

Avaliação das Tensões Residuais do Processo de Fundição no Comportamento Físico de um Disco de Freio

Marcelo A. Tirelli, Marco A. Colosio

General Motors do Brasil

Luciana Stuewe, Fabio Rola

Magma Engenharia do Brasil

Jesualdo L. Rossi

IPEN

Resumo

Peças fundidas são passíveis de apresentar tensões residuais oriundas do processo de manufatura, as quais afetam o comportamento físico do produto final. Neste sentido, focou-se no produto disco de freio como precursor deste estudo e também por se tratar de uma peça de segurança e conforto em um veículo.

O presente trabalho tem como meta avaliar as tensões residuais através da simulação numérica do processo de fundição e através de extensometria elétrica e posteriormente correlacioná-las com oportunidades de criação de técnicas visando o desenvolvimento de peças mais robustas e menos sensíveis à estas tensões, as quais podem ser aplicadas em desenvolvimento de novos produtos. Como resultado, este estudo demonstrou a presença destas tensões pelas técnicas utilizadas e dissertou tecnicamente esta questão em um ponto de vista metalúrgico e mecânico, finalizando com uma nova forma de abordar a questão da tensão residual em produtos fundidos.

Introdução

O sistema de frenagem é um item crítico no projeto de um automóvel. De fato, o sistema de freios está constantemente submetido às tensões térmicas e mecânicas relativamente altas durante a frenagem. A temperatura do sistema de freios pode chegar a valores próximos a 650°C e o superaquecimento do disco pode reduzir consideravelmente o desempenho veicular. Esta variação de temperatura pode provocar choques térmicos e pontos de aquecimento localizados, que mudam o comportamento mecânico do metal, resultando em trincas no disco e tensões após o resfriamento.¹

Outro fato importante a ser considerado é em relação a manufatura dos discos de freio. Devido à sua geometria complexa, o disco apresenta diferentes condições de resfriamento e solidificação no processo de fundição, gerando microestruturas e propriedades mecânicas heterogêneas ao longo da geometria da peça e também diferentes níveis de tensões residuais. Estas tensões formadas durante o processo de solidificação e resfriamento muitas vezes atingem valores próximos da resistência ao escoamento do material.

A simulação computacional é uma ferramenta valiosa que vem auxiliar no desenvolvimento de peças fundidas para aplicação automotivas as quais pode-se prever mecanismos de falha e

desenvolver peças mais robustas e confiáveis antes de serem encaminhadas para testes de campo. Simulações virtuais de esforços de tensão/deformação, fadiga, acústica e tensões residuais podem ser previamente determinadas e são fundamentais para a rapidez e precisão do desenvolvimento do produto final.

A tensão residual é inerente aos corpos físicos existentes, nele permanecendo ainda após a retirada das forças externas aplicadas, sendo o resultado dos diversos processos de manufatura empregados, como o de fundição. Estas tensões podem ser prejudiciais dependendo do comportamento mecânico do material durante a sua utilização. Em geral, tensões trativas na superfície do material tende a ser prejudicial e são apontadas como principais agentes de fadiga.

A extensometria elétrica é um conjunto de técnicas que envolvem instrumentação e cálculo para medir as deformações ocorridas em corpos ou estruturas. As medidas obtidas por *strain gage* das deformações se prestam a obter, indiretamente através de cálculos, tensões mecânicas que se originam dos processos de fabricação.²

O objetivo deste trabalho é avaliar as tensões residuais através da simulação numérica do processo de fundição em um disco de freio utilizado em veículos correntes e através de extensometria elétrica e posteriormente correlacioná-las com oportunidades de criação de técnicas visando o desenvolvimento de peças mais robustas e menos sensíveis a estas tensões, as quais podem ser aplicadas em desenvolvimento de novos produtos automotivos.

