



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGIA (PICYT)


Santiago de Querétaro, 31 de agosto del 2000

ACTA DE RECEPCION DE MODIFICACIONES A LA TESIS DEL ASPIRANTE A MAESTRIA – ING. HORACIO HUMBERTO MONTAÑO BACA

En cumplimiento al dictamen del Jurado Doctoral del Examen de Grado del aspirante a Maestro en Ciencias en la especialidad de Procesos de Manufactura, Ing. Horacio Humberto Montaña Baca, celebrado en CIDESI a los 18 días del mes de agosto del año 2000:

Los abajo firmantes, Presidente del Jurado y Vocal (Tutora en Planta) del referido Jurado Doctoral, damos fe que el Ing. Horacio Humberto Montaña Baca presentó una nueva versión de su Tesis, que satisface las sugerencias y modificaciones dictaminadas por los miembros del Jurado Doctoral que aparecen en su Acta de Examen de Grado.

Y para que así conste, firmamos la presente a los 31 días del mes de agosto del año 2000.


Dr. Oscar Barceinas Sánchez
Presidente del Jurado




Ing. Esther Estrella Gutiérrez
Vocal y Tutora en Planta

CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

SANTIAGO DE QUERETARO, QRO.

POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA

004220

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN
DE PASTAS DE EMBRAGUE A TRAVÉS DE LA
DISMINUCIÓN DEL RECHAZO INTERNO MEDIANTE
LA CARACTERIZACIÓN Y ELIMINACIÓN DE
CAUSAS QUE PRODUCEN EL DEFECTO CONOCIDO
COMO “PORO PERFIL”.

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN PROCESOS DE MANUFACTURA

HORACIO HUMBERTO MONTAÑO BACA

AGOSTO 2000

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por concederme lo más preciado en el mundo: La vida.

A mis padres: José Luis y María Yolanda
Con mucho cariño y agradecimiento por todo el esfuerzo, sacrificio,
paciencia y amor que me han brindado para trazar mi destino.

A mis hermanos: José Luis y María José
Pilares fundamentales de nuestra unión familiar y
por los momentos que hemos vivido juntos.

A mi novia: Nayvi
Con todo mi amor por la felicidad que ha traído a mi vida.

A mi tutor: Guillermo Morales Espejel
Por su amistad, paciencia y consejos sin los cuales no
hubiera sido posible la culminación de este trabajo.

A mis asesores: Oscar Barceinas Sánchez y Jean Alain Videau
Por su asesoría en la realización de la presente investigación.

A mis amigos: Horacio y Enrique
Que en todo momento han estado conmigo y que
han hecho inolvidable mi estancia en Querétaro.

AI PICYT
Por la realización de este posgrado.

A Valeo
Por la oportunidad de realizar este proyecto.

Esta tesis representa el término de muchos años de esfuerzo, no solo en el estudio sino en la formación como ser humano.

CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| Contenido | iv |
| Lista de figuras | vi |
| Lista de tablas | x |
| Nomenclatura | xi |
| Resumen | xii |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 1 |
| 1.2 Definición del problema | 2 |
| 1.3 Objetivos | 4 |
| 1.4 Hipótesis | 4 |
| 1.5 Metodología | 5 |
| 1.6 Justificación | 6 |
| 1.7 Organización de las tesis | 6 |
| 2. Marco teórico | 8 |
| 2.1 Antecedentes | 8 |
| 2.2 La vulcanización | 10 |
| 2.3 El embrague | 12 |
| 3. Proceso de manufactura | 15 |
| 3.1 Recepción de materias primas | 16 |
| 3.2 Trenzado de hilo | 16 |
| 3.3 Polvos y mezclas | 17 |
| 3.4 Impregnación | 18 |
| 3.5 Formado | 20 |
| 3.6 Vulcanizado | 21 |
| 3.7 Lijado | 24 |
| 3.8 Tratamiento térmico | 24 |
| 3.9 Rectificado | 24 |
| 3.10 Inspección visual | 24 |
| 3.11 Marcado | 25 |
| 3.12 Barrenado | 25 |

| | |
|---|----|
| 3.13 Recubrimiento antipolvo | 25 |
| 3.14 Embalado | 25 |
| 4. Trabajo experimental | 26 |
| 4.1 Análisis por microscopía electrónica de barrido | 26 |
| 4.2 Calorimetría diferencial de barrido | 28 |
| 5. Modelación Computacional | 34 |
| 5.1 Análisis por el método de elementos finitos | 34 |
| Propiedades | 34 |
| Metodología de solución | 36 |
| Solución numérica estado transitorio | 38 |
| Algoritmo de solución | 40 |
| Elemento | 40 |
| Condiciones de frontera | 41 |
| Condiciones iniciales | 41 |
| Dimensiones | 42 |
| Malla | 42 |
| Simulación por computadora | 43 |
| 5.2 Pruebas experimentales, Medición en la pasta | 45 |
| 5.3 Validación de la simulación por computadora | 50 |
| 5.4 Ajuste de parámetros | 51 |
| 5.5 Homogeneidad de temperaturas en el plato de calentamiento | 52 |
| 5.6 Aumento en el diámetro exterior de la preforma | 54 |
| 6. Pruebas en planta | 56 |
| 6.1 Ensayos industriales en el material 490/2 | 56 |
| 6.2 Ensayos industriales en el material 808 | 58 |
| 6.3 Efecto paro y arranque de la máquina | 59 |
| 7. Conclusiones y trabajo futuro | 60 |
| 7.1 Conclusiones | 60 |
| 7.2 Recomendaciones | 61 |
| 7.3 Trabajo futuro | 62 |
| Referencias | 64 |

LISTA DE FIGURAS



Figura 1.1. Poro Perfil. Definición: Falta de material en los cantos.

Figura 1.2. Hilo arrancado. Definición: Cavidad alargada superficial sobre la ruta de la trama de hilo.

Figura 1.3. Fisuras superficiales. Definición: Agrietamiento del material.

Figura 1.4. Huellas superficiales. Definición: Hendiduras o marcas, pequeñas cavidades superficiales.

Figura 1.5. Porosidad. Definición: Poros en la superficie del material.

Figura 1.6. Pieza con defecto "poro perfil".

Figura 1.7. Pieza sin defecto.

Figura 2.1. Partes del embrague.

Figura 2.2. Esquema de la conexión del embrague.

Figura 3. Etapas del proceso de manufactura para discos de fricción.

Figura 3.1. Area de trenzado, las bobinas se van acomodando en los anaqueles para su uso posterior.

Figura 3.2 (a). Area de trenzado. Hilos de cobre, de fibra de vidrio y textiles son extraídos de sus bobinas para ser trenzados.

Figura 3.2 (b). Area de trenzado. Trenzado de hilos y embobinado.

Figura 3.3 (a). Area de polvos y mezclas. Contenedor recibiendo polvos para la mezcla.

Figura 3.3 (b). Area de polvos y mezclas. Contenedor al final del ciclo.

Figura 3.4. Parte superior del heliglobo donde son vaciados los polvos.

Figura 3.5 (a). Area de impregnado. Entrada del hilo a la torre de impregnación.

Figura 3.5 (a). Area de impregnado. Hilo impregnado saliendo de las torres.

Figura 3.6. Hilo impregnado cayendo en los cuñetes.

Figura 3.7 (a). Preforma.

Figura 3.7 (b). Forma de la lobulación de la preforma, manera como se va tejiendo la preforma.

Figura 3.8. Boquilla inyectando el hilo al disco que esta girando.

Figura 3.9. Ciclo de vulcanización de los discos de fricción, gráfica presión – temperatura – tiempo.

Figura 3.10 (a). Portafolio abierto de dos moldes.

Figura 3.10 (b). Portafolios dentro de la prensa descansando sobre los platos de calentamiento.

Figura 3.11 (a). Sistema de presión. Pistón efectuando compresión sobre el sistema plato – portafolio.

Figura 3.11 (b). Sistema de presión. Descompresión del pistón, momento en que se realizan las desgasificaciones.

Figura 3.12. Transformación de la materia, la preforma pasa al molde en el proceso de vulcanización y sale en forma de pasta.

Figura 3.13. Operadora efectuando el control de aspecto visual.

Figura 4.1. Componentes de un microscopio electrónico de barrido.

Figura 4.2. Pieza sin defecto vista a 500 aumentos, las resinas logran vulcanizar homogéneamente.

Figura 4.3 (a). Pieza con defecto. Pieza vista a 25 aumentos, se observa la falta de material en el canto exterior.

Figura 4.3 (b). Pieza con defecto. Pieza vista a 350 aumentos, se observa que las gotas de hule (resina) no alcanzan a fluir completamente.

Figura 4.4. Diagrama esquemático de un Fisher Serie 300, sistema diferencial de análisis térmico.

Figura 4.5. Análisis por DSC de la muestra A de hilo impregnado, se observa que la reacción empieza a los 185°C de temperatura, teniendo una temperatura máxima de reacción de 205.04°C.

Figura 4.6. Análisis de DSC de la muestra B de hilo impregnado, se observa que la reacción empieza a los 179.3°C de temperatura, teniendo una temperatura máxima de reacción de 205.87 °C.

Figura 4.7. Análisis de DSC de la muestra de hilo impregnado del material 808, se observa que la reacción empieza a los 177.81°C de temperatura, teniendo una temperatura máxima de reacción de 206.05 °C.

- Figura 5.1.** Sección de la gráfica 4.5 parte donde hay reacción del material de 185°C a 228 °C.
- Figura 5.2.** Elemento utilizado en la simulación (plane 55) Thermal solid.
- Figura 5.3.** Condiciones de frontera que se aplican en la simulación, vista transversal.
- Figura 5.4.** Plano del modelo sección transversal, unidades en mm.
- Figura 5.5.** Malla del modelo, consta de 2128 elementos de tipo cuadrilátero ejesimétrico.
- Figura 5.6.** Simulación en un tiempo de 1 segundo se observan los perfiles de temperatura, la preforma está a 115°C, la placa inferior está en contacto con el plato a una temperatura de 188°C y el herramental esta a 155°C.
- Figura 5.7.** Simulación en un tiempo de 20 segundos, el centro de la pasta se encuentra a 143.31°C.
- Figura 5.8.** Simulación en un tiempo de 64 segundos, el centro del material vulcanizado alcanza una temperatura de 179.324 °C, temperatura en la cual el material empieza a reaccionar.
- Figura 5.9.** Comportamiento térmico del material durante la simulación por computadora del proceso, monitoreada en el centro de la porción de preforma analizada.
- Figura 5.10 (a).** Termopar dentro de preforma vulcanizada, el cordón del termopar cruza a través de un molde ranurado.
- Figura 5.10 (b).** Termopar dentro de preforma vulcanizada, cara ranurada de la pasta.
- Figura 5.11.** Pieza sin defecto, la preforma inicia a una temperatura de 116°C y alcanza los 179.5°C en un tiempo de 60 segundos.
- Figura 5.12.** Pieza sin defecto, la preforma inicia a una temperatura de 73°C alcanzando una temperatura de 179.7°C en un tiempo de 1 minuto con 39 segundos, la pieza no tiene el espesor requerido, fue bajo.
- Figura 5.13.** La preforma inicia a una temperatura de 151.2°C alcanzando la temperatura de 179.56°C en un tiempo de 30 segundos, teniéndose una pieza con “poro perfil” y espesor alto.
- Figura 5.13.** Comportamiento térmico de las pruebas experimentales realizadas a temperaturas diferentes de inicio de las preformas. La primer prueba se inicia a 116°C, la segunda a 73°C y la tercera a 151.2°C.

Figura 5.14. Muestra el comportamiento térmico de las pruebas experimentales realizadas a temperaturas diferentes de inicio de las preformas. La primer prueba se inicia a 116°C, la segunda a 73°C y la tercera a 151.2°C.

Figura 5.15. Ajuste de curvas sobre el comportamiento térmico del material en los primeros 70 segundos, después de este tiempo ya no hay cambios significativos en la temperatura (estado estable).

Figura 5.16. La primera presión alta (1PA) se aplica antes de lo debido, el material se calienta en esta etapa y alcanza la temperatura de transición en un tiempo de 1 minuto y 46 segundos.

Figura 5.17. Comportamiento térmico del material, comparación entre lo simulado y las pruebas experimentales efectuadas en el proceso.

Figura 5.18. Ajuste de temperaturas de inicio de las preformas. La temperatura de transición se alcanza alrededor de los 60 segundos coordinándose con la presión (1PA).

Figura 5.19 (a). Portafolio con termopares para medir la distribución de temperaturas en los platos de calentamiento.

Figura 5.19 (b). Termopar de portafolio con el que se mide la temperatura de lo plato.

Figura 5.20. Mapa de temperaturas de estado estable medidas en el plato de calentamiento, antes de las mejoras resultantes de este proyecto. Existe una diferencia de temperaturas en el plato de 34.2°C.

Figura 5.21. Mapa de temperaturas en estado estable medidas después de implantar las recomendaciones resultantes de este proyecto, se redujo la diferencia de temperaturas a 10.4°C en el mismo plato.

Figura 5.22(a). Plantilla de formado. Preforma sobre la plantilla de formado modificado

Figura 5.22 (b). Plantilla de formado. Diagrama del cambio de dimensiones del dispositivo.

Figura 6.1. Ensayos industriales realizados sobre el material 490/2, se tiene un acumulado de 6327 ppm mientras el objetivo es de 6500 ppm.

Figura 6.2. Ensayos industriales realizados sobre el material 808, se tiene un acumulado de 6052 ppm mientras el objetivo es de 6500 ppm.

Figura 6.3. Comportamiento de los defectos en arranques, cambio de turno y comida, el defecto se da en un 60%.

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Características sobre muestras de hilo impregnado para el material 490/2.

Tabla 4.2. Resultados del análisis por DSC.

Tabla 5.1. Propiedades del material 490/2 y del acero AISI-SAE 1045 utilizados para la simulación.

Tabla 5.2. Coeficientes de la ecuación 5.21.

Tabla 5.3. Temperaturas de inicio para cada plato de calentamiento.

Tabla 6.1 (a). Parámetros de producción material 490/2. Características de producción.

Tabla 6.1 (b). Parámetros de producción material 490/2. Tiempo de las presiones.

Tabla 6.1 (c). Parámetros de producción material 490/2. Magnitud de las temperaturas según el plato de calentamiento.

Tabla 6.2 (a). Parámetros de producción material 808. Características de producción.

Tabla 6.2 (b). Parámetros de producción material 808. Tiempo de las presiones.

Tabla 6.2 (c). Parámetros de producción material 808. Magnitud de las temperaturas según el plato de calentamiento.

NOMENCLATURA

| | |
|-----------------|---|
| k_x, k_y, k_z | Conductividades térmicas del material en direcciones x, y y $z, W / mK$ |
| c | Calor específico de material, J / kgK |
| ρ | Densidad del material, kg / m^3 |
| Q | Término de generación interna de calor, W / m^3 |
| T | Función de temperatura, K |
| t | Variable independiente de tiempo, s |
| x, y, z | Coordenadas espaciales, m . |
| C_p | Calor específico, $J / kg - K$. |
| ΔH | Diferencia en entalpia, J/g |
| ΔT | Diferencia en temperatura, $^{\circ}C$ |
| $1PB$ | Primera presión baja, bar |
| $1PA$ | Primera presión alta, bar |
| $2PA$ | Segunda presión alta, bar |
| PPM | Piezas por millón = $\frac{\text{Total de piezas malas}}{\text{Total de piezas fabricadas}} \times 1,000,000$ |

RESUMEN

En este trabajo se describe el mecanismo que en la fabricación de discos de fricción provoca el defecto conocido como “poro perfil”, el cual se origina por una desincronización de parámetros de presión y temperatura durante la manufactura. El “poro perfil” es el defecto con mayor ocurrencia en la fabricación de discos de fricción.

A través de análisis por microscopía electrónica se demuestra que la reacción de vulcanizado ocurre en el disco de fricción, y se observa que la presencia del defecto se debe a que las resinas del material no alcanzan a fluir completamente por todo el molde. Por medio del análisis de calorimetría diferencial, la temperatura de inicio de reacción del vulcanizado del material es encontrada, estableciéndose un rango dentro del cual el material esta en un estado de transición, pasa de un estado termolíquido a uno termofijo. Posteriormente, con simulación térmica de elementos finitos por computadora utilizando estado transitorio se calcula el tiempo en el que dicho valor de temperatura se presenta y es ahí cuando el prensado debe aplicarse para evitar la ocurrencia de dicho defecto.

Conocido el mecanismo es posible disminuir el número de defectos. En esta investigación se analiza principalmente el proceso de vulcanización, etapa en la cual se origina dicho defecto. Con la simulación y las pruebas se logra ajustar los parámetros de producción y así disminuir el defecto en un 60% en comparación al inicio del estudio.

CAPITULO UNO

INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

La tendencia actual en la industria es aprovechar eficientemente los recursos energéticos, las materias primas y preservar el medio ambiente. Ejemplo de este aprovechamiento y transformación de recursos en un proceso industrial de manufactura es el proceso de vulcanizado.

La empresa VALEO donde se realiza esta investigación es una industria líder en el mercado de autopartes, en la división Materiales de Fricción de México se producen discos de fricción para embrague. Estos discos de fricción se producen a partir de hilos textiles, hilos de cobre, resinas, caucho y sustancias químicas, conformados mediante la vulcanización, el cual es el proceso de mayor relevancia en la producción.

En la manufactura de los discos surgen defectos, siendo el de mayor importancia el conocido como “poro perfil”. Se desarrolla un estudio para determinar sus causas a fin de disminuir su ocurrencia. Al inicio del estudio se tenían 18500 piezas por millón (ppm) de rechazo.

En esta división se fabrican pastas de diversos materiales denominados 202, 808, 808MCC, 490/2, 490 y MILLENIUM, la diferencia entre estos materiales son las resinas de impregnación y los hilos que los conforman, siendo el principio de vulcanizado el mismo para todos. La investigación se realiza con el material 490/2, el material con mayor producción en la planta, para los otros materiales se sigue la misma metodología.

Se trata de resolver el problema mediante un análisis estadístico. Se recolectan los datos de los parámetros de producción y el número de piezas con poro perfil por cada ficha de fabricación [1], se analiza esta información y ninguno de los parámetros tiene alguna correlación entre sí descartándose la posibilidad de solución por este método.

1.2 DEFINICION DEL PROBLEMA

La clasificación de defectos que existen en el proceso de vulcanización se realiza conforme al estándar de apariencia de Valeo, referido a la referencia [2]. Los defectos que surgen en el proceso de vulcanizado se definen y muestran a continuación en las figuras 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5.

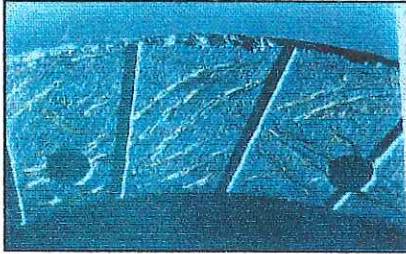


Figura 1.1.
Poros Perfil

Definición: Falta de material en los cantos.

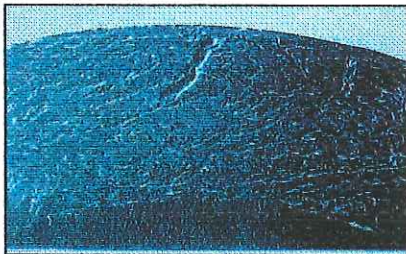


Figura 1.2.
Hilo arrancado

Definición: Cavidad alargada superficial sobre la ruta de la trama de hilo.

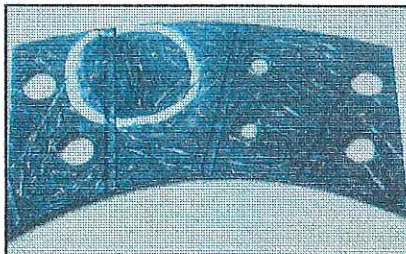


Figura 1.3.
Fisuras superficiales

Definición: Agrietamiento del material.

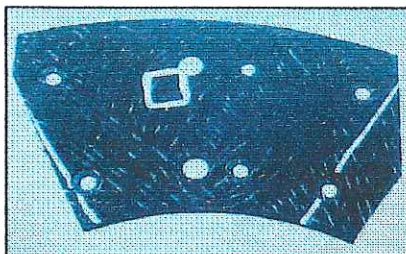


Figura 1.4.
Huellas superficiales

Definición: Hendiduras o marcas, pequeñas cavidades superficiales.

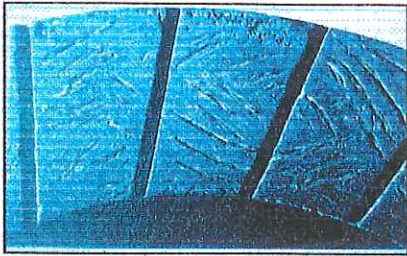


Figura 1.5.
Porosidad

Definición: Poros en la superficie del material.

Las piezas deben de cumplir con un estándar visual de apariencia y otro funcional, de tal forma que una pieza en buenas condiciones debe cumplir con los requerimientos de aspecto, dimensiones (espesor, diámetro exterior, diámetro interior), fuerza de centrifugado y pruebas físico - químicas.

El defecto “poro perfil” se define como un faltante de material en el canto exterior de los discos véase figura 1.6, este defecto es de apariencia ya que funcionalmente su comportamiento no se afecta por su presencia.

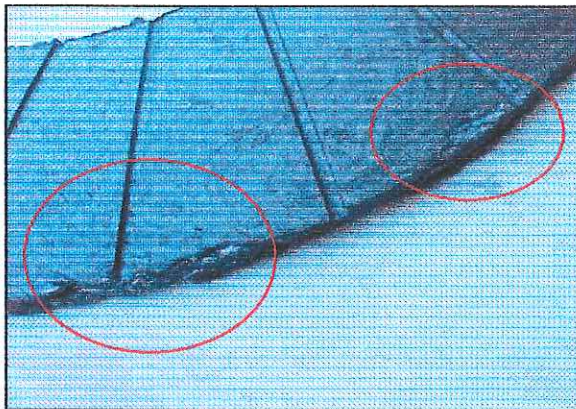


Figura 1.6. Pieza con defecto “poro perfil”.

Hay discos que tienen el faltante de material (poro) en el diámetro interior, estas piezas no se consideran dentro del defecto de poro perfil.

En contraste, una pieza sin defecto es la que no tiene faltantes de material en su canto exterior véase figura 1.7.

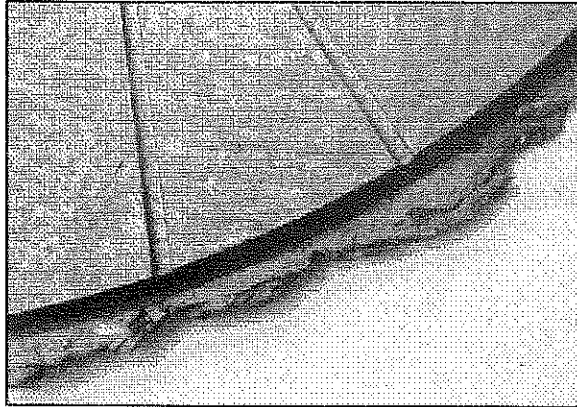


Figura 1.7 Pieza sin defecto.

1.3 OBJETIVOS

Determinar las causas que producen el defecto conocido como poro perfil.

