

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola De Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM PARA
MINIATURIZAÇÃO DE MOTORES

Uilian Boff

Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia

Porto Alegre
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola De Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM PARA
MINIATURIZAÇÃO DE MOTORES

Uilian Boff
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2012

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Lírío Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Henrique Corrêa de Souza (UNIJUI)

Prof. Dr. Moisés de Mattos Dias (FEEVALE)

Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha (UFRGS)

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

*Aos meus queridos pais Dimas Boff e
Aida Rosane Fernandes Boff.
A minha namorada Naiana Corrêa.*

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta e indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor Dr.-Ing. Lírio Schaeffer pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Aos colegas Eng. Msc. Luis Fernando Folle e Eng. Msc. Halston Mozetic pelas sugestões e observações valiosas ao longo de todo o trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM, que contribuíram no processo de pesquisa para a realização desse trabalho.

Aos bolsistas Acad. Rodrigo Limberger e Acad. Janaina da Rosa pela ajuda tanto nos ensaios práticos como na realização desse trabalho.

A secretária do LdTM, Agatha Bittencourt.

A empresa ArcelorMittal por disponibilizar o material, permitindo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq que colaborou nessa pesquisa financiando a minha bolsa de estudos.

Ao SENAI CIMATEC da Bahia por disponibilizar as licenças para uso do software eta/DYNAFORM e LS-Dyna.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV.
SUMÁRIO	V.
LISTA DE FIGURAS	VII.
LISTA DE TABELAS	XI.
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI.
LISTA DE ABREVIATURAS	XIII.
RESUMO	XIV.
ABSTRACT.....	XV.
1 INTRODUÇÃO.....	16
2 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Conformação de chapas	19
3.2 Princípios do processo de estampagem de chapas	19
3.2.1 Curva Limite de Conformação.....	19
3.2.2 Deformações e tensões num copo	22
3.2.3 Capacidade de embutimento do material	23
3.3 Corte por cisalhamento	25
3.4 Corte por eletroerosão a fio.....	26
3.5 Características dos materiais	27
3.5.1 Aço carbono ABNT 1010	27
3.5.2 Aço inox ABNT 304	27
3.5.3 Aço elétrico ABNT 35F 420M	29
3.6 Micromotores	29
3.7 Microestampagem.....	32
3.7.1 Problemas no mundo da microconformação.....	33
3.7.2 Conportamento do material na microconformação.....	34
3.7.3 Visioplaticidade	36
3.7.4 Atrito em microestampagem.....	37
3.8 Principais estudos desenvolvidos sobre microestampagem.....	38
3.9 Análise por elementos finitos.....	40
3.9.1 Introdução ao método de elementos finitos empregado no trabalho.....	41
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
4.1 Ensaios para obtenção das propriedades mecânicas do aço Inox ABNT 304 e ABNT 1010....	44
4.1.1 Ensaio de tração	44
4.1.2 Índice de anisotropia	46
4.2 Descrição do processo de corte das lâminas do rotor e do estator	46
4.2.1 Ferramenta para o corte convencional do rotor e estator	46
4.2.2 Corte do rotor e estator por eletroerosão a fio	48
4.3 Simulação computacional do processo de microestampagem	49
4.4 Descrição do processo de microestampagem da carcaça.....	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56

5.1	Análise da superfície de corte das lâminas do rotor e do estator do micromotor	56
5.1.1	Corte convencional.....	56
5.1.2	Corte por eletroerosão a fio.....	59
5.2	Resultados da simulação computacional para o processo de microestampagem do copo	61
5.3	Microestampagem da carcaça	71
6	CONCLUSÕES	75
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas empregadas no desenvolvimento dos componentes do micromotor.	17
Figura 2. Desenho esquemático do processo de estampagem de copos cilíndricos. Fonte: Oliveira, (2003).....	19
Figura 3. Curva Limite de Conformação para folhas de alumínio AL 99,5 com espessuras de 20 μ m e 100 μ m 20. Fonte: Vollertsen, (2012).....	20
Figura 4. Desenho esquemático das deformações principais inseridas no Diagrama Limite de Conformação. Adaptada de Bressan, (1998).	21
Figura 5. Deformações principais em um copo. Adaptada de Netto, (2004).....	22
Figura 6. Tipos de tensões que ocorrem na estampagem profunda. Adaptada de Garcia <i>et al</i> , (2000).	23
Figura 7. Representação esquemática da estampagem de uma peça de formato cilíndrico. Adaptade de Folle, (2008).	24
Figura 8. Elementos básicos de uma ferramenta de corte por cisalhamento. 1- punção, 2 - matriz, 3 - base da ferramenta, 4 - chapa, f - folga entre punção e matriz. (Fonte: Souza, 2001)	25
Figura 9. Partes principais de uma peça cisalhada. a – zona de arredondamento, b – zona cisalhada, c – zona fraturada, d – rebarba, e – empenamento. (Fonte: Souza, 2001).....	26
Figura 10. Esquema do micromotor utilizado no endoscópio. Fonte: Xinli <i>et al</i> , (2002).	30
Figura 11. Componentes do micromotor. a) carcaça do micromotor. b) rotor e estator do micromotor.	31
Figura 12. Desenho esquemático do micromotor a ser construído por microestampagem.	32
Figura 13. Drive de disco rígido com capacidade de um gigabyte (IBM). Fonte: Geiger <i>et al</i> , (2001).	33
Figura 14. Comparação entre um macro e um micro copo. Fonte: Vollertsen <i>et al</i> , (2004).	33
Figura 15. Problemas do mundo da microconformação. Fonte: Geiger <i>et al</i> , (2001).	34
Figura 16. Ensaio de tração para diferentes espessuras em Cu 99,9%. Fonte: Hoffmann e Hong, (2006).	35
Figura 17. Relação da superfície de grãos para o volume de grãos. Fonte: Vollertsen <i>et al</i> , (2004). .	36
Figura 18. Influência da Granulação (a) distribuição mais uniforme da deformação no material encruado. (b) Distribuição não homogênea das deformações para material de granulação grosseira. Fonte: Geiger <i>et al</i> , (2001).	37
Figura 19. Coeficiente de atrito em função do diâmetro do punção. Fonte: Vollertsen e Hu, (2007).	38

Figura 20. Conjunto montado no DYNAFORM para a simulação do processo de estampagem utilizado. Fonte: Folle, (2008).	43
Figura 21. Corpo de prova para ensaio de tração.....	44
Figura 22. Curva de escoamento obtida através do ensaio de tração para o aço ABNT 1010.	45
Figura 23. Curva de escoamento obtida através do ensaio de tração para o aço inox ABNT 304.	45
Figura 24. Ferramental empregado no corte das lâminas do rotor e do estator.	47
Figura 25. Desenho esquemático da ferramenta de corte das lâminas do rotor e do estator	48
Figura 26. Equipamento utilizado para o corte por eletroerosão a fio. Fonte: Fanuc, (2010).	49
Figura 27. Geometrias utilizadas na simulação. a) microestampagem convencional em dois estágios para o aço ABNT 1010 e aço inox ABNT 304. b) microestampagem em dois estágios com uma pré-forma inicial para o aço ABNT 1010.....	49
Figura 28. Representação esquemática da montagem no DYNAFORM para uma simulação em dois estágios para o aço inox ABNT 304 e ABNT 1010.....	51
Figura 29. Representação esquemática da montagem no DYNAFORM para uma simulação em dois estágios para o aço ABNT 1010 com uma pré-forma inicial.....	51
Figura 30. Desenho em corte das ferramentas utilizadas para microestampagem do copo. a) ferramenta de primeiro estágio com uma pré-forma inicial. b) ferramenta de primeiro estágio convencional. c) ferramenta de segundo estágio..	52
Figura 31. Dimensões de punção e matriz empregados no primeiro estágio com uma pré-forma inicial.....	52
Figura 32. Dimensões de punção e matriz empregados no primeiro estágio convencional.	53
Figura 33. Dimensões de punção e matriz empregados no segundo estágio, estágio final.	53
Figura 34. Ferramenta de corte do blank.	54
Figura 35. Conjunto de ferramentas utilizadas para microestampagem da carcaça. a) ferramenta utilizada para a estampagem das peças. b) conjunto de matrizes e punções	54
Figura 36. Equipamento utilizado para microestampagem.....	55
Figura 37. Lâminas obtidas pelo processo de corte em matriz. a) estator. b) rotor	56
Figura 38. Conjunto rotor e estator em formato de pacote. a) estator. b) rotor	56
Figura 39. Foto microscópica da região de corte do estator pelo processo de corte em matriz. a) parte inferior do estator, região da chapa em que não entrou em contato direto com o punção. b) parte posterior do estator, onde houve o contato direto com o punção, ocorrendo o cisalhamento e a zona de fratura da peça. c) região de corte do polo do estator. d) região de corte entre os polos do estator.	57

Figura 40. Foto microscópica da região de corte do rotor pelo processo de corte em matriz. a) parte posterior do rotor, onde houve o contato direto com o punção, ocorrendo o cisalhamento e a zona de fratura da peça. b) rebarba. c) região de corte do polo do rotor. d) região de corte entre os polos do rotor.....	58
Figura 41. Lâminas obtidas pelo processo de corte por eletroerosão a fio. a) estator. b) rotor	59
Figura 42. Conjunto rotor e estator em formato de pacote. a) estator. b) rotor	59
Figura 43. Foto microscópica da região de corte do estator obtida pelo processo de eletroerosão a fio. a) região posterior do estator. b) região inferior do estator. c) polo do estator. d) rebarba causada pelo fio ao final do processo.....	60
Figura 44. Foto microscópica da região de corte do rotor obtida pelo processo de eletroerosão a fio. a) rotor com rebarba em um dos polos. b) polos do rotor. c) região posterior do rotor. d) região inferior do rotor.....	61
Figura 45. Resultado da simulação para o processo de microestampagem do copo em uma única etapa.	62
Figura 46. Simulação em relação à espessura para o processo de microestampagem do copo em uma única etapa. a) simulação para o aço ABNT 1010. b) simulação para o aço inox ABNT 304.....	63
Figura 47. Resultado da simulação para a microestampagem do copo – primeiro estágio	64
Figura 48. Resultado da simulação para a microestampagem do copo - segundo estágio.	64
Figura 49. Simulação em relação à espessura para o processo de microestampagem do copo durante o primeiro estágio. a) simulação para o aço ABNT 1010. b) simulação para o aço inox ABNT 304.....	65
Figura 50. Simulação em relação à espessura para o processo de microestampagem do copo durante o segundo estágio. a) simulação para o aço ABNT 1010. b) simulação para o aço inox ABNT 304.	65
Figura 51. Resultado da simulação para o processo de microestampagem do copo em dois estágios sendo o primeiro com uma pré-forma inicial para o aço ABNT 1010	66
Figura 52. Simulação em relação à espessura do processo de microestampagem do copo para o aço ABNT 1010 com uma pré-forma inicial no primeiro estágio.....	67
Figura 53. Resultado da simulação para microestampagem do copo: (d) 12mm e (h) 10mm.	67
Figura 54. Resultado da simulação para microestampagem do copo: (d) 7mm e (h) 5mm	68
Figura 55. Simulação em relação á espessura para o processo de microestampagem do copo com diâmetro de 12 mm e altura de 10 mm. a) aço ABNT 1010. b) aço inox ABNT 304.....	69
Figura 56. Simulação em relação á espessura para o processo de microestampagem do copo com diâmetro de 7 mm e altura de 5 mm. a) aço ABNT 1010. b) aço inox ABNT 304.....	69

Figura 57. Resultado da simulação para o processo de microestampagem do copo utilizando apenas o conjunto de ferramentas do segundo estágio	70
Figura 58. Simulação em relação á espessura para a microestampagem do copo utilizando apenas o conjunto de ferramentas do segundo estágio. a) aço ABNT 1010. b) aço inox ABNT 304.....	71
Figura 59. Microestampagem do copo em dois estágios para o aço ABNT 1010.....	71
Figura 60. Microestampagem do copo em dois estágios para o aço inox ABNT 304.....	72
Figura 61. Carcaça do micromotor em aço inox ABNT 304.....	72
Figura 62. Microestampagem do copo em dois estágios para o aço ABNT 1010, sendo o primeiro estágio com uma pré-forma inicial	73
Figura 63. Desenho em corte da ferramenta para microestampagem do copo em uma única etapa ...	73
Figura 64 Microestampagem do copo em uma única etapa. a) inox ABNT 304. b) aço ABNT 1010.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do aço ABNT 1010. Fonte: Usiminas	27
Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço ABNT 1010. Fonte: Usiminas	27
Tabela 3. Composição química do aço inox ABNT 304. Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil	28
Tabela 4. Propriedades mecânicas do aço Inox ABNT 304. Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil	28
Tabela 5. Composição química do aço elétrico ABNT 35F 420M. Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil...	29
Tabela 6. Propriedades mecânicas do aço elétrico ABNT 35F 420M. Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil	29
Tabela 7. Coeficientes C e n para o aço ABNT 1010 e para o aço inox ABNT 304.....	45
Tabela 8. Valores de anisotropia média (r_m) e anisotropia planar (Δ_r) do aço ABNT 1010 e do aço inox ABNT 304.....	46
Tabela 9. Propriedades usadas para definir o material da geratriz no DYNAFORM.....	50
Tabela 10. Parâmetros geométricos para microestampagem do copo em dois estágios.....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

C	constante do material [N/mm^2]
d	diâmetro do punção [mm]
d_1	diâmetro do copo no primeiro estágio [mm]
d_2	diâmetro do copo no segundo estágio [mm]
D	diâmetro da geratriz [mm]
F	força [N]
h	altura do copo [mm]
h_1	altura do copo no primeiro estágio [mm]
h_2	altura do copo no segundo estágio [mm]
k_f	tensão de escoamento [N/mm^2]
n	índice de encruamento [-]
r	raio [mm]
r_m	coeficiente de anisotropia médio [-]
s	espessura da chapa [mm]
s_0	espessura inicial da chapa [mm]
w	largura da chapa [mm]
w_0	largura inicial da chapa [mm]
Δ_r	coeficiente de anisotropia planar [mm]
ε_x	deformação de engenharia [%]
φ	deformação verdadeira [-]
φ_1	deformação principal no comprimento [-]
φ_2	deformação principal na largura [-]
φ_3	deformação principal na espessura [-]
β	relação de estampagem [-]
β_{adm}	relação de estampagem admissível [-]
μ	coeficiente de atrito [-]
\emptyset	diâmetro [mm]

LISTA DE ABREVIATURAS

CLC *curva limite de conformação*

EM *estampagem media*

EP *estampagem profunda*

GO *chapa de aço de grão orientado*

GNO *chapa de aço de grão não-orientado*

LDR *razão limite de estampagem “limiting drawing ratio”*

MEV *microscopia eletrônica de varredura*

RESUMO

O processo de microestampagem permite a fabricação de peças ou microcomponentes, podendo ser aplicado a diversas áreas da engenharia. Logo, este trabalho tem por objetivo desenvolver um micromotor de passo e avaliar os efeitos da miniaturização de seus componentes. A simulação computacional foi utilizada neste trabalho de forma a avaliar os defeitos surgidos com a miniaturização, através do software de elementos finitos DYNAFORM com “solver” LS-DYNA. O material empregado na carcaça foi o aço de baixo carbono ABNT 1010 e o aço inoxidável ABNT 304, e para o núcleo magnético do micromotor, composto pelo rotor e estator, utilizou-se o aço elétrico ABNT 35F 420M. A simulação computacional, além de identificar os problemas oriundos da miniaturização dos componentes, também foi utilizada para otimizar as ferramentas de microestampagem, demonstrando desta forma ser uma grande aliada para o desenvolvimento do processo. O processo de corte convencional em matriz não foi aplicado no corte do rotor e do estator, pois produziu defeitos como empenamento e rebarbas. Ao invés disso, empregou-se o processo de corte por eletroerosão a fio, que produziu peças planas e superfícies lisas.

Palavras-chave: Microestampagem, micromotores, simulação, corte em matriz, eletroerosão a fio.

ABSTRACT

MICRO DEEP DRAWING APPLIED IN THE FABRICATION OF MICROMOTORS

The process of micro deep drawing is a micro-technology which allows the fabrication of microcomponents and can be applied to various fields of engineering. This study aims to develop the components of a micromotor step using this technology and to evaluate the effects of the microfabrication of the motor frame, rotor and stator. A computer simulation was carried out in order to evaluate miniaturization of the components through the finite element software DYNAFORM with “Solver” LS-DYNA. The material used in the motor housing was low carbon steel ABNT 1010 and stainless steel ABNT 304. However, in magnetic core, comprising the rotor and stator, the electric steel ABNT 35F 420M was employed. Micro deep drawing tools were developed based on the results obtained through simulation is a great ally to create microcomponents. The cutting process in the matrix was not employed to cut the rotor and the stator, because it produced defects such as warping and butts along the surface. Instead, wire cutting spark erosion was used and resulted in flat part and surfaces.

Key-words: Micro deep drawing, micromotor, simulation, cutting, spark erosion.

1 INTRODUÇÃO

O crescente interesse de pesquisadores e indústria sobre micro sistemas nos últimos anos é facilmente justificado pelas novas funções tecnológicas que são atribuídas aos inúmeros componentes aplicados nas mais diversas áreas, como dispositivos eletrônicos, sensores, materiais biomédicos, automobilísticos e etc. Tecnologias estas, que até pouco tempo eram tidas como inviáveis foram possíveis com a redução da escala dos componentes. Uma alternativa para se estudar as propriedades do material e os parâmetros que possam variar com a redução de escala é comparar a simulação computacional aos ensaios práticos realizados, para que se tenha uma idéia de que correções devem ser feitas nos atuais modelos matemáticos. O entendimento de como o material irá se comportar quando reduzido em escala é de extrema importância, pois peças de pequenas dimensões estão presentes em grande número de componentes, nas mais diversas áreas. Processos de conformação mecânica são os que conseguem produzir a maior quantidade de peças, a um menor tempo e com o menor custo, além de possibilitar um controle acurado dos parâmetros do processo.

O processo de microestampagem trata-se de um processo de fabricação relativamente novo, que permite a fabricação de peças ou componentes em escalas micro. Em geral, motores elétricos são construídos pelo processo de estampagem, sendo o núcleo magnético composto pelo rotor e estator obtido pelo processo de corte em matriz e a carcaça estampada em formato de copo. Quando a peça ou componente é reduzido em escala, o comportamento do material durante a miniaturização, não apresenta uma similaridade com o processo de estampagem convencional.

O método de elementos finitos torna-se um importante instrumento para avaliar os efeitos da microestampagem, uma vez que os resultados obtidos na simulação, quando bem tratados, mostram uma realidade muito próxima à obtida em processos experimentais. Desta forma este trabalho procurou avaliar o uso da simulação computacional no processo de microestampagem do copo (carcaça) e comparar os resultados aos resultados obtidos através de experimentos práticos. A Figura 1 mostra as etapas empregadas para o desenvolvimento dos componentes de um micromotor pelo processo de microestampagem. Com a definição do modelo a ser construído e do material a ser utilizado na construção do micromotor, o trabalho seguiu duas linhas de trabalho. Para a obtenção do rotor e do estator pelo processo de corte, inicialmente foi projetada e construída uma matriz de corte, posteriormente foi realizado o corte através da ferramenta construída, juntamente a esta etapa foi realizado o corte das peças por eletroerosão a fio, e por fim, foi realizada uma análise da superfície de corte através de um microscópio eletrônico de varredura de forma a comparar a eficácia de cada um dos processos de corte.

Para o desenvolvimento da carcaça, inicialmente foram realizados ensaios de tração e anisotropia, de forma a obter as propriedades mecânicas dos materiais empregados, propriedades estas que foram utilizadas como dados de entrada para a realização das simulações computacionais. A simulação, além de prever alguns defeitos que ocorrem durante a miniaturização, também foi utilizada para otimizar as ferramentas de microestampagem. Realizadas as simulações e otimizadas as ferramentas, construiu-se as ferramentas e por fim, o processo de microestampagem da carcaça do micromotor.

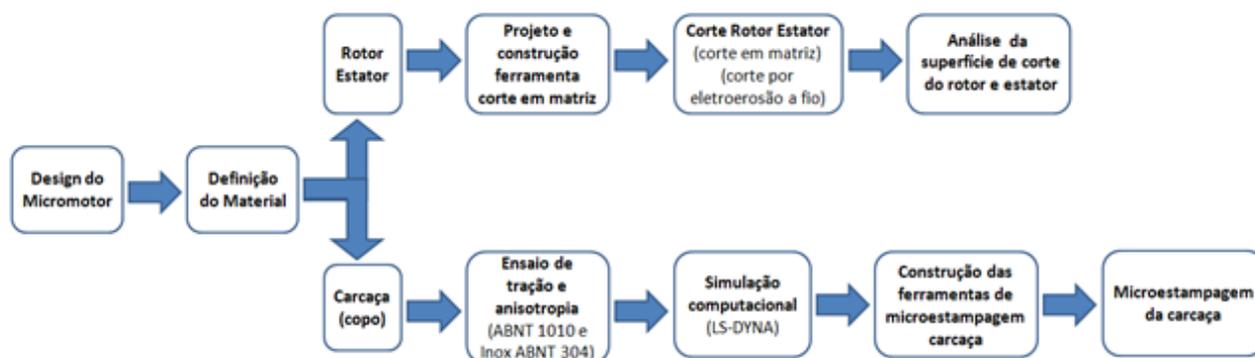


Figura 1. Etapas empregadas no desenvolvimento dos componentes do micromotor.

O trabalho também procura mostrar de uma forma geral os principais problemas ocasionados pela miniaturização de peças, como o comportamento do material durante um processo micro e as heterogeneidades. Os principais problemas ocorridos e as adaptações necessárias, tanto na simulação física quanto na microfabricação das peças.

2 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

Atualmente, devido à grande competição e o surgimento de novas tecnologias, impulsionados por uma tendência crescente na miniaturização de produtos, novos desenvolvimentos podem ser vistos em dispositivos eletrônicos, sensores, materiais biomédicos, automobilísticos e etc. Porém, a tendência à miniaturização de peças e componentes tem gerado um desconforto para a indústria, uma vez que esse tipo de componente necessita de um tratamento diferenciado, não contando com o auxílio da teoria já conhecida para processos de conformação.

A concepção de produtos micro tem como consequência as limitações, bem como os potenciais relacionados a novas tecnologias de produção. Por um lado, a miniaturização constitui uma limitação para a aplicabilidade da maioria das tecnologias de fabricação convencional como corte e estampagem, e por outro lado, abre a possibilidade de se empregar novas tecnologias. A quantidade e a diversidade de tecnologias usadas para produzir peças e micro componentes são enormes.

Dessa forma, os objetivos deste trabalho são:

- Desenvolver os componentes de um micromotor pelo processo de microestampagem.
- Fazer uso do software LS-DYNA para avaliar a influência do efeito escala durante o processo de microestampagem da carcaça.
- Analisar o comportamento do aço ABNT 1010 e do aço inox ABNT 304 durante o processo de microestampagem.
- Avaliar a superfície de corte obtida pelo processo de corte em matriz e por eletroerosão a fio nas chapas de aço elétrico ABNT 35F 420M.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Conformação de chapas

O processo de conformação de chapas pode ser dividido em dois diferentes grupos: o grupo dos processos de conformação e o grupo dos processos de separação. Ao grupo de conformação, pertencem todos os processos que alteram a forma geométrica da peça sem que haja separação ou adição de material, por exemplo, estampagem, embutimento profundo, dobra e repuxo. Ao grupo de separação, pertencem todos os processos de corte por cisalhamento, por exemplo, o corte convencional mais comumente usado por ser um processo simples e de baixo custo e o corte fino mais conhecido como “fineblanking” (Schaeffer, 1999).

3.2 Princípios do processo de estampagem de chapas

O processo de estampagem de chapas consiste principalmente na utilização de uma matriz, de um prensa-chapas e um punção, todos acoplados a uma prensa hidráulica ou mecânica. A Figura 2 ilustra uma representação esquemática em corte do equipamento utilizado para a estampagem de um copo. A matriz tem como função receber a chapa metálica e dar a forma final à peça. O prensa-chapas por sua vez, tem como função evitar a formação de rugas na peça ou flange, retendo a chapa metálica de forma a induzir seu estiramento. O punção força a chapa a entrar na matriz, dando-lhe a forma final. Para a minimização do atrito entre os componentes, são utilizados óleos lubrificantes sobre a chapa.

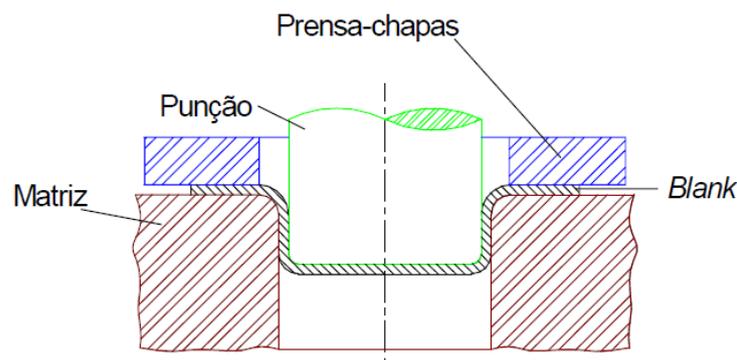


Figura 2. Desenho esquemático do processo de estampagem de copos cilíndricos.

Fonte: Oliveira, (2003).