1. Simulação do processo de manufatura do disco de freio (fundição)

A simulação do processo de fundição é bem difundida nas indústrias de fundição, onde é utilizada para otimizar o projeto e parâmetros de processo. O objetivo é geralmente evitar defeitos como porosidades, rechupes, juntas frias entre outros, bem como avaliar a microestrutura e propriedades mecânicas.

A simulação é na maioria das vezes dividida em cálculos do enchimento do molde, solidificação, propriedades mecânicas e tensões residuais.

Discos de freios são peças fundidas em máquinas de moldar verticais ou horizontais. Neste estudo, utilizou-se peças correntes de produção

para um veículo médio porte, com rodas de 14 polegadas, as mesmas foram moldadas em máquina vertical, conforme mostrado na figura 1, o material consiste em ferro fundido nodular perlítico, com propriedades mecânicas de 250 N/mm² de Resistência tração e dureza Brinell de 197 a 235 HBW (3000 Kgf/10 mm).

1.1- Simulação de enchimento e solidificação.

As geometrias do fundido, canais, massalotes e o molde são obtidos diretamente de um sistema CAD (figura 01). Para simulações do enchimento, são utilizadas abordagens *Navier Stokes* combinadas com *Fourier*. A distribuição de temperatura do fundido e do molde ao final do enchimento é a condição inicial para simulação de solidificação. A simulação de solidificação fornece a distribuição de temperatura ao longo da solidificação e resfriamento do fundido no molde (figura 02), bem como defeitos de porosidades na estrutura³.

Observam-se na figura 2 variações de temperatura no disco na ordem de 90 °C a 130°C. Estas variações ocorrem devido ao posicionamento das peças no molde e a distribuição dos canais de enchimento, os quais aquecem localmente os fundidos. Estas variações durante a solidificação e resfriamento, podem gerar propriedades mecânicas heterogêneas e também contrações e tensões desiguais nos produtos.

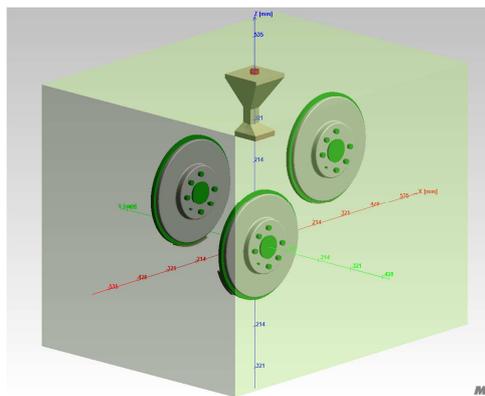


Figura 1 - Projeto de fundição. Três peças fundidas em molde vertical. Os canais de enchimento foram apagados na imagem no projeto de fundição, devido à confidencialidade do projeto.

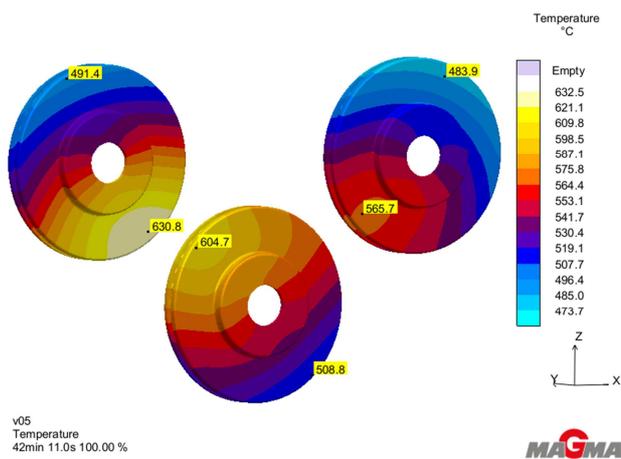


Figura 2 - Perfil de temperatura do produto logo após desmoldagem (40 min). Observa-se no momento da desmoldagem variações de temperatura em cada disco e entre os discos.

