

FABIO AUGUSTO FABOZZI

**MODELAMENTO DO PROCESSO DO CORTE
DE CHAPAS POR PUNÇIONAMENTO USANDO
O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS:
ESTUDO DE CASO DO CORTE DE CHAPAS DE
AÇO CARBONO PARA A FABRICAÇÃO DO
ROTOR E ESTATOR DE MOTORES ELÉTRICOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Engenheiro.

Área: Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. André Paulo Ts-
chipschin.

**São Paulo
2007**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin, pela orientação, apoio e amizade durante os anos da graduação e realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Fernando José Gomes Landgraf pela atenção e importantes contribuições em todo e qualquer momento.

Ao Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) e seus coordenadores pela disponibilização dos recursos técnicos.

A meus pais, incansáveis lutadores que me apóiam e suportam em todos os momentos e em todas as minhas decisões.

RESUMO

Aços magneticamente moles são largamente utilizados na fabricação de componentes de motores elétricos. A maioria destes componentes exige que o aço seja cortado e estampado nos formatos necessários. O procedimento geralmente utilizado é o corte por puncionamento.

O corte de chapas por puncionamento é regido por diversas variáveis que têm influência na qualidade do produto e no desgaste das ferramentas. Entre as variáveis mais importantes constam as folgas entre a matriz e o punção, raio de curvatura da ferramenta e da matriz, prensa e parâmetros de sua operação, lubrificação e as propriedades mecânicas do material cortado (Corrada, 1996).

Neste trabalho foi montado um modelo baseado em peças e ferramentas reais para a simulação em elementos finitos do processo de corte de chapas por puncionamento, analisando a influência de três das variáveis acima citadas. O modelo consiste em uma ferramenta, uma chapa e uma matriz. Foi utilizado um algoritmo para prever a nucleação e propagação de trincas na chapa geradas por cisalhamento.

O objetivo deste trabalho foi o estudo das variáveis de processo na rebarba formada no produto, pois se sabe que a altura da rebarba é um dos principais problemas das peças cortadas, já que introduzem perdas magnéticas no motor e dificultam a montagem dos pacotes de lâminas, além de causarem maior desgaste nas ferramentas de corte.

O modelo produzido neste trabalho permite a introdução de diversas variáveis, porém para este trabalho foram analisadas as seguintes: diferentes propriedades mecânicas para o material da chapa (dois aços 1006 com diferentes razões elásticas), diferentes coeficientes de atrito (lubrificação) e diferentes folgas entre ferramenta e matriz. Os resultados apresentaram diferentes tensões e alturas de rebarba, mostrando a influência de cada variável de processo.

Palavras-chave: Elementos finitos, Puncionamento, estatores, razão elástica.

ÍNDICE

RESUMO	3
AGRADECIMENTOS.....	2
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABELAS.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1. Corte de chapas por puncionamento	8
1.2 Método dos Elementos Finitos (MEF).....	15
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
2.1 Modelo	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
3.1 Simulação 1	34
3.2 Simulação 2	36
3.3 Simulação 3	37
3.4 Simulação 4	39
3.5 Simulação 5	40
4. CONCLUSÕES.....	46
5. BIBLIOGRAFIA.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do corte por puncionamento e das tensões típicas do processo.....	8
Figura 2: Produtos e ferramentas de produção em operações únicas. a) Rotor e estator produzidos em operações únicas; b) Ferramentas de entalhe único.....	10
Figura 3: Produção de rotor e estator em matrizes de corte em progressão.....	11
Figura 4: Exemplo exagerado de rebarba formada em corte de chapa.....	12
Figura 5: Altura de rebarba para cada 10.000 golpes antes da afiação da ferramenta.....	13
Figura 6: a) Esquema das regiões formadas na espessura da chapa após o corte; b) Micrografia transversal de uma chapa cortada.....	14
Figura 7: Exemplo de discretização em malha cúbica para simulação em elementos finitos.....	15
Figura 8: Peças do modelo e suas respectivas dimensões. a) Punção; b) Matriz; c) Chapa.....	20
Figura 9: Montagem do sistema do modelo.....	21
Figura 10: Foto das peças. a) Punção; b) Chapa já cortada.....	22
Figura 11: Malhas utilizadas. a) Punção; b)Matriz; c)Chapa.....	25
Figura 12: Diagrama mostrando as variáveis necessárias para implementação de previsão de nucleação e propagação de trincas em materiais metálicos. (Manual Abaqus 2007).....	28
Figura 13: Figura 13: Deformações plásticas equivalentes de diversos materiais metálicos no início da formação de bandas de cisalhamento. (Batra e Lear, 2004)	29
Figura 14: Deformações plásticas equivalentes dos diferentes materiais até a ruptura.....	30
Figura 15: Exemplo de momento do processo de corte omitindo a matriz, mostrando as tensões de Von Mises (em Pa na escala) atuantes na chapa – Simulação 3.....	31
Figura 16: Exemplo de momento do processo de corte mostrando a matriz e as tensões de Von Mises atuantes na chapa – Simulação 3.....	32
Figura 17: Estado final da simulação com a região cortada se afastando da matriz –	

Simulação 1.....	33
Figura 18: Chapa cortada em visão transversal – Simulação 4.....	34
Figura 19: Altura de rebarba X Tempo.....	35
Figura 20: Profundidade de roll-over X Tempo.....	35
Figura 21: Altura de rebarba X Tempo.....	36
Figura 22: Profundidade de roll over X Tempo.....	37
Figura 23: Altura de rebarba X Tempo.....	38
Figura 24: Profundidade de roll-over X Tempo.....	38
Figura 25: Altura de rebarba X Tempo.....	39
Figura 26: Profundidade de roll-over X Tempo.....	40
Figura 27: Altura de rebarba X Tempo.....	41
Figura 28: Profundidade de roll-over X Tempo.....	41
Figura 29: Gráfico comparativo entre os tamanhos médios de rebarba de cada simulação.....	42
Figura 30: Gráfico comparativo entre as profundidades médias de Roll-Over de cada simulação.....	43
Figura 31: Porcentagem de deformação plástica equivalente na chapa posterior ao raio de curvatura da matriz. a) Matriz omitida da imagem; b) Matriz mostrada e pontos de rompimento da malha circulados.....	45
Figura 32: Comparação entre rebarbas das micrografias reais e das formadas na simulação. a) e b) Micrografias do contorno cortado; c) e d) Resultado das simulações.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sumário das simulações realizadas.....	18
Tabela 2: Propriedades mecânicas dos aços considerados nas simulações.....	27
Tabela 3: Dados para previsão de nucleação e crescimento de trincas nos materiais estudados.....	30

1. INTRODUÇÃO

1.1. Corte de chapas por puncionamento

Estima-se que bilhões de chapas são estampadas por ano no Brasil, fabricando milhões de motores elétricos (Landgraf, 2001). Aços magneticamente moles são largamente utilizados na fabricação de componentes de motores elétricos. A maioria destes componentes exige que o aço seja cortado e estampado nos formatos necessários. O procedimento geralmente utilizado é o corte por puncionamento. A figura 1 exemplifica um corte por puncionamento, mostrando como se dão as tensões na chapa.

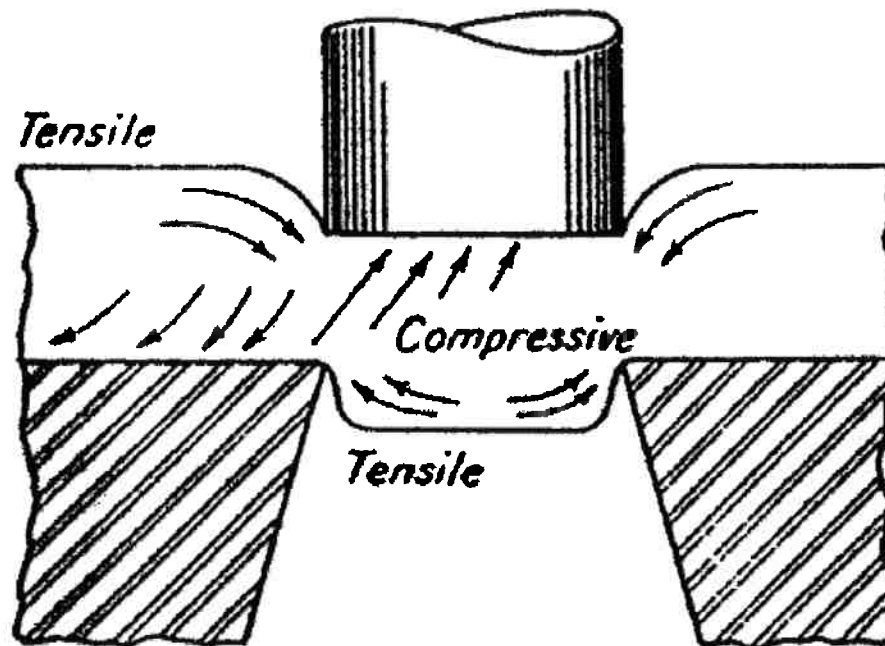


Figura 1: Esquema do corte por puncionamento e das tensões típicas do processo.

O corte de chapas por puncionamento é regido por diversas variáveis que têm influência na qualidade do produto e no desgaste das ferramentas. Entre as variáveis mais importantes constam as folgas entre a matriz e o punção, raio de curvatura da ferramenta e da matriz, prensa e parâmetros de sua operação, lubrificação e as propriedades mecânicas do material cortado (Corrada, 1996).

A operação da prensa é importante porque, dependendo da área a ser puncionada e do material a ser cortado, a força de puncionamento pode variar consideravelmente. Além disso, a estabilidade do punção e da matriz é de extrema importância para que se obtenham peças com a precisão necessária. Isso porque durante o golpe, dependendo do formato e do material da chapa e da força aplicada, as ferramentas podem sofrer deslocamentos laterais não desejáveis.

As chapas para a produção de rotores e estatores podem ser cortadas em matrizes de uma única operação (Single-Station Dies) ou em matrizes de corte em progressão (Progressive Dies).

A produção em matrizes de operação única é mais lenta, mas funciona bem para peças de baixa complexidade geométrica. Na produção dos rotores por matrizes de operação única, estes devem passar por uma operação onde são feitos entalhes em toda sua circunferência.

Estes entalhes podem ser feitos por ferramentas que fazem todos os entalhes em um único puncionamento ou em diversos puncionamentos que produzem um entalhe cada, em alta velocidade. O método mais utilizado é este último, pois os custos de ferramentas são menores e a matriz pode ser utilizada em outras linhas de produção (ASM committee on press forming of steel).

Na figura 2 a) podemos ver a seqüência de produção de rotores e estatores elétricos em matrizes de uma única operação. Na figura 2 b), mostra-se uma matriz para entalhes únicos em diversos puncionamentos.

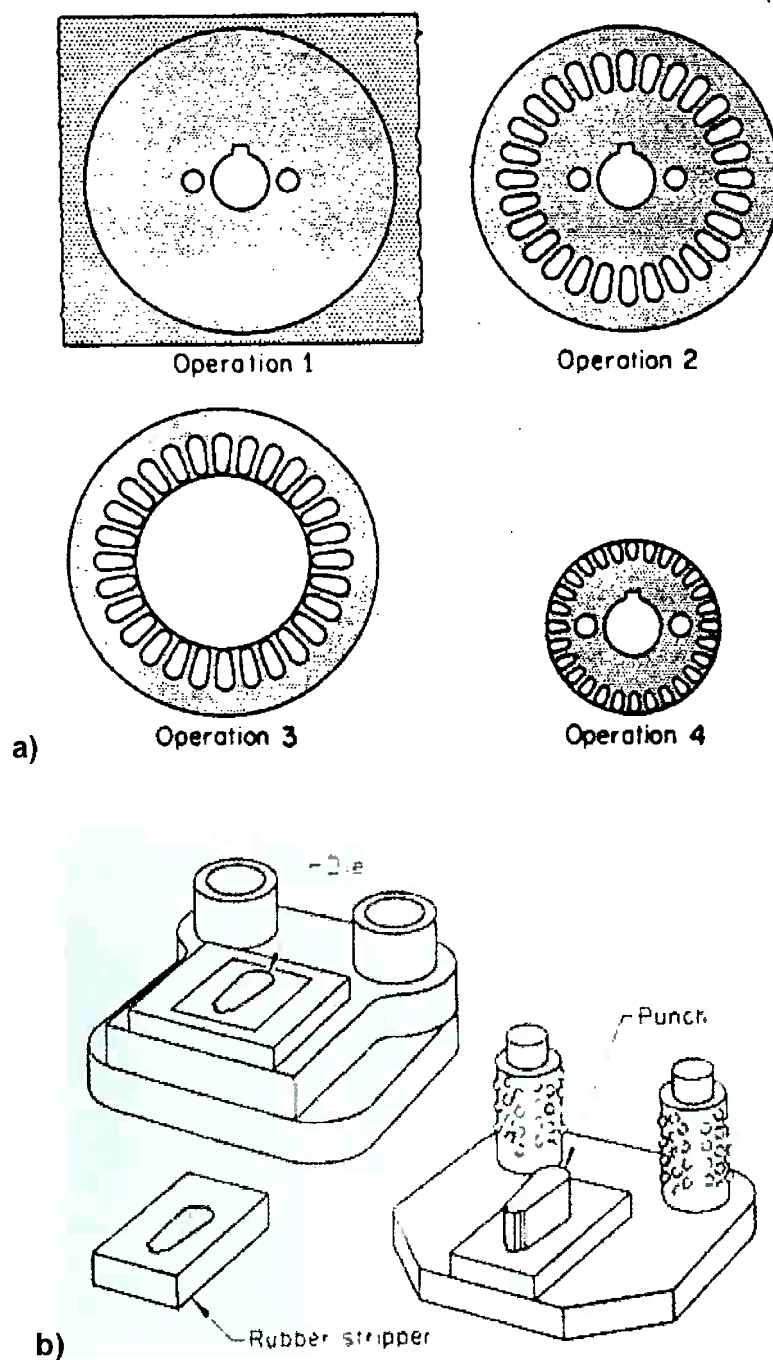


Figura 2: Produtos e ferramentas de produção em operações únicas. a) Rotor e estator produzidos em operações únicas; b) Ferramentas de entalhe único.

No caso da produção em matrizes de corte em progressão, um ou mais cortes de diferentes etapas do processo acontecem durante um mesmo funcionamento da prensa. As peças se locomovem posicionando-se abaixo de cada ferramenta para a

dada etapa. Este tipo de produção está exemplificado na figura 3, que mostra uma seqüência de produção de rotor e estator da direita para a esquerda.

