
Figura 9. Proceso de secado



(Locería Colombiana, 2008)

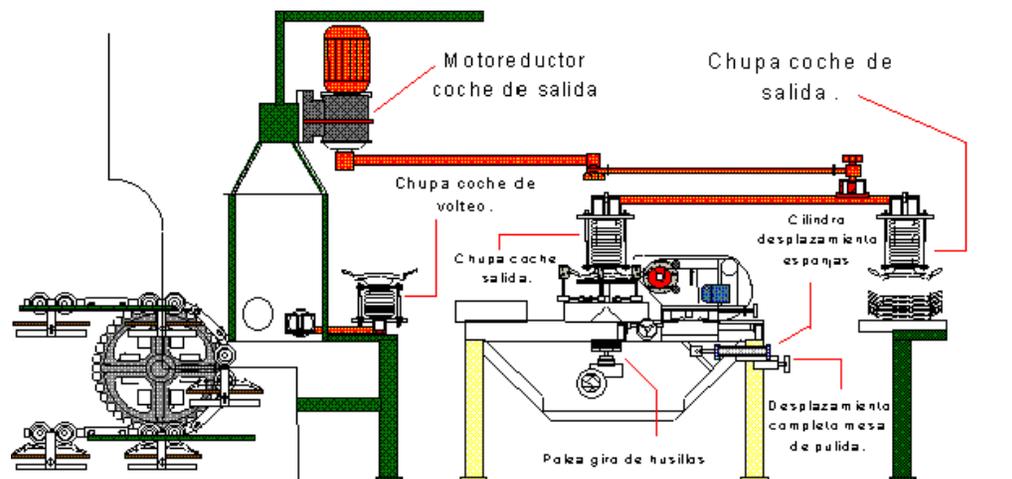
Luego de pasar por el secado cuero, la pieza con una humedad alrededor del 10% es desmoldada para posteriormente ser pulida y seguir con el resto del proceso. En la Figura 10 se muestra una imagen de la vista frontal del secadero cuero utilizado en Locería Colombiana y en la Figura 11 una vista lateral de la salida del secadero cuero (parte izquierda) y la posterior pulidora de platos.

Figura 10. Secadero cuero de platos



(Locería Colombiana, 2008)

Figura 11. Pulidora de secaderos Lippert de platos



(Locería Colombiana, 2008)

1.4 TRIBOLOGÍA

Cuando dos superficies de ingeniería están sometidas a esfuerzos de contacto aparecerá una distorsión en cada una de ellas. Estas deformaciones pueden ser elásticas, plásticas o una mezcla de ambas, las cuales pueden observarse a diferentes escalas: Macroscópica, a simple vista o con ayuda de comparadores y microscópica, como el número discreto de puntos de contacto que se deforman durante la aplicación del esfuerzo (Williams, 1994). Si además se inicia un deslizamiento relativo entre ellas aparece una resistencia al movimiento ofrecida por ambos cuerpos que es necesario vencer para continuar con el movimiento, esta resistencia es conocida como fricción. Los cuerpos pueden ser un gas y un sólido (fricción aerodinámica), un líquido y un sólido (fricción lubricada), entre un sólido y un sólido (fricción sólida) o debido a la disipación de energía interna dentro de un cuerpo (fricción interna) (Larsen-Basse, 2004). El principio que gobierna la fricción es la segunda ley de movimiento de Newton, donde $F = m \cdot a$, una fuerza es resultante de una masa acelerada. También se usa $F = \mu \cdot N$, una fuerza es resultante de una carga con un cierto coeficiente de fricción (Maldonado, 1998).

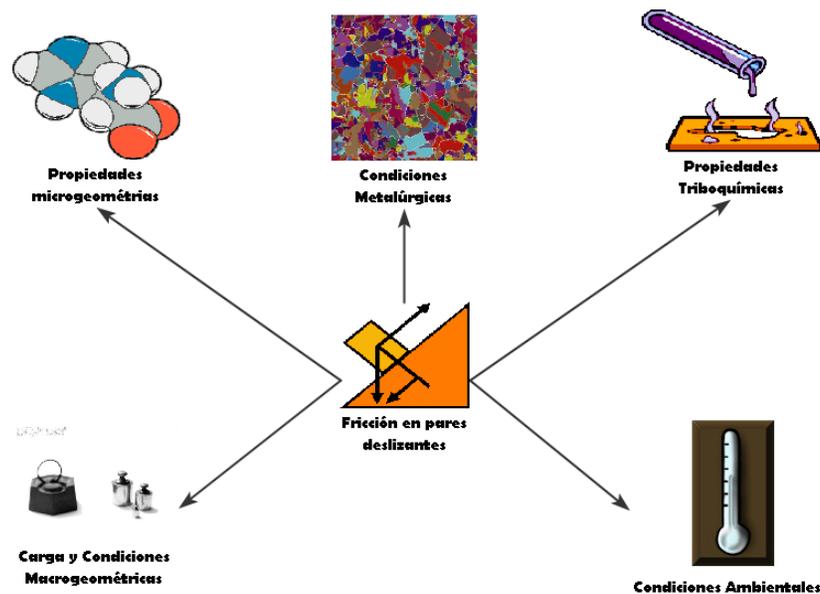
Considerando una masa estacionaria M que está en equilibrio (en reposo con velocidad cero v_0) sobre una superficie plana sólida S , existe una fuerza normal F que puede representar un sistema de fuerzas o el peso de la masa M (Rossouw, 2003).

Después de cierto tiempo de deslizamiento, el cual depende de la velocidad, temperatura, presión y rugosidad de las superficies y asociado al fenómeno de fricción, existe el daño de las superficies debido al desgaste. Para situaciones particulares de deslizamiento, la velocidad del desgaste depende de ciertas propiedades de los materiales de contacto, que se resumen en la Figura 12.

- Propiedades microgeométricas del par, relacionadas con la rugosidad y textura de las superficies.

- Propiedades macrogeométricas y cargas (esfuerzos) del par, relacionadas con la velocidad de deslizamiento, vibración, forma y dimensión de los sólidos.
- Propiedades triboquímicas, relacionadas con películas superficiales, su tipo y cantidad de átomos adsorbidos.
- Propiedades ambientales, relacionadas con el medio en el que se encuentra el sistema, temperatura y contaminación del mismo.

Figura 12. Propiedades determinantes del comportamiento de un tribosistema



(Zum Gahr, 1987)

El desgaste y la fricción no son causados sólo por un factor y dependiendo del autor existen diferentes tipos de mecanismos, los principales son:

- La adhesión se define como la unión en frío o en caliente de dos superficies sin que se elimine la intercara definida entre ambas. La tendencia a formar uniones adhesivas depende de las propiedades físicas y químicas de los materiales en contacto, el modo y el valor de la carga y las propiedades del contacto superficial como son la contaminación y la rugosidad (Zum Gahr, 1987).

- La abrasión consiste en el desplazamiento y la eliminación de material de la superficie de uno de los dos cuerpos que hacen parte del sistema tribológico, mediante acciones de surcado y microcorte básicamente. Este mecanismo es altamente eficiente para la remoción de material, e involucra la presencia de altas deformaciones plásticas en las regiones desgastadas o que han sufrido daño. La abrasión se presenta cuando existe una diferencia notoria entre las durezas de las superficies de los cuerpos en contacto, o cuando en la intercara de deslizamiento, existen partículas cuya dureza es por lo menos superior a la de una de las superficies en contacto.

La ecuación de Archard, la cual se observa en la Ecuación 7 es la mayor aproximación al desgaste abrasivo. La ecuación representa una relación lineal entre el desgaste y los parámetros de deslizamiento e involucra un factor de probabilidad que es determinado a partir de experimentación.

Ecuación 7. Ecuación de Archard

$$Q = \frac{K \cdot W}{H}$$

Donde: Q: Desgaste, K: Coeficiente de desgaste dimensional; W: Carga Total y H: Dureza por penetración.

Los cerámicos, los cuales son sólidos no metálicos inertes, han sido usados para propósitos tribológicos por décadas. Sin embargo, los estudios sobre tribología de cerámicos se centran en el estudio de cerámicos técnicos e investigaciones sobre materiales cerámicos tradicionales, como arcillas, son prácticamente inexistentes, especialmente en estado crudo.

2. MATERIALES Y EQUIPOS

En este capítulo se mostrarán los diferentes materiales utilizados en los ensayos que se llevaron a cabo durante el desarrollo del proyecto así como los equipos que se emplearon.

2.1 ESPUMAS

2.1.1 Espuma Corona. Esta espuma es producida en Stoke on Trent, Inglaterra, por una compañía experta en artículos para la industria de la cerámica. Es una espuma de color amarillento y suave al tacto, firme, muy resistente al desgaste y posee una gran absorción. A Locería Colombiana llega en diferentes presentaciones por las diferentes formas de pulido y las diversas referencias de platos y pocillos que se manejan, es así como se encuentran ruedas de 170 mm de diámetro exterior y 90 mm de grosor, cubos de 70 x 30 x 30 mm y láminas de 1 x 2 m de 40 mm de espesor.

Fotografía 1. Espuma Corona



La espuma observada en la Fotografía 1 corresponde a la rueda de 170mm de diámetro, utilizada para pulir platos a la salida de los secaderos.

2.1.2 Espuma PU Nacional. Se emplearon dos tipos de espumas de poliuretano en los ensayos, una nacional y otra importada. La primera es utilizada normalmente para la fabricación de muebles y colchones en la industria local y popularmente se le conoce como espuma *Croydon densidad 26*. Es una espuma de color rosado como se puede apreciar en la Fotografía 2.

Fotografía 2. Espuma de poliuretano nacional



2.1.3 Espuma PU Importada. La segunda espuma de poliuretano utilizada, presenta un aspecto muy diferente al de la nacional, el cual se asemeja mucho al de la Espuma Corona, por su color y textura como se muestra en la Fotografía 3.

