



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

*- Mestrado*

**ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS DE  
EIXO-ÁRVORES DE MÁQUINAS-FERRAMENTA  
EM ALTAS ROTAÇÕES**

por

Francisco Augusto Vieira da Silva

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da  
Paraíba para obtenção do grau de Mestre.*

**João Pessoa - Paraíba**

**Abril, 2011**

**FRANCISCO AUGUSTO VIEIRA DA SILVA**

**ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS DE  
EIXO-ÁRVORES DE MÁQUINAS-FERRAMENTA  
EM ALTAS ROTAÇÕES**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

**Orientador: Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva**

S586a *Silva, Francisco Augusto Vieira da.*  
*Análise dos deslocamentos térmicos de eixo-árvores de*  
*máquinas-ferramenta em altas rotações / Francisco Augusto*  
*Vieira da Silva.- João Pessoa, 2011.*  
99f. : il.

*Orientador: João Bosco de Aquino Silva*  
*Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT*  
1. Engenharia Mecânica. 2. Eixo-árvore. 3. Máquina-  
ferramenta. 4. Deslocamentos Térmicos.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Ademilton Galdino da Silva e Maria do Socorro Vieira da Silva, aos meus irmãos por todo companheirismo, e principalmente, ao meu Senhor, Meu Deus.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço as orações e aos votos de conquista dados pelos amigos.

Ao apoio financeiro concedido pela CAPES.

Aos meus respeitáveis companheiros e amigos do Laboratório de Engenharia de Precisão por respeitarem as leis do recinto.

Ao professor José Carlos de Lima Junior pelo apoio e pelos ensinamentos imensuráveis.

Ao meu orientador professor João Bosco de Aquino Silva por sua excelência em ser mestre, doutor e um padrão para a sociedade.

# **ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS TÉRMICOS DE EIXO-ÁRVORES DE MÁQUINAS-FERRAMENTA EM ALTAS ROTAÇÕES**

## **RESUMO**

As máquinas-ferramenta desempenham um papel fundamental nas produções industriais modernas, com isso o avanço tecnológico das indústrias das máquinas-ferramenta vem crescendo ao longo das últimas décadas. A usinagem com Alta Velocidade de corte – HSM é largamente utilizada para usinagem de superfícies complexas e de forma livre com alta exatidão geométrica e dimensional. O eixo-árvore é um dos principais elementos de uma máquina-ferramenta. Então, se torna necessário conhecer o grau de influências das principais fontes internas de calor numa máquina-ferramenta. Estas provêm basicamente: Das transmissões dos motores elétricos; Dos atritos nos acionamentos e caixas de engrenagens; Do processo de usinagem (ação de corte, cavacos, peça); Dos atritos nos mancais e guias. A exatidão dimensional e geométrica das peças usinadas dependem principalmente da performance do eixo-árvore. Para que seja admitida a idéia de um modelo holístico, e então, propor uma possível otimização para uma usinagem de alta exatidão é necessário o estudo e a investigação do comportamento mecânico e térmico do eixo-árvore. Por isso, neste trabalho é apresentada a análise, baseada no método dos elementos finitos dos deslocamentos mecânicos e térmicos, bem como, a determinação da velocidade crítica do eixo-árvore da máquina-ferramenta em alta velocidade de corte (HSM).

Palavras-chave: Eixo-árvore, Máquina-ferramenta, Deslocamentos Térmicos.

# **ANALYSIS OF MECHANICAL AND THERMAL DISPLACEMENTS IN HIGH SPEED MACHINE TOOL SPINDLES**

## **ABSTRACT**

Machine tools play a key role in modern industrial production; therefore the technological development of machine tool industry has grown over the past decades. High Speed Machining (HSM) is widely used for machining complex and free form surfaces with high geometrical and dimensional accuracy. The spindle is one of the main items of a machine tool. Thus, it becomes necessary to know the influence levels of the main internal sources of heat in a machine tool. These sources basically derive from: transmission of electric engines; friction in drives and gear boxes; machining process (cutting, chip, workpiece); friction in bearings and guides. The dimensional and geometric accuracy of machined parts depends mainly on the performance of the spindle. To admit the idea of a holistic model, and then propose a possible optimization for a high-accuracy machining it is necessary to study and investigate the mechanical and thermal behaviour of the spindle. For that reason, this paper presents an analysis, based on the finite element method, of the mechanical and thermal displacements, as well as a determination of the critical speed of the spindle of the machine tool at high cutting speed.

Keywords: Spindle, Machine Tool, Thermal Displacements

## SUMÁRIO

<b>Índice das Figuras.....</b>	<b>iv</b>
<b>Índice das Tabelas.....</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Símbolos.....</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Abreviaturas.....</b>	<b>xv</b>
<b>1 APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO GERAL.....	2
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
<b>2 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE PROJETO DE EIXO-ÁRVORE DE MÁQUINA-FERRAMENTA.....</b>	<b>4</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	4
2.2 AS MÁQUINAS-FERRAMENTA.....	4
2.2.1 Eixos-árvore.....	6
2.3 ESFORÇOS ATUANTES.....	9
2.3.1 Forças oriundas do processo de usinagem.....	9
2.3.2 Forças oriundas do processo de acionamento.....	11

<b>2.4</b>	<b>MATERIAIS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.5</b>	<b>USINAGEM EM ALTA VELOCIDADE.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5.1</b>	<b>HSM x Usinagem convencional.....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Vantagens e desvantagens do processo HSM.....</b>	<b>21</b>
<b>2.6</b>	<b>CONCLUSÃO II.....</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>DETERMINAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DA LINHA ELÁSTICA DO EIXO E DA VELOCIDADE CRÍTICA.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2</b>	<b>DESLOCAMENTO DA LINHA ELÁSTICA.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3</b>	<b>VELOCIDADES CRÍTICAS.....</b>	<b>30</b>
<b>3.4</b>	<b>PRINCÍPIOS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.5</b>	<b>APLICAÇÃO DO MEF PARA CURVA DO DESLOCAMENTO.....</b>	<b>34</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Eixo-árvore de seção uniforme.....</b>	<b>36</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Eixo-árvore de seção vazada.....</b>	<b>39</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Eixo-árvore de seção variável.....</b>	<b>42</b>
<b>3.6</b>	<b>ANÁLISE DA VELOCIDADE CRÍTICA POR MEIO DO MEF.....</b>	<b>51</b>
<b>3.6.1</b>	<b>Simulação para determinação dos modos de vibração.....</b>	<b>51</b>
<b>3.7</b>	<b>CONCLUSÃO III.....</b>	<b>54</b>
<b>4</b>	<b>DESLOCAMENTOS TÉRMICOS EM MÁQUINAS-FERRAMENTA.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>PRINCÍPIOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR.....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Radiação.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Convecção.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Condução.....</b>	<b>58</b>
<b>4.3</b>	<b>PRINCIPAIS FONTES DE CALOR DE MÁQUINAS-FERRAMENTA.....</b>	<b>61</b>

<b>4.4</b>	<b>DEFORMAÇÕES LINEARES E VOLUMÉTRICAS.....</b>	<b>65</b>
<b>4.5</b>	<b>ANÁLISE TÉRMICA UTILIZANDO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.</b>	<b>69</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Simulações em eixos-árvore maciços.....</b>	<b>69</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Simulações em eixos-árvore vazados.....</b>	<b>73</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Simulações em eixos-árvore escalonados.....</b>	<b>78</b>
<b>4.6</b>	<b>CONCLUSÃO IV.....</b>	<b>93</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>94</b>
<b>5.1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>94</b>
<b>5.2</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>95</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>96</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>2.1</b>	<b>Tendências do projeto das máquinas-ferramenta.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Eixo escalonado maciço.....</b>	<b>7</b>
<b>2.3</b>	<b>Eixo vazado.....</b>	<b>7</b>
<b>2.4</b>	<b>Eixo cônico.....</b>	<b>8</b>
<b>2.5</b>	<b>Eixo ranhurado.....</b>	<b>8</b>
<b>2.6</b>	<b>Eixo roscado.....</b>	<b>8</b>
<b>2.7</b>	<b>Forças geradas durante um processo de usinagem.....</b>	<b>9</b>
<b>2.8</b>	<b>Decomposição dos esforços sobre os eixos X e Y.....</b>	<b>12</b>
<b>2.9</b>	<b>Esforços atuantes devido ao processo de usinagem em uma posição genérica.....</b>	<b>13</b>
<b>2.10</b>	<b>Esforços atuantes devidos ao acionamento em uma posição genérica.</b>	<b>14</b>
<b>2.11</b>	<b>Racionalização do processo de fabricação de uma matriz.....</b>	<b>18</b>
<b>2.12</b>	<b>Faixas de velocidades de corte para diferentes materiais.....</b>	<b>19</b>
<b>2.13</b>	<b>Velocidades de corte convencional e HSC.....</b>	<b>19</b>
<b>2.14</b>	<b>Características com o aumento da velocidade de corte.....</b>	<b>20</b>
<b>2.15</b>	<b>Tecnologias relacionadas ao processo HSC.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Cargas positivas e resultados das forças internas.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Deslocamento total na ponta do eixo-árvore.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3</b>	<b>Deslocamento devido à componente <math>F_{y1}</math>.....</b>	<b>28</b>
<b>3.4</b>	<b>Deslocamento devido à componente <math>F_{y1}</math> e a deformação dos mancais.</b>	<b>29</b>

