

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

JOÃO PAULO TONSIC

**REVISÃO SOBRE MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS AOS
PROCESSOS DE USINAGEM**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CORNÉLIO PROCÓPIO
2017**

JOÃO PAULO TONSIC

**REVISÃO SOBRE MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS AOS
PROCESSOS DE USINAGEM**

Trabalho de Conclusão de
Curso de graduação, apresentado à
disciplina de Trabalho de Conclusão de
Curso, do Curso Superior de Engenharia
Mecânica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná - UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Carlos
Elias da Silva Junior.

**CORNÉLIO PROCÓPIO
2017**

FOLHA DE APROVAÇÃO

João Paulo Tonsic

REVISÃO LITERÁRIA SOBRE MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS AOS PROCESSOS DE USINAGEM

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:00hs do dia 27/04/2017, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Junior - Presidente (Orientador)

Prof. Dr. Adailton Silva Borges - (Membro)

Profa. Dra. Emillyn Ferreira Trevisani Olivio - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Tenho por mim que a humildade é a qualidade mais impressionante e atraente em um ser humano, através dela derivam-se outros sentimentos extremamente importantes para o convívio ou mesmo para trazer felicidade mútua. Com certeza um destes sentimentos, é a gratidão, portanto, obrigado.

Obrigado à minha família a qual me deu a oportunidade de estudar e principalmente me ensinou os valores necessários para encarar a vida, sem medo, mas com educação e um sorriso no rosto, Mãe, Pai, Aline, Marcelo e Adara, sem vocês não teria chegado até aqui, ou mesmo, não teria o porquê se não fosse por vocês.

Obrigado aos meus orientadores, primeiramente pela sabedoria, conselhos e conhecimento repassados, particularmente pela oportunidade de melhorar como pessoa, como profissional e acima de tudo pela generosidade em entender o momento que estou vivendo na carreira.

Por fim gostaria de agradecer a todos meu professores e amigos da turma 2011/1 do curso de engenharia mecânica, aos amigos da faculdade que a vida me agraciou, aos amigos do BAJA onde pude aprender e crescer, aos amigos do diretório acadêmico pela participação em busca do melhor para o nosso curso.

Para aqueles que por descuido esqueci de mencionar nesta seção, sintam-se abraçados.

Obrigado.

RESUMO

TONSIC, João Paulo. **Revisão sobre métodos numéricos aplicados aos processos de usinagem**. 2017. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Esta revisão literária faz uma abordagem sobre a correlação de duas partes da engenharia, a usinagem e dinâmica através das análises feitas a partir dos métodos dos elementos finitos. É composta pela exposição de estudos envolvendo 10 artigos científicos que contém experimentos teóricos e práticos sobre a investigação do comportamento de alguns processos, materiais e métodos utilizados para observação dos fenômenos ocorridos durante a fabricação de peças. A escolha dos artigos foi feita de modo a reunir elementos diferentes como: o estudo sobre temperaturas, formação de cavaco, aparecimento de trincas e até mesmo estrutural em máquinas e ferramentas, para que fosse possível agrupar um bom nível de informação a respeito das áreas correlatas, tornando este trabalho uma referência para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Métodos numéricos de análise. Métodos dos elementos finitos. Processos de usinagem.

ABSTRACT

TONSIC, João Paulo. **Review of numerical methods applying to machining processes**. 2017. 79 f. Final project (Graduation) - Mechanical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

This review takes an approach to the correlation of two segments of engineering, machining and dynamic through the finite element method analysis. It is composed by an exposure of studies that involves 10 scientific papers containing theoretical and practical experiments on the investigation of the behavior of some processes, materials and methods used for observation of the phenomena occurring during the manufacture of parts. The articles selection was made in order to bring together different elements such as: the study of temperature, chip formation, appearance of cracks and even structural in machinery and tools making it possible to group a good level of information about the related areas, making this work a reference for future works.

Keywords: Numerical methods of analysis. Finite element method. Machining processes.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Primeiro modo de vibração..... | 14 |
| Figura 2 - Esquema da montagem experimental..... | 15 |
| Figura 3 - Função de resposta em frequência (FRF) dos sistemas obtidas nos experimentos (a) 16 A, (b) 16 B e (c) 16 C..... | 16 |
| Figura 4 - Forças de corte, de avanço e temperatura de corte em função do avanço: a) $f = 20 \mu\text{m/rev}$. b) $f = 40 \mu\text{m/rev}$. e c) $f = 80 \mu\text{m/rev}$ | 18 |
| Figura 5 - Evolução da temperatura de corte em função do avanço: a) $f = 20 \mu\text{m/rev}$. b) $f = 40 \mu\text{m/rev}$. e c) $f = 80 \mu\text{m/rev}$ | 19 |
| Figura 6 - Evolução da tensão máxima de cisalhamento em função do avanço: a) $f = 20 \mu\text{m/rev}$. b) $f = 40 \mu\text{m/rev}$. e c) $f = 80 \mu\text{m/rev}$ | 20 |
| Figura 7 - Evolução da deformação plástica obtida em função do avanço: a) $f = 20 \mu\text{m/rev}$. b) $f = 40 \mu\text{m/rev}$. e c) $f = 80 \mu\text{m/rev}$ | 21 |
| Figura 8 - Posição de aplicação do fluxo de calor na ferramenta..... | 23 |
| Figura 9 - Distribuição de temperaturas na ferramenta ao final dos tempos ativos: (a) $T=0,466 \text{ s}$ e (b) $T= 1,500 \text{ s}$ | 23 |
| Figura 10 - Disposição do sistema de variação de fluxo de calor: (a) durante o tempo ativo e (b) durante o tempo inativo..... | 24 |
| Figura 11 - (a) Variação cíclica da temperatura e (b) Efeito dos tempos de aquecimento e de resfriamento sobre a variação da temperatura..... | 25 |
| Figura 12 - Malha de elementos finitos criada para simulação do modelo..... | 27 |
| Figura 13 - Resultados obtidos após a simulação do embutimento para: (a) comportamento da tensão pelo método de Von Mises, (b) valores dos deslocamentos, (c) espessura da chapa pós conformação e (d) deformações plásticas do modelo..... | 28 |
| Figura 14 - Geometria do corpo de prova..... | 30 |
| Figura 15 - Simulação explícita para deformação..... | 33 |
| Figura 16 - Modelo para simulação implícita com a fonte de calor..... | 33 |
| Figura 17 - Resultado da simulação pelo método explícito demonstrando o fluxo de calor em W/m^2 | 34 |
| Figura 18 - Resultado da simulação demonstrando a temperatura em K pelo método implícito..... | 34 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 - Curvas numéricas da variação de temperatura na condição de usinagem C2..... | 35 |
| Figura 20 - Modos de vibração para L = 65 mm: (a) 1° modo e (b) 2° modo..... | 37 |
| Figura 21 - FRF'S para os comprimentos em balanço de 65 e 75 mm | 38 |
| Figura 22 - Carta de estabilidade para os comprimentos em balanço de 65 e 75 mm.. | 39 |
| Figura 23 - Frequências de vibração em função da rotação..... | 39 |
| Figura 24 - Rugosidade em função do comprimento em balanço..... | 40 |
| Figura 25 - Espectros de frequência para cada comprimento em balanço..... | 41 |
| Figura 26 - Pontos de instalação dos sensores de temperature..... | 43 |
| Figura 27 - Curvas de temperatura x tempo dos termopares..... | 44 |
| Figura 28 - Corpo de prova com roseta retangular e terminais para instrumentação..... | 47 |
| Figura 29 - Detalhamento da furação do corpo de prova..... | 47 |
| Figura 30 - Perfil de tensão residual para: (a) tensão axial e (b) tensão circunferencial..... | 48 |
| Figura 31 - Modelagem da malha para o Método do Furo Cego e refinamento próximo ao furo..... | 49 |
| Figura 32 - Disposição da malha nas proximidades do furo..... | 49 |
| Figura 33 - Distribuição de tensões de Von Misses na superfície do modelo..... | 50 |
| Figura 34 - Comparação das tensões residuais na direção axial como função da profundidade do furo..... | 51 |
| Figura 35 - Comparação das tensões residuais na direção longitudinal em função da profundidade do furo..... | 51 |
| Figura 36 - Variação da pressão específica de corte (Ks) em relação a: (a) espessura e (b) velocidade de corte..... | 55 |
| Figura 37 - Modelo utilizado na simulação por elementos finitos: (a) antes e (b) depois da aplicação da força de usinagem..... | 55 |
| Figura 38 - Análise das tensões em relação aos parâmetros: (a) avanço e (b) velocidade de corte..... | 56 |
| Figura 39 - Análise da deformação em relação aos parâmetros: (a) avanço e (b) velocidade de corte..... | 57 |
| Figura 40 - Massas do conjunto original (A)..... | 58 |
| Figura 41 - Massas do conjunto modificado (E)..... | 59 |
| Figura 42 - Massas do conjunto modificado (B)..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 43 - Deformação da máquina considerando o conjunto no centro da viga..... | 60 |
| Figura 44 - Deformação da máquina considerando o conjunto na extremidade da ponte..... | 61 |
| Figura 45 - Efeito da nervura com formato “W” na estrutura da ponte no modelo A.. | 62 |
| Figura 46 - Características da nervura no formato “W” e a original..... | 62 |
| Figura 47 - Deformação da máquina considerando a ponte em formato “W”..... | 63 |
| Figura 48 - Representação das forças de tração e reação do contrapeso..... | 64 |
| Figura 49 - Deformação da máquina considerando tração e reação do contrapeso... | 64 |
| Figura 50 - Deformação da máquina considerando apenas tração do contrapeso... | 65 |
| Figura 51 - Deformação da máquina considerando a estrutura e cabeçote modificado..... | 66 |
| Figura 52 - Deformação da máquina considerando acréscimo do suporte..... | 67 |
| Figura 53 - Deformação da máquina considerando a estrutura e cabeçote modificado..... | 68 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Frequências naturais do sistema para diferentes comprimentos da ferramenta..... | 14 |
| Tabela 2 - Parâmetros de entrada para o software..... | 17 |
| Tabela 3 - Condições de corte no processo de fresamento..... | 31 |
| Tabela 4 - Sequência de ensaios..... | 31 |
| Tabela 5 - Propriedades mecânicas do nitreto de silício..... | 53 |
| Tabela 6 - Parâmetros de usinagem (variando a velocidade de corte)..... | 54 |
| Tabela 7 - Parâmetros de usinagem (variando o avanço)..... | 54 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 7 |
| 1.1 OBJETIVOS | 9 |
| 1.1.1 OBJETIVOS GERAIS | 9 |
| 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 9 |
| 2 METODOLOGIA | 11 |
| 3 REFERENCIAL TEÓRICO | 12 |
| 3.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO LIVRE DE FERRAMENTAS PARA USINAGEM EM ALTA VELOCIDADE | 12 |
| 3.2 SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DO CORTE ORTOGONAL DO AÇO AISI 4140 | 16 |
| 3.3 ESTUDO DA FORMAÇÃO DE TRINCAS TÉRMICAS EM FERRAMENTAS DE USINAGEM NO PROCESSO DE FRESAMENTO | 22 |
| 3.4 SIMULAÇÃO DE EMBUTIMENTO DE COPO QUADRADO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS | 26 |
| 3.5 ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE CALOR NA REGIÃO DE CORTE DURANTE O PROCESSO DE FRESAMENTO ORTOGONAL ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS | 29 |
| 3.6 INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO EM BALANÇO DA FERRAMENTA SOBRE A ESTABILIDADE DINÂMICA DO FRESAMENTO DE TOPO RETO A ALTAS VELOCIDADES | 36 |
| 3.7 DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA COMPENSAÇÃO DA DEFORMAÇÃO TÉRMICA DE UM CENTRO DE USINAGEM 5 EIXOS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) E DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA) | 42 |
| 3.8 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS TENSÕES RESIDUAIS EM SUPERFÍCIES USINADAS APÓS TORNEAMENTO DE COMPONENTES MECÂNICOS FABRICADOS COM AÇO CEMENTADO DIN 21NiCrMo2 (AISI 8620) | 45 |
| 3.9 AVALIAÇÃO DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM FERRAMENTAS CERÂMICAS DE NITRETO DE SILÍCIO | 52 |
| 3.10 ANÁLISE ESTRUTURAL DE MÁQUINAS-FERRAMENTA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS | 57 |
| 4 CONCLUSÃO | 69 |
| REFERÊNCIAS | 70 |
| ANEXO A – Como fazer o download e Instalação do software Ansys®, versão estudantil | 72 |

1 INTRODUÇÃO

Dentro do cenário industrial, muitas peças e componentes são fabricados por algum tipo de processo de usinagem, portanto, qualquer discussão que envolva a melhoria e aumento do acervo de informações a respeito deste assunto deve ser explorada, afim de otimizar os processos existentes e gerar economia para a fabricação, o que pode garantir lucro e também espaço no mercado praticando um preço competitivo de venda do produto. Algumas formas de alcançar este objetivo são: redução do tempo de fabricação, minimização do tempo de “*setup*”, aumento da vida útil de uma ferramenta de corte ou uma combinação destes fatores.

A tendência crescente da evolução de máquinas, ferramentas e equipamentos voltados para usinagem está fazendo com que sistemas de monitoramento e controle que interagem com a máquina sejam cada vez mais utilizados, automatizando o processo e reduzindo de forma considerável os tempos improdutivos e os custos agregados, assim como é dito por Machado et al. (2006).

Existem algumas variáveis que podem ser analisadas e estudadas nos processos de fabricação, como por exemplo, os parâmetros de usinagem, tipo e eficácia dos fluidos de corte, acabamento superficial, vibrações entre outros.

O método dos elementos finitos, conhecido pela abreviação MEF, se apresenta como um instrumento extremamente poderoso na resolução de problemas de diversas áreas e vem se mostrando bastante versátil no campo de estudo dos processos de fabricação. A ideia básica do MEF consiste em utilizar como parâmetros as variáveis nodais de um número finito de pontos previamente escolhidos, denominados de nós.

Segundo Faria et al. (2009), o método dos elementos finitos quando utilizado para análise de operações de usinagem auxilia na compreensão do comportamento dos metais sujeitos ao corte, fornecendo informações sobre a formação e espessura do cavaco e sua interação com a ferramenta de corte, distribuição de temperatura na interface da peça, cavaco e ferramenta, forças de corte e avanço, deformação na região de corte e desgaste da ferramenta.

O monitoramento do estado da ferramenta via análise de vibrações é um método muito utilizado, uma vez que os sinais de vibração estão fortemente

relacionados com desgaste, acabamento superficial e conseqüentemente com a força, assim como afirmado por Meola et al. (2002).

1.1 OBJETIVOS

Neste tópico serão apresentados os objetivos fundamentais e algumas expectativas desta revisão literária.

1.1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho visa realizar uma revisão de artigos sobre métodos numéricos aplicados aos processos de fabricação, para que sirva como base de estudo para outros interessados em desenvolver trabalhos que envolvam análises numéricas sobre o mesmo assunto, demonstrando com isso a possibilidade em se unir dois ramos importantes da engenharia para o emprego de tecnologia na área mecânica e correlacioná-los, com a intenção de aumentar o conhecimento e o acervo bibliográfico a respeito destes temas e promover uma interdisciplinaridade muito interessante para a geração e melhoria do conhecimento.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos de trabalho são:

- selecionar um grupo de artigos que sejam representativos das possibilidades de aplicação da simulação computacional pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) em processos de fabricação;
- avaliar os critérios adotados pelos autores dos artigos selecionados no que diz respeito aos métodos e procedimentos para a realização de análises por meio do MEF, empregando diversos softwares de simulação;
- discutir os resultados apresentados nos artigos, mostrando a versatilidade do emprego do MEF.

Algumas dificuldades podem ser encontradas para quem faz o primeiro contato com os métodos dos elementos finitos, por isso, espera-se que este trabalho possa contribuir de alguma forma para a geração e melhoria da busca pelo conhecimento. Os softwares utilizados para fazer as simulações também podem ser motivo de dúvida para os iniciantes desde a instauração, por isso, no apêndice A, existem informações importantes para auxílio em alguns procedimentos necessários para a instalação de um dos programas mais utilizados para o MEF, o Ansys® estudantil que é grátis e possui uma licença válida por seis meses. No mesmo apêndice existe o endereço onde pode ser feito o download do software pelo site de uma empresa brasileira que comercializa as licenças do software.

2 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido com pesquisas de artigos científicos relacionados a métodos numéricos utilizados em avaliações dos mais diversos tipos em relação aos processos de fabricação e principalmente, os vinculados a usinagem.

A pesquisa foi feita em arquivos digitais através da internet, acervos digitais de congressos de engenharia relacionados ao tema e revistas eletrônicas.

Os artigos foram escolhidos de modo a conseguir reunir o maior número de exemplos distintos a fim de montar uma relação de diferentes aplicações existentes, onde o leitor possa reunir as informações necessárias para colocar em prática as novas habilidades em outras situações ou mesmo para enriquecimento do conhecimento.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas as observações e comentários dos artigos escolhidos, levando em consideração as ferramentas utilizadas para as análises, os tipos de processos envolvidos e a discussão dos resultados avaliados, alguns comentários sobre as melhorias trazidas para aperfeiçoamento dos métodos e das investigações de cada procedimento.

3.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO LIVRE DE FERRAMENTAS PARA USINAGEM EM ALTA VELOCIDADE

O primeiro artigo estudado tem por objetivo identificar as frequências naturais do conjunto ferramenta e porta-ferramenta de uma fresa de topo através de um modelo parametrizado. O estudo foi motivado pela exigência do controle da vibração que existe na fabricação de peças no setor aeronáutico. A modelagem parametrizada foi realizada no software de elementos finitos Ansys® devido à adequação do mesmo para análises e a possibilidade de parametrização da ferramenta de corte.

Segundo Vieira e Almeida (2006), há uma crescente exigência na fabricação de peças com geometria complexa e pouca rigidez, como por exemplo, peças com paredes cada vez mais finas diminuindo com isso a massa da mesma. A identificação das frequências naturais e os respectivos modos de vibração das ferramentas de corte podem ajudar a entender quais são os melhores parâmetros de usinagem, garantindo a qualidade do fresamento em alta velocidade empregada neste processo.

Neste cenário, a usinagem com alta velocidade faz com que o efeito da vibração se torne importante, pois influencia significativamente o acabamento e a tolerância das peças fabricadas.

A proposta do trabalho é identificar e comparar as frequências naturais de ferramentas de corte obtidas tanto experimentalmente quanto pelo método dos elementos finitos (MEF).

A metodologia adotada consiste em construir um modelo parametrizado do conjunto ferramenta e porta-ferramenta, fazer um estudo do efeito do comprimento livre da ferramenta e em seguida, fazer uma verificação experimental das frequências naturais do sistema.

Os resultados foram descritos da seguinte maneira: o modelo tridimensional da ferramenta foi proveniente do perfil do dente, extraído experimentalmente em um projetor de perfis. Já o modelo do porta-ferramenta foi obtido pela rotação do perfil plano transversal do mesmo, cuja área também foi mapeada por uma malha de elementos finitos planos.

Meirovitch (1986) descreveu um elemento sólido de oito nós (hexaedro simples) que tem as mesmas características do elemento tridimensional adotado na modelagem (elemento Solid45 do software Ansys®), possui mesma formulação matemática (funções de interpolação, notação matricial dos deslocamentos e carregamentos). Esse elemento possui funções de interpolação lineares (oito nós) e três graus de liberdade (translação em x, y e z).

Algumas aproximações nas áreas (cortes) que receberam malhas de elementos planos foram necessárias, como eliminar pequenos rasgos e chanfros. Assim, obteve-se um modelo sólido mais uniforme sem influenciar significativamente a rigidez do conjunto.

As condições de contorno aplicadas foram de engaste nas áreas do porta-ferramenta que estão em contato com o fuso da máquina-ferramenta. No entanto, para uma análise mais elaborada do conjunto é importante considerar que a rigidez da máquina-ferramenta não é infinita, adotando-se uma interface de molas entre o porta ferramenta e o fuso.

A análise modal através de métodos numéricos extraiu as frequências naturais e os modos de vibração até a frequência de 10.000 Hz, suficiente para a análise estática requerida.

O primeiro modo de vibração pode ser visto na Figura 1.

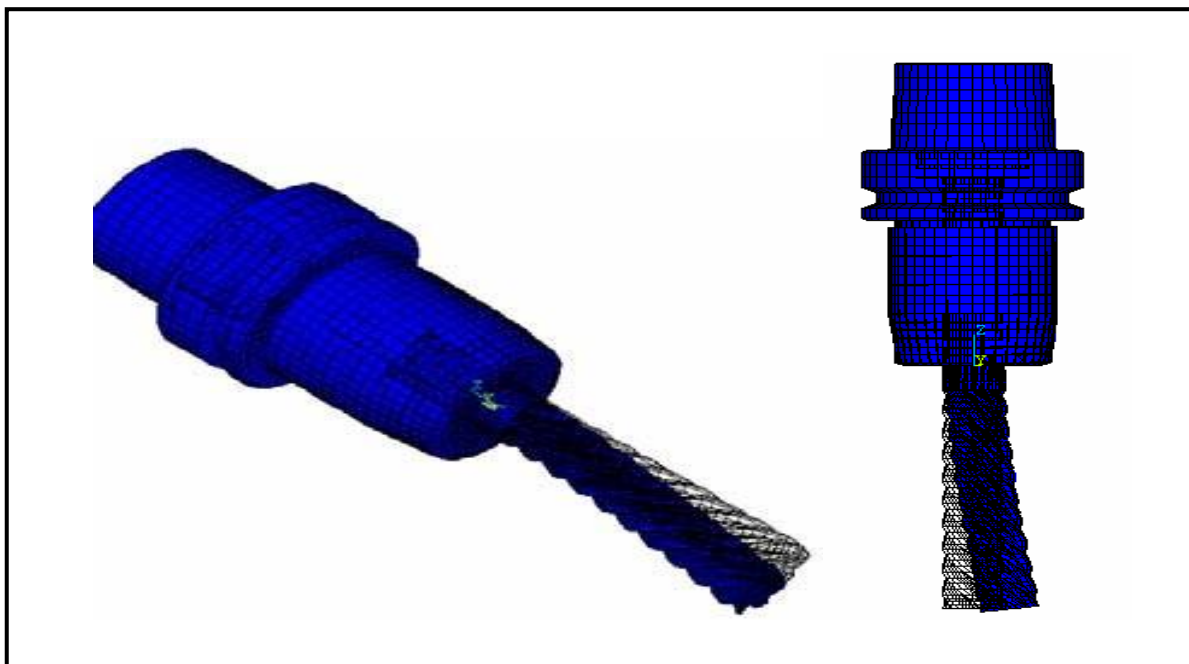


Figura 1 - Primeiro modo de vibração.
Fonte: Vieira e Almeida (2006, p. 3).

O segundo modo de vibração é muito semelhante ao primeiro, como pode-se verificar na Tabela 1. A pequena diferença entre eles pode ser explicada por uma falta de simetria na geometria helicoidal da ferramenta quanto a flexão e distribuição de massa entre os planos de vibração correspondentes aos primeiros modos. É possível verificar também que os modos de vibrar aumentam com a diminuição do comprimento em balanço, o que causa um aumento da rigidez da ferramenta.

Tabela 1 - Frequências naturais do sistema para diferentes comprimentos da ferramenta.

| L (mm) | w1 (Hz) | w2 (Hz) | w3 (Hz) | w4 (Hz) | w5 (Hz) | w6 (Hz) | w7 (Hz) | w8 (Hz) |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 160 | 938,81 | 938,85 | 3.781,6 | 3.783,6 | 6.233,1 | 6.233,6 | 6.419,3 | 8.164,7 |
| 138,33 | 1.275,8 | 1.275,9 | 4.095,7 | 4.097,5 | 7.212,3 | 7.776,5 | 7.776,6 | 8.848,4 |
| 130 | 1.577,7 | 1.577,9 | 4.283,0 | 4.284,9 | 7.774,2 | 9.118,3 | 9.118,7 | 9.308,7 |
| 121,67 | 1.982,3 | 1.982,6 | 4.504,1 | 4.505,9 | 8.383,3 | 9.792,5 | - | - |

Fonte: Vieira e Almeida (2006, p. 4).

Em relação ao efeito do comprimento livre da ferramenta, Vieira e Almeida (2006) citaram que o comprimento da ferramenta tem influência direta sobre as frequências naturais do sistema, pois, se a ferramenta for considerada como uma

viga em balanço, os valores destas seriam inversamente proporcionais ao comprimento da viga elevado ao quadrado.

A parte experimental foi realizada em um centro de usinagem. Foram utilizados sensores capacitivos piezelétricos, um martelo instrumental com cabeça emborrachada e fresas de topo reto de metal duro com 6 e 4 dentes.

