

# ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PROCESSOS DE FRESAMENTO 3 E 5 EIXOS PARA A FABRICAÇÃO DE MOLDES<sup>1</sup>

Adriano Eudorico Albano<sup>2</sup>  
Adriano Fagali de Souza<sup>3</sup>

## Resumo

Esse trabalho de pesquisa tem como objetivo descrever os processos de usinagem na cadeia de fabricação de moldes envolvendo o fresamento de superfícies complexas em 3 e 5 eixos. Nas análises dos tempos da cadeia industrial envolvendo CAD/CAM (Manufatura Assistida por Computador), foram verificadas as vantagens competitivas sobre os recursos tecnológicos que podem reduzir os tempos de fabricação e os custos de fabricação na cadeia de moldes. Além disso, foi avaliada a acuracidade dimensional após a usinagem para a geometria proposta. Os resultados serão discutidos nesse trabalho objetivando as operações na estrutura CAD/CAM/CNC/EDM e suas contribuições para o desenvolvimento e atualizações para a manufatura de moldes e matrizes, trazendo reduções possíveis para os tempos, custos e aumento de qualidade.

**Palavras-chave:** Fresamento 5 eixos; Fabricação de moldes; Manufatura assistida por computador; Eletroerosão.

## COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THE STRATEGIES OF 3 AND 5 AXES MILLING MACHINING FOR THE MANUFACTURING OF MOULDS

## Abstract

This research has a goal that is describes the machining process in the mold and die chain involving milling of complex surfaces in 3 and 5 axes. In the analyses of times of the industry chain involving CAD/CAM (Computer Aided Manufacturing), it was verified the competitive advantages about technology resources that can reduce the lead time and the costs of die and mold chain manufacturing. Besides these, were considered the dimensional accuracy after machining for the proposal geometry.

The results will be discussed in this research aiming the operations in the framework CAD/CAM/CNC/EDM and its contributions to the development and upgrades in the die and mold manufacturing, bringing possible reductions to the cycle times, costs and increasing of quality.

**Key words:** Five axis milling; Die and mould manufacturing; Computer aided manufacturing; Electric discharge machining.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 8º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 11 e 12 de agosto de 2010, São Paulo, SP.

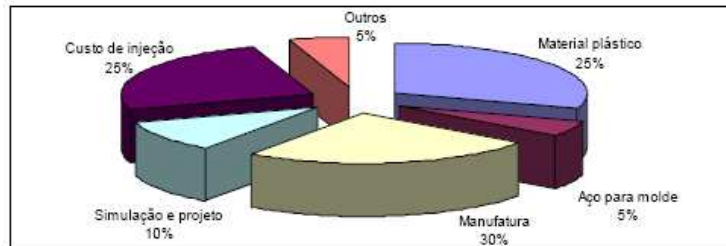
<sup>2</sup> Mestre em engenharia Mecânica (Sociesc).

<sup>3</sup> Doutor em engenharia mecânica (Sociesc).

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo investigar os processos envolvidos na cadeia de fabricação de moldes e matrizes, utilizando processos de fabricação por fresamento 3 e 5 eixos. A utilização crescente de componentes plásticos nas linhas automotivas, eletrodomésticos e telefonia móvel têm exigido cada vez mais agilidade, rapidez e flexibilidade no desenvolvimento e fabricação de moldes de injeção.<sup>(1)</sup>

A maior porcentagem do custo de um produto fabricado pela injeção de plástico é relativa à manufatura do molde (30% do custo total), sendo que a maior porcentagem desses custos está relacionada à usinagem (Figura 1).<sup>(2)</sup>



**Figura 1** - Análise de custo de um produto de polímero injetado.<sup>(2)</sup>

Mais de 60% do tempo de fabricação de um molde ou uma matriz é consumido na fabricação das partes funcionais, as quais incluem superfícies complexas.<sup>(3)</sup>

Tradicionalmente na fabricação de moldes aplica-se o fresamento em 3 eixos (X, Y, Z). Máquinas-ferramenta com 5 eixos simultâneos ainda são escassas nas ferramentarias, pois além dos altos custos de implantação requer o desenvolvimento de um novo processo de fabricação.

Os processos de fabricação e produção de geometrias complexas foram melhorados significativamente com o auxílio da utilização dos sistemas modernos de CAD/CAM.<sup>(4)</sup>

As máquinas-ferramenta 5 eixos, além de 3 eixos elementares de trabalho, possuem mais 2 eixos rotativos que podem agir simultaneamente, trazendo à fabricação de moldes uma grande versatilidade, entretanto, o processo se torna mais complexo.

Com a aplicação do fresamento 5 eixos há reduções de regiões a serem executadas por eletroerosão, diminuição das dificuldades comuns para a usinagem, como a fabricação de pequenos raios entre cantos, áreas com profundidade de corte relativamente grande, entre outros fatores considerados desfavoráveis aos processos de fabricação de moldes. A necessidade desse estudo advém da escassez de bibliografia tratando pontos específicos do processo propostos nos objetivos desse trabalho. A seguir são apresentados alguns estudos realizados sobre a tecnologia de fresamento 5 eixos demonstrando a contribuição tecnológica desse trabalho frente a crescente demanda pela aplicação desse tipo de fresamento na construção de ferramentais:

Alguns autores desenvolveram um algoritmo de trajetória de ferramenta em sistema CAM para suavizar os movimentos dos 5 eixos simultâneos através interpolações polinomiais a fim de obter melhor definição da trajetória e da compensação da ferramenta em superfícies complexas. Nesse estudo esse algoritmo foi testado em diferentes máquinas CNC, a fim de verificar o acabamento

superficial e tempos de usinagem. Em todas as máquinas avaliadas, apresentou redução dos tempos de usinagem e melhora do acabamento superficial.<sup>(5)</sup>

Houve também a proposição de um algoritmo para estimar de forma mais precisa, o tempo real de usinagem para o fresamento 5 eixos<sup>(6)</sup> e a proposição de um método de controle dimensional para avaliar os desvios posicionais e angulares de trajetórias em 5 eixos.<sup>(7)</sup>

O desenvolvimento de um algoritmo para minimizar os erros e invasões na superfície usinada por fresamento 5 eixos, empregando fresas de topo plana com raio (toroidal) também foi explorado por alguns autores.<sup>(8)</sup>

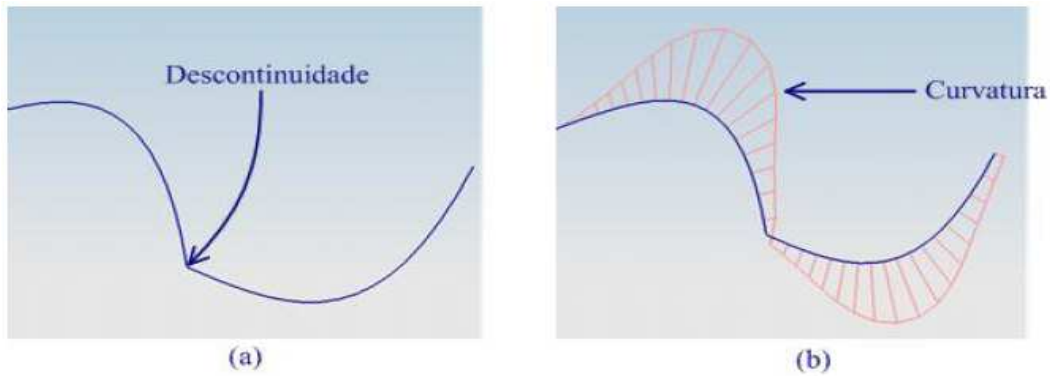
Modelo matemático para prever os esforços e os mecanismos de desgaste de ferramentas em usinagem por fresamento 5 eixos de aços endurecidos e o estudo da morfologia do cavaco e a vida da ferramenta em fresamento 5 eixos resultou como conclusão que não houve incremento significativo na vida da ferramenta, durante o fresamento 5 eixos de desbaste e nem de semi-acabamento com relação ao fresamento 3 eixos. Somente no acabamento houve um significativo aumento da vida da ferramenta, na ordem de 60%. Questões sobre tempos, custos e desvios geométricos de fabricação não foram abordados. Os autores se fixaram na avaliação dos principais mecanismos de desgastes resultantes do fresamento 5 eixos.<sup>(9)</sup>

