

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCIO BRANDANI TENÉ RIO

**A INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA, DE PARÂMETROS DE
PROCESSO E DO MATERIAL DAS CHAPAS NA UNIÃO POR *CLINCHING***

CURITIBA

2016

MARCIO BRANDANI TENÉ RIO

**A INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA, DE PARÂMETROS DE
PROCESSO E DO MATERIAL DAS CHAPAS NA UNIÃO POR *CLINCHING***

Dissertação apresentada como requisito para obter o título de Mestre em Engenharia Mecânica no curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manufatura

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor P. Marcondes
Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Lajarin

**CURITIBA
2016**

T311i Tenório, Marcio Brandani
A influência da geometria da ferramenta, de parâmetros de processo e do material das chapas na união por clinching / Marcio Brandani Tenório. – Curitiba, 2016.
77 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes – Coorientador: Sérgio Fernando Lajarin.
Bibliografia: p. 72-74.

1. Engenharia Mecânica. 2. Chapas de metal. 3. Metais – Indústria. I. Universidade Federal do Paraná. II. Marcondes, Paulo Victor Prestes. III. Lajarin, Sérgio Fernando . IV. Título.

CDD: 671.3



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA
Código CAPES: 40001016040P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MARCIO BRANDANI TENORIO**, intitulada: "**A INFLUENCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA, DE PARÂMETROS DE PROCESSO E DO MATERIAL DAS CHAPAS**

NA UNIÃO POR CLINCHING", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 06 de Setembro de 2016.

Prof PAULO VICTOR PRESTES MARCONDES
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

Prof MANOEL LUTERO GIABELA
Avaliador Externo (FATEC SENA)

Prof PAULO CESAR BORGES
Avaliador Externo (UTFPR)

Prof SERGIO LUIZ HENKE
Avaliador Externo (UFPR)

DEDICATÓRIA

À Deus, pela vida.

À minha amada esposa e companheira Salete, meus queridos filhos Carol e Paulo, pelo incentivo na continuação dos estudos, apoio nos momentos difíceis, paciência nos momentos de minha ausência e compreensão da importância desta titulação para nossa família.

Aos meus pais Walter (*in memoriam*) e Francisca, pela minha educação escolar, religiosa e formação para a vida.

Aos meus irmãos Marcia, Marli, Mauro e Risoleta, que sempre me incentivaram.

À minha sogra, D. Aurora (*in memoriam*), que muito rezou e intercedeu por mim.

Ao meu orientador acadêmico, Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes, pela amizade, apoio, incentivo, diretrizes para a condução e realização deste trabalho.

Ao meu coorientador acadêmico, Prof. Dr. Sergio Fernando Lajarin, pela amizade, apoio, acompanhamento e dedicação pessoal, sem o qual o presente trabalho não seria realizado.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná pelo constante incentivo à qualificação do seu quadro de servidores.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica que me acolheu como discente.

Ao prof. Bavastri, coordenador do PGMec, pela amizade e apoio incondicional que possibilitou viabilizar a realização do mestrado em paralelo às atividades de trabalho na secretaria do Programa.

Aos colegas de trabalho Osmar, Edson e Rodrigo, pela amizade, motivação e apoio na conclusão do curso.

À prof^a. Maria José, pela amizade e apoio financeiro de todo material necessário à pesquisa.

Ao prof. Henke, pela amizade e colaboração na realização dos experimentos no laboratório de Engenharia de Superfícies.

Aos professores do PGMec Luciano, Maria Lúcia, Marchi, Perito, Scheid, Silvio, Sofia e Thais, pela amizade e motivação para a realização do meu mestrado.

Aos alunos Pedro Amaral, Gustavo Bavarescu, Irene Bida, Nikolas, pela amizade e ajuda na aquisição do ferramental e material dos experimentos práticos.

Ao colega prof. Manolo, pela amizade, disponibilização do ferramental e auxílio na preparação e realização dos trabalhos práticos.