<b>3.5</b>	<b>Deslocamento devido à componente <math>F_{y2}</math>.....</b>	<b>29</b>
<b>3.6</b>	<b>Deslocamento devido à componente <math>F_{y2}</math> e a deformação dos mancais. ....</b>	<b>29</b>
<b>3.7</b>	<b>Deslocamento devido ao momento <math>M_{yz}</math>.....</b>	<b>30</b>
<b>3.8</b>	<b>Discretização de um domínio (<math>\Omega</math>) em elementos finitos.....</b>	<b>33</b>
<b>3.9</b>	<b>Eixo-árvore discretizado submetido a uma carga de usinagem.....</b>	<b>36</b>
<b>3.10</b>	<b>Simulação unidimensional do eixo-árvore.....</b>	<b>37</b>
<b>3.11</b>	<b>Comportamento da linha elástica do eixo-árvore, material alumínio 2014. ....</b>	<b>38</b>
<b>3.12</b>	<b>Comparação dos deslocamentos da linha elástica dos materiais, aço 4340 e do alumínio 2014.....</b>	<b>39</b>
<b>3.13</b>	<b>Comparativo dos deslocamentos da ponta do eixo-árvore para dois tipos de seção transversal circular, aço 4340.....</b>	<b>40</b>
<b>3.14</b>	<b>Comportamento de um eixo-árvore segundo a variação do diâmetro interno.....</b>	<b>41</b>
<b>3.15</b>	<b>Modelo de um eixo-árvore com seções múltiplas.....</b>	<b>43</b>
<b>3.16</b>	<b>Curva elástica do eixo-árvore escalonado na direção y, aço 4340.....</b>	<b>44</b>
<b>3.17</b>	<b>Curva elástica do eixo-árvore escalonado na direção x, aço 4340.....</b>	<b>46</b>
<b>3.18</b>	<b>Suavização da curva do deslocamento do eixo-árvore.....</b>	<b>47</b>
<b>3.19</b>	<b>Curvas dos deslocamentos para posições genéricas de usinagem e acionamento referentes à direção y.....</b>	<b>49</b>
<b>3.20</b>	<b>Curvas dos deslocamentos para posições genéricas de usinagem e acionamento referentes à direção x.....</b>	<b>50</b>
<b>3.21</b>	<b>Primeiro modo de vibração, 1354 Hz.....</b>	<b>53</b>
<b>3.22</b>	<b>Segundo modo de vibração, 3537 Hz.....</b>	<b>53</b>
<b>3.23</b>	<b>Terceiro modo de vibração, 9413 Hz.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Transferência de calor unidimensional por condução.....</b>	<b>59</b>

<b>4.2</b>	<b>Fontes de Calor de máquinas-ferramenta.....</b>	<b>62</b>
<b>4.3</b>	<b>Cadeias de efeitos térmicos.....</b>	<b>64</b>
<b>4.4</b>	<b>Modelo computacional do eixo-árvore de seção uniforme.....</b>	<b>70</b>
<b>4.5</b>	<b>Discretização do modelo e aplicação das condições de contorno.....</b>	<b>71</b>
<b>4.6</b>	<b>Gradiente de temperatura do eixo-árvore em regime estacionário.....</b>	<b>72</b>
<b>4.7</b>	<b>Distribuição da Temperatura da Superfície do eixo-árvore.....</b>	<b>72</b>
<b>4.8</b>	<b>Curva da temperatura da superfície para o aço e o alumínio.....</b>	<b>73</b>
<b>4.9</b>	<b>Corte em vista isométrica do eixo-árvore com seção circular vazada.</b>	<b>74</b>
<b>4.10</b>	<b>Distribuição da temperatura no tempo inicial (t = 0h).....</b>	<b>75</b>
<b>4.11</b>	<b>Distribuição da temperatura para o tempo final (t = 4h).....</b>	<b>75</b>
<b>4.12</b>	<b>Distribuição gráfica da temperatura do eixo-árvore em regime transiente.....</b>	<b>76</b>
<b>4.13</b>	<b>Distribuição da temperatura de uma amostra para os principais materiais para t = 24 min.....</b>	<b>77</b>
<b>4.14</b>	<b>Comparativo da temperatura superficial segundo suas seções transversais para t = 24 min.....</b>	<b>78</b>
<b>4.15</b>	<b>Vista de corte isométrica do eixo-árvore escalonado.....</b>	<b>79</b>
<b>4.16</b>	<b>Distribuição da temperatura partindo da origem para t = 5 min.....</b>	<b>80</b>
<b>4.17</b>	<b>Temperaturas da superfície do eixo-árvore em aço durante os trinta primeiros minutos de funcionamento.....</b>	<b>81</b>
<b>4.18</b>	<b>Eixo-árvore em regime estacionário, t = 170 min.....</b>	<b>82</b>
<b>4.19</b>	<b>Distribuição da temperatura superficial do aço para t = 10 min, 20 min e 30 min.....</b>	<b>82</b>
<b>4.20</b>	<b>Curva da temperatura superficial regime estacionário.....</b>	<b>83</b>
<b>4.21</b>	<b>Distribuição da temperatura superficial do titânio para t = 10 min, 20 min</b>	

e 30 min.....	85
4.22 Temperatura superficial do aço e do titânio para $t = 30$ min.....	85
4.23 Temperatura na ponta do eixo-árvore do aço e do titânio, $t = 170$ min..	86
4.24 Temperatura na ponta do eixo-árvore em regime estacionário.....	86
4.25 Deslocamento térmico do eixo-árvore submetido a determinadas temperaturas.....	87
4.26 Simulação para determinação dos deslocamentos na direção $x$ .....	88
4.27 Simulação para determinação dos deslocamentos na direção $y$ .....	88
4.28 Simulação para determinação dos deslocamentos na direção $z$ .....	89
4.29 Deslocamentos superficial do eixo-árvore na direção $y$ para $t = 10$ min, 20 min e 30 min.....	90
4.30 Deslocamento nas três direções para o aço e titânio quando $t = 30$ min.	90
4.31 Comparativo dos deslocamentos entre aço e titânio para $t = 170$ min..	91
4.32 Deslocamentos nas três direções para o eixo em titânio quando $t = 335$ min.....	92
4.33 Deslocamento na direção $y$ para $t = 170$ min e $t = 335$ min.....	92

**ÍNDICE DE TABELAS**

<b>2.1</b>	<b>Aços mais utilizados na confecção de eixos-árvore.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Características dos materiais utilizados no desenvolvimento de eixos-árvore.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>Comparativo entre a usinagem convencional e a HSC.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b>Equação da linha elástica para vigas bi-apoiadas.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>Comparativo dos deslocamentos do eixo-árvore bi-apoiado.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3</b>	<b>Deslocamentos para um eixo-árvore com seção maciça e vazada.....</b>	<b>40</b>
<b>3.4</b>	<b>Deslocamentos do eixo-árvore variando os diâmetros internos.....</b>	<b>42</b>
<b>3.5</b>	<b>Dimensões dos elementos.....</b>	<b>43</b>
<b>3.6</b>	<b>Comparativo dos deslocamentos e das rotações referente ao eixo y.....</b>	<b>44</b>
<b>3.7</b>	<b>Comparativo dos deslocamentos e das rotações referente ao eixo x.....</b>	<b>45</b>
<b>3.8</b>	<b>Deslocamentos referentes à direção y.....</b>	<b>47</b>
<b>3.9</b>	<b>Deslocamentos dos diversos ângulos de transmissão referentes à direção y.....</b>	<b>49</b>
<b>3.10</b>	<b>Deslocamentos dos diversos ângulos de transmissão referentes à direção x.....</b>	<b>50</b>
<b>3.11</b>	<b>Resultados da análise modal em três eixos-árvore de diferentes comprimentos.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>Amostras de determinadas temperaturas superficiais obtidas com o NX.</b>	<b>71</b>

<b>4.2</b>	<b>Temperatura da ponta do eixo-árvore para <math>t = 24\text{min}</math> e <math>t = 4\text{h}</math>.....</b>	<b>77</b>
<b>4.3</b>	<b>Temperatura da ponta do eixo-árvore segundo as seções transversais.</b>	<b>78</b>
<b>4.4</b>	<b>Coleta das temperaturas da superfície do eixo-árvore em aço.....</b>	<b>83</b>
<b>4.5</b>	<b>Coleta das temperaturas da superfície do eixo-árvore em titânio.....</b>	<b>84</b>
<b>4.6</b>	<b>Comparativo dos deslocamentos na ponta do eixo-árvore para <math>t = 30</math> min.....</b>	<b>91</b>

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$[K]$	<b>Matriz de Rigidez</b>
$[M]$	<b>Matriz de massa consistente</b>
$\{N\}^i$	<b>Matriz das funções de forma</b>
$\{d\}$	<b>Amplitudes nodais</b>
$\{T\}^i$	<b>Temperatura Nodal</b>
$\{F^e\}$	<b>Vetor de carga no regime estático</b>
$\{F(t)\}$	<b>Vetor de carga no regime dinâmico</b>
$\nabla$	<b>Gradiente tridimensional</b>
$\Delta T$	<b>Variação de Temperatura</b>
$\alpha$	<b>Coeficiente de expansão térmica linear</b>
$\bar{\alpha}$	<b>Coeficiente de expansão térmica linear médio</b>
$\alpha_1$	<b>Posição genérica da força de usinagem</b>
$\alpha_2$	<b>Posição genérica da força de acionamento</b>
$\alpha_t$	<b>Difusividade térmica</b>
$\beta$	<b>Ângulo de pressão</b>
$\delta v$	<b>Deslocamento virtual</b>
$\varepsilon$	<b>Deformação específica</b>