Foi utilizado um analisador de espectro para analisar a frequência em uma faixa de 0 – 7.000 Hz através de uma resposta entre os canais 1 e 2 conforme pode-se observar na Figura 2. O martelo serve para excitar o conjunto, emitindo um sinal que passará por um amplificador, assim como o sinal do sensor capacitivo e após essa etapa é que chegam ao analisador de espectro para serem comparados.

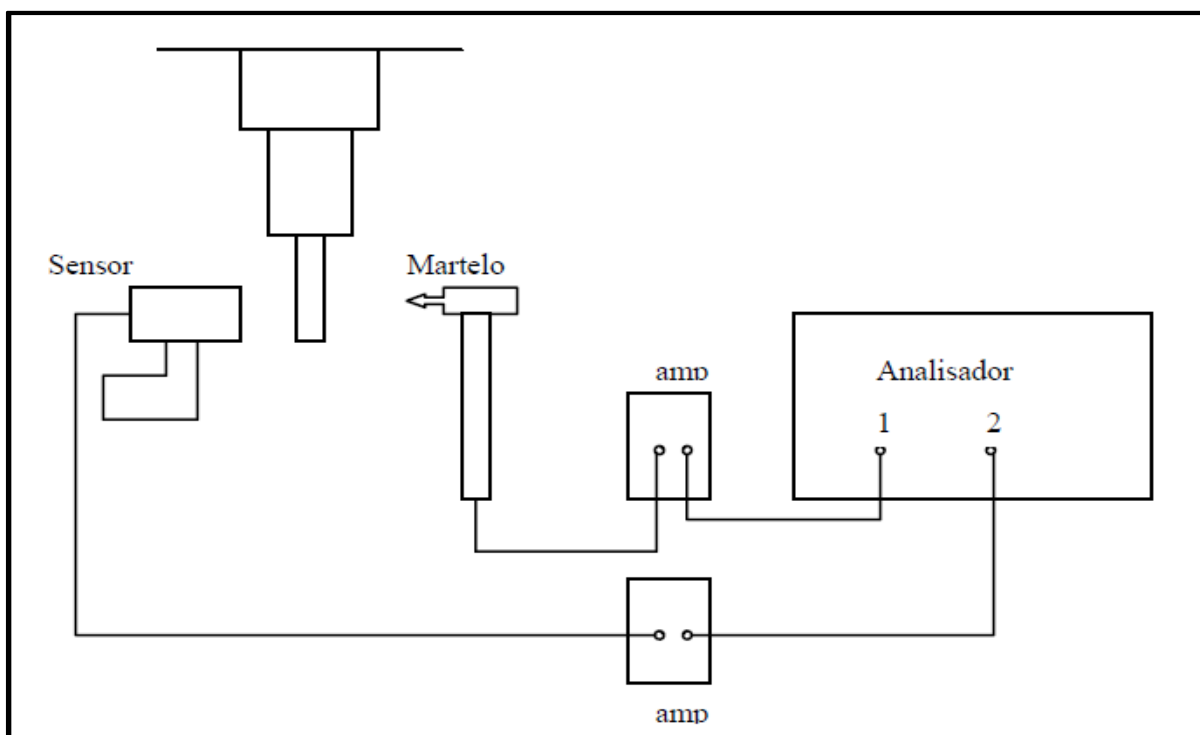


Figura 2 - Esquema da montagem experimental.
Fonte: Vieira e Almeida (2006, p. 5).

A função resposta em frequência obtida resultou de uma média de vários impactos. Nos gráficos da Figura 3 pode-se identificar a primeira frequência natural de vibração, em um valor próximo a 950 Hz.

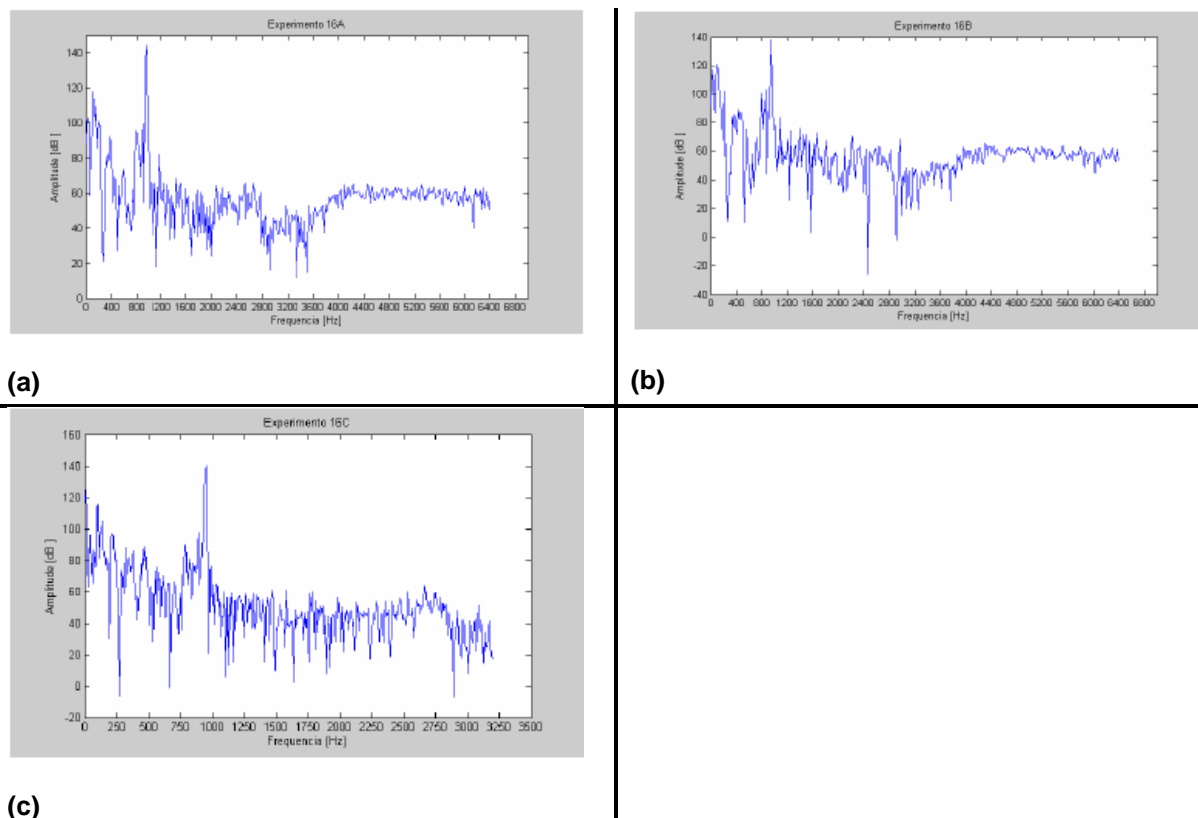


Figura 3 - Função de resposta em frequência (FRF) dos sistemas obtidas nos experimentos (a) 16 A, (b) 16 B e (c) 16 C.

Fonte: Vieira e Almeida (2006, p. 5).

Em síntese o trabalho conseguiu comparar a análise de vibração obtida pelo método dos elementos finitos com o método experimental, obtendo valores bem próximos para o primeiro modo de vibração, o qual é o mais fácil a ser atingido e por isso se torna o principal a ser controlado. Com isso, espera-se obter melhores resultados em processos de usinagem, mais precisamente no fresamento em alta velocidade.

3.2 SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DO CORTE ORTOGONAL DO AÇO AISI 4140

O segundo artigo apresenta uma análise MEF do corte ortogonal do aço AISI 4140, utilizando-se o software AdvantEdge®.

Segundo Faria et al. (2009), o processo de deformação está concentrado em uma pequena zona e as temperaturas que são geradas nesta, afetam grandemente a ferramenta e a peça.

No desenvolvimento do estudo, foram feitas várias simulações utilizando o modelo Lagrangiano no software citado anteriormente, com a finalidade de prever e entender as forças de corte e de avanço, a evolução da temperatura, o cisalhamento máximo e a deformação plástica do metal.

Os parâmetros de entrada para o software estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada para o software.

| Peça | | Simulação | |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|
| Comprimento [mm] | 2.5 | Número máximo de nós | 12000 |
| Altura [mm] | 2 | Tamanho máximo do elemento [mm] | 0,1 |
| Material | AISI 4140 | Tamanho mínimo do elemento [mm] | 0,02 |
| Ferramenta | | Processo | |
| Ângulo de ataque [°] | 0 | Profundidade de corte [µm] | 100 |
| Comprimento da face de ataque | 1 | Comprimento de corte [mm] | 2.5 |
| Ângulo de saída [°] | 7 | Avanço [µm/rev.] | 20; 40; 80 |
| Comprimento da face de saída [mm] | 1 | Velocidade de corte [m/min.] | 100 |
| Raio da aresta [mm] | 0,02 | Temperatura inicial [°C] | 20 |
| Material | metal duro (s/ revestimento) | Coefficiente de atrito | 0,5 |
| | | Fluido de corte | Não |

Fonte: Faria et al. (2009, p. 2).

O parâmetro variado durante as simulações foi o avanço em $f = 20, 40$ e $80 \mu\text{m/rev}$. Os gráficos da Figura 4 apresentam os resultados obtidos pela simulação para as forças de corte, de avanço e para a temperatura de corte em função do avanço, ao longo do comprimento de corte, empregando velocidade de corte de 100 m/min e profundidade de corte de $100 \mu\text{m}$.

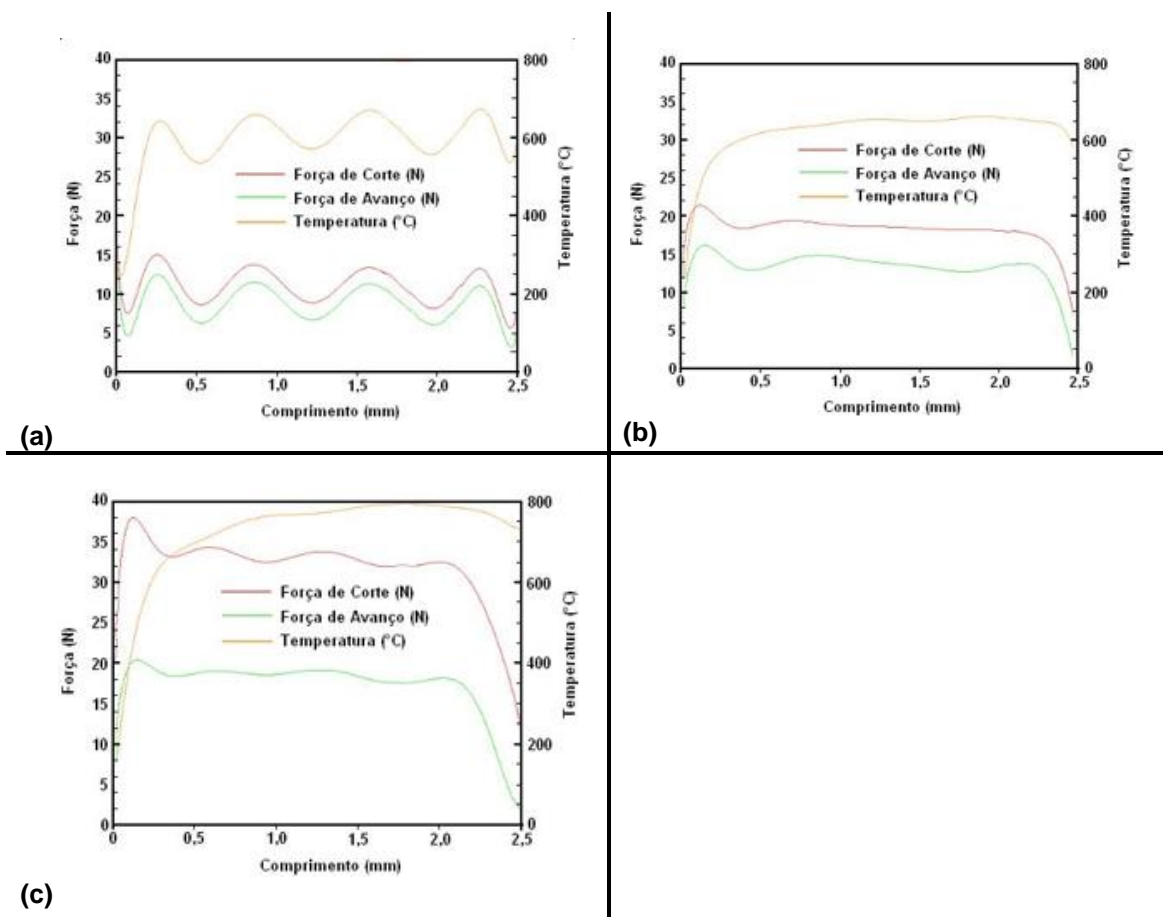
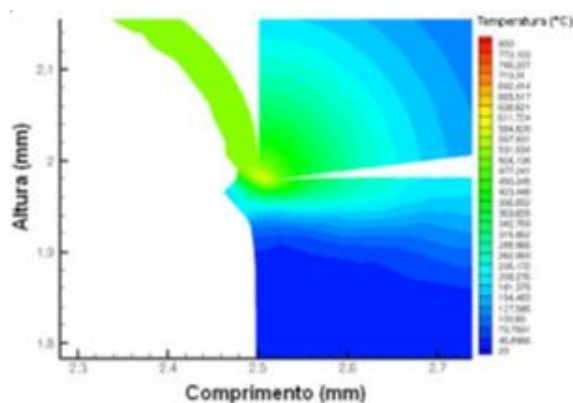


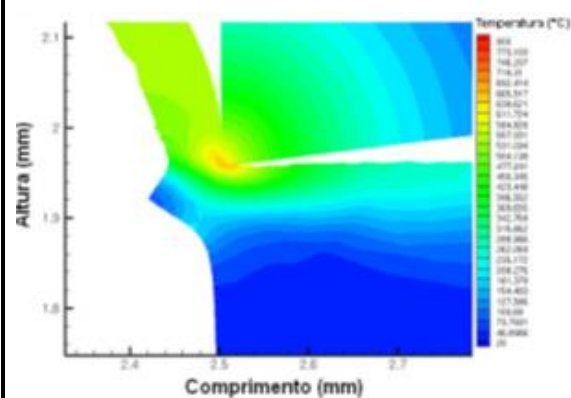
Figura 4 - Forças de corte, de avanço e temperatura de corte em função do avanço: a) $f = 20 \mu\text{m/rev}$. b) $f = 40 \mu\text{m/rev}$. e c) $f = 80 \mu\text{m/rev}$. Fonte: Faria et al. (2009, p. 2).

Nos gráficos da Figura 4, pode-se observar que com o aumento do avanço de usinagem há um aumento também na temperatura e na força de corte de maneira substancial; no entanto, os valores para força de avanço não aumentaram significativamente. Esse fato pode ser explicado devido a força de corte estar intimamente relacionada com a seção de corte do cavaco, portanto, se a energia necessária para a remoção do cavaco aumenta, a temperatura da zona de corte também tende a aumentar.

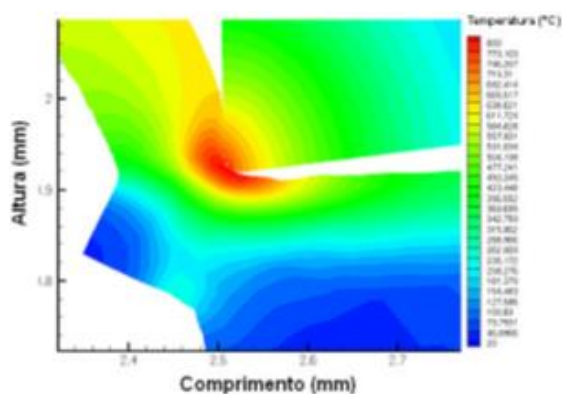
A Figura 5 mostra os mapas de simulação da evolução da temperatura de corte para os diversos avanços obtidos no final do comprimento de corte; os outros parâmetros fixos são: velocidade de corte de 100 m/min e profundidade de corte de 100 μm .



(a)



(b)



(c)

Figura 5 - Evolução da temperatura de corte em função do avanço: a) $f = 20 \mu\text{m/rev}$. b) $f = 40 \mu\text{m/rev}$. e c) $f = 80 \mu\text{m/rev}$.

Fonte: Faria et al. (2009, p. 3).

Nestes mapas é possível observar que a temperatura na zona de corte aumenta com o aumento do avanço, ou seja, há uma constatação de que quanto maior a energia para que o material possa ser cisalhado, também será verificado um aumento na temperatura do processo.

Na Figura 6 pode-se verificar a tensão máxima de cisalhamento em relação ao aumento da velocidade de avanço, obtida no final do comprimento de corte. Nota-se que o aumento da tensão de cisalhamento é diretamente proporcional ao aumento do avanço.

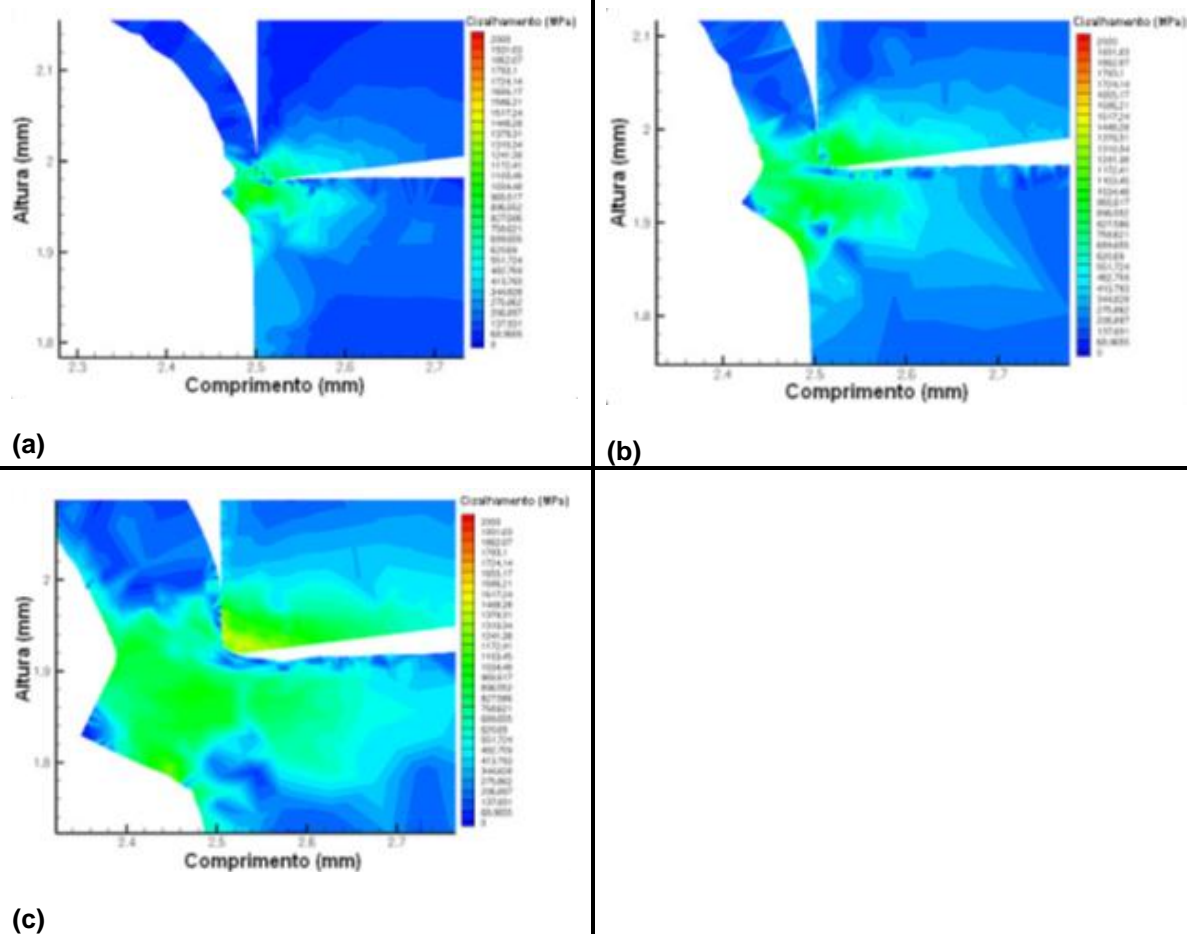
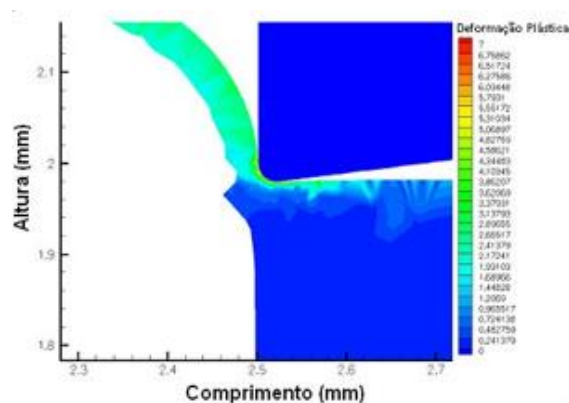
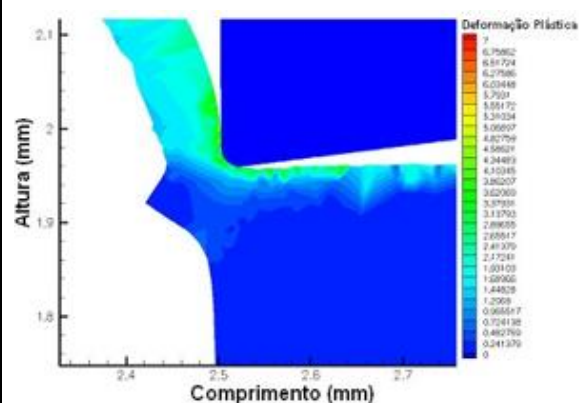


Figura 6 - Evolução da tensão máxima de cisalhamento em função do avanço: a) $f = 20 \mu\text{m/rev}$. b) $f = 40 \mu\text{m/rev}$. e c) $f = 80 \mu\text{m/rev}$.
 Fonte: Faria et al. (2009, p. 4).

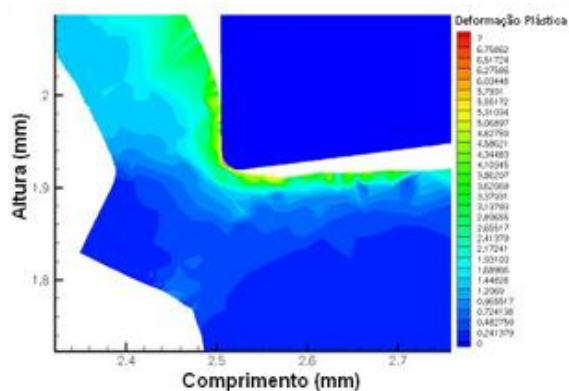
Os mapas da Figura 7 apresentam a evolução da deformação plástica obtida nos experimentos apenas com a variação do avanço, os quais mostram que a maior deformação plástica foi encontrada na superfície externa do cavaco e na superfície da peça, regiões nas quais os esforços para a remoção do cavaco concentraram-se.



(a)



(b)



(c)

Figura 7 - Evolução da deformação plástica obtida em função do avanço: a) $f = 20 \mu\text{m/rev}$. b) $f = 40 \mu\text{m/rev}$. e c) $f = 80 \mu\text{m/rev}$.

Fonte: Faria et al. (2009, p. 4).

Por fim, o trabalho conseguiu demonstrar com a ajuda das simulações, alguns fatores interessantes em relação aos parâmetros de usinagem e como eles se comportam. Outro ponto relevante é que o estudo observou características importantes de temperatura, tensão e deformação durante o corte ortogonal.

3.3 ESTUDO DA FORMAÇÃO DE TRINCAS TÉRMICAS EM FERRAMENTAS DE USINAGEM NO PROCESSO DE FRESAMENTO

Neste artigo foi apresentada a forma como a qual o estudo da formação de trincas em ferramentas foi desenvolvido. Inicialmente, Lopes et al. (2001) citaram que a influência da temperatura na vida útil das ferramentas de corte estão sendo cada vez mais objeto de estudo de trabalhos da área de usinagem.

Quando a operação é feita com corte interrompido, a exemplo do fresamento, existe uma flutuação cíclica da temperatura da ferramenta de corte, ou seja, um aumento quando a ferramenta entra em contato com a peça e conseqüentemente, quando o corte é interrompido, a temperatura desta região tende a diminuir. A partir desta variação da temperatura na interface cavaco-ferramenta ocorre uma modificação, também cíclica, da distribuição de tensões na região de corte, o que pode provocar a formação de trincas térmicas por fadiga.

A importância do estudo da distribuição de temperatura e da taxa de resfriamento da região corte e ferramenta motivou a simulação destes através do método de elementos finitos e também de forma experimental, utilizando um sistema de forma a reproduzir a variação do fluxo de calor.