3.2.1 Curva Limite de Conformação

Richter, (2003), define a Curva Limite de Conformação como sendo uma representação do comportamento de uma chapa metálica que é deformada em um processo de conformação

mecânica e traçada em um diagrama deformação principal (φ_1) vs. deformação principal (φ_2), onde φ_1 corresponde à deformação principal no comprimento e φ_2 a deformação principal na largura.

Segundo Netto, (2004), embora a CLC não seja uma propriedade intrínseca do material, trata-se de uma das mais importantes ferramentas para o projeto de peças estampadas via simulação computacional, ou seja, um programa qualquer de simulação numérica que internamente utilize interações matemáticas tem como ponto de convergência a CLC, garantindo que os resultados matemáticos obtidos na simulação tenham sentido físico.

A curva limite de conformação é um critério de falha, indicando a capacidade de um material de suportar diferentes tipos de deformação em um processo de estampagem, fornecendo uma estimativa de quão próximo o metal se encontra da ruptura. A Figura 3 mostra a Curva Limite de Conformação (CLC) para folhas de alumínio puro AL 99,5 com espessuras de 20 μ m e 100 μ m.

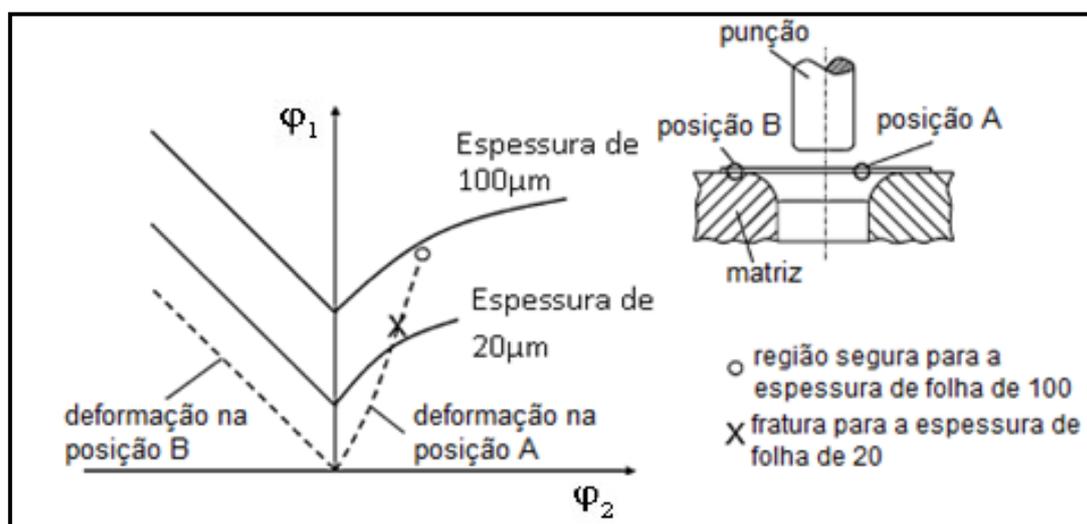


Figura 3. Curva Limite de Conformação para folhas de alumínio AL 99,5 com espessuras de 20 μ m e 100 μ m. Fonte: Vollertsen, (2012).

Para Keeler, (1968), o modo com que uma chapa de metal pode ou não ser conformada sem falha depende alguns fatores, como propriedades do material, condições superficiais, tamanho e forma do blank, lubrificação, velocidade da prensa, pressão do prensa chapas, design do punção e da matriz.

Bressan, (1998), faz uma representação do Diagrama Limite de Conformação, mostrando o tipo de deformações sofridas pelo material para uma malha circular impressa na chapa, tanto no estiramento quanto no embutimento profundo. Este diagrama está apresentado na Figura 4.

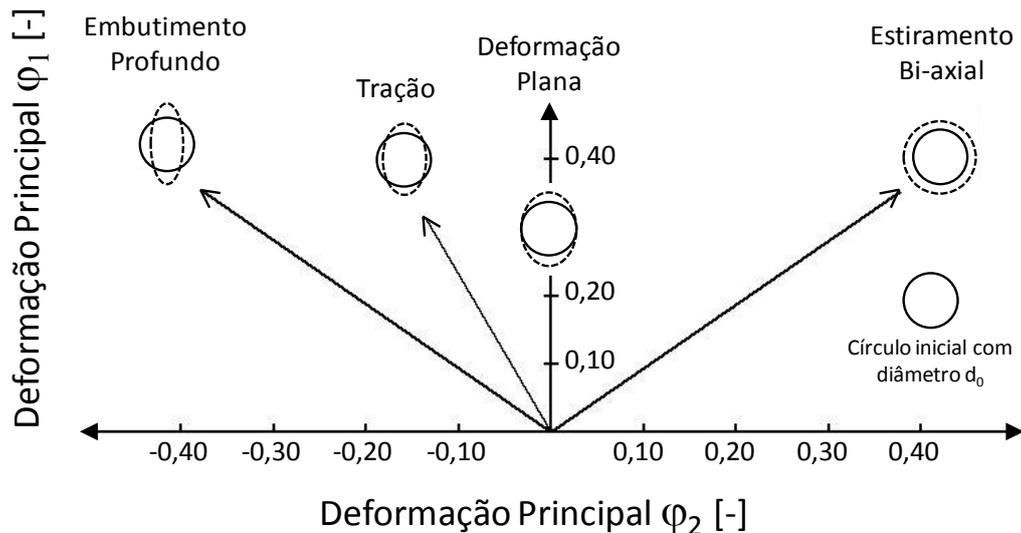


Figura 4. Desenho esquemático das deformações principais inseridas no Diagrama Limite de Conformação. Adaptada de Bressan, (1998).

Nota-se o surgimento de “linhas de tendência” que descrevem o caminho das deformações, isto é, funções onde a cada instante uma deformação (φ_2) está associada uma deformação (φ_1). Ainda nesta figura vê-se uma geometria circular original que quando submetida a diferentes solicitações gera a vista deformada de acordo com cada uma das combinações de deformação (Netto, 2004).

Embutimento profundo: a deformação principal (φ_1) é positiva na direção do comprimento e a deformação principal (φ_2) é negativa na direção da largura, sendo que na direção da espessura não há deformações. De acordo com a Lei da Constância de Volume, (φ_3) é nula;

$$\varphi_1 = -\varphi_2$$

$$\varphi_3 = 0$$

Tração: se caracteriza por deformações trativas na direção do comprimento e compressivas nas direções da largura e da espessura;

$$\varphi_1 = -2 \cdot \varphi_2$$

$$-\varphi_3 = -\varphi_2$$

Deformação plana: a deformação principal na direção da largura é igual à zero, nas direções do comprimento há deformações trativas e deformações compressivas na espessura;

$$\varphi_2 = 0$$

$$\varphi_1 = -\varphi_3$$

Estiramento biaxial: deformações na direção do comprimento e na largura são positivas (trativas) e iguais e a deformação na espessura é compressiva e igual ao dobro da deformação no comprimento (ou largura).

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$\varphi_3 = -2 \cdot \varphi_1$$

3.2.2 Deformações e tensões num copo

Durante a estampagem de um copo há uma redistribuição do metal, ou seja, à medida que o punção entra em contato com a chapa, sendo forçada para o interior da matriz, a chapa assume o formato do punção (Netto, 2004). Na Figura 5 estão representadas as deformações de embutimento profundo, tração, deformação plana e estiramento, para um processo de embutimento de um copo.

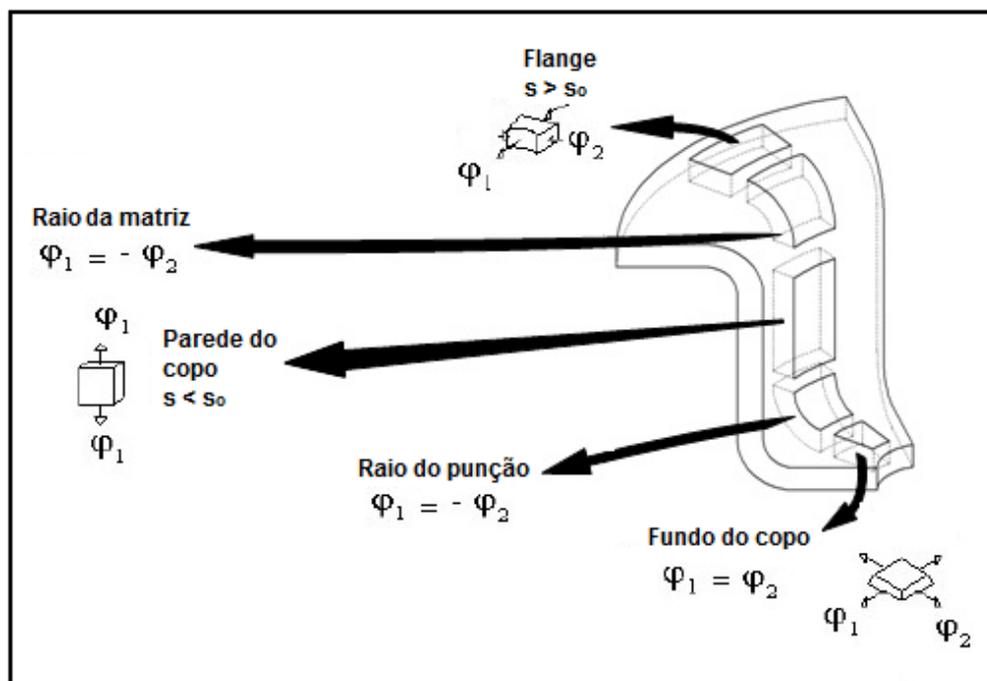


Figura 5. Deformações principais em um copo. Adaptada de Netto, (2004).

Ao longo do processo de estampagem, a geratriz (*blank*) é submetida a diferentes tipos de tensões, até atingir a forma final, conforme pode ser observado na Figura 6.

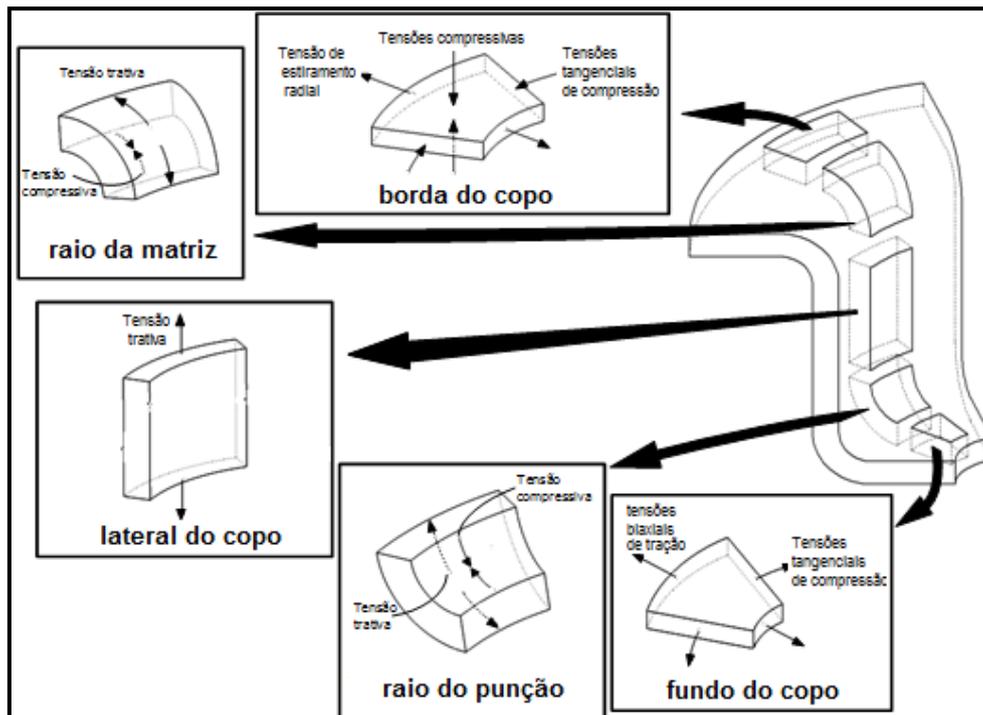


Figura 6. Tipos de tensões que ocorrem na estampagem profunda. Adaptada de Garcia *et al*, (2000).

Região da borda do copo: Segundo Blümel et al, 1997, na borda (flange) do copo há tensões tangenciais de compressão e tensões de estiramento radial juntamente com tensões compressivas oriundas do prensa-chapas. Esse conjunto de tensões faz com que à medida que o punção avance, ocorra o aumento de espessura.

Raio do punção e da matriz: O metal situado ao redor da matriz é deformado radialmente para o interior da mesma, fazendo com que o metal sofra esforços trativos no sentido radial e compressivos no sentido circunferencial. À medida que o material é forçado contra a matriz há deformações de embutimento profundo. As tensões que atuam no material que estão em contato com a matriz e com o punção são semelhantes (Netto, 2004).

Lateral do copo: Segundo Garcia *et al*, (2000), na região da lateral do copo ocorre deformação plana por ser uma região de estiramento uniforme, onde atuam tensões trativas no sentido radial, ocasionando uma diminuição da espessura da chapa.

Fundo do copo: Durante o processo de conformação há tensões biaxiais de tração e tensões compressivas no sentido da espessura em função do contato do punção com a geratriz (Netto, 2004).

3.2.3 Capacidade de embutimento do material

O projeto de uma peça estampada inicia-se com o conhecimento do componente no qual se deseja produzir, sendo assim, para que se possa produzir um componente estampado deve-se partir

de uma geratriz recortada de uma chapa. O dimensionamento correto e a forma da geratriz são necessários para evitar defeitos e perdas excessivas de material.

De acordo com Schaeffer, (2004), a forma mais simples de determinar a geratriz, pode ser vista na estampagem de um corpo sem flange, mostrada na Figura 7, onde o diâmetro da geratriz (D) pode ser calculado por:

$$D = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} \quad (\text{eq.1})$$

Onde (D) é o diâmetro da geratriz, (d) o diâmetro do punção e (h) a altura do copo.

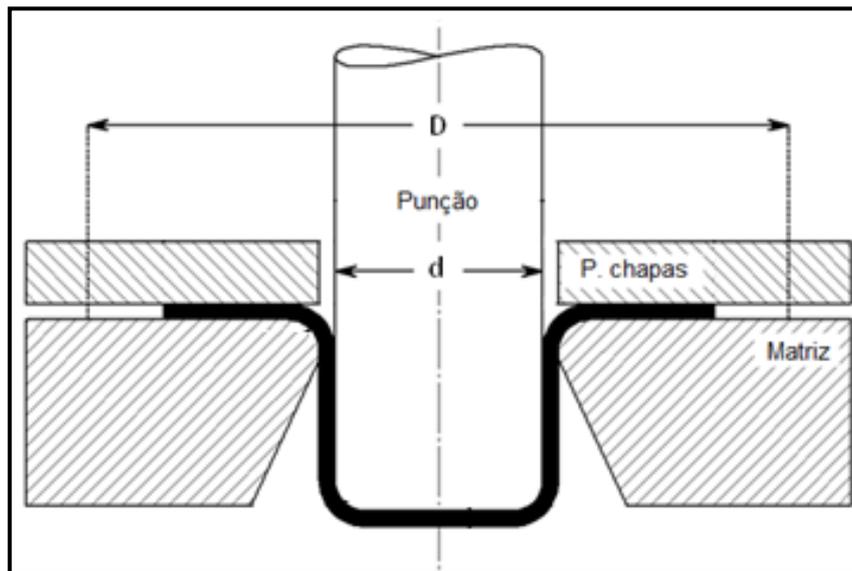


Figura 7. Representação esquemática da estampagem de uma peça de formato cilíndrico.

Adaptada de Folle, (2008).

A passagem de uma geratriz com diâmetro (D) para um corpo estampado com diâmetro (d), somente poderá ser realizado dentre alguns limites. Esta análise é realizada a partir do cálculo da Relação de Estampagem (β) definida pelo quociente do diâmetro da geratriz (D) pelo diâmetro do copo e/ou diâmetro do punção (d):

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (\text{eq.2})$$

Para determinar a Relação de Estampagem Admissível (β_{adm}), Schaeffer, (2004), coloca que para aços de maior estampabilidade, uma primeira aproximação, pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\beta_{adm} = 2,0 - \frac{1,1.d}{1000.s} \quad (\text{eq.3})$$

Ainda segundo Schaeffer, (2004), quando não for possível realizar o processo em uma só etapa, pelo fato de se ultrapassar a Relação de Estampagem Admissível, pode-se produzir o copo em várias etapas de estampagem, utilizando:

2º estágio: $\beta_{adm} = 1,3$

3º estágio: $\beta_{adm} = 1,2$

3.3 Corte por cisalhamento

O processo de corte por cisalhamento destina-se à obtenção de formas geométricas, a partir de chapas submetidas à ação de pressão exercida por um punção de corte contra uma matriz (Souza, 2001). Quando o punção inicia a penetração na chapa, o esforço de compressão converte-se em esforço cisalhante (esforço cortante) provocando a separação da peça da chapa.

O processo de corte pode ser tanto para realizar um furo com o formato do punção na chapa quanto para separar o componente (também com o formato do punção da chapa). No caso de um punção circular, o diâmetro do punção é levemente inferior ao diâmetro da matriz de forma a existir uma folga entre dois que permite que o punção penetre na matriz, separando a chapa em duas partes (Souza, 2001).

A escolha do processo normalmente está relacionada com a qualidade da região cortada. Processos de corte convencional diferem-se do corte fino pelo uso de folgas maiores. Normalmente em um processo de corte convencional o valor da folga está entre 5 e 10% da espessura da chapa. Para o processo de corte fino, as folgas são da ordem de 1%, ou menos. A Figura 8 ilustra os componentes básicos de uma ferramenta de corte convencional.

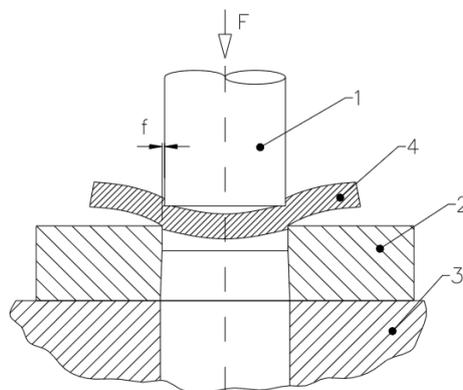


Figura 8. Elementos básicos de uma ferramenta de corte por cisalhamento. 1- punção, 2 - matriz, 3 - base da ferramenta, 4 - chapa, f - folga entre punção e matriz. Fonte: Souza, (2001).

Uma peça cortada através do processo convencional apresenta características próprias originadas da forma como as tensões se distribuem sobre a chapa no momento do corte, como mostra a Figura 9. Estas características definem qualitativamente o processo no que diz respeito ao resultado do corte (Souza, 2001).

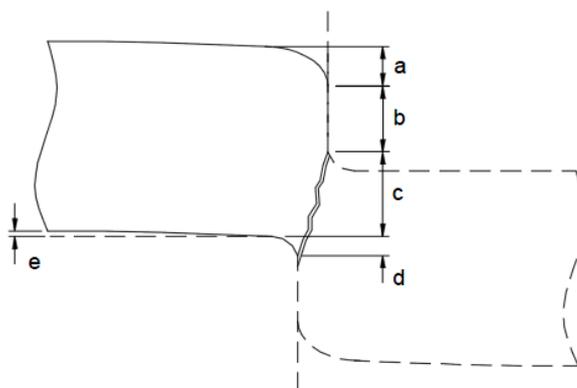


Figura 9. Partes principais de uma peça cisalhada. a – zona de arredondamento, b – zona cisalhada, c – zona fraturada, d – rebarba, e – empenamento. Fonte: Souza, (2001).

A forma como se processa o corte pode ser entendida através da análise de cada uma das fases do processo (Souza, 2001).

Na primeira fase ocorre a atuação da força do punção sobre a chapa ocorrendo uma deformação elástica. A chapa arqueia-se sob o punção e tende a levantar suas extremidades devido à folga entre o punção e a matriz. Desta fase passa-se rapidamente a uma deformação plástica, caracterizada pelo arredondamento permanente da chapa.

A seguir, ocorre a fase do cisalhamento, onde o material escoar devido ao esforço realizado pelo punção sobre a matriz formando a zona cisalhada. Devido ao crescente encruamento do material durante o corte, a zona de arredondamento da chapa tende a crescer.

A crescente sollicitação é aplicada até que se esgote a capacidade de deformação da secção da chapa. Quando isso ocorre, surge na aresta de corte da matriz uma trinca na direção máxima de tensão de cisalhamento, que conduz finalmente a separação do material. A trinca resultante pode ser reconhecida na peça cortada como uma região rugosa e de formato oblíquo, com ângulo de inclinação dependente do tamanho da folga. A forma como ocorre à fratura também é responsável pelo tipo e tamanho da rebarba resultante na peça.

3.4 Corte por eletroerosão a fio

O processo de eletroerosão a fio permite cortar materiais com um fino eletrodo que segue um caminho programado tendo como característica a ausência de forças de corte e tensões comuns

em processos convencionais, permitindo a fabricação de peças complexas, com superfícies sem distorções ou alterações microestruturais.

Uma das vantagens deste processo em relação ao corte convencional, é que o conjunto pode ser obtido em uma única etapa, sem a necessidade do agrupamento das chapas. Isso ocorre porque podem se agrupar várias chapas de modo a obter a altura final do conjunto, realizando o corte em uma única etapa. A grande desvantagem deste processo em relação ao corte convencional é o seu alto custo e a baixa produtividade.

3.5 Características dos materiais

3.5.1 Aço carbono ABNT 1010

As chapas de aço ABNT 1010 possuem um baixo teor de carbono, conforme ilustrado na Tabela 1, podendo ser aplicada em diversos segmentos, como na indústria automobilística, perfis estruturais, construção civil, etc.. Possuem baixa resistência e dureza e alta tenacidade e ductilidade. São aços que não têm suas propriedades mecânicas modificadas pela adição de outros elementos de liga e apresentam um baixo custo de produção. São indicados em aplicações em que ocorrem deformações relativamente pequenas, caso de uma estampagem média (EM) até processos de estampagem profunda (EP).

Tabela 1. Composição química do aço ABNT 1010.

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (máx)	P (máx)
ABNT 1010	0,08 ~ 0,13	0,30 ~1,00	0,10 ~ 0,20	0,05	0,04

Fonte: Usiminas.

Na Tabela 2 estão expressas as propriedades mecânicas do aço ABNT 1010.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço ABNT 1010.

Características Mecânicas	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (% mín.)
ABNT 1010	320	270 - 390	26

Fonte: Usiminas.

3.5.2 Aço inox ABNT 304

Os aços inoxidáveis são basicamente ligas Fe-Cr. Outros metais atuam como elementos de liga nos aços inoxidáveis, sendo o cromo o mais importante e a sua presença é fundamental para assegurar as suas propriedades. A Tabela 3 apresenta a composição química do aço inox ABNT 304.

Tabela 3. Composição química do aço inox ABNT 304.

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)
ABNT 304	0,08	2,0	0,75	0,045	0,03	18,0 a 20,0	8,0 a 10,5

Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil.

Há uma grande variedade de aços inoxidáveis, sendo que todos têm uma característica comum, contêm mais que 10,5% cromo (Guida, 2006).

Os aços inoxidáveis são comumente divididos em cinco grupos:

- Austeníticos (série 300): contendo 17-25% de cromo e 6-20% de níquel;
- Martensíticos (série 400): com 12-17% de cromo e 0,1 a 1,0% de carbono;
- Ferríticos (série 400): contendo 10,5-27% de cromo e baixo carbono;
- Duplex: com 23-30% de Cr, 2,5-7% de níquel e adições de titânio ou molibdênio;
- Endurecíveis por precipitação : podem ter uma base austenítica ou martensítica, com adições de Cu, Ti, Al, Mo, Nb ou N.

O aço austenítico ABNT 304, quando submetido a uma deformação a frio, sofre um endurecimento (os limites de resistência e de escoamento aumentam) e a ductilidade cai. Quanto maior a deformação plástica, maior será o esforço para produzir uma nova deformação, fenômeno este denominado encruamento ou endurecimento por deformação. Os aços austeníticos apresentam uma capacidade de encruamento maior que os ferríticos (Guida, 2006).

Estes aços são utilizados em uma ampla gama de aplicações tais como: indústria aeronáutica, química, naval, arquitetural, alimentação, caldeiraria, fabricação de tubos, etc.

Os aços inoxidáveis austeníticos não são ferromagnéticos, mas depois de conformados, dobrados, embutidos, etc., podem às vezes se tornar magnéticos em função da modificação da estrutura. Não apresentam a transição dúctil-frágil e são os mais indicados para estampagem profunda (Guida, 2006). A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas do aço inox ABNT 304.

Tabela 4. Propriedades mecânicas do aço Inox ABNT 304.

Características Mecânicas	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
Inox ABNT 304	280	600	58

Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil.

3.5.3 Aço elétrico ABNT 35F 420M

O aço elétrico é classificado pela norma ABNT NM71-2000 como 35F 420M, pela norma AISI por M-36, pela norma ASTM A677 M por 36F 195, pela norma JIS 2552-2000 por 35A 360 e pela norma DIN EN 10106 por M330-35A. No Brasil o fornecimento é exclusivo da ArcelorMittal Inox Brasil que o comercializa com o nome de E-170 com espessura de 0,35mm.

