

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA DISTRIBUIÇÃO DE
CALOR EM DRESSADORES SINTERIZADOS CONTENDO
DIAMANTE SINTÉTICO

GISLEINE PEREIRA DE CAMPOS



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof.Dr. **Reginaldo Teixeira Coelho**

São Carlos
- 1999 -

Class.	TESE
Cutt.	1098
Tombo	005/00

31100008532

s/s 1070461

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da
Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

C198e Campos, Gisleine Pereira de
Estudo teórico-experimental da distribuição de calor em dressadores sinterizados contendo diamante sintético / Gisleine Pereira de Campos. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Mecânica.

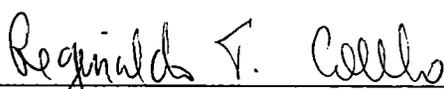
Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho.

1. Dressador. 2. Temperatura. 3. Diamante.
I. Título.

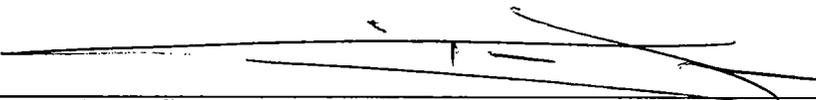
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Licenciada **GISLEINE PEREIRA DE CAMPOS**

Dissertação defendida e aprovada em 26.11.1999
pela Comissão Julgadora:



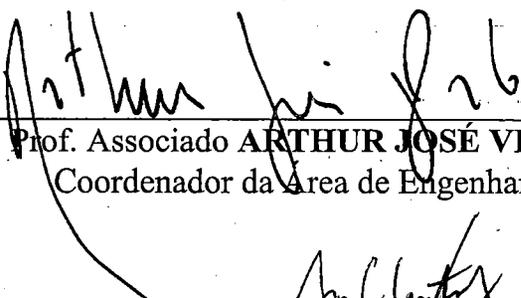
Prof. Doutor **REGINALDO TEIXEIRA COELHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



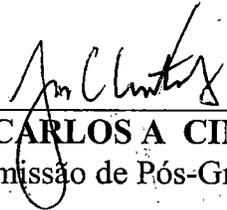
Prof. Titular **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **LUÍS FELIPE MENDES DE MOURA**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*Aos meus pais pela luta, amor e confiança
e ao meu irmão que são as pessoas
a quem tanto amo.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por estar sempre comigo.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho pela orientação, pela amizade e, principalmente por acreditar e confiar no meu trabalho.

À Kelen por ser minha irmã de coração em cada momento de minha vida por todos esses anos.

À Luciana que mesmo em pouco tempo já chegou conquistando um sentimento maravilhoso: a amizade.

Ao Mariano, Volnei e Neilor pela paciência e ajuda na correria do laboratório.

Aos meus grandes amigos Godoy, Geraldo, Teodora, Fabiana, Rodrigo, Toddy, Panamá, Claudião, Ana Lúcia, Celso, Barrão, Barata, Klaus, Alexandre, Renatão, Miudão, Adriano, Luciano, que são pessoas que eu tanto adoro e sempre arranjarei um jeitinho de ficar por perto.

Aos meus amigos do laboratório Carlos Elias, Aldo e Ronaldo pela grande ajuda e agradável convivência.

À Ana Paula pela constante ajuda e disponibilidade em ajudar-me. E principalmente pela amizade.

À Beth pela grande ajuda e atenção, que com sua sinceridade e sensibilidade consegue envolver todas as pessoas a sua volta, sou uma privilegiada por ser uma delas.

Às minhas amigas, confidentes e conselheiras: Eliz, Lisandra, Karina e Érica.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Mecânica que sempre estiveram dispostos ao atendimento.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento deste trabalho.

“Não importa qual caminho escolhemos e sim quem iremos encontrar na caminhada...”

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Objetivos.....	2
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 - Desgaste em rebolos.....	4
2.2 - Operação de dressagem.....	6
2.3 - Tipos de dressadores.....	11
2.4 - Novas tendências em dressagem.....	15
2.4.1 - Tendências em operações de dressagem.....	26
3 - EQUAÇÕES DE TRANSMISSÃO DE CALOR.....	29
3.1 - Método de Solução pela separação das variáveis.....	31
3.1.1 - Resolução pelo método analítico aplicado a dressadores.....	36
3.2 – Método de solução pelas equações de diferenças finitas.....	38
3.2.1 – Estabelecimento da rede nodal.....	38
3.2.2 – Equação da condução do calor em diferenças finitas.....	40
3.2.3 – O método do balanço de energia.....	41
3.2.4 – Resolução das equações de diferenças finitas.....	47
3.2.4.1 – O método da inversão de matriz.....	48
3.2.4.2 – Iteração de Gauss – Seidel.....	49
3.3 – O método de elementos finitos.....	50
4 – TRABALHO EXPERIMENTAL.....	63
4.1 – Materiais e Equipamentos.....	63

4.1.1 - Laboratório do grupo de otimização de processos de fabricação (GOPF).....	63
4.1.2 - Laboratório de CAD/CAE.....	65
4.2 – Descrição dos Experimentos.....	65
4.2.1 - Medição de Temperatura.....	66
4.2.2 - Cálculo de h e q_f	68
4.2.3 – Modelo do Método de Elementos Finitos para Distribuição de Temperaturas.....	69
4.2.3.1 - Pré-Processamento.....	70
4.2.3.2 - Solução (Solver).....	73
4.2.3.3 - Pós-Processamento.....	73
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
5.1 – Medição de Temperatura e Cálculo do Coeficiente de Transferência Convectiva de Calor (h) e do Fluxo de Calor (q_f).....	74
5.2 – Resultado da análise térmica via Método dos Elementos Finitos.....	81
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
APÊNDICE 1: ANÁLISE DO MATERIAL TÉRMICO UTILIZANDO O ANSYS52.....	95
APÊNDICE 2: ANÁLISE TÉRMICA UTILIZANDO ANSYS52.....	97
APÊNDICE 3: PROGRAMA CNC.....	98
APÊNDICE 4: PROGRAMA LAB VIEW.....	100

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Ilustração mostrando as diferenças existentes entre os termos perfilamento e dressagem: - Perfilado: após o perfilamento a superfície do rebolo é macia e fechada; - Dressado: após dressagem a superfície do rebolo é aberta com os grãos expostos, prontos para uma ação de retificação eficiente.....	7
FIGURA 2.2 - Esquema mostrando os principais parâmetros de dressagem usando-se um dressador ponta única de diamante.....	9
FIGURA 2.3 - Dressadores estáticos e rotativos.....	12
FIGURA 2.4 - Princípio da Dressagem à Laser.....	16
FIGURA 2.5 - Dressagem por descarga elétrica.....	19
FIGURA 2.6 - Dressagem ECDD com eletrodos giratórios (rebolo reto).....	19
FIGURA 2.7 - Dressagem ECDD com eletrodos giratórios (rebolo copo).....	20
FIGURA 2.8 - Dressagem Eletrolítica.....	21
FIGURA 2.9 - Detalhe do Eletrodo.....	21
FIGURA 2.10 - Equipamento para a dressagem com abrasivos livres.....	23
FIGURA 2.11 - Mecanismo da dressagem com abrasivos livres.....	23
FIGURA 2.12 - Superfície do rebolo dressada pelo método do Jato Abrasivo.....	24
FIGURA 2.13 - Padrão do rebolo micro-ranhurado.....	25
FIGURA 3.1 - Condução bidimensional numa chapa retangular.....	31
FIGURA 3.2 - Esquema do comportamento da temperatura em um dressador.....	37
FIGURA 3.3 - Condução bidimensional. (a) Rede nodal. (b) Aproximação em diferenças finitas.....	39
FIGURA 3.4 - Condução para um nó interno proveniente dos nós vizinhos.....	42
FIGURA 3.5 - Formulação da equação em diferença finitas correspondente a um canto reentrante de um sólido com convecção na superfície.....	44
FIGURA 3.6 - Condução entre materiais diferentes, adjacentes, com uma resistência térmica de contato na interface.....	46
FIGURA 3.7 - O contínuo.....	51
FIGURA 3.8 - O contínuo discretizado por inúmeros elementos.....	52
FIGURA 3.9 - Típico Pós-Processamento de um pacote comercial.....	54

FIGURA 4.1 – Esquema do banco de ensaios. (1) rebolo; (2) módulo da retificadora CNC; (3) dressadores presos à máquina; (4) termopares; (5) placa de conexão dos termopares; (6) microcomputador; (7) estrutura da retificadora CNC.....	64
FIGURA 4.2 - Foto da retificadora.....	67
FIGURA 4.3 – Posição do termopar por dentro do dressador.....	68
FIGURA 4.4 – Geometria do modelo.....	70
FIGURA 4.5 - Modelo discretizado.....	72
FIGURA 5.1 – Resultado da temperatura medida à 1,0mm da superfície em contato com o rebolo do dressador de liga metálica.....	75
FIGURA 5.2 - Resultado da temperatura medida à 2,0mm da superfície em contato com o rebolo do dressador de liga metálica.....	75
FIGURA 5.3 – Resultado da medição de temperatura à 1,5mm da superfície em contato com o rebolo.....	78
FIGURA 5.4 – Resultado da medição de temperatura à 0,5mm da superfície em contato com o rebolo.....	79
FIGURA 5.5 – Simulação no dressador de bronze.....	82
FIGURA 5.6 – Distribuição de temperaturas: (a) Variação em - 20% de h ; (b) Variação em + 20% de h	83
FIGURA 5.7 – Distribuição de temperaturas: (a) Variação em - 20% de q_f ; (b) Variação em + 20% de q_f	84
FIGURA 5.8 – Distribuição de temperaturas: (a) Variação em - 20% de k ; (b) Variação em + 20% de k	84
FIGURA 5.9 – Geometria discretizada do dressador de latão.....	85
FIGURA 5.10 – Simulação no dressador de latão.....	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Propriedades adotadas na análise.....	71
TABELA 2 – Valores aplicados à simulação.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al_2O_3 - Óxido de Aluminio

SiC - Carboneto de Silicio

CBN - Nitreto de Boro Cúbico

ECDD - Electrocontact Discharge Dressing

CNC - Comando Numérico Computadorizado

ELID - Electrolytic In-Process Dressing

RESUMO

CAMPOS, G.P. (1999). *Estudo teórico-experimental da distribuição de calor em dressadores sinterizados contendo diamante sintético*. São Carlos, 1999. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A crescente concorrência enfrentada pelas indústrias da área metal-mecânica, tanto no mercado brasileiro como no internacional, tem demandado dos sistemas produtivos uma maior agilidade e eficiência, a fim de que as indústrias possam responder às necessidades e constantes mudanças do mercado. O objetivo deste trabalho é contribuir para melhorar a eficiência dos processos de fabricação, estudando a operação de retificação, mais especificamente a dressagem de rebolos. Surgem nestas seqüências, problemas com a ferramenta empregada para esse tipo de trabalho, os dressadores; desta forma o estudo se concentra no estudo da distribuição de temperatura em um dressador com barras de diamante com perfil de atuação constante. Ainda que o diamante seja o material mais duro conhecido pelo homem, é muito sensível à temperatura, quando na presença de oxigênio. Em temperaturas superiores a aproximadamente 600-700°C, o diamante pode sofrer uma reação química transformando-se em grafite. Neste estudo a distribuição de temperatura é modelada usando o Método de Elementos Finitos. A validação deste modelo é através da medição de temperatura, usando-se termopares localizados no dressador. Esta análise experimental é confrontada com os resultados obtidos pelo modelo do Método dos Elementos Finitos. Uma vez que o modelo tenha sido validado de acordo com os resultados experimentais, uma nova geometria e material são testados. Dentre os resultados esperados estão a possibilidade de se encontrar caminhos para melhorar a performance das ferramentas de dressagem fabricadas com diamante usando-se um modelo desenvolvido e ajustado pelo Método dos Elementos Finitos.

Palavras-chave: dressador, temperatura, diamante.

ABSTRACT

CAMPOS, G.P. (1999). *Experimental-theoretical study of the temperature distribution on diamond dressing tools for precision grinding*. São Carlos, 1999. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The growing competition faced by the manufacturing industries, not only in the Brazilian market but also at the international level, has been demanding from productive systems a larger agility and efficiency, so that the industries can answer to the needs and constant changes on the market. The objective of this work is a contribution to improve the efficiency of the production processes, studying the grinding operation, more specifically the dressing process. Many problems appears with the dressing tool, among them the temperature distribution, in tools containing diamond bars. Although the diamond is the hardest material known by the man, it is very sensitive to the temperature, when in the presence of oxygen. In high temperatures, of approximately 600-700 °C, the diamond can suffer a chemical reaction becoming graphite. In this study the temperature distribution is modeled using the Finite Element Method (FEM). The validation of this model is through the temperature measurement using thermocouples located inside the dresser during normal work. This experimental analysis is confronted with the results obtained by the FEM model. Once the model has been validated in agreement with the experimental results, a new geometry and materials are tested. Among the expected results are the possibility to improve the performance of the dressing tools manufactured with diamond bars using a developed and adjusted FEM model.

Keywords: dress, temperature, diamond.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O processo de retificação, embora bastante pesquisado nos últimos anos, é ainda de caráter empírico e, desta forma, por vezes apresenta deficiências dentro de uma seqüência de fabricação. É, em geral, o processo final na seqüência de usinagem, sendo responsável pelas dimensões e acabamento superficial da peça. Entre as diversas variáveis que contribuem para a deficiência do processo estão as variações de qualidade na fabricação de um mesmo tipo de rebolo, e o desconhecimento das condições ideais de utilização agravam este problema tornando obscura a escolha das condições para uma nova operação (BIANCHI & OLIVEIRA, 1991). A operação de retificação usa um rebolo, o qual é constituído por múltiplos grãos abrasivos, distribuídos aleatoriamente e unidos por um ligante. Os tipos de abrasivos disponíveis para a aplicação em rebolos estão divididos em duas categorias: convencionais e superabrasivos. Os abrasivos convencionais mais comuns são o Óxido de Alumínio (Al_2O_3) e o Carbetto de Silício (SiC), enquanto os superabrasivos compreendem o diamante, natural, ou sintético e o Nitreto de Boro Cúbico (CBN) (SILVA JÚNIOR & COELHO, 1997). O rebolo pode ser definido a partir de parâmetros como tipo e tamanho de grão, dureza, estrutura e liga aglomerante (OLIVEIRA, 1989). Uma das formas de se perceber quando o rebolo atinge o fim da vida, é o aparecimento de queimas superficiais na peça, o que acontece normalmente em uma operação a seco. Durante a retificação o rebolo remove pequenas partículas da peça, o que leva as arestas dos grãos abrasivos a diminuir sua capacidade de corte devido ao desgaste, assim como em outros processo de formação de cavacos (BABU et al., 1989). Isto contribui para que a eficiência do processo seja cada vez menor e para que haja uma certa inconsistência nos resultados obtidos. O tamanho, forma, e distribuição das arestas de corte, assim como as condições dos poros na superfície do rebolo desempenham um papel dominante. A

eficiência é fortemente influenciada por um bom processo de dressagem (OLIVEIRA et al., 1992).

Diversos fatores causam inconsistência no desempenho do processo de retificação; as mudanças nas características topográficas de um rebolo pelo desgaste das arestas de corte, por exemplo, pode provocar grandes variações no resultado final de uma operação de retificação. Dessa forma, a geometria e as características funcionais do rebolo devem ser restauradas periodicamente pela operação de dressagem¹. O conhecimento da influência das condições de dressagem é, portanto, uma necessidade básica para o processo de retificação. Se conhecidas suas influências, ao invés de tornar o processo inconsistente, podem ser utilizadas na otimização de operações ou, para ampliar a faixa de trabalho de um rebolo. Quando o desgaste se torna excessivo, o rebolo por sua vez deve ser dressado para restauração do perfil, concentricidade e capacidade de corte (COELHO, 1996). Diversas são as ferramentas de dressagem, sendo porém, as mais comuns o dressador ponta única de diamante e os conglomerados, na forma de lâmina (blade ou "fliese"). Este tem sofrido diversas mudanças e evolução no decorrer dos anos. Atualmente há um modelo conhecido como dressador com perfil de atuação constante, devido ao fato de empregar barras de diamante sintético de perfil quadrado em uma matriz sinterizada, em lugar das pedras de diamante natural lapidadas. Devido à constância em seu perfil, as barras de diamante oferecem a possibilidade de uma maior estabilidade do processo de dressagem, contribuindo para a melhoria da qualidade do processo de retificação. Para que o dressador fabricado com estes diamantes resista ao desgaste e tenha sua vida útil prolongada, deve-se evitar as condições de temperatura que proporcionem grafitização do diamante. Desta forma, pode-se trabalhar com uma ferramenta de perfil constante com uma vida útil que proporcione condições otimizadas de retificação.

1.1 - Objetivos

Tendo em vista a crescente demanda por dressadores sinterizados de diamante monocristalino sintético, objetiva-se com este trabalho estudar a condução

¹ Particularmente para superabrasivos, como CBN e diamante.

de calor nestas ferramentas. Será empregado, inicialmente, um dressador fabricado no laboratório de otimização de processos de fabricação (LOPF), no qual será modelada a distribuição de temperatura. Sendo assim poder-se-á observar a sua eficiência em dissipar calor, o que contribuirá para uma otimização do projeto destas ferramentas contribuindo para minimizar o desgaste, por grafitização.

Além do estudo matemático da distribuição de calor, uma modelagem com o “software” de elementos finitos ANSYS será também usada para comparação dos resultados. Este processo deverá fornecer um modelo bastante próximo da realidade, capaz de ser aplicado com precisão na determinação da distribuição de temperaturas em dressadores sinterizados com diamante monocristalino sintético.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Desgaste em Rebolos

Um dos principais aspectos que afetam o desempenho das operações de retificação é o desgaste dos rebolos. Inicialmente pode-se fazer distinção entre desgaste e perda de afiação (ou agressividade). O desgaste pode ser considerado como a quantidade de rebolo consumida durante um determinado ciclo ou operação, enquanto que a perda de afiação (ou agressividade) é atribuída à perda da capacidade de remoção de material, devido ao arredondamento das arestas cortantes, ou ao entupimento das porosidades com cavacos removidos da peça (empastamento). Tem-se então dois conceitos distintos de desgaste, o primeiro com relação à perda diametral, ou de forma do rebolo, e o segundo trata da perda da capacidade de corte da superfície de trabalho (ARONSON, 1994; OLIVEIRA et al., 1992). Um rebolo pode sofrer desgaste sem perder agressividade (e vice-versa) o que é muito comum, por exemplo, quando as forças de corte são tais que grãos desgastados são removidos, dando lugar a novos, com arestas afiadas.

HAHN apud OLIVEIRA (1989) divide o mecanismo de desgaste de um rebolo em três situações distintas e que ocorrem progressivamente: atrito, fratura e desprendimento do grão. O desgaste por atrito é análogo ao sofrido pela grafite sobre o papel. Sua conclusão foi que as forças de corte aumentam muito nestes casos. Em outros trabalhos LINDSAY apud OLIVEIRA (1989), normalmente parceiro de Hahn em suas pesquisas, trata o desgaste por atrito simplesmente como perda de afiação.

Este mesmo autor constata que em uma dada operação de retificação onde a perda de forma do rebolo é praticamente nula, com o transcorrer do tempo este logo estará “cego” devido ao arredondamento das arestas individuais dos grãos abrasivos

por desgaste devido ao atrito. No transcorrer da usinagem os grãos vão se desgastando; o rebolo vai perdendo a agressividade; a força de corte aumenta² até que os mesmos sofram desprendimento dando lugar a novas arestas afiadas. Isso se constitui no mecanismo pelo qual ocorre a fratura dos grãos abrasivos. Este seria o mecanismo ideal para algumas operações, mas freqüentemente são observados rebolos que perdem a afiação e a força de corte aumenta o suficiente para causar danos superficiais à peça mas não para fraturar os grãos desgastados.

LINDSAY apud OLIVEIRA (1989) afirma também, baseado em resultados experimentais, que, numa operação onde o desgaste do rebolo é grande, este sempre se encontra agressivo, quer seja pela remoção de grãos inteiros ou pela quebra de arestas desgastadas. Isso caracteriza o terceiro mecanismo de desgaste acima citado.

NUSSBAUM, 1988; KRAR & RATTERMAN, 1990, por outro lado, dividem os mecanismos de desgaste do rebolo em quatro categorias:

- » desgaste por atrito que é o cegamento dos grãos abrasivos e a geração de desgaste das superfícies de trabalho devido ao atrito contra a peça;
- » fraturas dos grãos que é a total destruição dos grãos abrasivos resultantes das altas tensões contraídas de impactos durante a retificação;
- » fratura da liga é a quebra da liga que sustenta os grãos, assim expulsando os grãos para fora do aglomerante;
- » erosão da liga que reduz sua força de retenção, a qual mantém os grãos abrasivos na estrutura.

Esta segunda divisão dos mecanismos de desgaste é mais completa por considerar também o enfraquecimento do ligante, aspecto muito importante quando se retifica metais muito dúcteis ou com condições de corte que favoreçam a formação de cavacos longos. Um rebolo cuja superfície de trabalho perdeu a agressividade, sem dúvida, produzirá muito calor devido ao atrito e pode levar a excessivas vibrações, as quais prejudicam a integridade superficial e a resistência mecânica do produto final. Para que o processo de retificação possa manter seu desempenho, deve-se restaurar a capacidade de corte da superfície de trabalho através da operação de dressagem. Adicionalmente, a superfície de trabalho também pode perder a forma

² Principalmente nos grãos desgastados.

devido ao desgaste desigual dos grãos, neste caso a dressagem se faz necessária para recuperar a forma e a habilidade de corte (SEN, 1991).

2.2 - Operação de Dressagem

Uma vez que a dressagem do rebolo provoca uma modificação na topografia da superfície de trabalho, e esta influi de maneira decisiva no desempenho da retificação, deve-se conhecê-la muito bem para exercer um maior controle sobre o processo (SILVA JÚNIOR & COELHO, 1997).

Segundo alguns autores, a dressagem possui dois objetivos principais:

- » A obtenção de concentricidade entre a superfície de trabalho do rebolo e o eixo de rotação, ou a restauração da forma. A operação pela qual se atinge este objetivo é comumente chamada, na literatura internacional, de “Truing” ou Perfilamento. Refere-se à geometria do rebolo e é a operação de dar forma, corrigir a concentricidade (THALMANN, 1990, STEMMER, 1992). Após o perfilamento, a superfície trabalhada poderá ficar sem agressividade, a qual deve ser restaurada antes de reiniciar o trabalho (LI, 1995, THALMANN, 1990).

- » A fratura ou remoção dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade do rebolo. Este objetivo é atingido através da operação conhecida com “Dressing” ou dressagem e refere-se à topografia da superfície de trabalho. É uma espécie de “reafiação”, que consiste em remover ou fraturar grãos arredondados e cegos (rebolo espelhado) ou limpar rebolos “carregados” com cavacos (rebolo “empastado”) (STEMMER, 1992). Destina-se também a remoção do ligante para realizar a exposição dos grãos abrasivos (SILVA JÚNIOR & COELHO, 1997).

NUSSBAUM (1988), afirma que a dressagem também objetiva remover as partículas da peça presas à superfície de trabalho do rebolo que o jato do fluido refrigerante não conseguiu (NUSSBAUM, 1988; KRAR & RATTERMAN, 1990). Este último objetivo é alcançado através de uma operação chamada “Cleaning” que pode ser entendida como a regeneração da topografia através da remoção de resíduos

que estão obstruindo os espaços vazios dentro da estrutura destinados ao cavaco durante a retificação.

A dressagem e o perfilamento são termos que às vezes são confundidos. Em algumas aplicações ambos ocorrem simultaneamente contribuindo para essa confusão, mas são operações distintas e tem funções diferentes (THALMANN, 1990). A FIGURA 2.1 mostra uma situação onde pode-se entender as diferenças existentes entre esses termos.

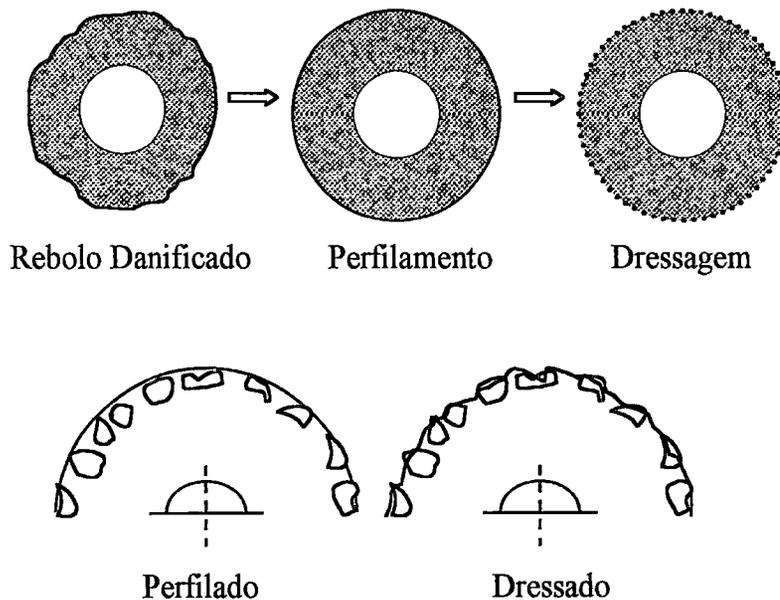


FIGURA 2.1 - Ilustração mostrando as diferenças existentes entre os termos perfilamento e dressagem: - Perfilado: após o perfilamento a superfície do reboleiro é macia e fechada; - Dressado: após dressagem a superfície do reboleiro é aberta com os grãos expostos, prontos para uma ação de retificação eficiente (KRAR & RATTERMAN, 1990).

Dressagem, como o termo é mais comumente empregado, pode ser entendida como o condicionamento da superfície do reboleiro para obter um certo comportamento na retificação. Para o caso dos rebolos de CBN de ligantes metálicos (MALKIN, 1989; KING & HAHN, 1986) é realizada pela cuidadosa erosão do material ligante, o que se faz necessário para expor grãos de CBN sem alterar a forma ou o perfil do reboleiro (NUSSBAUM, 1988; KRAR & RATTERMAN, 1990).

Normalmente, recomenda-se que a operação de dressagem seja realizada usando-se fluido refrigerante, embora possa ser feita a seco em certos casos, dependendo da operação que está sendo realizada. É recomendado, acima de tudo, que seja feita da mesma forma que se utiliza o rebolo, no processo de retificação em questão.