$\epsilon_R$	<b>Emissividade</b>
$\theta_e$	<b>Rotação do eixo-árvore dado pelo ELFEA2</b>
$\theta_n$	<b>Rotação do eixo-árvore dado pelo NX</b>
$\kappa$	<b>Taxa com a qual a inclinação varia ao longo do eixo da viga</b>
$\lambda$	<b>Autovalor</b>
$\mu$	<b>Fator de Poisson</b>
$\sigma$	<b>Tensão Mecânica</b>
$\sigma_{sb}$	<b>Constante de Stefan-Boltzman</b>
$\omega_1$	<b>Freqüência natural</b>
$\Omega$	<b>Domínio Discretizado</b>
$\Gamma$	<b>Contorno do domínio</b>
$\rho, \gamma$	<b>Peso específico ou Massa específica</b>
$\gamma \cdot c_p$	<b>Capacidade calorífica volumétrica</b>
$\gamma_V$	<b>Coefficiente de expansão volumétrica</b>
$\bar{\gamma}_V$	<b>Coefficiente de expansão volumétrica médio</b>
<b>A</b>	<b>Área da seção transversal</b>
<b>A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub></b>	<b>Constantes avaliadas pelas condições iniciais</b>
<b>A</b>	<b>Avanço de corte</b>
<b>C</b>	<b>Constante avaliada pela condição de fronteira</b>
<b>c<sub>p</sub></b>	<b>Calor específico</b>
<b>DFA</b>	<b>Distância entre a ponta do eixo-árvore e a força de usinagem</b>
<b>DP</b>	<b>Diâmetro primitivo de usinagem</b>
<b>DM</b>	<b>Diâmetro de trabalho da ferramenta</b>

<b><math>D_e</math></b>	<b>Diâmetro externo</b>
<b><math>D_i</math></b>	<b>Diâmetro interno</b>
<b><math>dT/dx</math></b>	<b>Gradiente de Temperatura</b>
<b>CA</b>	<b>Coefficiente de avanço</b>
<b>COEF</b>	<b>Coefficiente de carga</b>
<b>CR</b>	<b>Coefficiente de recuo</b>
<b>E</b>	<b>Módulo de elasticidade longitudinal</b>
<b><math>E_m</math></b>	<b>Poder Emissivo da Radiação</b>
<b>F1</b>	<b>Projeção da força de usinagem</b>
<b>F2</b>	<b>Projeção da força de acionamento</b>
<b>FA</b>	<b>Força de avanço</b>
<b>FC</b>	<b>Força de corte</b>
<b>FH</b>	<b>Projeção horizontal da força de acionamento</b>
<b>FN</b>	<b>Força Normal</b>
<b>FT</b>	<b>Força Tangencial</b>
<b>G</b>	<b>Aceleração gravitacional</b>
<b>H</b>	<b>Coefficiente de convecção, Função de interpolação Hermitiana</b>
<b>I</b>	<b>Momento de inércia de área</b>
<b><math>K_{s1.1}</math></b>	<b>Constante específica do metal para uma seção de corte de 1mm de comprimento por 1mm de largura</b>
<b>k</b>	<b>Condutividade térmica</b>
<b><math>k_x</math></b>	<b>Condutividade térmica associado à direção x</b>
<b>L, <math>L_T</math></b>	<b>Comprimento total do eixo</b>

$L_A$	Comprimento do eixo-árvore entre os apoios
$L_B$	Comprimento do eixo-árvore em balanço
$M$	Momento fletor
$M_{xz}$	Momento fletor no plano xz
$M_{yz}$	Momento fletor no plano yz
$m$	Massa distribuída por unidade de comprimento
$\dot{q}$	Taxa de geração de calor interna por unidade de volume
$q''_{rad}$	Taxa líquida de transferência de calor por radiação
$q''_h$	Taxa de transferência de calor por convecção
$q''_x$	Taxa de transferência de calor por condução na direção x
PR1	Relação entre a potência de corte e a potência da máquina
PR2	Relação entre a potência de acionamento e a potência da máquina
PT	Potência da máquina
$p$	Profundidade de corte
RT	Velocidade de rotação
$T_s$	Temperatura da superfície
$T_{viz}$	Temperatura da vizinhança
$T_\infty$	Temperatura do fluido
$T(x,y,z)$	Campo Escalar da Temperatura
$T$	Tempo
$V$	Esforço Cortante
$V_{Si}$	Volume do sólido inicial
$V_S$	Volume do sólido

$v$	<b>Deslocamento do eixo-árvore na posição <math>x</math></b>
$W$	<b>Força atuante na linha de centro das polias</b>
$w(x,t)$	<b>Carregamento estrutural</b>
$x$	<b>Posição do eixo-árvore com relação a origem</b>
$\theta$	<b>Ângulo de posição</b>
$Y$	<b>Deflexão da viga</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ABNT</b>	<b>Associação Brasileira de Normas Técnicas</b>
<b>AEF</b>	<b>Análise de Elementos Finitos</b>
<b>CAD</b>	<b>Computer Aided Design</b>
<b>CAE</b>	<b>Computer Aided Engineering</b>
<b>CAM</b>	<b>Computer Aided Manufacturing</b>
<b>CNC</b>	<b>Controle Numérico Computadorizado</b>
<b>DIN</b>	<b>Deutsches Institut für Normung</b>
<b>HSC</b>	<b>High Speed Cutting</b>
<b>HSM</b>	<b>High Speed Machining</b>
<b>MEF</b>	<b>Método dos Elementos Finitos</b>
<b>SAE</b>	<b>Society of Automotive Engineers</b>

# CAPÍTULO I

## APRESENTAÇÃO

### 1.1 INTRODUÇÃO

As modernas máquinas-ferramenta estão sendo desenvolvidas para uma alta exatidão e alta velocidade de usinagem, então, as análises dinâmicas, cinemáticas e da transferência de calor se tornam bastante complexas e esses fatores têm se tornado barreiras para o desenvolvimento de um modelo computacional ótimo das máquinas-ferramenta. A modelagem precisa é a base para os projetos de melhorias por meio de análises e otimizações das propriedades operacionais dos centros de usinagem e minimizações do tempo de prototipagem e custo (MODRZYCKI *et al.*, 2005).

A introdução de novas metodologias de projeto, voltadas à sistematização do conhecimento, orientações de desenvolvimento de projetos voltadas à fabricação, montagem, ajustagem, entre outras, permitiram uma racionalização e otimização do desenvolvimento de máquinas-ferramenta. O uso de sistemas computacionais para auxílio ao projeto, tais como os CAE, CAD, CAM, CAPP, etc., permitem uma maior otimização do projeto de máquinas-ferramenta (STOETERAU, 2004).

As máquinas-ferramenta estão sujeitas a diversos fatores que influenciam a qualidade geométrica e dimensional da peça de trabalho que variam entre: condições climáticas, condições do ambiente em que se encontra instalado o centro de usinagem, vibrações naturais do ambiente, e principalmente os fatores internos, ou seja, os próprios que já acompanham a máquina-ferramenta, tais como, os carregamentos mecânicos e térmicos. As influências térmicas podem gerar deformações nas estruturas, logo, torna-se necessário o conhecimento de todos os parâmetros térmicos, por exemplo, os deslocamentos causados pelas deformações térmicas e as distribuições de

temperatura, onde esses afetarão a exatidão de giro do eixo-árvore, em particular, quando se trata de alta qualidade de produção. Para que seja admitida a idéia de um modelo holístico, e então, propor uma possível otimização para uma usinagem de alta exatidão é necessário o estudo e a investigação do comportamento térmico e estrutural das máquinas-ferramenta.

## **1.2 OBJETIVO GERAL**

Analisar os deslocamentos térmicos de um eixo-árvore de uma máquina-ferramenta de alta rotação utilizando o Método dos Elementos Finitos.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudar os principais parâmetros de projeto de eixo-árvore;
- Determinar as principais fontes de calor geradas por uma máquina-ferramenta;
- Determinar os deslocamentos causados pelas fontes de calor no eixo-árvore do ponto de vista da engenharia de precisão;
- Aplicar o Método dos Elementos Finitos em modelos de eixos-árvore para determinação dos deslocamentos térmicos;
- Comparar os resultados do Método dos Elementos Finitos com os resultados do modelo analítico.

## **1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está organizada do seguinte modo:

O capítulo II consta dos principais parâmetros de projeto de eixo-árvore de máquinas-ferramenta, desde, os esforços atuantes durante o funcionamento da máquina-ferramenta até os principais tipos de materiais utilizados na fabricação do mesmo. Seguido de um levantamento bibliográfico sobre as pesquisas mais recentes da área de máquina-ferramenta, bem como, a explanação da mais recente tecnologia de usinagem em alta velocidade.

O capítulo III explana conceitos fundamentais para determinação da curva de deslocamento e da velocidade crítica do eixo-árvore. Aborda também, os princípios do

Método dos Elementos Finitos e finaliza aplicando por meio de um pacote computacional o MEF para determinação do deslocamento da linha elástica em três diferentes tipos de geometria de eixos-árvore nas mais distintas condições de usinagem. Por fim, também é determinada por análise numérica a velocidade crítica do eixo-árvore.

