

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE TENSÕES RESULTANTES DO PROCESSO DE TORNEAMENTO
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)**

Elisandro Ferreira Batista

**São Paulo
2005**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE TENSÕES RESULTANTES DO PROCESSO DE TORNEAMENTO
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

Elisandro Ferreira Batista

Orientadora: Izabel Fernanda Machado

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2005**

Primeiramente, agradeço a Deus pela dádiva da vida e por todas as oportunidades que já me foram concedidas. Agradeço a minha orientadora, Izabel, sempre muito solícita. Pela ajuda, compreensão, estímulo e motivação, agradeço a minha noiva, Alessandra, a minha família, em especial, a minha mãe, Geralda, e irmã, Edilaine, e a todos os meus amigos, Carlos, Eduardo, Erick e Ricardo.

RESUMO

Neste trabalho, foi feita uma análise de tensões resultantes do processo de torneamento utilizando o método dos elementos finitos. Para esta análise foram estimadas as propriedades mecânicas na superfície usinada de um aço SAE 1045. Esta estimativa foi baseada nas propriedades mecânicas de um aço SAE 1045 recozido e do mesmo aço normalizado. As tensões resultantes do torneamento foram simuladas com base nas forças de corte e de avanço obtidas em ensaios de usinagem. A força passiva foi estimada com base em dados da literatura. Com auxílio do método dos elementos finitos (MEF), foram realizadas várias etapas de simulação conforme é apresentado a seguir: I. Foi validada a utilização do programa realizando uma simulação semelhante a um caso conhecido e também semelhante ao caso a ser estudado. II. Foi simulado o torneamento de um aço SAE 1045 recozido no primeiro passe. III. Foi simulado o torneamento de um aço SAE 1045 normalizado no primeiro passe. IV. Foi simulado o torneamento de um aço SAE 1045 recozido no segundo passe, isto é, com a superfície contendo deformação plástica residual do primeiro passe e, portanto, com propriedades mecânicas diferentes do aço recozido. Em uma primeira etapa do trabalho foi avaliado o efeito do tratamento térmico e em uma segunda etapa foram consideradas as modificações nas propriedades resultantes das operações de usinagem. Com isso pode-se avaliar os diferentes campos de tensões resultantes do torneamento do aço SAE 1045 em diferentes etapas do processo de fabricação. Os resultados dessas simulações mostraram que parece haver diferenças nas tensões durante o processo de torneamento para os aços nas diferentes condições, seja de tratamento térmico, seja devido ao dano acumulado (encruamento) após o primeiro passe.

ABSTRACT

In this work, the tension analysis resulting from the turning process through the finite element method (FEM) was carried out. The mechanical properties of machined surface were estimated through the use of annealed and normalized SAE 1045 steel ones. The resulting tensions after turning were simulated based on the cutting forces and feed forces obtained during machining tests. Passive forces were estimated according to literature data. Simulation by using FEM was carried out at several stages as follows: I. An example of case study was analyzed, calculated and compared to a simulated one. The results showed an agreement between the cases. II. The turning of annealed SAE 1045 was simulated in the first pass. III. The turning of normalized SAE 1045 was simulated in the first pass. IV. The turning of annealed SAE 1045 was simulated in the second pass, which means it was workhardened on the machined surface. The workhardening caused by the first pass during turning, increased the mechanical properties of the surface. In the first evaluation stage the effect of heat treatment was evaluated and in the second stage the changes in the mechanical properties due to turning were also analyzed. Therefore, the effect of stress field on machined surface of SAE 1045 steel in different turning process conditions could be studied. The simulation results showed considerable differences in the stress field during the turning of the annealed, normalized and workhardened conditions.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	2
2.1 Usinagem	2
2.1.1 Torneamento	2
2.1.1.1 Desgastes e Avarias da Ferramenta	6
2.1.1.2 Formação de Cavaco	8
2.1.1.3 Rugosidade	10
2.1.1.4 Forças de Usinagem no Torneamento	11
2.1.1.5 Cálculo da Força de Corte	12
2.2 Usinabilidade	13
2.2.1 Efeito da Microestrutura na Usinagem	15
2.2.2 Efeito dos Elementos de Liga nos Aços Carbono	16
2.2.3 Tratamentos Térmicos – Normalização e Recozimento	18
2.2.4 Encruamento	22
3 METODO DOS ELEMENTOS FINITOS – MEF	22
3.1 Programa Utilizado	22
3.2 Conceitos Iniciais	23
3.3 Arquitetura Básica do Abaqus	24
3.4 Entradas	24
3.4.1 Geometria	24
3.4.2 Material	24
3.4.3 Seção	25
3.4.4 Malha	25
3.4.4.1 Tipo de Análise	25
3.4.4.2 Geração de Malha	27
3.4.4.3 Elementos	32
3.4.5 Condições de Contorno	33
3.4.6 Carregamento	33
3.4.7 Procedimento de Cálculo	33
3.4.7.1 Cálculo	36
3.4.7.2 Convergência	36
3.4.7.3 Incremento	36
3.4.7.4 Variação dos Parâmetros Externos	36
3.5 Saídas	37

4 METODOLOGIA PARA ENSAIOS	38
4.1 Material Utilizado	38
4.2 Preparação dos Ensaios de Força de Corte	38
4.3 Avaliação da Força de Usinagem Durante o Torneamento	39
4.4 Registro dos Parâmetros de Usinagem	43
4.5 Medições de Durezas	43
4.6 Acabamento superficial – Medições de Rugosidade	44
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	45
6 SIMULAÇÕES	47
6.1 Simulação I: Validação das Simulações	47
6.1.1 Entradas.....	47
6.1.2 Saídas	48
6.1.3 Cálculo Utilizando Conceitos de Resistência de Materiais	48
6.1.4 Comentários	52
6.2 Simulação II: Material Recozido no Primeiro Passe	53
6.2.1 Entradas.....	53
6.2.2 Saídas	54
6.2.3 Comentários	56
6.3 Simulação III: Material Normalizado no Primeiro Passe	56
6.3.1 Entradas.....	57
6.3.2 Saídas	57
6.3.3 Comentários	58
6.4 Simulação IV: Material Recozido no Segundo Passe.....	59
6.4.1 Entradas.....	59
6.4.2 Saídas	60
6.4.3 Comentários	61
6.5 Influência da Força Passiva nos Resultados	62
7 CONCLUSÕES	65
LISTA DE REFERÊNCIAS	67
BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA	70
ANEXOS	72
Anexo A – Entradas das Simulações	73
Anexo A- I Simulação Inicial - Entradas.....	73
Anexo A- II Simulação com Material Recozido – Entradas.....	79
Anexo A-III Simulação com Material Normalizado – Entradas	88
Anexo A- IV Simulação com Material Recozido e Encruado – Entradas.....	93
Anexo B – Tabelas e figuras extraídas da literatura	95
APÊNDICES	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do SAE-1045.....	38
Tabela 2: Componentes da força de usinagem	42
Tabela 3: Ensaio 1, rotação de 1120 rpm.....	45
Tabela 4: Ensaio 2, rotação de 720 rpm.....	45
Tabela 5: Ensaio 3, aço SAE1045 recozido com 1120 rpm	46
Tabela 6: Ensaio 4, aço SAE1045 normalizado com 1120 rpm	46
Tabela 7: Simulação IV – Força de usinagem	59
Tabela 8: Simulação II – Força de usinagem.....	87
Tabela B I: Valores das constantes das fórmulas da pressão específica de corte segundo a ASME e AWF	95
Tabela B II: Propriedades mecânicas de algumas ligas de aço carbono.....	98
Tabela Apêndice A- I: Estimativa de custo para fabricação das amostras	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Partes de uma ferramenta – arestas, superfícies e chanfros	3
Figura 2: Esquema dos tipos de desgaste da ferramenta de corte: (A) desgaste de cratera; (B) desgaste de flanco; (C) e (D) entalhe.....	3
Figura 3: Padrão de desgaste para uma ferramenta de metal-duro	4
Figura 4: Representação de R_a – rugosidade média	9
Figura 5: Representação de R_t – rugosidade total	9
Figura 6: Valores típicos de rugosidade para alguns processos de fabricação	9
Figura 7: Força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento	10
Figura 8: Diagrama de fases ferro carbono na vizinhança do eutetóide, indicando as faixas de temperatura do tratamento térmico para aços carbono comuns, (Callister, 2000)	17
Figura 9: Influência do trabalho a frio sobre o comportamento tensão deformação para um aço com baixo teor de carbono, (Callister, 2000).....	20
Figura 10: Aço 1040, latão e cobre – aumento do limite de escoamento em função do trabalho a frio (Callister, 2000).....	20
Figura 11: Aço 1040, latão e cobre – aumento do limite de resistência à tração em função do trabalho a frio (Callister, 2000).....	21
Figura 12: Aço 1040, latão e cobre – redução da ductilidade em função do trabalho a frio (Callister, 2000)	21
Figura 13: Arquitetura básica do Abaqus	23
Figura 14: Peça comporta malha de elementos hexaédricos apenas após a adequada partição.....	26
Figura 15: Principais grupos de elementos utilizados pelo Abaqus	27
Figura 16: Elementos sólidos tridimensionais do Abaqus.....	28
Figura 17: Disposição e nomenclatura das faces e dos nós dos elementos sólidos do Abaqus	29
Figura 18: Exemplo de elemento linear e de segunda ordem	30
Figura 19: Porta-ferramentas instrumentado	40
Figura 20: Esquema e disposição dos extensômetros no porta ferramentas instrumentado. R1 à R16 são os extensômetros, (GUIMARÃES, 2000).....	40
Figura 21: Conjunto de equipamentos utilizados nas medidas de força de corte. (a) Dispositivo para medir força de corte (porta-ferramentas instrumentado), sistema de	

aquisição e microcomputador utilizado nos ensaios de usinagem. (b) Sistema de aquisição ligado a microcomputador no carrinho. (c) Porta-ferramentas instrumentado montado no torno mecânico.....	41
Figura 22: Esquema com os pontos de medida de dureza	44
Figura 23: Simulação I – esboço da primeira peça analisada	47
Figura 24: Simulação I – resultados.....	48
Figura 25: DCL (diagrama de corpo livre) da barra, diagrama de forças e momentos na direção x.....	49
Figura 26: Face de engaste, as linhas imaginárias A estão na face superior e na inferior e a linha B no centro da barra	50
Figura 27: Simulação II – geometria da peça analisada (a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) Perspectiva evidenciando o engastamento	54
Figura 28: Simulação II – posicionamento da força de usinagem. (a) força aplicada no ponto de referência 1 (RP-1) e (b) ponto de referência entre os elementos 2500, 2474, 193 e 66.....	55
Figura 29: Simulação II – resultado na região de aplicação da força, identificação dos nós	55
Figura 30: Simulação II – resultado na região de aplicação da força com tensão máxima de 191,0 MPa na superfície.....	56
Figura 31: Simulação III – resultado na região de aplicação da força, identificação dos nós	57
Figura 32: Simulação III – resultado na região de aplicação da força com tensão máxima de 191,1 MPa na superfície.....	58
Figura 33: Simulação III – resultado – visão geral	58
Figura 34: Simulação IV – Posicionamento da força de usinagem. (a) força aplicada no ponto de referência 1 (RP-1) e (b) ponto de referência entre os elementos 7, 28, 928 e 793.....	60
Figura 35: Simulação IV – resultado na região de aplicação da força com tensão máxima de 166,2 MPa na superfície.....	61
Figura 36: Simulação IV – resultado – visão geral.....	61
Figura 37: Simulação IV - material encruado com força equivalente a força observada na peça de material recozido.....	62
Figura 38: Simulação IV - material encruado com força equivalente a força observada na peça de material normalizado	62
Figura 39: Material recozido no primeiro passe. (a) Força aplicada (b) Resultado.....	63
Figura 40: Material normalizado no primeiro passe. (a) Força aplicada (b) Resultado ..	63

Figura 41: Material recozido no segundo passe. (a) Força aplicada (b) Resultado	63
Figura 42: Simulação I – formato da peça.....	73
Figura 43: Simulação I – material da peça.....	74
Figura 44: Simulação I – configuração do procedimento de cálculo.....	74
Figura 45: Simulação I – configuração do procedimento de cálculo, método e variação de parâmetros	75
Figura 46: Simulação I – formato dos elementos e geração da malha.....	76
Figura 47: Simulação I – configuração dos elementos	76
Figura 48: Simulação I – tamanho dos elementos	77
Figura 49: Simulação I – visualização da malha de elementos	77
Figura 50: Simulação I – condições de contorno.....	77
Figura 51: Simulação I – carregamento externo.....	78
Figura 52: Simulação II – formato da peça.....	79
Figura 53: Simulação II – curva tensão deformação do SAE 1045 recozido	80
Figura 54: Simulação II – curva tensão deformação do SAE 1045 recozido, região elástica, com módulo de elasticidade $E=207\text{GPa}$, Juvinall 2000	80
Figura 55: Simulação II – material da peça – configuração da região linear	81
Figura 56: Simulação II – material da peça – configuração da região não linear.....	82
Figura 57: Simulação II – configuração do procedimento de cálculo	82
Figura 58: Simulação II – configuração do procedimento de cálculo, método e variação de parâmetros	83
Figura 59: Simulação II – geração da malha. (a) Mostra que não é possível utilizar elementos hexagonais e (b) mostra que não é possível utilizar elementos de formatos variados.....	84
Figura 60: Simulação II – formato dos elementos e geração da malha	84
Figura 61: Simulação II – configuração dos elementos.....	85
Figura 62: Simulação II – tamanho dos elementos.....	85
Figura 63: Simulação II – visualização da malha de elementos	86
Figura 64: Simulação II – condições de contorno	86
Figura 65: Simulação II – carregamento externo.....	87
Figura 66: Simulação III – curva tensão deformação do SAE 1045 normalizado.....	88
Figura 67: Simulação III – curva tensão deformação do SAE 1045 normalizado, região elástica, com módulo de elasticidade $E=207\text{GPa}$, Juvinall 2000	89

Figura 68: Simulação III – material da peça – configuração da região linear	90
Figura 69: Simulação III – material da peça – configuração da região não linear	91
Figura 70: Simulação III – carregamento externo	92
Figura 71: Não é possível gerar uma malha com elementos hexagonais neste modelo ..	93
Figura 72: Efetuando-se algumas partições, a malha com elementos hexagonais torna-se factível.....	94
Figura B I: Curva tensão x deformação típica do aço SAE 1045	97
Figura B II: Correspondência das escalas de dureza	102

LISTA DE SÍMBOLOS

- a: Avanço no torneamento [mm/volta]
A₀: Área original da seção reta que sofre deformação [mm²]
A_d: Área A₀ após deformação [mm²]
b: Largura onde passa o “fluxo” das setas de cisalhamento [m]
C: Constante empírica utilizada para calcular a vida de ferramenta
Ca: Constante do material apresentada na Tabela B I em ANEXO
D_{inicial}: Diâmetro inicial antes da operação de torneamento [mm]
D_{final}: Diâmetro final após a operação de torneamento [mm]
E: Módulo de elasticidade [GPa]
e: Erro consequente dos métodos numéricos de cálculo
e_{cavaco}: Espessura do cavaco [mm]
F: Vetor força nos graus de liberdade
F_i: Força na direção i [N]
h: Altura da seção transversal da peça [m]
I: Momento geométrico de inércia [m⁴]
K: Matriz de rigidez do elemento
K_s: Pressão específica de corte [N/mm²]
KT: Profundidade da cratera [mm]
KM: Distância do centro da cratera ao gume [mm]
l_{cavaco}: Largura do cavaco [mm]
M_i: Momento na direção i [N/m²]
M_s: Momento estático da seção transversal [m³]
n: Expoente função do material utilizado no cálculo da força de corte ou constante empírica para cálculo da vida da ferramenta
ν: Coeficiente de Poisson
p: Profundidade de corte [mm]
Pa: Força de avanço no torneamento [N]
Pc: Força de corte no torneamento [N]
Pp: Força passiva no torneamento [N]
Pr: Força resultante no torneamento [N]
Q: Vetor deslocamento dos graus de liberdade
%TF: Porcentagem de trabalho a frio [%]
Ra: Rugosidade média [μm]
Rt: Rugosidade total [μm]
T: Vida da ferramenta [min]
τ: Tensão de cisalhamento [MPa]
V: Velocidade de corte [m/min]
VB: Largura da marca de desgaste do flanco [mm]
VB_B: Valor médio de V_B [mm]
VB_{máx}: Valor máximo de V_B [mm]
VB_C: Desgaste de entalhe no gume secundário [mm]
VB_N: Desgaste de entalhe no gume principal [mm]

1 INTRODUÇÃO

Fazer simulações confiáveis dos processos de fabricação é de grande importância, pois isso leva a uma diminuição de custos e agilidade nos processos. Por exemplo, as montadoras têm investido cada vez mais em simulações de processos de fabricação seja para reduzir custos com ensaios destrutivos, seja para diminuir o tempo entre o início do projeto e a data de lançamento do produto. Essa agilidade só foi conquistada com a inovação tecnológica. No entanto, uma das grandes dificuldades nas simulações numéricas é que estas nem sempre são muito fieis à realidade pelo fato de assumirem a hipótese de que as propriedades do material são constantes ao longo do processo de fabricação. Este trabalho visa contribuir para solucionar esta falha. Neste trabalho, é feita uma análise de tensões resultantes do processo de torneamento utilizando o método dos elementos finitos. Para esta análise foram estimadas as propriedades mecânicas na superfície usinada de um aço SAE 1045. Esta estimativa foi baseada nas propriedades mecânicas de um aço SAE 1045 recozido e do mesmo aço normalizado. As tensões resultantes do torneamento foram simuladas com base nas forças de corte e de avanço obtidas em ensaios de usinagem. A força passiva foi estimada com base em dados da literatura. Com auxílio do método dos elementos finitos (MEF), foram realizadas várias etapas de simulação conforme é apresentado a seguir: I. Foi validada a utilização do programa realizando uma simulação semelhante a um caso conhecido e também semelhante ao caso a ser estudado. II. Foi simulado o torneamento de um aço SAE 1045 recozido no primeiro passe. III. Foi simulado o torneamento de um aço SAE 1045 normalizado no primeiro passe. IV. Foi simulado o torneamento de um aço SAE 1045 recozido no segundo passe, isto é, com a superfície contendo deformação plástica residual do primeiro passe e, portanto, com propriedades mecânicas diferentes do aço recozido. Em uma primeira etapa do trabalho foi avaliado o efeito do tratamento térmico e em uma segunda etapa foram consideradas as modificações nas propriedades resultantes das operações de usinagem. O objetivo principal deste trabalho é avaliar os diferentes campos de tensões resultantes do torneamento do aço SAE 1045 com diferentes tratamentos térmicos e em diferentes etapas do processo de fabricação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Usinagem

Operações de usinagem são aquelas em que há produção de cavaco ao se conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento ou ainda uma combinação qualquer destes três itens (FERRARESI, 1997). As principais operações de usinagem são: torneamento, aplainamento, furação, alargamento, rebaixamento, mandrilamento, fresamento, serramento, brochamento, roscamento, limagem, rasqueteamento, tamboreamento, retificação, brunimento, superacabamento, lapidação, espelhamento, polimento, lixamento, jateamento, afiação e denteamento. Este trabalho foi focado na operação de torneamento.

2.1.1 Torneamento

Segundo Ferraresi (1997), o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.

2.1.1.1 Desgastes e Avarias da Ferramenta

Durante a usinagem dos metais, a ação de corte altera a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte, pois se verificam desgastes progressivos no flanco e na face da ferramenta, o que evidentemente compromete a operação de usinagem. É importante observar a influência deste desgaste da ferramenta nos testes realizados. A Figura 1 mostra as superfícies, chanfros e arestas de uma ferramenta, enquanto que a Figura 2 esquematiza os tipos de desgaste presentes na ferramenta e a

Figura 3 mostra uma padronização típica de desgastes de ferramentas de metal-duro. O desgaste de cratera na face, a marca de desgaste no flanco e o entalhe são os desgastes típicos.

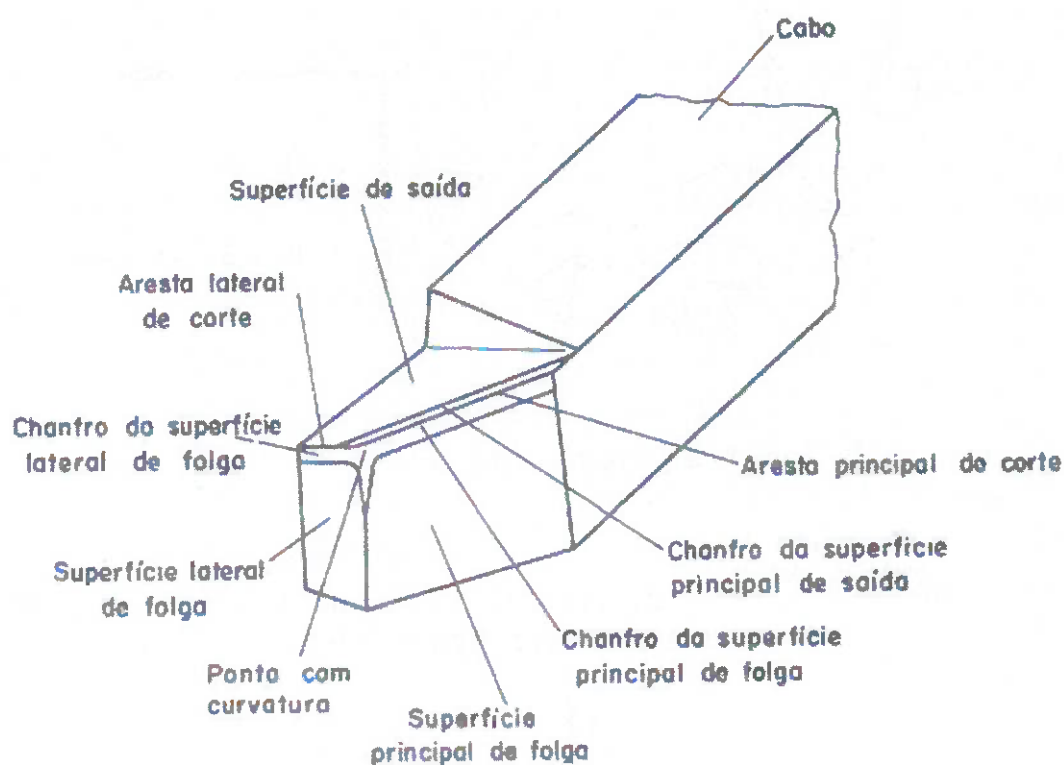


Figura 1: Partes de uma ferramenta – arestas, superfícies e chanfros (FERRARESI, 1997)

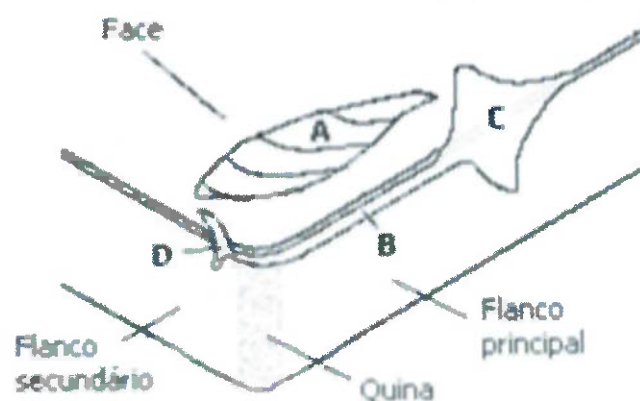


Figura 2: Esquema dos tipos de desgaste da ferramenta de corte: (A) desgaste de cratera; (B) desgaste de flanco; (C) e (D) entalhe

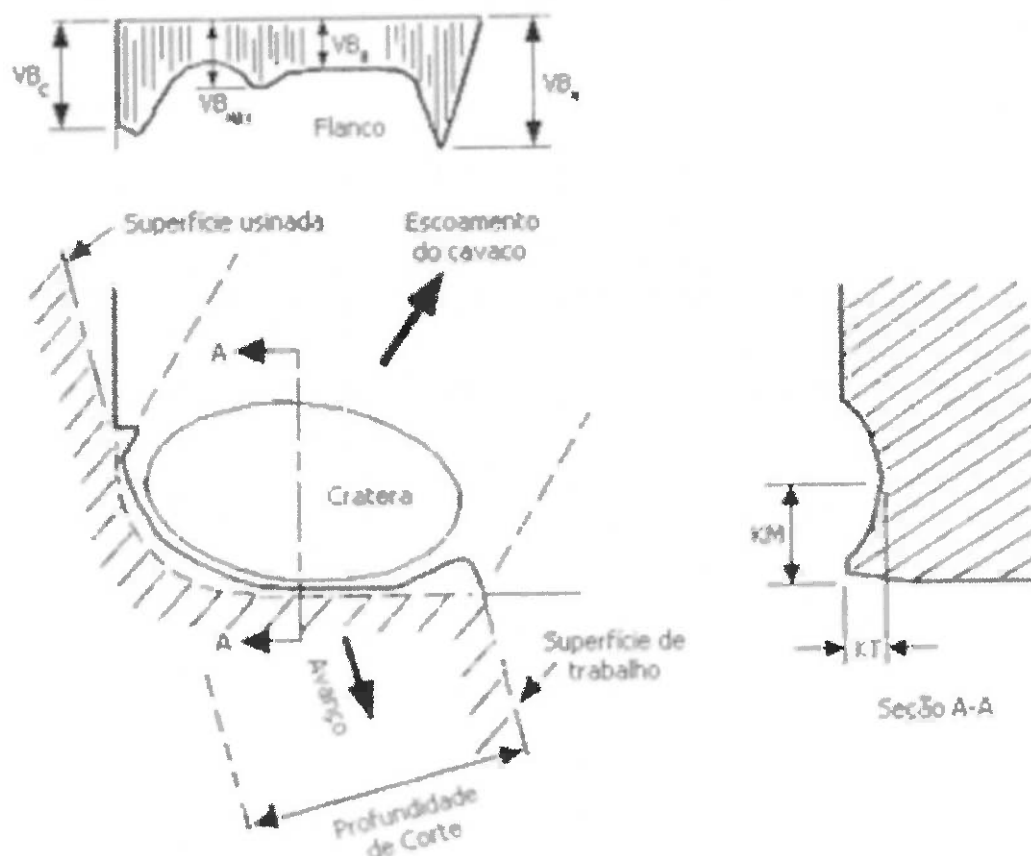


Figura 3: Padrão de desgaste para uma ferramenta de metal-duro

A norma ISO 3685 determina os parâmetros de medida dos desgastes desenvolvidos no flanco e na face da ferramenta (Figura 3). No flanco mede-se a largura da marca de desgaste (VB), sendo: VB_B o desgaste médio de flanco; $VB_{m\acute{a}x}$ o desgaste máximo de flanco; VB_N o desgaste de entalhe no gume principal; VB_C o desgaste de entalhe no gume secundário. Na face mede-se a profundidade da cratera (KT) e a distância do centro da cratera ao gume (KM).