A operação de dressagem, assim como as condições em que é realizada, afetam a topografia da superfície do rebolo, a qual influencia fortemente a performance da ferramenta e do processo de retificação (BABU & RADHAKRISHNAN, 1989). Pode-se citar como fatores decisivos influenciando os resultados da dressagem, a especificação do rebolo e, principalmente, os diferentes parâmetros de dressagem. A dressagem influencia tanto a microgeometria³ quanto a macrogeometria⁴. O uso de dressador ponta única de diamante provoca o corte e a fratura dos grãos abrasivos. O mecanismo cinemático da operação de dressagem com dressador ponta única consiste em deslocá-lo transversalmente paralelo ao eixo do rebolo, com este em movimento de rotação. A penetração do dressador a uma determinada *profundidade de dressagem* (a_d) implica uma *largura de atuação de dressagem* (b_d). Estes parâmetros podem ser observados através da FIGURA 2.2.

³Propriedades do espaço de corte.

⁴Perfil da superfície do rebolo.

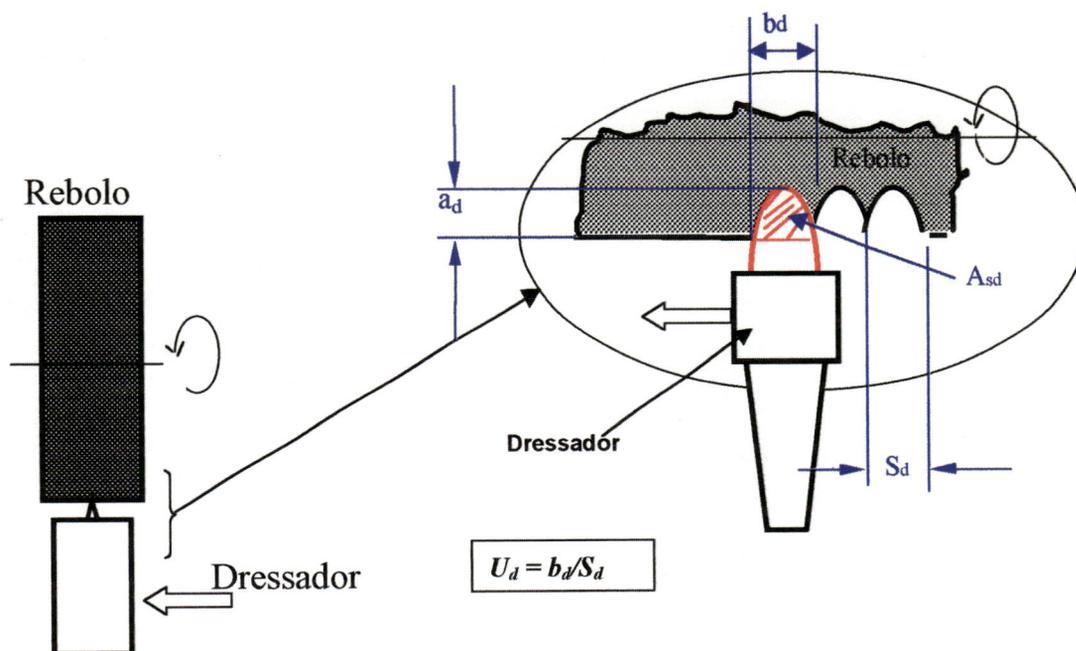


FIGURA 2.2 - Esquema mostrando os principais parâmetros de dressagem usando-se um dressador ponta única de diamante (SILVA JÚNIOR & COELHO, 1997).

Essa operação provoca o corte e a fratura dos grãos abrasivos, além de gerar uma “rosca” na superfície do rebolo por onde passa o dressador. Dessa operação surgem dois efeitos que são classificados por:

- » **Macroefeito:** a sua formação é função do formato do dressador, da profundidade de penetração e do passo de dressagem em que é realizada a operação. Este fenômeno determina a posição em que as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas na superfície do rebolo. Pode-se dizer também que o macroefeito é a rosca que o dressador faz na face do rebolo, proporcionada pela cinemática de dressagem.
- » **Microefeito:** o microefeito é formado pelo arrancamento dos grãos desgastados e fratura dos grãos que não se desgastam por completo, onde novas arestas de corte são geradas pelo dressador. A agressividade das arestas depende das condições de dressagem e da capacidade em formar novas arestas cortantes

quando os grãos são fraturado⁵. Este fenômeno está portanto relacionado ao tipo de aresta que é formada nos grãos abrasivos durante a operação de dressagem, podendo tornar o rebolo mais agressivo ou não (BIANCHI & OLIVEIRA, 1991). A restauração da agressividade da superfície de trabalho do rebolo, está diretamente ligada à capacidade de remoção de material durante a retificação.

A dressagem é essencialmente uma operação de afiação planejada para gerar uma topografia específica na superfície de trabalho do rebolo. Essa é executada num intervalo de tempo entre a retificação de duas peças consecutivas, ou pode ser realizada durante a retificação (dressagem contínua). Garante a boa qualidade dimensional do produto, alta taxa de remoção do material, e redução do custo combinada com o alto grau de eficiência. A eficiência da dressagem em restaurar a capacidade de corte do rebolo e a rapidez com que é realizada são de fundamental importância para o sucesso nas aplicações da retificação.

Uma vez dressado, o rebolo cortará mais livremente com menor força para remoção de metal. A dressagem do rebolo é também fator que influencia os resultados pretendidos, principalmente em se tratando de retificação de precisão. É muito difícil considerar o desempenho de um rebolo sem conhecer em detalhes a sua condição de dressagem (NUSSBAUM, 1998; KRAR & RATTERMAN, 1990). Por ser um elemento transformador da topografia do rebolo o procedimento de dressagem deve ser muito bem conhecido para que se possa otimizar o processo (BIANCHI & OLIVEIRA, 1991).

Uma vez que o dressador passa com uma velocidade constante pelo rebolo, se o dressador se desgasta, ocorre uma maior interferência de um passo de dressagem sobre o outro. O *grau de recobrimento de dressagem* (U_a) definido como a razão entre a *largura de atuação do dressador* (b_a) e o *passo de dressagem* (S_a), aumenta com o desgaste do dressador. Além da menor agressividade da rosca, o dressador gasto provoca uma menor agressividade do grão, pois não promove a quebra ou arrancamento deste com a mesma facilidade que um dressador novo. Essa menor agressividade do rebolo pode provocar o aumento das forças de corte e a perda mais rápida de afiação dos grãos, levando à queima superficial da peça (SILVA JÚNIOR & COELHO, 1997). Como a operação de dressagem é fundamental para o bom

⁵ Ou seja, depende da friabilidade dos grãos abrasivos.

desempenho do processo de retificação, o desgaste do dressador torna-se também de extrema importância⁶.

2.3 - Tipos de Dressadores

Diversos são os tipos de dressadores empregados, sendo em geral, fabricados com diamante, devido às severas condições de desgaste abrasivo durante a dressagem (COELHO, 1996). Os dressadores estáticos convencionais utilizam-se de ferramentas de diamantes de ponta única ou conglomeradas fixadas num suporte apropriado. Esses dressadores são diretamente usados para cortar a superfície do rebolo expondo assim novos grãos. Às vezes, este processo resulta em uma hélice uniforme de corte sobre o rebolo. Por esse motivo, as ferramentas de dressagem devem ser seguras e corretamente fixadas para evitar vibrações e a tendência a penetração excessiva no rebolo.

Essencialmente a operação de dressagem é executada após a remoção da peça da máquina. Existem, contudo, formas de dressagem contínuas, como o esmagamento da superfície de trabalho do rebolo através de um cilindro endurecido ou de um dressador rotativo impregnado de diamantes, o qual é prensado contra o rebolo girando. A ação mecânica destes dressadores às vezes produzem trincas e perda de grãos na face do rebolo mesmo assim permitindo a exposição de novos grãos. Contudo, o consumo do rebolo pode ser alto e é possível a remoção de grãos ainda em condições de corte.

A dressagem causa o desgaste do dressador e altera a geometria atuante do mesmo, influenciando as condições de dressagem o que, em última análise, afeta o mecanismo de desgaste do rebolo e o processo de retificação como um todo (BABU et al., 1989).

As ferramentas de dressagem podem ser divididas, de acordo com o seu princípio de atuação cinemática, em dois grupos: dressadores estáticos e dressadores

⁶ Neste caso o desgaste do dressador acarretará uma modificação da forma da superfície de trabalho e também uma menor agressividade resultante.

rotativos⁷ (SILVA JÚNIOR & COELHO, 1997). Neste grupo tem-se dois tipos básicos de ferramenta: as de ponta única e as conglomeradas. As de ponta única são constituídas de um corpo ou suporte onde é fixado um diamante de ponta única. Nas conglomeradas diversos diamantes são posicionados em uma liga metálica e, de acordo com a configuração diamante/liga, tem-se alguns tipos característicos (por exemplo: bastão dressador, “fliese”, etc).

		Forma de Contato entre o Dressador e o Rebolo		
		Pontual	Linha	Superfície
Dressadores Estáticos		 Dressador de Ponta Única	 $bd < bs$ Dressador Tipo Placa	 Dressador Multigranular
			 $\omega p = 0$ Disco Dressador	 $\omega p = 0$ Rolo Dressador
Dressadores Rotativos			 $\omega p > 0; vd > 0$ Disco Dressador	 $vvd > 0; vd = 0$ Eloco Dressador
				 $\omega p > 0; vd = 0$ Rolo Dressador

FIGURA 2.3 - Dressadores estáticos e rotativos.

Os dressadores rotativos apresentam, além do movimento de translação, um movimento rotativo quando em contato com o rebolo (COELHO & SILVA JÚNIOR, 1997). Os dressadores de diamante de ponta única são usados para dressar rebolos convencionais com o objetivo de arrancar alguns grãos para o surgimento de novos grãos afiados. Estas fraturas dos grãos afetarão o desgaste do dressador de diamante de duas formas: primeiro, a abrasão do diamante será rápida como resultado dos mais severos impactos, e segundo, devido a alta temperatura gerada, uma certa

⁷ Os dressadores estáticos não possuem movimentos rotativos durante a atuação.

porcentagem do diamante se perderá pela grafitização. Segundo SEN (1991), o desgaste do dressador de diamante, como qualquer outra ferramenta de corte, está diretamente relacionado a quantidade de material removido do rebolo. Esta divisão, no entanto, é muito básica e pode não ser essencial diante dos novos tipos e mecanismos de dressagem que vem sendo usados atualmente. A seguir são relacionados e descritos alguns dos tipos de dressadores mais comuns.

Cortadores metálicos (rosetas): são constituídos de arruelas dentadas ou corrugadas de aço. São geralmente usados na dressagem de rebolos em operações de desbaste, como aqueles usados em rebarbação em fundições ou na operação de retificação plana em retificadoras de eixo-árvore vertical (STEMMER, 1992).

Bastões dressadores: são prismas de abrasivos, em geral de Al_2O_3 ou SiC com ligantes de natureza vitrificada. São usados para remover o empastamento de rebolos diamantados, ou de CBN, em operações de afiação de ferramentas ou para quebrar cantos muito vivos em rebolos de retificadoras centerless.

Discos dressadores: são de material abrasivo comum usados para operações de “truíng” em rebolos de diamante ou CBN e também de rebolos para operações de desbaste. A escolha do disco é determinada pelo tipo de operação. Discos de grãos finos são usados para dressar e perfilar rebolos diamantados, discos de grão grosso são usados para rebolos de abrasivos convencionais. O disco dressador e o rolo dressador são basicamente as duas ferramentas rotativas mais comuns na indústria. O disco dressador (ou rebolo dressador) é um disco de liga metálica impregnado com diamantes, com funcionamento semelhante ao de um rebolo. Trata-se de uma ferramenta muito utilizada no perfilamento de rebolos para operações de forma, pois o seu perfil de atuação é bastante uniforme (SILVA JÚNIOR & COELHO, 1997).

Dressadores de ponta única: são formados por uma pedra de diamante natural ou sintético cuja aresta é lapidada dando-lhe a forma piramidal. São usadas para perfilar e dressar rebolos para operações de precisão, tais como retificação plana, cilíndrica, centerless e interna. Tem aumentado, porém, o uso de dressadores múltiplos do tipo “perfil de atuação constante”. Dressadores de ponta única de diamante, quando usadas em rebolos duros, largos, de grande diâmetro, desgastam-se ficando com áreas achatadas, as quais cegam o rebolo nas operações subseqüentes de dressagem. Para prevenir esta situação, usam-se múltiplas pedras de diamantes

alinhas. Este tipo de dressador é conhecido como “Fliese”. Dressadores de ponta única de diamante natural exigem:

- » Diamante suficientemente grande. Tarefas pesadas exigem diamantes maiores.
- » Giro freqüente do diamante em torno de seu eixo longitudinal para evitar a geração de superfícies achatadas.
- » Posicionamento correto do diamante, durante a dressagem
- » Deslocamento uniforme (mecânico), com avanços da ordem de 0,1mm/rev., com mínimo de pressão.
- » Passes leves, da ordem de 0,02 a 0,08 mm de profundidade, devem ser usados.
- » Refrigeração intensa, sem choques térmicos, durante a dressagem.
- » Evitar impacto do diamante contra o rebolo (STEMMER, 1992).

Roletes rotativos de diamantes e roletes diamantados: são ferramentas de formas especiais que encontram uso em muitas operações, com a vantagem de assegurarem uma forma geométrica de grande repetibilidade na superfície de trabalho do rebolo e, conseqüentemente, na peça retificada. Dressadores diamantados contendo diamantes em forma de matriz, são os tipos mais comuns encontrados no mercado (STEMMER, 1992).

Os rolos dressadores diamantados de forma são fabricados a partir de um cilindro metálico contendo o perfil desejado sobre o qual são depositados os diamantes. Pode-se ter um conjunto simples de diamantes ou uma composição do tipo de matriz de diamantes. Os rolos são rigidamente montados em suportes guiados que permitem forçá-lo contra o rebolo. O contato é feito geralmente com ambos parados, acelerando-se então, lentamente, o rebolo. A seguir, o rolo é avançado e forçado contra o rebolo, até que se tenha reproduzido o perfil completo na superfície de trabalho do mesmo. Formas muito profundas produzem considerável desgaste nos rolos. Para uma dressagem eficiente por esmagamento, a máquina deve apresentar como pré-requisitos rigidez, precisão e potência suficientes.

Rebolos com ligante vitrificado podem ser conformados por esmagamento mecânico, pela pressão contra rolos de forma adequada. A quebra das pontes de ligante expõe os grãos abrasivos, fazendo com que o rebolo atue de forma mais agressiva, mais precisa e gerando menos calor do que no caso de rebolos dressados por diamantes. Os rolos de esmagamento mecânico (crushers) são feitos de aço

rápido, metal duro ou, às vezes, até de aço macio ou ferro fundido⁸. A forma periférica é produzida por usinagem, sendo abertas ainda ranhuras longitudinais.

A melhor técnica de dressagem depende muito do tipo de rebolo e do tipo de processo envolvido. Na maioria dos casos, no entanto, os objetivos são aqueles descritos acima (THALMANN, 1990).

Devido à grande dureza dos abrasivos de CBN, as ferramentas de dressagem de diamantes rotativos com maior volume de diamantes são as mais indicadas para esta aplicação. Às vezes, dressagem de rebolos superabrasivos é somente possível com o uso de ferramentas de diamantes de altos custos (WESTKÄMPER, 1995).

Os rolos dressadores de diamante (rollers) de perfil são geralmente usados para dressar rebolos com perfis mais complicados na indústria e tem uma baixa flexibilidade de emprego. A dressagem com rolo de diamante, para um tipo de peça com contorno específico é caracterizada pelo pouco tempo gasto de dressagem e o alto nível de acuracidade, mas a ferramenta está sujeita a um considerável desgaste (WESTKÄMPER, 1995). O uso de tais tipos de dressadores pode ter custo econômico somente a partir de um certo tamanho mínimo de lote, tanto que eles são usados principalmente em séries e produção em massa, e fora isso altas forças ocorrem devido a grande área de seção transversal de corte conduzindo a erros dimensionais e de forma causados no perfil do rebolo (WESTKÄMPER, 1995).

2.4 - Novas tendências em Dressagem

Dressagem a Laser: Raios laser de alta potência podem ser utilizados para auxiliar os processos de retificação, especialmente a dressagem, e também o tratamento térmico integrado. Devido à alta intensidade de energia e à precisão de direcionamento, os raios laser constituem-se em ferramentas altamente flexíveis, isto é, de ampla aplicação. Neste sentido, a sua integração ou combinação com os processos clássicos de usinagem é de particular interesse, abrindo novas perspectivas econômicas e tecnológicas. Apesar deste avanço, devido a testes realizados por

⁸ Para aplicações pouco frequentes.

(WESTKÄMPER, 1995), com respeito à força de retificação, a rugosidade da peça e o desgaste do rebolo, não foi encontrado diferenças significantes entre um rebolo dressado pelo método do laser e um rebolo dressado convencionalmente (WESTKÄMPER, 1995).

No processo de dressagem à laser emprega-se um feixe de alta potência⁹, que se desloca com uma velocidade definida pela coordenação entre os pulsos do laser e a velocidade de avanço do feixe, de modo que toda a superfície do rebolo possa ser irradiada (FIGURA 2.4). Além disso, este processo permite que, através da determinação dos parâmetros do feixe de laser, os diversos componentes do rebolo tais como grão abrasivo, revestimento do grão e material do ligante, possam ser irradiados a fim de se obter um resultado equivalente à dressagem convencional.

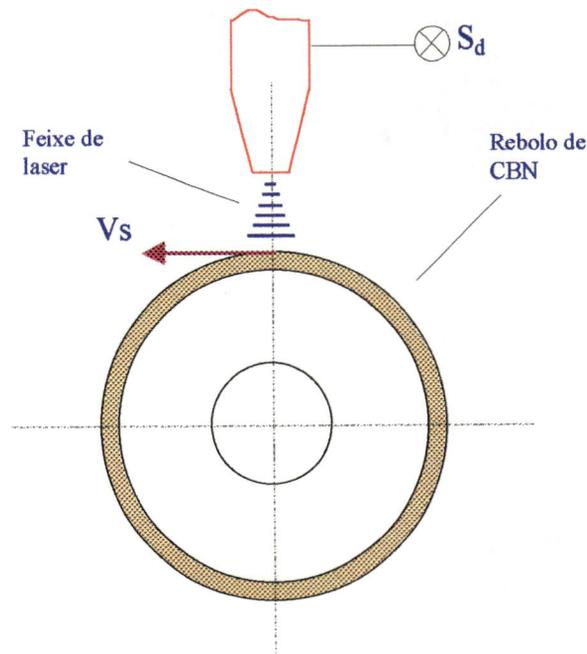


FIGURA 2.4 - Princípio da Dressagem à Laser (WESTKÄMPER, 1995).

Como o laser é uma ferramenta que não necessita de contato físico, a geometria/topografia desejada pode ser produzida na superfície do rebolo quantas vezes necessário sem interrupção da produção. Este processo não somente economiza considerável tempo e esforço, mas também garante a consistência na

⁹ O qual é posicionado perpendicularmente à superfície do rebolo girando.

performance do rebolo um bom significado da reprodução das condições de dressagem. Segundo BABU & RADHAKRISHNAN (1995), o estudo feito revelou que maior intensidade de laser não é ideal na dressagem de um rebolo para obter uma boa superfície final. A performance do rebolo dressado a laser é comparada com a do rebolo dressado com diamante. Em todos os casos as forças foram maiores no estágio inicial de retificação. Com uma retificação contínua, o rebolo dressado a laser mostrou melhores resultados sob longos períodos. Com maior intensidade o rebolo dressado a laser, em todas as direções de avanço, produziram as forças quase iguais àquelas obtidas com o rebolo dressado com diamante (BABU & RADHAKRISHNAN, 1989).

Por causa da alta densidade energética e afiação direcional do raio laser, existe uma flexibilidade com relação a essa ferramenta, isto é, uma ferramenta com propósito comum e usual (WESTKÄMPER, 1995). A dressagem a laser pode ser feita no rebolo para obter ou expor formas na extremidade de corte ou extrair localmente os grãos gastos ou também expulsar farpas de cavacos (BABU et al., 1989). A conclusão obtida segundo BABU & RADHAKRISHNAN (1994), que os resultados obtidos com o rebolo dressado a laser não podem ser diretamente comparados àquele obtidos com o rebolo dressado por diamante, por exemplo, visto que a natureza da dressagem a laser é completamente diferente da dressagem com diamante. Portanto não é possível analisar em qual houve maior ou menor desgaste (BABU & RADHAKRISHNAN, 1994). Esse tipo de método abre novas perspectivas econômicas (WESTKÄMPER, 1995). Para o preparo de rebolos superabrasivos, o uso de raio laser no perfilamento assim como na dressagem tem sido possível.

Os métodos mecânicos comumente usados não são tão eficazes para rebolos de liga metálica, e algumas aplicações de energia elétrica, ao invés de mecânica, tem sido desenvolvidas recentemente. A dressagem elétrica, por si só, não é uma tecnologia nova. Pode-se dizer que tenha-se iniciado por volta de 1960 nos Estados Unidos.

Os métodos elétricos de dressagem são divididos em dois tipos: dressagem electrolítica e dressagem por descarga elétrica (electrodischarge) (TAMAKI & KITAGAWA, 1992).

1) Dressagem por Descarga Elétrica (Electrocontact Discharge Dressing - ECDD): A dressagem por descarga elétrica convencional na usinagem já tem sido aplicada, principalmente pelos fabricantes de rebolos. A dressagem por descarga elétrica é indicada para rebolos de diamante com ligante metálico e utiliza a energia da descarga elétrica proveniente de um par de eletrodos, confeccionados em latão, os quais mantêm um leve contato com o reboło. A descarga elétrica acontece instantaneamente quando os eletrodos se separam do reboło. Neste método apenas o material do ligante do reboło é removido, não havendo corte mecânico dos grãos abrasivos¹⁰. Os eletrodos podem ser fixos ou giratórios. Um caso específico é o de um disco de grafite que é usado como um eletrodo; portanto, se o usuário quer redressar ou reformar o reboło sem separá-lo da máquina, um setup especial ou sistema CNC deve ser usado (TAMAKI & KITAGAWA, 1992).

No primeiro caso, os dois eletrodos são posicionados um na frente do outro (na seqüência) e se movem perpendicularmente à direção de deslocamento do reboło. Neste arranjo podem ser executados dois tipos de dressagem ECDD:

- a) Na primeira, o método se aplica aos rebolos do tipo copo e os eletrodos atravessam o reboło na direção da sua largura com uma pequena profundidade de corte (10 μ m);
- b) Na outra, destinada aos rebolos retos, os eletrodos são mergulhados contra a superfície do reboło com pequena penetração (10 μ m).

A FIGURA 2.5 apresenta uma visão esquemática destes dois tipos de dressagem.

¹⁰ O que permite a obtenção de uma protusão máxima de cerca de 60% do tamanho do grão.

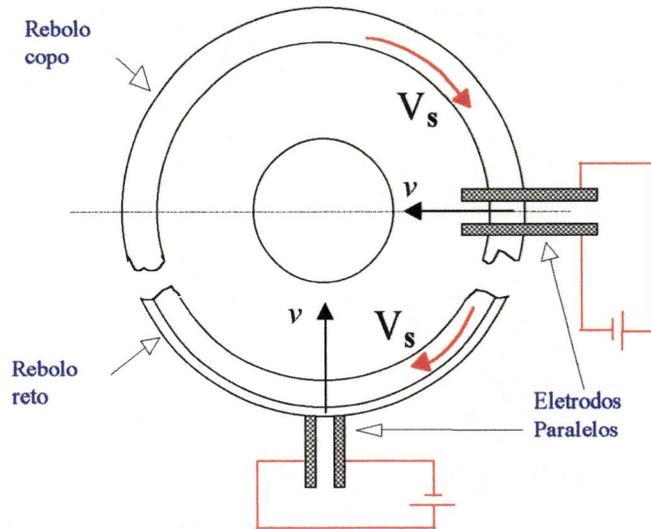


FIGURA 2.5 - Dressagem por descarga elétrica (TAMAKI et al., 1992).

No método giratório existem vários eletrodos, os quais são dispostos alternadamente na forma de um pente circular (um positivo e outro negativo) e com um espaçamento de 2 mm entre um e outro, sendo unidos por um anel. Os eletrodos giram perpendicularmente à direção de giro do rebolo, mantendo contato permanente com a camada abrasiva (TAMAKI et al., 1992). As FIGURAS 2.6 e 2.7 a seguir mostram uma visão esquemática do mecanismo de dressagem utilizando o método dos eletrodos giratórios respectivamente para os rebolos reto e do tipo copo.

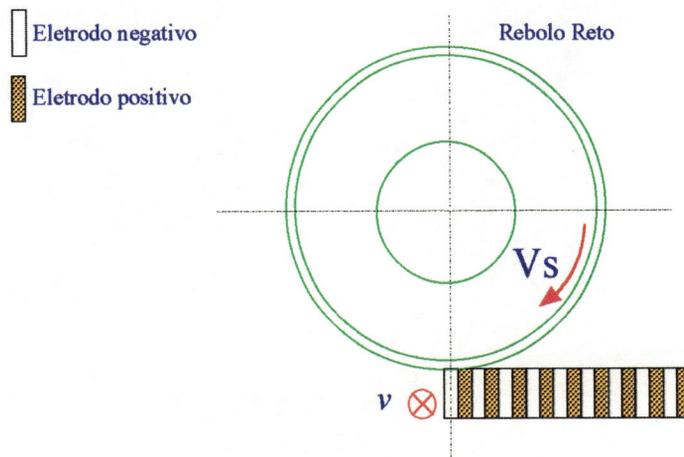


FIGURA 2.6 - Dressagem ECDD com eletrodos giratórios (rebolo reto) (TAMAKI et al., 1992).

