

80 oitavo zero
15/07/1999

Determinação dos Parâmetros para

Construção de Dispositivo de

FADIGA TÉRMICA

Aquecimento por Atrito

Aluno:	<i>Rubem Ribeiro Neto</i>
Orientador:	<i>Prof. Doutor Amilton Sinatora</i>
Coordenador:	<i>Prof. Doutor Alberto Hernandez Netto</i>

São Paulo, julho de 1999.

Agradecimentos:

Ao Prof. Amilton Sinatora, não somente pelo trabalho em si, mas por toda a nossa relação nesses anos. Prof. Deniol Tanaka, apesar dos “nãos”, que não raro escutei. Prof. Euriale de Jesus Zerbini, pelo apoio técnico na modelagem de transferência de calor e alguns dados fornecidos.

Aos amigos e companheiros de trabalho Ricardo Akira Nagaya e Alexandre Augusto Gilli. A Roberto Santos Martins, vem colaborando para o meu desenvolvimento na área de simulação numérica.

Ao meu pai, Rubem Ribeiro Filho, que não só me deu apoio moral e técnico nestes anos, mas também me ajudou na dedução de alguns trechos.

Aos amigos, Luciano Martinez Stefanini, Fábio Stabile de Oliveira, Francesco Valentin Grazzini e Paulo Saiz Jabardo, que durante esses anos tantas noites e dias passamos estudando.

A Rosângela, que não cito sobrenome pois o amor não o tem, pela sua compreensão e apoio neste tão difícil último ano.

Vocês não só colaboraram para este trabalho, mas para a minha formação.

ÍNDICE

1. OBJETIVOS	2...
2. IMPORTÂNCIA ECONÔMICA	2..
3. FENÔMENOS PRESENTES NO DESGASTE DE CILINDROS	3
4. O DESGASTE DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO.....	5
5. O QUE É FADIGA TÉRMICA?	8..
6. DEDUÇÃO DO PARÂMETRO TSR	11
6.1 ANÁLISE DO PARÂMETRO T.S.R.....	14
6.2 ANÁLISE DE PRIMEIRA LEI PARA A BARRA.....	14
7. O CILINDRO	15..
8. PESQUISA DE MÁQUINAS	17.
9. NOSSA MÁQUINA - METODOLOGIA DE PROJETO EMPREGADA.....	19
9.1 DESCRITIVO DA MÁQUINA	20.
9.2 PROJETO TÉRMICO - MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	21
9.2.1 <i>Parâmetros da análise</i>	22
9.3 MODELO NUMÉRICO	25.
9.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES	27.
10. CONCLUSÕES	32.
11. BIBLIOGRAFIA.....	34.

1. Objetivos

Os objetivos deste trabalho são estudar e compreender o fenômeno de desgaste por fadiga térmica e determinar os parâmetros de projeto para se projetar e construir um dispositivo capaz de simular e estudar qualitativamente o desgaste de materiais para cilindros de laminação a quente. O desgaste de cilindros é importante, pois apresenta impacto na economia mundial. Este problema, devido a complexidade dos processos não é um problema fácil de se resolver.

2. Importância Econômica

É empregado no processo de fabricação de laminados a quente, de impacto mundial na economia pois no mundo todo o processo de laminação a quente é responsável por cerca de 90% da produção de chapas e perfis de aço, representando um amplo e vasto mercado.

Esses produtos são a principal matéria prima das indústrias de bens de consumo e o seu custo tem repercussão nas economias a nível mundial. No custo de produção dos produtos laminados o consumo dos cilindros e a sua manutenção representam de 5 a 15% do custo total. Fica evidente então que

a melhoria do seu desgaste e manutenção é fundamental para a redução de custos e aumento da competitividade dos produtos laminados.

3. Fenômenos Presentes no Desgaste de Cilindros

O processo de desgaste dos cilindros ainda não está bem determinado. Os artigos lidos e a experiência nesta área do *Profº. Dr. Amilton Sinatora*, sugerem que uma combinação de fatores atua no processo de desgaste dos cilindros, sendo que os principais seriam a fadiga térmica e a abrasão.

Existe também a quebra abrupta do cilindro, que ocorre quando a transferência de calor é tão grande que mesmo um material mais dúctil como o aço acaba falhando por choque térmico. O exemplo mais concreto disto é quando ocorre a parada da cadeira de laminação e geralmente o cilindro de 1 metro de diâmetro é rachado ao meio.

Para analisarmos qual a principal razão da falha de um componente devemos avaliar três pontos em potencial, sendo eles: o tipo de falha, as propriedades mecânicas do material, o serviço ao qual o componente está solicitado e como se iniciam as falhas.

O tipo de falha é importante pois geralmente um certo tipo de defeito é associado a um determinado processo de desgaste. As propriedades do material geralmente nos sugerem a que tipo de falha o material é mais propenso a falhar. Propriedades como resistência à tração, dureza e difusividade térmica são muito importantes no nosso caso em particular. Um exemplo disto são os ferros fundidos nodulares, muito resistentes a abrasão e pouco resistentes a choques mecânicos.

O tipo de serviço também é um importante guia na busca pelo processo de desgaste relevante, pois ele determina como o sistema trabalha e qual é o processo de desgaste envolvido em potencial. Um exemplo clássico é o desgaste de engrenagens, onde a fadiga de contato é o processo relevante pois nesse caso temos sempre uma superfície em contato com a outra alternando tensões de Hertz na superfície que originam o "pitting", ou pipocamento.

O fenômeno que inicia a falha é importante pois muitas vezes ele ocorre só no começo e com o decorrer do tempo deixa de ocorrer e outro processo então passa a deteriorar a superfície ou seja o processo inicial muitas vezes atua como potencializador do processo final, e muitas vezes é mais fácil evitar o processo inicial do que o final. Um exemplo clássico disso é que os resíduos do "pitting", misturados ao óleo de lubrificação, potencializam a abrasão a três corpos em caixas de câmbio. Esta é uma das razões pela qual se troca o

óleo da caixa de mudanças ou se coloca um parafuso magnético na base do câmbio que atrai os resíduos de ferro e evita que eles se misturem ao óleo.