Fotografía 3. Espuma de poliuretano importada



2.1.4 Espuma PE. La espuma de polietileno es otra de las espumas que se encuentran comúnmente en el mercado nacional, y generalmente es empleada en la industria del calzado (suelas), artículos acuáticos (flotadores) y láminas para asilamiento acústico y térmico. Se pueden conseguir en las diferentes peleterías de la ciudad y su presentación más común es en láminas de diferentes espesores, que son logrados por medio de la superposición de varias láminas pegadas entre sí. Esta espuma muestra una apariencia desigual a las anteriormente mencionadas presentando una rigidez considerablemente mayor y una textura no tan suave.

Fotografía 4. Espuma de polietileno



2.2 EQUIPOS

2.2.1 Balanza.

- Fabricante: METTLER TOLEDO.
- Referencia: XP6002SDR.
- Localización: Laboratorio de suelos. Universidad EAFIT.
- Uso: Ensayos de absorción y densidad.

2.2.2 Estereoscopio.

- Fabricante: CARL ZEISS.
- Referencia: Stemi DV4.
- Localización: Laboratorio de materiales. Universidad EAFIT.

- Uso: Ensayo de morfología.

2.2.3 Máquina Universal de Ensayos para plásticos.

- Fabricante: INSTRON.
- Referencia: 3366.
- Localización: Laboratorio de materiales. Universidad EAFIT.
- Uso: Ensayos de compresión.

2.2.4 Rugosímetro.

- Fabricante: MAHR PERTHEN.
- Referencia: 7912000.
- Localización: Laboratorio de metrología. Universidad EAFIT.
- Uso: Determinación de la rugosidad promedio del cerámico dado por las espumas después de ensayo *in situ*.

2.2.5 Espectrómetro Infrarrojo.

- Fabricante: NICOLET MAGNA.
- Referencia: Nicolet Magna System 550.
- Localización: Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC).
- Uso: Determinación y confirmación del material base de la espuma, evitando suposiciones en la investigación.

2.2.6 Secadero FSE03

- Fabricante: LIPPERT.
- Referencia: Secadero Lippert 3104.
- Localización: Planta Loza, Locería Colombiana, Grupo Corona.
- Uso: Pruebas piloto de pulido.

3. FABRICACIÓN DE LOS CUERPOS DE PRUEBA

Todos los cuerpos de prueba que se debieron fabricar para todas las pruebas fueron hechos en el laboratorio de Ingeniería de diseño de la universidad EAFIT, utilizando herramientas convencionales tales como sierras caladoras, sinfín, lijas, entre otras.

3.1 ENSAYOS DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN

El ensayo requiere de 4 probetas por tipo de espuma, siendo necesarias 2 para medir densidad y 2 para absorción, sin restricciones en las dimensiones de la misma. Las probetas se muestran en la Fotografía 5.

Tabla 5. Dimensiones de probeta para cada material

| Material | Dimensiones (mm) |
|--------------|------------------|
| PU Nacional | 30 x 30 x 70 |
| PE | 15 x 15 x 60 |
| Corona | 30 x 30 x 70 |
| PU Importado | 15 x 15 x 60 |

Fotografía 5. Probetas de ensayo de densidad y absorción



3.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN

Las probetas deben tener las caras superior e inferior paralelas entre sí y es esencial que los lados sean verticales. Es recomendable que tengan unas dimensiones de 50 x 50 mm con 25 mm de espesor aunque pueden tener otras dimensiones siempre y cuando el espesor no sea mayor al 75% de la dimensión mínima de la cara superior (ver Anexo 1). La norma ASTM D3574 – 03 especifica que deben ser 3 probetas por muestra y que el resultado ha reportar es el promedio de los 3 valores.

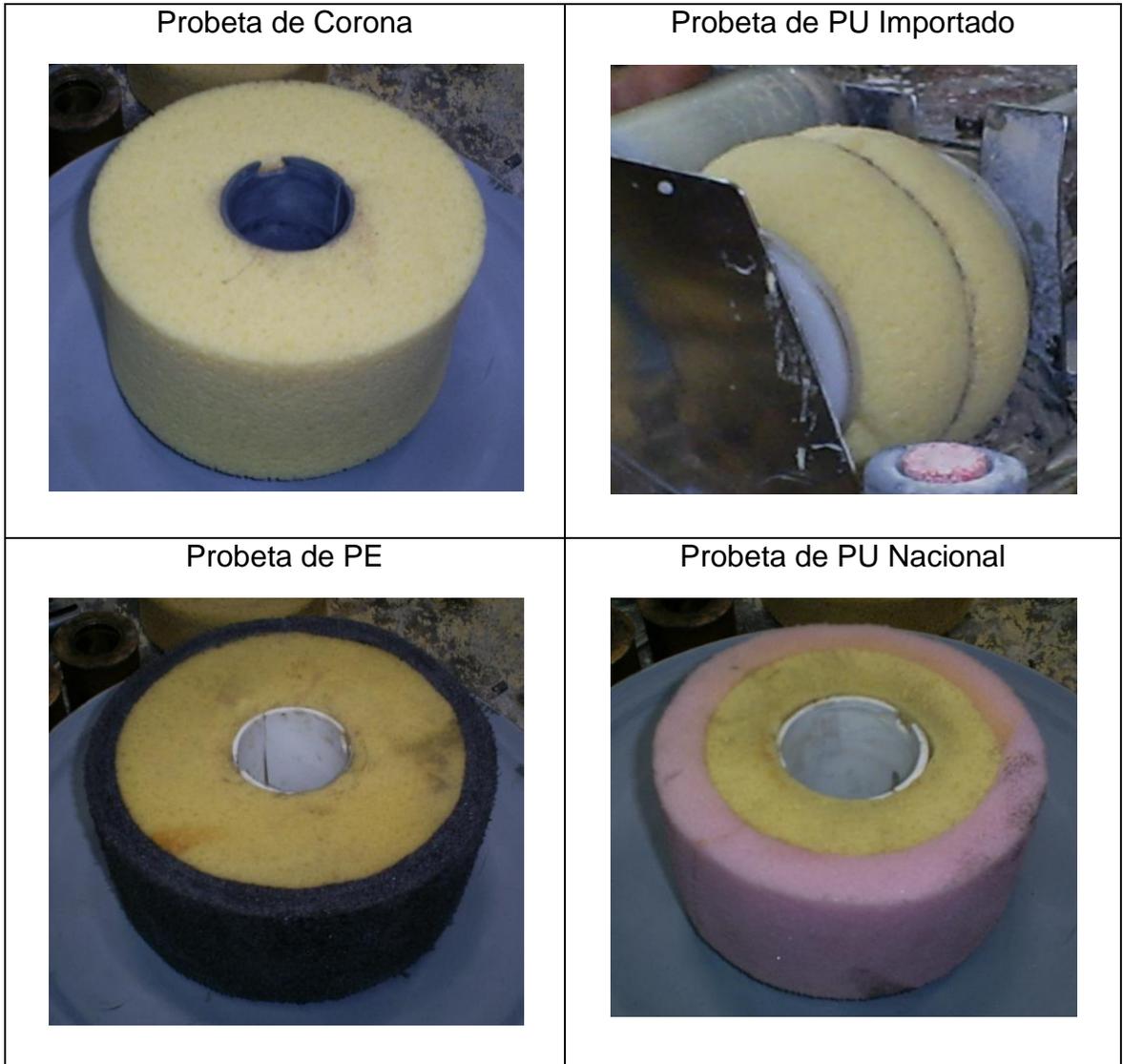
Fotografía 6. Probetas de ensayo de compresión



3.3 ENSAYOS DE DESGASTE Y ABRASIÓN IN SITU

Las espumas que se utilizan normalmente en Locería Colombiana para este proceso y en este tipo de máquina, son de una forma y unas dimensiones especificadas en el Anexo 2, pero debido a que no fue posible encontrar muestras de este tamaño y forma para los otros tres tipos de espuma, fue necesario acondicionarlas, pegando láminas de PU Nacional y de PE a dos Espumas Corona con las medidas estándar para que pudieran trabajar puliendo platos en esta máquina. Con la espuma de PU Importado, debido a su forma y tamaño disponible, se debió hacer un montaje diferente.

Figura 13. Probetas de ensayo de abrasión y desgaste



4. ENSAYOS

Durante este capítulo se mostrarán uno a uno todos los ensayos que se desarrollaron a lo largo de la ejecución del proyecto, con sus características, normas, protocolos.

4.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE ESPUMAS POR FTIR

El objeto de este ensayo es conocer el material base de las espumas por medio de la técnica instrumental Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), el cual se realizó en el Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC). Este ensayo se realizó para confirmar la naturaleza de la espuma con la que actualmente trabaja Corona, puesto que inicialmente se pensó que era una esponja marina (de origen natural) pero había sospechas que podría ser una espuma sintética. Además, se realizaron pruebas de PU importado para apreciar su similitud, ya que se sabía con certeza el material base de la espuma de PE así como el de la espuma de PU Nacional.

Tabla 6. Especificaciones del análisis por FTIR

| Condiciones de operación | |
|---|---|
| Fuente: | Infrarrojo |
| Frecuencia del Laser: | 15798.2 cm ⁻¹ |
| Detector: | DTGS KBr |
| Resolución: | 4 cm ⁻¹ |
| Ganancia de fondo: | Autogancia |
| Número de puntos para la transformada de Fourier: | 8192 |
| Rango de número de onda: | 500cm ⁻¹ - 400cm ⁻¹ |
| Forma final de la ordenada: | Absorbancia |
| Número de barridos: | 16 |

(ICIPC, 2008)

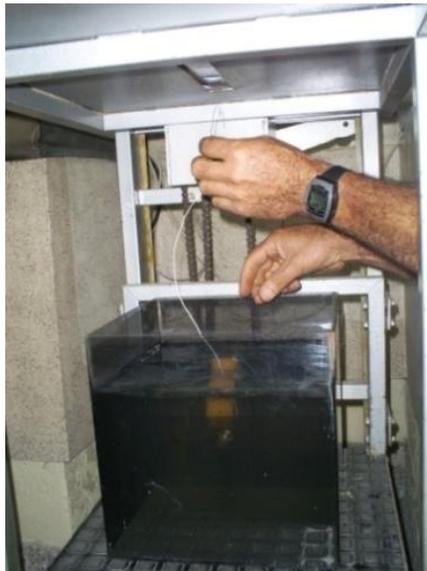
4.2 ENSAYO DE DENSIDAD

Este método es útil para calcular el porcentaje de vacíos de aire como se indica en las normas INVE – 736 o INVE -799 las cuales se basan en la norma ASTM D1188 – 96. El ensayo se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de suelos de la Universidad EAFIT bajo la supervisión del personal asignado.

