

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ROLAN CHINELLATO BALLARDIN**

**ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO PROCESSO DE  
VULCANIZAÇÃO DE UMA SUSPENSÃO PNEUMÁTICA**

**Caxias do Sul**

**2014**

**ROLAN CHINELLATO BALLARDIN**

**ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO PROCESSO DE  
VULCANIZAÇÃO DE UMA SUSPENSÃO PNEUMÁTICA**

Trabalho de Estagio II - MEC 0258,  
apresentado como requisito parcial para a  
conclusão do Curso de Engenharia Mecânica  
na Universidade de Caxias do Sul.

Supervisor: Dr. Carlos Roberto Altafini

**Caxias do Sul**

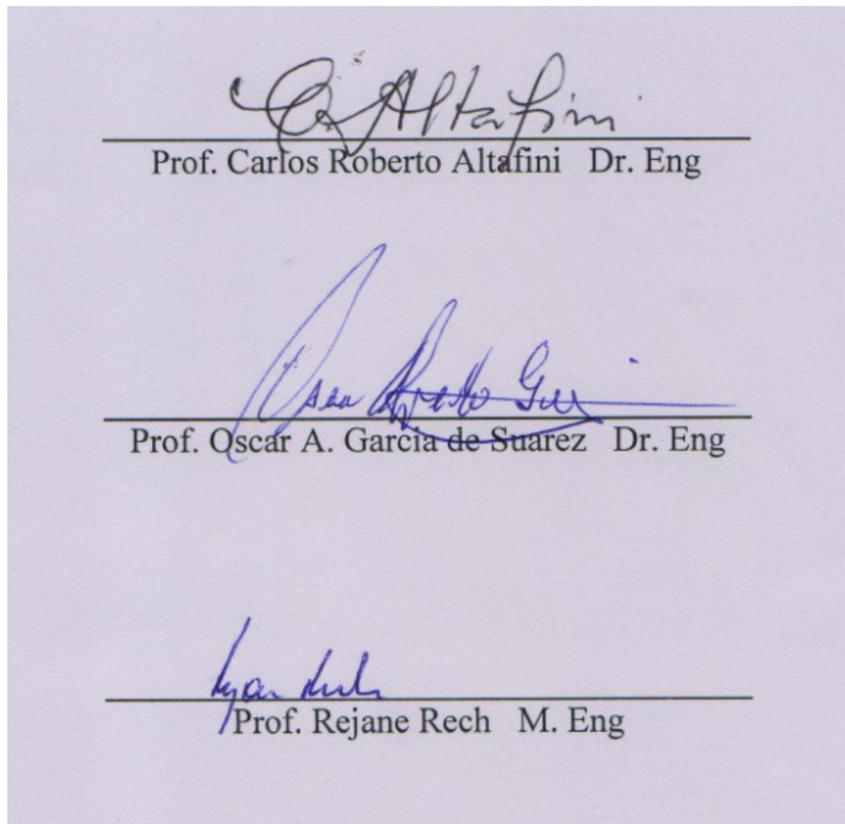
**2014**

**ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO PROCESSO DE  
VULCANIZAÇÃO DE UMA SUSPENSÃO PNEUMÁTICA**

**ROLAN CHINELLATO BALLARDIN**

ESTE RELATÓRIO FOI JULGADO ADEQUADO PARA A APROVAÇÃO NA  
DISCIPLINA DE ESTÁGIO II DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BANCA EXAMINADORA:



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a meus pais, que ao longo de todos estes anos de vida, nos momentos mais difíceis, sempre estiveram ao meu lado incentivando e proporcionando tudo que estava ao seu alcance para que esta conquista fosse possível.

À empresa GLOBO indústria de peças, por me permitir e me auxiliar na realização deste trabalho. Além disto, agradeço a todos os demais colegas de trabalho que direta ou indiretamente também participaram desta conquista.

Aos professores e colegas da Universidade de Caxias do Sul pelos momentos inesquecíveis e pelo conhecimento adquirido. Em especial, um agradecimento ao professor Carlos Roberto Altafini, supervisor deste trabalho de estágio.

## RESUMO

Este estudo visa analisar o processo de transferência de calor ao aquecer um composto de borracha até a temperatura de vulcanização. Avaliou-se a melhor forma de atingir a temperatura de vulcanização para produzir um componente para uma peça de suspensão pneumática. Para isso, analisou-se a condução de calor através da espessura do composto da borracha com uma e com duas frentes de calor. Com uma melhor distribuição de energia térmica ao composto de borracha garantiu-se um processo de aquecimento mais rápido e mais eficaz. De modo a analisar os resultados obtidos foi de suma importância conhecer os conceitos sobre transferência de calor em relação ao tempo no interior de um material. Os resultados deste estudo mostraram reduções de 67% no tempo para transferência de calor, e de 31,5% na economia da energia elétrica necessária para o processo de aquecimento na vulcanização do composto de borracha. Dessa maneira, de posse dos conceitos de transferência de calor e dos resultados obtidos, justifica-se a implementação do sistema de aquecimento com duas frentes de calor.

**Palavras-chave:** Suspensão pneumática. Vulcanização. Transferência de calor.

**Área de conhecimento:** Engenharia Mecânica, Transferência de Calor.

## **ABSTRACT**

This study aims to analyze the process of heat transfer during the heating of a rubber compound until the vulcanization temperature. It was evaluated the best way to reach the vulcanization temperature to manufacture a component for an air suspension part. For this, It was analyzed the heat conduction through the thickness of the rubber compound with one and two heat fronts. With a better distribution of thermal energy inside the rubber compound it has ensured a faster and more efficient heating process. In order to analyze the obtained results it has been very important the knowledge of the concepts of heat transfer over time in a material. The results of this study showed some reductions, as 67% over the time for heat transfer, and 31.5% over the electrical energy needed for the heating process in the vulcanization of rubber compound. Thus, according to the concepts of heat transfer and the obtained results, it has justified the implementation of the heating system with two heat fronts.

**Keywords:** Air suspension part. Vulcanization. Heat transfer.

**Area of expertise:** Mechanical Engineering, Heat Transfer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação. ....	10
Figura 2 - Suspensão pneumática. ....	11
Figura 3 - Geometrias de suspensões pneumáticas. ....	14
Figura 4 - Borracha não vulcanizada e após a vulcanização. ....	17
Figura 5 - Reação de vulcanização. ....	18
Figura 6 - Fases da vulcanização. ....	19
Figura 7 - Fluxo de calor unidimensional transiente. ....	23
Figura 8 - Distribuição de temperatura em regime transiente. ....	24
Figura 9 - Processo de vulcanização utilizado. ....	30
Figura 10 - Montagem dos laminados de borracha. ....	31
Figura 11 - Uma frente de calor na vulcanização. ....	32
Figura 12 - Duas frentes de calor na vulcanização. ....	34
Figura 13 - Ferramenta das amostras. ....	34
Figura 14 - Cavidade de vulcanização. ....	35
Figura 15 - Equipamentos utilizados para leitura de dados. ....	36
Figura 16 - Interface de trabalho do <i>software</i> . ....	37
Figura 17 - Simulação com uma frente de calor. ....	37
Figura 18 - Simulação com duas frentes de calor. ....	38
Figura 19 - Energia térmica em trânsito no instante inicial. ....	39
Figura 20 - Transferência de calor com mudança de direção. ....	42
Figura 21 - Temperatura no centro da borracha ao longo do tempo (MEF). ....	43
Figura 22 - Temperatura na espessura para uma frente de calor. ....	44
Figura 23 - Temperatura na espessura para duas frentes de calor. ....	45
Figura 24 - Fluxo de calor no processo atual da empresa. ....	46
Figura 25 - Fluxo de calor no processo proposto. ....	46
Figura 26 - Ferramenta das amostras. ....	47
Figura 27 - Temperatura no centro da borracha ao longo do tempo no experimento físico. ...	48
Figura 28 - Comparação <i>software</i> x experimento pratico. ....	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1	AMBIENTE DE ESTÁGIO .....	11
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	11
1.3	OBJETIVOS .....	12
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>12</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1	SUSPENSÕES PNEUMÁTICAS .....	14
2.2	BORRACHA .....	15
<b>2.2.1</b>	<b>Borracha natural .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Borracha sintética .....</b>	<b>16</b>
2.3	VULCANIZAÇÃO.....	17
<b>2.3.1</b>	<b>Fases da vulcanização.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Ingredientes de formulação .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Processos de vulcanização.....</b>	<b>21</b>
2.4	TRANSFÊRENCIA DE CALOR.....	22
<b>2.4.1</b>	<b>Condução transiente.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Capacitância global .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Efeitos espaciais .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Solução aproximada .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Transferência total de energia.....</b>	<b>28</b>
2.5	MODELO NUMERICO PARA O PROCESSO DE AQUECIMENTO .....	29
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>30</b>
3.1	PROCESSO ATUAL.....	30
3.2	O PROBLEMA NA TRANSMISSÃO DE CALOR.....	32
3.3	PROPOSTA DE INTERVENÇÃO .....	33

3.4	MOLDE EXPERIMENTAL .....	34
3.5	INSTRUMENTAÇÃO DO MOLDE .....	35
3.6	COMPARAÇÃO COM SIMULAÇÃO MEF .....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>39</b>
4.1	CÁLCULO ANALÍTICO.....	39
<b>4.1.1</b>	<b>Calor transferido .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Determinação do tempo de aquecimento.....</b>	<b>40</b>
4.2	SIMULAÇÃO PELO MEF .....	43
4.3	TESTE PRÁTICO .....	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>
	ANEXO A - Tabela 5.1 do Incropera e DeWitt (2003).....	54
	ANEXO B - Tabela A.3 do Incropera e DeWitt (2003).....	55
	ANEXO C - Tabelas utilizadas para a elaboração dos gráficos.....	56
	ANEXO D - Ficha técnica do óleo térmico.....	61

## 1 INTRODUÇÃO

Devido às péssimas condições encontradas em muitas das rodovias brasileiras, se os veículos não tivessem um sistema que amortecesse os buracos e desníveis, eles teriam uma vida útil muito curta. A suspensão veio para dissipar energia dinâmica tornando a viagem mais confortável.

Com a implantação no país dos sistemas pneumáticos nas décadas de 70 e 80, foi percebido um considerável aumento da vida útil dos equipamentos decorrente das menores respostas do asfalto transmitidas para a estrutura do veículo. Resultante dessa ótima aprovação, a suspensão pneumática vem tomando força no mercado brasileiro nos seguimentos de ônibus e caminhão.

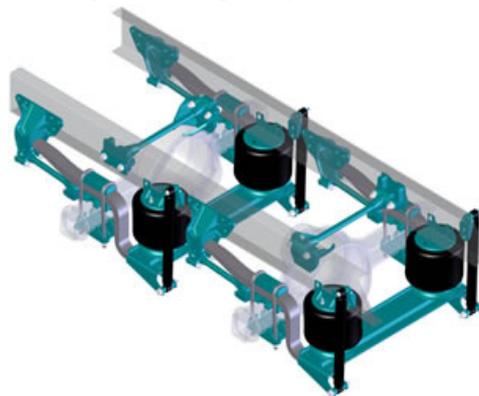
Sendo assim, esse sistema apresenta as seguintes vantagens:

- suspensão mais leve, referente ao peso;
- mantém a altura do veículo constante;
- menor índice de ruídos;
- maior conforto e suavidade na rodagem; e
- redução significativa das vibrações.

Tecnicamente, as molas pneumáticas são conjuntos formados por uma bolsa produzida de camadas de borracha, reforçada por tecidos de alta tenacidade e fechada por fixações metálicas, formando um recipiente estanque, projetado para operar com pressão interna de ar comprimido.

A figura 1 demonstra a aplicação das suspensões destinada a carretas e na figura 2 é mostrado o suspensor.

Figura 1 - Aplicação.



Fonte: KLL Hendrickson. (2013)

Figura 2 - Suspensão pneumática.



Fonte: Goodyear. (2013)

Para resistir aos estresses exercidos, a bolsa de borracha se torna o elemento mais crítico do componente, ganhando destaque nesse trabalho. Por se tratar de um componente de borracha se torna indispensável o estudo do processo de vulcanização, envolvendo os mecanismos de transferência de calor nesse processo de fabricação.

## 1.1 AMBIENTE DE ESTÁGIO

A empresa Globo indústria e comércio de peças Ltda. é uma das 6 empresas do grupo HW, as quais são voltadas para o ramo de atividade para veículos pesados. Está localizada na cidade de São Marcos, no estado do Rio Grande do Sul e iniciou suas atividades no ano de 1999 com o objetivo de atender o mercado de reposição. Contempla segmentos como acabamentos plásticos, suspensões pneumáticas para cabines de caminhões, espelhos retrovisores, acessórios e peças técnicas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Com o grande aumento das aplicações de suspensão pneumáticas no transporte rodoviário nacional, vem à tona a necessidade da empresa expandir esse segmento para as suspensões de carretas, ônibus e 3º eixo. Com isso surge a necessidade de um melhor entendimento dos processos de fabricação da indústria da borracha, dentre eles a vulcanização e o processo de transferência de calor.

Já se demonstrou nas suspensões de cabines com 2,7 mm de espessura de borracha desenvolvidas pela empresa, que o item de maior importância é a bolsa de ar. Na qual se compreende maior parte do tempo de processo e responsabilidade de aplicação.

Para se conseguir desenvolver um produto de alta qualidade e com custo competitivo com o mercado atual, aspectos como a transferência de calor provaram ser de extrema importância na redução do tempo de cura da borracha, levando em consideração a demanda e o preço final do produto. Um ciclo de cura demasiadamente curto não permite a borracha atingir as suas propriedades físicas e químicas ideais, prejudicando qualitativamente o produto. Por outro lado, um ciclo de cura demasiadamente longo significa desperdício de energia, redução da capacidade produtiva, aumento do custo de produção e queda das propriedades da borracha. Então se mostra de grande importância um estudo detalhado, visando buscar melhorias no processo.

Com o desenvolvimento desse novo seguimento na empresa encontra-se alguma dificuldade de se processar bolsas pneumáticas de paredes de borracha mais grossas, tendo em vista a necessidade de cargas maiores de atuação sobre a suspensão. Com espessuras de 6 a 8 mm, o tempo para atingir a temperatura ótima de cura no interior da bolsa aumentará consideravelmente.

O ponto principal para o sucesso do trabalho será obter a forma mais adequada de transferência de calor para as paredes de maior espessura da borracha, minimizando o tempo de vulcanização da nova bolsa pneumática pretendida pela empresa.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo geral

Analisar o processo de transferência de calor na vulcanização de uma suspensão pneumática de borracha, levando em consideração o aumento da espessura do novo produto.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos a serem alcançados são os seguintes:

- a) analisar a troca térmica unidirecional e bidirecional na vulcanização de um composto de borracha, mostrando as vantagens em tempo;
- b) obter gráficos mostrando o avanço das frentes de calor em relação com o tempo;

- c) instrumentar o processo com termopares para confrontar com os valores obtidos numericamente;
- d) mensurar a redução de tempo no novo processo de transferência de calor.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica será feito uma explanação de alguns conceitos fundamentais para o entendimento do estudo sobre transferência de calor na vulcanização de borracha.

### 2.1 SUSPENSÕES PNEUMÁTICAS

Genta e Morello (2009), descrevem que as principais funções das suspensões é permitir a distribuição de forças em carregamento sobre o chassi, absorver os impactos recebidos pela roda quando em contato com as irregularidades da estrada e resistir às forças de controle geradas através dos pneus, no sentido longitudinal e lateral.

Suspensão a ar ou suspensão pneumática não é um conceito recente. Foi concebida na década de 1920, e difundida no final da década de 1940, buscando melhorias na estabilidade para carros de competição. O invento foi bem sucedido e logo foram criadas novas aplicações para o produto. Hoje em dia são empregados em veículos de passeio, caminhões, semi-reboques, ônibus, vagões ferroviários e implementos agrícolas.

Atualmente, a suspensão a ar é muito utilizada na montagem de ônibus, para assegurar um rodar mais suave. Pela mesma razão, é empregada também em vagões ferroviários e de metrô, especialmente no transporte urbano (FIRESTONE, 2013).

Com o desenvolvimento da engenharia automotiva, têm-se, hoje, diversos modelos e geometrias de suspensões a ar, utilizadas nos mais variados modelos de veículos. Na Figura 3 são apresentadas as principais geometrias de suspensões pneumáticas.