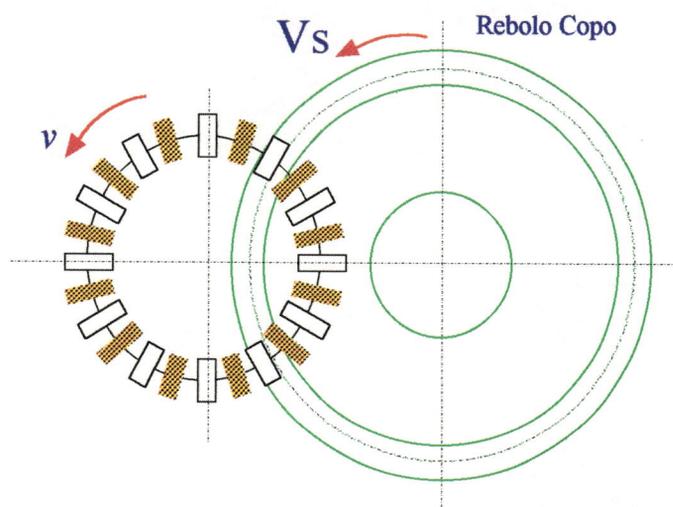


FIGURA 2.7 - Dressagem ECDD com eletrodos giratórios (rebolo copo) (TAMAKI et al., 1992).

2) Dressagem Eletrolítica (Electrolytic In-Process Dressing - ELID): ELID é uma técnica de dressagem na qual a habilidade da usinagem é mantida através da assistência da dressagem no processo electrolítico (OHMORI & NAKAGAWA, 1997), esta técnica tem sido colocada em prática desde 1989, e agora está estabelecida como uma nova técnica de retificação de ultraprecisão (OHMORI, 1992).

O rebolo atua como pólo positivo e um eletrodo fixado logo abaixo deste corresponde ao pólo negativo. A electrólise ocorre num pequeno espaço de 0,1 mm que separa os dois pólos, através do fornecimento de uma corrente eléctrica e de uma solução química (electrólito). A FIGURA 2.8 apresenta uma visão esquemática da operação de dressagem e FIGURA 2.9 mostra uma visão mais detalha do eletrodo.

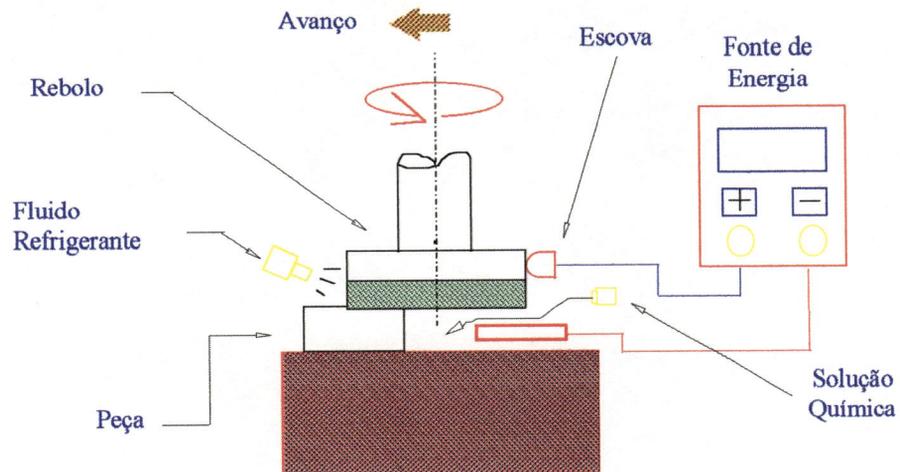


FIGURA 2.8 - Dressagem Eletrolítica (OHMORI, 1995).

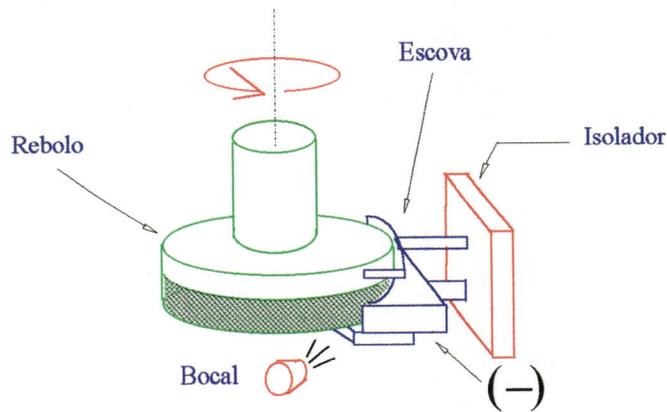


FIGURA 2.9 - Detalhe do Eletrodo (OHMORI, 1995).

Nesta técnica, a eletrólise atua especificamente na remoção do material do ligante do rebolo.

Este processo ajuda a estabilidade dos grãos salientes durante a retificação. A notável redução na força de retificação e a retificação estável é realizada pelo funcionamento da ELID após completar a retificação normal. A aplicação da ELID pode eliminar ou reduzir a necessidade dos processos de esmerilhamento ou polimento usando abrasivos livres.

Antes de começar com a operação ELID- grinding, a liga metálica de rebolos retificados usados são perfilados mecanicamente e pré-dressados electroliticamente (OHMORI, 1992). Para produzir superfícies lisas usando abrasivo de retificação

fixo, é necessário utilizar diamante fino ou grãos de CBN dentro do rebolo. Esses finos grãos do rebolo proporcionam pequenos grãos salientes e como consequência são difíceis de dresser pelos métodos convencionais e rapidamente leva ao “carregamento” ou ao “esmerilhamento” do rebolo. As rápidas mudanças na eficácia de corte do rebolo conduzem a diferenças dramáticas no nível de força de retificação de um corte para o outro daí por diante o processo rapidamente vem a ser instável.

Dressagem com Abrasivos Livres: A dressagem por abrasivos-livres aproxima-se da dressagem de rebolos de CBN com liga de resina (LI, 1995). Neste método, um rebolo de CBN com ligante resinóide é fixado num eixo que o aciona. A porção inferior do rebolo é mergulhada num reservatório contendo grãos abrasivos convencionais (Óxido de Alumínio) misturado com óleo. Uma placa de dressagem exerce pressão constante sobre a superfície do rebolo através da ação de uma mola. Quando o eixo é acionado, devido à presença do óleo, os abrasivos livres aderem à superfície do rebolo, passando sob a placa de dressagem. A função dos abrasivos livres ao percorrer a superfície do rebolo sob a ação da placa é escavar o material do ligante do rebolo, assim como o revestimento dos grãos de CBN, de maneira a expô-lo cada vez mais acima da camada de ligante. O processo continua até que a *altura média* da porção exposta (h) iguale ou ultrapasse o *diâmetro* (d) dos grãos livres. Atingida esta condição, a dressagem é finalizada. A seguir, as FIGURAS 2.10 e 2.11 apresentam uma visão esquemática do equipamento e do mecanismo da dressagem com abrasivos livres.

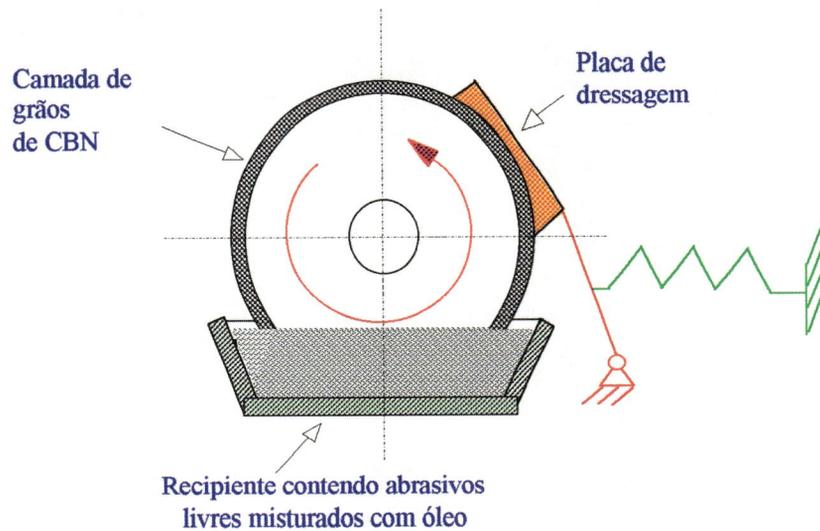


FIGURA 2.10 - Equipamento para a dressagem com abrasivos livres (LI, 1995).

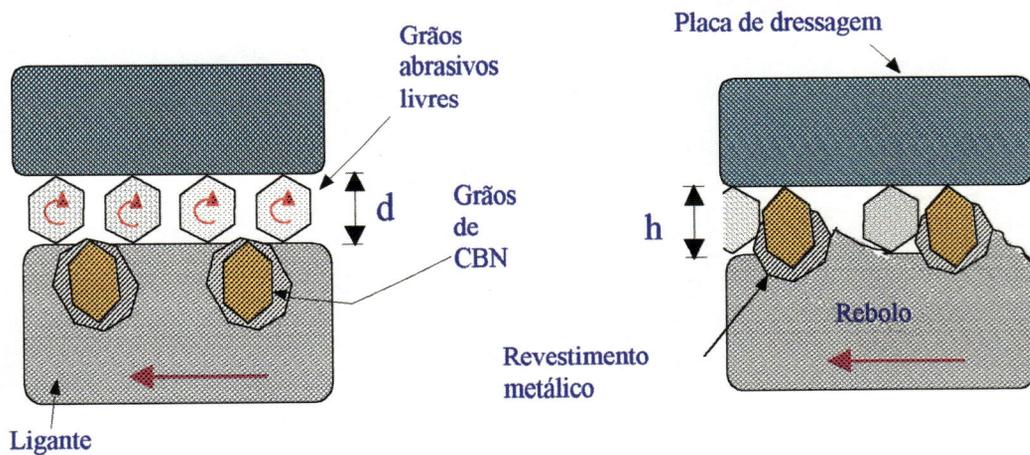


FIGURA 2.11 - Mecanismo da dressagem com abrasivos livres (LI, 1995).

Segundo LI (1995), quando o método é simples e fácil de aplicar, todos os requerimentos de dressagem listados como bons podem ser encontrados satisfatoriamente. Resultados experimentais apresentados mostraram que a topografia e performance de retificação do rebolo dressado de CBN usando este método são muito melhores comparados a outros métodos de dressagem. Um exemplo de comparação foi feita entre a dressagem por abrasivos livres e a dressagem por parada controlada. Foi observado que durante a retificação, o rebolo dressado por parada controlada gasta muito mais rápido comparado ao dressado por

abrasivos livres. Também na retificação com o rebolo dressado por parada controlada, a força constante foi acima de 30% maior se comparada ao rebolo dressado com abrasivos livres (LI, 1995).

Dressagem através de jato abrasivo: A dressagem por jato abrasivo foi recentemente desenvolvida e se aplica a rebolos diamantados de grão ultra-fino com ligante resinóide. O método utiliza um gás a alta pressão (N_2) que acelera pequenas partículas abrasivas (diâmetro de $25\mu\text{m}$) até velocidades de cerca de 100 a 200m/s. A dressagem em processo é feita pelo direcionamento uniforme deste jato sobre a superfície do rebolo, gerando um grande número de crateras ($10\mu\text{m}$ de diâmetro). A FIGURA 2.12 apresenta uma representação do aspecto da superfície do rebolo dressado por este método.

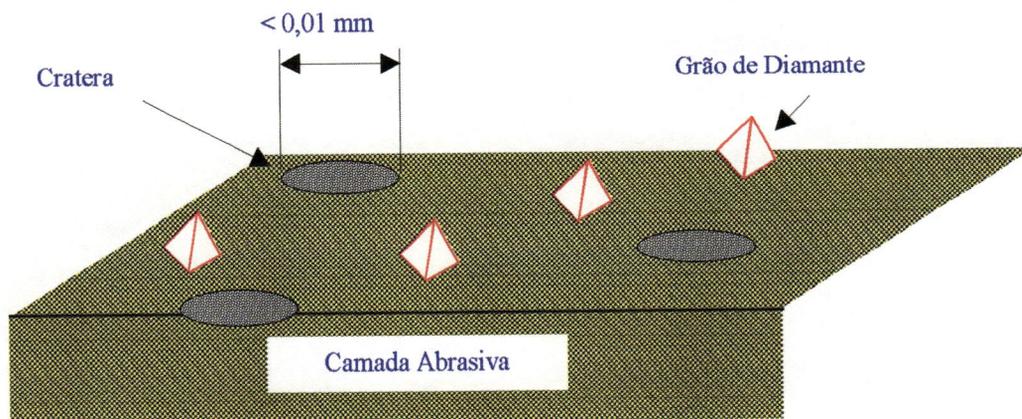


FIGURA 2.12 - Superfície do rebolo dressada pelo método do Jato Abrasivo (KURIYAGAWA et al., 1996).

Uma outra aplicação deste método é a formação de ranhuras estreitas sobre a superfície do rebolo. Essas ranhuras possuem 0,44 mm de largura por 0,3 mm de profundidade e são usinadas a intervalos iguais na superfície do rebolo utilizando o jato abrasivo (FIGURA 2.13).

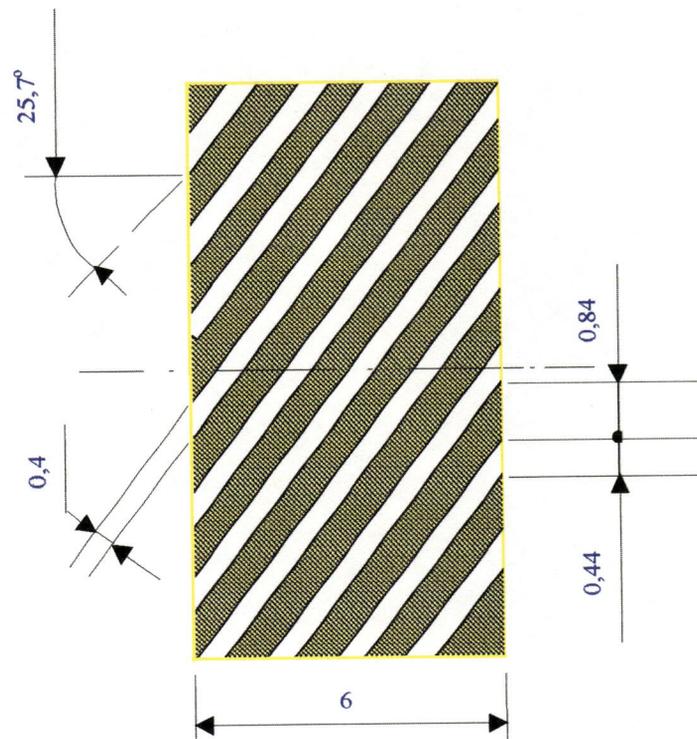


FIGURA 2.13 - Padrão do rebolo micro-ranhurado (KURIYAGAWA et al., 1996).

Ambos os processos demonstraram melhorias quanto à vida do rebolo, rugosidade superficial e estabilidade do processo na retificação de espelhamento de cerâmicas (KURIYAGAWA et al., 1996).

Dressagem Forçada: Rezaei et al.(1989) desenvolveram uma nova técnica para a dressagem de rebolos diamantados com ligante vitrificado, na qual a superfície do rebolo é submetida a uma retificação “creep feed” sobre um bloco de material cerâmico. A grande força de atrito gerada entre a superfície do rebolo e a cerâmica causa um rápido aumento do calor na área de contato. Esta combinação de altas forças e calor causa a quebra dos grãos de diamante, renovando a agressividade do rebolo.

Dressagem utilizando um Cortador de Segmentos: Um outro método desenvolvido por Rezaei et al.(1989) consiste de um cortador provido de duas séries

de cinco insertos feitos de Carboneto de Tungstênio. O cortador foi projetado para que os insertos exerçam entre si uma ação de recobrimento, de modo que a largura de corte resulte levemente superior à largura do rebolo. Os insertos possuem quatro arestas de corte, com um ângulo de saída que permite apenas uma única direção efetiva de rotação. A dressagem é executada baixando-se o rebolo diretamente sobre o cortador, com ambos girando na mesma direção e mantendo uma relação de velocidades positiva de 0,9.

Dressagem “Cooltip”: Com relação aos rebolos abrasivos convencionais, a técnica mais recente é o emprego de um dressador denominado “Cooltip”, feito de diamante natural fixado em uma matriz de aço, com um suprimento interno de refrigerante. Os primeiros testes foram realizados com rebolos de Óxido de Alumínio e apresentaram resultados promissores (SILVA JÚNIOR & COELHO, 1997).

2.4.1-Tendências em operações de dressagem

A técnica ELID possibilita menores esforços de retificação, aliada a uma alta qualidade superficial do componente usinado, podendo até mesmo substituir a lapidação e o polimento. Além disso, esta técnica permite a retificação de materiais frágeis, isto é, sem a ocorrência de fratura frágil do material.

As vantagens do processo de dressagem a laser são o princípio de trabalho livre de esforços, a ausência de poluição ambiente e a eliminação do emprego de ferramentas de condicionamento de alto custo, como os rolos de forma diamantados. Entretanto, em termos de forças de retificação, rugosidade da peça e desgaste do rebolo, não há diferenças significativas entre um rebolo de CBN dressado por laser e um outro dressado por um bloco de Al_2O_3 convencional ou por um dressador de diamante. E além disso, neste processo a concentricidade do rebolo não pode ser corrigida.

A técnica que emprega o dressador “Cooltip” é de desenvolvimento muito recente, necessitando ainda de aperfeiçoamentos e de um número maior de trabalhos para comprovar a sua aplicabilidade. Quanto ao método que emprega o jato abrasivo,

KURIYAGAWA et al. (1996) obteve melhorias em termos de vida do rebolo, rugosidade superficial e estabilidade do processo.

O rebolo dressado pelo método ECDD (Descarga Elétrica) apresenta na sua superfície mais espaço para o alojamento dos cavacos e também maior protusão dos grãos abrasivos do que um rebolo dressado por um bastão abrasivo convencional de SiC. Alta protusão dos grãos e espaço para os cavacos resultam em níveis mais baixos de forças de retificação. Além disso, o método dos eletrodos giratórios é superior ao dos eletrodos fixos tanto em circularidade quanto em planicidade da superfície gerada.

O método da dressagem utilizando abrasivos livres tem como principal atrativo a extrema simplicidade e facilidade de aplicação, fornecendo bons resultados em termos de rugosidade superficial da peça usinada, forças de retificação, desgaste do rebolo dressado, avarias térmicas na superfície da peça retificada, etc.

Ambos os métodos por REZAEI et al. (1989), a saber, a dressagem forçada e a dressagem empregando um cortador de segmentos, apresentaram resultados satisfatórios em termos de renovação e manutenção da agressividade do rebolo e diminuição da força de retificação. Entretanto, em termos de rugosidade superficial obtida, apenas o método da dressagem forçada mostrou resultados satisfatórios, enquanto o cortador, devido a danos sofridos nos seus segmentos durante o processo de dressagem, apresentou um resultado bem inferior. A principal vantagem do cortador é a facilidade de substituição dos insertos, os quais são relativamente baratos.

De acordo com SILVA JÚNIOR & COELHO (1997), devido à relativa complexidade do processo de retificação, provocada pelo elevado número de parâmetros que atuam simultaneamente, existem processos de dressagem que podem ser mais adequados do que aqueles que atualmente são comumente empregados, tanto na dressagem de rebolos convencionais quanto de superabrasivos.

A grafitização do diamante se dá à aproximadamente 700°C na presença de oxigênio. Durante a dressagem com ferramentas diamantadas a temperatura pode ultrapassar este valor em certos pontos apressando o processo de desgaste da ferramenta. A presença de certos metais, por exemplo aqueles do grupo VIII da Tabela Periódica, podem acelerar esta reação. Desta forma, surge a importância de

saber como se comporta a dissipação do calor gerado pela abrasão entre os grãos abrasivos do rebolo e o diamante do dressador. Essa dissipação está relacionada com o material do dressador, que deve ser um bom condutor de calor, e também com sua forma para que se possa otimizar a troca de calor com o fluido refrigerante. Neste caso, o objetivo mais importante numa análise de condução de calor é o de determinar o campo de temperaturas no meio, resultante das condições impostas às suas fronteiras. Uma vez conhecida esta distribuição, o fluxo de calor em qualquer ponto do meio, ou na sua superfície, pode ser calculado (COELHO, 1996).

CAPÍTULO 3 – EQUAÇÕES DE TRANSMISSÃO DE CALOR

A transmissão de calor pode ser definida como a transmissão de energia de uma região para outra, como resultado da diferença de temperatura entre elas. A literatura geralmente reconhece três modos distintos de transmissão de calor: condução, radiação e convecção. Estritamente falando, apenas condução e radiação devem ser classificados como processos de transmissão de calor, pois somente esses dois mecanismos dependem da mera existência de uma diferença de temperatura para sua atuação. O último dos três, a convecção, não concorda estritamente com a definição de transmissão de calor pois também depende, para sua operação, do transporte mecânico de massa. Mas, como convecção também efetua a transmissão de energia de regiões de maior temperatura para as de menor, o termo “transmissão de calor por convecção” tornou-se aceitável. Neste texto somente os processos de condução e convecção serão tratados (KREITH, 1973).

Condução. A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa através de um meio¹¹ ou entre meios diferentes em contato físico direto. O efeito observável da condução de calor consiste na desigualdade de temperatura. Entretanto, se diferenças de temperatura são mantidas pela adição ou remoção de calor em pontos diferentes, um fluxo contínuo de calor da região quente para a fria será estabelecido.

Convecção. A convecção é um processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. A convecção é mais importante como mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou um gás (KREITH, 1973).

Na grande maioria das análises de transmissão de calor existem dois objetivos principais. O primeiro é determinar a *distribuição de temperatura no meio*, o que,

¹¹ Sólido, líquido ou gasoso.

conduz à determinação de $T(x, y, z)$. Este objetivo é, em geral, atingido pela resolução da forma apropriada da equação da condução de calor. Nos problemas a serem tratados neste trabalho a condução será bidimensional, em regime permanente, sem geração de calor no interior do volume de controle sendo estudado e com condutividade térmica constante em todas as direções. As condições de contorno serão a convecção nas faces em que predomina a temperatura ambiente, a face em contato com o rebolo está submetida a uma temperatura T_R e no outro extremo do mesmo a temperatura será a ambiente. Estas condições simplificam a equação geral de condução de calor (3.1) na forma da equação (3.1a), sendo ambas mostradas abaixo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (3.1a)$$

onde:

T = temperatura (K);

x, y, z = coordenadas cartesianas (m);

k = condutividade térmica (W/mK);

\dot{q} = taxa de geração de energia por unidade de volume (W/m³);

ρ = densidade (kg/m³);

c_p = calor específico a pressão constante (J/kg.K);

t = tempo (s).

O segundo objetivo importante, é a determinação das componentes do fluxo

de calor¹² q_x'' e q_y'' , onde $q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}$ $q_y'' = -k \frac{\partial T}{\partial y}$

q_x'', q_y'' = fluxos de calor nas direções x e y respectivamente (W/m²).

Os métodos para resolver a equação (3.1a) incluem abordagens analíticas, diferenças finitas e elementos finitos.

O método analítico envolve a obtenção da solução matemática exata da equação (3.1a), a qual têm considerável valor, pois a variável dependente T é

¹² Que são as aplicações das equações das taxas de calor.

determinada como função contínua das variáveis independentes (x, y) . Então, a solução pode ser usada para o cálculo da temperatura em qualquer ponto do meio. Em contraste com os métodos analíticos, que proporcionam resultados exatos em qualquer ponto, o método de diferenças finitas proporciona resultados aproximados em pontos discretos. No entanto, em virtude do método das diferenças finitas poder abordar geometrias e condições de contorno complicadas, oferecem, com muita frequência, os únicos meios pelos quais os problemas da condução multidimensional podem ser resolvidos. Portanto, o método das diferenças finitas pode ser usado para se conseguir resultados razoavelmente precisos. O método de elementos finitos também pode ser aplicado a praticamente qualquer geometria e, assim como as diferenças finitas podem ser a única maneira de se encontrar a solução para determinadas geometrias e a exatidão dos resultados vai depender condições de discretização e disponibilidade de recursos computacionais.

3.1 - Método de Solução pela Separação das Variáveis

Considerando o sistema da FIGURA 3.1. Os três lados de uma chapa retangular de espessura unitária são mantidos a uma temperatura constante T_1 , enquanto o quarto lado se mantém a uma outra temperatura constante $T_2 \neq T_1$.

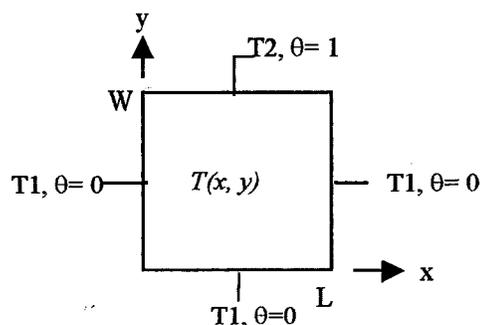


FIGURA 3.1 - Condução bidimensional numa chapa retangular.

Procura-se a distribuição de temperatura $T(x,y)$, e para simplificar a busca pela solução, introduz-se a variável θ , dada pela seguinte relação:

$$\theta \equiv \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \tag{3.2}$$

θ = diferença de temperatura (K);

T_1, T_2 = temperaturas constantes com $T_1 \neq T_2$ (K).

substituindo (3.2) em (3.1a), a equação diferencial transformada é

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \quad (3.3)$$

Uma vez que esta equação é de segunda ordem em x e em y , são necessárias duas condições de contorno para cada uma das coordenadas. São elas:

$$\begin{aligned} \theta(0, y) = 0 & \quad e \quad \theta(x, 0) = 0 \\ \theta(L, y) = 0 & \quad e \quad \theta(x, W) = 1, \text{ onde:} \end{aligned}$$

L, W = comprimento característico (m).

Pode-se observar que, pela transformação da equação (3.2), três das quatro condições de contorno são homogêneas e o valor de θ está limitado ao intervalo 0 -1.

Agora aplicando a técnica da separação das variáveis e admitindo que a solução desejada possa exprimir-se como o produto de duas funções, uma dependente apenas de x e outra dependente apenas de y . Isto é, admite-se a existência de uma solução da forma:

$$\theta(x, y) = X(x) \cdot Y(y) \quad (3.4)$$

onde: X, Y = funções da separação de variáveis.

Levando-se esse resultado para a equação (3.3) e fazendo-se a divisão por $X \cdot Y$, obtém-se

$$-\frac{1}{x} \frac{d^2 X}{dx^2} = \frac{1}{y} \frac{d^2 Y}{dy^2} \quad (3.5)$$

e é evidente que a equação diferencial é, na realidade, separável. Isto é, o primeiro membro da equação depende somente da variável x e o segundo membro depende somente de y . Então, a igualdade só pode valer¹³ se os dois membros forem iguais a uma mesma constante. Identificando essa constante, ainda desconhecida, a constante de separação, por λ^2 , teremos, então:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \lambda^2 X = 0 \quad (3.6)$$

¹³ Para qualquer x e qualquer y .