4. O desgaste de cilindros de laminação

Os principais fenômenos de desgaste dos cilindros parecem ser a abrasão, a corrosão e a fadiga térmica, sendo esta visão compartilhada por muitos pesquisadores da área. Divergências surgem porém, quanto à importância, ou atuação de cada um.

A dificuldade de quantificar os fenômenos envolvidos é frequente no estudo de sistemas tribológicos, pois além de existirem muitos fenômenos atuando juntos, os dispositivos de ensaio de laboratório dificilmente conseguem reproduzir um único processo isoladamente.

O nosso grupo de pesquisa acredita, por diversas razões, que a fadiga térmica seja o principal mecanismo de falha. Esta conclusão não foi trivial, e sim baseada em muito estudo e discussão.

Em sistemas tribológicos as duas coisas mais importantes para determinarmos o processo de desgaste são o tipo de falha e o início das falhas.

O tipo de falha é importante pois caracteriza o processo. O início da falha é importante pois uma pequena falha inicial pode potencializar outras falhas de outros processos, ou seja de não existir ou quanto mais tempo levar para acontecer a falha inicial, melhor.

No caso dos cilindros, a malha de trinca apresentadas, se assemelha muito, para não dizer igual, com a malha característica de fadiga térmica. Para tanto compare a figura 1, que mostra a malha de trincas de um cilindro, com a figura 2, de fadiga térmica, nesse caso de um tubo de caldeira.



Figura 1 - Malha de trincas em um cilindro de laminação

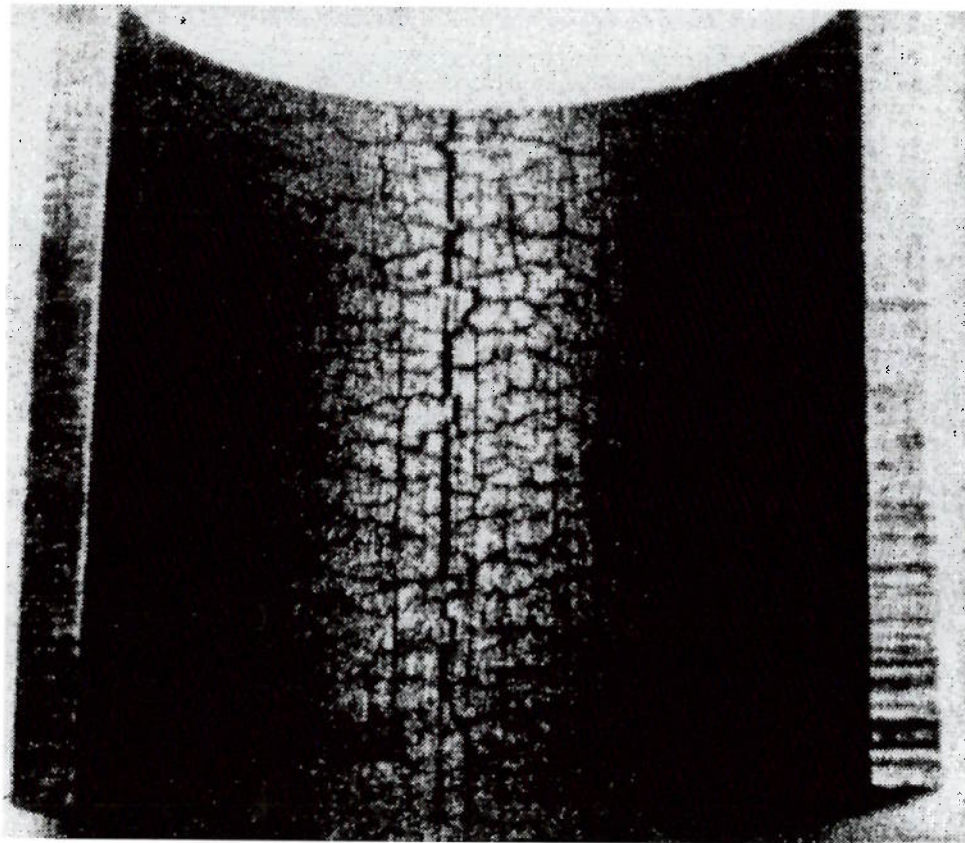


Figura 2 - Malha de trincas em um tubo de caldeira

Após o surgimento dessa malha inicial, começam a aumentar os processos de corrosão, que se mistura através das fendas e da abrasão, que aumenta com os pequenos pedaços arrancados desta malha, e ocorreria então a abrasão a 3 corpos.

5. O que é Fadiga Térmica?

O processo de falha por fadiga térmica é simples de ser compreendido, porém o conceito de como ocorre a tensão térmica difere completamente do conceito de como a tensão mecânica ocorre. Isto foi objeto de pesquisa bibliográfica e compreendido no livro "Thermal Stress".

A tensão térmica pode surgir de duas maneiras. A primeira e mais clássica sendo uma distribuição desigual de temperatura em um componente isotrópico, induzindo deformações. Restrições, mecânicas ou térmicas, leia-se de difusividade térmica, que é a "velocidade" com a qual o calor se propaga, a essas deformações induzem tensões. Essas tensões abaixo da tensão de escoamento ou ruptura, em regime cíclico acabam por originar trincas.

Quando em um único ciclo a tensão supera a tensão de ruptura do material naquela temperatura convencionamos chamar a falha de choque térmico. Para entender como isto pode ocorrer, imagine um cubo de aço, onde aquecemos uma das faces, nesta face a temperatura aumenta rapidamente, e o material se dilata, na face oposta que ainda está fria, o material não se dilata, o que impõe uma restrição ao deslocamento da face aquecida, dessa forma teremos tensões de compressão em uma face e tensões de tração na outra.