Para a simulação MEF, foi modelada a ferramenta em 3D, no formato de um paralelepípedo com as dimensões $c = 12,5$ mm por $w = 12,5$ mm por $5,0$ mm de altura. Foi aplicado um fluxo de calor $Q = 20.106$ J/m².s na direção positiva do eixo z, de acordo com a Figura 8, na área de interface cavaco-ferramenta. O ciclo dura $1,5$ s, onde o calor é aplicado durante $0,466$ s (t_a) e o tempo de resfriamento é de $1,033$ s (t_{res}). Estes valores foram adotados de acordo com a simulação experimental. As outras superfícies receberam um fluxo convectivo constante, onde adotou-se o coeficiente de transferência convectiva $h = 20,0$ W/m².°C.

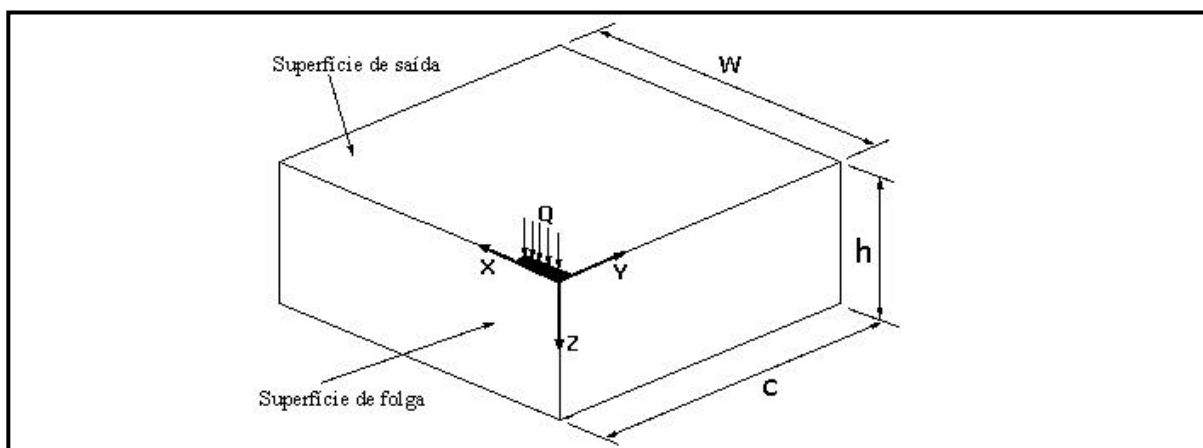


Figura 8 - Posição de aplicação do fluxo de calor na ferramenta.
Fonte: Lopes et al. (2001, p. 3).

Neste parágrafo serão discutidos os resultados obtidos pela simulação pelo MEF. Na Figura 9 (a) pode-se observar a distribuição de temperaturas obtidas ao final do período de aquecimento, enquanto a Figura 9 (b) mostra a distribuição de temperaturas obtida ao final do período de resfriamento, considerando um ciclo completo (tempo ativo mais tempo inativo = 0,466 s + 1,333 s = 1,5 s).

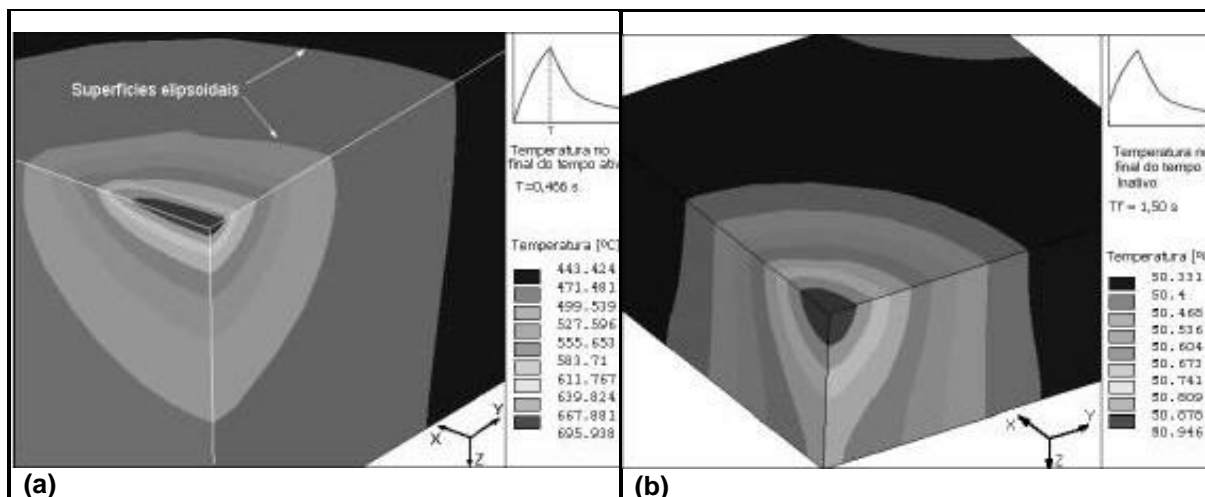


Figura 9 - Distribuição de temperaturas na ferramenta ao final dos tempos ativos: (a) $T=0,466$ s e (b) $T= 1,500$ s.
Fonte: Lopes, Loy e Silva (2001, p. 4).

Após a análise por elementos finitos, foi feita uma análise experimental, a fim de correlacionar os resultados teóricos e práticos obtidos.

Os testes foram feitos de maneira com que se conseguisse ciclos diferentes na região de temperatura de corte, mas sem que a ferramenta fosse sujeita aos esforços mecânicos de uma operação normal, fazendo com isso o estudo apenas dos resultados inerentes ao fluxo de calor do sistema. A temperatura na ferramenta é medida em diferentes posições empregando termopar do tipo K.

O sistema de variação do fluxo de calor é composto de uma chama de oxiacetileno, duas placas circulares de cobre e suporte da pastilha, ilustrado na Figura 10.

A ferramenta foi fixa entre as duas peças de cobre que possuem movimento de rotação. Em cada peça de cobre há uma abertura que permite o contato da ferramenta com a fonte de calor, o comprimento das aberturas e a velocidade de rotação determinam os tempos ativo e inativo da ferramenta, ou seja, o tempo de aquecimento e o tempo de resfriamento da mesma. O conjunto funciona como um gabarito preso na placa de um torno que consegue fornecer a rotação para as peças. Neste trabalho não foi utilizado fluido de corte.

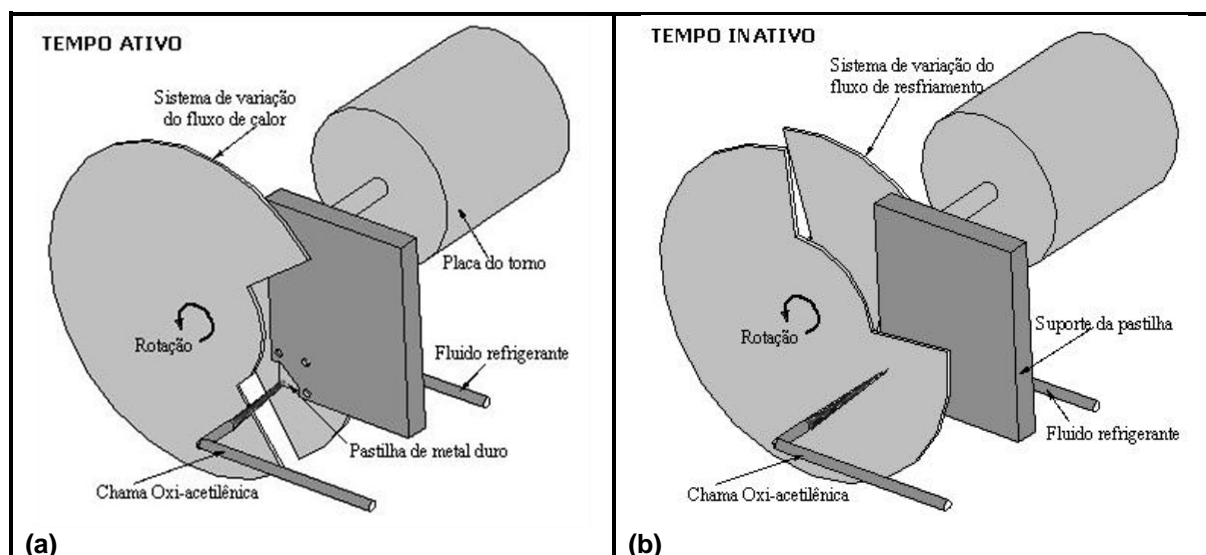


Figura 10 - Disposição do sistema de variação de fluxo de calor: (a) durante o tempo ativo e (b) durante o tempo inativo.

Fonte: Lopes et al. (2001, p. 6).

Os resultados obtidos durante o procedimento experimental podem ser vistos na Figura 11 onde a Figura 11 (a) mostra a variação da temperatura na superfície de saída da ferramenta para o ensaio onde o tempo ativo foi de 0,466 s e o tempo de

resfriamento de 1,033 s. A temperatura máxima aumentou com o tempo e após 8 segundos de teste estava em torno de 350°C, enquanto que a temperatura mínima era de aproximadamente 100°C a uma taxa de resfriamento em torno de 167 °C/s.

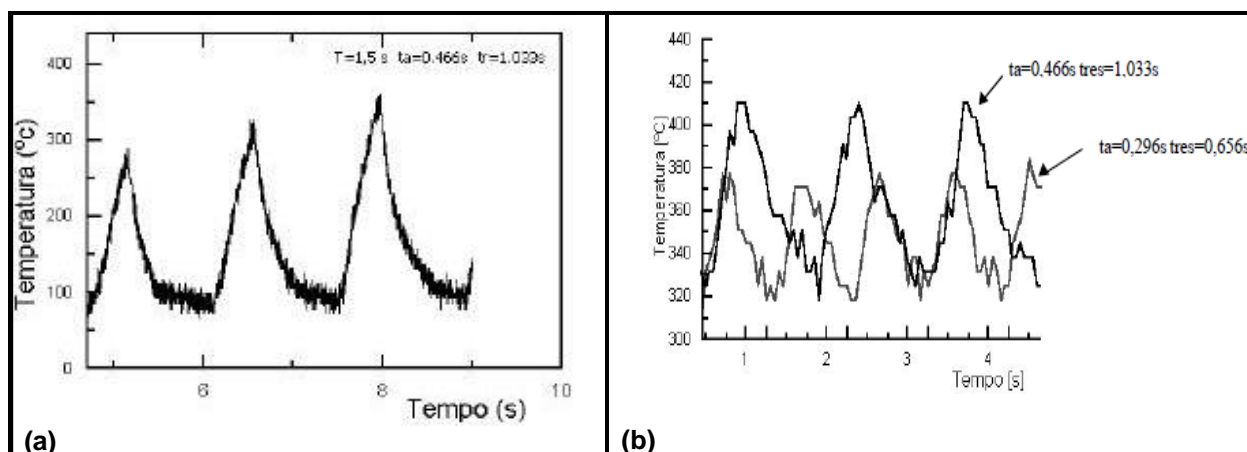


Figura 11 - Gráficos de temperatura x tempo, sendo: (a) variação cíclica da temperatura e (b) efeito dos tempos de aquecimento e de resfriamento sobre a variação da temperatura.

Fonte: Lopes et al. (2001, p. 6).

Os valores dos tempos de aquecimento e de resfriamento foram atingidos com uma rotação de 40 rpm. Para uma operação normal, ou seja, com uma fresa de 100 mm de diâmetro esta rotação representa uma velocidade de corte de 10 m/min. Precisou-se utilizar este valor muito baixo devido ao tempo de resposta do termopar usado para medir temperatura (100 ms).

A Figura 11 (b) compara o comportamento da temperatura com o aumento da rotação, promovendo com o dispositivo a diminuição dos tempos ativos e inativos. A rotação utilizada foi de 63 rpm. Observa-se que a temperatura máxima diminui e a temperatura mínima praticamente não se altera.

Por fim, a modelagem da ferramenta obtida através de métodos numéricos representou de forma qualitativa, o comportamento térmico transiente da mesma. No entanto, quantitativamente houveram diferenças consideráveis que podem ser explicadas devido a incerteza quanto as propriedades térmicas da ferramenta e quanto ao fluxo de calor aplicado a esta.

Apesar das diferenças encontradas, a distribuição tridimensional da temperatura na pastilha permite analisar a maneira na qual o fluxo de calor se propaga na superfície da ferramenta bem como a grande variação de temperatura na mesma,

o que pode indicar também que há diferença de tensão superficial, podendo provocar a geração de trincas térmicas.

3.4 SIMULAÇÃO DE EMBUTIMENTO DE COPO QUADRADO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O artigo em questão faz uma pequena revisão teórica sobre os métodos de conformação dos materiais, no entanto, a finalidade do trabalho é fazer uma simulação pelo método dos elementos finitos das variáveis contidas durante o processo de estampagem de um elemento de seção quadrada.

Silva e Gubaua (2014) enfatizaram que o desenvolvimento e o progresso dos métodos de simulação só foram possíveis graças à evolução dos computadores, os quais possibilitam por meio de algoritmos, um maior reconhecimento e também maior flexibilidade do método computacional para análises estruturais.

Para que se possa compreender o método utilizado, é citado que a geometria da peça é subdividida em pedaços, mais corretamente, elementos, estes que por sua vez estão conectados com o elemento ao lado por meio de nós, criando a configuração de uma malha como pode ser visto na Figura 12. Após isso, a solução do problema passa a ser os n-elementos gerados e não mais a solução da geometria original.

A simulação numérica foi feita no software ABAQUS® 6 Versão 12.

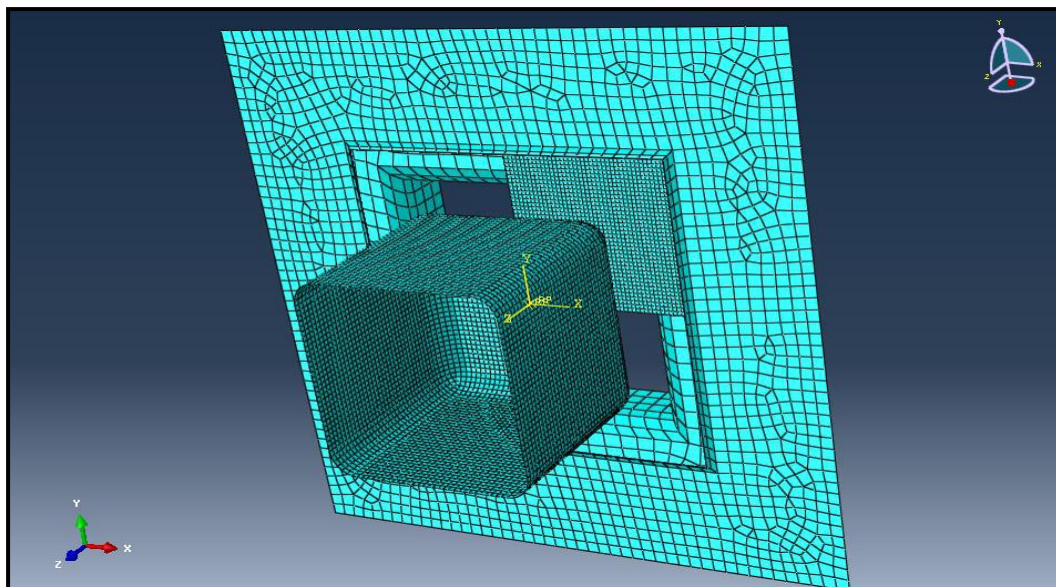


Figura 12 - Malha de elementos finitos criada para simulação do modelo.
Fonte: Silva e Gubaua (2014, p. 4).

O metal utilizado na simulação da conformação é o TRIP 800, as propriedades do material que serviram como parâmetros de entrada no software foram o Módulo de Elasticidade de 207000 MPa, Coeficiente de Poisson de 0,3 e Densidade de $7,8 \cdot 10^{-3} \text{ t/mm}^3$.

A metodologia adotada por Silva e Gubaua (2014) e utilizada para fazer a simulação, é bem interessante e por ser dividida em etapas.

O primeiro passo é a discretização do modelo geométrico a fim de gerar a malha de elemento finitos. Utilizou-se de uma chapa quadrada para simular a conformação. A cor verde indica no software que o material foi aplicado sobre a seção, indicando que é possível dar sequência ao modelamento e simulação.

No segundo passo, são inseridas as propriedades do material, as restrições, condições de contorno e os carregamentos com o intuito de fazer com que as características retratem o mais próximo da realidade e gerando um resultado seguro. Foi usado o módulo Explicit do ABAQUS® em três etapas, fazendo primeiramente a aproximação do prensa chapas junto à chapa; após isso, é aplicada uma força no prensa chapas a fim de evitar possíveis vibrações na chapa durante o processo de conformação mecânica e por fim, o movimento do punção é liberado para conformar a peça.

Tanto o prensa chapas quanto a matriz são engastados, o que faz com que estes não se movimentem ao longo da simulação, ou seja, existe apenas o movimento de aproximação entre o prensa chapas e a chapa.

No terceiro passo, acontece a solução do sistema linear de equação. O quarto passo é o cálculo dos itens de interesse para as variáveis de solução.

Quinto passo, avaliação crítica dos resultados e se for necessário, repetir a análise.

Após a conclusão da simulação, foi feita a discussão dos resultados. Os valores para tensão de Von Misses, deslocamento, espessura e deformação podem ser verificados na Figura 13.

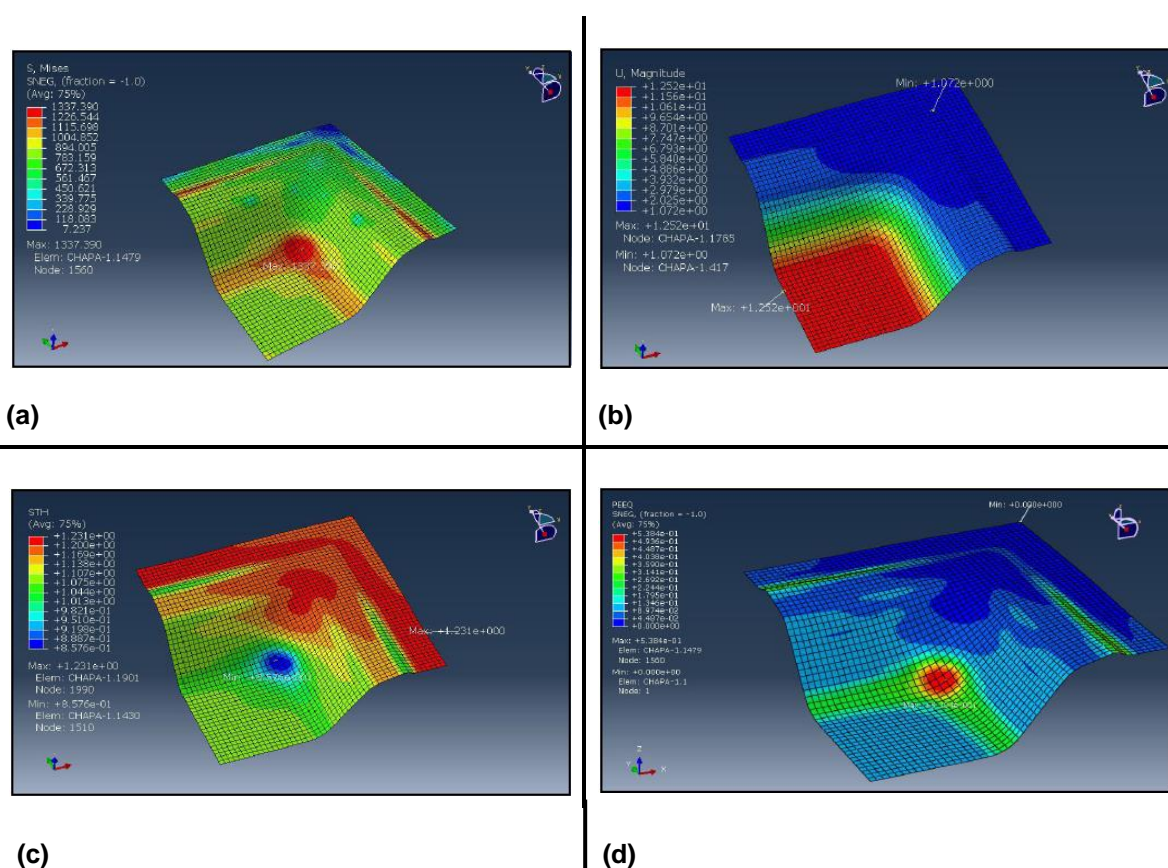


Figura 13 - Resultados obtidos após a simulação do embutimento para: (a) comportamento da tensão pelo método de Von Misses, (b) valores dos deslocamentos, (c) espessura da chapa pós conformação e (d) deformações plásticas do modelo.

Fonte: Silva e Gubaua (2014, p. 9).

A Figura 13 (a) demonstra os valores para tensão, na Figura 13 (b) é possível verificar os deslocamentos após a conformação do material. Na Figura 13 (c), observa-se que o ponto de menor espessura se encontra no canto onde há o arredondamento da chapa de acordo com a geometria do punção e como esperado, na

Figura 13 (d) nota-se que a maior deformação plástica também se dá nesta região, é coerente que os itens avaliados apresentassem resultados correlatos já que o ponto de menor espessura é aquele onde há uma grande tensão, ou seja, região mais fragilizada da peça.

Concluindo, fica clara a importância do dimensionamento e da correta escolha da geometria das peças ensaiadas para o processo de conformação, a fim de evitar força em excesso, o que pode causar o rompimento da chapa a ser conformada já que as maiores concentrações de tensões são dadas justamente nos locais onde os arredondamentos do punção entram em contato com a chapa.

As simulações são feitas com modelos aproximados utilizando um software, o que pode inserir alguns erros de resultados. Mesmo assim, pode-se perceber a ajuda que este tipo de ferramenta pode oferecer para melhoria de projetos sem a necessidade de gasto de tempo e dinheiro em modelos reais, permitindo que o projeto consiga ser ajustado e melhorado antes mesmo de sua concepção física final.

3.5 ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE CALOR NA REGIÃO DE CORTE DURANTE O PROCESSO DE FRESAMENTO ORTOGONAL ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O trabalho em questão, teve como objetivo comparar um modelo de formação de cavaco obtido pelo método de elemento finitos com resultados obtidos experimentalmente em uma operação de fresamento ortogonal.

Durante o desenvolvimento do artigo, Nascimento (2011) cita a importância do tempo para a indústria, ou seja, quanto mais se reduzir o tempo de fabricação, necessariamente, os custos de produção também tenderão a cair.

A geração de calor, na região de interface peça, cavaco e ferramenta pode influenciar em vários fatores durante a usinagem, tais como: acabamento superficial, vida útil da ferramenta, perda de tolerância dimensional entre outros problemas. Existe um dado interessante neste artigo, Nascimento (2011) afirma que com base em pesquisas mais recentes, quando há um aumento da velocidade de corte, o tempo para que o calor gerado no processo seja conduzido pela peça é menor,

com isso, a maior parte do calor acaba sendo transferido para o cavaco, fora da região de corte.

A proposta do trabalho é o desenvolvimento de um modelo numérico para a simulação de um processo de fresamento ortogonal no qual será obtida a distribuição de temperatura na peça. Estas simulações serão realizadas com velocidades de corte de 80, 100 e 150 m/min e avanço por dente de 0,17 mm/dente.

A parte experimental do trabalho utilizou um centro de usinagem Romi Discovery 560; a ferramenta utilizada foi uma fresa de topo com haste cilíndrica com diâmetro de 16 mm, a peça feita em aço AISI 4340 cujas dimensões podem ser vistas na Figura 14.

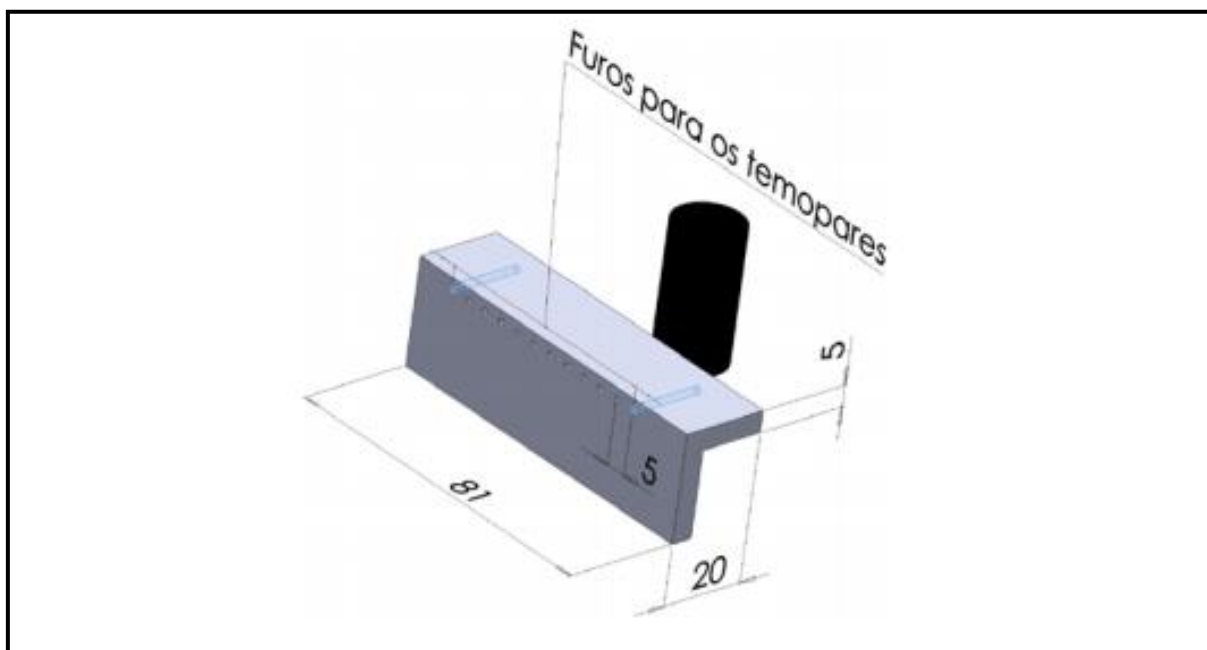


Figura 14 - Geometria do corpo de prova.
Fonte: Nascimento (2011, p. 2).