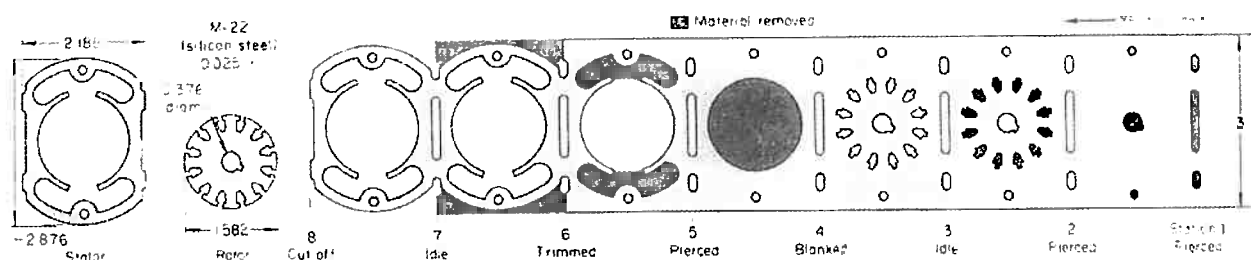


Figura 3: Produção de rotor e estator em matrizes de corte em progressão.

Os materiais geralmente utilizados para a produção de rotores e estatores de motores elétricos são os aços baixo carbono como o 1006, 1008 e 1010, aços ao silício e ligas ferro-níquel. Os aços baixo carbono apresentam vantagens de custo, pois são mais baratos e custam menos para serem cortados e estampados.

As condições em que o aço a ser cortado foi tratado são importantes para todo o processo, pois as suas propriedades mecânicas interferem na força de nas características do punção; por exemplo, se tratados de modo a ficarem mais resistentes, exigirão maior força e controle da prensa. Por outro lado, quando são tratados de forma a ficarem mais moles, tendem a produzir maiores alturas de rebarba.

A presença de rebarba é um fator determinante para a qualidade das peças produzidas, pois as rebarbas introduzem perdas magnéticas no motor elétrico, dificulta o acoplamento dos pacotes de lâminas que são montados nestes motores e ainda diminuem a vida útil das ferramentas de corte, pois aumentam a área de contato entre a ferramenta e a lâmina durante o procedimento de punção.

É praticamente impossível não obter rebarba em operações de corte. Os dois fatores que mais afetam a altura da rebarba são a folga entre punção e matriz e as propriedades do material da chapa (ASM committee on press forming of steel).

O corte ocorre, normalmente, na aresta do punção, pois é ali que a trinca nucleia-se devido às tensões de cisalhamento. Quando a aresta não está afiada, esta trinca pode nuclear-se em outras regiões, causando maiores rebarbas, que ficarão mais tempo em contato com o punção, aumentando seu desgaste.

Na figura 4 mostra-se um exemplo exagerado de rebarba gerada em uma operação de corte por puncionamento.

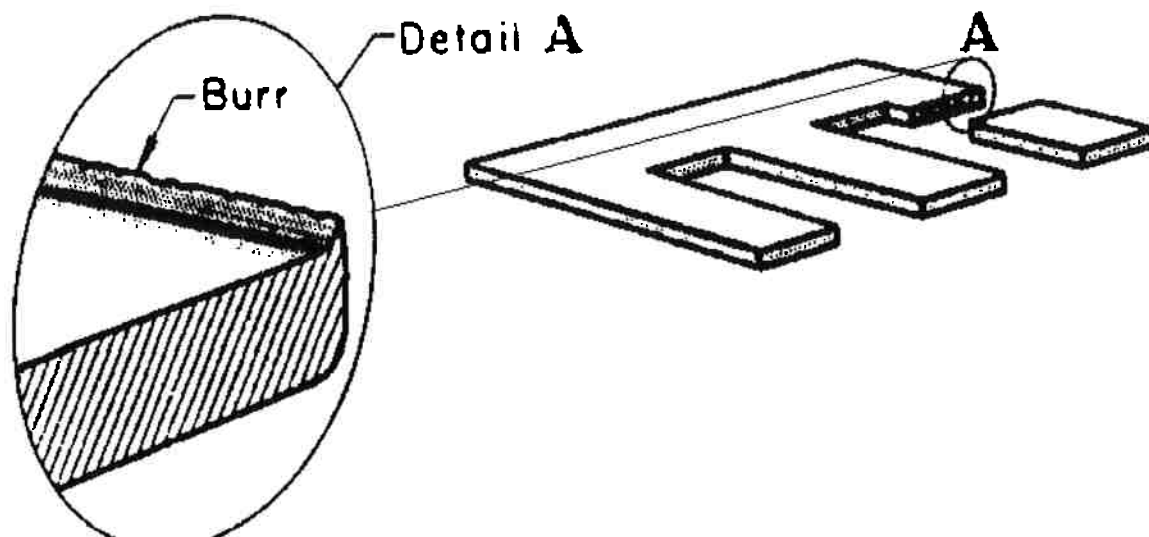


Figura 4: Exemplo exagerado de rebarba formada em corte de chapa.

O desgaste das ferramentas, que ocorre pelo atrito de suas laterais com a chapa de aço enquanto o punção desloca-se para baixo, acontece porque a região deformada adere à lateral da ferramenta e fica entre o punção e a matriz durante o corte. O deslizamento do aço sobre a ferramenta e o desgaste desta dependem da ductilidade e abrasividade do aço cortado (Landgraf, 2001).

Quando a rebarba excede o tamanho máximo especificado pela empresa produtora, a ferramenta de corte é afiada para que possa ser utilizada novamente; ou seja, o tempo entre afiações de uma ferramenta é determinado pela altura de rebarba produzida por seu corte. Portanto, para diminuir custos com afiação de ferramentas e tempo de parada de produção deve-se otimizar o tempo entre afiações, maximizando-o.

Na figura 5 verifica-se a variação do tamanho de rebarba produzido nas lâminas cortadas em função do número de cortes feito por um mesmo punção, antes deste ser afiado novamente.

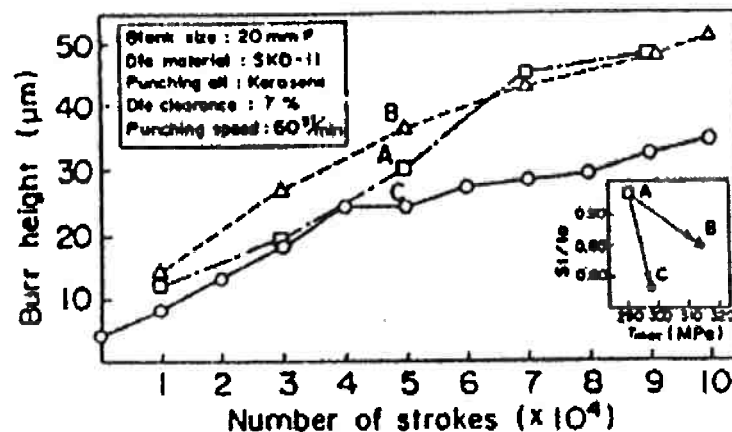


Figura 5: Altura de rebarba para cada 10.000 golpes antes da afiação da ferramenta.

Entretanto, a formação de rebarbas de tamanho além do aceitável não é o único problema que aparece no corte de chapas. Após o corte, devido às tensões residuais, parâmetros da prensa e outras variáveis do processo, o produto pode ficar ovalizado, com falta de planicidade, pode haver cavacos presos no sistema aumentando o desgaste das ferramentas, entre outros.

Na espessura da lâmina cortada, é possível verificar-se diferentes regiões, que são formadas por diferentes fenômenos que ocorrem durante o corte. No plano que é primeiramente atingido pelo punção, na área de contato, a superfície sofre deformação plástica, ficando arredondada. Esta região é chamada de Roll-Over. Logo abaixo da região de deformação plástica, verifica-se a região de corte, lisa e plana, paralela à espessura da lâmina. Na terceira e última região, adjacente à zona de corte, ocorre a fratura do material, e inclui a formação da rebarba. Esta região é chamada de região de estouro.

Na figura 6, apresentam-se as diferentes regiões do corte na espessura da chapa puncionada.

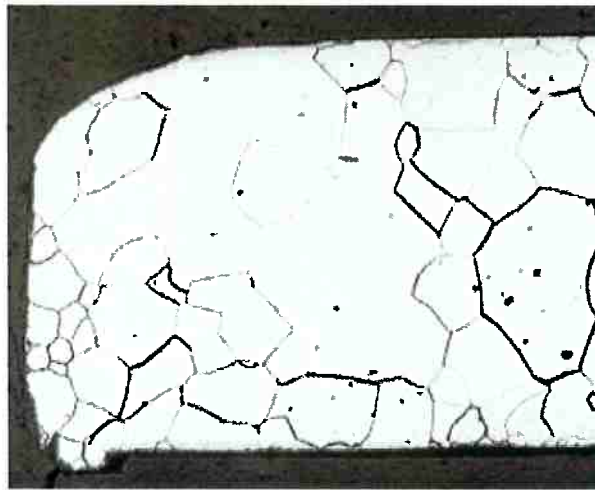
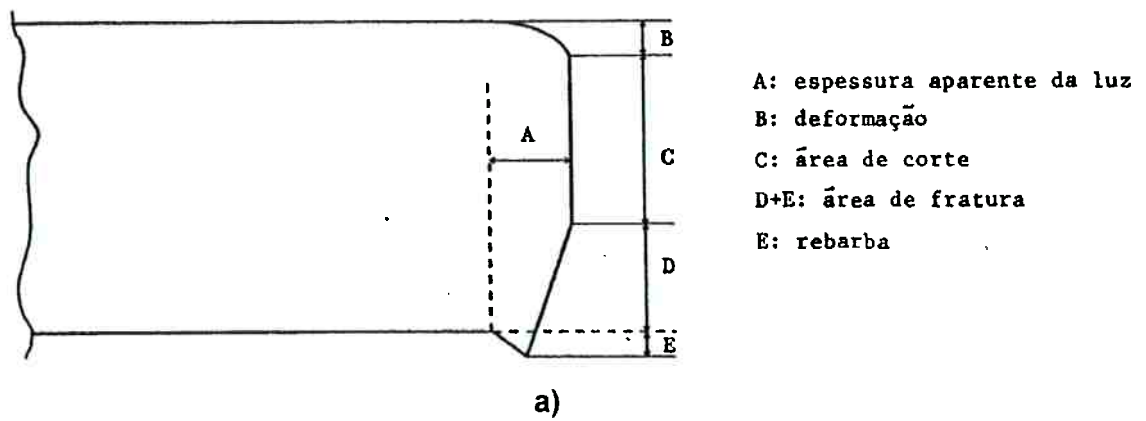


Figura 6: a) Esquema das regiões formadas na espessura da chapa após o corte; b) Micrografia transversal de uma chapa cortada.

1.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

A computação atual traz muitas facilidades para o modelamento e cálculo de problemas com alto número de variáveis e que exigem séries grandes de iterações para suas resoluções. O método dos elementos finitos permite este tipo de cálculo com alta precisão. Este método discretiza as peças e componentes de um problema em um número finito de elementos e então faz o cálculo de cada variável, para cada instante de tempo, em cada um dos elementos. Na figura 7 é mostrada a discretização de um crânio de macaco em elementos cúbicos.

Monkey Skull
Displacement Magnitude

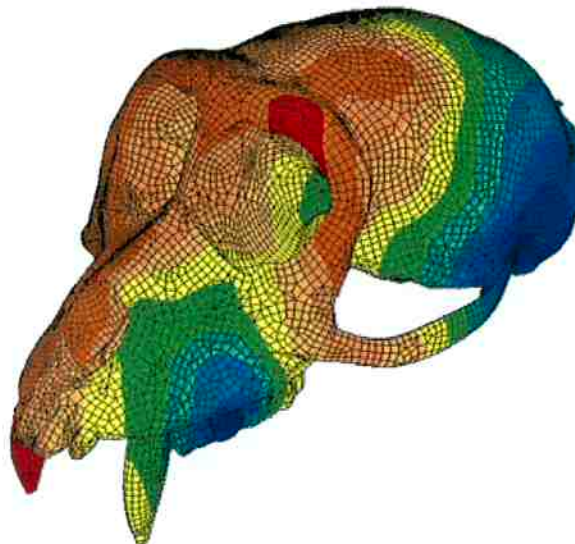


Figura 7: Exemplo de discretização em malha cúbica para simulação em elementos finitos.

O método dos elementos finitos permite o cálculo de diversas variáveis para diferentes problemas, como por exemplo:

- Análise de tensões e deformações
- Transferência de calor
- Projeto e avaliação de elastômeros
- Resolução de problemas estruturais particulares
- Conformação de metais
- Mecânica de contato
- Modelos de impacto

- Análise acústica

Mais recentemente, tornou-se possível a previsão de nucleação e propagação de trincas em diversos tipos de materiais, por um processo de separação e exclusão dos elementos da malha.

Como a capacidade de um computador é limitada, deve-se prestar atenção ao modo como se monta o modelo a ser simulado. A precisão dos resultados aumenta com o refinamento da malha, entretanto quanto mais se refina a malha, mais cálculos são propostos à máquina, que levará mais tempo para concluir o trabalho.

Somente como exemplo para que fique clara a ordem de grandeza desta variação de tempo, para um mesmo problema, só o refinamento da malha pode fazer com que a simulação leve 3 horas ou 1 mês para ser concluída.

O tempo de simulação também pode variar com o tempo real do que se está simulando. Por exemplo, uma simulação de um resfriamento de 20 horas de um grande componente levará mais tempo do que uma simulação de resfriamento em 15 horas do mesmo componente em um meio mais agressivo, geralmente.

Para simulações mais complexas, a utilização de múltiplos processadores em paralelo é importante, pois reduz o tempo de simulação consideravelmente.

A montagem de um modelo para cálculo por MEF consiste em algumas etapas, a saber:

1. Desenho dos componentes, atribuição das propriedades de seus materiais e montagem do sistema;
2. Implementação da malha mais indicada para o problema;
3. Escolha do tipo de análise (dinâmica, estática, implícita, explícita...);
4. Especificação dos parâmetros de interação entre os diferentes componentes do sistema;
5. Imposição das restrições e condições iniciais e de contorno.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado o software Abaqus v.6.7 para a realização deste trabalho. Trata-se de um software de modelamento em elementos finitos para problemas mecânicos, térmicos ou elétricos. Dentre os softwares de modelamento em elementos finitos, o Abaqus apresenta-se como o de maior complexidade de uso e maior tempo de processamento, porém de maior precisão e mais versátil (Vega et al, 2007).

Recentemente, a partir de 2007, foi incluso no programa um módulo para previsão de nucleação e propagação de trincas em diversos tipos de materiais, que permite que a malha seja separada durante a simulação. Porém este tipo de análise traz certa complexidade ao processo de montagem do modelo por exigir implementações em linhas de comando além das feitas na interface gráfica do programa. Outra dificuldade é a obtenção de exemplos e assistência técnica para elaboração deste tipo de análise por sua dificuldade e pouco tempo de existência.