O capítulo IV traz os principais conceitos e princípios da transmissão de calor. As principais fontes de calor de uma máquina-ferramenta são mapeadas; o capítulo tem como alvo enfatizar as principais influências térmicas em um eixo-árvore expondo a influência das suas deformações lineares e volumétricas dentro do campo da engenharia de precisão. Também, traz a aplicação do MEF, agora, aplicado para a determinação dos deslocamentos térmicos. Diversas análises nas mais diferentes condições são realizadas com o intuito de quantificar os erros ocasionados pelo campo térmico.

O Capítulo V apresenta a conclusão deste trabalho de pesquisa com sugestões para futuros trabalhos.

## **CAPÍTULO II**

### **PRINCIPAIS PARÂMETROS DE PROJETO DE EIXO-ÁRVORE DE MÁQUINA-FERRAMENTA**

#### **2.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica das máquinas-ferramenta em geral. O capítulo inicia com a seção 2.2 apresentando o histórico da tecnologia de usinagem seguido de conceitos básicos essenciais com destaque para um dos principais elementos de uma máquina-ferramenta, o eixo-árvore. Na seção 2.3 são apresentados os principais esforços atuantes em um eixo-árvore seguidos do seu equacionamento. Na seção 2.4 destacam-se os principais materiais utilizados nos projetos de eixos. E finalizando o capítulo, a última seção aborda sobre a tecnologia de usinagem em foco nas últimas décadas, a usinagem em alta velocidade (HSM), apresentando uma breve explanação sobre o que é a referida tecnologia, as suas vantagens em relação a usinagem convencional, e também, suas vantagens/desvantagens econômicas e tecnológicas.

#### **2.2 AS MÁQUINAS-FERRAMENTA**

As máquinas-ferramenta, também chamadas de máquinas operatrizes no Brasil, são máquinas utilizadas na fabricação de peças, entre outros, nos diversos setores industriais (automobilístico, aeroespacial, ferramentaria e etc.) contribuindo amplamente na economia do setor mecânico.

Desde o início da revolução industrial quando surgiram as primeiras máquinas-ferramenta desenvolvidas segundo princípios modernos, até meados dos anos 70 do século XX, as máquinas-ferramenta sempre evoluíram com base em soluções puramente mecânicas, e no máximo incorporando elementos eletro-eletrônicos básicos. Contudo, nas últimas três décadas os avanços tecnológicos permitiram uma verdadeira revolução no projeto de máquinas-ferramenta. Outro fator importante no desenvolvimento de

máquinas-ferramenta foi à introdução do comando numérico computadorizado, isso permitiu que toda uma gama de eletrônica embarcada pudesse controlar parâmetros da máquina até limites inimagináveis até então. O aumento artificial da estabilidade dinâmica da máquina, assim como o monitoramento em tempo real das deformações na estrutura e até mesmos do processo de usinagem, levou a melhora do desempenho geral das mesmas. Todo avanço se tornou possível graças às ferramentas de projeto CAD, CAM, CAE que minimizaram o tempo de análise das estruturas complexas em geral (STOETERAU, 2004).

Garantir a repetibilidade na operação, fabricar peças com tolerâncias de forma e dimensional asseguradas, manter os requisitos de qualidade superficial e um alto desempenho técnico com eficiência econômica tem sido os requisitos que nos faz recorrer diretamente ao uso de máquinas-ferramenta. Mas para acatar a estes requisitos as máquinas-ferramenta devem atender rigorosos critérios de projetos que vão desde uma ótima rigidez estática e dinâmica, estabilidade térmica, facilidade de operação até fácil acesso aos componentes internos visando à manutenção da mesma.

Atualmente o projeto de máquinas-ferramenta para usinagem com ferramentas de geometria definida, aponta para três áreas de desenvolvimento distintas. A primeira voltada para obter a máxima flexibilidade de produção, sendo caracterizada pelas máquinas do tipo hexapot, a segunda caracterizada pela alta ação da taxa de remoção, a qual forma a base da usinagem em alta velocidade – HSM, e a terceira voltada para atender as necessidades de obtenção de alta exatidão dimensional, geométrica e elevada qualidade superficial, ou seja, para a ultra exatidão, Fig. (2.1). (STOETERAU, 2004).



Figura 2.1. Tendências do projeto das máquinas-ferramenta, adaptado de (STOETERAU, 2004).

Diante dos elementos mecânicos (guias, mancais, eixo-árvore, cabeçote e etc.) que compõem uma máquina-ferramenta, o eixo-árvore se destaca como um dos principais elementos. Por influenciar diretamente na exatidão dimensional e geométrica das peças de trabalho por meio da precisão de giro, o eixo-árvore também, transmite a potência necessária para a usinagem. No tópico (2.2.1) são abordados os principais tipos de eixos-árvore.

### **2.2.1 Eixos-árvore**

Eixos são elementos de máquinas que suportam corpos e constituem o seu centro de rotação. Geralmente apoiados em mancais, são elementos de ligação de sistemas e, por serem peças muito solicitadas e normalmente vitais para um sistema, devem ter seu estudo, dimensionamento e escolha dos materiais muito bem elaborados.

Denomina-se eixos, peças que suportam elementos de máquinas em rotação e são o centro de giro. Denominam-se eixos-árvore, os eixos que, além de suportarem elementos de máquinas em rotação e ser o seu centro de giro, transmitem momentos torsores (torque), transferindo energia entre os elementos a ele conectados. São peças rotativas ou muitas vezes estacionárias usualmente de seções circulares, onde se montam elementos como engrenagens, polias, rodas dentadas, etc. Estão geralmente sujeitos aos esforços de flexão, torção, compressão, tração ou combinações destes. Podem ter em vista disto, seções variáveis. Existem normas de padronização dimensional para eixos, são algumas delas (LOPES, 2005):

- DIN 114 - Diâmetro de eixos padronizados
- DIN 112 - Rotações normalizadas
- DIN 42943 - Pontas de eixos para máquinas elétricas

Naturalmente, quando o eixo precisa de abruptas mudanças de seção, têm-se dificuldades em usar dimensões normalizadas; nestes casos, ligeiros desvios são aceitáveis. Além disto, quando se determina a forma da variação da seção de um eixo devem-se estar atentos aos pontos de concentração de tensões.

Os eixos-árvores podem apresentar diferentes configurações geométricas, tais como:

- a) **Eixos maciços/Eixos escalonados:** Apresentando secção circular maciça, com degraus ou apoio das peças montadas sobre eles, As arestas são arredondadas para aliviar a concentração de esforços. Já os eixos escalonados possuem diversas secções circulares ao longo de sua estrutura podendo ser maciços ou vazados, são também chamados de eixos de geometria complexa. No tocante, geralmente a geometria de um eixo-árvore é a de um cilindro escalonado, isto é, possuem múltiplas secções transversais facilitando toda concepção de projeto para acoplamento ótimo dos demais elementos de máquinas, como mostra a Fig. (2.2) (LARANJA, 2007).

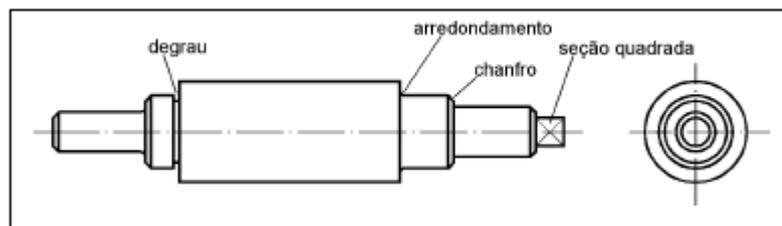


Figura 2.2. Eixo escalonado maciço

- b) **Eixos vazados:** Um eixo vazado possibilita a circulação de fluidos para as partes móveis, visando à lubrificação e o resfriamento, bem como reduz o peso do sistema mecânico, visto na Fig. (2.3) (SHIGLEY, 2005).

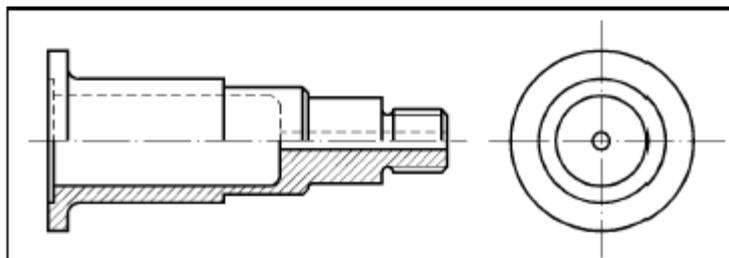


Figura 2.3. Eixo vazado

- c) **Eixos cônicos:** Devem ser ajustados num componente que possua furo de encaixe cônico. A parte ajustável tem formato cônico e é firmemente fixada por meio de uma porca. Uma chaveta é utilizada para evitar a rotação relativa, ver Fig. (2.4) (LARANJA, 2007).