Foram realizados estudos para otimização dos tempos de cálculo para realizar a simulação e detecção de colisões na usinagem 5 eixos e a influência dos principais parâmetros de usinagem no fresamento 3 e 5 eixos de superfícies complexas, para redução dos tempos de acabamento manual (polimento) das superfícies acabadas.<sup>(10,11)</sup> Em um outro estudo comparativo entre os dois processos através de medição de rugosidade da superfície usinada, não foram avaliados os custos envolvidos no processo de fabricação nem os erros geométricos ocorridos em ambos os processos de usinagem.<sup>(12)</sup>

A proposição para a otimização das condições de corte no fresamento 5 eixos, empregando diferentes ângulos de inclinação da ferramenta ao longo da superfície usinada, obtiveram resultados significativos relativos ao acabamento superficial e otimização das condições de corte.<sup>(13)</sup>

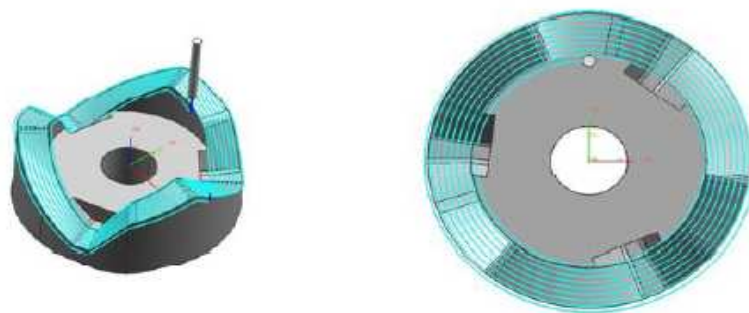
Outro estudo importante na área foi a avaliação do acabamento superficial na usinagem 5 eixos de aletas de turbinas contendo paredes finas. Foram realizadas usinagens com diferentes orientações de corte e trajetórias. Os autores avaliaram 8 condições de corte e somente uma apresentou acabamento aceitável, sem vibrações durante processo. O detrimento da qualidade, segundo os autores, ocorreu na maioria dos casos devido a vibrações durante a usinagem. A vibração foi reduzida em um dos casos, devido à orientação da trajetória.<sup>(14)</sup>

Concluiu-se que a influência da integração entre os sistemas CAD e CAM para o fresamento 5 eixos de componentes de turbinas a gás trouxeram problemas e limitações das trajetórias calculadas pelo CAM, tais como invasões da ferramenta na peça, pois o resultado correlaciona-se diretamente em função da qualidade da geometria modelada no CAD. Descontinuidades na superfície modelada podem ocasionar erros de cálculos das trajetórias.<sup>(15)</sup> A descontinuidade se caracteriza por um ponto na curva onde haja interrupção da curvatura. Isso é ilustrado na Figura 2a e evidenciado graficamente na Figura 2b.



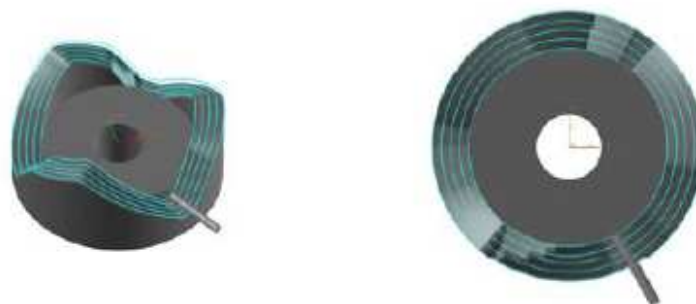
**Figura 2:** (a) Curva descontínua, problemas na modelagem da superfícies. (b) Gráfico de curvatura.<sup>(15)</sup>

O comparativo no acabamento e o ciclo de fabricação para cavidade de um componente automotivo fresando dois corpos de prova, um em 3 eixos e outro em 5 eixos simultâneos foi realizado em um outro estudo. Demonstrou-se de forma conclusiva o potencial ganho na aplicação de estratégias otimizadas em 5 eixos. Na cavidade onde foi feito o fresamento em 3 eixos, adotou-se a estratégia em 3D *offset*. A Figura 3 ilustra a trajetória da ferramenta, conforme simulação.



**Figura 3:** Cavidade usinada em estratégia 3D *offset*.<sup>(16)</sup>

Para o experimento em 3 eixos, foi utilizada uma ferramenta de diâmetro de 4 mm com 2 facas de corte. Na cavidade onde foi feito o fresamento em 5 eixos simultâneos, foi adotada a estratégia em *Swarf*, que se caracteriza como na utilização da lateral da ferramenta, acompanhando o perfil (superfície), reduzindo o número de incrementos transversais. A Figura 4 ilustra a trajetória da ferramenta *Swarf* 5 eixos.



**Figura 4:** Cavidade usinada em estratégia 5 eixos *SWARF*.<sup>(16)</sup>

Após a realização do experimento de usinagem, os autores obtiveram os seguintes resultados:



- o tempo de usinagem foi de 27 minutos para a usinagem em 3 eixos e 1 minutos e 20 segundos para a usinagem 5 eixos, evidenciando o importante potencial de redução no processo de fabricação por usinagem 5 eixos, nesse caso;
- segundo os autores, para a geração de programas 5 eixos, houve demanda maior de tempo para o modelamento CAD e para os cálculos e simulações em 5 eixos, devido à complexidade do processo;
- a média da rugosidade para a usinagem em 3 eixos, no sentido ortogonal, o valor Ra foi de 2,7  $\mu\text{m}$ , enquanto para a usinagem 5 eixos, no mesmo sentido, foi obtido Ra igual a 4,28  $\mu\text{m}$ . Verificou-se maior valor de rugosidade na peça fresada por 5 eixos. Como concluem os autores, esse fato ocorreu porque o diâmetro da ferramenta era pequeno e, provavelmente, houve flambagem da haste durante a usinagem.<sup>(16)</sup>

Nesse trabalho não estão evidenciadas questões relativas a possíveis áreas para eletroerosão nem os custos envolvidos nos processos 3 e 5 eixos. Também não foram considerados os possíveis erros geométricos entre os processos.

Diversos trabalhos de pesquisas como exemplificado anteriormente, na área de usinagem por fresamento em 5 eixos, podem ser encontrados na literatura. Esses trabalhos estão, muitas vezes, focados no desenvolvimento das tecnologias relacionadas à aplicação da usinagem 5 eixos, tais como: algoritmos para cálculo e simulação de trajetórias 5 eixos; desenvolvimento de novas configurações de máquinas-ferramenta; rotinas e sistemas de comando e controle numérico; precisão do processo etc.

Entretanto, trabalhos que investigam os tempos de fabricação, custos envolvidos e qualidade da usinagem, comparando ao fresamento tradicional 3 eixos e o 5 eixos para a fabricação de moldes e matrizes, ainda são incipientes, embora fundamentais.