No caso das avarias, elas podem ser subdivididas em: deformações plásticas, trincas e fraturas, sendo que fratura pode ser um lascamento ou quebra. As trincas térmicas, devido ao aumento do gradiente de temperatura a cada entrada da ferramenta na peça, são a maior causa das falhas da ferramenta em altas velocidades de corte. Já as trincas mecânicas, por causa dos choques mecânicos na entrada e/ou na saída da ferramenta na

peça, são as principais responsáveis pelas falhas, lascamentos, em baixas velocidades de corte. O lascamento é uma falha acidental e prematura que pode ocorrer quando a ferramenta é pouco resistente (ângulo de quina “er” muito pequeno; pastilha muito dura e pouco tenaz) ou quando acontecem sobrecargas de origem mecânica (impactos ferramenta-peça, peça com inclusões duras e vibrações) ou térmica (resfriamento brusco).

Quando a abrasão é a principal causa do desgaste de flanco, os padrões de desgaste são relativamente uniformes e fáceis de mensurar. Por exemplo, o tempo necessário para que a largura média da marca de desgaste de flanco (VB_B) atinja 0,3 mm é um padrão usual de fim de vida, embora esta abordagem esteja mais ligada às falhas na ferramenta que propriamente aos problemas de acabamento e/ou tolerância da peça. Contudo, quando lascamentos gerados por adesão ou sobrecargas mecânicas e/ou térmicas são a causa do desgaste de flanco, o padrão é geralmente irregular, resultante principalmente da usinagem de materiais de difícil corte. Neste caso, VB_B não mais determina a vida. Recomenda-se que seja considerada a largura máxima da marca de desgaste de flanco ($VB_{máx}$). A zona onde $VB_{máx}$ ocorre pode fornecer informações úteis sobre o mecanismo de desgaste e como ele pode ser reduzido. Em geral, $VB_{máx} > 0,6$ mm caracteriza fim de vida.

O desgaste de cratera se manifesta sob a forma de cavidade na face da ferramenta. O desenvolvimento deste tipo de desgaste está diretamente ligado à temperatura e à pressão de corte. Ao contrário do desgaste de flanco, o desgaste de cratera não influencia na rugosidade ou na tolerância, mas sim na geometria do ângulo de saída (g) e no comprimento de contato cavaco-ferramenta. Ele pode, em condições térmicas inadequadas e para alguns tipos de materiais usinados, resultar em fraturas na ferramenta devido à fragilidade do gume. A profundidade de cratera KT entre 0,05 e 0,1 mm é geralmente usada como critério de fim de vida. Talvez o principal inconveniente de KT esteja na dificuldade de sua quantificação. Ferraresi (1977) mostra que a medição de KT é feita geralmente por perfilômetros especiais, onde uma agulha apalpadora com uma ponta de safira com raio de 10 mm percorre a superfície a ser examinada; o movimento

da agulha é então ampliado mecânica e opticamente para que o perfil da superfície possa ser registrado.

2.1.1.2 Formação de Cavaco

Cavaco é o material produzido durante o corte nos processos de usinagem. Em modelos mais simplificados, o cavaco é assumido como sendo uma fita contínua de largura constante, com um plano de cisalhamento bem definido, mas não é o que de fato ocorre. A formação de cavaco ocorre pelo recalque do material contra a superfície de saída da ferramenta, ocorrendo deformação plástica bastante intensa do material que está sendo removido. A ruptura ocorrerá acompanhando o plano de cisalhamento. A formação de cavaco é um fenômeno periódico. Praticamente toda a energia mecânica associada à formação de cavaco se transforma em calor (SCANDIFFIO, 2000). Em processos de conformação a frio apenas de 2 a 10% da energia é gasta na deformação, a qual é acumulada na forma de defeitos, a outra parcela é perdida na forma de calor. O calor gerado durante o processo de usinagem pode propiciar a ocorrência de transformações de fase no cavaco formado, bem como na superfície da peça. Nos processos de usinagem o calor é dissipado pelo cavaco, pela peça, pela ferramenta e pelo fluido de corte, o qual é geralmente tóxico. Trabalhos (KOMANDURI, 2001) têm sido feitos no sentido de se realizar corte a seco ou com adição de mínima quantidade de lubrificante.

Existem diversos problemas que podem ser gerados em função da forma dos cavacos que são: segurança do operador, dano à ferramenta e/ou peça, manuseio e armazenagem do cavaco, forças de corte, temperatura e por consequência, vida da ferramenta. Trabalho realizado por Komanduri et al. (1981) apresentou um estudo pormenorizado da formação do cavaco e de sua segmentação durante a usinagem. Já o trabalho de Axinte (2001) relaciona a formação de cavaco com as discontinuidades na microestrutura tal como a presença de inclusões. Segundo Ferraresi (1997), os cavacos podem ser classificados simplificadaamente como:

1. Cavaco contínuo, que apresenta lamelas justapostas, mas a distinção das lamelas não é nítida;
2. Cavaco de cisalhamento apresenta lamelas justapostas e a distinção é nítida;
3. Cavaco de ruptura, apresenta forma de fragmentos da peça usinada, não apresenta continuidade.

Em princípio, a formação de cavaco é um fenômeno que ocorre periodicamente. A deformação concentra-se na região onde ocorre cisalhamento, e quando a deformação nessa região assume um valor crítico o processo reinicia-se. Isto resulta na formação de uma série de segmentos discretos dentro do cavaco. De um modo geral, materiais metálicos dúcteis tendem a formar cavacos contínuos ou de cisalhamento e materiais frágeis tendem a formar cavacos de ruptura. Durante o corte, ocorre cisalhamento concentrado ao longo de plano de cisalhamento. Quanto maior a deformação do cavaco, menor o ângulo de cisalhamento e maiores os esforços de corte. A parte de trás do cavaco é rugosa porque nessa região a deformação não é homogênea.

Pode também ocorrer durante o processo de usinagem a formação de aresta postiça. A aresta postiça é uma porção do cavaco que fica aderida à face da ferramenta. A formação de aresta postiça é favorecida quando a usinagem é feita em velocidades de corte relativamente baixas, não havendo grande aumento de temperatura na interface material-ferramenta. À medida que a velocidade de corte aumenta, a temperatura na ponta da ferramenta também aumenta, causando diminuição da aresta postiça. A aresta postiça pode desaparecer quando as temperaturas alcançadas são suficientes para diminuir o limite de escoamento do material. Podendo também ocorrer diminuição do encruamento, pela ocorrência de processos com a recuperação.

Segundo Shaw (1984), existem dois tipos de cavacos formados em função de não homogeneidade de deformação:

1. Ocorrência de cisalhamento adiabático.
2. Ocorrência de fratura e caldeamento.

O cisalhamento adiabático ocorre, de um modo geral, em materiais que tem baixa condutividade térmica, baixo calor específico e tendência à ocorrência de amolecimento em temperaturas elevadas (recuperação e recristalização), conforme ocorre em ligas de

titânio usinadas com elevadas velocidades de corte. A fratura e o caldeamento têm um resultado semelhante, com exceção do fato da região de elevada deformação ser muito pequena. Nos dois casos, a parte de trás do cavaco apresenta grande ondulação, (SHAW, 1984).

2.1.1.3 Rugosidade

Existe uma correlação entre o desgaste da ferramenta, os níveis de vibração e a rugosidade da ferramenta, (Pereira, 2004). O avanço influencia diretamente na rugosidade. Avanço, força de corte, K_s e rugosidade estão intimamente relacionados. Macari (2005) verificou que o aumento do avanço implica no aumento da rugosidade e da força de corte e na diminuição de K_s .

Ao definir rugosidade, é sempre válido mencionar o conceito de erros de forma. Estes são os dois parâmetros de qualidade superficial mais utilizados. Uma definição bastante elucidativa é proposta por Hutchings (1992), em que a rugosidade consistiria de irregularidades de pequena escala de uma superfície, enquanto que erros de forma seriam uma medida do desvio de forma de uma superfície de sua forma ideal (por exemplo, plana, cilíndrica ou esférica). Este mesmo autor admite que a distinção entre os dois conceitos é arbitrária.

Rugosidade Média

Na Figura 4 da página a seguir, o perfil médio é a linha tal que, no comprimento L , a soma das áreas cheias acima é igual à soma das áreas vazias abaixo (considerando a superfície sem ondulação). Entretanto, a medição de R_a não é suficiente para a caracterização da rugosidade. Se há necessidade de distinção mais rigorosa, outros parâmetros devem ser considerados, tais como picos e depressões, formas e espaçamentos. E métodos mais sofisticados devem ser considerados.

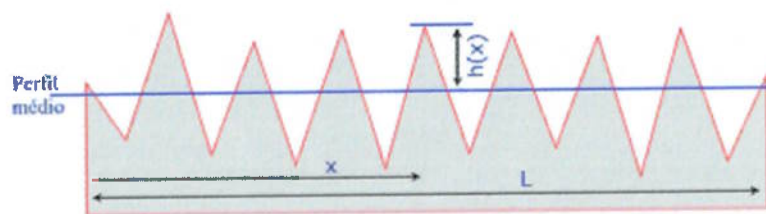


Figura 4: Representação de Ra – rugosidade média

Rugosidade Total

É dada pela diferença entre o pico mais alto e a depressão mais baixa no comprimento considerado. Pode ser um bom indicador da ocorrência de falhas no processo de fabricação.

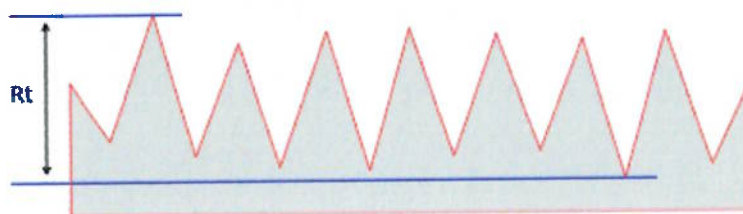


Figura 5: Representação de Rt – rugosidade total

A Figura 6 apresenta faixas de rugosidades médias típicas para alguns processos:

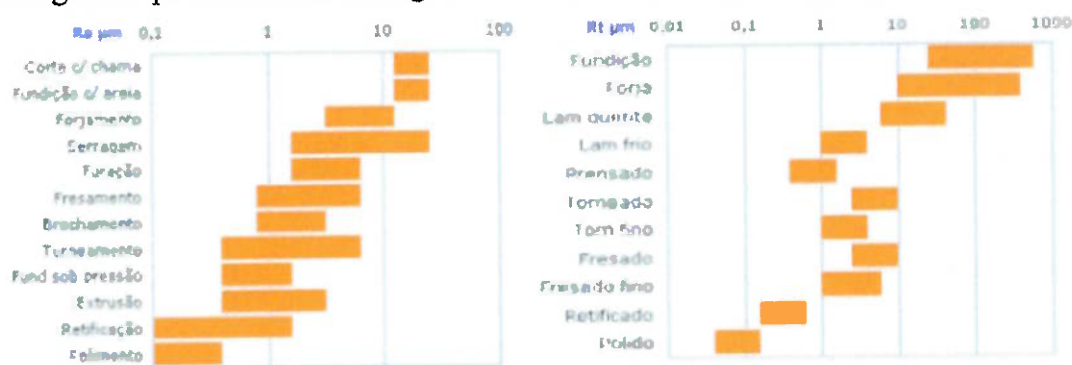


Figura 6: Valores típicos de rugosidade para alguns processos de fabricação
(<http://myspace.eng.br/eng/rugosid.asp>)

2.1.1.4 Forças de Usinagem no Torneamento

A força de usinagem é dada pela resultante dos esforços que atuam sobre a cunha cortante. Na verdade, não se trabalha com a força de usinagem propriamente dita, mas sim com suas componentes. A Figura 7 ilustra a força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento. O conhecimento ou mesmo a estimativa dos esforços de usinagem máximos é utilizado, de um modo geral, para o dimensionamento do equipamento de usinagem e projeto de ferramentas e dispositivos de usinagem. No entanto, esses esforços variam durante o processo de usinagem e podem ser utilizados para estudar os mecanismos de formação de cavaco (Katayama, 1990); (Kovac, 1997).

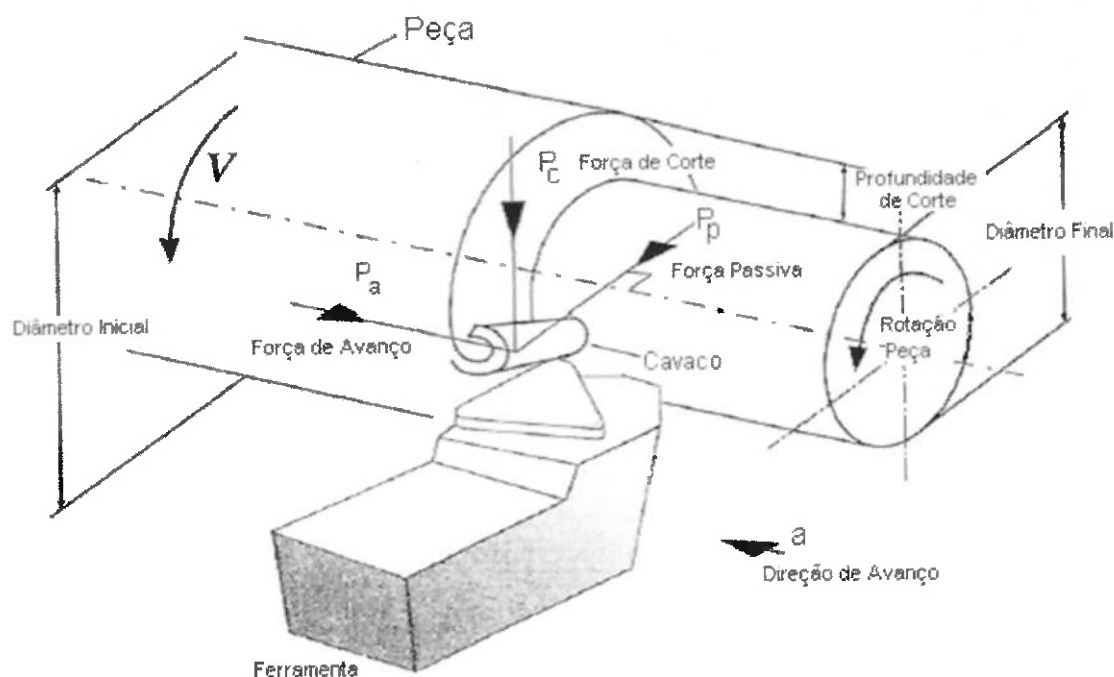


Figura 7: Força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento
Adaptado de Ferraresi (1977)

A Figura 7 apresenta a força de pressão ou força passiva (P_p), força de avanço (P_a) e a força de corte (P_c). A resultante destas componentes é chamada de força de usinagem ou força resultante (P_r), a é o avanço da ferramenta e V indica a rotação da peça.

As forças envolvidas na usinagem são melhor avaliadas em termos de energia específica (força de corte dividida pela área, que é dada pelo avanço multiplicado pela profundidade de corte). Influenciam na energia específica: composição química e microestrutura do material, ângulo de afastamento da ferramenta e espessura do cavaco não deformado. Fatores metalúrgicos como taxa de encruamento do material, também são muito relevantes. Se o material apresentar elevado encruamento durante a usinagem, as forças durante o corte também aumentarão. Cortes, onde ocorre o mecanismo de cisalhamento adiabático, são sensíveis à taxa de deformação do material e as forças de corte serão maiores, mesmo em elevadas velocidades de corte. Isso ocorre na usinagem de ligas de titânio, por exemplo (Metals Handbook, 1989).

As medidas de força de corte podem ser realizadas acoplando um porta ferramentas instrumentado com sensores capazes de medir, direta ou indiretamente, as componentes da força de usinagem. O sinal dos sensores é conectado a uma interface, que amplifica e filtra os sinais, que está ligada a um microcomputador. Esses sensores podem ser sensores piezelétricos ou “strain gages”. Vários trabalhos (DIMLA, 2000a); (DIMLA, 2000b); (HAMID, 1995); (STRAFFORD, 1997) têm sido realizados no sentido de usar a força de corte como forma de avaliar o processo de usinagem. Esses trabalhos têm diferentes abordagens, onde as forças de corte são correlacionadas com parâmetros que vão desde rugosidade, desgaste de ferramenta até microestrutura e propriedades mecânicas.

2.1.1.5 Cálculo da Força de Corte

Segundo Ferraresi (1997), a força de corte (P_C) pode ser calculada pelo código ASME conforme apresentado a seguir. Primeiramente, calcula-se a pressão específica de corte:

$$k_s = \frac{C_a}{a^n} \quad (1)$$

Onde: k_s é a pressão específica de corte em kgf/mm^2 ;
 C_a é a constante do material, vide Tabela B I em ANEXOS;
 a é o avanço em mm/volta , e
 n é um expoente função do material, sendo 0,2 para aço e 0,3 para ferro fundido.

Em seguida, é possível calcular a força de corte:

$$P_c = k_s \cdot a \cdot p \quad (2)$$

Onde: P_c é a força de corte em kgf ;
 k_s é a pressão específica de corte em kgf/mm^2 ;
 a é o avanço em mm/volta , e
 p é a profundidade de corte.

2.2 Usinabilidade

A usinabilidade de um material, bem como outras propriedades de fabricação, são tão importantes como as propriedades mecânicas e resistência à corrosão. A usinabilidade de um material metálico é influenciada por vários fatores tais como: composição química, microestrutura, resistência do material, avanço utilizado na usinagem, velocidade de corte, penetração e escolha do fluido de corte (Peckener, 1977).

Há três aspectos principais que caracterizam a usinabilidade: a vida da ferramenta, acabamento superficial e potência requerida para o corte. Assim, a usinabilidade pode ser definida com auxílio de alguns critérios tais como desgaste da ferramenta, acabamento superficial da peça usinada, remoção de cavaco, velocidade de corte e produtividade. Geralmente, a usinabilidade de um material também é associada à sua dureza. Quanto mais duro o material, maior é a dificuldade para usiná-lo. No entanto, a

usinabilidade parece mais relacionada com a microestrutura do material do que com sua dureza propriamente dita (Machado et al., 2003).

A usinabilidade também depende de variáveis do processo de usinagem, tais como: rigidez da ferramenta, geometria e material da ferramenta, tipo do fluido de corte e tipo da operação de usinagem (Machado et al., 2005).

Existem vários testes para avaliar a usinabilidade de um material. Esses ensaios são importantes para comparar materiais e também para otimizar os processos de usinagem. Os primeiros ensaios de usinabilidade foram realizados no século passado por Taylor. Nesse ensaio era determinada a velocidade de corte que causava a falha da ferramenta após 20 minutos (V20). A partir desses ensaios ficou determinada a relação empírica:

$$T \cdot V \cdot n = C \quad (3)$$

Onde: T é a vida da ferramenta em minutos;

V é a velocidade de corte m/mim, e

C e n são constantes empíricas obtidas experimentalmente.

Diversos métodos são utilizados para se avaliar o processo de usinagem e dão indicações da usinabilidade do material. Dentre esses métodos estão a emissão acústica, temperatura da ferramenta, forças de corte e vibração. A utilização de ultra-som e de acabamento superficial também é indicada.

Neste texto, será dada ênfase aos fatores que relacionam a microestrutura com a usinabilidade de aços. Estes fatores são: composição química, tratamento térmico e deformação plástica (encruamento).

2.2.1 Efeito da Microestrutura na Usinagem

Uma grande lista de itens que influenciam na usinagem dos materiais pode ser citada. A microestrutura de um material influencia diretamente nas propriedades

mecânicas e, portanto, tem um papel importante na usinagem (Shaw, 1984). Por exemplo, a relação de Hall-Petch mostra como o tamanho de grão influencia no limite de resistência do material (Meyers; Chawla, 2000). Pode-se também citar como exemplo os aços carbono, nos quais variações nas taxas de resfriamento, a partir da temperatura de austenitização, causam variações de dureza acima de 40 HRC, (Krauss, 1989). Os fatores microestruturais que afetam as propriedades mecânicas são, dentre outros, tamanho de grão, ocorrência de precipitação e outras transformações de fase e encruamento.

A microestrutura da superfície de uma peça ou componente pode ser alterada pelo processo de usinagem. Pode-se verificar as mudanças microestruturais tanto na superfície do material usinado, como no cavaco formado em função das condições de usinagem e da microestrutura do material de partida. Outro exemplo do que ocorre na microestrutura do cavaco durante o torneamento, onde pode ocorrer um escoamento localizado, é a formação de bandas de cisalhamento (Shaw, 1984). Trabalho realizado por Strafford et al. e exposto por Staker (1980) mostrou a influência da microestrutura nas forças de corte de diferentes aços. Astakhov (1999) relacionou a quantidade de deformação, mecanismos de fratura com os mecanismos de formação de cavaco. Já os trabalhos de Komanduri (2001) relacionam a quantidade e mecanismos de deformação com as temperaturas envolvidas durante o processo de usinagem e com a microestrutura do cavaco formado durante o processo de usinagem. A relação entre a microestrutura, ou a existência da descontinuidade na microestrutura, e fatores como acabamento superficial (rugosidade), força de corte, temperatura de corte e vida da ferramenta também têm sido objeto de estudos. Outro fator que também está relacionado como a microestrutura do material é a ocorrência de tensões residuais durante a usinagem (Saï; Salh; Lebrunm, 2001).

Embora determinar as variáveis de usinagem do ponto de vista microestrutural seja difícil de ser realizada, pois os fenômenos envolvidos são complexos e interagem entre si, esta é uma das melhores formas de se estudar os mecanismos de corte em diferentes materiais.

2.2.2 Efeito dos Elementos de Liga nos Aços Carbono

Uma vez que a usinabilidade tem um forte impacto econômico sobre a produção, o efeito dos elementos de liga na usinabilidade tem sido alvo de muito estudo. No entanto, o critério de avaliação e a metodologia utilizada diferem muito nos trabalhos.

A usinabilidade de aços resulfurados já foi estudada com médio carbono, com e sem a adição de elementos como Al, Nb e V, medindo-se desgaste de flanco. Ocorre que em aços com aproximadamente a mesma dureza, o Nb muda a relação ferrita-perlita, aumentando a fração volumétrica de ferrita. Neste trabalho os aços apresentavam uma relação de Mn/S de aproximadamente 13.

Mauti (1989) também relacionou o desgaste de ferramenta com a microestrutura do material. Foi utilizado um aço 1020, observou-se que diferentes microestruturas, 37% de ferrita no lote 1 e 30% no lote 2, levaram a diferentes vidas de ferramenta. Maiores teores de ferrita parecem favorecer a usinabilidade. Neste trabalho a relação Mn/S esteve entre 40 e 50.

Acabamento superficial e forças de corte já foram utilizados como critérios para avaliação da usinabilidade. Foram comparados os efeitos do carbono, fósforo e nitrogênio. Sabe-se que teores de nitrogênio em torno de 0,04% levam a um melhor acabamento superficial, porém são requeridas maiores forças de corte. O nitrogênio parece ter grande influência no comportamento mecânico desses aços. Já os maiores teores de carbono (0,4%) e de fósforo (0,15%) diminuem as forças de corte, porém não proporcionam acabamento superficial tão bom. Strafford (1997) também mediu forças de corte para avaliar a usinabilidade de diversos aços. Neste trabalho concluiu-se que as forças de corte aumentaram com a dureza do material e dependeram do tamanho de grão e fração volumétrica das fases. Variações nos esforços de corte foram associadas à presença de inclusões, isto é, variações na microestrutura.

A formação de aresta postiça foi utilizada no trabalho como forma de avaliar a usinabilidade do aço SCM440 (0,4%C, 0,81%Mn, 1,16%Cr, 0,17%Mo, 0,021%S). Neste caso, foram realizados diferentes tratamentos térmicos, mas com durezas próximas. Foi observado que as forças de corte variam muito em função do tratamento térmico,

principalmente para velocidades de corte mais baixas. As melhores condições foram obtidas no aço laminado à quente.

2.2.3 Tratamentos Térmicos – Normalização e Recozimento

Neste trabalho foram realizados ensaios com material SAE 1045 recozido e normalizado. Uma vez que tais tratamentos influenciam diretamente na microestrutura e, portanto, também influenciam no comportamento mecânico, são apresentados a seguir os conceitos básicos destes tratamentos, que ajudam o leitor a compreender melhor os resultados obtidos.

Normalização

Aços que foram deformados plasticamente mediante, por exemplo, uma operação de laminação, são compostos por grãos de perlita, que possuem um formato irregular e que são relativamente grandes, mas que variam substancialmente em tamanho. Um tratamento térmico de normalização é usado para refinar os grãos (isto é, para diminuir o tamanho médio do grão) e produzir uma distribuição de tamanhos mais uniforme e desejável; aços perlíticos com grãos finos são mais tenazes do que aços perlíticos com grãos mais grosseiros. A normalização é obtida mediante o aquecimento a uma temperatura de aproximadamente 55 a 85 °C (100 a 150 °F) acima da temperatura crítica superior, que é dependente da composição, como está indicado na Figura 8. Após ser dado tempo suficiente para que a liga seja completamente transformada em austenita, no que se constitui um procedimento que é conhecido por austenitização, o tratamento é encerrado pelo resfriamento ao ar, Callister (2002).

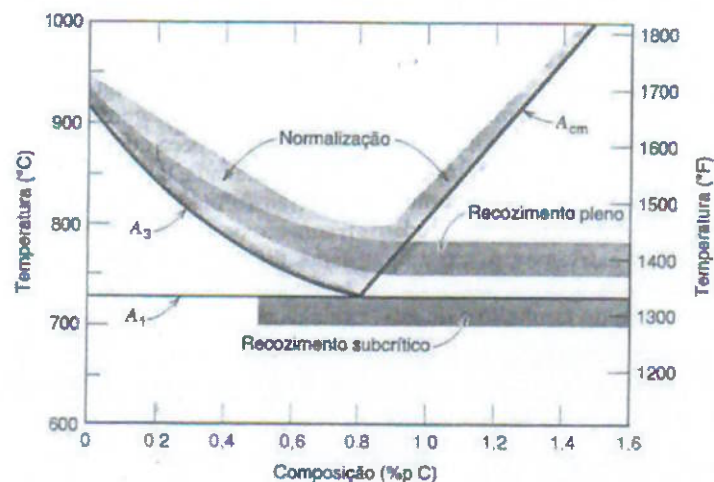


Figura 8: Diagrama de fases ferro carbono na vizinhança do eutetóide, indicando as faixas de temperatura do tratamento térmico para aços carbonos comuns, (Callister, 2000)

Observando a Figura 8, acima, nota-se que é necessário elevar-se a temperatura entre 825 e 855 °C para o caso do SAE 1045, o que justifica o material normalizado, que possui a curva tensão deformação apresentada na Figura 66, ter sido aquecido até a temperatura de 850 °C.