Figura 3 - Geometrias de suspensões pneumáticas.



Fonte: AktasGroup. (2013)

A preferência por este tipo de suspensão entre os caminhões, reboques e semi-reboques também vem aumentando, devido à maior proteção oferecida à carga, ao aumento da vida útil do equipamento, redução dos custos e dos tempos de manutenção.

O sistema de suspensão a ar consiste da própria mola pneumática, sua conexão de ar e fixações, válvulas de controle de altura, linhas de ar comprimido, reservatório de ar e compressor.

O fole contendo ar comprimido executa a função de mola que se ajusta as cargas variáveis durante seu trabalho através da válvula de controle de altura. Desse modo obtém-se o controle automático da altura que assegurará, por exemplo, uma altura constante da escada de entrada do ônibus, ou uma altura constante da superfície de carregamento do caminhão durante toda a operação de carga (FIRESTONE, 2013).

## 2.2 BORRACHA

Borracha é um elastômero, ou seja, um material macromolecular, que recupera rapidamente a sua forma e dimensões iniciais após cessar a aplicação de uma tensão. É considerado o mais famoso polímero da família dos elastômeros, que no seu estado primário é pegajoso e apresenta fluência nas temperaturas ambiente. Para torná-lo úteis suas moléculas devem ser submetidas ao processo de ligações cruzadas em diversos pontos da cadeia polimérica (MORTON, 1995).

Segundo Morton (1995), no seu estado modificado, não pode ser reprocessado para uma forma permanente por aplicação de calor e pressão.

Hofmann (1989), explica que a propriedade predominante dos elastômeros é o comportamento elástico após deformação em compressão ou tração. É possível, por exemplo, esticar um elastômero até dez vezes o seu comprimento inicial e, após remoção da tensão aplicada, verifica-se que o mesmo voltará, sob circunstâncias ideais, à forma e comprimento originais.

O perfil das propriedades que pode ser obtido depende fundamentalmente do elastômero escolhido, da formulação do composto utilizada, do processo de produção e da forma e desenho do produto. As propriedades que definem um elastômero só podem ser obtidas usando compostos adequadamente formulados e após vulcanização subsequente (HOFMANN, 1989).

As borrachas são classificadas em duas grandes famílias: borrachas naturais abreviadas como NR do termo em inglês “*Natural Rubber*”, obtidas a partir do látex da árvore

Hevea Brasiliensis, e borrachas sintéticas obtidas a partir do refinamento do petróleo e que podem ter diversas formulações (PINHEIRO, 2001).

### **2.2.1 Borracha natural**

Segundo Hofmann (1989), a borracha natural pode reagir com o enxofre a temperaturas elevadas para formar reticulações, ocorrendo a transformação de um estado pegajoso e fundamentalmente plástico num estado elástico.

Os vulcanizados de borracha natural (composto na maior parte por isopreno) possuem propriedades com valores muito interessantes do ponto de vista tecnológico, especialmente boa resistência à tração combinada com uma boa elasticidade, boa resistência ao calor até 80-90 °C, boa flexibilidade a baixas temperaturas até cerca de -55 °C e excelentes propriedades dinâmicas exibidas durante solicitações cíclicas. Apresenta alta permeabilidade ao gás, resistência limitada ao envelhecimento e ao ozônio. Não é resistente a agentes oxidantes como, por exemplo, o ácido nítrico, a óleos minerais e a hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos (GOMES, 2012).

### **2.2.2 Borracha sintética**

Gomes (2012), explica que a borracha sintética é aquela que pode ser feita da polimerização de uma variedade dos monômeros, incluindo o isopreno, cloropreno e o isobutileno, que podem ser misturados em várias proporções desejáveis para uma ampla gama de propriedades físicas, mecânicas e químicas.

Abaixo alguns dos diferentes compostos de borrachas sintéticas:

- a) borracha de poliisopreno (IR);
- b) borracha de butadieno estireno (SBR);
- c) borracha de policloropreno (CR);
- d) borracha de polibutadieno (BR);
- e) borracha nitrílica (NBR);
- f) borracha de poliuretano( AU e EU).

As primeiras tentativas na pesquisa de borrachas sintéticas tinham por finalidade obter uma borracha sintética semelhante à borracha natural, usando o isopreno como material de partida (HOFMANN, 1989).

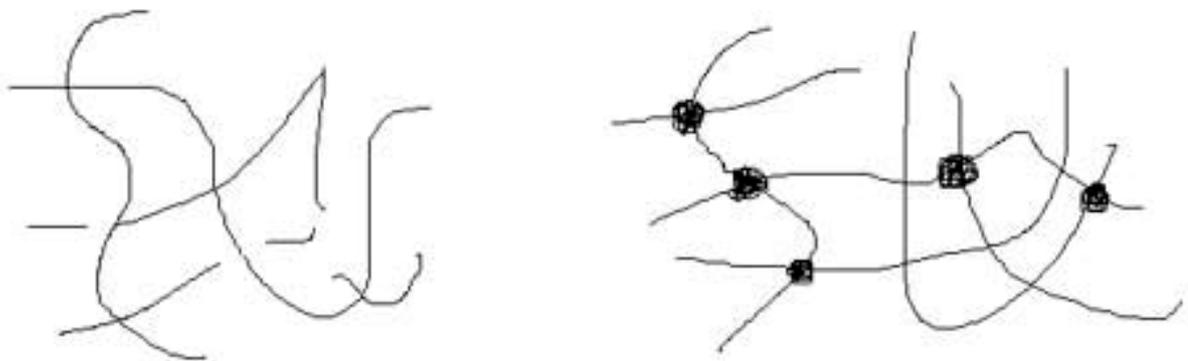
Os vulcanizados obtidos a partir da borracha sintética como, por exemplo, butadieno estireno (SBR) apresentam uma melhor resistência à abrasão do que a borracha natural (NR), assim como uma melhor resistência a altas temperaturas e ao envelhecimento, mas uma menor flexibilidade e elasticidade a baixas temperaturas. No caso das temperaturas elevadas, os vulcanizados de SBR apresentam um endurecimento e não um amolecimento como acontece com os vulcanizados de borracha natural. A permeabilidade ao gás apresentada é elevada, mas menor do que a dos vulcanizados de borracha natural enquanto que a resistência química é semelhante à da borracha natural.

### 2.3 VULCANIZAÇÃO

De acordo com Passador et al. (2007), vulcanização é a conversão da borracha através de um processo químico de formação de ligações cruzadas, ou seja, um processo onde as cadeias moleculares, até então independentes, são unidas através de ligações químicas primárias formando reticulados, que levam à formação de uma rede tridimensional no material. Essa organização estrutural permite manter ou incrementar as propriedades elásticas e reduzir o comportamento plástico do material. O elastômero se torna insolúvel e mais resistente fisicamente num intervalo de temperatura maior que o da borracha não vulcanizada.

A figura 4 mostra a estrutura da borracha não vulcanizada e após o processo de vulcanização.

Figura 4 - Borracha não vulcanizada e após a vulcanização.



Fonte: Rubberpedia. (2013)

Quando se submete à ação do calor uma mistura de borracha natural com enxofre, os átomos de enxofre atacam essa dupla ligação e estabelecem, mediante ligações do tipo covalente, pontes de átomos de enxofre entre as cadeias moleculares, formando uma verdadeira rede tridimensional. O enxofre tem o papel de agente de vulcanização. A figura 5

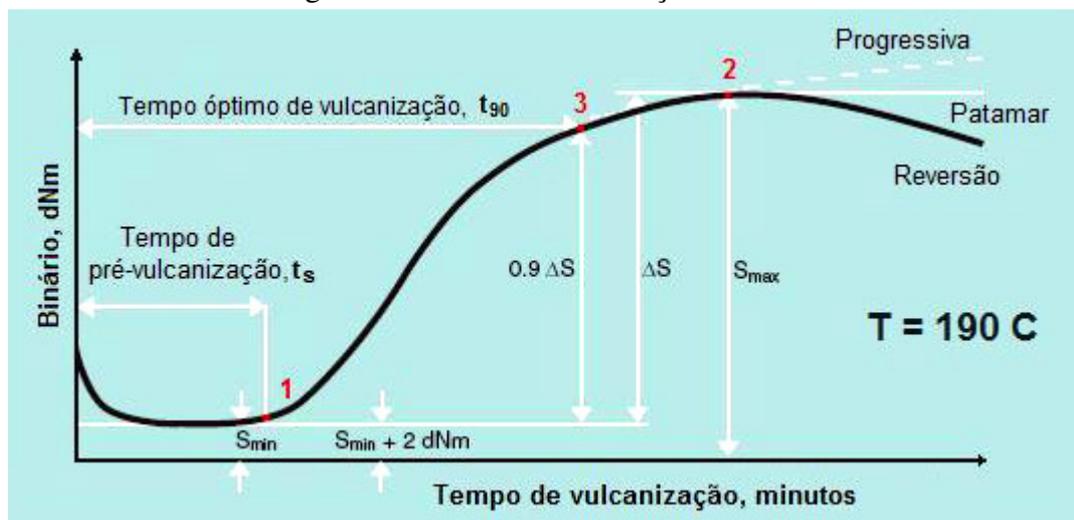


De acordo com Costa (2003), os estágios de vulcanização são divididos nas seguintes etapas:

- tempo durante o qual não ocorre vulcanização. Neste período a borracha comporta-se termoplasticamente e reduz a sua viscosidade devido ao efeito combinado do aquecimento e cisão macromolecular;
- fase da subcura. Desenvolve-se o processo de reticulação, a maioria das propriedades da borracha não está ainda completamente desenvolvida;
- estágio de cura ótima. Atinge-se o grau máximo de reticulação. Como nem todas as propriedades dos vulcanizados atingem o seu valor ótimo a este nível de cura, é necessário encontrar um compromisso entre o estágio de cura ou uma ligeira sobrecura;
- fase de sobrecura ou reversão. Obtém-se prolongando o aquecimento (vulcanização) das borrachas para além do tempo de cura ótima. E inicia o estado de reversão das propriedades físicas.

A figura 6 apresenta as fases do processo de vulcanização obtido a partir de um reômetro de torque.

Figura 6 - Fases da vulcanização.



Fonte: CTB. (2013)

Pierozan e Koserski (2010) descrevem em seu estudo sobre a vulcanização de batoques de borracha com diferentes espessuras em uma dada temperatura, medindo a evolução da temperatura no centro do mesmo em função das curvas de vulcanização, que a exposição prolongada ao calor no processo de vulcanização se dá início a fase de reversão.

Ainda segundo Pierozan e Koserski (2010), o ensaio foi realizado com o processo de moldagem por compressão, após o molde estar estabilizado a temperatura de 160°C, o batoque de borracha foi colocado com um sensor de temperatura na região central da peça dentro do molde, dando início ao processo de transferência de calor.

Os autores observaram o impacto da sobre vulcanização na parte externa em decorrência da obtenção da ótima vulcanização da parte central do batoque. Comparando as propriedades físico-mecânicas de um composto de 2 mm de espessura em relação as diversas espessuras ensaiadas, foi notado que o tempo demasiadamente longo de exposição ao calor na parte externa ocasiona uma perda considerável da tensão e o alongamento na ruptura, Sendo concluído que na vulcanização de artigos espessos para atingir um bom grau de cura na parte interna há um sacrifício da parte externa.

### **2.3.2 Ingredientes de formulação**

De acordo com Costa (2003), uma formulação de borracha é a arte e a ciência de selecionar e combinar elastômeros e aditivos para obter uma íntima mistura que proporcione as propriedades físico-mecânicas, dinâmicas e químicas necessárias ao produto final.

Segundo Rocha et al. (2007), os ingredientes de formulação podem ser divididos nos seguintes grupos.

- a) agentes de vulcanização – são aquelas substâncias que promovem ligações cruzadas entre as moléculas dos elastômeros. Os agentes de vulcanização mais comum empregado na vulcanização dos elastômeros é o enxofre, porém também se use os óxidos metálicos;
- b) aceleradores – são substâncias que, em combinação com os agentes de vulcanização, reduzem o tempo de vulcanização, aumentando assim a taxa de vulcanização e melhorando as propriedades físicas;
- c) ativadores – são substâncias que ativam o sistema de aceleração e aumentam sua eficácia, conseguindo um grande aumento no grau de vulcanização. Óxido metálico e ácido graxo geralmente são os mais usados em aplicações industriais;
- d) retardadores – são ingredientes usados para reduzir o risco da pré-vulcanização de um composto;
- e) cargas – são ingredientes usados para reforçar as propriedades físicas, dar certa características de processamento ou reduzir o custo. As cargas mais usuais são os negros de fumo e as sílicas;

- f) antidegradantes – retardam o envelhecimento natural ou acelerado causado pela exposição do composto às intempéries como calor, raios ultravioletas e gases oxidantes;
- g) outros – pigmentos, retardantes de chama, odorantes, agentes de expansão, etc..

### 2.3.3 Processos de vulcanização

Os artefatos de borracha podem ser vulcanizados de formas muito diversas. Os diversos métodos de vulcanização desenvolvidos ao longo destas 17 décadas que decorrem desde a data de sua descoberta permitem vulcanizar por meios economicamente eficientes uma pluralidade de artefatos.

Segundo Rocha et al.(2007), os métodos de vulcanização mais utilizados são:

- a) moldagem por compressão – consiste na moldagem da borracha em moldes através de pressão gerada por uma máquina hidráulica. São classificados através do método de inserção da matéria prima, podendo ser, manual, por transferência e injeção. É muito utilizado na produção de peças técnicas como anéis *o'ring*;
- b) estufa de ar quente - o método é utilizado na vulcanização de tecidos revestidos com borracha. O tecido, depois de receber esta película, de uma solução de borracha, segue de imediato para a estufa de ar quente, aquecida em geral a 120-165 °C onde, mercê de um percurso em sistema do tipo acumulador, permanece um determinado tempo de residência, consumando-se a vulcanização;
- c) moldagem por pressão interna – consiste na vulcanização de peças cilíndricas, onde o calor é transmitido para a peça através do molde externo. Na parte interna a pressão é gerada através de uma câmara de borracha (*bladder*) que comprime a peça contra as paredes do molde. Possui uma ampla gama de aplicação como na vulcanização de pneus e bolsas de suspensão;
- d) autoclave - é um recipiente que contém vapor sob pressão e é de formato cilíndrico. Podem ser aquecidos com vapor diretamente ou indiretamente em contato com a peça, eletricamente e com combustão de gás;
- e) banho de sais fundidos - a mistura de sais é aquecida a temperaturas da ordem dos 230 a 250 °C. O material extrudado é mantido imerso no banho de sais fundidos por meio de um conjunto de rolos. Esse processo de vulcanização permite atingir velocidades de vulcanização de 70 m/min, em linhas com 25-26 metros de

comprimento. É muito utilizado na produção de perfis em borracha, tubos e alguns tipos de mangueiras;

- f) leito fluidizado - o método consiste na imersão da borracha em um pseudo fluido, que é composto por pequenas esferas de vidro, com 0,2 a 0,4 mm de diâmetro, aquecidas e mantidas em suspensão por uma corrente de ar quente, o que mantém as esferas de vidro a cerca de 200-250 °C. O material extrudado passa sobrenadando neste leito fluidizado;
- g) in situ - o equipamento é cheio com água e fechado de maneira adequada, de forma a poder permitir o aquecimento da água contida no seu interior por vapor direto ou com uma serpentina onde circula vapor ou um termofluido. A água sobreaquecida transfere o seu calor para o material de revestimento e exerce a pressão suficiente para proporcionar uma boa adesão entre a parede metálica do equipamento e o material de revestimento.

Cada método qual possui suas particularidades e formas diferentes de obter a vulcanização do composto de borracha.

## 2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Dá se o nome de transferência de calor aos conjuntos de fenômenos que descrevem a passagem de calor entre dois meios. A transferência de calor pode efetuar-se através de três mecanismos distintos (INCROPERA e DEWITT, 2003):

- a) Condução - se refere ao transporte de energia em um meio sólido devido à existência de um gradiente de temperatura. O mecanismo físico que proporciona esse fenômeno é a atividade atômica, ou molecular, aleatória.
- b) Convecção –que se dá em meio fluídico e é composto pelo mecanismo da difusão em que a transferência de calor se dá pelo movimento aleatório molecular e pelo movimento global, ou macroscópico, do fluido.
- c) Radiação - que é a energia emitida por toda matéria que se encontra a uma temperatura finita, sendo transportada por ondas eletromagnéticas e difere da condução e convecção, pois não necessita de um meio para propagação.