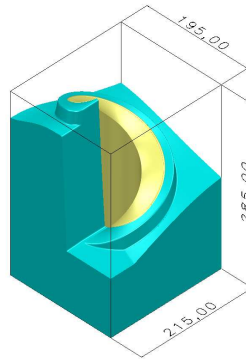
Com isso, a relevância do trabalho ora desenvolvido é avaliar sistematicamente os processos de fresamento de moldes, empregando as técnicas de 3 e 5 eixos, onde foram considerados:

- os tempos de planejamento e programação da usinagem via software CAD/CAM, para os processos 3 e 5 eixos;
- avaliação das áreas remanescentes para eletroerosão, para ambos os casos;
- tempos de fresamento das cavidades e fresamento dos eletrodos necessários para cada processo de usinagem;
- tempo de usinagem por eletroerosão para cada processo;
- custos envolvidos em cada processo; e
- avaliação geométrica do perfil usinado por ambos os processos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Com o objetivo de estudar e avaliar os processos de fresamento 3 e 5 eixos para a fabricação de moldes, foi definida uma geometria para o corpo de prova a fim de representar, em suas formas geométricas, características comumente encontradas nesta indústria. Foram fabricados dois corpos de prova empregando ambos processos de fresamento.

A Figura 5 ilustra a geometria do corpo de prova.



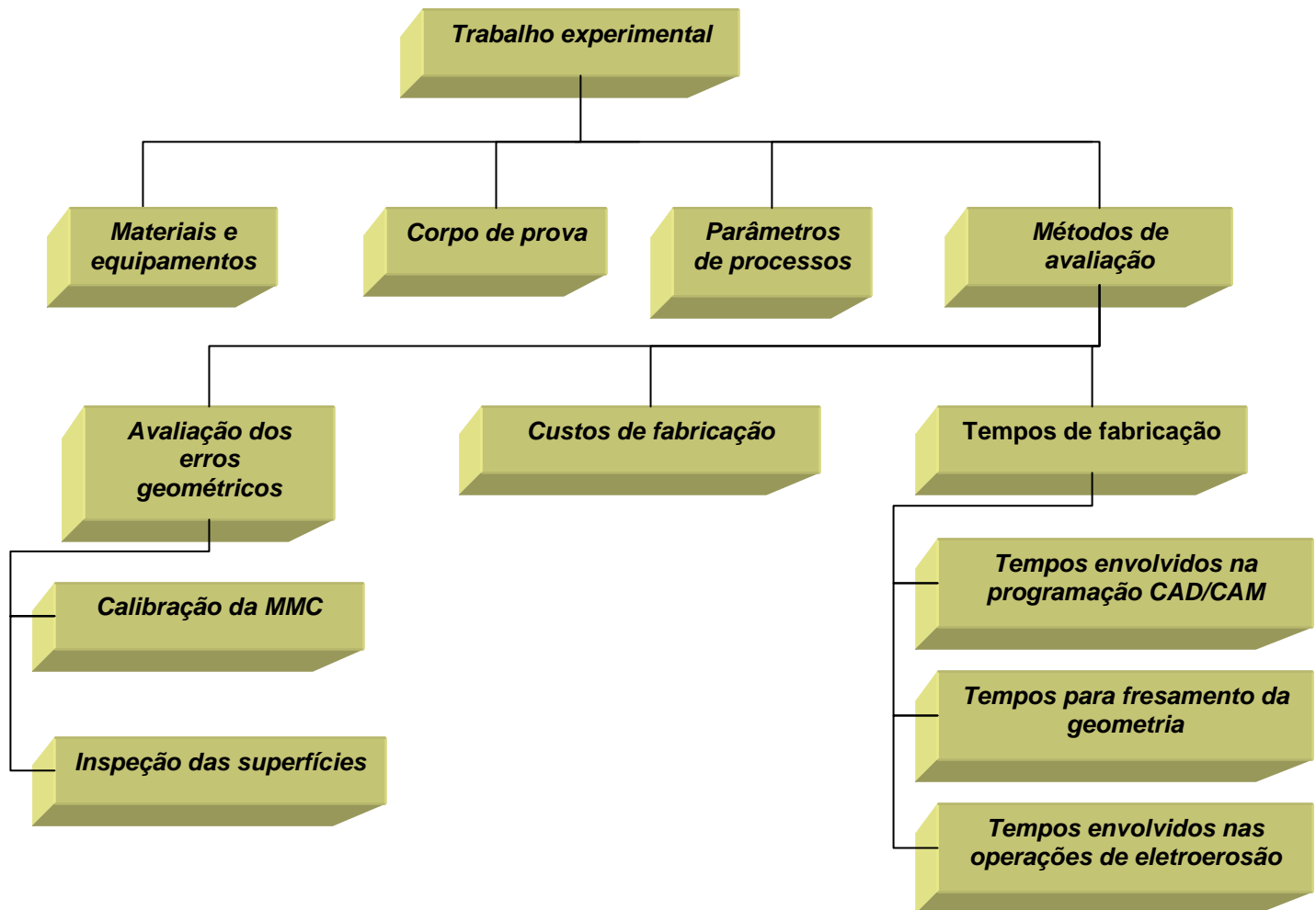
**Figura 5** - Geometria da cavidade do agitador da máquina lavar roupas em 3D.

O procedimento experimental foi auxiliado pelos profissionais da SOCIESC Ferramentaria, e teve início no setor de projeto e fabricação, onde foram definidos o modelo geométrico e as estratégias de fabricação e fresamento. Após a conclusão dessa etapa, o trabalho se concentrou na fabricação dos dois corpos de prova utilizando as técnicas de fresamento 3 e 5 eixos. Na seqüência foram realizadas operações de usinagem por eletroerosão, necessárias para a remoção de material nas regiões onde a ferramenta de fresamento não pôde alcançar. Obteve-se uma significativa redução das regiões de eletroerosão para o fresamento 5 eixos. Foram quantificadas estas reduções, em termos de área, tempo de fabricação dos eletrodos, tempo de eletroerosão e a repercussão ao custo de fabricação.

Após executar a fabricação dos dois corpos de prova e realizar uma avaliação detalhada entre os processos de fresamento, foi realizada a inspeção geométrica das superfícies usinadas e uma avaliação dos erros de forma ocasionados por cada método.

Para auxiliar a visualização do procedimento experimental realizado, a Figura 6 apresenta todas as etapas e sub-etapas realizadas. O item “métodos de avaliação” foi detalhado com mais ênfase a fim de propiciar uma avaliação e comparação criteriosa entre os processos de fabricação estudados.

O procedimento experimental está então subdividido nos tópicos de materiais e equipamentos, corpo de prova, parâmetros de processos e métodos de avaliação.



**Figura 6 - Escopo de processo para o procedimento experimental.**

Utilizando o sistema CAD/CAM Powershape e Powermill, foram avaliados os tempos necessários para análise da geometria, cálculos das trajetórias de ferramenta, tempos de simulações, tempos de pós-processamento e tempos específicos para desenvolver o processo de eletroerosão.

Os recursos empregados para o experimento como materiais, máquinas e programas computacionais necessários para obtenção e avaliação dos resultados experimentais são descritos a seguir.

A matéria-prima dos corpos de prova foi o aço VP20 ISO, fornecido pela Villares Metals.

Os aços empregados na fabricação de moldes necessitam ter características específicas como polibilidade e usinabilidade superior em relação aos outros aços ferramentas.<sup>(17)</sup>

Os parâmetros de cortes para o experimento foram escolhidos de acordo com as recomendações de catálogo técnico dos fornecedores das ferramentas empregadas nos experimentos.<sup>(18,19)</sup> As características das ferramentas de cortes foram definidas com auxílio do programador CAM para cada operação de desbaste, pré-acabamento e acabamento final.

## 2.1 Tempos de Fabricação

Os tempos de fabricação avaliados nesse trabalho foram subdivididos para os seguintes processos:

- tempos envolvidos na programação CAD/CAM;
- tempo para fresamento da geometria; e
- tempos envolvidos nas operações de eletroerosão.