Recozimento Pleno

Um tratamento térmico conhecido por recozimento pleno é usado com frequência em aços com teores baixos e médios de carbono que serão submetidos a usinagem ou que irão sofrer deformação plástica durante uma operação de conformação. A liga é austenitizada pelo seu aquecimento a até 15 a 40 °C acima das linhas A₃ ou A₁, conforme indicado na Figura 8, até que seja atingida uma condição de equilíbrio. A liga é então resfriada no próprio forno; isto é, o forno de tratamento térmico é desligado e tanto o forno como o aço resfriam até a temperatura ambiente à mesma taxa de resfriamento. O produto microestrutural desse recozimento é uma perlita grosseira, tornando o aço relativamente mole e dúctil. O procedimento de resfriamento em um recozimento pleno demanda tempo; entretanto, tem-se como resultado uma

microestrutura que possui grãos pequenos e uma estrutura granular uniforme (Callister, 2002).

Recozimento Subcrítico

Aços que contêm teores médios e altos de carbono e que possuem uma microestrutura composta por perlita grosseira uniforme podem ainda ser muito duros para serem convenientemente usinados ou deformados plasticamente. Esses aços, e na realidade qualquer aço, podem ser termicamente tratados ou recozidos para desenvolver a estrutura da cementita globulizada. Os aços que sofrem recozimento subcrítico são moles, possuem um máximo de ductilidade, e são facilmente usinados ou deformados. O tratamento térmico de recozimento subcrítico consiste em se aquecer a liga até uma temperatura imediatamente abaixo da temperatura eutetóide (linha A_1 na Figura 8, ou até aproximadamente 700 °C) na região $\alpha + Fe_3C$ do diagrama de fases. Se a microestrutura original contiver perlita, os tempos de recozimento subcrítico irão ficar, em geral, na faixa entre 15 e 25 horas (Callister, 2002).

2.2.4 Encruamento

O fenômeno do encruamento é explicado com base em interações entre campos de deformação e discordâncias. A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação ou com o encruamento, devido à multiplicação das discordâncias ou à formação de novas discordâncias. Conseqüentemente, a distância média de separação entre as discordâncias diminui. Na média, as interações de deformação discordâncias-discordâncias são repulsivas. O resultado líquido ou global é tal que o movimento de uma discordância é dificultado pela presença de outras discordâncias. À medida que a densidade de discordâncias aumenta, essa resistência ao movimento das discordâncias por outras discordâncias se torna mais pronunciada. Dessa forma, a tensão imposta, necessária para deformar um metal, aumenta com o aumento do trabalho a frio (Callister, 2002).

O encruamento é consequência de uma deformação plástica do material, o que o torna mais duro e mais resistente. Pelo fato de a temperatura em que a deformação é efetuada estar muito abaixo da temperatura absoluta de fusão do metal, também é chamado de trabalho a frio. A maioria dos metais encrua a temperatura ambiente.

Algumas vezes é conveniente expressar o grau de deformação plástica como um percentual de trabalho a frio, em vez de expressar como uma deformação. O percentual de trabalho a frio (%TF) é definido pela expressão (CALLISTER, 2002):

$$\%TF = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Onde: %TF é a porcentagem de trabalho a frio;

A_0 é a área original da seção reta que sofre deformação;

A_d é a área A_0 após deformação.

A influência do encruamento sobre o comportamento tensão deformação está exposta na Figura 9. A Figura 10 e a Figura 11 mostram como o aço, o latão e o cobre aumentam seu limite de escoamento e seu limite de resistência à tração com o aumento do trabalho a frio. A consequência do aumento da dureza e da resistência, conforme Figura 12, é a diminuição da ductilidade do metal.

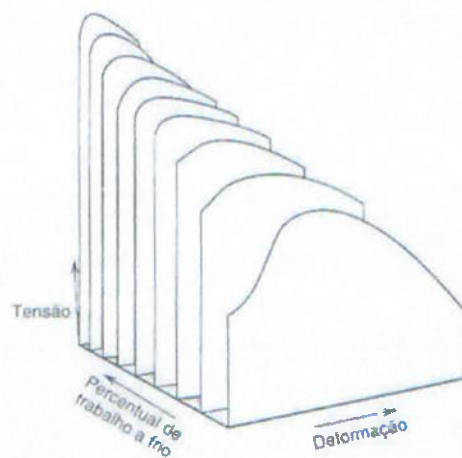


Figura 9: Influência do trabalho a frio sobre o comportamento tensão deformação para um aço com baixo teor de carbono, (Callister, 2000)

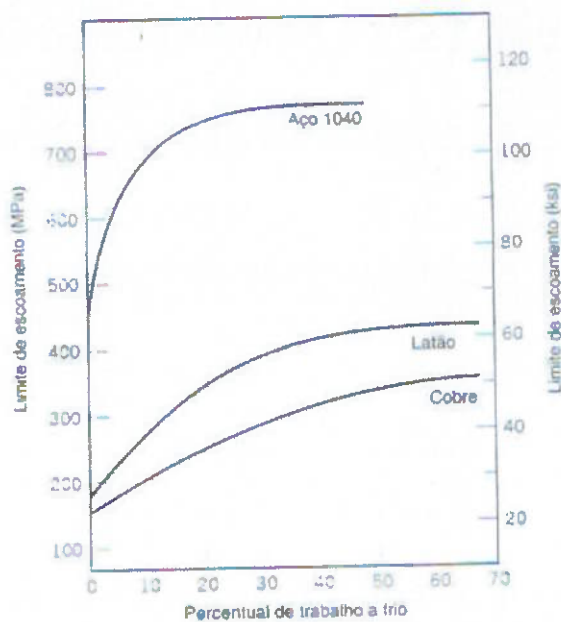


Figura 10: Aço 1040, latão e cobre – aumento do limite de escoamento em função do trabalho a frio (Callister, 2000)

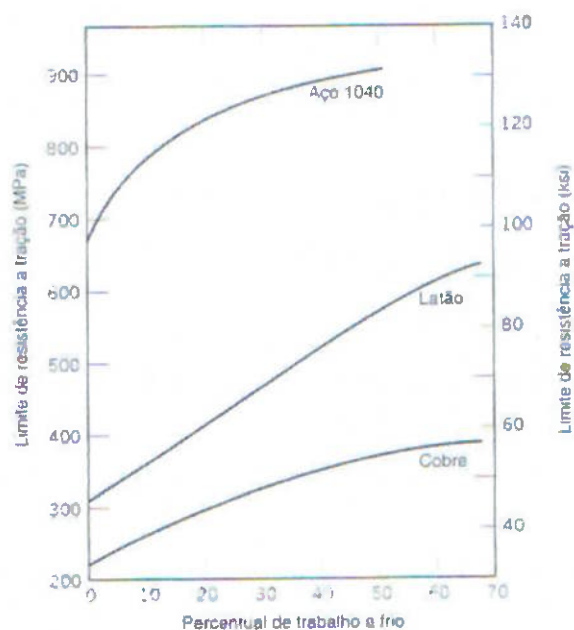


Figura 11: Aço 1040, latão e cobre – aumento do limite de resistência à tração em função do trabalho a frio (Callister, 2000)

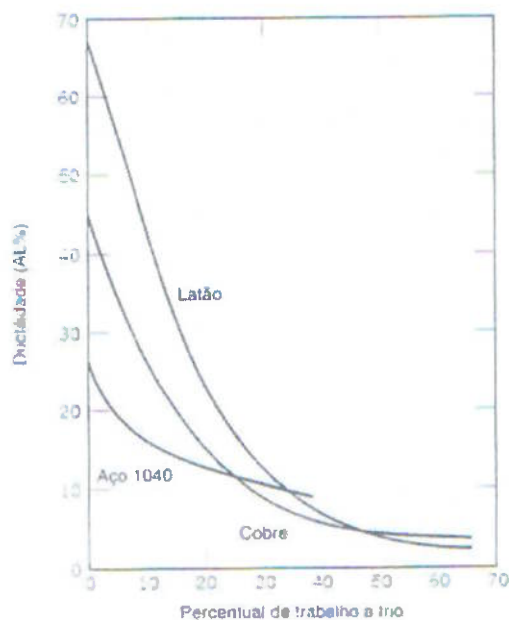


Figura 12: Aço 1040, latão e cobre – redução da ductilidade em função do trabalho a frio (Callister, 2000)

3 METODO DOS ELEMENTOS FINITOS – MEF

3.1 Programa Utilizado

O programa utilizado para este trabalho é o ABAQUS em sua versão 6.5-1. Este programa possui uma interface acessível sendo constituído de módulos. Existem os módulos de modelagem da peça, definição dos materiais, carregamento externo e assim por diante, conforme detalhado no item 4.4.

3.2 Conceitos Iniciais

O método dos elementos finitos é um método numérico pelo qual podemos analisar problemas complexos, sendo que os métodos analíticos fundamentados no cálculo diferencial e integral exigiriam muito esforço para o alcance das respostas à análise, se é que as encontraria. Para tanto, o MEF divide o problema em muitas partes finitas, isso se chama discretização em elementos finitos. Note que os recursos do cálculo diferencial e integral estão calcados no estudo de elementos infinitesimais para a solução de problemas, diferentemente do MEF que está calcado no estudo de elementos finitesimais.

Existem vários tipos de elementos finitesimais, ou elementos finitos, com o qual o método pode trabalhar para a execução da análise. O tipo do elemento dependerá dos graus de liberdade nos nós, ou seja, da definição das direções livres nos vértices dos elementos, sendo assim, cada direção livre num nó corresponde a um grau de liberdade. Outro detalhe que influencia na classificação é o estado de tensões que o elemento aceita. No item *Entradas* há uma descrição mais detalhada com relação à malha e aos elementos.

3.3 Arquitetura Básica do Abaqus

Um programa de elementos finitos é um código computacional, projetado para ser usado na solução de certa classe de problemas, que pode ser ampla ou restrita, mas que contém uma certa estrutura mínima, inerente ao mais simples dos programas de elementos finitos.

Conforme pode ser observado na Figura 13, todo programa de elementos finitos deve ter pelo menos cinco etapas, quais sejam: a entrada de dados, a superposição das matrizes e vetores do elemento, a imposição das condições de contorno, a solução do sistema de equações e a saída dos resultados.

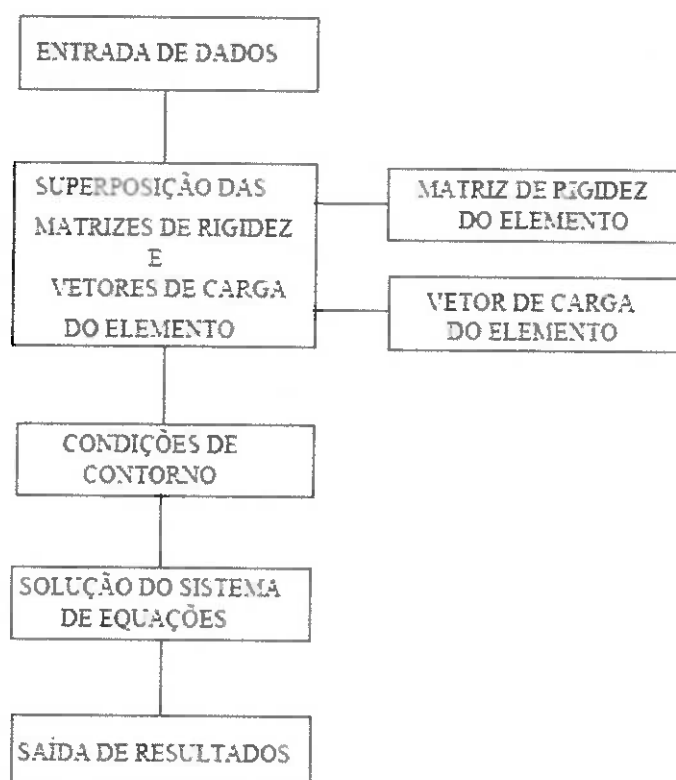


Figura 13: Arquitetura básica do Abaqus

3.4 Entradas

As entradas do Abaqus são basicamente: geometria, material, propriedades da seção, malha de elementos finitesimais, método de cálculo, condições de contorno e carregamento. Basicamente, cada tópico é um módulo do programa, e após o preenchimento de todos os módulos é possível iniciar os cálculos.

3.4.1 Geometria

Em um ambiente semelhante aos dos programas renomados de desenho, é possível modelar a peça a ser estudada. Neste trabalho foram modeladas peças sólidas, homogêneas, tridimensionais e deformáveis.

3.4.2 Material

Este módulo permite que o usuário forneça muita informação sobre o material. Nas simulações realizadas neste trabalho, os materiais foram definidos pela curva tensão-deformação e pela densidade.

A região elástica é definida pelo módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν). Já a região inelástica, pode ser descrita fornecendo-se alguns pontos pertencentes à curva. Os materiais foram considerados todos como isotrópicos.

Para as simulações aqui realizadas, as informações acima já foram suficientes, mas ainda há a possibilidade de se computar outras propriedades, tais como: condutividade térmica, calor específico, calor latente, condutividade elétrica, constante dielétrica, solubilidade e difusibilidade.

3.4.3 Seção

Este passo consiste em definir quais serão as propriedades da seção da peça. Uma vez definido corretamente o material utilizado, basta associar o material a uma nova

seção e a seção à peça. Também haveria a possibilidade de definir um estado plano de tensões, se fosse o caso das simulações aqui realizadas.

Neste trabalho foi necessário considerar camadas com diferentes propriedades ao longo do sentido radial da peça, para tanto basta particionar a peças em quantas seções se deseja.

3.4.4 Malha

Este é um dos módulos mais importantes, pois há uma série de definições que implicarão em um resultado ótimo, ruim ou até mesmo em resultado nenhum caso não se escolha uma malha que torne o cálculo factível. A seguir, serão discutidos tipos de análise, técnicas de geração de malha, formatos possíveis, controle e tamanho dos elementos.

3.4.4.1 Tipo de Análise

O Abaqus pode trabalhar principalmente com os seguintes tipos de análise: transferência de calor, tensões térmicas, análise acústica, choques mecânicos e também cálculo de tensão e deslocamento tridimensionais devido a um carregamento externo. Este trabalho tem seu foco voltado para o segundo caso.

3.4.4.2 Geração de Malha

As técnicas de geração permitem três tipos de malha:

- malha estruturada;
- malha livre;
- malha por varredura.

A malha estruturada é gerada através de uma malha predefinida na face da peça. É recomendável que se atente principalmente para as regiões localizadas nas proximidades de curvas, onde algum elemento pode ultrapassar o limite da peça, caso a malha não seja

suficientemente refinada. Há duas alternativas para este problema: tornar a malha mais densa nessas regiões ou particionar a peça em partes menores e mais simples.

A malha livre é gerada automaticamente sem esta matriz preliminar como acontece com a estruturada. A vantagem é que por ser uma malha não estruturada, possui maior flexibilidade e pode ser aplicada em peças de geometria mais complexas.

A malha por varredura prolonga a malha gerada em uma face, funciona como uma extrusão dos elementos. Possui a desvantagem de não gerar a malha caso haja algum vértice isolado ou borda isolada além da face mestra.

Partição

Este é um comando poderoso e possui as seguintes vantagens:

- Divide uma peça de geometria complexa em várias partes mais simples;
- Proporciona maior controle sobre a malha;
- Permite que cada região da peça seja configurada com um tipo de elemento.

A Figura 14, a seguir, apresenta um exemplo de peça que não pode receber uma malha constituída por elementos hexaédricos. Para resolver este impasse há duas possibilidades: alterar o formato do elementos de hexaédrico para tetraédrico e gerar uma malha livre; ou particionar a peça utilizando as técnicas de geração de malha adequadas. A Figura 14 ilustra a peça particionada em duas regiões, sendo que a da esquerda pode acomodar uma malha estruturada e a da direita uma malha por varredura.

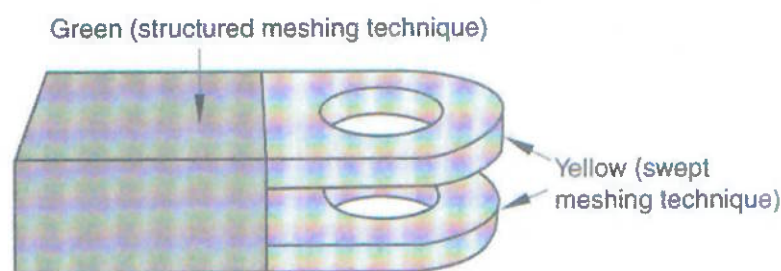


Figura 14: Peça comporta malha de elementos hexaédricos apenas após a adequada partição

3.4.4.3 Elementos

Formato

Conforme Figura 15, abaixo, os principais grupos de elementos são: sólido, de casca, de viga, rígido, de membrana, infinitos, conector elástico e amortecedor ou cilíndrico.

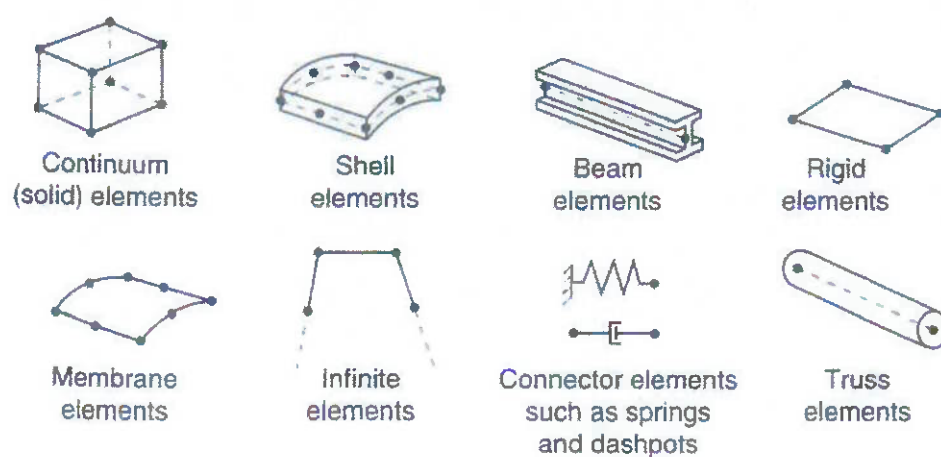


Figura 15: Principais grupos de elementos utilizados pelo Abaqus (ABAQUS INC., 2004)

Dentre os grupos supra citados, destacam-se os elementos sólidos tridimensionais utilizados neste trabalho, são eles:

- Tetraédricos;
- Prismas triangulares;
- Hexaédricos.

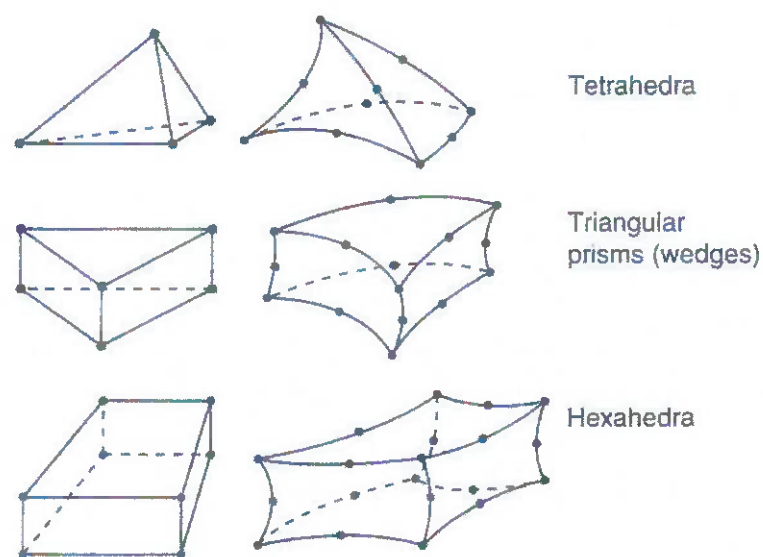


Figura 16: Elementos sólidos tridimensionais do Abaqus (ABAQUS INC., 2004)

Quantidade de Nós

O número de graus de liberdade é fundamentalmente o número de variáveis calculadas durante a análise. No caso de cálculo de tensão e deslocamento, o número de graus de liberdade é a soma das translações e rotações permitidas em cada nó de cada elemento.

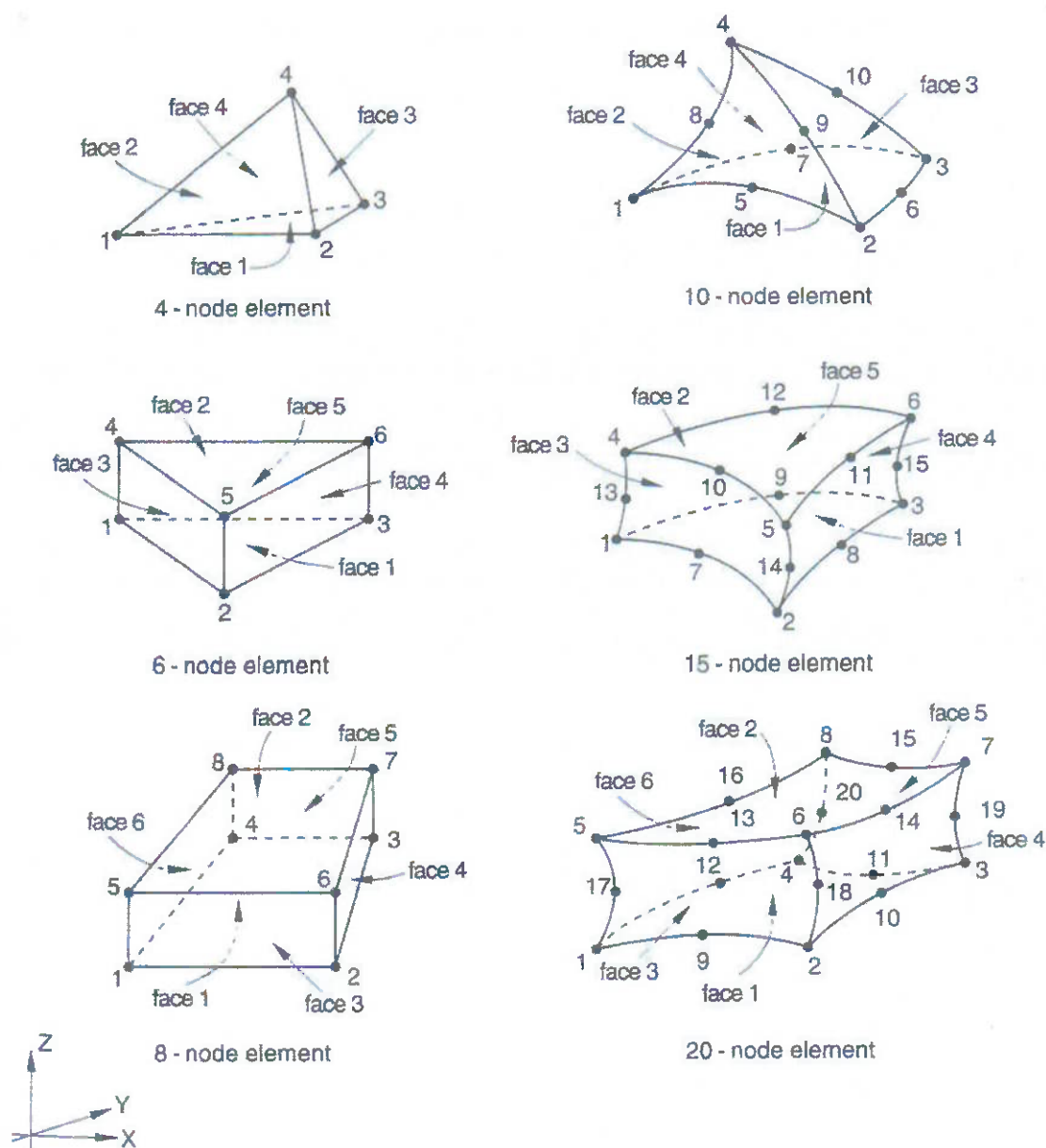


Figura 17: Disposição e nomenclatura das faces e dos nós dos elementos sólidos do Abaqus (ABAQUS INC., 2004)

Elemento cúbico linear e de segunda ordem (quadrático)

Os elementos de segunda ordem, ou quadráticos, proporcionam maior acurácia, porém para problemas com geometria complexa os elementos lineares são mais indicados.

Neste trabalho, foram adotados elementos lineares, porém elementos de modo incompatível, sendo assim, os resultados tiveram uma boa acurácia com a vantagem de se ter um cálculo mais rápido.

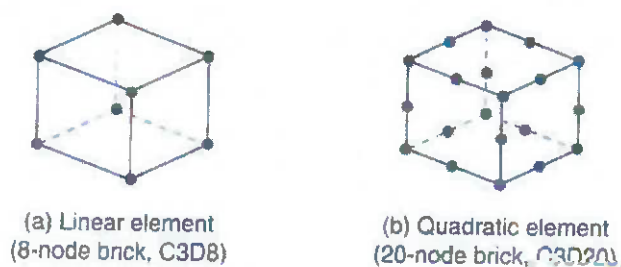


Figura 18: Exemplo de elemento linear e de segunda ordem (ABAQUS INC., 2004)

Tamanho do Elemento

Por último, antes de acionar o comando que gera a malha, é preciso definir o tamanho do elemento, e por consequência a quantidade total de elementos, ou seja, a densidade da malha.

Configurações Opcionais

Elementos híbridos: devem ser utilizados quando o material é extremamente incompressível, ou seja, quando pequenos deslocamentos causam grandes tensões. Geralmente esta formulação é utilizada para materiais com coeficiente de Poisson superior a 0.48, motivo pelo qual não foram utilizados elementos híbridos neste trabalho, afinal o coeficiente de Poisson do aço é aproximadamente $\nu_{aço}=0.30$.

Integração reduzida: Este método realiza integração de ordem reduzida e pode ser aplicado a elementos bidimensionais quadriláteros e tridimensionais hexaédricos. Isso reduz bastante o tempo de cálculo principalmente em elementos tridimensionais.

Exemplo: O elemento C3D20 exige um tempo aproximadamente 3,5 vezes maior que o C3D20R, pois este último possui apenas 8 pontos de integração contra 27 do C3D20. Geralmente, quando se trabalha com elementos quadráticos, o método de integração reduzida proporciona maior acurácia que a integração total. Para elementos de primeira ordem, a integração mais adequada dependerá muito da natureza do problema.

Modo incompatível: O modo incompatível melhora o comportamento dos elementos quando o problema é de flexão, pois além dos graus de liberdade padrão, este modo considera outros internamente. Tomando-se o elemento tipicamente utilizado como exemplo, o C3D8, ao se adotar o modo incompatível o elemento passa a ter mais 13 graus de liberdade. Esses elementos aumentam o tempo de cálculo em relação aos elementos padrão de primeira ordem, porém o cálculo é mais rápido quando comparado com elementos de segunda ordem.