No corpo de prova, existem furos para alojar os termopares do tipo k. Os dados de temperatura foram medidos por meio de um sistema de aquisição de dados composto por um amplificador de carga modelo 5019 da marca Kistler e um microcomputador para receber esses sinais. No microcomputador, havia uma rotina computacional em Labview® para converter os sinais de tensão (Volts) para temperatura (em °C) usando as curvas de calibração dos termopares.

No experimento foram utilizadas três condições de corte. Os valores de profundidade de usinagem (a_p), avanço por dente (f_z) e profundidade lateral (a_e) foram mantidos constantes e variou-se apenas a velocidade de corte, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Condições de corte no processo de fresamento.

| Experimento | V_c [m/min] | f_z [m/dente] | V_f [mm/min] | a_p [mm] | a_e [mm] |
|-------------|---------------|-----------------|----------------|------------|------------|
| C1 | 80 | 0,17 | 270,57 | 5 | 0,55 |
| C2 | 100 | 0,17 | 338,21 | 5 | 0,55 |
| C3 | 150 | 0,17 | 508,17 | 5 | 0,55 |

Fonte: Nascimento (2011, p. 3).

Para satisfazer a matriz estatística foram necessários seis corpos de prova (CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6). Cada ensaio foi repetido uma vez para cada corpo de prova a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados, com uma diferença, no segundo ensaio, a distância entre o termopar e a região de calor diminui em 0,55 mm (a_e). No primeiro experimento, a distância entre a região de corte e o termopar foi chamada de $d_{0,8}$ e no segundo experimento de $d_{1,35}$. Os ensaios seguiram a sequência apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Sequência de ensaios.

| | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 | CP5 | CP6 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $d_{0,8}$ | C5 | C6 | C1 | C2 | C3 | C4 |
| $d_{1,35}$ | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C1 |

Fonte: Nascimento (2011, p. 3).

No software ABAQUS®, existe o módulo explícito o qual utiliza informações do tempo anterior para determinar a variável no tempo futuro. Esse método é computacionalmente simples, mas o intervalo tem que ser muito pequeno, podendo ser da ordem de milissegundos. Já o módulo implícito, usa as informações

do tempo anterior mais a do tempo presente, para encontrar a variável no tempo futuro, tal método necessita resolver um sistema de equações para cada intervalo de tempo (podendo ser da ordem de minutos ou horas).

No artigo analisado, utilizou-se do método explícito já que este permite simular deformações não lineares. Foi possível observar a distribuição de calor em cerca de 0,0012 segundos de contato entre a aresta da ferramenta e a peça usinada. No entanto, para maior efetividade do modelo foi realizada uma segunda simulação, utilizando o método implícito de solução. A partir deste, pode-se verificar a distribuição de calor na peça, porém sem deformação, durante o tempo necessário para avaliação.

O modelo de elementos finitos foi construído a partir de observações feitas em um sistema de fresamento real, e a partir daí, foram feitas algumas considerações para que o método numérico pudesse ser utilizado.

Na primeira etapa o processo ocorrerá no tempo de contato entre a aresta de corte e a peça.

Em um segundo momento, a fonte de calor, representada pelos fluxos, atuará sobre a peça, por um tempo mais longo, reproduzindo o que na realidade é o tempo de duração da usinagem do elemento. Devido a operação de fresamento ser um processo intermitente, os valores de fluxo de calor são pulsos sincronizados gerados pelo contato entre os dentes, velocidade de corte e de avanço.

O ambiente Abaqus/CAE permite a modelagem em 2D e a discretização do mesmo. Na primeira etapa do processo foi criado um modelo MEF para solução explícita, conforme mostrado na Figura 15.

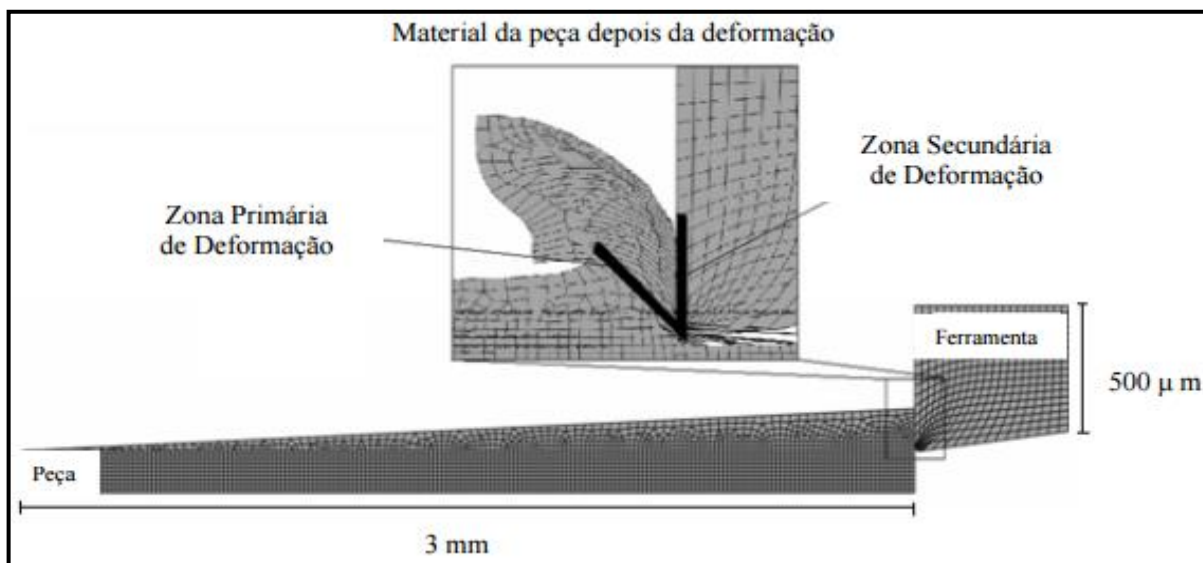


Figura 15 - Simulação explícita para deformação.
 Fonte: Nascimento (2011, p. 4).

Na Figura 15, pode-se perceber onde se encontram as principais regiões de geração de calor, zonas primária e secundária de deformação, nesta última ocorre grande parte da transferência de calor para a ferramenta, o que pode contribuir negativamente na taxa de remoção de material. O fluxo de calor obtido através deste processo, foi usado para segunda etapa da simulação (método implícito), conforme Figura 16, onde uma fonte de calor percorre o mesmo caminho que a ferramenta faria em uma usinagem real, com a velocidade de avanço V_f . Em ambas etapas do estudo, os parâmetros de corte foram padronizados seguindo a Tabela 3.

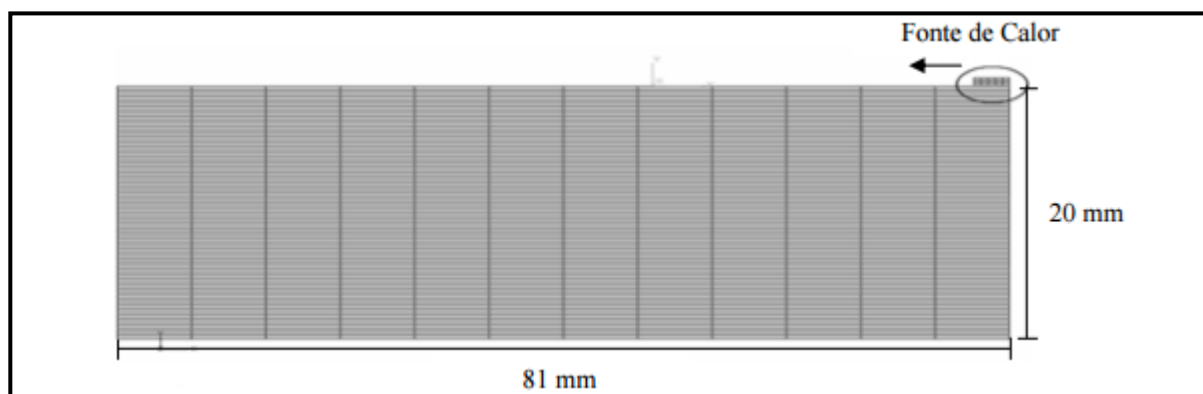


Figura 16 - Modelo para simulação implícita com a fonte de calor.
 Fonte: Nascimento (2011, p. 5).

Na parte de discussão dos resultados, a Figura 17 representa o fluxo de calor gerado no processo de fresamento simulado.

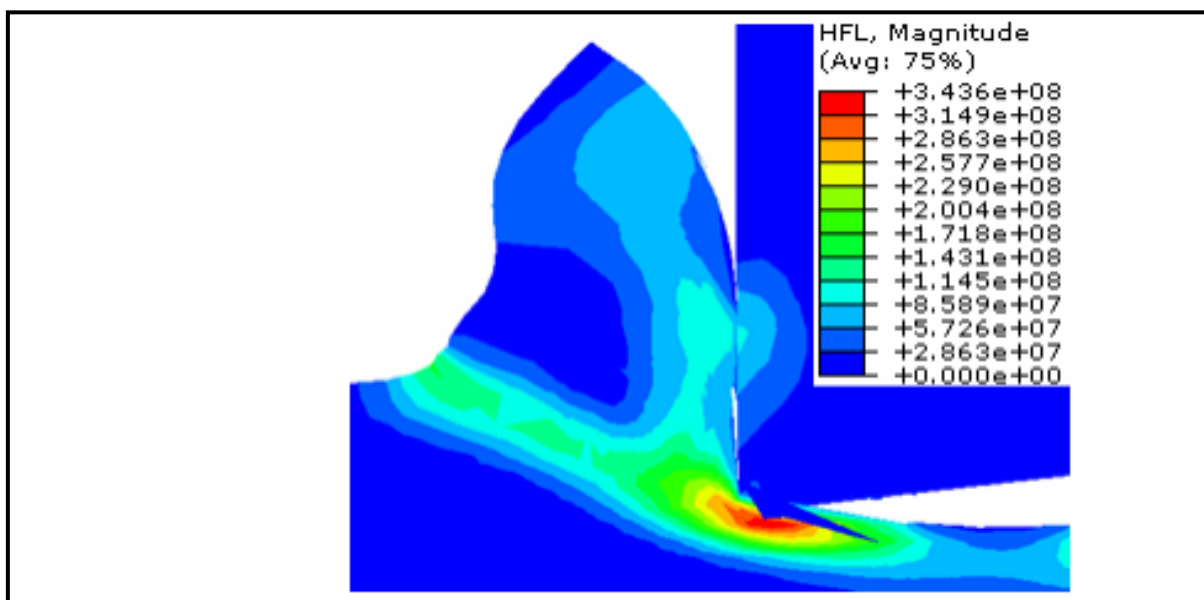


Figura 17 - Resultado da simulação pelo método explícito demonstrando o fluxo de calor em W/m^2 .

Fonte: Nascimento (2011, p. 6).

Posteriormente, foi feita a simulação para o método implícito, cujo resultado pode ser visto na Figura 18.

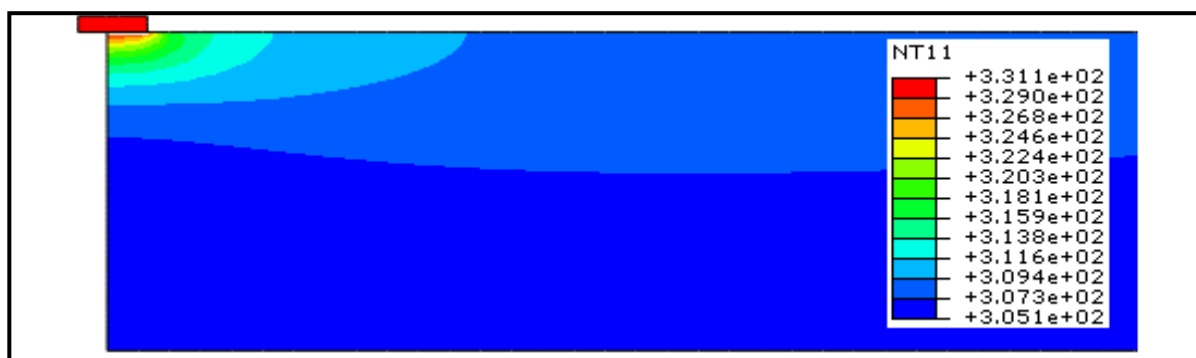


Figura 18 - Resultado da simulação demonstrando a temperatura em K pelo método implícito.

Fonte: Nascimento (2011, p. 7).

As imagens foram retratadas nas condições de corte C2. A Figura 19 apresenta as curvas de temperatura obtidas dos termopares, onde pode-se identificar um aumento de temperatura.

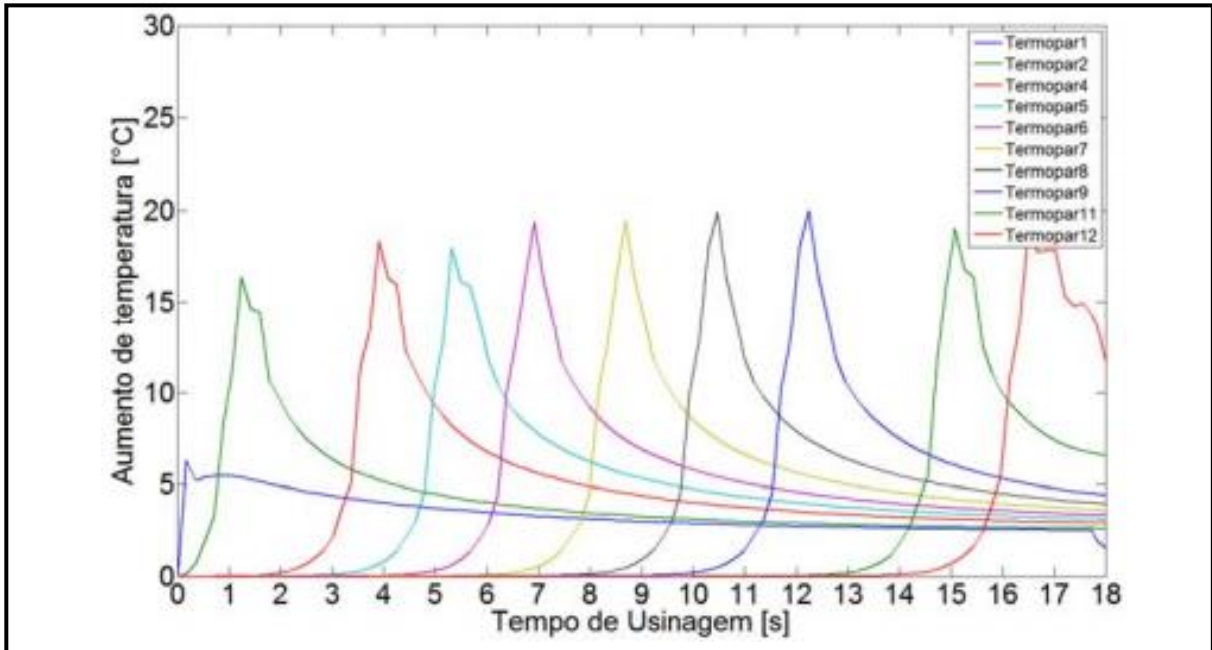


Figura 19 - Curvas numéricas da variação de temperatura na condição de usinagem C2.
Fonte: Nascimento (2011, p. 7).

Em seguida, os dados obtidos dos termopares foram tratados a fim de comparar os dados da simulação teórica e a experimental. Após a aquisição de temperatura para todas as condições de corte (C1, C2, C3) foi feita uma rotina em Matlab® que calcula a média do aumento de temperatura na peça em cada condição de corte, conforme a equação (1).

$$\Delta \bar{\theta}^{C,d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta \bar{\theta}^{C,d} \quad (1)$$

Onde C é a condição de usinagem, M o número de termopares e d é a distância entre o termopar e a fonte de calor.

Através da análise dos gráficos foi possível observar que o aumento da velocidade de corte causou uma redução na temperatura da peça, que provavelmente tenha explicação devido ao tempo de contato entre ferramenta e peça ser menor, dissipando calor através do cavaco.

Ao final do estudo, pode-se observar alguns aspectos importantes como: a constatação discutida no parágrafo acima, o modelo proposto consegue simular uma operação de fresamento por completo, novamente, além de poder afirmar que o método de elementos finitos, é uma ferramenta que ajuda a melhorar os padrões de qualidade devido a melhoria na escolha dos parâmetros de usinagem que podem gerar aumento de produtividade, vida útil da ferramenta e garanti das tolerâncias dimensionais, lembrando que a simulação é feita sem a necessidade de gasto com material e ferramentas.

3.6 INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO EM BALANÇO DA FERRAMENTA SOBRE A ESTABILIDADE DINÂMICA DO FRESAMENTO DE TOPO RETO A ALTAS VELOCIDADES

Neste trabalho existe uma preocupação com as exigências sobre comportamento dinâmico dos sistemas envolvendo a máquina, ferramenta e peça, mais especificamente em um processo de fresamento em alta velocidade. A fixação da fresa em balanço em diferentes comprimentos resulta em valores distintos para as frequências naturais bem como a rigidez do sistema como um todo.

Para analisar as características descritas acima, utilizou-se o Método dos Elementos Finitos. As funções resposta em frequência para as diferentes fixações da ferramenta foram obtidas através de testes de impacto empregando-se martelo e acelerômetro. Os experimentos foram realizados através da usinagem de canais em blocos de alumínio, com a ajuda de fresas inteiriças de metal duro.

Na avaliação, foram observados o acabamento superficial das peças e os sinais de áudio captados por um microfone. Um resultado interessante é que menores comprimentos em balanço não resultam necessariamente em maior estabilidade para o processo. Há grande relevância quando a frequência de passagem de dentes se aproxima da frequência natural, e neste caso, é possível alterar as

características dinâmicas do sistema a fim de aumentar a taxa de remoção de material sem que ocorram grandes vibrações.

O experimento foi feito em um centro de usinagem, o material das peças ensaiadas é a liga 7075-T6 a profundidade do corte axial foi aumentando até que o processo deixasse de ser estável. O sinal de áudio foi captado por um microfone unidirecional de 1/2" modelo 377A02; as respostas em frequência foram captadas através de testes de impacto utilizando martelo modelo 086B03 e acelerômetro modelo 352810.

A Figura 20 retrata os 2 primeiros modos de vibração para um comprimento em balanço de 65 mm. Como condições de contorno foram considerados os sulcos para a transmissão do torque e a fixação do porta-ferramenta ao eixo-árvore através da superfície interna do cone.

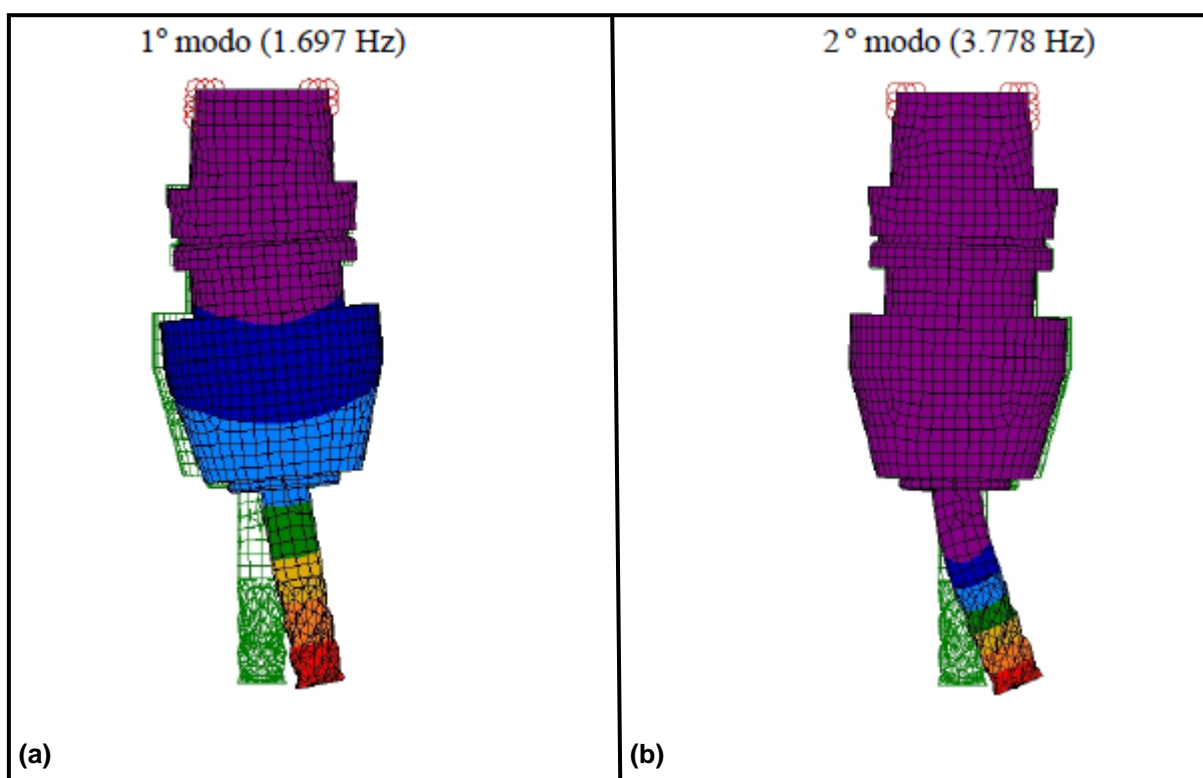


Figura 20 - Modos de vibração para $L = 65$ mm: (a) 1° modo e (b) 2° modo.
Fonte: Weingaertner et al. (2004, p. 4).

O gráfico da Figura 21 mostra as FRF's medidas na extremidade de uma fresa para os comprimentos em balanço de 65 e de 75 mm.

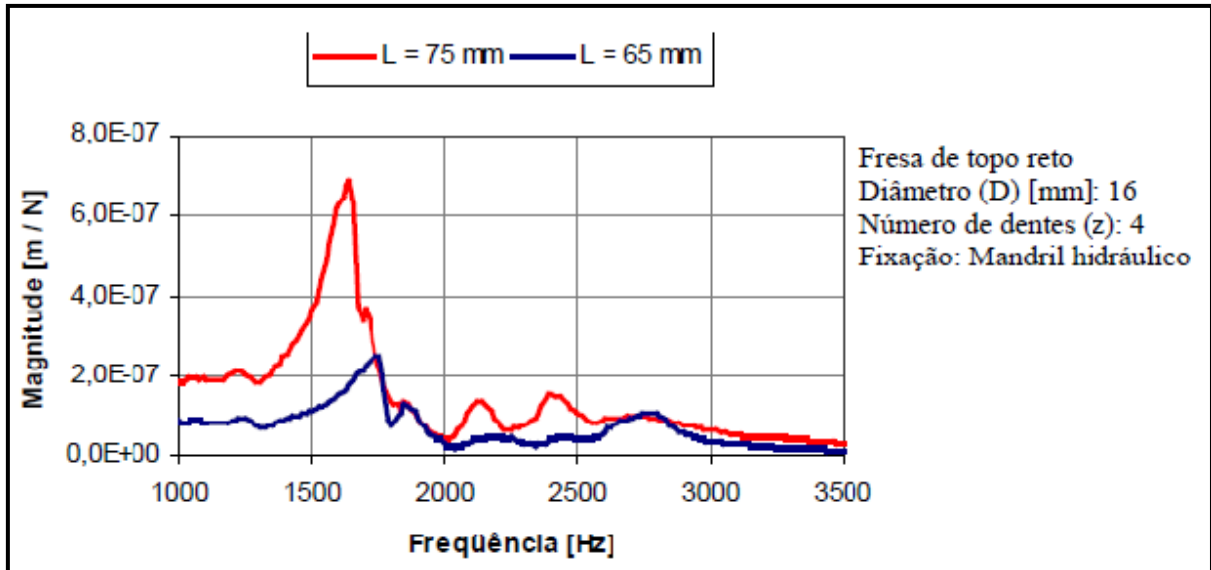


Figura 21 - FRF'S para os comprimentos em balanço de 65 e 75 mm.
Fonte: Weingaertner et al. (2004, p. 4).