1.2 Determinação da microestrutura e propriedades mecânicas.

Os modelos avançados para ferro fundido levam em consideração a composição química da liga, condições de nucleação e taxas de resfriamento locais e, desta forma são capazes de fornecer resultados precisos da microestrutura local como: tipo e tamanho da grafita, espaçamento lamelar, matriz metálica, entre outros. As variações de processo na fundição são extremamente influentes na formação da microestrutura e propriedades mecânicas ao longo da geometria do fundido. As figuras 3 e 4 mostram a previsão do tipo de grafita e tamanho de célula eutética. A quantidade e tamanho das grafitas influenciam nas propriedades importantes para os discos de freio, como fadiga térmica e capacidade de amortecimento de vibrações e ruídos⁴.

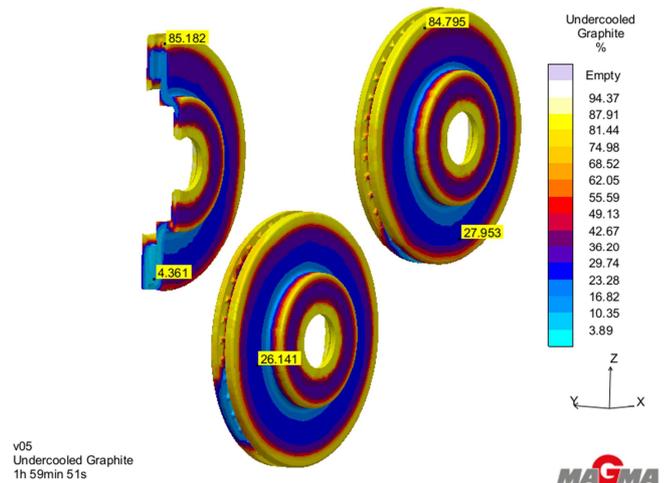


Figura 3 – Resultado da simulação para distribuição da grafita de super resfriamento.

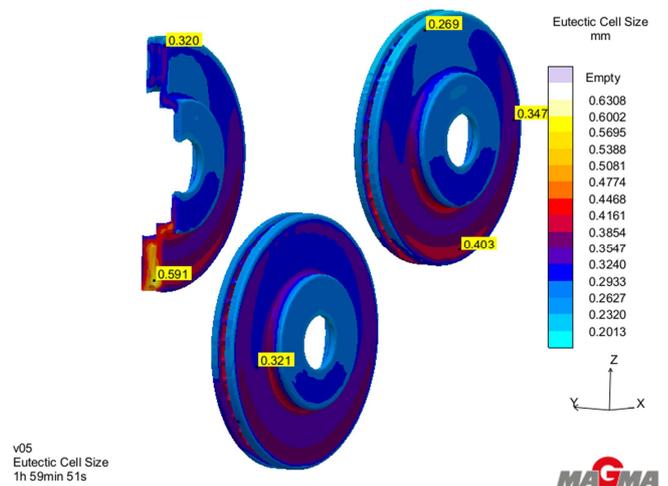


Figura 4 – Resultado da simulação para o tamanho de célula eutética.

Observam-se nas figuras 5 e 6 a variação da dureza e resistência mecânica. A simulação é capaz de prever resistência ao escoamento, resistência à ruptura, alongamento, dureza e módulo de elasticidade.