Establecer los parámetros de producción para lograr la disminución del defecto en un 60% (6500 ppm).

1.4 HIPOTESIS

En la etapa de vulcanización hay un momento en el cual la pasta se encuentra a la temperatura de transición y es en este lapso de tiempo en el que la presión necesaria para lograr el espesor debe de aplicarse para que la resina se distribuya por todo en el molde. Con esta información se puede establecer una sincronización presión-temperatura durante la vulcanización de las pastas.

1.5 METODOLOGIA

- A. Conocimiento del proceso y recopilación de información en planta y de literatura.
- B. Análisis por microscopía electrónica de barrido.
- C. Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC).
- D. Simulación del comportamiento térmico del proceso.
 - Propiedades del material
 - Metodología de solución
 - Solución numérica estado transitorio
 - Algoritmo de solución
 - Elemento
 - Condiciones de frontera
 - Condiciones iniciales
 - Dimensiones
 - Malla
 - Simulación por computadora
- E. Pruebas experimentales.
 - Medición presión - temperatura - tiempo
- F. Validación de los resultados.
- G. Ajuste de parámetros
- H. Homogeneización de la temperatura en los platos de calentamiento.
- I. Aumento en el diámetro exterior de la preforma.
- J. Ensayos Industriales en los materiales 490/2 y 808.
- K. Efecto paro y arranque de la máquina.

1.6 JUSTIFICACION

004220

Este proyecto se desarrolla con el fin de disminuir el rechazo interno dentro de la producción, teniendo por consecuencia la disminución de costos. Mediante este trabajo se recuperarán 12500 piezas por millón aproximadamente de la producción normal.

El uso del método de elementos finitos permite de una manera más eficaz realizar la simulación y estudio térmico del proceso de vulcanizado, con esto se puede predecir el comportamiento del material durante la fabricación de pastas.

1.7 ORGANIZACION DE LA TESIS

El presente trabajo de tesis muestra los estudios realizados para determinar las causas que dan origen al defecto poro perfil en las pastas de embrague, durante el proceso de vulcanización. Esta tesis consta de siete capítulos, los cuales están organizados de la siguiente manera:

En el presente capítulo I, se da una descripción del problema que se presenta en el proceso de vulcanización y su impacto en la producción. También se mencionan los antecedentes, el objetivo, hipótesis y justificación de este trabajo de investigación.

En el capítulo II se hace la investigación de literatura y referencia al marco teórico, dando una breve descripción de lo que es la vulcanización y las pastas de embrague.

En el capítulo III se muestra el proceso de manufactura de las pastas de embrague.

En el capítulo IV se hace el trabajo experimental, análisis por microscopía electrónica de barrido y análisis del comportamiento del material.

En el capítulo V se realiza la simulación del proceso por computadora y mediciones antes y después del ajuste realizado.

En el capítulo VI se realiza el análisis de resultados.

En el capítulo VII se hacen las conclusiones pertinentes de la tesis, recomendaciones y se propone el trabajo futuro que podría realizarse para mejorar el proceso y eliminar el defecto.

CAPITULO DOS

MARCO TEORICO

2.1 La Vulcanización.

En la actualidad, se vulcanizan, además del caucho, los aceites secantes y otras diolefinas, las resinas de poliéster insaturado, ciertos poliuretanos de cadena carbonada larga, etc. También, el agente de cruzamiento puede no ser azufre, y muchos compuestos divalentes actúan de la misma manera, como los peróxidos, diaminas, quinonas, diisocianatos, etc.

La vulcanización del caucho fue descubierta por Charles Goodyear en 1838, aunque el nombre se debe a Thomas Hancock, quien al fundir una mezcla de azufre y caucho crudo obtuvo la primera muestra de ebonita. Más tarde fue disminuyendo la cantidad de azufre agregado, hasta obtener así tipos más elásticos que, en esencia, son los mismos que hoy se fabrican y se conocen con el nombre de caucho vulcanizado; las técnicas fueron mejorando con el empleo de azufre cada vez más finamente dividido, y después con el de los aceleradores de vulcanización, cuya primera patente, referida a la anilina, apareció en 1914 en Alemania, aunque sus efectos se conocían desde varios años atrás. Más adelante se descubrieron los activadores, concretamente el óxido de cinc. Hoy la vulcanización constituye una técnica compleja, siendo más bien un arte que una ciencia, aunque no sean bien conocidos los fundamentos químicos del fenómeno.

A pesar de no conocerse exactamente el quimismo de la vulcanización, se puede admitir de un modo simple que consiste en la reticulación de las moléculas lineales de gran longitud de caucho mediante puentes -S-, o cadenas más largas de azufre, situadas a una distancia media suficiente para permitir la máxima movilidad de las moléculas cruzadas sin que se produzca flujo viscoso. La distribución de los puentes a lo largo de la cadena carbonada no es uniforme, salvo en ciertos tipos de cauchos sintéticos, y tiene lugar, en general, por apertura de los dobles enlaces (uno cada cuatro átomos de carbono) o por sustitución en las cadenas laterales, aunque esto último no está suficientemente

comprobado. También pueden constar de cadenas de más de un átomo de azufre y del monómero, se comprueba que se consiguen buenos vulcanizados con puentes a distancia media de unos 20 a 100 átomos de carbono.

La macromolécula vulcanizada queda, pues, constituida por una estructura de malla muy ancha que en reposo tiene sus moléculas en cierto grado de ordenamiento, mantenido por las fuerzas de van der Waals, pero que al ser sometidas a tracción se distienden y quedan en estado amorfo, como lo confirma el hecho de que en este estado ya no se produzcan interferencias por reflexión de rayos X. Al aumentar la longitud de la malla aumenta también la elongación, pero disminuye lógicamente la resistencia a la tracción.

En la práctica de la operación, además del azufre finamente dividido (azufre micronizado) intervienen otros agentes para mejorar las condiciones de trabajo y las propiedades del producto resultante. Estos ingredientes son: los aceleradores de vulcanización que regulan la fijación del azufre, impidiendo que quede parte del mismo sin reaccionar y se estropee el producto final. Se trata en general de compuestos capaces de fijar el S en forma más o menos lábil y cederlo a las moléculas del caucho. También permiten modificar a voluntad las temperaturas y tiempos de vulcanización. Son muy numerosos y se agrupan por familias, que van desde los de acción más lenta hasta los de acción más rápida, a saber: las aminas (anilina, guanidina, diaguanida, hexamina, etc.), los mercaptanos (mercaptobenzotiazol), los xantogenatos y los derivados del ácido tiocarbámico. Los últimos pueden vulcanizar por sí solos, cediendo parte de su azufre [3].

Uno de los efectos más importantes de los acelerantes ultrarrápidos es el de que, al no dejar azufre residual libre, las propiedades del vulcanizado son las mismas en una zona amplia, tanto de temperaturas como de tiempos de vulcanización, y, por la misma causa, las propiedades del vulcanizado dependen muy poco del envejecimiento y de la temperatura.

Los retardantes son catalizadores negativos que evitan la prevulcanización durante el almacenamiento de las masas preparadas, pero en definitiva, no influyen en las propiedades de vulcanizado. Entre ellos se pueden citar la difenilnitrosamina, el ftalato de difenilguanidina, el benzoato de cinc y los ácidos salicílico, benzoico y ftálico.

Finalmente, los activadores se utilizan junto con los ultraacelerantes y, como regla general, los activadores ácidos con acelerantes básicos, y viceversa. Los más utilizados son: el MgO y el ZnO. A veces se encuentra combinados químicamente en un solo producto.

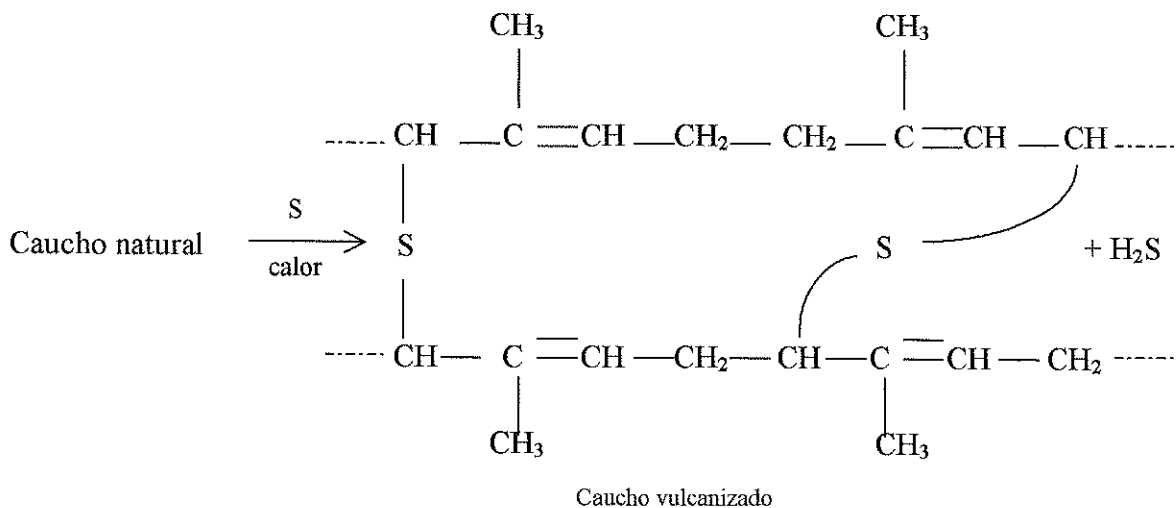
Los antioxidantes tienen por objeto evitar la ulterior degradación de los vulcanizados por el oxígeno del aire. El uso más frecuente en el caucho es la fenil- β -naftilamina.

La mezcla de todos los ingredientes se efectúa en general en cilindros masticadores. En el caso de disoluciones y dispersiones para la obtención de varios impermeabilizantes, productos adhesivos, espumas de caucho, etc., se mezclan asimismo en forma de disolución o dispersión, generalmente con adición de un retardador. Se emplean en general aceleradores lentos para masas de gran espesor, y viceversa.

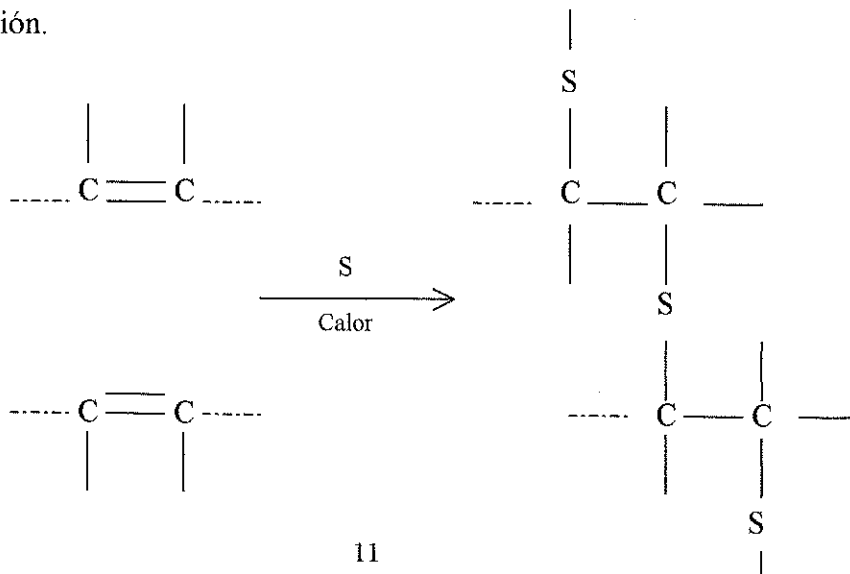
Los métodos utilizados en vulcanización difieren entre sí fundamentalmente en la manera de transmitir el calor a la pieza de goma, la cual varía según las características del producto que desea obtener y según el espesor de la pieza. El método más sencillo consiste en utilizar una prensa mientras se transmite el calor a través de las paredes del molde. Sin embargo, sus resultados no son del todo satisfactorios, y por ello se suele efectuar un precaletamiento mediante ultrasonidos o con un alternador de alta frecuencia. Se pueden emplear también moldes de inyección, análogos a los utilizados en la fabricación de piezas de plástico. Finalmente, la elección del método, y en particular de los líquidos de alto punto de fusión, debe realizarse teniendo en cuenta la máxima temperatura que son capaces de resistir las gomas [3].

La vulcanización del hule introduce enlaces cruzados de disulfuro entre las cadenas de poliisopreno. Estos enlaces cruzados forman un material más resistente y elástico que no se rompe cuando se estira [4].

La vulcanización – el proceso de calentar caucho con azufre – es importante para mejorar las propiedades del caucho natural, que es viscoso y difícil de manejar. La vulcanización hace que las unidades individuales de polímeros (que son cadenas largas) se unan por puentes de azufre; a esto se le llama retículo y, en forma simplificada, parece asemejarse a la siguiente estructura:



Hay muchas formas diferentes de reticulación, pero parece ser que intervienen radicales; en la estructura anterior, los hidrógenos alílicos adyacentes a los dobles enlaces son reemplazados por enlaces de azufre. Existen pruebas de que incluso algunos dobles enlaces carbono – carbono se rompen para formar retículos; desaparece parte aunque no toda la insaturación.



La vulcanización requiere a menudo de 5 a 8% por peso de azufre, y el caucho duro especial requiere de 25 a 50% de azufre [5].

2.2 El Embrague.

El embrague se compone de cuatro partes: plato del volante de inercia, disco de fricción, plato o prensa de presión, cojinete de empuje o tope (figura 2.1).

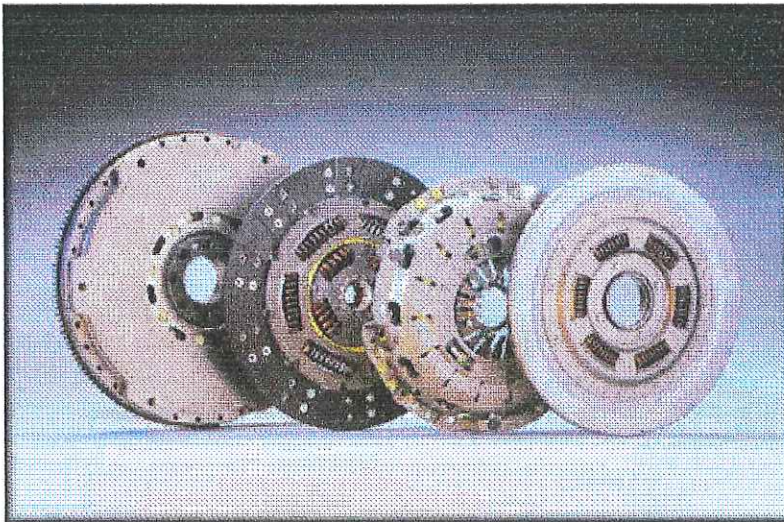


Figura 2.1. Partes del embrague.

El conjunto del embrague (figura 2.2) está situado entre el volante de inercia o volante motor y la caja de velocidades, su función es transmitir el giro del árbol motor o cigüeñal a la caja de velocidades.

El funcionamiento del embrague es muy simple y el accionamiento del mismo es a voluntad del conductor, pues de él depende que se mueva el vehículo o no. Si tenemos el pedal de embrague sin pisar, diremos que está embragado y si pisamos el pedal diremos que está desembragado.

El volante de inercia va unido por uno de los extremos al cigüeñal a través de tornillos, y en él está el plato que sirve de asiento del disco de fricción. El volante tiene unos orificios con hilos de rosca para permitir que la prensa de presión quede sujeta al mismo volante, también por medio de tornillos [6].

El disco de fricción está compuesto de resinas, elementos químicos y limadores metálicos, que por medio de remaches van unidos a un disco metálico, en el cual se encuentra una serie de muelles que tienen la función de amortiguar los impactos que recibe del plato de la prensa de presión cuando el conductor suelta el pedal del embrague, es decir cuando se embraga el sistema. El disco va unido al eje primario del cambio de velocidades por medio de un estriado.

La prensa de presión es la que ejerce permanentemente la presión adecuada al disco de fricción y lo deja rígido entre los dos platos, es decir, plato del volante de inercia y plato de prensa de presión.

Si no fuese así, el disco patinaría y al vehículo le costaría andar e incluso ni se llegaría a moverse de sitio. La diferencia que existe entre la prensa de diafragma y la de muelles es que la del diafragma no requiere ajuste alguno y las arrancadas son mucho más suaves. Este tipo de prensa no tiene reparación alguna, mientras que las de muelles, sí.

El cojinete de empuje o tope se encarga de presionar las láminas de la prensa de presión está oprimiendo fuertemente el disco de fricción (en ésta situación se dice que el disco está solidario entre plato de volante de inercia y el plato de prensa de presión). Al ser todo el conjunto solidario, el disco transmitirá el giro al eje primario y éste al resto de ejes de cambio de velocidades, y si tenemos una velocidad puesta, el vehículo se pondrá en movimiento [7], [8].

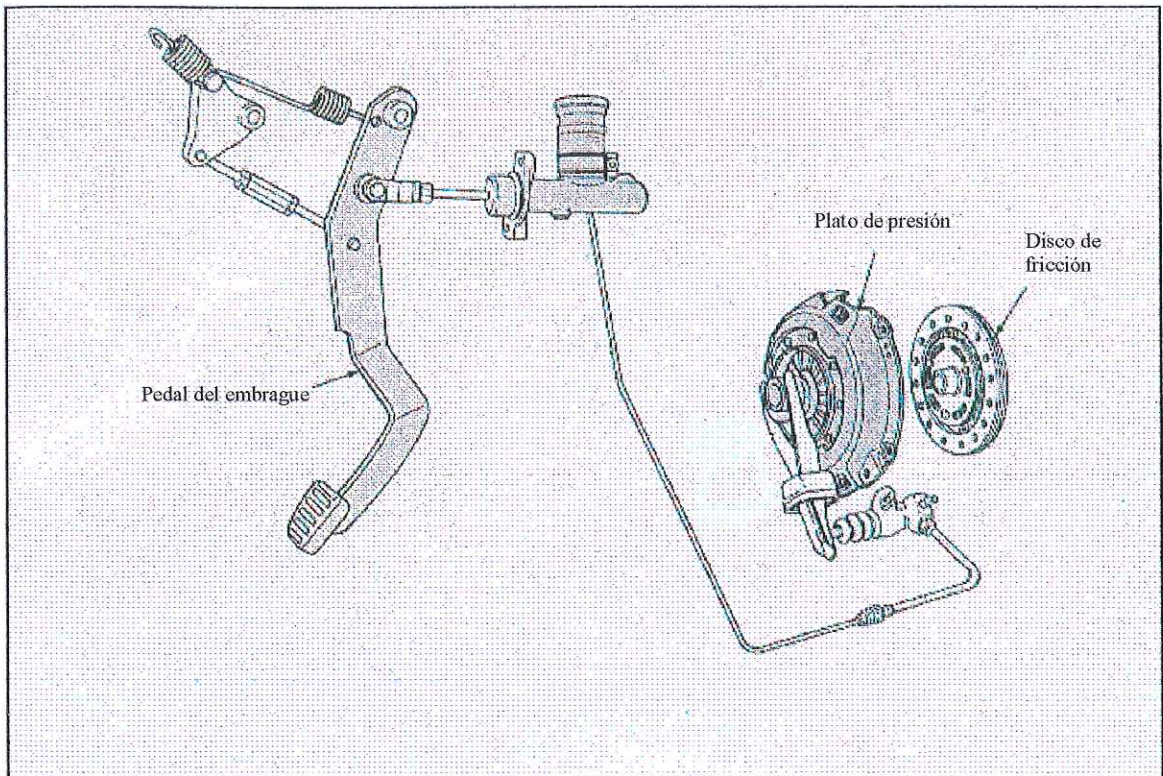


Figura 2.2. Esquema de la conexión del embrague.

CAPITULO TRES

PROCESO DE MANUFACTURA

En este capítulo se exponen los pasos del proceso de producción, dándose una breve introducción y explicación de cada uno de éstos procesos. El proceso se compone de los siguientes pasos:

- 3.1 Recepción de materias primas
- 3.2 Trenzado de hilo
- 3.3 Polvos y mezclas
- 3.4 Impregnación
- 3.5 Formado
- 3.6 Vulcanizado
- 3.7 Lijado
- 3.8 Tratamiento térmico
- 3.9 Rectificado
- 3.10 Inspección visual
- 3.11 Marcado
- 3.12 Barrenado
- 3.13 Recubrimiento antipolvo
- 3.14 Embalado

3.1 Recepción de materias primas.

Parte del proceso donde se hace la recepción y el almacenamiento de las materias primas. Antes de la aceptación de las materias se hacen pruebas físico - químicas para verificar que cumple con las especificaciones requeridas.

3.2 Trenzado de hilo

En esta parte del proceso se realiza el trenzado del hilo véase figura 3.1, se entrelazan hilos de cobre, textiles y de fibra de vidrio en uno solo véase figura 3.2 (a), los hilos dependen del material que se vaya a producir. Aquí se hacen las pruebas de trenzado, que consisten en determinar el número de vueltas en una distancia determinada. El hilo trenzado se va enrollando en bobinas véase figura 3.2 (b), de ahí se almacena en un anaquel para posteriormente pasar a la siguiente etapa.



Figura 3.1. Area de trenzado, las bobinas se van acomodando en los anaqueles para su uso posterior.



(a)

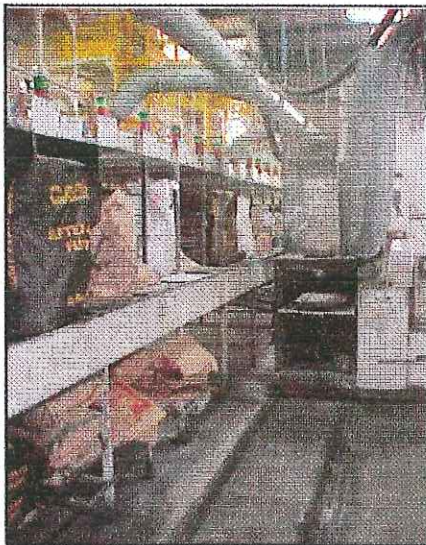


(b)

Figura 3.2. Area de trenzado (a) Hilos de cobre, de fibra de vidrio y textiles son extraídos de sus bobinas para ser trenzados, (b) trenzado de los hilos y embobinado.

3.3 Polvos y mezclas.

Aquí se mezclan los polvos químicos catalizadores, resinas y caucho. Este proceso se realiza pasando un contenedor sobre un riel donde se va vaciando cada polvo (figuras 3.3 (a) y (b)), en la cantidad requerida, dependiendo del material que se va a producir.



(a)



(b)

Figura 3.3 Area de polvos y mezclas (a) contenedor recibiendo polvos para la mezcla, (b) Contenedor al final del ciclo.

Después de tener la mezcla de los polvos en el contenedor, éste se vacía en un heliglobo* véase la figura 3.4. El heliglobo previamente es cargado con tricloroetileno, que sirve de dispersante para los polvos y solvente del caucho. Aquí el heliglobo gira hasta que se dispersan los polvos y se disuelve el caucho. Terminado el ciclo de giro, se hace una prueba de aspecto para saber si la muestra cumple con las condiciones deseadas para pasar a la siguiente etapa.