Recomendações Gerais

Abaixo, as principais recomendações no que se refere ao uso dos elementos da malha:

- Para análises tridimensionais, os elementos hexaédricos são os mais recomendáveis, pois proporcionam a melhor relação custo / benefício. No caso de se utilizar elementos tetraédricos, recomenda-se que sejam de segunda ordem (quadráticos);
- Integração reduzida e elementos quadráticos são adequados para problemas não lineares simples e problemas lineares;
- Em regiões de gradiente elevado é necessário usar elementos quadráticos;
- Problemas envolvendo grandes distorções devem ser modelados com elementos hexaédricos de primeira ordem, e, se a distorção for muito acentuada, deve-se optar por elementos de primeira ordem com integração reduzida;
- Elementos híbridos devem ser utilizados apenas para material completamente incompressível;

- Obtém-se maior acurácia em problema de flexão, utilizando o modo incompatível, malha relativamente fina e elementos de primeira ordem com integração reduzida.

Nomenclatura

O Abaqus utiliza um sistema de nomenclatura para os elementos, sendo composto por seis conjuntos de significados, onde os três primeiros são obrigatórios e os três últimos opcionais. Da esquerda para a direita, tem-se:

1) A posição 1 indica o tipo de análise. Para análise de tensão e deslocamento o código correspondente é C, transferência de calor e difusão de massa são indicados por DC, análise acústica AC.

2) Em seguida, o código que caracteriza o tipo de elemento: uni, bi ou tridimensional (1D, 2D ou 3D), axiométrico (AXA) ou cilíndrico (CL).

3) A última posição obrigatória indica o número de nós de cada elemento.

4) Se a opção de integração reduzida ou a opção de modo incompatível estiver ativada, aparecerá a letra R ou I, respectivamente. É possível que nenhuma das duas letras apareça, pois são escolhas opcionais.

5) Caso o elemento tenha sido definido como híbrido, aparecerá a letra H na quinta posição.

6) Na última definição genérica do elemento a letra D indica a consideração da transferência de calor por convecção e difusão com controle de dispersão e a letra T indica deslocamento e temperatura acoplados.

O elemento mais utilizado nas simulações aqui apresentadas foi o C3D8I, elemento para se estudar tensões e deslocamentos, tridimensional, 8 nós, opção modo incompatível ativada e não híbrido.

3.4.5 Condições de Contorno

Na categoria mecânica, existem as opções de fixar o deslocamento e a rotação de uma face, impor um conector de velocidade ou ainda um conector de descolamento.

No caso real, a barra gira no torno e a ferramenta está fixa, porém pode-se imaginar a barra como fixa e a ferramenta girando, pois são situações equivalentes. Para ratificar esta equivalência basta analisar um sistema de coordenadas localizado na ponta da ferramenta. Neste sistema, a ferramenta está parada exceto pelo movimento de avanço longitudinal e a peça está em rotação. Já em um sistema de coordenadas fixo à peça, a situação é oposta. Sendo assim, em todas as simulações a peça foi modelada como uma barra engastada, sendo a seção de engaste correspondente à seção fixa pela castanha do torno.

3.4.6 Carregamento

Neste modelo, é computado o carregamento externo, que pode ser uma pressão uniforme sobre a peça, força concentrada com as três componentes, momento, pressão em uma tubulação, força e momento de conexão, entre outros.

3.4.7 Procedimento de Cálculo

Todo o procedimento de análise (cálculo) deve ser configurado no módulo *passo* do Abaqus, onde pode ser definido o método numérico a ser utilizado, tipo de matriz de rigidez, incremento e forma de variação dos parâmetros externos, conforme exposto nos itens seguintes.

3.4.7.1 Cálculo

O método dos elementos finitos está baseado no elemento, e para isso, existem as equações constitutivas do mesmo. A primeira delas é a equação matricial que relaciona as forças (aplicadas nos graus de liberdade definidos nos nós) com os deslocamentos dos respectivos graus de liberdade, ou seja, em cada grau de liberdade, que é passível de receber uma força, há um deslocamento associado, que pode ser circunstancialmente

nulo. Chamamos esta equação matricial de equação fundamental do equilíbrio estático, e a escrevemos representativamente como:

$$[K]_{n \times n} \cdot \{Q\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1} \quad (5)$$

Onde: $[K]$ é a matriz de rigidez do elemento ($n \times n$);
 $\{Q\}$ é o vetor deslocamento dos graus de liberdade ($n \times 1$);
 $\{F\}$ é o vetor Força nos graus de liberdade ($n \times 1$), e
 n é o número de graus de liberdade do elemento.

Assim, força e deslocamento se relacionam através da matriz de rigidez do elemento. Os componentes desta matriz são função do material, mais especificamente do seu módulo de elasticidade, e de sua geometria.

Geralmente, o Abaqus utiliza o método de Newton para resolver problemas não lineares e o método direto da rigidez (stiffness method) para problemas lineares. Nos dois casos a matriz de rigidez é necessária.

Método Direto

As equações de função de forma características do elemento são recursos numéricos para determinar os deslocamentos no seu interior em função dos deslocamentos nos nós. Na verdade, com os deslocamentos nos nós, obtidos pela equação fundamental do equilíbrio, obtém-se também as tensões no interior do elemento σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{xz} e τ_{yz} , ou σ_1 , σ_2 , σ_3 , ou $\sigma_{\text{Von Mises}}$, ou σ_{Tresca} , ou ainda σ_{Rankine} .

Matematicamente, pelo método, uma estrutura discretizada com um carregamento aplicado para a análise, não passa de um grande sistema linear composto por cada uma das equações de equilíbrio de cada elemento finito que a compõe. Solucioná-lo, implica em determinar os deslocamentos dos graus de liberdade de todos os nós livres da estrutura.

$$\begin{cases} [K]_1 \cdot \{Q\}_1 = \{F\}_1 \\ [K]_2 \cdot \{Q\}_2 = \{F\}_2 \\ [K]_3 \cdot \{Q\}_3 = \{F\}_3 \\ \vdots \\ [K]_n \cdot \{Q\}_n = \{F\}_n \end{cases} \Leftrightarrow [K]_{global} \cdot \{Q\}_{livres} = \{F\}_{externas} \quad (6)$$

E então:

$$\{Q\}_{livres} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ \vdots \\ Q_n \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Tendo sido calculados os deslocamentos, o método se volta a cada elemento novamente, e usando as equações de função de forma, calcula, em cada elemento as tensões e deslocamentos internos, terminando a análise da estrutura.

Método de Newton

É um método iterativo em que se fornece o Q_0 . O próximo valor é calculado pela seguinte formula (equação iterativa):

$$Q_{k+1} = Q_k - \frac{F(Q_k)}{F'(Q_{k+1})}, k = 1, 2, \dots \quad (8)$$

O Abaqus automaticamente verifica se a matriz de rigidez é simétrica ou não simétrica e também defini o método de cálculo mais adequado para o modelo estudado.

3.4.7.2 Convergência

Para o método direto, o erro pode ser definido como:

$$e^2 = \frac{\|KQ - F\|}{\|F\|} \quad (9)$$

O valor de referência para convergência do método direto é $e^2 < 10^{-6}$, já para o método de Newton a referência é um pouco menor $e^2 < 10^{-8}$.

$$e^2 = \frac{\max \|F''(\varepsilon)\|}{2 \cdot \min \|F'(\varepsilon)\|}, \varepsilon \in I \quad (10)$$

3.4.7.3 Incremento

O tempo de incremento pode ser definido ou determinado automaticamente pelo programa, o que é mais recomendável, pois o Abaqus define o tempo de incremento baseado na acurácia exigida.

O número máximo de incrementos deve ser adequado, se o valor for menor que o adequado, a iteração termina sem atingir uma boa solução.

3.4.7.4 Variação dos Parâmetros Externos

É possível impor a suavidade de variação de parâmetros externos, como carregamento por exemplo. Há duas opções: variação instantânea ou linear. Para os casos analisados neste trabalho, a variação linear é mais indicada.

3.5 Saídas

Após efetuados os cálculos, o software permite visualizar a peça não deformada, a peça deformada, a representação dos vetores, o que permite visualizar onde ocorre tensão por tração e onde ocorre compressão, além de representar também as regiões submetidas a diferentes tensões, exibindo cores mais quentes em regiões de maiores tensões e cores mais frias em regiões menos solicitadas.

4 METODOLOGIA PARA ENSAIOS

4.1 Material Utilizado

O material escolhido para a realização deste trabalho foi um aço SAE 1045, cuja composição química é apresentada na Tabela 1:

Tabela 1: Composição química do SAE-1045

Composição Química do SAE-1045									
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	%Cu
0,455	0,230	0,740	0,018	0,026	0,140	0,120	0,030	0,023	0,150

4.2 Preparação dos Ensaios de Força de Corte

Para que fatores externos não interferissem nos ensaios, alguns cuidados foram tomados. Atenção especial para sempre ajustar a máquina da mesma maneira, com a peça bem fixada e centralizada na castanha, para tanto, usou-se um relógio calibrador. Tendo em vista que o material a ser usinado é fornecido com geometria imperfeita devido ao seu próprio processo de fabricação, é imprescindível antes de iniciar o ensaio propriamente dito, usinar o tarugo de forma a remover uma fina camada de metal, os parâmetros de usinagem utilizados nesta etapa preliminar devem ser sempre os mesmos, com isso foi garantida uma mesma condição inicial para os tarugos em todos os ensaios. As demais recomendações são as mesmas necessárias para qualquer operação de usinagem, tais como utilizar ferramentas apropriadas e utilizar os devidos equipamentos de proteção individual.

4.3 Avaliação da Força de Usinagem Durante o Torneamento

As forças de corte e de avanço foram medidas utilizando o dispositivo apresentado na Figura 19 da página a seguir, que é um porta-ferramentas instrumentado com extensômetros (Guimarães, 2000) ligado a um sistema de aquisição. Para armazenamento e tratamento dos dados é utilizado um microcomputador.

A aquisição dos dados é feita utilizando-se um sistema que apresenta uma configuração inicial (taxa de aquisição; tempo de aquisição; tipos de filtros; configuração dos canais; tipo de instrumentação, no caso extensômetros). O software utilizado é o Aqdados (software da Linx Eletrônica Ltda). Esse software foi instalado em um microcomputador alocado para o sistema de aquisição e para o dispositivo de medição das forças. O instrumento de medição (porta ferramentas instrumentado) fica ligado ao sistema de aquisição (placa de aquisição de dados e módulos com filtros e amplificadores - ADS 2000). Para a calibração do porta-ferramentas instrumentado, apresentado na Figura 19, tem sido utilizado um dinamômetro em contato com o mesmo. Durante a calibração a relação entre a força e a tensão é inserida no software do sistema de aquisição. O esquema do dispositivo e a disposição dos extensômetros são apresentados na Figura 20. Na Figura 21 são ilustradas esquematicamente as medições realizadas utilizando este dispositivo.

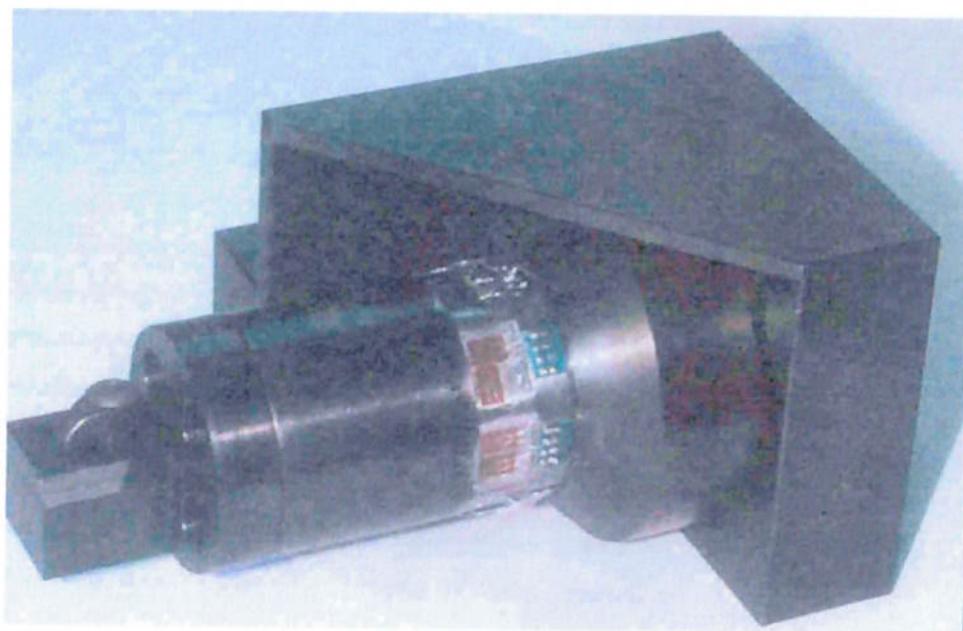


Figura 19: Porta-ferramentas instrumentado

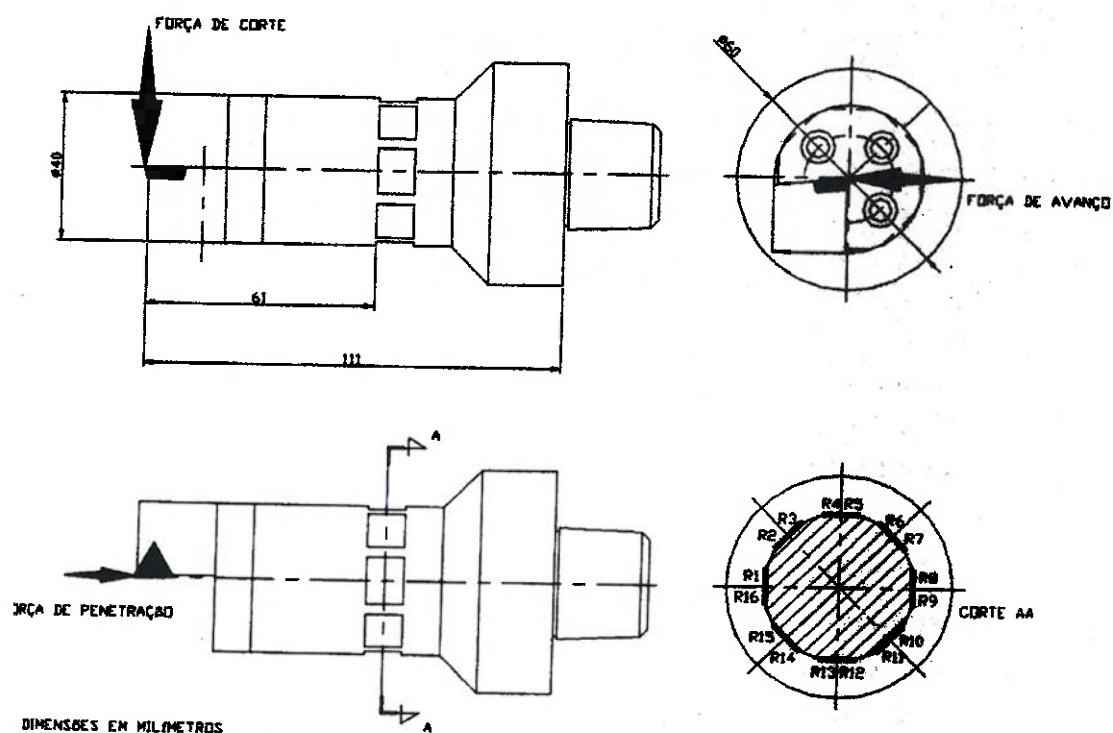


Figura 20: Esquema e disposição dos extensômetros no porta ferramentas instrumentado. R1 à R16 são os extensômetros, (GUIMARÃES, 2000)



(a)

Sistema de Aquisição (Placa, módulos e filtros)



(b)



(c)

Figura 21: Conjunto de equipamentos utilizados nas medidas de força de corte. (a) Dispositivo para medir força de corte (porta-ferramentas instrumentado), sistema de aquisição e microcomputador utilizado nos ensaios de usinagem. (b) Sistema de aquisição ligado a microcomputador no carrinho. (c) Porta-ferramentas instrumentado montado no torno mecânico.

Estimativa da Força Passiva

A Tabela 2 abaixo apresenta o valor da força de usinagem no torneamento, bem como suas componentes, Strafford (1997). P_p é a força passiva, P_c é a força de corte, P_a é a força de avanço e P_r é a força resultante.

Tabela 2: Componentes da força de usinagem

Linha	P_p (N)	P_c (N)	P_a (N)	P_r (N)
1	811	569	358	1056
2	810	557	347	1047
3	809	592	399	1062

Fonte: Strafford (1997).

Observando-se os valores médios:

$$P_p = 810 \pm 1 \text{ N}$$

$$P_c = 573 \pm 18 \text{ N}$$

$$P_a = 368 \pm 27 \text{ N}$$

$$P = 1.055 \pm 8 \text{ N}$$

Verifica-se que:

$$P_p = 141\% P_c \quad (11)$$

$$P_a = 64\% P_c \quad (12)$$

A relação entre P_a e P_c é próxima da relação observada nos testes, o que indica consistência entre os valores obtidos nos ensaios e os valores desta referência.

Sendo assim, uma vez medidas as componentes força de avanço (P_a) e força de corte (P_c), através do porta-ferramentas instrumentado, a força passiva foi estimada pela relação de 141% apresentada acima.

4.4 Registro dos Parâmetros de Usinagem

Conforme item 2, a usinabilidade também depende de variáveis do processo de usinagem, tais como: rigidez da ferramenta, geometria e material da ferramenta, tipo do fluido de corte, tipo da operação de usinagem, avanço utilizado na usinagem, velocidade de corte e penetração.

Mesmo sendo mantidos constantes vários destes parâmetros, uma ficha completa foi elaborada e preenchida a cada peça fabricada. Com esta medida, pretende-se ter um controle por escrito e registrado de todas as operações de usinagem realizadas durante o ano, eliminando a possibilidade de eventuais dúvidas futuras. A ficha empregada está apresentada no Apêndice.

4.5 Medições de Durezas

O processo de medição de dureza Vickers consiste basicamente em cortar o tarugo na secção que se deseja estudar, efetuar o embutimento, preparar a superfície (lixamento e polimento), fazer o ataque químico com ácido ou base (para o caso de análise microscópica) e, finalmente, realizar a medição de dureza propriamente dita no durômetro. Todo o processo de preparação de superfície é muito importante, afinal não é desejável que o corte influencie nas leituras.

Os pontos escolhidos para efetuar medição de dureza nos tarugos de teste estão indicados na Figura 22 da página a seguir:

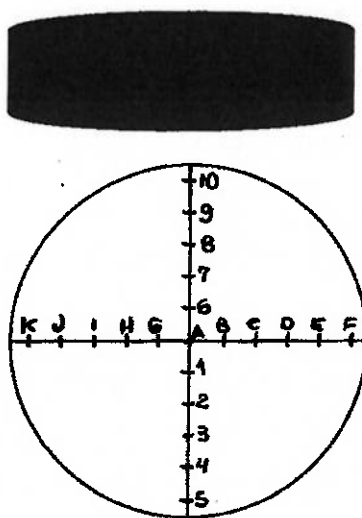


Figura 22: Esquema com os pontos de medida de dureza

4.6 Acabamento superficial – Medições de Rugosidade

Para se obter valores corretos de rugosidade, alguns cuidados devem ser tomados. Abaixo, segue roteiro para adequada leitura:

- Verificar a calibração do rugosímetro, usando um padrão com rugosidade R_a conhecida;
- Limpar superfícies das peças;
- Posicionar agulha do rugosímetro sobre a superfície da peça e alinhar a haste do instrumento com a direção de medição;
- Selecionar o valor do comprimento de amostragem e da amplitude da leitura no rugosímetro, e
- Fazer cerca de cinco medições na superfície de cada peça e ler valor da rugosidade R_a no mostrador do aparelho.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No primeiro ensaio, conforme Tabela 3, a usinagem foi efetuada com rotação de 1120 rpm. Mais abaixo, a Tabela 4 apresenta valores referentes ao ensaio com rotação de 720 rpm.

Para as tabelas a seguir: D_{inicial} é diâmetro inicial, D_{final} é diâmetro final, p é a profundidade de corte, a é o avanço, R_a rugosidade média, R_t rugosidade máxima, P_c é a força de corte, P_a é a força de avanço, e_{cavaco} é a espessura do cavaco, l_{cavaco} é a largura do cavaco e K_s é a pressão específica de corte.

Tabela 3: Ensaio 1, rotação de 1120 rpm

Linha	D_{inicial} (mm)	D_{final} (mm)	Passe	p (mm)	a (mm/volta)	R_a (μm)	R_t (μm)	P_c (N)	P_a (N)	e_{cavaco} (mm)	l_{cavaco} (mm)	K_s (N/mm ²)
1	53,40	51,85	Preliminar	0,775	0,205	0,615	5,84	220	128	0,224	1,18	1385
2	51,85	49,85	1°	1,000	0,205	0,705	4,54	228	133	0,215	1,13	1112
3	49,85	46,50	2°	1,675	0,205	0,930	4,32	443	278	0,258	1,879	1290
4	54,05	49,61	1°	2,220	0,205	4,510	20,19	1098	960	0,496	2,343	2413
5	53,34	49,48	1°	1,930	0,205	4,450	18,19	1166	511	0,483	2,455	2947
6	53,15	48,44	1°	2,355	0,205	5,640	22,10	1246	554	0,485	2,606	2581

Tabela 4: Ensaio 2, rotação de 720 rpm

Linha	D_{inicial} (mm)	D_{final} (mm)	Passe	p (mm)	a (mm/volta)	R_a (μm)	R_t (μm)	P_c (N)	P_a (N)	e_{cavaco} (mm)	l_{cavaco} (mm)	K_s (N/mm ²)
1	54,0	52,8	Preliminar	0,6	0,205	0,765	4,11	167	93	0,246	0,800	1358
2	52,8	50,8	1°	1,0	0,205	5,055	21,55	319	206	0,311	1,365	1556
3	50,8	47,2	2°	1,8	0,205	6,700	30,23	440	289	0,277	1,900	1192

A rotação de 720 rpm se evidenciou como absolutamente inadequada, pois houve forte vibração na máquina, alta geração de ruído, além de notória geração de calor. Ratificando essas afirmações, pode-se ver através da linha n.º 2 da Tabela 3 e da linha

n.º 2 da Tabela 4 que a rugosidade média e a rugosidade total no primeiro passe à rotação de 720 rpm são respectiva e aproximadamente 7 vezes e 5 vezes maiores quando comparados ao ensaio à 1120 rpm.

A Tabela 5 apresenta os resultados dos testes realizados com o material SAE 1045 recozido com 4 horas de aquecimento a 850 °C e resfriamento no forno até temperatura ambiente, em seguida, a Tabela 6 corresponde ao teste realizado com este mesmo material, SAE 1045, porém normalizado com 4 horas de aquecimento no forno a 850 °C e resfriamento ao ar.

Tabela 5: Ensaio 3, aço SAE1045 recozido com 1120 rpm

Linha	p (mm)	a (mm/volta)	Ra (μm)	Rt (μm)	Pc (N)	Pa (N)	Ks (N/mm ²)
1	2,245	0,205	2,77	11,17	1132	605	2460
2	2,175	0,205	3,72	17,31	1100	553	2467
3	2,160	0,205	4,41	18,63	1067	556	2410

O valor de Ks médio obtido foi de (2.446 ± 31) N/mm² e o valor médio obtido de dureza foi 175 HB.

Tabela 6: Ensaio 4, aço SAE1045 normalizado com 1120 rpm

Linha	p (mm)	a (mm/volta)	Ra (μm)	Rt (μm)	Pc (N)	Pa (N)	Ks (N/mm ²)
1	3,596	0,11	4,6	19,3	974	421	2462
2	3,540	0,11	4,57	18,5	988	439	2537
3	4,048	0,10	3,35	12,4	1025	441	2532

O valor de Ks médio obtido foi de (2.510 ± 42) N/mm² e o valor médio obtido de dureza foi 191 HB.

6 SIMULAÇÕES

6.1 Simulação I: Validação das Simulações

Esta simulação foi realizada com o objetivo de comparar valores indicados pelo programa, o Abaqus, com valores calculados utilizando conceitos de resistência dos materiais. A geometria da peça escolhida, bem como o carregamento externo atuante, é relativamente simples para facilitar os cálculos e se ter maior certeza de tal comparação.

6.1.1 Entradas

A geometria da peça está apresentada na Figura 23, a seguir, sendo uma barra de seção transversal 25 mm x 20 mm e comprimento de 200 mm.

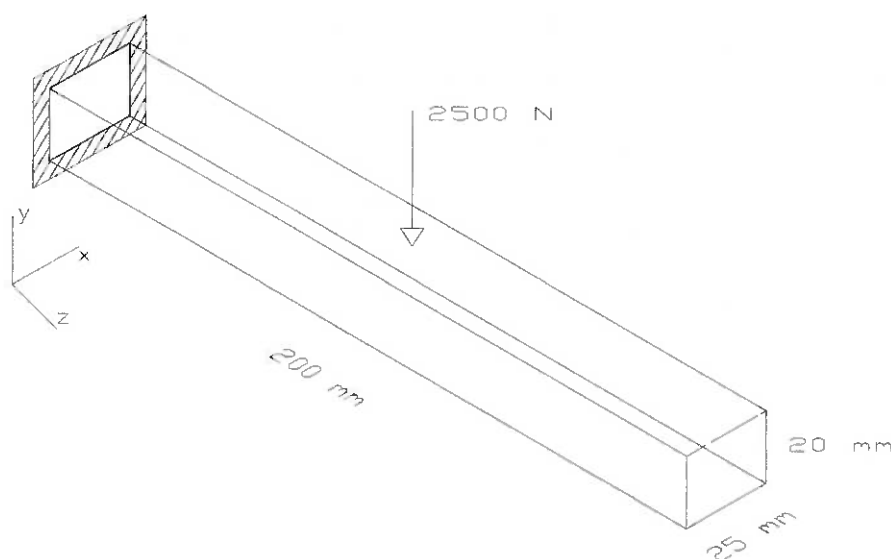


Figura 23: Simulação I – esboço da primeira peça analisada

O material foi definido como um aço genérico com módulo de elasticidade $E = 207.000 \text{ MPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. A malha foi construída pela técnica de geração estruturada, sendo composta de 3.752 elementos do tipo C3D8I, ou seja, utilizando o modo incompatível. A barra tem uma extremidade engastada e uma força

concentrada aplicada no meio da face superior. As figuras correspondentes às telas do software fornecem maiores detalhes a respeito das entradas utilizadas na simulação e estão no item Anexo A- I Simulação Inicial - Entradas.

6.1.2 Saídas

Conforme apresentado na Figura 24, o valor máximo de tensão na face engastada é $1,511 \cdot 10^{+02}$ MPa, correspondente à cor amarela.