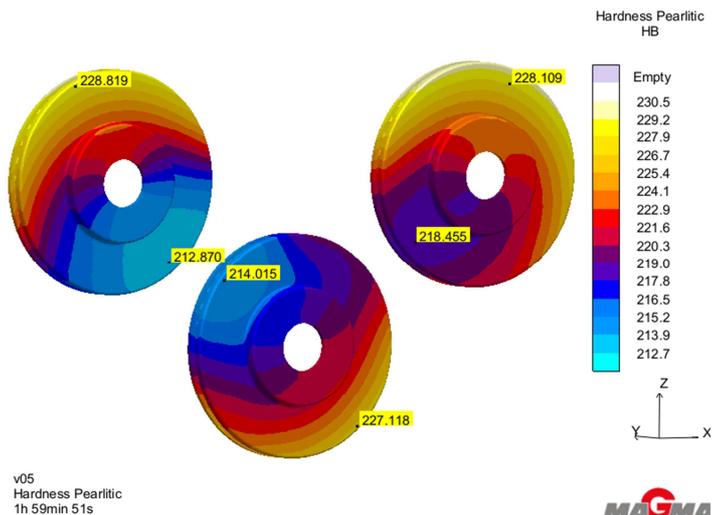


Figura 5 – Resultado de simulação para distribuição de dureza nos discos fundidos.

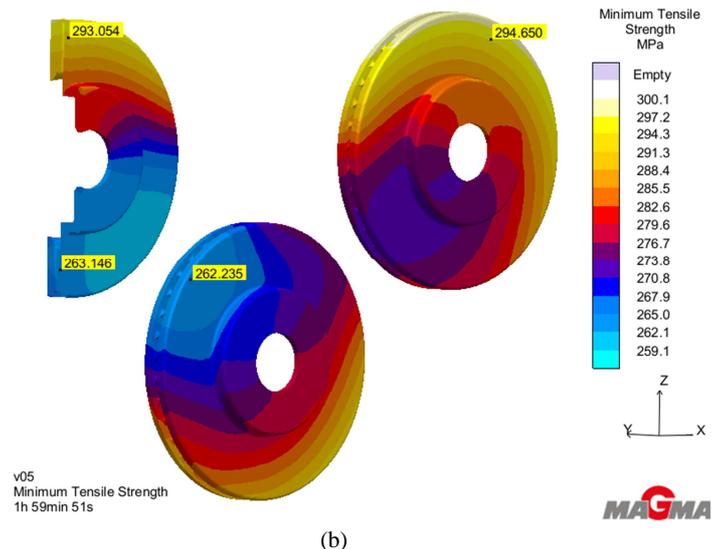


Figura 6 - Distribuição de resistência á tração.

Observam-se nas figuras acima variação da microestrutura e propriedades mecânicas entre os discos e no próprio disco. A dureza apresentada na figura 5 mostra claramente esta variação. A heterogeneidade das propriedades se deve ao perfil térmico heterogêneo, devido ao posicionamento das peças no molde e influência dos canais de enchimento, os quais aquecem determinadas regiões do disco, alterando as suas condições de solidificação e resfriamento. Estas variações podem afetar o comportamento do disco de freio em campo causando, variações de desgaste e resistência á fadiga.

Estas variações de propriedades mecânicas, ocorridas devido ao processo de fundição, muitas vezes não são levadas em consideração no desenvolvimento do produto, onde na maioria das vezes se considera uma propriedade homogênea estabelecida por norma.

1.3 Tensões residuais e distorções:

Bem como as propriedades mecânicas reais do fundido, a distribuição das tensões residuais são informações fundamentais para o desenvolvimento de produto. As tensões são formadas durante a solidificação e resfriamento, e muitas vezes, atingem os valores da resistência ao escoamento do material. A desconsideração destes valores no cálculo estrutural, pode gerar erros significativos para a *performance* do componente. Observam-se na figura 7 as tensões residuais simuladas para o suporte para as direções X e Z. As tensões foram avaliadas após o processo de fundição, retirada de canais de enchimento e usinagem do sobremetal do produto bruto. Os valores de tensões residuais avaliados após usinagem levam em consideração apenas o rearranjo das tensões após retirada do sobremetal.

As tensões residuais variam com a complexidade da geometria do fundido e, também com a variação do processo de fundição, como: tempo de desmoldagem, dureza do molde, geometria de machos (maciço ou aliviado), condutividade térmica da areia de molde.