Segundo Incropera e DeWitt (2003), a transferência de calor é a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura entre dois corpos. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes ocorrerá transferência de calor.

Está implícito na definição acima que um corpo nunca contém calor, mas calor é identificado quando cruza a fronteira de um sistema. O calor é, portanto um fenômeno transitório de fronteira, que cessa quando não existe mais uma diferença de temperatura entre dois meios (BORGNAKKE e SONNTAG, 2009).

Incropera e DeWitt (2003) descrevem que o fluxo de calor por condução (2.1) é a quantidade de energia sendo transferida entre dois corpos ou um meio.

$$q'' = -k \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (2.1)$$

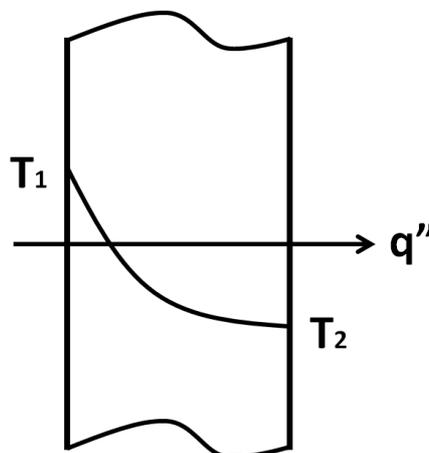
Sendo,  $k$  a condutividade térmica do material (W/mK);  $(T_2 - T_1)$  a diferença das temperaturas que entra nas faces ( $^{\circ}\text{C}$ ); e  $L$  a espessura da parede através da qual a transferência de calor (m).

Tendo em vista o assunto abordado nesse trabalho, o mecanismo de transferência de calor por condução no regime transiente será brevemente exposto nesse item.

#### 2.4.1 Condução transiente

A condução de calor chama-se transiente ou transitória, quando a mesma varia com o tempo. Se as temperaturas da face interna, externa ou ambas de um corpo sólido for alterada repentinamente, a temperatura da face oposta ou do centro do sólido tende a variar com o tempo. Em outras palavras, se houver mudanças nas condições de contorno do sistema surge um regime de transferência de calor não estacionário e passa algum tempo até que se atinja a condição de equilíbrio estacionário (ÖZISIK, 1990). A figura 7 mostra o fluxo de calor unidimensional transiente através de uma parede plana.

Figura 7 - Fluxo de calor unidimensional transiente.



## 2.4.2 Capacitância global

Para condições em que os gradientes de temperatura no interior do sólido são pequenos, um procedimento simples pode ser empregado, que é o método da capacitância global. Esse método basea-se na hipótese de que a temperatura no interior do sólido é uniforme no espaço, em qualquer instante de tempo durante o processo transiente.

Segundo a lei de Fourier, a condução térmica na ausência de um gradiente de temperatura implica na existência de uma condutividade térmica infinita. Embora essa condição nunca possa ser satisfeita integralmente, ela é aproximada quando a resistência térmica à condução de calor no interior do sólido é pequena em comparação a resistência térmica à transferência de calor por convecção entre o sólido e sua vizinhança (INCROPERA, 2003).

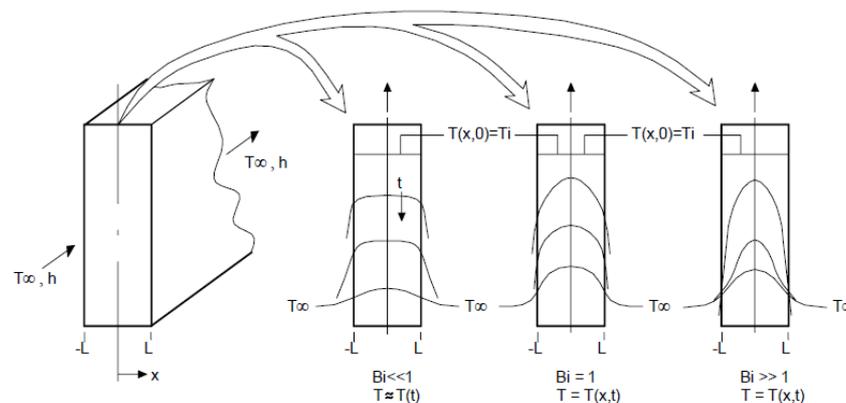
Braga (2004) descreve que o número de Biot (2.2) é a razão entre as resistências interna e externa e dá a medida do decréscimo de temperatura no sólido relativo à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido.

$$Bi = \frac{h \cdot Lc}{k} \quad (2.2)$$

Sendo,  $h$  o coeficiente convectivo ( $W/m^2K$ );  $Lc$  o comprimento característico (m); e  $k$  a condutividade térmica do material ( $W/mK$ ).

Se o  $Bi \ll 1$  é razoável assumir uma distribuição de temperatura uniforme no sólido em qualquer tempo durante o processo transiente. Para o  $Bi \gg 1$  o gradiente de temperatura no sólido é muito maior que entre a superfície e o fluido. A figura 8 mostra a distribuição de temperatura em regime transiente para diferentes números de Biot em uma parede plana.

Figura 8 - Distribuição de temperatura em regime transiente.



Fonte: Incropera e DeWitt. (2003)

Incropera e DeWitt (2003), explica que o número de Biot fornece a medida da relação entre a queda de temperatura ao longo do sólido e a diferença das temperaturas de sua superfície e do fluido.

Outro parâmetro adimensional característico do processo de condução transiente é o número de Fourier (2.3), definido como.

$$Fo = \frac{\alpha \cdot t}{Lc^2} \quad (2.3)$$

Onde,  $\alpha$  a difusividade térmica ( $m^2/s$ );  $t$  o tempo (s); e  $Lc$  o comprimento característico (m).

Se isolar o tempo na equação 2.3 obtém-se a equação 2.4.

$$t = \frac{Fo \cdot L^2}{\alpha} \quad (2.4)$$

A difusividade térmica (2.5) mede a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação a sua capacidade de armazená-la.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp} \quad (2.5)$$

Sendo,  $k$  a condutividade térmica do material ( $W/mK$ );  $\rho$  a densidade ( $kg/m^3$ ) e  $Cp$  o calor específico ( $kJ/kgK$ ).

Ao se desprezar os gradientes de temperatura no interior do sólido, a alternativa é a determinação de um balanço global de energia no sólido (2.6), que deve relacionar a taxa de perda de calor da superfície com a variação de sua energia interna.

$$-\dot{E}_s = \dot{E}_{ac} \quad (2.6)$$

Ou na forma da equação 2.7

$$-h \cdot A_{sup} \cdot (T - T_{\infty}) = \rho \cdot V_c \frac{dT}{dt} \quad (2.7)$$

### 2.4.3 Efeitos espaciais

Incropera e DeWitt (2003), explica que quando o método da capacitância global é inadequado, procedimentos alternativos devem ser utilizados. Deve-se então, considerar que o gradiente de temperatura interna não é mais desprezível.

De modo geral, os problemas de condução em regime transiente são descritos pela equação do calor. Contudo, para maioria dos problemas, tal como a da parede plana, apenas uma coordenada espacial é necessária para descrever a distribuição interna de temperatura.

Sem a geração interna e com a hipótese de condutividade térmica constante, a equação se reduz a (2.8).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

Para se resolver essa equação, determinando a distribuição de temperatura  $T(x,t)$ , torna-se necessário especificar uma condição inicial e duas condições de contorno.

Para um típico problema de condução transiente, a condição inicial é dada por (2.9):

$$T(x, 0) = T_i \quad (2.9)$$

Defini-se as condições de contorno como (2.10):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.10)$$

E na forma da equação (2.11)

$$-k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h \cdot [T(L, t) - T_\infty] \quad (2.11)$$

A equação 2.9 presume uma distribuição de temperatura uniforme no tempo  $t=0$ ; a equação 2.10 reflete a exigência de simetria no plano intermediário da parede; a equação 2.11 descreve a condição superficial para  $t>0$ . Nas equações, da 2.8 até 2.11, fica evidente que, além de ser função de  $x$  e de  $t$ , a distribuição de temperaturas na parede depende de outros parâmetros físicos (2.12). Em particular:

$$T = T(x, t, T_i, T_\infty, L, k, \alpha, h) \quad (2.12)$$

Esse problema pode ser resolvido analiticamente ou numericamente. O mais importante é notar as vantagens que podem ser obtidas pela adimensionalização das equações que descrevem o processo. Isso pode ser feito pelo arranjo das variáveis, conforme (2.13).

$$\theta^* \equiv \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (2.13)$$

Sendo que  $\theta^*$  deve estar no intervalo  $0 \leq \theta^* \leq 1$ . Uma coordenada espacial adimensional pode ser definida como (2.14).

$$x^* \equiv \frac{x}{L} \quad (2.14)$$

Onde  $L$  é a semi-espessura da placa plana. Um tempo adimensional pode ser definido como (2.15).

$$t^* \equiv \frac{\alpha \cdot t}{L^2} \equiv Fo \quad (2.15)$$

Substituindo as equações 2.13 a 2.15 nas equações 2.8 a 2.11 a equação do calor é escrita da seguinte forma (2.16).

$$\frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x^{*2}} = \frac{\partial \theta^*}{\partial Fo} \quad (2.16)$$

E as condições de contorno se tornam (2.17, 2.18 e 2.19).

$$\theta^*(x^*, 0) = 1 \quad (2.17)$$

$$\left. \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \right|_{x^*=0} = 0 \quad (2.18)$$

$$\left. \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \right|_{x^*=1} = -Bi \theta^*(1, t^*) \quad (2.19)$$

Na forma adimensional, a dependência funcional pode ser representada como (2.20).

$$\theta^* = f(x^*, Fo, Bi) \quad (2.20)$$

A equação 2.20 indica que para uma dada geometria, a distribuição transiente de temperatura é uma função universal de  $x^*$ ,  $Fo$ ,  $Bi$ . Ou seja, a solução adimensional assume uma forma que não depende dos valores particulares de  $T_i$ ,  $T$ ,  $L$ ,  $k$ ,  $\alpha$ , ou  $h$ .

#### 2.4.4 Solução aproximada

Incropera e DeWitt (2003), explica que para um caso com parede plana com espessura pequena comparada a largura e a altura da parede, é razoável supor que a condução de calor ocorra exclusivamente na direção  $x$ . Uma solução exata para esse problema tem a forma da equação (2.21).

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \exp(-\xi_n^2 \cdot Fo) \cdot \cos(\xi_n \cdot x^*) \quad (2.21)$$

Onde  $C_n$  é o coeficiente definido pela equação (2.22).

$$C_n = \frac{4 \operatorname{sen} \xi_n}{2 \xi_n + \operatorname{sen}(2 \xi_n)} \quad (2.22)$$

A equação 2.21 pode ser aproximada pelo primeiro termo da série. Desse modo a forma adimensional da distribuição de temperaturas se transforma na equação (2.23).

$$\theta^* = C_1 \cdot \exp(-\xi_1^2 \cdot Fo) \cdot \cos(\xi_1 \cdot x^*) \quad (2.23)$$

Onde  $\theta^* \equiv (T_0 - T_\infty)/(T_i - T_\infty)$  representa a temperatura adimensional no plano central ( $x^* = 0$ ). A equação fica (2.24).

$$\theta^* = C_1 \cdot \exp(-\xi_1^2 \cdot Fo) \quad (2.24)$$

Se isolar Fo da equação 2.24 obtém-se a equação (2.25).

$$Fo = -\frac{1}{\xi_1^2} \cdot \ln\left(\frac{\theta^*}{C_1}\right) \quad (2.25)$$

#### 2.4.5 Transferência total de energia

Esse método é bastante útil quando se deseja saber a quantidade total de energia (2.26) que deixou a parede até um dado instante de tempo  $t$  do processo transiente. Segundo Incropera e DeWitt (2003), pode ser aplicada ao intervalo de tempo delimitado pela condição inicial ( $t=0$ ) e por qualquer outro instante de tempo  $t>0$ .

$$E_e - E_s = \Delta E_{ac} \quad (2.26)$$

Igualando a quantidade de energia que sai da parede  $Q$  a  $E_s$ , e estabelecendo  $E_e=0$  e  $\Delta E_{ac} = E(t) - E(0)$ , segue-se que (2.27):

$$Q = -[E(t) - E(0)] \quad (2.27)$$

Ou na forma da equação (2.28)

$$Q = -\int \rho c [T(r, t) - T_i] dV \quad (2.28)$$

Onde a integração é efetuada no volume da parede. É conveniente adimensionar esse resultado com a definição da grandeza (2.29).

$$Q_0 = \rho c V (T_i - T_\infty) \quad (2.29)$$

A equação 2.29 pode ser interpretada como a energia interna inicial da parede em relação à temperatura do fluido. Ela também representa a quantidade máxima de energia que pode ser transferida caso o processo se estenda até  $t=\infty$ . Portanto, supondo propriedades termofísicas constantes, a razão entre a quantidade total de energia transferida ao longo do intervalo de tempo  $t$  e a transferência de energia máxima possível (2.30) é dada por.

$$\frac{Q}{Q_0} = \int \frac{-[T(x, t) - T_i] dV}{T_i - T_\infty} \frac{dV}{V} = \frac{1}{V} \int (1 - \theta^*) dV \quad (2.30)$$

Utilizando a forma aproximada da distribuição de temperatura na parede plana, a integração da equação fica (2.31).

$$\frac{Q}{Q_0} = 1 - \frac{\sin \xi_1}{\xi_1} \theta_0^* \quad (2.31)$$

## 2.5 MODELO NUMÉRICO PARA O PROCESSO DE AQUECIMENTO

Um dos pontos de grande importância na análise do processo de vulcanização de borracha é o cálculo do campo de temperatura. Buscando melhor eficiência de vulcanização e uniformidade das propriedades físicas e químicas do composto vulcanizado, se buscam modelos numéricos para o melhor entendimento do processo de transferência de calor durante o processo.

Pinheiro (2001) descreve que no ciclo de vulcanização, o fenômeno da transmissão de calor precede o fenômeno das reações termo-químicas, afinal o calor juntamente com o enxofre, são os agentes primários que promovem a cura do composto de borracha. Embora haja uma dependência, na realidade os dois fenômenos podem ser estudados separadamente, sem prejuízo para a compreensão do procedimento final para o dimensionamento da vulcanização.

Segundo Melo (2011), o método de elementos finitos (MEF) consiste em diferentes métodos numéricos que aproximam a solução de problemas de valor de fronteiras descritos tanto por equações diferenciais ordinárias quanto por equações diferenciais parciais através da subdivisão da geometria do problema em elementos menores, chamados elementos finitos, nos quais a aproximação da solução exata pode ser obtida por interpolação de uma solução aproximada.

Ainda segundo Melo (2011), o método numérico das diferenças finitas é facilmente executado em computadores, consistindo na discretização do domínio e na substituição das derivadas presentes na equação diferencial por aproximações utilizando apenas os valores numéricos da função.

Neste tipo de problema, as duas derivadas relativamente ao tempo e ao espaço, são agora aproximadas pelas diferenças finitas.

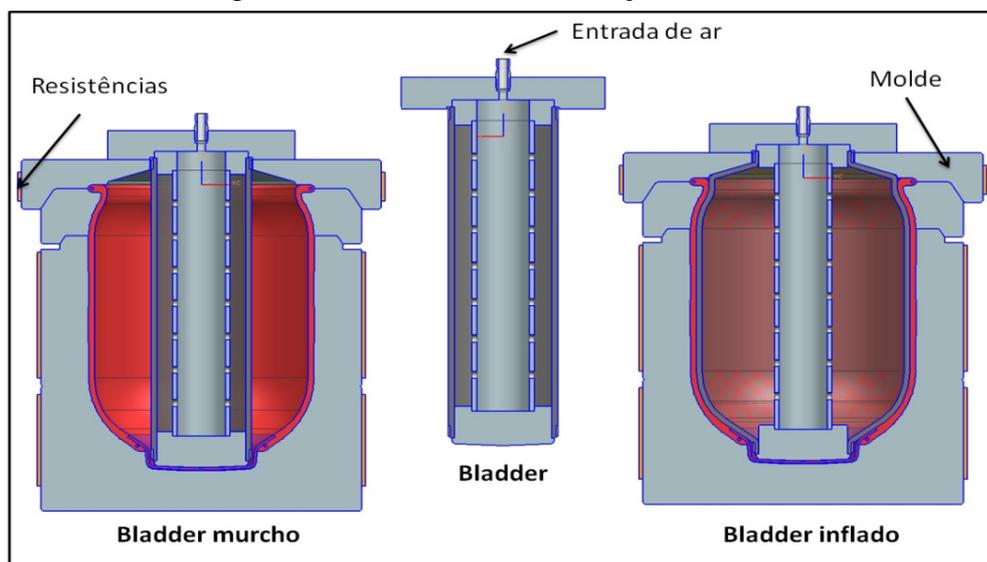
### 3 DESENVOLVIMENTO

Nesta etapa será analisado o processo de vulcanização por pressão interna utilizado pela empresa Globo Componente Automotivos, como também a proposta detalhada da intervenção deste trabalho mostrando a metodologia adotada.