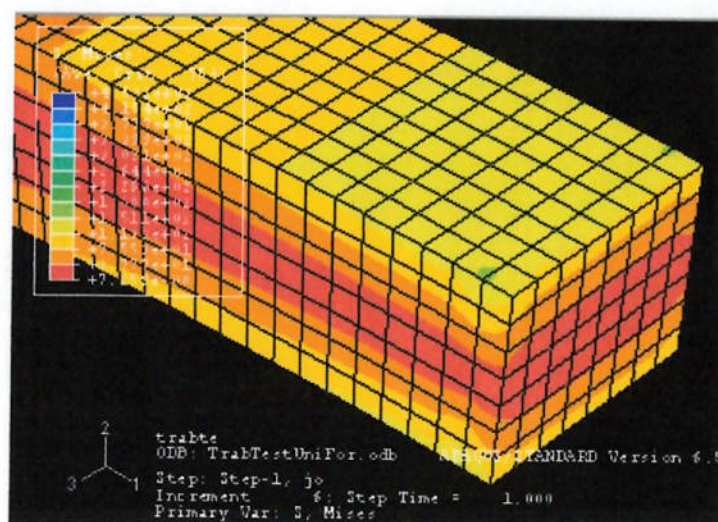


Figura 24: Simulação I – resultados

6.1.3 Cálculo Utilizando Conceitos de Resistência de Materiais

O cálculo desta barra não é complexo. As reações de apoio são facilmente calculadas fazendo o equilíbrio de forças em y e conclui-se que existe uma resultante para cima de modo a equilibrar o carregamento aplicado para baixo. Este carregamento gera um momento de 250 Nm, pois:

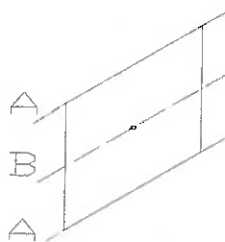


Figura 26: Face de engaste, as linhas imaginárias A estão na face superior e na inferior e a linha B no centro da barra

Observando os diagramas da Figura 25, conclui-se facilmente que a seção crítica é a seção de engaste. Todos os pontos ao longo da linha A estão sujeitos à flexão provocada pelo momento M_x , porém estão livres de tensão devido ao cisalhamento, pois pertencem à borda da seção, onde o momento estático é nulo. A seguir, os cálculos para se analisar quais os pontos críticos da seção.

Forças e momentos:

$$F_x = 0$$

$$F_y = 2500 \text{ N}$$

$$F_z = 0$$

$$M_x = 250 \text{ Nm}$$

$$M_y = 0$$

$$M_z = 0$$

Propriedade da Seção:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,025 \cdot 0,020^3}{12} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4 \quad (14)$$

Onde: I é o momento geométrico de inércia da seção transversal;

b é o comprimento da base do retângulo que representa a seção;

h é a altura da base do retângulo que representa a seção.

$$M_x = F_y \cdot d = 2500 \cdot \frac{0,200}{2} = 250Nm$$

(13)

Onde: M é o momento provocado pela força F ;

F é a força aplicada no centro da face superior da barra;

d é o braço da força, ou seja, distância entre ponto de aplicação da força e face engastada.

Isso resulta nos seguintes diagramas:

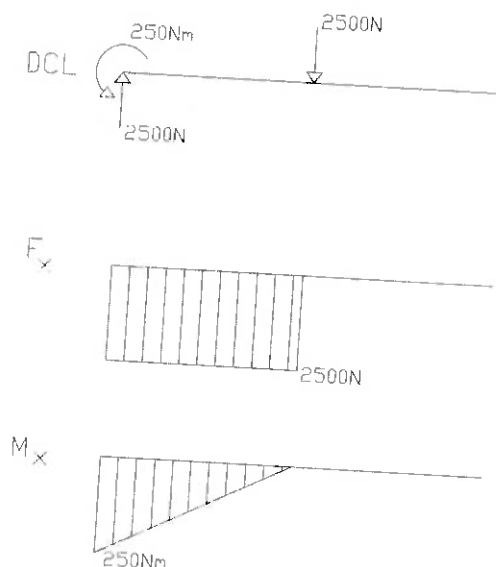


Figura 25: DCL (diagrama de corpo livre) da barra, diagrama de forças e momentos na direção x

Elementos da linha A:

$$\tau = 0$$

$$\sigma_z = \frac{M_x \cdot d}{I} = \frac{250 \cdot 0,010}{\frac{0,025 \cdot 0,020^3}{12}} = 150 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 150 \text{ MPa} \quad (15)$$

Onde: σ_x é a tensão de tração na direção x;

M_x é o momento fletor na direção x;

I é o momento geométrico de inércia da seção transversal;

d é a distância do centro da barra até o elemento onde se deseja saber a tensão.

Elementos da linha B:

Na linha central não há tensão devido à flexão, pois a distância d é nula:

$$\sigma_z = \frac{M_x \cdot d}{I} = 0 \quad (16)$$

$$\tau_1 = \frac{M_t \cdot d}{J} = 0, \text{ pois } M_t = 0 \quad (17)$$

Onde: σ_x é a tensão de tração na direção x;

M_x é o momento fletor na direção x;

I é o momento geométrico de inércia da seção transversal;

τ_1 é a tensão de cisalhamento devida ao momento torsor;

M_t é o momento torsor;

d é distância do centro da barra até o elemento onde se deseja saber a tensão;

J é o momento polar de inércia.

$$\tau_2 = \frac{F_y \cdot M_s}{b \cdot I} = \frac{2500 \cdot (0,025 \cdot 0,010 \cdot 0,005)}{0,025 \cdot \left(\frac{0,025 \cdot 0,020^3}{12} \right)} = 7,5 \text{ MPa} \quad (18)$$

Onde: τ_2 é a tensão de cisalhamento devida à força cortante;
 F_y é a força na direção y;
 M_s é o momento estático;
 b é a largura por onde passa o 'fluxo' das setas de cisalhamento;
 I é o momento de inércia da seção.

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 0 + 7,5 = 7,5 \text{ MPa} \quad (19)$$

Onde: τ é a tensão de cisalhamento total;
 τ_1 é a tensão de cisalhamento devido a momento torsor;
 τ_2 é a tensão de cisalhamento devida à força cortante.

Portanto, os pontos críticos são os situados nas linhas A, submetidos a tensão máxima de 150 MPa.

6.1.4 Comentários

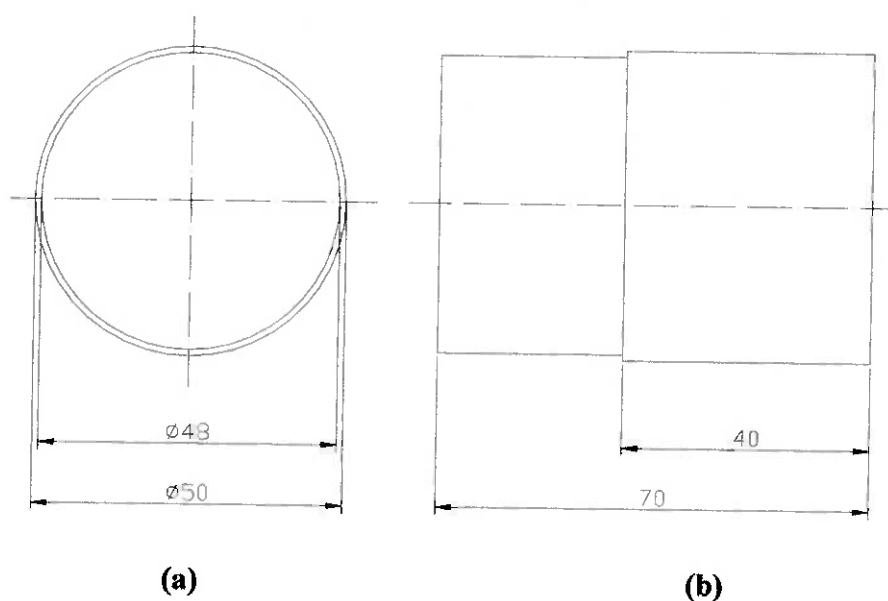
O valor calculado de 150 MPa está bem próximo do valor informado pelo Abaqus, 151,1 MPa. O erro equivale a aproximadamente 0,7%. Note que os máximos aparecem aproximadamente nas regiões comentadas no item anterior.

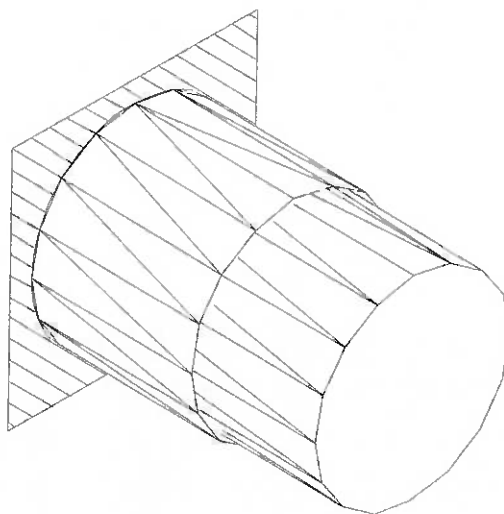
6.2 Simulação II: Material Recozido no Primeiro Passe

Esta simulação foi realizada baseada nos resultados apresentados na Tabela 5 do ensaio com material recozido. Conforme já discutido no item 3.4.5 *Condições de Contorno*, a barra foi modelada como engastada. A força de corte e a força de avanço aplicadas no modelo foram obtidas da Tabela 5 e a força passiva foi estimada pela relação apresentada no item 4.3.

6.2.1 Entradas

A geometria da peça está apresentada na Figura 27, abaixo, sendo uma barra de seção transversal circular ϕ 50 mm ao longo dos 40 mm iniciais e ϕ 48 mm até a extremidade, representando uma operação de usinagem com profundidade de corte de 1 mm, no raio.





(c)

Figura 27: Simulação II – geometria da peça analisada (a) Vista frontal (b) Vista lateral (c) Perspectiva evidenciando o engastamento

Conforme item *Anexo A- II Simulação com Material Recozido – Entradas*, a curva tensão deformação do material foi definida com auxílio da Tabela B II e da Figura B I. A princípio, não seria possível utilizar elementos hexagonais nesta peça, porém, após particioná-la, utilizando a técnica de varredura foi possível utilizar tais elementos, sendo 20.770 elementos do tipo C3D8I. A barra tem uma extremidade engastada não permitindo translação e nem rotação em nenhum dos três eixos, e sofre ação da força de usinagem, cujo valor foi extraído da Tabela 5. As figuras correspondentes às telas do software fornecem maiores detalhes a respeito das entradas utilizadas na simulação e estão no item *A-II Simulação com material recozido – Entradas em Anexos*.

6.2.2 Saídas

A Figura 28 exhibe o local exato de aplicação da força e a Figura 29 apresenta a distribuição de tensões nas proximidades da força.

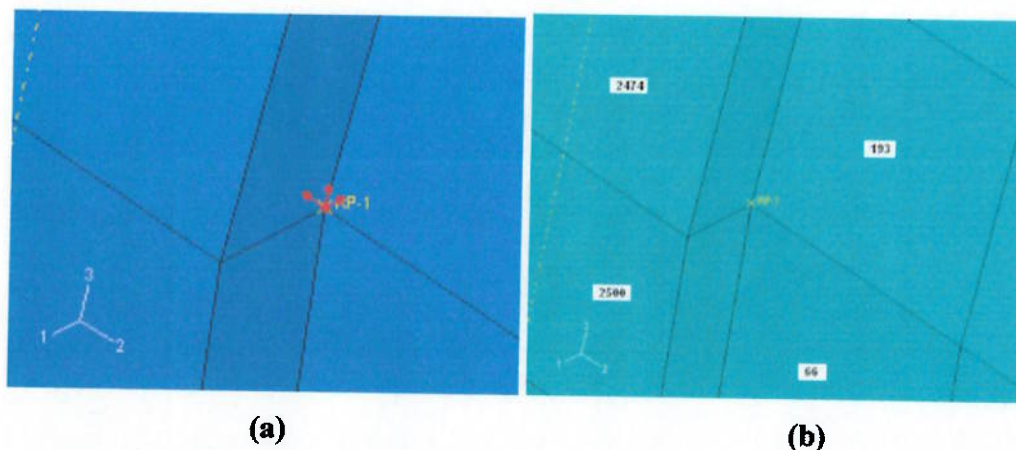


Figura 28: Simulação II – posicionamento da força de usinagem. (a) força aplicada no ponto de referência 1 (RP-1) e (b) ponto de referência entre os elementos 2500, 2474, 193 e 66

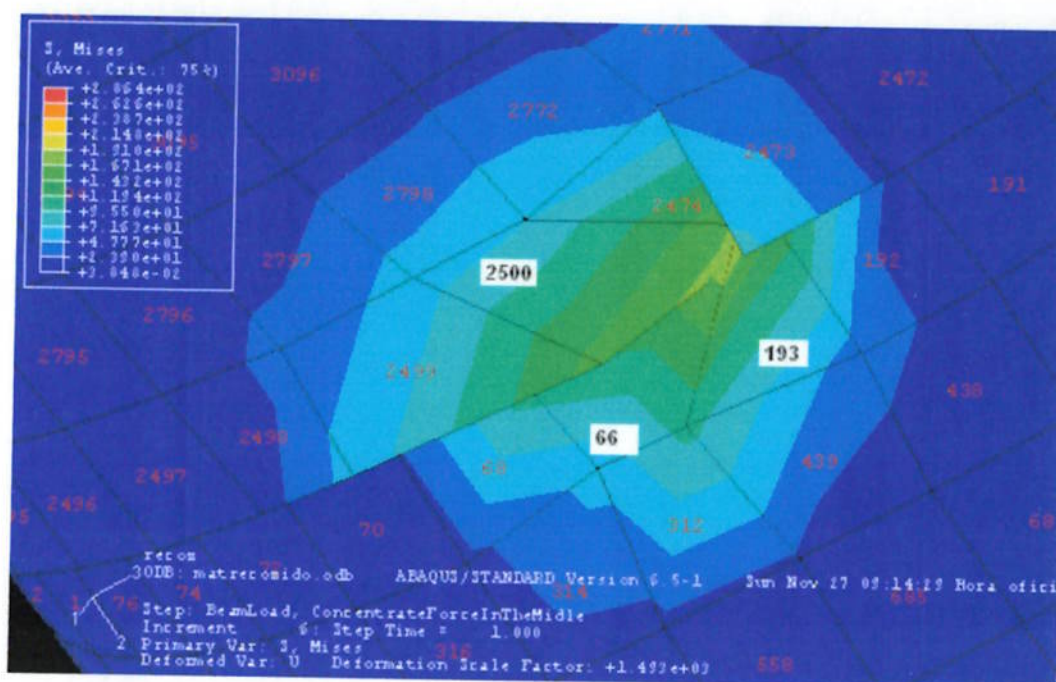


Figura 29: Simulação II – resultado na região de aplicação da força, identificação dos nós

Enquanto a Figura 29, da página anterior, mostra que a maior tensão presente na peça vale 286,4 MPa, a Figura 30, a seguir, mostra que a maior tensão na superfície é de 191,0 MPa.

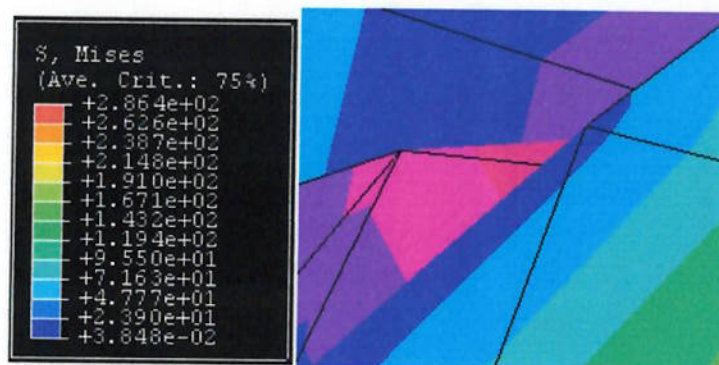


Figura 30: Simulação II – resultado na região de aplicação da força com tensão máxima de 191,0 MPa na superfície

6.2.3 Comentários

Esta simulação evidenciou que a maior tensão observada na peça é de 286,4 MPa, sendo que na superfície a maior tensão vale 191,0 MPa.

6.3 Simulação III: Material Normalizado no Primeiro Passe

Esta simulação foi realizada baseada nos resultados apresentados na Tabela 6 do ensaio com material recozido. Esta simulação é similar à anterior, são utilizados o mesmo tipo e tamanho de elemento, técnica de geração de malha, geometria da peça, configurações do procedimento de cálculo e condições de contorno. As principais diferenças são: a curva tensão deformação do material e o carregamento, pois a força de usinagem aplicada foi baseada na Tabela 6.

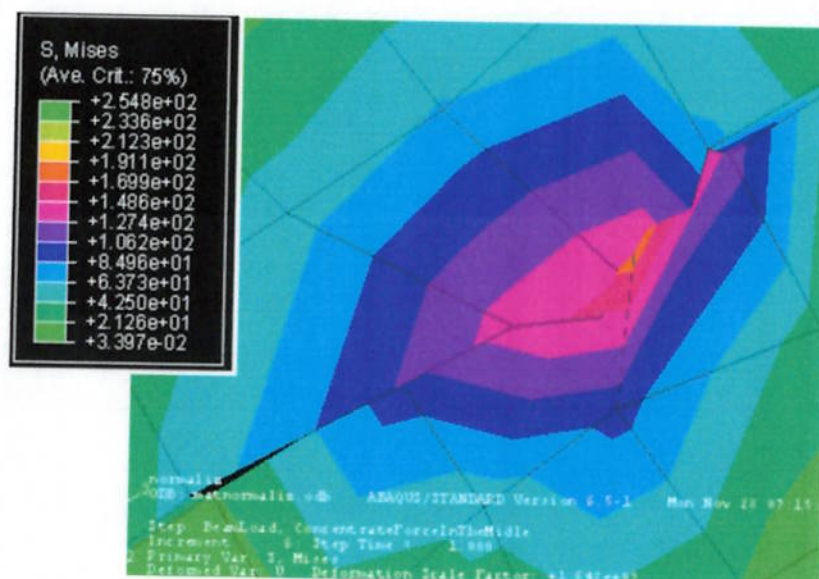


Figura 32: Simulação III – resultado na região de aplicação da força com tensão máxima de 191,1 MPa na superfície

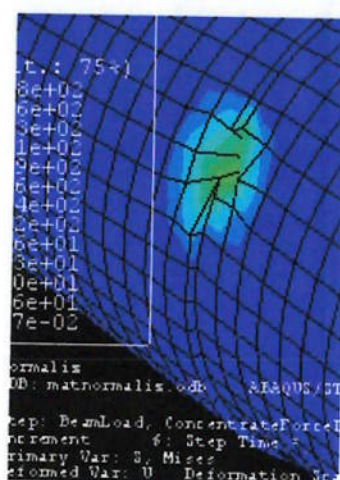


Figura 33: Simulação III – resultado – visão geral

6.3.3 Comentários

Esta simulação mostrou que o máximo também não ocorre na superfície. O maior valor de tensão calculado é de 254,8 MPa.

6.4 Simulação IV: Material Recozido no Segundo Passe

Neste item, será apresentada uma peça recebendo o segundo passe de torneamento. O material da peça é um SAE 1045 recozido, porém com uma camada externa de propriedades iguais ao do SAE 1045 normalizado, simulando o encruamento sofrido no primeiro passe.

6.4.1 Entradas

Conforme exposto no item 2.3.1, sabe-se que o material se torna menos dúctil e mais resistente quando é submetido a uma deformação plástica, portanto, as propriedades do material usinado durante o segundo passe são diferentes das do primeiro passe. A Figura 10 e a Figura 11 apresentam o aumento do limite de escoamento e do limite de resistência, respectivamente, em função do encruamento. Foram assumidas duas hipóteses nesta simulação:

- O material encruado possui a curva tensão deformação igual a do material normalizado;
- A força de usinagem, que teria um valor intermediário entre a força observada no ensaio com material recozido e a observada no ensaio com SAE 1045 normalizado, será assumida como uma média dessas duas, conforme Tabela 7 abaixo:

Tabela 7: Simulação IV – Força de usinagem

Material da peça usinada	P _C (N)	P _A (N)	P _P (N)
Recozido	1.100	571	1.551
Normalizado	996	434	1.404
Recozido encruado	1.048	503	1.478

Para maiores detalhes deste modelo, vide Anexo A- IV.

6.4.2 Saídas

A força de usinagem foi aplicada no nó cujos vizinhos são os elementos 7, 28, 928 e 793, conforme Figura 34, abaixo.

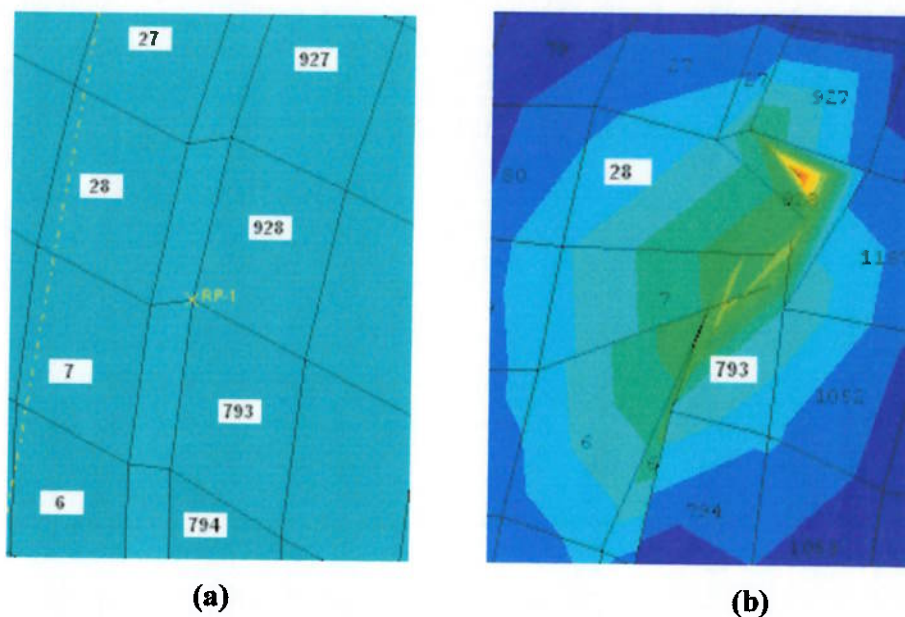


Figura 34: Simulação IV – Posicionamento da força de usinagem. (a) força aplicada no ponto de referência 1 (RP-1) e (b) ponto de referência entre os elementos 7, 28, 928 e 793



Figura 35: Simulação IV – resultado na região de aplicação da força com tensão máxima de 166,2 MPa na superfície

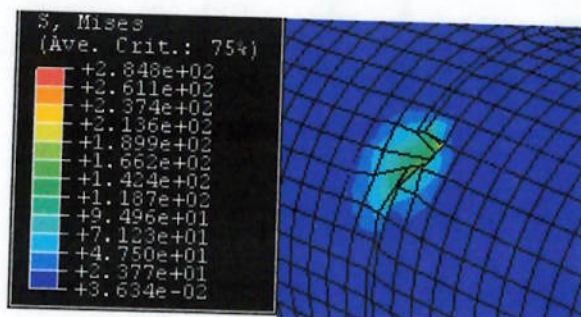


Figura 36: Simulação IV – resultado – visão geral

6.4.3 Comentários

A tensão máxima observada nesta simulação foi de 284,8 MPa, conforme Figura 36, acima. Este valor é superior ao máximo calculado na simulação anterior.

Foi realizada esta simulação com força de valor equivalente à força da simulação II (usinagem com material recozido no primeiro passe), obtendo-se o valor máximo de 301,3 MPa.

Por último, realizou-se a simulação deste modelo com força de valor equivalente à força da simulação III (usinagem com material normalizado no primeiro passe), obtendo-se o valor máximo de 268,3 MPa.