Os aços para fins elétricos podem ser analisados como uma classe especial de aços baixo carbono com propriedades magnéticas específicas para sua aplicação na fabricação de núcleos de motores elétricos, geradores, transformadores de potência, reatores para sistemas de iluminação, medidores de energia e motores para compressores herméticos de geladeiras, freezers e ar-condicionado. A Tabela 5 apresenta a composição química dada pelo fabricante do aço elétrico de grão não-orientado ABNT 35F 420M.

Tabela 5. Composição química do aço elétrico ABNT 35F 420M.

	Si (%)	C (%)	Mn (%)	Al (%)	P (%)	S (%)
ABNT 35F 420M	1,70 a 2,30	< 0,0030	< 0,060	< 0,400	< 0,0040	< 0,0080

Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil.

Esses aços são divididos em duas grandes famílias, conforme descrito a seguir:

- Chapas de aço de grão orientado (GO) – há uma orientação cristalográfica paralela à superfície da chapa de aço, o que promove propriedades magnéticas excelentes em apenas uma direção (Landgraf, 2002).

- Chapas de aço de grão não-orientado (GNO) – não há uma orientação cristalográfica preferencial. O emprego dos aços GNO é muito amplo, se destacando o uso em motores elétricos de pequeno e grande porte, reatores de lâmpadas e medidores de energia.

A Tabela 6 apresenta as propriedades mecânicas do aço elétrico ABNT 35F 420M.

Tabela 6. Propriedades mecânicas do aço elétrico ABNT 35F 420M.

Características Mecânicas	Limite de Escoamento (MPa)		Limite de Resistência (MPa)		Alongamento (%)
	L	T	L	T	
ABNT 35F 420M	300	304	420	425	30

Fonte: ArcelorMittal Inox Brasil.

3.6 Micromotores

As pesquisas envolvendo micromotores vêm se expandindo em diversos campos da engenharia, onde existe uma gama de tamanhos de interesse que vão de centímetros até centenas de microns. A concepção e o desenvolvimento de microdispositivos que podem se mover no interior do corpo humano, de forma autônoma ou orientada por um médico é um tema muito importante no campo da medicina, porque torna possível realizar um melhor diagnóstico, terapias mais específicas e mais eficazes. A estas dimensões dispositivos tradicionais não são mais viáveis, tornando-se necessário introduzir a inovação (Cristofaro *et al*, 2010). A Figura 10 ilustra um exemplo onde um micromotor é aplicado a área de cirurgias minimamente invasivas, utilizando como principal ferramenta o endoscópio, isso porque um endoscópio comum possui um campo de visão limitado, sendo necessária a troca de cateteres durante a operação de modo a se obter outros ângulos de visão. Utilizando-se de um micromotor para girar este prisma na ponta do endoscópio, o campo de visão poderia alcançar 360°, reduzindo assim os custos do tratamento e o tempo de recuperação do paciente, aumentando as chances de sucesso da operação (Lin *et al*, 2001; Tendick *et al*, 1998).

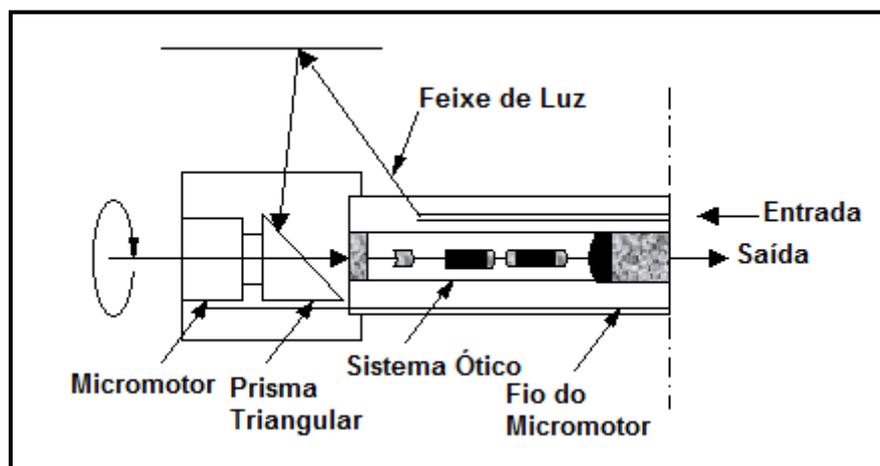


Figura 10. Esquema do micromotor utilizado no endoscópio. Fonte: Xinli *et al*, (2002).

Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos gerando variações angulares. O rotor de um motor de passo é rotacionado em pequenos incrementos angulares, denominados “passos”, quando pulsos elétricos são aplicados em uma determinada sequencia nos terminais deste. A rotação é diretamente relacionada aos impulsos elétricos que são recebidos, bem como a sequencia a qual tais pulsos são aplicados, refletindo diretamente na direção a qual o motor gira. A velocidade com que o rotor gira é dada pela frequência de pulsos recebidos, e o tamanho do ângulo rotacionado é diretamente relacionado com o número de pulsos aplicados (Brites e Santos, 2008).

O número de passos é dado pelo número de alinhamentos possíveis entre o rotor e as bobinas. Para aumentar o número de passos de um motor usa-se um maior número de bobinas e um maior número de polos no rotor.

O micromotor é constituído basicamente pelos seguintes elementos:

- um circuito magnético estático, constituído por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si, ao qual se dá o nome de estator;

- por um rotor constituído por um núcleo ferromagnético, também laminado, sobre o qual se encontra um enrolamento ou um conjunto de condutores paralelos, nos quais são induzidas correntes provocadas pela corrente alternada das bobinas do estator.

O rotor por sua vez, transmite à carga a energia mecânica produzida. O entreferro (distância entre o rotor e o estator) é bastante reduzido, de forma a reduzir a corrente em vazio e, portanto as perdas. A Figura 11 ilustra a carcaça o rotor e o estator do micromotor e suas respectivas dimensões.

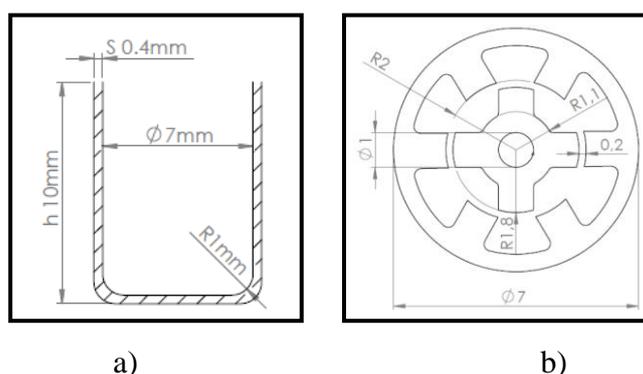


Figura 11. Componentes do micromotor. a) carcaça do micromotor. b) rotor e estator do micromotor.

A escolha e otimização deve ser feita de acordo com as necessidades de aplicações. Existem diversos tipos de micromotores, tais como micromotor eletrostático, de passo, ultrasônico e eletromagnético. De um modo geral, os micromotores são adequados para várias aplicações, como micro-sensores e micro-atuadores, interruptores ópticos e armazenamento de dados de mídia (Zhang *et al*, 2005).

Atualmente, existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para a fabricação de micromotores e microcomponentes, mas que não serão citadas neste trabalho. A escolha do processo de microestampagem para o desenvolvimento deste trabalho deve-se ao fato de que o processo de microestampagem trata-se de uma técnica relativamente nova e que por tratar-se de um processo de conformação mecânica apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos, como alta razão de produtividade, economia de material, controle das propriedades mecânicas, além de normalmente

proporcionar processos de produção viáveis. A Figura 12 ilustra um desenho esquemático dos componentes do micromotor a serem desenvolvidos neste trabalho. O design e as dimensões foram sugeridos com base em outros trabalhos que estão sendo desenvolvidos no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), isso porque o custo para projetar um micromotor é relativamente alto.

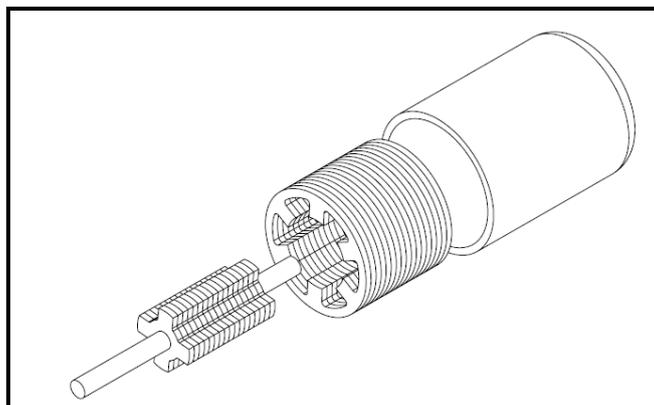


Figura12. Desenho esquemático do micromotor a ser construído por microestampagem.

Quando se refere ao termo micromotor, existem algumas divergências quanto a pronúncia deste termo, por exemplo, na Ásia se utiliza o termo ‘micromáquinas’ (“micromachines”), enquanto que os pesquisadores europeus preferem o termo ‘microsistemas’ (“microsystems”). Nos EUA a sigla ‘MEMS’ permanece o termo dominante para referenciar não apenas dispositivos eletromecânicos, mas também estruturas microusinadas de forma geral. O termo “micromachining”, por sua vez, refere-se às técnicas ou ao processo de microusinagem propriamente dito. Embora os microsistemas não sejam realmente novos, a nomenclatura utilizada ainda não está padronizada (Vinhais, 2004).

3.7 Microestampagem

O grande aumento de volume de negócios nos últimos anos mostra uma crescente demanda em microcomponentes, impulsionados principalmente por uma tendência crescente na miniaturização dos produtos. Essa demanda não vem só dos consumidores que buscam produtos eletrônicos em menor tamanho e com mais funções, mas também em aplicações técnicas, como equipamentos para a área médica, sensores, além de uma gama variada de produtos, como mostra a Figura 13, onde pode ser visto um exemplo de miniaturização de um drive de disco rígido da IBM com capacidade de um gigabyte.



Figura 13. Drive de disco rígido com capacidade de um gigabyte (IBM). Fonte: Geiger *et al*, (2001).

O processo de microestampagem é semelhante ao processo de estampagem convencional, porém a diminuição das dimensões das partes torna o processo de fabricação mais difícil. A concepção de produtos micro tem por conseqüência as limitações bem como os potenciais relacionados com tecnologias de produção. Se por um lado, a miniaturização constitui uma limitação para a aplicabilidade da maioria das tecnologias de fabricação convencional, por outro lado, abre a possibilidade de se empregar novas tecnologias. A Figura 14 ilustra um exemplo comparativo entre um macro e um micro copo estampado.

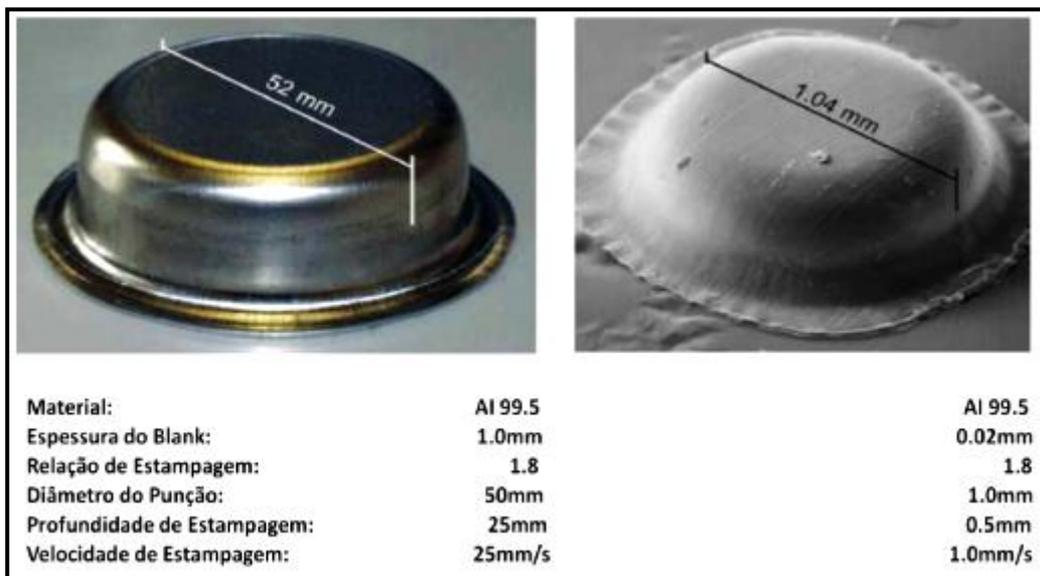


Figura 14. Comparação entre um macro e um micro copo. Fonte: Vollertsen, (2004).

3.7.1 Problemas no mundo da microconformação

Assim como qualquer outro meio de fabricação de peças, os processos de microfabricação também possuem alguns problemas, entre eles a folga entre a matriz e o punção de

uma máquina que é insignificante para uma peça convencional, mas que pode ser um problema quando a folga necessária para uma micropeça situa-se no intervalo de poucos microns.

Outro problema que envolve este novo método de fabricação esta no desenvolvimento de ferramentas de alta precisão e disponibilidade de máquinas/ferramentas adequadas para a produção de micropeças, especialmente para a fabricação de formas complexas com tolerâncias estreitas (Geiger *et al*, 2001).

O estudo da microconformação envolve diferentes áreas de conhecimento. É necessário estudar as características do material, do processo, das ferramentas, assim como do conjunto máquina/ferramenta. Para utilizar esses resultados em aplicações industriais é necessária uma pesquisa detalhada dos fenômenos e dos processos básicos de conformação mecânica. A Figura 15 ilustra os problemas que podem ocorrer no mundo da microconformação.

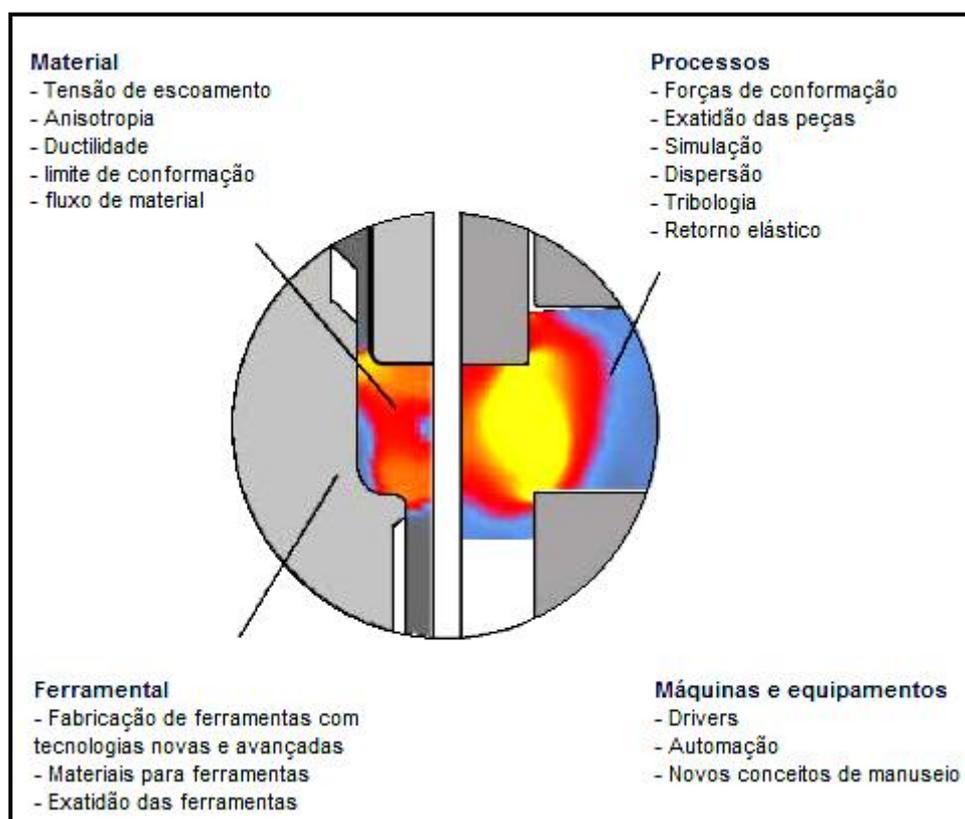


Figura 15. Problemas do mundo da microconformação. Fonte: Geiger *et al*, (2001).

3.7.2 Comportamento do material na microconformação

O comportamento do material é influenciado por efeitos de tamanho que ocorrem quando o dimensionamento de uma peça obtida através de um processo de miniaturização passa de um tamanho convencional para uma escala micro. Em caso de redução do tamanho da peça de trabalho

para dimensões com formas micro, nem todos os parâmetros podem ser alterados de acordo com a regra da similaridade (Hu *et al*, 2003).

O efeito escala descreve a diferença de comportamento de um material em um processo de conformação onde a escala é diminuída. Para estudo do efeito escala é necessária a realização de vários experimentos, sendo necessário utilizar as leis da teoria de similaridade a fim de se obter processos geometricamente similares, porém, com tamanhos diferentes. Na conformação de metais, os parâmetros mais importantes que descrevem o comportamento do material são a tensão de escoamento e a curva de escoamento, assim torna-se possível controlar as forças de conformação, a carga nas ferramentas.

Ensaio de tração realizados por Hoffmann e Hong, (2006), em Cu 99,9% com espessuras de 500 μ m, 200 μ m, 100 μ m, 50 μ m, 25 μ m e 10 μ m, mostram que à medida que a espessura é reduzida, há uma diminuição da tensão de escoamento. A Figura 16 ilustra os dados obtidos nos ensaios através de um gráfico de tensão de escoamento vs. deformação. As curvas obtidas em chapas com espessura de 500 μ m e 200 μ m foram classificadas como macro e as curvas obtidas com espessuras de 100 μ m até 10 μ m foram classificadas como micro.

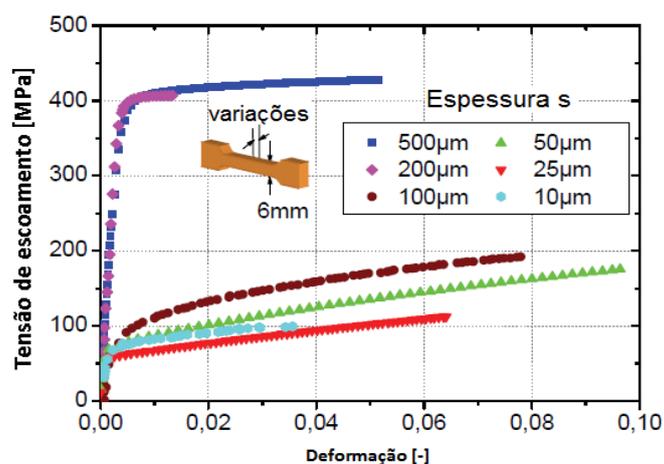


Figura 16. Ensaio de tração para diferentes espessuras em Cu 99,9%.

Fonte: Hoffmann e Hong, (2006).

O efeito da miniaturização na tensão de escoamento está relacionado com o aumento da quantidade de grãos superficiais, quando há diminuição nas dimensões da peça, enquanto o tamanho do grão continua o mesmo. Durante o processo de conformação, grãos externos estão sujeitos a pequenas forças quando comparados aos grãos internos ao volume. Em consequência, a tensão de escoamento deve diminuir com a redução da dimensão da peça (Batalha *et al*, 2005). A proporção da superfície de grãos para o volume de grãos (Figura 17) é responsável por este efeito.

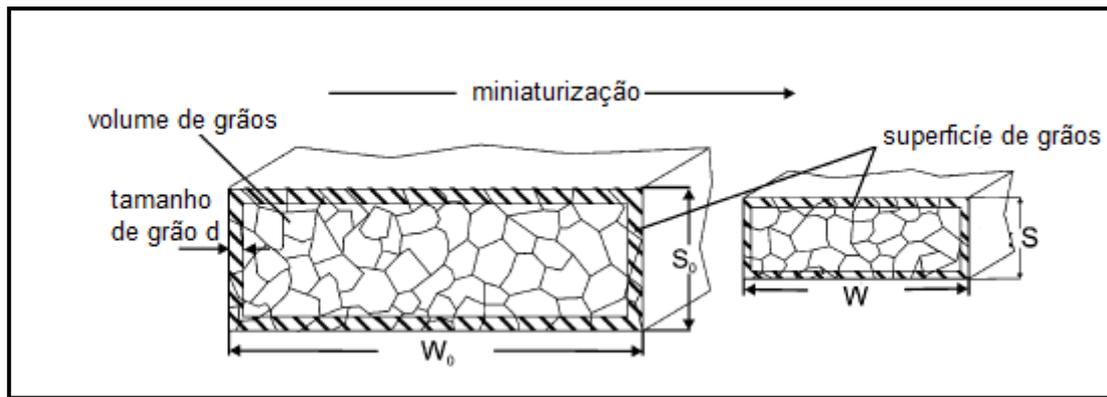


Figura 17. Relação da superfície de grãos para o volume de grãos. Fonte: Vollertsen *et al*, (2004).

A razão limite de estampagem ou *limiting drawing ratio* (LDR) é um indicador característico do processo de estampagem, mostrando o quanto a peça pode ser deformada durante o processo. Quanto maior o LDR, maior a capacidade do material se deformar. O LDR é geralmente afetado pelo material e pela geometria das ferramentas. Ensaios realizados por Vollertsen e Hu, (2007), mostraram que para um mesmo material, espessura e ferramentas, o LDR para uma micro peça foi de 1,5, enquanto que para uma peça macro, o LDR foi de 1,8. Isso mostra que a relação de estampagem para uma macro peça é claramente maior que para uma peça micro.

3.7.3 Visioplaticidade

Visioplaticidade é um método que possibilita a obtenção de informações sobre o escoamento de um metal e das tensões envolvidas na operação de conformação. Quanto ao processo de microconformação, dobramento ou corte, o comportamento ainda está em fase de investigação. Sabe-se, contudo que há uma dependência da geometria da aresta cortante na orientação dos grãos na área deformada. A Figura 18 mostra a influência da granulação e do estado do material. Quando o material é recozido, seus grãos aumentam e apresentam uma distribuição grosseira, porém quando o material é encruado, suas linhas ficam mais homogêneas (Geiger *et al*, 2001).

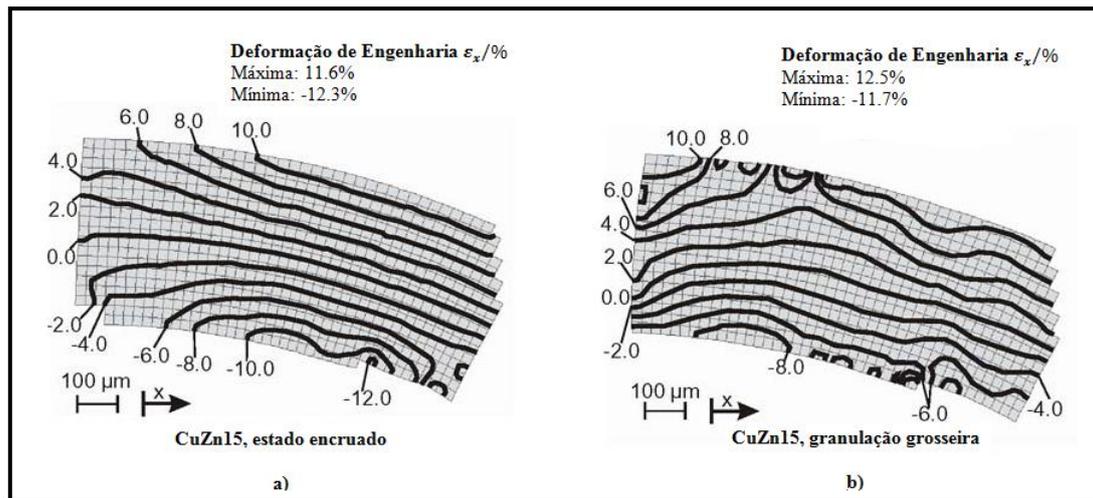


Figura 18. Influência da Granulação (a) distribuição mais uniforme da deformação no material encruado. (b) Distribuição não homogênea das deformações para material de granulação grosseira.

Fonte: Geiger *et al*, (2001).

Isto significa que a orientação dos grãos que causa resistências diferentes contra a deformação tem efeito na distribuição da força apenas quando existem poucos grãos na área deformada. Para materiais policristalinos, a força é homogênea e no caso de poucos grãos na área deformada, apenas os grãos com orientação favorável são deformados. Se o número de grãos for ainda menor, cada grão será deformado de acordo com o formato da ferramenta, não considerando a orientação favorável (Geiger *et al*, 2001).

3.7.4 Atrito em microestampagem

Assim como outros fatores já citados, o atrito também é afetado pela miniaturização. Quando há uma redução do tamanho da peça para formas micro, nem todos os parâmetros podem ser alterados de acordo com a regra de semelhança, por exemplo, o tamanho de grão. Isso faz com que os chamados efeitos de tamanho gerem a ocorrência de resultados inesperados sobre a força limite.

Durante o processo de fabricação pode ocorrer escoamento e deformação de materiais com o impedimento do movimento livre entre as superfícies, ou seja, atrito. Vollertsen e Hu em 2007 realizaram ensaios com cinco diferentes diâmetros de punções, mostrando que o coeficiente de atrito entre as peças e a ferramenta aumenta se a dimensão do processo diminui, impedindo o fluxo de material e conseqüentemente diminuindo a relação de estampagem. A Figura 19 mostra a relação entre o coeficiente de atrito e o diâmetro do punção. Quanto menor o diâmetro do punção, maior o atrito. Alguns pesquisadores realizaram ensaios de compressão do anel, compressão em cilindros, estampagem de micro tiras e microestampagem, ambos de acordo com a teoria da similaridade e

comprovaram que o atrito aumentou drasticamente com a diminuição da amostra inicial sob a lubrificação de um lubrificante líquido.