Inicialmente, duas definições são utilizadas para realizar avaliações dos tempos de fabricação em cada processo:

### 2.1.1 Tempo específico de processo

É o tempo de cada etapa de fabricação. Neste caso não são considerados os tempos não produtivos, tais como preparação e parada de máquina. São identificados o início e final de cada operação. Para obtenção deste tempo foram empregados recursos de software, como é o caso dos processos de usinagem CNC, fresamento e eletroerosão. Os tempos das etapas CAD/CAM foram cronometrados manualmente.

### 2.1.2 Tempo total de processo

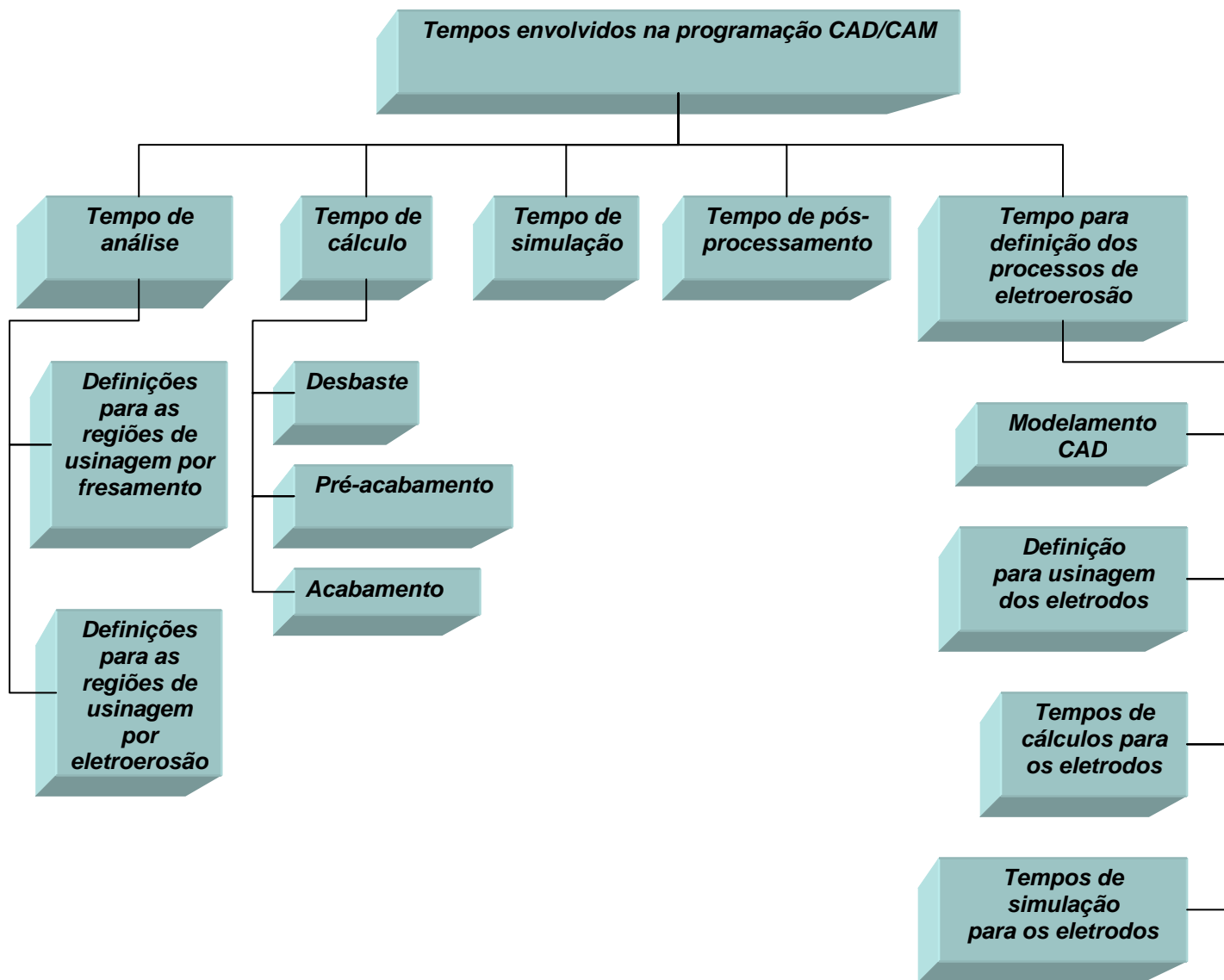
É o tempo real para fabricação, o qual repercute diretamente no custo de fabricação. Neste caso são computados os tempos de preparação de máquina e todos os demais tempos improdutivos que são contabilizados no orçamento de um trabalho industrial. Neste caso, os tempos totais de processo foram obtidos pelo software de planejamento e controle de produção, CPS versão 3.0 disponível na instituição, que oferece uma ferramenta para apontamento eletrônico dos tempos totais de processo. Cada início e fim de atividade são computados no sistema pelos profissionais envolvidos em cada processo avaliado.

Para obtenção dos tempos envolvidos na programação CAD/CAM, o processo foi dividido nas seguintes sub-etapas:

- tempo de análise da geometria – tempo para definições dos processos envolvidos conforme a geometria e sua complexidade que refletem diretamente na estratégia de cálculo de percurso da ferramenta;
- tempo de cálculo - é o tempo consumido para que o software gere o percurso da trajetória através de cálculos baseados nos algoritmos internos do sistema CAD/CAM;
- tempo de simulação – nessa etapa verificaram-se possíveis colisões ou invasões da ferramenta em regiões fora dos critérios especificados pelo processo;
- tempo de pós-processamento – tempo necessário para conversão do arquivo gerado pelo CAM para linguagem CNC; e
- tempos específicos para desenvolver o processo de eletroerosão\_ – é o tempo consumido envolvendo as definições para eletroerosão.

A Figura 7 ilustra a estrutura elaborada para conhecerem-se os tempos específicos necessários para a fabricação dos corpos de prova nos processos CAD/CAM avaliados. Esta estrutura foi empregada para ambos os processos (3 e 5 eixos).





**Figura 7** - Tempos envolvidos programação CAD/CAM.

Baseado no diagrama de tempos requeridos para o desenvolvimento das etapas de fabricação realizadas por sistema CAD/CAM foram adquiridos os tempos para cada sub-etapa. Utilizando estas informações são apresentados posteriormente, gráficos para comparação e discussão sobre os processos 3 e 5 eixos.

Para obtenção do tempo de fresamento da geometria, o tempo específico de processo foi obtido pelo CNC. Esse tempo ocorre no momento que o operador realiza o início de operação até o momento que a máquina encerra o processo. Esse tempo fica armazenado no relógio do CNC e foi devidamente registrado pelo operador na ficha de processo.

Para o processo de eletroerosão os seguintes tempos foram computados:

- tempo de fresamento dos eletrodos: é o tempo empregado para construção dos eletrodos.
- tempo de preparação da máquina: é o tempo para os devidos alinhamentos da peça e do eletrodo na máquina de eletroerosão, escolha dos parâmetros tecnológicos e preparação do programa para início do processo.

- tempo de usinagem por eletroerosão: É o tempo real de usinagem, para desbaste e acabamento.

## 2.2 Custos de Fabricação

Os seguintes critérios foram levados em consideração para o levantamento de custos:

- tempos totais de processo (tempo obtido pelo sistema CPS);
- custo de fabricação por processo;
- materiais empregados para confecção do corpo de prova.

A equação 1 apresenta como foi obtido o custo total de fabricação do corpo de prova onde foram computados os valores de custo por processo, considerando somente os tempos reais de produção. Foram desconsiderados para essa fórmula os encargos, insumos e outros fatores, exceto no custo de aquisição de materiais onde foi acrescentado o valor do IPI.

$$C_T = (C_{Aço} + C_{Cobre}) + (T_{CAD/M} \times C_{CAD/M}) + (T_{Mill} \times C_{Mill}) + (T_{Mill/Elet} \times C_{Mill/Elet}) + (T_{EDM} \times C_{EDM}) \quad (1)$$

Onde:

$C_t$ : Custo Total.