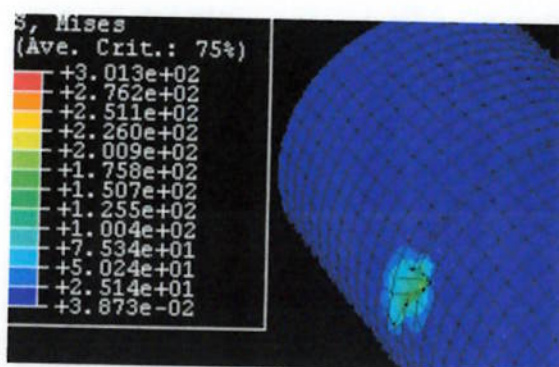


Figura 37: Simulação IV - material encruado com força equivalente a força observada na peça de material recozido

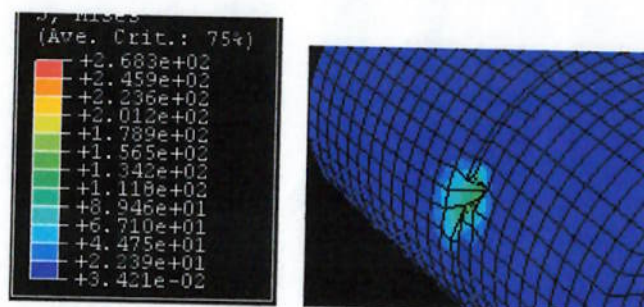


Figura 38: Simulação IV - material encruado com força equivalente a força observada na peça de material normalizado

6.5 Influência da Força Passiva nos Resultados

Conforme apresentado no item 4.3 *Avaliação da Força de Usinagem Durante o Torneamento*, a força passiva foi estimada como sendo 141% da força de corte, (STRAFFORD, 1997). Algumas simulações foram realizadas com uma relação diferente da observada por Strafford (1997) para analisar-se a influência desta informação na conclusão desta análise. Arbitrariamente, tomou-se a seguinte proporção:

$$P_p = (30\%) \cdot P_c \quad (20)$$

Os resultados estão apresentados nas figuras abaixo:

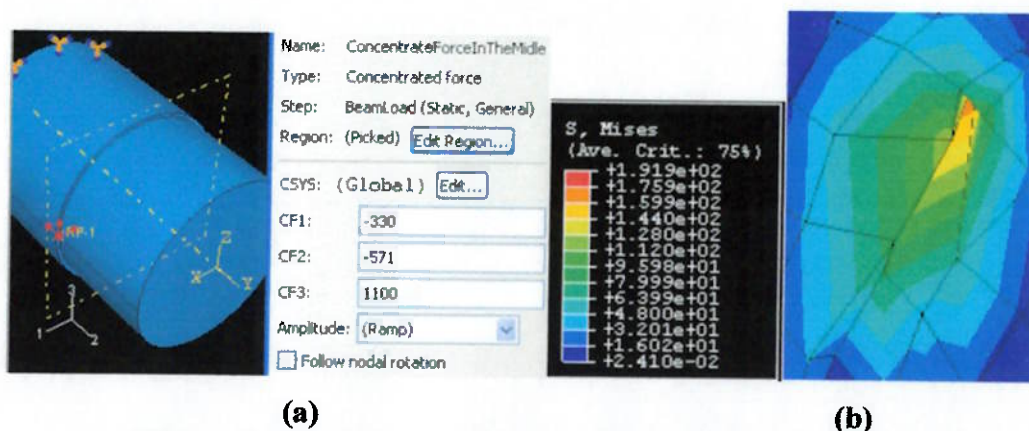


Figura 39: Material recozido no primeiro passe. (a) Força aplicada (b) Resultado



Figura 40: Material normalizado no primeiro passe. (a) Força aplicada (b) Resultado

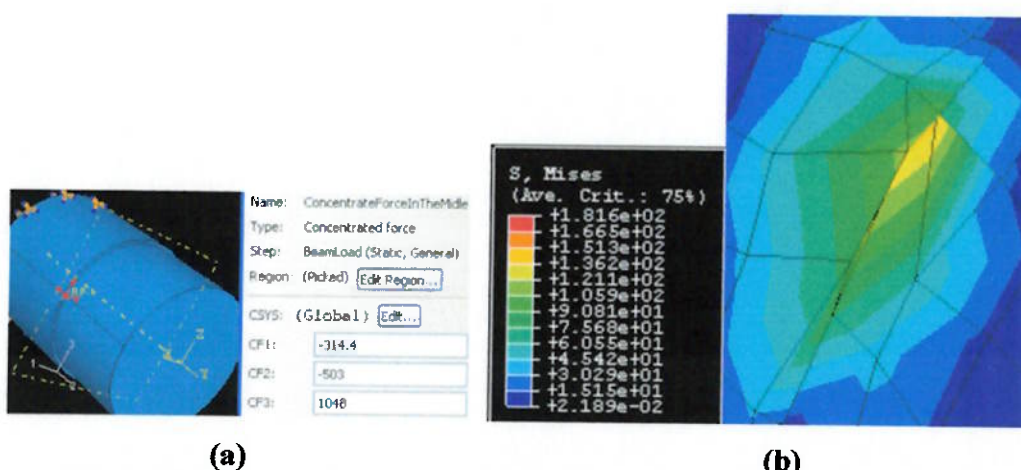


Figura 41: Material recozido no segundo passe. (a) Força aplicada (b) Resultado

Observa-se na Figura 39, Figura 40 e Figura 41 que os resultados são similares aos anteriormente apresentados com a relação entre força passiva e força de corte de Strafford (1997). Houve uma redução do máximo observado com o material recozido no primeiro passe de 67%, com material normalizado no primeiro passe a redução foi de 66% e para o material recozido no segundo passe observou-se um máximo 64% menor, utilizando esta última relação de força passiva. Há uma proporção entre os máximos, pois, em média, os máximos são 66% menores.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho conduziu às seguintes conclusões:

A primeira simulação de validação foi realizada com sucesso, uma vez que o valor encontrado (151,1 MPa) coincidiu com o calculado, 150 MPa. Este resultado fornece maior segurança nos resultados das simulações seguintes.

A rotação de 720 rpm mostrou-se completamente inadequada, afinal os valores de rugosidade média e total são cinco vezes os valores nos mesmos parâmetros à rotação de 1120 rpm e estão fora da faixa esperada para esta operação.

Ao simular o torneamento de uma barra em aço carbono 1045 recozido registraram-se valores (286,4 MPa) maiores de tensão, 12% superiores em relação à simulação com aço normalizado (254,8 MPa), ratificando a influência do tratamento térmico, intrinsecamente ligas à microestrutura, na usinagem dos metais.

A simulação IV mostrou que o encruamento, ou trabalho a frio, após deformação plástica preliminar em uma etapa de usinagem anterior causa um aumento de 5% no valor de máxima tensão, 301,3 MPa contra 286,4 MPa no caso da barra recozida.

Arbitrou-se um valor para a relação entre a força passiva e a força de corte diferente da relação observada por Strafford (1997). Quanto menor é a força passiva, menor é a tensão observada na peça. Porém, esta relação não altera as observações feitas quanto à comparação entre material recozido, normalizado e encruado, pois a proporção entre os máximos valores de tensão foi aproximadamente mantida.

Conforme esperado, o valor máximo de tensão não foi encontrado da superfície do material. Embora não seja possível com ajuda do programa Abaqus saber exatamente onde está este máximo, sabe-se que não está distante da superfície.

Como sugestão de melhoria, a operação de torneamento poderia ser simulada de forma dinâmica e não apenas estática, o que muito provavelmente exigiria um outro software mais específico. Além disso, a simulação IV poderia ser repetida com diversas camadas diferentes de material, por exemplo, ao invés de se fazer uma casca de 1 mm, poderiam ser feitas 5 cascas de 0,2 mm, variando progressivamente as propriedades em

cada camada. Isso não foi realizado porque os elementos precisam ser menores do os utilizados, o que torna a malha complexa e o cálculo extremamente lento.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- ABAQUS, INC. Abaqus / CAE User's Manual. Volume I: Abaqus Version 6.5. USA, 2004.
- ABAQUS, INC. Abaqus / Standard User's Manual. Volume II: Abaqus Version 6.5. USA, 2004.
- ABAQUS, INC. Analysis User's Manual. Volume II: Analysis in the Abaqus Version 6.5. USA, 2004.
- ASME. Manual on Cutting of Metals. USA, The American Society of Mechanical Engineers, 1952.
- ASTAKHOV, V. P. A treatise on material characterization in the metal cutting process. Part 1: A novel approach and experimental verification. Journal of Materials Processing Technology. V. 96. pp. 22-33, 1999.
- AXINTE, D.A.; BELLUCO, H.; DE CHIFFRE, L. Evaluation of cutting force uncertain components in turning. International Journal of Machine Tools & Manufacturing. Vol. 41, pp. 719-730, 2001.
- CALLISTER JR., W. D. Ciência e engenharia de materiais - uma introdução. 5. ed. São Paulo: LTC, 2002. 589p.
- DIMLA E. DINLA Sr.; LISTER, P.M. On-line metal cutting tool condition monitoring. I: Force and vibration analysis. International Journal of Machine Tools & Manufacturing. Vol. 40, pp. 739-768, 2000.
- DIMLA E. DINLA Sr., Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. International Journal of Machine Tools & Manufacturing. Vol. 40, pp. 1073-1098, 2000.
- FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1977.
- GUIMARÃES, A.R. Sistema para a medição das componentes da força de usinagem em operações de torneamento. Trabalho de Formatura. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

- HAMID, A. A.; ALI, Y. Experimental determination of dynamic forces during transient orthogonal turning. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 55, pp. 162-170, 1995.
- HUTCHINGS, F.R. and UNTERWEISER, PAUL M.. Failure analysis : the British Engine technical reports. Metals Park, Ohio : American Society for Metals, 1981.
- JUVINALL, R. C., MARSHEK, K. M.. Fundamentals of Machine Component Design. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, INC, 2000.
- KATAYAMA, S.; HASHIMURA, M. Effect of carbon phosphorus and nitrogen contents in steel on machined surface cutting. *ISIJ International*. V. 30. pp. 457-563, 1990.
- KOMANDURI, R.; BROWN. On the mechanics of chip segmentation in machining. *Journal of Engineering for Industry*. V. 103.pp.33-51, 1981.
- KOMANDURI, R. Hou, Z.B. Thermal modeling of the metal cutting process. Part II: Temperature raise distribution due to frictional heat source at the tool-chip interface. *International Journal of Mechanical Sciences*. V.43. pp. 57-88, 2001.
- KOVAC, P., SIDJANIN, L. Investigation of chip formation during milling. *International Journal of Production Economics*. Vol. 51, pp. 149-153, 1997.
- KRAUSS, G.; Steels: heat treatment and processing principles. ASM International, Ohio, USA, 1989.
- MACARI, Flávio Namura. Efeito dos Parâmetros de Usinagem na Força de Corte e no Acabamento Superficial de Três Aços Inoxidáveis Austeníticos. XIII SIICUSP - Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo, ficha1524, 2005.
- MACHADO, I. F.; MARCICANO, J. P.; DRIEMEIER. L.; DIAS, C. A. N. An investigation of the effect of machining parameters on the strain induced martensite formation during turning in an austenitic stainless steel In: 17 th International Congress of Mechanical Engineering, 2003, São Paulo. 17 th International Congress of Mechanical Engineering: COBEM 2003 - São Paulo, 2003.

- MACHADO, I. F.; MARCICANO, J. P. P.; SOUZA, L.; HASSUI, A. Relação existente entre a microestrutura de alguns aços inoxidáveis austeníticos, formação de cavaco, força de corte e o acabamento superficial no processo de torneamento In: 3o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2005, Joinville. 3o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação: COBEF 2005 – Joinville, 2005.
- MAUTI, R.; CHANG, N.S. Machinability of resulphurized medium-carbon steels with and without microalloying elements. In: Factors influencing machining and their controls. Cincinnati, USA, 12-14 sept. 1989. pp. 91-96.
- Metals Handbook - Machining. USA. ASM, vol 16, 1989.
- MEYERS, M.; CHAWLA, Mechanical behavior of materials. USA. Prentice Hall. 2000.
- PEREIRA, J. E. A., NETO, I. de M., PINTO, R. A., MATSUMOTO, H. e PEREIRA, J. A.. Influência do Desgaste da Ferramenta na Rugosidade da peça e nos Sinais de Vibração no Processo de Torneamento. XI CREEM UERJ e IPRJ, Nova Friburgo: Paper CRE04 – PF05, 2004.
- SAI, W. B.; SALH, N. B.; LEBRUN, J. L., Influence of machining by finishing milling on surface characteristics. International Journal of Machine Tools & Manufacturing. Vol. 41, pp. 443-450, 2001.
- SCANDIFFIO, I. Uma contribuição ao estudo do corte a seco e ao corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas. São Paulo. 2000.
- SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. Great Britain. Clarendon Press. 1984.
- STAKER, M. R. On adiabatic shear band determinations by surface observations. Scripta Metallurgica. V. 14. pp. 677-680, 1980.
- STRAFFORD, K. N. Indirect monitoring of machinability in carbon steels by measurement of cutting forces. Journal of Materials Processing Technology. V. 67. pp. 150-156, 1997.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- ABOUELATTA, O. B.; MÁLD, J, Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 118, pp. 269-277, 2001.
- AKASAWA, T.; FUKUDA, I.; NAKAMURA, K.; TANAKA, T. Effect of microstructure and hardness on the machinability of medium-carbon chromomolybdenum steel. *Journal of Materials Processing Technology*. V. 153-154. pp. 48-53, 2004.
- Catálogo de Dinamômetros Piezoelétricos – Kistler AG.
- CHAPRA, C. S., CANALE, R. P. *Numerical Methods for Engineers*. 5. ed. New York: Mc Graw Hill, 2005.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. São Paulo. Editora Artliber. 2ª edição. 2000.
- GUIMARÃES, A.R. Sistema para a medição das componentes da força de usinagem em operações de torneamento. Trabalho de Formatura. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000.
- KOMANDURI, R.; CHANDRASEKARAM, N. RAFF, L.M., Molecular dynamics (MD) simulation of uniaxial tension of some single-crystal cubic metals at nanolevels. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 43, pp. 2237-2260, 2001.
- KOMANDURI, R. HOU, Z.B. Thermal modeling of the metal cutting process. Part III: Temperature rise distribution due to combined effects of shear plane heat source and the tool-chip interface frictional heat source. *International Journal of Mechanical Sciences*. V.43. pp. 89-107, 2001.
- LEMAIRE, J. C.; BACKOFEN, W.A. Adiabatic instability in the orthogonal cutting of steel. *Metallurgical Transactions*. V. 3. pp.477-481, 1972.
- LIN, W. S.; LEE, B. Y.; WU, C. L. Modeling the surface roughness and cutting force for turning. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 108, pp. 286-293, 2001.

- M'SAOUBI, R.; OUTEIRO, J. C.; CHANGEUX, B.; LEBRUN, J. L.; MOURAO DIAS, A., Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steel. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 96, pp. 225-233, 1999.
- MACHADO, I. F.; MARCICANO, J. P. P.; DRIEMEIER, L.; DIAS, C. A. N. An Investigation of the effect of machining parameters on strain-induced martensite formation during turning in an austenitic stainless steel. In: *INTERNACIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING*, 17., São Paulo, 2003. São Paulo: ABCM, 2003. 1 CD-ROM.
- MACHADO, I. F.; MARCICANO, J. P. P.; SOUZA, L.; HASSUI, A. Relação existente entre a microestrutura de alguns aços inoxidáveis austeníticos, formação de cavaco, força de corte e o acabamento superficial no processo de torneamento. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF*, 2., Uberlândia, 2003. Uberlândia: ABCM, 2003. 1 CD-ROM.
- *Metals Handbook - Machining*. USA. ASM, vol 16, 1989.
- PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. Aços inoxidáveis austeníticos microestrutura e propriedades. São Paulo, Hemus, 1994.
- PECKENER, D.; BERNSTEIN, I.M. *Handbook of Stainless Steels*. USA. McGraw Hill, 1977. Cap. 24.
- SATO, F.L. Estudo da usinabilidade de aços para construção mecânica através de esclerometria pendular. Trabalho de formatura. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.
- SEMIATIN, S. L.; RAO, S. B. Shear Localization during metal cutting. *Materials Science and Engineering*. V. 61. pp.185-192, 1983.
- STAKER, M. R. The relation between adiabatic shear instability strain and material properties. *Acta Metallurgica*. V. 29. pp.683-689, 1981.
- Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, URI. Santo Ângelo. Disponível em <<http://www.urisan.tche.br/~ajsouza/usinagem.htm>>. Acesso em 07 de maio de 2005.

ANEXOS

Anexo A – Entradas das Simulações

A seguir, são apresentadas diversas figuras correspondentes às telas do software que resumem as entradas utilizadas nas simulações.

Anexo A- I Simulação Inicial - Entradas

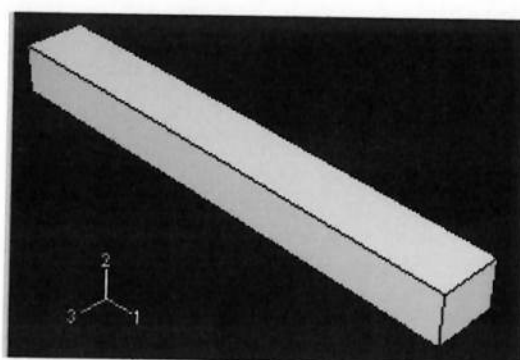


Figura 42: Simulação I – formato da peça

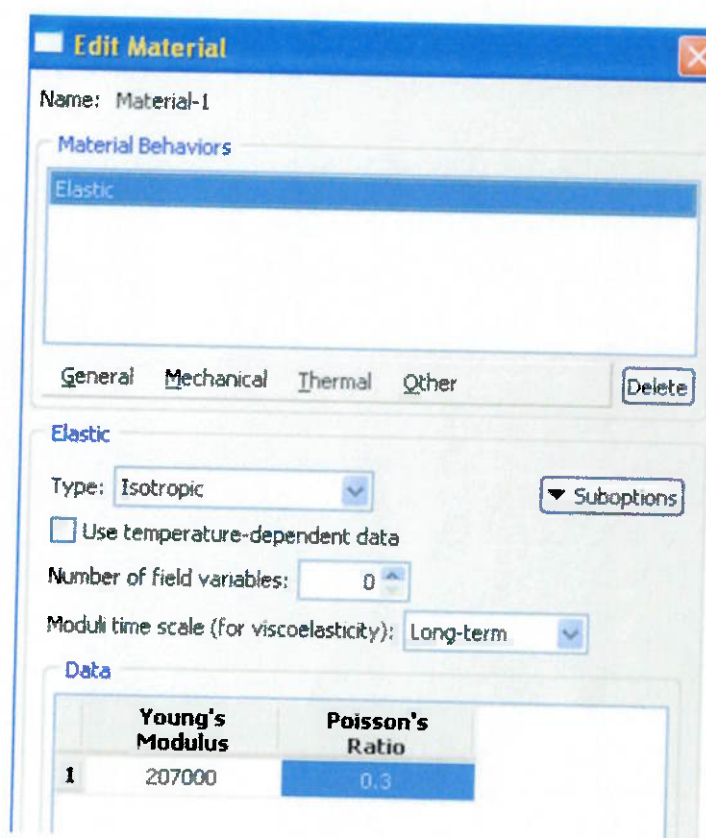


Figura 43: Simulação I – material da peça

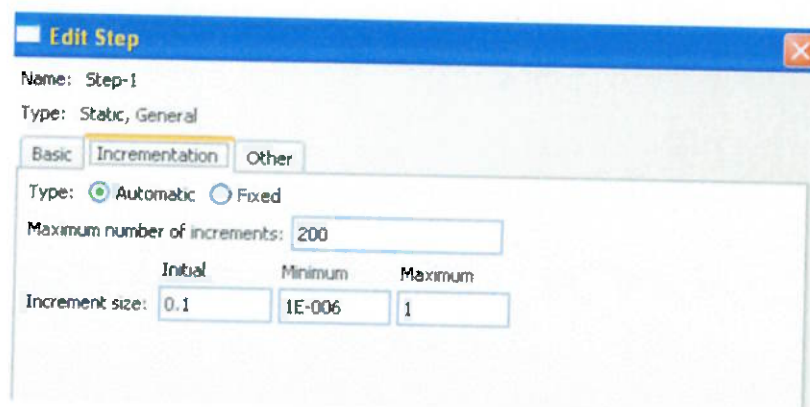


Figura 44: Simulação I – configuração do procedimento de cálculo

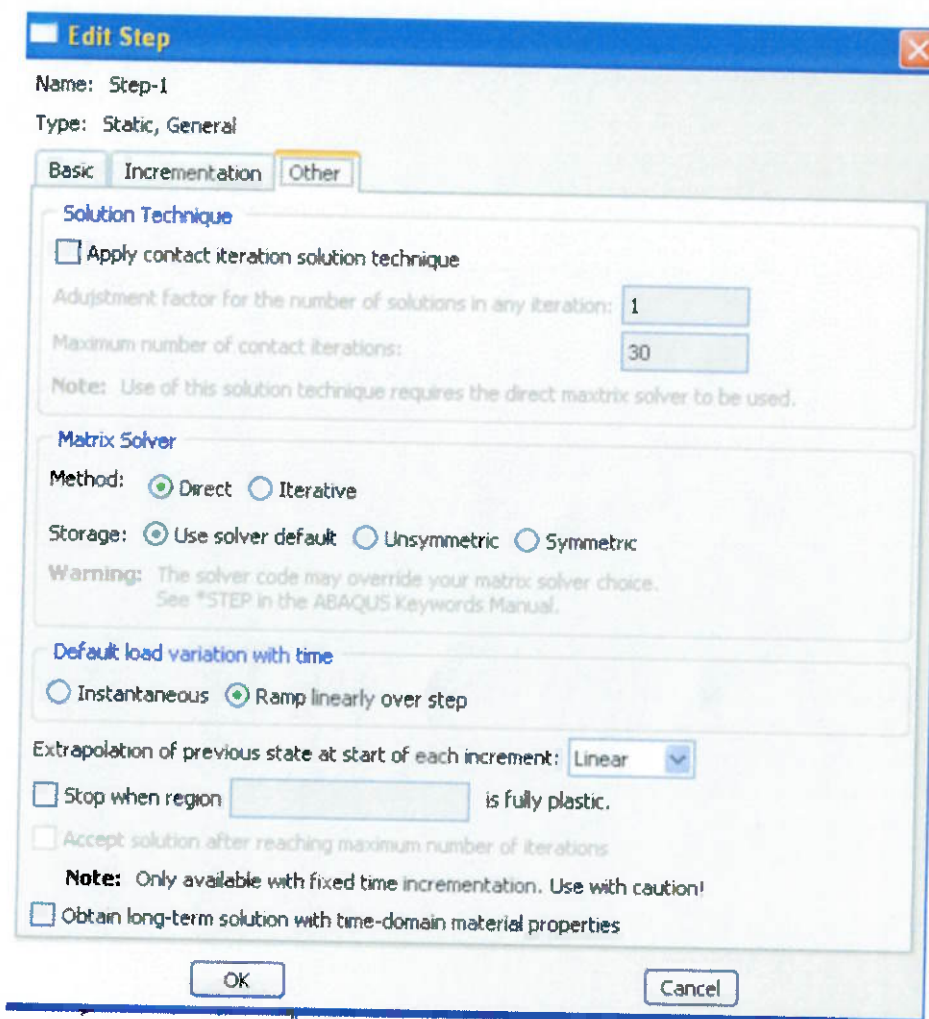


Figura 45: Simulação I – configuração do procedimento de cálculo, método e variação de parâmetros

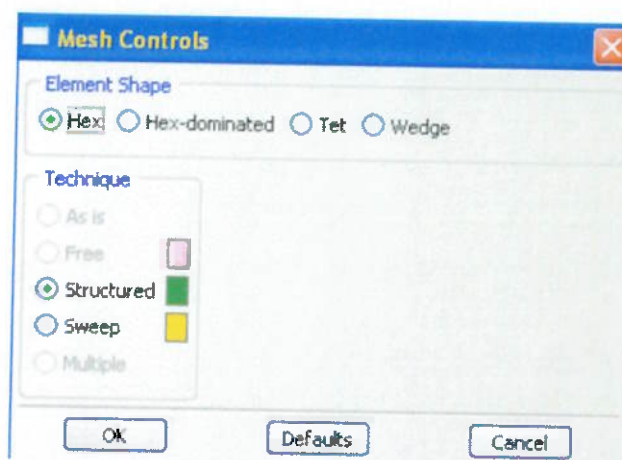


Figura 46: Simulação I – formato dos elementos e geração da malha

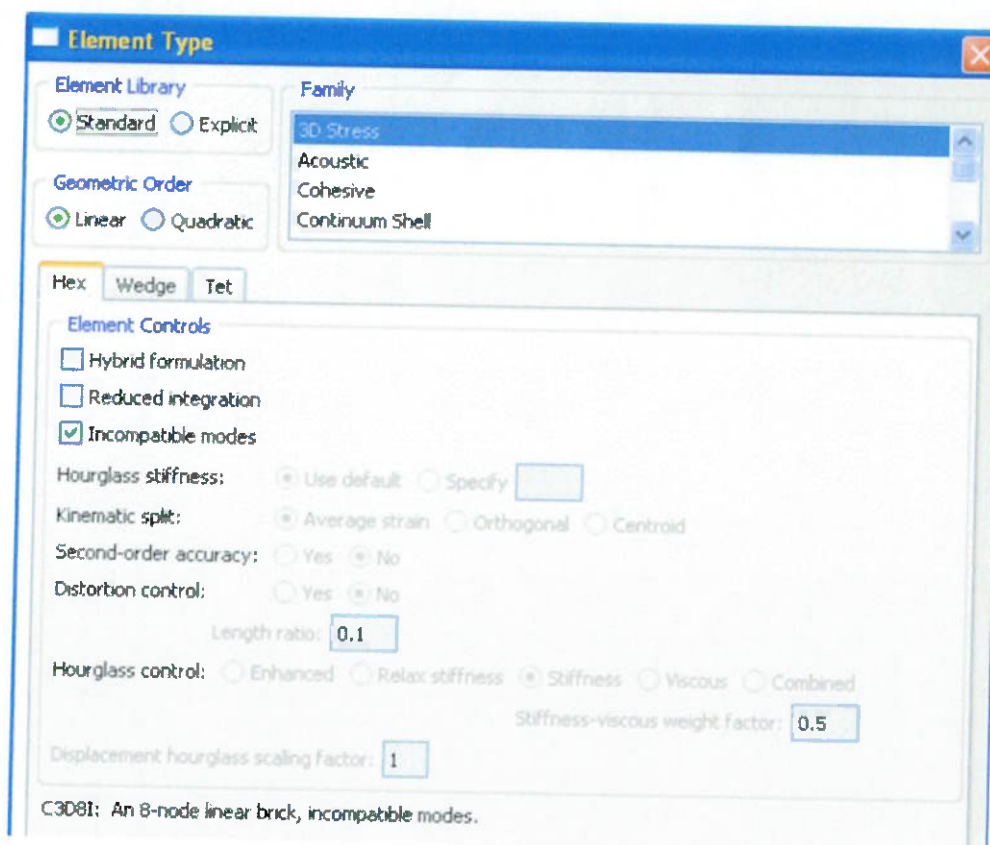


Figura 47: Simulação I – configuração dos elementos

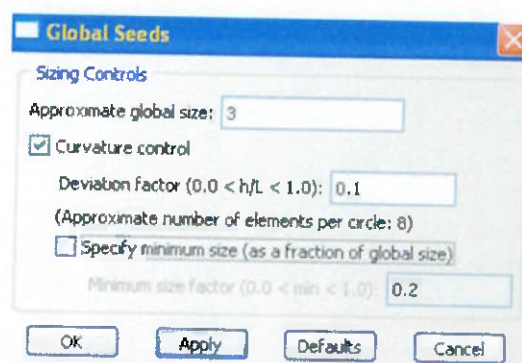


Figura 48: Simulação I – tamanho dos elementos

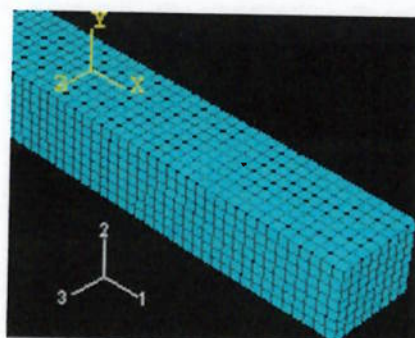


Figura 49: Simulação I – visualização da malha de elementos

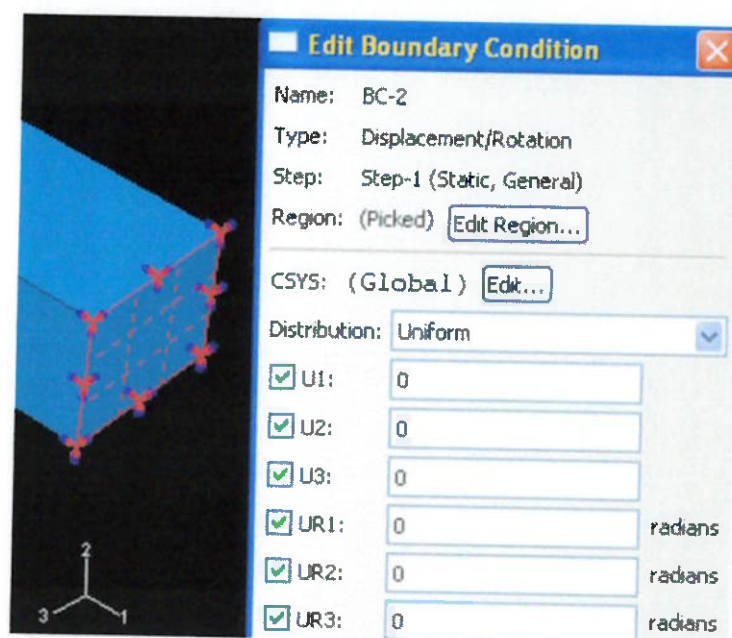


Figura 50: Simulação I – condições de contorno

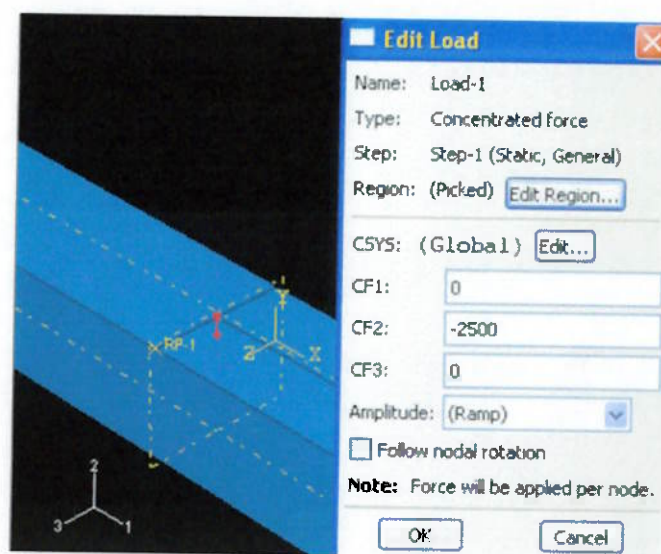


Figura 51: Simulação I – carregamento externo

Anexo A- II Simulação com Material Recozido – Entradas

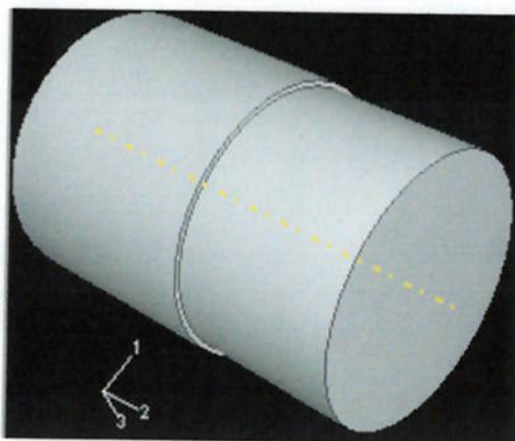


Figura 52: Simulação II – formato da peça

Utilizando os valores apresentados na Tabela B II para o aço SAE 1040 e SAE 1050, estimaram-se valores médios para o SAE 1045 do limite de resistência, tensão de escoamento e alongamento. Utilizando-se as proporções da curva típica do SAE 1045 apresentado na Figura B I, foram estimados os valores da tensão de ruptura e do alongamento correspondente ao ponto de limite de resistência, em seguida, foi traçada a curva tensão deformação média do aço 1045 recozido conforme Figura 53:

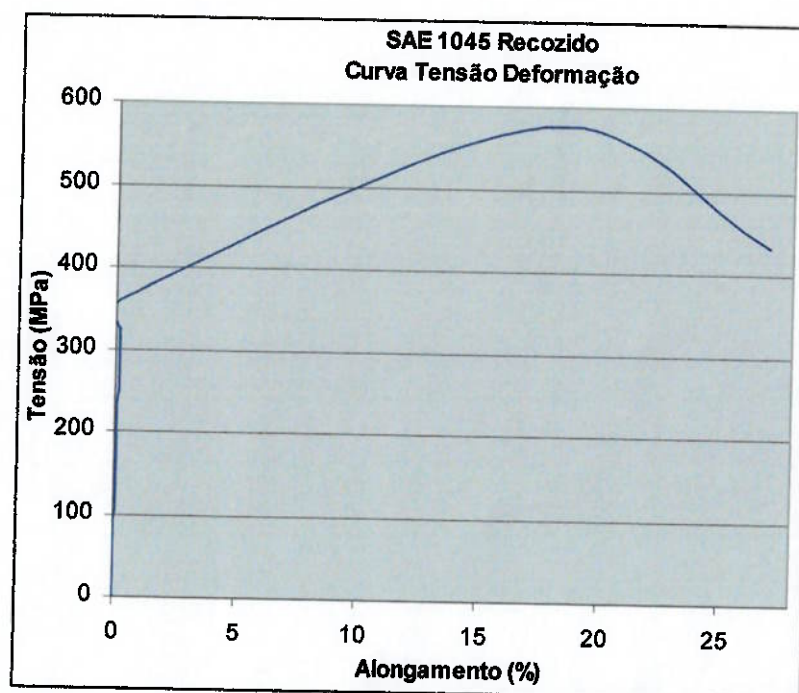


Figura 53: Simulação II – curva tensão deformação do SAE 1045 recozido

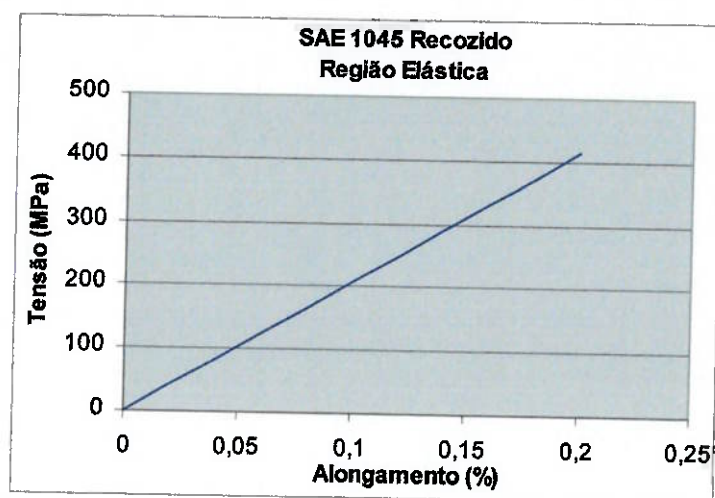


Figura 54: Simulação II – curva tensão deformação do SAE 1045 recozido, região elástica, com módulo de elasticidade $E=207\text{GPa}$, Juvinal 2000

As figuras a seguir apresentam as telas que definem o material no programa. Na Figura 56 estão presentes alguns pontos da curva da Figura 53.

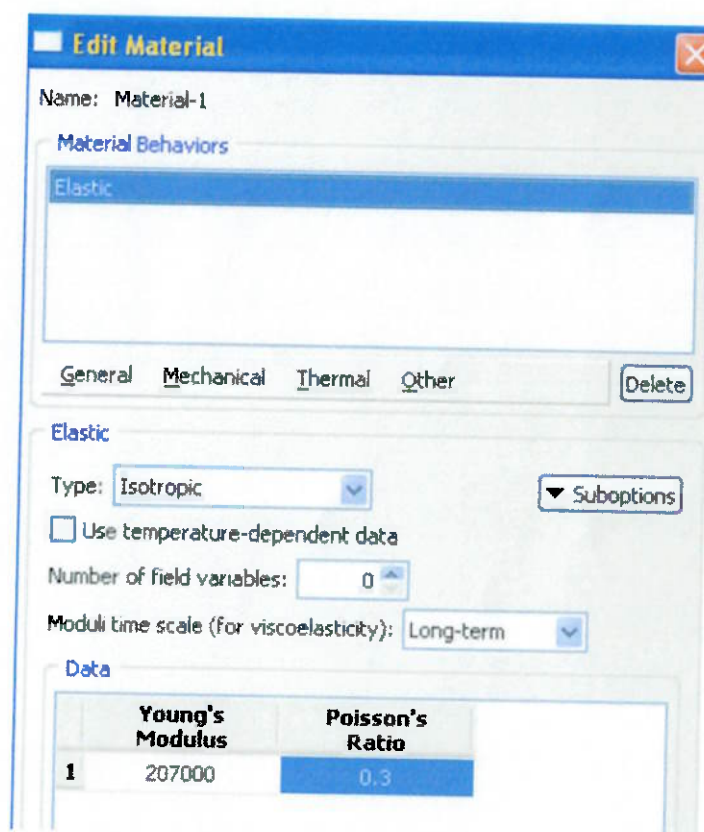


Figura 55: Simulação II – material da peça – configuração da região linear

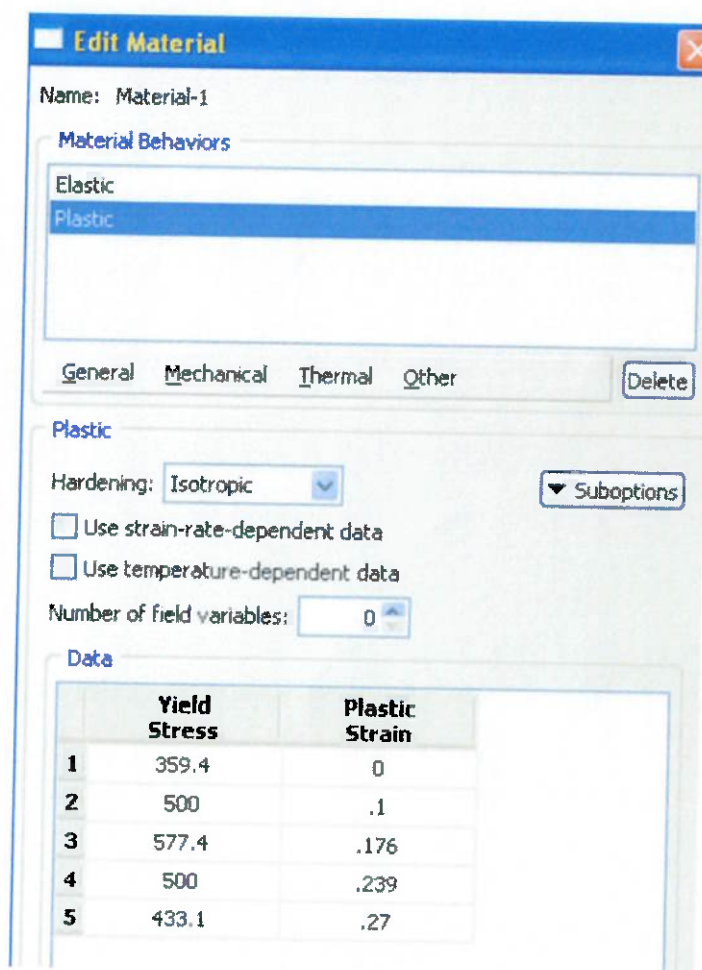


Figura 56: Simulação II – material da peça – configuração da região não linear

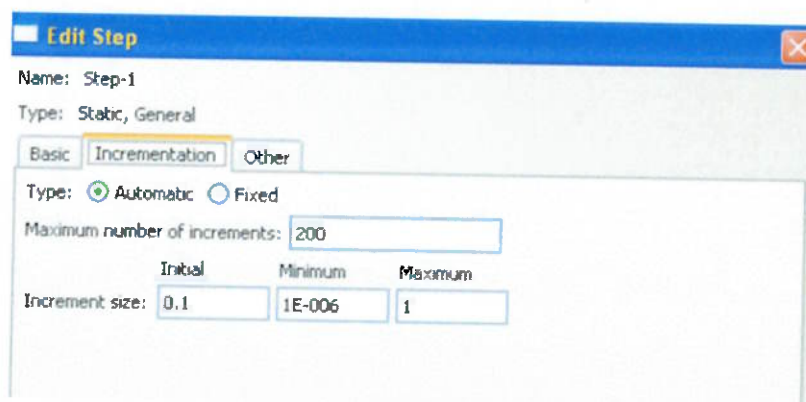


Figura 57: Simulação II – configuração do procedimento de cálculo

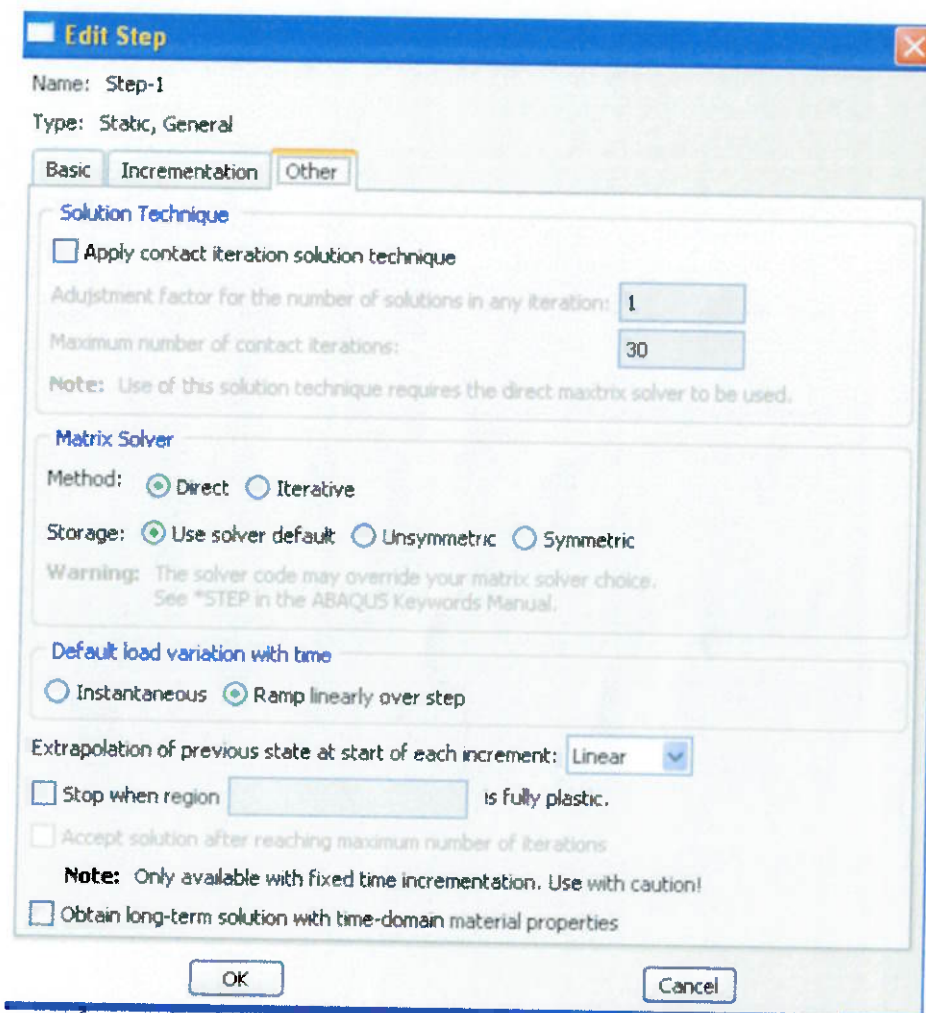
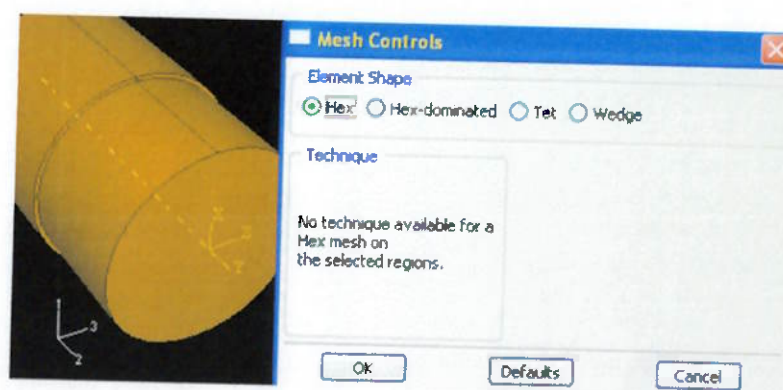


Figura 58: Simulação II – configuração do procedimento de cálculo, método e variação de parâmetros

A Figura 59 mostra que não é possível utilizar elementos hexagonais na malha desta peça, devido a sua geometria. Conforme exposto no item 3.4.4.2, uma solução para este problema é particionar a peça e utilizar técnicas diferentes em cada região. O plano XZ da Figura 60 particiona em uma trecho com $\phi 50$ mm e outro com $\phi 48$ mm. Desta forma, foi possível utilizar elementos hexagonais com a técnica de geração de malha por varredura, conforme apresento na Figura 60.



(a)



(b)

Figura 59: Simulação II – geração da malha. (a) Mostra que não é possível utilizar elementos hexagonais e (b) mostra que não é possível utilizar elementos de formatos variados

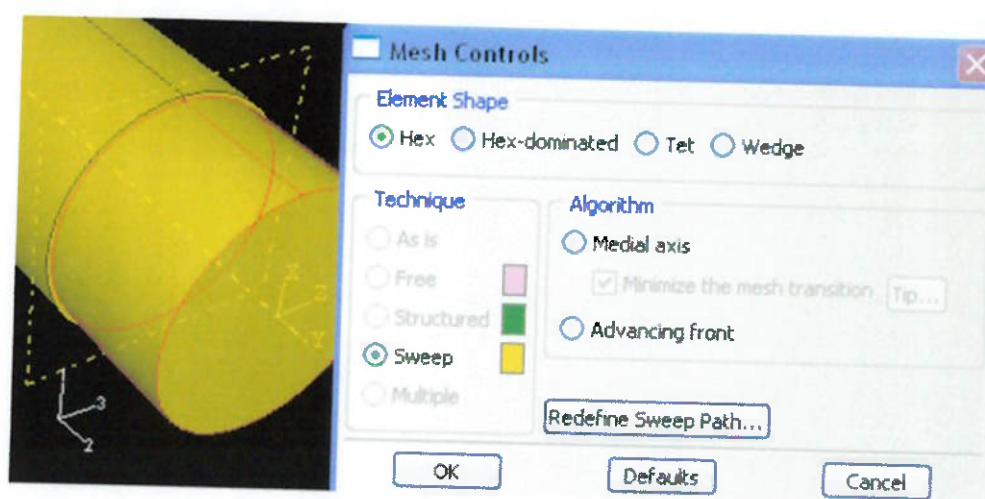


Figura 60: Simulação II – formato dos elementos e geração da malha

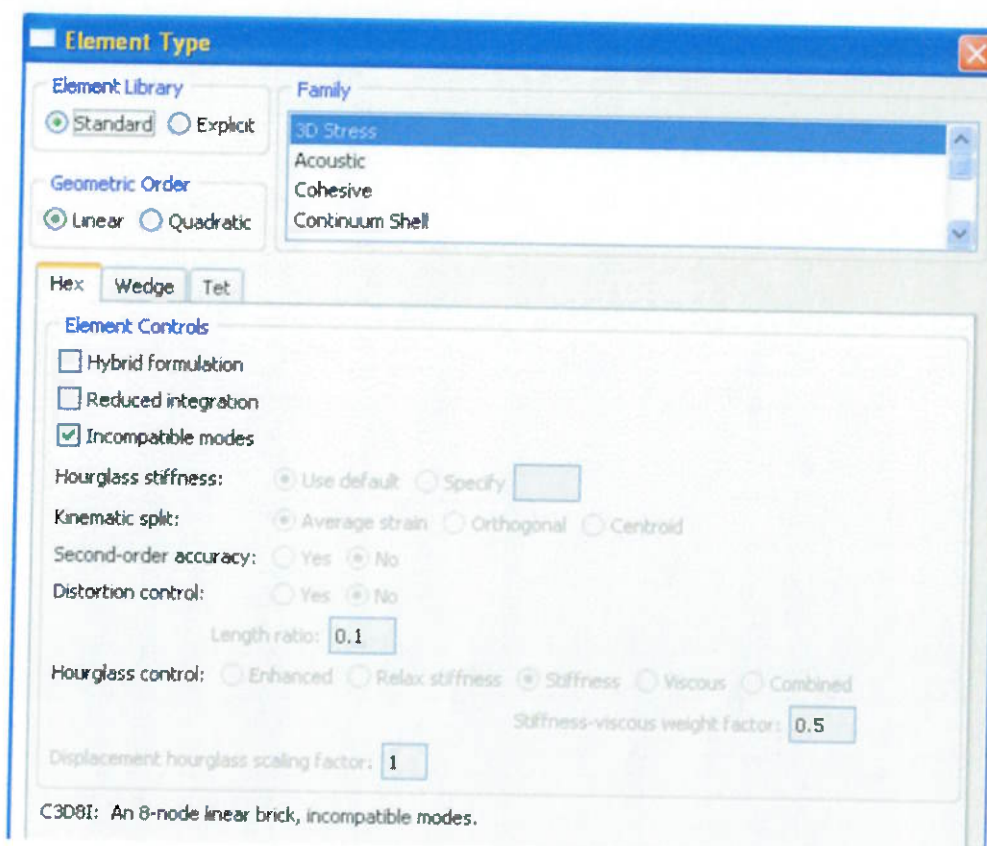


Figura 61: Simulação II – configuração dos elementos

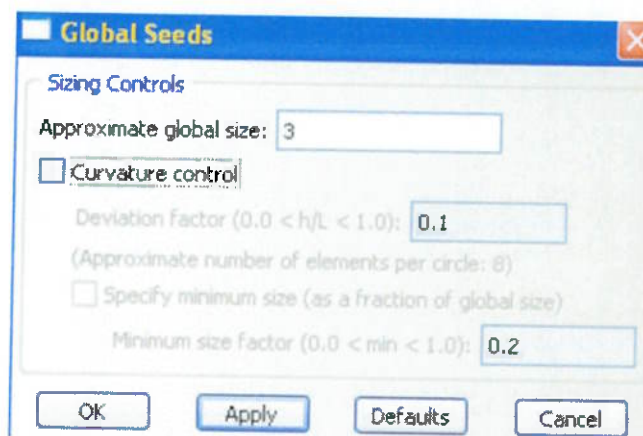


Figura 62: Simulação II – tamanho dos elementos

Utilizando o tamanho de elemento apresentado acima, foram gerados 6.334 elementos, conforme Figura 63, a seguir:

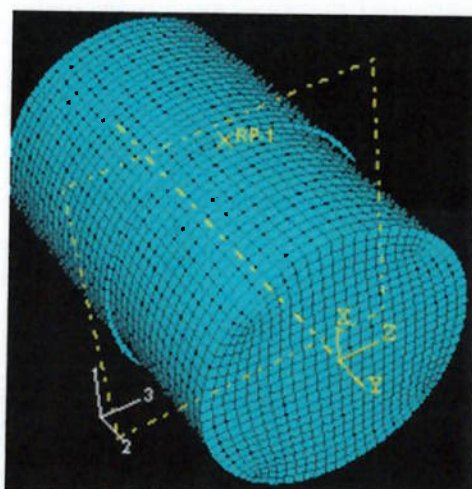


Figura 63: Simulação II – visualização da malha de elementos

A Figura 64, a seguir, apresenta a face de diâmetro maior engastada, note que esta face está impedida de realizar movimentos de translação e de rotação nos eixos x, y e z.

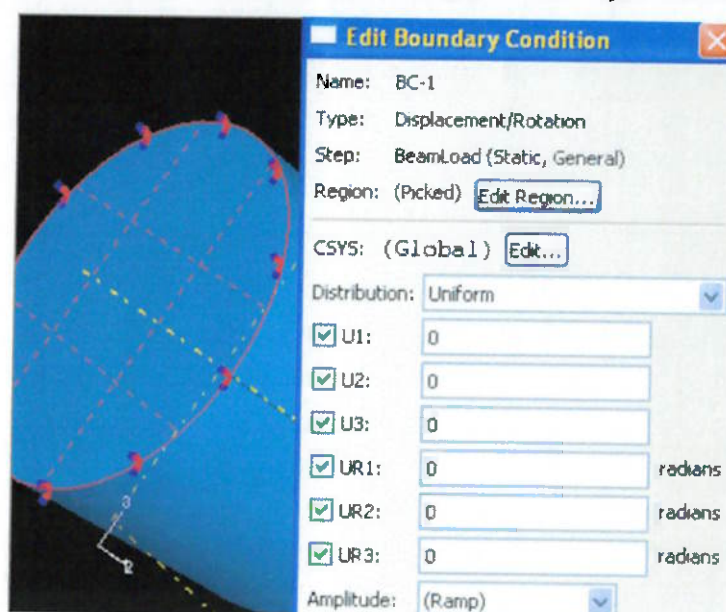


Figura 64: Simulação II – condições de contorno

O carregamento aplicado nesta simulação corresponde ao valor médio medido no ensaio com material recozido, apresentado na Tabela 5. A força passiva foi estimada conforme item 4.3 *Avaliação da Força de Usinagem Durante o Torneamento*, então, tem-se:

Tabela 8: Simulação II – Força de usinagem

F_C (N)	F_A (N)	F_P (N)
1.100	571	1.551

A Figura 65, a seguir, apresenta esta força aplicada à peça.