#### 3.1 PROCESSO ATUAL

O processo de vulcanização, das suspensões pneumáticas por pressão interna pode ser visto na figura 9. O equipamento consiste de um molde externo de alumínio aquecido a 180 °C por resistências elétricas e com a forma final do produto gravada nas suas faces. A borracha de 2,7 mm de espessura é pressionada para ganhar a forma da mesma. Internamente há uma bexiga (*bladder*) também de borracha e inicialmente murcha que será inflada com pressão de ar a aproximadamente 17 bar e 80 °C que será responsável por pressionar o composto contra as paredes externas do molde.

Figura 9 - Processo de vulcanização utilizado.



Fonte: Autor. (2014)

Para obtenção do tempo de cura é utilizado o método físico que consiste na vulcanização de diversas peças na mesma temperatura, mas em tempos diferentes. Após as peças são submetidas a um ensaio de tração e comparadas as suas propriedades físicas.

Com base em ensaios de resistência nas peças, se obteve um tempo ótimo de cura de aproximadamente sete minutos para uma espessura de 2,7 mm. Com tempos de cura inferiores

a borracha não demonstrou resistência suficiente para as cargas exigidas e com tempos de cura superiores a borracha começa a degradar, apresentando bolhas na superfície em contato com a fonte de calor.

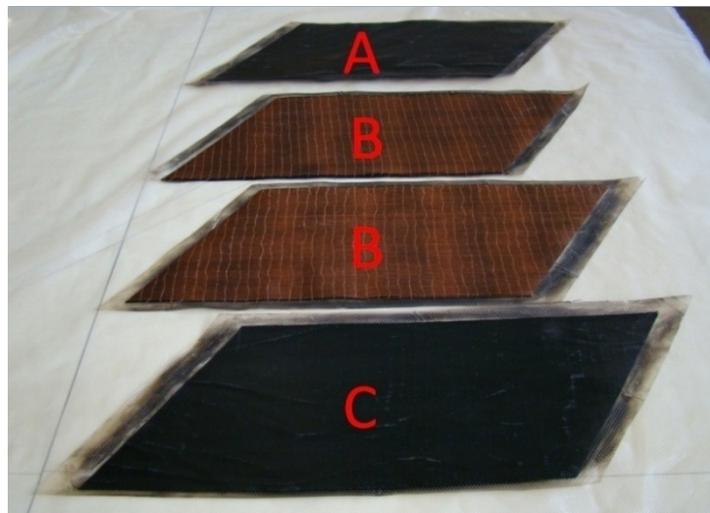
Levando em consideração a nova espessura de borracha que varia entre 6 a 8 mm para suspensões de grande porte pretendida pela empresa, fica evidente um aumento considerável no tempo de vulcanização. Tendo em vista fatores como tempo e temperatura, o processo de vulcanização é a fase de maior importância na produção de uma suspensão pneumática. O melhor dimensionamento da distribuição do calor ao longo da espessura do composto determinará o sucesso ou o fracasso do produto final.

O composto a ser vulcanizado é preparado através de quatro laminados enrolados e disposto em camadas conforme abaixo:

- a) camada interna – composta de borracha, que terá a função de manter a estanqueidade do ar contido em seu interior;
- b) camada intermediária interna e externa – formadas por um tecido de nylon enrolado um oposto ao outro a um certo grau em relação ao eixo da peça e tem a responsabilidade de resistir as cargas de pressão geradas internamente em razão da pressão do sistema e das cargas atuantes sobre o mesmo;
- c) camada externa – constitui de outra camada de borracha que terá a função de ajudar na estanqueidade e selar os componentes dos intempéries externo como radiação solar, óleos, graxas e ozônio.

A figura 10 demonstra a montagem dos laminados de borracha a ser vulcanizado.

Figura 10 - Montagem dos laminados de borracha.

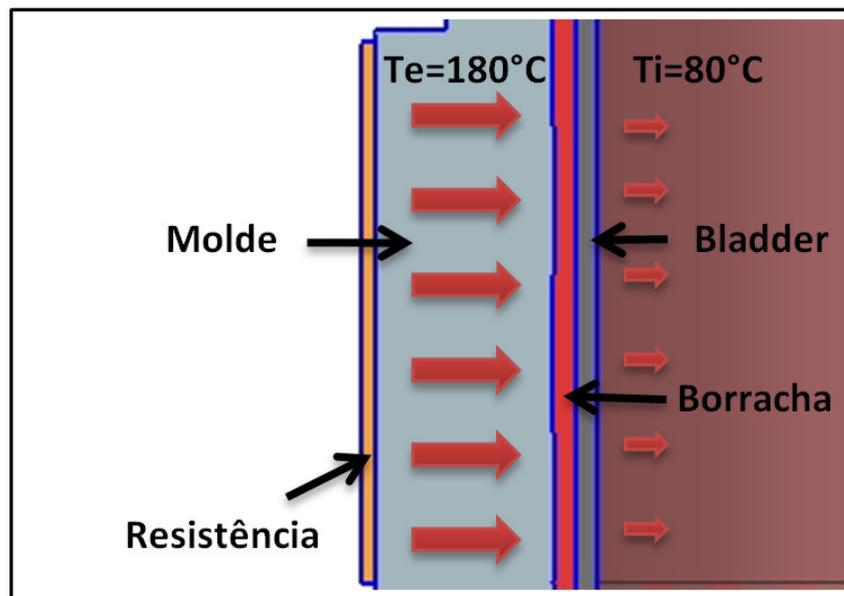


### 3.2 O PROBLEMA NA TRANSMISSÃO DE CALOR

O molde externo construído em alumínio possui alta condutibilidade térmica transmitindo facilmente todo calor gerado pelas resistências para a face externa da borracha do produto final em contato com a parede interna aquecida. Por outro lado, tanto o composto como o próprio *bladder*, por serem de borracha são péssimos condutores de calor fazendo com que o processo de condução de calor no centro da suspensão ocorra lentamente. Durante o processo de vulcanização as regiões internas da suspensão permanecem em regime transiente por quase todo ciclo de cura. Obviamente as regiões externas com maior proximidade a fonte de calor atingem mais rapidamente a condição isotérmica.

Sendo a parede externa do molde aquecida a única fonte de geração de calor, a temperatura contida no *bladder* de 80 °C é proveniente da transferência de calor da borracha da peça sendo vulcanizada, conforme ilustrado na figura 11. Desta forma há uma fuga de calor para o lado do *bladder* e de conseqüência para o ar interno a esse, que a cada ciclo é eliminado para o ambiente. Com essa perda de energia térmica aumenta o tempo para atingir a temperatura ótima de vulcanização no interior da bolsa e, conseqüentemente, aumentando o tempo de processo e custo final do produto.

Figura 11 - Uma frente de calor na vulcanização.



Fonte: Autor. (2014)

Como atualmente toda entrada de calor no composto de borracha da suspensão pneumática se dá pela face externa, há dificuldade para se atingir um bom estado de cura no

outro lado da peça de borracha. A região em contato diretamente com a fonte de calor terá um maior tempo de residência a elevadas temperaturas e passa a ser uma região de sacrifício e entra no estado de reversão diminuindo bruscamente as propriedades físicas em relação a um composto vulcanizado uniformemente.

Outro problema evidenciado é a grande inércia térmica em razão da baixa condutibilidade térmica da borracha que possui valores entre 0,1 a 0,3 W/m.k dificultando a vulcanização uniforme do composto sendo vulcanizado.

### 3.3 PROPOSTA DE INTERVENÇÃO

De acordo com a nova espessura pretendida, notaram-se dois aspectos cruciais para viabilidade do projeto. A qualidade de vulcanização ao longo de toda a espessura do composto de borracha e os altos tempos de ciclo que exigirá mais máquinas para atingir a demanda do mercado.

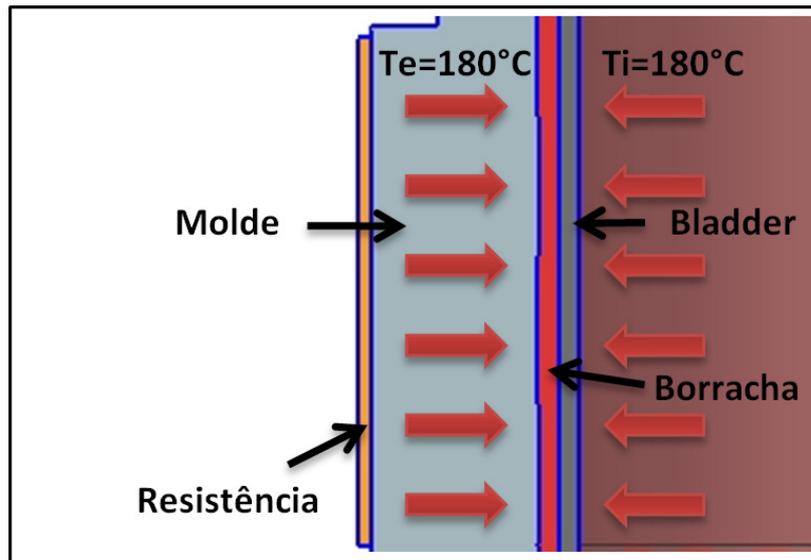
Os dois fatores críticos do projeto se defrontam com o fenômeno da transferência de calor reforçando a sua importância no sucesso do estudo. Observando tal situação foi pensado primeiramente na possibilidade de se criar uma segunda frente de calor vindo internamente à peça por intermédio do *bladder*. Isso diminui o tempo necessário para atingir a temperatura de cura no centro do composto de borracha e, de consequência diminuindo o tempo de exposição das regiões expostas diretamente às frentes de calor.

A idéia consiste em aumentar a temperatura do fluido internamente ao *bladder* que é responsável apenas pela pressão, criando assim uma segunda frente de calor conforme a figura 12.

O ar como condutor de calor possui grandes desvantagens em relação a um fluido. Sua condutibilidade térmica é muito baixa, aumentando assim o tempo necessário para aquecer e transmitir o calor necessário para vulcanizar a borracha.

Para isso o fluido responsável por pressurizar o *bladder* agora é substituído por óleo térmico. O óleo adotado para o processo é o Baku TC da Tutela, um óleo mineral a base de parafínicos e aditivos especiais que lhe garante excelentes características de viscosidade, temperatura, alto coeficiente de transferência de calor, baixa pressão de vapores e uma temperatura máxima de trabalho de 300 °C, superior à temperatura necessária para o processo.

Figura 12 - Duas frentes de calor na vulcanização.

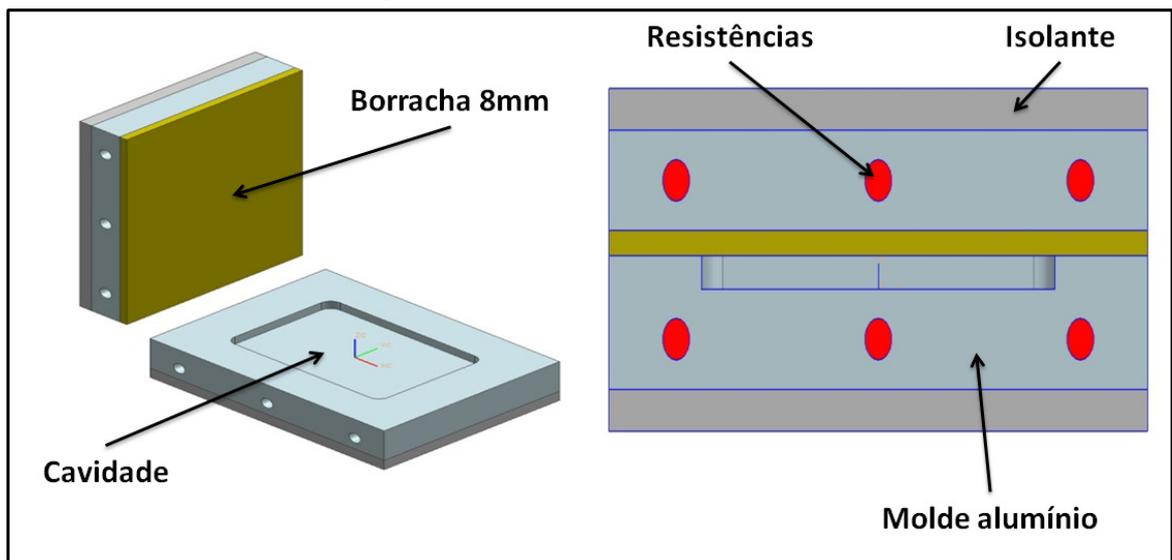


Fonte: Autor. (20143)

### 3.4 MOLDE EXPERIMENTAL

Para a realização dos ensaios práticos de vulcanização, foi construída uma ferramenta de alumínio com resistências, para analisar o processo de vulcanização das amostras simulando a situação real de transferência de calor da suspensão pneumática. A figura 13 mostra a ferramenta construída para os ensaios.

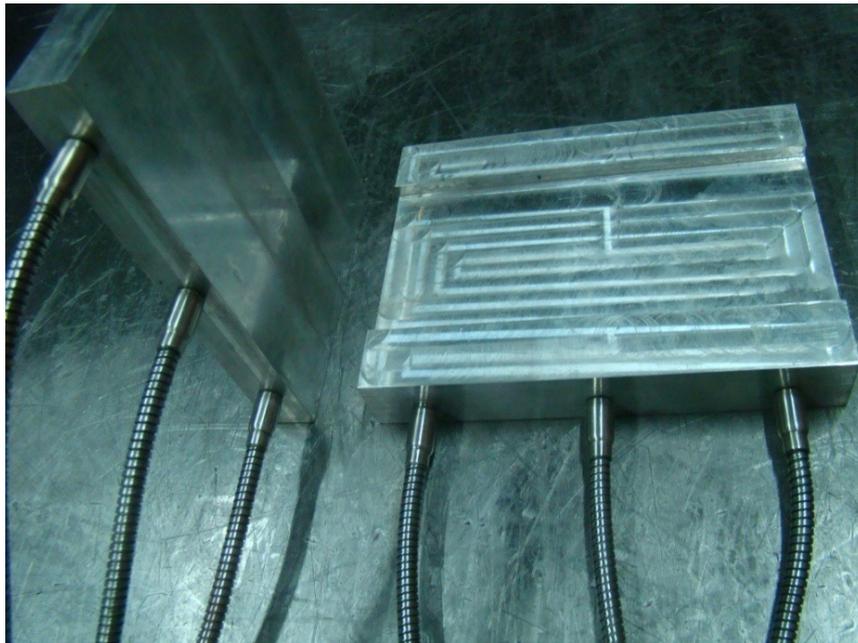
Figura 13 - Ferramenta das amostras.



Fonte: Autor. (2014)

A ferramenta é composta por duas partes, ambas isoladas nas suas faces em contato com a prensa de vulcanização e com resistências introduzidas no centro das placas de alumínio a uma distância de 70 mm entre elas. Uma das placas possui sua face plana e a outra possui uma cavidade de vulcanização onde será colocado o composto de borracha conforme a figura 14.

Figura 14 - Cavidade de vulcanização.



Fonte: Autor. (2014)

Para o controle da temperatura do molde foi usado um termopar em cada placa, ligados a um controlador de temperatura de duas zonas da marca Inova com a histerese regulada em 3 °C, que é responsável por controlar as 3 resistências de 1000 W colocadas em cada placa para geração e manutenção da temperatura do molde.