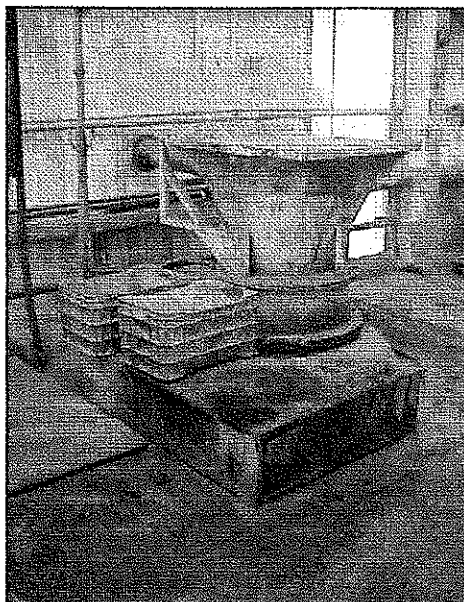


Figura 3.4. Parte superior del heliglobo donde son vaciados los polvos.

3.4 Impregnación.

Básicamente, en esta etapa el hilo trenzado se impregna con la mezcla de polvos. En la impregnación la mezcla penetra en el hilo y este sube por unas torres de secado que se encuentran a la temperatura de extracción del tricloroetileno donde es secado. El hilo entra como se recibe del área de trenzado y sale impregnado véanse figuras 3.5 (a) y (b). En esta parte del proceso se hace una evaluación del hilo para conocer si esta dentro de los rangos de impregnación.

* Heliglobo: Un mezclador a gran escala con chaqueta aislante para controlar temperatura.



(a)



(b)

Figura 3.5. Area de impregnado (a) Entrada del hilo a la torre de impregnación (b) hilo impregnado saliendo de las torres.

Después de la impregnación el hilo se deposita en cuñetes en donde se almacena para su uso posterior véase figura 3.6.



Figura 3.6. Hilo impregnado cayendo en los cuñetes.

3.5 Formado.

En esta operación el hilo toma la forma inicial de la pasta, llamada preforma véase figura 3.7 (a). En el formado el hilo impregnado se toma de los cuñetes, se coloca en la formadora en donde se pasa el hilo por una báscula, se pesa y se corta hasta alcanzar el peso especificado. El hilo pesado se inyecta mediante una boquilla véase figura 3.8 sobre un disco que gira dándole la forma final de la preforma.

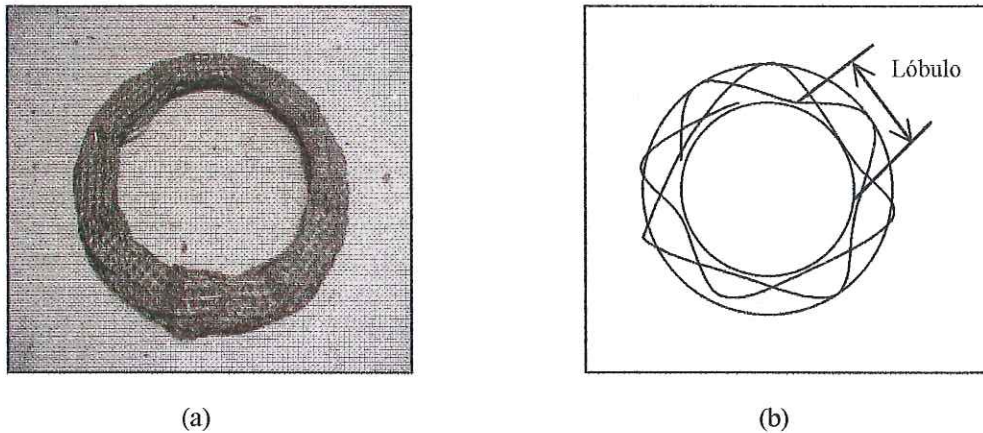


Figura 3.7. (a) Preforma (b) Forma de la lobulación de la preforma, manera como se va tejiendo la preforma.

Las preformas tienen como patrón de formado una plantilla, en donde, la preforma debe de ajustar en el diámetro interno y externo de ella. Cada referencia tiene un dispositivo de formado. Estas preformas tienen que cumplir con propiedades de peso y lobulación véase figura 3.7 (b).

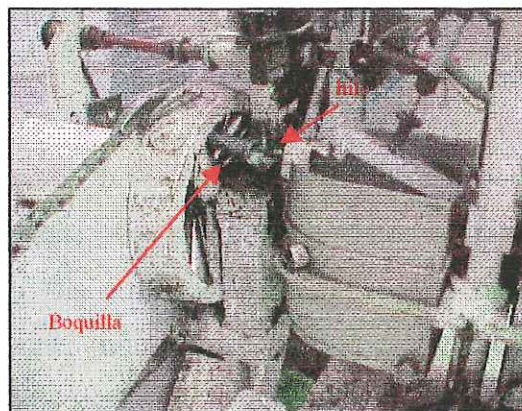


Figura 3.8. Boquilla inyectando el hilo al disco que esta girando.

3.6 Vulcanizado.

El proceso de vulcanizado que se efectúa se basa en una secuencia de tres niveles de presión intercaladas entre dos etapas de liberación de gases con reacción química exotérmica véase la figura 3.9. Calentamiento externo es aplicado a la pasta a través de unos platos de calentamiento donde la presión se transmite por unos pistones de presión.

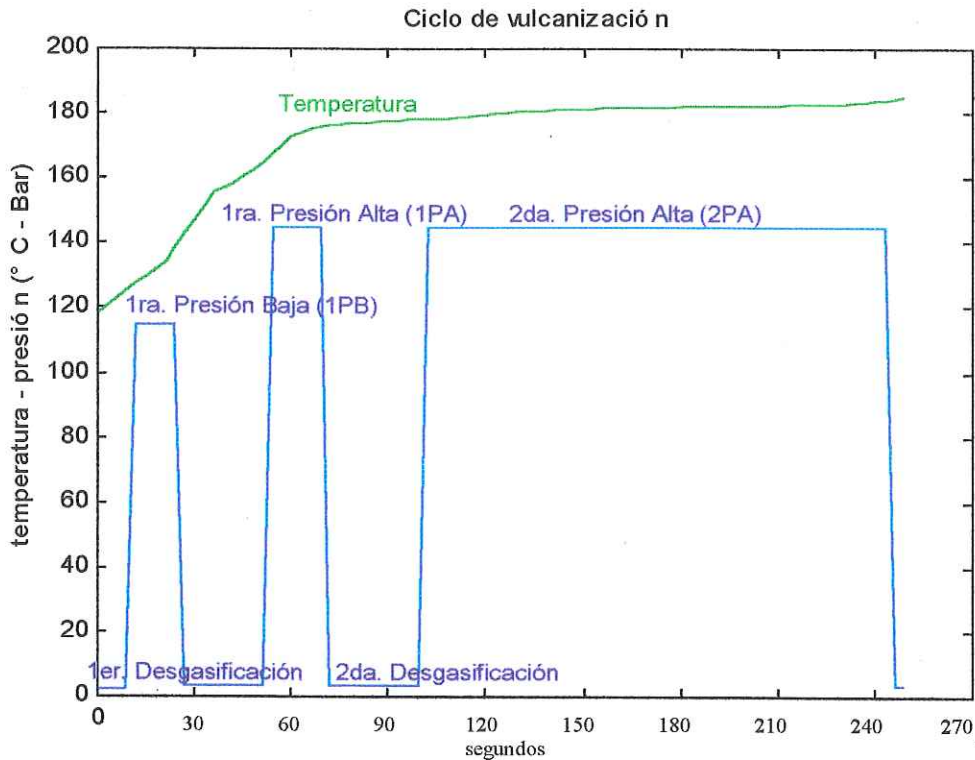


Figura 3.9. Ciclo de vulcanización de los discos de fricción, gráfica presión – temperatura - tiempo.

La transformación de la preforma en pasta es el resultado del proceso de vulcanización, la que se realiza a temperatura y presión controladas dentro de una prensa. Esta prensa está compuesta de platos de calentamiento, cada uno contiene en su interior resistencias eléctricas distribuidas uniformemente para el calentamiento de los mismos. En la parte inferior del primer plato están dos pistones, el principal y el lateral. Todo el sistema está cubierto por una armadura (carcasa), con el fin de eliminar las fugas de calor. Los sistemas de temperatura y de presión son controlados por medio de un sistema de control PLC. Los platos tienen un termopar que indica la temperatura a la que se encuentran.

Una célula esta compuesta por una prensa, dos formadoras y dos operadores. Cada operador es responsable de diez portafolios y una formadora. El operador debe hacer el cambio de preformas de cinco portafolios y formar preformas, mientras los otros cinco portafolios están dentro de la prensa en el ciclo de vulcanizado. El cambio de preformas consiste en desmontar las piezas ya vulcanizadas de los moldes y poner preformas nuevas en los mismos para el ciclo siguiente.

Las preformas son colocadas dentro de los moldes, estos a su vez están contenidos en portafolios véase figura 3.10 (a). Los portafolios son calentados por conducción térmica por los platos de calentamiento. Antes de colocar la preforma en el molde se aplica un agente desmoldante, cuya función es evitar que la preforma se quede pegada al desmontarla. Una vez colocada la preforma dentro del molde, los portafolios son colocados dentro de la prensa sobre los platos de calentamiento véase figura 3.10 (b) y el ciclo comienza.



(a)



(b)

Figura 3.10. (a) Portafolio abierto de dos moldes (b) Portafolios dentro de la prensa descansando sobre los platos de calentamiento.

Una vez iniciado el ciclo las puertas de la prensa se cierran, la presión se incrementa mientras los platos calientan los portafolios por conducción térmica. El ciclo consta de tres compresiones véase figura 3.11 (a) con sus respectivas desgasificaciones que ayudan a eliminar los gases acumulados véase figura 3.11 (b). El ciclo tiene una duración aproximada de cuatro minutos con diez segundos.

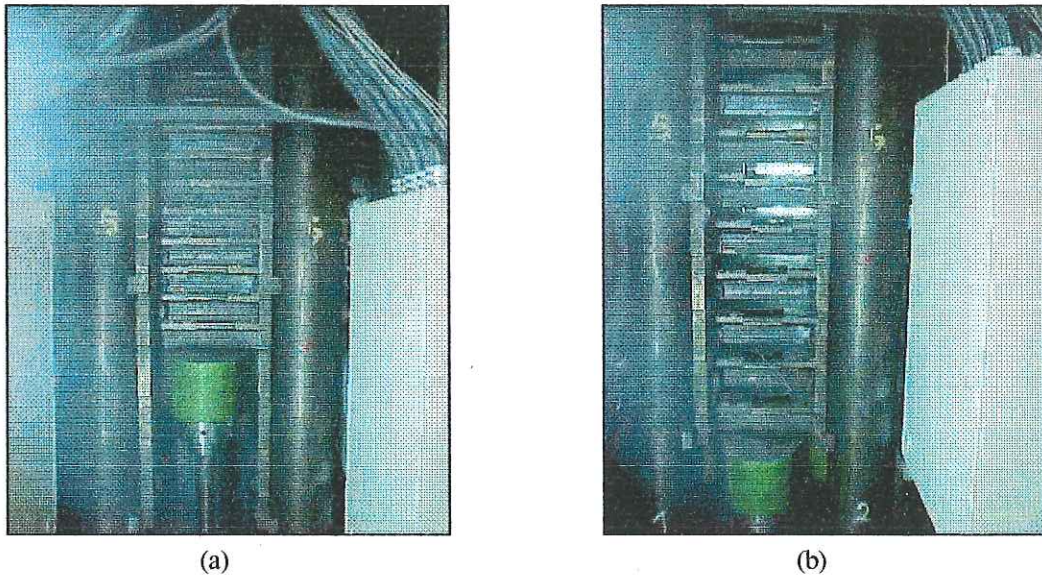


Figura 3.11. Sistema de presión (a) Pistón efectuando compresión sobre el sistema plato – portafolio, (b) descompresión del pistón, momento en que se realizan las desgasificaciones.

El resultado de este proceso es el disco de fricción vulcanizado véase figura 3.12. En esta parte del proceso ocurre la transformación de la materia.

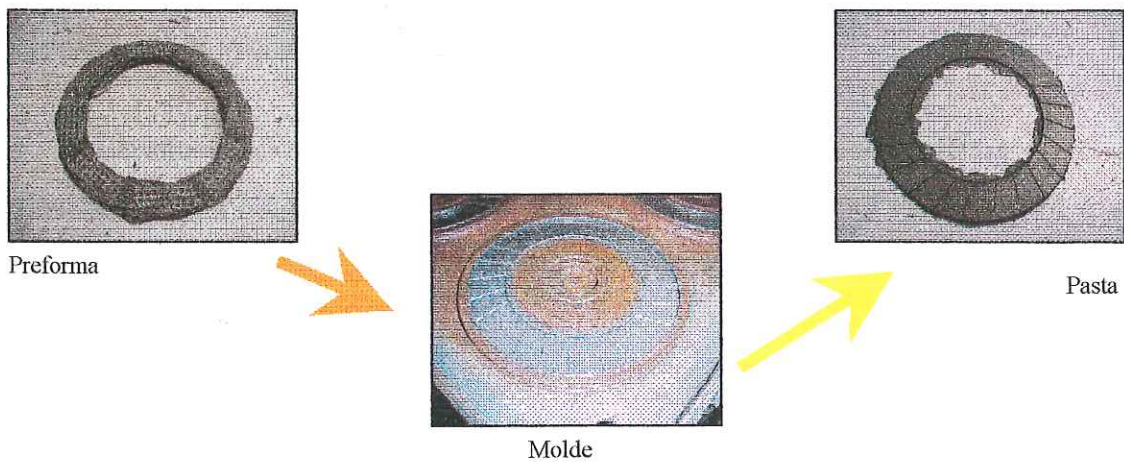


Figura 3.12. Transformación de la materia, la preforma pasa al molde en el proceso de vulcanización y sale en forma de pasta.

3.7 Lijado.

Después del vulcanizado se efectúa el lijado proceso donde se elimina la rebaba de resina que se forma en el vulcanizado y también se le da el espesor inicial requerido, con cierta planicidad en las superficies para evitar distorsiones en el tratamiento térmico.

3.8 Tratamiento térmico.

En esta parte del proceso se realiza la cocción final de las pastas. Dentro del horno las pastas se calientan hasta los 250°C durante un tiempo determinado. Aquí las pastas se colocan en anaqueles para entrar al horno. Dentro del horno hay un sistema de ventiladores que llevan el calor a todas las partes de éste.

3.9 Rectificado.

Aquí se da a la pasta el espesor y paralelismo requerido por el cliente, además de que se elimina una pequeña capa que se produce durante el tratamiento térmico. La pasta entra mediante una banda y es sometida a desbaste al mismo tiempo en la parte superior e inferior mediante el giro encontrado de dos piedras abrasivas.

3.10 Inspección visual.

En esta etapa se revisan las pastas para separar las que tienen defectos de las que no véase figura 3.13. Dentro los defectos principales que se tienen están el poro perfil, fisuras superficiales, porosidad, huellas superficiales, hilo arrancado.

Operación sin valor agregado en la cual se separan las piezas con defectos visuales, cabe aclarar que entre menos se presente un defecto esta operación se agiliza.



Figura 3.13. Operadora efectuando el control de aspecto visual.

3.11 Marcado.

En esta operación se da rastreabilidad al proceso con el número de parte del cliente. Aquí se marcan las piezas con su ficha de fabricación (lote), espesor, cliente, fecha y material de la pieza.

3.12 Barrenado.

Se da a cada dimensión el plano de barrenado (acomodamiento de barrenos) deseado para el cliente. Los barrenos sirven para alojar los segmentos o diafragmas en el armado del embrague.

3.13 Recubrimiento antipolvo.

Aquí a las pastas se les da un recubrimiento de látex, esto es para darle buena presentación a la pasta y evitar desprendimiento de polvo en la línea del cliente. Las pastas se apilan en anaqueles, que más tarde se sumergen en una tina de látex, se sacan y se les da un ciclo de calentamiento para que el látex cure.

3.14 Embalado.

Por último, las pastas se empacan y se colocan dentro de cajas. Cada caja se etiqueta con la referencia, cantidad, cliente, etc.

CAPITULO CUATRO TRABAJO EXPERIMENTAL

Para determinar la morfología y el origen del defecto se realizan estudios de microscopía electrónica y calorimetría diferencial al material antes y después del proceso de vulcanización para conocer el comportamiento térmico.

El análisis por microscopía electrónica de barrido muestra que el material de las piezas que se analizan vulcaniza homogéneamente tanto en piezas con defecto como en piezas sin defecto. La presencia del defecto se debe a que las resinas del material no alcanzan a fluir completamente dentro del molde.

El análisis diferencial de barrido (DSC) nos señala el comportamiento térmico del material y la temperatura de inicio de reacción de vulcanizado del material.

4.1 Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido.

El principio de operación del microscopio de barrido electrónico es muy simple y puede ser entendido refiriéndose a la figura 4.1. Un haz de electrones fino (B) es barrido sobre la superficie del espécimen en sincronización con el punto de la pantalla del tubo de rayos catódicos (TRC). Un detector monitorea la intensidad de una señal secundaria proveniente del espécimen (por ejemplo electrones secundarios) y la brillantez del punto del TRC se controla por una amplificación de la señal detectada. Si, por alguna razón, la intensidad de la señal secundaria emitida cambia a través del espécimen entonces el contraste será visto en la imagen sobre el TRC, Dawn Chescoe y Peter J. Goodhew [9].

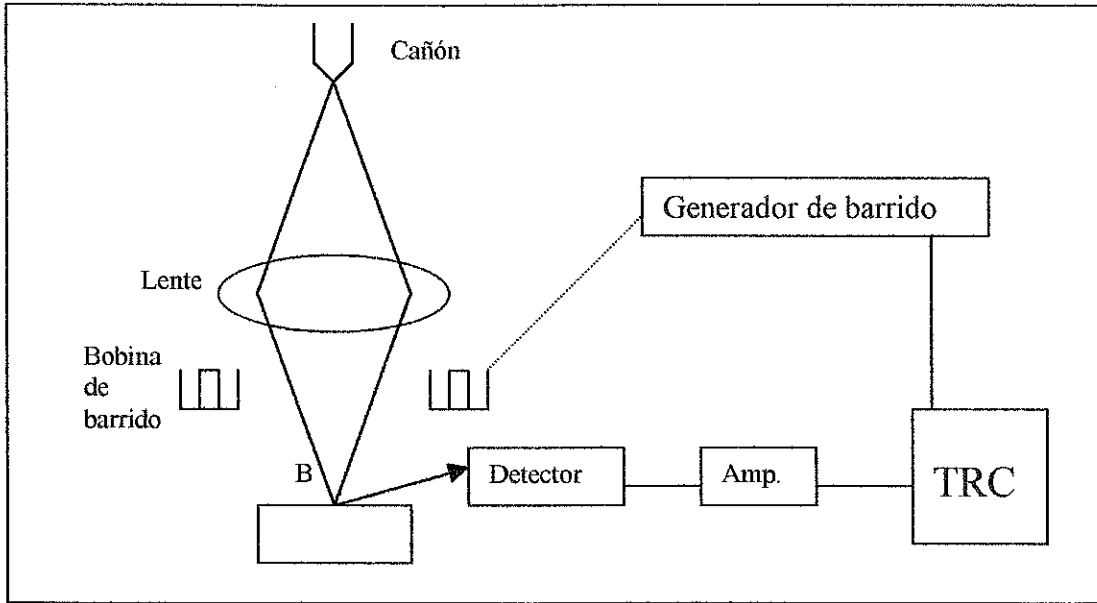


Figura 4.1. Componentes de un microscopio electrónico de barrido.

La tarea del microscopio electrónico de barrido es el análisis de la morfología a nivel microscópico del defecto. Se analizan piezas con y sin defecto para determinar si las resinas logran vulcanizar.

En una pieza sin defecto véase la figura 4.2 vista a 500 aumentos puede observarse que no existe ninguna diferencia de contraste, lo que demuestra que la reacción de vulcanizado ocurre de manera homogénea al menos en la porción analizada.

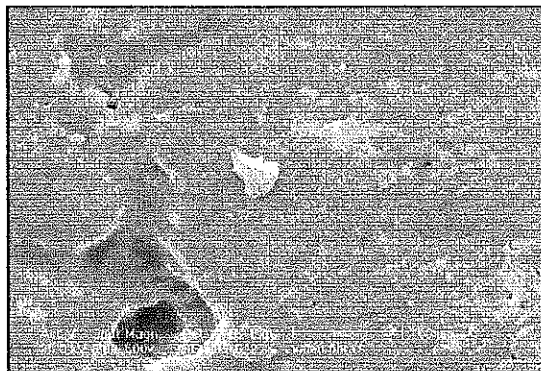


Figura 4.2. Pieza sin defecto vista a 500 aumentos, las resinas logran vulcanizar homogéneamente.

De la misma manera en una pieza con defecto véanse figuras 4.3 (a) y (b) se observa que la resina no alcanza a fluir pues aparecen gotas de hule (resina) véase figura 4.3 (b), lo cual indica una falta de distribución en el molde debido a la energía interfasial alta. La resina endurece antes de tiempo pues la temperatura de transición es superada rápidamente y no llega a la pared del molde.

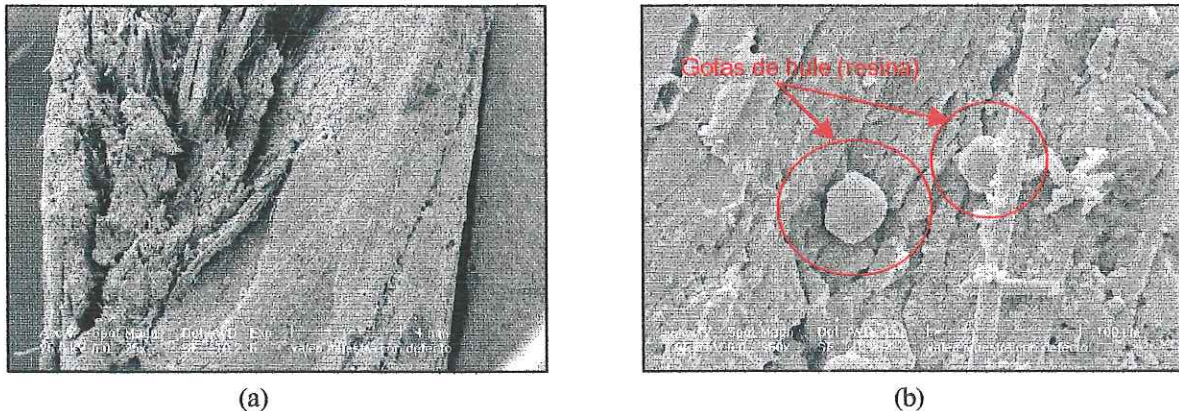


Figura 4.3. Pieza con defecto (a) Pieza vista a 25 aumentos, se observa la falta de material en el canto exterior (b) Pieza vista a 350 aumentos, se observa que las gotas de hule (resina) no alcanzan a fluir completamente.

Después del análisis de varias piezas con y sin defecto se concluye que las resinas logran vulcanizar. En el caso de las piezas con defectos las gotas de hule (resina) se endurecen antes de llegar a la pared del molde, de tal manera que la temperatura de transición es superada rápidamente lo cual indica que la temperatura no permite fluir a la resina y así es como se produce el defecto.