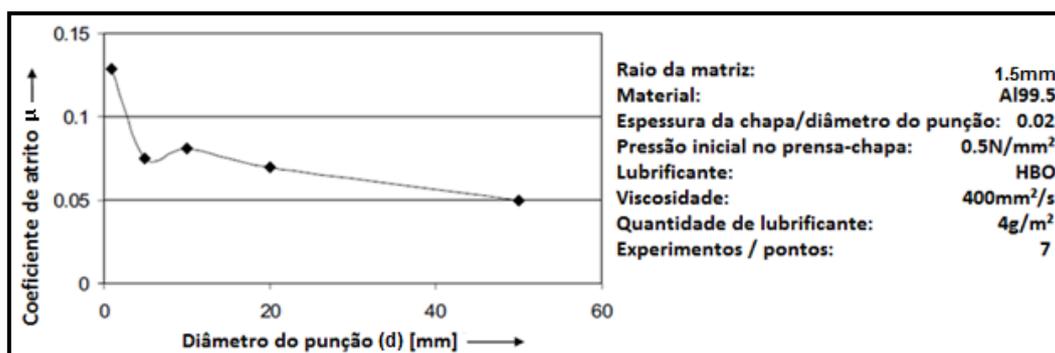


Figura 19. Coeficiente de atrito em função do diâmetro do punção. Fonte: Vollertsen e Hu, (2007).

3.8 Principais estudos desenvolvidos sobre microestampagem

Nos últimos anos, diversos estudos estão sendo realizados para avaliar o comportamento sob conformação de materiais, quando as suas dimensões são muito reduzidas, o efeito de escala é usado para determinar como as propriedades de um material irão se comportar quando miniaturizadas, não podendo simplesmente considerar que as propriedades não irão se modificar quando se passa de uma peça macro para uma peça micro. Geiger *et al* em 2001 e Vollertsen *et al* em 2004 fazem uma revisão ao estado da arte em microconformação de metais, abordando os problemas que ocorrem na miniaturização de peças, como a influência do efeito escala e o coeficiente de atrito, que aumenta com a redução do tamanho da peça. O efeito escala não só aparece dentro do processo, mas também deve ser levado em conta em todas as outras áreas que envolvem o processo de conformação, exigindo novas soluções, especialmente na fabricação de ferramentas e máquinas. Recentes progressos e idéias inovadoras representam uma base promissora para extrapolar o potencial inerente no processo de microconformação.

Hu *et al* em 2003 descreveu uma nova teoria que permite o cálculo do atrito entre a peça e a ferramenta para um processo de estampagem profunda. A influência do atrito ainda é mais diferenciada, se o processo de estampagem profunda é reduzido. Este método de ensaio permite determinar o atrito dentre as ferramentas de estampagem, podendo ser aplicada tanto para peças macro como para peças micro.

Alting *et al* em 2003 mostrou alguns conceitos básicos de flexão a laser e dobra, além da importância da geometria e dos parâmetros do material para micro processos de conformação, utilizando-se da teoria e dos resultados experimentais. Assim conseguiu deduzir algumas pré-condições para processos de conformação em que as peças têm as suas dimensões reduzidas.

Batalha *et al* em 2005, fez uma breve revisão bibliográfica sobre a influência do efeito escala na simulação de processos de microfabricação e o estudo das diferenças dos efeitos da conformação de metais para macro e microcomponentes, sendo um dos desafios da nova geração, estudar o efeito escala a fim de criar novas técnicas de produção em massa viáveis.

Hoffmann e Hong em 2006 procuraram determinar e investigar as variáveis que influenciam consideravelmente o efeito escala, assim como a otimização de tais processos de conformação com o uso mais abrangente da simulação e análise por elementos finitos. O modelo convencional usado para chapas grossas ainda não é suficiente. De acordo com Hoffmann e Hong, existem investigações que mostram que, entre outras coisas, a espessura da chapa e o tamanho de grão do material podem influenciar no efeito escala, sendo importante considerar estas características do material na determinação da curva de escoamento.

Vollertsen e Hu em 2006 investigaram o atrito em função do tamanho do processo, para isso utilizaram tiras de chapas em diversas espessuras e diferentes diâmetros de punções e a partir de um modelo de cálculo a função do atrito pode ser obtida a partir de medidas experimentais de força do punção versus avanço do punção.

Yi Qin em 2006 dedicou-se a explorar as estratégias relativas ao desenvolvimento de equipamentos para microconformação através da análise do estudo da arte e do desenvolvimento de sistemas de manufatura em miniatura (microfábricas) como modelos de potencial em desenvolvimento.

Fung-Huei *et al* em 2008 apresentam uma modelagem matemática prática e eficaz para descrever o comportamento do material de qualquer espessura e tamanho de grão em microestampagem. Utilizando este modelo, um micro copo foi estampado e analisado pelo método de elementos finitos. Os resultados da simulação mostram que a variação na espessura e a distribuição de tensões são razoáveis, provando que através da modelagem matemática irá fornecer resultados satisfatórios levando em conta a espessura e o tamanho de grão para um processo de microestampagem.

Manabe *et al* em 2008, analisou a rugosidade da superfície da ferramenta sobre a peça através do método de elementos finitos (FEM) em um processo de microestampagem.

Chan *et al* em 2011 investigaram a deformação plástica e o atrito em micro escala por meio de ensaios de compressão em amostras de alumínio AA6061 e elementos finitos, mostrando que o efeito escala gera fenômenos como a diminuição da tensão de escoamento, o aumento da deformação local, do retorno elástico e do atrito.

Gong *et al* em 2011 investigou os efeitos da lubrificação em microestampagem, para isso utilizou Diamond Like Carbon (DLC), processo de revestimento que usa carbono semelhante ao

diamante, durante a estampagem de micro copos, comprovando que a utilização do DLC diminui drasticamente a força de estampagem, além de melhorar a razão limite de estampagem, se comparado a outras condições de lubrificação. Hu *et al*, (2012), também investigou o comportamento tribológico de revestimento DLC, comprovando a eficácia deste método, reduzindo significativamente o atrito na peça, mostrando que o DLC tem um grande potencial de aplicação em microconformação.

3.9 Análise por elementos finitos

O método de elementos finitos é uma ferramenta útil na análise de problemas termomecânicos. Fornece um meio para estudar em detalhes problemas complexos que conduzem a uma melhor compreensão e eventualmente otimização do processo. Métodos numéricos podem ser aplicados de diversas maneiras, permitindo comparar resultados obtidos experimentalmente com resultados obtidos através da simulação, alcançando um nível mais alto de precisão nos parâmetros de identificação. Desta forma, uma síntese entre experimentos e simulação, busca atingir um maior conhecimento entre os materiais e processos.

Outra grande aplicação do método de elementos finitos esta no projeto de ferramentas, matrizes e no dimensionamento de blanks para o processo de microestampagem. Isso porque o método de elementos finitos permite não só a otimização do processo, como também é capaz de prever defeitos que ocorrem ao longo do processo.

O propósito de usar o método de elementos finitos em conformação de metais é investigar o mecanismo dos processos de deformação plástica, com os seguintes objetivos (Oliveira, 2003):

- Estabelecer as relações cinemáticas (forma, velocidades, razões de deformação e deformações) desde a peça não deformada até a peça deformada ou acabada, ou seja, durante todo o processo de conformação;
- Estabelecer os limites de conformabilidade, ou seja, determinar se é possível ou não realizar a operação, sem causar danos superficiais ou internos no material, ao final do processo;
- Prever as tensões, os esforços e a energia necessária para realizar a operação de conformação. Essas informações são necessárias para o projeto das ferramentas e para a seleção dos equipamentos com capacidades apropriadas (força e energia).

Um grande número de defeitos e falhas pode ser encontrado no processo de estampagem. Os ajustes dos parâmetros muitas vezes são feitos por tentativa e erro, o que causa um grande

prejuízo de tempo e material. Assim a simulação numérica pode ser utilizada para otimizar todas as fases dos processo, com uma grande economia de tempo e redução de custos.

3.9.1 Introdução ao método de elementos finitos empregado no trabalho

Para as análises com a simulação empregadas no presente estudo foi usado o software de simulação em estampagem eta/DYNAFORM Versão 5.6 com o solver LS-Dyna versão 971.

O eta/DYNAFORM é um software de simulação em estampagem que usa o LS-DYNA como “solver”. O eta/DYNAFORM combina as análises do LS-DYNA versão 971 com as funções pré e pós-processador do próprio DYNAFORM. As funções iterativas e as análises dos elementos são integradas unicamente para servir a indústria de estampagem no dimensionamento de matrizes e no de desenvolvimento de peças finais.

O LS-DYNA é um solver de uso geral que incorpora as análises não lineares, dinâmicas e de elementos finitos utilizando capacidades implícitas e explícitas para resolver problemas tanto de fluidos como estrutural. Algumas análises atuais desse solver englobam simulação de acidentes automotivos, segurança dos ocupantes de automóveis, explosões subaquáticas e processos de estampagem.

O eta/DYNAFORM permite dar informações, no caso de uma estampagem, acerca da estampabilidade das chapas, atuação do prensa-chapas e do punção, retorno elástico do material, orelhamento causado pela anisotropia do material, espessura da chapa durante o processo, tendências a rupturas prematuras, tendências ao enrugamento e a possibilidade de realizar a estampagem em múltiplos estágios.

Algumas propriedades particulares do DYNAFORM são descritas abaixo para entender como foi executada a simulação:

Tipo de contato usado “Contact interface”: “Form one way Surface to Surface”

Esse tipo de contato é usado para modelar corpos rígidos que usam elementos tipo casca ao qual é necessário que a espessura desse corpo rígido seja levada em consideração.

O contato “(forming ou form) surface to surface” usa um recurso chamado projeção de nós (elementos) que consiste em fazer coincidir os nós da malha de uma superfície na outra, para que as forças possam ser transmitidas mesmo se não houver um perfeito acoplamento entre os nós das superfícies em contato. Esse recurso é muito preciso e bastante usado para o caso de conformação de metais onde um contato contínuo é necessário durante a simulação. A única desvantagem desse método é o alto custo de máquina para a simulação, ou seja, são necessários mais cálculos e a simulação é mais demorada.

Tipo de deslocamento empregado “Process Type”: “Double Action”

O movimento das ferramentas é relacionado com o tipo de deslocamento das mesmas (Draw Type). Se for definida uma ação simples (“Single Action”), o movimento é executado pela matriz e o punção permanece estático, se for definida uma ação dupla (“Double Action”), o movimento é executado pelo punção e a matriz permanece estática, porém pode-se atribuir uma pressão de atuação entre ela e o prensa-chapas, por isso a definição de duplo efeito.

Propriedade aplicada à geratriz “Material Property”: BELYTSCHKO-TSAY

A propriedade BELYTSCHKO-TSAY é usada para definir o tipo de formulação matemática que será aplicada nos elementos tipo casca da geratriz. Essa propriedade é amplamente usada em simulações de estampagem.

Para um elemento casca com cinco pontos de integração através da espessura, o elemento BELYTSCHKO-TSAY requer 725 operações matemáticas comparado a 4050 operações geradas pelo elemento Hughes-Liu que era usado antes de ser criado o elemento BELYTSCHKO-TSAY. Esse tipo de elemento foi criado em 1981 por BELYTSCHKO e TSAY e é baseado numa combinação das formulações co-rotacionais e de velocidade de deformação. A eficiência desse elemento é obtida de uma formulação matemática simplificada que resulta dessas duas suposições cinéticas. A parte co-rotacional da formulação evita as complexidades dos mecanismos não lineares através do acoplamento de um sistema de coordenadas no próprio elemento. A parte da velocidade de deformação da formulação facilita a avaliação dos balanços energéticos entre os elementos (LS-Dyna, 2006).

O elemento usado para definir as ferramentas (punção, matriz e prensa-chapas) também é do tipo casca, porém esse elemento é indeformável. A Figura 20 mostra a construção de todo o conjunto montado no simulador para a execução da estampagem com as malhas geradas e os detalhes de refinamento da malha nas regiões críticas.

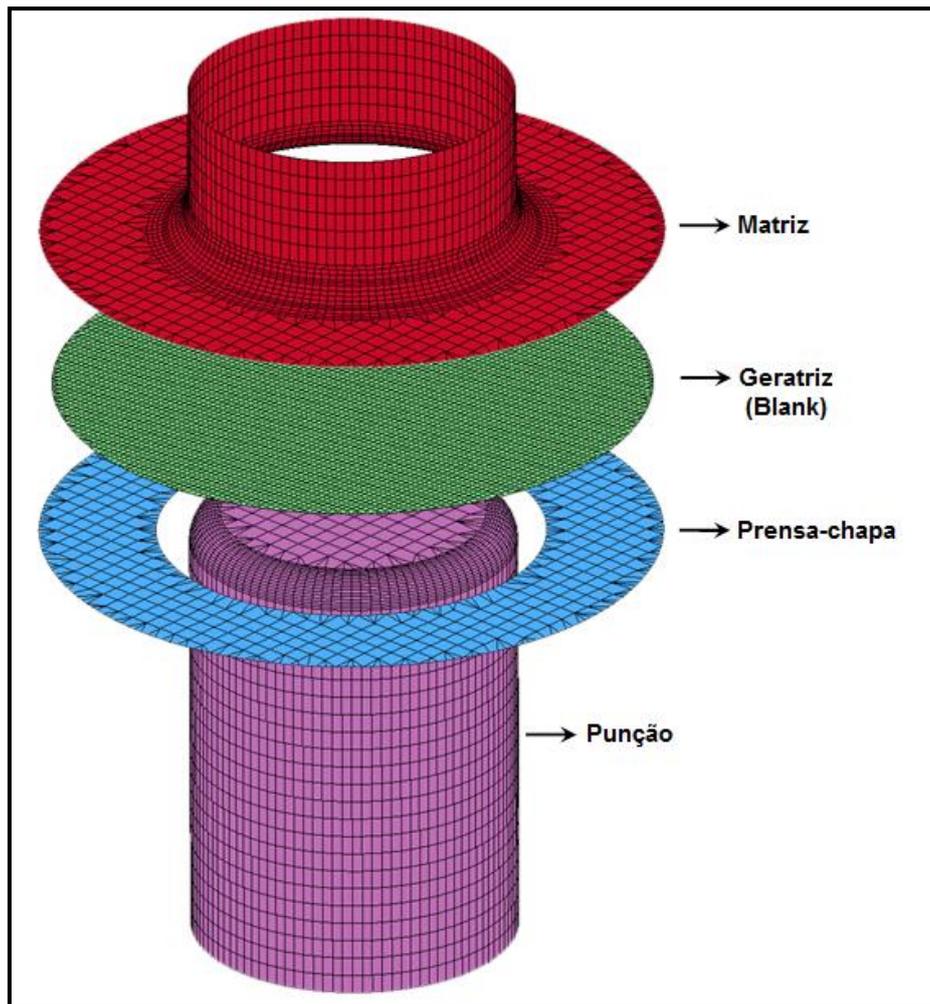


Figura 20. Conjunto montado no DYNAFORM para a simulação do processo de microestampagem.

Fonte: Folle, (2008).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Ensaios para obtenção das propriedades mecânicas do aço Inox ABNT 304 e ABNT 1010

Os ensaios tecnológicos são fundamentais para o processo de estampagem, servem para estimar a capacidade de conformação metálica nas etapas de produção bem como para se ter conhecimento a cerca de suas propriedades e assim poder comparar a outros materiais. Outra grande aplicação dos ensaios é alimentar os programas de simulação por elementos finitos. Os materiais utilizados para os ensaios foram o aço inox ABNT 304 e o aço ABNT 1010.

4.1.1 Ensaio de tração

De modo a obter as curvas de escoamento do aço ABNT 1010 e do aço inox ABNT 304, foram realizados ensaios de tração de acordo com a norma ABNT NBR 6152, em uma máquina universal de ensaios. Para realização do ensaio de tração, foram utilizados corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 21. Foram realizados três ensaios válidos para 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação.

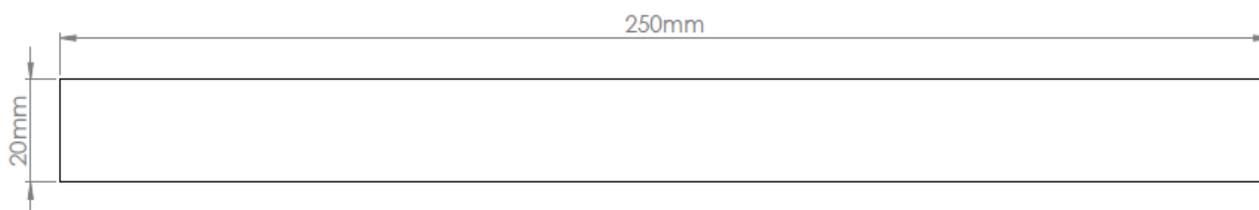


Figura 21. Corpo de prova para ensaio de tração.

O fato de geralmente as curvas de escoamento obtidas através do ensaio de tração, apresentarem um baixo grau de deformação, muitas vezes é necessário que se faça uma extrapolação matemática, onde para um processo de deformação a frio, utiliza-se a equação exponencial de Hollomon, tendo a seguinte forma:

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad (\text{eq.4})$$

Onde kf representa a tensão de escoamento, C é uma constante do material e n é o índice de encruamento.

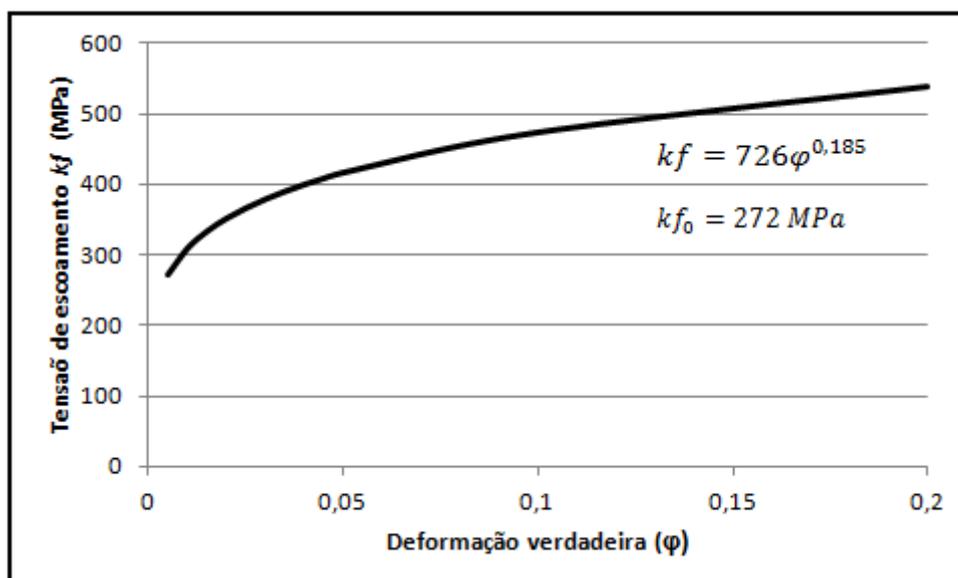


Figura 22. Curva de escoamento obtida através do ensaio de tração para o aço ABNT 1010.

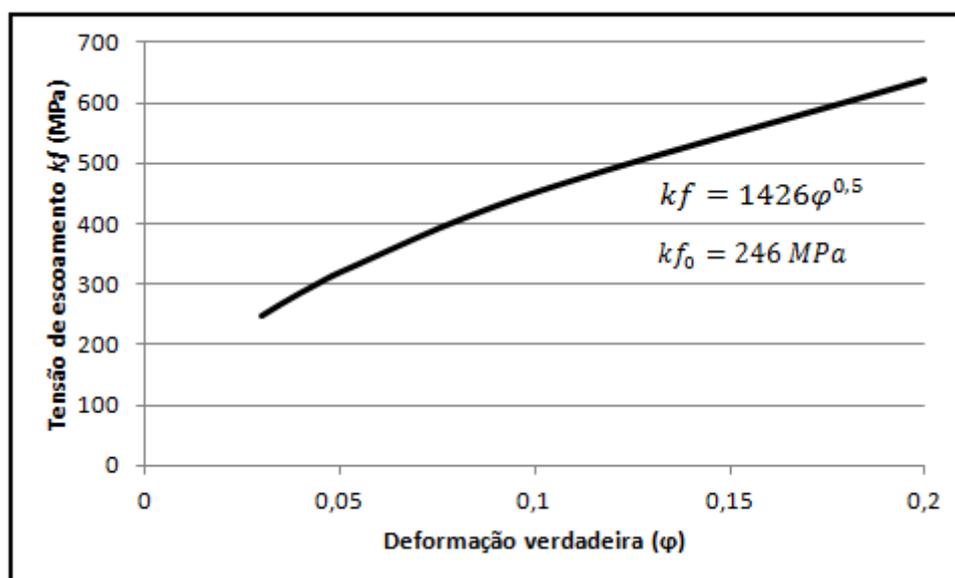


Figura 23. Curva de escoamento obtida através do ensaio de tração para o aço inox ABNT 304.

Os valores para constante do material “C” e o índice de encruamento “n” são mostrados na Tabela 7 para cada material.

Tabela 7. Coeficientes C e n para o aço ABNT 1010 e para o aço inox ABNT 304.

	C	n
ABNT 1010	726,0	0,185
Inox ABNT 304	1426,0	0,50

4.1.2 Índice de anisotropia

A anisotropia caracteriza as propriedades de uma chapa metálica levando-se em conta os efeitos de sua heterogeneidade causada no processo de laminação. Durante o processo de laminação de chapas metálicas ocorre a deformação da microestrutura e se originam grãos mais alongados na direção da laminação provocando uma heterogeneidade nas propriedades das chapas, apresentando valores diferentes, que dependem de como os corpos de prova são cortados de acordo com a direção em que o material foi laminado, uma vez que a laminação modifica a orientação cristalina dos grãos que compõem o material. Através da norma ABNT NBR 8164, foi determinada a anisotropia normal do aço ABNT 1010 e do aço inox ABNT 304 com três ensaios válidos para 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa. O valor médio de anisotropia r_m estima a anisotropia de um material e pode ser determinado a partir da equação (5):

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (\text{eq.5})$$

A anisotropia planar indica a diferença de comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa. O coeficiente de anisotropia planar Δ_r é dado pela equação (6):

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} - 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (\text{eq.6})$$

Os valores de anisotropia média e planar obtidas através das equações (5) e (6) estão expressas na Tabela 8.

Tabela 8. Valores de anisotropia média (r_m) e anisotropia planar (Δ_r) do aço ABNT 1010 e do aço inox ABNT 304.

Material	r_{0°	r_{45°	r_{90°	r_m	Δ_r
ABNT 1010	1,35	1,32	1,56	1,39	0,14
Inox ABNT 304	0,85	1,18	0,85	1,0	-0,32

4.2 Descrição do processo de corte das lâminas do rotor e do estator

4.2.1 Ferramenta para o corte convencional do rotor e estator

Um dos objetivos deste trabalho foi projetar e construir uma ferramenta que permitisse o desenvolvimento de pesquisas sobre o processo de corte por cisalhamento para chapas finas, em especial chapas empregadas na construção de motores elétricos. A solução encontrada foi projetar

uma ferramenta de corte utilizando apenas componentes convencionais de ferramentas para estampagem. O processo de corte fino mais conhecido por fineblanking poderia ter sido utilizado, porém além de não ser indicado para o corte de chapas com espessuras muito finas, elevaria os custos da ferramenta.

A Figura 24 mostra a foto da ferramenta construída. A ferramenta possui como estrutura principal uma base de estampo convencional e duas placas. A placa inferior e superior é guiada por pinos-guia. O punção é fixo na placa superior e a matriz na placa inferior. O processo de corte destina-se à obtenção de formas geométricas, a partir de chapas submetidas à ação de pressão exercida por um punção. O corte ocorre da seguinte forma, quando o punção inicia a penetração na chapa, o esforço de compressão converte-se em esforço cisalhante (esforço cortante) provocando a separação brusca de uma porção da chapa.



Figura 24. Ferramental empregado no corte das lâminas do rotor e do estator.

Para otimizar o processo de corte das chapas, foi projetada e construída uma ferramenta de corte sequencial (Figura 25), de forma a obter o rotor e o estator em um único golpe dado pela prensa. A ferramenta é completamente independente da prensa não necessitando ser fixada por meios de espigas ou grampos fixadores, sendo assim, a prensa age somente fornecendo a força para o processo de corte, diminuindo a possibilidade de possíveis desalinhamentos entre punção e matriz.