Foi utilizado um “cluster” para o processamento das simulações. Todas as simulações contaram com quatro processadores trabalhando em paralelo e cada uma das simulações precisou de cerca de 120 horas para ser concluída, totalizando 600 horas de processamento, já que foram realizadas cinco simulações com as 3 diferentes variáveis de interesse.

Foi feito um modelo para a simulação do corte para a produção dos entalhes nos rotores, puncionados em matrizes de entalhe único, conforme descrito na Introdução.

Dois materiais diferentes foram simulados: Aço 1006 com tratamento A e aço 1006 com tratamento B. O tratamento A conferiu uma razão elástica de 0,61, enquanto o tratamento B conferiu ao aço uma razão elástica de 0,86. Estes dados foram obtidos da literatura (Landgraf, 2001).

Para cada um dos materiais, o corte foi simulado em duas condições de lubrificação, com coeficiente de atrito 0,5 (não lubrificado) e 0,05 (lubrificado).

Todas as simulações citadas até agora foram feitas com folga entre o punção e a matriz de 0,1mm. Simulou-se ainda uma última situação, contemplando o aço de

maior razão elástica, coeficiente de atrito de 0,5 e folga entre a matriz e o punção de 0,2mm.

A tabela 1 resume a distribuição das simulações.

Tabela 1: Sumário das simulações realizadas

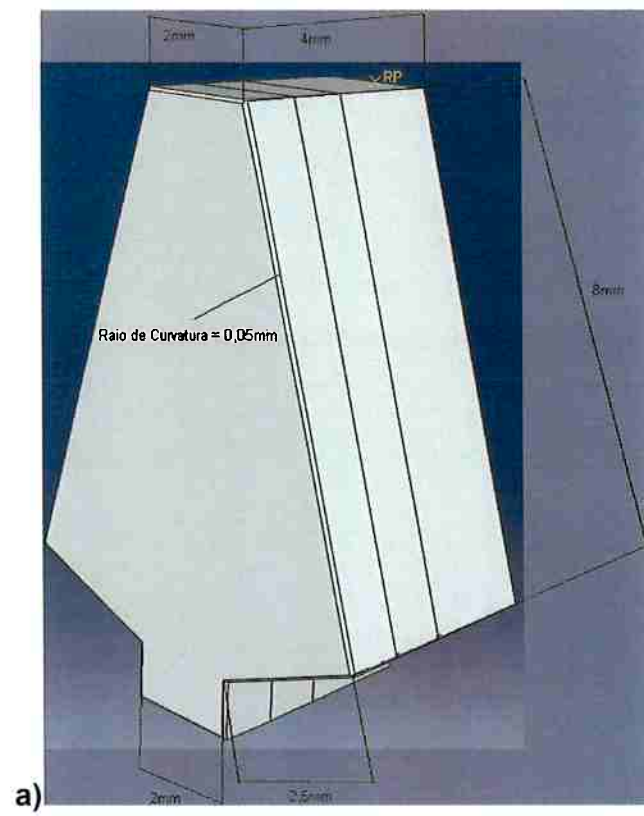
Simulação	Coeficiente de Atrito		Razão Elástica		Folga Punção Matriz	
	0,05	0,5	0,61	0,86	0,1 mm	0,2 mm
1		X	X		X	
2	X		X		X	
3		X		X	X	
4	X			X	X	
5		X		X		X

Chamou-se de rebarba todo o material da chapa que estivesse na região adjacente ao corte e que tenha ficado abaixo do plano da lâmina cortada. Os resultados foram avaliados tomando-se 10 pontos aleatórios da rebarba e fazendo-se a média entre eles.

Chamou-se de roll-over toda a região adjacente ao corte, no plano superior da lâmina, que apresentou somente deformação plástica, sem rompimento de malha, conforme mostrado na figura 18, nos resultados. A região de “roll-over” foi medida também em 10 pontos tomados aleatoriamente.

2.1 Modelo

O modelo contempla um punção para entalhe único, uma matriz e a chapa a ser cortada. A figura 8 mostra as peças contempladas no modelo e suas respectivas dimensões. Note-se que o raio de curvatura imposto nas arestas do punção e da matriz foram de 0,05mm.



b)

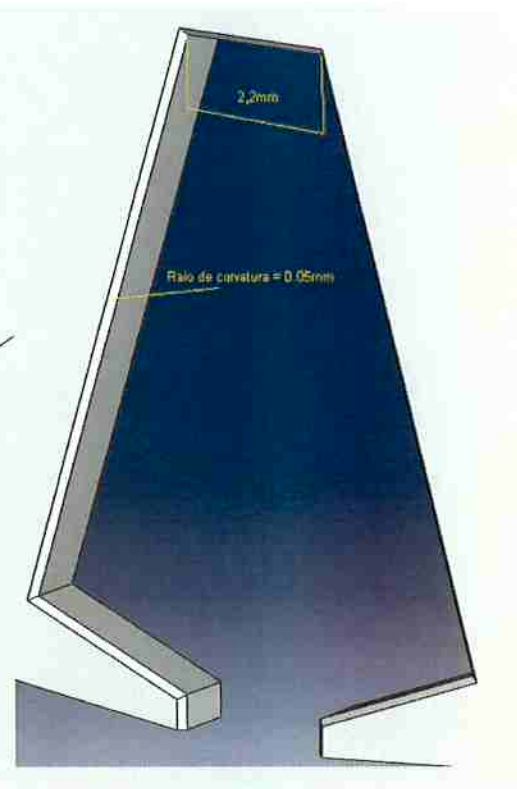
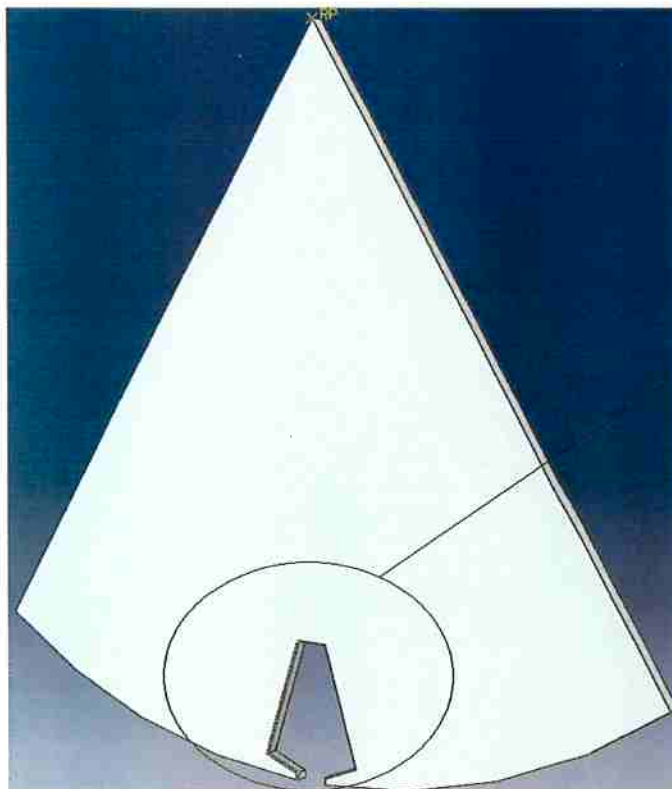




Figura 8: Peças do modelo e suas respectivas dimensões. a) Punção; b) Matriz; c) Chapa.

Na figura 9 vê-se a montagem do sistema.



Figura 9: Montagem do sistema do modelo.

Na figura 10 verifica-se a ordem de grandeza das peças reais, mostrando-se o punção e uma chapa já cortada.

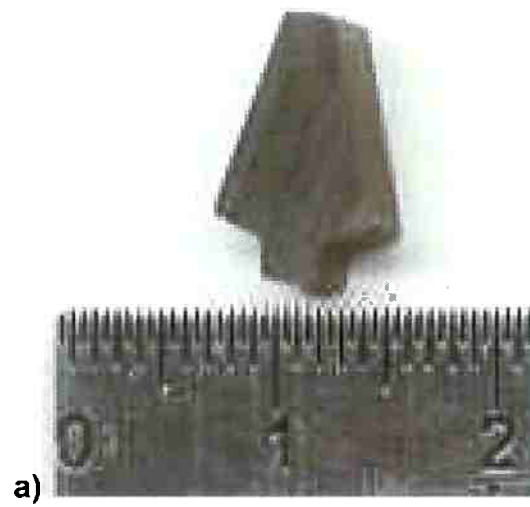


Figura 10: Foto das peças. a) Punção; b) Chapa já cortada.

O modelo foi construído com os seguintes passos e restrições:

1. Desenho dos três componentes do sistema seguindo dimensões reais;
2. Aplicação dos materiais às respectivas peças;
3. Criação da malha (descrita adiante);

4. Aplicação do método dinâmico explícito para a resolução;
5. Aplicação da interação e dos coeficientes de atrito;
6. Imposição das condições iniciais e de contorno.

Os desenhos foram feitos no próprio módulo de CAD do software.

As malhas foram criadas com alguns cuidados, como por exemplo: Na chapa a ser cortada, a malha foi refinada na região do corte, pois se sabe que as rebarbas reais têm alturas da ordem de grandeza de $60\mu\text{m}$. Portanto, os elementos da malha na região do corte foram feitos com arestas de $125\mu\text{m}$.

Não foi possível diminuir ainda mais o tamanho dos elementos da malha porque o custo computacional cresceria demasiadamente, impossibilitando a realização deste trabalho, já que permitiria a realização de apenas 2 simulações.

Além do refinamento feito na malha da chapa, refinou-se a malha nas arestas do punção e da matriz, a fim de que o raio de curvatura destas ferramentas fosse simulado de maneira adequada.

Na figura 11, mostram-se as malhas utilizadas.



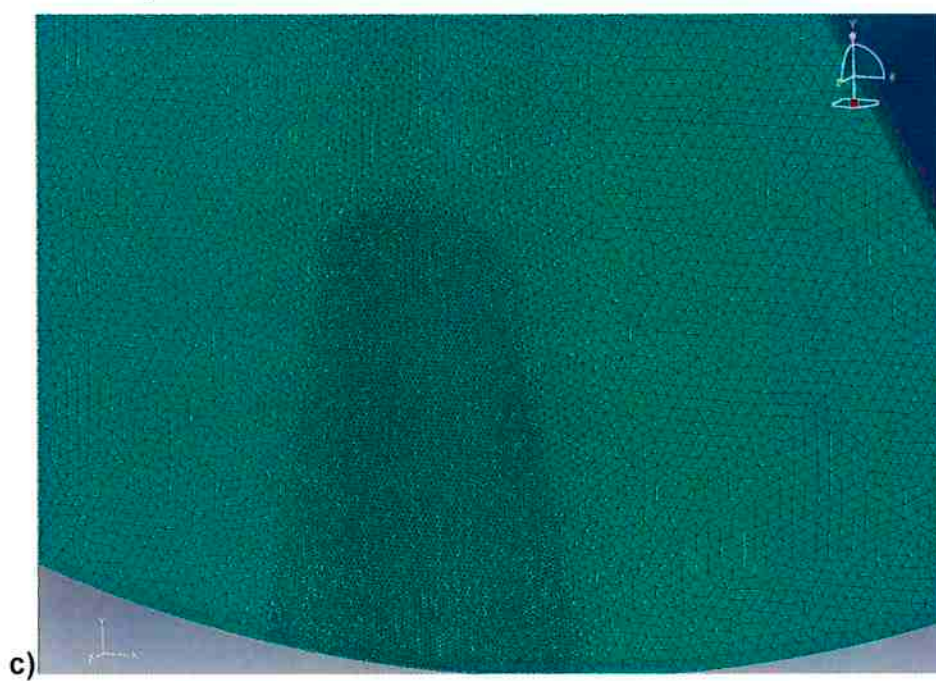
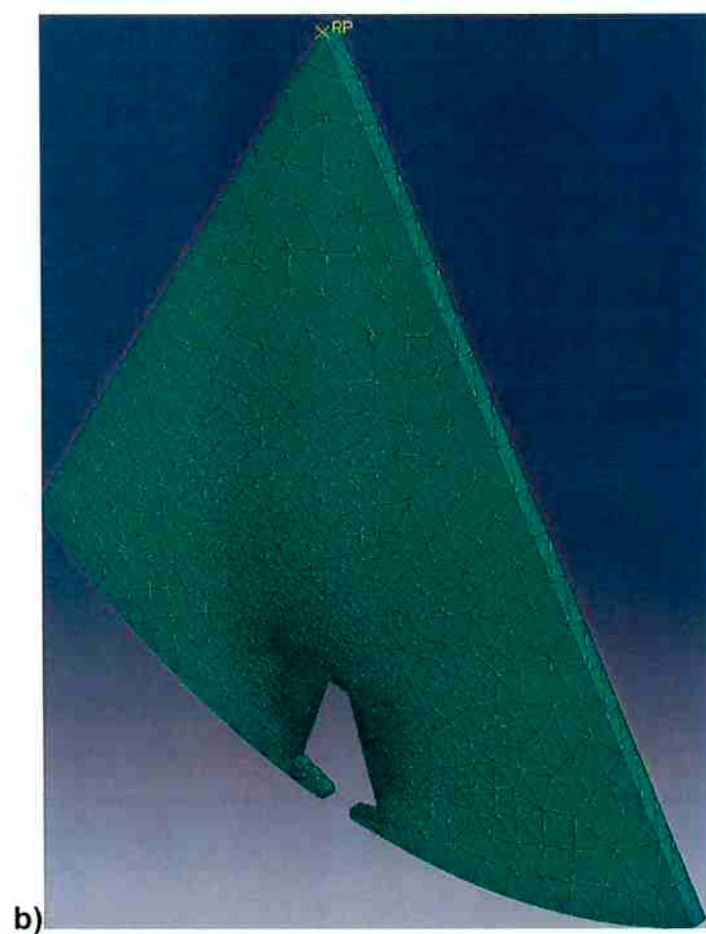


Figura 11: Malhas utilizadas. a) Punção; b)Matriz; c)Chapa

O método de resolução imposto ao processamento foi o dinâmico explícito e os resultados foram divididos em 600 quadros. É importante lembrar que a velocidade do punção e, por consequência, o tempo do processo, não influenciam no resultado, uma vez que a influência da taxa de deformação nas propriedades do material não foi considerada (como descrito adiante) para a simplificação e viabilização do modelo. A velocidade do punção foi considerada como de 5 m/s.

As condições de contorno impostas foram as seguintes:

O modelo foi montado idealizando uma situação na qual ao punção só é permitido se locomover com velocidade constante na direção do puncionamento, ou seja, não há deslocamento lateral nem desaceleração desta ferramenta em nenhum momento do processo. Além disso, a fim de diminuir-se o tempo de simulação, esta ferramenta foi considerada totalmente rígida. Isto diminui o tempo de simulação porque o programa não precisa fazer todos os cálculos (deformações, tensões, etc..) para esta peça.