À colega de turma Sandra Marchi, pelo apoio nos estudos e estreita amizade com sua família.

À Juslei Lajarin, pequenina Maria Fernanda e D. Dita, pela amizade e gentil acolhimento em sua família.

EPÍGRAFE

“Tudo posso naquele que me fortalece”.

Filipenses 4:13

RESUMO

Na indústria metal mecânica em geral existe a necessidade constante de unir componentes feitos de chapas metálicas. Existem diversas maneiras de fazer a união mecânica dessas chapas, algumas desmontáveis como as feitas por parafusos, porcas e pinos, e outras permanentes como as feitas por solda, colagem adesiva e rebite. Além desses métodos mais tradicionais, existe um que vem ganhando espaço na indústria, principalmente automobilística, que é a união por *clinch*. O *clinch* é um método de união de chapas por meio da deformação plástica local, sem uso de nenhum elemento adicional de união, apenas por meio da ação de um punção que exerce uma força contra uma matriz. Neste trabalho o processo de *clinch* foi estudado por meio de experimentos práticos e também por simulação computacional usando método de elementos finitos. Em uma primeira parte foi estudada a influência de diferentes geometrias, parâmetros de processo e parâmetro de ferramenta na resistência de juntas unidas por *clinch*. Posteriormente foi realizado um estudo prático com o intuito de comparar seus resultados com resultados obtidos por simulação computacional. Foi feito também levantamento metalográfico e de dureza na região da seção da junta, para analisar o comportamento da microestrutura nessa região. Foi possível observar que a geometria da ferramenta de *clinch* e a escolha dos parâmetros de processo influencia na resistência da junta unida. Ferramentas de simulação por elementos finitos são úteis do ponto de vista econômico e de tempo na definição da geometria da ferramenta e no planejamento do processo por apresentar resultados similares aos experimentos práticos e evitar a manufatura de diferentes ferramentas e a realização de diversos experimentos. A metalografia dos materiais na região da junta revelou um grande alongamento nos grãos e um fluxo bastante complexo do material preenchendo a cavidade da matriz e produzindo o entrosamento entre as chapas. Nessa região os grãos se encruaram e a dureza aumentou consideravelmente.

Palavras-chave: Manufatura. Conformação mecânica. União de chapas metálicas. *Clinching*.

ABSTRACT

In the metalworking industry in general there is a constant need to unite made of sheet metal components. There are several ways to make the mechanical connection of these plates, some demountable as those made by screws, nuts, studs, and other permanent as those made by welding, adhesive glue and rivet. In addition to these more traditional methods, there is one that is becoming more popular in the industry, especially the automobile, which is marriage by *clinch*ing. The *clinch*ing is a method of joining sheets by local plastic deformation, without using any additional member joining only by virtue of the action of a punch against a die. In this work the *clinch*ing process was studied through practical experiments and also by computer simulation using the finite element method. In a first portion was studied the influence of different geometry and process parameters and tool resistance joints joined by *clinch*ing. Later we conducted a case study in order to compare their results with results obtained by computer simulation. It was also made metallographic and hardness survey in the section of the joint region to analyze the microstructure of behavior in this area. It was observed that the geometry of the *clinch*ing tool and the choice of the process parameters influencing the joined joint strength. Simulation tools for finite elements are useful from an economic point of view and time the tool geometry definition and process planning to present similar results to practical experiments and prevent the manufacture of different tools and conducting various experiments. The metallography of the material in the joint region revealed a large stretch in grains and flow rather complex material filling the cavity of the matrix and producing the meshing between the plates. In this region the grains strain hardening and hardness increased considerably.

Keywords: Manufacturing. Mechanical forming. Union of metal plates. *Clinch*ing .