$C_{Aço}$ : Custo com o aço para a confecção do corpo de prova.

$C_{Cobre}$ : Custo com o cobre para confecção dos eletrodos.

$T_{CAD/M}$ : Tempo requerido na etapa CAD/CAM.

$C_{CAD/M}$ : Custos da etapa CAD/CAM.

$T_{Mill}$ : Tempo requerido na etapa de usinagem por fresamento .

$C_{Mill}$  : Custos da etapa de usinagem por fresamento.

$T_{Mill/Elet}$ : Tempo requerido na etapa de fabricação dos eletrodos.

$C_{Mill/Elet}$ :Custos da etapa de fabricação dos eletrodos.

$T_{EDM}$ : Tempo requerido na etapa EDM.

$C_{EDM}$ : Custos da etapa de EDM.

O custo da matéria prima é calculado multiplicando-se o peso necessário para fabricação da geometria pelo custo em R\$/Kg. Para o aço VP 20 o custo de mercado computado foi de R\$ 13,00/KG + 5 % IPI e o cobre foi de R\$ 34,00 + 5 % IPI (cotação de maio/2008).

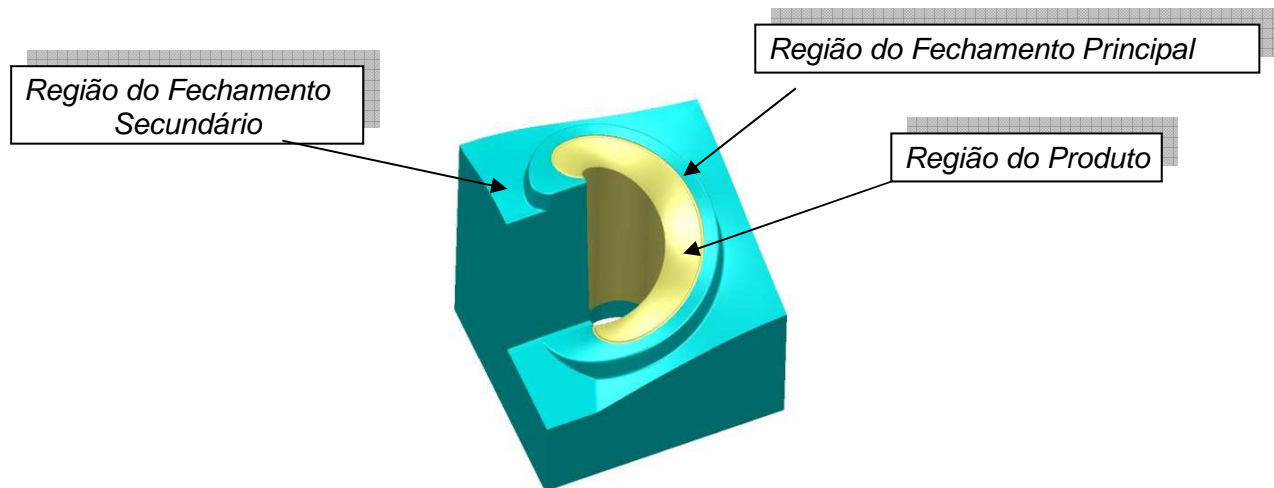
Os custos referentes a cada etapa de fabricação são referentes aos custos hora de cada célula envolvida que no experimento foram embasados pela tabela de custos ano base 2008 da ferramentaria SOCIESC (CAD/CAM, fresamento alta velocidade 3 e 5 eixos, eletroerosão).

Os custos finais obtidos são apresentados na *Tabela 1: Custo de fabricação das cavidades*.

## 2.3 Verificação dos Erros Geométricos

A análise dimensional tem por objetivo identificar os erros geométricos das superfícies usinadas pelo processo de fresamento 3 e 5 eixos.

Com a integração entre softwares CAD/CAI e a máquina de medir por coordenadas, foi possível medir os erros geométricos das superfícies fresadas, nas principais regiões da cavidade, que são as superfícies de fechamento do molde e as superfícies do produto. Foram definidas três regiões para análise, conforme ilustrado na Figura 8.

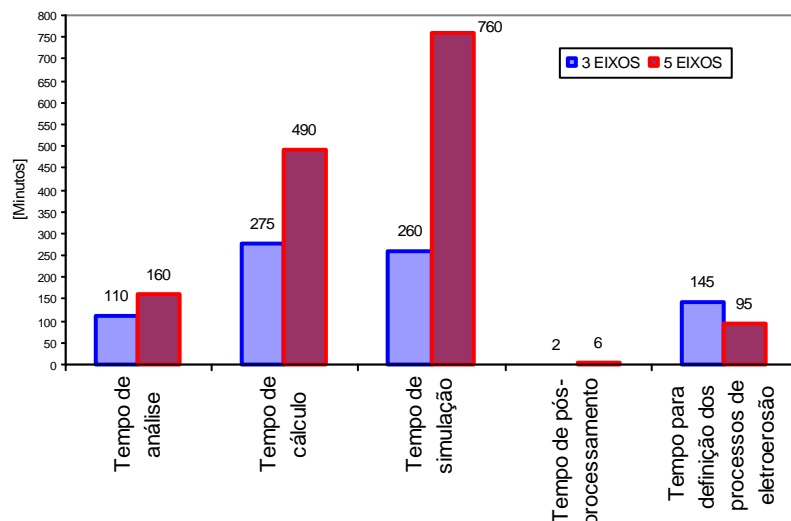


**Figura 8** - Regiões selecionadas para avaliar os erros dimensionais dos corpos de prova

Para avaliação do processo de inspeção, foram escolhidos 10 pontos para a região do produto e 12 pontos para a região do fechamento principal e fechamento secundário, buscando evidenciar a dispersão obtida através de relatório dimensional de cada medição.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os tempos necessários das etapas de fabricação realizadas por sistema CAD/CAM são mostrados na Figura 9, e são significativos para o desenvolvimento das etapas de fabricação em CAD/CAM.



**Figura 9** - Tempos do processo CAD/CAM

No tempo de análise necessário para as definições iniciais da geometria foram feitas as escolhas da melhor estratégia, ferramentas, parâmetros e criação de fronteiras. Nesta etapa o tempo para o processo 5 eixos foi aproximadamente 46% maior em relação ao processo 3 eixos.

O tempo necessário para o software CAD/CAM calcular as trajetórias de ferramenta foi 78% maior para o processo 5 eixos em comparação com o processo 3 eixos.

O tempo necessário para checar possibilidades de colisões suporte/peça e/ou ferramenta/peça consumiram um tempo significativo na fase de simulações em CAD/CAM. No processo 5 eixos há a necessidade de todo o sistema estar modelado, (máquina-peça-ferramenta), o que tornou a simulação cerca de 175% superior ao tempo de simulação para o processo 3 eixos.

A última etapa é o tempo de pós-processamento que foi o tempo necessário para conversão do arquivo gerado pelo CAM para linguagem máquina conforme comando CNC a ser executado. Para os programas em 5 eixos foram necessários 6 minutos para o pós-processamento e enquanto que para o processo em 3 eixos apenas 2 minutos foram suficientes, representando uma diferença de 200%. Essa diferença pode ser explicada pela relação direta ao número de programas que em 5 eixos foi superior, e aos tamanhos dos arquivos que foram 11,1 Mbites para o processo 3 eixos e 38,4 Mbites para o processo em 5 eixos.

O processo de fresamento em 3 eixos, necessitou de 17 programas, enquanto que para o fresamento em 5 eixos o total foi de 23 programas. Considerando que 16 programas foram efetivamente em 5 eixos, isso representa quase 70% do processo de fabricação, sendo os 30% restantes (7 programas) utilizado estratégias de fresamento em 3 eixos. Isso ocorreu porque a geometria inicial no desbaste partiu de um bloco com geometria definida, favorecendo a remoção por camadas em estratégias 2 ½ eixos.