A simulação com o comprimento de 75 mm possui alguns picos que demonstram os modos de vibrar, o primeiro modo de vibrar ocorre com a frequência de 1638 Hz. O gráfico da Figura 22 também mostra os outros modos de vibrar em 2400 Hz e 2138 Hz. Para o comprimento de 65 mm, os picos são menos aparentes, ou seja, um modo de vibrar é mais próximo do outro, o que é explicado devido ao aumento da rigidez do sistema provinda de um menor comprimento em balanço.

Juntamente com a análise do áudio captado, foi feita a medição de rugosidade da peça, criando uma carta de estabilidade para cada comprimento em balanço. As curvas são consideradas fronteiras entre regiões de estabilidade (abaixo das curvas) e instabilidade (acima) onde ocorrem vibrações e podem ser vistas sobrepostas na Figura 22.

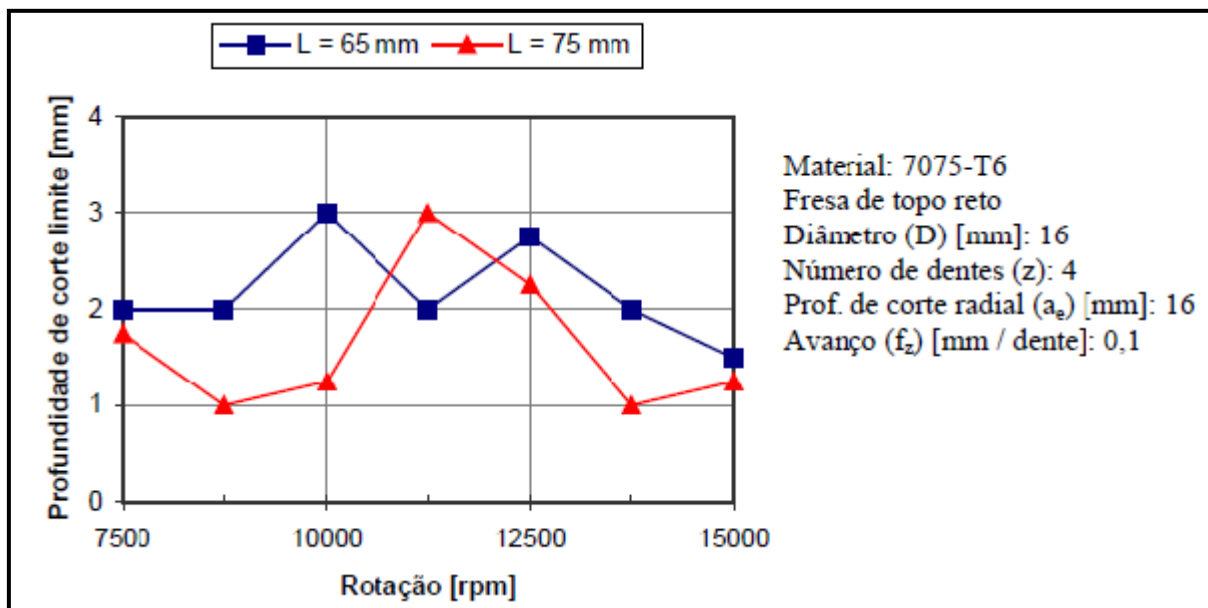


Figura 22 - Carta de estabilidade para os comprimentos em balanço de 65 e 75 mm.
 Fonte: Weingaertner et al. (2004, p. 5).

No gráfico da Figura 23 está retratada a maneira como a qual se comportou a frequência de vibração (f_v) dos 2 comprimentos em balanço, em função da rotação empregada.

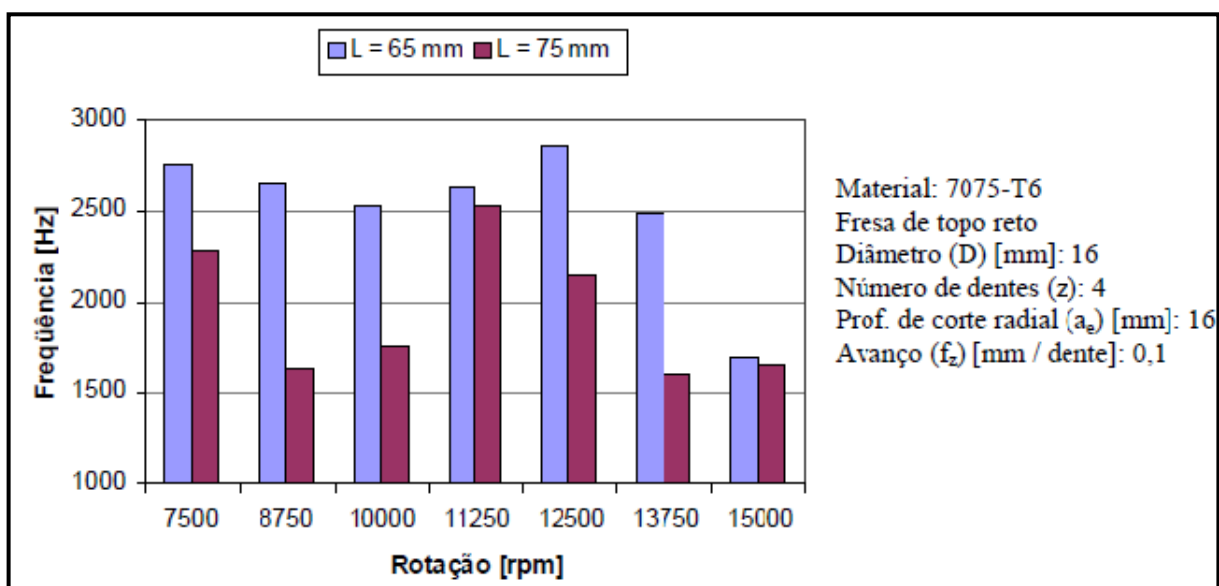


Figura 23 - Frequências de vibração em função da rotação.
 Fonte: Weingaertner et al. (2004, p. 6).

Há uma semelhança entre a carta de estabilidade e o gráfico gerado pelas frequências de vibração em diferentes rotações do maior comprimento em balanço.

A próxima análise ficou por conta dos valores de rugosidades medidos nos rasgos usinados para diferentes comprimentos em balanço, os menores valores ocorreram para os comprimentos de 70 e 75 mm onde os cortes foram considerados como estáveis. Em relação ao menor comprimento, onde a rigidez é maior, a rotação utilizada no ensaio correspondeu a uma condição desfavorável, o que acarretou no surgimento de vibrações regenerativas no processo de usinagem. Esta discussão foi feita sobre os dados da Figura 24.

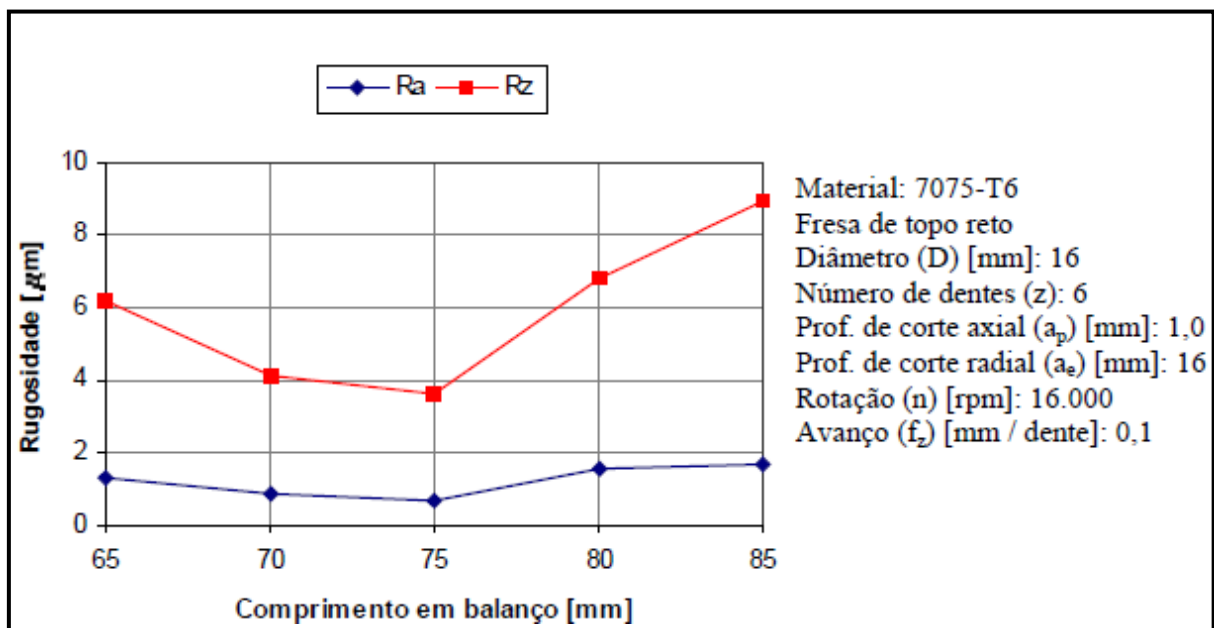


Figura 24 - Rugosidade em função do comprimento em balanço.
 Fonte: Weingaertner et al. (2004, p. 6).

A Figura 25 mostra os espectros dos sinais de áudio medidos durante o processo de usinagem para os diferentes comprimentos em balanço.

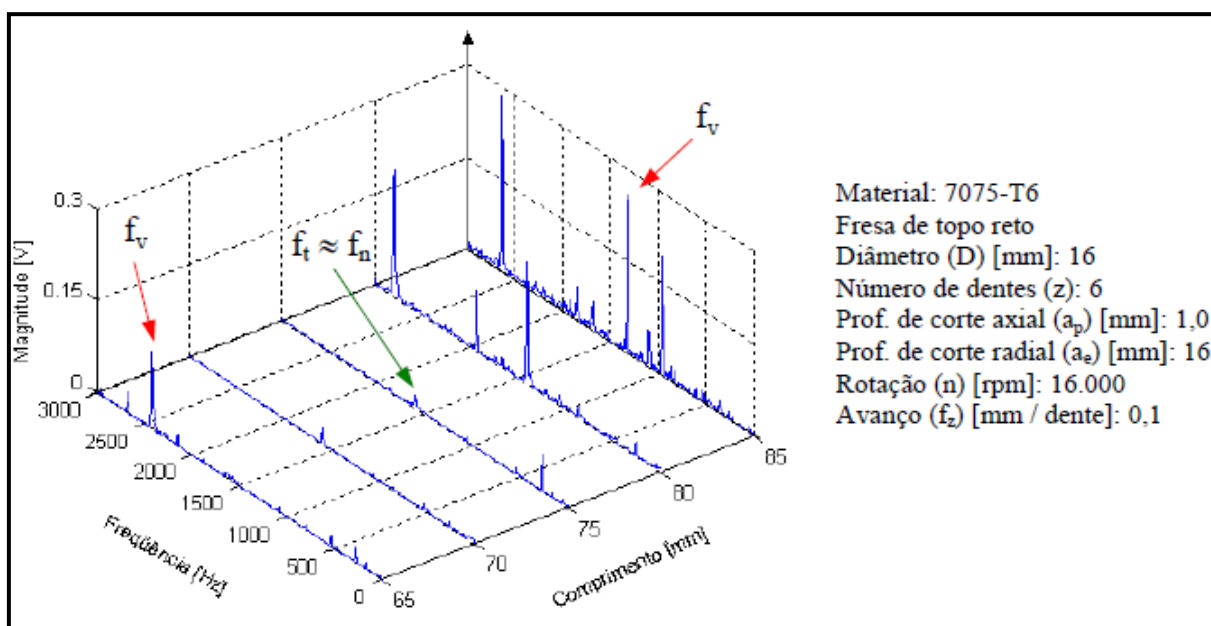


Figura 25 - Espectros de frequência para cada comprimento em balanço.
 Fonte: Weingaertner et al. (2004, p. 7).

Para os comprimentos $L = 80$ e 85 mm, as magnitudes são elevadas para as frequências próximas dos primeiros modos, a frequência de vibração para $L = 65$ mm, está associada ao segundo modo de vibrar. Para os comprimentos de $L = 70$ e 75 mm, aparecem com magnitudes consideravelmente menores a frequência de passagem de dentes (f_t) e a frequência de rotação devido à excentricidade.

Ao final das análises, Weingaertner et al. (2004) citaram a influência direta que o comprimento em balanço da fresa exerce sobre as características do sistema e também dos resultados da usinagem. Os valores encontrados durante a simulação por MEF foram próximas daquelas medidas experimentalmente, garantindo a boa qualidade dos dados fornecidos pelo método. Ficou evidente também a forma como a qual a estabilidade do processo depende da dinâmica do sistema, bem como dos parâmetros de corte escolhidos, ou seja, diferentes comprimentos em balanço podem gerar distintos modos de vibrar durante o processo.

De maneira geral, menores comprimentos em balanço, conseguem atender a cortes mais profundos na peça sem que ocorram vibrações regenerativas o que não exclui o fato de que algumas características combinadas possam gerar este fenômeno.

Finalmente, a característica mais marcante deste trabalho é a importância de que um parâmetro ou característica de ferramenta sejam decisivos para o sucesso de um processo produtivo utilizando altas velocidades, ainda mais interessante, poder observar que o emprego da simulação computacional permite que estas análises sejam confiáveis e úteis para a indústria.

3.7 DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA COMPENSAÇÃO DA DEFORMAÇÃO TÉRMICA DE UM CENTRO DE USINAGEM 5 EIXOS ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) E DE REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS (RNA)

Este artigo, preocupou-se em propor uma solução para o problema da deformação térmica de um equipamento para usinagem com auxílio do método dos elementos finitos e de redes neurais artificiais capazes de compensar estes deslocamentos causados pelas mudanças de temperatura.

Durante a introdução, Santos et al. (2015) afirmaram que devido ao fato dos centros de usinagem serem utilizados normalmente para fabricação de peças complexas, há uma preocupação em relação aos desvios relativos da superfície da peça e da ferramenta de corte, o que pode acarretar em dimensões finais fora do especificado em projeto.

Para realizar o mapeamento das fontes de calor, foram verificados alguns locais como: rolamentos e mancais; Óleo hidráulico; Acionamentos; Bombas e motores; Guias lineares e patins; Fontes de calor externas – ambiente; Processo de usinagem. Para o auxílio da detecção destes pontos mais importantes, foi utilizada uma câmera com gravação de imagem infravermelha.

Após a observação das imagens termográficas, foram instalados 6 sensores nos pontos críticos ao longo da estrutura da máquina.

Neste parágrafo serão descritas as etapas necessárias para a simulação através de elementos finitos. Foi feito o desenho da máquina em 3D e este foi transportado para o Ansys® no módulo de análise térmica estacionária para aplicação das condições de contorno térmicas baseadas nas leituras obtidas pelos termopares. Exportou-se as condições de contorno térmicas para a solução estrutural e, em

seguida, simulou-se os deslocamentos que ocorrem na ponta da ferramenta para fazer a análise pelo método dos elementos finitos. A partir disso, foram plotados os dados de temperatura x tempo baseado na leitura dos termopares, bem como o deslocamento x temperatura obtido pela análise numérica.

Criou-se uma rede neural artificial (RNA) através da função de ativação no Matlab®, tendo como entradas os valores das temperaturas de cada nó no modelo em elementos finitos, correspondendo aos valores de temperatura medidas pelos termopares distribuídos no centro de usinagem. Treinou-se a RNA por meio de programas desenvolvidos no Matlab® usando as funções contidas no próprio software. O processo de validação foi executado a fim de verificar se a rede poderia realmente aprender e prever os deslocamentos térmicos somente fazendo uso das leituras de temperatura nos nós e após isso, foi feita a simulação dos deslocamentos em cada eixo, por meio das funções do Matlab® para verificar a eficiência da técnica desenvolvida, permitindo assim a compensação dos erros térmicos.

A Figura 26 demonstra a localização dos sensores nos pontos críticos da máquina.

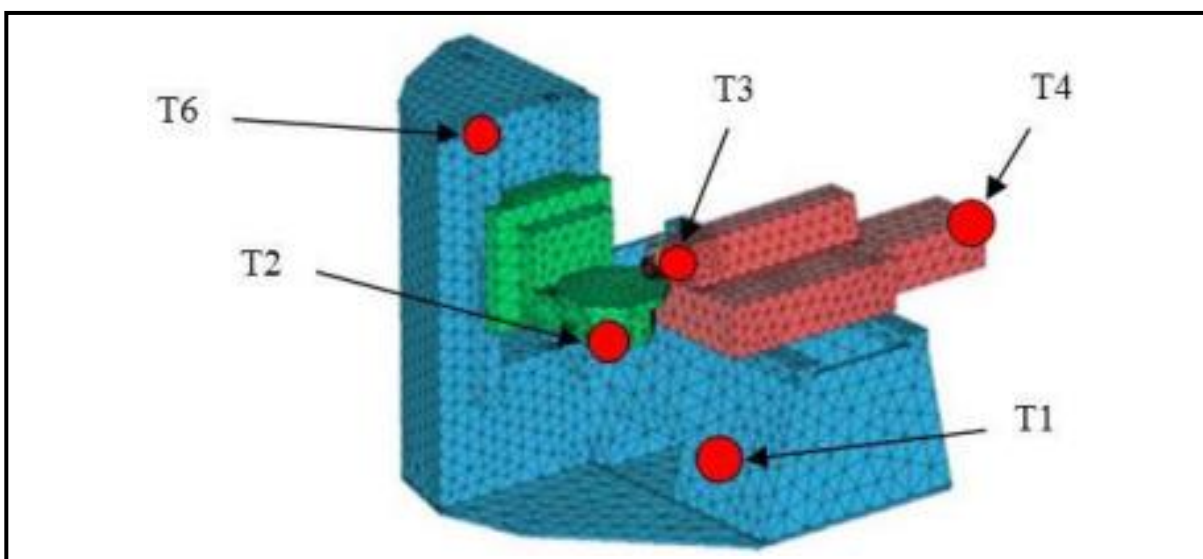


Figura 26 - Pontos de instalação dos sensores de temperatura.
Fonte: Santos et al. (2015, p. 5).

No gráfico da Figura 27, pode-se observar as leituras de cada termopar ao longo de 8 horas.

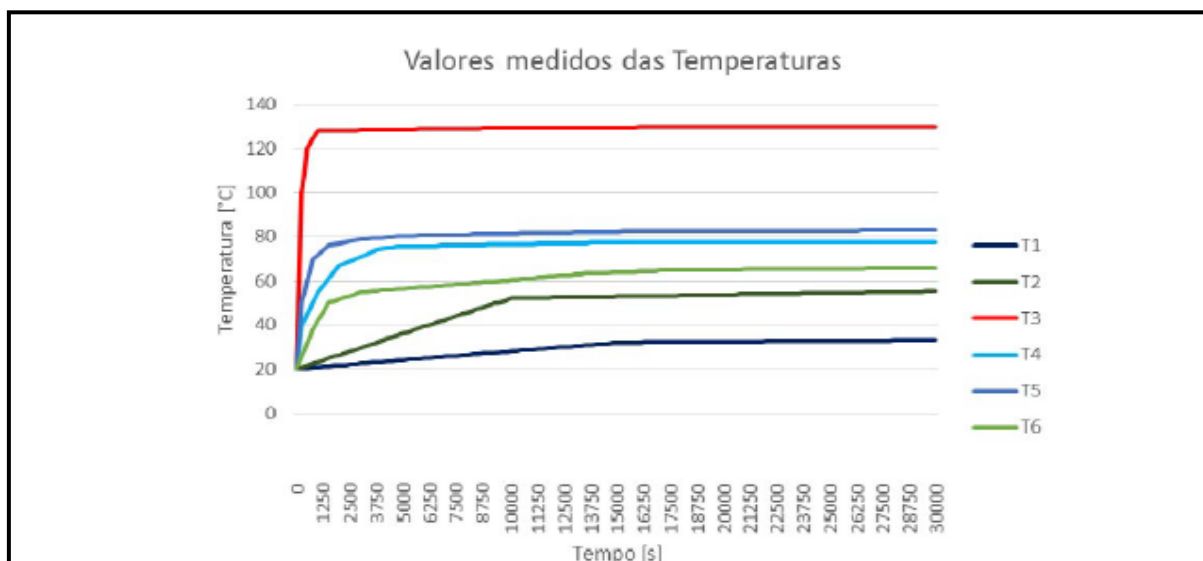


Figura 27 - Curvas de temperatura x tempo dos termopares.
Fonte: Santos et al. (2015, p. 5).

Durante a discussão dos resultados, foi feita uma observação a respeito do termopar que ficou alojado mais próximo a ferramenta, T3, a forma como a temperatura entra rapidamente em um estado de equilíbrio, diferentemente dos outros, já que devido sua localização, o mesmo é afetado grandemente pelo calor provindo da ponta da ferramenta, ou seja, da zona de corte.

Na outra parte do trabalho, é discutida a forma como foi desenvolvida a rede neural artificial (RNA) baseada nas leituras dos termopares. De maneira um pouco mais superficial, será retratada a forma como a qual a rede foi formulada.

A configuração continha três camadas sendo: 16 neurônios na primeira, 20 na segunda e 3 na terceira camada, com *backpropagation*, *feed-forward* e *feedback* da saída para a entrada.

Segundo Lanhlellas (2013), *backpropagation* é um algoritmo utilizado para reconhecer padrões e em especial, este consegue resolver problemas “ não-linearmente separáveis”, ou seja, aqueles onde não se pode separar 2 classes distintas no eixo cartesiano bidimensional apenas traçando uma reta. Outra característica importante é que o *Backpropagation* é *feedforward*, ou seja, a conexão entre os neurônios não é cíclica, portanto, desde o início até o fim não será possível encontrar um ciclo. Após isso, a rede passou por um processo de aprendizagem nos

deslocamentos dos três eixos simultaneamente através de uma função de ativação e algumas formulações matemáticas.

Ao final da aprendizagem é necessário que seja feito o processo de validação, onde foram proporcionados valores diferentes de entrada (temperaturas) em relação aos quais ela foi treinada, e comparados os resultados com a simulação também utilizando esses valores, a fim de atestar que a RNA consegue aprender e se é possível prever as deformações apenas utilizando as temperaturas medidas pelos termopares.

Considerando os gradientes de temperatura aplicados no modelo numérico, foram obtidos os deslocamentos térmicos através do método dos elementos finitos para os três eixos. Foram obtidos os deslocamentos nos três eixos: o eixo x, conseguiu-se reduzir de 20,85 μm para 4,85 μm , de 14,75 μm para 2,36 μm no eixo Y e de 23,24 μm para 4,98 μm no eixo Z.

Em uma análise final, pode ser verificado que as medições de temperatura por imagem termográfica e termopares, simulação termo elástica pelo MEF, análise por RNA e a metodologia desenvolvida neste trabalho forneceram resultados significativos no caso de correção de erros térmicos em máquinas-ferramentas. Portanto, fica claro a maneira como a qual os métodos numéricos são ferramentas extremamente versáteis podendo trabalhar em conjunto com outras análises para proporcionar ganhos e também prever características importantes do projeto antes mesmo de uma construção física por exemplo.

3.8 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS TENSÕES RESIDUAIS EM SUPERFÍCIES USINADAS APÓS TORNEAMENTO DE COMPONENTES MECÂNICOS FABRICADOS COM AÇO CEMENTADO DIN 21NiCrMo2 (AISI 8620)

Neste trabalho, são analisados os níveis de tensão residual provenientes do processo de usinagem.

É comum a aparição de tensões residuais geradas após procedimentos de corte, conformação, solda, entre outros, já que isso acontece quando o material sofre uma deformação plástica em alguma região, ou seja, em grande parte dos processos de fabricação este problema pode ocorrer. Portanto, um estudo mais aprofundado sobre o

tema contribui de maneira significativa para o desenvolvimento de técnicas para melhoria ou mesmo para o acompanhamento destes níveis, trazendo um ganho para a engenharia mecânica.

Para a análise experimental foi feita a confecção do corpo de prova em componentes de aço ABNT 8620, cementado para dureza próxima a 60 HRC, utilizando-se um inserto de CBN contendo um raio de ponta de 0,8 mm usinado a seco em uma máquina CNC, com velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,12 mm/rotação e profundidade de corte igual a 0,18 mm.

Utilizou-se do Método do Furo Cego Incremental, realizado através de um pequeno furo feito na superfície do material. A deformação da superfície devido a este furo é registrada por meio de extensômetros especiais. Para fazer a validação do experimento citado, os resultados obtidos serviram de base para elaboração de modelos mais refinados utilizando-se elementos finitos, a fim de representar o campo de deformação obtido pelo método anterior.