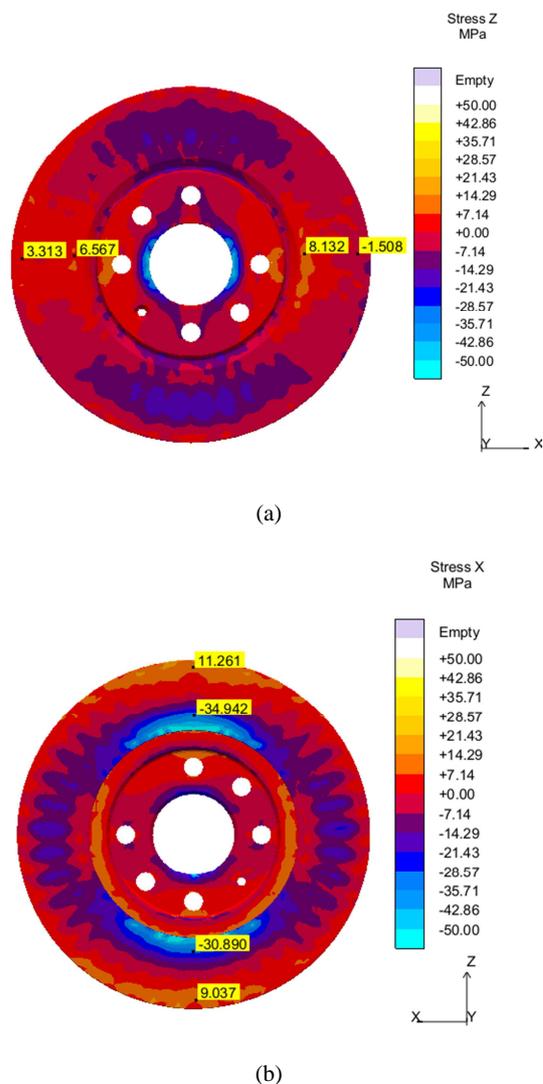
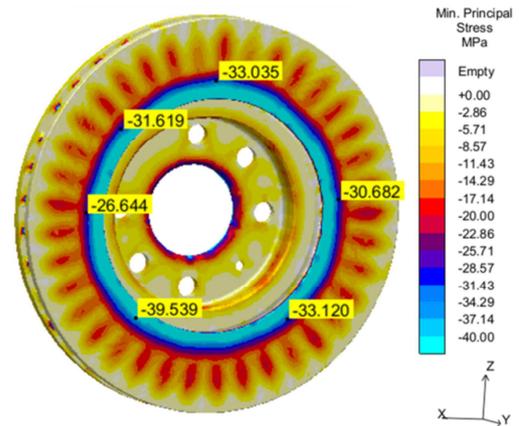


Figura 7 (a) - Tensões residuais normais na direção X. (b) e (d) Tensões residuais normais na direção Z.

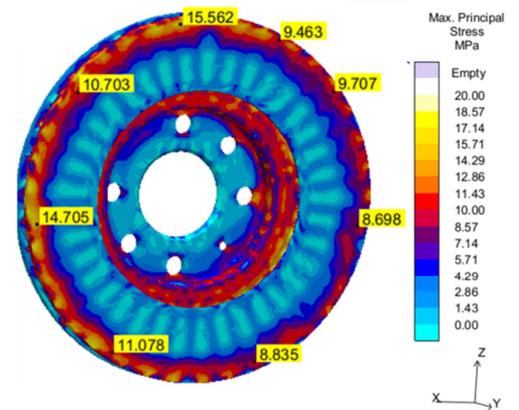
A figura 7 (a) mostra a pista de frenagem onde se observam tendências de tensões trativas próximo ao diâmetro central e tensões compressivas no diâmetro externo. As tensões residuais nesta face são baixas e pouco influentes para *performance* do componente.