Para a geração dos arquivos necessários à fabricação dos corpos de prova, foram computados 13,3 horas para o processo de fresamento 3 eixos e 25,18 horas para o processo de fresamento 5 eixos.

Para o processo de fresamento em 5 eixos foi necessário um tempo 89% maior em relação ao processo de fresamento 3 eixos. Isso ocorreu devido à maior complexidade dos cálculos de trajetórias e simulações necessários para o fresamento em 5 eixos.

### 3.1 Tempo de Fresamento da Geometria

A Figura 10 ilustra os corpos de prova fabricados no experimento de usinagem.



a: Corpo de prova - Fresamento 3 eixos

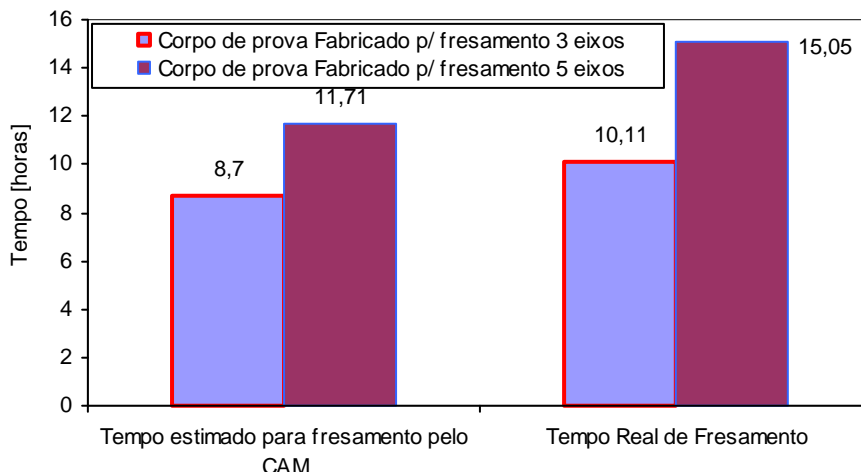


b: Corpo de prova - Fresamento 5 eixos

**Figura 10** - Corpos de prova fabricados.

A Figura 11 apresenta a somatória do tempo de usinagem real para fabricação dos corpos de prova e a somatória relativa ao tempo de fresamento estimado pelo software CAM.





**Figura 11** - Tempo de fresamento da geometria.

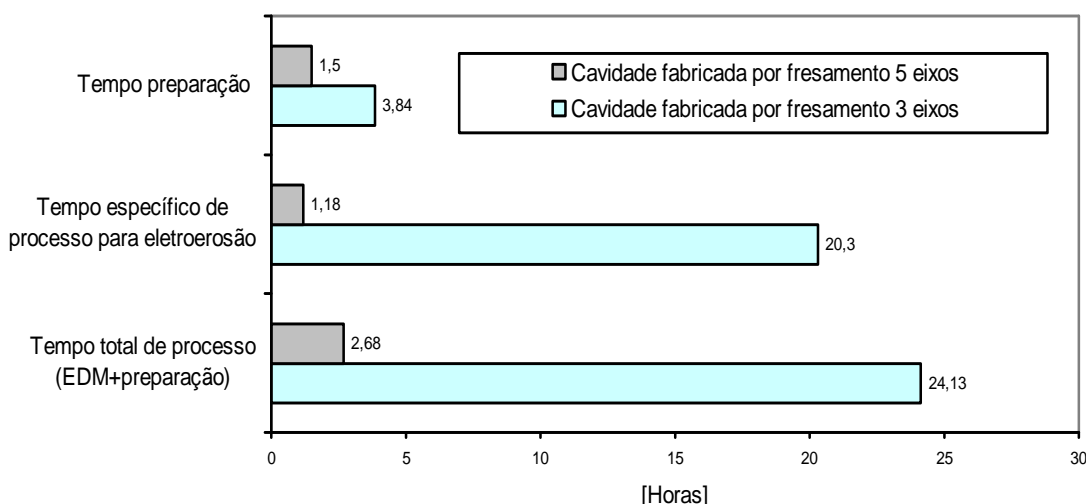
Comparando-se o tempo real de fresamento do corpo de prova, o processo 5 eixos consumiu um tempo 28,5% superior em relação ao processo de fresamento em 3 eixos. Isso ocorreu devido:

- à maior quantidade de programas gerados;
- à maior área de acabamento realizado no fresamento 5 eixos;
- aos avanços reais de usinagem serem significativamente inferiores aos valores programados;

À diferença entre o tempo estimado para fresamento pelo CAM se diferenciou do tempo real. Na usinagem 3 eixos o tempo real foi 16,2% superior e na usinagem 5 eixos o tempo real foi 48% superior ao tempo estimado pelo CAM.

### 3.2 Tempo Total de Processo para Eletroerosão

O apontamento eletrônico com o software CPS foi utilizado para obter o tempo total de processo para eletroerosão, como ilustra a *Figura*. O sistema apenas registra o tempo inicial e final de processo, acionado pelo usuário.

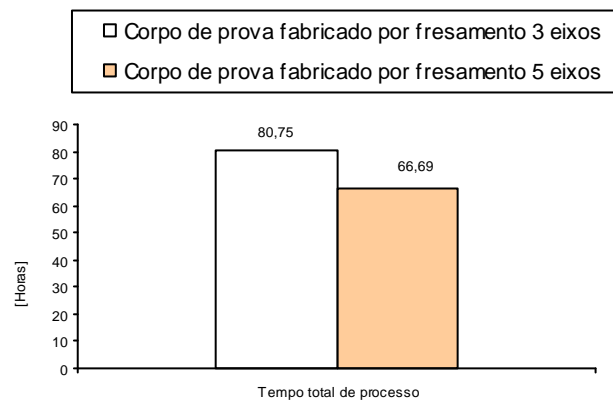


**Figura 12** - Tempo total de processo para eletroerosão.

A diferença de tempo total do processo de eletroerosão (EDM) foi de aproximadamente 8 vezes entre os dois casos de estudos. Este fato evidencia a

eficiência do processo de usinagem 5 eixos, para usinagem de regiões profundas e complexas.

O tempo total de processo constitui-se no tempo computado pelo início e fim de operação via apontamento eletrônico para fins de custos, pois trata-se do tempo específico de processo adicionado aos tempos improdutivos. A Figura 13 ilustra para os dois tipos de fresamento estudados, o resultado referente às somatórias desses tempos.



**Figura 13** - Tempo total de processo.

O corpo de prova fresado por 3 eixos teve um tempo total de processo (registro via apontamento eletrônico) no valor de 80,75 horas e o corpo de prova fresado por 5 eixos apresentou um valor total de 66,69 horas, representando uma diferença de tempo total de processo de 21%.

Para a indústria de moldes, o processo de fresamento em 5 eixos favorece positivamente os prazos de entrega devido à redução de operações e tempos de processos necessários à conclusão de uma cavidade.

### 3.3 Custos de Fabricação

O custo de fabricação avaliado nesse trabalho foi obtido multiplicando o tempo total de processo requerido por cada etapa e seu respectivo custo por hora, adicionado ao custo da matéria-prima, tem-se o custo total de cada corpo de prova, como detalhado na Tabela 1.

**Tabela 1:** Custo de fabricação das cavidades

Processo	Aço $C_{Aço}$	Cobre $C_{Cobre}$	CAD/CAM $C_{CAD/M}$	Fresamento $C_{Mill}$	EDM $C_{EDM}$	Fabricação eletrodos $C_{Mill/Elet}$	Custo total $C_t$
3 Eixos	R\$1.500,75	R\$337,41	R\$826,66	R\$1.436,38	R\$960,26	R\$325,38	R\$5.386,84
5 Eixos	R\$1.500,75	R\$120,44	R\$969,14	R\$1.793,63	R\$106,77	R\$162,69	R\$4.653,41

O processo de fresamento 5 eixos resultou em uma redução de 13,6% do custo de fabricação das cavidades, comparando-se ao processo 3 eixos.