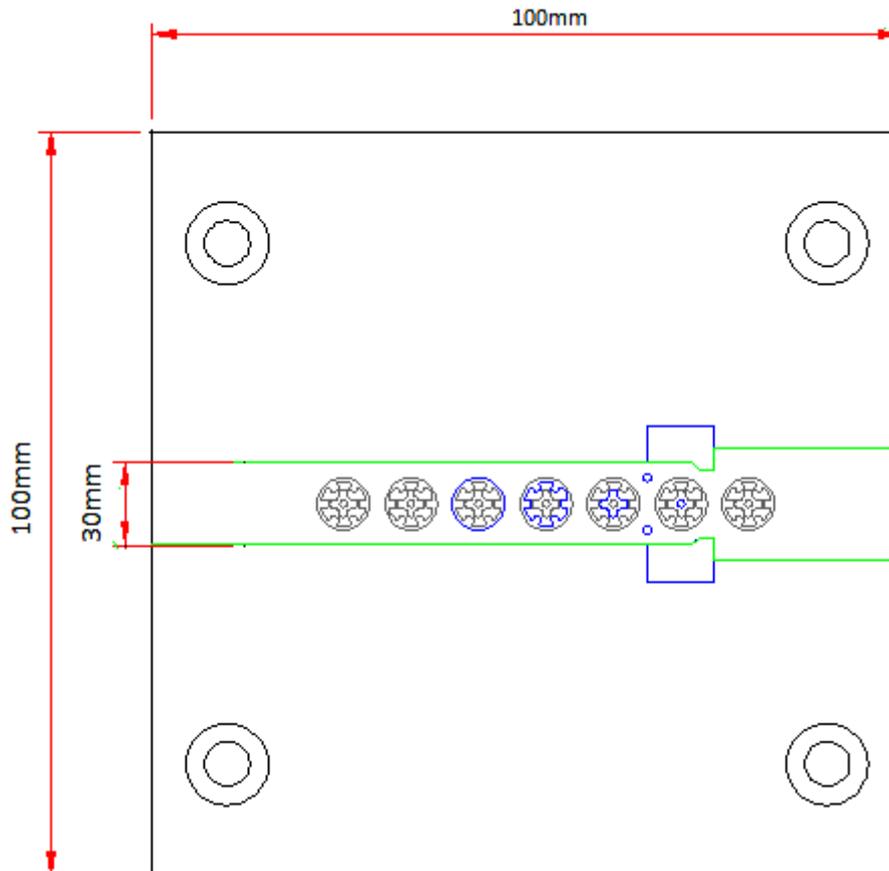


Figura 25. Desenho esquemático da ferramenta de corte das lâminas do rotor e do estator.

Outro parâmetro a ser considerado em uma operação de corte é a folga entre o punção e a matriz, isto porque são vários os parâmetros de influência, como: aspecto superficial do corte, imprecisões, operações posteriores e aspectos funcionais, etc. Em se tratando de chapas com espessuras muito finas, como a utilizada para este trabalho, a folga entre a matriz e o punção é muito pequena, praticamente inexistente, sendo assim, utilizou-se apenas o deslizamento da ferramenta de corte para o interior da matriz.

4.2.2 Corte do rotor e estator por eletroerosão a fio

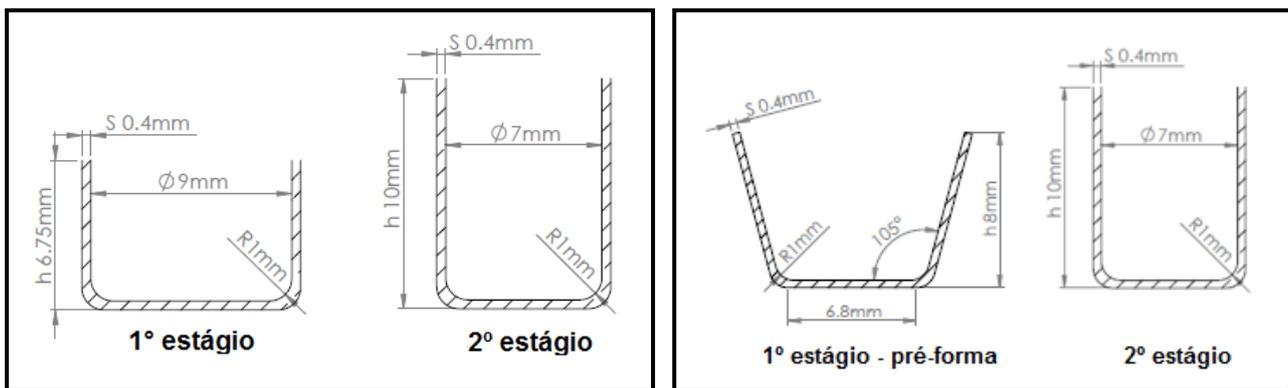
Para realizar o corte por eletroerosão a fio, utilizou-se uma máquina da marca FANUC modelo ROBOCUT α -0iE, fio de latão com diâmetro 0,25mm e lubrificação a água. Uma foto ilustrativa do equipamento de corte por eletroerosão a fio pode ser visto na Figura 26.



Figura 26. Equipamento utilizado para o corte por eletroerosão a fio. Fonte: Fanuc, (2010).

4.3 Simulação computacional do processo de microestampagem

Os materiais empregados na simulação foram chapas de aço carbono ABNT 1010 e aço inoxidável ABNT 304, ambos com espessura de 0,4mm. As geometrias, as quais foram simuladas, estão expressas na Figura 27. O objetivo de se utilizar dois materiais foi apenas para avaliar o comportamento de ambos através da simulação numérica por elementos finitos quando submetidos a um processo de miniaturização. Como ambos os materiais possuem características diferentes, sendo o aço inoxidável ABNT 304 de melhor estampabilidade, espera-se que este material apresente melhores resultados que o aço ABNT 1010.



a)

b)

Figura 27. Geometrias utilizadas na simulação. a) microestampagem convencional em dois estágios para o aço ABNT 1010 e aço inox ABNT 304. b) microestampagem em dois estágios com uma pré-forma inicial para o aço ABNT 1010.

As propriedades mecânicas do aço ABNT 1010 assim como do aço inox ABNT 304, foram descritas anteriormente. A escolha do aço inoxidável ABNT 304 deve a sua grande aplicabilidade, além de suas excelentes características, quando se pretende obter peças estampadas e de embutimento profundo.

As propriedades aplicadas aos materiais usados, aço inox ABNT 304 e aço ABNT 1010, usados como dados de entrada no DYNAFORM, estão descritas na Tabela 9.

Tabela 9. Propriedades usadas para definir o material da geratriz no DYNAFORM.

Propriedades do Material	Inox 304		ABNT 1010	
Densidade	7,85	g/cm ³	7,83	g/cm ³
Modulo de Young	207000	N/mm ²	207000	N/mm ²
Coeficiente de Poisson	0,28		0,28	
Índice de encruamento (<i>n</i>)	0,50		0,185	
Constante do material (<i>C</i>)	1426		726	
Índice de anisotropia (<i>r_m</i>)	1,0		1,39	
Tensão de escoamento (<i>kf₀</i>)	272	MPa	246	MPa

A curva tensão vs. deformação verdadeira é criada pelo DYNAFORM através de *C* e *n* dada pela equação (4), criada por Hollomon. Essa equação permite uma boa aproximação desde que obedeça a algumas condições como, por exemplo, realizar o ensaio a temperatura ambiente. A parte inicial da curva tensão vs. deformação (parte elástica) é criada pelo DYNAFORM informando-se a deformação e tensão de escoamento e a parte final da curva (ruptura) também é informada por uma deformação final.

A Curva Limite de Conformação (CLC) também é criada pelo DYNAFORM através de *n*, dada pela equação (4), e pela espessura inicial da geratriz. Essa forma de criação da CLC foi concebida por Keeler através de uma relação empírica. A CLC criada por esse método é bastante próxima da maioria das CLC's medidas através de ensaios.

A Figura 28 mostra uma representação esquemática das ferramentas montadas no DYNAFORM para uma simulação em dois estágios para o aço inoxidável ABNT 304 e ABNT 1010, já a Figura 29 mostra uma representação esquemática das ferramentas montadas no DYNAFORM para uma simulação em dois estágios para o aço ABNT 1010, sendo o primeiro estágio com uma pré-forma inicial.

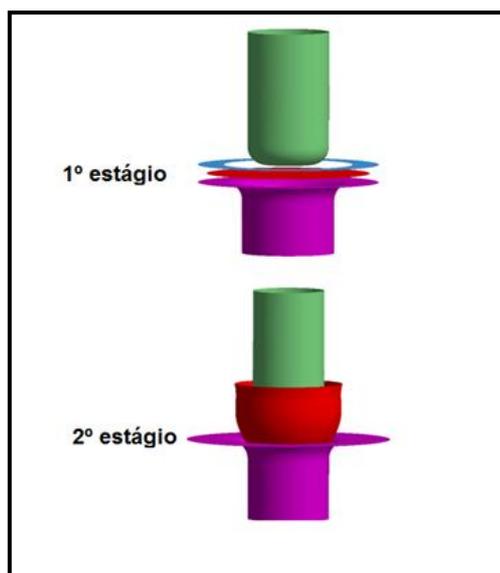


Figura 28. Representação esquemática da montagem no DYNAFORM para uma simulação em dois estágios para o aço inox ABNT 304 e ABNT 1010.

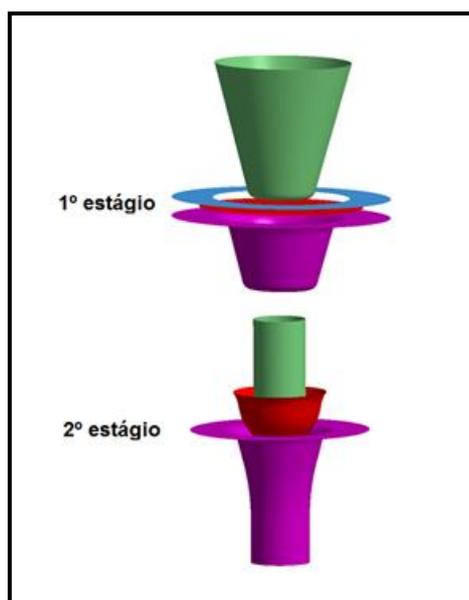


Figura 29. Representação esquemática da montagem no DYNAFORM para uma simulação em dois estágios para o aço ABNT 1010 com uma pré-forma inicial.

4.4 Descrição do processo de microestampagem da carcaça

As ferramentas utilizadas para o processo de microestampagem do copo (carcaça) foram projetadas e construídas com base nos resultados obtidos através do método de simulação empregado. As ferramentas são compostas por duas bases, superior e inferior, matriz, punção, prensa-chapas e suporte do punção. Assim como no processo de corte em matriz, a ferramenta construída é completamente independente da prensa não necessitando ser fixada por meios de

espigas ou grampos fixadores, sendo assim, a prensa age somente fornecendo a força para o processo de estampagem, diminuindo a possibilidade de possíveis desalinhamentos entre punção e matriz. A Figura 30 ilustra uma representação em corte das ferramentas utilizadas para o processo de microestampagem do copo.

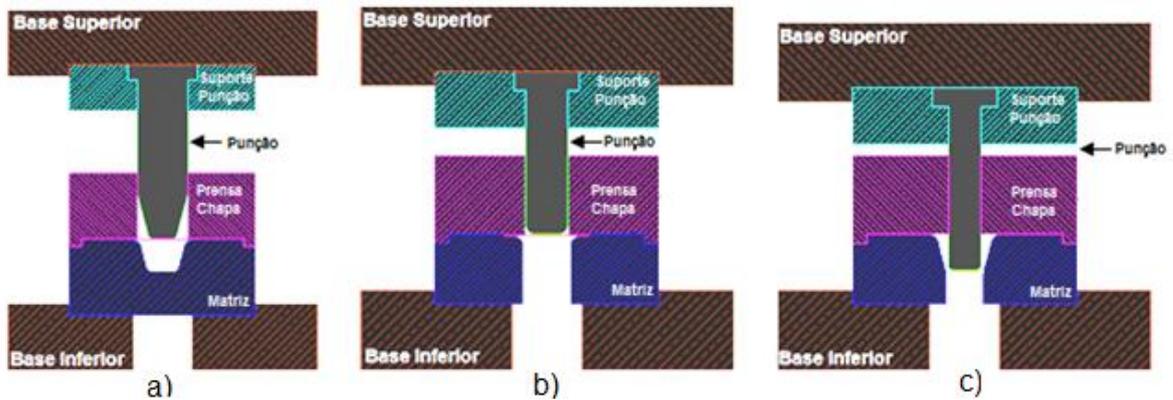


Figura 30. Desenho em corte das ferramentas utilizadas para microestampagem do copo. a) ferramenta de primeiro estágio com uma pré-forma inicial. b) ferramenta de primeiro estágio convencional. c) ferramenta de segundo estágio.

Na Figura 31 estão expressas as dimensões do punção e matriz empregados na microestampagem do copo, sendo esta uma pré-forma inicial. A figura 32 apresenta as dimensões do punção e da matriz para o primeiro estágio convencional e a Figura 33, apresenta as dimensões do punção e matriz para o segundo estágio, estágio final.

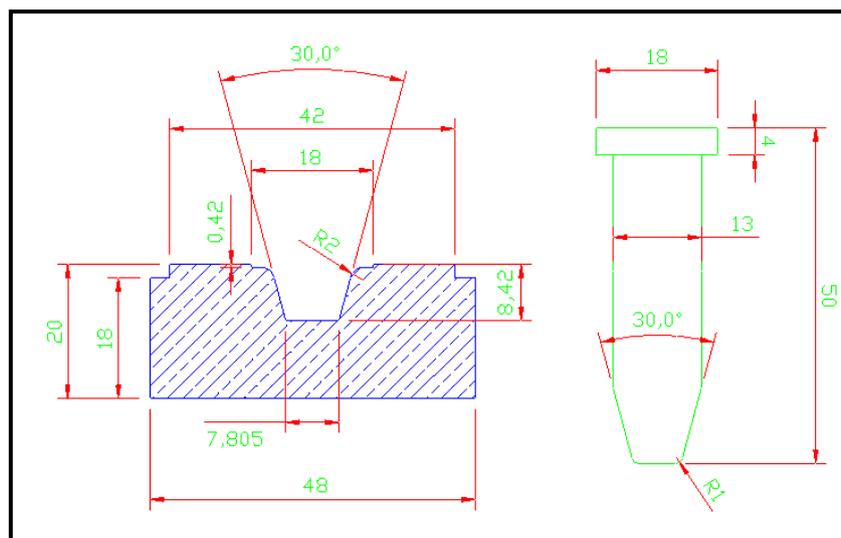


Figura 31. Dimensões do punção e da matriz empregados no primeiro estágio com uma pré-forma inicial.

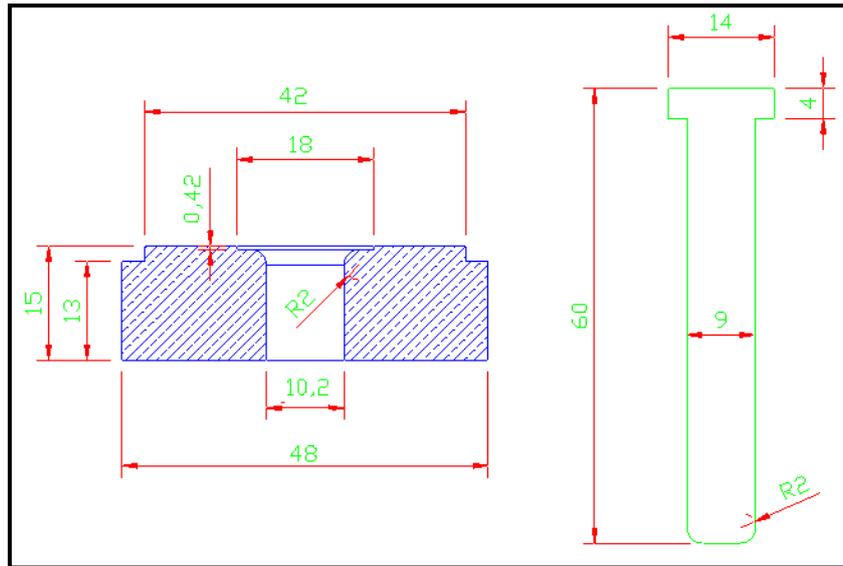


Figura 32. Dimensões do punção e da matriz empregados no primeiro estágio convencional.

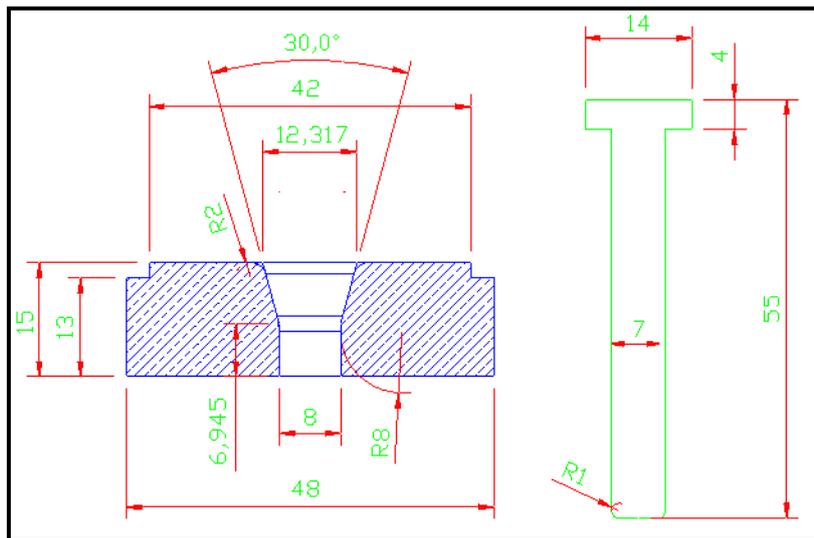


Figura 33. Dimensões do punção e da matriz empregados no segundo estágio, estágio final.

Para que fosse feito o corte dos blanks para depois serem estampados, foi projetada e construída uma ferramenta de corte. Trata-se de uma ferramenta simples, sem a presença de grampos ou espigas para fixar, sendo necessária apenas a força da prensa para realizar o corte das tiras. A Figura 34 mostra uma imagem desta ferramenta, onde foi realizado o corte dos blanks.

A partir do corte dos blanks, foi realizada a microestampagem das peças. A Figura 35 ilustra a montagem da ferramenta de microestampagem e o conjunto de matrizes e punções empregados no processo. As dimensões de cada conjunto, já foram descritas anteriormente.

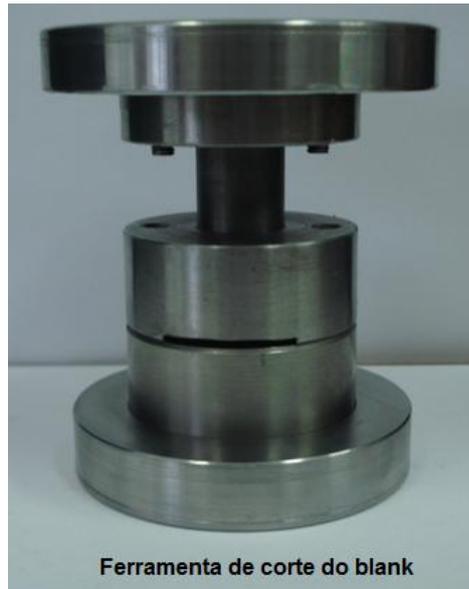


Figura 34. Ferramenta de corte do blank.

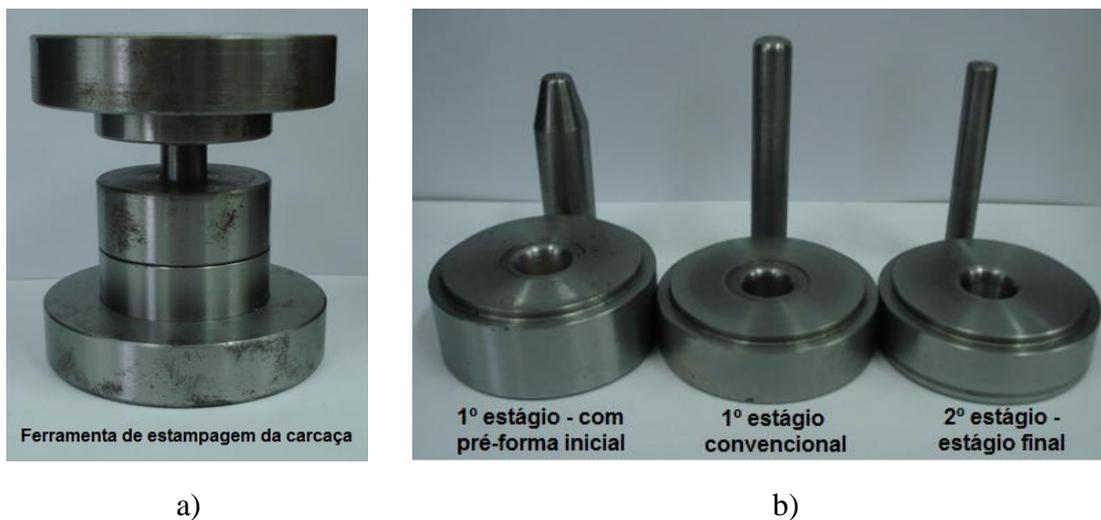


Figura 35. Conjunto de ferramentas utilizadas para microestampagem da carcaça. a) ferramenta utilizada para a estampagem das peças. b) conjunto de matrizes e punções.

O equipamento utilizado para o processo de microestampagem foi uma prensa hidráulica da marca Bovenau, modelo P30000 – 30ST com capacidade de $294kN$. A Figura 36 ilustra uma foto do equipamento, juntamente com a ferramenta de microestampagem. A escolha por utilizar este equipamento deve-se ao fato de que a força exigida para estampar o copo é relativamente baixa, além disso, permite que a peça (copo) possa ser estampada a uma velocidade relativamente baixa, podendo assim ter um maior controle do processo.



Figura 36. Equipamento utilizado para microestampagem.

O lubrificante utilizado para os ensaios práticos são de uso comercial e de base mineral. A metodologia de aplicação do lubrificante consistiu em passar esse em ambos os lados da geratriz, isto é, na chapa a ser estampada. Como a quantidade de lubrificante espalhada na chapa foi em excesso, este se espalha para o punção e as ferramentas, não necessitando assim lubrificá-los.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise da superfície de corte das lâminas do rotor e do estator do micromotor

5.1.1 Corte convencional

Vários são os fatores que influenciam o desempenho magnético e energético de um motor, sendo condicionado a este trabalho apenas analisar a superfície de corte das peças obtidas durante a operação de corte das chapas. Em geral, motores elétricos de corrente alternada, baseiam-se no fluxo magnético variável, de forma a produzir uma força no entreferro, fazendo o rotor girar com torque definido. A passagem deste fluxo magnético em um meio condutor (as lâminas de aço) produzem correntes induzidas indesejáveis, provocando perdas energéticas no motor. Os fatores que influenciam essas perdas são a espessura da chapa, incorporação de silício ao aço, rebarbas devido ao processo de corte das chapas, entre outros (Oliveira, 2009).

As lâminas manufaturadas através de processo de corte em matriz (ver Figura 37) foram depois agrupadas formando os pacotes do estator e rotor, conforme ilustrado na Figura 38.

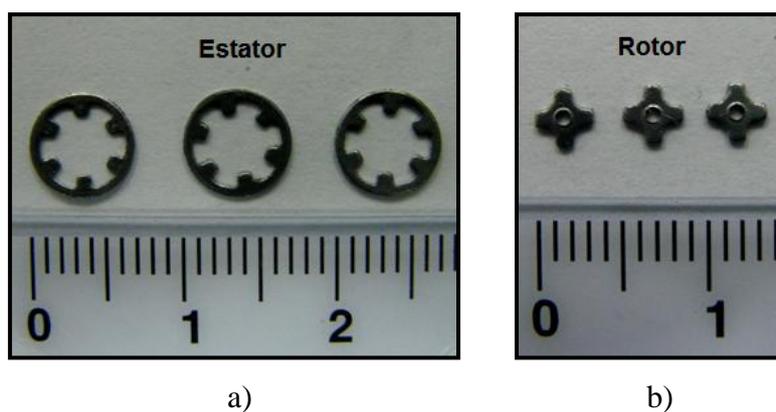


Figura 37. Lâminas obtidas pelo processo de corte em matriz. a) estator. b) rotor.

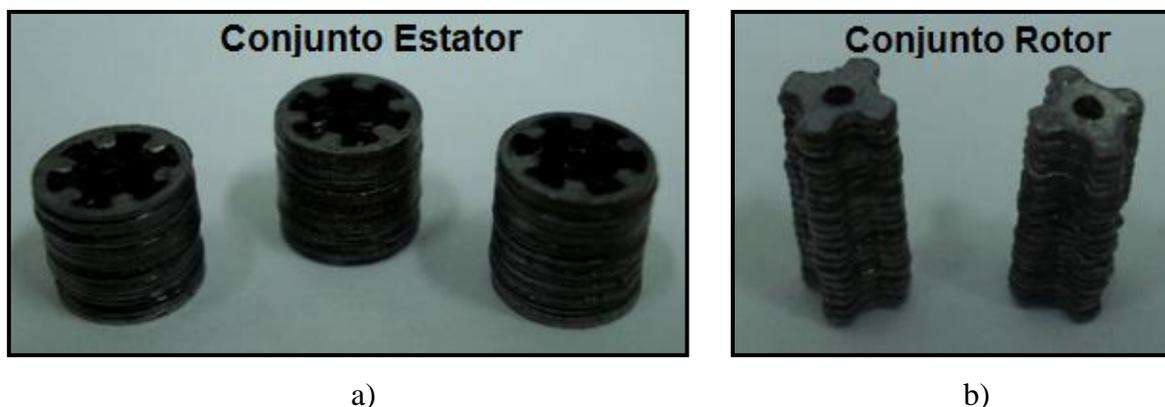


Figura 38. Conjunto do rotor e estator em formato de pacote. a) estator. b) rotor.