A figura 7 (b) apresenta as tensões residuais normais na face do disco na região da pista de frenagem é possível observar maiores tensões compressivas próximo ao diâmetro central e tensões trativas no diâmetro externo. Neste caso as tensões são maiores e observa-se maior diferença entre trativas e compressivas.

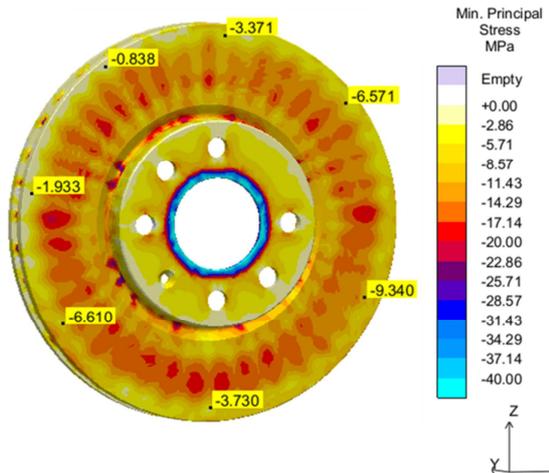
As figuras 8, 9 e 10 apresentam os resultados de tensões residuais principais. As tensões residuais mínimas representam as tensões compressivas e as tensões residuais máximas as tensões trativas. As figuras 8 e 9 mostram claramente as tensões compressivas e trativas nas faces dos discos. A figura 9 mostra a pista de frenagem com maior variação entre tensões compressivas e trativas. As tensões compressivas auxiliam para o aumento da resistência a fadiga do componente e sua vida útil, porém tensões trativas podem reduzir a resistência a fadiga, dependendo do alinhamento destas tensões com as tensões de trabalho do componente. As tensões residuais podem ser mapeadas para análises de elementos finitos e assim, avaliar sua influência na análise estrutural dos componentes automotivos⁵.



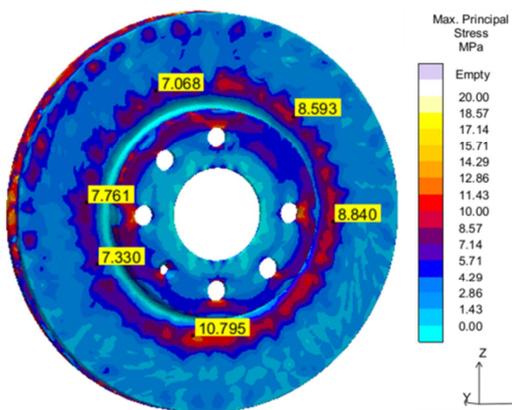
(a)



(b)



(a)

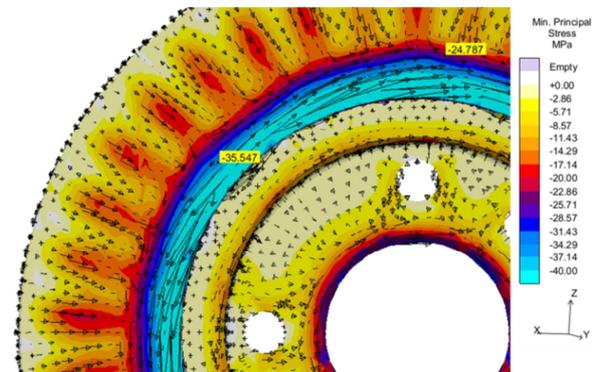


(b)

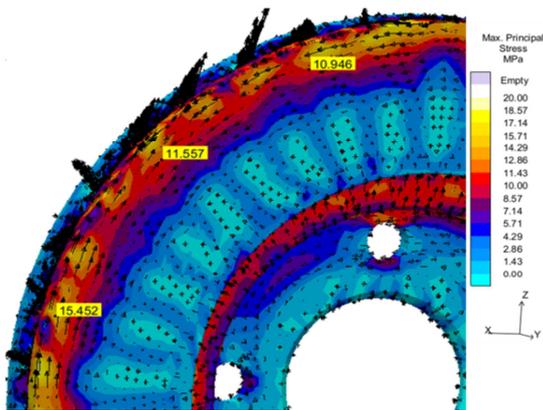
Figura 8 – (a) Tensões mínimas principais no diâmetro externo da pista de frenagem. (b) Tensões máximas principais no diâmetro interno da pista de frenagem.