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} - \lambda^2 Y = 0 \quad (3.7)$$

onde: $\lambda^2 =$ constante de separação.

e a equação diferencial parcial foi reduzida a duas equações diferenciais ordinárias. Observa-se que a identificação da constante λ^2 como constante positiva não foi arbitrária. Se fosse escolhido um valor negativo, ou o valor $\lambda^2 = 0$, pode-se demonstrar que não seria possível encontrar uma solução satisfazendo as condições de contorno prescritas.

As soluções gerais das equações (3.6) e (3.7) são, respectivamente,

$$\begin{aligned} X &= C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x \\ Y &= C_3 e^{-\lambda y} + C_4 e^{+\lambda y} \end{aligned} \quad , \text{ onde}$$

$C_1, C_2, C_3, C_4 =$ constantes.

Utilizando CASSAGO JÚNIOR & LADEIRA (1995), a forma geral da solução bidimensional é:

$$\theta = (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x)(C_3 e^{-\lambda y} + C_4 e^{+\lambda y}) \quad (3.8)$$

com a condição de contorno $\theta(0, y) = 0$, torna-se evidente que $C_1 = 0$. Além disso, pela condição $\theta(x, 0) = 0$, obtém-se

$$C_2 \sin \lambda x (C_3 + C_4) = 0$$

que só pode ser satisfeita se $C_3 = -C_4$. Embora esta condição também pudesse ser satisfeita com $C_2 = 0$, esta igualdade eliminaria totalmente a dependência em x e proporcionaria uma solução inaceitável. Agora, com a condição $\theta(L, y) = 0$, obtém-se:

$$C_2 C_4 \sin \lambda L (e^{\lambda y} - e^{-\lambda y}) = 0$$

a única maneira dessa condição ser satisfeita¹⁴ é fazer λ assumir valores discretos para os quais $\sin \lambda L = 0$. Estes valores devem então ter a forma:

$$\lambda = \frac{n\pi}{L} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.9)$$

onde se exclui o valor $n = 0$ por proporcionar uma solução inaceitável. A solução desejada pode agora ser expressa como:

¹⁴ E continuar a ser uma solução aceitável.

$$\theta = C_2 C_4 \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} \left(e^{ny/L} - e^{-ny/L} \right) \quad (3.10)$$

Combinando-se as constantes e levando em conta que a nova constante pode depender de n , obtém-se:

$$\theta(x, y) = C_n \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} \operatorname{senh} \frac{n\pi y}{L}$$

onde usa-se também a igualdade $\left(e^{ny/L} - e^{-ny/L} \right) = 2 \operatorname{senh}(n\pi y/L)$. Sob essa forma, pôde-se chegar, na realidade, a um número infinito de soluções que satisfazem a equação diferencial inicial e as condições de contorno. No entanto, uma vez que o problema é linear, uma solução mais geral pode ser obtida por uma superposição com a forma:

$$\theta(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} \operatorname{senh} \frac{n\pi y}{L} \quad (3.11)$$

Para determinar-se C_n aplica-se agora a condição de contorno remanescente, que tem a forma:

$$\theta(x, W) = 1 = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} \operatorname{senh} \frac{n\pi W}{L} \quad (3.12)$$

Embora a equação (3.12) pareça ser uma relação muito complicada, para a determinação de C_n , há um método padrão para conseguir esta determinação. Envolve a expansão em série, em termos de funções ortogonais. Um conjunto infinito de funções $g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x), \dots$ é ortogonal, no domínio $a \leq x \leq b$, se

$$\int_a^b g_m(x) g_n(x) dx = 0 \quad m \neq n \quad (3.13)$$

g = funções ortogonais;

m, n = constantes com $m \neq n$;

a, b = limites de integração.

Muitas funções são ortogonais, e entre elas as funções trigonométricas $\operatorname{sen} n\pi x/L$ e $\operatorname{cos} n\pi x/L$, com $0 \leq x \leq L$. A utilidade destas funções está no fato de que qualquer função $f(x)$ pode ser expressa em termos de uma série infinita de funções ortogonais:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n g_n(x) \quad (3.14)$$

f = função;

A_n = coeficientes de multiplicação.

A forma dos coeficientes A_n nesta série pode ser determinada pela multiplicação de cada membro da equação por $g_n(x)$ e pela integração entre os limites a e b .

$$\int_a^b f(x)g_n(x)dx = \int_a^b g_n(x) \sum_{n=1}^{\infty} A_n g_n(x) dx \quad (3.15)$$

No entanto, pela equação (3.13), é evidente que todos os termos do segundo membro da equação (3.15), exceto um, devem ser nulos, o que deixa a equação na seguinte forma:

$$\int_a^b f(x)g_n(x)dx = A_n \int_a^b g_n^2(x)dx$$

Então,

$$A_n = \frac{\int_a^b f(x)g_n(x)dx}{\int_a^b g_n^2(x)dx} \quad (3.16)$$

As propriedades das funções ortogonais podem ser usadas para resolver a equação (3.12) em C_n , mediante a expansão em uma série infinita análoga às anteriores, apropriada à função $f(x)$. Pela equação (3.12), pode-se observar que $f(x) = 1$ e a função ortogonal $g_n(x) = \text{sen } n\pi x/L$. Fazendo-se a substituição na equação (3.16), chega-se a:

$$A_n = \frac{\int_0^L \text{sen} \frac{n\pi x}{L} dx}{\int_0^L \text{sen}^2 \frac{n\pi x}{L} dx} = \frac{2(-1)^{n+1} + 1}{\pi n}$$

Então, pela equação (3.14), tem-se:

$$1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{n+1} + 1}{\pi n} \text{sen} \frac{n\pi x}{L} \quad (3.17)$$

que é a expansão da unidade numa série de Fourier. Comparando as equações (3.12) e (3.17), obtém-se:

$$C_n = \frac{2[(-1)^{n+1} + 1]}{n\pi \text{senh}(n\pi W/L)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.18)$$

levando a equação (3.18) na equação (3.11), finalmente chega-se à solução final para a distribuição de temperatura em uma chapa de espessura constante com as condições de contorno declaradas acima:

$$\theta(x,y) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} + 1}{n} \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} \frac{\operatorname{senh}(n\pi y/L)}{\operatorname{senh}(n\pi W/L)} \quad (3.19)$$

A equação (3.19) é uma série convergente de onde o valor de θ pode ser calculado para qualquer (x, y) . A temperatura T correspondente a um valor de θ pode ser obtida pela equação (3.2).

3.1.1 - Resolução pelo Método Analítico Aplicado a Dressadores

Será obtida uma solução analítica para um caso específico em dressadores. As 4 superfícies em contato com T_{∞} contém troca de calor por convecção (condição de contorno), a condução de calor no dressador é unidimensional.

Uma das faces do dressador estará ligada com uma temperatura de $T(0)=T_R$, onde T_R é a temperatura do rebolo que será dressado, e sua temperatura no outro extremo será T_{∞} . Neste tipo de estudo usa-se constantes e áreas, por exemplo A_c é uma constante e $A_s = P \cdot x$ é a área superficial medida da base até x e P é o perímetro do dressador. Assim, com $dA_c/dx = 0$ e $dA_s/dx = P$, tem-se :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_c} (T - T_{\infty}) = 0 \quad (3.20)$$

h = coeficiente de transferência convectiva de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$);

P = perímetro (m);

A_c = área da seção reta (m^2);

T_L = temperatura considerada ambiente.

Para simplificar a forma desta equação passa-se da variável dependente para a variável θ , excesso de temperatura, definida por:

$$\theta(x) \equiv T(x) - T_{\infty} \quad (3.21)$$

Um esquema simples pode ser visto na FIGURA 3.2:

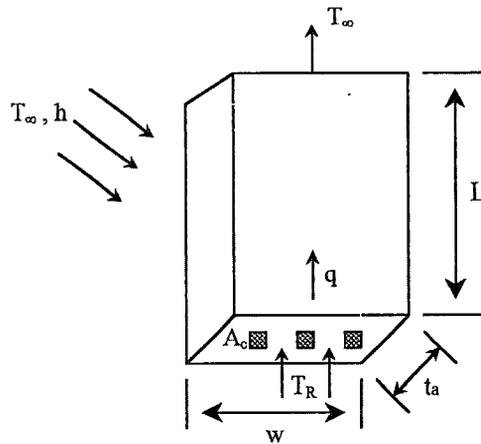


FIGURA 3.2 - Esquema do comportamento da temperatura em um dressador.

$$P = 2w + 2t_a$$

$$A_c = w \cdot t_a$$

w = comprimento característico (m);

t_a = altura do dressador (m).

onde, uma vez que T_∞ é constante, $d\theta/dx = dT/dx$. Da equação (3.21) para a equação (3.20), obtém-se:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad (3.22)$$

onde

$$m^2 \equiv \frac{hP}{kA_c} \quad (3.23)$$

A equação (3.22) é uma equação diferencial de segunda ordem, homogênea, com os coeficientes constantes. A sua solução geral tem a forma:

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (3.24)$$

Para calcular as constantes C_1 e C_2 da equação (3.24), enuncia-se uma condição de contorno apropriada, com relação a temperatura na base do dressador ($x=0$), temos:

$$\theta(0) = T_R - T_\infty \equiv \theta_b \quad (3.25)$$

T_R = temperatura de contato com o rebolo (K);

θ_b = diferença de temperatura (K).

Neste caso, considerando a condição na ponta do dressador como $x = L$, e em particular, quando $\theta(L) \rightarrow \theta_L$ (constante), obtém-se:

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{(\theta_L/\theta_b)\sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL} \quad (3.26)$$

e

$$q_f = \sqrt{hPkA_c}\theta_b \frac{\cosh mL - \theta_L/\theta_b}{\sinh mL} \quad (3.27)$$

onde:

$\theta_L =$ constante;

$L =$ comprimento do dressador (m);

$q_f =$ taxa de transferência de calor no dressador (W).

Assim, a distribuição de temperatura será obtida de acordo com a equação

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{(\theta_L/\theta_b)\sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL}, \text{ onde } m \equiv \sqrt{hP/kA_c}.$$

3.2 - Método de Solução pelas Equações de Diferenças Finitas.

As soluções obtidas através do método analítico foram conseguidas para um conjunto de geometrias e condições de contorno simples. No entanto, os problemas de condução bidimensional envolvem, freqüentemente, geometrias e/ou condições de contorno, que impedem a adoção dessas soluções. Nesses casos, a melhor escolha é a que usa técnicas numéricas.

3.2.1 - Estabelecimento da Rede Nodal.

Em contraste com uma solução analítica, a qual permite a determinação de temperatura em qualquer ponto que se queira no meio, uma solução por diferenças finitas só permite a determinação da temperatura em pontos discretos. A primeira etapa de qualquer análise é, então, a da escolha desses pontos. Isto se faz, conforme a FIGURA 3.3, pela subdivisão do meio estudado em pequenas regiões, atribuindo-se a cada uma delas um ponto de referência no seu centro. As hipóteses assumidas

anteriormente para a solução analítica também valem para este caso a ser analisado por diferenças finitas.

O ponto de referência é denominado, muitas vezes, ponto nodal (ou simplesmente nó) e o conjunto desses pontos é uma rede nodal. Os nós são identificados por um sistema de numeração que, num sistema bidimensional, pode assumir a forma que está na FIGURA 3.3(a). As localizações em x e em y são identificadas pelos índices m e n , respectivamente.

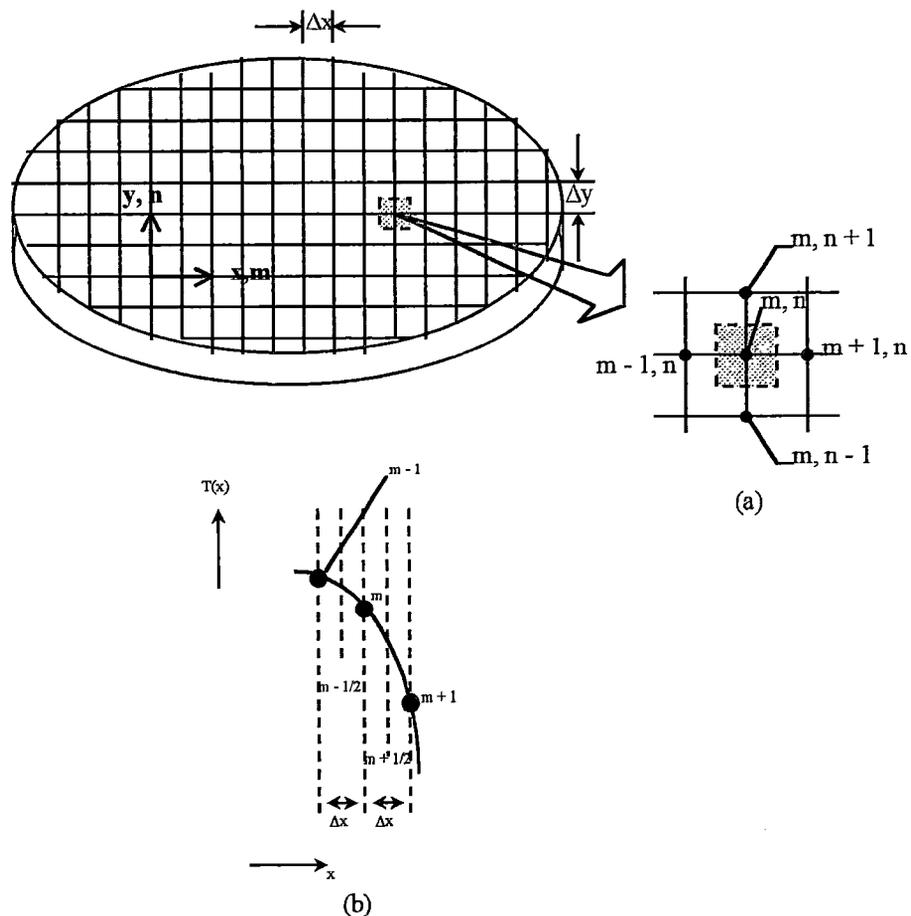


FIGURA 3.3 - Condução bidimensional. (a) Rede nodal. (b) Aproximação em diferenças finitas. (INCROPERA, 1992)

É importante observar que cada nó representa uma certa região e a sua temperatura é uma medida da temperatura média da região. Por exemplo, a temperatura no nó m, n , FIGURA 3.3(a), pode ser considerada a temperatura média da área vizinha que aparece hachurada. Além disso, a escolha dos nós é raramente

arbitrária e depende muitas vezes de questões como a conveniência geométrica e a exatidão desejada. A exatidão numérica dos cálculos feitos depende fortemente do número de nós identificados. Se esse número for pequeno (rede de malhas grosseira), como é o caso quando os cálculos são feitos manualmente, a exatidão será limitada. No entanto, com um computador, pode-se escolher um número elevado de pontos (rede de malha fina) e a exatidão atingida será muito melhorada.

3.2.2 - Equação da Condução do Calor em Diferenças Finitas.

A determinação numérica da distribuição de temperatura impõe uma equação de condução de calor apropriada para cada um dos nós de temperatura desconhecida. O conjunto de equações resultante pode, então, ser resolvido simultaneamente na temperatura de cada nó. Para qualquer nó interior de um sistema bidimensional, sem geração de calor e com a condutividade térmica uniforme e constante, vale a forma da condução do calor dada pela equação (3.1a). No entanto, se o sistema for caracterizado em termos de uma rede nodal, é necessário trabalhar com uma forma aproximada em diferenças finitas.

Uma equação em diferenças finitas, apropriada para os nós interiores de um sistema bidimensional, pode ser deduzida diretamente da equação (3.1a). Considere-se a derivada segunda $\partial^2 T / \partial x^2$. Pela FIGURA 3.3(b), o valor no nó m, n pode ser aproximado por:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{\partial T / \partial x \Big|_{m+1/2,n} - \partial T / \partial x \Big|_{m-1/2,n}}{\Delta x} \quad (3.28)$$

Δx = variação do comprimento em x .

m, n = índices de identificação dos nós.

Os gradientes de temperatura podem ser expressos, por sua vez, em função das temperaturas dos nós. Isto é:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+1/2,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-1/2,n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad (3.30)$$

Substituindo as equações (3.29) e (3.30) em (3.28), obtém-se:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (3.31)$$

De maneira semelhante, pode-se mostrar que:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Big|_{m,n} &\approx \frac{\partial T / \partial y \Big|_{m,n+\frac{1}{2}} - \partial T / \partial y \Big|_{m,n-\frac{1}{2}}}{\Delta y} \\ &\approx \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Δy = variação do comprimento em y .

Em uma rede em que $\Delta x = \Delta y$, a substituição das equações (3.31) e (3.32) na equação (3.1a), leva a:

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 4T_{m,n} = 0 \quad (3.33)$$

Então, para o nó m, n , a equação da condução de calor, que é uma equação diferencial exata, reduz-se a uma equação algébrica aproximada. Esta forma aproximada pode ser aplicada a qualquer nó interior que seja equidistante dos seus quatro nós vizinhos. Ela exige, simplesmente, que a soma das temperaturas associadas aos nós vizinhos seja quatro vezes a temperatura do nó considerado.

3.2.3 - Tratamento das condições de contorno

A equação em diferenças finitas para um nó também pode ser deduzida pela aplicação da conservação de energia ao volume de controle em torno da região nodal. Uma vez que a direção real do fluxo de calor¹⁵ é muitas vezes desconhecida, é conveniente formular o balanço de energia admitindo que todos os fluxos de calor são dirigidos para dentro do nó. Esta condição, como é natural, é impossível, mas, se as equações das taxas forem expressas, de maneira coerente, com essa hipótese, consegue-se a forma correta da equação de diferenças finitas. Nas condições de

¹⁵ Para dentro ou para fora do nó.

regime permanente, com a geração de calor, a forma apropriada da equação de conservação de energia é então:

$$\dot{E}_{af} + \dot{E}_g = 0 \quad (3.34)$$

onde:

\dot{E}_{af} = taxa de afluência de energia num volume de controle (W);

\dot{E}_g = taxa de geração de energia num volume de controle (W).

Consideremos a aplicação da equação acima a um volume de controle em torno do nó interior m, n da FIGURA 3.4.

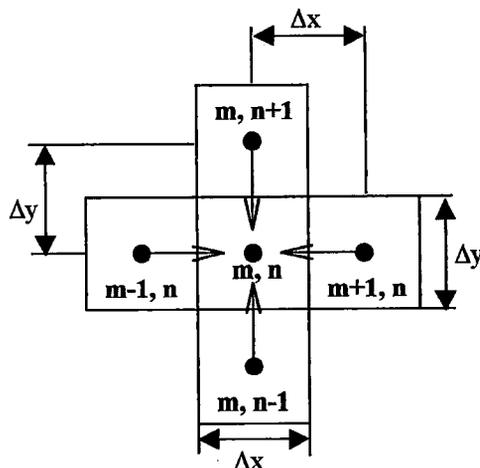


FIGURA 3.4 - Condução para um nó interno proveniente dos nós vizinhos.

Nas condições bidimensionais, a troca de energia é influenciada pela condução entre m, n e seus quatro nós adjacentes, e também pela geração. Então, a equação (3.34) se reduz a

$$\sum_{i=1}^4 q_{(i) \rightarrow (m,n)} + \dot{q}(\Delta x \cdot \Delta y \cdot 1) = 0$$

onde i se refere aos nós vizinhos, $q_{(i) \rightarrow (m,n)}$ é a taxa de condução entre os nós, e se admite uma profundidade unitária. Para estimar os termos da taxa de condução admite-se que a transferência ocorra exclusivamente através das flechas que estejam orientadas ou na direção x ou na direção y . É possível, então, usar formas

simplificadas da lei de Fourier. Por exemplo, a taxa de transferência condutiva do nó $(m-1, n)$ para o nó (m, n) pode ser expressa como:

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (3.35)$$

A grandeza $(\Delta y \cdot 1)$ é a área da transferência de calor e o termo $(T_{m-1,n} - T_{m,n})/\Delta x$ é a expressão aproximada, em diferenças finitas, do gradiente de temperatura na fronteira entre os dois nós. As outras taxas de condução podem então ser expressas como

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (3.36)$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (3.37)$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (3.38)$$

Observa-se que, ao calcular cada taxa de condução, subtrai-se a temperatura do nó (m, n) da temperatura do nó adjacente. Esta é a operação correta em face da hipótese do fluxo de calor para o nó (m, n) e está coerente com a direção das setas que aparecem na FIGURA 3.4. Levando as equações (3.35) a (3.38) para o balanço de energia e lembrando-se que $\Delta x = \Delta y$, segue-se que a equação de diferenças finitas para um nó interior, com geração de calor, é:

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + \frac{\dot{q}(\Delta x \cdot \Delta y)}{k} - 4T_{m,n} = 0 \quad (3.39)$$

Se não houver uma fonte de energia distribuída internamente ($\dot{q} = 0$), esta expressão se reduz a equação (3.33).

É importante notar que a equação de diferenças finitas é necessária em cada ponto onde a temperatura seja desconhecida. No entanto, nem sempre é possível classificar todos estes pontos como interiores e assim usar a equação (3.33) ou a (3.39). Por exemplo, a temperatura pode ser conhecida numa superfície isolada, ou numa superfície exposta a condições convectivas. Nos pontos destas superfícies, a equação de diferenças finitas deve ser obtida pela aplicação do método do balanço de energia.

Para ilustrar este método, consideremos o nó correspondente ao canto reentrante da FIGURA 3.5.

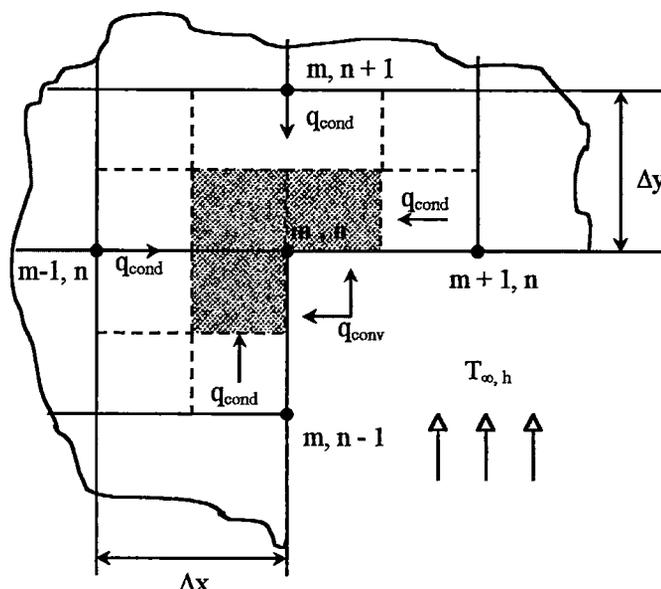


FIGURA 3.5 - Formulação da equação em diferença finitas correspondente a um canto reentrante de um sólido com convecção na superfície (INCROPERA, 1992).

Este nó representa, por hipótese, a seção dos três quadrados sombreados e troca energia convectivamente com o fluido adjacente, na temperatura T_{∞} . A condução para a região nodal (m, n) ocorrerá ao longo de quatro faixas de condução de calor q_{cond} podem ser expressas como

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y \cdot 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (3.40)$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot 1) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (3.41)$$

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k\left(\frac{\Delta y}{2} \cdot 1\right) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (3.42)$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k\left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1\right) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (3.43)$$

Observa-se que as áreas para a condução das regiões dos nós $(m-1, n)$ e $(m, n+1)$ são proporcionais a Δy e Δx , respectivamente, enquanto a condução de $(m+1, n)$ e de $(m, n-1)$ ocorre em faixas com as larguras $(\Delta y/2)$ e $(\Delta x/2)$, respectivamente.

As condições na região do nó (m, n) são também influenciadas pela troca convectiva com o fluido e esta troca pode ser encarada como ocorrendo ao longo das meias-faixas nas direções x e y . A taxa total de transferência convectiva q_{conv} pode exprimir-se como

$$q_{(\infty) \rightarrow (m,n)} = h \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot 1 \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) + h \left(\frac{\Delta y}{2} \cdot 1 \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) \quad (3.44)$$

Está implícita nesta expressão a hipótese de as superfícies expostas do canto estarem a uma temperatura uniforme correspondente à temperatura do nó $T_{m,n}$. Esta hipótese é coerente com o conceito de estar toda a região do nó caracterizada por uma só temperatura, que representa uma média da distribuição de temperatura real na região. Na ausência de efeitos transientes, ou de efeitos tridimensionais ou de geração, a conservação de energia, equação (3.34), impõe que a soma das equações (3.40) a (3.44) seja nula. Efetuando esta soma e reordenando, obtemos

$$T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + \frac{1}{2}(T_{m+1,n} + T_{m,n-1}) + \frac{h\Delta x}{k} T_{\infty} - \left(3 + \frac{h\Delta x}{k} \right) T_{m,n} = 0 \quad (3.45)$$

onde admitimos mais uma vez que $\Delta y = \Delta x$.

É útil observar que as taxas de transferência de calor entre os nós adjacentes também podem ser formuladas em termos das resistências térmicas correspondentes. Voltando, por exemplo, para a FIGURA 3.5, a taxa de transferência condutiva de calor do nó $(m-1, n)$ para o nó (m, n) pode exprimir-se por

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{R_{t,cond}} = \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{(\Delta x \cdot 1)/k\Delta y}$$

$$\text{onde } R_{t,cond} \equiv \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} \quad e \quad q_x = \frac{kA}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}), \quad \text{assim}$$

$$R_{t,cond} = \frac{L}{kA}$$

$R_{t,cond}$ = resistência térmica na condução (K/W);

$T_{s,1}$ = temperatura na superfície 1 (K);

$T_{s,2}$ = temperatura na superfície 2 (K);

A = área (m^2);

o que leva ao resultado equivalente ao da equação (3.40). Analogamente, a taxa de transferência de calor por convecção para (m, n) pode exprimir-se como

$$q_{(\infty) \rightarrow (m,n)} = \frac{T_{\infty} - T_{m,n}}{R_{t,conv}} = \frac{T_{\infty} - T_{m,n}}{\left\{ h \left[(\Delta x/2) \cdot 1 + (\Delta y/2) \cdot 1 \right] \right\}^{-1}}$$

onde $R_{t,conv} \equiv \frac{T_s - T_{\infty}}{q}$ e $q = hA(T_s - T_{\infty})$, assim

$$R_{t,conv} = \frac{1}{hA}$$

$R_{t,conv}$ = resistência térmica na convecção (K/W);

T_s = temperatura na superfície (K);

que é equivalente à equação (3.44).