Para reproduzir com exatidão a baixa transferência de calor na parte do *bladder* de borracha o qual é responsável pela vulcanização da parte interna da suspensão, foi colocada em uma das faces da ferramenta uma capa de borracha já vulcanizada com 8 mm de espessura. Com isso ter-se-á um baixo fluxo de calor em uma das faces e um alto fluxo de calor na outra face.

### 3.5 INSTRUMENTAÇÃO DO MOLDE

Para fazer a medição de temperatura no composto de borracha ao longo do processo de vulcanização, foram instalados três termopares, sendo dois nas faces externas logo abaixo da

superfície e o outro na região central da peça. Mediu-se então, o tempo necessário para que o centro do composto de borracha atingisse a temperatura de vulcanização.

Os termopares utilizados foram do tipo J que possuem faixa de utilização de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  e erro de mais ou menos  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os termopares foram acoplados a um controlador de temperatura da marca Inova, o qual recebe as medidas de temperatura de aquecimento durante o tempo de 700 segundos de vulcanização. A figura 15 mostra os equipamentos utilizados para leitura de dados durante o processo de vulcanização.

Figura 15 - Equipamentos utilizados para leitura de dados.



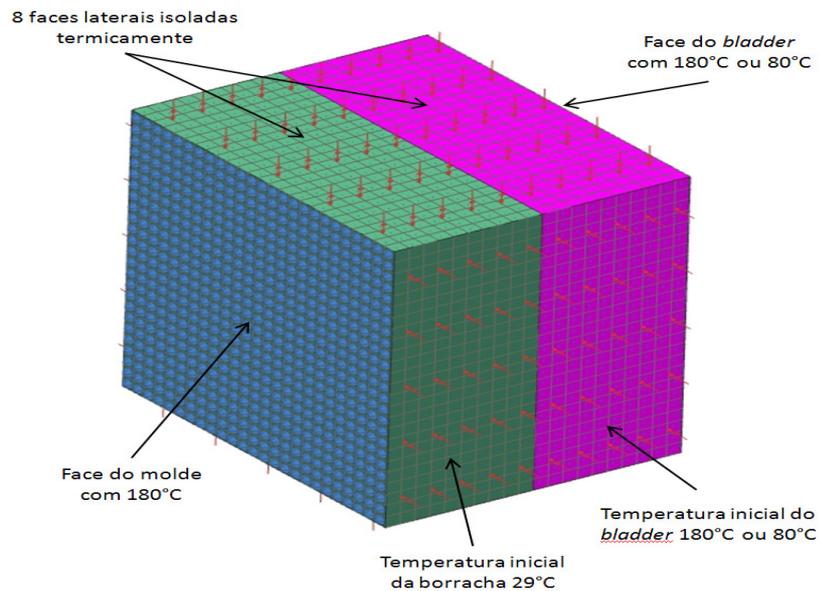
Fonte: Autor. (2014)

Foi utilizado um termômetro de mira a laser da marca Infrared para conferir as temperaturas do experimento e garantir as leituras de temperatura.

### 3.6 COMPARAÇÃO COM SIMULAÇÃO MEF

Com a finalidade de avaliar os valores obtidos, foi realizada uma análise do processo de transferência de calor em placas plana via MEF. O *software* utilizado foi o NX8 CAE no ambiente de simulações térmicas. Os dados de entrada foram os mesmos utilizados nos cálculos analíticos. A figura 16 demonstra a interface de trabalho do *software* com a malha em verde que é a borracha a ser vulcanizada com a temperatura inicial a  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura medida no início dos ensaios), e o *bladder* em rosa que terá sua temperatura variada entre  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  para o caso com duas frentes de calor e  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  para o caso com uma frente de calor.

Figura 16 - Interface de trabalho do *software*.

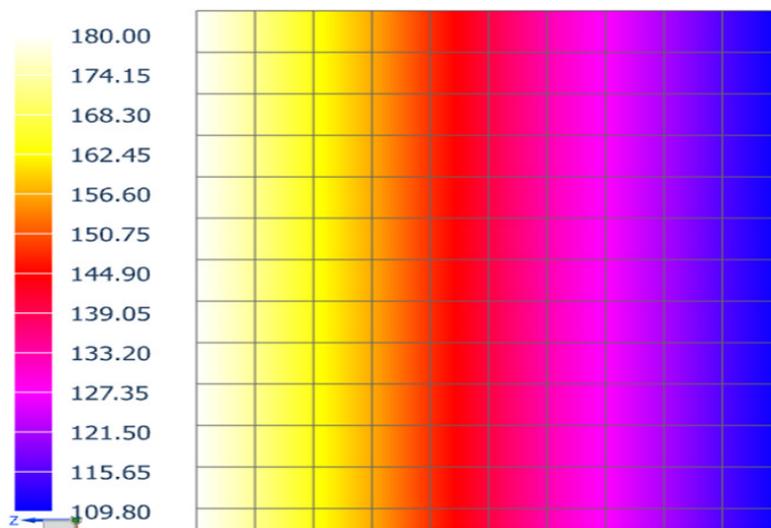


Fonte: Autor. (2014)

Visando reproduzir com exatidão a alta condutibilidade térmica em umas das faces em razão do molde de alumínio e a baixa condutibilidade da borracha do *bladder*, foi analisado o processo com a temperatura da parte interna da suspensão sendo transferida através de uma segunda parede de 8 mm de espessura com as mesmas propriedades da borracha sendo vulcanizada. A figura 17 demonstra a análise com uma frente de calor.

Figura 17 - Simulação com uma frente de calor.

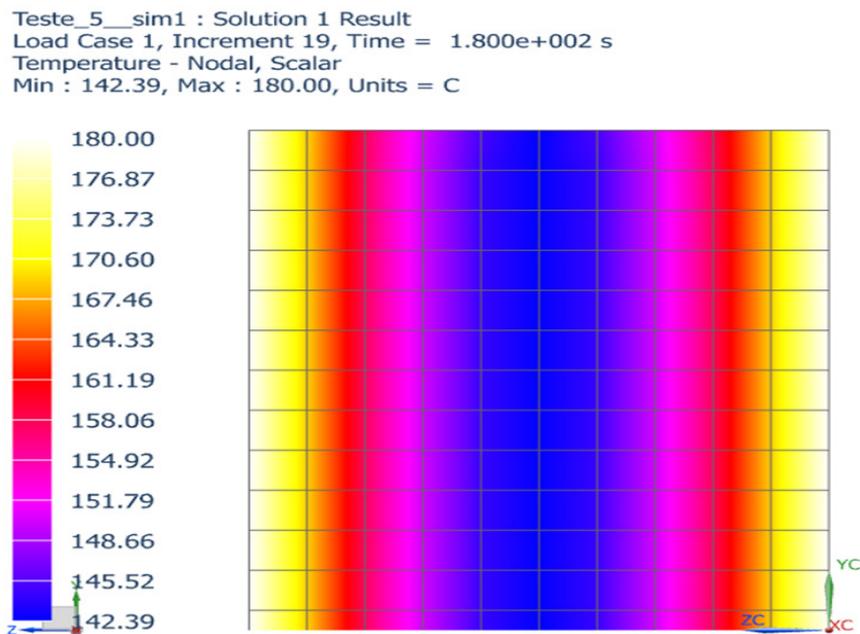
Teste\_4\_sim1 : Solution 3 Result  
Load Case 1, Increment 57, Time = 5.600e+002 s  
Temperature - Nodal, Scalar  
Min : 80.00, Max : 180.00, Units = C



Fonte: Autor. (2014)

Foram analisadas as duas situações de transferência de calor em regime transiente linear com elementos cúbicos de 0,8 mm de lado e isolada termicamente em suas laterais. A temperatura da face do molde foi adotada em 180 °C para os dois casos e a temperatura do *bladder* em 80 °C para o modelo com uma frente de calor e de 180 °C para a proposta de intervenção com duas frentes de calor. A figura 18 descreve a análise da situação proposta com duas frentes de calor.

Figura 18 - Simulação com duas frentes de calor.



Fonte: Autor. (2014)

Para ambos os casos foram obtidos os valores de temperatura no centro da parede de borracha até atingir o ponto de referência especificado em 140 °C. Com esses valores se torna possível validar o experimento prático confrontando seus valores com os obtidos no ensaio experimental e analítico.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no cálculo analítico, nos ensaios experimentais e na simulação computacional pelo MEF, assim como a discussão desses resultados.

### 4.1 CÁLCULO ANALÍTICO

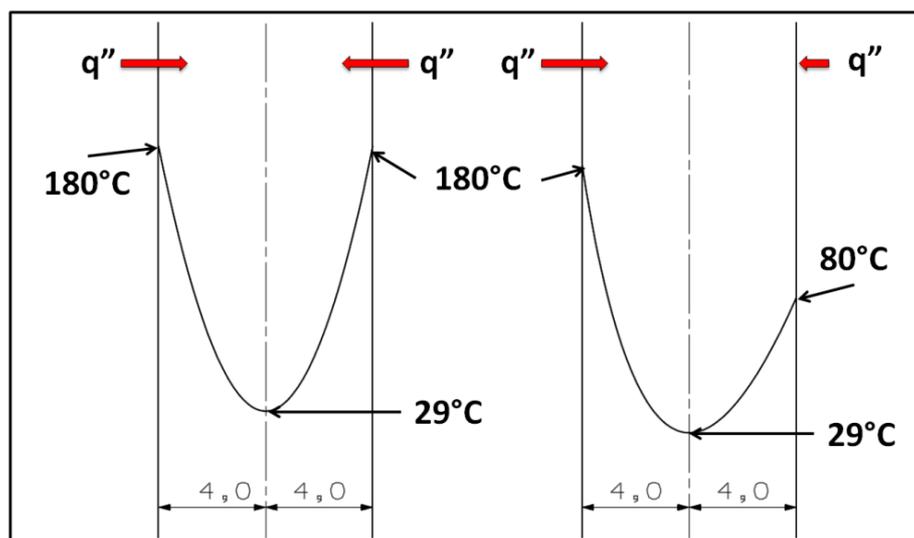
#### 4.1.1 Calor transferido

Levando em consideração que o diâmetro da nova suspensão pneumática pretendida é muitas vezes maior que a espessura, pode-se assim considerar o estudo como uma parede plana sem grandes desvios dos resultados finais.

Os compostos de borracha durante o processo de vulcanização têm suas propriedades físicas alteradas com o aumento da temperatura tornando o processo de transferência de calor de um regime transiente linear para um regime transiente não linear. Para desenvolver esse processo analiticamente considera-se o mesmo como um regime transiente linear, tendo em vista que as alterações de propriedades são particularmente pequenas e podendo assim ser desprezadas no estudo.

A figura 19 descreve a energia térmica em trânsito no instante inicial nas duas situações analisadas, devido à diferença de temperatura no espaço.

Figura 19 - Energia térmica em trânsito no instante inicial.



Para determinar a quantidade de energia térmica que entra na parede de borracha no instante inicial e durante o processo de vulcanização nos dois casos de transferência de calor, utilizou-se a equação (2.1).

Tomando em consideração que o composto de borracha nos dois casos recebe calor em ambas as paredes de sua face, pode-se analisar o processo como simétrico e adotando sua linha de centro como referência.

Para a face com distribuição de calor de 180 °C e adotando que o composto inicia sua vulcanização com 29 °C (mesma temperatura medida no início dos ensaios experimentais), uma estimativa do fluxo de calor no instante inicial é dada por:

$$q'' = -0,13W/m.K. \frac{(29^{\circ}C - 180^{\circ}C)}{0,004m}$$

$$q'' = 4.907 W/m^2$$

Já para a face com temperatura de 80 °C e adotando a mesma condição inicial de 29 °C, o fluxo de calor no instante inicial é dado por:

$$q'' = -0,13W/m.K. \frac{(29^{\circ}C - 80^{\circ}C)}{0,004m}$$

$$q'' = 1.657 W/m^2$$

Assim obtém-se para o processo atual com uma frente de calor, o valor da soma das frentes de calor de 180 °C e a de 80 °C proveniente do *bladder*.

$$q'' = 6.564 W/m^2$$

E para o novo processo com duas frentes de calor, o valor fica como o dobro da frente de calor com 180 °C, por ser um processo simétrico.

$$q'' = 9.814 W/m^2$$

Com base nos resultados dos cálculos pode se concluir que a quantidade de energia térmica que entra no corpo de borracha no instante inicial da vulcanização aumenta 49% no novo processo de transferência de calor. Conseqüência disso é a diminuição do tempo necessário para atingir o estado de vulcanização.

#### 4.1.2 Determinação do tempo de aquecimento

Adotando uma temperatura de referência no centro da parede de 140 °C pode-se calcular o tempo necessário para o interior do composto de borracha atingir a temperatura

determinada para os dois processos, tendo assim um valor mensurado da redução do tempo de vulcanização.

Considerando os valores do anexo B da condutibilidade térmica da borracha ( $k$ ) de 0,13 W/m.K, a massa específica ( $\rho$ ) 1100 kg/m<sup>3</sup> e o calor específico ( $C_p$ ) de 2010 J/kg.K. A difusividade térmica ( $\alpha$ ) da borracha é obtida da equação (2.5).

$$\alpha = \frac{0,13 \frac{W}{m.K}}{1100 \frac{Kg}{m^3} \cdot 2010 \frac{J}{Kg.K}}$$

$$\alpha = 5,8796 \cdot 10^{-8} m^2/s$$

Segundo Braga (2004), para uma dada área e um dado calor trocado, o produto do coeficiente de troca de calor por convecção pela diferença de temperaturas entre superfície e fluido permanece constante.

Como essa aplicação não possui calor sendo trocado por convecção, o valor de  $h$  fica sendo infinito e o Biot passa a ter o seu valor como infinito, tendo uma diferença nula de temperaturas que equivale a se fazer a temperatura da superfície igual à temperatura do fluido.

Analisando a situação de vulcanização com duas frentes de calor, ambas com 180 °C de temperatura no instante inicial de troca térmica em suas superfícies pode-se assim considerar o problema simétrico analisando apenas um dos lados de condução. Da equação (2.13) obtém-se:

$$\theta^* = \frac{140 \text{ }^\circ\text{C} - 180 \text{ }^\circ\text{C}}{29 \text{ }^\circ\text{C} - 180 \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$\theta^* = 0,2649$$

Segundo a tabela do anexo A, tem-se que para Biot infinito  $C_1$  igual a 1,2733 e  $\xi_1$  igual a 1,5708.

Aplicando a equação 2.25 obtém-se:

$$Fo = -\frac{1}{1,5708^2} \cdot \ln \left( \frac{0,2649}{1,2733} \right)$$

$$Fo = 0,6363$$

Então usando a equação 2.4 obtém-se o tempo em segundos para atingir a temperatura de 140 °C no centro da espessura da borracha.

$$t = \frac{0,6363 \cdot 0,004^2}{5,8796 \cdot 10^{-8}}$$

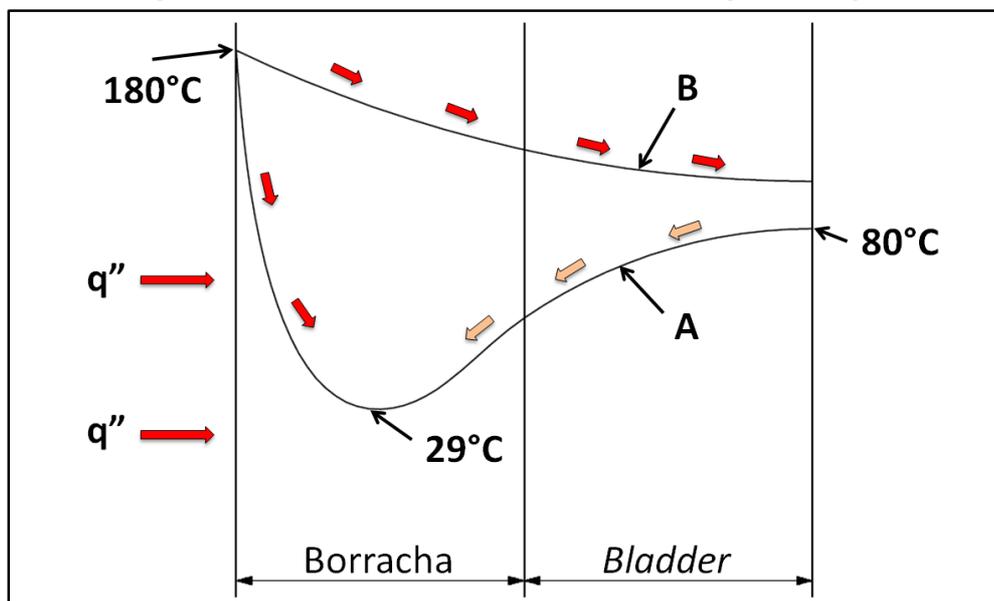
$$t = 173,15 s$$

Obtem-se o valor de 173,15 s para atingir a temperatura de 140 °C no centro da espessura da borracha sendo vulcanizada para o caso proposto com duas frentes de calor.