Situação ideal parecida é imposta à matriz, que é totalmente imóvel, independentemente das tensões, durante todo o processo. Esta ferramenta também foi considerada totalmente rígida para efeito da simulação.

O punção se movimenta no curso até que todo o contorno da chapa seja cortado, depois retorna à posição inicial para que não fique em contato com as rebarbas, o que alteraria os resultados de medidas delas.

A chapa a ser cortada, por sua vez, possui uma região rígida e imóvel e uma região com mobilidade em todas as direções e com propriedades do aço da respectiva simulação.

Na figura 8 c), onde mostra-se a chapa, vê-se uma divisão triangular mais forte. A região dentro desta zona triangular, que entrará em contato com o punção, tem mobilidade e possui as propriedades do aço. A região fora desta zona triangular foi considerada rígida. A linha triangular foi feita com base nas chapas reais, situando-se exatamente na metade da distância entre um entalhe e os entalhes vizinhos.

As propriedades dos materiais utilizados nas peças do modelo foram retiradas do trabalho do Professor Dr. Fernando J. G. Landgraf, de 2001, em seus escri-

tos sobre cortes por puncionamento. São considerados dois aços 1006, comum e semiprocessado. As propriedades destes materiais constam na tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos aços considerados nas simulações.

	1006 Comum	1006 semi-processado
Limite de Escoamento (MPa)	190	300
Limite de resistência(MPa)	311	349
Razão Elástica(MPa)	0,61	0,86
Módulo de Elasticidade(GPa)	205	205
Coeficiente de Poisson	0,29	0,29

As propriedades tabeladas acima permitem ao software calcular as tensões e deformações, porém não são suficientes para a previsão de nucleação e propagação de trincas. Estas previsões são feitas de acordo com os danos causados por cisalhamento.

Para a previsão de nucleação de defeitos (neste caso a formação de bandas de cisalhamento), utilizam-se outras variáveis, a saber: Fração de deformação plástica equivalente, taxa de deformação equivalente e a razão da tensão de cisalhamento, que é definida como a razão entre a tensão equivalente de Von Mises e a máxima tensão de cisalhamento para o material, todas no limite de resistência do material, quando os danos se iniciam.

Para prever a propagação utiliza-se o critério da deformação plástica equivalente no momento da ruptura.

A figura 12 exemplifica as variáveis citadas acima. D representa o dano (*damage*), ε_o^{pl} representa a deformação plástica equivalente no momento que se inicia o D , ε_f^{pl} representa a deformação plástica equivalente no momento da falha.

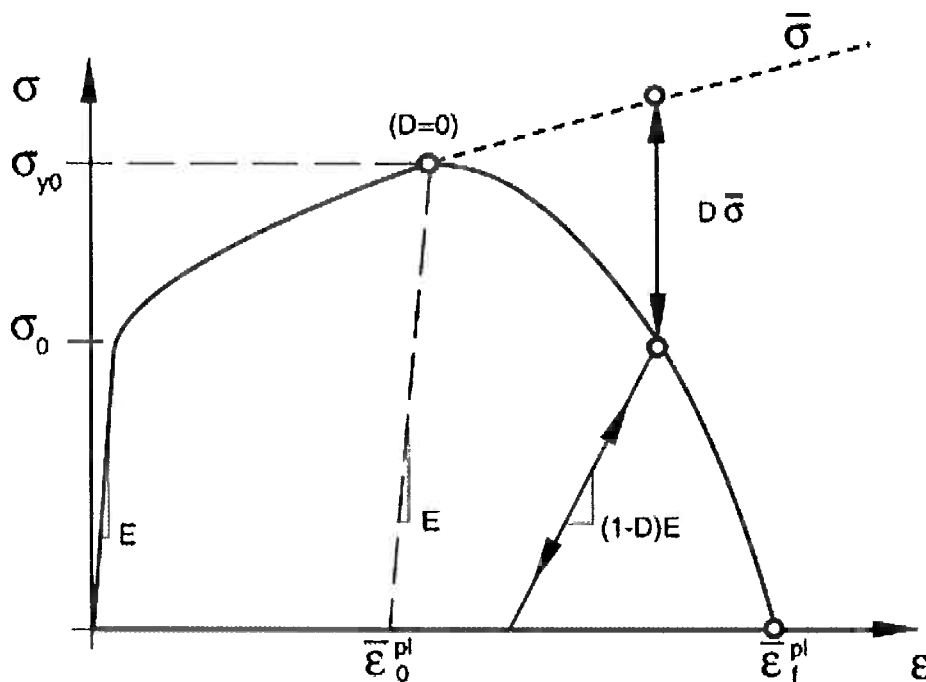


Figura 12: Diagrama mostrando as variáveis necessárias para implementação de previsão de nucleação e propagação de trincas em materiais metálicos. (Manual Abaqus 2007)

Os dados que foram implementados nestas variáveis do modelo foram retiradas do trabalho de Batra e Lear (2004). O trabalho deste autor foi sobre a previsão do início da formação das bandas de cisalhamento em condições adiabáticas em diversos materiais metálicos, medindo a deformação plástica equivalente no limite de resistência e na ruptura dos materiais utilizando o método dos elementos finitos e comparando com os resultados obtidos experimentalmente em laboratório.

No trabalho de Batra e Lear, dois aços têm propriedades mecânicas parecidas com os aços que foram estudados no presente trabalho (Tabela 2). O *Armco Iron*, com limite de escoamento de 175 MPa, e o 1006, com limite de escoamento de 350MPa.

A semelhança entre os limites de escoamento por si só não permite a utilização das propriedades destes dois aços no lugar das propriedades dos aços que foram simulados nesta pesquisa, porém a diferença pequena de deformações plásticas equivalentes de 0,61 para 0,64 entre o *Armco Iron* e o 1006 de Batra, mostrada na figura 13, permite assumir que as deformações plásticas equivalentes do 1006 comum deste trabalho sejam similares às do *Armco Iron*, de Batra, tanto para a forma-

ção de bandas de cisalhamento como para a ruptura. Da mesma maneira, assume-se que as deformações plásticas equivalentes do 1006 semi-processado deste trabalho sejam similares às do 1006 do trabalho de Batra.

Na figura 13 mostra-se uma tabela do trabalho de Batra et al, com os valores das variáveis citadas acima para cada um dos materiais estudados. ASB representa a formação de bandas de cisalhamento adiabáticas. Nota-se que na tabela são dados os valores de deformação plástica equivalente no início de formação das bandas de cisalhamento para diversos materiais metálicos.

Material	Effective strain from		Weak defect							Strong defect					
			r_{max} has peak value			When ASB initiates				ASB speed (m/s)		Axial strain when ASB initiates		ASB speed (m/s)	
	Consideré's condition	Hart's criterion	Axial strain	Effective plastic strain	Homologous temperature	Axial strain	Effective plastic strain	Homologous temperature	Triaxiality ratio	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final
Depleted uranium	0.0498	0.0495	0.038	0.0527	0.0216	0.124	0.4091	0.1598	1.430	124	496	0.072		193	334
Tungsten	0.0045	0.004422	0.024	0.0283	0.0123	0.137	0.4180	0.1757	1.255	140	648	0.086		165	357
S-7 tool steel	0.0173	0.01709	0.044	0.0567	0.0169	0.168	0.5468	0.1627	1.147	157	517	0.114		247	357
4340 steel	0.0491	0.0485	0.141	0.1980	0.0337	0.315	0.6794	0.1201	1.069	158	214	0.203		239	399
7039	0.0818	0.0810	0.207	0.2750	0.0821	0.330	0.6860	0.2127	1.056	235	244	0.233		265	355
aluminum															
2024	0.1013	0.1002	0.218	0.2810	0.0958	0.350	0.6806	0.2433	1.071	183	184	0.251		265	418
aluminum															
1006 steel	0.0782	0.0764	0.183	0.2660	0.0204	0.374	0.6406	0.0525	1.117	98	42	0.260		198	46
OFHC	0.1810	0.1765	0.262	0.3612	0.0198	0.391	0.5886	0.0351	1.081	107	45	0.270		206	26
copper															
Cartridge	0.2649	0.2628	0.310	0.4187	0.0476	0.409	0.5951	0.0742	1.108	102	52	0.276		207	82
brass															
Carpenter	0.1194	0.1142	0.181	0.2566	0.0138	0.427	0.6208	0.0359	1.093	105	22	0.280		199	92
electric iron															
Armco iron	0.1579	0.1516	0.222	0.2998	0.0134	0.433	0.6099	0.0295	1.061	189	79	0.290		198	76

Figura 13: Deformações plásticas equivalentes de diversos materiais metálicos no início da formação de bandas de cisalhamento. (Batra e Lear, 2004)

Com estes dados em mãos ainda faltam os dados de deformação plástica equivalente na ruptura dos materiais. Para isso foi tomado um gráfico do mesmo trabalho de Batra, mostrado na figura 14.

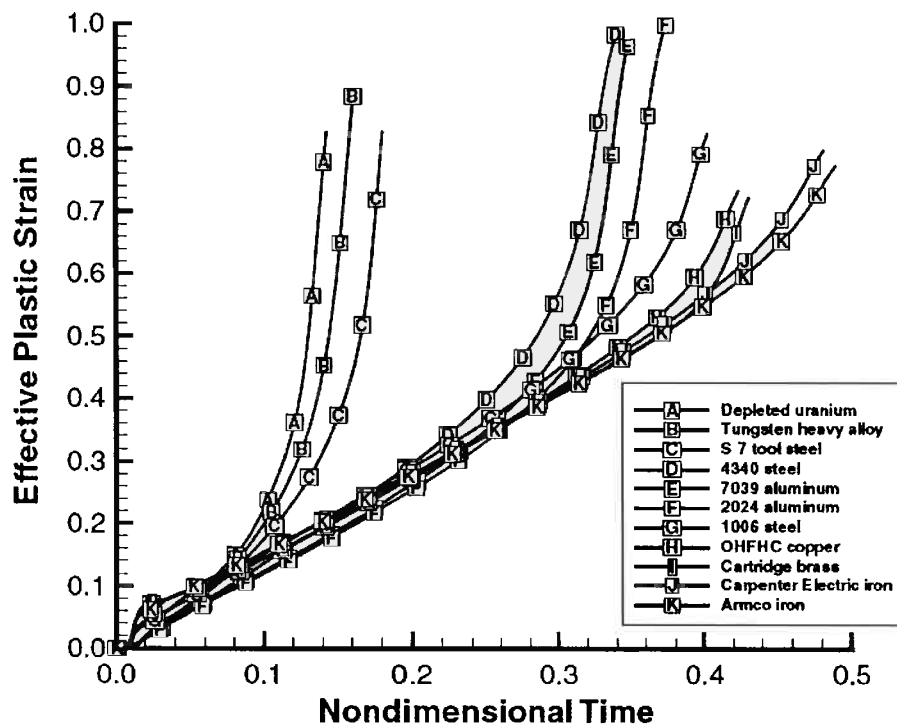


Figura 14: Deformações plásticas equivalentes dos diferentes materiais até a ruptura.

Portanto, os dados para a previsão de nucleação e propagação de trincas nos dois aços estudados neste trabalho são as mostradas na tabela 3:

Tabela 3: Dados para previsão de nucleação e crescimento de trincas nos materiais estudados.

	1006 comum	1006 semi-processado
Deformação Plástica Equivalente no limite de resistência	0,61	0,64
Deformação Plástica Equivalente na ruptura	0,72	0,78

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deram-se por 5 simulações, conforme a tabela 1. Abaixo exemplificam-se as situações finais das simulações.

Na figura 15 vê-se um momento do processo de corte, mostrando as tensões equivalentes de Von Mises agindo na chapa. A matriz foi omitida na figura para a melhor visualização.

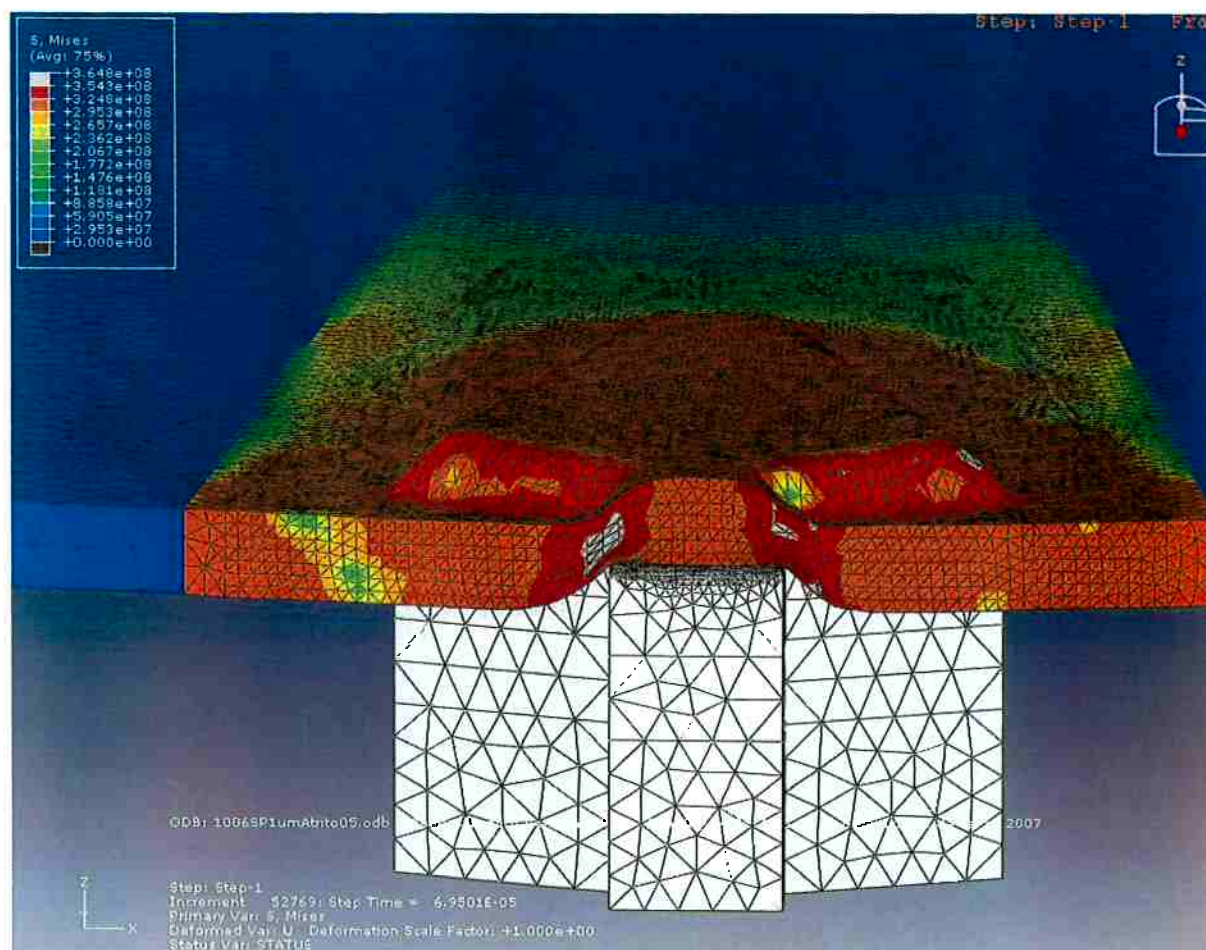


Figura 15: Exemplo de momento do processo de corte omitindo a matriz, mostrando as tensões de Von Mises (em Pa na escala) atuantes na chapa – Simulação 3.