Como exemplo da utilidade dos conceitos de resistência, considere-se uma interface que separa dois materiais diferentes e que se caracteriza por uma resistência térmica de contato $R''_{t,c}$ (FIGURA 3.6).

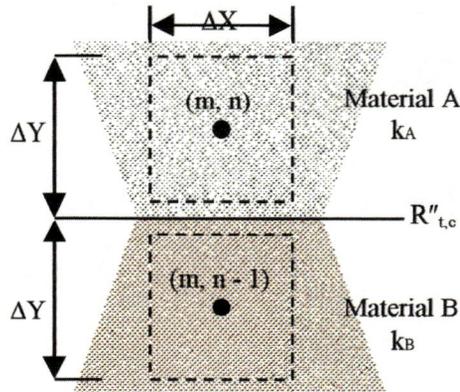


FIGURA 3.6 - Condução entre materiais diferentes, adjacentes, com uma resistência térmica de contato na interface (INCROPERA, 1992).

A taxa de transferência de calor do nó (m, n) para o nó $(m, n-1)$ pode exprimir-se como

$$q_{(m,n) \rightarrow (m,n-1)} = \frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{R_{tot}} \tag{3.46}$$

R_{tot} = resistência total (K/W).

onde, com a profundidade unitária,

$$R_{tot} = \frac{\Delta y/2}{k_A(\Delta x \cdot 1)} + \frac{R''_{t,c}}{\Delta x \cdot 1} + \frac{\Delta y/2}{k_B(\Delta x \cdot 1)} \tag{3.47}$$

onde $R_{tot} = \sum R_t$ e $R'_{t,c} = \frac{T_A - T_B}{q'_x}$ e $q'_x = \frac{q_x}{A} = \frac{k}{L}(T_{s,1} - T_{s,2})$

k_A = condutividade térmica do material A (W/mK);

k_B = condutividade térmica do material B (W/mK);

$R'_{t,c}$ = resistência térmica de contato (K/W);

R_t = resistência térmica (K/W);

T_A = temperatura do material A (K);

T_B = temperatura do material B (K);

3.2.4 - Resolução das Equações de Diferenças Finitas

Uma vez que se tenha estabelecido a rede nodal e se tenha escrito a equação de diferenças finitas de cada nó, a distribuição de temperatura pode ser determinada. O problema se reduz ao de resolver um sistema de equações algébricas lineares. Para isto são numerosos os métodos disponíveis, que se classificam em métodos diretos e métodos iterativos. Os métodos diretos envolvem um número fixo e predeterminado de operações aritméticas e são convenientes para usar quando o número de equações¹⁶ for pequeno. Estes métodos, no entanto, estão sujeitos a exigências excessivas de memória e de tempo de computador e é mais eficiente, muitas vezes, usar técnica iterativa. Embora o número necessário de operações aritméticas não possa ser predeterminado, os métodos iterativos caracterizam-se pela pequena exigência que se faz ao computador e são especialmente apropriados quando o número de equações for grande.

Neste caso vamos considerar o método da inversão de matriz e a iteração Gauss-Seidel como exemplos de métodos direto e iterativo, respectivamente.

¹⁶ Referentes as temperaturas nodais desconhecidas.

3.2.4.1 - O Método da Inversão de Matriz

Consideremos um sistema de M equações de diferenças finitas, correspondentes a M temperaturas desconhecidas. Ao se escreverem estas equações é conveniente identificar os nós por um único índice inferior inteiro, em lugar de identificá-los pelo índice inferior duplo (m, n) como até agora. O procedimento para fazer a inversão de uma matriz principia por escreverem-se as equações na forma

$$\begin{aligned} a_{11}T_1 + a_{12}T_2 + a_{13}T_3 + \dots + a_{1M}T_M &= C_1 \\ a_{21}T_1 + a_{22}T_2 + a_{23}T_3 + \dots + a_{2M}T_M &= C_2 \\ \vdots & \\ a_{M1}T_1 + a_{M2}T_2 + a_{M3}T_3 + \dots + a_{MM}T_M &= C_M \end{aligned} \tag{3.48}$$

onde as grandezas $a_{11}, a_{12}, \dots, C_1, \dots$ são coeficientes e constantes conhecidos que envolvem as grandezas $\Delta x, k, h$ e T_∞ . Com a notação matricial, estas equações podem ser expressas como

$$[A] [T] = [C] \tag{3.49}$$

onde

$$A \equiv \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \dots & a_{MM} \end{bmatrix}, T \equiv \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_M \end{bmatrix}, C \equiv \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_M \end{bmatrix}$$

A matriz dos coeficientes $[A]$ é uma matriz quadrada $(M \times M)$ e os seus elementos são identificados pela notação do duplo índice, onde o primeiro se refere à linha e o segundo à coluna. As matrizes $[T]$ e $[C]$ só tem uma coluna e são conhecidas como matriz ou vetor coluna. Nos casos típicos, são denominadas o vetor solução e o vetor do segundo membro, respectivamente. Efetuando-se a multiplicação das matrizes do primeiro membro da equação (3.49), encontram-se as equações (3.48).

O vetor solução pode, então, ser expresso como

$$[T] = [A]^{-1}[C] \tag{3.50}$$

onde $[A]^{-1}$ é a matriz inversa de $[A]$ e se define por

$$[A]^{-1} \equiv \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1M} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{M1} & b_{M2} & \cdots & b_{MM} \end{bmatrix}$$

Efetuada a operação no segundo membro da equação (3.50), segue-se que

$$\begin{aligned} T_1 &= b_{11}C_1 + b_{12}C_2 + \cdots + b_{1M}C_M \\ T_2 &= b_{21}C_1 + b_{22}C_2 + \cdots + b_{2M}C_M \\ &\vdots \\ T_M &= b_{M1}C_1 + b_{M2}C_2 + \cdots + b_{MM}C_M \end{aligned} \tag{3.51}$$

e o problema se reduz à determinação de $[A]^{-1}$. Isto é, se $[A]$ for invertida, os seus elementos b_{11}, b_{12}, \dots serão determinados e as temperaturas desconhecidas podem ser calculadas a partir das expressões anteriores.

3.2.4.2 - Iteração de Gauss-Seidel

O método de Gauss-Seidel é uma técnica iterativa poderosa e muito popular. A aplicação dessa técnica ao sistema de equações representado pela equação (3.48) é facilitada pelo seguinte procedimento.

1. Na medida do possível, as equações devem ser reordenadas de modo que os elementos da diagonal principal tenham módulos maiores que os de outros elementos na mesma linha. Isto é, a seqüência de equações desejável deve proporcionar $|a_{11}| > |a_{12}|, |a_{13}|, \dots, |a_{1N}|; |a_{22}| > |a_{21}|, |a_{23}|, \dots, |a_{2N}|$; e assim sucessivamente.
2. Depois de se reordenar cada uma das M equações, elas se escrevem de forma explícita na temperatura associada ao seu elemento diagonal. Cada temperatura no vetor solução terá então a forma

$$T_i^{(k)} = \frac{C_i}{a_{ii}} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{a_{ij}}{a_{ii}} T_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^N \frac{a_{ij}}{a_{ii}} T_j^{(k-1)} \tag{3.52}$$

onde $i = 1, 2, \dots, M$. O índice superior k refere-se à etapa da iteração.

3. Para cada temperatura T_i admite-se um valor inicial ($k = 0$). Os cálculos posteriores reduzem-se bastante mediante uma escolha inicial baseada em estimativas razoáveis.

4. Calculam-se então novos valores de T_i pela substituição dos valores admitidos inicialmente ($k = 0$), ou de novos valores de T_j ($k = 1$), no segundo membro da equação (3.52). Esta etapa é a primeira iteração ($k = 1$).
5. Mediante a equação (3.52), o procedimento de iteração continua pelo cálculo dos novos valores de $T_i^{(k)}$ da iteração em curso, onde $1 \leq j \leq i-1$ e dos valores $T_j^{(k-1)}$ da iteração anterior, onde $i + 1 \leq j \leq M$.
6. A iteração termina quando satisfaz a um critério de convergência previamente aceito. O critério pode exprimir-se como

$$\left| T_i^{(k)} - T_i^{(k-1)} \right| \leq \varepsilon \quad (3.53)$$

onde ε representa a incerteza aceitável na temperatura.

3.3 - O Método de Elementos Finitos

Para prever o desempenho de componentes mecânicos, o projetista dispõe hoje de uma série de ferramentas matemáticas que podem ser aplicadas. Soluções analíticas podem ser usadas em certos casos, mas sua aplicação é limitada a situações específicas onde uma solução matemática da estrutura pode ser encontrada. Uma maneira mais abrangente de tratar problemas estruturais consiste no uso de métodos numéricos de análise. Apesar de tais métodos fornecerem soluções aproximadas, em muitos casos, esta é a única maneira que os projetistas dispõem para encontrar as respostas que procuram.

O Método dos Elementos Finitos considera a região de solução do problema formada por pequenos elementos interconectados entre si. A região em estudo é analiticamente modelada ou aproximada por um conjunto de elementos discretos pré-definidos. Uma vez que estes elementos possam ser colocados juntos em um número incontável de diferentes configurações, tem-se formas geométricas bastante complexas modeladas. Além disso, possibilita que o projetista tenha bastante flexibilidade na aplicação de cargas e condições de contorno, o que torna este método o mais amplamente utilizado em análises estruturais nos dias de hoje.

O Método dos Elementos Finitos é aplicável a uma grande faixa de problemas de valores de contorno em engenharia. Em um problema de valor de contorno, uma



solução é procurada na região do corpo (domínio), enquanto nos contornos desta região os valores das variáveis dependentes (ou suas derivadas) são conhecidos.

De acordo com HUEBNER (1994) o método pode ser sumarizado basicamente em 3 etapas: pré-processamento, solução (*solver*) e pós-processamento.

Pré-Processamento

É a etapa de preparação do problema para posteriormente solucioná-lo. É nesta fase que se faz a modelagem do fenômeno, assumindo hipóteses, condições iniciais, condições de contorno e carregamentos, assim como a escolha do elemento, das propriedades dos materiais e da geometria que representará a forma do componente a ser analisado. A seguir são descritas 2 subetapas importantes para o pré-processamento:

- ◆ *Discretização do contínuo* - o contínuo é o corpo físico mostrado na FIGURA 3.7, estrutura ou sólido sendo analisado. A discretização visualizada na FIGURA 3.8 pode ser simplesmente descrita como o processo no qual o domínio é subdividido em um sistema equivalente de elementos finitos, os quais podem ser por exemplo triângulos ou quadriláteros para problemas em duas dimensões ou tetraedros e hexaedros em três dimensões. Estes elementos possuem os chamados nós que podem ser internos ou externos, ou seja, pertencem ao interior do elemento ou estão localizados nas arestas do mesmo. Embora venha se tentando automatizar o processo de subdivisão do domínio, este processo permanece dependendo essencialmente do julgamento e experiência do engenheiro;

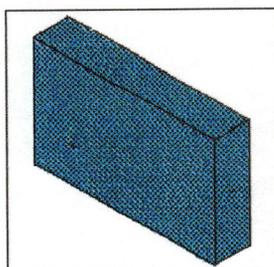


FIGURA 3.7 - O contínuo

- ◆ *Seleção das funções de interpolação* - as funções de interpolação ou deslocamento assumidas representam apenas aproximadamente a distribuição exata ou real dos deslocamentos. Geralmente, a forma adotada para as funções de interpolação é a polinomial, pela simplicidade de manipulação matemática. Existem três fatores inter-relacionados que influenciam a seleção da função de interpolação: escolha do tipo e do grau da função¹⁷, o tipo das variáveis de campo que descrevem o modelo¹⁸ e finalmente, o modelo deve satisfazer certos requisitos que garantam que o resultado numérico se aproxime da solução correta;

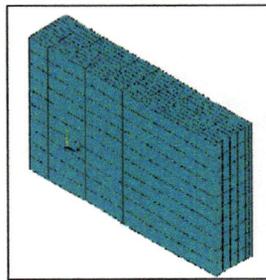


FIGURA 3.8 - O contínuo discretizado por inúmeros elementos

Solução (solver)

A solução do problema tem como ponto de partida o modelo configurado na etapa anterior. Portanto, a acuracidade das respostas depende basicamente da capacidade do engenheiro em abstrair o fenômeno. A solução é baseada em um algoritmo numérico que visa solucionar da maneira mais rápida e acurada, uma equação diferencial com condições de contorno e/ou condições iniciais impostas pelo modelo. A seguir são descritas algumas subetapas para solucionar um problema:

- ◆ *Obtenção da matriz de condutividade térmica* - a matriz de condutividade consiste dos coeficientes das equações de equilíbrio derivadas das propriedades geométricas e do material de um elemento e pode ser obtida pelo uso do princípio da mínima energia potencial. A condutividade relaciona as temperaturas nodais ao calor aplicados nos nós. A relação de equilíbrio entre a matriz de condutividade $[k^T]$, o vetor de calor nodal $\{Q\}$ e o vetor temperatura nodal $\{T\}$ é expressa como um

¹⁷ Como normalmente o tipo adotado é o polinomial, apenas o grau deve ser escolhido.

¹⁸ Normalmente os deslocamentos nos nós ou suas derivadas.

conjunto de equações algébricas lineares simultâneas, $[K]\{T\} = \{Q\}$. A matriz de condutividade para um elemento depende da função de interpolação, da geometria do elemento e das propriedades locais do material;

- ◆ *Montagem das equações algébricas para todo o domínio* - este processo inclui a montagem da matriz de condutividade global para todo o corpo a partir das matrizes de condutividade elementares e do vetor calor global a partir dos vetores calor elementares. Em geral, a base para um método de montagem é a exigência das interconexões nodais. As temperaturas em um nó devem ser as mesmas para todos os elementos adjacentes;
- ◆ *Soluções para as temperaturas desconhecidas* - as equações algébricas montadas no passo anterior são resolvidas para as temperaturas desconhecidas. Em problemas lineares, esta é uma aplicação relativamente direta das técnicas de álgebra matricial. Entretanto, para problemas não-lineares, as soluções desejadas são obtidas por uma seqüência de passos, cada qual envolvendo a modificação da matriz de condutividade e/ou do vetor calor;

Um aspecto importante é que esses algoritmos numéricos podem ser implementados computacionalmente para agilizar o cálculo. Atualmente é possível encontrar no mercado pacotes computacionais tais como: ANSYS, NASTRAN, ABAQUS e outros. Cada um possuindo facilidades e dificuldades para a modelagem de problemas.

Pós-Processamento

Esta é a última etapa. Ela depende apenas das necessidades do engenheiro que está modelando o problema. Ou seja, ela é o conjunto solução da equação diferencial que descreve o fenômeno em estudo como demonstra a FIGURA 3.9, podendo ser:

- Deslocamentos nodais;
- Deformações da geometria;
- Gradientes de tensão de acordo com o critério de resistência escolhido;
- Gradientes de temperatura;
- Deslocamentos nodais ao longo do tempo;

- Freqüências naturais e formas de vibrar da estrutura.

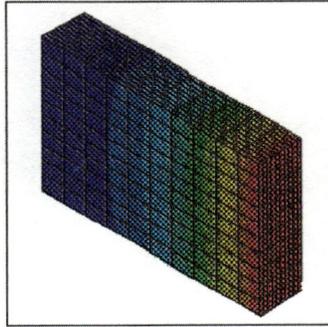


FIGURA 3.9 - Típico Pós-Processamento de um pacote comercial

Esses recursos implementados computacionalmente permitem estimar a solução de um problema complexo em um tempo relativamente pequeno, fazendo com que se otimize o tempo de processo para desenvolvimento de projetos de materiais isotrópicos ou anisotrópicos¹⁹ sujeitos a carregamentos estáticos, térmicos, dinâmicos e outros.

Portanto, através do Método dos Elementos Finitos calcula-se a matriz global de condutividade do sistema para depois obter a distribuição de calor no corpo do dressador.

Análise Térmica via Método dos Elementos Finitos

A equação diferencial dominante para casos bidimensionais, quando em regime permanente, pode ser expressa na forma geral como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.54)$$

onde:

k_x , k_y : condutividades térmicas nas direções x e y respectivamente (W/mK);

Na fronteira do domínio D , quando há convecção e a radiação é desprezada, temos as seguintes condições gerais de fronteira:

$$T = T(x, y) \text{ em } S_1$$

¹⁹ Como exemplo os materiais compósitos.

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + q + h(T - T_\infty) = 0 \quad \text{em } S_2 \quad (3.55)$$

D = domínio da função;

S_1, S_2 = fronteiras do domínio D ;

n_x, n_y = cosenos diretores do vetor normal externo \tilde{n} em x e y respectivamente para a fronteira S

que é um domínio em 2 dimensões para equação de condução de calor onde $T(x,y)$ é uma distribuição específica da temperatura na fronteira, q é a perda de calor na fronteira devido a condução, e $h(T-T_\infty)$ é a perda de calor na fronteira devido a convecção para temperatura ambiente T_∞ com coeficiente de transferência de calor por convecção h . A análise térmica utilizando o ANSYS52 pode ser vista com mais detalhes no Apêndice 2.

Método Variacional

É importante lembrar que um dos primeiros passos é a discretização do contínuo. Portanto, o modelo do dressador será discretizado em vários elementos cada qual possuindo sua condutividade térmica. HUEBNER (1994) descreve que o comportamento térmico de uma estrutura discretizada possui em algum instante de tempo a energia potencial dada pelo seguinte funcional:

$$I(T) = \iint_D \left[\frac{k_x}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{k_y}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy + \int_{S_2} \left(qT + \frac{1}{2} hT^2 - hTT_\infty \right) dS \quad (3.56)$$

I = funcional;

Supõe-se que o domínio D é dividido em elementos poligonais e que a distribuição de T dentro de cada elemento é assumido como sendo

$$T^{(e)}(x,y) = \sum_{i=1}^r N_i(x,y) T_i = \{N\}^T \{T\}^{(e)} \quad (3.57)$$

$T^{(e)}$ = distribuição de temperatura dentro de cada elemento (K);

N_i = funções de forma que minimizam o funcional ;

r = número de nós atribuído ao elemento (e);

T_i = temperaturas nodais discretas (K).

Substituindo (3.57) em (3.56) obtemos para um elemento um funcional discretizado $I(T^{(e)})$ expresso em termos das temperaturas nodais discretas.

Requerendo que $I(T^{(e)})$ seja um mínimo é equivalente a fazer:

$$\frac{\partial I(T^{(e)})}{\partial T_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, r$$

Portanto para um típico nó i , temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(T^{(e)})}{\partial T_i} = 0 = & \iint_{D^{(e)}} \left[k_x \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} \right) + k_y \frac{\partial T^{(e)}}{\partial y} \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{\partial T^{(e)}}{\partial y} \right) \right] dx dy + \\ & + \int_{s_2^{(e)}} \left(q \frac{\partial T^{(e)}}{\partial T_i} + h T^{(e)} \frac{\partial T^{(e)}}{\partial T_i} - h T_\infty \frac{\partial T^{(e)}}{\partial T_i} \right) d\Sigma^{(e)}, \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (3.58)$$

ou, na notação de matriz, temos para um elemento inteiro:

$$[k_c]^{(e)} \{T\}^{(e)} = -\{q\}^{(e)} - [k_h]^{(e)} \{T\}^{(e)} + \{qT_\infty\}^{(e)} \quad (3.59)$$

onde:

$$\begin{aligned} k_{cij} &= \iint_{D^{(e)}} \left(k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx dy \\ q_i &= \int_{s_2^{(e)}} q N_i d\Sigma^{(e)} \\ k_{hij} &= \int_{s_2^{(e)}} h N_i N_j d\Sigma^{(e)}, \quad qT_\infty = \int_{s_2^{(e)}} h T_\infty N_i d\Sigma^{(e)} \end{aligned}$$

A equação (3.59) expressa o comportamento geral de um elemento térmico bidimensional.

Pode-se notar que desde que o funcional contenha somente a derivada de primeira ordem da temperatura, a função de aproximação precisa somente garantir continuidade de temperatura através da fronteira interelementos e eles devem ser capazes de representar valores constantes de ambas derivadas primeira dentro de algum elemento.

Método de Galerkin

Método dos resíduos ponderados (Galerkin's method)

O método de resíduos ponderados é uma técnica de obtenção de soluções aproximadas para equações diferenciais parciais lineares e não lineares. Ele possibilita outro meio com o qual se formula as equações de elementos finitos.

A aplicação do método de resíduos ponderados envolve basicamente 2 passos. O primeiro passo é assumir o comportamento geral do funcional da variável de campo dependente tal que de algum modo satisfaça aproximadamente a equação diferencial e condições de contorno dadas. A substituição desta aproximação na equação diferencial original e condições de contorno resultam em algum erro chamado resíduo. Este resíduo é necessário para corrigir a função aproximada sobre o domínio completo da solução.

O segundo passo é resolver as equações resultantes do primeiro passo e desse modo obter a forma geral do funcional para uma função particular, que torna-se então a solução aproximada procurada.

A aplicação deste método envolve a aplicação de dois passos.

Inicialmente, considere-se que deseja-se encontrar uma representação aproximada para o funcional através de uma variável de campo f governada pela equação diferencial (3.60):

$$\mathcal{L}(f) - f = 0, \quad (3.60)$$

válida no domínio D e superfície S , onde:

$\mathcal{L}(f)$ representa um operador diferencial sobre a função f .

f é uma função conhecida de variáveis independentes.

Aproximando-se f por $\tilde{\phi}$, e sendo o comportamento de $\tilde{\phi}$ especificado em termos de parâmetros desconhecidos, temos:

$$f \approx \tilde{\phi} = \sum_{i=1}^m N_i C_i, \quad (3.61)$$

onde:

N_i : funções adotadas;

C_i : parâmetros desconhecidos;

m : número de parâmetros,

geralmente escolhido de modo a satisfazer as condições globais de contorno.

Então:

$$\mathcal{L}(\tilde{\phi}) - f = R, \quad (3.62)$$

onde R é o erro residual.

Compensando-se o erro através de m funções de peso W_i , linearmente independentes, temos:

$$\int_D [\mathcal{L}(\tilde{\phi}) - f] W_i dD = \int_D R W_i dD = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.63)$$

$$R \approx 0$$

Em seguida resolve-se a equação (3.63) para os valores de C_i , obtendo-se uma aproximação para f .

De acordo com o método de Bubnov-Galerkin, as funções de peso são as mesmas utilizadas para representar f , ou seja, $W_i = N_i$ para $i = 1, 2, \dots, m$.

Temos então, para cada elemento:

$$\int_{D^{(e)}} [\mathcal{L}(\phi^{(e)}) - f^{(e)}] N_i^{(e)} dD^{(e)} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (3.64)$$

$$\text{onde: } f^{(e)} = \{N^{(e)}\}^T \{f\}^{(e)}$$

$f^{(e)}$: função excitadora para o elemento (e)

r : número de parâmetros desconhecidos do elemento

Quando apenas as equações diferenciais e as condições de contorno estão disponíveis, o método de Galerkin é o mais indicado para a solução do problema.

Para aplicar-se o método de Galerkin nas equações (3.54) e (3.55) primeiro expressa-se o comportamento aproximado da temperatura dentro de cada elemento de acordo com a equação (3.57).

Então, aplicando o critério de Galerkin, pode-se escrever:

$$\iint_{D^{(e)}} N_i \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T^{(e)}}{\partial y} \right) \right] dx dy = 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (3.65)$$

A equação (3.65) expressa o residual dentro da fronteira do elemento, mas não admite a influência da fronteira.

Usando-se a integração por partes para reduzir a ordem das derivadas na equação (3.65) e para introduzir a influência da condição natural de fronteira.

Concentrando a atenção nos dois primeiros termos da equação (3.65), integrando por partes usando a equação:

$$\int_D u(\nabla v) d\Omega = \int_{\Sigma} u(v\hat{n}) d\Sigma - \int_D v \nabla u d\Omega; \quad \text{com } u = N_i \quad e$$

$$v = k_x \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} \hat{i} + k_y \frac{\partial T^{(e)}}{\partial y} \hat{j}$$

Após a integração a equação fica da forma:

$$- \iint_{D^{(e)}} \left(k_x \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + k_y \frac{\partial T^{(e)}}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dx dy +$$

$$+ \int_{S_2^{(e)}} \left(k_x \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T^{(e)}}{\partial y} n_y \right) N_i d\Sigma^{(e)} = 0 \quad (3.66)$$

A integral de superfície (fronteira residual) na equação (3.66) agora permite a introdução das condições naturais de fronteira da equação (3.55) porque, para elementos na fronteira de D ,

$$k_x \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T^{(e)}}{\partial y} n_y = -q^{(e)} - h(T^{(e)} - T_{\infty}) \quad \text{em } S_2$$

Portanto, notando que $T^{(e)} = \{N\}^T \{T\}^{(e)}$, pode-se escrever a equação (3.66) como:

$$\iint_{D^{(e)}} \left(k_x \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \{T\}^{(e)} \frac{\partial N_i}{\partial x} + k_y \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \{T\}^{(e)} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dx dy +$$

$$+ \int_{S_2^{(e)}} (q N_i + h \{N\}^T \{T\}^{(e)} N_i - h T_{\infty} N_i) d\Sigma^{(e)} = 0$$

a qual admitimos sendo idêntica a equação (3.59), derivada pelo método variacional.

A mesma linha de raciocínio pode ser aplicada na obtenção das equações correspondentes ao caso tridimensional. Segundo o ANSYS User's Manual (1995) tem-se a equação da primeira lei dada por:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) - \{L\}^T \{q\} = \tilde{Q} \quad (3.67)$$

onde $\rho =$ densidade (kg/m^3);
 $c =$ calor específico (J/kgK);

$T =$ temperatura (K);

$t =$ tempo (s);

$$\{L\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} = \text{vetor operador};$$

$$\{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} = \text{vetor velocidade para transporte de massa de calor};$$

$\{q\} =$ vetor do fluxo de calor (W);

$\tilde{Q} =$ razão de geração de calor por unidade de volume (J).