El procedimiento para el ensayo de densidad consiste en:

- Pesarse las probetas en seco con una balanza.
- Recubrirlas con parafina previamente derretida, con el fin de evitar que el agua sea absorbida a la hora de sumergirlas.
- Una vez las probetas son pesadas y apropiadamente impermeabilizadas se procede a pesarlas de nuevo ahora con el peso extra de la parafina.
- Amarrar la probeta a un alambre con un lastre que cuelga de la balanza y se sumerge en un recipiente con agua como se muestra en la Fotografía 7.

Fotografía 7. Montaje del ensayo de densidad



Una vez se obtienen los datos luego de las diferentes mediciones, se aplica una ecuación sencilla que da como resultado la gravedad específica aparente que es equivalente a la densidad aparente de las diferentes probetas. La ecuación es como sigue:

Ecuación 8. Gravedad específica aparente.

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{D - E - \left(\frac{D - A}{F}\right)}$$

Donde:

A= Masa seca del espécimen en el aire, g,

D= Masa del espécimen seco más parafina de recubrimiento, g,

E= Masa del espécimen seco más parafina de recubrimiento en agua, g,

F= Gravedad específica de la parafina a $25^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

4.3 ENSAYO DE ABSORCIÓN

La absorción como se mencionó anteriormente, es una propiedad de vital importancia para el uso que se le da a las espumas en la industria de la cerámica, y por ende debe ser analizada y medida para poder caracterizar correctamente las diferentes espumas en cuestión. La Espuma Corona, en la aplicación, es una espuma con una muy buena absorción pero que a la vez evacua fácilmente el líquido absorbido permitiendo así ser lavada rápidamente.

Es un poco más sencillo de realizar pues consiste solamente en sumergir por completo las probetas por 24 horas (previamente pesadas), para luego hacer una serie de mediciones de peso que dan cuenta de las propiedades de absorción de los diferentes tipos de espuma analizados.

Fotografía 8. Ensayo de absorción



En la primera medición se pesa la probeta después de ser retirado el exceso de agua por gravedad, para determinar el total de agua que absorbió durante las 24 horas. Posterior a esto se escurre la espuma manualmente y se pesa de nuevo para saber cuánta agua evacua cuando es comprimida.

Fotografía 9. Escurrido de una probeta



4.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN

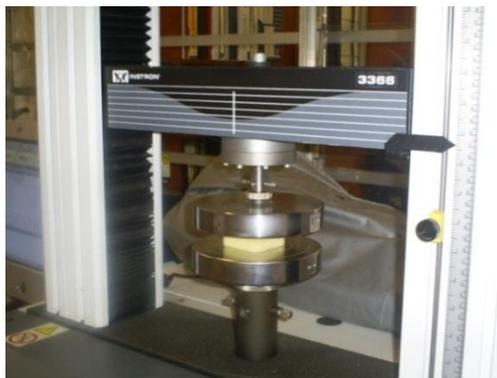
Las mediciones hechas en este ensayo permiten conocer propiedades muy importantes en las espumas como lo son la resistencia a la compresión y la recuperación que cada una de ellas posee. El ensayo se desarrolló en el

laboratorio de materiales de la universidad EAFIT con la ayuda de la asesora del proyecto, basándose en la norma ASTM D3574 – 03.

El ensayo consiste básicamente en medir la fuerza necesaria para producir una compresión del 50% sobre toda el área superior de la probeta, utilizando un sistema de ensayo de doble columna acondicionado con dos platinas para soportar las probetas de espuma.

La primera parte del ensayo se trata de comprimir la probeta dos veces entre el 75 y el 80% de su espesor original a una rata de 250 ± 25 mm/min para posteriormente dejarla descansar por un período de 6 ± 1 minutos. Pasado este tiempo se vuelve a comprimir la probeta pero esta vez al 50% de su espesor original y a una rata de 50 ± 5 mm/min y se determina la fuerza final después de 60 ± 3 segundos.

Fotografía 10. Ensayo de compresión



4.5 MORFOLOGÍA

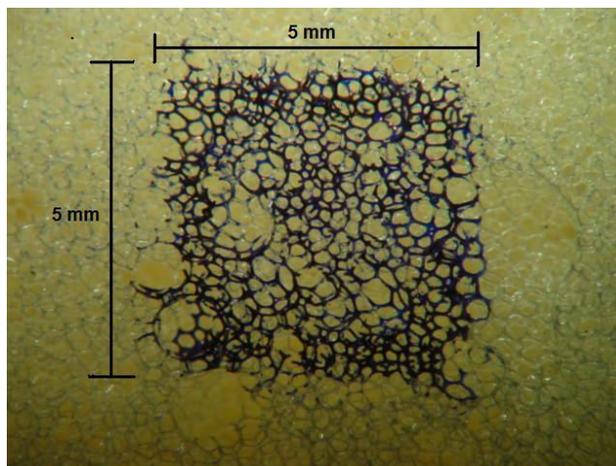
Este análisis consiste en observar dos características esenciales de las espumas: densidad de celda y tamaño de celda. De estas dos características se desprenden muchas de las propiedades que caracterizan a una espuma como la absorción, la

resistencia a la compresión, entre otras. Los análisis se hicieron en el laboratorio de materiales de la universidad EAFIT.

Para las dos mediciones, tanto densidad como tamaño de celda, se utilizó un microscopio acondicionado para tomar fotografías las cuales facilitaron las tareas de conteo y medición.

Se definió como estándar para medir las densidades de celda un área de 25 mm^2 , la cual fue trazada sobre la superficie de las muestras demarcando a su vez las celdas a contar, diferenciándolas de las celdas que se encontraban en otras capas inferiores y que podían alterar el resultado. Estas celdas demarcadas fueron contadas una a una hasta completar toda el área definida para así conocer la densidad de celda en celda/mm^2 de todas las muestras analizadas.

Fotografía 11. Demarcación del área estándar



La medición de celda utilizó prácticamente el mismo procedimiento utilizado en la densidad de celda, con la diferencia que no se necesitaba un área definida para medir el tamaño de una sola celda. Solamente se selecciona aleatoriamente una celda enfocándola lo mejor posible con el microscopio para luego superponer una reglilla con una escala determinada y así medir su tamaño.

4.6 ENSAYOS DE DESGASTE Y ABRASIÓN IN SITU

Estos ensayos fueron realizados en la planta de Locería Colombiana en la sección de formación de platos, donde se montaron las diferentes espumas acondicionadas a los parámetros de operación de las máquinas pulidoras. Fueron montados los 4 tipos de espuma en análisis incluyendo una Espuma Corona nueva que sirvió de patrón para comparar las otras tres. Se montó una espuma a la vez por recomendación del personal operativo con el fin de no afectar mucho la producción y la calidad de la obra.

El pulido que la espuma da a la obra es un factor crítico en el proceso de formado en Locería Colombiana, ya que superficies mal pulidas en un plato o en un pocillo pueden significar rupturas en los hornos y su posterior rechazo por parte de Calidad. Por consiguiente se debe poner especial atención a este aspecto ya que también es determinante para escoger una espuma.

Fotografía 12. Montaje del ensayo de abrasión y desgaste



4.6.1 Medición de rugosidad. El acabado en los platos que dieron las espumas de prueba, se midió en el laboratorio de metrología de la universidad EAFIT con un rugosímetro que muestra las diferentes calidades en los diferentes pulidos. Se llevaron muestras de platos crudos pulidos con las diferentes espumas y allí se les midió la rugosidad.

5. RESULTADOS

5.1 LISTADO DE PROVEEDORES

Se seleccionó aleatoriamente una serie de proveedores tanto locales como nacionales, que fabricaran diferentes tipos de espuma que sirvieran para los ensayos y además para conocer un poco el mercado nacional de espumas y así saber si existe alguna empresa que produzca una espuma con las características de la Espuma Corona.