Essa redução se caracterizou principalmente pela minimização da necessidade de eletroerosão e conseqüentemente diminuição da necessidade de fabricação de eletrodos.

### 3.4 Avaliações dos Erros Geométricos

Utilizando-se as informações obtidas com o software CAD/CAI e a máquina de medir por coordenadas, foi realizado um trabalho estatístico auxiliado pelo software Minitab. As três regiões avaliadas são: a área do produto, a área do fechamento principal e a área do fechamento secundário, como detalhado na Figura 8. A Figura 14 mostra os resultados de uma das três medições para a superfície do produto. Cada ponto inspecionado é arquivado no sistema em forma de desvios referentes ao modelamento CAD.

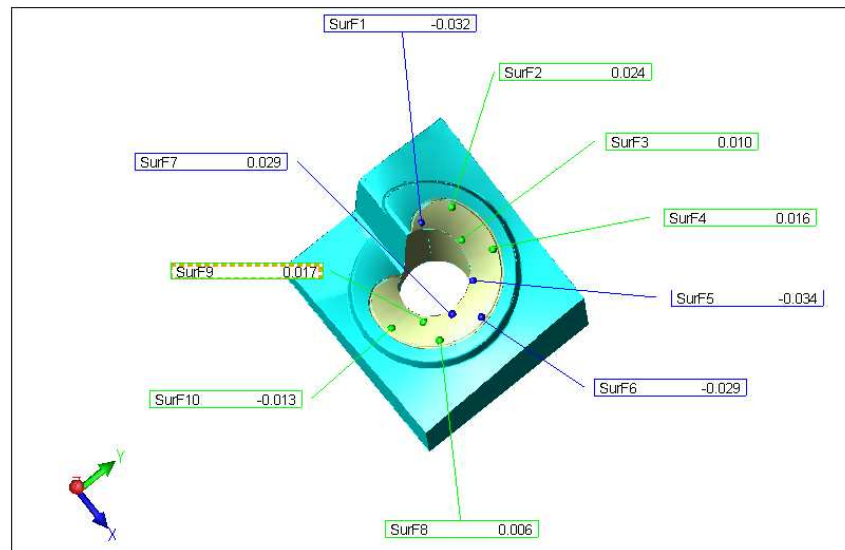
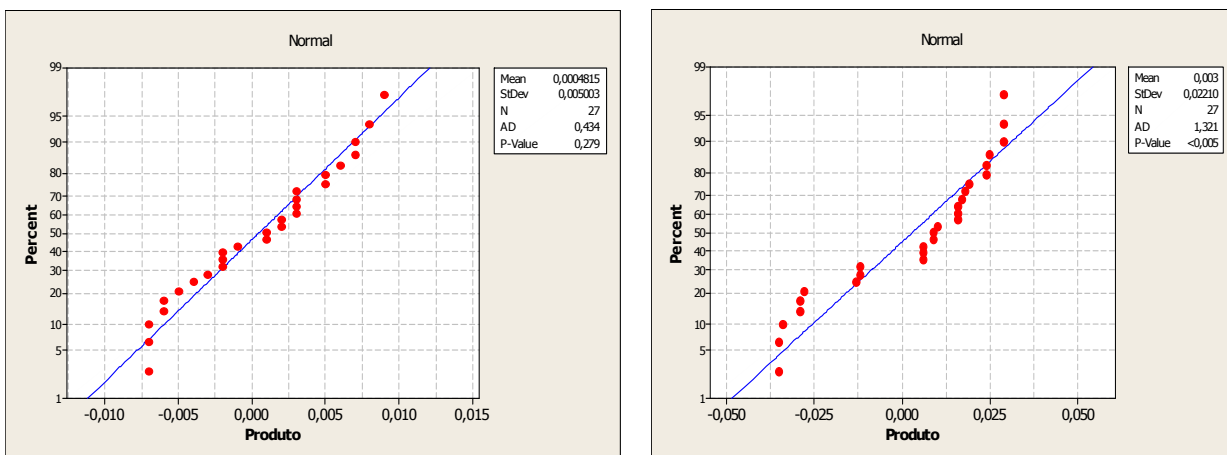


Figura 14 - Medição da região do produto.

A Figura 15 ilustra o teste de normalidade para a região do produto fabricado pelos dois tipos de fresamento empregados.

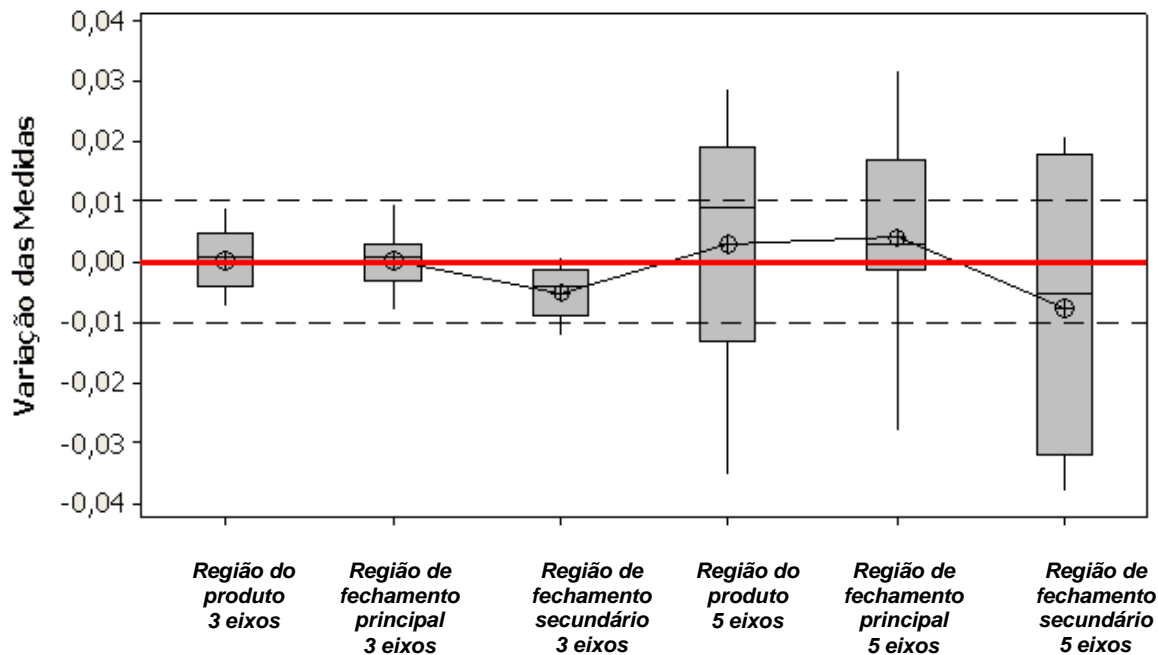


a: Cavidade Fresada em 3 eixos

b - Cavidade Fresada em 5 eixos

Figura 15 - Teste de normalidade para a região do produto.

O gráfico disponível pelo software Minitab, denominado *boxplot*, representa graficamente a dispersão das amostras em 4 sub-divisões dentre os valores obtidos. É importante destacar que as amostras obtidas na máquina 3 eixos apresentaram desvios-padrão menores que os apresentados na máquina 5 eixos. Isso fica evidente no gráfico *boxplot* apresentado na Figura 16.



**Figura 16** - Boxplot comparativo para os dois processos estudados.

Conforme apresentado na Figura 17, nota-se que os desvios dimensionais da máquina 3 eixos foi menor que a abrangência dos desvios da máquina 5 eixos.