A lei de Fourier é usada para mostrar o vetor do fluxo de calor para os gradientes térmicos:

$$\{q\} = -|D|\{L\}T \quad (3.68)$$

onde

$$|D| = \begin{bmatrix} k_{xx} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & k_{yy} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & k_{zz} \end{bmatrix} = \text{matriz de condutividade térmica};$$

k_{xx} , k_{yy} , $k_{zz} =$ condutividade no elemento nas direções x, y e z respectivamente.

Combinando as equações (3.67) e (3.68):

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) = \{L\}^T (|D| \{L\} T) + \tilde{Q}$$

expandindo a equação, tem-se:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \tilde{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.69)$$

Como o estudo é feito para o caso em regime permanente, sem geração de calor interno e sem transporte de massa, chega-se a equação simplificada:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.70)$$

Dois tipos de condições de contorno são considerados na análise desenvolvida.

1- Fluxo de calor específico atuando sobre a superfície S_1 :

$$\{q\}^T \{n\} = -q^* \quad (3.71)$$

onde $\{n\}$ = vetor normal;
 q^* = fluxo de calor específico

2- Convecção de superfície específica atuando sobre a superfície S_2 :

$$\{q\}^T \{n\} = h(T - T_\infty) \quad (3.72)$$

onde h = coeficiente de transferência convectiva de calor (W/m^2K);
 T = temperatura na superfície do modelo (K);
 T_∞ = temperatura ambiente (K).

Combinando as equações (3.68) com (3.71) e (3.72), temos:

$$\{n\}^T \{D\} \{L\} T = q^* \quad (3.73)$$

$$\{n\}^T \{D\} \{L\} T = h (T - T_\infty) \quad (3.74)$$

Fazendo-se o balanço de energia no modelo e aplicando-se as equações (3.73) e (3.74) chega-se, após algumas manipulações matemáticas, a:

$$\int_{\text{volume}} \left(\{L\}^T \delta T \{D\} \{L\} T \right) d(\text{vol}) = \int_{S_1} \delta T q^* d(S_1) + \int_{S_2} \delta T h (T - T_\infty) d(S_2) \quad (3.75)$$

onde vol = volume do elemento;
 δT = uma temperatura admissível ($=\delta T(x, y, z)$)

que é a equação para casos tridimensionais. A temperatura para cada elemento é dada pela equação:

$$T = \{N\}^T \{T_e\} \quad (3.76)$$

onde $T = T(x, y, z)$ = temperatura (K);
 $\{N\} = \{N(x, y, z)\}$ = função de forma do elemento;
 $\{T_e\} = \{T_e(t)\}$ = vetor de temperatura nodal.

δT tem a mesma forma que T :

$$\delta T = \{\delta T_e\}^T \{N\} \quad (3.77)$$

A combinação $\{L\}T$ é escrita como:

$$\{L\}T = [B]\{T_e\} \quad (3.78)$$

onde $[B] = \{L\}\{N\}^T$

Agora, o variacional da equação (3.75) pode ser combinado com as equações (3.76) e (3.78) para fornecer:

$$\int_{vol} (\{\delta T_e\}^T [B]^T |D||B| \{T_e\}) d(vol) = \int_{S_1} \{\delta T_e\}^T \{N\} q^* d(S_1) + \int_{S_2} \{\delta T_e\}^T \{N\} h(T - \{N\}^T \{T_e\}) d(S_2) \quad (3.79)$$

Temos que $\{T_e\}$ e $\{\delta T_e\}$ são valores nodais e não variam no elemento, então eles podem ser removidos da integral.

Assim a equação (3.79) pode ser reduzida a:

$$\int_{vol} |B|^T |D||B| d(vol) \{T_e\} = \int_{S_1} \{N\} q^* d(S_1) + \int_{S_2} Th \{N\} d(S_2) - \int_{S_2} h \{N\} \{N\}^T \{T_e\} d(S_2) \quad (3.80)$$

A equação (3.80) pode ser rescrita como:

$$([k_e^{th}] + [k_e^{tc}]) \{T_e\} = \{Q_e^f\} + \{Q_e^c\} \quad (3.81)$$

onde

$$[k_e^{th}] = \int_{vol} |B|^T |D||B| d(vol) = \text{matriz de condutividade do elemento de difusão};$$

$$[k_e^{tc}] = \int_{S_2} h \{N\} \{N\}^T dS_2 = \text{matriz de condutividade do elemento na superfície de}$$

convecção;

$$\{Q_e^f\} = \int_{S_1} \{N\} q^* d(S_1) = \text{vetor do fluxo de massa do elemento};$$

$$\{Q_e^c\} = \int_{S_2} Th \{N\} d(S_2) = \text{vetor do fluxo de calor do elemento na superfície de}$$

convecção.

CAPÍTULO 4 – TRABALHO EXPERIMENTAL

O presente trabalho foi desenvolvido junto ao laboratório do grupo de otimização de processo de fabricação (GOPF), dentro do projeto NUMA- núcleo de manufatura avançada do Departamento de Engenharia Mecânica, USP - São Carlos, contando com o apoio do laboratório de CAD/CAE também integrante do Departamento de Engenharia Mecânica, USP - São Carlos. A seguir descreve-se as principais características dos materiais e equipamentos empregados seguido pela descrição dos experimentos.

4.1 – Materiais e Equipamentos

4.1.1 - Laboratório do grupo de otimização de processos de fabricação (GOPF)

O banco de ensaios foi montado em uma retificadora cilíndrica universal CNC (marca ZEMA, modelo G 8000), um microcomputador desktop, dois dressadores um com as dimensões de 17mm de comprimento, 4mm de espessura e 13mm de largura e o outro com dimensões de 15mm de comprimento, 4mm de espessura e 13mm de largura, dois termopares do tipo K (níquel / níquel-cromo) para medição de temperatura na operação de dressagem e uma placa de conexão dos termopares (marca National Instruments, modelo SCB-68). A calibração dos termopares foi realizada usando-se gelo e água fervente. O padrão de temperatura usado foi um termômetro de bulbo. A FIGURA 4.1 apresenta um esquema do banco de ensaios.

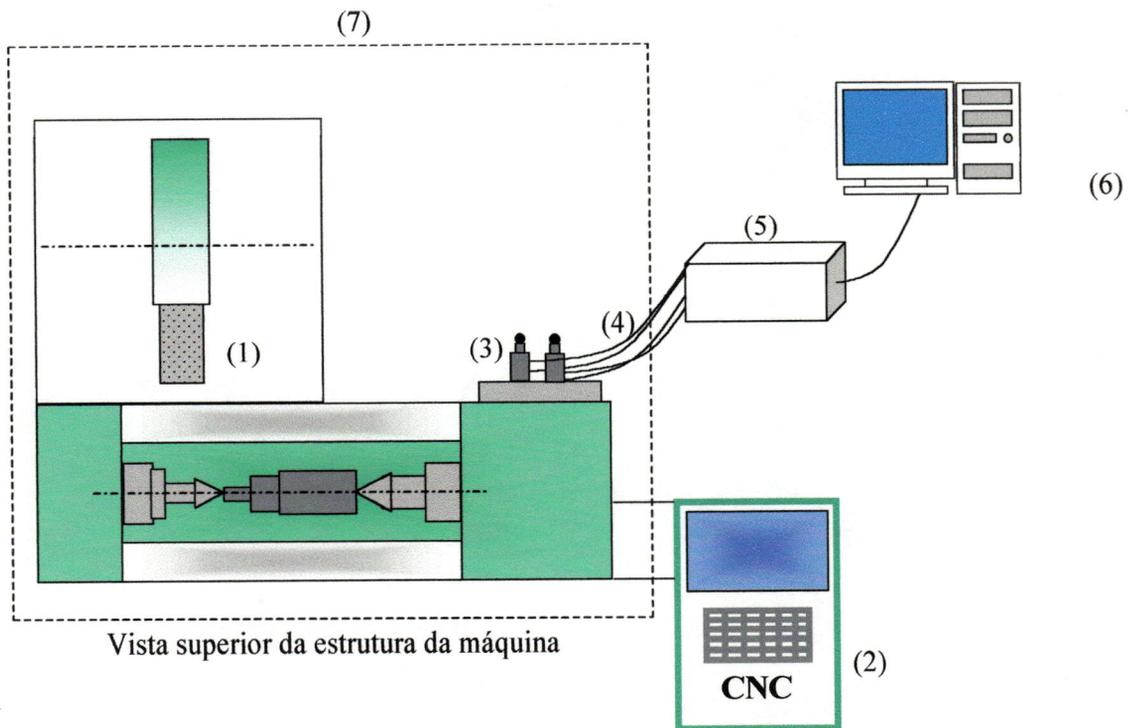


FIGURA 4.1 – Esquema do banco de ensaios. (1) rebolo; (2) módulo da retificadora CNC; (3) dressadores presos à máquina; (4) termopares; (5) placa de conexão dos termopares; (6) microcomputador; (7) estrutura da retificadora CNC.

Os equipamentos componentes do banco de ensaios são:

- (1) Rebolo – Abrasivo convencional, Óxido de Alumínio, de granulometria mesh 100, liga vitrificada e dureza R;
- (2) CNC ZEMA G8000 - painel de controle da máquina onde foi feito o programa de dressagem;
- (3) Dressadores empregados – um dressador de liga de bronze sem diamantes;
um dressador de liga de bronze com 3 barras de diamante de 0,8 x 0,8mm e 5,0 mm de comprimento.
- (4) Termopares tipo K (Ni/NiCr) – os dois termopares foram responsáveis pela medição da temperatura nos dressadores;
- (5) Placa de conexão dos termopares (SCB-68)– recebe os sinais de tensão produzidos pela junção quente dos termopares e os transmite ao microcomputador;

(6) Microcomputador-(Pentium II – 333 MMX) – recebe os sinais transmitidos pela placa de conexão dos termopares da National Instruments. Os sinais analógicos são convertidos para números digitais e são lidos por um programa escrito em LabView. Este programa faz uma leitura desses sinais e os armazena na memória. Os arquivos são salvos como .xls (arquivos compatíveis com o programa EXCEL™) onde é possível armazenar até 10000 pontos de leitura, podendo-se também, com o decorrer do tempo, parar o programa para a observação dos gráficos de temperatura em função do tempo obtidos em cada passo de dressagem, (o programa de aquisição de dados está descrito no APÊNDICE 4);

(7) Retificadora CNC – Segue o programa de dressagem do painel de controle do módulo da retificadora CNC o qual está mostrado detalhadamente no APÊNDICE 3.

4.1.2 - Laboratório de CAD/CAE

No laboratório do CAD/CAE realizou-se a simulação da distribuição de temperaturas no corpo do dressador via Método dos Elementos Finitos (MEF), sendo necessário:

Hardware: estação de trabalho (work station): IBM Risc e periféricos com potência de cálculo (260 SPEC.FP.92), 128Mb de memória e 4,5Gb de disco.

Software: ANSYS (versão 5.2) em plataforma UNIX.

4.2 – Descrição dos Experimentos

A experimentação será descrita abaixo com as 3 etapas propostas: a medição das temperaturas durante a operação de dressagem, a resolução da equação do modelo proposto pelo método analítico usando os valores experimentais e a simulação da distribuição de temperaturas pelo software de elementos finitos ANSYS usando os resultados obtidos nas primeiras duas etapas. O fluxo foi aplicado na liga e no diamante

separadamente, assim o fluxo de calor relativo a liga foi subtraído do fluxo de calor da liga contendo diamante para obter q_f do diamante. Esse fluxo de acordo com o ANSYS User's Manual (1995) é aplicado por unidade de área, como temos um dressador com 3 diamantes de 0,8 x 0,8mm a divisão do fluxo de calor foi feita por 3 x área (do diamante), obtendo assim q_f em cada diamante. Da mesma forma o fluxo obtido para a liga foi dividido pela área da mesma para ser aplicado na simulação.

4.2.1 - Medição de Temperatura

Para se obter um caso mais próximo possível do real na simulação da medição de temperaturas pelo Método dos Elementos Finitos, fez-se necessário a construção de dois dressadores; um somente com liga metálica de bronze para que fosse possível encontrar o fluxo de calor a ser aplicado na mesma; e o outro com liga metálica contendo os diamantes onde foi obtido o fluxo de calor aplicado em toda face; com a subtração dos dois fluxos obteve-se o valor a ser aplicado somente nos diamantes; a partir desses valores e do coeficiente de transferência convectiva de calor foi feito o estudo da distribuição de temperaturas no corpo do dressador.

Foi preciso realizar a medição de temperatura em dois pontos de cada dressador para a resolução das equações propostas pelo método analítico. As temperaturas foram medidas através de um furo de 1,0mm de diâmetro com profundidade de até 1,0mm da superfície que entra em contato com o rebolo. A princípio foram realizadas medições de temperatura a 1,0mm de distância da face em contato com o rebolo, com o tempo de dressagem o dressador desgastou em até 1,0mm de distância e então realizou-se novas medições de temperatura. Obtidos os dois valores de temperatura chegou-se ao fluxo de calor (q_f) e ao coeficiente de transferência convectiva de calor (h) para cada componente dos dressadores a saber: a liga e a liga contendo os diamantes. Baseado no trabalho desenvolvido por VIGNA(1997) foram sinterizados dois dressadores para utilização nos ensaios, contendo uma liga comercial de bronze que proporcionou boa condutividade térmica. O processo de sinterização e maiores detalhes sobre a fabricação das

ferramentas estão em VIGNA(1997) e SILVA JÚNIOR(1998). As ferramentas foram fixadas na retificadora na posição do dressador original através de uma placa adaptável à máquina construída para esse fim SILVA JÚNIOR(1998). A FIGURA 4.2 mostra o banco de ensaios.

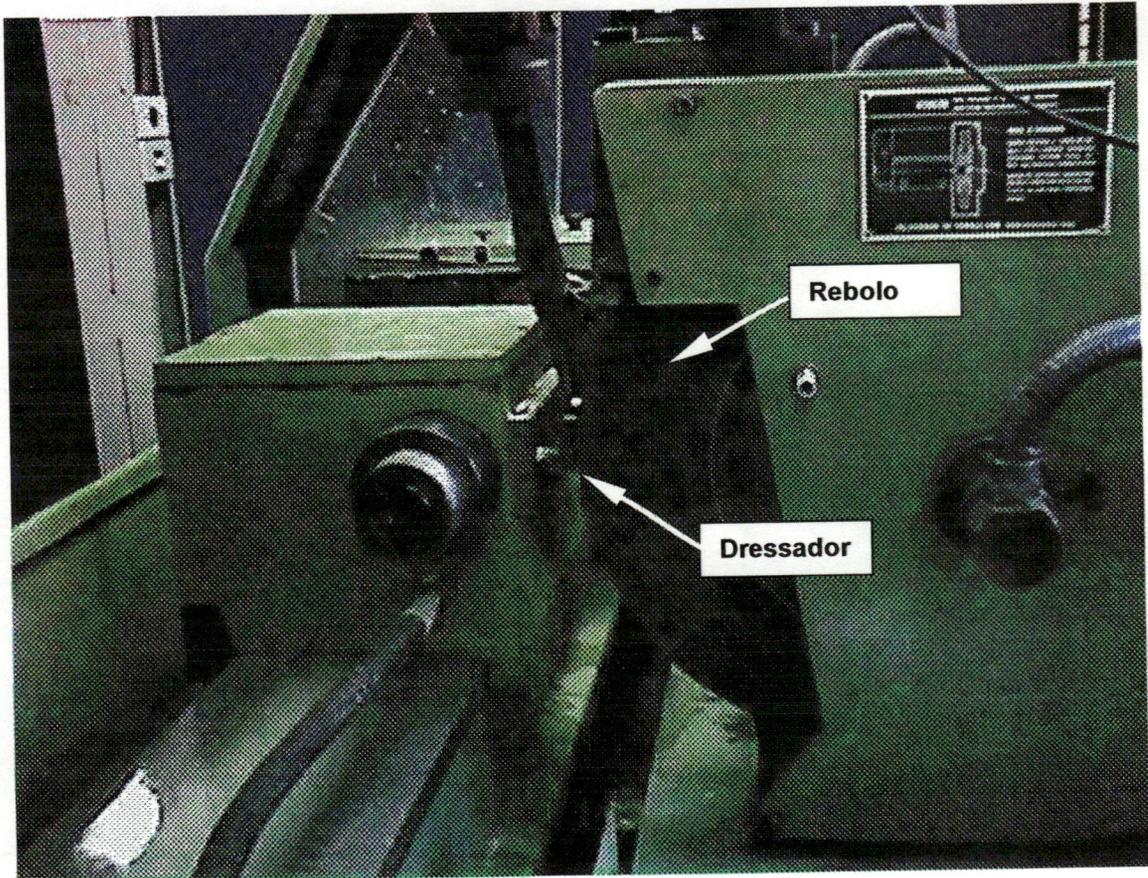


FIGURA 4.2 - Foto da retificadora.

Foram realizados diversos ensaios através do programa CNC para dressagens que tem as seguintes ações:

programa de dressagem – liga o rebolo;

- posiciona o rebolo em avanço rápido;

- avança na direção do dressador em avanço rápido;

- dressa o rebolo em velocidade programada;
- afasta o rebolo em velocidade rápida;
- repete os passos descritos acima.

O programa CNC está descrito no APÊNDICE 3. Em todos os experimentos utilizou-se fluido refrigerante.

Assim foram medidas temperaturas a 1,0 mm da superfície do rebolo e depois de desgastado o dressador até 1,0 mm mediu-se novamente a temperatura, para o dressador contendo somente a liga metálica.

As próximas temperaturas medidas experimentalmente foram referentes ao dressador de liga metálica contendo diamantes; as medições de temperatura foram feitas da mesma forma : a 0,5 mm da superfície e depois de desgastado o dressador a 1,0 mm da mesma. A FIGURA 4.3 mostra o termopar no corpo de dressador para realizar as medições de temperatura.

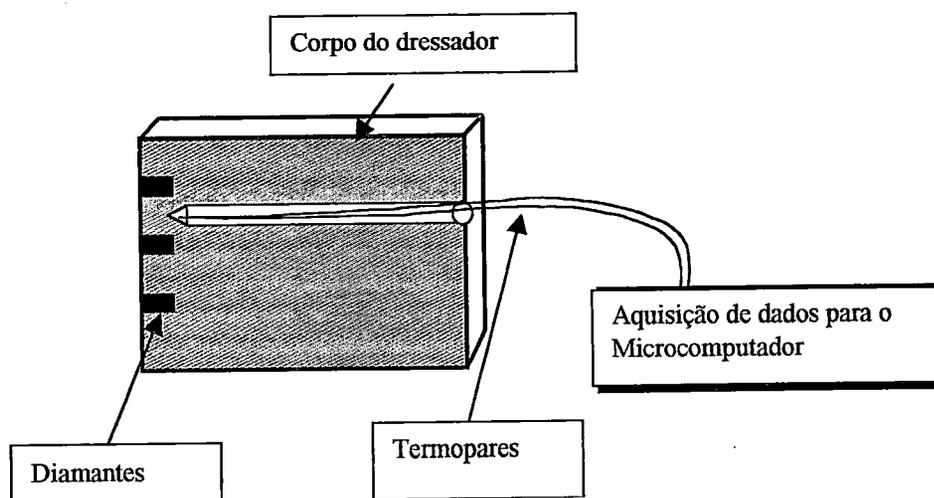


FIGURA 4.3 – Posição do termopar por dentro do dressador.

4.2.2 – Cálculo de h e q_f

As equações obtidas pelo método analítico são aqui utilizadas para os cálculos do fluxo de calor (q_f) e do coeficiente de transferência convectiva de calor (h).

Para se obter q_f e h para a liga foi utilizado o valor da condutividade térmica do material do dressador, o bronze comercial = $52\text{W/m}^2\text{K}$ da Tabela (A.1)- Propriedades termofísicas de alguns sólidos metálicos (INCROPERA & WITT, 1992). Tomando a equação (3.26):

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{(\theta_L/\theta_b)\sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL} \quad (3.26)$$

onde $m^2 \equiv \frac{hP}{kA_c}$

e utilizando os valores de temperatura medidas no item 4.2.1(θ_b), obteve-se:

Com as temperaturas do dressador contendo somente liga

- fluxo de calor (q_{fL}) da liga;
- θ_{bL} da liga;
- coeficiente de transferência convectiva de calor (h_L) da liga.

Com as temperaturas do dressador de liga metálica contendo diamantes

- fluxo de calor (q_{fLD}) da liga contendo diamantes;
- θ_{bLD} da liga contendo diamantes;
- coeficiente de transferência convectiva de calor (h_{LD}) da liga contendo diamantes.

Os valores de q_{fLD} e h_{LD} obtidos no cálculo analítico serão utilizados na etapa de simulação.

4.2.3 – Modelo do Método de Elementos Finitos para Distribuição de Temperaturas

No laboratório do CAD/CAE realizou-se a simulação via Método de Elementos Finitos. O modelo teórico foi gerado através do programa ANSYS52. Foi modelado $\frac{1}{4}$ do dressador para proporcionar uma melhor visão da distribuição de temperatura no interior do dressador e também por não haver necessidade de modelar o dressador inteiro, já que este é simétrico.

Segundo o ANSYS User's Manual (1995) uma superfície livre de elementos (isto é, não adjacente a outros elementos é considerada como adiabática). Superfícies isoladas e superfícies simétricas são, por definição, adiabáticas, neste caso nas superfícies de simetria do dressador não é necessário a aplicação de condições de contorno. De acordo com a proposta de HUEBNER (1994), o problema foi solucionado seguindo as 3 etapas essenciais para a utilização do Método de Elementos Finitos: etapa de pré-processamento, solução (solver) e etapa de pós-processamento.

4.2.3.1 – Pré-Processamento

A modelagem do dressador ensaiada em laboratório é constituída por:

Construção da geometria – o dressador pode ser modelado como mostra a FIGURA 4.4.



FIGURA 4.4 – Geometria do modelo.

Propriedade dos materiais – o material para este caso é considerado isotrópico e necessita dos valores de k_{11} (condutividade térmica do bronze - k_{xx}), k_{22} (condutividade térmica do diamante - k_{xx}), ρ_{c1} (densidade do bronze -DENS), ρ_{c2} (densidade do diamante -DENS), c_1 (calor específico do bronze -C), c_2 (calor específico do diamante -C) e ν_{12} (coeficiente de Poisson ν_{xy} para o bronze e diamante) para que possa ser

calculado. A TABELA 1 mostra os valores com as unidades (SI) correspondentes a cada propriedade.

TABELA 1 – Propriedades adotadas na análise.

PROPRIEDADE	VALOR(*)
	Unidade (Sistema Internacional)
$k_{11}(k_{xx})^{**}$	52 (W/ mK)
$K_{22}(k_{xx})^{**}$	2300 (W/ mK)
ρ_{e1} (densidade)**	8800 (Kg/ m ³)
ρ_{e2} (densidade)**	3500 (Kg/ m ³)
c_1 (C)**	460 (J/ KgK)
c_2 (C)**	509 (J/ KgK)
$\nu_{12}(\nu_{xy})^*$	0,3

(*)* variáveis especificadas pelo ANSYS52

()** valores provenientes da Tabela (A.1) - Propriedades termofísicas de alguns sólidos metálicos (INCROPERA & WITT, 1992).

Escolha do Elemento para a discretização do contínuo – segundo ANSYS User's Manual Procedure (1995), o elemento SOLID70 é um dos mais adequados para análise térmica do dressador, pois devido a geometria do mesmo, com ausência de curvas, uma interpolação linear foi o suficiente para a modelagem. O SOLID70 possui 8 nós (I, J, K, L, M, N, O, P) no total sendo quatro por aresta e cada um possuindo um grau de liberdade. O corpo é subdividido em um sistema equivalente de elementos finitos escolhidos como blocos que possuem os chamados nós. A malha gerada por essa divisão é dada pela FIGURA 4.5. Detalhes do elemento podem ser vistos no Apêndice 1.

Ao final do processo de discretização o modelo ficou com um total de 9100 elementos e 10692 nós.

Condições de Contorno – convecção nas faces onde não há simetria. De acordo com os valores obtidos nas equações o coeficiente de transferência convectiva de calor a ser aplicado foi $h = 15845,93 \text{ w/m}^2\text{k}$, a uma temperatura ambiente de 27°C .

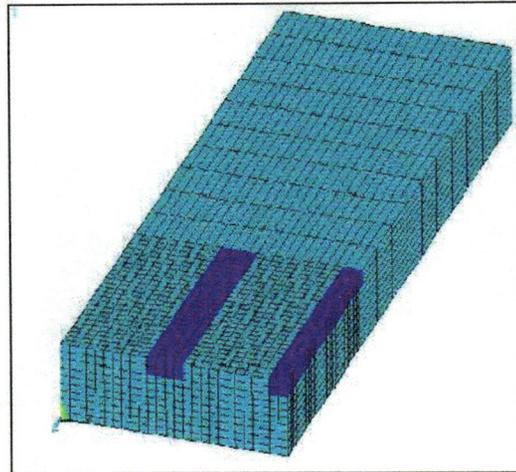


FIGURA 4.5 - Modelo discretizado

Carregamentos – fluxo de calor nos diamantes e na liga na face em que o dressador está em contato com o rebolo. Os fluxos de calor aplicados foram para a liga, $q_{fl} = 1533622,87 \text{ w/m}^2$; e para cada um dos diamantes $q_{fd} = 90105543,79 \text{ w/m}^2$.

Condições Iniciais – não são impostas condições iniciais ao modelo.

Hipóteses – simetria da solução;
homogeneidade dos materiais;
isotropia do material.

4.2.3.2 - Solução (Solver)

Após a etapa de preparação do modelo, a solução é executada automaticamente pelo solver do ANSYS52. A solução é baseada num algoritmo numérico que soluciona de maneira rápida a equação diferencial proposta, com todas as condições de contorno impostas para o dressador.

4.2.3.3 - Pós-Processamento

É apresentada a distribuição de temperatura no corpo do dressador. É o conjunto de soluções da equação diferencial que descreve o fenômeno em estudo, ou seja, a distribuição de temperaturas ao longo do dressador.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados estão divididos em duas seções. Na primeira são mostradas as medições de temperaturas necessárias para calcular o coeficiente transferência convectiva de calor (h) e o valor do fluxo de calor (q_f). Na segunda seção os valores obtidos para h e q_f foram fornecidos ao modelo do Método de Elementos Finitos juntamente com as condições de contorno e a distribuição de temperaturas foi obtida sob todo o corpo do dressador.