As tensões residuais do método do Furo Cego Incremental foram levantadas com o auxílio do equipamento modelo RS-200 Milling Guide, da marca Vishay Micro-Measurements Group. Já os valores, foram tratados usando um software específico para análise de tensões residuais, o H-Drill.

Nas Figuras 28 e 29 pode-se observar a posição da roseta e o detalhe de como é feita a furação.



Figura 28 - Corpo de prova com roseta retangular e terminais para instrumentação.
Fonte: Farias et al. (2009, p. 3).



Figura 29 - Detalhamento da furação do corpo de prova.
Fonte: Farias et al. (2009, p. 3).

A broca utilizada tem diâmetro de 1,85 mm e a roseta do estudo é a 062RE fabricada pela Vishay Micro-Measurements. Foi necessário a utilização do micrômetro para controlar a profundidade de corte, a ferramenta é aproximada da superfície e neste ponto todos os canais do medidor de deformação são zerados, o furo então é feito lentamente, controlando a profundidade pelo micrômetro a uma velocidade de 4 $\mu\text{m}/\text{minuto}$ a cada 20 μm , os valores do alívio da deformação mostrados no medidor de deformação foram anotados, em seguida, estes dados foram inseridos no software H-Drill para análise integral.

As Figuras 30 (a) e (b) apresentam os resultados dos perfis de tensão residual obtidos para o corpo de prova estudado respectivamente nas direções axial (a) e circunferencial (b). Os resultados são obtidos do pós-processamento das deformações repassadas ao software H-Drill.

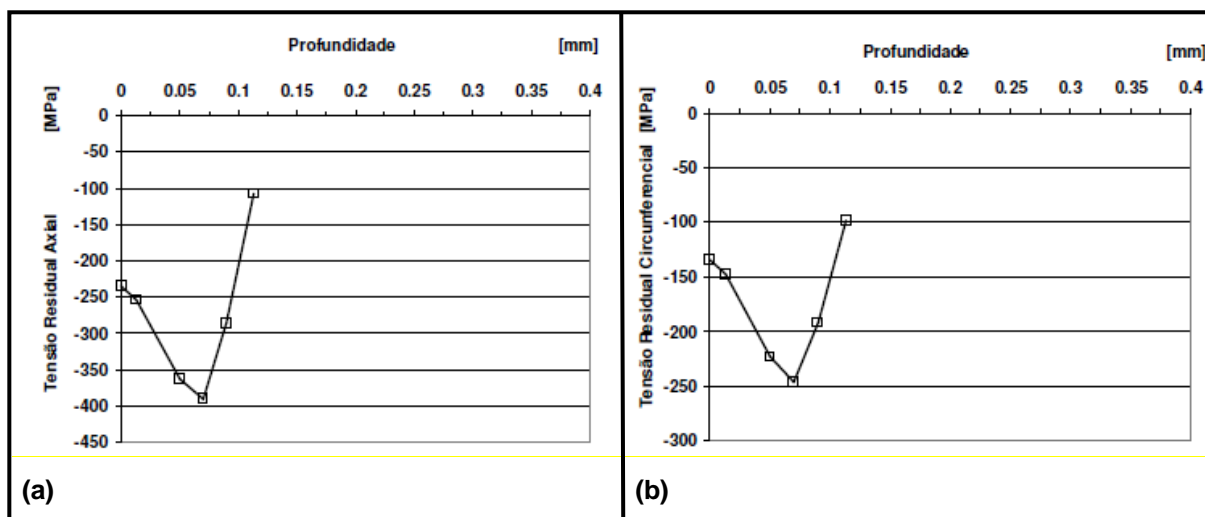


Figura 30 - Perfil de tensão residual para: (a) tensão axial e (b) tensão circunferencial.
Fonte: Farias et al. (2009, p. 4).

Após a realização dos experimentos, foi feita a análise através dos métodos dos elementos finitos. Devido às reduzidas dimensões da roseta aplicada (extensômetros dispostos em diâmetro de 5 mm), o componente foi aproximado de uma placa plana de dimensões grandes em relação ao furo simulando condições semi-infinitas com as devidas condições de contorno distantes do furo. Na Figura 31 pode-se observar a construção da malha para este modelo de placa e do refinamento próximo ao furo. As diferentes profundidades são simuladas por meio da exclusão sucessiva de camadas de elementos. A malha nas bordas do furo possui 36 setores radiais, enquanto apresenta quatro camadas de elementos por passe de perfuração.

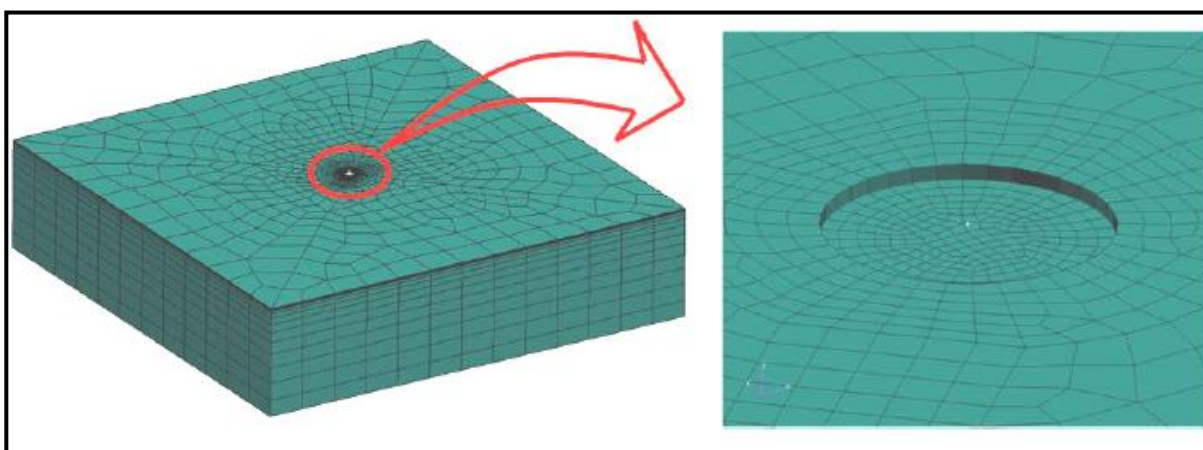


Figura 31 - Modelagem da malha para o Método do Furo Cego e refinamento próximo ao furo.
Fonte: Farias et al. (2009, p. 4).

Na Figura 32 nota-se uma geometria bem parecida com a da roseta utilizada, garantindo a integração acurada das deformações ao longo da grade ativa de cada um dos extensômetros considerados.

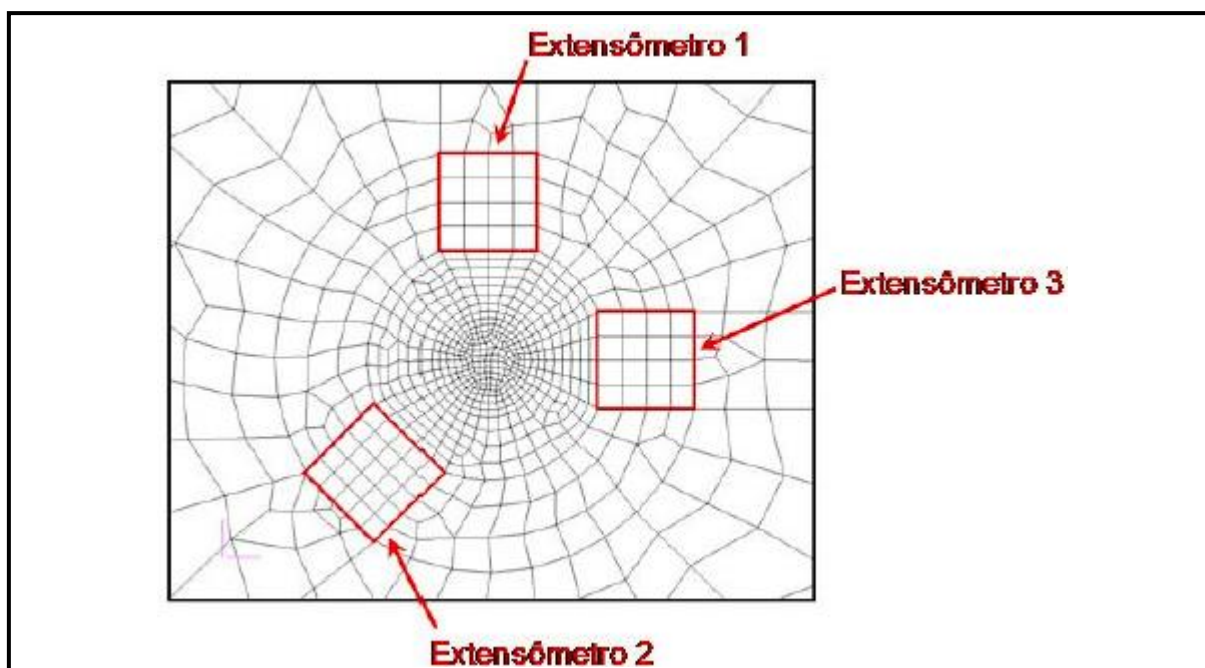


Figura 32 - Disposição da malha nas proximidades do furo.
Fonte: Farias et al. (2009, p. 5).

No modelo, o material considerado é elástico linear com módulo de elasticidade de 200 GPa e coeficiente de Poisson igual 0.3. O código de elementos finitos usado foi o MSC Patran (para pré e pós-processamento) e MSC Nastran (para processamento). Foram utilizados elementos hexaédricos isoparamétricos 3-D de oito nós resultando em aproximadamente 30.000 elementos e 34.000 nós.

A aplicação de cargas foi feita a partir da descrição dos campos de tensões fornecida pelo software H-Drill para cada profundidade de penetração do caso real estudado.

A Figura 33 apresenta o campo de tensões de Von Mises, no qual é possível verificar uma tensão máxima de 279 MPa nas proximidades da borda livre do furo.

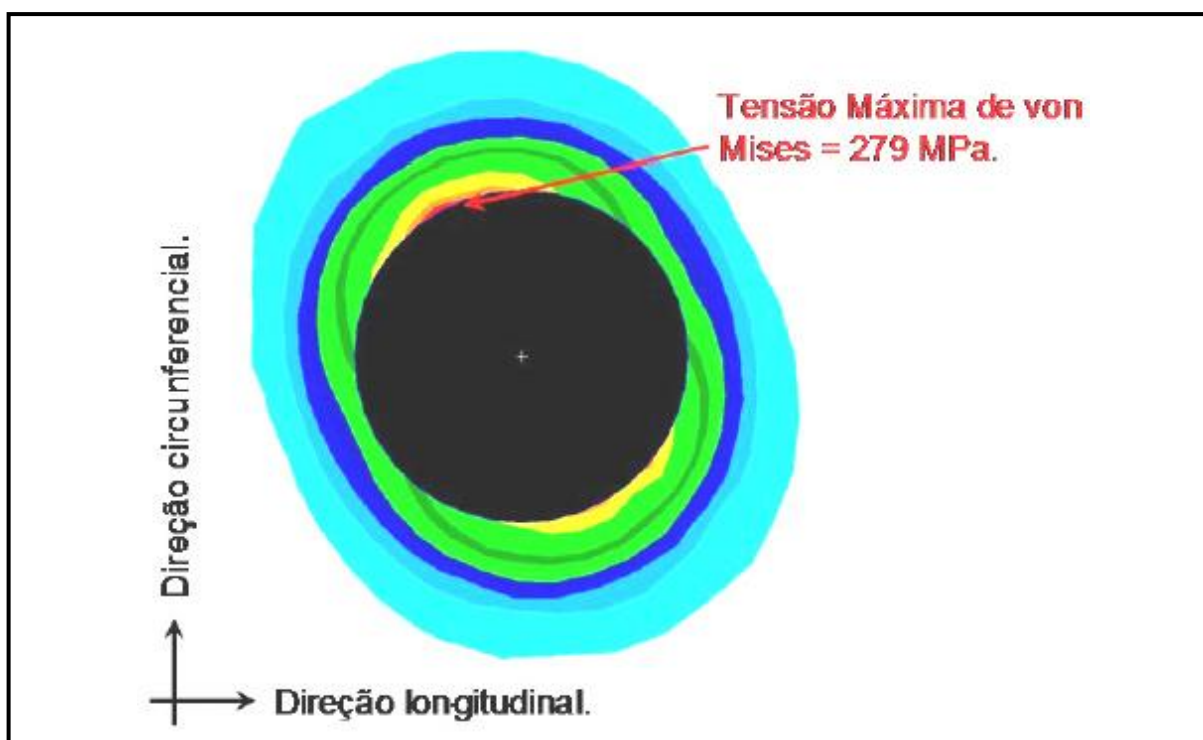


Figura 33 - Distribuição de tensões de Von Mises na superfície do modelo.
Fonte: Farias et al. (2009, p. 6).

Os campos de deformações obtidos pelo método numérico dos elementos finitos foram também inseridos no software H-Drill, para análise no método integral gerando um perfil de tensões residuais para comparação com os resultados obtidos utilizando o experimento do Método do Furo Cego Incremental.

As Figuras 34 e 35 demonstram a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente em relação à simulação por elementos finitos.

É possível enxergar que tanto para as tensões no sentido axial como para o circunferencial há uma grande coerência entre os dados, com exceção do ponto máximo de máximo compressivo o qual apresentou-se mais acentuado no MEF. No entanto, de maneira geral, os resultados demonstram que o Método do Furo é uma técnica acurada de medição de tensões residuais.

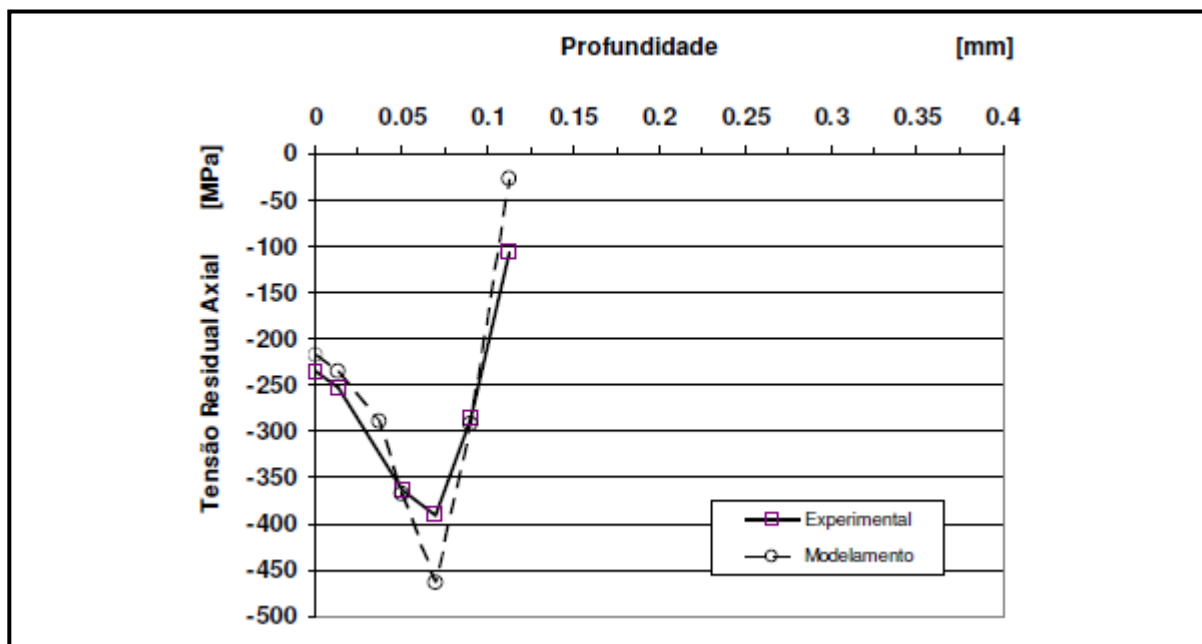


Figura 34 - Comparação das tensões residuais na direção axial como função da profundidade do furo.

Fonte: Farias et al. (2009, p. 3).

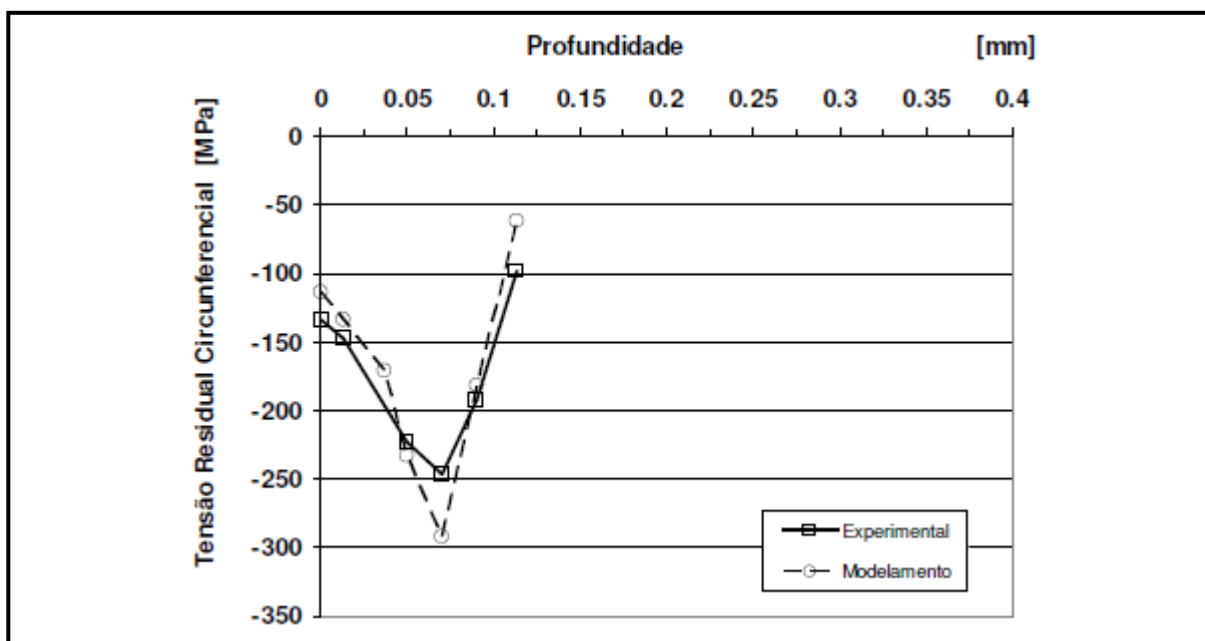


Figura 35 - Comparação das tensões residuais na direção longitudinal em função da profundidade do furo.

Fonte: Farias et al. (2009, p. 7).

Em suma, pode-se observar que o trabalho, apesar de ter sido realizado unicamente em um corpo de prova, conseguiu cumprir o objetivo de análise de

tensões residuais e demonstrou também que o método do Furo Cego Incremental é viável e uma ferramenta importante neste tipo de investigação.

Por fim, o artigo estudado demonstrou uma contribuição à área de processos de fabricação, pois a utilização destes métodos experimentais e conseqüentemente a análise destes resultados pode ajudar na escolha das melhores ferramentas para cada tipo de máquina, operação ou mesmo nos parâmetros envolvidos.

3.9 AVALIAÇÃO DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM FERRAMENTAS CERÂMICAS DE NITRETO DE SILÍCIO

No trabalho em questão, há uma preocupação em relação aos processos de usinagem, mais especificamente o torneamento, a ferramenta de corte é submetida a altas temperaturas e também a grande intensidade de força, implicando em um estado de tensão por todo o instrumento, contribuindo com a deformação do material e que posteriormente pode influenciar no processo como um todo.

Para que seja possível fazer a avaliação dos fatores responsáveis por influenciar o método de fabricação, é necessário que se tenha em mente que a força de corte é expressa pela equação (2).

$$F_c = K_s \cdot A \quad (2)$$

Onde:

K_s : Pressão específica de corte.

A: Área da seção de corte.

O material estudado se trata de uma cerâmica, e como é sabido, possui pouca capacidade de deformação plástica. O propósito do trabalho foi analisar através do método dos elementos finitos, por meio do software MSC-Nastran®, o

comportamento do campo de tensões e de deformações de um inserto de nitreto de silício (Si_3N_4), cujo processo de sinterização foi normal em atmosfera de nitrogênio. As forças utilizadas foram obtidas do torneamento de um ferro fundido cinzento.

A avaliação do experimento foi feita sobre a influência dos parâmetros de usinagem, avanço e velocidade de corte e as tensões geradas na aresta de corte para cada configuração de ajuste de parâmetros.

Os corpos de prova utilizados nos experimentos eram de ferro fundido cinzento FC-250, com diâmetro de 105 mm e comprimento de 300 mm, torneados em um CNC equipado com dinamômetro para realizar a aquisição das forças de usinagem nas três componentes. Para realizar a simulação computacional foram utilizados dados da Tabela 5 onde se encontram as propriedades do nitreto de silício.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do nitreto de silício.

| Propriedade | Unidade | Valor |
|--------------------------|---------------------|--------------|
| Dureza | GPa | 20,05 |
| Tenacidade à fratura | MPam ^{0,5} | 6,45 |
| Massa específica | Kg/m ³ | 3210 |
| Coeficiente de Poisson | --- | 0,26 |
| Resistência à tração | GPa | 0,40 |
| Resistência à compressão | GPa | 2,50 |
| Módulo de Young | GPa | 340,00 |

Fonte: Low e Li (1996).

Nas simulações, foram variados os parâmetros de corte, a fim de analisar a influência dos mesmos nos valores de tensão e deformação sofridos pela ferramenta. Utilizou-se 4 padrões de velocidade de corte e também outros 4 para o avanço, conforme as Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Parâmetros de usinagem (variando a velocidade de corte).

| Teste | Velocidade de corte (m/min) | Avanço (mm/rotação) | Profundidade de corte (mm) |
|-------|-----------------------------|---------------------|----------------------------|
| 1 | 180 | 0,12 | 1,00 |
| 2 | 240 | 0,12 | 1,00 |
| 3 | 300 | 0,12 | 1,00 |
| 4 | 360 | 0,12 | 1,00 |

Fonte: Lanna, Bello e Souza (2004, p. 5).

Tabela 7 - Parâmetros de usinagem (variando o avanço).

| Teste | Velocidade de corte (m/min) | Avanço (mm/rotação) | Profundidade de corte (mm) |
|-------|-----------------------------|---------------------|----------------------------|
| 5 | 300 | 0,12 | 1,00 |
| 6 | 300 | 0,23 | 1,00 |
| 7 | 300 | 0,33 | 1,00 |
| 8 | 300 | 0,40 | 1,00 |

Fonte: Lanna, Bello e Souza (2004, p. 5).

Na Figura 36 é possível verificar a influência da espessura de corte e da velocidade de corte sobre a pressão específica de corte, uma vez que esta sofre uma queda considerável em seus valores quando a espessura é pequena, ou seja entre 0,12 a 0,20 mm. No entanto, quando este parâmetro é analisado para valores maiores (0,3 a 0,4 mm), a redução é bem mais suave como pode-se verificar na Figura 36 (a). Na Figura 36 (b), percebe-se que o valor da pressão específica de corte não é alterado significativamente com a variação da velocidade de corte.

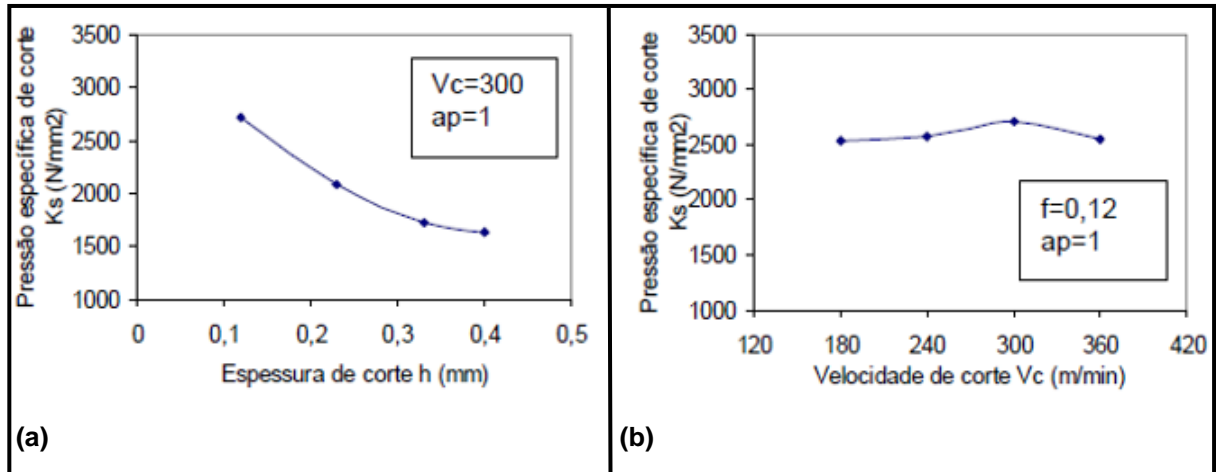


Figura 36 - Variação da pressão específica de corte (K_s) em relação a: (a) espessura e (b) velocidade de corte.