4.2 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

En la calorimetría diferencial de barrido, el calor absorbido o emitido por un sistema químico es observado midiendo la diferencia de temperatura entre ese sistema y un compuesto inerte de referencia (a menudo alumina, carburo de silicio o cuentas de vidrio) mientras las temperaturas de los dos son incrementadas a velocidades constantes.

En la calorimetría diferencial de barrido, la muestra y la sustancia de referencia están también sujetas a un continuo incremento de temperatura; aquí sin embargo, el calor es adicionado a la muestra o a la referencia tal y como sea necesario para mantener a los dos a la misma temperatura. El calor añadido, que es registrado, compensa por esas pérdidas o ganancias como una consecuencia de las reacciones endotérmicas o exotérmicas que ocurren en la muestra véase figura 4.4, Douglas A. Skoog y Donald M. West [10].

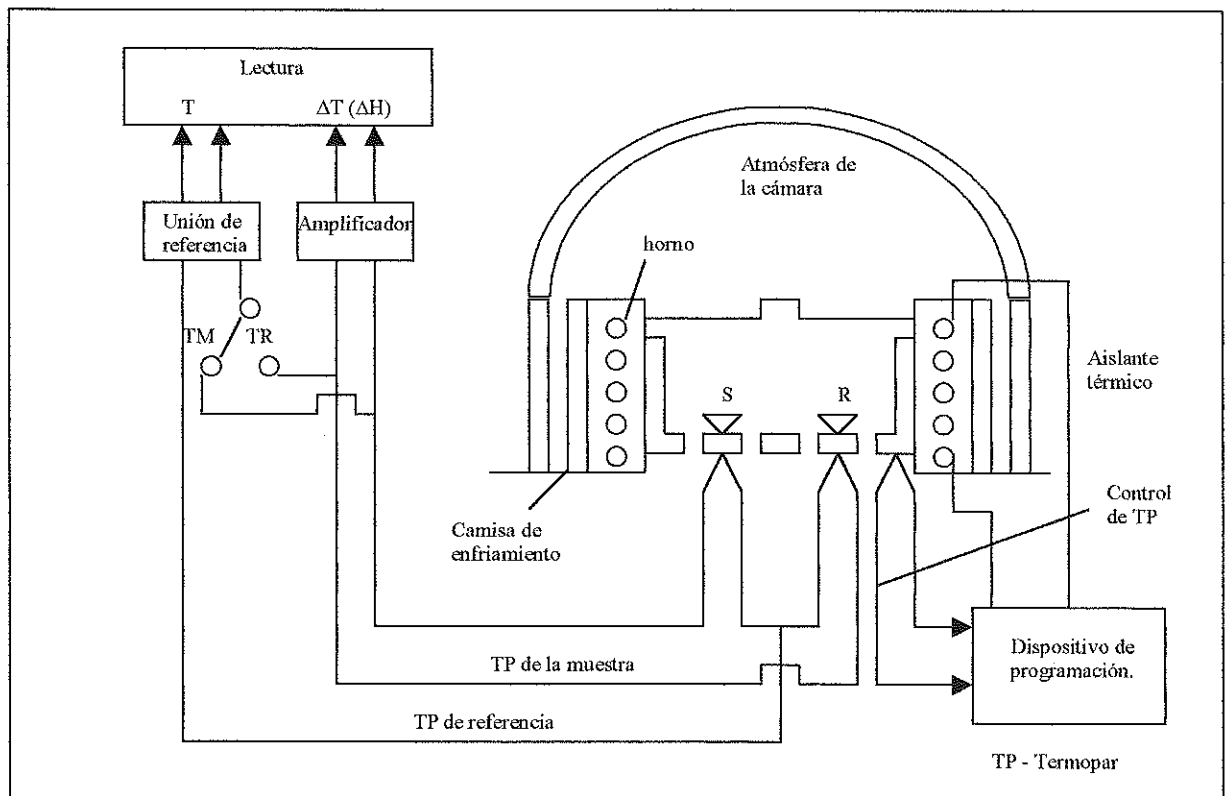


Figura 4.4. Diagrama esquemático de un Fisher Serie 300 sistema diferencial de análisis térmico.

Para conocer el comportamiento térmico del material se analizan muestras de hilo impregnado mediante un análisis diferencial de barrido (DSC) para determinar la temperatura de inicio de la reacción de vulcanizado.

Para este estudio se analiza hilo impregnado con características opuestas, es decir a una velocidad de impregnación, temperatura de impregnación, porcentaje de impregnación y porcentaje tricloroetileno residual máximas y mínimas que puede tener el hilo impregnado véase tabla 4.1; y con esto poder determinar un rango de temperaturas de transición.

Tabla 4.1. Características sobre muestras de hilo impregnado para el material 490/2.

| | Muestra A | Muestra B |
|--------------------------|-----------|-----------|
| Torre | 3 | 3 |
| Peso (5 mts.) | 94.85 | 88.63 |
| Vel/Ciclos | 25 | 34 |
| Temperatura | 127 °C | 136 °C |
| % impregnación | 168.58% | 150.10% |
| % tricloro resid. | 1.23% | 0.78% |

De acuerdo a las gráficas del comportamiento térmico (figuras 4.5 y 4.6) se puede observar a que temperatura empieza a reaccionar el material, la temperatura máxima de reacción y la entalpía de reacción determinándose que entre los 179.3°C y 185°C el material se encuentra en la temperatura de transición.

Las muestras fueron calentadas de 30°C a 270°C para observar la reacción exotérmica de vulcanización. Se reportaron los resultados de temperatura de inicio de reacción, temperatura del máximo de reacción y entalpía de reacción. Las condiciones experimentales fueron:

| | |
|-----------------------------|--|
| Masa de la muestra: | 10 mg. (aprox.) |
| Velocidad de calentamiento: | 10 °C / min. |
| Calibración con estándares: | In, Sn |
| Intervalo de temperatura: | 30°C a 270°C |
| Atmósfera: | N ₂ alta pureza (100 ml/min.) |

Se realizan pruebas de análisis de calorimetría variando las velocidades de calentamiento, observándose que en el comportamiento térmico del material no existe alguna variación significativa.

Resultados del análisis por DSC.

Tabla 4.2. Resultados del análisis por DSC.

| Muestra | T de inicio de reacción (°C) | T máximo de reacción (°C) | Entalpía de reacción (cal/g) |
|---------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| A | 185 | 205.4 | 0.7496 |
| B | 179.3 | 205.87 | 1.629 |

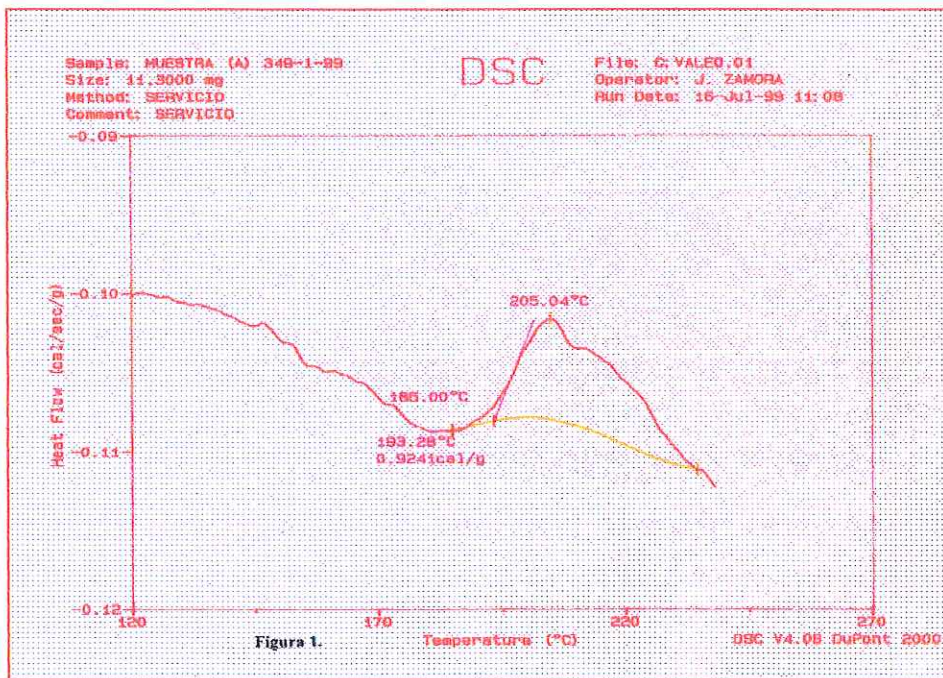


Figura 4.5. Análisis de DSC de la misma A de hilo impregnado, se observa que la reacción empieza a los 185°C de temperatura, teniendo una temperatura máxima de reacción de 205.04°C.

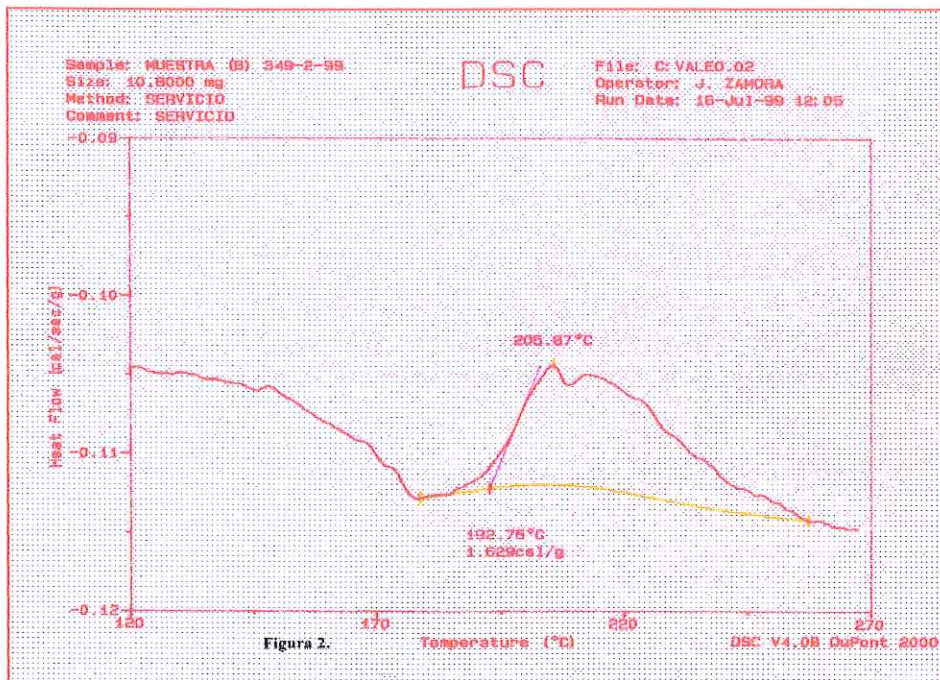


Figura 4.6. Análisis de DSC de la muestra B de hilo impregnado, se observa que la reacción empieza a los 179.3°C de temperatura, teniendo una temperatura máxima de reacción de 205.87 °C.

Se determina que en un rango de temperatura entre 179.3°C y 185°C el material se encuentra en etapa de transición (la resina es maleable), es decir, pasa de un estado termolíquido a uno termofijo y es aquí donde debe aplicarse la presión para que la resina logre expandirse en todo el molde para evitar el defecto conocido como “poro perfil”.

Material 808

Se realiza un análisis de DSC con hilo impregnado del material 808 y conocer a que temperatura inicia la reacción de vulcanizado. La figura 4.7 muestra el comportamiento térmico del material 808. Este material tiene una temperatura de inicio de reacción de 177.81°C.

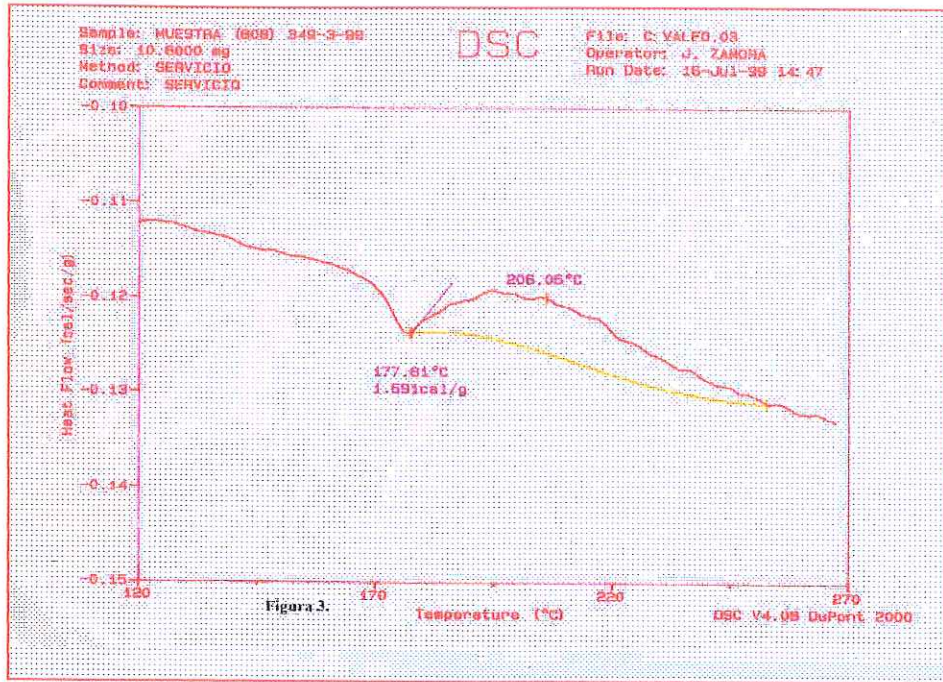


Figura 4.7. Análisis de DSC de la muestra de hilo impregnado del material 808, se observa que la reacción empieza a los 177.81°C de temperatura, teniendo una temperatura máxima de reacción de 206.05 °C.

CAPITULO CINCO

MODELACION COMPUTACIONAL

Una vez establecido el rango de temperaturas de inicio de la reacción del material, se hace un análisis del proceso por medio de método de elementos finitos (MEF) utilizando estado transitorio, a fin de predecir el comportamiento térmico del material durante el proceso de vulcanizado y predecir el tiempo en el cual el material alcanza estas temperaturas.

En esta investigación, las pruebas experimentales y la simulación se concentran en un plato de calentamiento de la prensa, para los demás platos se sigue la misma metodología.

5.1 Análisis por el método de elementos finitos.

Propiedades.

Para el análisis por el método de elementos finitos es necesario conocer las propiedades de los materiales, para el disco de fricción y para el herramental*.

Herramental: acero AISI – SAE 1045.

Disco de fricción: material 490/2.

Se determinan las propiedades de los materiales que el método requiere siendo estas el calor específico, la conductividad térmica y la densidad.

El calor específico (C_p) del material se calcula de la ecuación

$$\Delta H = C_p \times \Delta T \quad (5.1)$$

*Herramental. Es el conjunto del portafolio y los moldes ensamblados.

Primeramente se realiza un ajuste de curvas con una sección de la figura 4.5 del análisis por DSC cuando comienza la reacción del material véase figura 5.1 para obtener una función del comportamiento del material entre 458 K y 501 K. Esta función se integra y se evalúa para obtener el calor específico del material.

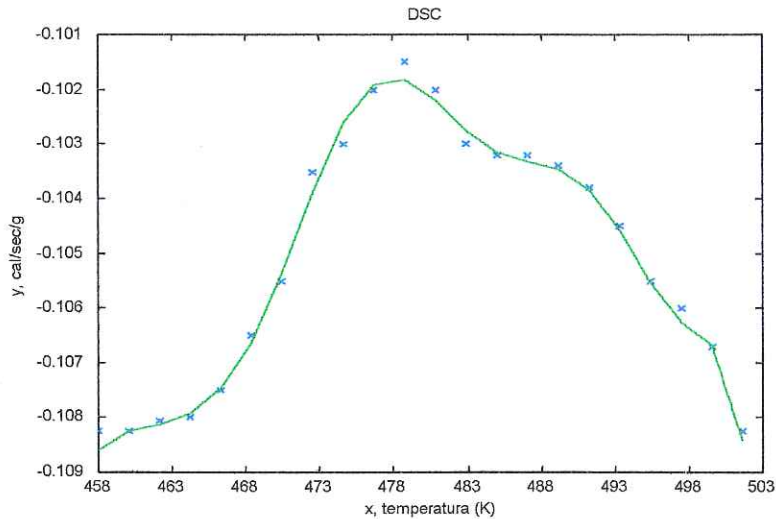


Figura 5.1. Sección de la figura 4.5, parte donde hay reacción del material de 458 K a 501 K.

Integrando

$$\Delta H = \int_{Tf}^{Ti} f(x) dx \tag{5.2}$$

Sustituyendo las temperaturas inicial y final de la reacción, se obtiene un calor específico de 1260 J / kg. – K. Se efectúa la misma metodología para la figura 5.2, obteniéndose un valor semejante al de la figura 5.1.

Las propiedades de los materiales que son utilizados en la simulación se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Propiedades del material 490/2 y del acero AISI-SAE 1045 utilizados para la simulación.

| Propiedad | Material 490/2 | Acero AISI-SAE 1045 |
|--------------------------------|----------------|---------------------|
| Densidad (kg./m ³) | 1900 | 7801 |
| Calor específico (J/kg.-K) | 1260 | 473 |
| Conductividad térmica (W/m-K) | 0.15 | 42 |

La densidad del material se obtiene de la referencia [11]. La conductividad térmica del material es aproximada a la del caucho [11], [12], [13]. Se sabe que los hilos de cobre y los hilos textiles pueden influir en este valor, sin embargo, como es difícil medirlo, se realizó un estudio de sensibilidad donde la conductividad térmica se varía en la simulación, mostrando poca influencia en el resultado de los tiempos de calentamiento.

Para el acero los datos se obtienen de la referencia [13].

Metodología de solución

Las técnicas de elementos finitos son metodologías numéricas para resolver ecuaciones diferenciales en forma aproximada. A través del uso de interpolación, se satisface a la ecuación diferencial en una pequeña región del dominio, llamado elemento finito, las soluciones de todos los elementos que conforman el dominio, son posteriormente conectadas para obtener una representación global de la solución de la ecuación y sus condiciones iniciales y/o de frontera. Dicha representación se obtiene a través de un sistema de ecuaciones algebraicas lineales o no, que requiere resolverse, se recomienda su consulta ver referencias [14], [15] y [16].

En conducción de calor, el estado transitorio se manifiesta cuando la temperatura de un punto se incrementa o decrementa a través de tiempo. Se tiene un proceso de calentamiento o enfriamiento.

La ecuación más general de transferencia de calor por conducción en sólidos, en tres dimensiones (3 – D) es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -Q + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.3)$$

definida en un dominio Ω , donde:

| | |
|-----------------|---|
| k_x, k_y, k_z | Conductividades térmicas del material en direcciones x, y y $z, W / mK$ |
| c | Calor específico de material, $J / kg K$ |
| ρ | Densidad del material, kg / m^3 |
| Q | Término de generación interna de calor, W / m^3 |
| T | Función de temperatura, K |
| t | Variable independiente de tiempo, s |
| x, y, z | Coordenadas espaciales, m . |

La ecuación diferencial que modela el comportamiento de un objeto bidimensional con transferencia de calor en estado transitorio es la ecuación (5.4).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q - C \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \tag{5.4}$$

De donde, con conceptos de cálculo variacional es posible obtener para un elemento el funcional del problema para $Q = 0$:

$$J(T) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left[k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy + \iint_{\Omega} C \frac{\partial T}{\partial t} dx dy - \int_{T_2} T q ds + \frac{1}{2} \int_{T_3} h T^2 ds - \int_{T_3} h T T_{\infty} ds \tag{5.5}$$

Sustituyendo la forma discreta de la temperatura, se obtiene un sistema matricial:

$$[[K] + [C]]^{(e)} \{\phi\}^{(e)} + [\hat{K}]^{(e)} \{\phi\} = \{q\}^{(e)} + \{C\}^{(e)} \tag{5.6}$$

donde:

$$\hat{K}_{i,j} = \iint_{\Omega} CN_i^{(e)} N_j^{(e)} dx dy \tag{5.7}$$

y $\hat{\phi} = \frac{d\phi}{dt}$.

Sustituyendo las funciones de forma en la ecuación (5.7) y resolviendo, se tiene

$$\hat{K}_{i,j} = c/12, \text{ si } i \neq j$$

$$\hat{K}_{i,j} = c/6, \text{ si } i = j$$

donde c es el calor específico del material.

Solución numérica, estado transitorio

La ecuación (5.6) por conveniencia se agrupa de la siguiente forma:

$$[K_{\phi}] \{\phi\} + [\hat{K}] \{\dot{\phi}\} = \{R(t)\} \tag{5.8}$$

para:

$$[K_{\phi}] = [K]^{(e)} + [C]^{(e)} \tag{5.9}$$

$$\{R(t)\} = \{q\}^{(e)} + \{C\}^{(e)} \tag{5.10}$$

Utilizando series de Taylor, se puede determinar que:

$$\{\phi\}_{t+\Delta t} = \{\phi\}_t + \Delta t \{\dot{\phi}\}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \{\ddot{\phi}\}_t + \dots \tag{5.11}$$

$$\{\dot{\phi}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{\phi}\}_t + \Delta t \{\ddot{\phi}\}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \{\dddot{\phi}\}_t + \dots \tag{5.12}$$

$$\{\ddot{\phi}\}_{t+\Delta t} = \{\ddot{\phi}\}_t + \Delta t \{\dddot{\phi}\}_t + \dots \tag{5.13}$$

Suponiendo que $\{\dot{\phi}\}$ varía linealmente en el tiempo Δt :

$$\{\dot{\phi}\}_t \approx \frac{1}{\Delta t} [\{\phi\}_{t+\Delta t} - \{\phi\}_t] \quad (5.14)$$

Sustituyendo la ecuación (5.14) en la ecuación (5.11), se obtiene que $\{\phi\}$, esta dada por

$$\{\phi\}_{t+\Delta t} \approx \{\phi\}_t + \Delta t \{\dot{\phi}\}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \frac{1}{\Delta t} [\{\dot{\phi}\}_{t+\Delta t} - \{\dot{\phi}\}_t] \quad (5.15)$$

desarrollando la ecuación (5.15)

$$\{\phi\}_{t+\Delta t} \approx \{\phi\}_t + \Delta t \{\dot{\phi}\}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \{\dot{\phi}\}_{t+\Delta t} - \frac{\Delta t}{2} \{\dot{\phi}\}_t \quad (5.16)$$

donde

$$\{\phi\}_{t+\Delta t} \approx \{\phi\}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} [\{\dot{\phi}\}_t + \{\dot{\phi}\}_{t+\Delta t}] \quad (5.17)$$

Despejando $\{\dot{\phi}\}_{t+\Delta t}$ en la ecuación (5.8):

$$\{\dot{\phi}\}_{t+\Delta t} = [\hat{K}]^{-1} [\{R\}_{t+\Delta t} - [\hat{K}] \{\phi\}_{t+\Delta t}] \quad (5.18)$$

y sustituyendo $\{\dot{\phi}\}_{t+\Delta t}$ en la ecuación (5.18)

$$\{\phi\}_{t+\Delta t} = [\hat{K}]^{-1} \left[\{R\}_{t+\Delta t} - [\hat{K}] \{\phi\}_t - [\hat{K}] \frac{\Delta t}{2} [\{\dot{\phi}\}_t + \{\dot{\phi}\}_{t+\Delta t}] \right] \quad (5.19)$$

agrupando términos, se obtiene:

$$\{\phi\}_{t+\Delta t} = \left[[\hat{K}] + \frac{\Delta t}{2} [k] \right]^{-1} \left[\{R\}_{t+\Delta t} - [\hat{K}] \left[\{\phi\}_t + \frac{\Delta t}{2} \{\dot{\phi}\}_t \right] \right] \quad (5.20)$$

Algoritmo de solución

La distribución de temperatura se determina a partir de las condiciones iniciales con la ayuda de las ecuaciones antes desarrolladas. El algoritmo de solución propuesto para el problema es el siguiente:

1. Con la temperatura inicial en tiempo cero ($t = 0$) se calcula $\{\phi\}_{t+\Delta t}$ utilizando la expresión (5.18).
2. Se calcula $\{\phi^i\}_{t+\Delta t}$ de la expresión (5.20).
3. Calcular $\{\phi\}_{t+\Delta t}$ de la ecuación (5.17).
4. Hacer $t = t + \Delta t$.
5. Continuar el proceso hasta llegar al valor deseado de tiempo t o el estado estable.