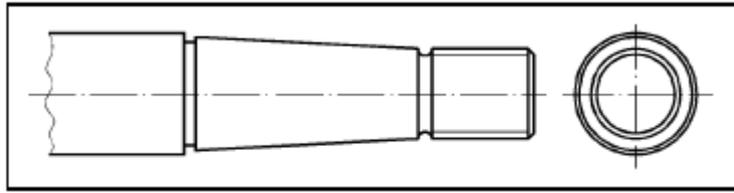


Figura 2.4. Eixo cônico

- d) **Eixos ranhurados:** Apresentam uma série de ranhuras longitudinais em torno de sua circunferência. As ranhuras engrenam-se com os sulcos correspondentes das peças a serem montadas neles. Os eixos ranhurados são utilizados quando há a necessidade de transmitir grandes esforços, Fig. (2.5) (LARANJA, 2007).

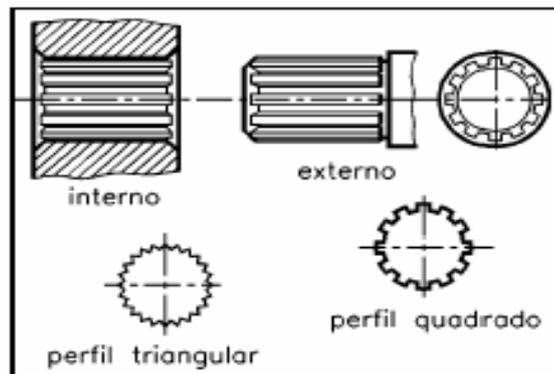


Figura 2.5. Eixo ranhurado

- e) **Eixos roscados:** Possuem algumas partes roscadas que podem receber porcas capazes de prenderem outros componentes ao conjunto, como mostra a Fig. (2.6) (LARANJA, 2007).

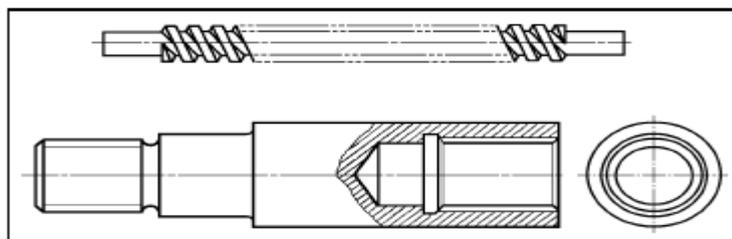


Figura 2.6. Eixo roscado

Dos eixos-árvore apresentados, três deles se tornam nosso objeto de estudo mediante a vasta aplicação em máquinas-ferramenta, são eles: eixos maciços, vazados e escalonados.

### 2.3 ESFORÇOS ATUANTES

Durante o processo de usinagem, o eixo-árvore de uma máquina-ferramenta está sujeito a esforços decorrentes dos processos de usinagem e de acionamento, como também, do peso da peça a ser usinada. A Figura (2.7) ilustra as forças produzidas em um eixo-árvore de um torno, durante o processo de usinagem. O procedimento de cálculo das principais forças que agem sobre o eixo-árvore, assim como, as suas decomposições sobre os eixos X e Y. Convém ressaltar que as equações aqui apresentadas são validas para qualquer processo de usinagem (SILVA, 1987).

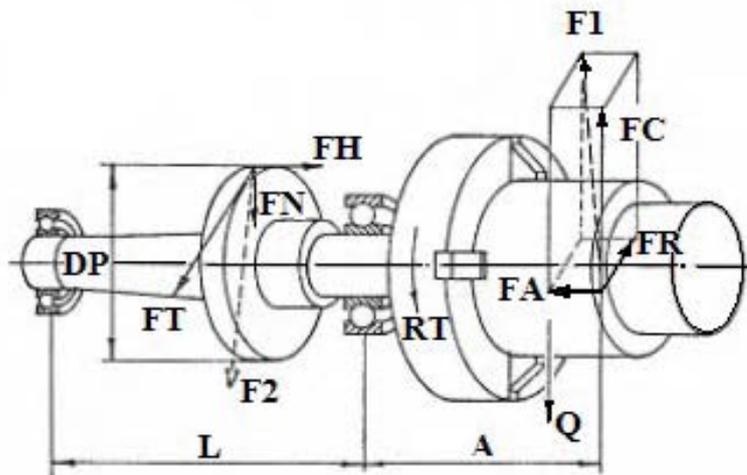


Figura 2.7. Forças geradas durante um processo de usinagem, adaptado de (SILVA, 1987)

#### 2.3.1. Forças oriundas do processo de usinagem

A projeção da força de usinagem  $F_1$  sobre as direções de corte, de avanço e perpendicular ao plano de trabalho corresponde às forças principais de corte,  $FC$ , de avanço  $FA$ , e de recuo,  $FR$ , respectivamente. A força principal de corte é dada a partir da teoria de Kienzle (FERRARESI, 1985):

$$FC = K_{s1.1} h^{1-z} b \quad (2.1)$$

Onde:

FC – Força principal de corte (N)

$K_{s1.1}$  – Constante específica do metal para uma seção de corte de 1mm de comprimento por 1mm de largura (N/mm<sup>2</sup>)

1-z – parâmetro função de  $K_{s1.1}$

$h = a \cdot \text{sen}(x)$  (mm)

$b = p \cdot \frac{1}{\text{sen}(x)}$  (mm)

p – profundidade do corte (mm)

a – avanço de corte (mm)

x – ângulo de posição (graus)

Os valores de  $K_{s1.1}$  e 1-z podem ser obtidos nas referências bibliográficas de Ferraresi (1985) e Silva (1987). As forças de avanço, FA, e de recuo, FR, são relacionadas com a força principal de corte, FC, através dos coeficientes CA e CR, respectivamente. Estes coeficientes dependem do material da peça, da geometria da ferramenta e da seção de corte, estas forças são dadas pelas Eq. (2.2) e Eq. (2.3):

$$FA = CA \cdot FC \quad (2.2)$$

$$FR = CR \cdot FC \quad (2.3)$$

A força principal de corte pode ser determinada, também, em função da potência de corte e da rotação. Considerando-se a relação percentual entre a potência de corte e a potência da máquina igual a PR1, a força de corte, em Newtons, é dada pela Eq. (2.4):

$$FC = \frac{600050}{\pi} \frac{PR1 \cdot PT}{DM \cdot RT} \quad (2.4)$$

Onde:

PT – Potência da máquina (kW)

DM – Diâmetro de trabalho da ferramenta (mm)

$$PR1 = \frac{\text{Potência de corte}}{\text{Potência da máquina}} \cdot 100 \quad (\%)$$

RT – Velocidade de rotação (rpm)

### 2.3.2. Forças oriundas do processo de acionamento

Atualmente existem diversos tipos de acionamento dos eixos-árvore, mas em critério de análise podem-se destacar dois deles como os mais usuais tipos de acionamento, são eles – por engrenagens e por elementos flexíveis. As análises das forças do processo de acionamento por engrenagem e por polias são abordadas separadamente (SILVA, 1987):

- a) Acionamento por engrenagens:** Quando o acionamento é desenvolvido por meio de engrenagens com um diâmetro primitivo, DP, e um ângulo de pressão,  $\beta$ . Se a engrenagem é helicoidal ou cônica, a força de acionamento, F2, atuará numa direção oblíqua proporcionando três componentes, FN, FT e FH, Fig. (2.7). No caso de engrenagem cilíndrica de dentes retos, F2 será decomposta numa componente tangencial, FT, e em uma componente normal, FN, dadas pelas seguintes equações:

$$FT = \frac{600050}{\pi} \frac{PR2.PT}{DP.RT} \quad (2.5)$$

$$FN = FT.Tan(\beta) \quad (2.6)$$

Onde:

PT – Potência da máquina (kW)

DP– Diâmetro primitivo de engrenagem (mm)

$$PR2 = \frac{\text{Potência de acionamento}}{\text{Potência da máquina}} \cdot 100 \quad (\%)$$

RT – Velocidade de rotação (rpm)

$\beta$  – Ângulo de pressão (graus)

- b) Acionamento por elementos flexíveis:** Quando o acionamento é efetuado por meio de correias ou correntes e polias com diâmetro primitivo DP; neste

caso, a força tangencial também é dada pela Eq. (2.5). A força  $W$ , Fig. (2.10), que atua sobre a linha que une os centros das polias, é calculado em função de  $FT$  e do coeficiente de carga,  $COEF$ . Este coeficiente é especificamente em função das condições de trabalho, logo;

$$W = COEF.FT \quad (2.7)$$

**c) Peso da peça a ser usinada,  $Q$ :** Nas máquinas-ferramenta em que as peças a serem usinadas são fixadas na ponta do eixo-árvore, a relação entre a força principal de corte e o peso da peça é consideravelmente alta. Nos casos em que se usinam peças de pesos elevados, estes não agem sobre o eixo-árvore, mas sim sobre a mesa da máquina-ferramenta. Neste último caso, o peso da peça deve ser considerado somente no dimensionamento da mesa. Por essa razão, não se leva em consideração o peso da peça a ser usinada na determinação dos deslocamentos do eixo-árvore.

**d) Decomposição dos esforços:** A Figura (2.8) mostra as forças que agem sobre o eixo-árvore segundo os eixos de coordenadas  $X$  e  $Y$ . As forças  $F_{x1}$  e  $F_{y1}$  são as componentes resultantes dos esforços de usinagem, nas direções  $X$  e  $Y$  respectivamente.  $M_{xz}$  e  $M_{yz}$  são os momentos fletores, na ponta do eixo-árvore, devidos aos esforços de usinagem nos planos  $xz$  e  $yz$  respectivamente.  $F_{x2}$ ,  $F_{y2}$  são as componentes resultantes dos esforços de acionamento, nas direções  $X$  e  $Y$ .