Tabla 7. Listado de proveedores

| Proveedor | Espumas disponibles | Ciudad | Teléfono |
|-----------------------------|---------------------|-------------|----------|
| Espumas Medellín | PU | Medellín | 2815981 |
| Espumas Plásticas S.A. | PU | Medellín | 3606666 |
| Polyder Ltda. | PU | Medellín | 2763776 |
| Seki de Colombia | PU | Medellín | 3014060 |
| Flexo | PU | Medellín | 4414668 |
| Metroespumas | PU | Medellín | 2321690 |
| Internacional de espumas | PU | Medellín | 2323178 |
| Plastitelas | PU | Medellín | 5118080 |
| Plastitodo | PE-LD y PVC | Medellín | 5123468 |
| Gransori | PU, PVC, PE- LD | Bogotá | 6601534 |
| Espumas Sta. fe de Bogotá | PU | Bogotá | 6094545 |
| Espumas de la sabana | PU | Bogotá | 2672057 |
| Espumas Santander | PU | Bucaramanga | 6802063 |
| Solveco S.A. | PU | Bogotá | 4156055 |
| Espumas de Polietileno S.A. | PE | Cali | 4471077 |
| Polylon S.A. | PE | Cali | 3339991 |
| Espumados S.A. | PU | Soacha | 4157087 |

Como se puede observar en la tabla anterior, la espuma de PU es la más común y la que más fácilmente se puede conseguir, mientras que las espumas de otros

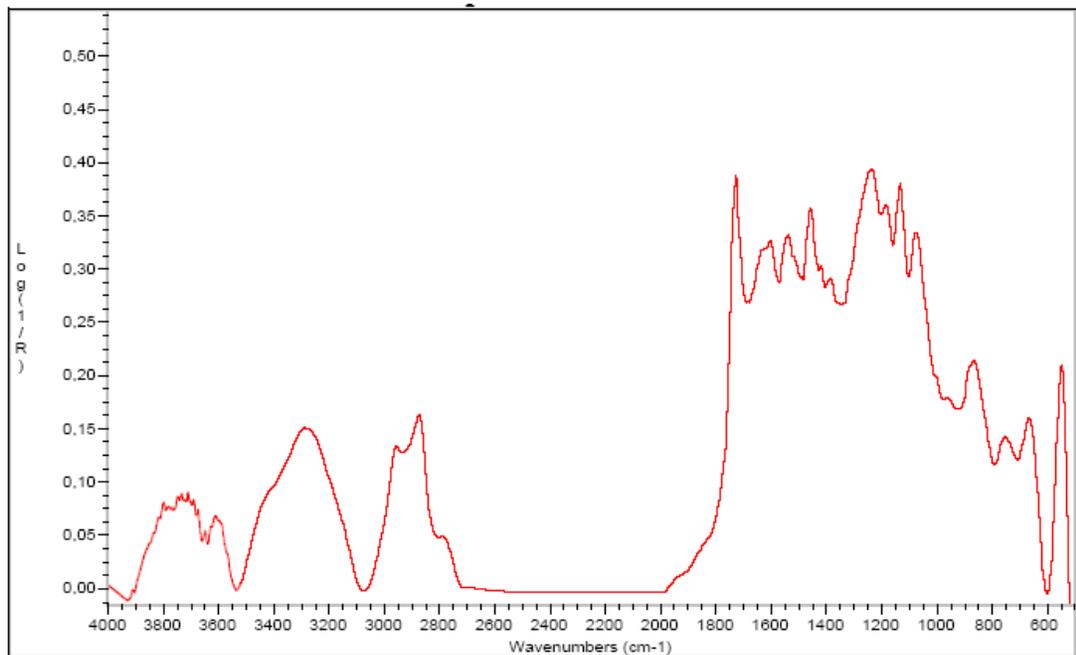
materiales como las de PE y PVC son escasas y pocas empresas las producen tanto a nivel local como nacional.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos de los diferentes ensayos explicados en el capítulo anterior, por medio de tablas, gráficas y valores.

5.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA POR FTIR

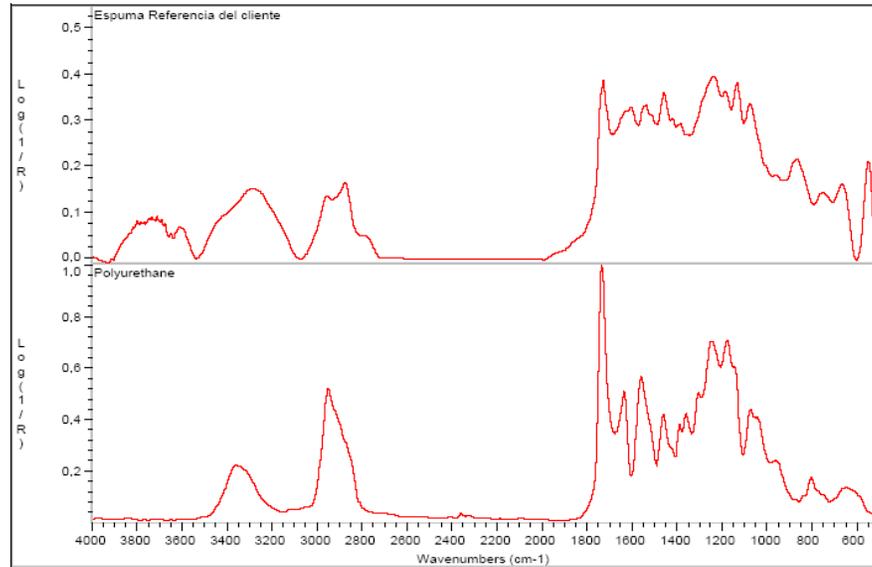
5.2.1 Espuma Corona. En el espectro infrarrojo FTIR del pirolizado de esta espuma, en la Figura 14 se puede observar la presencia de absorbancias a números de onda, entre otras, 3400cm^{-1} , 2925cm^{-1} , 2860cm^{-1} , 1710 cm^{-1} y 1238 cm^{-1} . Al realizar la comparación del espectro infrarrojo FTIR de la muestra, Figura 15, con la biblioteca de espectros del ICIPC se encontró buena correlación con un material polimérico de Poliuretano.

Figura 14. Espectro FTIR de la Espuma Corona



(ICIPC, 2008)

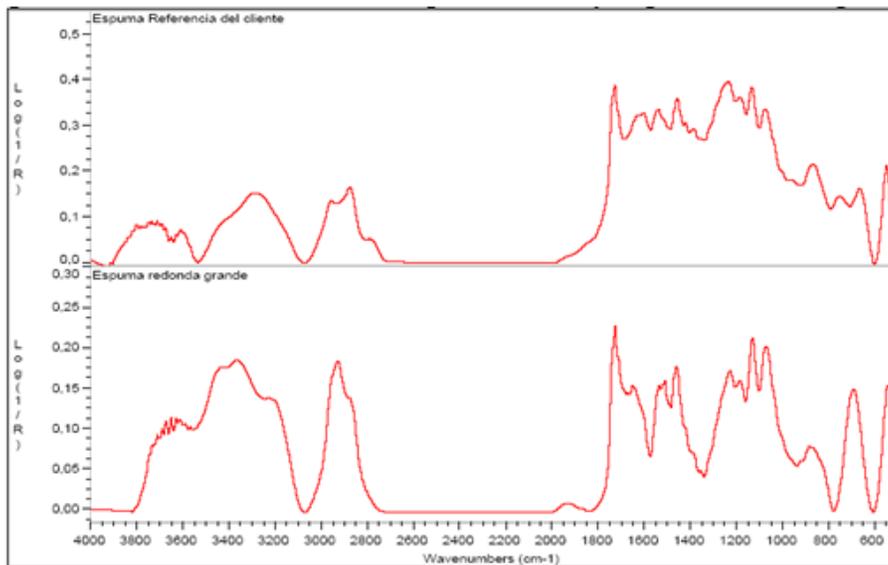
Figura 15. Comparación con biblioteca de espectros FTIR del ICIPC



(ICIPC, 2008)

5.2.2 Espuma PU Importada. El espectro FTIR del pirolizado de esta espuma es muy similar a la Espuma Corona, Figura 16. Ambos espectros FTIR presentan absorbancias comunes, especialmente a números de onda 3270 cm^{-1} , 1734 cm^{-1} , 1530 cm^{-1} , 1466 cm^{-1} , 1236 cm^{-1} , 1235 cm^{-1} , 1191 cm^{-1} , 1140 cm^{-1} y 1076 cm^{-1} .

Figura 16. Espectros FTIR Espuma Corona y Espuma PU Importada



En la Figura 15 se aprecia el espectro FTIR de la Espuma Corona comparada con un poliuretano 100% sólido extraído de la base de datos del software del espectrógrafo, en los cuales se observa gran similitud. Los picos de mayor intensidad identifican diferentes enlaces, los cuales se encuentran en grandes proporciones en la estructura molecular del material. Entre 3000 y 3400 se muestran la vibración de los enlaces simples de nitrógeno característicos del poliuretano, vibraciones de tensión del C-H perteneciente al anillo aromático residual de isocianato sin reaccionar, además de las vibraciones residuales de los grupos epóxidos característicos del poliol sin reaccionar. Entre 2800 y 3000, el pico corresponde a la tensión del enlace C-H alifático, la tensión simétrica NCO. Los últimos picos de espectro corresponden a cantidades de cloro y flúor del agente espumante e isocianato que no reaccionaron durante la formación de la espuma. Por ejemplo, si durante la generación de la espuma, la reacción entre el isocianato, el poliol y el agente espumante no hubiera sido efectiva se identificarían claramente en el área de 2400, picos de alta intensidad correspondientes a los enlaces $N = H$ presentes en el isocianato sin procesar, esto puede considerarse además una forma de control de calidad de las espumas producidas. Vale aclarar que las diferencias entre los dos espectros radican en la presencia del agente espumante en la estructura y posibles aditivos para mejorar propiedades mecánicas y/o procesamiento.

5.3 ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN

En este ensayo se obtuvieron una serie de datos como: peso, densidades y volúmenes de dos probetas por material, para luego calcular la densidad aparente promedio de cada material y compararlas entre sí.