Na figura 16 é mostrado o mesmo momento do processo com a matriz. Nota-se que próximo ao punção, a chapa forma um arco que não fica em contato com a matriz.

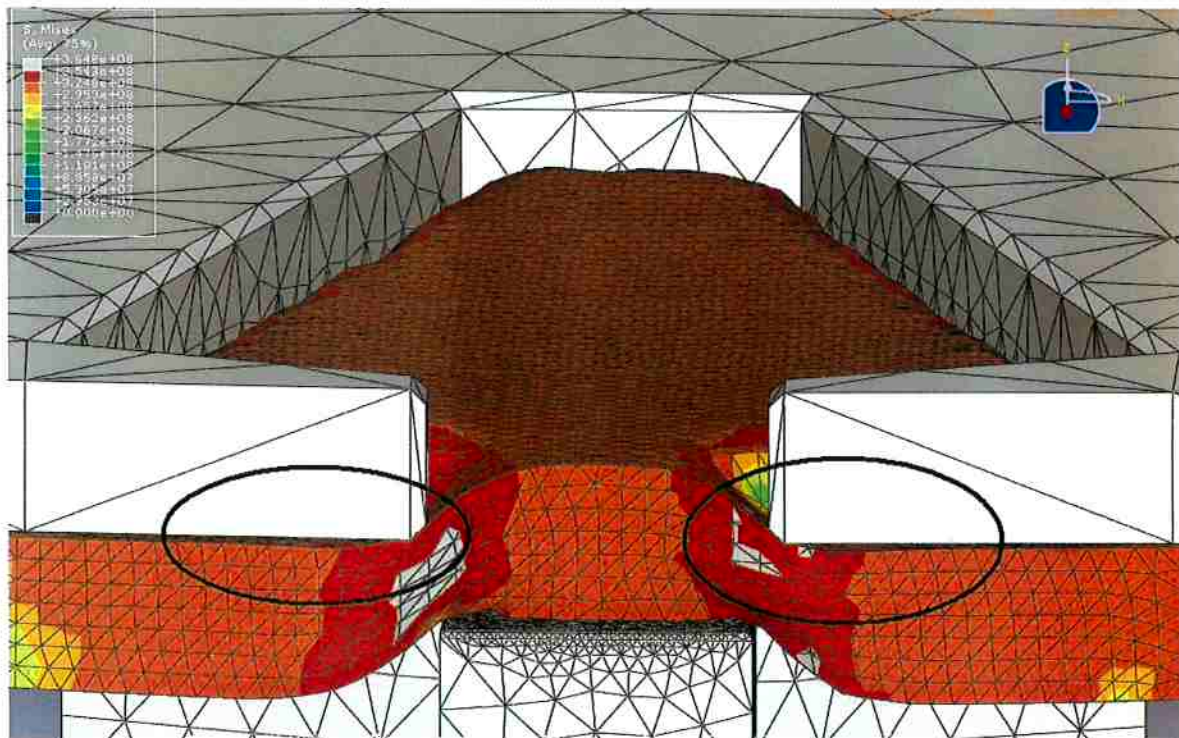


Figura 16: Exemplo de momento do processo de corte mostrando a matriz e as tensões de Von Mises atuantes na chapa – Simulação 3.

A figura 17 mostra o estado final da simulação, com a chapa cortada.

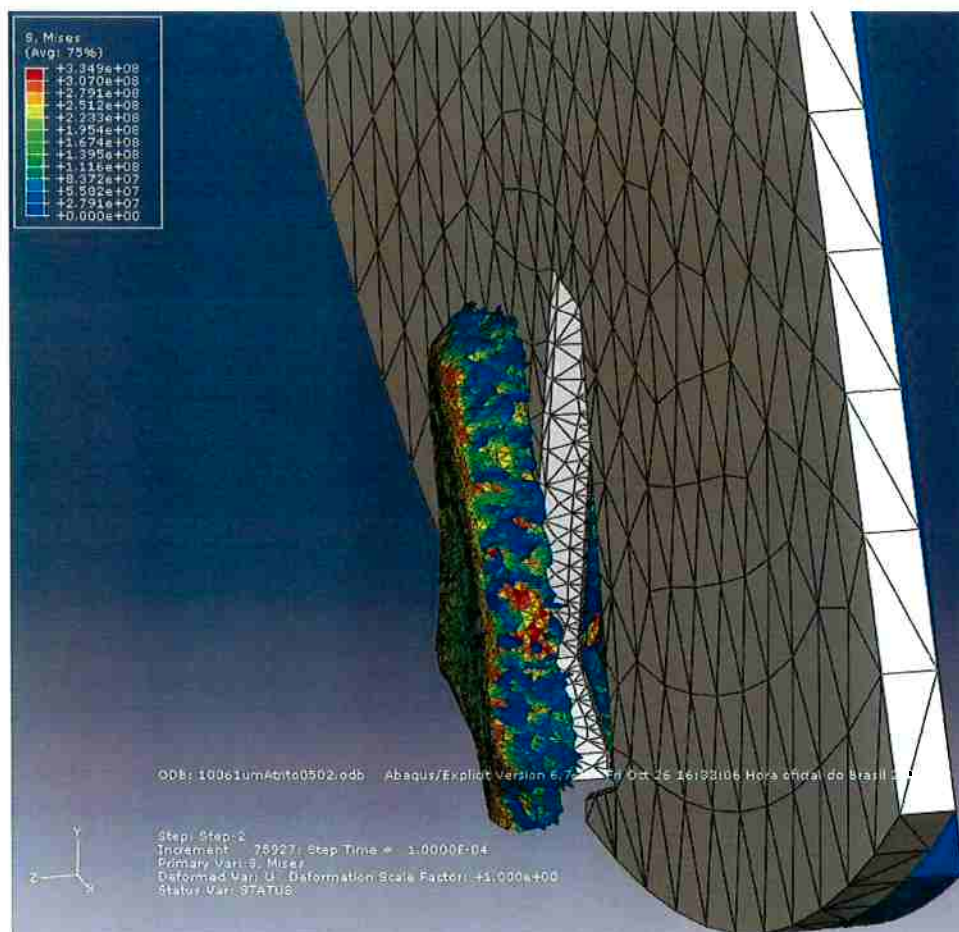


Figura 17: Estado final da simulação com a região cortada se afastando da matriz – Simulação 1.

Na figura 18 vemos a chapa puncionada no plano xz. É possível verificar a região de roll-over e a região onde a malha foi separada.

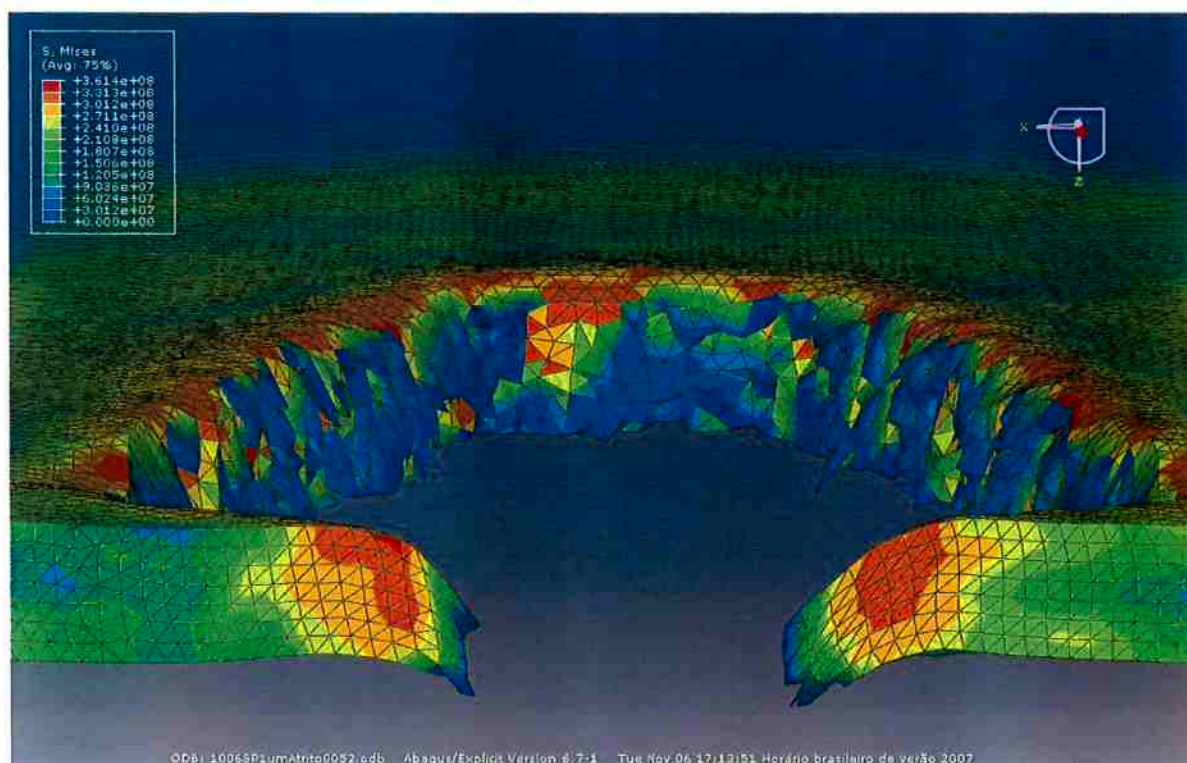


Figura 18: Chapa cortada em visão transversal – Simulação 4.

A partir das cinco simulações foram estimadas a altura da rebarba e a profundidade de Roll-Over, utilizando os valores médios de dez medidas realizadas aleatoriamente no contorno da região puncionada. Nos gráficos mostrados a seguir, o eixo vertical representa a medida da altura da rebarba ou profundidade do Roll-Over em metros, e o eixo horizontal, o tempo em segundos. Observe que a grande variação inicial corresponde à deformação elástica.

3.1 Simulação 1

A simulação 1 contemplou:

- Coeficiente de atrito: 0,5
- Aço: 1006 comum
- Folga Punção-Matriz: 0,1 mm

As medidas da altura da rebarba formada, tomadas nos 10 pontos aleatórios, são mostradas no gráfico da figura 19.

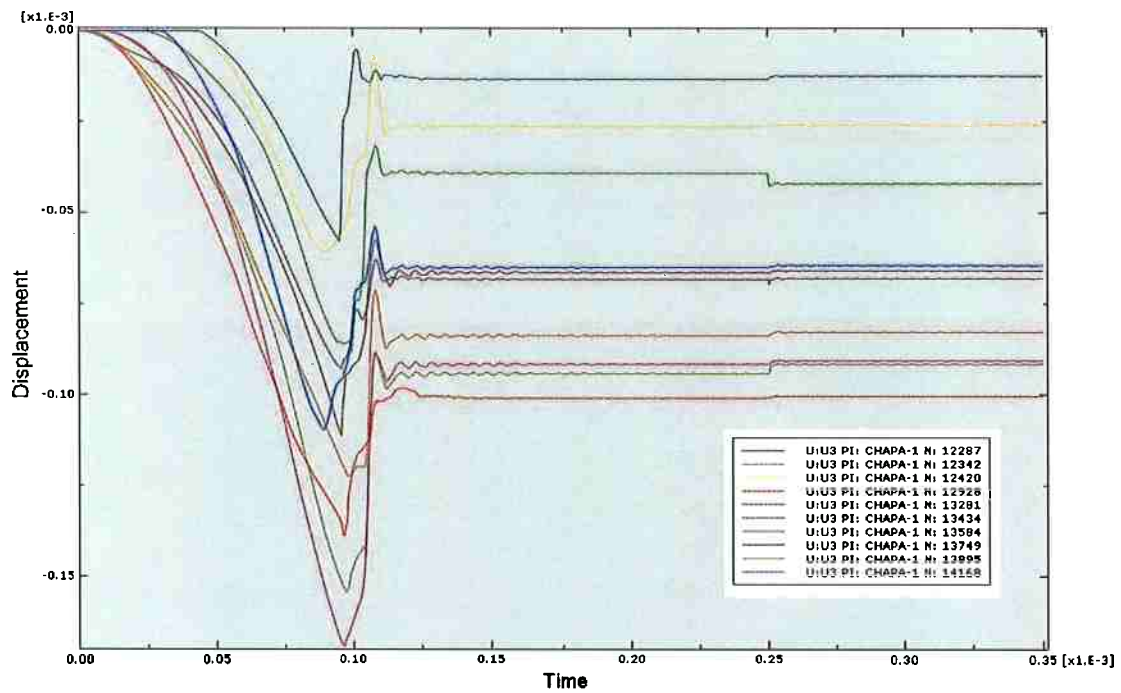


Figura 19: Altura de rebarba X Tempo.

As medidas da profundidade do roll-over são mostradas na figura 20.

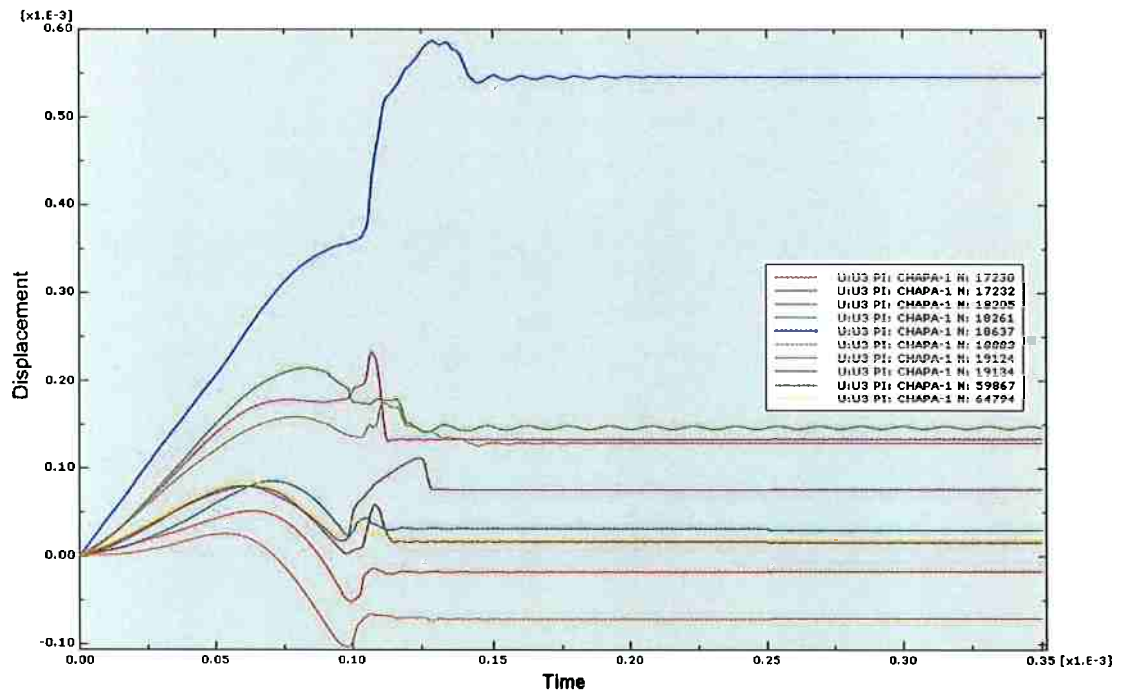


Figura 20: Profundidade do Roll-Over X Tempo.