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – <i>Clinching</i> mecânico: (a) Chapas unidas e (b) vista da junta em corte.....	16
FIGURA 2 – Formação do ponto de solda	23
FIGURA 3 – União de chapas rebitadas na fuselagem de aeronave	24
FIGURA 4 – Processo de rebiteamento auto perfurável	26
FIGURA 5 – Corpo de prova de rebiteamento auto perfurável.....	26
FIGURA 6 – Utilização do <i>Clinching</i> pela indústria automotiva	28
FIGURA 7 – Processo de união de chapas por <i>clinch</i> ing.....	29
FIGURA 8 – Arrancamento por cisalhamento	31
FIGURA 9 – Arrancamento cruzado por tração.....	31
FIGURA 10 – Processo de <i>clinch</i> ing plano.	32
FIGURA 11 – Comparação entre o <i>clinch</i> ing convencional (a) e plano (b).....	33
FIGURA 12 – Processo de <i>clinch</i> ing com corte parcial.....	34
FIGURA 13 – Detalhe do punção e da matriz no <i>clinch</i> ing com corte parcial retangular.....	34
FIGURA 14 – Sequência esquemática da união de chapas por <i>clinch</i> ing circular.....	35
FIGURA 15 – <i>Clinching</i> circular	36
FIGURA 16 – <i>Clinching</i> circular na parte interior da carroçaria de automóvel.....	36
FIGURA 17 – Seção transversal da união de metal-polímero semicristalino.....	37
FIGURA 18 – Fluxograma com as etapas experimentais do trabalho	39
FIGURA 19 – Curvas tensão x deformação verdadeira dos materiais usados.	41
FIGURA 20 – Geometrias de ferramenta de <i>clinch</i> ing analisadas.....	43
FIGURA 21 – Modelo computacional da ferramenta de <i>clinch</i> ing.	45
FIGURA 22 – Passos da simulação do <i>clinch</i> ing ao arrancamento.....	47
FIGURA 23 – Máquina e porta-ferramenta para os ensaios de <i>clinch</i> ing; em (a) porta-ferramenta e em (b) máquina de ensaio uniaxial de tração.....	48
FIGURA 24 – Corpo de prova para ensaios de <i>clinch</i> ing	49
FIGURA 25 – Arrancamento; em (a) Dispositivo para ensaio e (b) ilustração do ensaio.....	50

FIGURA 26 - Pontos da medição de dureza no perfil da junta	52
FIGURA 27 - Força máxima no arrancamento para seis diferentes geometrias em três níveis de parâmetros de processo.	55
FIGURA 28 - Relação da força máxima no arrancamento com a espessura de entrosamento para seis diferentes geometrias em três níveis de parâmetros de processo com o aço HSLA 420/490.	55
FIGURA 29 - Relação da força máxima no arrancamento com a espessura de entrosamento para seis diferentes geometrias em três níveis de parâmetros de processo com o aço ARC05.....	56
FIGURA 30 - Corpos de prova do aço ARC05 para matriz (e) unidas por <i>clinch</i> ing.....	57
FIGURA 31 - Comparação do perfil de <i>clinch</i> ing: macrografia dos experimentos práticos versus simulação computacional para o aço ARC05 e matriz (a).....	57
FIGURA 32 - Comparação do perfil de <i>clinch</i> ing: experimentos práticos versus simulação para o aço ARC05 e matriz (e).....	58
FIGURA 33 - Resultado da força do punção durante o <i>clinch</i> ing com o aço ARC05.....	59
FIGURA 34 - Resultado da força máxima no arrancamento prático versus simulação com o aço ARC05.	60
FIGURA 35 - Corpos de prova da liga de alumínio 5052F para matriz (a), unidas por <i>clinch</i> ing.....	60
FIGURA 36 - Comparação do perfil de <i>clinch</i> ing, experimentos práticos versus simulação para o Alumínio 5052F e matriz (a).....	61
FIGURA 37 - Comparação do perfil de <i>clinch</i> ing, experimentos práticos versus simulação para o Alumínio 5052F e matriz (e)	62
FIGURA 38 - Resultado da força máxima no arrancamento prático versus simulação com a liga de alumínio 5052F.....	63
FIGURA 39 - Resultado da força do punção durante o <i>clinch</i> ing com a liga de alumínio 5052F.	63
FIGURA 40 - Resultado da força do punção durante experimento prático de <i>clinch</i> ing com o aço ARC05 e a liga de alumínio 5052F.....	64
FIGURA 41 - Metalografia da seção da união por <i>clinch</i> ing com o aço ARC05.	66