Tabla 8. Datos y resultados del ensayo de densidad

| Material | PU Nacional | | Polietileno | | PU Importado | | Corona | |
|---|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Probeta N° | | | | | | | | |
| Peso en el aire (g) | 1.700 | 1.660 | 0.480 | 0.430 | 0.700 | 0.740 | 2.220 | 2.170 |
| Peso con parafina en el aire (g) | 19.680 | 8.900 | 8.140 | 7.020 | 21.840 | 20.710 | 26.520 | 28.860 |
| Peso parafina (g) | 17.980 | 7.240 | 7.660 | 6.590 | 21.140 | 19.970 | 24.300 | 26.690 |
| Densidad parafina (g/cm ³) | 0.924 | 0.924 | 0.924 | 0.924 | 0.924 | 0.924 | 0.924 | 0.924 |
| Volumen parafina (cm ³) | 19.467 | 7.839 | 8.294 | 7.135 | 22.889 | 21.622 | 26.310 | 28.898 |
| Peso con parafina en el agua (g) | 48.830 | 52.560 | 23.430 | 21.590 | 9.860 | 10.040 | 42.380 | 44.940 |
| Volumen con parafina (cm ³) | 68.510 | 61.460 | 31.570 | 28.610 | 31.700 | 30.750 | 68.900 | 73.800 |
| Volumen (cm ³) | 49.043 | 53.621 | 23.276 | 21.475 | 8.811 | 9.128 | 42.590 | 44.902 |
| Densidad aparente (g/cm ³) | 0.035 | 0.031 | 0.021 | 0.020 | 0.079 | 0.081 | 0.052 | 0.048 |
| Promedio (g/cm³) | 0.033 | | 0.020 | | 0.080 | | 0.050 | |

Tabla 9. Datos y resultados del ensayo de absorción

| Material | PU Nacional | | Polietileno | | PU Importado | | Corona | |
|--|-------------|---------|-------------|--------|--------------|---------|----------|---------|
| | 3 | 4 | 3 | 4 | 1' | 2' | 1 | 2 |
| Muestra N° | | | | | | | | |
| Peso seco (g) | 1.67 | 1.74 | 0.37 | 0.35 | 1.78 | 1.79 | 16.74 | 16.75 |
| Peso con agua total (g) | 58.4 | 60.36 | 3.71 | 3.55 | 53.46 | 56.1 | 423.24 | 431.13 |
| Peso escurrido por gravedad (g) | 28.84 | 21.05 | 2.85 | 2.88 | 38.85 | 43.78 | 155.58 | 150.4 |
| Peso escurrido manualmente (g) | 4.95 | 4.32 | 0.74 | 0.81 | 4.31 | 4.97 | | |
| Absorción total (%) | 3397.01 | 3368.97 | 902.70 | 914.29 | 2903.37 | 3034.08 | 2428.32 | 2473.91 |
| Absorción escurrido gravedad (%) | 1626.95 | 1109.77 | 670.27 | 722.86 | 2082.58 | 2345.81 | 829.39 | 797.91 |
| Absorción escurrido manualmente (%) | 196.41 | 148.28 | 100.00 | 131.43 | 142.13 | 177.65 | | |
| Drenaje escurrido gravedad (%) | 50.62 | 65.13 | 23.18 | 18.87 | 27.33 | 21.96 | 63.24 | 65.11 |
| Drenaje escurrido manualmente (%) | 91.52 | 92.84 | 80.05 | 77.18 | 91.94 | 91.14 | | |
| Promedio absorción total (%) | 3382.986 | | 908.494 | | 2968.724 | | 2451.113 | |
| Promedio absorción escurrido gravedad (%) | 1368.358 | | 696.564 | | 2214.197 | | 813.651 | |
| Promedio absorción escurrido manualmente (%) | 172.342 | | 115.714 | | 159.894 | | 0.000 | |
| Promedio Drenaje escurrido gravedad (%) | 57.87 | | 21.03 | | 24.64 | | 64.18 | |
| Promedio Drenaje escurrido manualmente (%) | 92.18 | | 78.62 | | 91.54 | | | |

5.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN

El software de la máquina universal de ensayos para plásticos arrojó una serie de datos de un determinado número de puntos que consistían en una deformación y una fuerza, con los cuales se calculó la deformación unitaria de la muestra y el esfuerzo aplicado.

Figura 17. Comparación ensayo de compresión al 80%

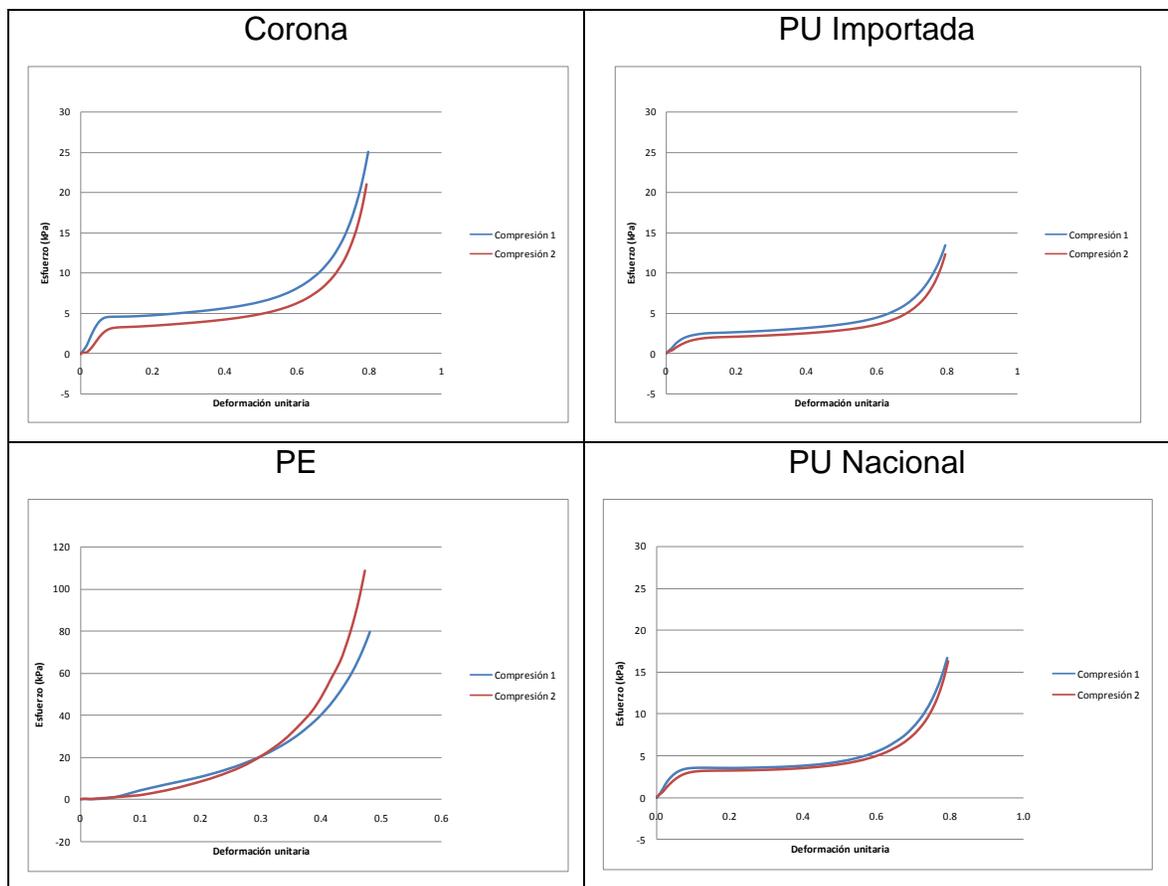
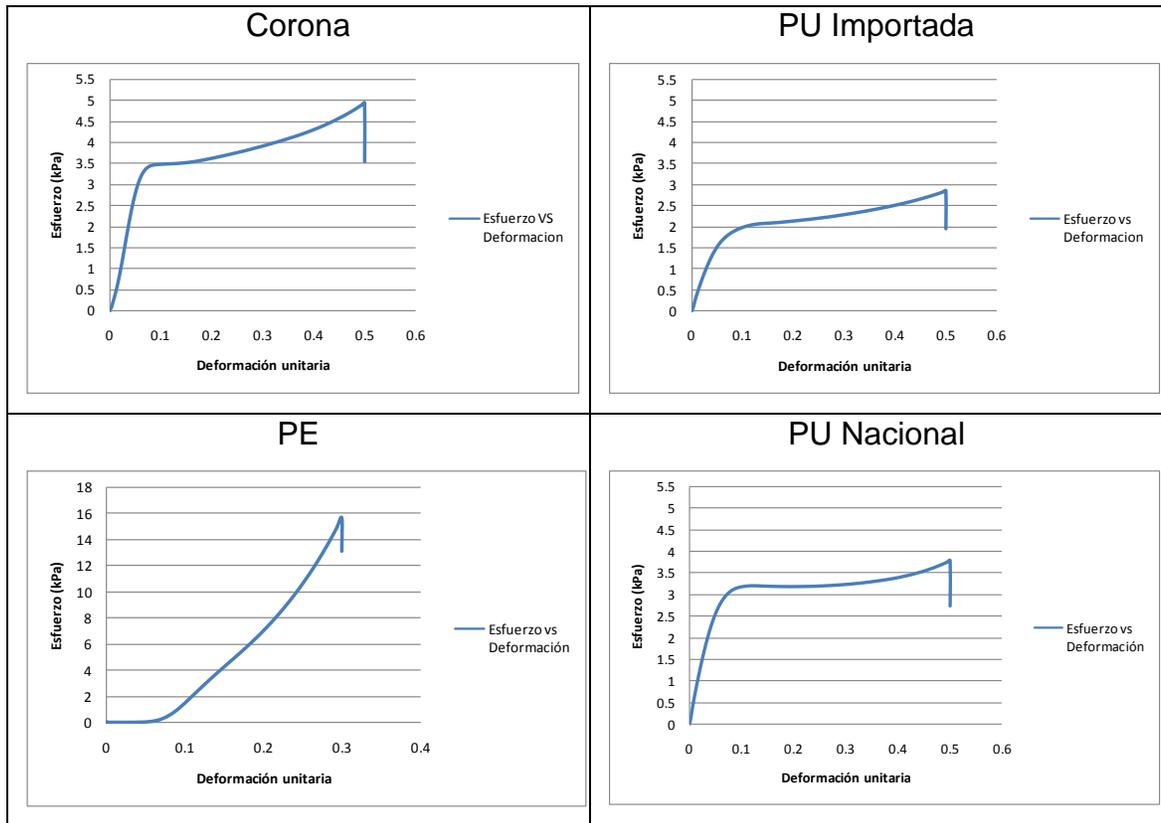