Elemento.

Se utiliza un elemento ejesimétrico de dos dimensiones con la capacidad de conducción térmica. El elemento tiene cuatro nodos con un grado de libertad y temperatura en cada nodo. El elemento es aplicable en análisis térmicos transitorios. La geometría, los nodos y el sistema de coordenadas de este elemento son mostrados en la figura 5.2. [17].

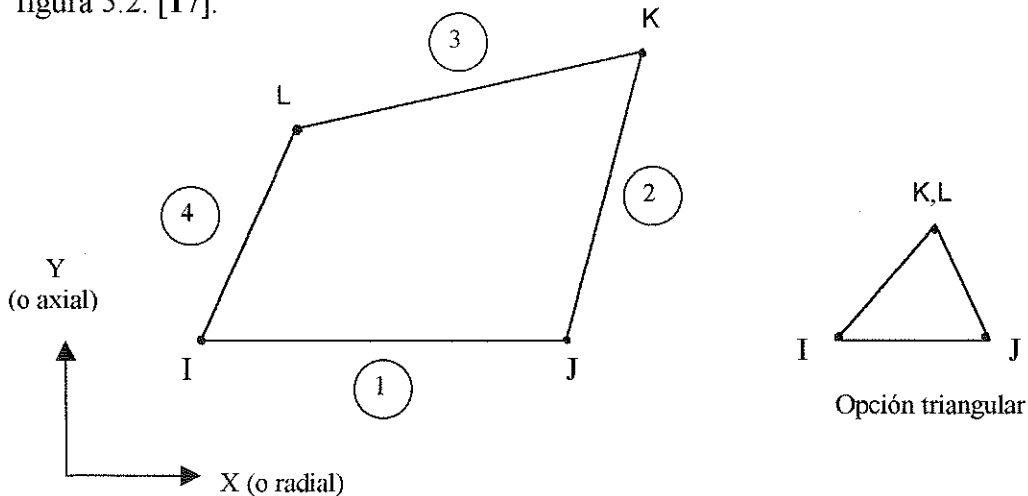


Figura 5.2. Elemento utilizado en la simulación (Plane 55) Thermal Solid.

Condiciones de Frontera

Para la simulación se recurre a un modelo simple ejesimétrico, de pared compuesta, siendo la parte central del modelo la preforma, puesto que es aquí donde el proceso de vulcanización tiene lugar. Las condiciones de frontera se aplican como se muestra en la figura 5.3.

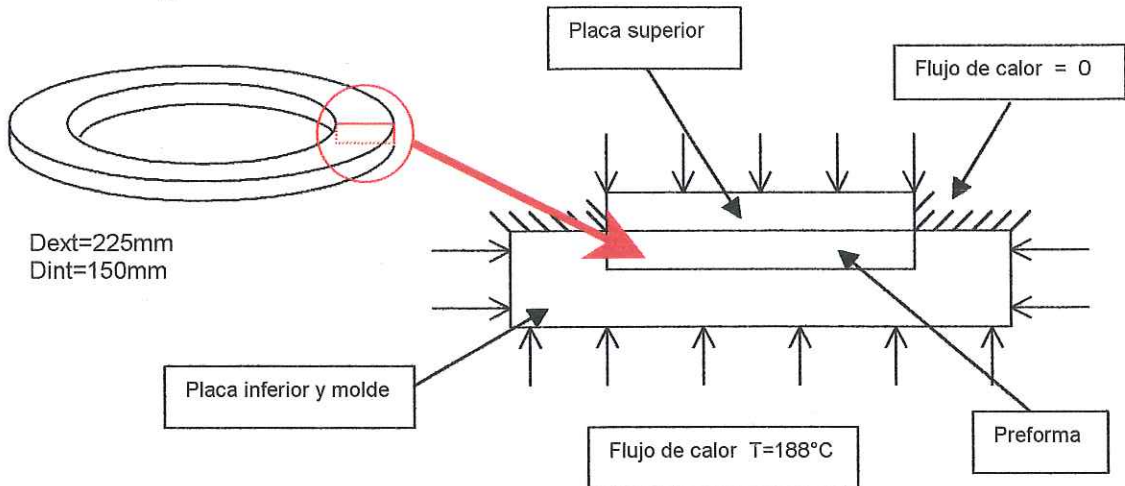


Figura 5.3. Condiciones de frontera que se aplican en la simulación, vista transversal.

Condiciones iniciales

Para las condiciones iniciales, la preforma entra a la etapa de prensado a una temperatura inicial de 115°C . La preforma tiene esta temperatura porque se calienta mientras esta en tiempo de espera*.

El portafolio que rodea a la preforma tiene una temperatura inicial de 155°C . Esta temperatura se debe a que el portafolio se enfría durante el tiempo de espera.

Estos datos fueron directamente medidos en el proceso.

*El tiempo de espera se define como el tiempo que transcurre desde que la preforma entra en el molde hasta que entra la primera baja presión (1PB).

Dimensiones.

Para las dimensiones de la simulación se asume un comportamiento ejesimétrico en el eje de las ordenadas, por lo tanto las dimensiones en el eje de las abscisas son las siguientes: La *placa superior* tiene 4.0 mm que es el espesor de la placa superior, la *pasta* tiene un espesor de 4.0 mm y la *placa inferior* tiene un espesor de 9.7 mm que incluye 4.0 mm de la placa inferior, 4.5 mm que es el espesor del molde y 1.2 mm del espesor de la plantilla ranurada* véase figura 5.4.

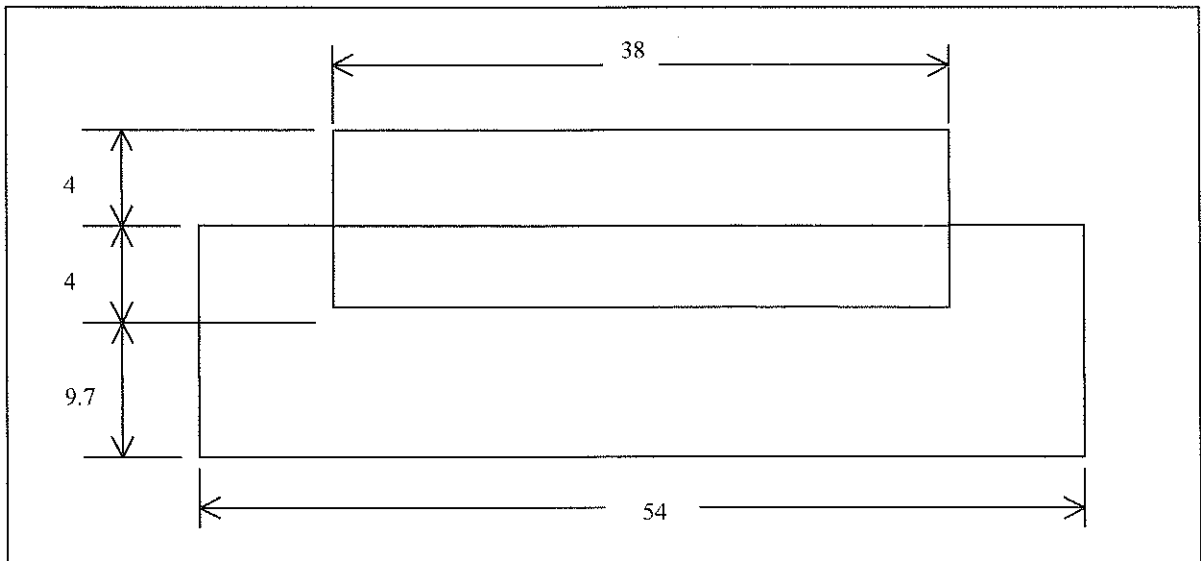


Figura 5.4. Plano del modelo sección transversal, unidades en mm.

Malla.

La simulación por computadora se hace utilizando el método de elementos finitos, con el paquete comercial ANSYS. La malla utilizada, consta de 2128 elementos de tipo cuadrilátero ejesimétrico véase figura 5.5. Primeramente se hace un estudio de convergencia para determinar el tamaño de los elementos de la malla. El paquete resuelve la ecuación típica de calor con el término transitorio (ecuación 5.3).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -Q + \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

*Plantilla ranurada es el fondo que se coloca en el molde para darle la forma final de ranuras a la pasta.

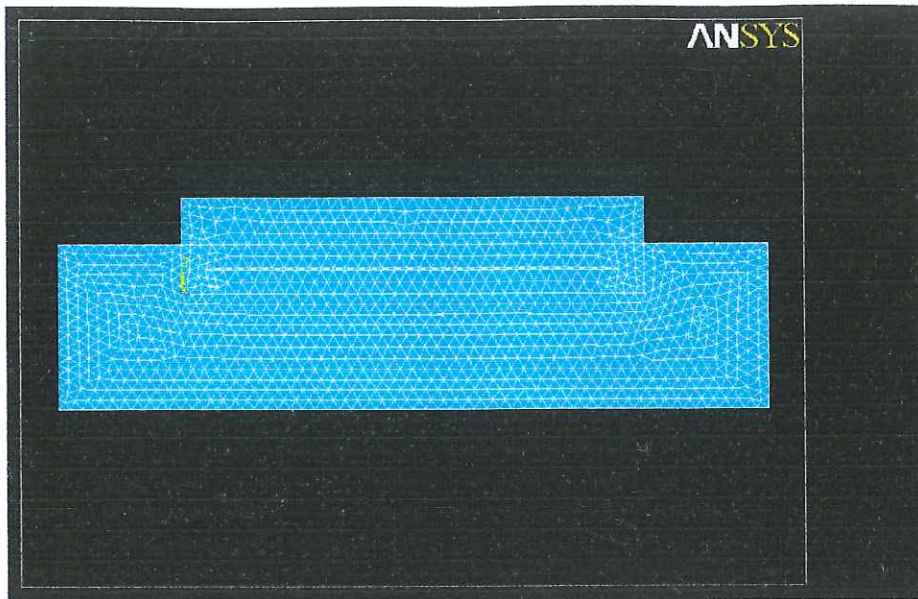


Figura 5.5. Mallado del modelo consta de 2128 elementos de tipo cuadrilátero ejesimétrico.

Simulación por computadora.

En esta sección se muestra la simulación del comportamiento térmico del proceso en estado transitorio. Se realiza la simulación del proceso y en un tiempo de 1 segundo se verifican las condiciones del herramental y pasta (figura 5.6). La preforma inicia a una temperatura de 115°C y el herramental se encuentra a 155°C.

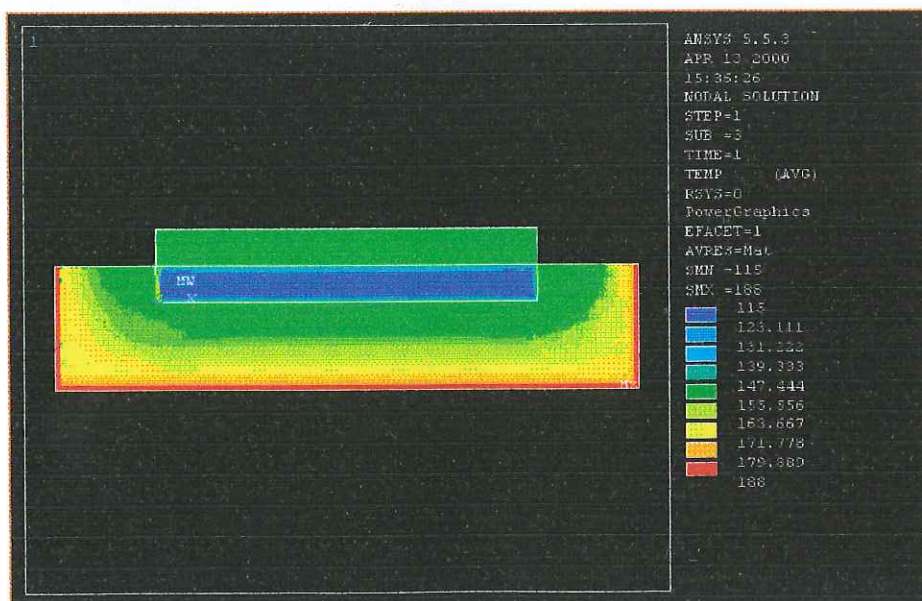


Figura 5.6. Simulación en un tiempo de 1 segundo se observan los perfiles de temperatura, la preforma esta a 115°C, la placa inferior está en contacto con el plato a una temperatura de 188°C y el herramental esta a 155°C.

En un tiempo de 20 segundos el centro de la preforma alcanza 143.31°C véase figura 5.7.

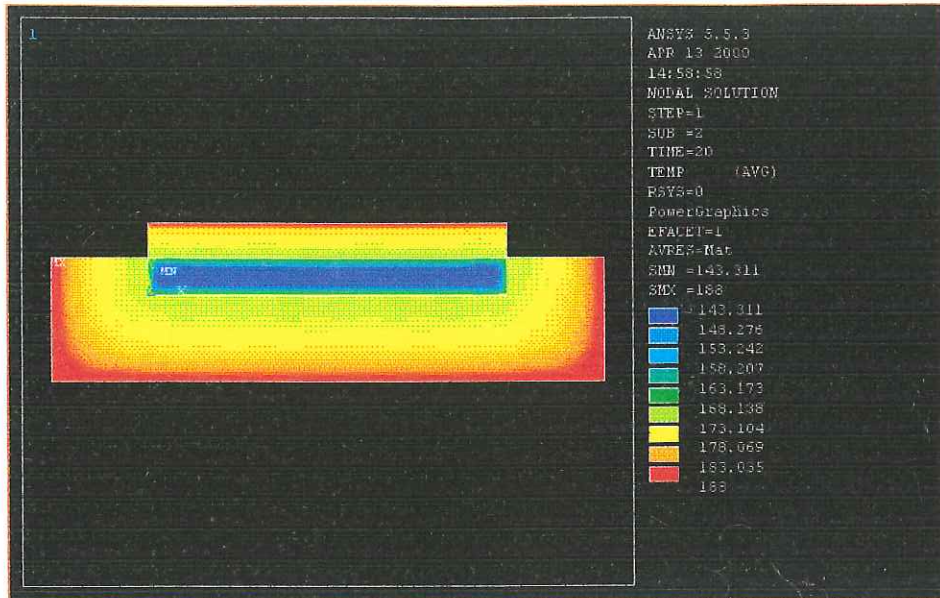


Figura 5.7. Modelación en un tiempo de 20 segundos, el centro de la pasta se encuentra a 143.31°C .

Los resultados muestran que la temperatura de inicio de reacción de 179.32°C se alcanza en un tiempo de 64 segundos véase figura 5.8.

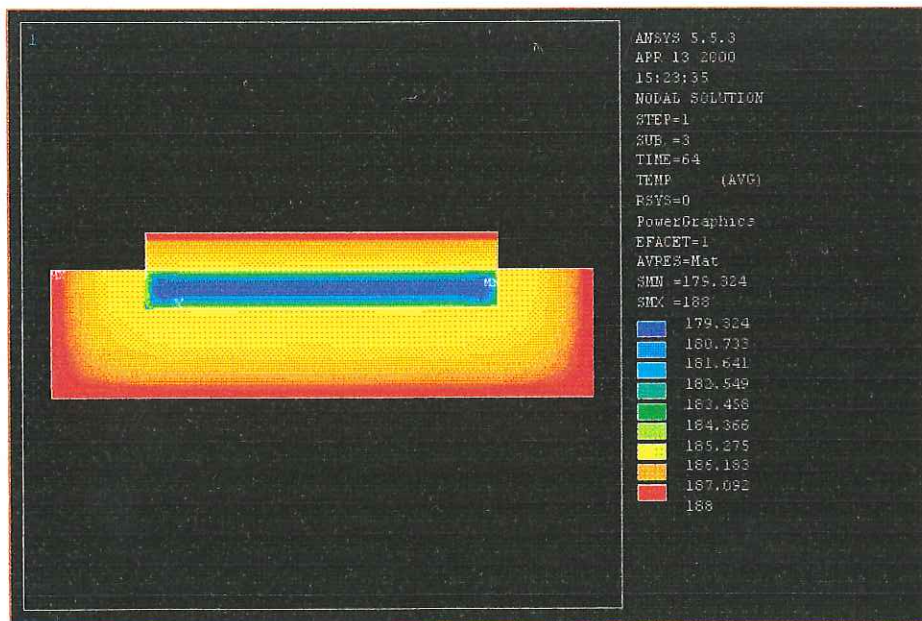


Figura 5.8. Simulación en un tiempo de 64 segundos, el centro del material vulcanizado alcanza una temperatura de 179.324°C , temperatura en la cual el material empieza a reaccionar.

Una vez simulado el proceso la figura 5.9 muestra el comportamiento térmico del material a través del tiempo en el centro de la preforma.

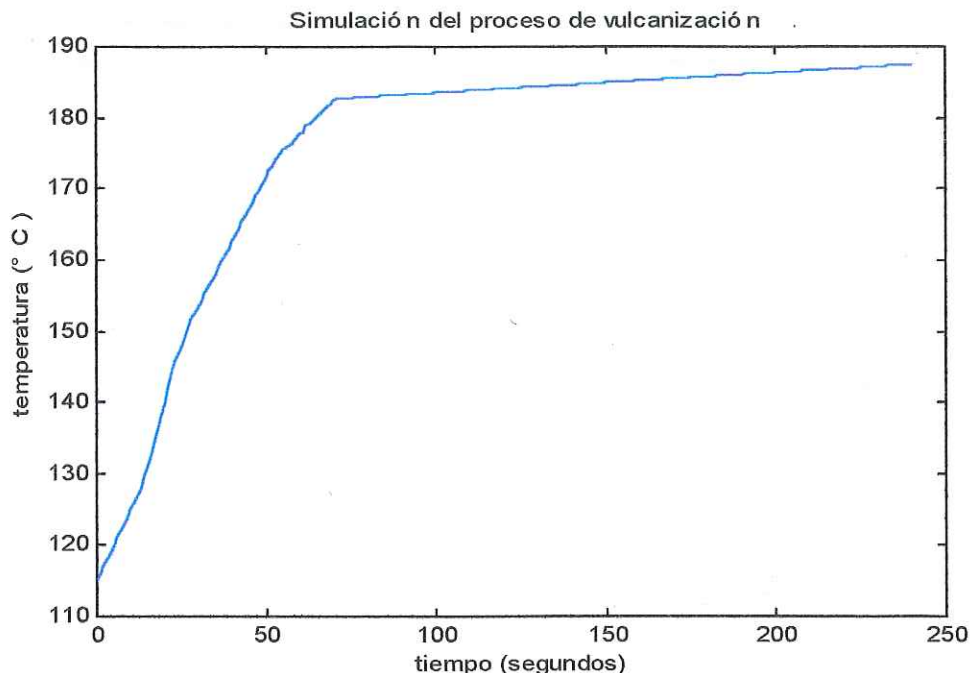


Figura 5.9. Comportamiento térmico del material durante la simulación por computadora del proceso, monitoreada en el centro de la porción de preforma analizada.

La simulación por computadora del proceso térmico de la vulcanización establece que el material llega a una temperatura de 179.3 °C en un tiempo de 64 segundos, momento en el cual el material se encuentra en estado de transición, es aquí donde debe aplicarse la presión para que las resinas se expandan por todo el molde y evitar el defecto conocido como “poro perfil”.

5.2 Pruebas experimentales.

Medición Presión – Temperatura – Tiempo en la pasta.

Para conocer el comportamiento térmico del material en planta se efectúan pruebas experimentales. Se colocaron termopares en el interior de varias preformas véanse figuras 5.10 (a) y (b) para poder medir la temperatura durante el proceso.

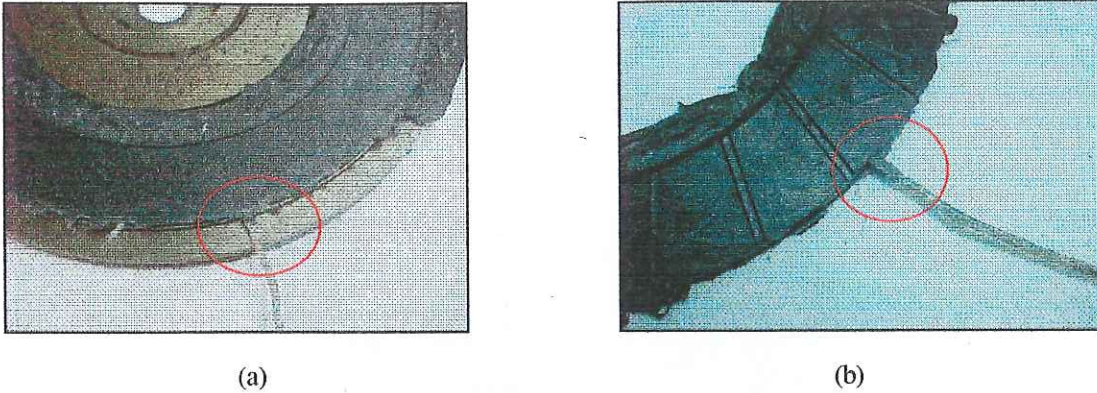


Figura 5.10. (a) Termopar dentro de preforma vulcanizada, el cordón del termopar cruza a través de un molde ranurado. (b) Termopar dentro de preforma vulcanizada, cara ranurada de la pasta.

Con este dispositivo se logra obtener el comportamiento térmico de la preforma dentro del molde durante el proceso de vulcanizado. Se realizan tres pruebas con temperaturas de inicio diferentes. Estas pruebas se efectúan en el mismo portafolio, plato y bajo los mismos parámetros (tiempo, presión, temperatura del plato de calentamiento).

La primer prueba experimental se realiza a una temperatura inicial en la preforma de $116\text{ }^{\circ}\text{C}$, en esta prueba se alcanza la temperatura de $179.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 60 segundos, teniéndose como resultado una pieza sin defectos y con el espesor dentro de especificaciones véase figura 5.11.

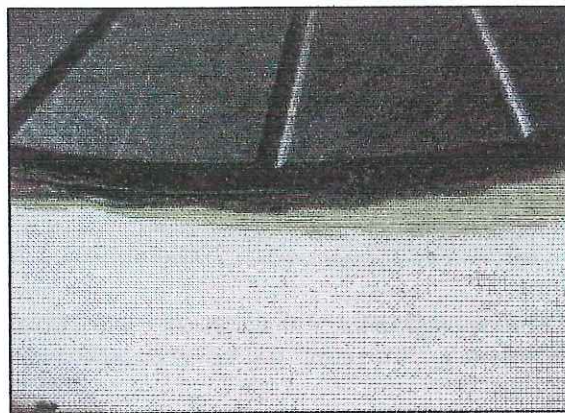


Figura 5.11. Pieza sin defecto, la preforma inicia a una temperatura de 116°C y alcanza los 179.5°C en un tiempo de 60 segundos.