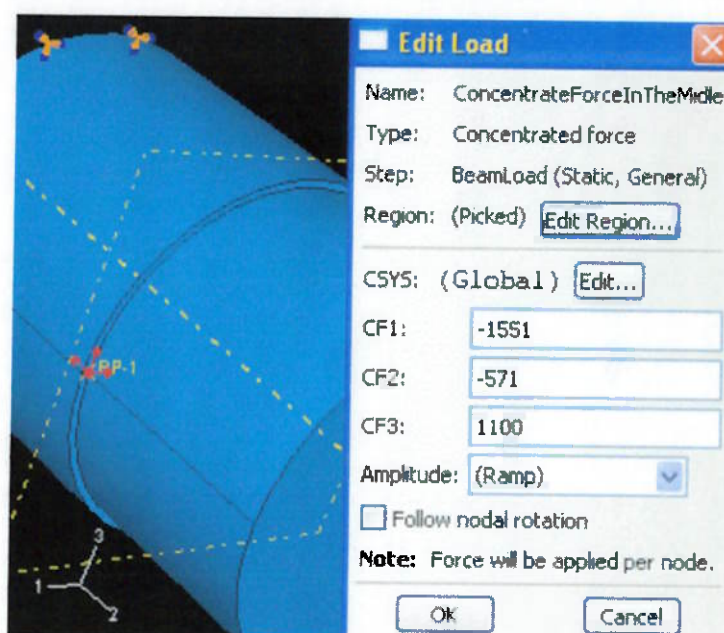


Figura 65: Simulação II – carregamento externo

Anexo A-III Simulação com Material Normalizado – Entradas

A curva tensão deformação foi obtida seguindo o mesmo procedimento do exposto no caso anterior, baseando-se na Tabela B II e na Figura B I. A curva tensão deformação média do aço 1045 normalizado segue abaixo:

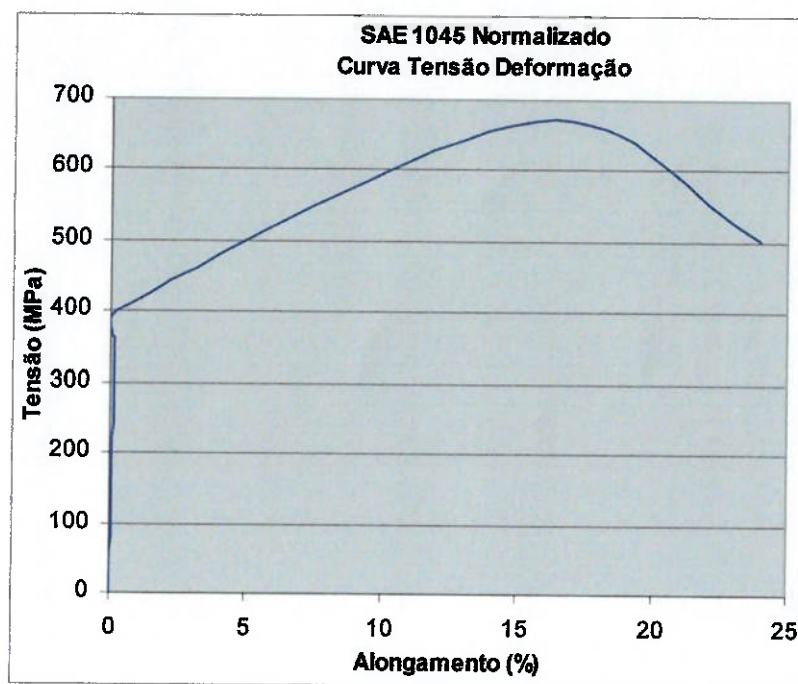


Figura 66: Simulação III – curva tensão deformação do SAE 1045 normalizado

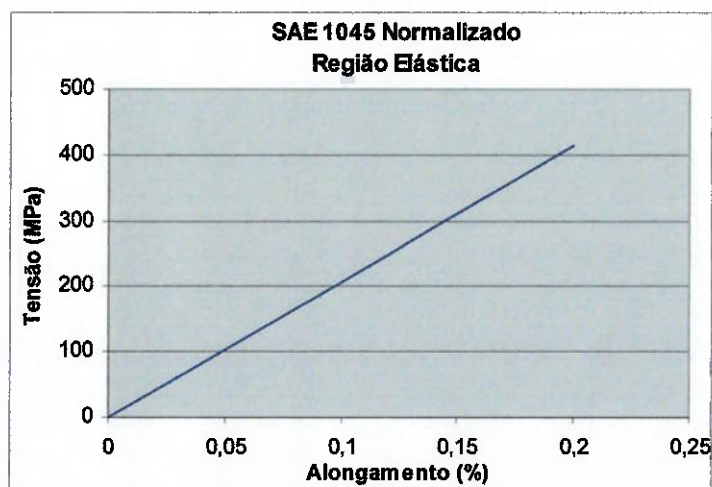


Figura 67: Simulação III – curva tensão deformação do SAE 1045 normalizado, região elástica, com módulo de elasticidade $E=207\text{GPa}$, Juvinall 2000

As figuras a seguir apresentam as telas que definem o material no programa. Na Figura 69, estão presentes alguns pontos da curva da Figura 66.

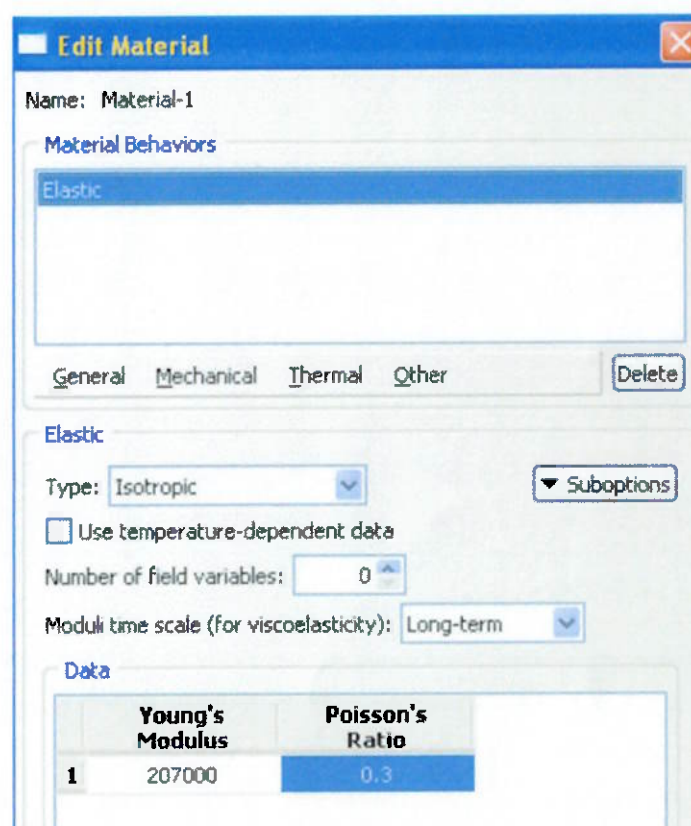


Figura 68: Simulação III – material da peça – configuração da região linear

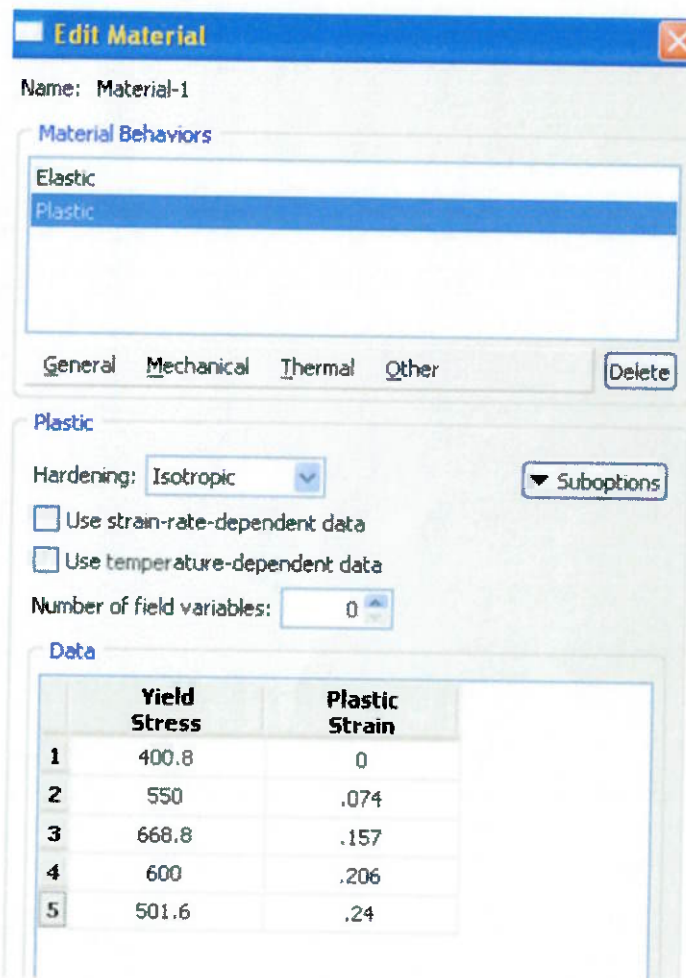


Figura 69: Simulação III – material da peça – configuração da região não linear

O carregamento aplicado nesta simulação corresponde ao valor médio medido no ensaio com material normalizado, apresentado na Tabela 6. A força passiva foi estimada conforme item 4.3, então, tem-se:

Tabela 9: Simulação III – Força de usinagem

F_C (N)	F_A (N)	F_P (N)
996	434	1.404

A Figura 70 apresenta esta força aplicada à peça.

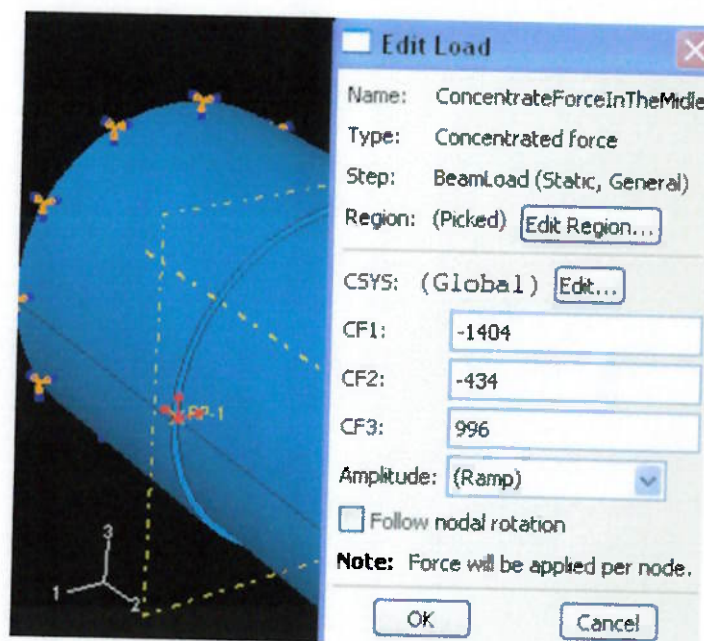


Figura 70: Simulação III – carregamento externo

Anexo A- IV Simulação com Material Recozido e Encruado – Entradas

A malha deste modelo, à princípio, não poderia ser composta por elementos hexagonais, conforme mostra a Figura 71. Porém, após efetuar as devidas partições, foi possível utilizar elementos hexagonais, C3D8I, com geração de malha pela técnica de varredura, conforme Figura 72.



Figura 71: Não é possível gerar uma malha com elementos hexagonais neste modelo

Após as devidas partições o problema foi solucionado e também foi utilizada malha com 6.633 elementos.

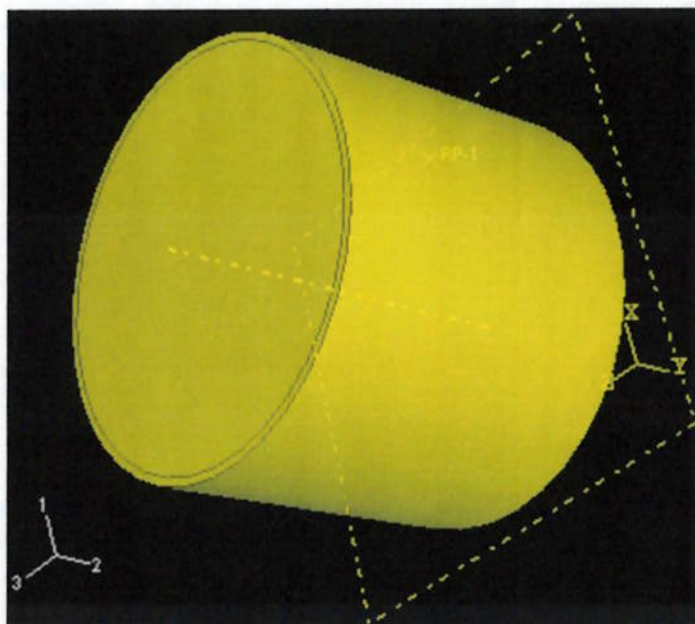


Figura 72: Efetuando-se algumas partições, a malha com elementos hexagonais torna-se factível

Na Figura 72, acima, é possível ver uma fina camada externa, esta camada corresponde ao material encruado.

Anexo B – Tabelas e figuras extraídas da literatura

Tabela B I: Valores das constantes das fórmulas da pressão específica de corte segundo a ASME e AWF

Material	Dureza Brinell	C_1^2	C_2^2
<i>Aços de construção</i>			
SAE 1020 e 1025 ou St 37.11 e 42.11	127	182	120
SAE X 1020 — EF ⁴	156	190	—
SAE 1035 ou St 50.11	174	201	140
SAE 1045 ou St 60.11	187	215	145
SAE 1050 — LQ	201	224	—
SAE 1060 ou St 70.11	217	245	150
SAE 1095 ou St 85	280	280	160
<i>Aços de corte fácil</i>			
SAE 1112 — LQ, B	130	104	—
SAE 1112 — EF, B	167	125	—
SAE X 1112 — EF	183	125	—
<i>Aços manganês</i>			
SAE X 1315 — LQ	120	108	—
SAE X 1315 — EF	161	105	—
SAE T 1340 — LQ	217	240	—
<i>Aços níquel</i>			
SAE 2315 — N	192	182	—
SAE 2330 — EF	223	202	—
SAE 2340 — N	223	202	—
SAE 2512 — N	—	182	—
<i>Aços cromo-níquel</i>			
SAE 3115 — N	128	132	—
SAE 3115 — EF	163	138	—
SAE 3130 — EF	210	197	—
SAE 3140 — T	285	228	—
SAE 3140 — R	207	178	—
SAE 3240 — R	170	145	—
<i>Aços molibdênio</i>			
SAE 4340 — T	400	310	—
SAE 4340 — R	302	233	—
SAE 4310	415	304	—
SAE 4615 — EF	212	182	—
SAE 4815 — N	187	175	—
SAE 4640 — N	248	197	—
<i>Aços cromo</i>			
SAE 5120 — N	149	155	—
SAE 5135 — R	207	172	—
SAE 52100 — R	187	185	—

Tabela Anexo B - I (continuação): Valores das constantes das fórmulas da pressão específica de corte segundo a ASME e AWF

<i>Material</i>	<i>Dureza Brinell</i>	<i>C₁²</i>	<i>C₂³</i>
<i>Aços cromo vanádio mang.</i>			
SAE 6115 — N	170	182	—
SAE 6140 — R	187	240	—
<i>Aços liga alemães</i>			
Aço Liga 70/85	—	—	160
Aço Liga 100/140 e inox.	—	—	180
Aço Liga 140/180	—	—	195
<i>Ferro fundido</i>			
Fofo mole	126	60	—
Fofo médio	181	122	—
Fofo duro	241	142	—
Ge 12.91 e 14.91	—	—	64
Ge 18.91 e 26.91	200-250	—	94
Fofo esferoidal	—	127	—
Fofo esferoidal (trat.)	—	114	—
Fofo acicular	263	142	—
Fofo ligado	250-400	—	110
<i>Aço fundido</i>			
Aço fundido mole	—	—	110
Aço fundido médio	—	—	120
<i>Não-ferrosos</i>			
Latão	—	—	54
Cobre	—	—	72
Alumínio puro	—	—	36
Liga magnésio	—	—	20
Liga AL c/ Si	5	—	46
Al fundido	5	—	46
<i>Plásticos</i>			
Borracha dura, Ebonite	—	—	15,5
Bakelite, Pertinax	—	—	16,2

1 Para a equivalência de materiais consultar o apêndice.

2 Ferramenta de aço rápido (18% W, 4% Cr, 1% V) com ângulos (segundo a ASA B 3.22 — 1950): *back rake* 8°, *relief* 6°, *side rake* 14°, *end cutting-edge angle* 6°, *side-cutting-edge angle* 30°, *nose radius* 3/16".

3 Ferramenta com ângulo de posição $\alpha = 45^\circ$.

4 EF = estirado a frio, LQ = laminado a quente, B = produzido em forno Bessemer, N = normalizado, R = recozido.

5 Tensão de ruptura 30 a 42 kg²/mm².

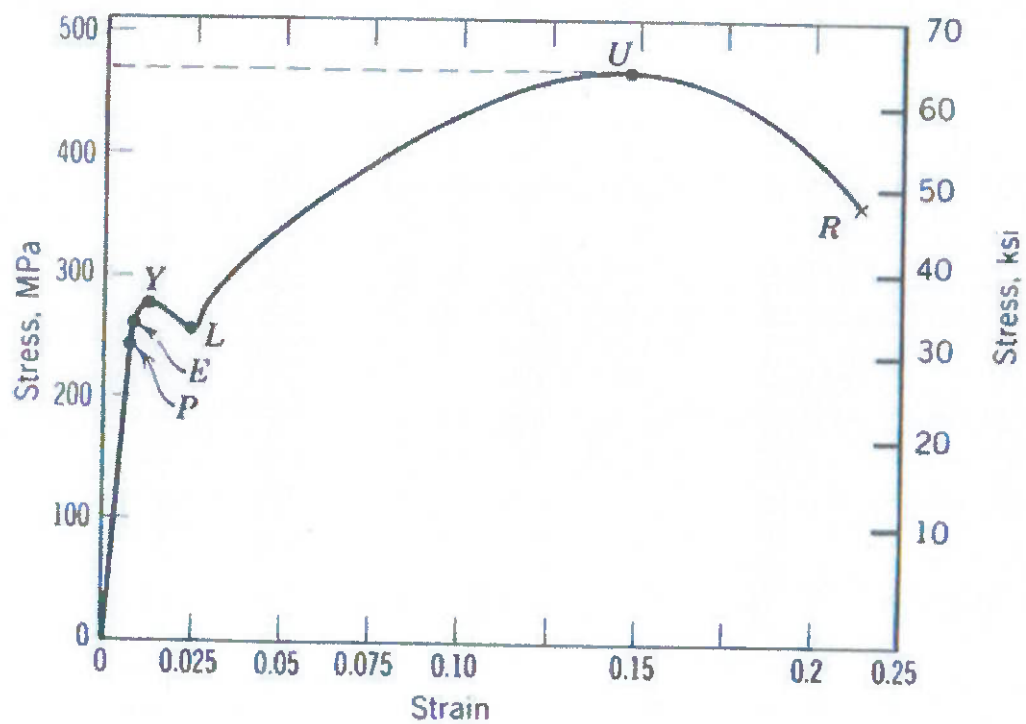


Figura B I: Curva tensão x deformação típica do aço SAE 1045

Tabela B II: Propriedades mecânicas de algumas ligas de aço carbono

<i>Mechanical Properties of Selected Carbon and Alloy Steels</i>										
Tensile Strength		Yield Strength		Elongation		Reduction in Area		Brinell Hardness, H_B		Izod Impact Strength
Number	Treatment	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	J
1015	As-rolled	420.6	61.0	313.7	45.5	39.0	61.0	126	110.5	81.5
	Normalized	424.0	61.5	324.1	47.0	37.0	69.6	121	115.5	85.2
	Annealed	386.1	56.0	284.4	41.3	37.0	69.7	111	115.0	84.8
1020	As-rolled	448.2	65.0	330.9	48.0	36.0	59.0	143	86.8	64.0
	Normalized	441.3	64.0	346.5	50.3	35.8	67.9	131	117.7	86.8
	Annealed	394.7	57.3	294.8	42.8	36.5	66.0	111	123.4	91.0
1030	As-rolled	551.6	80.0	344.7	50.0	32.0	57.0	179	74.6	55.0
	Normalized	520.6	75.5	344.7	50.0	32.0	60.8	149	93.6	69.0
	Annealed	463.7	67.3	341.3	49.5	31.2	57.9	126	69.4	51.2
1040	As-rolled	620.5	90.0	413.7	60.0	25.0	50.0	201	48.8	36.0
	Normalized	589.5	85.5	374.0	54.3	28.0	54.9	170	65.1	48.0
	Annealed	518.8	75.3	353.4	51.3	30.2	57.2	149	44.3	32.7
1050	As-rolled	723.9	105.0	413.7	60.0	20.0	40.0	229	31.2	23.0
	Normalized	748.1	108.5	427.5	62.0	20.0	39.4	217	27.1	20.0
	Annealed	636.0	92.3	365.4	53.0	23.7	39.9	187	16.9	12.5
1095	As-rolled	965.3	140.0	572.3	83.0	9.0	18.0	293	4.1	3.0
	Normalized	1013.5	147.0	499.9	72.5	9.5	13.5	293	5.4	4.0
	Annealed	656.7	95.3	379.2	55.0	13.0	20.6	192	2.7	2.0
1118	As-rolled	521.2	75.6	316.5	45.9	32.0	70.0	149	108.5	80.0
	Normalized	477.8	69.3	319.2	46.3	33.5	65.9	143	103.4	76.3
	Annealed	450.2	65.3	284.8	41.3	34.5	66.8	131	106.4	78.5

Fonte: Juvinall, 2000.

APÊNDICES

Apêndice A – Avaliação da viabilidade técnico econômica

Um dos primeiros estudos realizados foi a análise da viabilidade deste projeto. Uma vez tendo o aço como o material eleito para utilização nos ensaios, era desejável primeiramente conhecer as dificuldades técnicas e, em seguida, o custo deste trabalho.

Exeqüibilidade

O torneamento é uma operação relativamente simples e suficiente para proporcionar as condições de trabalho necessárias neste estudo. Logo, concluiu-se que não haveria complicação técnica durante a fabricação. Obviamente, inúmeros cuidados foram tomados, tais como, fixação correta da peça e registro de todos os parâmetros de usinagem.

Insumo e Maquinário

A peças produzidas tinham dimensões aproximadas de 25 mm de diâmetro por 70 mm de comprimento. Uma opção seria alimentar a máquina com uma barra de diâmetro

A oficina do PMR também ofereceu as máquinas para fabricação, além de um técnico para prestar apoio ao trabalho. O LFS (laboratório de fenômenos de superfície do PMR) auxiliou na leitura das durezas.

Com todo este apoio da Escola, o projeto foi considerado absolutamente viável. Por outro lado, sem estes auxílios no caso de qualquer imprevisto por parte da Escola, o custo foi estimado, conforme Tabela Apêndice A- I, da seguinte forma:

Tabela Apêndice A- I: Estimativa de custo para fabricação das amostras

	Qtdade.	Preço Unitário	Preço Total
Material	8,3 kg	R\$4,24	R\$35,07
Torno	2,0 horas	R\$35,00	R\$70,00
Medições de Dureza	10	R\$4,00	R\$40,00
Total =>			R\$145,07

Fontes:

✓ TREFITA, Rua Sargento Manoel Chaga, 448 Pq. N. Mundo. Telefone: 6095-2550. Contato: Ângela.

✓ ULTRA-TÊMPERA, Rua Icó, 150, Cumbica. Telefone: 6412-6911. Contatos: Manoel e Antonio.

É um custo relativamente pequeno, podendo ser assumido pelo graduando. Logo, concluiu-se que o projeto é totalmente viável, tanto tecnicamente quanto economicamente.

Apêndice B – Conversões de Unidades

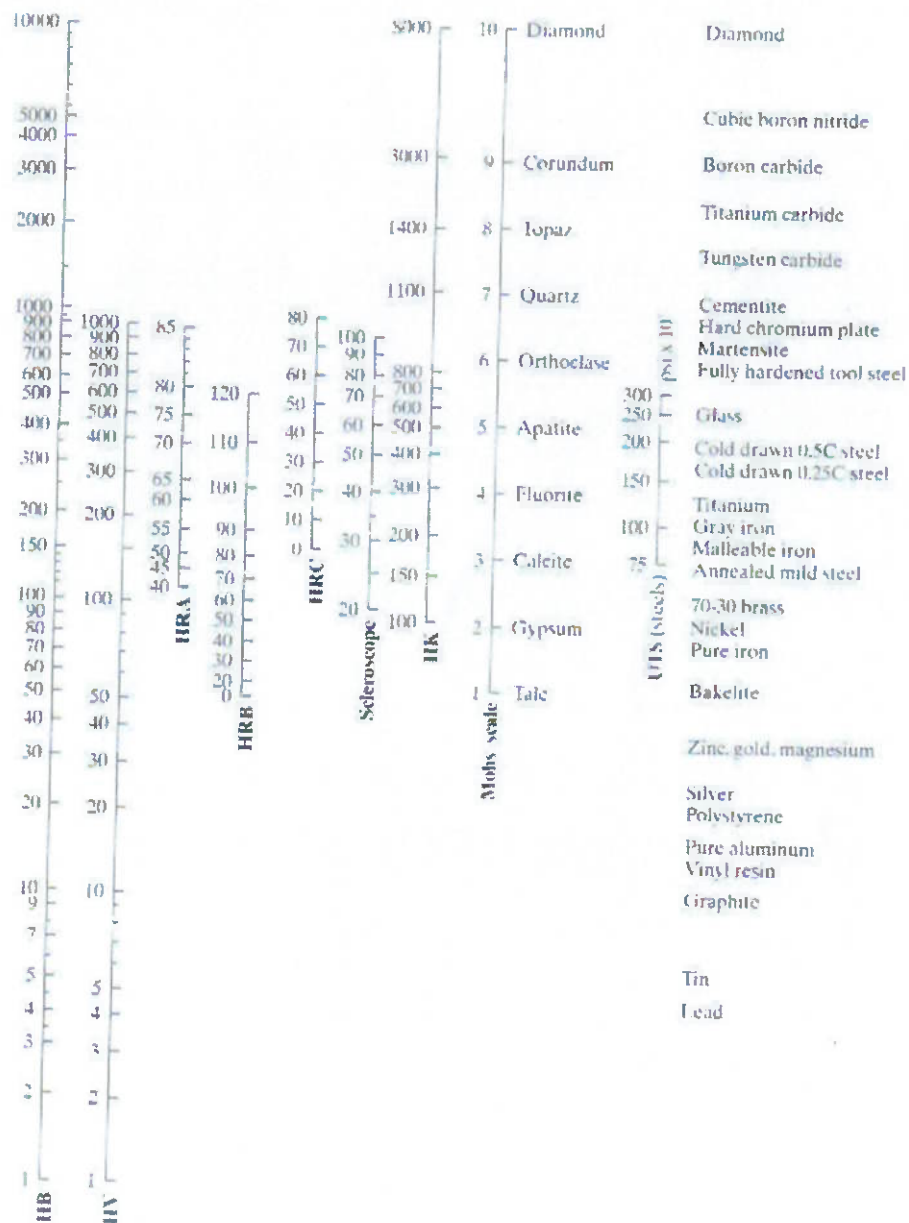


Figura B II: Correspondência das escalas de dureza

Apêndice C – Ficha para registro dos ensaios



Ensaio n.º:	
Operação:	
Operador:	
Local:	Oficina da Escola Politécnica da USP
Data:	
Participantes:	



1	1. OPERAÇÃO:			
2	☐ Torneamento	☐ Fresamento	☐ Furação	
3				
4				
5	2. MÁQUINA:			
6	Número da máquina:			
7				
8				
9	3. PEÇA:			
10	Material:			
11	Fornecedor:			
12	Fabricação: ☐ Laminado ☐ Trefilado			
14	Geometria:			
15	Diâmetro externo: mm		Comprimento: mm	
16				
17				
18	4. FERRAMENTA:			
19	Material:			
20	Tipo:			
21	Fabricante:			
22	☐ Nova ☐ Usada, desgaste aparente: ☐ Boa ☐ Razoável ☐ Ruim			
23				
24				
25	5. PARÂMETROS GERAIS:			
26	Diâmetro inicial:	$D_{inicial}$	mm	
27	Diâmetro final:	D_{final}	mm	
28	Avanço:	a	mm/volta	
29	Rugosidade média:	R_a	μm	
30	Rugosidade total:	R_t	μm	
31	Força de corte:	P_c	N	
32	Força de avanço:	P_a	N	
33	Espessura do cavaco:	e_{cavaco}	mm	
34	Largura do avanço:	l_{cavaco}	mm	
35				
36				
37	5. NOTAS:			
38				
39				
40				
41				
42				
43				
44				
45				