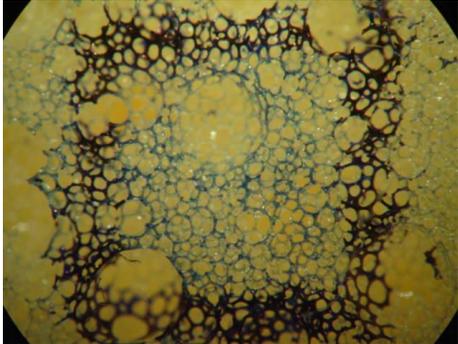
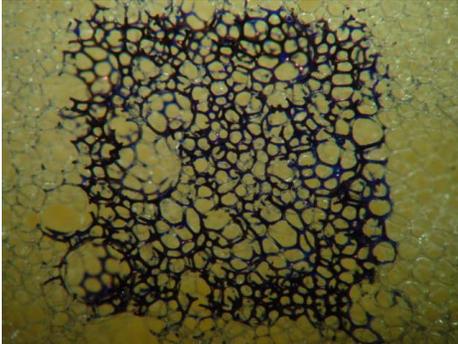
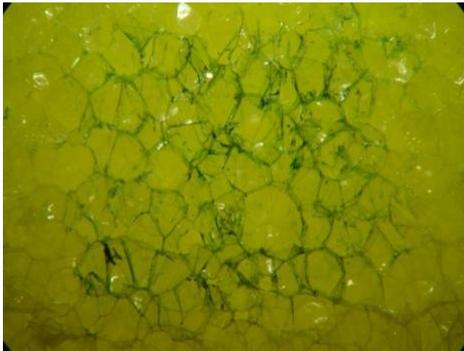
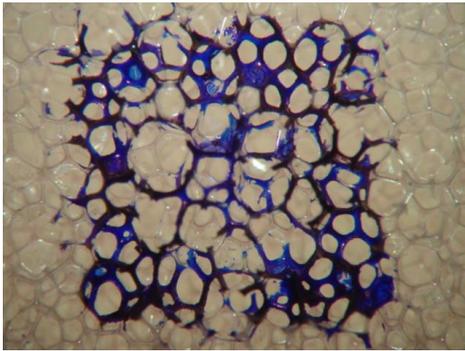
Figura 18. Comparación ensayo de compresión al 50%



5.5 MORFOLOGÍA

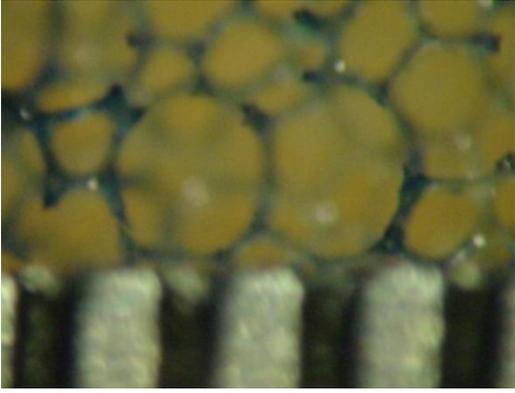
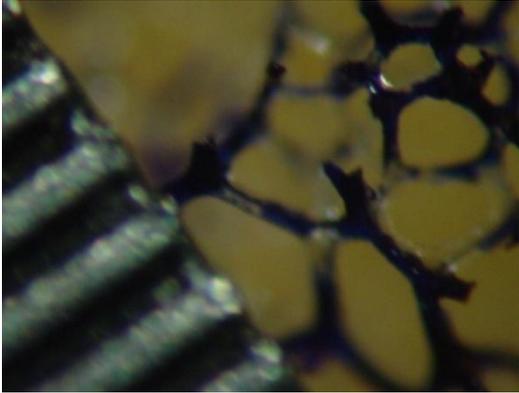
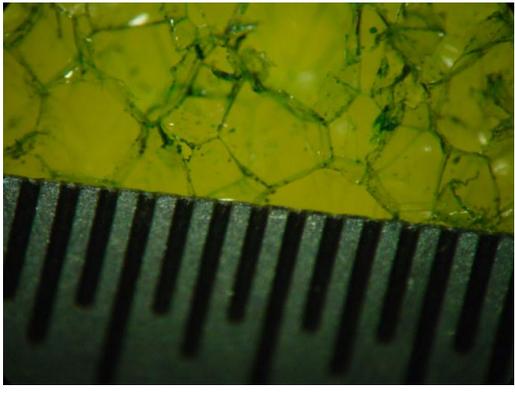
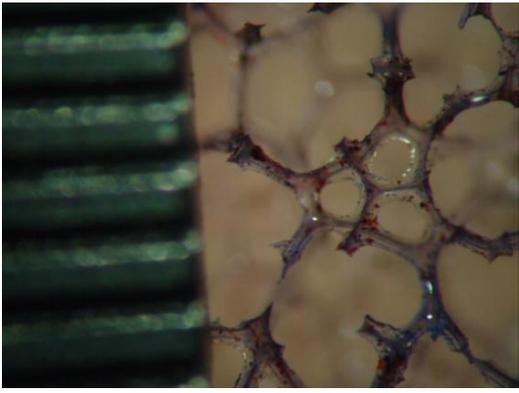
5.5.1 Densidad de celda. Se mostrarán los resultados que se obtuvieron después de contar las celdas en las áreas estándar de las 4 muestras analizadas así como las fotografías utilizadas para tal fin.

Tabla 10. Resultados del ensayo de densidad de celda

| | |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">Corona</p>  | <p style="text-align: center;">PU Importada</p>  |
| <p style="text-align: center;">336 celdas en 25 mm² Densidad de celda: 13.44 celdas/mm²</p> | <p style="text-align: center;">305 celdas en 25 mm² Densidad de celda: 12.2 celdas/mm²</p> |
| <p style="text-align: center;">PE</p>  | <p style="text-align: center;">PU Nacional</p>  |
| <p style="text-align: center;">164 celdas en 25 mm² Densidad de celda: 6.56 celdas/mm²</p> | <p style="text-align: center;">99 celdas en 25 mm² Densidad de celda: 3.96 celdas/mm²</p> |

5.5.2 Tamaño de celda. Se muestra el promedio del tamaño de las celdas de las 4 espumas en estudio. Se midieron varias celdas de una misma muestra aleatoriamente, evadiendo los poros muy grandes (en especial en la Espuma Corona y en la de PU Importado), para luego sacar un promedio. Se utilizaron varias escalas en la medición, ya que habían muestras con celdas muy pequeñas que requerían mayor precisión y otras con celdas más grandes que no.

Tabla 11. Resultados del ensayo de medición de celda

| | |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">Corona</p>  | <p style="text-align: center;">PU Importada</p>  |
| <p>Tamaño promedio de celda: 0.25 mm.</p> | <p>Tamaño promedio de celda: 0.51 mm.</p> |
| <p style="text-align: center;">PE</p>  | <p style="text-align: center;">PU Nacional</p>  |
| <p>Tamaño promedio de celda: 1.39 mm.</p> | <p>Tamaño promedio de celda: 0.99 mm.</p> |

5.6 ENSAYOS DE DESGASTE Y ABRASIÓN

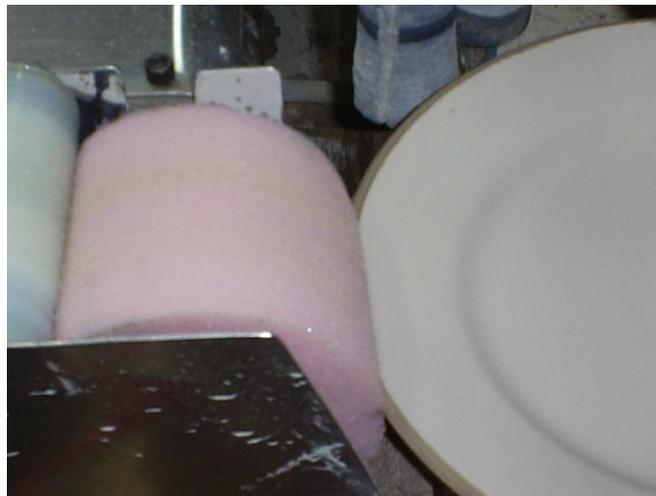
5.6.1 Desgaste. Los resultados de estos ensayos en gran parte son resultados cualitativos apoyados en la experiencia del personal operativo de la planta y en la observación detallada que se tuvo durante el desarrollo del proceso.

Las espumas de PU nacional y PE fueron montadas en la misma máquina pulidora, pero por cuestiones de tamaño, la espuma de PU importada debió ser

montada en otra máquina que también pule platos pero acepta un mayor rango de tamaños en las espumas. La espuma de PU nacional trabajó 2 horas con un total de 18 minutos en paros lo que equivale a un trabajo sin parar de 1 hora y 42 minutos, y que a una velocidad de 3 platos pulidos por minuto, suma 306 platos pulidos. La espuma de PE solo alcanzó a pulir un plato debido a que por su poca capacidad de absorción, rechazaba toda el agua de enjuague salpicando todo a su alrededor y obligando a la suspensión de la prueba. Con respecto a la espuma de PU importada, esta trabajó más tiempo ya que mostró un comportamiento muy bueno, alcanzando a pulir durante 6 horas, lo que a una velocidad de aproximadamente 2.4 platos/minuto, equivale a 864 platos pulidos.

El desgaste de las espumas se observó mientras estas hacían su trabajo, y no fue necesario esperar mucho tiempo para sacar conclusiones acerca de cómo trabajaban y de cómo se desgastaban gracias a la vasta experiencia del personal de planta que estuvo presente durante el proceso. También salieron a relucir otras propiedades (o la falta de ellas) con el paso de los minutos, cada vez que el operario de la máquina rechazaba un plato por defectos en la pulida.

Fotografía 13. Espuma de PU Nacional puliendo



5.6.1.1 Espuma de PU Nacional. La espuma se comportó aparentemente bien, pero presentó una serie de fallas que influyen enormemente en la calidad de la obra:

- Esta espuma se despedaza fácilmente cuando entra en contacto con la cerámica, arrojando pedazos de espuma a la obra que luego significarán defectos de calidad.

Fotografía 14. Pedazo desprendido de espuma PU Nacional



- Cuando se encuentra puliendo, la espuma es mojada y escurrida para así soltar el barro resultante de pulir la obra, pero aparentemente por su gran capacidad de absorción y no tan alta capacidad de drenaje, esta retiene el agua ocasionando que la obra se empantane.