Figura 9 – (a) Tensões mínimas principais no diâmetro externo da pista de frenagem. (b) Tensões máximas principais no diâmetro interno da pista de frenagem.

As figuras 10 (a) e (b) mostram o detalhe da pista de frenagem com a direção das tensões no sentido radial, mostrando que o valor das tensões trativas e compressivas no sentido radial é equivalente às tensões nas direções normais X e Z mostradas nas figuras 6 e 7.



(a)



(b)

Figura 10 – Detalhe da região da pista de frenagem mostrando: (a) a direção da tensão de compressão e (b) a direção da tensão de tração

As tensões residuais podem alterar a resistência á fadiga do componente e também gerar distorções após a fundição e durante a aplicação do componente. As figuras mostram a direção do empenamento do disco após o processo de fundição. Observa-se um empenamento na direção Y de 0,19 mm.

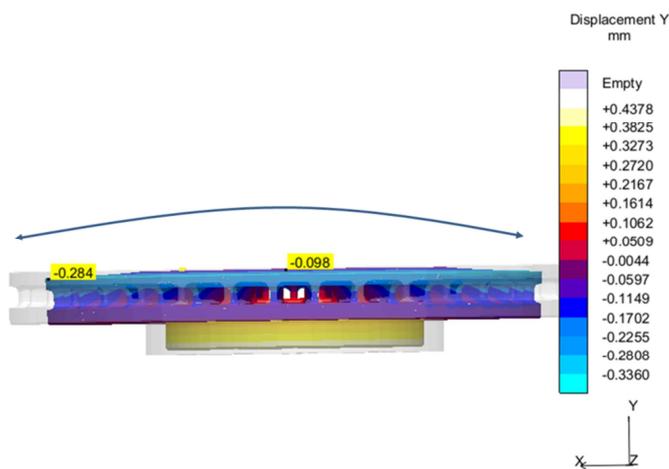


Figura 11 – Deformação do disco no eixo Y após o processo de fundição. Distorção 10x exagerada.

2. Medição das tensões por extensometria elétrica

Para avaliar as tensões residuais no disco de freio, foram realizadas medidas através de extensometria elétrica, utilizando o método de alívio de tensão pelo método do corte. Após a limpeza da superfície, adesivagem e verificação da uniformidade de contato mecânico, procedeu-se com a soldagem e conexão elétrica do extensômetro (*strain gage*) e dos terminais de conexão. O equipamento utilizado para coletar os dados foi o *Strain Indicator Type 1525*.

A figura 12 mostra os pontos instrumentados com *strain gage* unidirecionais, em ambas as pistas de frenagem.

Foram realizadas a medição de três produtos fundidos e usinados.



Figura 12 – Instrumentação dos discos de freio por *strain gage* unidirecionais.

A figura 13 apresenta os resultados das medições realizadas pela extensometria. As barras de erro mostram os valores máximos e mínimos medidos pelos *strain gage* em cada posição do produto (figura 11).