5.1 – Medição de Temperatura e Cálculo do Coeficiente de Transferência Convectiva de Calor (h) e do Fluxo de Calor (q_f)

Assim que os valores de temperatura foram salvos como arquivos compatíveis com o EXCEL foi possível através das temperaturas medidas obter-se os gráficos de T (temperatura) x t (tempo) de acordo com cada tipo de dressador: o de liga e o de liga mais diamante. Os gráficos para a medição de temperatura no dressador de liga metálica foram dados pela FIGURA 5.1 e pela FIGURA 5.2. No primeiro teste a liga de bronze sinterizada, sem diamantes dentro, foi usada para calcular a taxa de transferência de calor que flui somente através da liga.

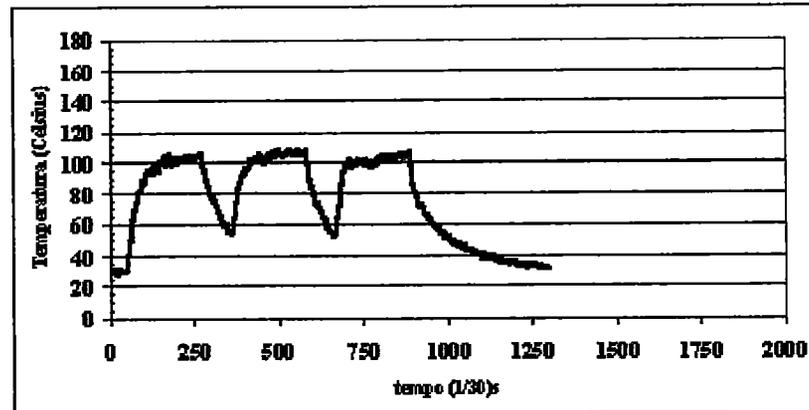


FIGURA 5.1 – Resultado da temperatura medida à 1,0mm da superfície em contato com o rebolo do dressador de liga metálica sem diamante.

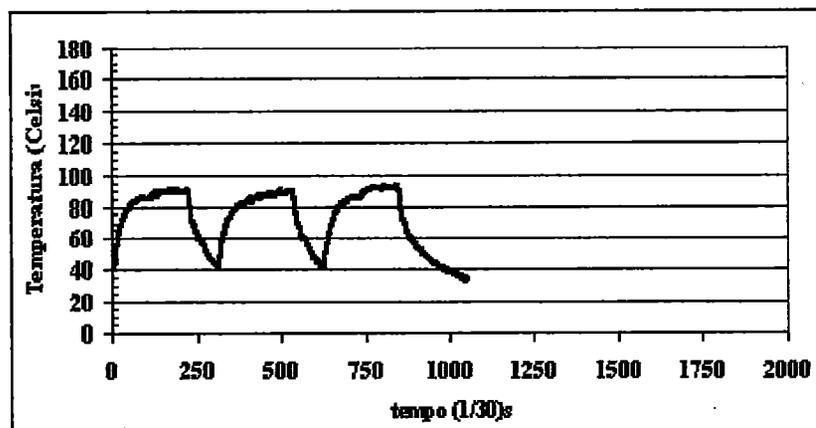


FIGURA 5.2 - Resultado da temperatura medida à 2,0mm da superfície em contato com o rebolo do dressador de liga metálica sem diamante.

De acordo com os gráficos mostrados nas FIGURAS 5.1 e 5.2 pode-se observar que a temperatura aumenta quando o dressador entra em contato com o rebolo, alcançando uma condição relativamente estável então a temperatura começa a cair quando o dressador termina o contato com o rebolo. A FIGURA 5.1 mostra 3 ciclos de dressagem, tomando um valor médio dos valores estáveis de cada ciclo, obtém-se 102 °C valor de temperatura assumido no ponto $x = 1mm$. Repetindo-se o mesmo procedimento para os 3 ciclos da FIGURA 5.2 o valor 83°C foi assumido no ponto $x = 2mm$. O valor usado para a condutividade térmica do bronze foi novamente $k = 52W/mK$.

Tendo em vista a equação:

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{(\theta_L/\theta_b)\sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL} \quad (5.1)$$

onde $m^2 \equiv \frac{hP}{kA_c}$, temos:

Com relação à liga a média de temperaturas para o furo em 1mm foi de $T_{1b} = 102^\circ\text{C}$ e para o furo em 2mm de $T_{2b} = 83^\circ\text{C}$; O valor da temperatura T_L foi medido com um termopar;

$$\theta_L = T_L - T_\infty, \quad T_L = 35^\circ\text{C} \text{ e } T_\infty = 27^\circ\text{C}, \text{ portanto}$$

$$\theta_L = 8^\circ\text{C} \text{ da mesma forma com as temperaturas obtidas,}$$

$$\theta_1 = T_{1b} - T_\infty \Rightarrow \theta_1 = 102 - 27 = 75^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = T_{2b} - T_\infty \Rightarrow \theta_2 = 83 - 27 = 56^\circ\text{C}$$

Os valores que serão encontrados são θ_b e m .

São obtidas duas equações, onde o valor de L é uma aproximação:

1) Quando $x = 0,001\text{m} \rightarrow \theta_1 = 75 \rightarrow L = 0,015\text{m}$

$$75 = \frac{\theta_b \left[\left(\frac{8}{\theta_b} \right) \sinh(0,001m) + \sinh(0,014m) \right]}{\sinh(0,015m)}, \text{ isolando } \theta_b \text{ temos:}$$

$$\theta_b = \frac{75 \sinh(0,015m) - 8 \sinh(0,001m)}{\sinh(0,014m)} \quad (I)$$

2) Quando $x = 0,002\text{m} \rightarrow \theta_2 = 56 \rightarrow L = 0,014\text{m}$

$$56 = \frac{\theta_b \left[\left(\frac{8}{\theta_b} \right) \sinh(0,002m) + \sinh(0,012m) \right]}{\sinh(0,014m)} \quad (\text{II})$$

substituindo (I) em (II), obtemos:

$$\frac{8 \sinh(0,002m) + \left(\frac{75 \sinh(0,015m) - 8 \sinh(0,001m)}{\sinh(0,014m)} \right) (\sinh(0,012m))}{\sinh(0,014m)} = 56$$

resolvendo a equação acima obtemos o valor de m:

$$m = 293,8 \text{ m}^{-1}$$

Substituindo m na equação (I), obtemos θ_b :

$$\theta_b = 100,55^\circ\text{C}.$$

Assim temos:

$$h = \frac{m^2 k A_c}{P}, \quad \text{onde de acordo com as medidas do dressador:}$$

$$A_c = 0,000052 \text{ m}^2;$$

$$P = 0,034 \text{ m};$$

$$k_{\text{brnze}} = 52 \text{ w/mk}, \quad \text{portanto}$$

$$h = 6864,8 \text{ w/m}^2\text{k}$$

Pela equação (3.27):

$$q_f = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \frac{\cosh mL - \theta_L/\theta_b}{\sinh mL}, \quad \text{substituindo os valores na equação, temos}$$

$q_f = 79,748 \text{ w}$. Para a utilização do fluxo de calor no software ANSYS52, precisa-se do fluxo de calor por unidade de área, sendo portanto $q_f/A_c = 79,748 / 0,000052 = 1533622,87 \text{ w/m}^2$.

Esses valores foram obtidos com o resultado de uma condição particular de dressagem. Mudanças no fluxo do fluido de corte, concentração de óleo e posição de aplicação

podem afetar esses valores. Porém, eles oferecem uma condição real na qual a performance do modelo pode ser avaliada.

As mesmas condições de dressagem e procedimentos descritos acima foram usados para o dressador de liga mais diamante calculando o fluxo de calor e coeficiente de transferência convectiva de calor relativos ao mesmo. Os gráficos para a medição de temperatura no dressador de liga mais diamante foram dados pela FIGURA 5.3 e pela FIGURA 5.4. O valor encontrado para o coeficiente de transferência convectiva de calor na convecção forçada com líquido está dentro do limite, de acordo com INCROPERA & WITT (1992).

A quantidade de fluxo de energia térmica através do dressador, é preferencialmente conduzida pelas barras de diamantes, as quais tem uma maior condutividade térmica ($k = 2300\text{W/mK}$). Foi assumido neste teste que a taxa de transferência de calor estava fluindo preferencialmente pelas barras de diamante e depois pelo corpo. Para isolar a quantidade de transferência de calor só transmitida pelo corpo foi usado o primeiro teste feito no dressador de liga sem diamantes.

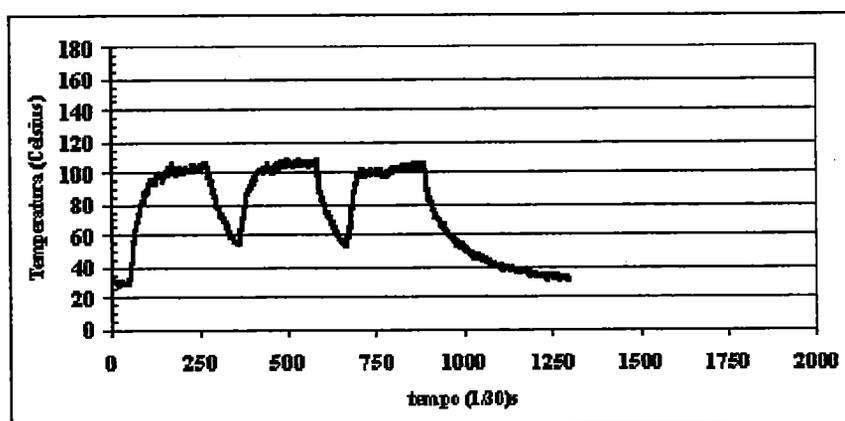


FIGURA 5.3 – Resultado da medição de temperatura à 1,5mm da superfície em contato com o rebolo do dressador contendo diamantes.

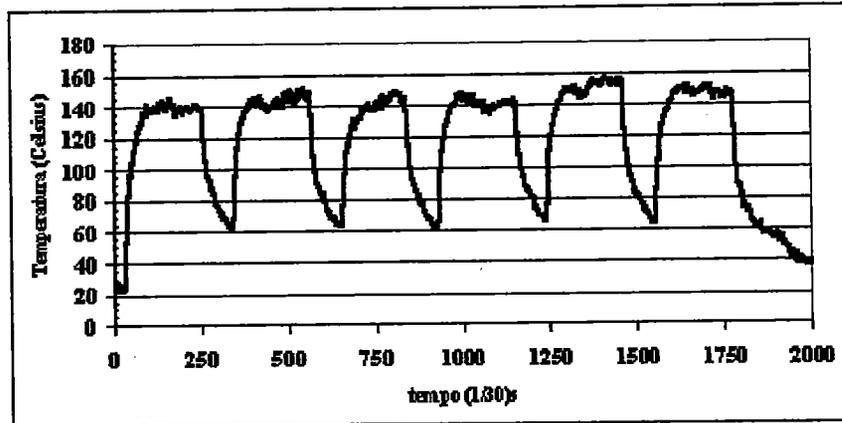


FIGURA 5.4 – Resultado da medição de temperatura à 0,5mm da superfície em contato com o rebolo do dressador contendo diamantes.

Com relação à este dressador de liga mais diamante a média de temperaturas medidas para o furo em 0,5mm foi de $T_{1d} = 143,66^{\circ}\text{C}$ e para o furo em 1,5mm de $T_{2d} = 101,66^{\circ}\text{C}$.

onde $\theta_L = 8^{\circ}\text{C}$

$$\theta_1 = T_{1d} - T_{\infty} \Rightarrow \theta_1 = 101,66 - 27 = 74,66^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_2 = T_{2d} - T_{\infty} \Rightarrow \theta_2 = 143,66 - 27 = 116,66^{\circ}\text{C}$$

São obtidas duas equações:

1) Quando $x = 0,0015\text{m} \rightarrow \theta_1 = 74,66^{\circ}\text{C} \rightarrow L = 0,017\text{m}$

$$74,66 = \frac{\theta_b \left[\left(\frac{8}{\theta_b} \right) \sinh(0,0015\text{m}) + \sinh(0,0155\text{m}) \right]}{\sinh(0,017\text{m})} \quad , \text{ isolando } \theta_b$$

$$\theta_B = \frac{74,66 \sinh(0,017\text{m}) - 8 \sinh(0,0015\text{m})}{\sinh(0,0155\text{m})}$$

2) Quando $x = 0,0005\text{m} \rightarrow \theta_2 = 116,66^{\circ}\text{C}$ e $L = 0,016\text{m}$

$$116,66 = \frac{\theta_b \left[\left(\frac{8}{\theta_b} \right) \sinh(0,0005m) + \sinh(0,0155m) \right]}{\sinh(0,016m)}, \text{ substituindo } \theta_b$$

$$\frac{8 \sinh(0,0005m) + \left(\frac{74,66 \sinh(0,017m) - 8 \sinh(0,0015m)}{\sinh(0,0155m)} \right) (\sinh(0,0155m))}{\sinh(0,016m)} = 116,66$$

resolvendo as equações obteve-se:

$$m = 446,37 \text{ m}^{-1} \quad \text{e}$$

$$\theta_b = 145,827^\circ\text{C}.$$

Assim temos:

$$h = \frac{m^2 k A_c}{P}, \quad \text{onde de acordo com as medidas do dressador: } A_c = 0,000052\text{m}^2,$$

$$P = 0,034\text{m e } k_{\text{bronzee}} = 52\text{w/mk, portanto}$$

$$h = 15845,93\text{w/m}^2\text{k}$$

Pela equação (3.27):

$$q = \sqrt{h P k A_c} \theta_b \frac{\cosh mL - \theta_L / \theta_b}{\sinh mL}, \quad \text{substituindo os valores na equação, temos}$$

$q_f = 175,9472\text{w}$. Para a utilização do fluxo de calor no software ANSYS52, precisa-se do fluxo de calor por unidade de área, sendo portanto agora a área do diamante que será onde o fluxo é aplicado, portanto $q_f / 3 A_{cd}$, pois o fluxo é aplicado em 3 diamantes com dimensões de 0,8 de altura por 0,8 de largura então, $175,9472 / 3(0,00000064) = 91639166,66\text{w/m}^2$. Desse fluxo de calor tem-se que descontar o fluxo de calor obtido somente para a liga, para se ter um fluxo que será aplicado somente nos diamantes, assim:

$$q_f - q_{fl} = 91639166,66 - 1533622,87 = 90105543,79 \text{w/m}^2.$$

5.2 – Resultado da análise térmica via Método dos Elementos Finitos

Os resultados obtidos numericamente foram usados na simulação da distribuição de temperaturas do dressador. Além desses valores, para simular um caso mais realista foi aplicado a condição de contorno presente na fase de experimentação, a convecção.

Os valores obtidos e aplicados na simulação são mostrados na TABELA 2.

TABELA 2 – Valores aplicados à simulação

valores	Dressador - liga	Dressador- liga e diamante
q_f	1533622,87w/m ²	90105543,79w/m ²
h	6864,8w/m ² k	15845,93w/m ² k
$T_{ambiente}$	300K	300K

Como foi modelado ¼ do dressador e admitido simetria, duas faces do mesmo foram mantidas isoladas; em volta do dressador foi aplicado a convecção (h e temperatura ambiente a 27°C), obtida do dressador liga e diamante e na face em contato com o rebolo foram aplicados os fluxos de calor obtidos da liga e da liga mais diamante. A FIGURA 5.5 mostra o resultado da simulação aplicando os valores dados pela TABELA 2.

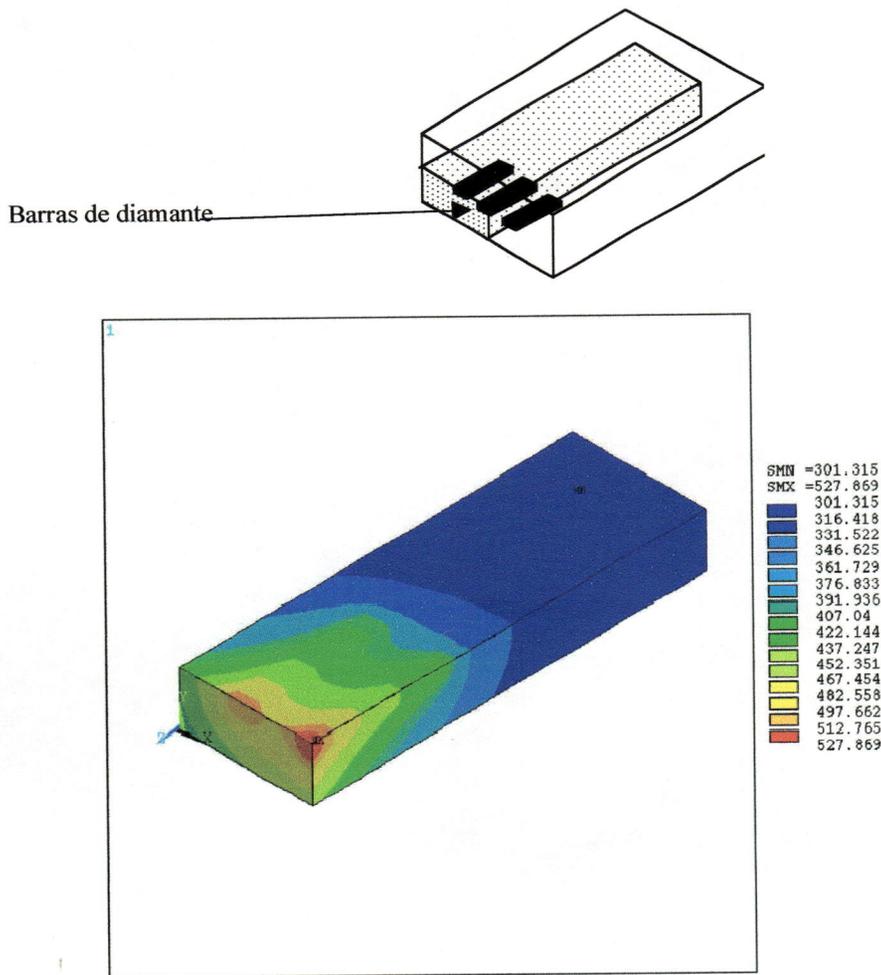


FIGURA 5.5 – Simulação no dressador de bronze.

De acordo com a FIGURA 5.5 pode-se observar que confrontando o resultado da simulação com a medição realizada em laboratório, próxima à face de contato com o rebolo, a distribuição de temperaturas mostra uma resposta realista atendendo aos valores esperados de acordo com a experimentação.

5.3 - Análise da Sensibilidade dos Parâmetros h , k e q_f no Modelo do Método de Elementos Finitos

Nesta fase, são feitos vários testes baseados no resultado obtido na simulação do dressador de bronze com os valores da condutividade térmica (k), coeficiente de

transferência convectiva de calor (h) e a taxa de transferência de calor na aleta (q_f). A variação desses parâmetros contribuiu para a visualização da mudança na distribuição de temperatura e portanto, para obter a influencia de cada um desses fatores. Foi mudado o valor de h em 20% acima e abaixo do valor calculado analiticamente e observou-se pequenas variações na distribuição de temperaturas, as quais podem ser vistas na FIGURA 5.6.

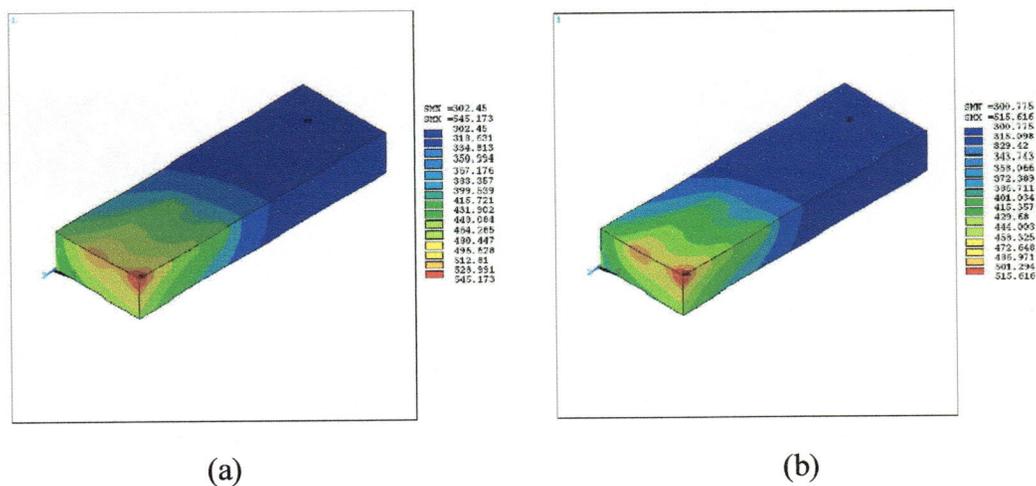


FIGURA 5.6 – Distribuição de temperaturas: (a) Variação em - 20% de h ; (b) Variação em + 20% de h

O valor da temperatura variou em torno de 3%. Observou-se que o coeficiente de transferência convectiva de calor (h) tem pouca influencia na mudança de temperaturas pelo corpo do dressador, assim um erro de mais ou menos 20% na medição das mesmas não acarreta mudanças significativas na temperatura máxima atingida no dressador. Da mesma forma, variou-se o valor da taxa de transferência de calor (q_f) em 20% acima e abaixo do valor obtido dos cálculos. A distribuição de temperaturas pode ser vista na FIGURA 5.7.

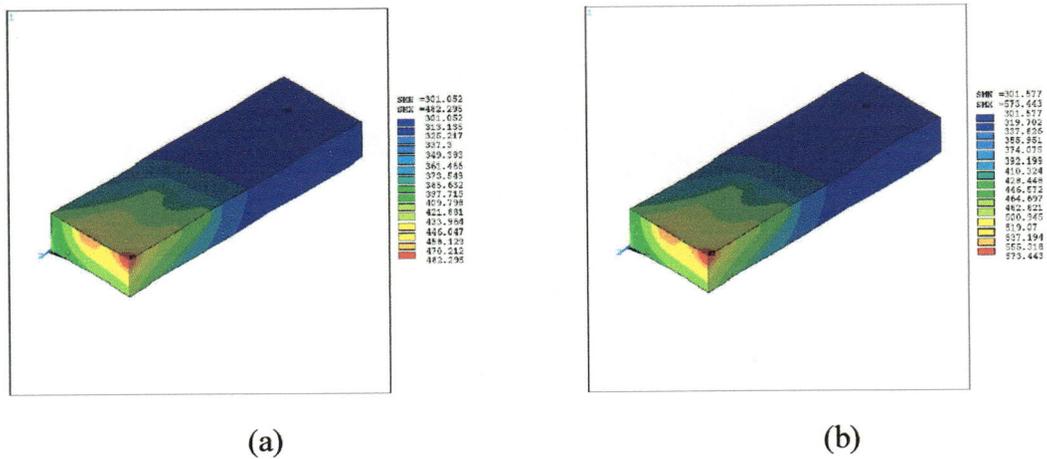


FIGURA 5.7 – Distribuição de temperaturas: (a) Variação em - 20% de q_f ; (b) Variação em + 20% de q_f

Pode-se observar que a mudança na temperatura máxima ficou em torno de 8%. A variação do fluxo de calor tem uma maior influência na distribuição de temperaturas, mas ainda assim é significativamente baixa. Da mesma forma um possível erro de 20% no valor de q_f não acarreta maiores mudanças na temperatura máxima.

O valor de k também foi variado em 20% acima e abaixo do valor assumido da tabela e a distribuição de temperaturas pode ser observada na FIGURA 5.8.

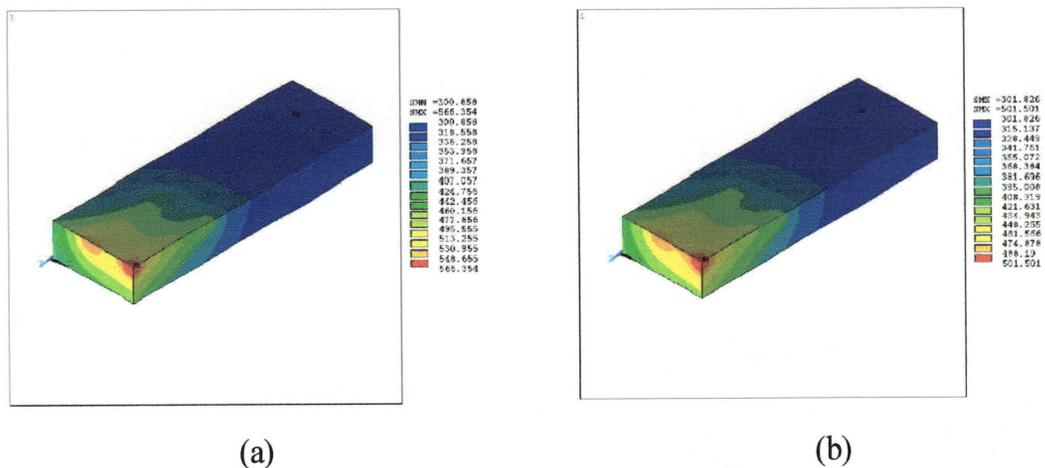


FIGURA 5.8 – Distribuição de temperaturas: (a) Variação em - 20% de k ; (b) Variação em + 20% de k

Pode-se observar que a mudança na temperatura máxima ficou em torno de 6%. Observou-se que a condutividade térmica (k) não tem grandes mudanças de temperaturas pelo corpo do dressador, assim um erro de mais ou menos 20% na medição das mesmas não acarreta mudanças significativas.

Proposta Para Construção De Um Modelo De Dressador Visando Melhorar A Distribuição De Temperaturas

Usando as informações obtidas nos testes de sensibilidade feitos com os parâmetros k , h e q_f , propõe-se a construção de um dressador com melhor desempenho quanto à distribuição de calor. Esse novo dressador contém uma liga com condutividade térmica maior e uma maior área de dissipação de calor. Desse modo um novo dressador foi construído usando-se Latão ($k = 137\text{W/m}^2\text{K}$) com quatro diamantes e o corpo do dressador constituído de aletas. Os quatro diamantes foram usados para se ter uma maior área de contato com o rebolo, aumentado-se a transmissão de calor para a liga metálica, além de proporcionar maior resistência ao desgaste abrasivo. As aletas aumentaram a área de troca de calor com o fluido refrigerante em aproximadamente 17%. A geometria proposta para o dressador de latão pode ser vista na FIGURA 5.9.