5.6.1.2 Espuma de PE. El ensayo debió suspenderse inmediatamente porque al recibir agua y girar, inmediatamente la repelía ensuciando todo a su alrededor. Aparte de esto las capas que forman la espuma se despegaron unas de otras dando a entender que no resiste en lo más mínimo el esfuerzo a la que es sometida por esta máquina.

Fotografía 15. Espuma de PE dañada



5.6.1.3 Espuma de PU importada. Esta espuma fue la que mejor se comportó de todas, mostrando una resistencia al desgaste muy buena y puliendo los platos como si fuera una Espuma Corona. No arrojó pedazos de espuma a la obra como lo hizo la de PU Nacional y además demostró ser una espuma que se deja limpiar fácilmente y que no empantana la obra.

5.6.2 Medición de rugosidad. En la Tabla 12 se muestran los datos arrojados en las mediciones de rugosidad de las muestras llevadas al laboratorio de metrología. Se hicieron varias mediciones de una misma muestra para sacar un valor promedio y una desviación estándar. Se utilizó el parámetro de rugosidad promedio por ser el más usado, sin embargo, para una investigación exhaustiva del tribosistema se recomienda como mínimo la medición de tres parámetros de rugosidad. La rugosidad obtenida en los platos depende mucho del contacto que la espuma tenga con el plato, y este es regulado por los operarios de la máquina, quienes lo hacen sin algún procedimiento estandarizado, por lo tanto los valores de rugosidad pueden variar de un plato a otro.

Tabla 12. Datos de rugosidad de platos pulidos

| Material | Corona | | | | PU | | PU Importado | |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| N° muestra Medición | 1 Ra(μm) | 2 Ra(μm) | 3 Ra(μm) | 4 Ra(μm) | 1 Ra(μm) | 2 Ra(μm) | 1 Ra(μm) | 2 Ra(μm) |
| 1 | 4.1 | 6.6 | 4.4 | 5.3 | 4.3 | 5.7 | 3.4 | 3.6 |
| 2 | 4.2 | 5.2 | 4.5 | 5.5 | 3.2 | 3.8 | 3.2 | 3.1 |
| 3 | 4.1 | 5.8 | 5.2 | 5.4 | 2.7 | 3.7 | 4.3 | 2.8 |
| 4 | 4.3 | | 4.2 | 4.8 | 3.3 | 4.7 | 3.5 | 2.5 |
| 5 | | | 4.5 | 5.3 | 3.4 | 4.5 | 2.6 | 3.8 |
| 6 | | | 4.3 | 4.8 | 2.4 | 4.2 | 3.1 | 4.1 |
| 7 | | | 4.5 | | 3.6 | 3.1 | 3.0 | 4.2 |
| 8 | | | | | 3.6 | 4.2 | 3.6 | 3.4 |
| Promedio | 4.175 | 5.86 | 4.51 | 5.18 | 3.312 | 4.23 | 3.337 | 3.5 |
| Desviación Estándar | 0.191 | 1.4 | 0.64 | 0.612 | 1.163 | 0.001 | 1.002 | 1.25 |

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se confrontarán los resultados obtenidos en el capítulo anterior, para así poder analizar lo que estos datos quieren decir con respecto a las propiedades de las espumas para finalmente decidir qué espuma es la que más se aproxima a la usada en Corona.

6.1 PROPIEDADES DE LA ESPUMA ACTUAL

Tabla 13. Propiedades de la Espuma Corona

| Propiedad | | Resultado |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Densidad aparente | | 0.050 g/cm ³ |
| Absorción | Absorción total | 2451.113 % |
| | Absorción escurrido gravedad | 813.651 % |
| | Drenaje escurrido gravedad | 64.18 % |
| Módulo de elasticidad | | 46.15 kPa |
| Recuperación elástica | | 1.4 kPa |
| Densidad de celda | | 13.44 celdas/mm ² |
| Tamaño de celda promedio | | 0.25 mm |
| Rugosidad obtenida en el plato | | 4.93 μm |
| Resistencia al desgaste | | Buena |

Estas condiciones se considerarán como ideales para esta aplicación.

6.2 PROPIEDADES DE LAS ESPUMAS ALTERNATIVAS

A continuación se presentan los resultados de las propiedades de las espumas alternativas para el proceso de pulido.

6.2.1 PU Nacional

Tabla 14. Propiedades de la espuma PU Nacional

| Propiedad | | Resultado |
|-------------------|---------------------|-------------------------|
| Densidad aparente | | 0.033 g/cm ³ |
| Absorción | Absorción total | 3382.986 % |
| | Absorción escurrido | 1368.358 % |

Tabla 14. (Continuación)

| | | |
|--|--------------------------------|--------------------|
| | Absorción escurrido manual/ | 172.342 % |
| | Drenaje escurrido gravedad | 57.87 % |
| | Drenaje escurrido manual/ | 92.18 % |
| | Módulo de elasticidad | 65.34 kPa |
| | Recuperación elástica | 1.05 kPa |
| | Densidad de celda | 3.96 |
| | Tamaño de celda | 0.99 mm |
| | Rugosidad obtenida en el plato | 3.77 μm |
| | Resistencia al desgaste | Regular |

6.2.2 PE

Tabla 15. Propiedades de la espuma PE

| Propiedad | | Resultado |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Densidad aparente | | 0.020 g/cm ³ |
| Absorción | Absorción total | 908.494 % |
| | Absorción escurrido | 696.564 % |
| | Absorción escurrido manual/ | 115.714 % |
| | Drenaje escurrido gravedad | 21.03 % |
| | Drenaje escurrido manual/ | 78.62 % |
| Módulo de elasticidad | | N/A |
| Recuperación elástica | | N/A |
| Densidad de celda | | 6.56 celdas/mm ² |
| Tamaño de celda | | 1.39 mm |
| Rugosidad obtenida en el plato | | N/A |
| Resistencia al desgaste | | Mala |

6.2.3 PU Importada

Tabla 16. Propiedades de la espuma PU Importada

| Propiedad | | Resultado |
|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Densidad aparente | | 0.080 g/cm ³ |
| Absorción | Absorción total | 2968.724 % |
| | Absorción escurrido | 2214.197 % |
| | Absorción escurrido manual/ | 159.894 % |
| | Drenaje escurrido gravedad | 24.64 % |
| | Drenaje escurrido manual/ | 91.54 % |
| Módulo de elasticidad | | 36.32 kPa |

Tabla 16. (Continuación)

| | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Recuperación elástica | 1.95 kPa |
| Densidad de celda | 12.2 celdas/mm ² |
| Tamaño de celda | 0.51 mm |
| Rugosidad obtenida en el plato | 3.42 μm |
| Resistencia al desgaste | Buena |

6.3 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES

6.3.1 Ponderación. Para seleccionar las propiedades más influyentes a la hora de escoger una espuma que cumpliera las condiciones óptimas para el proceso de pulido, se siguió un procedimiento que las ordenó según la importancia que cada una tenía para las personas que participaron en este procedimiento calificativo: los integrantes del proyecto, la asesora y un ingeniero de Corona. A cada persona se le entregó un formato como el que se observa en la Tabla 17, donde cada número representa una propiedad específica, en este caso fueron 8.

Tabla 17. Formato de ponderación

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 1 2 | | | | | | | |
| 1 3 | 2 3 | | | | | | |
| 1 4 | 2 4 | 3 4 | | | | | |
| 1 5 | 2 5 | 3 5 | 4 5 | | | | |
| 1 6 | 2 6 | 3 6 | 4 6 | 5 6 | | | |
| 1 7 | 2 7 | 3 7 | 4 7 | 5 7 | 6 7 | | |
| 1 8 | 2 8 | 3 8 | 4 8 | 5 8 | 6 8 | 7 8 | |

(Senge, 2004)

Donde,

1. Absorción escurrido por gravedad
2. Densidad aparente
3. Módulo de elasticidad

4. Recuperación
5. Densidad de celda
6. Tamaño de celda
7. Desgaste
8. Abrasión

Cada persona se encargó de escoger bajo su propio criterio, una sola propiedad de cada pareja encerrada en cada celda de la tabla, seleccionando así las propiedades más importantes luego de pasar por un proceso de comparación de cada propiedad con todas las demás. La Calificación corresponde a la suma del número de veces que cada propiedad apareció en las tablas de cada calificador. En la Tabla 18 se presenta la clasificación de las propiedades con sus respectivas calificaciones y porcentajes (Importancia o relevancia). Estos porcentajes fueron dados de acuerdo a la metodología del libro La Quinta Disciplina (Senge, 2004).

Tabla 18. Ponderación de propiedades

| Propiedad | Calificación | Porcentaje | Clasificación |
|-----------------------|--------------|------------|---------------|
| Absorción | 16 | 14 | 4 |
| Densidad aparente | 9 | 8 | 6 |
| Módulo de elasticidad | 12 | 11 | 5 |
| Recuperación | 19 | 17 | 3 |
| Densidad de celda | 4 | 4 | 7 |
| Tamaño de celda | 1 | 1 | 8 |
| Desgaste | 25 | 22 | 2 |
| Abrasión | 26 | 23 | 1 |

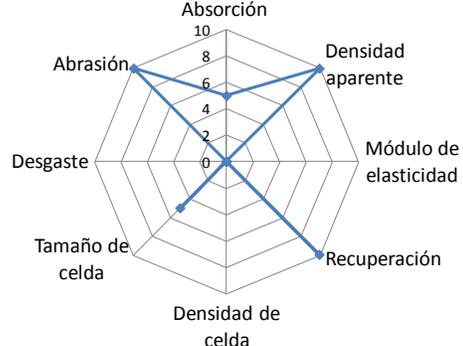
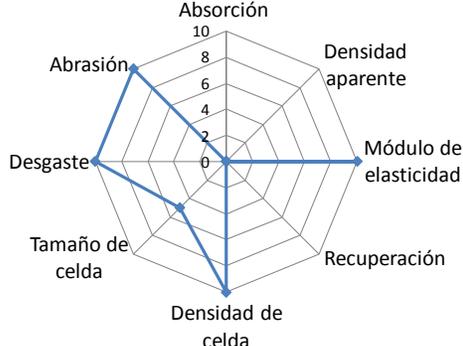
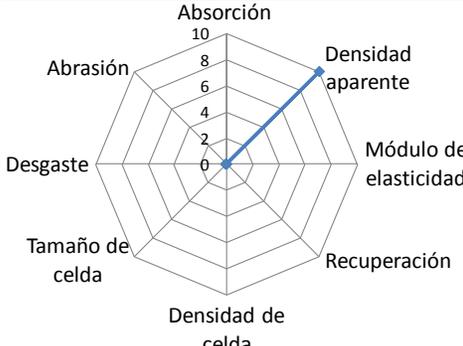
6.3.2 Parámetros de calificación. Cada propiedad de cada espuma fue calificada teniendo como parámetro las propiedades de la Espuma Corona, ya que estas se asumen como ideales para el proceso en que son requeridas.