En la segunda prueba experimental la preforma inicia a una temperatura de 73°C y en un tiempo de 1 minuto y 39 segundos alcanza la temperatura de 179.7°C , teniéndose una pieza sin defecto pero con dimensiones fuera de especificaciones, el espesor es bajo véase figura 5.12.

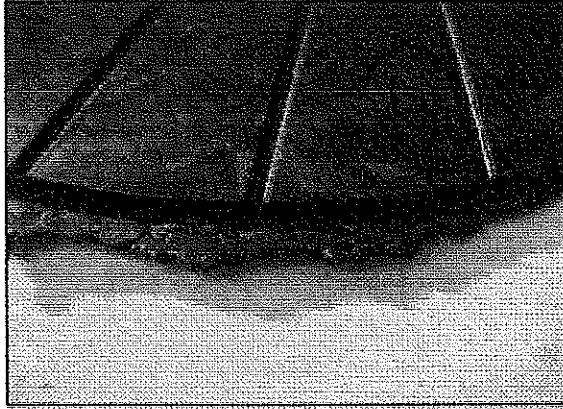


Figura 5.12. Pieza sin defecto, la preforma inicia a una temperatura de 73°C alcanzando la temperatura de 179.7°C en un tiempo de 1 minuto con 39 segundos, la pieza no tiene el espesor requerido, fue bajo.

Para la tercer prueba experimental la preforma inicia a una temperatura de 151.2°C y en un tiempo de 30 segundos alcanza la temperatura de 179.56°C teniéndose una pieza con el defecto conocido como "poro perfil" y el espesor es alto véase figura 5.13.

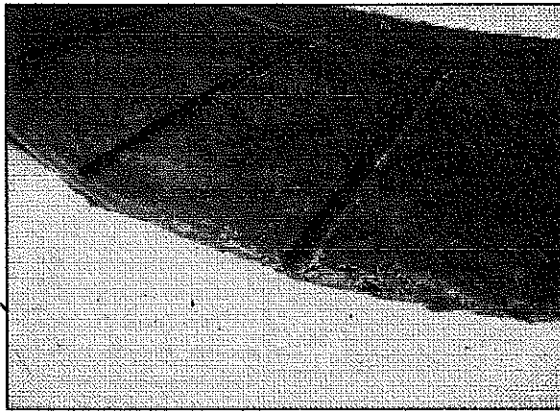


Figura 5.13. La preforma inicia a una temperatura de 151.2°C alcanzando la temperatura de 179.56°C en un tiempo de 30 segundos, teniéndose una pieza con "poro perfil" y espesor alto.

En la figura 5.14 se observa el comportamiento térmico que tienen las tres pruebas experimentales donde la temperatura de inicio de las preformas es diferente.

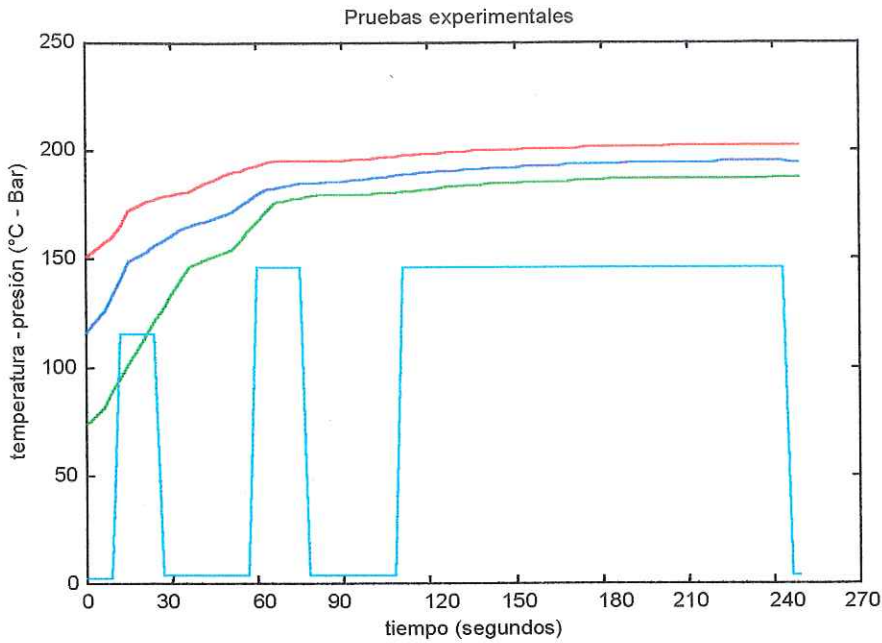


Figura 5.14. Muestra el comportamiento térmico de las pruebas experimentales realizadas a temperaturas diferentes de inicio de las preformas. La primer prueba se inicia a 116°C, la segunda a 73°C y la tercera a 151.2°C.

Con estas pruebas se hace un ajuste de curvas para el comportamiento de la preforma en el proceso de vulcanizado (figura 5.15). Para este ajuste se tomaron los primeros 70 segundos de la figura 5.14, después de este tiempo no hay cambios significativos en la temperatura (estado estable).

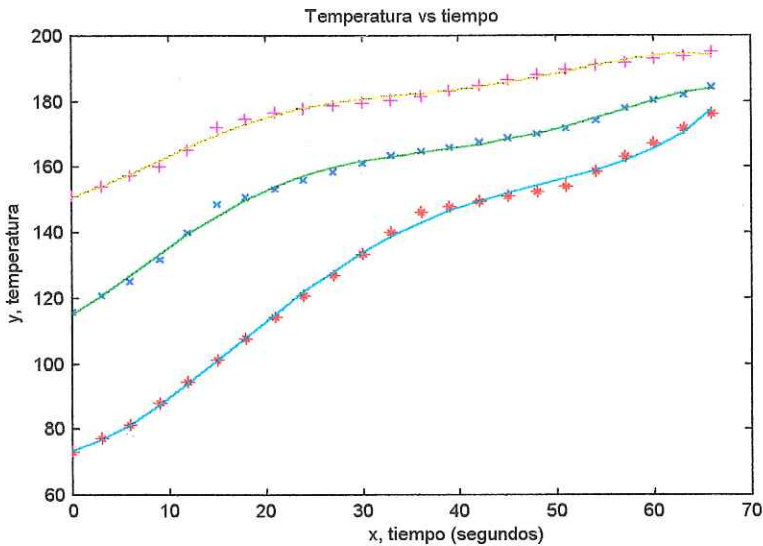


Figura 5.15. Ajuste de curvas sobre el comportamiento térmico del material en los primeros 70 segundos, después de este tiempo ya no hay cambios significativos en la temperatura (estado estable).

De este ajuste de curvas se obtiene la siguiente ecuación:

$$T - (At^5 + Bt^4 + Ct^3 + Dt^2 + E) = F \tag{5.21}$$

Tabla 5.2. Coeficientes de la ecuación 5.21.

| Variable | A | B | C | D | E | T |
|----------|------------|-----------|---------|---------|--------|-----------|
| Valor | -5.182E-07 | 8.633E-05 | -0.0047 | 0.07486 | 1.5827 | 179.3,185 |

Sustituyendo en la ecuación (5.21) los valores de la temperatura de transición T = 179.3°C y 185°C se obtienen las temperaturas de inicio de prensado de 114.2°C y 119.9°C para un tiempo de t = 60. Estas temperaturas se logran ajustando los tiempos de espera.

Se hace otra prueba experimental reduciendo el tiempo de la primera desgasificación (figura 5.16) para conocer el comportamiento de la presión dentro del ciclo. Se observa que la presión actúa como un catalizador, es decir acelera el calentamiento de la preforma mientras está accionada. La temperatura de 179.3°C llega hasta el tiempo de 1 minuto con 46 segundos debido a que la preforma no se calienta lo debido antes de que la primera presión alta (1PA) se aplique.

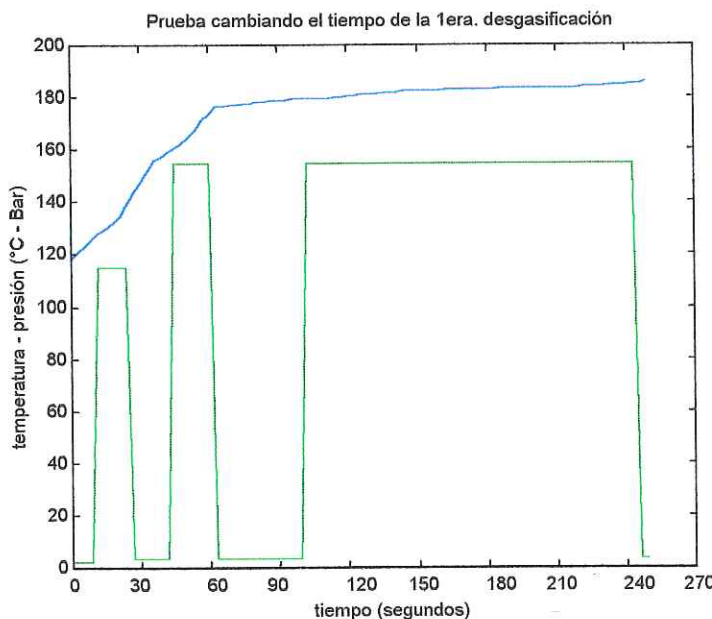


Figura 5.16. La primera presión alta (1PA) se aplica antes de lo debido, el material se calienta en esta etapa y alcanza la temperatura de transición en un tiempo de 106 segundos.

La preforma debe de tener tiempo necesario para calentarse, antes de aplicar la primera presión alta (1PA) si no incrementará la temperatura y no alcanzará la temperatura de transición dentro del tiempo requerido.

5.3 Validación de la simulación por computadora.

Calculadas las temperaturas de inicio, en planta se ajustan los parámetros de producción para obtener dichos valores. Se corre una prueba donde se mide la temperatura de la pasta en el tiempo y se compara con la simulación, obteniéndose los comportamientos mostrados en la figura 5.17.

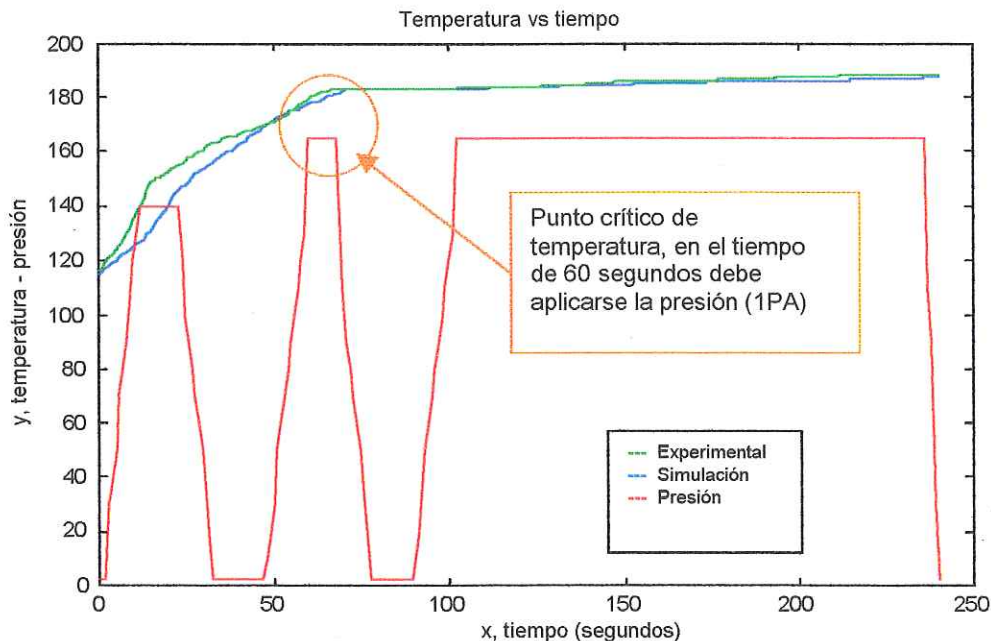


Figura 5.17. Comportamiento térmico del material, comparación entre lo simulado y las pruebas experimentales efectuadas en el proceso.

En la comparación de los comportamientos experimental y simulado hay una ligera diferencia de temperaturas dentro de los primeros 45 segundos del proceso, esto se debe a que el proceso es exotérmico y al aplicarse la presión (1PB) la temperatura de la preforma se incrementa y esta acción no fue simulada.

Se sabe que en un tiempo de 60 segundos el material se encuentra en transición, de un estado termolíquido a un termoplástico, es decir se encuentra maleable. En este momento se debe aplicar la presión (1PA) para que las resinas se expandan por todo el molde y así evitar el defecto, la simulación térmica indica que este tiempo ocurre alrededor de los 60 segundos después de iniciado el ciclo.

5.4 Ajuste de parámetros.

De acuerdo a las simulaciones y los estudios del proceso se ajustan los parámetros para que la temperatura de transición se alcance alrededor de 60 segundos. Se ajustan los tiempos de espera para que las preformas comiencen a la temperatura de inicio de acuerdo al plato de calentamiento véase tabla 5.3.

Tabla 5.3. Temperaturas de inicio para cada plato de calentamiento.

| Plato | Rango de temperatura de inicio |
|-------|--------------------------------|
| 1,6 | 109.8°C – 115.5°C |
| 2,7 | 114.2°C – 119.9°C |
| 3,8 | 117.4°C – 123.1°C |
| 4,9 | 120.6°C – 126.3°C |
| 5,10 | 124.7°C – 130.4°C |

Se hacen las mediciones de temperatura después del ajuste en todos los platos de calentamiento y se obtiene que en un tiempo alrededor de 60 segundos se alcanza el rango de temperatura de transición y en este momento es cuando se aplica la primera presión alta (1PA) para evitar el defecto véase figura 5.18.

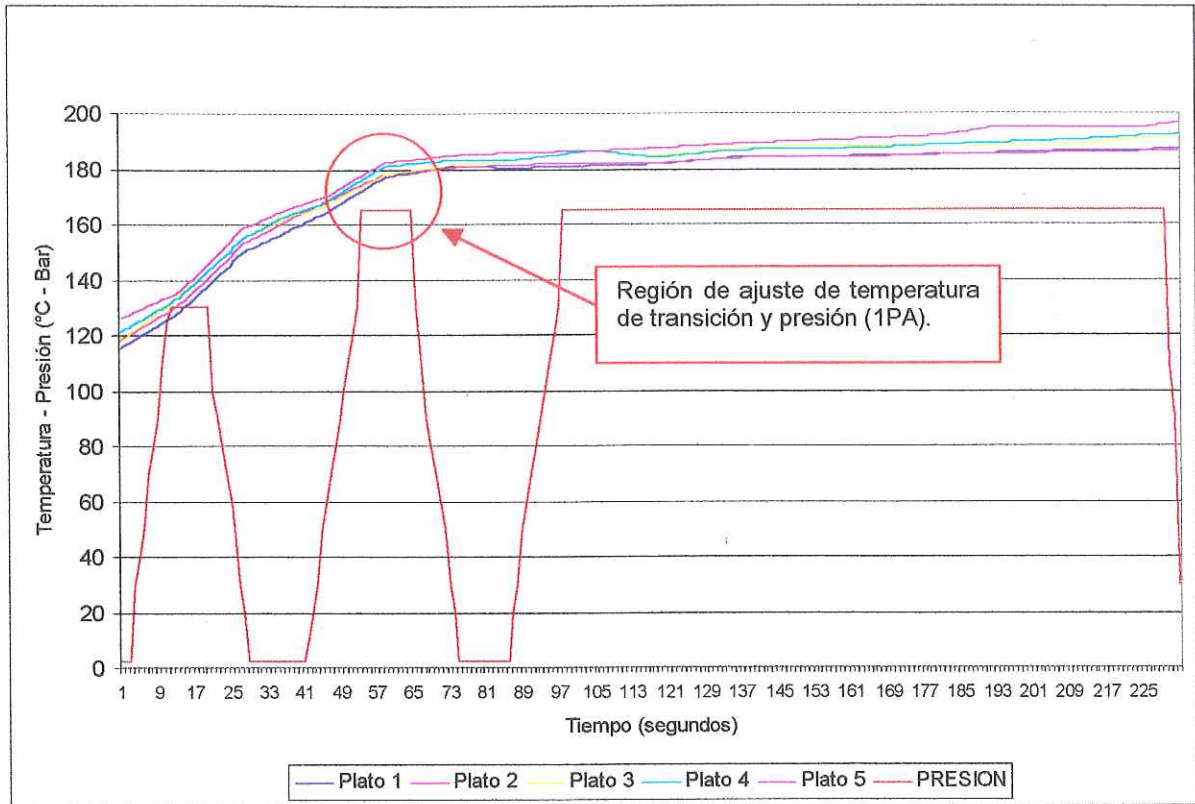
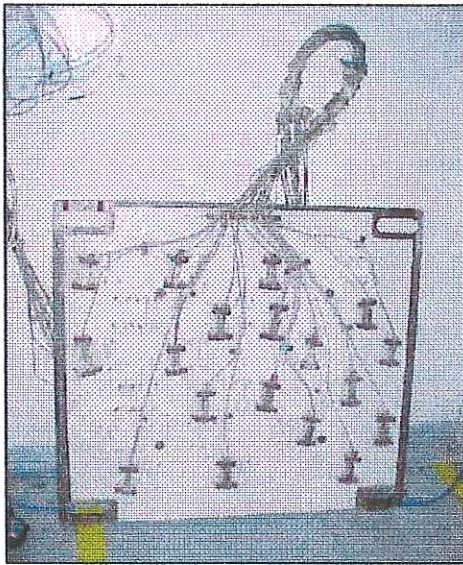


Figura 5.18. Ajuste de temperaturas de inicio de las preformas. La temperatura de transición se alcanza alrededor de los 60 segundos coordinándose con la presión (1PA).

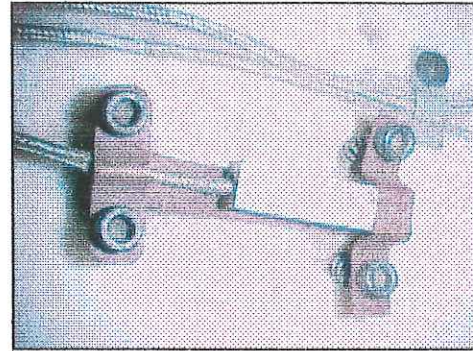
Después del ajuste se logró la sincronización entre la temperatura y la presión, la presión entra cuando la pasta está en el rango de temperaturas de transición.

5.5 Homogeneización de la temperatura en los platos de calentamiento.

Se realiza un estudio físico sobre los platos de calentamiento de la prensa para determinar la diferencia de temperaturas que existe dentro un mismo plato. Para realizar esta medición se prepara un portafolio que contiene en su superficie termopares véanse figuras 5.19 (a) y (b) que hacen contacto con el plato, estos termopares están distribuidos por todo el portafolio para obtener la temperatura en distintos puntos del plato. El estudio se realiza en un plato, mediante este estudio los otros platos también son modificados.



(a)



(b)

Figura 5.19. (a) Portafolio con termopares para medir la distribución de temperaturas en los platos de calentamiento, (b) Termopar de portafolio con el que se mide la temperatura de lo plato.

Se realiza la primera medición para conocer el estado inicial del plato de calentamiento teniéndose una diferencia de temperaturas de 34.2°C véase figura 5.20.

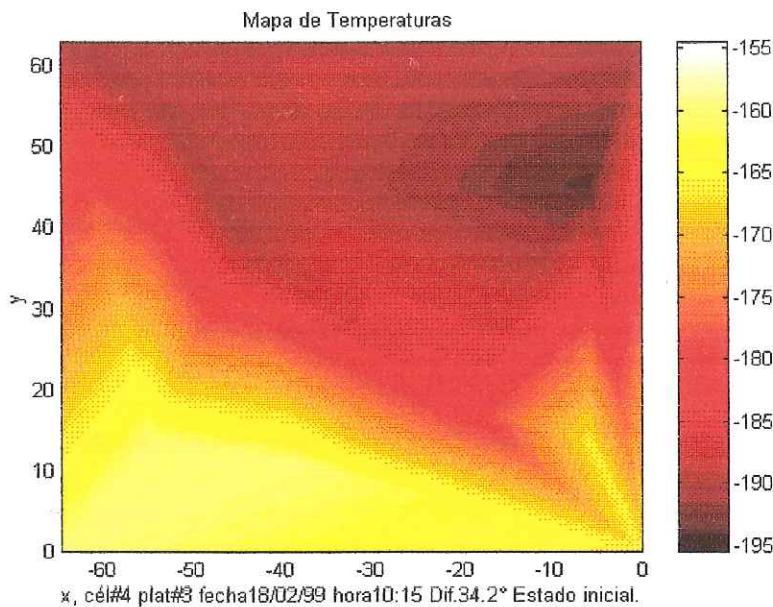


Figura 5.20. Mapa de temperaturas de estado estable medidas en el plato de calentamiento, antes de las mejoras resultantes de este proyecto. Existe una diferencia de temperaturas en el plato de 34.2°C .

Una vez conocida la diferencia de temperaturas en el plato se realizan modificaciones dentro la prensa. Los platos de calentamiento tienen en su interior resistencias eléctricas las cuales mediante corriente eléctrica generan calor, estas resistencias son sustituidas debido a su mal estado.

Se colocan guardas en la prensa donde se presentan fugas de calor. Se aísla toda la prensa en su interior para conservar la temperatura. Una vez realizadas todas estas acciones la diferencia de temperatura se reduce a 10.4°C véase figura 5.21.

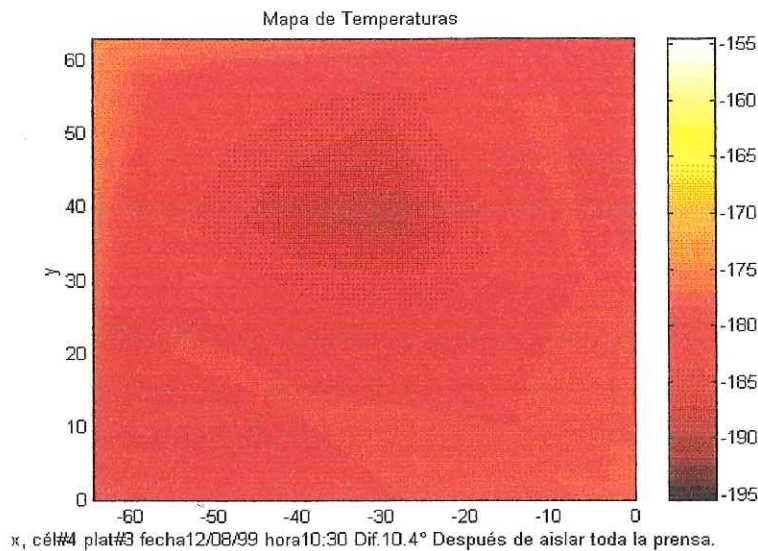


Figura 5.21. Mapa de temperaturas en estado estable medidas después de implantar las recomendaciones resultantes de este proyecto, se redujo la diferencia de temperaturas a 10.4°C en el mismo plato.