Outro caso em que podem se originar as tensões térmicas é em material não-isotrópico, aquecido uniformemente. Nesse caso, como seções diferentes do material têm propriedades térmicas e mecânicas diversas, a velocidade com

que o calor se propaga, varia de seção a seção, assim como as deformações, o que acarreta gradientes de tensão.

É interessante observar que tanto a fadiga como o choque térmicos estão relacionados com a magnitude do gradiente de temperatura, sendo intuitivo que quanto maior o gradiente maior a probabilidade desses fenômenos ocorrerem. Porém eles estão também relacionados com a difusividade térmica do material, que é a capacidade que o material tem de conduzir o calor. Este não é muito intuitivo, porém todos sabemos que se aquecermos um eixo feito de vidro em um forno ao redor de 300 °C e jogarmos numa bacia com água a temperatura ambiente o mesmo quebra inteiro por choque térmico, mas se mantermos a geometria e fizermos isso com um eixo de aço, conseguiremos induzir tensões de tração na superfície, ou seja temperando o material. Talvez se fizermos isso ciclicamente com o eixo de aço o mesmo falhe por fadiga térmica.

Quando este ciclo é baixo ou mesmo somente único damos o nome de choque térmico. Alguns autores costumam definir o ciclo único como choque-térmico, e poucos ciclos como fadiga de baixo ciclo, ou definição mais correta “Low Endurance Fadigue”, pois existe encruamento ao longo dos ciclos até culminar no choque térmico propriamente dito.

O choque pode ocorrer quando as propriedades do material, resistividade, tensão de ruptura e modulo de elasticidade estão de certa forma combinadas que conferem ao material baixa resistência a variações de temperatura. Este é

o caso dos materiais cerâmicos, pouco ducteis, com altas tensões de ruptura, alto módulo de elasticidade e alta resistência térmica.

Acima já mencionamos a diferença básica entre fadiga térmica e choque térmico, já que estes se diferem basicamente pelo número de ciclos. Podemos classificar choque térmico como a "fadiga" de um único ciclo ou de poucos ciclos.

Durante o nosso estudo encontramos referência ao parâmetro TSR (Thermal Shock Resistance), este parâmetro é dado por :

$TSR = \sigma \cdot k / E \cdot \alpha$, onde:

σtensão de ruptura do material

kcondutibilidade térmica do material

Emódulo de elasticidade do material

αcoeficiente linear de expansão térmica

Porém tal referência não mostrava a dedução teórica deste parâmetro, que parece funcionar, pois foi aplicado em alguns casos reais. Então decidi fazer um modelo simples de transferência de calor unidimensional a fim de deduzi-lo.

6. Dedução do parâmetro TSR

A fadiga térmica difere da fadiga mecânica, porque basicamente a tensão térmica difere da tensão mecânica. Eu prefiro a definição "*Termodinâmica*" de tensão ao invés da puramente mecânica, pelo fato de a associação com a fadiga térmica ficar mais fácil.

Imaginemos um barra na qual, nas suas extremidades seja aplicada uma força F , esta barra aumentará de comprimento de l_0 para l , sendo:

$E = (l - l_0) / l_0$, o trabalho será então:

$W = F (l - l_0)$, admitindo que nenhum calor é fornecido ao sistema a equação da 1ª lei fica:

$$\Delta U = W$$

$$\Delta U = F(l - l_0) \text{ ou}$$

$$\Delta U = \sigma.A(l - l_0)$$

ou seja a força mecânica mexeu na energia interna do sistema.

Imaginemos agora uma barra a uma temperatura T , com um comprimento L sendo resfriada até uma temperatura T_0 , $T > T_0$, e com uma porção de comprimento l_0 , $L \gg l_0$, de modo às suas extremidades estarem "termicamente" presas, ou seja a variação da temperatura só se dará no trecho l_0 , da barra e de modo que o seu comprimento não possa diminuir.

Hipóteses:

- 1 - Material isotrópico;
- 2 - $l_0 \gg a \Rightarrow q_y$ desprezível.
- 3 - Material homogêneo;
- 4 - dt é pequeno, o quanto necessário;
- 5 - $da \neq 0$ (Não há restrição na direção y);
- 6 - $dl = 0$ (Há restrição na direção x);
- 7 - AB é olhada apenas por um instante pequeno o suficiente para a temperatura longe de AB seja T , e em AB seja T_0 .

Lei de Fourier - Dir x

$q_x = -K (dT/dx)$, para o problema

$q_x = -K (T - T_0)/l_0$

Variação do comprimento da seção AB, caso não houvesse restrição

$$l = l_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

$$l = l_0 + l_0 \alpha (T - T_0)$$

$$(l - l_0)/l_0 = \alpha (T - T_0)$$

Tensão gerada pela restrição de diferença de temperatura pois $dl = 0$, seria como um contra trabalho na seção AB, pois a sua tendência seria diminuir,

mas a inércia térmica/mecânica da barra como um todo não deixa que ela diminua.

$$\sigma = E \varepsilon$$

Porém,

$$\varepsilon = (l - l_0)/l_0 = \alpha (T - T_0)$$

e portanto:

$$\sigma = E \alpha (T - T_0).$$

Se considerarmos que qx é a capacidade da seção AB perder calor em função de uma dada temperatura entre esses pontos e os de mais temos que:

$$qx / K l_0 = (T - T_0)$$

substituindo $(T - T_0)$ por $qx / K l_0$ em

temos:

$$\sigma = E \alpha qx / K l_0,$$

rearranjando:

$$qx / l_0 = \sigma K / E \alpha,$$

definindo T.S.R como qx / l_0 , temos:

$$T.S.R = \sigma K / E \alpha, \text{ como queríamos demonstrar.}$$

Se o resfriamento for brutal, de forma que σ , chegue a ruptura, teremos falha por choque térmico.