Para o segundo caso com apenas uma frente de calor, as superfícies de contato possuem temperaturas diferentes impossibilitando o estudo em simetria como no caso anterior.

A transferência de calor do *bladder* para a borracha sendo vulcanizada possui duas direções de fluxo ao longo do processo de aquecimento. Durante o tempo necessário para a borracha que está inicialmente a temperatura de 29 °C atingir a temperatura de 80 °C o *bladder* transfere calor para a borracha que recebe energia térmica da face do molde de alumínio a 180 °C e do *bladder* a 80 °C (linha A). Após as superfícies de contato entre a borracha e o *bladder* atingirem a mesma temperatura a direção do fluxo de calor muda de sentido e o *bladder* começa a receber energia térmica da borracha que por sua vez recebe calor do molde de alumínio (linha B). A figura 20 demonstra esse comportamento de troca de calor com mudança de direção durante o processo de vulcanização.

Figura 20 - Transferência de calor com mudança de direção.



Fonte: Autor. (2014)

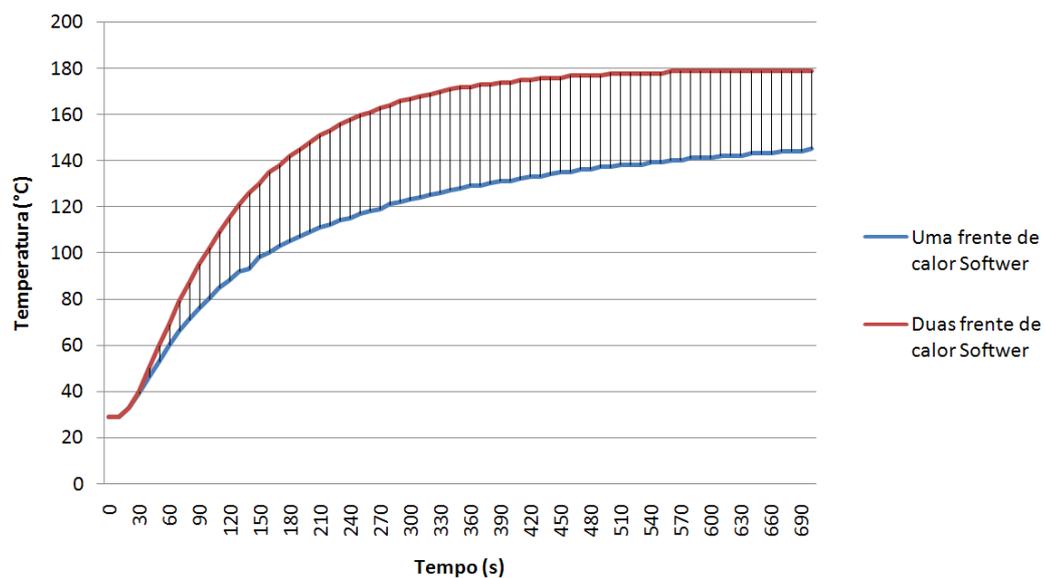
Com base na complexidade do problema com apenas uma frente de calor será adotada uma análise com auxílio do método de elementos finitos (MEF) buscando um melhor entendimento desse caso de transferência de calor.

## 4.2 SIMULAÇÃO PELO MEF

Com base nos dados gerados pelo *software* obtém-se que para atingir a temperatura de referência de 140 °C no centro da espessura de borracha, para o caso com apenas uma frente de calor, foi de 560 segundos, quanto para o caso com duas frentes de calor o valor cai para 175 segundos. O valor obtido de 173,15 segundos anteriormente nos cálculos se aproxima satisfatoriamente dos valores gerados pelo *software*, dando um erro aproximado de 1%.

Com os dados obtidos ao longo do tempo foi gerado o gráfico da figura 21 onde se pode analisar o comportamento da temperatura no centro da espessura em relação ao tempo para os dois casos. Fica evidente a diferença em tempo ganho para o caso com duas frentes de calor de aproximadamente 385 segundos.

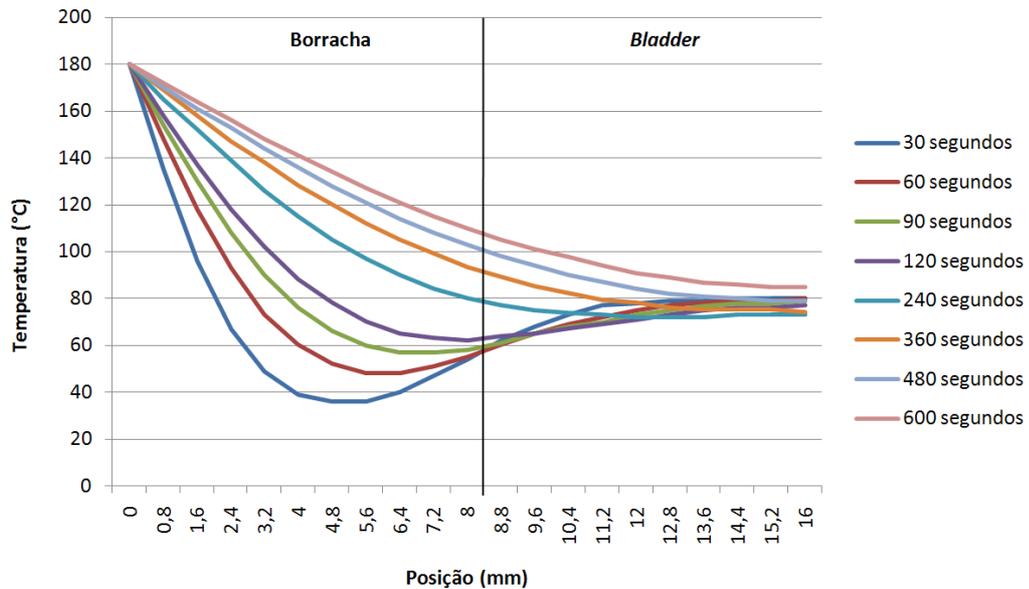
Figura 21 - Temperatura no centro da borracha ao longo do tempo (MEF).



Fonte: Autor. (2014)

Tirando os valores do ganho de temperatura ao longo da espessura da borracha com o avanço do tempo, é possível perceber a dificuldade com a baixa transferência de calor por parte do *bladder* citado no capítulo 3 em razão da alta inércia térmica do material. A figura 22 descreve a mudança de sentido da transferência de calor também citado nos capítulos acima para o caso com apenas uma frente de calor até 600 segundos após o início da vulcanização.

Figura 22 - Temperatura na espessura para uma frente de calor.



Fonte: Autor. (2014)

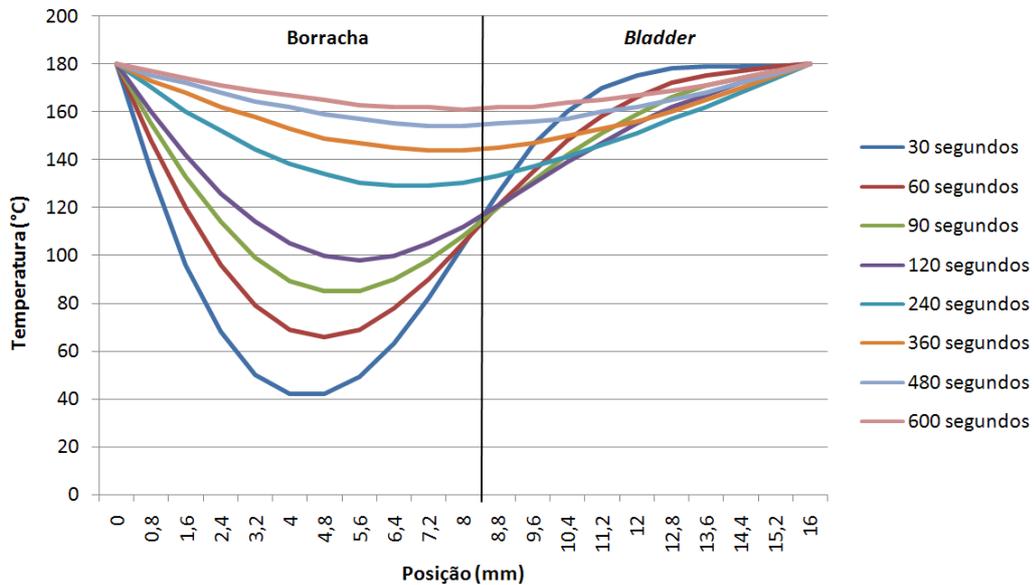
Pode se notar na figura 22 que a parede interna da suspensão pneumática que está em contato com o *bladder* durante a vulcanização no processo atual da empresa, possui a menor temperatura e conseqüentemente atingirá propriedades físicas diferentes ao longo da espessura da borracha, fazendo com que a peça tenha uma densidade de reticulação das pontes de enxofre desuniforme.

Por outro lado a face em contato diretamente com a fonte de calor pode dar início ao processo de reversão das propriedades físicas pelo alto tempo de residência em altas temperaturas. Fator esse que reforça a importância em uma melhor distribuição de energia térmica durante o processo de vulcanização da borracha.

A velocidade com que a vulcanização acontece é diretamente proporcional à quantidade de calor e energia aplicada, já que a maioria dos processos de vulcanização é dependente de calor. Pode-se concluir que, quanto mais energia for aplicada ao processo de vulcanização, menor será o tempo de vulcanização.

A figura 23 descreve as mesmas condições da figura anterior para o caso com duas frentes de calor.

Figura 23 - Temperatura na espessura para duas frentes de calor.



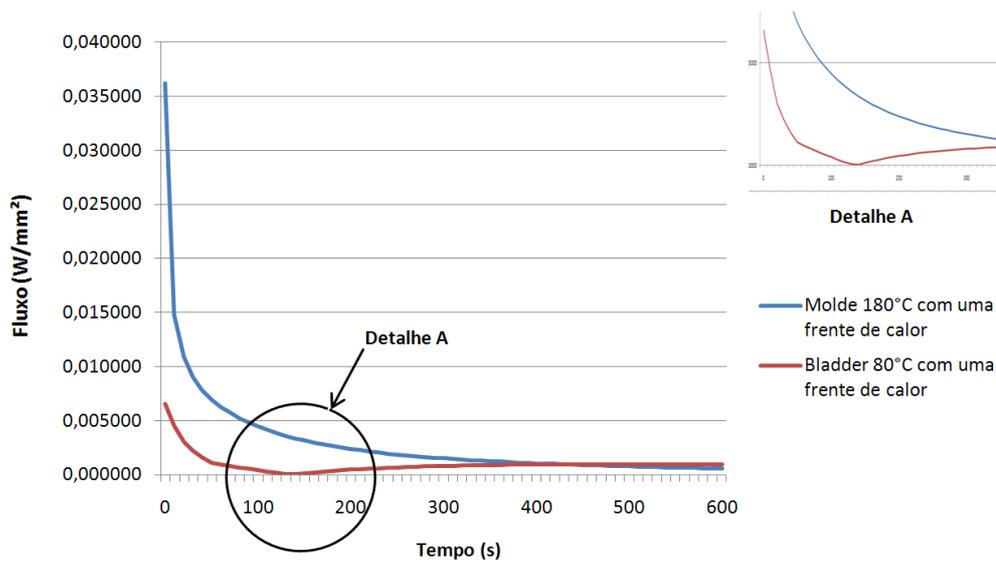
Fonte: Autor. (2014)

Comparando os gráficos pode-se perceber a diferença nas temperaturas da face externa da borracha em relação à face em contato com o *bladder*. Essa região receberá menos calor nos dois casos, mas com intensidades diferentes e em consequência serão obtidos resultados de vulcanizações diferentes.

As informações descritas no gráfico das figuras 22 e 23 permitem entender o fenômeno de transferência de calor ao longo da espessura da borracha e seu comportamento em razão do tempo de vulcanização. Pode-se observar a energia térmica em trânsito sendo doado do *bladder* para a peça nos primeiros minutos de processo até as duas faces igualarem suas temperaturas de contato. Após decorrer esse tempo, o sentido de transferência de calor muda de direção e por sua vez a peça começa a devolver energia térmica para o *bladder* aumentando sua temperatura inicial.

Com base na análise gerada pelo *software* foi possível obter os valores de fluxo de calor que entra na superfície molde/peça e na superfície *bladder*/peça ao longo do tempo. Pode-se observar na figura 24 que o fluxo de calor que entra na interface molde/peça na análise com uma frente de calor é o grande responsável por elevar a temperatura da peça durante a vulcanização. Por outro lado a interface *bladder*/peça possui menor participação por possuir menores valores de  $\Delta T$ . A figura 24 mostra o fluxo de calor no processo atual da empresa.

Figura 24 - Fluxo de calor no processo atual da empresa.

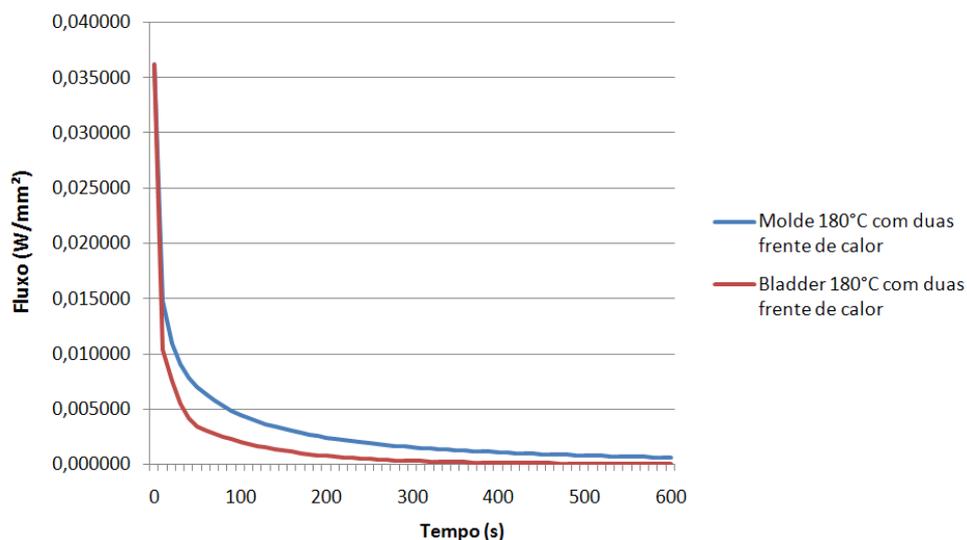


Fonte: Autor. (2014)

Fica evidente no detalhe A do gráfico acima a mudança de direção do fluxo de calor da interface *bladder*/peça já comentado anteriormente.

Para o caso proposto com duas frentes de calor foi possível observar que a intensidade do fluxo de calor que entra na peça tem seus valores mais próximos contribuindo quase por igual na elevação da temperatura durante o processo de vulcanização. A diferença existente entre as duas linhas é em função da diminuição de temperatura do *bladder* que fornece calor para a peça e logo recupera essa energia voltando à temperatura inicial. A figura 25 mostra o fluxo de calor no processo proposto.

Figura 25 - Fluxo de calor no processo proposto.