Outro problema recorrente do processo de corte, descrito por Oliveira, (2009), é que o processo de corte do material deteriora a estrutura cristalina dos domínios magnéticos. Como os grãos (ou domínios magnéticos) têm uma distribuição homogênea ao longo do material, a perda por histerese é homogênea no material. O processo de corte faz com que essa forma deixe de ser homogênea na região próxima ao corte, acarretando no aumento da perda por histerese. A Figura 39 e a Figura 40 mostram a nível microscópico como fica a região de corte das lâminas do estator e do rotor após a operação de corte em matriz.

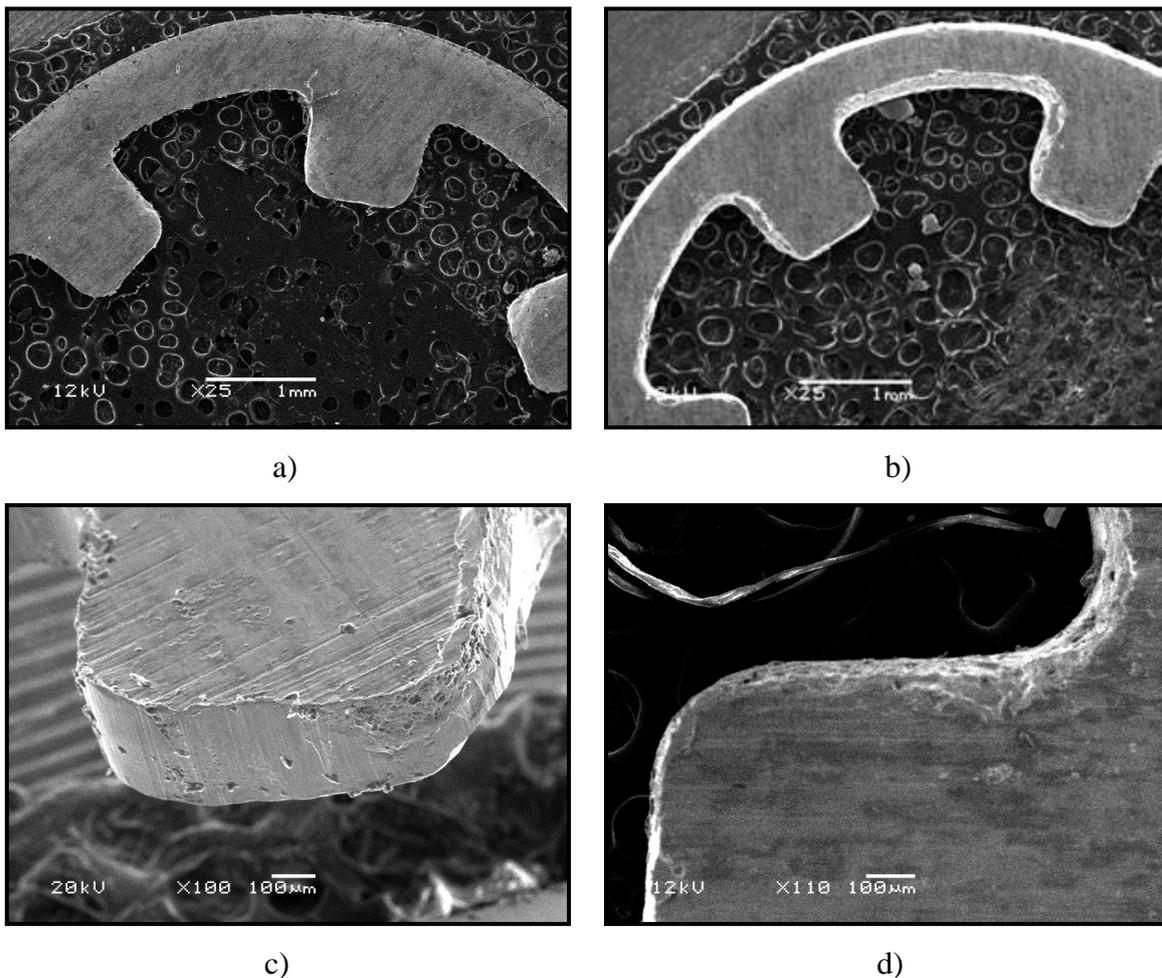


Figura 39. Foto microscópica da região de corte do estator pelo processo de corte em matriz. a) parte inferior do estator, região da chapa em que não entrou em contato direto com o punção. b) parte posterior do estator, onde houve o contato direto com o punção, ocorrendo o cisalhamento e a zona de fratura da peça. c) região de corte do polo do estator. d) região de corte entre os polos do estator.

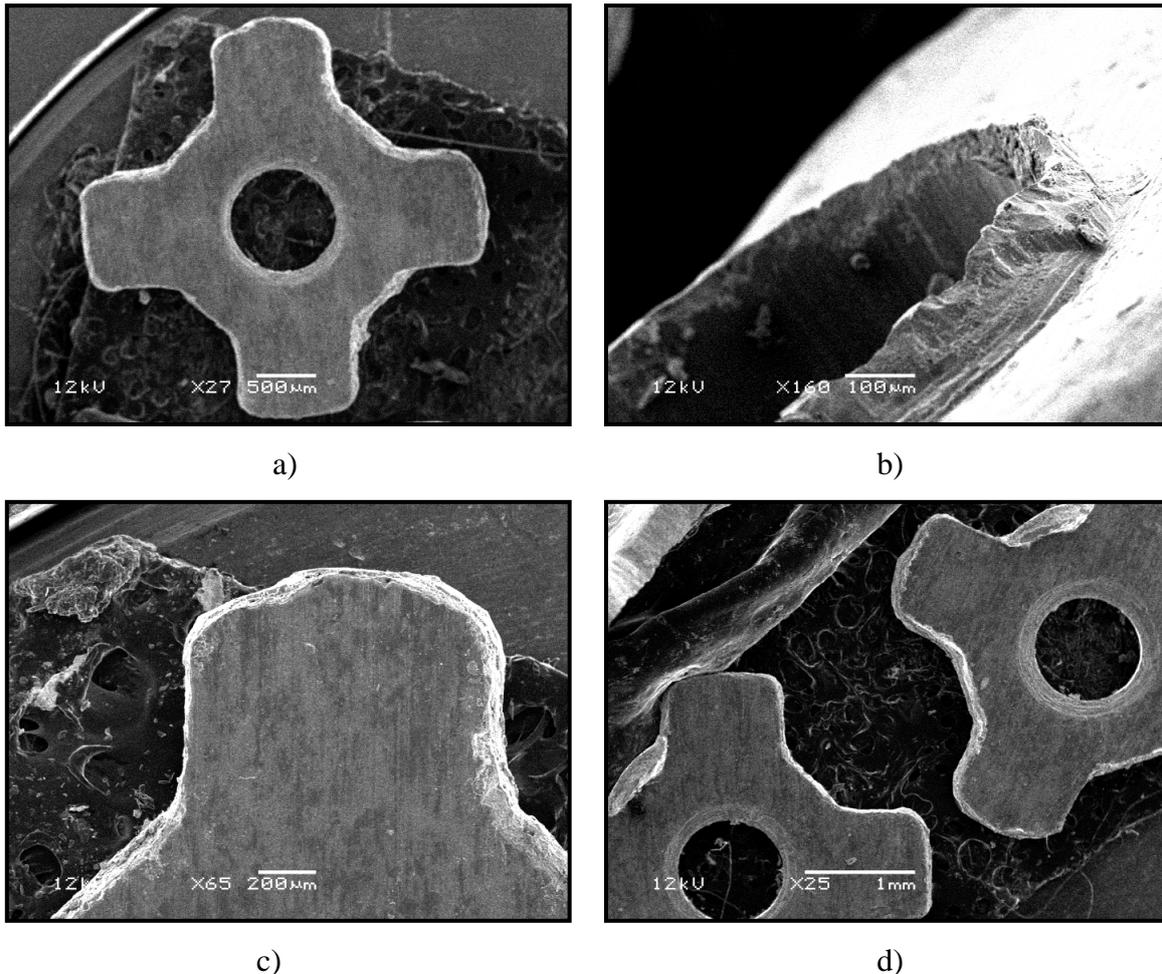


Figura 40. Foto microscópica da região de corte do rotor pelo processo de corte em matriz. a) parte posterior do rotor, onde houve o contato direto com o punção, ocorrendo o cisalhamento e a zona de fratura da peça. b) rebarba. c) região de corte do polo do rotor. d) região de corte entre os polos do rotor.

Análises da superfície da região de corte feitas através da microscopia eletrônica de varredura mostraram que o processo de corte em matriz ocasionou o amassamento das bordas, o surgimento de rebarbas e pequenas trincas ao longo da superfície de corte.

Com o surgimento destas imperfeições ocorridas ao longo do processo de corte, e por as lâminas não apresentarem uma boa planicidade devido ao empenamento gerado pelo processo de corte, isso acabou dificultando a montagem e principalmente o alinhamento final do conjunto do rotor e do estator.

Tendo em vista que os resultados obtidos pelo processo de corte convencional não foram satisfatórios, devido à ocorrência de diversos fatores citados anteriormente e que dificultaram não só a montagem do conjunto, mas que podem gerar grandes perdas a este motor, optou-se por fazer o corte das peças pelo processo de eletroerosão a fio.

5.1.2 Corte por eletroerosão a fio

As lâminas do rotor e estator obtidas pelo processo de corte por eletroerosão a fio, estão expressas na Figura 41. A ausência do furo interno no rotor ocorre porque o diâmetro do furo interno é de apenas 1mm de diâmetro, como o diâmetro do fio utilizado para o processo de corte é de 0,25mm de diâmetro, não haveria como realizar o furo para esta determinada dimensão.

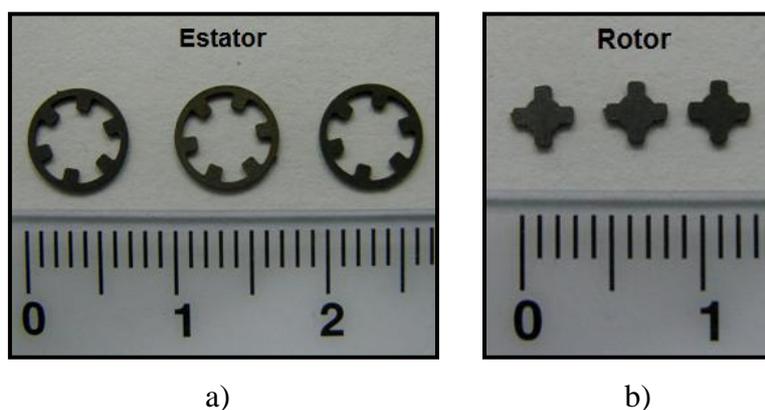


Figura 41. Lâminas obtidas pelo processo de corte por eletroerosão a fio. a) estator. b) rotor.

O fato de não haver imperfeições ou qualquer tipo de alteração na região de corte, mantendo a planicidade das peças, facilita a montagem e proporciona um excelente alinhamento do conjunto conforme pode ser visto na Figura 42, o que não foi possível com as peças obtidas pelo processo de corte em matriz.



Figura 42. Conjunto rotor e estator em formato de pacote. a) estator. b) rotor.

A eficácia deste processo pode ser visto através de uma análise microscópica de varredura, onde estão apresentadas as superfícies de corte do estator (Figura 43) e do rotor (Figura 44) obtidas pelo processo de corte por eletroerosão a fio. As imagens mostram em diferentes ângulos

que o processo de corte por eletroerosão a fio proporcionou superfícies lisas, sem que houvesse imperfeições na superfície de corte, ao contrário do processo de corte convencional.

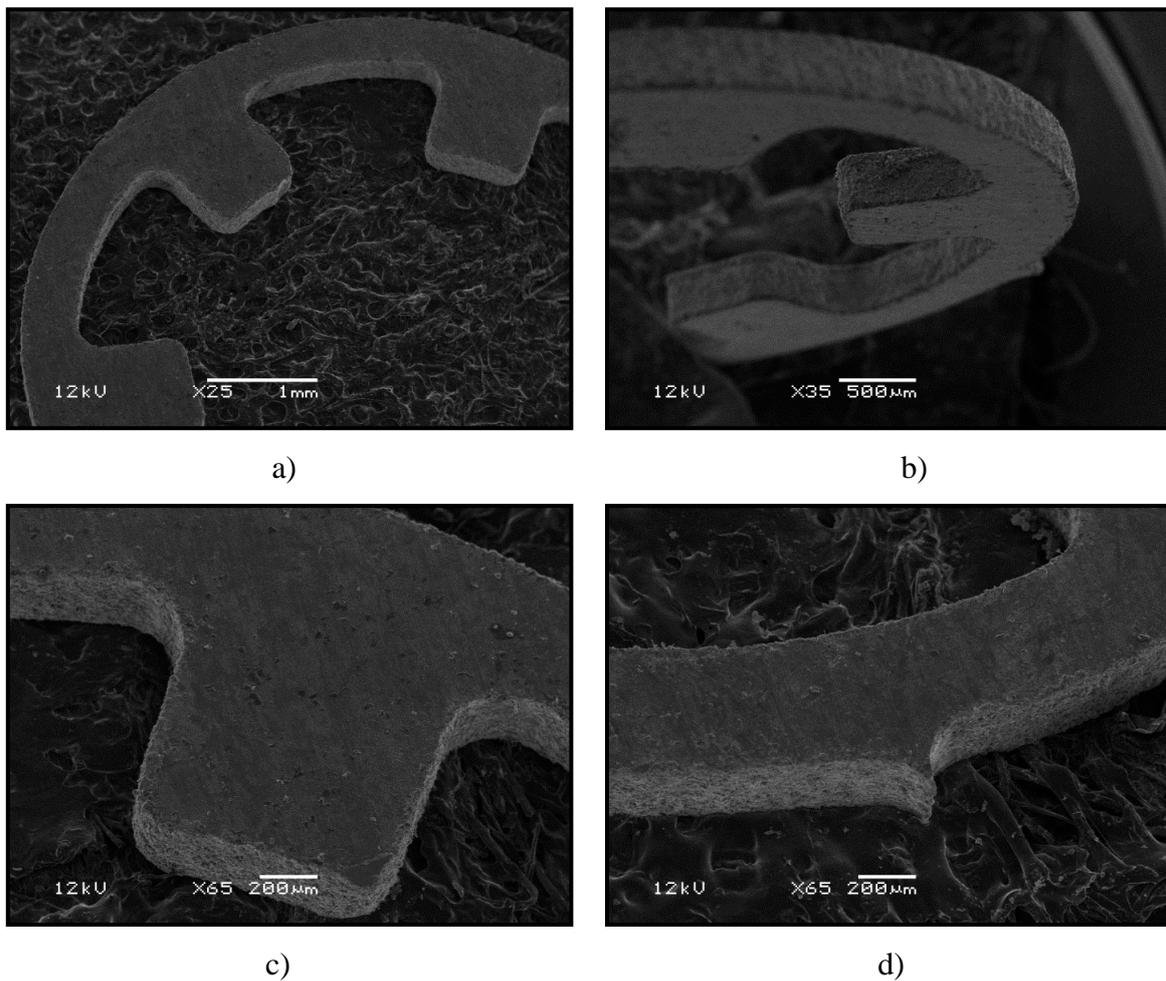
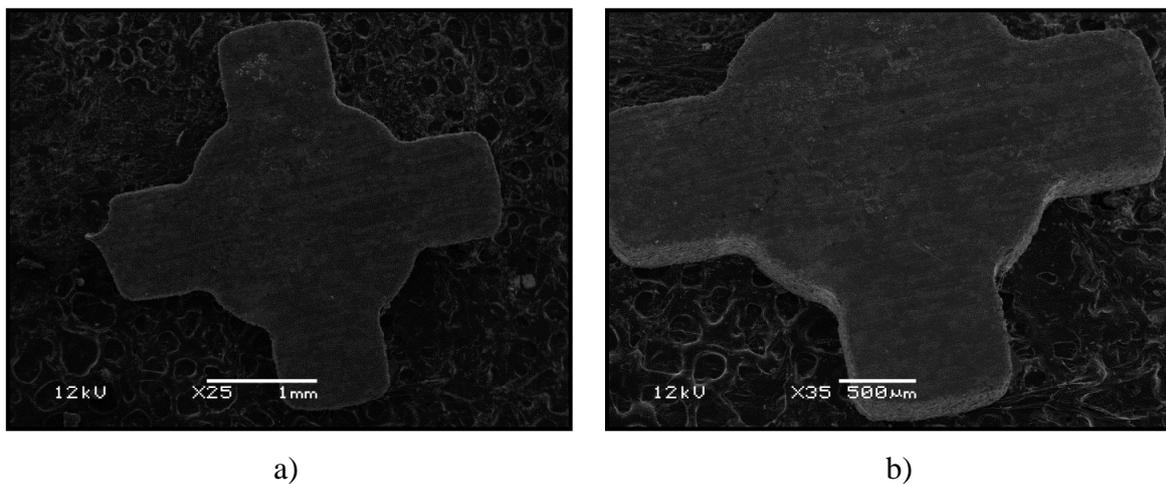
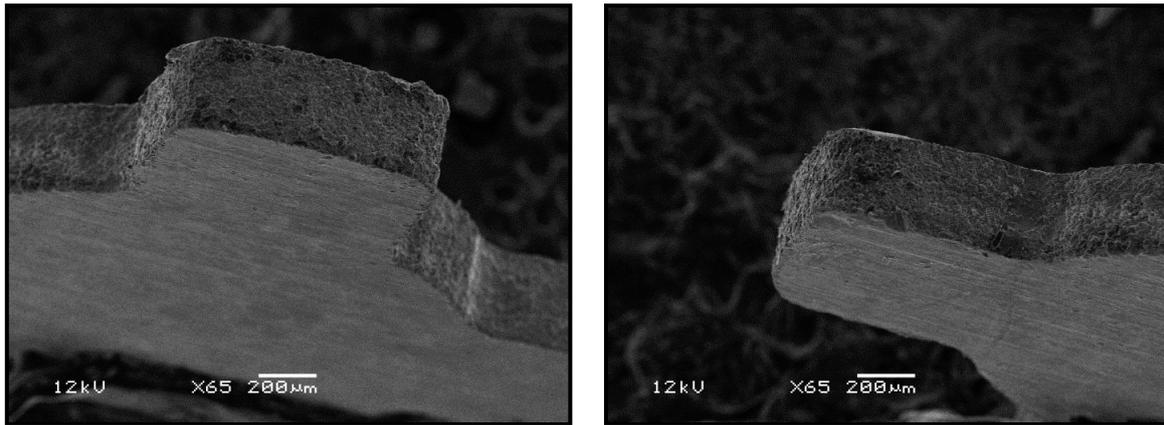


Figura 43. Foto microscópica da região de corte do estator obtida pelo processo de eletroerosão a fio. a) região posterior do estator. b) região inferior do estator. c) polo do estator. d) rebarba causada pelo fio ao final do processo.





c)

d)

Figura 44. Foto microscópica da região de corte do rotor obtida pelo processo de eletroerosão a fio. a) rotor com rebarba em um dos polos. b) polos do rotor. c) região posterior do rotor. d) região inferior do rotor.

A rebarba gerada no estator e no rotor durante o processo de corte por eletroerosão a fio ocorreu ao final do processo, onde o conjunto despreendeu-se do dispositivo em que estava fixado encostando no fio. Isso fez com que surgisse essa pequena rebarba em ambas as peças.

Um das desvantagens de se utilizar este processo está relacionado ao custo e ao tempo, visto que o processo convencional pode produzir grandes quantidades de peças em um espaço de tempo menor, além de ter um custo mais baixo por necessitar de equipamentos mais simples que o processo de corte por eletroerosão a fio. Por outro lado, o processo proporciona peças lisas, isentas de rebarbas e de trincas ao longo da superfície, tornando-se um processo viável quando se busca produzir pequenas quantidades de peças.

5.2 Resultados da simulação computacional para o processo de microestampagem do copo

Neste estudo foram desenvolvidos vários modelos utilizando para a mesma geometria o aço ABNT 1010 e o aço inoxidável ABNT 304. O objetivo foi avaliar a influência do efeito escala em um processo de microestampagem através da simulação por elementos finitos, assim como o dimensionamento das matrizes para o processo de microestampagem do copo.

Alguns parâmetros foram definidos para realizar as simulações, são eles: O raio de curvatura (filete) de todas as matrizes foi de 2mm. A matriz, o punção e o prensa-chapas foram modelados como corpos rígidos. O coeficiente de atrito entre as ferramentas e o blank foi de 0,05. Para modelagem do blank utilizou-se elemento finito de casca com malha de 0,5mm. A matriz, o punção e o prensa-chapas foram também modelados como elementos de casca com malha de 0,3mm e refinamento de malha de 0,05mm nas regiões críticas, conforme mostrado anteriormente na Figura

20. Estes parâmetros foram definidos através de uma análise visual dos resultados obtidos nas simulações, onde foi escolhido os que tiveram melhores resultados, sendo que para chegar a estes valores foram realizadas inúmeras simulações.

De acordo com a geometria do copo (carcaça), foram realizadas simulações de modo a obter o copo em uma única etapa de embutimento. Os resultados obtidos durante a simulação para microestampagem do copo em uma única etapa para o aço ABNT 1010 e para o aço inoxidável ABNT 304 podem ser vistos na Figura 45.

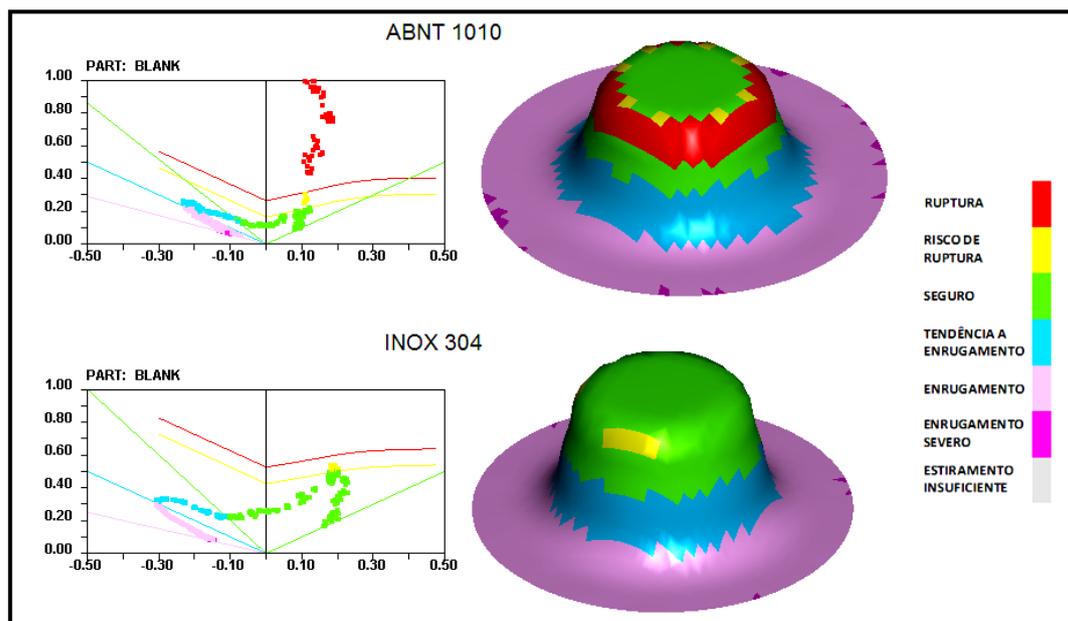


Figura 45. Resultado da simulação para a microestampagem do copo em uma única etapa.

Os resultados obtidos na simulação mostram que não será possível realizar o processo em uma única etapa. Ambos os materiais apresentaram indícios de ruptura antes mesmo do final do processo.

Simulações realizadas em função da espessura do material mostram que as regiões onde há indícios de ruptura, apresentaram índices elevados de redução na espessura, o que leva o material ao rompimento. A Figura 46 mostra os resultados da simulação em relação à espessura, para o aço ABNT 1010 e aço inox ABNT 304, durante o processo de microestampagem em uma única etapa. A região da peça em azul escuro significa aumento de espessura, já a região em vermelho, mostra que há uma grande redução na espessura da chapa. O aumento da espessura ocorre na região onde há enrugamento do material, durante o processo de microestampagem.