3.2 Simulação 2

A simulação 2 contemplou:

- Coeficiente de atrito: 0,05
- Aço: 1006 comum
- Folga Punção-Matriz: 0,1 mm

As medidas da altura da rebarba formada, tomadas nos 10 pontos aleatórios, são mostradas no gráfico da figura 21.

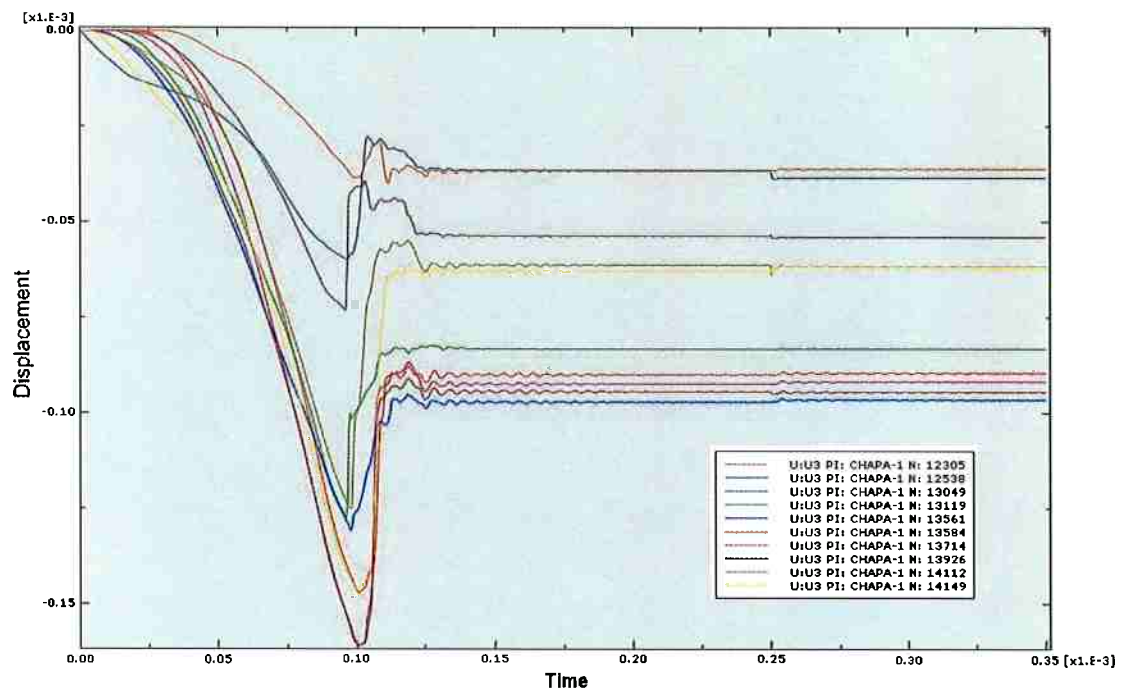


Figura 21: Altura de rebarba X Tempo.

As medidas da profundidade do roll-over são mostradas na figura 22.

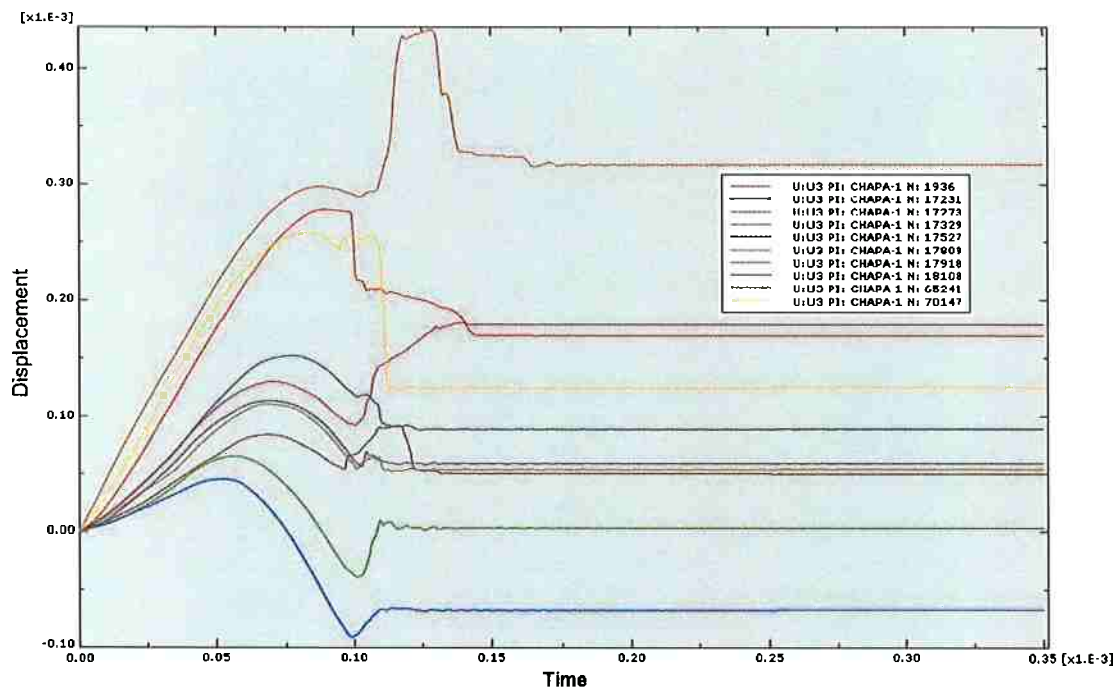


Figura 22: Profundidade do Roll-Over X Tempo.

3.3 Simulação 3

A simulação 3 contemplou:

- Coeficiente de atrito: 0,5
- Aço: 1006 Semi-Processado
- Folga Punção-Matriz: 0,1 mm

As medidas da altura da rebarba formada, tomadas nos 10 pontos aleatórios, são mostradas no gráfico da figura 23.

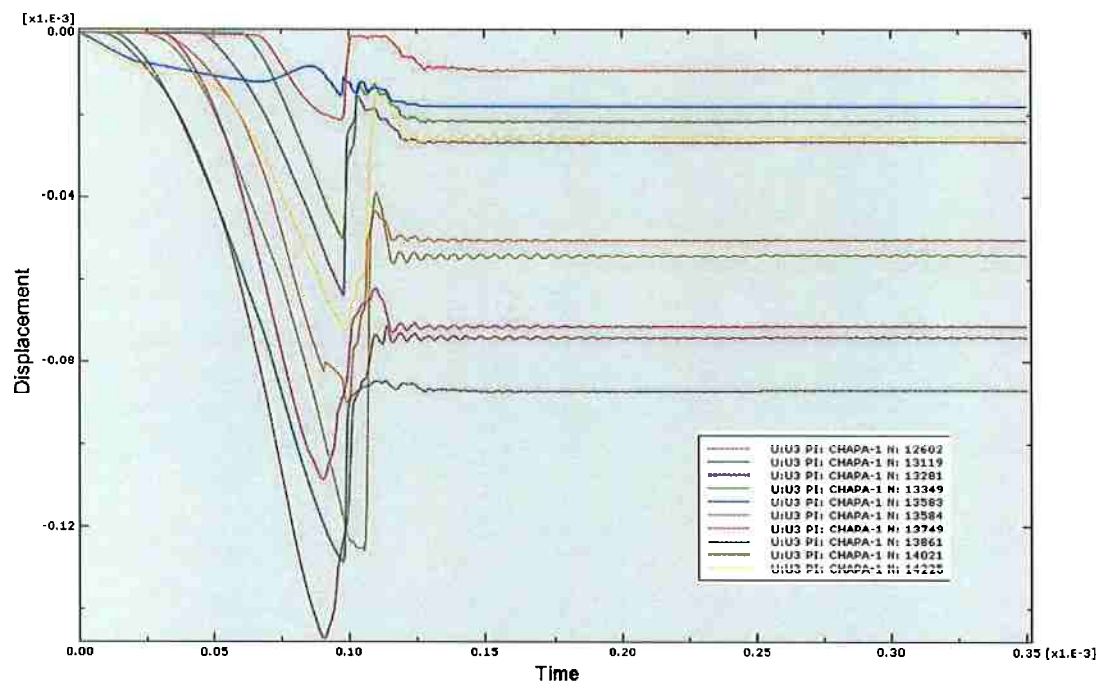


Figura 23: Altura de rebarba X Tempo.

As medidas da profundidade do roll-over são mostradas na figura 22.

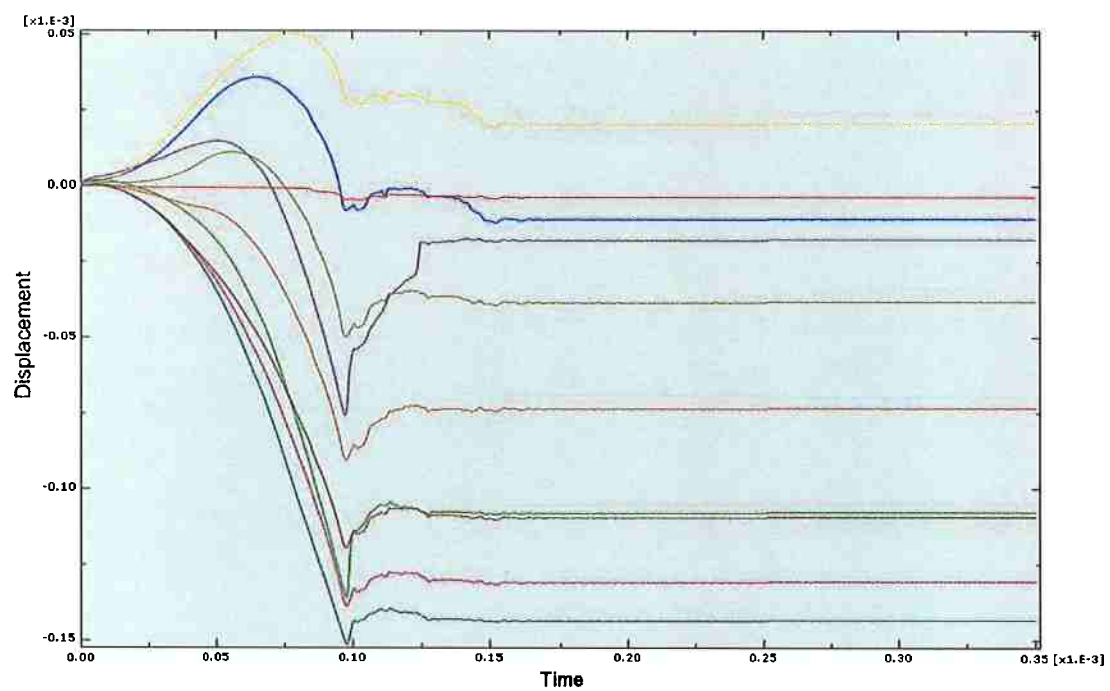


Figura 24: Profundidade do Roll-Over X Tempo.

3.4 Simulação 4

A simulação 4 contemplou:

- Coeficiente de atrito: 0,05
- Aço: 1006 Semi-Processado
- Folga Punção-Matriz: 0,1 mm

As medidas da altura da rebarba formada, tomadas nos 10 pontos aleatórios, são mostradas no gráfico da figura 25.

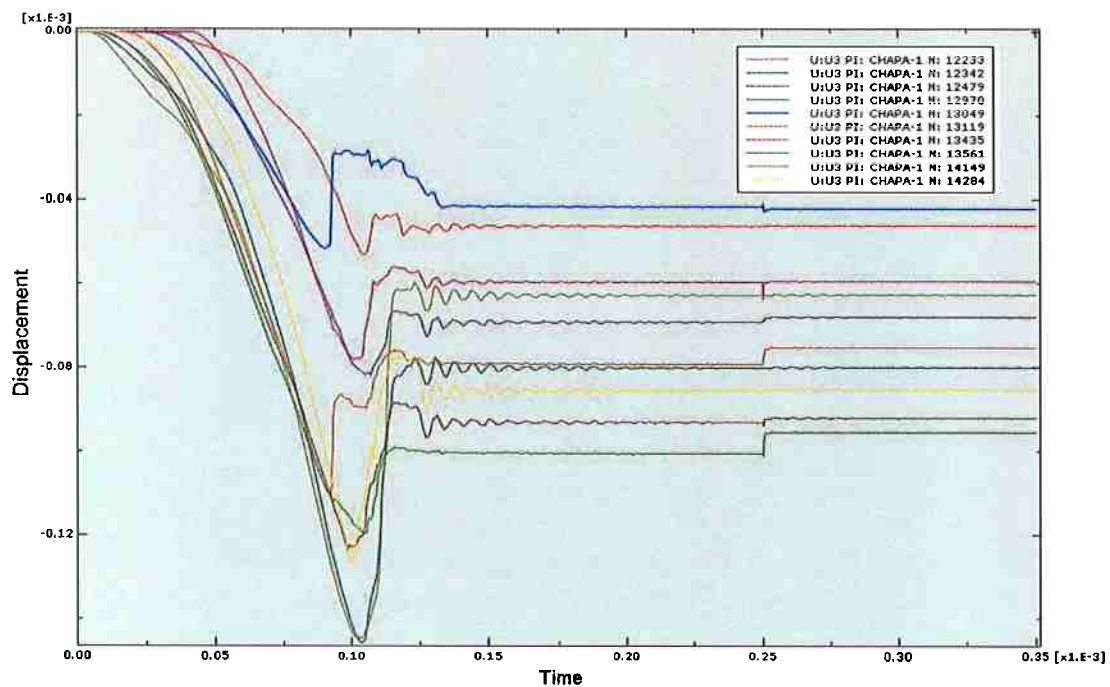


Figura 25: Altura de rebarba X Tempo.