Fonte: Autor. (2014)

Tirando a média ao longo do tempo do fluxo de calor necessário nas duas análises para atingir a temperatura de 140 °C e somando as duas contribuições do molde e do *bladder* obtém-se os valores de 0,011 W/mm<sup>2</sup> para o caso com duas fontes de calor e 0,0049 W/mm<sup>2</sup> para o caso com apenas uma fonte de calor. Multiplicando o fluxo de calor pelo tempo demandados de cada situação e a área da amostra simulada, encontra-se a energia total em joules.

$$E_{duas\ frentes} = 0,011 \frac{W}{mm^2} \cdot 175s. (200mm \times 90mm)$$

$$E_{duas\ frentes} = 50309\ j$$

$$E_{uma\ frente} = 0,0049 \frac{W}{mm^2} \cdot 560s. (200mm \times 90mm)$$

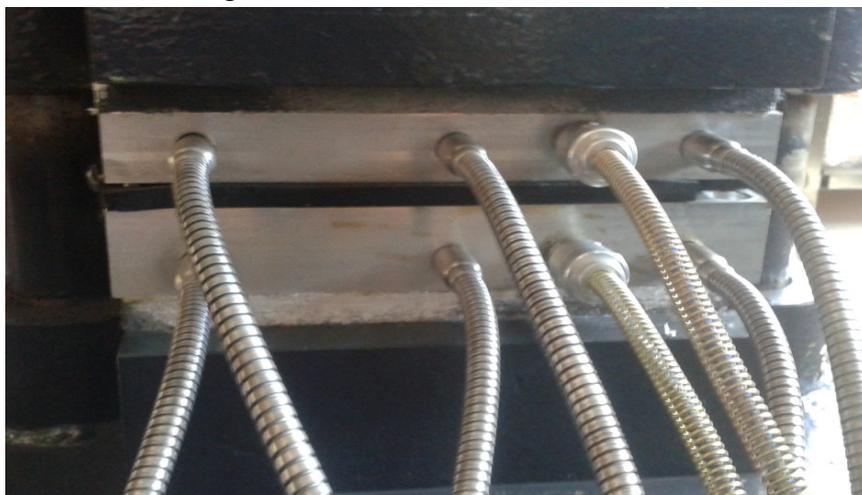
$$E_{uma\ frente} = 71803\ j$$

Obteve-se uma redução de 30% no consumo de energia térmica para o aquecimento no processo com duas fontes de calor proposto no trabalho.

#### 4.3 TESTE PRÁTICO

Foi analisado o processo de transferência de calor na vulcanização de um composto com dimensões de 200 x 90 x 8 mm de espessura, determinando-se os tempos para atingir o equilíbrio isotérmico de temperatura no processo com uma frente de calor e no processo proposto com duas fontes de calor. A figura 26 mostra a ferramenta colocada na prensa e vulcanizando as amostras de borracha.

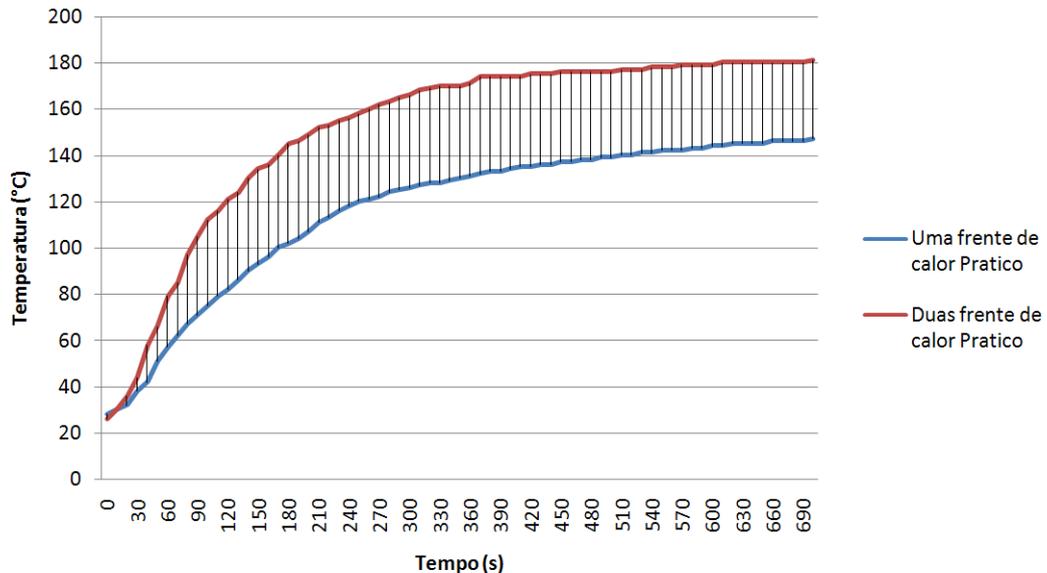
Figura 26 - Ferramenta das amostras.



Fonte: Autor. (2014)

Com os dados obtidos no experimento prático pelos leitores de temperatura, foi construído o gráfico para confrontar com os resultados encontrados analiticamente e pelo MEF. A figura 27 mostra o comportamento da temperatura durante o processo de vulcanização da borracha.

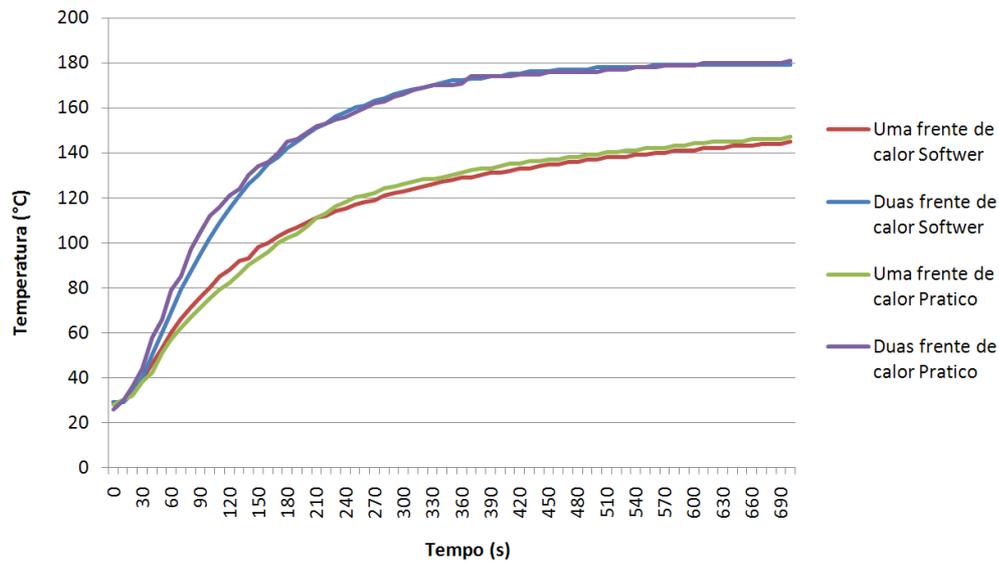
Figura 27 - Temperatura no centro da borracha ao longo do tempo no experimento físico.



Fonte: Autor. (2014)

Os dados coletados no experimento prático de vulcanização foram de 510 segundos para o caso de uma frente de calor e 170 segundos para o caso com duas frentes de calor, se aproximando consideravelmente dos valores obtidos nos cálculos analíticos e pelo *software*.

Considerando o processo atual de vulcanização com ar à temperatura ambiente internamente ao *bladder*, obtem-se um erro de 9% em comparação com os valores obtidos no *software*. Já para o caso proposto no trabalho com óleo térmico a temperatura de 180 °C internamente ao *bladder* obteve-se um erro de 2% em relação ao cálculo analítico e 3,5% para os valores obtidos na simulação por elementos finitos. Esses desvios podem ser vistos na figura 28 que sobrepõem os resultados das análises geradas no *software* e no experimento prático.

Figura 28 - Comparação *software* x experimento pratico.

Fonte: Autor. (2014)

A redução de tempo no experimento foi de 340 segundos em comparação com 385 segundos do analisado com o auxílio de *software* de elementos finitos. Esse erro acontece em razão das perdas de dissipação de calor do molde para o ambiente o que não é considerado na análise computacional e analítica.

Pode-se concluir que para o processo atual com a nova espessura de borracha o tempo médio necessário para o centro do composto sendo vulcanizado atingir a temperatura de 140°C é de aproximadamente 9 minutos, quanto para o processo proposto esse tempo cai para aproximadamente 3 minutos.

Sabendo que o tempo de vulcanização da borracha a uma dada temperatura é igual para os dois casos, a diferença em tempo dos dois processos será em função do tempo de aquecimento que calculamos em 67% a menos para a proposta de duas frentes de calor.

Esses valores possibilitam e tornam viável a implantação desse novo segmento de suspensões pneumáticas para veículos pesados na linha de produtos da empresa. Com uma redução de 67% no tempo necessário para aquecer o composto de borracha sendo vulcanizado e uma melhor uniformidade das propriedades físicas em razão da melhor distribuição de calor ao longo da espessura da borracha durante a vulcanização, acarretará em um produto com melhor preço de mercado e maior qualidade final.

Ao contrário da idéia de que colocando mais fontes de calor para aquecer o óleo internamente ao *bladder* se aumentará a quantidade de energia elétrica consumida e conseqüentemente tornando o processo mais oneroso, foi possível através dos tempos de

aquecimento encontrados no experimento pratico mensurar um valor percentual na redução de consumo elétrico no novo processo.

Para a análise com uma frente de calor foi usado 3 resistências elétricas com 1000 W de potência que demandarão 510 segundos para atingir a temperatura de 140 °C no centro do composto de borracha.

$$E = 3000 \frac{j}{s} \cdot 510s$$

$$E = 1,53 \cdot 10^6 j$$

Já para o caso com duas frentes de calor foi usado 6 resistências elétricas com 1000 W de potência que demandarão 170 segundos para atingir a mesma temperatura.

$$E = 6000 \frac{j}{s} \cdot 170s$$

$$E = 1,02 \cdot 10^6 j$$

Pode-se concluir que além da redução em tempo de processo também se obtém uma redução de 33% no consumo de energia elétrica durante o aquecimento para fabricar o mesmo produto. Embora sejam usadas mais resistências o tempo de aplicação é consideravelmente menor para atingir a mesma temperatura de 140 °C. O valor de 30% de redução do consumo de energia térmica encontrado nos cálculos tirados dos gráficos da simulação MEF se aproxima satisfatoriamente dos valores de consumo de energia elétrica encontrado nos cálculos do experimento pratico.

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento desse trabalho oportunizou um melhor entendimento do fenômeno de transferência de calor durante o aquecimento no ciclo de vulcanização de uma suspensão pneumática, especialmente para o processo com pressão interna gerada por *bladder*.

Dessa forma, aspectos como a transferência de calor provou ser de extrema importância na redução do tempo de vulcanização da borracha. Um ciclo de cura demasiadamente curto não permite que a borracha atinja as suas propriedades físicas e químicas ideais, prejudicando qualitativamente o produto. Por outro lado, um ciclo de cura demasiadamente longo significa desperdício de energia, redução da capacidade produtiva, aumento do custo de produção e queda das propriedades da borracha.

A análise de transferência de calor para o processo com temperaturas diferentes nas faces de contato, se demonstrou possível apenas pelo método dos elementos finitos. Isso porque o fluxo de calor muda com o tempo ao longo do aquecimento da borracha impossibilitando uma análise analítica e precisa do caso.

Com a comparação dos resultados obtidos no capítulo 4, é possível observar que tanto os valores calculados analiticamente estão bastante próximos dos valores obtidos experimentalmente e pelo método de elementos finitos (MEF). Assim, a utilização dos resultados se apresenta confiável para a implementação da proposta do trabalho de duas frentes de calor.

Os valores médios encontrados de 67% de redução no tempo e 31,5% na redução do consumo de energia elétrica, ambos durante a fase de aquecimento na vulcanização da nova suspensão pneumática pretendida pela empresa, viabiliza a implementação da idéia e justifica os altos investimentos para se obter essa nova fonte de geração de calor internamente ao *bladder*. Com essa melhor distribuição de calor ao longo da espessura da borracha sendo vulcanizada, se obterá uma melhor uniformidade das propriedades físicas, um menor desperdício de energia e uma maior qualidade do produto final.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise da influência das mudanças das propriedades de condutibilidade térmica da borracha em razão do aumento da temperatura, o que torna o processo um regime transiente não linear.

## REFERÊNCIAS

- BORGNAKKE, C. ;SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: E. Blücher, 2009.
- BRAGA, F. W. **Transmissão de calor**. São Paulo: Thomson, 2004.
- COSTA, H. **Aspectos Históricos da Vulcanização**, 2003
- CTB.**Ciência e tecnologia da borracha**. Disponível em: <<http://www.ctb.com.pt>>. Acesso em 02 out. 2013.
- FIRESTONE. **Air Spring**. Disponível em: <<http://www.bfbr.com.br/fipil/index.html> >. Acesso em 02 out. 2013.
- GOMES, M. M. **Porta da indústria da borracha**, (2012) disponível em: <<http://www.rubberpedia.com>>. Acesso em 09 out. 2013.
- GENTA, G. ;MORELLO, L. **The Automotive Chassis, Volume 1 Components Design**. v. 1. Torino, Italia: Springer Science, 2009.
- HOFMANN, W. **Rubber Technology Handbook**, Hanser, New York, 1989.
- INCROPERA, F. P. ;DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, c2003.
- KRAMBEER, M. **Rubber Compounding - advance course**, Schill and Seilacher, Hamburgo 1991.
- MELO, K. **Aplicação do método das diferenças finitas na equação do calor transiente**. Angicos RN, 2011. Monografia – Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA.
- MORTON, M. **Rubber technology**. 3.ed. London: Chapman & Hall, c1995
- ÖZISIK, M. N. **Transferência de calor: um texto básico**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1990.
- PASSADOR, F. R. ;PESSAN, L. A. ;JUNIOR, A. R. **Blendas PVC/NBR por processamento reativo Blendas PVC/NBR**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, nº 2, p. 80-84, 2007
- PINHEIRO, G. E. **Modelos numéricos aplicados á vulcanização de pneus**. São Carlos, 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, 2001.
- PIEROZAN, N. ;KOSERSKI, J. **Vulcanização de artefatos espessos**. Senai/RS, São Leopoldo. 2010.
- ROCHA, E. C. ;LOVISON, V. M. H. ;PIEROZAN, N. J. **Tecnologia de transformação dos elastômeros**. 2.ed. rev. e ampl. São Leopoldo, RS: SENAI, 2007.

**RUBBERPEDIA. Portal da indústria da borracha.** Disponível em: <<http://www.rubberpedia.com>>. Acesso em 25 set. 2013.

**SBQ. Sociedade Brasileira de química.** Disponível em: <<http://www.s bq.org.br>>. Acesso em 02 out. 2013.

## ANEXO A - Tabela 5.1 do Incropera e DeWitt (2003)

**TABELA 5.1 Coeficientes usados na aproximação pelo primeiro termo das soluções em séries da condução unidimensional transiente**

$Bi^*$	Parede Plana		Cilindro Infinito		Esfera	
	$\zeta_1$ (rad)	$C_1$	$\zeta_1$ (rad)	$C_1$	$\zeta_1$ (rad)	$C_1$
0,01	0,0998	1,0017	0,1412	1,0025	0,1730	1,0030
0,02	0,1410	1,0033	0,1995	1,0050	0,2445	1,0060
0,03	0,1723	1,0049	0,2440	1,0075	0,2991	1,0090
0,04	0,1987	1,0066	0,2814	1,0099	0,3450	1,0120
0,05	0,2218	1,0082	0,3143	1,0124	0,3854	1,0149
0,06	0,2425	1,0098	0,3438	1,0148	0,4217	1,0179
0,07	0,2615	1,0114	0,3709	1,0173	0,4551	1,0209
0,08	0,2791	1,0130	0,3960	1,0197	0,4860	1,0239
0,09	0,2956	1,0145	0,4195	1,0222	0,5150	1,0268
0,10	0,3111	1,0161	0,4417	1,0246	0,5423	1,0298
0,15	0,3779	1,0237	0,5376	1,0365	0,6609	1,0445
0,20	0,4328	1,0311	0,6170	1,0483	0,7593	1,0592
0,25	0,4801	1,0382	0,6856	1,0598	0,8447	1,0737
0,30	0,5218	1,0450	0,7465	1,0712	0,9208	1,0880
0,4	0,5932	1,0580	0,8516	1,0932	1,0528	1,1164
0,5	0,6533	1,0701	0,9408	1,1143	1,1656	1,1441
0,6	0,7051	1,0814	1,0184	1,1345	1,2644	1,1713
0,7	0,7506	1,0919	1,0873	1,1539	1,3525	1,1978
0,8	0,7910	1,1016	1,1490	1,1724	1,4320	1,2236
0,9	0,8274	1,1107	1,2048	1,1902	1,5044	1,2488

**TABELA 5.1 Continuação**

1,0	0,8603	1,1191	1,2558	1,2071	1,5708	1,2732
2,0	1,0769	1,1785	1,5994	1,3384	2,0288	1,4793
3,0	1,1925	1,2102	1,7887	1,4191	2,2889	1,6227
4,0	1,2646	1,2287	1,9081	1,4698	2,4556	1,7202
5,0	1,3138	1,2402	1,9898	1,5029	2,5704	1,7870
6,0	1,3496	1,2479	2,0490	1,5253	2,6537	1,8338
7,0	1,3766	1,2532	2,0937	1,5411	2,7165	1,8673
8,0	1,3978	1,2570	2,1286	1,5526	1,7654	1,8920
9,0	1,4149	1,2598	2,1566	1,5611	2,8044	1,9106
10,0	1,4289	1,2620	2,1795	1,5677	2,8363	1,9249
20,0	1,4961	1,2699	2,2881	1,5919	2,9857	1,9781
30,0	1,5202	1,2717	2,3261	1,5973	3,0372	1,9898
40,0	1,5325	1,2723	2,3455	1,5993	3,0632	1,9942
50,0	1,5400	1,2727	2,3572	1,6002	3,0788	1,9962
100,0	1,5552	1,2731	2,3809	1,6015	3,1102	1,9990
$\infty$	1,5708	1,2733	2,4050	1,6018	3,1415	2,0000

\* $Bi = hL/k$  para a parede plana e  $hr_o/k$  para o cilindro infinito e a esfera. Veja Figura 5.6.