La reducción en el delta de temperaturas en el plato de calentamiento ayuda a que la transferencia de calor entre el plato y el portafolio sea uniforme y no existan partes frías que afecten el proceso de vulcanización.

5.6 Aumento en el diámetro exterior de la preforma.

Se encuentra en la práctica que el aumento en el diámetro exterior de la preforma facilita la expansión de la resina en la pared del molde. Se modifica la plantilla de formado en su diámetro exterior aumentando 1.5 mm su medida nominal véase figura 5.22 (a) y (b).

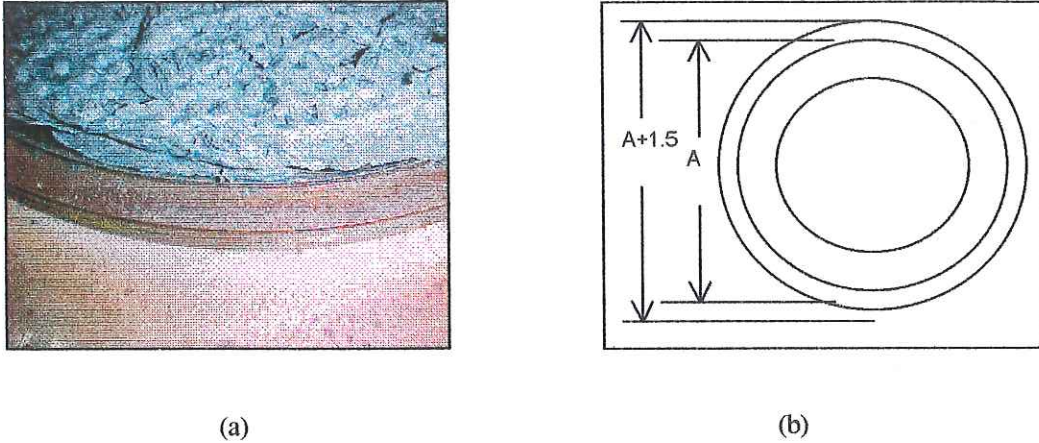


Figura 5.22. Plantilla de formado (a) Preforma sobre la plantilla de formado modificado (b) Diagrama del cambio de dimensiones de la plantilla.

El aumento en el diámetro exterior de la preforma hace que al momento de aplicar la presión la resina se expanda y alcance la pared del molde con mayor facilidad.

CAPITULO SEIS PRUEBAS EN PLANTA

Después del análisis de causas que producen el defecto se efectúan diez ensayos industriales con el material 490/2 con el propósito de conocer el impacto de la investigación. De acuerdo al análisis en estos ensayos se sincronizan los parámetros de temperatura y presión durante el proceso de producción, para evitar el defecto conocido como “poro perfil”. Los ensayos se realizan en una célula y en diferentes turnos de trabajo. Se establece una tolerancia en los valores debido a las condiciones externas con las que se trabaja. Las referencias de producción son seleccionadas aleatoriamente con el fin de demostrar que este análisis puede ser aplicable en todas las dimensiones de los discos de fricción que se producen en planta.

Después de efectuar estos ensayos y obtener resultados benéficos se realizan ocho ensayos industriales con el material 808, a fin de probar su aplicación en otros materiales. Para la obtención de los parámetros de producción para este material se aplica la misma metodología.

6.1 Ensayos Industriales en el material 490/2.

Se efectúan diez ensayos industriales con el material 490/2, donde se fabrican alrededor de 11000 discos de fricción. Los parámetros de producción se ajustan para sincronizar la temperatura de transición con la primera presión alta (1PA). A través de mediciones de temperatura dentro de la pasta se comprueba que los parámetros están conforme la investigación lo señala. Para las magnitudes de las presiones se toman los valores que las tablas de presiones de la referencia [18]. Las tablas 6.1 (a), (b) y (c) muestran los valores que se utilizaron para los ensayos.

Tabla 6.1. Parámetros de producción del material 490/2 (a) Características de producción (b) Tiempo de las presiones (c) Magnitud de las temperaturas según el plato de calentamiento.

| | |
|-------------|----------|
| Peso | Nominal |
| Dimensiones | + 1.5 mm |
| Material | 490/2 |
| Célula | 1 |
| Turno | 1,2,3 |

(a)

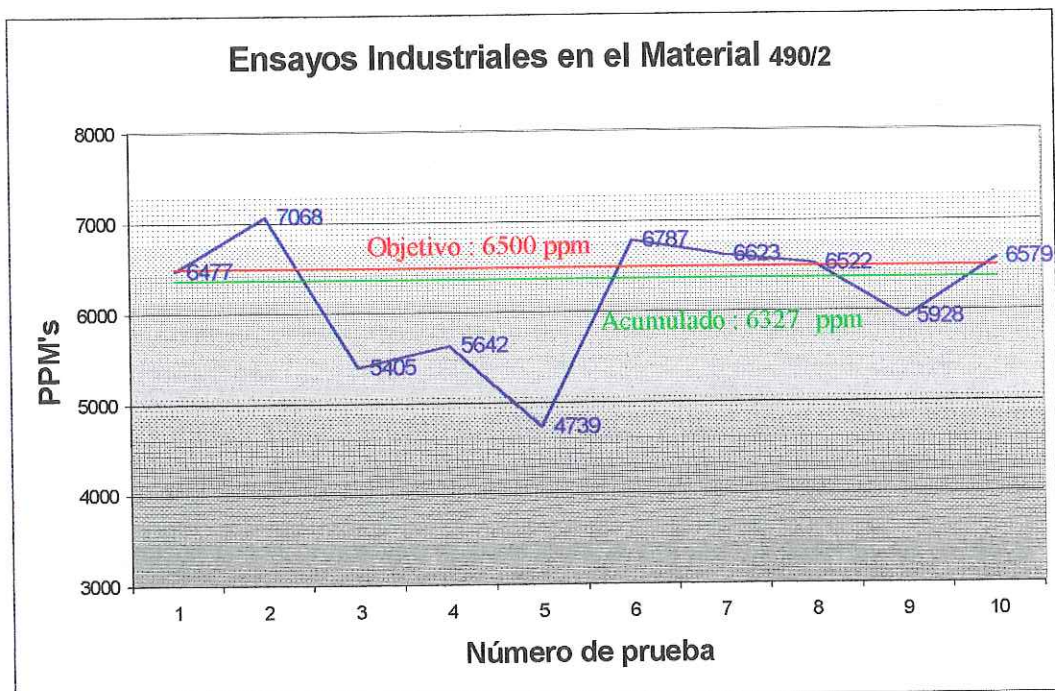
| Plato | Temp +/-3° |
|-------|------------|
| 1 | 196 |
| 2 | 194 |
| 3 | 192 |
| 4 | 189 |
| 5 | 188 |
| 6 | 193 |
| 7 | 192 |
| 8 | 191 |
| 9 | 190 |
| 10 | 190 |
| 11 | 190 |

(c)

| Fase | Tiempo |
|----------------------|-----------|
| 1era. Presión Baja | 5 - 7 |
| 1er. Desgasificación | 8 - 10 |
| 1era. Presión Alta | 12 |
| 2da. Desgasificación | 12 |
| 2da. Presión Alta | 140 - 145 |

(b)

En la gráfica 6.1 se observan los resultados que se obtienen después de realizar los ensayos industriales. El objetivo propuesto en estos ensayos es de 6500 ppm, obteniéndose un acumulado de 6327 ppm.



Gráfica 6.1. Ensayos industriales realizados sobre el material 490/2, se tiene un acumulado de 6327 ppm mientras el objetivo es de 6500 ppm.

6.2 Ensayos Industriales en el material 808.

Con el propósito de comprobar la aplicación de la metodología para los otros materiales se realizan ocho ensayos industriales con el material 808, produciéndose alrededor de 7000 discos de fricción. Las propiedades del material 808 no cambian significativamente con respecto al material 490/2, de tal forma que el tiempo de aplicación de la presión (1PA) es también alrededor de 60 segundos. Se verifica que los parámetros de temperatura y presión se sincronicen midiendo la temperatura de las preformas. Para las magnitudes de las presiones se toman los valores que las tablas de presiones de la referencia [18]. Las tablas 6.2 (a), (b) y (c) muestran los valores que se utilizaron para los ensayos.

Tabla 6.2. Parámetros de producción del material 808 (a) Características de producción (b) Tiempo de las presiones (c) Magnitud de las temperaturas según el plato de calentamiento.

| | |
|-------------|----------|
| Peso | Nominal |
| Dimensiones | + 1.5 mm |
| Material | 808 |
| Célula | 2 |
| Turno | 1,2,3 |

(a)

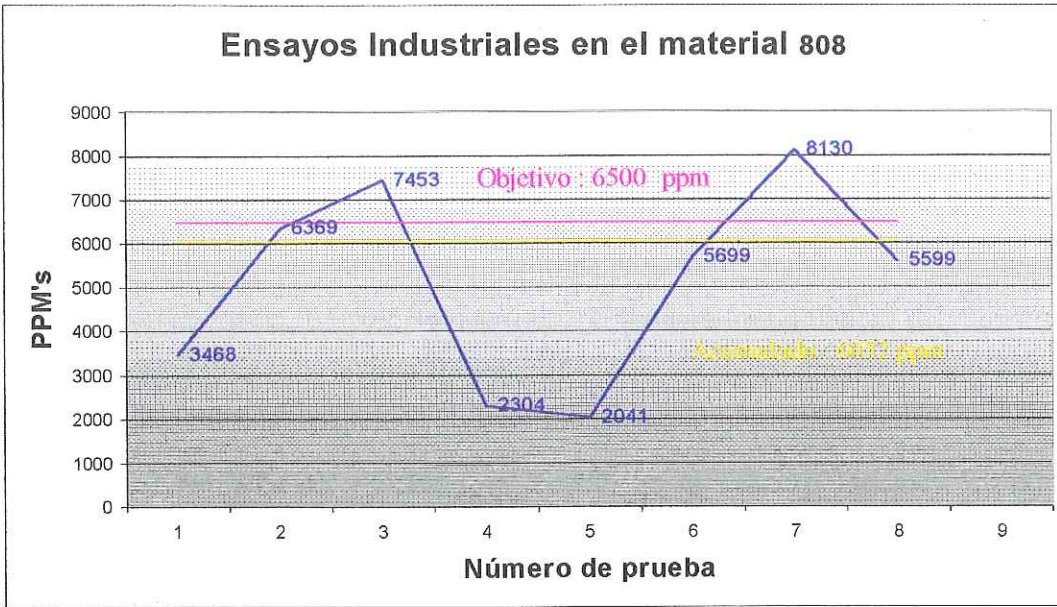
| Fase | Tiempo |
|-----------------------|-----------|
| 1era. Presión Baja | 19 - 21 |
| 1era. Desgasificación | 3 - 4 |
| 1era. Presión Alta | 8 - 9 |
| 2da. Desgasificación | 14 - 15 |
| 2da. Presión alta | 145 - 150 |

(b)

| Plato | Temp +/-3° |
|-------|------------|
| 1 | 213 |
| 2 | 211 |
| 3 | 205 |
| 4 | 204 |
| 5 | 194 |
| 6 | 218 |
| 7 | 214 |
| 8 | 206 |
| 9 | 196 |
| 10 | 194 |
| 11 | 199 |

(c)

En la gráfica 6.2 se observan los resultados obtenidos después de realizar los ensayos industriales. El objetivo propuesto en estos ensayos es de 6500 ppm, obteniéndose un acumulado de 6052 ppm.

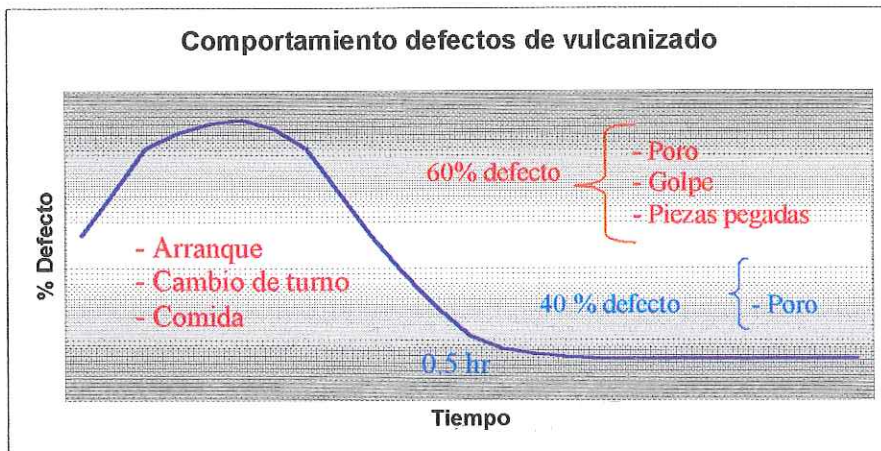


Gráfica 6.2. Ensayos industriales realizados sobre el material 808, se tiene un acumulado de 6052 ppm mientras el objetivo es de 6500 ppm.

A través de los ensayos industriales ajustando los parámetros de producción se logra disminuir el defecto en un 60% en comparación con el inicio del estudio.

6.3 Efecto de paro y arranque de la máquina.

Se observa durante los ensayos industriales que al momento de arranque los defectos surgen en un 60% véase gráfica 6.3. Los arranques son principalmente el cambio de herramental, el receso para la comida y el cambio de turno, debido a esto hay pérdida de calor en el herramental.



Gráfica 6.3. Comportamiento de los defectos en arranques, cambio de turno y comida, el defecto se da en un 60%.

CAPITULO SIETE

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1 Conclusiones

Para entender las causas del defecto conocido como “poro perfil” en la fabricación de discos de fricción, se determina la temperatura de inicio de vulcanizado a través del análisis por calorimetría diferencial y a través de la simulación por elementos finitos se determina el tiempo donde la aplicación del prensado debe ocurrir. Los parámetros de temperatura y tiempo se ajustan en el proceso logrando disminuir la ocurrencia del defecto.

De los resultados obtenidos en el presente trabajo, las siguientes conclusiones pueden obtenerse:

1. La temperatura de transición del material 490/2 se alcanza entre los 179.3°C y 185°C y para el material 808 se alcanza a los 177.81°C.
2. La presión (1PA) debe aplicarse cuando el material está en estado de transición, es decir la temperatura se encuentra en el rango de inicio de reacción para que la distribución de la resina pueda realizarse en todo el molde y así evitar el defecto, la simulación térmica indica que este tiempo ocurre alrededor de los 60 segundos después de iniciado el ciclo, para el tipo de disco con las dimensiones aquí analizado, en práctica las dimensiones de los diferentes tipos de discos producidos no varían significativamente, por tanto los valores aquí obtenidos de la simulación no serán diferentes en otros discos. Si el cambio en tamaño es significativo, deberá realizarse otra simulación.
3. El rango de temperatura inicial de las preformas para alcanzar la temperatura de transición en 60 segundos está entre 109.8°C y 130.4°C para todos los platos de calentamiento.

7.2 Recomendaciones

Para la eliminación del defecto y mejora del proceso se recomienda lo siguiente:

1. La presión (IPA) debe aplicarse cuando el material se encuentra a la temperatura de transición, para que la resina logre su expansión por todo el molde, esto ocurre en un tiempo de alrededor de 60 segundos.
2. Preforma. Aumento en el diámetro exterior.

El aumento de 1.5 mm en el diámetro externo en la preforma facilita la expansión de la resina en todo el molde, pues ésta tiene menos distancia que recorrer.

3. Formadoras. Peso constante en preformas.

Actualmente las formadoras tienen una variación en el formado de la preforma, las máquinas tienen una variación de hasta 22 gramos. El rango de tolerancia que se debe de tener en las formadoras es de 5 gramos, por tanto la máquina se debe ajustar para que nos dé esta variación. Si la preforma está baja de peso, lo más probable es que al momento de vulcanizar se obtenga el defecto poro perfil debido a la falta de material, pues éste no llena el molde.

4. Hilo. Impregnación constante.

Este problema se refiere a que el hilo en la formadora tiene problemas de uniformidad de dimensiones, la preforma no es redonda en su totalidad. Cuando el hilo no es constante en su impregnación presenta variaciones de peso.

5. Aislamiento. Uniformidad de temperaturas en el plato.

Dentro de los platos hay una variación muy grande de temperatura dentro el mismo plato, existen diferencias de hasta 29°C, y por lo tanto el calentamiento de los portafolios no es uniforme.

6. Trabajo continuo.

Efectuar relevos de los operadores en la hora de la comida y cambio de turnos, ayuda a evitar el defecto. Los defectos surgen en un 60% al reiniciar la producción debido a que los herramientas (portafolios) pierden temperatura. Lo que se persigue con esto es continuidad en la producción y así disminuir los defectos de paro y arranque.

7. Herramental.

El herramental juega un papel muy importante en la producción, si el herramental está golpeado, al momento de entrar la presión no se ejerce uniformemente sobre todo el portafolio.

7.3 Trabajo futuro

Se recomienda continuar el estudio en los siguientes puntos:

1. Validar a través de mediciones el valor utilizado para la conductividad térmica del material 490/2.
2. En la simulación por elementos finitos incluir el término de generación de calor que es efecto de la reacción exotérmica del vulcanizado cuando se introduce la presión. Con esto se espera que la temperatura de transición se alcance en un tiempo ligeramente menor al actual, mejorando el acuerdo con las mediciones.

3. Hacer un estudio sobre la impregnación del hilo para tener los valores óptimos del porcentaje de humedad y porcentaje de impregnación, así como la posibilidad de tener un impregnado homogéneo.

REFERENCIAS

- [1] Documento interno Valeo. F:/users/pract_calidad/humberto/segpars.xls., 1999.
- [2] Documento interno Valeo. VMF/FR EST ASP000 Revisión F., 1999.
- [3] Diccionario Encicopedico Salvat, Salvat editores S.A., Tomo 20, 1992.
- [4] **Química Orgánica**, L.G. Wade Jr., Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1993.
- [5] **Química Orgánica**, Alan S. Wingrove, Robert L. Caret, Harla S.A. de C.V., 1984.
- [6] **The Motor Vehicle**, K. Newton, W. Steeds, T.K. Garret, SAE international, 1996.
- [7] **Manual Transmissions & Transaxles**, Jack Erjavec, Delmar Publishers, 1997.
- [8] Página WEB: <http://www.taxihispano.com/taxicsp/de/d00004/a00007.htm>
- [9] **The operation of transmission and scanning electron microscopes**. Dawn Chescoe and Peter J. Goodhew – Oxford Science publications, Capítulo I, 1990.
- [10] **Principles of instrumental analysis**. Douglas A. Skoog and Donald M. West – Saunders college, 1993.
- [11] Documento interno Valeo. PAQP VMF/FR – EST 49002 Revisión A. 1999.
- [12] **Transferencia de calor**. A.F. Mills, McGraw Hill, 1995.
- [13] **Transferencia de calor**. B.V. Karlekar, R.M. Desmond, McGraw Hill, 1995.
- [14] **Transferencia de calor**. José A. Manrique. Editorial Harla S.A. de C.V., 1981.
- [15] **Transferencia de calor**. M. Necati Oziki. McGraw Hill, 1980.
- [16] **Fundamentals of Pipe Flow**. Robert P. Benedict. Wiley – Interscience Publications, 1992.
- [17] **ANSYS User's Manual**, Volume III Elements.
- [18] Documento interno Valeo. F:/users/esther/respaldo/intvulca/pres-p2a.wk4, 1999.

PUBLICACIÓN

REDUCCION DE DEFECTOS EN LA MANUFACTURA DE DISCOS DE FRICCION A TRAVES DE SIMULACION TERMICA

Horacio H. Montaña Baca¹, Oscar Barceinas Sánchez², Guillermo E. Morales Espejel³

En este trabajo se describe el mecanismo que en la fabricación de discos de fricción provoca el defecto conocido como "poro", el cual se origina por una desincronización de parámetros de presión y temperatura durante la manufactura. A través de análisis de calorimetría diferencial, la temperatura de inicio del vulcanizado es encontrada. Posteriormente, con simulación térmica por computadora se calcula el tiempo en el que dicha temperatura se presenta y el prensado debe aplicarse. Conocido el mecanismo es posible disminuir el número de defectos. En esta investigación se analiza principalmente el proceso de vulcanización, etapa en la cual se origina dicho defecto. Con la simulación y las pruebas se logra ajustar los parámetros de producción y así disminuir la aparición del defecto.

Palabras Clave: Discos de fricción, simulación térmica, vulcanización, manufactura.

1. Introducción

Los discos de fricción para embragues se producen a partir de hilos textiles, hilos de cobre, resinas, caucho y sustancias químicas, conformados mediante vulcanización, el cual es el proceso de mayor relevancia en la producción. En la manufactura de los discos surgen defectos, siendo el de mayor importancia el conocido como "poro". Se desarrolla un estudio para determinar sus causas a fin de disminuir su ocurrencia. Al inicio del estudio se tenían 18500 piezas por millón de rechazo.

El defecto se define como un faltante de material en el canto exterior de los discos (Figura 1), este defecto es de apariencia ya que funcionalmente su comportamiento no se afecta por su presencia.

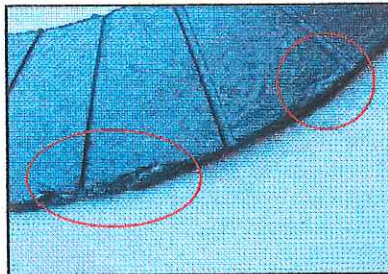


Figura 1. Disco de fricción con el defecto llamado "poro".

El proceso de manufactura comienza con el trenzado de hilos, en esta parte se entrelazan hilos de cobre, textiles y de fibra de vidrio en una sola trenza. En la etapa de polvos y mezclas se mezclan polvos químicos catalizadores, resinas y caucho en un contenedor que se vacía en un mezclador previamente cargado por un solvente el cual sirve de dispersante. El mezclador empieza a girar hasta que los polvos se dispersan y el caucho se disuelve. En la siguiente etapa el hilo trenzado es

¹ Ing. Horacio H. Montaña Baca, Estudiante de Posgrado CIDESI, Querétaro, Qro.
hhmontano@yahoo.com

² Dr. Oscar Barceinas Sánchez, investigador CIATEQ, Querétaro, Qro.
oscarb@ciateq.mx

³ Dr. Guillermo E. Morales Espejel, profesor del Centro de Diseño e Innovación de Productos, Campus Monterrey, gemorale@campus.mty.itesm.mx

impregnado por la mezcla y secado. El hilo impregnado se lleva a las formadoras, aquí el hilo es inyectado por una boquilla en un plato giratorio dando origen a una preforma (Figura 2).

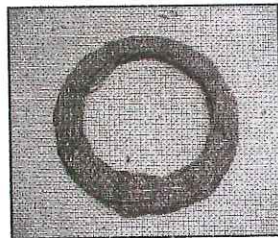


Figura 2. Preforma de hilo impregnado.

Ya que se tiene la preforma se pasa al ciclo de vulcanizado. El proceso de vulcanizado que se efectúa se basa en una secuencia de tres niveles de presión intercaladas entre dos etapas de liberación de gases con reacción química exotérmica (Figura 3). Calentamiento externo es aplicado a la pasta a través de unos platos de calentamiento donde también se transmite la presión por los pistones de presión.