As medidas da profundidade do roll-over são mostradas na figura 26.

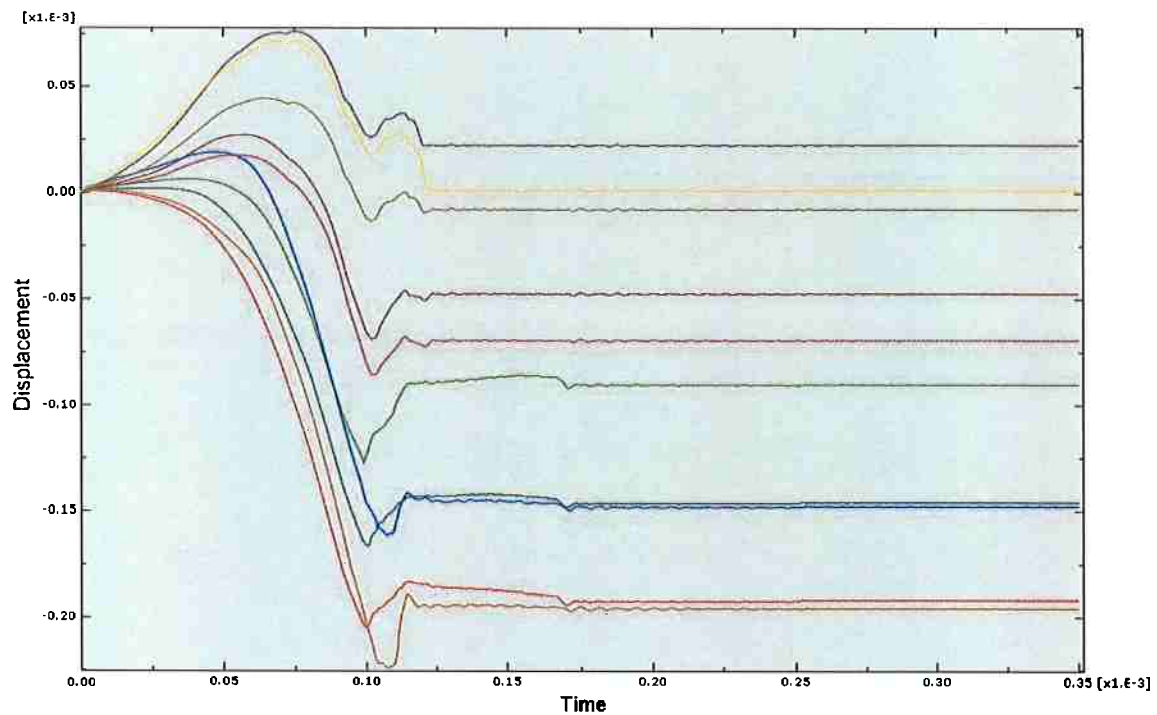


Figura 26: Profundidade do Roll-Over X Tempo.

3.5 Simulação 5

A simulação 5 contemplou:

- Coeficiente de atrito: 0,5
- Aço: 1006 Semi-Processado
- Folga Punção-Matriz: 0,2 mm

As medidas da altura da rebarba formada, tomadas nos 10 pontos aleatórios, são mostradas no gráfico da figura 27.

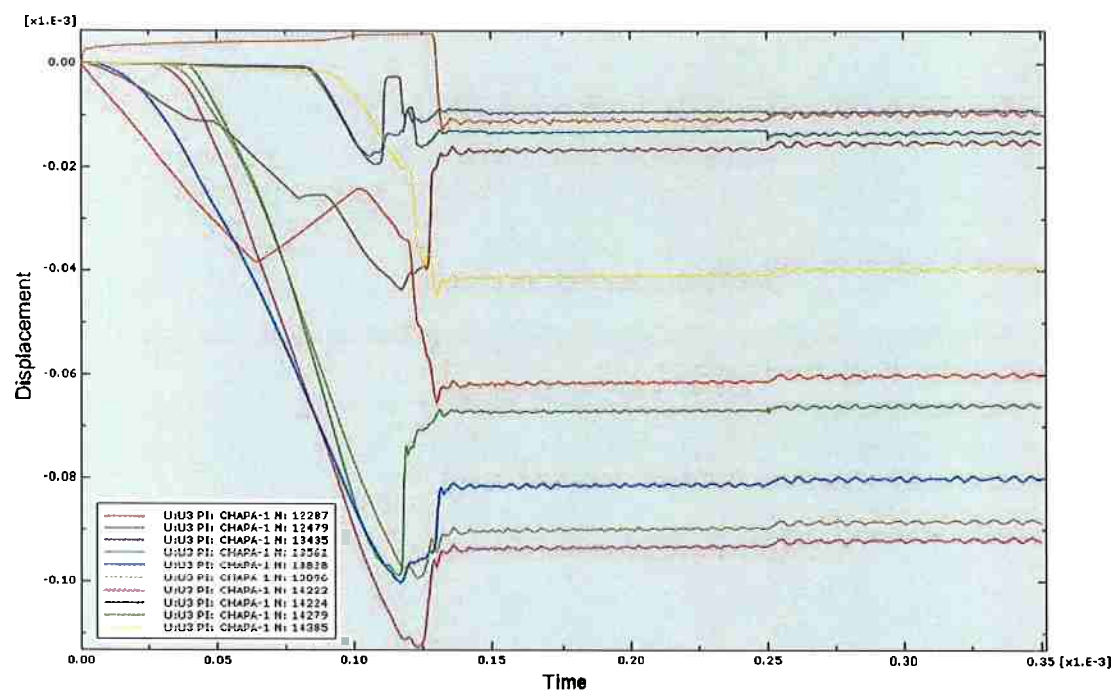


Figura 27: Altura de rebarba X Tempo.

As medidas da profundidade do roll-over são mostradas na figura 28.

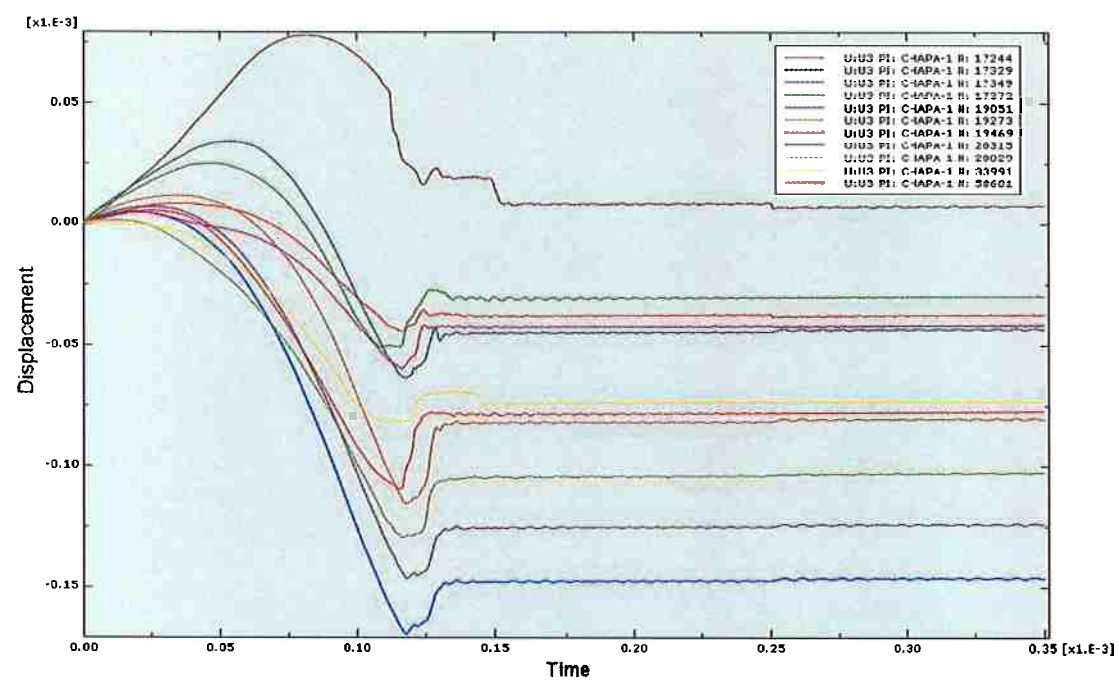


Figura 28: Profundidade do Roll-Over X Tempo.

Em todos os casos, a partir das medidas da altura da rebarba como da profundidade do roll-over, vê-se que o material sofre primeiramente deformação elástica, que gera as maiores inclinações das curvas. É possível verificar-se a recuperação elástica do material e sua posterior estabilização, mantendo alguma porcentagem de deformação plástica. Mesmo na região estabilizada da curva pode-se perceber certa oscilação, que é causada, também, pelo comportamento elástico do material.

Nas figuras 29 e 30, abaixo, mostram-se gráficos comparativos entre os resultados das simulações, para altura média de rebarba e profundidade média de roll-over, respectivamente.

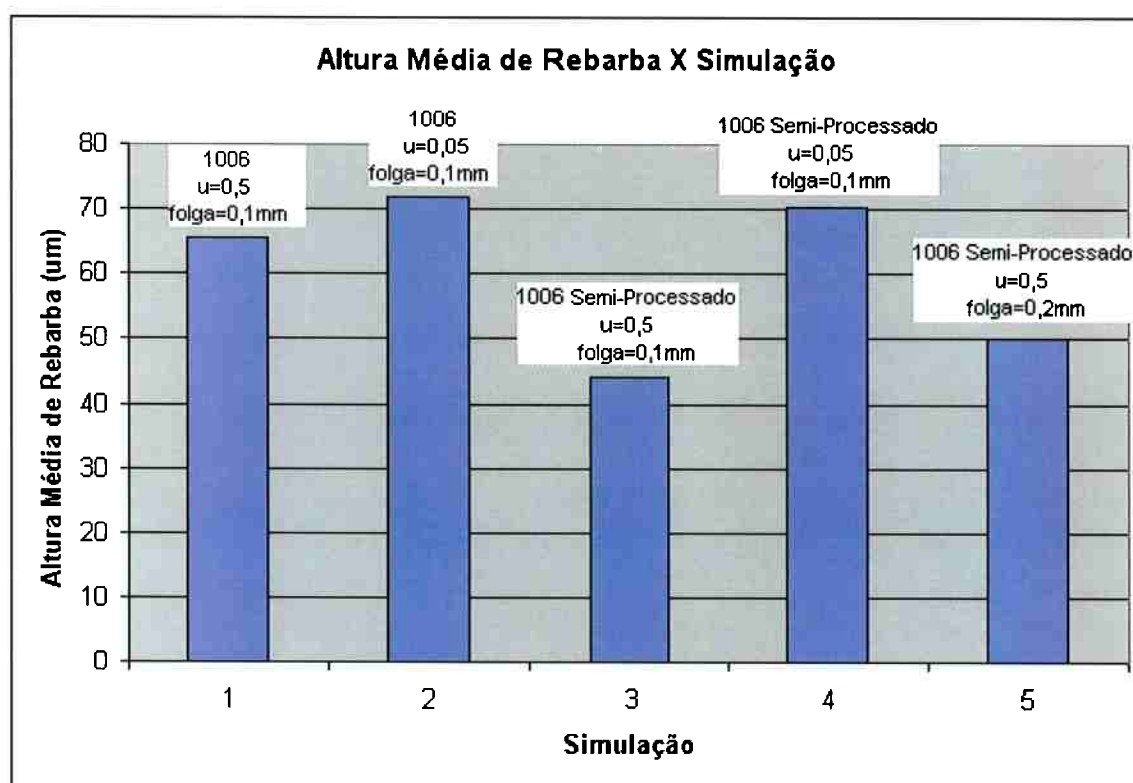


Figura 29: Gráfico comparativo entre os tamanhos médios de rebarba de cada simulação.

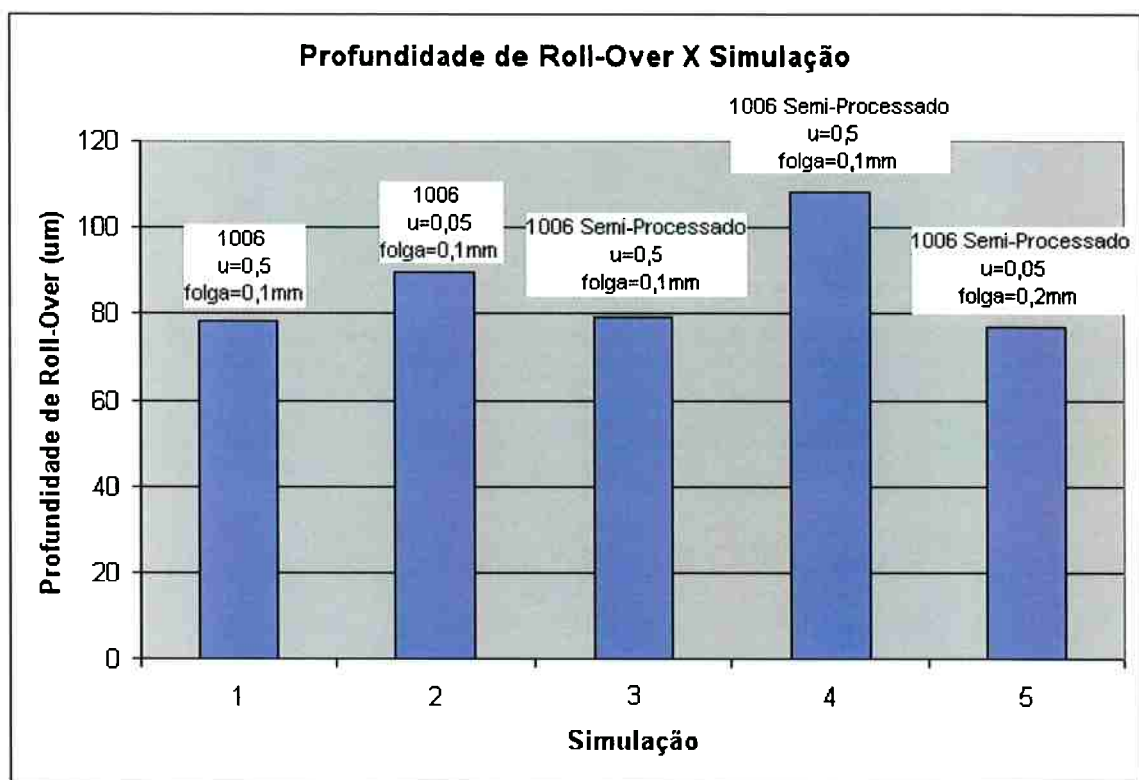


Figura 30: Gráfico comparativo entre as profundidades médias de Roll-Over de cada simulação.