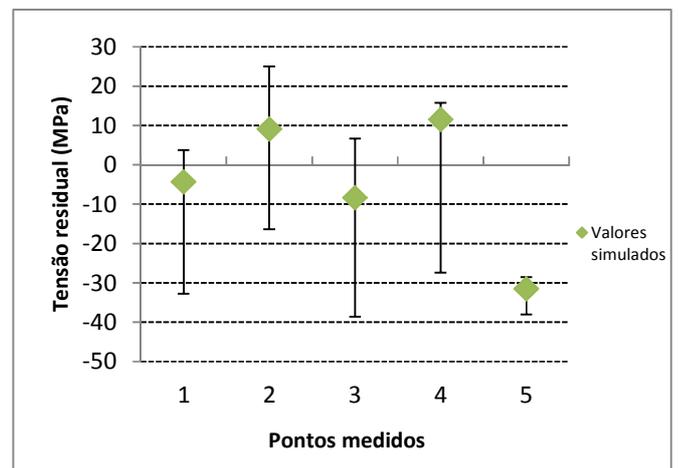


Figura 13 – Resultados das medições mínimas e máximas da tensão residual, medida em três peças. Os pontos verdes são resultados obtidos através da simulação de fundição.

Observa-se na figura 13 que as tensões medidas apresentam uma grande amplitude, na maioria dos pontos foram medidas tensões de tração e compressão em diferentes produtos na mesma região. Esta variação pode ter ocorrido, devido aos produtos não serem do mesmo lote de produção ou por imprecisões do teste. Outra possibilidade é a variação brusca de tensões tratativas e compressivas em uma mesma pista de frenagem, como se observam na figura 10. Em algumas peças o *strain gage* pode estar mais próximo da tratativa ou da compressiva. Existem diversas discussões na literatura sobre qual a melhor maneira de medir tensões residuais em produtos fundidos,² porém, os resultados da simulação de fundição se apresentam dentro das faixas medidas pela extensometria.

Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo comparar as tensões residuais por simulação virtual e por extensometria elétrica para quantificação de tensões residuais tratativas e compressivas em discos de freios.

Baseados nos resultados experimentais, pode-se concluir as seguintes constatações:

- O projeto do ferramental de fundição e os parâmetros de produção do metal são variáveis que influenciam nas tensões residuais.
- A metodologia desenvolvida pelo software de simulação apresentou-se eficiente na avaliação e constatações das tensões
- Simulação e extensometria são técnicas distintas mas apresentaram resultados similares, podendo ser uma alternativa de medição.
- A peça em estudo não apresentou valores considerados de tensões residuais que poderiam comprometer seu desempenho, coerente com o fato de serem peças correntes de produção que não estão envolvidas em falhas.
- Apesar dos valores encontrados não serem elevados para aplicação do produto, verificou-se que o processo de fundição utilizado provocou uma variação de dureza e tensão ao logo da pista frenagem.

Referências

- 1 Iombriller, S. F. “Análise térmica e dinâmica do sistema de freio a disco de veículos comerciais pesados” Dissertação de Doutorado – Universidade de São Paulo - USP São Carlos, 2002.
- 2 Cione, Francisco Carlos. “Medidas de tensões residuais por extensometria em componentes usados no setor da mobilidade”. Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nuclear – IPEN. São Paulo, 2012.
- 3 Hartmann, G.; Hepp, E.; Egner-Walter, A.; Dannbauer, H. : “Simulation of Local Properties of Metal Cast Engine and Suspension Parts”, Conference “Virtual Product Creation”, Stuttgart, June 2004.
- 4 Guesser, W.; et al. “Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freio”. Brake Colloquium SAE Brazil. Gramado/RS. 2003.
- 5 Zanol, A.L. et al. “Influência das tensões residuais e propriedades mecânicas, oriundas do processo de fundição, sobre a performance de um componente de sistema de suspensão”. Suspension System Colloquium SAE Brazil. Caxias do Sul/RS. May 2014.

Informações de Contato

marcelo.tirelli@gm.com; marco.colosio@gm.com
jelrossi@ipen.br
f.rola@magmasoft.com.br; stuewe@magmasoft.com.br

Agradecimento

A empresa General Motors do Brasil por ter permitido a publicação deste trabalho, a Magma Engenharia do Brasil por ter auxiliado nas simulações e IPEN, por ter orientado a conclusão deste trabalho.