FIGURA 42 - Macrografia da região unida por deformação plástica com a liga de Alumínio 5052F.	67
FIGURA 43 - Perfil de dureza na região da junta com o aço ARC05	68
FIGURA 44 - Perfil de dureza na região da junta com a liga de AL 5052F	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Propriedades mecânicas e espessuras dos materiais	41
TABELA 2 - Fatores de controle.	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA.....	17
1.4 HIPÓTESE.....	18
1.5 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	19
1.5.1 Objetivos específicos.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 ABORDAGEM DO TEMA.....	20
2.2 UNIÃO DE CHAPAS.....	21
2.3 UNIÃO DESMONTÁVEL.....	21
2.4 UNIÃO PERMANENTE.....	22
2.4.1 Soldagem.....	22
2.4.2 União por rebite tradicional.....	24
2.4.3 União por rebite auto perfurável.....	25
2.4.4 União por colagem.....	26
2.4.5 União por deformação plástica.....	27
2.5 <i>CLINCHING</i> MECÂNICO.....	28
2.5.1 <i>Clinching</i> plano.....	32
2.5.2 <i>Clinching</i> com corte.....	33
2.5.3 <i>Clinching</i> circular.....	34
2.5.4 Comparativo entre o <i>clinch</i> ing versus soldagem.....	37
3 METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	39
3.1 MATERIAIS.....	40
3.1.1 Propriedades mecânicas dos materiais.....	40
3.2 ESTUDO PELO MEF DOS PARÂMETROS DE PROCESSO E GEOMETRIA DE FERRAMENTA.....	42
3.2.1 Definição das geometrias das ferramentas.....	42
3.2.2 Definição dos parâmetros de ferramenta e processo.....	44
3.2.3 Modelo computacional por meio do MEF.....	45
3.3 COMPARAÇÃO DE EXPERIMENTOS PRÁTICOS E COMPUTACIONAIS.....	48

3.3.1	Ensaio de <i>clinching</i>	48
3.3.2	Ensaio de arrancamento	50
3.3.3	Análise metalográfica das juntas	50
3.3.4	Análise de dureza das juntas	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	53
4.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRÁTICOS VERSUS SIMULAÇÃO	56
4.2.1	Resultados dos experimentos de <i>clinching</i> com o aço ARC05	56
4.2.2	Resultado dos experimentos de <i>clinching</i> com a liga de alumínio 5052F ..	60
4.2.3	Comparativo dos resultados obtidos com o aço ARC05 e a liga de alumínio 5052F ..	64
4.3	ANÁLISE METALOGRÁFICA E DE DUREZA NA REGIÃO UNIDA POR <i>CLINCHING</i>	65
4.3.1	Análise de micrografia e macrografia.....	65
4.3.2	Ensaio de dureza	67
5	CONCLUSÃO	69
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS.....	72
	APÊNDICE 1.....	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Na indústria metal mecânica em geral é muito comum a necessidade de unir componentes feitos de chapas metálicas. A indústria tem procurado adequar os seus processos e produtos visando novas alternativas para viabilizar a relação do custo versus benefícios, sem comprometer a qualidade do seu produto final.

Nos processos de montagem do setor automotivo há uma constante necessidade de unir componentes feitos de chapas de aço de alta resistência para montar a carroceria de veículos. O setor aeronáutico tem a necessidade de unir chapas, principalmente de alumínio, na montagem das aeronaves. Na linha branca, há necessidade de unir chapas de aço de baixo carbono que compõe eletrodomésticos dos mais variados, além de outros setores como de estruturas metálicas, embalagens e outros diversos.