ANEXO B - Tabela A.3 do Incropera e DeWitt (2003)

TABELA A.3 *Continuação**Outros Materiais*

Descrição/ Composição	Temperatura (K)	Massa Específica, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade Térmica, $k$ (W/(m · K))	Calor Específico, $c_p$ (J/(kg · K))
Algodão	300	80	0,06	1300
Areia	300	1515	0,27	800
Argila	300	1460	1,3	880
Asfalto	300	2115	0,062	920
Baquelita	300	1300	1,4	1465
Borracha, vulcanizada				
Dura	300	1190	0,16	—
Macia	300	1100	0,13	2010
Carvão, antracita	300	1350	0,26	1260
Concreto (com brita)	300	2300	1,4	880
Couro (solado)	300	998	0,159	—
Gelo	273	920	1,88	2040
	253	—	2,03	1945
Gêneros alimentícios				
Banana (75,7% teor de água)	300	980	0,481	3350
Maçã, vermelha (75% teor de água)	300	840	0,513	3600
Massa de bolo	300	720	0,223	—
Bolo, totalmente assado	300	280	0,121	—
Carne de frango, branca (74,4% teor de água)	198	—	1,60	—
	233	—	1,49	—
	253	—	1,35	—
	263	—	1,20	—
	273	—	0,476	—
	283	—	0,480	—
	293	—	0,489	—
Madeira, corte radial				
Abeto	300	420	0,14	2720
Carvalho	300	545	0,19	2385
Madeira, corte transversal				
Abeto	300	415	0,11	2720
Balsa	300	140	0,055	—
Carvalho	300	545	0,17	2385
Cipreste	300	465	0,097	—
Pinho amarelo	300	640	0,15	2805
Pinho branco	300	435	0,11	—
Neve	273	110	0,049	—
		500	0,190	—
Papel	300	930	0,180	1340
Parafina	300	900	0,240	2890
Rocha				
Arenito, Berea	300	2150	2,90	745
Calcário, Salem	300	2320	2,15	810
Granito, Barre	300	2630	2,79	775
Mármore, Halston	300	2680	2,80	830
Quartzito, Sioux	300	2640	5,38	1105

## ANEXO C - Tabelas utilizadas para a elaboração dos gráficos

Temperatura no centro da borracha				
Tempo	Temperatura		Temperatura	
	Uma frente de calor <i>Softwer</i>	Duas frentes de calor <i>Softwer</i>	Uma frente de calor Prático	Duas frentes de calor Prático
0	29	29	28	26
10	29	29	30	30
20	33	33	32	36
30	39	40	38	44
40	46	50	42	58
50	53	60	51	66
60	60	69	57	79
70	66	79	62	85
80	71	87	67	97
90	76	95	71	105
100	80	102	75	112
110	85	109	79	116
120	88	115	82	121
130	92	121	86	124
140	93	126	90	130
150	98	130	93	134
160	100	135	96	136
170	103	138	100	140
180	105	142	102	145
190	107	145	104	146
200	109	148	107	149
210	111	151	111	152
220	112	153	113	153
230	114	156	116	155
240	115	158	118	156
250	117	160	120	158
260	118	161	121	160
270	119	163	122	162
280	121	164	124	163
290	122	166	125	165
300	123	167	126	166
310	124	168	127	168
320	125	169	128	169

330	126	170	128	170
340	127	171	129	170
350	128	172	130	170
360	129	172	131	171
370	129	173	132	174
380	130	173	133	174
390	131	174	133	174
400	131	174	134	174
410	132	175	135	174
420	133	175	135	175
430	133	176	136	175
440	134	176	136	175
450	135	176	137	176
460	135	177	137	176
470	136	177	138	176
480	136	177	138	176
490	137	177	139	176
500	137	178	139	176
510	138	178	140	177
520	138	178	140	177
530	138	178	141	177
540	139	178	141	178
550	139	178	142	178
560	140	179	142	178
570	140	179	142	179
580	141	179	143	179
590	141	179	143	179
600	141	179	144	179
610	142	179	144	180
620	142	179	145	180
630	142	179	145	180
640	143	179	145	180
650	143	179	145	180
660	143	179	146	180
670	144	179	146	180
680	144	179	146	180
690	144	179	146	180
700	145	179	147	181

Uma frente de calor na espessura								
Posição (mm)	Tempo (segundos)							
	30 s	60 s	90 s	120 s	240 s	360 s	480 s	600 s
0	180	180	180	180	180	180	180	180
0,8	135	148	154	158	165	169	170	172
1,6	96	118	130	137	152	158	161	164
2,4	67	93	108	118	139	147	153	156
3,2	49	73	90	102	126	138	144	148
4	39	60	76	88	115	128	136	141
4,8	36	52	66	78	105	120	128	134
5,6	36	48	60	70	97	112	121	127
6,4	40	48	57	65	90	105	114	121
7,2	47	51	57	63	84	99	108	115
8	54	55	58	62	80	93	103	110
8,8	62	60	61	64	77	89	98	105
9,6	68	65	65	65	75	85	94	101
10,4	73	69	68	67	74	82	90	98
11,2	77	72	70	69	73	79	87	94
12	78	75	73	71	72	78	84	91
12,8	79	77	75	73	72	76	82	89
13,6	79	78	77	75	72	75	81	87
14,4	80	79	78	76	73	75	80	86
15,2	80	79	78	76	73	75	79	85
16	80	80	79	77	73	74	79	85

Duas frentes de calor na espessura								
Posição (mm)	Tempo (segundos)							
	30 s	60 s	90 s	120 s	240 s	360 s	480 s	600 s
0	180	180	180	180	180	180	180	180
0,8	135	148	155	160	170	173	175	177
1,6	96	120	133	142	160	168	172	174
2,4	68	96	114	126	152	162	168	171
3,2	50	79	99	114	144	158	164	169
4	42	69	89	105	138	153	162	167
4,8	42	66	85	100	134	149	159	165
5,6	49	69	85	98	130	147	157	163
6,4	63	78	90	100	129	145	155	162
7,2	82	90	98	105	129	144	154	162
8	104	105	108	112	130	144	154	161

8,8	126	121	120	121	133	145	155	162
9,6	146	135	131	130	137	147	156	162
10,4	160	148	142	139	141	150	157	164
11,2	170	158	151	147	146	153	160	165
12	175	166	159	155	151	156	162	167
12,8	178	172	166	162	157	160	165	169
13,6	179	175	171	167	162	165	168	171
14,4	179	177	174	172	168	170	172	174
15,2	179	179	177	176	174	175	176	177
16	180	180	180	180	180	180	180	180

Tempo para 140°C		
Forma	Uma frente de calor	Duas frentes de calor
Software	560 seg	175 seg
prático	510 seg	170 Seg
calculo	x	173,15seg

Fluxo de calor							
Duas frentes de calor				Uma frente de calor			
Molde 180°C com duas frentes de calor		Bladder 180°C com duas frentes de calor		Molde 180°C com uma frente de calor		Bladder 80°C com uma frente de calor	
Tempo (s)	Fluxo (W/mm <sup>2</sup> )	Tempo (s)	Fluxo (W/mm <sup>2</sup> )	Tempo (s)	Fluxo (W/mm <sup>2</sup> )	Tempo (s)	Fluxo (W/mm <sup>2</sup> )
0	0,036240	0	0,036240	0	0,036240	0	0,006600
10	0,014803	10	0,010401	10	0,014803	10	0,004600
20	0,010909	20	0,007545	20	0,010909	20	0,003042
30	0,009012	30	0,005507	30	0,009012	30	0,002218
40	0,007818	40	0,004207	40	0,007818	40	0,001602
50	0,006954	50	0,003465	50	0,006954	50	0,001126
60	0,006274	60	0,003106	60	0,006274	60	0,000966
70	0,005712	70	0,002798	70	0,005712	70	0,000813
80	0,005234	80	0,002527	80	0,005234	80	0,000667
90	0,004820	90	0,002284	90	0,004820	90	0,000529
100	0,004457	100	0,002065	100	0,004457	100	0,000398
110	0,004137	110	0,001868	110	0,004137	110	0,000277
120	0,003852	120	0,001691	120	0,003852	120	0,000164
130	0,003597	130	0,001530	130	0,003597	130	0,000060
140	0,003368	140	0,001385	140	0,003368	140	0,000036
150	0,003162	150	0,001255	150	0,003162	150	0,000123
160	0,002975	160	0,001137	160	0,002975	160	0,000203
170	0,002805	170	0,001031	170	0,002805	170	0,000276
180	0,002651	180	0,000935	180	0,002651	180	0,000343
190	0,002510	190	0,000849	190	0,002510	190	0,000404
200	0,002380	200	0,000771	200	0,002380	200	0,000459

210	0,002261	210	0,000702	210	0,002261	210	0,000510
220	0,002152	220	0,000639	220	0,002152	220	0,000556
230	0,002051	230	0,000582	230	0,002051	230	0,000599
240	0,001957	240	0,000531	240	0,001957	240	0,000637
250	0,001870	250	0,000485	250	0,001870	250	0,000672
260	0,001789	260	0,000443	260	0,001789	260	0,000704
270	0,001713	270	0,000405	270	0,001713	270	0,000734
280	0,001643	280	0,000372	280	0,001643	280	0,000760
290	0,001576	290	0,000341	290	0,001576	290	0,000785
300	0,001514	300	0,000314	300	0,001514	300	0,000807
310	0,001456	310	0,000289	310	0,001456	310	0,000827
320	0,001401	320	0,000266	320	0,001401	320	0,000845
330	0,001349	330	0,000246	330	0,001349	330	0,000862
340	0,001300	340	0,000227	340	0,001300	340	0,000876
350	0,001254	350	0,000210	350	0,001254	350	0,000890
360	0,001210	360	0,000195	360	0,001210	360	0,000902
370	0,001168	370	0,000182	370	0,001168	370	0,000913
380	0,001129	380	0,000169	380	0,001129	380	0,000922
390	0,001091	390	0,000158	390	0,001091	390	0,000931
400	0,001055	400	0,000147	400	0,001055	400	0,000939
410	0,001020	410	0,000138	410	0,001020	410	0,000945
420	0,000987	420	0,000129	420	0,000987	420	0,000951
430	0,000956	430	0,000121	430	0,000956	430	0,000956
440	0,000926	440	0,000114	440	0,000926	440	0,000960
450	0,000897	450	0,000108	450	0,000897	450	0,000964
460	0,000869	460	0,000101	460	0,000869	460	0,000966
470	0,000843	470	0,000096	470	0,000843	470	0,000969
480	0,000817	480	0,000091	480	0,000817	480	0,000970
490	0,000792	490	0,000086	490	0,000792	490	0,000971
500	0,000768	500	0,000082	500	0,000768	500	0,000972
510	0,000746	510	0,000078	510	0,000746	510	0,000972
520	0,000723	520	0,000074	520	0,000723	520	0,000972
530	0,000702	530	0,000070	530	0,000702	530	0,000971
540	0,000682	540	0,000067	540	0,000682	540	0,000970
550	0,000662	550	0,000064	550	0,000662	550	0,000969
560	0,000643	560	0,000061	560	0,000643	560	0,000967
570	0,000624	570	0,000059	570	0,000624	570	0,000965
580	0,000606	580	0,000056	580	0,000606	580	0,000963
590	0,000589	590	0,000054	590	0,000589	590	0,000960
600	0,000572	600	0,000052	600	0,000572	600	0,000958

## ANEXO D – Ficha técnica do óleo térmico



# TUTELA BAKU TC


**I  
N  
F  
O  
R  
M  
E  
T  
É  
C  
N  
I  
C  
O**

Fluido altamente refinado, extraído de petróleo parafínico e formulado para ter a função de transferir calor em sistemas fechados de até 300 ° C e em sistemas abertos de até 200 ° C.

## DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO

TUTELA BAKU TC é um óleo mineral de base parafínicos e aditivos específicos para uso em transferência de calor nos processos industriais onde são utilizados sistemas de aquecimento indireto (fechado).

TUTELA BAKU TC possui propriedades que lhe garante excelentes características viscosidade/temperatura; alto coeficiente de transferência de calor; alta estabilidade térmica; baixa pressão de vapor; larga faixa de temperatura operacional (-18 a 300°C).

TUTELA BAKU TC é um excelente fluido para transferência de calor, possuindo boa condutividade térmica, calor específico adequado e resistência à oxidação, reduzindo assim a tendência ao espessamento e à formação de depósitos, o que permite operações a altas temperaturas por longos períodos.

É um óleo parafínico, altamente refinado, produzido de básicos selecionados, não corrosivos, contendo inibidores de ferrugem e oxidação, agentes antiespumantes e de liberação de ar. Recomendado para uso comum fluido térmico, possui baixa volatilidade que minimiza a evaporação, eliminando a possibilidade de obstrução por vapor e conseqüente cavitação e baixa viscosidade nas temperaturas de operação, diminuindo a energia necessária ao bombeamento e aumenta a velocidade de transferência de calor.

## ANÁLISES TÍPICAS

ENSAIO	ASTM	32	46	68	100	150
Viscosidade,cSt á 40°C	D-445	32	46	68	100	150
I.V.	D-2270	min.90	min.90	min.90	min.90	min.90
Ponto de fulgor VAC, ° C	D-092	min.200	min.200	min.200	min.200	min.220
Espuma, ml/ml	D-892	máx.10/0	máx.10/0	máx.10/0	máx.10/0	máx.10/0
Número de Acidez, mg KOH/g	D-974	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Densidade Relativa, 25/4 °C	D-4052	0,87	0,88	0,88	0,885	0,888

## EMBALAGEM DISPONÍVEL

- o Tambor de 200 litros;
- o Balde de 20 litros.

## SÁUDE E SEGURANÇA

Para evitar danos ao indivíduo ou ao meio ambiente, utilize o produto de forma adequada e siga corretamente as indicações do fabricante do equipamento. Para maiores informações, solicite a "Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ)".

As informações deste informativo baseiam-se em dados disponíveis na época de sua publicação. Reservamo-nos o direito de fazer alterações a qualquer momento, sem prévio aviso.		
ELABORAÇÃO: 08.04.99	REVISÃO: 03 / 18.08.05	Pág.: 32 / 2
ATENÇÃO: O óleo lubrificante após seu uso é um resíduo perigoso, podendo provocar danos ao meio ambiente. Todos os usuários de lubrificantes que gerem óleos usados ou contaminados, deverão armazená-los e mantê-los acessíveis a coleta, em recipientes próprios e resistentes a vazamentos. Estes óleos deverão ser coletados por empresas autorizadas pela ANP, com fim específico de re-refino. (Resolução N° 362 do CONAMA de 23/06/2005 - Portaria ANP N° 125 de 30/07/1999). O não cumprimento destas resoluções sujeita o infrator às sanções previstas na lei de crimes ambientais.		

**Assistência Técnica: 0800-8833200**