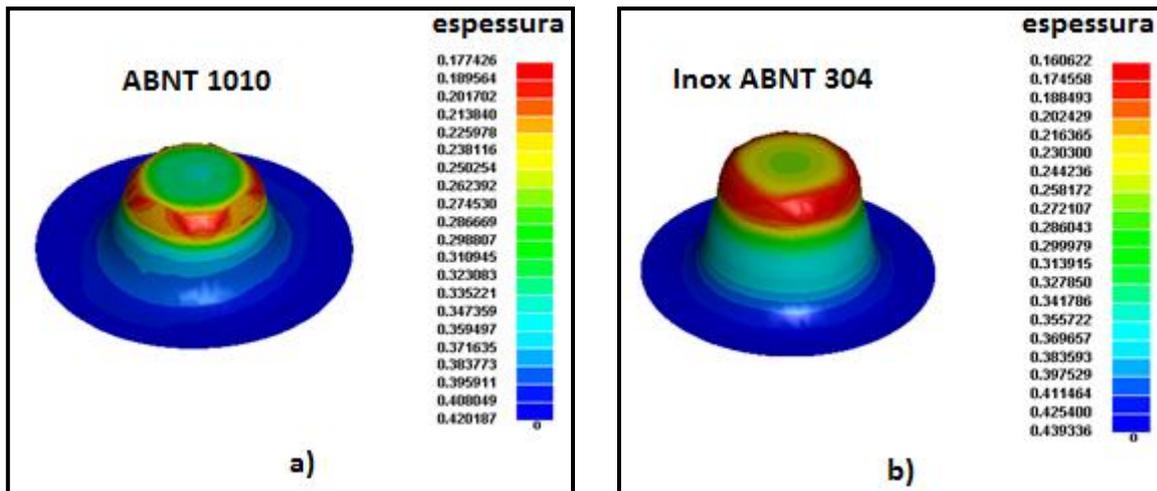


Figura 46. Simulação em relação à espessura para o processo de microestampagem do copo em uma única etapa. a) simulação para o aço ABNT 1010. b) simulação para o aço inox ABNT 304.

Como não foi possível realizar o processo em um único estágio, este será dividido em duas etapas ou dois estágios. Os parâmetros geométricos para simulação do processo de microestampagem do copo em dois estágios estão expressos na Tabela 10.

Tabela 10. Parâmetros geométricos para microestampagem do copo em dois estágios.

Parâmetros Geométricos	
Primeiro estágio	
Diâmetro da geratriz D (mm)	18,0
Diâmetro do copo d_1 (mm)	9,0
Altura do copo h_1 (mm)	6,75
Relação de estampagem β	2,0
Segundo estágio	
Diâmetro do copo d_2 (mm)	7,0
Altura do copo h_2 (mm)	10,0
Relação de estampagem β	1,3

A Figura 47 e a Figura 48 mostram os resultados da simulação obtidos para o primeiro e segundo estágio convencionais. Os materiais empregados foram o aço ABNT 1010 e o aço inox ABNT 304.

Um dos problemas encontrados na microestampagem está relacionado com o prensa-chapas. Segundo Basti *et al* (2011), a força necessária para uma microestampagem é insignificante se

comparado a um processo convencional, isso ocorre devido a diferença de pressão na área de contato, ou seja, em um processo micro, a área de contato entre o blank e o prensa-chapa é muito pequena, levando assim ao enrugamento do copo.

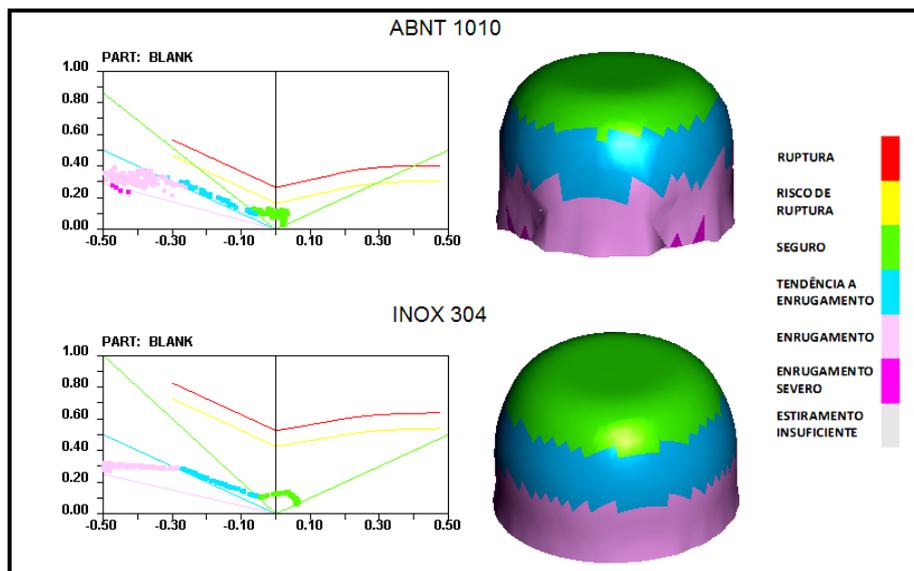


Figura 47. Resultado da simulação para a microestampagem do copo – primeiro estágio.

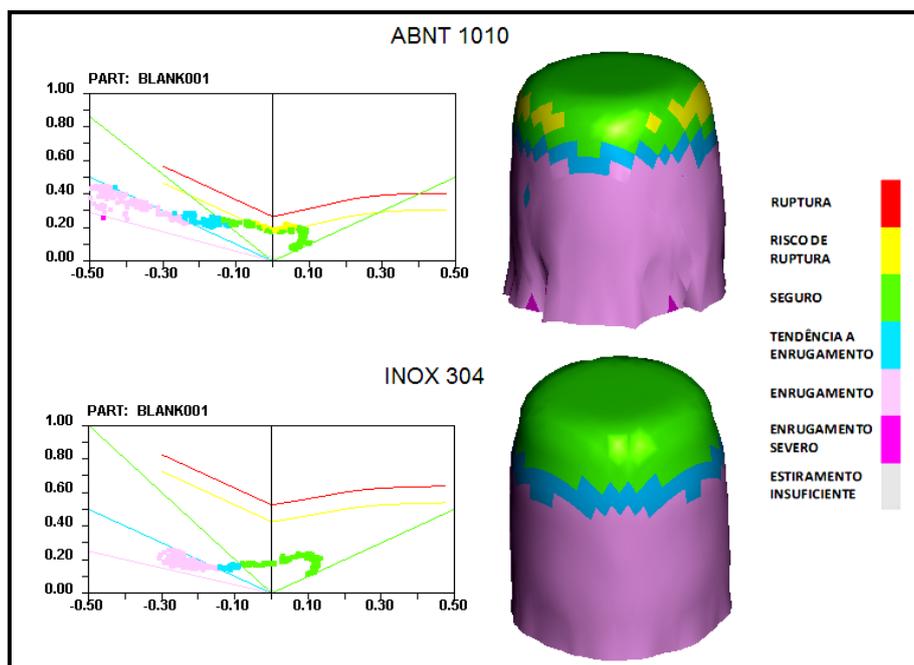


Figura 48. Resultado da simulação para a microestampagem do copo - segundo estágio.

O fato de a área de contato entre o prensa-chapas e o blank ser muito pequena em processos micro leva ao enrugamento do copo logo na etapa inicial, caso do aço ABNT 1010, que apresentou enrugamento logo na primeira etapa, isso faz com que o segundo estágio se torne inviável

em um experimento físico, pois aumentaria o enrugamento do mesmo, ocasionando amassamentos e o risco de ruptura da peça.

Para o Inox ABNT 304, o enrugamento na etapa inicial (primeiro estágio) foi relativamente pequeno, podendo ser visto apenas nas bordas do copo, o mesmo ocorreu no segundo estágio, tendo um pequeno aumento se comparado ao primeiro estágio. O fato de haver um pequeno enrugamento na primeira etapa, para este caso, não proporcionaria problemas para uma segunda etapa, caso contrário ao aço ABNT 1010.

O fato de ter havido enrugamento severo na região da borda do copo, gerou um aumento significativo da espessura da chapa nesta região, conforme mostrado na Figura 49 e Figura 50. Para os dois casos em questão a redução na espessura apresentou um maior índice durante o segundo estágio, se concentrando na região do fundo copo.

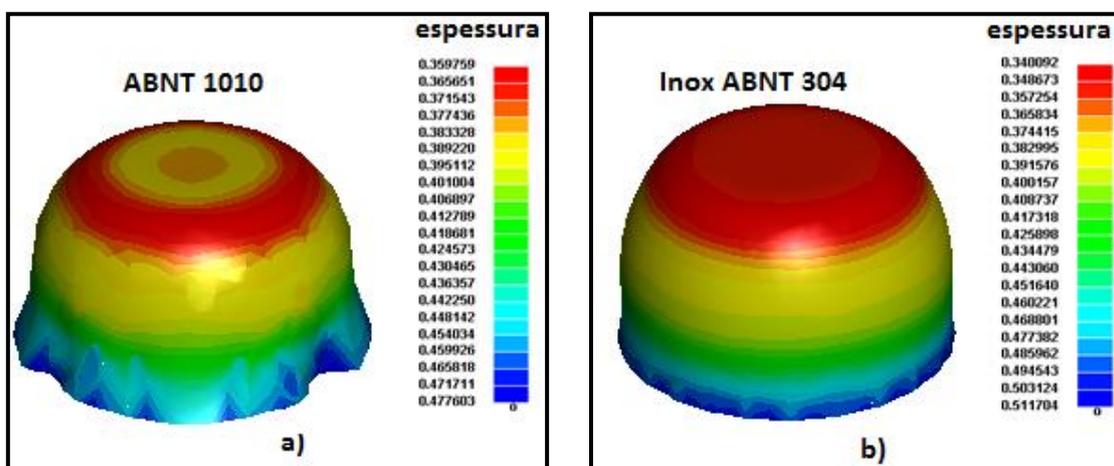


Figura 49. Simulação em relação à espessura para o processo de microestampagem do copo durante o primeiro estágio. a) simulação para o aço ABNT 1010. b) simulação para o aço inox ABNT 304.

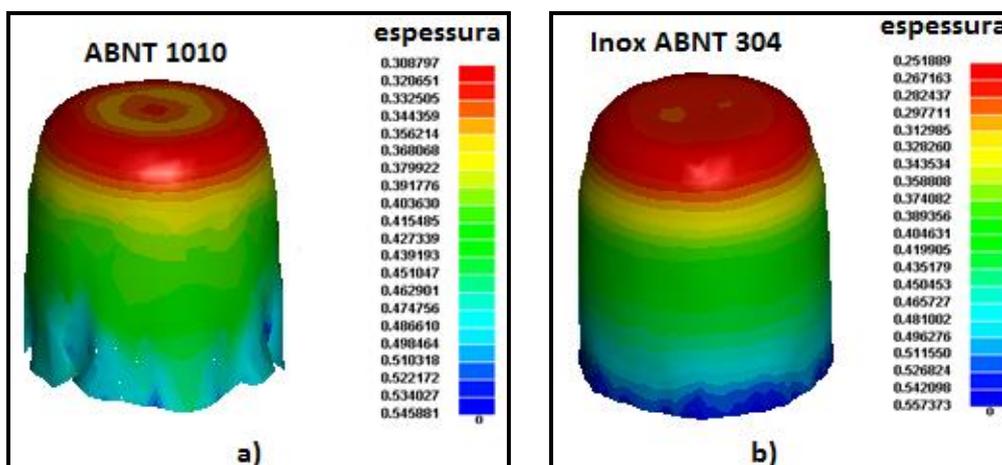


Figura 50. Simulação em relação à espessura para o processo de microestampagem do copo durante o segundo estágio. a) simulação para o aço ABNT 1010. b) simulação para o aço inox ABNT 304.

Para que o enrugamento do copo fosse diminuído ou eliminado (caso do aço ABNT 1010), optou-se por realizar na etapa inicial (primeiro estágio), uma pré-forma inicial. Para a segunda etapa ou estágio final, utilizou-se o método convencional. Os resultados da simulação para um processo de microestampagem com uma pré-forma inicial estão representados na Figura 51. Quanto ao aço inox ABNT 304, não foi necessário realizar a simulação por este método, visto que o material apresentou bons resultados para um processo em dois estágios.

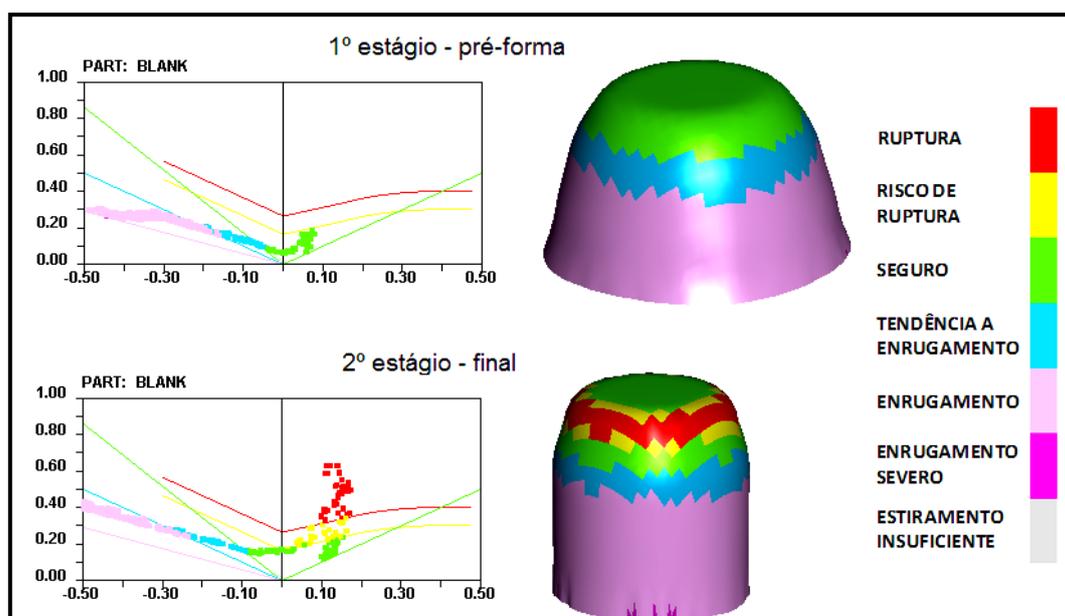


Figura 51. Resultado da simulação para a microestampagem do copo em dois estágios sendo o primeiro com uma pré-forma inicial para o aço ABNT 1010.

Ao optar-se por uma pré-forma durante o primeiro estágio, houve uma diminuição considerável no enrugamento da peça para o aço ABNT 1010, se comparado ao estágio inicial em um processo convencional dividido em duas etapas. Para a segunda etapa ou estágio final, a simulação mostra que além do enrugamento do copo, ocorre a ruptura na região do fundo do copo.

Os resultados da simulação evidenciam que tanto para um processo convencional, como para um processo em que se utilizou uma pré-forma inicial, não será possível realizar o processo de microestampagem do copo, com as dimensões iniciais propostas, para o material ABNT 1010. Em ambos os casos o material apresentou falhas tanto na primeira quanto na segunda etapa. O mesmo pode ser comprovado através das simulações realizadas em função da espessura do material, que ao longo das duas etapas, apresentou uma grande redução na espessura, levando o material a possíveis falhas e até mesmo o rompimento durante o processo de microestampagem.

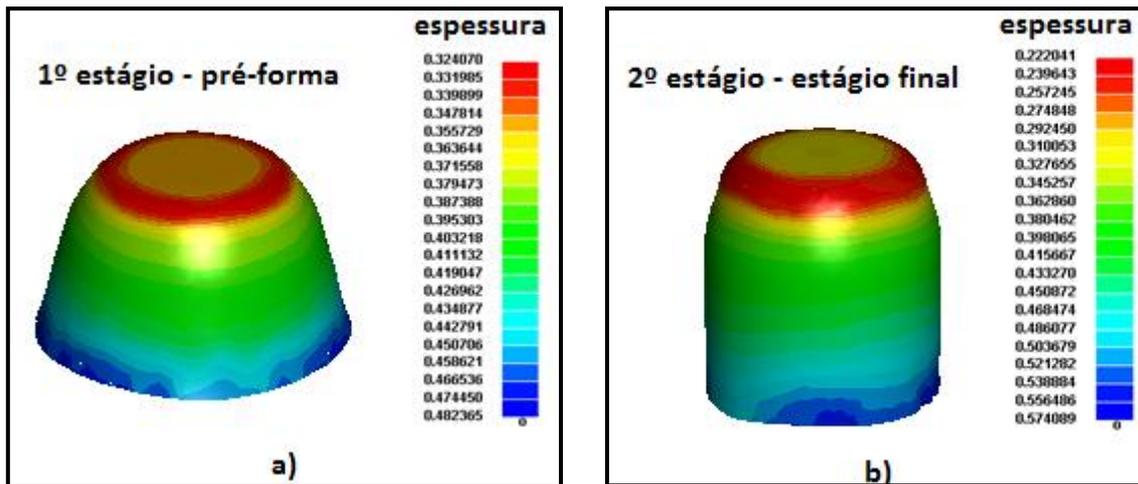


Figura 52. Simulação em relação à espessura do processo de microestampagem do copo para o aço ABNT 1010 com uma pré-forma inicial no primeiro estágio.

Como alternativa para o problema ocorrido com o aço ABNT 1010, buscando eliminar o enrugamento do material, e possíveis falhas ao longo do processo, aumentou-se o diâmetro do copo, porém, mantendo a mesma altura, de forma a manter a relação de estampagem admissível para este material, de modo a realizar o processo de estampagem do copo em uma única etapa (ver Figura 53). A segunda hipótese foi manter o diâmetro do copo, reduzindo então a altura e mantendo a relação de estampagem admissível (ver Figura 54). As simulações realizadas com o inox ABNT 304 foram apenas para comprovar a eficácia deste material em relação ao aço ABNT 1010.

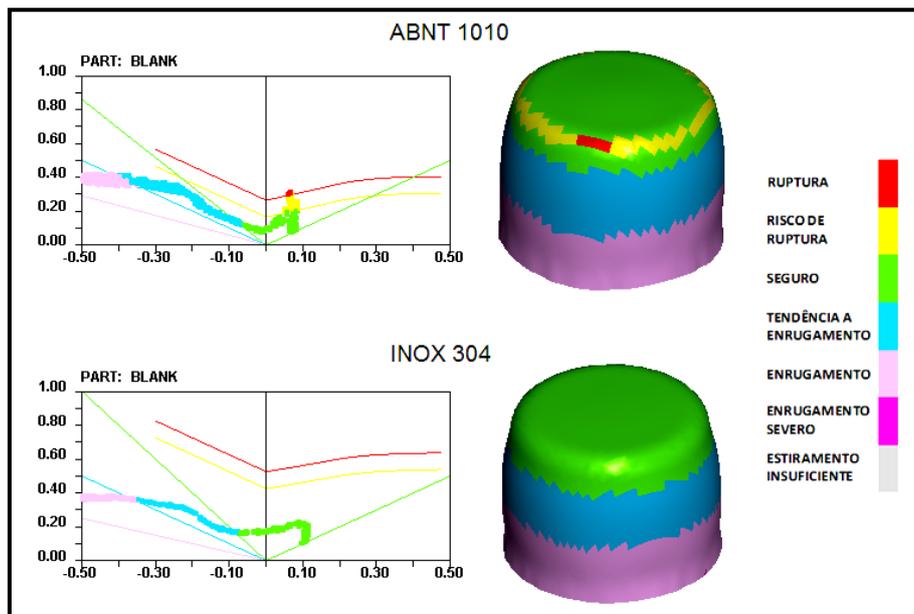


Figura 53. Resultado da simulação para a microestampagem do copo: (d) 12mm e (h) 10mm.

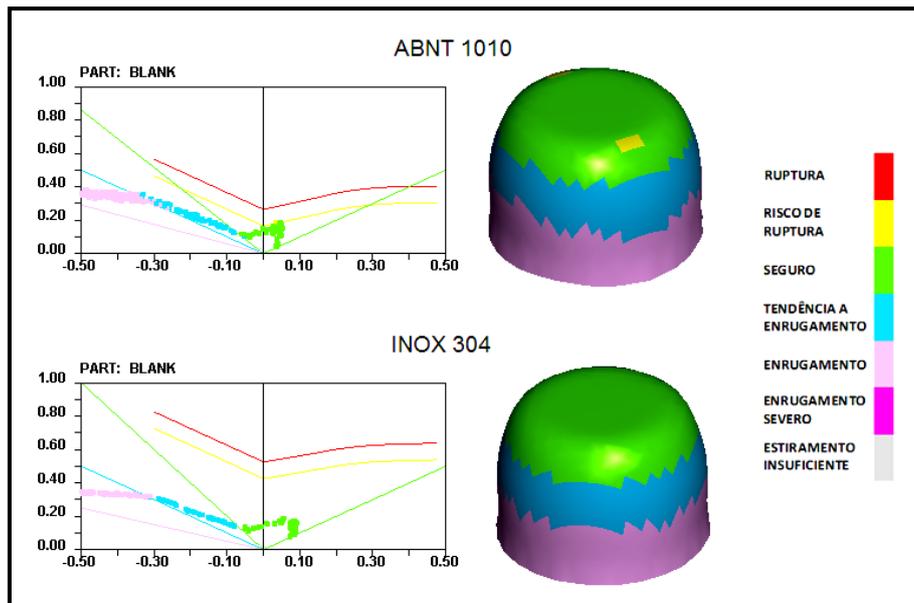


Figura 54. Resultado da simulação para a microestampagem do copo: (d) 7mm e (h) 5mm.

Em ambos os casos, os materiais apresentaram comportamentos semelhantes durante o processo de estampagem. No caso do aço inox ABNT 304, o fato de aumentar o diâmetro ou reduzir a altura, mantendo a relação de estampagem admissível, não influencia os resultados da simulação. O aço ABNT 1010 por sua vez, apresentou duas situações diferentes para uma mesma relação de estampagem. A Figura 53 representa o pior caso, onde em determinadas regiões ao fundo do copo houve indícios de ruptura o que não aconteceu na Figura 54, onde houve apenas um único indício de que o copo pode apresentar riscos de ruptura ao longo do processo de estampagem. Houve também pequenos enrugamentos para ambos os casos e materiais mostrando que mesmo trabalhando dentro de uma relação de estampagem admissível, o fato de a área do prensa-chapas ser muito pequena, leva o material ao enrugamento.

Quanto à espessura da chapa, ambos os materiais apresentaram reduções semelhantes de espessura na região do fundo do copo. O mesmo ocorreu na região da borda do copo, porém neste caso, em função do enrugamento houve um aumento de espessura. A Figura 55 mostra os resultados obtidos para o processo de microestampagem do copo com diâmetro (d) de 12 mm e altura (h) de 10 mm, e a Figura 56, os resultados obtidos para a microestampagem do copo com diâmetro (d) de 7 mm e altura (h) de 5 mm, ambos para o aço ABNT 1010 e aço inox ABNT 304.

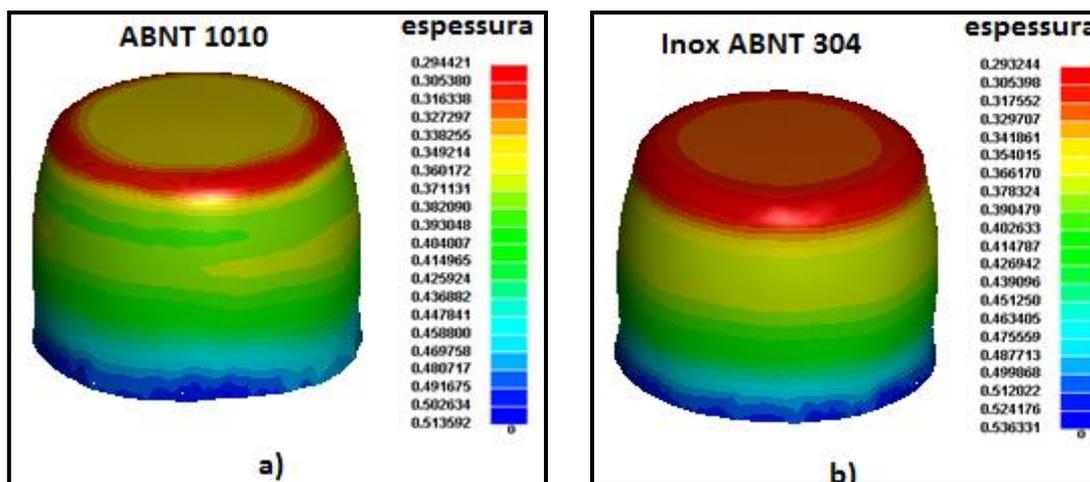


Figura 55. Simulação em relação á espessura para o processo de microestampagem do copo com diâmetro de 12 mm e altura de 10 mm. a) aço ABNT 1010. b) aço inox ABNT 304.

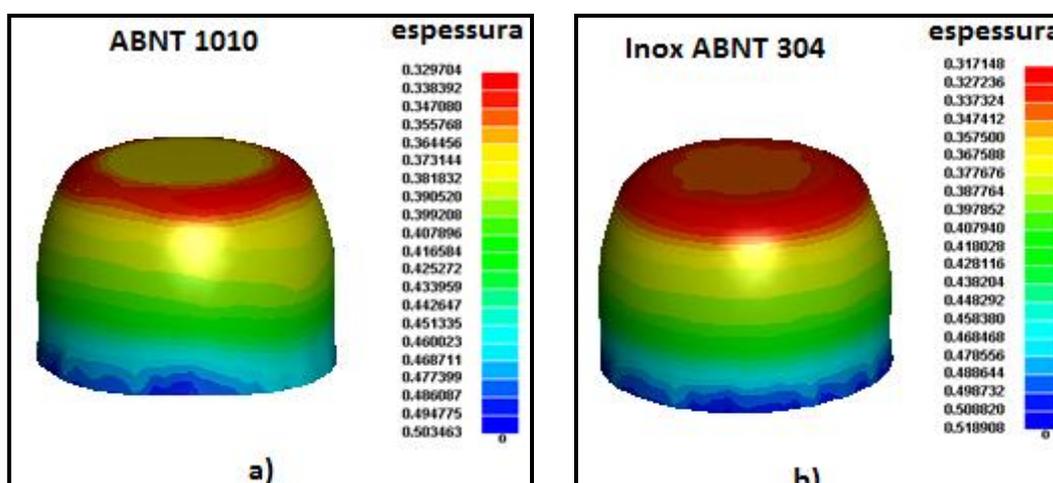


Figura 56. Simulação em relação á espessura para o processo de microestampagem do copo com diâmetro de 7 mm e altura de 5 mm. a) aço ABNT 1010. b) aço inox ABNT 304.