6.1 Análise do parâmetro T.S.R.

K / α , reflete o fluxo de energia pela taxa de deformação térmica ou seja a capacidade de o material se deformar em virtude da velocidade da propagação do fluxo de calor.

σ / E , reflete a taxa de aumento da tensão, frente a uma dada deformação.

O parâmetro $\sigma K / E \alpha$, como um todo o aumento de tensão para um dado fluxo de calor, sobre a sua capacidade do material se deformar.

6.2 Análise de primeira Lei para a barra

Como a barra tende para um comprimento l_0 , mas não pode percorrer este caminho, um trabalho $W = F (l-l_0)$, fica induzido à barra e a equação da 1ª lei fica:

$$A U + Q = W$$

ou

$$A U + C_m (T-T_0) = \sigma St (l-l_0).$$

Onde:

St , área da seção transversal;

C_m , capacidade térmica do material.

Notamos então que a transferência de calor, originou uma tensão σ , de tração na barra. No exemplo acima a “Tensão Térmica” se originou devido a uma termo-mecânica, onde a inércia térmica do corpo, origina transitórios de temperatura, e partes se dilatam ou contraem mais que outras, sendo este o nosso caso em estudo.

Resumidamente podemos dizer que fadiga térmica se origina a partir de transitórios de temperatura, que por sua vez originam deformações e que induzem assim tensões, num processo cíclico de esquentar - esfriar, temos trincas ocasionadas por fadiga: a fadiga térmica.

7. O Cilindro

Em estudos tribológicos é muito importante e fundamental conhecer a peça em estudo e as condições de serviço a que está submetido, e este será o assunto desta seção.

Os cilindros são feitos de aço ou ferro fundido. São constituídos de duas partes, uma casca externa dura e pouco dúctil, quando comparada ao miolo mole e dúctil. Devido a essa construção existe uma resistência térmica entre o miolo e a casca, resultante da interface e da camada de óxido presente. Esta

resistência isola termicamente o miolo da casca e por isso a temperatura no miolo sempre será menor que na casca.

O aquecimento se dá na parte inferior, onde a chapa entra em contato com o cilindro, sendo a radiação, a condução e a geração por atrito os processos presentes, no meu entender, e para isto também serviu a nossa pesquisa, a principal componente, se deve ao atrito. O resfriamento se dá na porção superior através de jatos d'água e é intenso.

O miolo por possuir propriedade diferentes da casca e por estar a uma temperatura inferior acaba sendo uma restrição à deformação da casca, e seria esperado trincas superficiais no sentido transversal, como realmente ocorrem.

As diferentes temperaturas ao longo do sentido de rotação do cilindro acabam por originar trincas no sentido do eixo de rotação, o que também acontece.

Quando ocorre a parada da cadeira de laminação, ocorre a falha brutal do cilindro no sentido transversal, que quebra inteiro. Acreditamos que nesse caso a transferência de calor é muito grande e localizada, pois o cilindro parou de girar o que ocasiona a falha por Choque Térmico.

8. Pesquisa de Máquinas

Até agora a construção de um dispositivo capaz de estudar fadiga térmica não foi abordada, isto se deve ao fato de que este processo de desgaste nunca foi antes estudado pelo Laboratório de Fenômenos de Superfície, o que fez com que o processo fosse amplamente discutido, sendo muitas reuniões realizadas, não só sobre máquinas, mas também sobre como o processo ocorre. Eu em particular procurei estudar primeiro o que era Tensão Térmica, para depois iniciar o estudo da Fadiga Térmica. Nesta seção vou discutir os dois modelos de máquinas, dentre os muitos que encontramos na bibliografia, que nos serviram de base para nossa escolha.

Muitos artigos foram lidos e muitos modelos são neles propostos, porém somente dois desses modelos parecem produzir resultado confiáveis e somente a eles foi dedicado um estudo mais aprofundado.

O primeiro modelo, por curiosidade não trata de cilindros de laminação, e sim de fadiga térmica em materiais cerâmicos, mas tudo bem, afinal o cilindro é quase cerâmico! Este modelo de máquina é utilizada pelo Prof. Dr. Michael Pohl, na Ruhr-Universität Bochum, na Alemanha. Basicamente a máquina opera com um corpo de prova, que é irradiado por um raio laser e resfriado ao natural ou por um jato de nitrogênio. Este equipamento apresenta as seguintes características.

- estuda o fenômeno da fadiga térmica isoladamente, uma vez que outros fenômenos como abrasão e corrosão não estão presentes;
- apresenta alto custo;
- apresenta problemas de segurança, devido a radiação do laser.

O outro equipamento criado para estudar cilindros de laminação em específico, é de autoria de Sven-etrik Lundberg, da Milltek Innovation, Gävle da Suécia. É um dispositivo disco contra disco, modelo clássico em máquinas de desgaste, sendo que um disco representa a chapa e é mantido a uma temperatura constante através de um maçarico e o outro disco representa o cilindro, sendo a temperatura controlada através do tempo de encosto entre os dois cilindros, a separação e encontro dos dois é realizada através de um cilindro hidráulico., permitindo também variação no valor da carga aplicada. Este sistema apresenta as seguintes características.

- outros fenômenos atuam junto com a fadiga térmica, sendo eles a abrasão e a corrosão;
- comparado com o equipamento anterior, este apresenta baixo custo e se encaixa no nosso orçamento para o projeto;
- é versátil se forem feitas pequenas modificações;
- é um equipamento mais seguro que o anterior.

Pelas características citadas acima, optamos por projetar um sistema semelhante ao utilizado por Lundberg, com algumas modificações que o

tornem mais versátil. Além disso a máquina utilizada por Pohl, será utilizada pelo Prof. Amilton, em ensaios que fará na Alemanha.