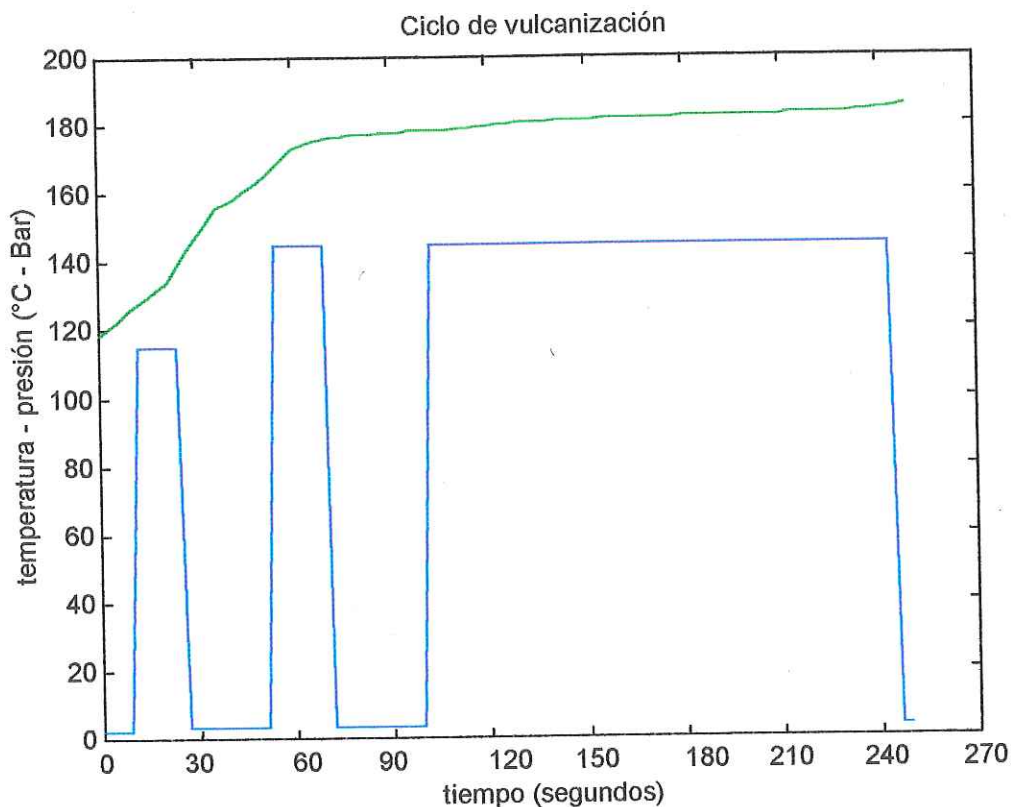


Figura 3. Ciclo de vulcanización de los discos de fricción.

Las preformas son colocadas dentro de los moldes, estos a su vez están contenidos en portafolios (Figura 4a). Los portafolios son calentados por conducción térmica por los platos de calentamiento. Una vez colocada la preforma dentro del molde, los portafolios son colocados dentro de la prensa sobre los platos de calentamiento (Figura 4b) y el ciclo comienza.

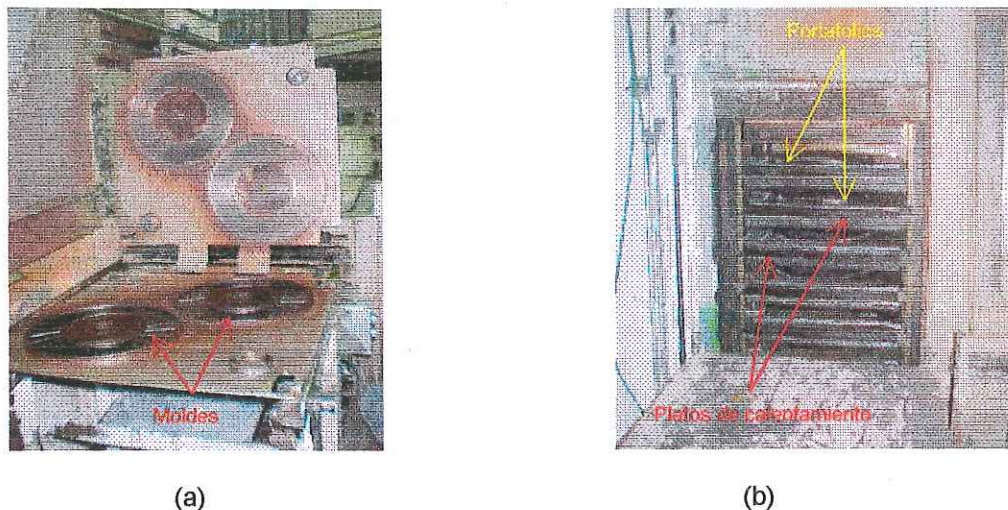


Figura 4. (a) Portafolio abierto de dos moldes, (b) Portafolios dentro de la prensa descansando sobre los platos de calentamiento.

Una vez iniciado el ciclo las puertas de la prensa se cierran, la presión se incrementa mientras los platos calientan los portafolios por conducción térmica. El ciclo consta de tres presiones con sus respectivas desgasificaciones que ayudan a eliminar los gases acumulados. El ciclo tiene una duración aproximada de 4 minutos y 10 segundos. El resultado de este proceso es el disco de fricción vulcanizado (Figura 5). El cual se envía posteriormente a una etapa de ajuste de medidas.

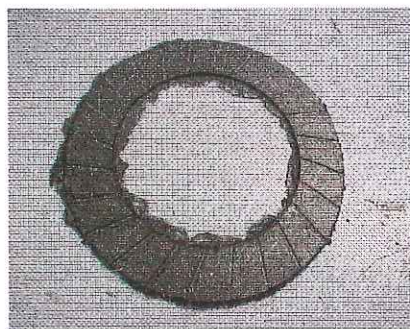
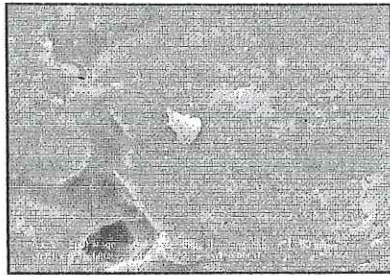


Figura 5. Disco de fricción vulcanizado.

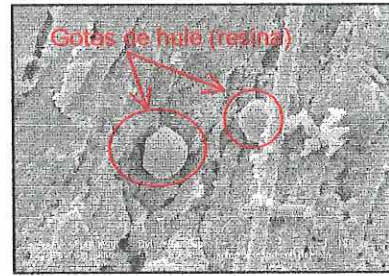
2. Metodología

Para determinar la morfología y el origen del defecto se realizan estudios de microscopía electrónica y calorimetría diferencial al material antes y después del proceso de vulcanizado, para conocer su comportamiento térmico y realizar una simulación de elementos finitos con el fin de predecir el comportamiento térmico durante el proceso de vulcanizado.

En el estudio por microscopía electrónica de barrido se analizan una pieza con defecto y una sin defecto. En la pieza sin defecto (Figura 6a) puede observarse que no existe ninguna diferencia de contraste, lo que demuestra que la reacción de vulcanizado ocurre de una manera homogénea. En la pieza con defecto (Figura 6b) se observa que la resina no alcanza a fluir pues aparecen gotas de hule (resina), lo cual indica una falta de distribución en el molde debido a la alta energía interfasial. La resina endurece antes de tiempo pues la temperatura de transición es superada rápidamente.



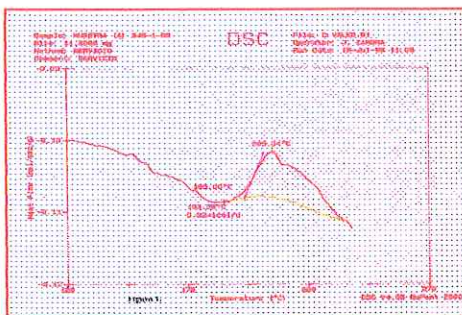
(a)



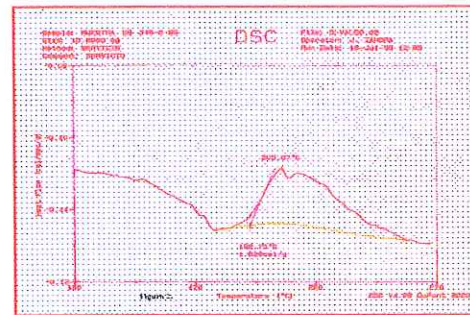
(b)

Figura 6. Muestras microscópicas (a) Muestra sin defecto vista a 500 aumentos, las resinas logran vulcanizar (b) Muestra con defecto vista a 350 aumentos, se observan las gotas de hule (resina) que no alcanzan a fluir completamente.

Para conocer el comportamiento térmico del material se analizan muestras de hilo impregnado mediante análisis diferencial de barrido (DSC) para determinar la temperatura de inicio de la reacción de vulcanizado. Las muestras de hilo tienen características opuestas para poder determinar un rango de temperaturas. De acuerdo a las gráficas del comportamiento térmico se puede observar a que temperatura empieza a reaccionar el material (Figura 7a, b) determinándose que entre los 179.3°C y 185°C el material se encuentra en la temperatura de transición.



(a)



(b)

Figura 7. Análisis por DSC (a) En este análisis la temperatura de inicio de reacción es de 185°C, (b) en este análisis se observa que la temperatura de inicio de reacción es de 179.3°C.

Una vez establecido el rango de temperatura de inicio de reacción del material se hace un análisis del proceso por medio de elementos finitos (FEM) utilizando estado transitorio, a fin de conocer el comportamiento térmico en el proceso de vulcanizado y predecir el tiempo en el cual el material alcanza dicho rango de temperaturas.

Para el análisis por el método de elementos finitos es necesario conocer las propiedades de los materiales: Para el disco de fricción y para el herramental.

Herramental: acero AISI-SAE 1045.

Disco de Fricción: material 490/2.

El calor específico del material se calcula de la ecuación

$$\Delta H = C_p \times \Delta T \quad (1)$$

Primeramente se realiza un ajuste de curvas sobre la gráfica del análisis por DSC cuando comienza la reacción de material.

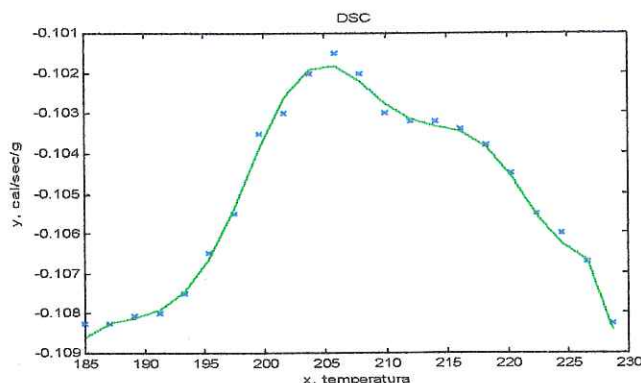


Figura 8. Sección de gráfica del análisis por DSC.

Integrando
$$\Delta H = \int_{Tf}^{Ti} f(x) \delta x \quad (2)$$

Se obtiene un calor específico de 1260 J / Kg – K.

Las otras propiedades de los materiales se muestran en la tabla 1[1].

Tabla 1. Datos de las propiedades utilizados para la simulación.

| Propiedad | Material | Acero AISI – SAE 1045 |
|---------------------------------|----------|-----------------------|
| Densidad Kg / m ³ | 1900 | 7801 |
| Calor Específico J / Kg – K | 1260 | 473 |
| Conductividad térmica W / m – K | 0.15 | 42 |

El valor de la densidad del material es dado por la empresa. La conductividad térmica del material es aproximada a la del caucho [2]. Se sabe que los hilos de cobre y los hilos textiles pueden influir en este valor, sin embargo, como es difícil medirlo, se realizó un estudio de sensibilidad donde la conductividad térmica se varía en la simulación, mostrando poca influencia en el resultado de los tiempos de calentamiento.

Para la simulación se recurre a un modelo simple ejesimétrico, de pared compuesta, siendo la parte central del modelo la preforma, puesto que es aquí donde el proceso de vulcanización tiene lugar.

2.1. Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera se aplican como se muestra en la figura 9.

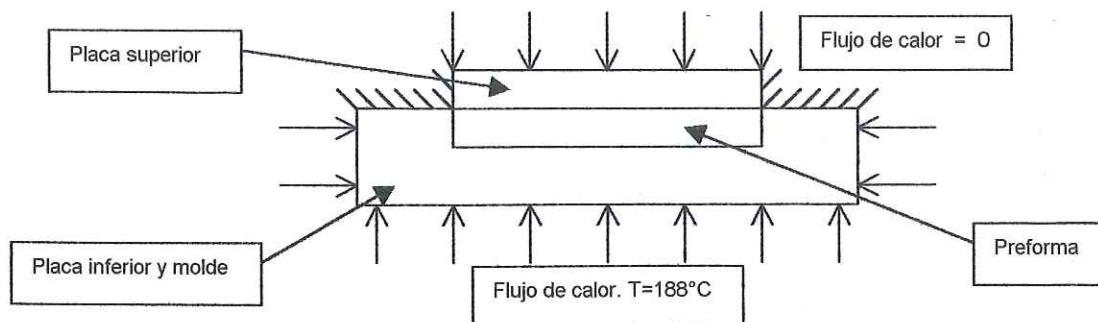


Figura 9. Condiciones de frontera que se aplican en la simulación.

2.2 Condiciones Iniciales

Para las condiciones iniciales la preforma entra a la etapa de prensado a una temperatura inicial de 115°C. El portafolio que rodea a la preforma tiene una temperatura inicial de 155°C, dichos datos fueron directamente medidos.

La simulación por computadora se hace utilizando el método de elementos finitos, con el paquete comercial ANSYS. La malla utilizada, consta de 2128 elementos de tipo cuadrilátero ejesimétrico. El paquete resuelve la ecuación típica de calor con el término transitorio [3],[4]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -Q + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Los resultados muestran que la temperatura de inicio de reacción de 179.3°C se alcanza en un tiempo de 64 segundos (Figura 10).

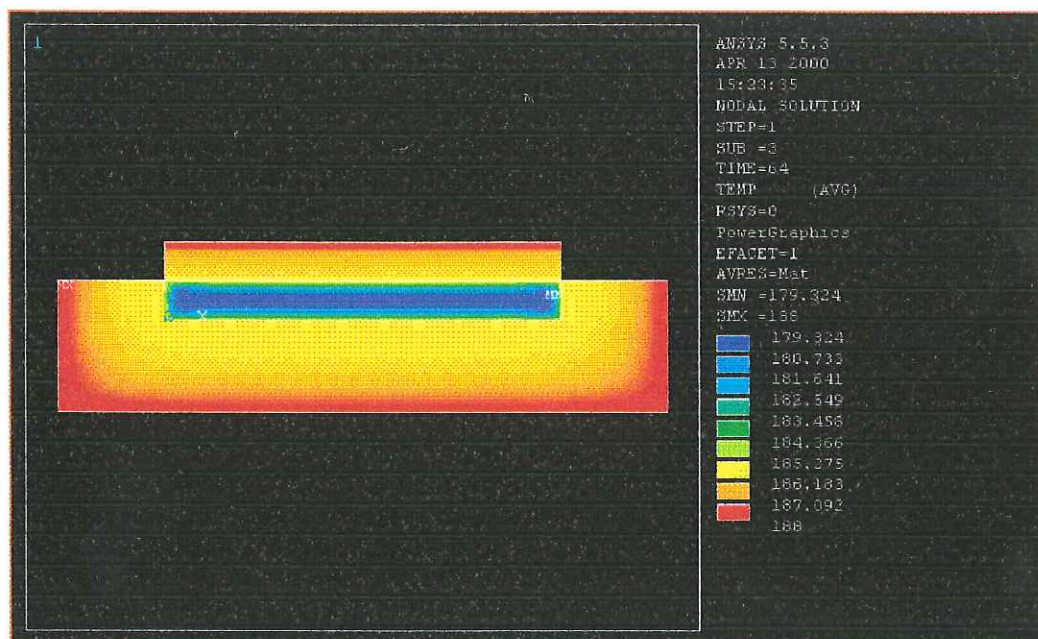


Figura 10. Simulación en un tiempo de 64 segundos, el material vulcanizado alcanza una temperatura de 179.32 °C.

Para conocer el comportamiento térmico del material en planta se efectuaron pruebas experimentales. Se colocaron termopares en el interior de varias preformas para poder medir la temperatura durante el proceso. Se realizan tres pruebas con temperaturas de inicio diferentes. La primer prueba experimental se realiza a una temperatura inicial en la preforma de 116°C, en esta prueba se alcanza 179.5°C en 60 segundos teniendo como resultado una pieza sin defecto y dentro de las dimensiones deseadas. La segunda prueba inicia a 73°C y en un tiempo de 1 minuto y 39 segundos alcanza la temperatura de 179.7°C y como resultado se obtiene una pieza con dimensiones no deseadas, espesor bajo. La tercer prueba se inicia con una temperatura 151.2°C alcanzando la temperatura de 179.56 en 30 segundos, dando como resultado una pieza con defecto y espesor alto.

Con estas tres pruebas se hace un ajuste de curvas para el comportamiento de la preforma en el proceso de vulcanizado (Figura 11).

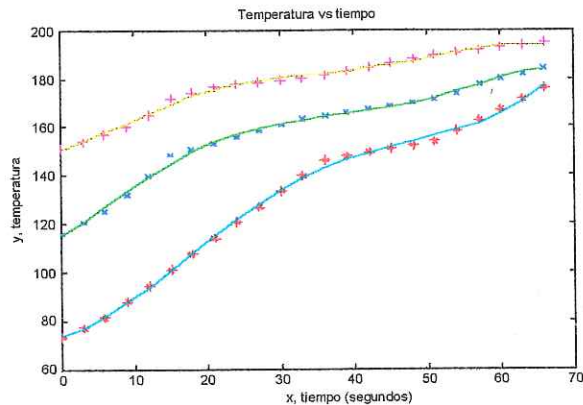


Figura 11. Ajuste de curvas sobre el comportamiento térmico del material en los primeros 70 segundos, después de este tiempo ya no hay cambios significativos en la temperatura (estado estable).

De este ajuste de curvas se obtiene la siguiente ecuación:

$$T - (At^5 + Bt^4 + Ct^3 + Dt^2 + E) = F \quad (4)$$

Tabla 2. Coeficientes de la ecuación 4.

| Variable | A | B | C | D | E | T |
|----------|-------------|-----------|---------|---------|--------|------------|
| Valor | - 5.182E-07 | 8.633E-05 | -0.0047 | 0.07486 | 1.5827 | 179.3, 185 |

Sustituyendo en la ecuación (4) los valores de la temperatura de transición $T = 179.3^\circ\text{C}$ y 185°C se obtienen las temperaturas de inicio de prensado de 114.2°C y 119.9°C para un tiempo de $t = 60$ segundos.

3. Resultados y Discusión

Calculadas las temperaturas de inicio, en planta se ajustaron los parámetros de producción para obtener dichos valores. Se corre una prueba donde se mide la temperatura de la pasta en el tiempo y se compara con la simulación, obteniéndose los comportamientos mostrados en la figura 12.

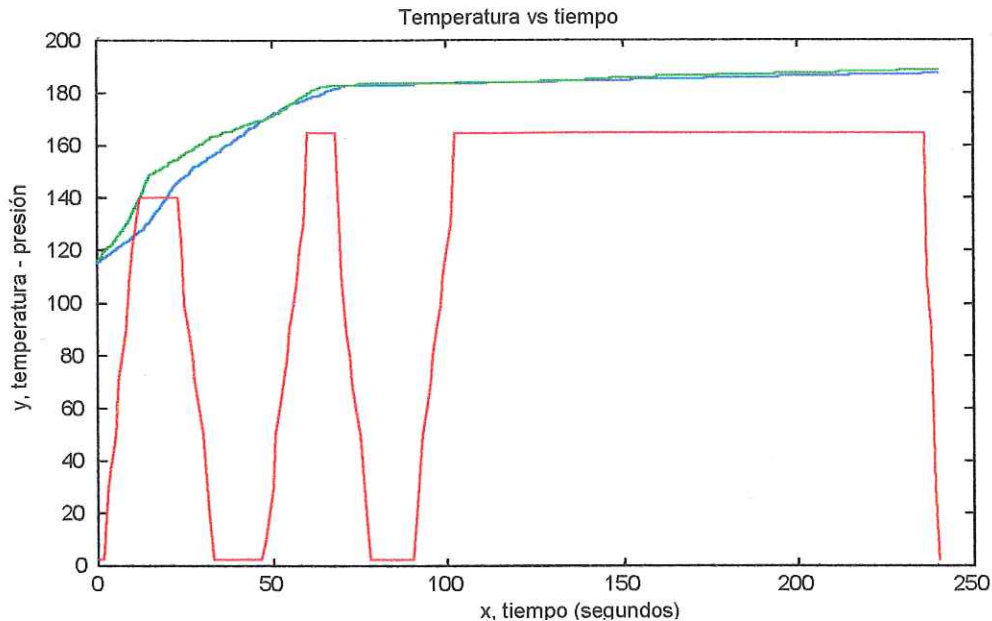


Figura 12. Comportamiento térmico del material, comparación entre lo simulado y las pruebas experimentales efectuadas en el proceso.

En la comparación de los comportamientos experimental y simulado hay una ligera diferencia de temperaturas dentro de los primeros 45 segundos del proceso, esto se debe a que el proceso es exotérmico y al aplicarse la presión (1PB) la temperatura de la preforma se incrementa y esta acción no es simulada.

Se sabe que en un tiempo de 60 segundos el material se encuentra en transición, de un estado termolíquido a un termoplástico, es decir se encuentra maleable. En este momento se debe de aplicar la presión (1PA) para que las resinas se expandan por todo el molde y así evitar el defecto. Con este ajuste en los parámetros de producción se logra disminuir el defecto en un 60% en comparación al inicio del estudio. El procedimiento ha sido probado con 18 ensayos industriales todos exitosos y actualmente se estudia su implantación permanente.

4. Conclusiones

Para entender las causas del defecto conocido como "poro" en la fabricación de discos de fricción, a través de calorimetría diferencial se determina la temperatura de inicio de vulcanizado y a través de simulación del proceso por elementos finitos se determina el tiempo donde la aplicación del prensado debe ocurrir. Los parámetros de temperatura y tiempo se ajustan en el proceso logrando disminuir la ocurrencia del defecto.

De los resultados obtenidos en el presente trabajo, las siguientes conclusiones pueden obtenerse:

1. La temperatura de transición del material se alcanza entre los 179.3°C y 185°C.
2. La presión (1PA) debe aplicarse cuando el material esta en estado de transición, es decir la temperatura se encuentra en el rango de inicio de reacción para que la distribución de la resina pueda realizarse en todo el molde y así evitar el defecto, la simulación térmica indica que este tiempo ocurre alrededor de los 60 segundos después de iniciado el ciclo.
3. El rango de temperatura inicial de las preformas para alcanzar la temperatura de transición en 60 segundos es de 114.2°C a 119.9°C.

5. Referencias

- [1] Transferencia de calor. B.V. Karlekar, R.M. Desmond, McGraw Hill, 1995.
- [2] Transferencia de calor. A.F. Mills, McGraw Hill, 1995.
- [3] Fundamentals of Pipe Flow. Robert P. Benedict. Wiley – Interscience Publications, 1992.
- [4] Transferencia de calor. José Manrique. Editorial Harla S.A. de C.V., 1981.