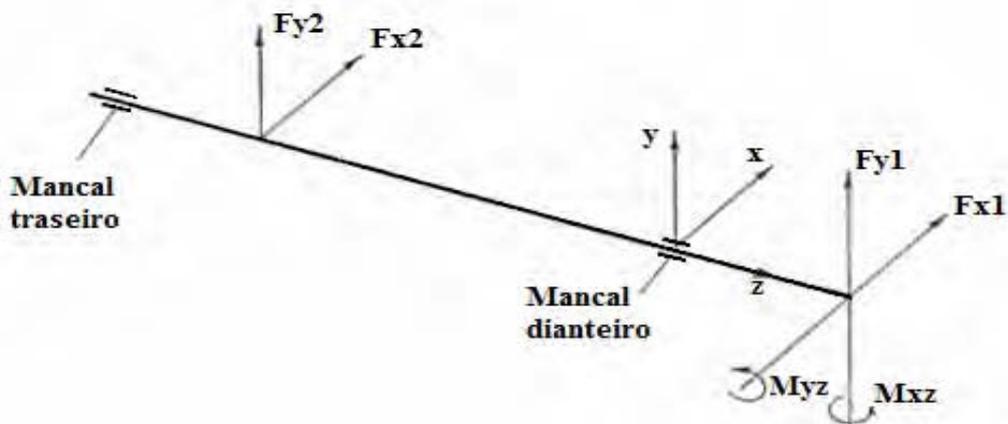


Figura 2.8. Decomposição dos esforços sobre os eixos  $X$  e  $Y$ , adaptado de (SILVA, 1987)

Para os esforços devidos à usinagem numa posição genérica  $\alpha_1$  e à distância DFA da ponta do eixo-árvore, Fig. (2.9), tem-se como equacionamento das componentes:

$$F_{x1} = FR \cdot \cos(\alpha_1) - FC \cdot \sin(\alpha_1) \quad (2.8)$$

$$F_{y1} = FC \cdot \cos(\alpha_1) + FR \cdot \sin(\alpha_1) \quad (2.9)$$

$$M_{xz} = F_{x1} \cdot DFA - FA \cdot \frac{DM}{2} \cdot \cos(\alpha_1) \quad (2.10)$$

$$M_{yz} = F_{y1} \cdot DFA - FA \cdot \frac{DM}{2} \cdot \sin(\alpha_1) \quad (2.11)$$

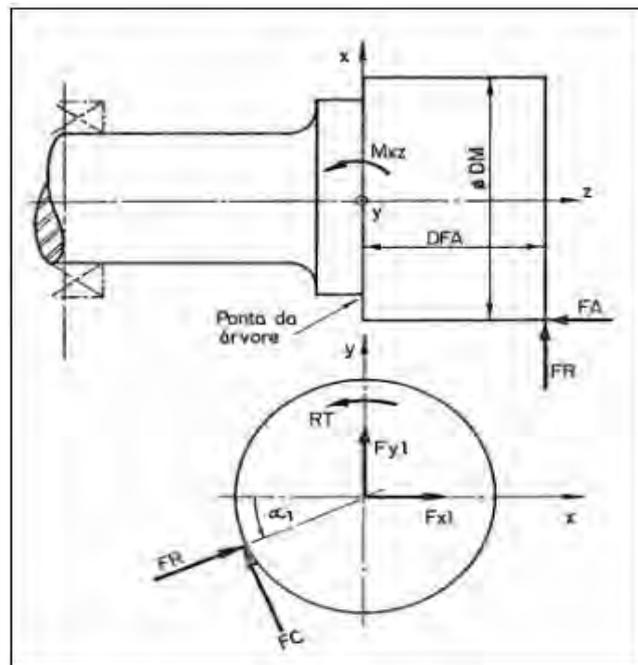


Figura 2.9. Esforços atuantes devido ao processo de usinagem em uma posição genérica (SILVA, 1987, p.14)

A Figura (2.10) mostra os esforços atuantes devido ao acionamento para uma posição qualquer, onde os esforços podem ser descritos quando o acionamento é por meio de engrenagens como:

$$F_{x2} = FT \cdot \cos(\alpha_2) - FN \cdot \sin(\alpha_2) \quad (2.12)$$

$$F_{y2} = FN \cdot \cos(\alpha_2) + FT \cdot \sin(\alpha_2) \quad (2.13)$$

E através de correias por:

$$F_{x2} = W \cdot \sin(\alpha_2) \quad (2.14)$$

$$F_{y2} = -W \cdot \cos(\alpha_2) \quad (2.15)$$

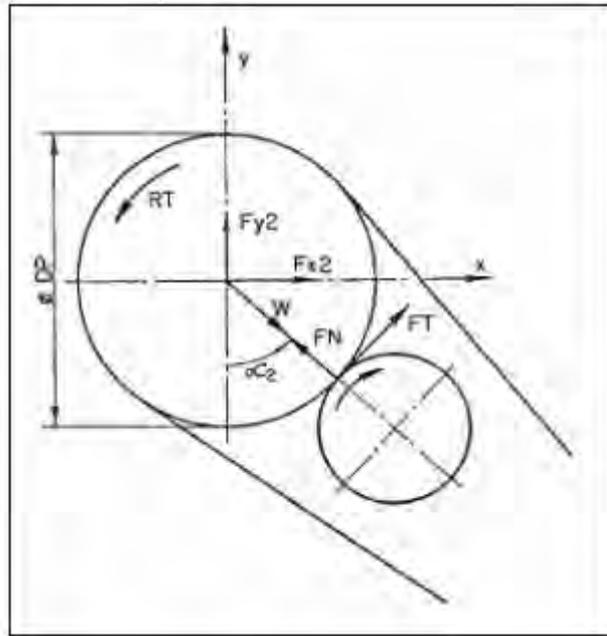


Figura 2.10. Esforços atuantes devido ao acionamento em uma posição genérica (SILVA, 1987, p.14)

## 2.4 MATERIAIS

Os eixos-árvore são fabricados em ligas de aço, pois os materiais metálicos apresentam melhores propriedades mecânicas do que os outros materiais. Por isso, são mais adequados para a fabricação de elementos de transmissão. Os eixos-árvore têm finalidades específicas, eles podem ser fabricados em cobre, alumínio, latão. Portanto, o material de fabricação varia de acordo com a função dos eixos-árvore. Como os materiais a serem usados em eixos devem ser escolhidos de acordo com as características de operação dos eixos, deve-se estar atentos se eles possuirão alta resistência mecânica, baixa sensibilidade à concentração de tensões e boa usinabilidade.

Comumente é utilizado aço carbono - 1025 a 1045 SAE/ABNT - onde, recebem tratamentos térmicos de normalização ou tempera. Uma maior resistência localizada nas pontas dos eixos pode ser conseguida endurecendo o aço para uma dureza de até 40 ou 50 RC. Para se conseguir melhores e mais adequados materiais, menores diâmetros e acréscimo de resistência ao desgaste nas pontas dos eixos, são usados aços carbonos ligados e efetuados tratamento térmicos e termoquímicos. No entanto isso resulta em maior custo e em maior sensibilidade à concentração de tensões, reduzindo um pouco o seu campo de aplicação (LOPES, 2005).

A lista dos aços-liga e aços carbono mais empregados em projetos de eixo-árvore encontra-se na Tab. (2.1) abaixo:

Tabela 2.1. Aços mais utilizados na confecção de eixos-árvore (LOPES, 2005)

<b>Aço ABNT/SAE</b>	<b>Solicitação</b>	<b>Observações</b>
1020	Baixa	Peças secundárias
1030	Baixa	Peças secundárias
1045	Média	Mais utilizado em eixos-árvore
4140	Média	Aço cromo – molibdênio
4320	Média	Aço níquel - cromo – molibdênio
4340	Alta	Aço níquel - cromo – molibdênio
8640	Alta	Aço níquel - cromo – molibdênio

A Tabela (2.2) disponibiliza os materiais, normalizados de acordo com a SAE/ABNT, mais utilizados na fabricação de eixos-árvore juntamente com todas as características que serão solicitadas ao decorrer do desenvolvimento do trabalho.

Tabela 2.2. Características dos materiais utilizados no desenvolvimento de eixos-árvore

<b>Material</b>	<b>Mod. de Young E (MPa)</b>	<b>Coef. de Expansão Linear <math>\alpha</math> (<math>10^{-6}/K</math>)</b>	<b>Densidade <math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor Específico <math>c_p</math> (J/kg. K)</b>	<b>Difusividade Térmica <math>\alpha_t \cdot 10^6</math> (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Condutividade Térmica k (W/m.K)</b>
Aço	210000	11,7	7800	434	16,4	55,7
Alumínio	70000	23,6	2702	903	97,1	237
Cobre	120000	16,9	8933	385	117	401
Latão	105000	20	8470	380	87,9	116
Titânio	120000	8,9	4500	522	9,32	21,9

## 2.5 USINAGEM EM ALTA VELOCIDADE

*High Speed Machining* (HSM), ou ainda *High Speed Cutting* (HSC), é hoje a última palavra em termos de tecnologia para usinagem. Encontrada principalmente nos centros de usinagem automotivos, aeroespaciais, de matrizes e moldagens, esta tecnologia está em constante desenvolvimento. A idéia consiste em aumentar a velocidade de usinagem e assim diminuir a temperatura da peça sendo usinada causando um menor enfraquecimento do material. A razão é que a velocidade de corte (*Machining Feed Rate*) é maior do que a velocidade de condução térmica, concentrando a maior parte da dissipação de calor no material removido (cavaco) (SIEMENS, 2011).