9. Nossa Máquina - Metodologia de Projeto Empregada

Após estudos realizados pelo Prof. Amilton na Alemanha, decidimos que a melhor configuração para a máquina seria a de um "freio", ou seja um cilindro a alta temperatura que girando ora é encostado em um corpo de prova plano e ora é afastado. O aquecimento se dá por três vias: radiação, condução e atrito. Este recebe então um jato d'água na superfície, que o resfria. Dos três processos de transferência de calor citados, o que mais contribui para aquecimento do corpo de prova é o atrito, sendo a condução e a radiação desprezíveis no processo.

Fica como referência, que a máquina ainda pode ter duas outras opções de ensaio, sendo uma a substituição do corpo de prova plano por um cilindro, sendo para isso necessário apenas projetar o subsistema do corpo de prova. A outra é a troca do cilindro de aquecimento por uma fonte autônoma, um raio laser ou um arco elétrico por exemplo. Nesse segundo caso a máquina se assemelharia a de Pohl. Este sistema apresenta as seguintes características:

- baixo custo;
- é facilmente adaptável a uma máquina rotativa como um torno por exemplo;
- calor gerado pelo atrito é da mesma ordem de grandeza que o gerado por um laser de alta intensidade;
- construção rápida;
- fluido de resfriamento é o mesmo do caso real;
- pode ser facilmente adaptado a outra fonte de calor;
- combina fadiga térmica com corrosão e desgaste por deslizamento/abrasão;
- outros fenômenos atuam junto com a fadiga térmica, sendo eles a abrasão e a corrosão.

9.1 Descritivo da Máquina

Nossa máquina será um dispositivo acoplado a um torno. Na árvore do torno, será fixado um disco com o material da chapa ou dos perfis a serem laminados. No carrinho, será acoplado um sistema com cilindro pneumático e demais dispositivos de controle, fará com que o corpo de prova entre em contato com o disco para o aquecimento através do atrito e com o jato de água, para o resfriamento.

O tempo de contato e resfriamento, poderão ser controlados através de um circuito eletrônico e a força de contato será regulada através de uma válvula reguladora de pressão colocada na entrada do cilindro.

9.2 Projeto Térmico - Modelo de Transferência de Calor

O projeto mecânico do dispositivo é simples, não sendo o gargalo do projeto. Dessa maneira não o abordarei nesse estudo, realizando apenas a seleção do cilindro pneumático e demais componentes. Por sua vez o projeto térmico, que deve determinar principalmente o tempo de aquecimento do corpo de prova, exige maior dedicação.

O tempo de aquecimento, diferente do tempo de resfriamento, não pode ser superestimado, pois temos de ter certeza de que uma temperatura máxima não seja superada, aliás isto é altamente indesejável, pois caso ocorra pode invalidar o ensaio. Já o tempo de resfriamento, uma vez que a temperatura do corpo nunca será inferior à do fluido refrigerante, não representa um problema, sendo que pode ser calculado e estimado através de escoamento sobre placa plana, que tem solução analítica.

Se quisermos ter um valor preciso para o tempo de aquecimento, por este ser um processo em regime transitório tri-dimensional, é exigido simulação numérica do sistema.

O tempo de contato foi determinado com o auxílio de simulação numérica realizada no software ANSYS 5.4, no qual tenho larga experiência na área estrutural. Na realidade desenvolvi uma série de sub-rotinas de análise, parametrizadas para estudar o aquecimento do corpo e determinar qual deve ser este tempo. Estas rotinas, que formam um programa, assim como um

manual de utilização ficará a disposição do laboratório caso deseje-se usar outra fonte de aquecimento, como um laser ou um arco-elétrico.

Hipóteses Adotadas:

- regime transitório;
- bordas adiabáticas;
- propriedades do material não mudam com a temperatura;
- material isotrópico;

Processos presentes:

- radiação (desprezível);
- condução no contato (desprezível, pois resistência térmica de contato é alta);
- geração na superfície do V.C. = trabalho da força de atrito é constante ao longo do tempo.

9.2.1 Parâmetros da análise

Analisei diversas configurações diferentes para o sistema, variando a rotação do disco e a carga aplicada, para uma mesma geometria e diferentes tempos de contato do disco com o corpo de prova.

A geometria inicial do corpo de prova era:

Largura = 25,0 mm

Comprimento = 50,0 mm

Altura = 15,0 mm

O contato disco - corpo de prova, não foi simulado numericamente, uma vez que não é necessário, sendo o fluxo de calor calculado da seguinte maneira:

Área de contato: calculada mediante tensões de Hertz, para um disco contra um plano (disco de raio infinito), de acordo com o proposto por Shigley, no livro Mechanical Engineering Design.

Fluxo devido à condução: lei de Fourier, utilizando o valor de resistência térmica de contato recomendado pelo Prof. Zerbini.

Fluxo devido à radiação: modelo clássico de radiação, com fator de forma estimado em $\frac{1}{2}$ e emissividade de 0.8, mediante consulta a bibliografia especializada.

Fluxo devido ao atrito: calculado como o trabalho da força de atrito por unidade de tempo sobre a superfície.

Para se ter uma razoável área de contato, sem fazer com que o disco cresça muito, e sem aumentar muito sua largura, para que não atinja dimensões comparadas com o corpo de prova sugeri:

Diâmetro = 200 mm

Largura = 10 mm

Rotação = 150 rpm

Força aplicada = 1000 N

Inicialmente havia proposto que o disco fosse aquecido, mas como isso se mostrou dispensável, já que o calor era basicamente fornecido pelo atrito, nos resultados finais não considerei esta hipótese.