Tabla 19. Parámetros de calificación

| Propiedad | Parámetro | Calificación |
|---|---------------------------|--------------|
| Absorción (%) | $x < 700$ | 5 |
| | $700 \leq x \leq 900$ | 10 |
| | $x > 900$ | 0 |
| Densidad aparente (g/cm ³) | $x \leq 0.050$ | 10 |
| | $x > 0.050$ | 0 |
| Módulo de elasticidad (kPa) | $0 \leq x \leq 16.25$ | 5 |
| | $16.25 \leq x \leq 46.15$ | 10 |
| | $x \geq 46.15$ | 0 |
| Recuperación (kPa) | $x < 1$ | 0 |
| | $1 \leq x \leq 2$ | 10 |
| | $x > 2$ | 0 |
| Densidad de celda (celda/mm ²) | $x < 10$ | 0 |
| | $10 \leq x \leq 15$ | 10 |
| | $x > 15$ | 5 |
| Tamaño de celda (mm ²) | $x < 0.2$ | 0 |
| | $0.2 \leq x \leq 0.3$ | 10 |
| | $0.3 < x < 1$ | 5 |
| Resistencia al desgaste | Buena | 10 |
| | Regular | 0 |
| | Mala | 0 |
| Abrasión (μm) | $x \leq 4.93$ | 10 |
| | $x > 4.93$ | 0 |

6.3.3 Calificación. En la Tabla 20 se presentan las calificaciones en forma de gráficos radiales de las propiedades evaluadas para cada espuma, así como las calificaciones totales, donde la Espuma Corona tendría un valor de 1000 por ser la espuma ideal para trabajar en Corona gracias a sus propiedades.

Tabla 20. Calificación de las espumas

| Espuma | Gráfico | Calificación total |
|--------------|--|--------------------|
| PU Nacional |  <p>A radar chart for PU Nacional with eight axes: Absorción (top), Densidad aparente (top-right), Módulo de elasticidad (right), Recuperación (bottom-right), Densidad de celda (bottom), Tamaño de celda (bottom-left), Desgaste (left), and Abrasión (top-left). The chart has concentric circles at intervals of 2, from 0 to 10. The scores are approximately: Absorción: 5, Densidad aparente: 8, Módulo de elasticidad: 4, Recuperación: 9, Densidad de celda: 1, Tamaño de celda: 1, Desgaste: 1, Abrasión: 8.</p> | 555 |
| PU Importada |  <p>A radar chart for PU Importada with the same eight axes. The scores are approximately: Absorción: 4, Densidad aparente: 4, Módulo de elasticidad: 10, Recuperación: 1, Densidad de celda: 1, Tamaño de celda: 1, Desgaste: 8, Abrasión: 8.</p> | 605 |
| PE |  <p>A radar chart for PE with the same eight axes. The scores are approximately: Absorción: 1, Densidad aparente: 8, Módulo de elasticidad: 1, Recuperación: 1, Densidad de celda: 1, Tamaño de celda: 1, Desgaste: 1, Abrasión: 1.</p> | 80 |

Con los gráficos radiales se pueden observar las falencias que las espumas tienen en las diferentes propiedades evaluadas y además se confirma que ninguna alcanza la calificación ideal, es decir ninguna posee las cualidades que la espuma Corona tiene.

7. CONCLUSIONES

En la búsqueda y consecución de las diferentes espumas en el mercado local se observó que las espumas de producción nacional se focalizan en la industria del mueble y sus derivaciones relacionadas con el objetivo de brindar comodidad a las personas, y las que son producidas en el exterior, por lo general son creadas para trabajos de belleza y cuidado del cuerpo.

Las empresas locales que lideran el mercado nacional de espumas no han tenido la motivación suficiente para hacer un estudio y una investigación completa con la cual desarrollar espumas con las características requeridas para llevar a cabo un proceso de pulido de cerámica, ya que estas empresas se caracterizan por tener una producción en volúmenes grandes y de formas no muy complejas, que luego son comercializadas en un mercado de gran tamaño y consumo, por lo tanto, no ven atractivo emprender en un mercado tan específico y relativamente pequeño.

Por lo observado en el Análisis de resultados, se concluye que de las 3 espumas evaluadas no hay ninguna que posea las mismas características que la Espuma Corona y por lo tanto se puede afirmar con seguridad que en el mercado local y/o nacional, por el momento, no se consigue una espuma que pueda ser utilizada por Corona en sus procesos productivos y que trabaje eficazmente. La espuma que más se acerca al comportamiento de una Espuma Corona es la Espuma PU Importada, ya que sus propiedades son las que más se asemejan y además fue la que mayor puntaje obtuvo en la Calificación Total. Por lo anterior, la opción más factible, en caso de retrasos de entregas de la Espuma Corona y desaparición de esta del mercado, por ahora es la Espuma PU Importada.

Esta espuma, aunque se aproxima bastante a lo que se requiere en la industria cerámica, tiene varias desventajas que no le permiten ser la opción ideal. Entre las más críticas están la capacidad de recuperación y la absorción, determinantes a la hora de escoger una espuma. Aún así, presenta cualidades muy similares a la

Espuma Corona como lo son la resistencia al desgaste, la morfología y en general un aspecto muy similar.

Por todo lo anterior, se propone el diseño local de una espuma especial para el pulido de los productos cerámicos de Corona considerando las propiedades de la espuma que actualmente se está utilizando, mejorando la resistencia al desgaste y la abrasión obtenida en el material cerámico; el costo sería un elemento secundario para este diseño considerando que los tiempos de entrega tan restringidos actualmente hacen que los costos de compra, transporte, logísticos y de importación sean muy altos, haciendo que un diseño nacional tenga una relación costo/beneficio óptima.

8. TRABAJOS FUTUROS

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación se observó que ciertos campos de investigación se encuentran poco desarrollados y permiten la generación de proyectos de investigación interesantes para el fortalecimiento tanto de la industria como de la academia local. Por lo tanto, se proponen los siguientes proyectos de investigación que pueden considerarse como tesis de maestrías o proyectos de cofinanciación con Colciencias:

- Estudio de contacto del tribosistema espuma termoplástica flexible – cerámico crudo.
- Desarrollo de una espuma flexible para el pulido de material cerámico crudo.
- Desarrollo del proceso de espumado y formado para una espuma flexible para el pulido de material cerámico crudo.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for flexible cellular materials. Test C – Compression force deflection test. West Conshohocken. ASTM. 2003. p. 4 - 5. ASTM D3574 - 03.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples. West Conshohocken. ASTM. 1996. ASTM D1188 - 96

GIBSON, L., y ASHBY, M. Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge. Cambridge University Press. 1997. p. 5 – 8.

KLEMPNER, D., y FRISCH, K. C. Handbook of polymeric foams and foam technology. New York. Hanser Publishers. 1991. p. 7 – 8.

LARSEN-BASSE, J. Solid Friction. En: P. J. BLAU. ASM Handbook Volume 18: Friction, Lubrication and Wear Technology. [s.l.]. ASM International. 2004. p. 25 - 78.

LEE, S. T.; RAMESH, N. S. y GENDRON, R. Thermoplastic Foam Processing. Boca Raton. CRC Press LLC. 2005. p. 13 – 18.

LEE, S. T.; PARK, C. B., y RAMESH, N. Polymeric Foams Science and Technology. Boca Raton. CRC Press. 2007. p. 1 – 7.

MALDONADO, J. E. Coefficient of Friction Measurement for Plastic against Metals as a Function of Normal Force. En: ANTEC. Proceedings ANTEC 1998 Conference. Atlanta. SPE. 1998.

PARIS, L. S. Procesamiento de plásticos. Material de clase. Medellín. Universidad EAFIT. 2007.

ROSSOUW, P. E. A Fundamental Review of variables associated with low velocity frictional dynamics. En: Seminars in Orthodontics Volume 9. [s.l.]. 2003. p. 223-235.

SENGE, P. La Quinta disciplina en la práctica. Buenos Aires. Ediciones Granica S.A. 2004. p. 10 – 11.

WILLIAMS, J. Engineering Tribology. En: Engineering Tribology. New York: Oxford University Press. 1994. p. 488.

ZUM GAHR, K.H. Microstructure and Wear of Materials. [s.l.]. Elsevier Publishing Company. 1987. p. 560.

BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA

FURNESS, J. Thermoplastics: An introduction. AZOM.COM. [en línea]. Disponible en Internet: <<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=83>>. [citado en 18 de marzo de 2008].

NETTO, R. S. Plásticos termoestables. FISICANET. [en línea]. Disponible en Internet:<http://www.fisicanet.com.ar/tecnicos/tecnologia/te03_plasticos_termoestables.php>. [citado en 25 de Marzo de 2008].

WIKIPEDIA. Polymer. [en línea]. Disponible en Internet: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Polymer>>. [citado en 18 de marzo de 2008].