Como se pôde ver no gráfico da figura 29, o tamanho médio de rebarba diminuiu quando se utilizou um aço de menor razão elástica, pois os tamanhos médios de rebarba de 3 e 4 são menores que de 1 e 2, respectivamente. Isso se deve à menor ductilidade do aço. O tamanho médio de rebarba também aumentou com a utilização de mais lubrificação (menor coeficiente de atrito), tanto no caso do aço 1006 comum quanto no semi-processado. O menor coeficiente de atrito resulta em menor fator de triaxialidade na chapa deformada, maior ductilidade e conseqüentemente maior deformação plástica antes do estouro, resultando em maior rebarba.

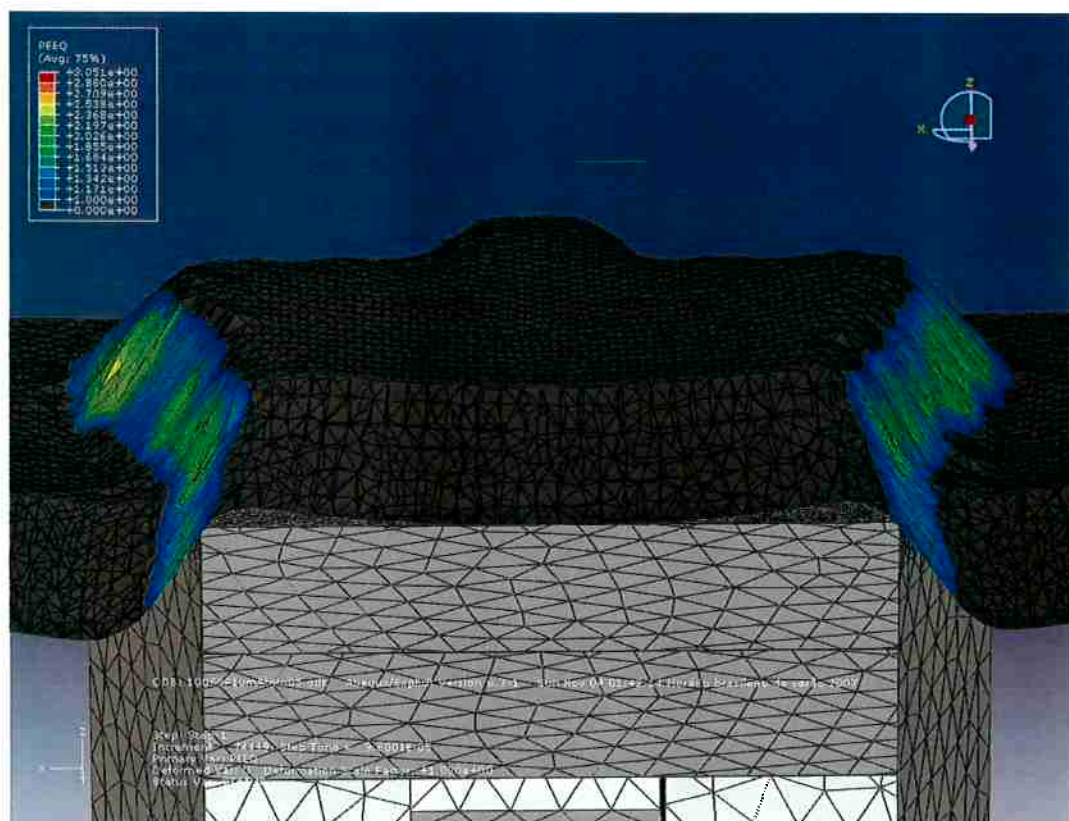
Comparando-se a simulação 3 com a 5, onde o mesmo aço é cortado com a mesma lubrificação porém com o dobro de luz entre a ferramenta e a matriz, nota-se que o tamanho médio da rebarba aumentou.

Neste ponto, poder-se-ia perguntar se o tamanho máximo de rebarba não teria que ser igual ao raio de curvatura das ferramentas, já que a menor área resistente da chapa encontra-se entre as duas curvaturas das ferramentas. A resposta é dada pela quantidade de deformação plástica equivalente que aparece na chapa, conforme

mostrado na figura 31, na qual é feito um corte no plano xy. Prestando-se atenção à escala de cores, nota-se que a região no plano determinado pelas arestas das ferramentas possui coloração azulada, enquanto o terço superior da face lateral da chapa cortada recebe coloração verde, que representa deformações plásticas equivalentes maiores que a cor azul.

O ponto onde a malha é primeiramente rompida, na figura 31 b), é indicado pelos círculos vermelhos, justificando a rebarba maior que o raio de curvatura da matriz. Nota-se que a região do início do estouro situa-se no terço superior da face lateral da chapa cortada. Infelizmente não foi possível estimar variações da altura de estouro (% de corte em relação à área fraturada) em função dos parâmetros de simulação.

a)



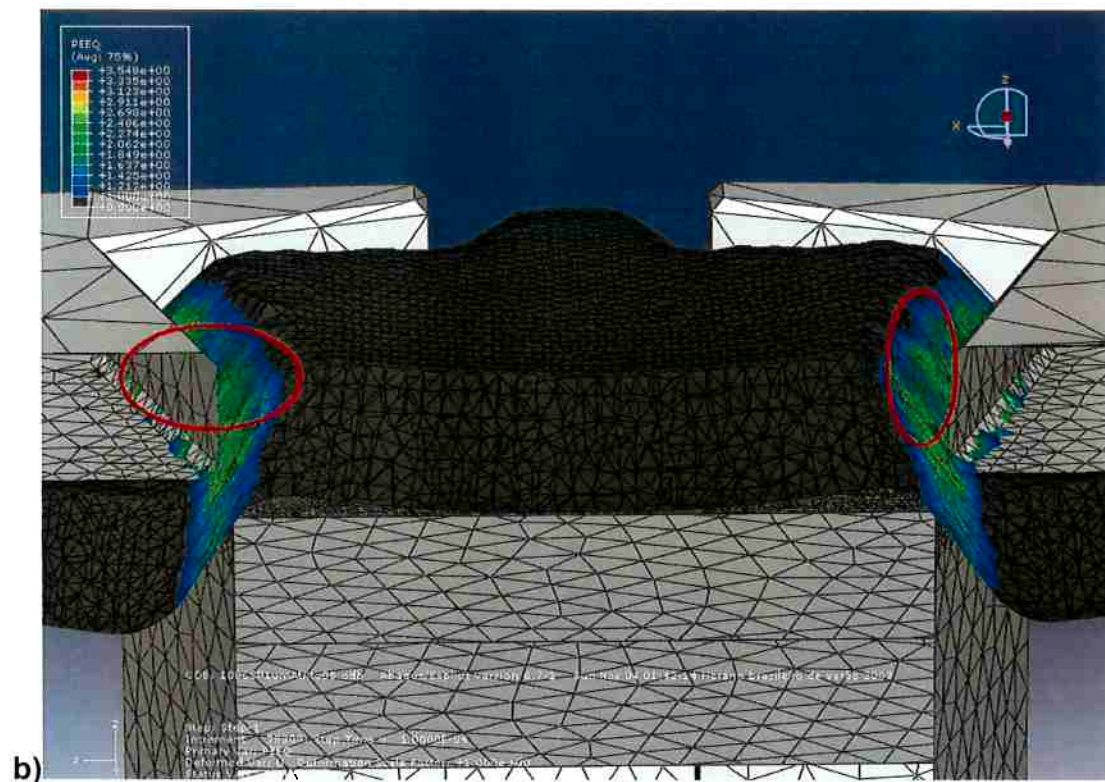


Figura 31: Porcentagem de deformação plástica equivalente na chapa posterior ao raio de curvatura da matriz. a) Matriz omitida da imagem; b) Matriz mostrada e pontos de rompimento da malha circulados.

A profundidade de roll-over na chapa aumentou com a utilização de maior lubrificação e também aumentou com a utilização do aço com menor razão elástica. Comparando-se a simulação 3 com a 5, verifica-se que com o aumento da luz entre as ferramentas e mantendo-se o mesmo material e lubrificação, a profundidade média de roll-over diminuiu.

Na figura 32 mostram-se figuras dos estados finais da simulação em comparação com micrografias reais do produto cortado.

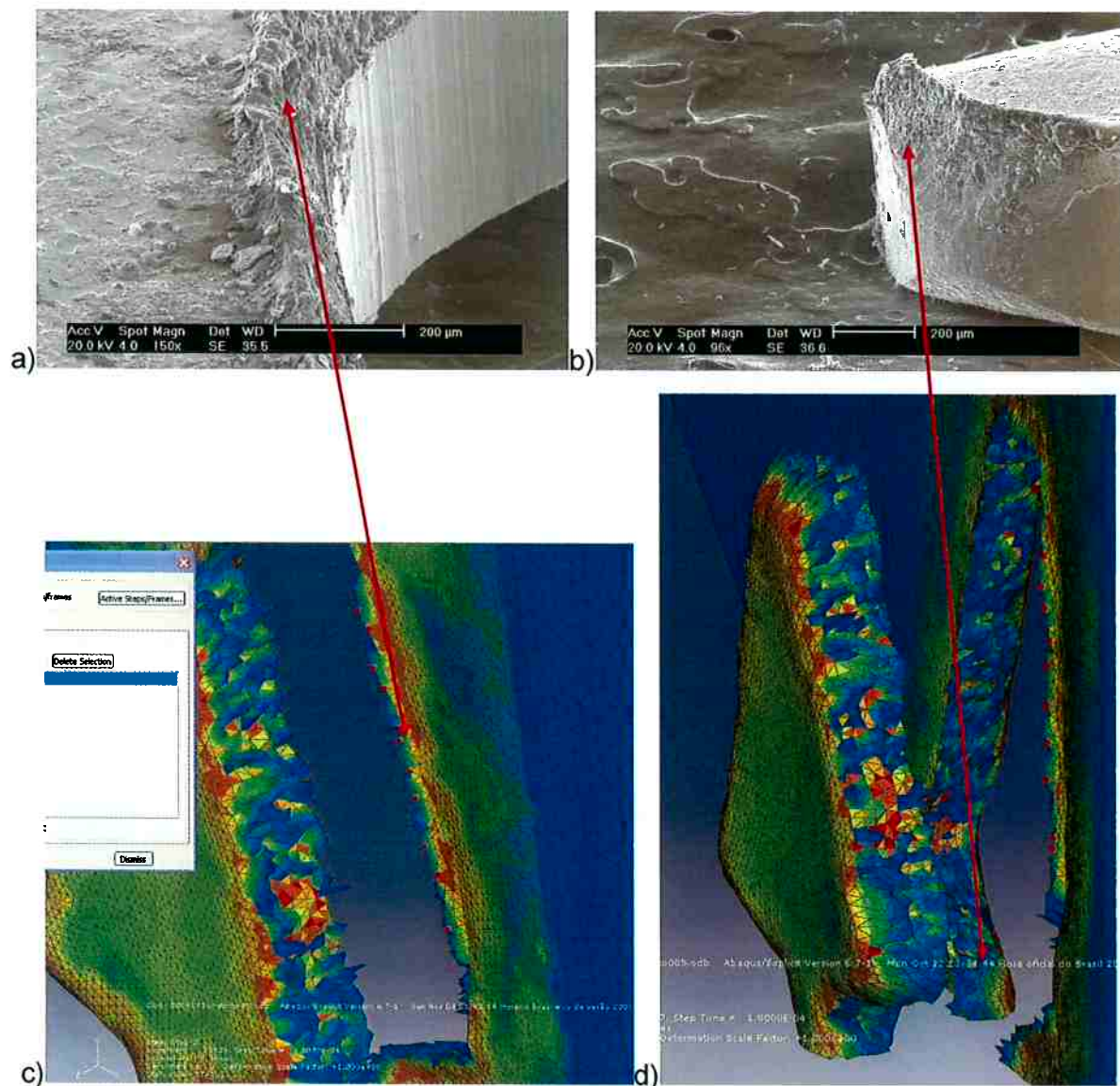


Figura 32: Comparação entre rebarbas das micrografias reais e das formadas na simulação. a) e b) Micrografias do contorno cortado; c) e d) Resultado das simulações.

4. CONCLUSÕES

Não foi possível estimar variações da altura de estouro (% de corte em relação à área fraturada).

A utilização de aços com menor razão elástica reduzem o tamanho da rebarba nas lâminas cortadas.

A utilização de lubrificantes faz com que a rebarba tenha maior altura nas lâminas puncionadas.

O aumento da luz entre as ferramentas implica em obter-se maiores rebarbas nas lâminas cortadas.

A altura da rebarba pode ser maior do que o raio de curvatura das ferramentas, pois há um acúmulo de deformações plásticas que fazem com que as maiores deformações plásticas equivalentes ocorrem na região posterior ao raio de curvatura, possibilitando que o material rompa nesta região.

A profundidade de roll-over aumentou com a utilização de aços com menor razão elástica.

A profundidade de roll-over aumentou com a utilização de menores coeficientes de atrito.

Dobrando-se o tamanho da luz entre as ferramentas, obteve-se menor profundidade de roll-over.

5. BIBLIOGRAFIA

- 1 –Corrada, G. Estampos de metal duro para lâminas magnéticas. 1a. CIME, Anais, Statomat, Curitiba, 1996.**
- 2 – Landgraf, F.J.G., Estampagem - Curso IPT – Aços elétricos, cap. 12, págs. 1 – 20, Maio (2001).**
- 3 – BATRA, R.C. Adiabatic shear banding in plane strain tensile deformations of 11 thermoelasticviscoplastic materials with finite thermal wave speed. International Journal of plasticity 21 1521-1545 (2005).**
- 4 – Yashiki, H., Kaneko, T. Effect of alloying elements on response of non-oriented electrical steels to stamping operations, JMEPEG, v.1, pag. 29-34, 1992.**
- 5 – Oldani, C.R., Actis, F.^a, Cohen, G.B. Correlación de propiedades mecánicas y comportamiento frente al matizado de aceros de bajo carbono de uso eléctrico – I Taller sobre materiales magneticos e sus aplicaciones – pag. 43-51 Cordoba, 1995.**
- 6 – ASM committee on press forming of steel – Blanking of low carbon steel. Journal of material engineering and performance, Vol.1, pags. 31-44, Fevereiro 1992.**
- 7 – BATRA, R.C., Zhang, X., Wright, T.W. Critical Strain ranking of 12 materials in deformations involving adiabatic shear stress bands. Brief notes – Transactions of the ASME, Vol. 62, pags. 252-255, Março 1995.**
- 8 – Abaqus V.6.7 Manual and Documentation – Abaqus/CAE user's manual and Abaqus analysis User's Manual – 2007.**

9 – Vega et al., Modelamento de processos de conformação mecânica por elementos finitos. Seminário de conformação mecânica II, EPUSP, São Paulo, 2007.

10 -- JB Lightstone, RB Mazzarella - US Patent 3,979,981, 1976.

11 – Metals Handbook, v.14, pags. 60-68.