Fonte: Lanna, Bello e Souza (2004, p. 6).

Foi utilizado o software MSC-Nastran® para a simulação da tensões e deformações no inserto cerâmico. Na Figura 37 (a), pode - se observar o modelo com a malha anteriormente à simulação. A Figura 37 (b) ilustra o modelo após a simulação. A força total aplicada é resultado das três componentes (força de usinagem, força de avanço e força passiva). No modelo, considerou-se a força aplicada em apenas um ponto da aresta de corte por motivo de simplificação.

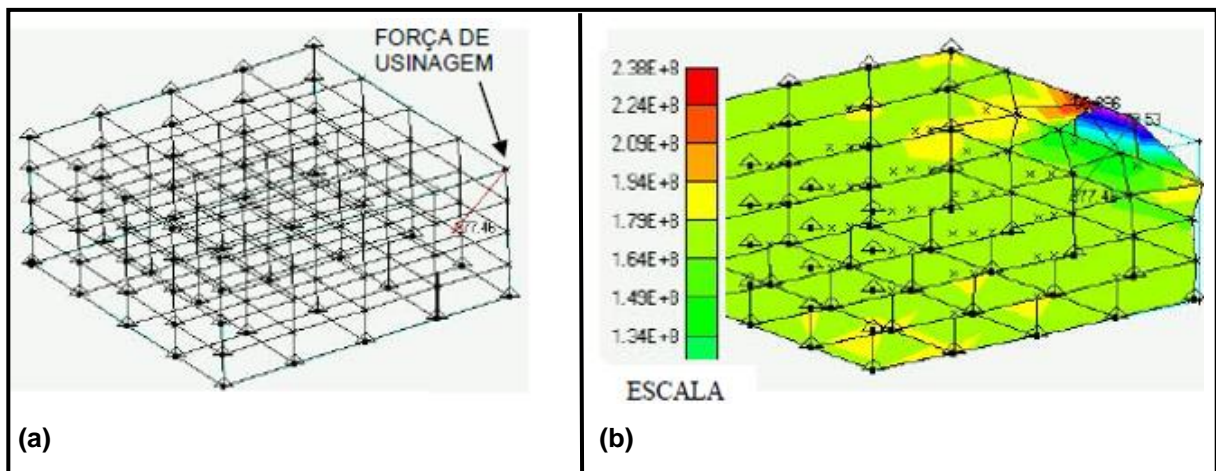


Figura 37 - Modelo utilizado na simulação por elementos finitos: (a) antes e (b) depois da aplicação da força de usinagem.

Fonte: Lanna, Bello e Souza (2004, p. 6).

Uma outra análise é feita a fim de mostrar a influência dos parâmetros de usinagem em relação as tensões geradas na ferramenta. Na Figura 38 (a), é possível ver a influência direta do avanço com comportamento quase linear, demonstrando que quando há um aumento do avanço, aumenta-se a seção de corte e conseqüentemente os valores de tensão. Na Figura 38 (b), pode-se perceber que a velocidade de corte não influencia grandemente, mantendo-se estável para valores abaixo de 300 m/min, e acima disso, verificou-se uma pequena queda que pode ser explicado pelo aumento de calor na interface peça e ferramenta causando certa redução na resistência do material o que alivia a tensão gerada devido ao corte.

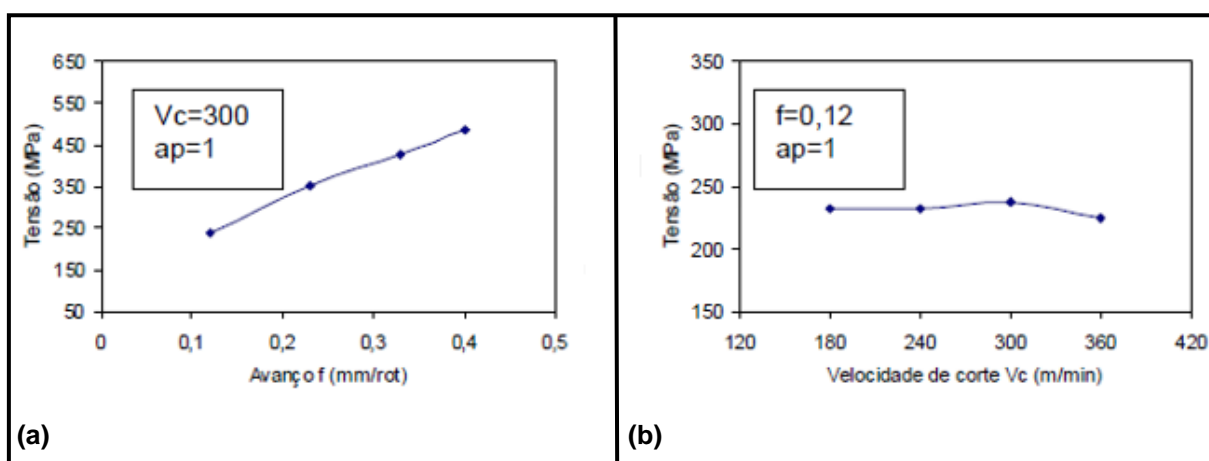


Figura 38 - Análise das tensões em relação aos parâmetros: (a) avanço e (b) velocidade de corte. Fonte: Lanna, Bello e Souza (2004, p. 7).

Como última análise, observou-se o comportamento da deformação em relação aos parâmetros de usinagem. Nota-se que há uma certa semelhança entre o comportamento das tensões e das deformações, pois com o aumento do avanço, houve um aumento também da deformação, em contrapartida, a velocidade de corte influenciou muito pouco na deformação da ferramenta. Estas observações foram feitas através dos gráficos da Figura 39.

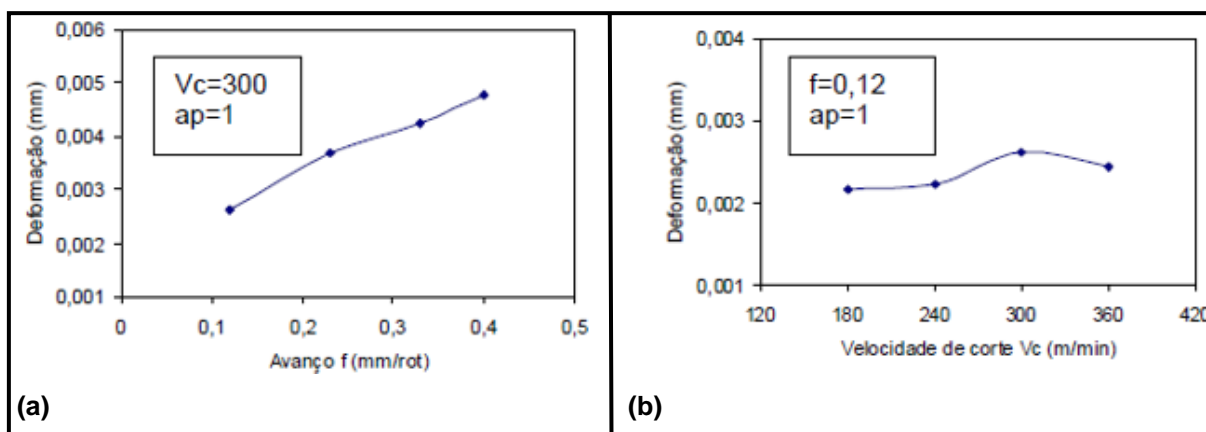


Figura 39 - Análise da deformação em relação aos parâmetros: (a) avanço e (b) velocidade de corte.

Fonte: Lanna, Bello e Souza (2004, p. 8).

Com análise geral, pode-se perceber através deste trabalho que o avanço de usinagem possui maior influência nas tensões e deformações da ferramenta de corte durante a usinagem do ferro fundido cinzento. Houve a percepção também de que trabalhar com velocidade de usinagem mais altas pode ser benéfico e alcançar um melhor rendimento para o processo.

Ficou clara a importância do método dos elementos finitos na execução deste trabalho, já que através deste pode-se alcançar resultados factíveis para auxílio no entendimento da natureza dos fenômenos envolvidos no processo de usinagem, propiciando uma melhoria contínua nos métodos de fabricação.

3.10 ANÁLISE ESTRUTURAL DE MÁQUINAS-FERRAMENTA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Este trabalho tem por objetivo identificar a maneira como a qual se comporta uma fresadora vertical e verificar onde estão localizadas as deflexões máximas da estrutura em 3 configurações distintas, por meio dos Métodos dos Elementos Finitos empregando o software NxNastran®.

Sant'Anna et al. (2009) citaram que no projeto de máquinas-ferramentas, um dos conceitos mais importantes é a rigidez, e essa, pode ser dividida em estática e dinâmica. A rigidez estática é estabelecida tomando a relação entre a carga e a

deformação, já a dinâmica tomam esses mesmos parâmetros em função da frequência.

A Figura 40 apresenta as massas do conjunto A que é o modelo original.

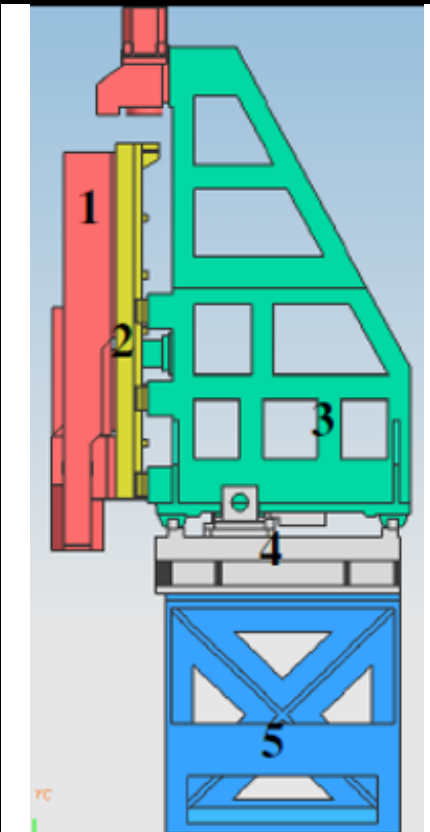
| Desenho | Conjunto | Massa (Kg) |
|--|---------------|------------|
|  | 1 - Cabeçote | 732 |
| | 2 - Carro | 460 |
| | 3 - Estrutura | 1497 |
| | 4 - Ponte | 1967 |
| | 5 - Colunas | 1602 |

Figura 40 - Massas do conjunto original (A).
 Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 2).

A Figura 41 mostra as massas do cabeçote e estrutura após modificados formando o conjunto E.

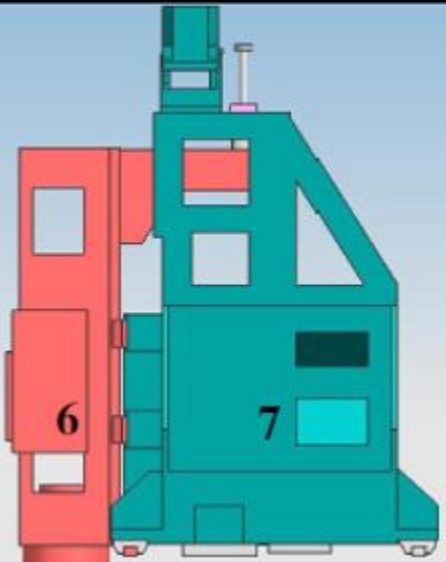
| Desenho | Conjunto | Massa (Kg) |
|---|------------------------------------|------------|
|  | 6 - Cabeçote mais carro modificado | 928 |
| | 7 - Estrutura modificada | 1271 |

Figura 41 - Massas do conjunto modificado (E).
 Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 3).

A Figura 42 apresenta as massas para o conjunto modificado pelo projeto para chegar ao modelo (B).

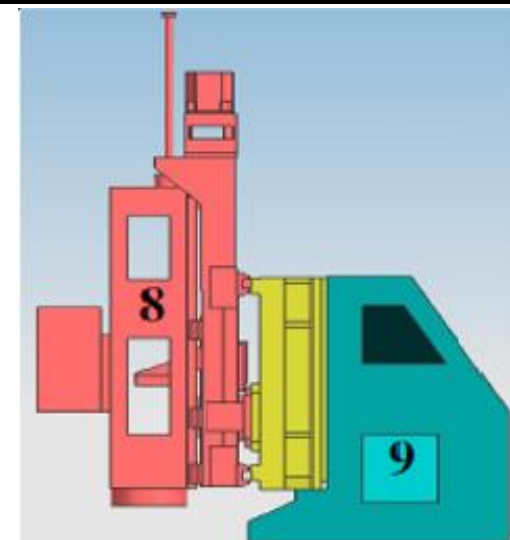
| Desenho | Conjunto | Massa (Kg) |
|---|------------------------------------|------------|
|  | 8 - Cabeçote mais carro modificado | 1582 |
| | 9 - Estrutura modificada | 2255 |

Figura 42 - Massas do conjunto modificado (B).
 Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 3).

A metodologia utilizada nas simulações MEF foi aplicada em etapas. A condição de contorno utilizada entre os modelos foi a Glue Coincident, nesta malha os nós ficam coincidentes. As colunas foram restringidas nas extremidades inferiores nos 6 graus de liberdade.

No desenvolvimento do artigo havia uma certa dificuldade em relacionar qual eram as simulações e para qual modelo, por isso, essas serão apresentadas de forma mais organizada

As etapas das simulações analisaram, para o modelo A.

- O efeito do cabeçote, carro e estrutura com o conjunto no centro da ponte (I);
- Efeito do cabeçote, carro e estrutura com o conjunto na extremidade da ponte (II);
- Efeito da adição de um suporte entre as colunas (III).

A Figura 43 mostra a simulação para o problema (I), onde pode-se observar um deslocamento de 31 μm no cabeçote e de 21 μm na viga.

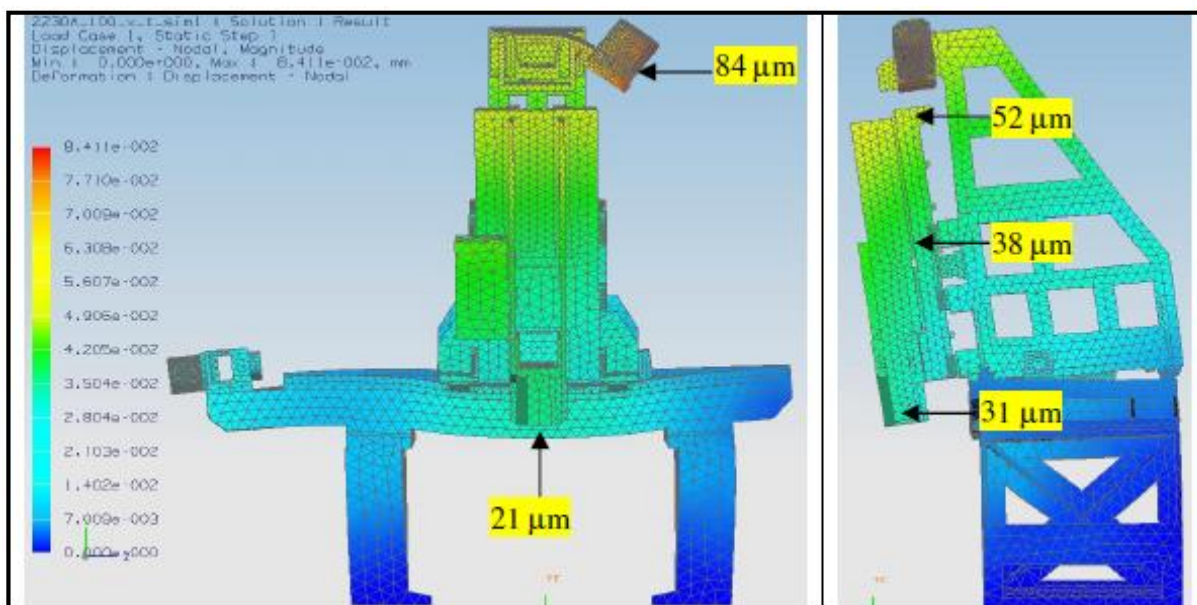


Figura 43 - Deformação da máquina considerando o conjunto no centro da viga.
Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 5).

Na Figura 44 é possível identificar os deslocamentos obtidos através da simulação com o conjunto na extremidade da ponte, onde o deslocamento do cabeçote foi de 30 μm , no centro da ponte houve um deslocamento de 19 μm , valores bem próximos do que os medidos com o conjunto ainda no centro. A diferença foi no resultado do deslocamento da ponte na extremidade com o valor de 17 μm , esta diferença entre o centro e a extremidade é explicado devido à proximidade da estrutura da coluna de apoio da máquina.

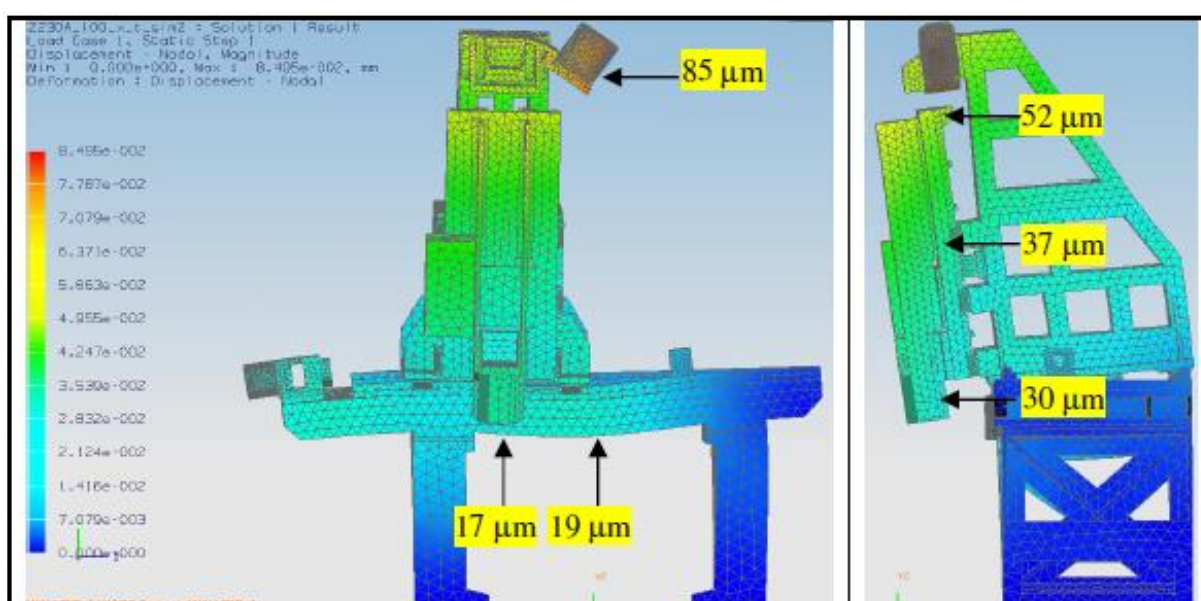


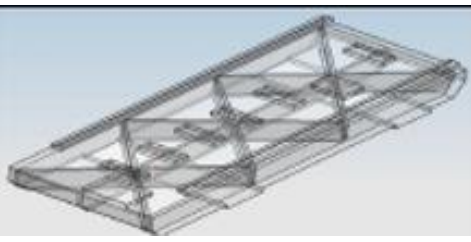
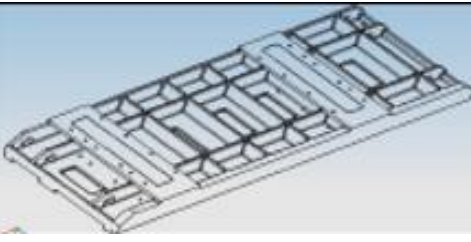
Figura 44 - Deformação da máquina considerando o conjunto na extremidade da ponte.
Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 5).

A simulação subsequente tem por objetivo analisar uma melhoria, colocando-se um suporte com nervuras do tipo “W” a fim de aumentar a rigidez do equipamento. A Figura 45 mostra a configuração do suporte e suas características.

| Desenho | Conjunto | Massa (Kg) | Material |
|---|----------|------------|---------------|
|  | Suporte | 654 | Ferro fundido |

**Figura 45 - Efeito da nervura com formato “W” na estrutura da ponte no modelo A.
Fonte: Sant’Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 3).**

A Figura 46 expõe as diferenças entre o suporte com as nervuras em formato “W” em relação a original paralela.

| Desenho | Conjunto | Massa (Kg) | Material |
|---|---------------------------------------|------------|---------------|
|  | Ponte com nervura “W” | 1895 | Ferro fundido |
|  | Ponte com nervura paralela (original) | 1967 | Ferro fundido |

**Figura 46 - Características da nervura no formato “W” e a original.
Fonte: Sant’Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 4).**

Diante dos resultados obtidos na Figura 47, pode-se perceber que apesar da estrutura do tipo “W” possuir 72 Kg a menos que a original, os deslocamentos foram os mesmos.

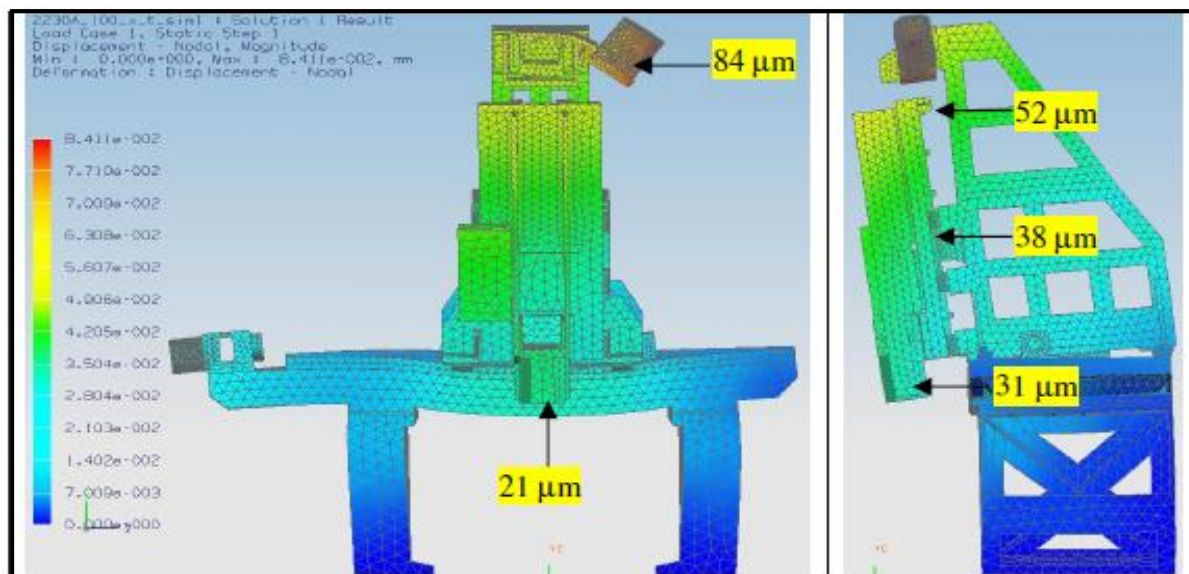


Figura 47 - Deformação da máquina considerando a ponte em formato “W”.
Fonte: Sant’Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 5).

Outra análise será feita em relação ao efeito físico do contrapeso no Modelo A. A fresadora vertical estudada, possui um cilindro hidráulico na parte superior da estrutura, tal peça atua como um contrapeso tentando equilibrar o peso do cabeçote, exercendo uma força contrária na vertical, para promover o equilíbrio da estrutura.

Foram propostas duas representações para analisar o comportamento do contrapeso em relação a rigidez da máquina, a primeira considera uma força de tração na haste do contrapeso com magnitude igual ao da estrutura (carro e cabeçote) a ser sustentada o que dá um valor de 11,885 kN e uma força de reação, com mesma intensidade, porém com sentido oposto aplicada no flange de fixação do cilindro no suporte da máquina, de acordo com a Figura 48.