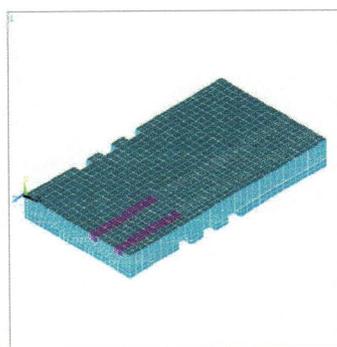


FIGURA 5.9 – Geometria discretizada do dressador de latão.

Na simulação realizada usando-se os parâmetros obtidos experimentalmente encontrou-se temperatura máxima menor além de uma dissipação em uma extensão menor do corpo do dressador. Foram aplicados nesta segunda simulação os mesmos

valores de q_f e h obtidos nos cálculos analíticos. Os resultados da simulação podem ser vistos na FIGURA 5.10.

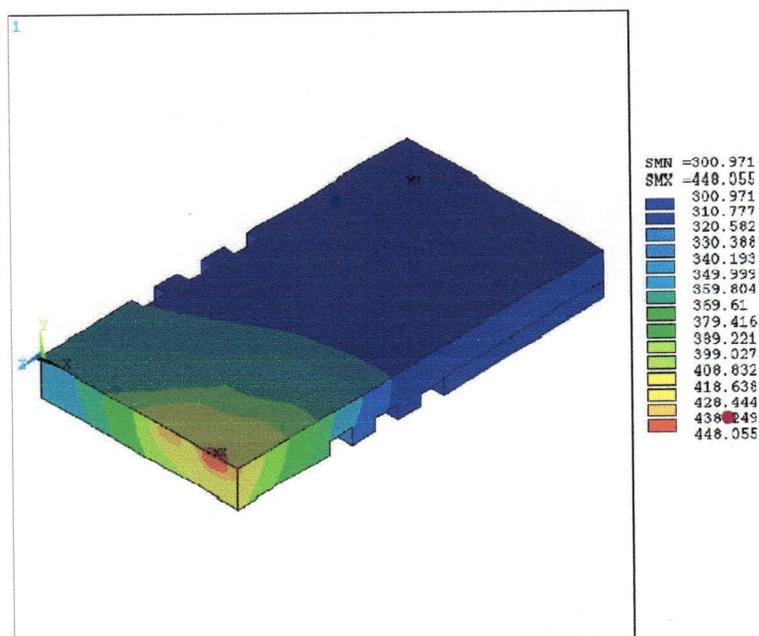


FIGURA 5.10 – Simulação no dressador de latão.

Como pode-se observar a temperatura máxima ficou em torno de 15% abaixo daquela encontrada para o dressador convencional. De acordo com a simulação, a temperatura na ferramenta de dressagem mudou de 527K para 448K. Isto pode ser considerado bom para a conservação da integridade das barras de diamante. Embora as aletas usadas sejam relativamente pequenas, o resultado obtido indica a vantagem desses elementos em toda dissipação de calor. Aumentar o volume do corpo do dressador é também outra maneira de melhorar a distribuição de temperatura na ferramenta de dressagem.

O mesmo valor de coeficiente de transferência de calor por convecção h foi usado apesar de poder não ser exatamente o caso. Quando as aletas foram acrescentadas ao dressador deveria, de acordo com INCROPERA & WITT (1992), haver um aumento no valor de h . Foi também considerado somente o número diferente de diamantes (3 no primeiro dressador feito com bronze e 4 no segundo feito com Latão). Isto também não é

exatamente verdadeiro, pois o último diamante gera menos calor por receber menos carga dos grãos abrasivos do rebolo.

Embora o desenvolvimento desse modelo contenha limitações, pode-se dizer que contém valores mais próximos dos reais encontrados em condições normais de trabalho. Ensaios adicionais deverão, no entanto, ser realizados em trabalhos futuros para que sejam avaliadas as implicações dessas limitações, principalmente quanto às modificações nas condições de dressagem.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Do presente trabalho pode-se chegar as seguintes conclusões:

- O modelo de elementos finitos desenvolvido contém dados realistas, obtidos experimentalmente, e certamente ajudará projetistas no desenvolvimento de novas ferramentas de dressagem com melhor performance em termos de distribuição de temperaturas.
- Usando um maior número de diamantes, há uma melhora na condução de calor para a liga no corpo do dressador e as superfícies de troca de calor aumentarão com as aletas, haverá menores temperaturas na ferramenta de dressagem durante o trabalho, o que poderá melhorar significativamente a performance da ferramenta.
- Os valores do coeficiente de transferência convectiva de calor, h , e o fluxo de calor, q_f , foram medidos experimentalmente usando-se uma condição particular de dressagem para operações de acabamento em retificação. As mudanças nessas condições, por exemplo a dressagem para operações de desbaste, pode afetar esses valores. Porém, as simulações com o modelo de Elementos Finitos indicam que a distribuição de temperaturas não é sensível a pequenas mudanças nestes parâmetros. As condições de trabalho teriam que ser consideravelmente modificadas para afetar significativamente a distribuição de temperatura obtida pelo modelo desenvolvido no Método de Elementos Finitos.

- O melhor modo para minimizar a temperatura na ferramenta de dressagem e, conseqüentemente preservar os diamantes é maximizar o volume da ferramenta de dressagem usando-se uma liga altamente condutiva para o corpo do dressador e adicionar aletas para melhor troca de calor com o fluido refrigerante.
- Para trabalhos futuros pode-se sugerir que novos projetos de dressadores sejam testados, inicialmente com o modelo de Elementos finitos seguido de testes práticos em ambiente de fábrica. Adicionalmente, novas ligas para o corpo do dressador podem ser testadas, contendo elementos metálicos mais condutivos, tais como cobre e prata. Novas configurações de aletas podem ainda ser incorporadas assim como outras qualidades de diamantes sintéticos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANSYS USER'S MANUAL (1995). Procedures, v.1.

ANSYS USER'S MANUAL (1995). Theory, v.4.

ARONSON, R.B. (1994). Precision dressing. *Manufacturing engineering*, v. 113, n. 3, p. 45-48, Sept.

BABU, N.R.; RADHAKRISHNAN, V. (1989). Investigations on laser dressing of grinding wheels - part II: grinding performance of a laser dressed aluminum oxide wheel. *Journal of engineering for industry*, v. 111, n. 3, p. 253 - 261, Aug.

BABU, N.R.; MURTI, Y.V.G.S.; RADHAKRISHNAN, V. (1989). Investigations on laser dressing of grinding wheels - part I: preliminary study. *Journal of engineering for industry*, v. 111, n. 30, p. 244 - 252. Aug.

BABU, N.R.; RADHAKRISHNAN, V. (1995). Influence of dressing feed on the performance of laser dressed Al_2O_3 wheel in wet grinding. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, v. 35, n. 5, p. 661 - 671, May.

BIANCHI, E.C.; OLIVEIRA, J.F.G. (1991). *Ação das condições de dressagem na vida de rebolos na retificação de precisão*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 11., São Paulo. *Anais. ABCM*, v. 3, p. 341-344, dez.

- CASSAGO JÚNIOR, H.; LADEIRA, L.A.C. (1995). *Equações Diferenciais Ordinárias*. Apostila do curso de matemática – USP – Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos.
- COELHO, R.T. (1996). *Modelagem e estudo da dissipação de calor em dressadores estáticos sinterizados*. Trabalho apresentado à FAPESP.
- DIRETRIZES PARA A ELABORAÇÃO DE DISSERTAÇÕES E TESES NA EESC/USP. (1996). Serviço de Biblioteca. 2ed., São Carlos, Brasil.
- HINTERMANN, H.E.; CHATTOPADHYAY, A.K. (1993). Low pressure synthesis of diamond coatings. *Annals of the CIRP*, v. 42, n. 2, p. 769.
- HUEBNER, K.H. (1994). *The finite element method for engineers*. New York, John Wiley & Sons.
- INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. (1992). *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Rio de Janeiro, LTC - Livros técnicos e científicos. Cap. 4, p. 78 - 92.
- KING, R.I.; HAHN, R.S. (1986). Handbook of modern grinding technology. In: AULT, W. *Truing and dressing of grinding wheels*. New York, Chapman and Hall. Cap. 4, p. 88 - 97.
- KRAR, S.F.; RATTERMAN, E. (1990). *Superabrasives - Grinding and machining with CBN and diamond*. Mc Graw - Hill publishing company, New York.
- KREITH, F. (1973). *Princípios da transmissão de calor*. São Paulo, Edgard Blücher. Cap. 1, p. 1 -13.
- KURIYAGAWA, N.; YOSHIDA, N.; SYOJI, K. (1996). In process dressing of resinoid-bonded ultra-fine grit diamond wheel using micro-abrasive jet technology. In: INTERNATIONAL MANUFACTURING ENGINEERING CONFERENCE, Storrs. *Proceedings Connecticut, USA*, p. 53 - 55.

- LI, X. (1995). A free-abrasive machining approach to dressing of resin-bonded CBN grinding wheels. *Journal of materials processing technology*. v. 48, n. 1-4, p. 223 -230, Jan.
- MALKIN, S. (1989). *Grinding technology - theory and applications of machining with abrasives*. England, Ellis Horwood . Cap. 4, p. 79 - 102.
- MAKSOU D T.M.A.; MOKBEL, A.A. (1996). New 'cooltip' dresser for alumina wheels. *Proceedings of international manufacturing engineering conference*, USA, p. 61-64, Aug.
- NAKAYAMA, K.; TAKAGI, J.; IRIE, E.; OKUNO, K. (1980). Sharpness evaluation of grinding wheel face by the grinding of steel ball. *CIRP Annals*. v. 1, n. 46, p. 261 - 264.
- NUSSBAUM, G.C. (1988). *Rebolos & Abrasivos*. São Paulo, Ícone.
- OHMORI, H. (1992). Electrolytic in - process dressing (ELID) grinding technique for ultraprecision mirror surface machining, *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng*, v. 26, n. 4, p. 273-278, Dec.
- OHMORI, H.; NAKAGAWA, T. (1995). Analysis of mirror surface generation of hard and brittle materials by ELID grinding with superfine grain metallic bond wheels. *Annals of the CIRP*, v. 1, n. 44, p. 287 - 290, Jan.
- OHMORI, H.; NAKAGAWA, T. (1997). Utilization of nonlinear conditions in precision grinding with ELID for fabrication of hard material components. *Annals of the CIRP*, v. 1, n. 46, p. 261 - 264, Jan.

- OLIVEIRA, J.F.G. (1989). *Tópicos avançados sobre o processo de retificação*. Apostila do curso de engenharia mecânica - USP - Escola de Engenharia de São Carlos.
- OLIVEIRA, J.F.G.; BIANCHI, E.C; SOUZA, G.F. (1992). O desempenho de rebolos pode ser controlado pela dressagem. *Máquinas e metais*, p. 12-25, jun.
- OLIVEIRA, J.F.G. (1994). Um novo sistema de controle em processo da afiação de rebolos. *Máquinas e metais*, n. 338, p. 144-151, mar.
- PERSON & BOUQUET. *Aplicações industriais do diamante*. (CATÁLOGO). São Paulo.
- PREMADIA. Diamond abrasives wheel sizes. (CATALOG). England.
- REZAEI, M.; SUTO, T.; NOGUCHI, H.; WAIDA, T. (1989). A novel dressing technique for diamond wheels. *Industrial diamond review*, v. 49, n. 535, p. 258 - 261.
- SEN, P.K. (1991). Wheel dressing and natural diamond. *Industrial diamond review*, v. 51, n. 532, p. 32-38.
- SHORE, P. (1993). 'ELID' for efficient grinding of super smooth surfaces. *Industrial diamond review*, v. 53, n. 559, p. 318 - 322.
- SILVA JÚNIOR, C.E. (1998). *Estudo Experimental do Desgaste de Dressadores Sinterizados com Perfil de Atuação Constante*. São Carlos. 102p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SILVA JÚNIOR, C.E.; COELHO, R.T. (1997). A dressagem de rebolos convencionais e superabrasivos aplicados em retificação de precisão - uma revisão bibliográfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 14., Bauru. *Anais*. São Paulo. p. 240 - 241.

- STEMMER, C.E. (1992). *Ferramentas de corte II*. Florianópolis, editora UFSC. Cap. 6, p. 301 - 306.
- TAMAKI, J.; KITAGAWA, T. (1992). Electrocontact discharge dressing of metal-bonded diamond wheel - part 1- truing efficiency and grinding performance, *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, v. 26, n. 4, p. 284 - 289, Dec.
- THALMANN, R. (1990). Dressing superabrasives wheels. *Abrasive Engineering society Magazine*, v. 31, n. 2, p. 16 - 18.
- TITA, V. (1999). *Análise Dinâmica Teórica e Experimental de Vigas Fabricadas a partir de Materiais Compósitos Poliméricos Reforçado*. São Carlos. 119p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- VIGNA, C.M. (1997). *Desenvolvimento de Dressadores Estáticos com Perfil de Atuação Constante*. São Carlos. /Relatório Científico – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/.
- WESTKÄMPER, E. (1995). Grinding assisted by Nd: YAG lasers. *Annals of the CIRP*, v.1, n.44, p. 317 - 320, Jan.
- WILLIAMS, J.; YAZDZIK, H. (1993). The in-process dressing characteristics of vitrified bonded CBN grinding wheels. *Transactions of ASME*. v. 115, p. 200.
- YOKOGAWA, M.; YOKOGAWA, K. (1992). Development of an untended dressing system for vitrified CBN wheels. *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, v. 26, n. 4, p. 290, Dec.

APÊNDICE 1

ANÁLISE DO MATERIAL TÉRMICO UTILIZANDO O ANSYS52

O ANSYS é um pacote comercial de Elementos Finitos que permite análises de estruturas através da simulação de um modelo teórico computacional. O seu “solver” é capaz de realizar análises estruturais estáticas e dinâmicas, linear ou não-linear. Ele também inclui análises de transferência de calor, bem como fluídicas e eletromagnéticas. Os pré e pós-processadores também estão inclusos no pacote, mas podem ser executados através de outros programas, tais como o PRO-ENGINEER (PTC).

Este apêndice trata da análise de material térmico via ANSYS versão 5.2. Porém informações adicionais podem ser encontradas no ANSYS User’s Manual.

Elementos

O ANSYS5.2 possui 3 elementos específicos para modelagem de um sólido com capacidade de condução térmica tridimensional. O primeiro é denominado SOLID70, ele é um elemento que possui 8 nós e cada um desses nós tem 1 grau de liberdade (temperatura), é aplicável em análises térmicas estáticas ou transientes. O segundo é denominado SOLID90, ele é um elemento de uma versão de ordem maior que o elemento térmico de 8 nós (SOLID70). Este elemento possui 20 nós e cada um desses nós tem 1 grau de liberdade (temperatura), ele tem compatíveis temperaturas de formas e são bem aplicados em modelos com curvas nos contornos. O terceiro elemento é denominado SOLID87, ele é um elemento que possui 8 nós e cada um desses nós tem 1 grau de liberdade (temperatura). É bastante aplicado em modelos com meshes irregulares (tal como produzidas em vários sistemas de CAD/CAM).

O pacote permite a especificação do material que pode ser analisado como isotrópico, podendo as propriedades especificadas assumir valores diferentes, de acordo com os materiais, são elas:

K_{xx} = condutividade térmica do material;

DENS = densidade do material;

NUXY = coeficiente de Poisson na direção x – fornecido pelo ANSYS;

C = calor específico do material.

O elemento SOLID70 foi escolhido para as análises e a Figura (A-1) mostra o elemento com mais detalhes:

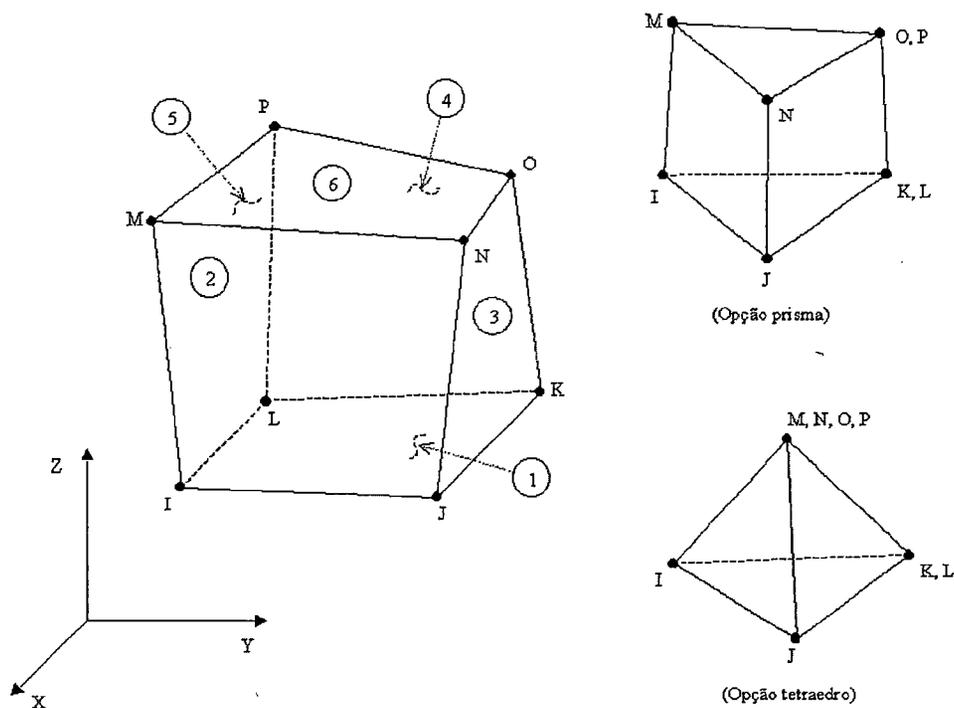


Figura (A-1) – Elemento SOLID70

APÊNDICE 2

ANÁLISE TÉRMICA UTILIZANDO ANSYS52

Uma análise térmica em estado permanente calcula os efeitos de carregamentos térmicos permanentes em um objeto. Ela é comumente usada como um precursor à análise térmica transiente (ajuda a estabelecer as condições iniciais) ou como o último passo de uma análise térmica transiente, quando todos os efeitos transientes são considerados reduzidos. A análise térmica em estado permanente é usada para determinar temperaturas, gradientes térmicos, taxa do fluxo de calor e os fluxos de calor em um objeto devido a carregamentos térmicos que não variam com o tempo. Os tipos de carregamentos que podem ser aplicados incluem convecções, fluxos de calor, taxa do fluxo de calor, taxa de geração de calor e temperaturas específicas. Uma análise térmica em estado permanente pode ser linear, com propriedades do material constantes, ou não-linear com a temperatura e propriedades do material dependentes. Para a maioria dos materiais, as propriedades térmicas variam com a temperatura, assim a análise é usualmente não-linear. Também a inclusão de efeitos de radiação produzem a análise não-linear.

APÊNDICE 3

PROGRAMA CNC

Programa CNC utilizado nas operações de dressagem:

%9 Programa Principal

N10 G01 X200. F60000 (Recoo para segurança);
N15 G0 ZD45 K1. (Posição em Z do dressador);
N16 P99 = 2 (Parâmetro referente ao Looping);
N20 G37 IP1 (Compensa a primeira profundidade de dressagem;
N25 G01 XD44 IP1 F60000 (Posição em X do dressador com profundidade P1);
N26 G04 H10 (Tempo de espera da máquina);
N30 G10 XD44 (Atualiza coordenada);
N35 G01 K- D49 FP3 (Dressagem com avanço P3);
N55 G0 X200. (Recoo de segurança);
N60 ZD45 K1. (Posição em Z do dressador);
N65 G37 IP2 (Compensa a segunda profundidade de dressagem);
N70 G01 XD44 IP2 F60000 (Posição em X do dressador com profundidade P2);
N71 G04 H10 (Tempo de espera da máquina);
N72 G10 XD44 (Atualiza coordenada);
N75 G01 K-D49 FP4 (Dressagem com avanço P4);
N90 G0 X200. (Recoo de segurança);
N91 G0 ZD45 K1. (Posição em Z do dressador);
N95 P99 = P99-1 P99#0 L20 (Looping do programa a partir de N20);
N100 M5 (Desliga o eixo árvore);

N110 M30 (Para o programa);

% 8

N08 G94 (Unidades das coordenadas);

N10 M11 S45 (Liga o rebolo);

N20 M8 (Liga o fluido de corte);

N30 E9 P1 = -20 P2 = -30 P3 = 30000 P4 = 30000 (Chama o programa principal e entra com os parâmetros a serem usados);

N40 M9 (Desliga o fluido de corte);

N50 M30 (Para o programa);

Onde P1, P2 = profundidade de dressagem

P3, P4 = velocidade ou avanço de dressagem

D45 = Referencia em Z do dressador

D44 = Referencia em X do dressador

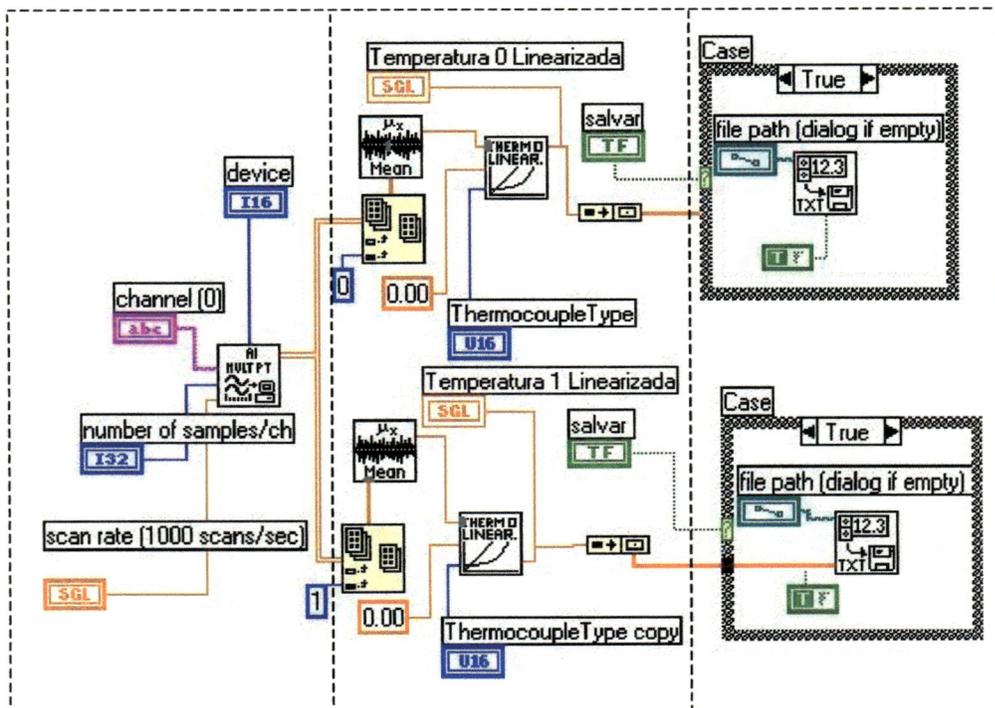
I, K = parâmetros de implementação

APÊNDICE 4

PROGRAMA LAB VIEW

Telas do programa LabView utilizado na obtenção dos sinais dos termopares para plotar os gráficos relativos a cada operação de dressagem.

Tela do programa:



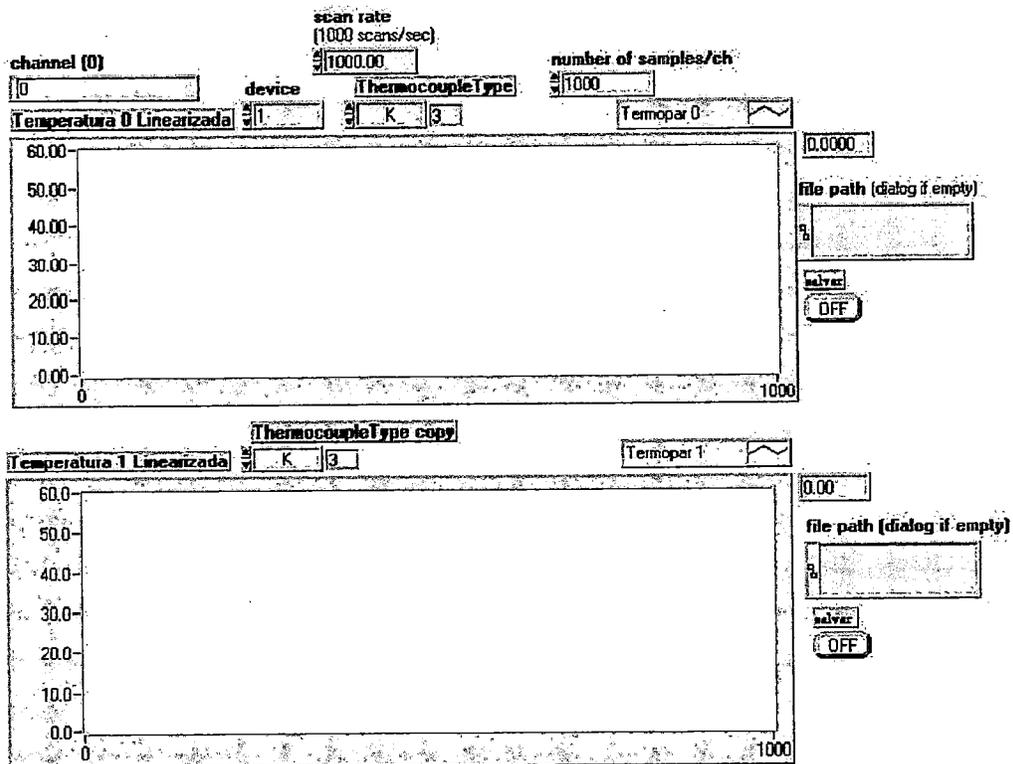
Os sinais da placa de aquisição são lidos e enviados para uma vi como 2 vetores

Os 2 vetores se separam, é calculado uma média, linearizado e plotado no gráfico mostrado na tela.

A saída são 2 vetores que são salvos como arquivos .xlx (Excel).



Tela gráfica:



Os gráficos exibidos na tela apresentarão a variação da temperatura em função do tempo de acordo com a leitura feita pelo termopar do tipo K, com a opção ao lado de cada gráfico de salvar os arquivos no modo .xls (EXCEL) para toda tela que o autor achar necessária.