A análise numérica mostrou também que o comprimento do corpo de prova poderia ser reduzido para 40,0 mm, o que parece pouco importante, mas é difícil fundir amostras pequenas com a mesma microestrutura do cilindro original, e 50,0 mm de comprimento, era o tamanho máximo que conseguiríamos fundir, de forma a ter um ensaio de qualidade. Na verdade não seria possível fundir um corpo de prova com as mesmas propriedades mecânicas do cilindro, se ele fosse maior do que o que foi inicialmente proposto. Assim sendo a geometria final ficou:

Largura = 25,0 mm

Comprimento = 40,0 mm

Altura = 15,0 mm

sendo que será esta para os quais os resultados serão apresentados.

9.3 *Modelo numérico*

Realizei a simulação de um quarto do corpo de prova somente, já que foi possível aplicar condições de simetria ao longo da largura e do comprimento. Isto não influi de maneira alguma nos resultados e reduz o tempo de processamento em até 8 vezes.

A área de contato, por ser muito pequena, necessitava de uma malha muito refinada nessa região, mas era impossível além de desnecessário, aplicar esse tamanho a todo o modelo. Dessa maneira fui modificando o tamanho dos elementos, de forma a reduzir seu número. Foi tomado o cuidado de manter a sua razão de aspecto, de no máximo 1/10, pois acima desse valor, os resultados poderiam não ser confiáveis.

1

ANSYS

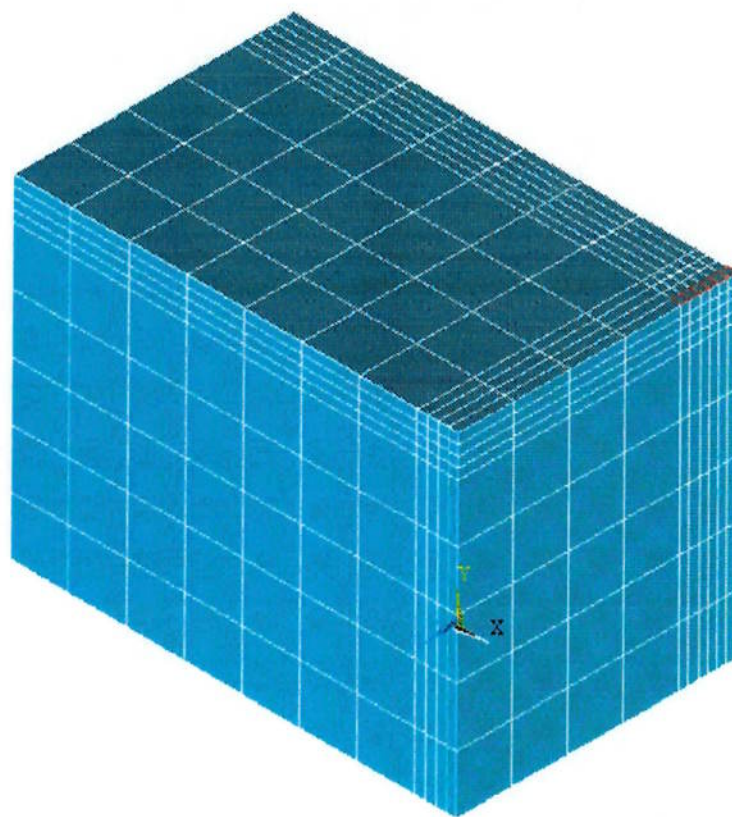


Figura 3 - Modelo numérico de transferência de calor

9.4 Resultados das análises

Apresentarei os resultados de duas das simulações que realizei, que considero ser os de melhor importância e ao final, apresento as sugestões para o que considero ser as melhores configurações.

Abaixo seguem os dados de entrada gerais e as plotagens para o tempo de aquecimento considerado.

Para o corpo de prova:

Largura = 25,0 mm

Comprimento = 40,0 mm

Altura = 15,0 mm

Para o disco de aquecimento:

Diâmetro = 200 mm

Largura = 10 mm

Rotação = 150 rpm

Força aplicada = 1000 N

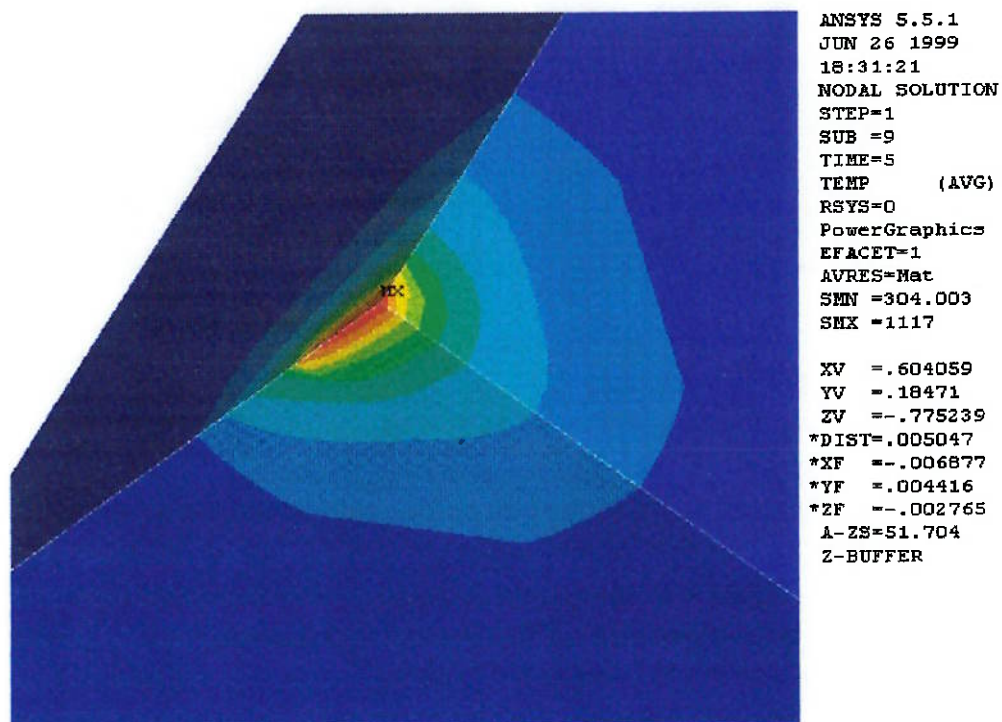
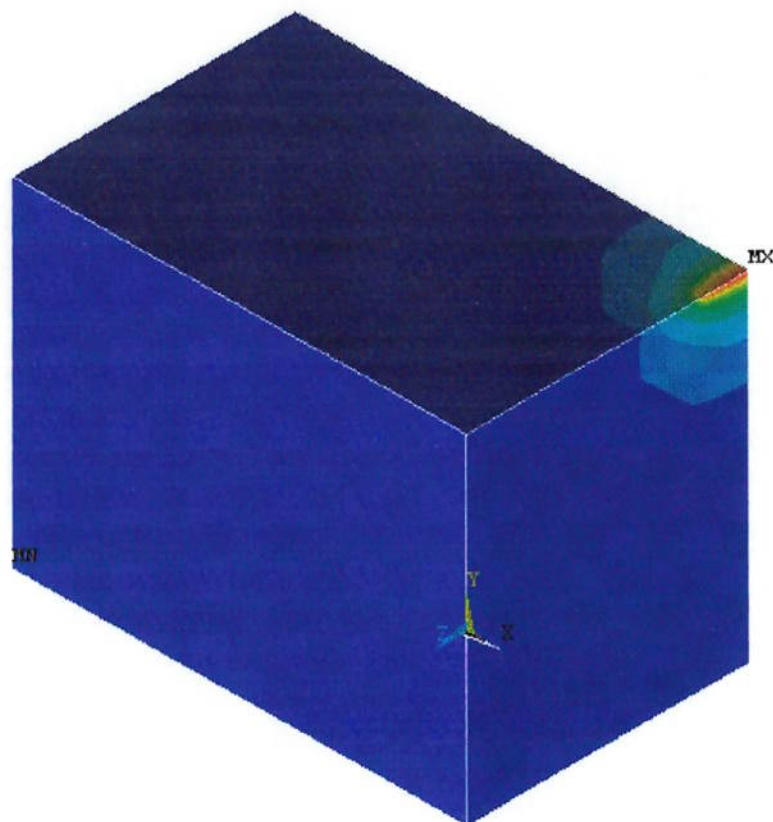


Figura 4 - Detalhe no local de aquecimento para 5s.

Notar valores de até 1100 K (830 celsius).

1



```

ANSYS 5.5.1
JUN 26 1999
18:33:35
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =9
TIME=5
TEMP      (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
SMN  =304.003
SMX  =1117

XV  =1
YV  =1
ZV  =1
DIST=.014034
XF  =-.01
ZF  =-.00625
Z-BUFFER
    
```

Figura 5 - Vista geral do corpo de prova para 5 s.

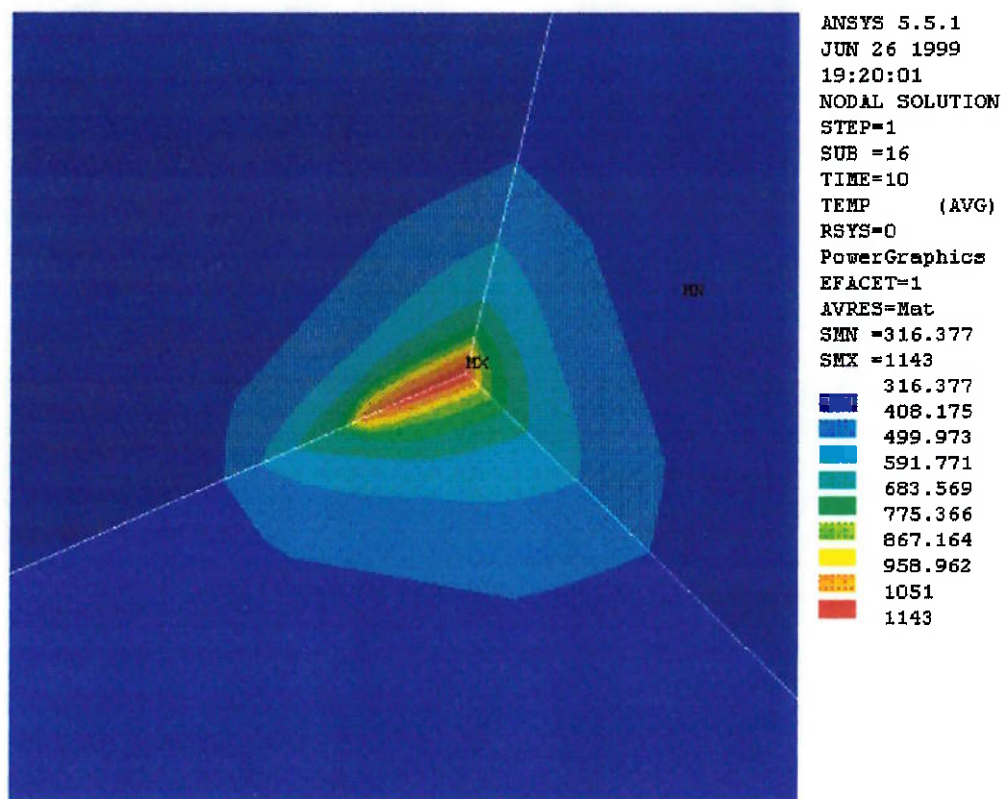


Figura 6 - Detalhe no local de aquecimento para 10s.

Notar faixas com temperaturas de até 700 celsius, já alcançando as necessidades do ensaio.