Este método de usinagem atualmente é bastante empregado na fabricação de moldes e matrizes. Neste caso, a usinagem HSM possui várias vantagens como a flexibilização da produção. Tradicionalmente, a produção de moldes e matrizes envolve a usinagem convencional, com o material no estado normal, seguido de tratamento térmico, utilização do processo de eletro-erosão e, por fim, realização de acabamento e polimento manual. Atualmente o processo HSM permite a usinagem dos componentes diretamente em material endurecido eliminando as operações de eletro-erosão e do polimento manual. O resultado destas melhorias que o processo HSM proporciona na usinagem de moldes é um menor tempo de ciclo de produção, eliminação de operações e conseqüentemente a queda no custo de fabricação da peça (CAPLA, 2006).

Porém para aplicar o conceito de usinagem HSM na indústria, os parâmetros de processo como, ferramentas, máquina-ferramenta, temperatura, parâmetros de corte, qualidade superficial, vantagens e desvantagens do processo devem ser mais bem compreendidos. Com isso, este trabalho será focado no estudo dos parâmetros e ferramentas adequadas para aplicação prática do processo de usinagem HSM.

A velocidade de corte para HSC em operações de fresamento está na faixa de dez vezes superior às velocidades convencionais de usinagem, de acordo com o material a ser usinado. A aceleração para movimentação e posicionamento dos eixos da máquina-ferramenta, também é um fator importante a ser considerado, principalmente na usinagem de formas complexas. Máquinas que trabalham com altas acelerações, podem obter um ganho significativo frente às máquinas convencionais. As máquinas-ferramenta na faixa de transição para HSC, atualmente podem trabalhar com acelerações da ordem de  $10 \text{ m/s}^2$ , e máquinas HSC de laboratório com motores lineares, trabalham hoje com acelerações da ordem de  $30 \text{ m/s}^2$ . Atualmente pode-se encontrar

eixos-árvore com frequência de rotação de até 100.000 rpm, embora seja mais comum a faixa de 15.000 á 40.000 rpm (SOUZA, 2011).

### **2.5.1 HSM x Usinagem convencional**

Nas últimas décadas a indústria tem enfrentado uma forte concorrência emergente das novas regiões competitivas. Esta concorrência mudou o ambiente industrial, portanto, a busca por novas tecnologias tornou-se essencial para lidar com essas novas realidades competitivas. Em certos setores de mercado a customização e pequenos ciclos vida acabaram forçando as indústrias a substituir os processos de usinagem convencionais por processos de usinagem mais adequados para a produção de pequenos volumes de peças (RIBERO et al, 2009).

Atualmente para a fabricação de moldes e matrizes é utilizada a tecnologia de usinagem HSM (High Speed Machining), pois esta pode produzir superfícies com melhor qualidade. Este acabamento é melhor porque os esforços que a matéria-prima sofre devido à usinagem são menores se comparados ao processo convencional a profundidade e a largura de corte são quase sempre maiores. O objetivo é manter o acabamento manual em níveis bem reduzidos ou até mesmo eliminá-los. Com isto, podem-se reduzir as imperfeições geradas por essa operação aumentando-se assim a qualidade da peça. No entanto, essa melhoria na qualidade só está se tornando possível, porque as ferramentas de corte, máquinas de usinagem (CNC) e programas computacionais estão sendo aperfeiçoados. Este aprimoramento faz com que a usinagem HSM seja economicamente viável, pois se pode aumentar o número de passes laterais de um molde, sem que haja perdas de tempo de ciclo de usinagem, além é claro, das vantagens de se produzir um produto com uma qualidade diferenciada (OLIVEIRA, 2007).

Os Benefícios da usinagem HSM incluem redução do custo/tempo do processo, através da eliminação de vários processos, incluindo o de acabamento manual. Observa-se também melhorias na qualidade decorrente de uma melhor exatidão dimensional do componente, redução da rugosidade superficial e a eliminação da distorção devido ao tratamento térmico (WOODS et al, 2003).

A Figura (2.11) mostra a melhoria proporcionada pela tecnologia HSM reduzindo etapas do processo de fabricação de uma matriz.

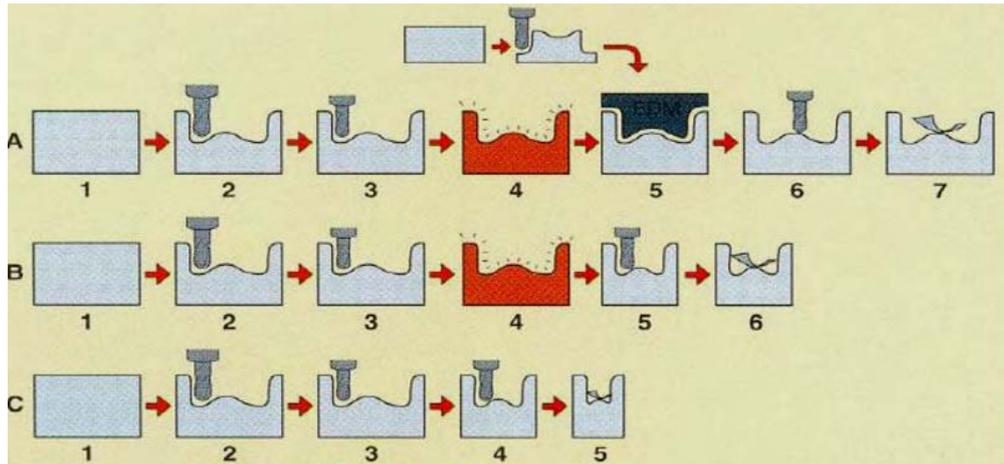


Figura 2.11. Racionalização do processo de fabricação de uma matriz (SANDVIK, 1999)

A) **Processo inicial:** (1) *blank* macio, (2) desbaste, (3) semi-acabamento, (4) tratamento térmico, (5) eletroerosão, (6) acabamento das regiões de fácil acessibilidade, (7) acabamento manual.

B) **Opção para o processo 1:** onde a etapa de eletroerosão foi substituída pelo acabamento da cavidade com HSM, assim sendo reduzindo uma etapa do processo.

C) **Opção para o processo 2:** (1) *blank* já recebeu o tratamento térmico e está com dureza final de utilização, (2) desbaste, (3) semi-acabamento, (4) acabamento final, todos realizados com uma única fixação, (5) acabamento manual reduzido ou mesmo eliminado.

A principal contribuição na usinagem em altas velocidades está no fato de poder trabalhar com velocidades de corte de cinco a dez vezes maiores, se comparado ao processo convencional e utilizar profundidades de cortes menores que as utilizadas nos processos tradicionais diferenciada obtendo maior precisão ao usinado, pois se reduz consideravelmente os processos de acabamento manuais, posteriores ao processo de usinagem (OLIVEIRA, 2007).

Observa-se na Fig. (2.12) a faixa de valores que se convencionou chamar de usinagem em altas velocidades, relacionado ao material a ser usinado. A velocidade de corte também está relacionada a cada aplicação específica conforme demonstrado na Fig. (2.13) (MÜLLER & SOTO, 1999).

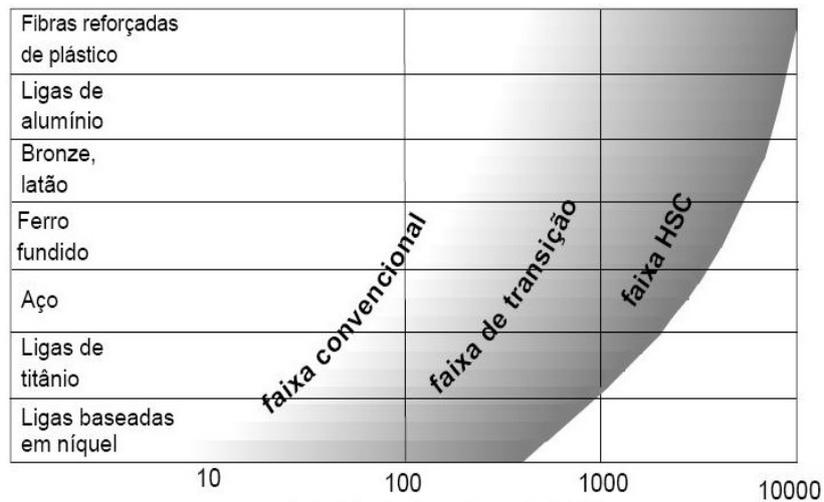


Figura 2.12. Faixas de velocidades de corte para diferentes materiais (SCHULZ, 1996)