Para o fresamento 3 eixos os intervalos encontrados estão dentro dos padrões de precisão recomendados para as áreas de estudo. No fresamento 5 eixos a variabilidade foi bem mais acentuada ocasionando desvios além do permitido para as áreas avaliadas, tornando o processo em 5 eixos simultâneos instável para garantia de precisão em pontos críticos de um molde. Ambos os processos atingiram o grau de normalidade para os resultados obtidos dentro de um nível de confiança na ordem de 95%.

## 5 CONCLUSÃO

As principais conclusões obtidas no desenvolvimento deste trabalho estão apresentadas a seguir.

### 5.1 Conclusões Relacionadas ao Tempo de Fabricação

- O fresamento 5 eixos possibilitou uma redução de 10% do tempo específico para a fabricação da geometria proposta, considerando a somatória dos tempos requeridos por cada etapa de fabricação, sem considerar os tempos de preparação de máquina e demais tempos improdutivos.
- Considerando todos os tempos de fabricação, dos quais são atribuídos os custos de produção, o fresamento 5 eixos propiciou uma redução de 21% do tempo total para a fabricação da cavidade proposta.
- O processo 5 eixos promoveu, para a geometria em estudo, uma significativa redução do número de eletrodos e também no tempo de eletroerosão, devido à área necessária ao processo de eletroerosão ser reduzida, por propiciar maior alcance da ferramenta. Este fato pode favorecer a vida útil do molde por minimizar regiões com camada branca.



- A etapa de simulação CAM para fresamento 5 eixos impacta expressivamente no respectivo tempo e custo de fabricação, onde requereu 175% a mais de tempo, comparado a simulação 3 eixos.
- A grande distinção do fresamento para o caso estudado está na redução significativa de eletroerosão. A diferença entre os processos 3 e 5 eixos alcançou 800%. Indiretamente através dessa redução significativa, minimizam-se áreas prejudicadas pela eletroerosão por formação de camada branca.

## 5.2 Conclusões Relacionadas aos Custos de Fabricação

- O fresamento 5 eixos possibilitou uma redução geral de custos na ordem de 13,6%.
- Na investigação realizada, através de uma metodologia simplificada, a implantação da tecnologia 5 eixos tem um custo 46% superior em relação à tecnologia 3 eixos.
- Para o caso estudado, os custos dos processos de fabricação representam aproximadamente 75% do custo total de fabricação da cavidade, sendo o restante referente à matéria-prima empregada.

## Conclusões para os desvios de forma

- O fresamento 5 eixos propiciou maior desvio de forma.
- Para o fresamento 3 eixos os intervalos encontrados estão dentro dos padrões de precisão recomendados para as áreas de estudo.
- No fresamento 5 eixos a variabilidade foi bem mais acentuada ocasionando desvios além do permitido para as áreas avaliadas, tornando o processo em 5 eixos simultâneos instável para garantia de precisão em pontos críticos de um molde.
- Ambos processos atingiram o grau de normalidade para os pontos de medição obtidos dentro de um nível de confiança de 95%.

## Agradecimentos

Ao Professor Dr. Adriano Fagali de Souza do Instituto Superior Tupy, pela orientação e acompanhamento passo a passo durante o desenvolvimento desse trabalho.

À Ferramentaria SOCIESC e demais envolvidos que se engajaram na realização desse projeto.

À Empresa Villares Metals pelo fornecimento da matéria prima utilizada nos experimentos de usinagem.

À empresa DELCAM, pelo sistema CAD/CAM utilizado nesse trabalho.

À empresa GRV software, pela utilização de software de gerenciamento de custos CPS.

Ao laboratório de Metrologia Sociesc pelo envolvimento nas medições tridimensionais do experimento.

## REFERÊNCIAS

- 1 LUCIANO, M.,A.;VALLEJOS, R.,V.;C.,A.,COSTA; A., GALELLI ;GRACIOLLI,O.,D. (2002) Sistema de planejamento e controle ordena o trabalho em ferramentarias.

- 2 BOUJELBENE, M.; MOISAN, A.; TOUNSI, N.; BRENIER, B. (2004):.Productivity enhancements in dies and molds manufacturing by the use of C1 continuous tool path. International Journal of Machine Tool & Manufacture, Amsterdam, v.44, n1, p.101-107, Jan 2004.
- 3 FALLBÖHMER, P.; ALTANT.; TÖNSHOFF,H.;NAKAGAWA,T.:(1996). Survey of the die and mould manufacturing industry. Journal of Material Processing Technology, Amsterdam, v.59, n1/2, p. 158-168, May.
- 4 SOUZA, A. F. (2004). Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades. São Carlos: SEM, EESC-USP. Faculdade de Engenharia Mecânica, Escola de engenharia de São Carlos. Tese de Doutorado.
- 5 LANGERON, M. J.; DUC, E.; BOURDET, P. (2003). A new format for 5-axis tool path computation, using B-spline curves. Computer-Aided Design 36 December.
- 6 SO, B. S.; JUNG, Y. H.; PARK, J. W.; LEE, D. W. (2007). Five-axis machining time estimation algorithm based on machine characteristics. Journal of Material Processing Technology.
- 7 TSUTSUMI, M, SAITO, A; (2004). Identification of angular and positional deviation inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements. International Journal of Machine Tools e Manufacture,44.(1333-1342).
- 8 MUNLIM, M.; MAKHANOV, S. S.; BOHEZ, E. L. J. (2004) Optimization of rotations of a five axis milling machine near stationary points. Computer-Aided Design 36 pp 1117-1128.
- 9 BECZE, C. E.; CLAYTON, P.; CHEN, L.; EL-WARDANY,T. I.; ELBESTAWI, M. A.(1999) High speed five-axis milling of hardened tool steel. Journal of Machine Tools & Manufacture.pp869-885.
- 10 ILUSHIN, O.; ELBER, G.; HALPERIN, D.; WEIN, R.; KIM, M. (2005).Precision global collision detection in multi-axis NC-machining. Computer Aided Design. Vol 37 p.909-920.
- 11 MARINO, M.; CHRAIBI, S.; MARTINO, T. (1998). Collision Detection Optimization in TAUTEM Project. 3º Seminário Internacional de Alta Tecnologia – Desenvolvimento distribuído do Produto, pp. 105-119. ITALY.
- 12 BAPTISTA, R.; SIMÕES, A. (1999). Three and five axes milling of sculptured surfaces. Journal of Materials Processing Technology 103 pp 398-403.
- 13 BOUZAKIS, D. K.; AICHOUH, P.; EFSTATHIOU, K.; KOUTOUPAS, G.(1999). A computer supported simulation of multiaxis milling to determine optimum cutting kinematics concerning the occurring surface roughness'. 2<sup>nd</sup> International German and French Conference on High Speed Machining.
- 14 LIM, S. T.; MOON, C. L.; KIM, W. S.; LEE, W. D. (2002).Evaluation of cutter orientations in 5 axis high speed milling of turbine blade. Journal of Materials Processing Technology. pp130-131 pp 401-406.
- 15 SILVA, A.S.A. (2006) Desenvolvimento integrado CAD/CAM de componentes para turbinas a gás. Dissertação de Mestrado-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- 16 GOMES, J. O; SOUZA, G. O; SILVA, A. S. A. (2005) Simultaneous 5-axes and 3-axes milling comparison applied on automotive component. 18<sup>th</sup> Congress International of Mechanical Engineering, Nov. Ouro Preto Minas Gerais.
- 17 MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. (2004) Moldes de plástico: otimização da usinabilidade do Aço P20. Revista o mundo da usinagem N15 p 28-30
- 18 METALWORKING CUTTING TOOLS, Catálogo técnico para usinagem de moldes e matrizes TaeguTec. Korea V2007 pp F221-G117-120.
- 19 MILLING TOOLS, Catálogo técnico para usinagem de moldes e matrizes ISCAR. Israel V2007 pp K226-227.