1

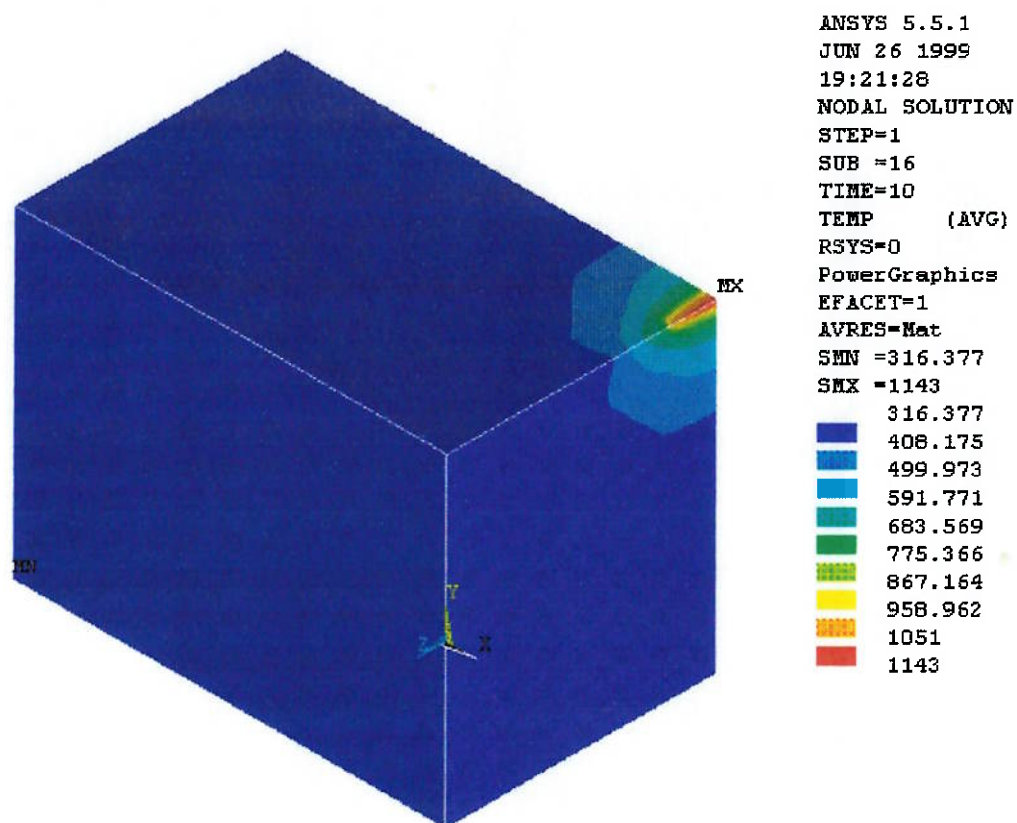


Figura 7 - Vista geral do corpo de prova para 10 s.

10. Conclusões

O modelo respondeu bem, quanto ao perfil de temperatura e valores encontrados. Notamos que para o tempo de 10 segundos uma região, na face de aquecimento de uns 8 por 8 milímetros, apresenta temperaturas mínima de 550 celsius, com alguns pontos ao redor de 900 celsius, mas isto não deve ser considerado, pois provavelmente é um erro numérico.

É recomendável realizar as simulações futuras, utilizando propriedades de material que variam com a temperatura. Sendo para uma primeira aproximação, ou chute inicial, o modelo é confiável. Deve-se instrumentar o dispositivo, a fim de quantificar os resultados.

Alguns resultados de tensão térmica foram avaliados, mas apesar de responderem bem qualitativamente, quantitativamente não são confiáveis, pois encontrei um erro de condição de contorno, embora talvez esse 'erro' não altere os resultados. Numa futura simulação o erro pode ser facilmente corrigido. Neste caso, seria possível determinar as tensões de contato entre o cilindro e o corpo de prova, e também quantificar o calor transferido com maior precisão ao cilindro, não considerando apenas como metade do gerado pela força de atrito, pois pode ser que esse não se divida uniformemente entre o cilindro e o corpo, embora para primeira análise este modelo atenda muito bem aos requisitos.

Recomendo como parâmetros de projeto e operação:

Corpo de prova como já analisado;

Diâmetro do disco de atrito/aquecimento: 250 mm

Rotação: 50 a 500 rpm;

Carga aplicada: 300 a 2500 N;

Tempo de aquecimento: 5 a 20 segundos.

Nesse primeiro modelo não foi considerado a dinâmica do sistema, mas em trabalhos futuros, em primeira vista não há nada que impeça. Para este trabalho futuro existe o desejo tanto por parte do Laboratório, como da minha pessoa que seja feito a título de Mestrado, não só pelas dificuldades adicionais, mas também pela continuação de uma grande parceria.

11. Bibliografia

Incropera, Frank P. & de Witt, David P., Fundamentos da Transferência de Calor e Massa, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, Rio de Janeiro, 1992.

Van Wylen, Gordon; Sonntag, Richard; Borgnakke, Claus; Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1995.

Pohl, Michael; Testing of the Resistance to Thermal Cycling and the Cavitation Behaviour of Ceramics at the Institute of Material of the RUB, Ruhr-Universität Bochum, 1997.

Lundberg, Seven-Erik, A New High-Temperature Test Rig for Optimization of Materials for Hot-Rolling Rolls; Journal of Materials Processing Technology, 36 (273-301), 1993.

Sehitoglu, Huseyin; Thermal and Thermomechanical Fatigue of Structural Alloys, Metals Handbook, 1998.

Benham, P.P. and Hoyle, Russel; Thermal Stress; Sir Issac Pitman and Sons Ltd., London.

Spuzic, K.N. Strafford, C. Subramanian, G. Savage; Wear of Hot Rolling Mills: an Overview, Wear 176 (261-271), 1994.

Shigley, Joseph Edward and Mischke, Charles R.; Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill, 1989.

ANSYS 5.4, Vol. I Procedures Manual, 1997.

ANSYS 5.4, Vol. II Commands Manual, 1997.

ANSYS 5.4, Vol. III Elements Manual, 1997.