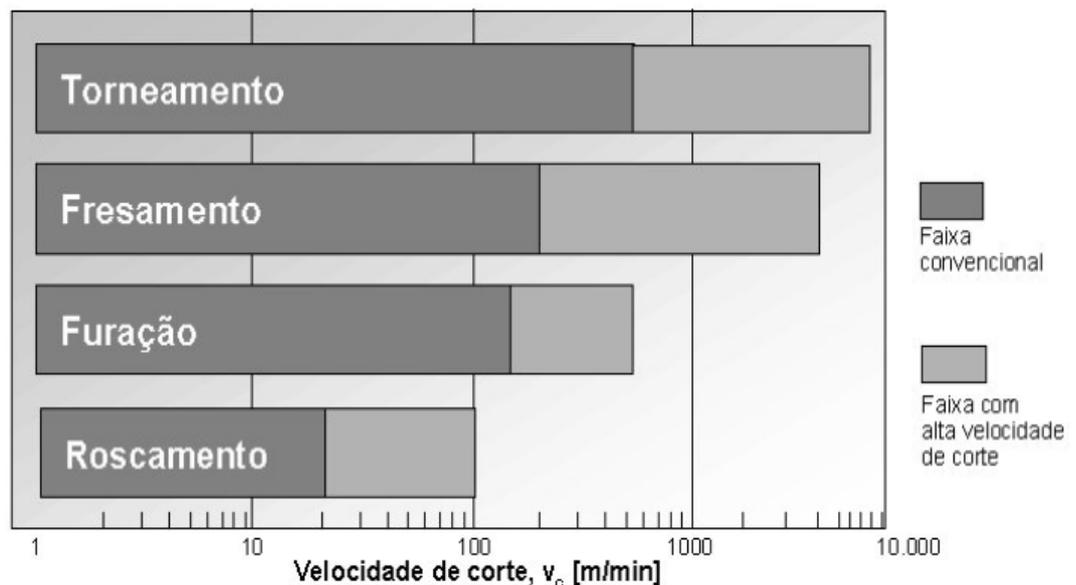


Figura 2.13. Velocidades de corte convencionais e HSC (MULLER & SOTO, 1999)

Com o aumento da velocidade de corte ocorre uma redução nas forças de usinagem, maior taxa de remoção de cavacos, melhoria na qualidade superficial das superfícies usinadas e redução da vida das ferramentas de corte. Como mostra a Fig. (2.14) (SCHULZ, 1996).

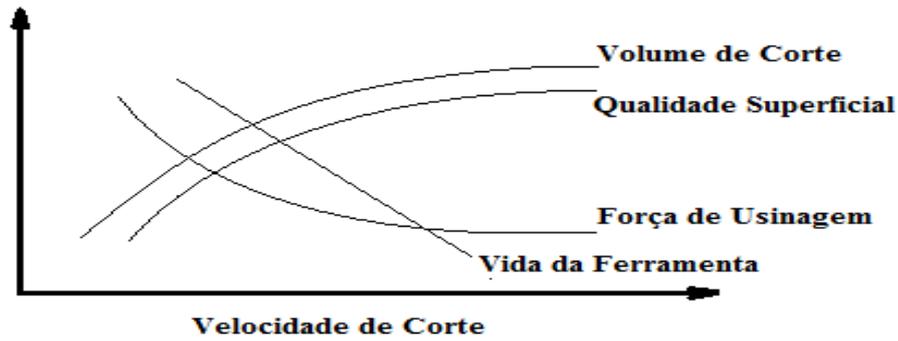


Figura 2.14. Características com o aumento da velocidade de corte, adaptado de (SCHULZ, 1996).

A velocidade de corte para HSC em operações de fresamento está na faixa de dez vezes superior às velocidades convencionais de usinagem, de acordo com o material a ser usinado. A aceleração para movimentação e posicionamento dos eixos da máquina-ferramenta, também é um fator importante a ser considerado, principalmente na usinagem de formas complexas. Máquinas que trabalham com altas acelerações, podem obter um ganho significativo frente às máquinas convencionais. As máquinas-ferramenta na faixa de transição para HSC, atualmente podem trabalhar com acelerações da ordem de 10 m/s, e máquinas HSC de laboratório com motores lineares, trabalham hoje com acelerações da ordem de 30 m/s. Na tabela 2.3 a seguir, podemos observar um comparativo de velocidades convencionais e de HSC.

Tabela 2.3. Comparativo entre a usinagem convencional e a HSC (SIEMENS, 2011)

Material		Tipos de ferramentas			
		Brocas, Fresas para acabamento		Fresas, Fresas de topo	
		Convencional (m/min)	HSC (m/min)	Convencional (m/min)	HSC (m/min)
<b>Alumínio</b>		> 305	> 3050	> 610	> 3658
<b>Ferro fundido</b>	Macio	152	366	366	1219
	Dúctil	107	244	244	914
<b>Aço</b>	Liga	76	244	213	366
	Inoxidável	107	152	152	274
	Duro HRC65	24	122	30	46
<b>Titânio</b>		38	61	46	91

### 2.5.2 Vantagens e desvantagens do processo HSM

Dentre as principais vantagens econômicas proporcionadas pelo uso da HSC destacam-se as seguintes (CAPLA, 2006):

- Aumento na produtividade;
- Redução dos custos do processo de fabricação, custos de fabricação reduzidos devido a ciclos totais mais rápidos;
- Maior flexibilidade na alocação de mão de obra;
- Maior flexibilidade comercial, pois pedidos complexos podem ser atendidos em menor espaço de tempo.

Já do ponto de vista tecnológico aponta-se como principais vantagens:

- Aumento da qualidade superficial, o que elimina muitos trabalhos posteriores;
- Melhoria nos mecanismo de formação de cavaco;
- Melhoria da exatidão dimensional;
- Diminuição das forças de corte proporcional ao aumento das velocidades de corte;
- Usinagem sem vibrações, pois as oscilações induzidas pelo corte da ferramenta são de alta frequência;
- Melhoria na dissipação do calor do processo, pois a maior parte da energia térmica gerada se concentra no cavaco, o que proporciona menor aquecimento da peça, especialmente no fresamento;
- Altas taxas de remoção de material;
- Baixos tempos inativos.

Também existem desvantagens que precisam ser consideradas, tais como (CAPLA, 2006):

- Alto nível de desgaste da ferramenta de corte;
- Maior custo tanto para máquinas-ferramenta e ferramentas de corte;
- Necessidade de alta precisão do balanceamento do ferramental;

- Necessidade de fuso de alta velocidade, os quais são excessivamente caros e possuem baixa durabilidade, em torno de 5000 a 10000 horas na máxima velocidade de rotação.
- Necessidade de sistemas de controle especiais;
- Necessidade de otimização adequada dos parâmetros tecnológicos, os quais ainda não são totalmente dominados.

A Figura (2.15) mostra as tecnologias correspondentes que devem ser consideradas para se trabalhar de maneira eficiente em HSM.

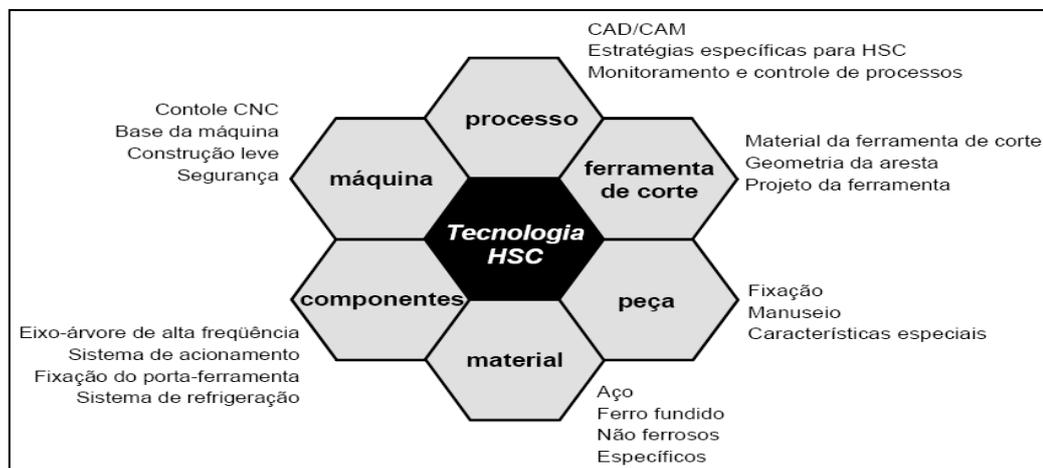


Figura 2.15. Tecnologias relacionadas ao processo HSC (CAPLA, 2006).

## 2.6 CONCLUSÃO II

Neste capítulo foi apresentado alguns aspectos fundamentais das máquinas-ferramenta dentro da indústria de produção relatando a importância das máquinas operatrizes no controle de qualidade da exatidão. Também, destacou-se o eixo-árvore como um dos principais elementos que compõe as máquinas-ferramenta, no qual, ele é responsável diretamente pela qualidade dimensional e geométrica das peças, sendo assim, é de suma importância o levantamento de alguns parâmetros de projetos, tais como, os esforços mecânicos, os materiais utilizados em sua fabricação. E por fim, a tecnologia de usinagem em alta velocidade é explanada mostrando os pontos que caracterizam essa tecnologia, como também, um comparativo com o processo convencional; Percebe-se também, os pontos fortes como a viabilidade econômica que a tecnologia HSM fornece e diminuição do tempo de usinagem, mas também, são

abordadas algumas desvantagens que devem ao fato da tecnologia HSM ainda não ter atingido ao estado da arte. Todavia que estudos e pesquisas estão sendo realizados com intuito de otimizar o quanto antes essa tecnologia compensando as desvantagens citadas no tópico (2.5.2).