Dentre as várias simulações realizadas para ambos os materiais, sobre diversas condições de processo, ambas mostraram que o aço inox ABNT 304, pelas suas características, apresenta melhores resultados que o aço ABNT 1010, e que pode ser comprovado através dos ensaios práticos.

Para o processo de microestampagem em uma única etapa, além de utilizar a ferramenta convencional, optou-se por realizar a simulação utilizando a matriz de segundo estágio, construída para o processo em que se tem uma pré-forma inicial no primeiro estágio. Esta matriz se difere por ter um encaixe para a pré-forma, conforme pode ser visto na Figura 31. Esta ferramenta permite realizar os dois estágios em uma única etapa, conforme mostrado na Figura 57, onde as peças obtidas apresentaram um melhor comportamento principalmente pelo fato de que houve a diminuição do enrugamento se comparado aos outros resultados obtidos pela simulação. Estes resultados também

foram comprovados em ensaios práticos, sem que houvesse a ruptura da peça, havendo apenas enrugamento.

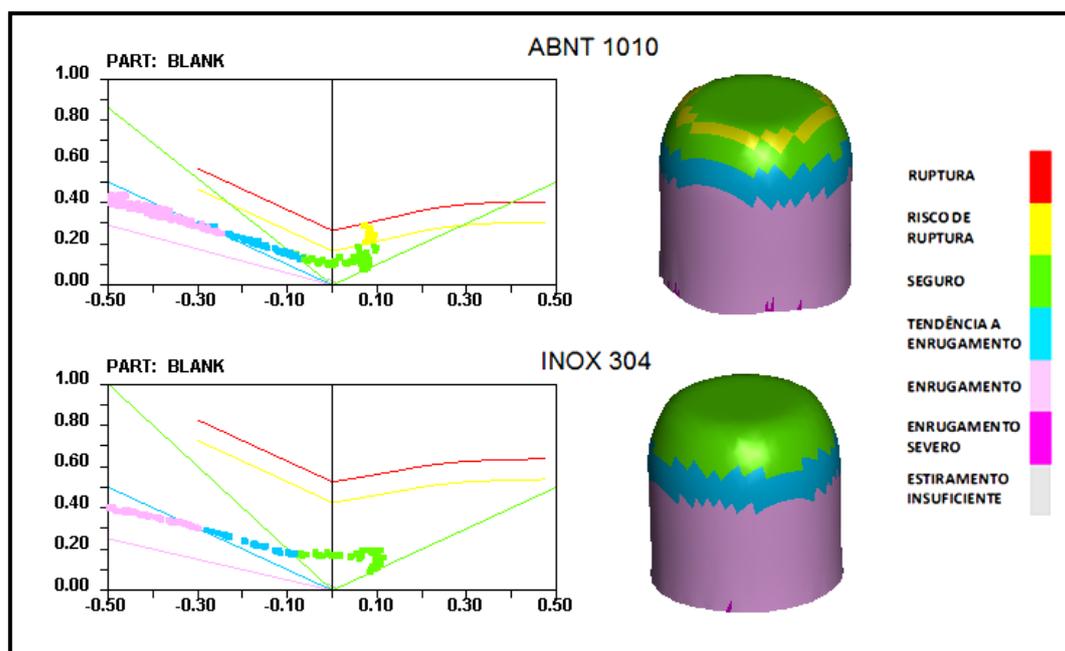


Figura 57. Resultado da simulação para a microestampagem do copo utilizando apenas o conjunto de ferramentas do segundo estágio.

Para este caso, a redução na espessura foi praticamente igual à encontrada para um processo de microestampagem convencional em dois estágios. Como essa redução não foi muito significativa mostra que o processo pode ser realizado, sem que haja ruptura na região do fundo do copo. O mesmo ocorreu na região da borda do copo, onde o enrugamento severo ao longo do processo, levou a um grande aumento de espessura nesta região. A Figura 58 mostra os resultados obtidos para o aço ABNT 1010 e aço inox ABNT 304, durante o processo de microestampagem utilizando apenas a ferramenta de segundo estágio.

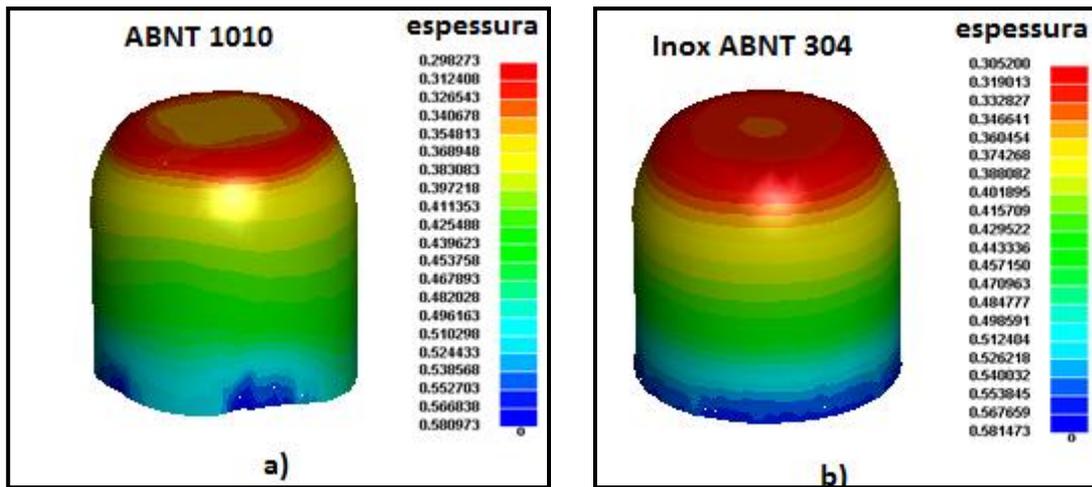


Figura 58 Simulação em relação á espessura para a microestampagem do copo utilizando apenas o conjunto de ferramentas do segundo estágio. a) aço ABNT 1010. b) aço inox ABNT 304.

5.3 Microestampagem da carcaça

O processo de microestampagem ocorreu da seguinte forma, na primeira etapa utilizando a ferramenta do primeiro estágio, foram estampadas cinco peças de cada material, ou seja, cinco peças com o aço ABNT 1010 e cinco peças com o aço Inco ABNT 304. Após fez-se o segundo estágio, a partir das peças do primeiro estágio. O resultado do processo de microestampagem para o primeiro e segundo estágio do aço ABNT 1010 pode ser visto na Figura 59, já para o aço inco ABNT 304 é mostrado na Figura 60. Em ambos os casos, o prensa-chapas serviu apenas para alinhamento do conjunto, não sendo exercida nenhuma força sobre ele. Isso ocorreu pelo seguinte fato, no primeiro estágio há um rebaixo na matriz para alinhar o blank, esse rebaixo possui uma altura igual à espessura da chapa, sendo assim, mesmo que aplicado uma força, não evitaria o enrugamento, pois o prensa-chapas não estaria atuando sobre a chapa.



Figura 59. Microestampagem do copo em dois estágios para o aço ABNT 1010.



Figura 60. Microestampagem do copo em dois estágios para o aço inox ABNT 304.

Mesmo na simulação numérica, onde se utilizou uma força no prensa-chapas, houve o enrugamento do copo, isto ocorre porque a área de atuação do prensa-chapas é muito pequena em processos micro levando a ocorrência destes efeitos. Tendo em vista esses defeitos, já previstos na simulação, aumentou-se a altura do copo, para que depois fosse recortado, chegando assim ao formato final, a carcaça do micromotor. Para o aço inox ABNT 304 isso foi possível, conforme mostra a Figura 61, porém para o aço ABNT 1010, tendo em vista que o enrugamento foi muito severo logo na primeira etapa, fez com que houvesse um amassamento e o surgimento de trincas durante a segunda etapa, sendo este o motivo para se realizar uma pré-forma inicial no primeiro estágio para o aço ABNT 1010.



Figura 61. Carcaça do micromotor em aço inox ABNT 304.

A pré-forma inicial foi utilizada de forma a reduzir o enrugamento na primeira etapa, o que pode ser comprovado através da simulação numérica. Essa pré-forma foi introduzida de forma que o copo tivesse a sua dimensão mais próxima da dimensão final, sendo assim o ângulo mínimo de inclinação da matriz mostrada na Figura 31 em que se conseguiu estampar foi de 15° . Porém, os resultados práticos mostrados na Figura 62, mostram que mesmo com a pré-forma há enrugamento na peça, variando em alguns casos, desde pequenos enrugamentos até enrugamentos severos. Para

este caso em específico, a simulação indicava que para a segunda etapa ocorreria o rompimento da peça na região do fundo do copo, o que acabou não acontecendo nos ensaios.

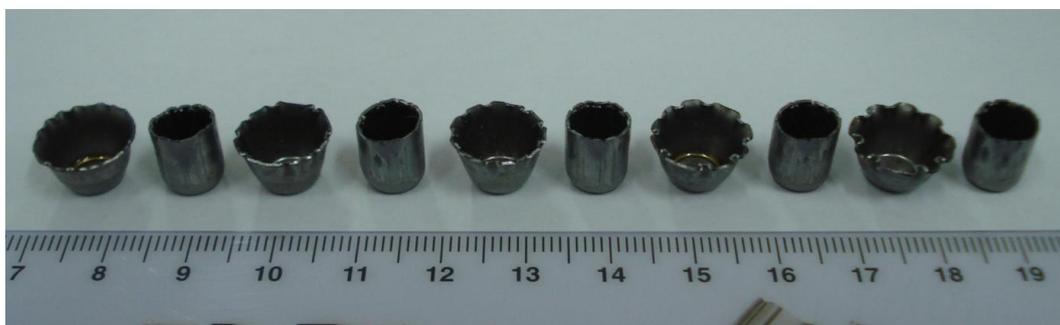


Figura 62. Microestampagem do copo em dois estágios para o aço ABNT 1010, sendo o primeiro estágio com uma pré-forma inicial.

Por fim, utilizou-se a ferramenta do segundo estágio de forma a obter a peça em uma única etapa. A ferramenta do segundo estágio foi projetada permitindo o encaixe do copo obtido na primeira etapa. Isso permitiu que a partir do blank, fosse possível realizar dois estágios em uma única etapa. Um desenho em corte desta ferramenta pode ser visto na Figura 63. Em princípio, este método não seria utilizado neste trabalho, porém os resultados obtidos na simulação mostraram que seria possível realizar dois estágios em uma única etapa utilizando esta ferramenta, obtendo a peça no formato final desejado, sem que houvesse ruptura, diminuído o enrugamento principalmente no caso do aço ABNT 1010 se comparado a um processo em dois estágios.

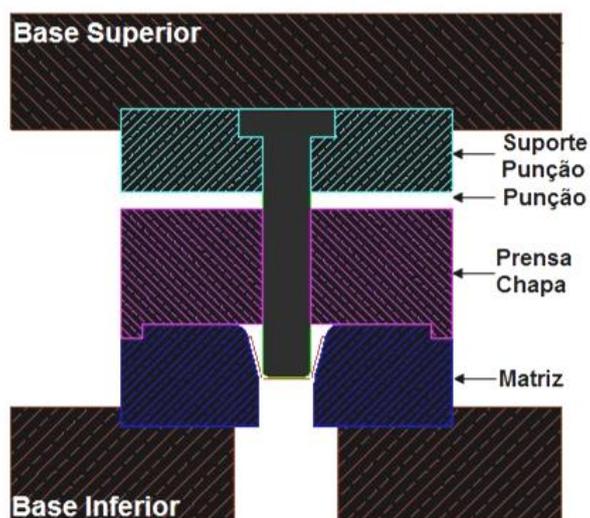


Figura 63. Desenho em corte da ferramenta para microestampagem do copo em uma única etapa.

Apesar dos resultados obtidos mostrarem que quando se utiliza apenas este conjunto de ferramentas para a microestampagem do copo, há uma diminuição do enrugamento, o fato de não haver um rebaixo na ferramenta dificulta a centralização do blank, isso faz com que em alguns casos em que o blank não se encontre centralizado, sobre material em um dos lados e falte do outro, levando o copo a formas irregulares e na maioria das vezes o rompimento da peça antes mesmo do processo chegar ao seu final. A Figura 64 mostra os dois extremos, mostrando que caso o blank não esteja centralizado de forma correta haverá o rompimento da peça, contrário ao caso em que o blank está centralizado, permitindo se obter peças sem a presença de rupturas ou irregularidades.

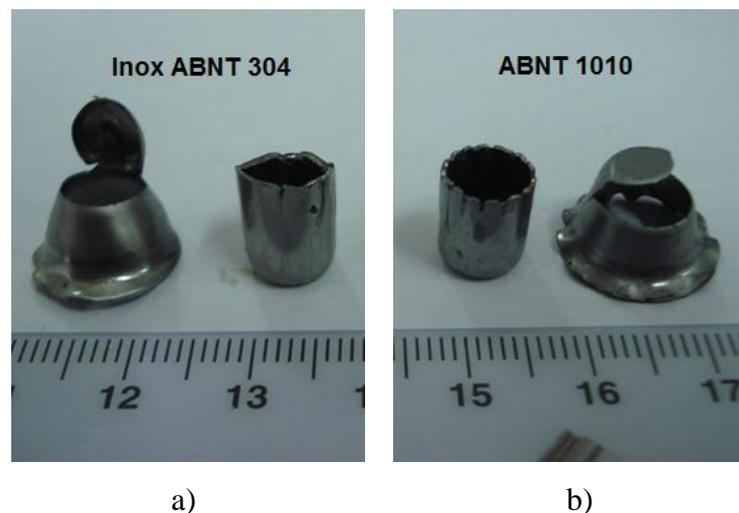


Figura 64. Microestampagem do copo em uma única etapa. a) inox ABNT 304. b) aço ABNT 1010.

Quanto ao enrugamento das peças, é um problema causado pela miniaturização e que não foi possível resolver neste trabalho, tentou-se aumentar a força no prensa-chapas durante a simulação, porém chegava-se a um determinado ponto que ocorria o rompimento da peça antes mesmo de completar o processo, quando a força era diminuída ocorria o enrugamento da peça.

6 CONCLUSÕES

Algumas conclusões podem ser feitas em relação ao trabalho realizado:

- Em relação ao corte das peças, tendo em vista os resultados obtidos durante o processo de corte convencional por cisalhamento, uma análise microscópica de varredura constatou que as peças produzidas por este processo, para as condições impostas neste trabalho, não se aplicariam ao presente caso, devido aos defeitos ocasionados por este processo na região de corte das lâminas;
- O processo de corte por eletroerosão a fio, por sua vez, produziu peças com excelente acabamento, sendo no presente estudo, o método mais indicado para a produção das peças;
- A simulação através do software LS-DYNA apresentou uma boa concordância com os ensaios práticos de microestampagem das peças, pois foi capaz de prever os defeitos que ocorreriam ao longo do processo, como os casos em que houve enrugamento das peças, além de possibilitar o dimensionamento das ferramentas de forma otimizada, mostrando que a simulação é uma grande aliada quando se pretende obter peças pelo processo de microestampagem;
- Tanto a simulação numérica, quanto os ensaios de microestampagem da carcaça, mostraram algumas particularidades do processo quando miniaturizado, como é o caso do enrugamento, que ocorre porque a área de atuação do prensa-chapas é muito pequena;
- Quanto ao processo de microestampagem do copo, o aço inox ABNT 304 mostrou ser o melhor material para o presente caso, apresentando um menor enrugamento, e desta forma permitindo a obtenção da carcaça;
- Outro fato importante, é que o aço inox em um processo convencional apresenta um enrugamento maior que o aço carbono, contrário ao que aconteceu neste trabalho, onde o enrugamento foi maior para o aço carbono do que para o aço inox;
- Por fim, o processo de microestampagem mostrou ter um grande potencial quando se pretende obter micro peças, tendo a simulação numérica como uma grande aliada, porém trata-se de uma técnica ainda em desenvolvimento e muito pouca difundida no Brasil, necessitando de novos estudos e um conhecimento detalhado de todos os efeitos que ocorrem ao longo do processo para a produção de peças.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões podem ser feitas para completar o presente estudo.

- Utilizar a metodologia apresentada para outros materiais, inclusive as famílias de aços inoxidáveis que apresentam uma boa capacidade de conformação mecânica;
- Testar diferentes espessuras de material, para analisar o comportamento durante um processo de miniaturização.
- Analisar a microestrutura do material após o processo de microestampagem.
- Testar diferentes geometrias de ferramenta, de forma a eliminar o enrugamento durante o processo de microestampagem.
- Utilizar um software de simulação numérica que utilize elementos do tipo volume.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6152 – Norma Brasileira específica para o ensaio de tração em materiais metálicos a temperatura ambiente – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 8164 - Folhas e chapas de aço de baixo carbono - Determinação da anisotropia plástica e do expoente de encruamento - Método de ensaio - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR NM 71:2000 – Produtos planos de aço para uso elétrico, de grão não orientado totalmente processados - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Alting, L.; Kimura, F.; Hansen, H. N.; Bissacco, G. *Micro engineering*. CIRP Annals – Manufacturing Technology. Vol. 52, Issue 2, 2003. p.635-657.

ArcelorMittal Inox Brasil. *Catálogo dos aços elétricos*. www.arcelormittalinoxbrasil.com.br. Acessado em 06 de março de 2012.

Backofen, W. A. *Deformation Processing*, 1972. Em: Mielnik, E. M. *Metalworking Science and Engineering*, McGraw-Hill, 1991.

Basti, A.; Khorasani, A.; Nateghi, A. R. *Analysis and Comparison of Micro Scale and Bulk Scale Deep Drawing Process*. 10th International Conference on Technology of Plasticity – ICTP 2011. Aachen/Germany, 2011. p. 1081-1086.

Batalha, G. F.; Cerveira, R. L. L. P.; Silva, F. R. D. A. *Simulação de processo de microfabricação: influência do efeito de escala*. In: 3 COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2005, Joinville - SC. Anais do 3 COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Joinville - SC : ABCM-IST-UDESC-UFSC, 2005. v. 3. p.1-10.

Bressan, J. D. *Conformação de chapas anisotrópicas e superplásticas*. In: Anais I Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre/RS, 1998. p.151-160.

Brites, F. G.; Santos, V. P. A. *Motor de passo*. Programa de educação tutorial – Grupo PET-Tele. Universidade Federal Fluminense, Niterói/RJ, 2008.

Blümel, K.; Gerlach, J.; Ufermann, P. *Biaxial testes to characterize the forming behavior of steel sheets*. Automotive Body Materials, Alemanha: IBEC, 1997.p.42-46.

Carlsson, P. *Surface Engineering in Sheet Metal Forming*. Acta universitatis upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 7. Uppsala, 2005.

Chan, W. L.; Fu, M. W.; Lu, J. *The size effect on micro deformation behavior in micro-scale plastic deformation*. Materials and Design 32, 2011. p.198-206.

Cristofaro, S. De.; Stefanini, C.; Pak, N. Ng.; Susilo, E.; Carroza, M. C.; Dario, P. *Eletromagnetic wobble micromotor for microrobots actuation*. Sensors e Actuators A 161, 2010. p. 234-244.

FANUC. *Catálogo de produtos Fanuc Robocut α -oiE/ α -1iE*, 2010.

- Folle, L. F. *Metodologia de medição do coeficiente de atrito em estampagem e avaliação da influência da lubrificação e condições superficiais via simulação numérica*. Dissertação de mestrado. PPGEM – UFRGS, Porto Alegre/RS, 2008.
- Fung-Huei Yeh.; Ching-Lun Li.; Yuung-Hwa Lu. *Study of thickness and grain size effects on material behavior in micro-forming*. Journal of Materials Processing Technology 201, 2008. p.237-241.
- Garcia, A.; Spim, J. A.; Santos, C. *Ensaio dos Materiais*. Brasil: LTC – Livros Técnicos e Científicos, Porto Alegre, 2000. 247p.
- Geiger, M.; Kleiner, M.; Eckstein, R.; Tiesler, N.; Engel, U. *Microforming*. Ann. CIRP, 2001. p.445–462.
- Gong, F.; Guo, B.; Wang, C.; Shan, D. *Micro deep drawing of micro cups by using DLC film coated blank holders and dies*. Diamond & Related Materials 20, 2011. p.196-200.
- Guida, R. B. *Comparação da estampabilidade de chapas de aço inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio obtidas através de duas rotas de fabricação*. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – UFMG, Belo Horizonte/MG, 2006.
- Hu, Z.; Schulze Niehoff, H.; Vollerstsen, F. *Determination of the friction coefficient in deep drawing, process scaling*. In: Vollerstsen F, Hollmann F (eds). Proceeding of the 1st colloquium of DFG priority program process scaling. BIAS-verlag, Bremen, 2003, p.27-34.
- Hu, Z.; Schubnov, A.; Vollertsen, F. *Tribological behavior of DLC-films and their application in micro deep drawing*. Journal of Materials Processing Technology 212, 2012. p.647-652.
- Hoffmann, H.; Hong, S. *Tensile Test of very thin Sheet Metal and Determination of Flow Stress Considering the Scaling Effect*. CIRP Annals – Manufacturing Technology. Vol. 55. Issue 1, 2006. p.263-266.
- Keeler, S. P. Properties related to forming. *Understanding sheet metal formability*. Machinery, v.74, nº. 8, 1968. p. 94-103.
- Landgraf, F. J. G. *Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos*. In: Ivani Bott; Paulo Rios; Ronaldo Paranhos. (Org.). Aços: perspectivas para os próximos 10 anos. 1^a ed. Rio de Janeiro/RJ, 2002. p.109-128.
- Lin, L.M.; Yan, G. Z.; Song, Y. R. *“The research of side viewing endoscope with field of view auto-scanning,” Chinese J. Bio. Eng. china*, vol. 20, 2011. p.85-88.
- Luna, w.; Pflingstag, M.; Dias, M.; Schaeffer, L. *Analysis of the performance of a step micromotor with four rotors of different morphologies using finite elements*, Journal Electrical Systems 7-1, 2011, p. 81-88.
- LS-Dyna. *Theory manual*. Livermore software technology corporation, Livermore, California, 2006.

- Manabe, K.; Shimizu, T.; Koyama, H.; Yang, M.; Ito, K. *Validation of FE simulation based on surface roughness model in micro-deep drawing*. Journal of Materials Processing Technology 204, 2008. p.89-93.
- Netto, S. E. S. *Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação*. Dissertação de mestrado. PPGEM – UFRGS, Porto Alegre/RS, 2004.
- Oliveira, J. G. S. M. *Materiais usados na construção de motores elétricos*. Seminário Técnico da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2009.
- Oliveira, S. A. G. *Simulação Numérica de Processos de Conformação Mecânica*. In: 13º POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia/MG, 2003.
- Richter, A. *Comparação dos resultados de diferentes testes para a determinação da curva limite de conformação*. In: Anais da VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, 2003. p. 24-29.
- Schaeffer, L. *Conformação de Chapas Metálicas*. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 2004.
- Schaeffer, L. *Conformação Mecânica*. Imprensa livre editora, Porto Alegre, 1999.
- Souza, S. A. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos*. Edgard Blucher, 1974.
- Souza, J. H. C. *Estudo do processo de corte de chapas por cisalhamento*. Dissertação de mestrado. PPGEM – UFRGS, Porto Alegre, 2001.
- Tendick, F.; S.S.Sastry, R.S.Fearing, and M.Cohn, “*Applications of micromechatronics in minimally invasive surgery*,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 3. 1998. p.34-42.
- Usiminas. *Catálogo de Produtos Laminados a Frio*. www.usiminas.com. Acessado em 06 de março de 2012.
- Vinhais, H. F. *Projeto otimizado de um micro-motor eletrostático*. Monografia de trabalho de formatura apresentado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.
- Vollertsen, F.; Hu, Z.; Schulze Niehoff, H.; Theiler, C. *State of the art in micro forming and investigations in micro deep drawing*. Journal of Material Processing Technology 151, 2004. p.70–79.
- Vollertsen, F.; Hu, Z. *Tribological Size effects in Sheet metal Forming Measured by a Strip Drawing Test*. CIRP Annals – Manufacturing Technology. Vol. 55, Issue 1, 2006. p.291-294.
- Vollertsen, F.; Hu, Z. *On the Drawing Limit in Micro Deep Drawing*. *Journal for Technology of Plasticity*. Vol. 32, 2007, Number 1-2. p. 1-12.
- Vollertsen, F. *Effects on the deep drawing diagram in micro forming*. Production Engineering Research and Development. Vol. 6, 2012, Number 1.p. 11-18.
- Xinli, W.; Shumei, C.; Shukang, C. *Advantages of electrostatic micromotor and its application to medical instruments*. In: Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Vol. 4. p. 2466-2468.

Zhang, W.; Meng, G.; Li, H. *Eletrostatic micromotor and its reliability*. Microelectronics reliability 45, 2005. p. 1230-1242.

Yi Qin. *Micro-forming and miniature manufacturing systems – development needs and perspectives*. Journal of Materials Processing Technology 177, 2006. p.8-18.