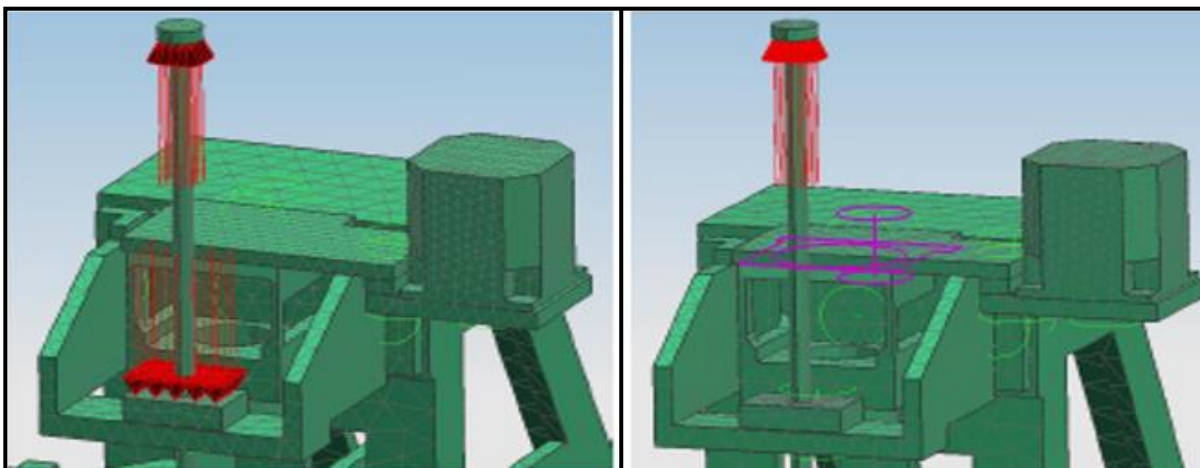


Figura 48 - Representação das forças de tração e reação do contrapeso.
Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 4).

Os resultados para a primeira representação mostram que os deslocamentos no centro da ponte permaneceram inalterados se comparados com a primeira simulação, no entanto, os efeitos ao longo do eixo do cabeçote foram próximos, o que o faz ficar mais alinhado e diminui a tendência a flexão como pode ser visto na Figura 49.

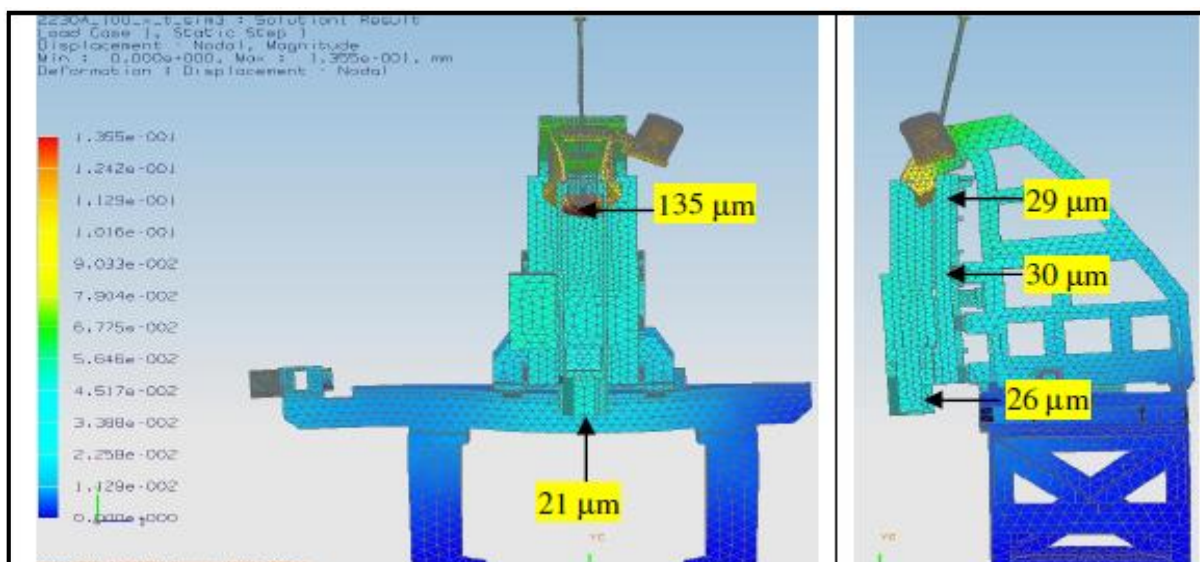


Figura 49 - Deformação da máquina considerando tração e reação do contrapeso.
Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 7).

Para a segunda proposta em relação ao comportamento do contrapeso sem reação no suporte, os resultados mostram que ao aplicar força na haste, o peso do carro e do cabeçote é equilibrado, por isso, as deformações encontradas são referentes somente a carga da estrutura sobre a ponte, conforme pode ser visto na Figura 50.

Observa-se que também neste modelo, os deslocamentos ao longo do eixo do cabeçote foram próximo e assim mantém seu alinhamento diminuindo a tendência a flexão. Durante a avaliação, foi notado que a distribuição de massa na estrutura sobre a ponte e sem excentricidade pode reduzir os deslocamentos em pelo menos 60%.

Portanto, analisando as duas propostas para o contrapeso, pode-se dizer que a primeira representa melhor o modelo físico do equipamento.

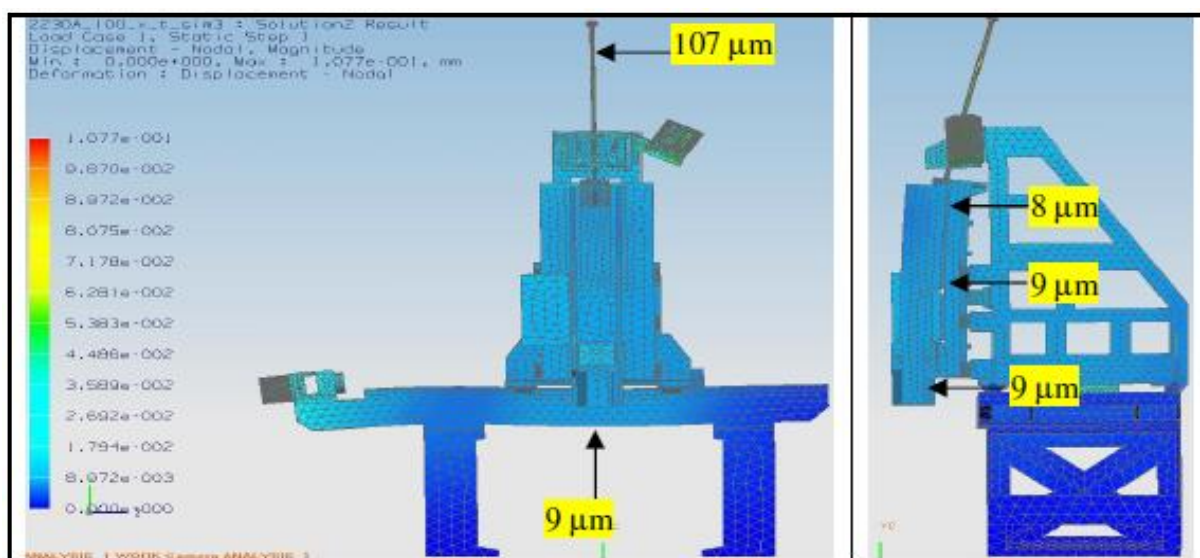


Figura 50 - Deformação da máquina considerando apenas tração do contrapeso.
 Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 7).

As próximas simulações serão feitas para o modelo E sem suporte entre as colunas.

Neste modelo, manteve-se a ponte e as colunas conforme original, no entanto, reduziu-se a massa da estrutura e cabeçote alterando o projeto a fim de reduzir a massa em balanço sobre a ponte. Os resultados mostraram um deslocamento de 30 μm na extremidade inferior do eixo do cabeçote, visto na Figura

51. Em suma, não foi encontrada nenhuma melhoria com as alterações propostas, além disso, verificou-se que a massa do cabeçote em balanço propicia um momento em torno do eixo da ponte, contribuindo com um problema de flexão.

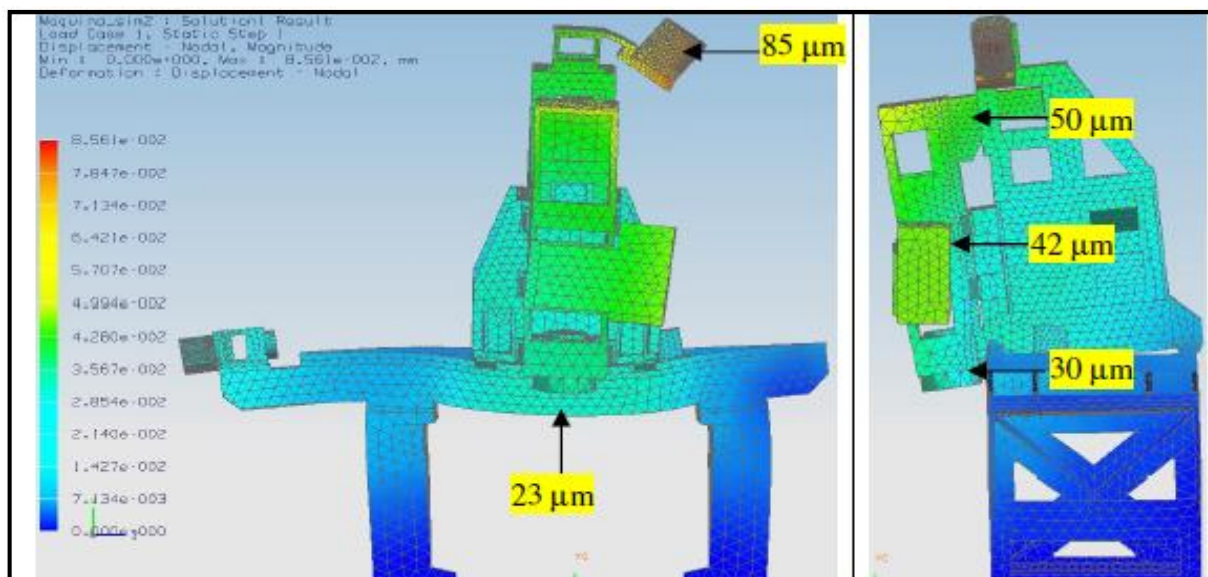


Figura 51 - Deformação da máquina considerando a estrutura e cabeçote modificado.
 Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 8).

A próxima avaliação diz respeito a inserção de um suporte entre as colunas no modelo E. Como visto na simulação para o modelo A, o suporte em ferro fundido reduz o deslocamento na extremidade do eixo em relação ao original no centro da ponte. Estes resultados estão mostrados na Figura 52.

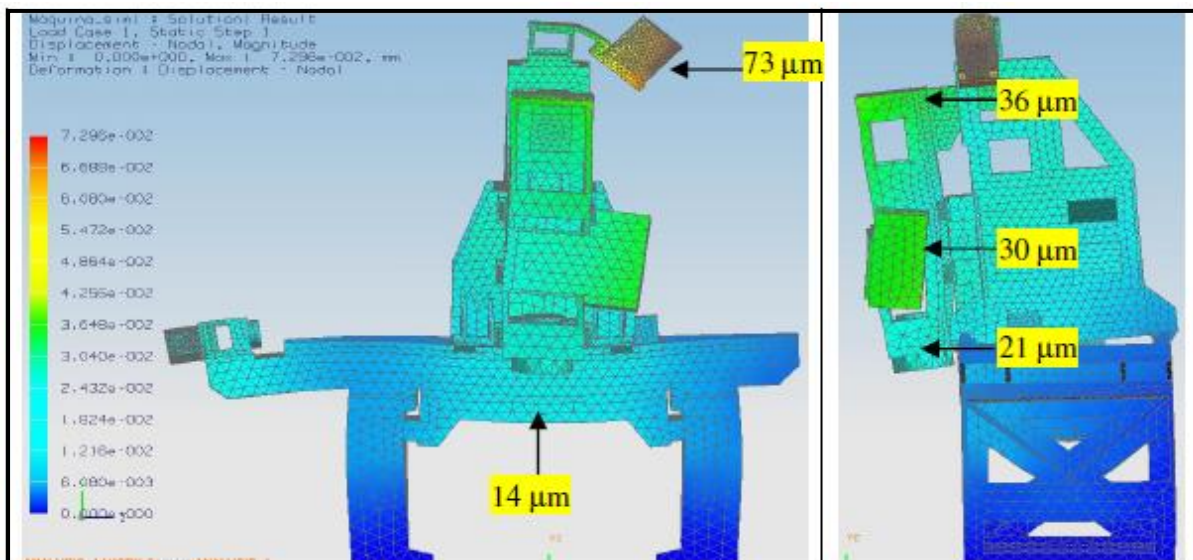


Figura 52 - Deformação da máquina considerando acréscimo do suporte.
Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 8).

A última simulação é feita a fim de coletar os resultados para o modelo proposto B. Nesta versão, a máquina apresenta um arranjo estrutural diferente, principalmente o giro em 90 graus da posição da ponte a forma geométrica da estrutura.

Como resultado, foi obtido um deslocamento de 45 μm na extremidade do eixo do cabeçote, enquanto no centro da viga este deslocamento chegou a 21 μm , como pode ser visto na Figura 53.

Este foi o caso onde ocorreu maior deformação na extremidade do eixo, fato explicado devido ao aumento da quantidade de massa em balanço, cerca de 30% a mais em relação ao modelo original.

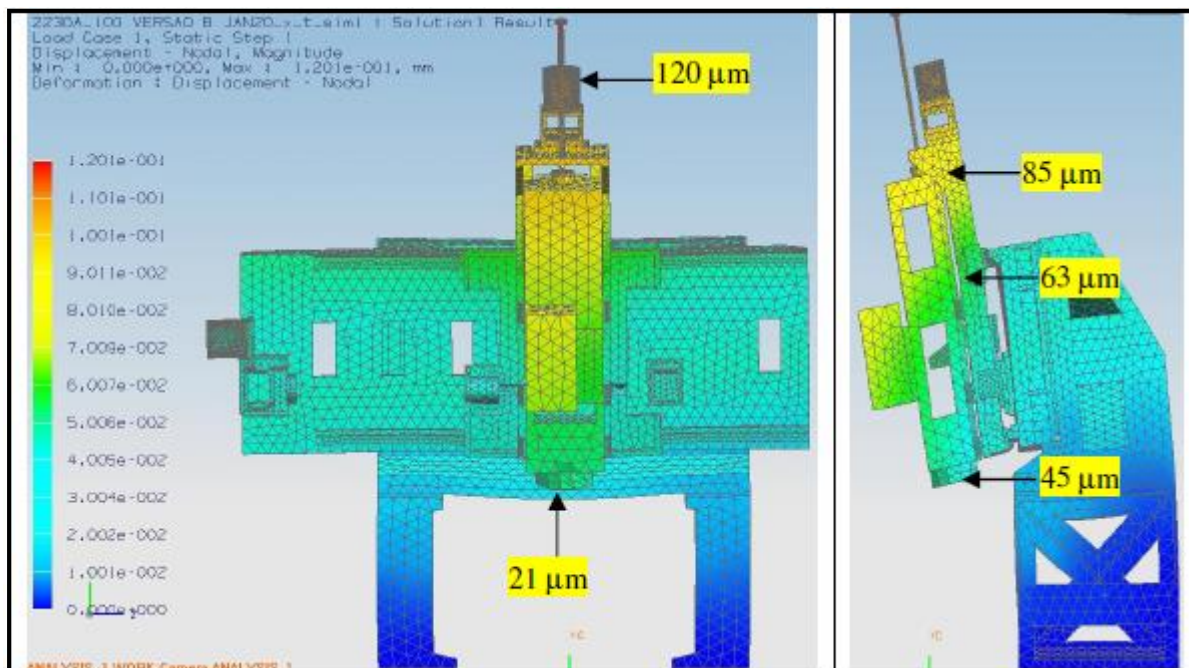


Figura 53 - Deformação da máquina considerando a estrutura e cabeçote modificado.
 Fonte: Sant'Anna, Nunes e Gomes (2009, p. 9).

Em conclusão, independentemente de qual será a estratégia utilizada para se solucionar o problema da fresadora vertical, esta terá que minimizar os efeitos da excentricidade promovida pela forma da arquitetura da máquina.

Em suma, como já dito várias vezes neste trabalho, a análise por elementos finitos é uma ferramenta extremamente importante para a engenharia e outros campos, pois além de extremamente versátil, capaz de analisar conjuntos dos mais simples aos mais complexos, consegue alcançar uma fidelidade dos resultados bem próxima ao modelo real.

4 CONCLUSÃO

Ao final do presente trabalho, é possível verificar a abrangência que o método dos elementos finitos consegue alcançar por ser uma ferramenta extremamente flexível onde pode-se analisar estruturas complexas com boa fidelidade em seus resultados. Outra característica importante é a capacidade de fazer simulações, antes mesmo de construir um modelo real, economizando muito tempo e principalmente, reduzindo custos.

Os métodos de usinagem são processos de fabricação muito utilizados, portanto, qualquer melhoria neste ramo é bem-vinda, já que, na maioria das vezes, as peças são fabricadas em larga escala e os pequenos ganhos obtidos são multiplicados, como por exemplo, em uma análise de parâmetros, onde é possível identificar valores de velocidade, avanço ou profundidade compatíveis com as máquinas, ferramentas e peças utilizadas, gerando com isso um aperfeiçoamento do procedimento de fabricação, diminuindo o custo por peça e conseqüentemente trazendo maior lucro.

Finalmente, considerando o objetivo do trabalho de selecionar e examinar vários artigos, de forma a gerar um referencial teórico sobre a correlação dos métodos numéricos de análise e a usinagem dos materiais, destaca-se que tal objetivo foi alcançado, uma vez que foram feitas observações sobre os resultados e discussões, assim como sobre as características dos processos e sobre a metodologia empregada para cada tipo de análise.

REFERÊNCIAS

- Faria, P.; Abrão, A.; Rubi, J. C.; Davim, J. P.; Maranhão, C.; Silva, L. R. Simulação por elementos finitos do corte ortogonal do aço AISI 4140. **CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte - MG**, 2009.
- Farias, A.; Donato, G. H. B.; Delijaicov, S.; Batalha, G. F. Avaliação experimental das tensões residuais em superfícies usinadas após torneamento de componentes mecânicos fabricados com aço cementado DIN 21NiCrMo (AISI 8620). **COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte - MG**, 2009.
- Lanna, M. A.; Bello, A. A. L.; Souza, J. V. C. Avaliação das tensões e deformações em ferramentas cerâmicas de nitreto de silício, **48º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Curitiba - PR**, 2004.
- Lanhellas, Ronaldo. Redes Neurais Artificiais: Algoritmo Backpropagation. **DEVMEDIA**. Disponível em: <<http://www.devmedia.com.br/redes-neurais-artificiais-algoritmo-backpropagation/28559>> Acesso em 30 set. 2016.
- Lopes, D. S.; Loy, R. M. B.; Silva, M. B. Estudo da formação de trincas térmicas em ferramentas de usinagem no processo de fresamento. **COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Curitiba - PR**, 2001.
- Low, I. M.; Li, X. S. **Advanced ceramic tools for machining application II**, Switzerland: Key Engineering Materials. VI. 14, 1996.
- Machado, F. M.; Souza, A. J. Desenvolvimento de um dispositivo de medição de esforços no processo de torneamento. **Vivências**: Revista Eletrônica de Extensão da URI, Erechim. v. 1, n. 2, p. 1-3, Maio 2006. Disponível em: <www.reitoria.uri.br/~vivencias/Numero%20002/artigos/vencedores/area_engenharias/Desenvolvimento%20de%20um%20Dispositivo.doc> Acesso em: 10 jul. 2016.
- Meirovitch, Leonard. **Principles and techniques of vibration**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1986.
- Meola, T.; Duarte, M. V.; Sousa, M. M.; Santos, S. Monitorando o desvio de circularidade no processo de furação em uma fresadora cnc utilizando sinais de vibração mecânica. **CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa - PB**, 2002.
- Nascimento, C. H.; Coelho, R. T., Estudo da distribuição de calor na região de corte durante o processo de fresamento ortogonal através do método de elementos finitos, **COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul - RS**, 2011.

Sant'anna, D. R.; Nunes, J. M.; Gomes, J. O. Análise estrutural de máquinas-ferramenta pelo método dos elementos finitos. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA – **XV ENCITA**, 2009, São José dos Campos. Disponível em: <<http://www.bibl.ita.br/xvencita/MEC09.pdf>> Acesso em 16 set. 2016.

Santos, M. O.; Batalha, G. M.; Bordinassi, E. C. Desenvolvimento de um método para compensação da deformação térmica de um centro de usinagem 5 eixos através do método dos elementos finitos (MEF) e de redes neurais artificiais (RNA). **COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador - BA**, 2015.

Silva, F. A.; Gubaua, J. E. Simulação de embutimento de copo quadrado utilizando o método dos elementos finitos. **PGMEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR**. Disponível em: <servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/EME777/Abaqus/copo%20quadrado/Simula%20E7%E3o%20de%20embutimento%20de%20copo%20quadrado%20utilizando%20o%20M%E9todo%20dos%20Elementos%20Finitos.pdf> Acesso em: 20 set. 2016.

Vieira, Gabriela H.; Almeida, Sérgio F. M. Análise de vibração livre de ferramentas para usinagem em alta velocidade. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA - **XII ENCITA**, 2006, São José dos Campos. Disponível em: <www.bibl.ita.br/xiiencita/mec_13.pdf> Acesso em: 12 jul. 2016.

Weingaertner, W. L.; Schroeter, R. B.; Polli, M. L.; Gomes, J. O.; Paes, A. Influência do comprimento em balanço da ferramenta sobre a estabilidade dinâmica do fresamento de topo reto a altas velocidades. **COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Joinville - SC**, 2005.

ANEXO A – Como fazer o download e Instalação do software Ansys®, versão estudantil

O download do software pode ser feito a partir do site <<http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student>>.

No site da empresa ESSS (<http://www.esss.com.br/ensino_programa_academico_ansys_estudantil_instalacao.php>), há um guia de instalação do software. A seguir, são apresentadas as instruções para realizar esta instalação.

Antes de iniciar a instalação:

1. Certifique-se que o computador atende os requisitos técnicos necessários para executar o pacote de softwares;
2. Cheque se você possui acesso como administrador do computador no qual será instalado o ANSYS Estudantil;
3. Desinstale qualquer outro produto da ANSYS existente no computador. A instalação do pacote ANSYS para estudante irá substituir as licenças existentes;
4. Verifique se você tem a chave da licença disponível. A licença deve ser baixada separadamente na seção de download da ANSYS.

INSTALAÇÃO

Após fazer o download e iniciar a instalação do pacote ANSYS Estudantil, baixe e rode o arquivo da licença. Siga todas as etapas de instalação em sequência (parte 1, 2 e 3);

PARTE 1 – INSTALAÇÃO ANSYS ESTUDANTIL

1. Faça a extração (unzip) dos arquivos de instalação;
2. Na pasta dos arquivos extraídos, clique com o botão direito do mouse sobre o arquivo setup.exe e selecione a opção executar como administrador (Run as Administrator);
3. Clique no texto Install ANSYS, Inc. Products;

4. Leia e aceite os termos para continuar;
5. Clique no botão Next para aceitar os valores padrão em toda a instalação. Pule a opção Enter License Server Specification;
6. Após completar a instalação, clique em Next. Você verá uma mensagem destacada como importante, indicando que a instalação foi completada;
7. Verifique a caixa de pesquisa na parte inferior, se você deseja enviar a pesquisa;
8. Clique no botão Exit. Você irá retornar para a página de Instalação da Versão 16.2. Certifique-se de não selecionar opções não suportadas pelo pacote ANSYS para estudantes;
9. Selecione a opção Exit. Na sequência instale o arquivo da licença (ANSYS License File), descrito na parte 2.

PARTE 2 – LICENÇA DO ANSYS ESTUDANTIL

1. Baixe o arquivo gerador da licença ANSYS Estudantil - ansys_student_.lic - para o computador. A parte do nome do arquivo indica a data de expiração da licença do arquivo;
2. Extraia o arquivo da licença e observe o local onde salvá-lo:
Recomendamos mover o arquivo de licença para C:\Program Files\ANSYS Inc\Shared Files\Licensing, mas você pode também colocar a licença na área de trabalho;
Evite colocar o arquivo da licença em um diretório Temp;
Não salve o arquivo da licença usando o Microsoft Word.
3. Defina a variável de ambiente ANSYSLMD_LICENSE_FILE para o local do arquivo ansys_student.lic, incluindo o nome do arquivo. Por exemplo: C:\ansys_inc\ansys_student_20160131.lic.
4. Siga os passos abaixo para definir uma variável de ambiente no Windows:
Abra o Control Panel;
Selecione System and Security;
Selecione System;
Selecione Advanced System Settings;
Clique no botão Environment Variables;

Selecione o botão New abaixo das variáveis do sistema.

*Note que existirão outras variáveis com nomes similares e cuide para usar exatamente este nome para a variável de ambiente.

PARTE 3 – EXECUTANDO O ANSYS ESTUDANTIL

1. Depois de completar os passos 1 e 2 da instalação, é recomendável reiniciar o computador. A melhor forma de acessar o ANSYS Estudantil é a partir do menu iniciar:

Abra o menu iniciar e selecione a opção Workbench 16.2 ou todos os programas, em seguida, escolha a pasta ANSYS 16.2 e clique em Workbench 16.2

A página inicial do ANSYS Estudantil Workbench 16.2 irá abrir. Agora você pode começar a usar o ANSYS Estudantil.