A união de componentes de chapas pode ser feita por meio de algum processo de união permanente como, por exemplo, soldagem, cola adesiva e rebite, ou por algum tipo de união desmontável, feita por parafuso, porca, prisioneiro, pino entre outros.

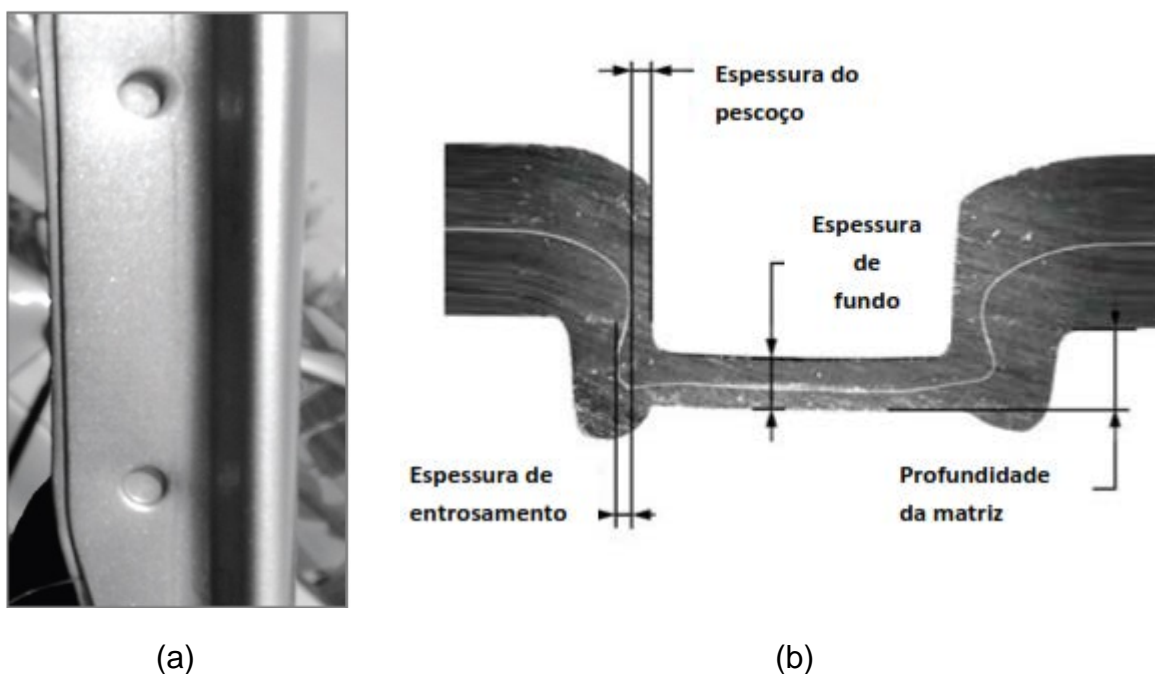
A união desmontável de chapas tem a vantagem de permitir a desmontagem e intercambiabilidade entre elas, mas implica, na maioria das vezes, em maior peso no conjunto da união, baixo carregamento dinâmico e menor agilidade na montagem. No caso da união permanente por soldagem, por exemplo, ela pode ser amplamente automatizada em uma linha de produção oferecendo rapidez, repetibilidade e resistência. Entretanto, apresentam algumas limitações com o uso de diferentes materiais (aço com alumínio, metal com não metal), alto custo de equipamento, produção de respingos e fumaça prejudicial ao operador e sempre gera no material uma zona termicamente afetada no entorno da união, que pode facilitar a oxidação e deterioração da junta.

Uma técnica de união que vem ganhando espaço gradativamente na indústria é a união por deformação plástica. Groche *et al.* (2014) fizeram uma revisão sobre essa técnica e apresentam diversas variações existentes. A mais comum é conhecida como união por *clinch* (*clinch*). Segundo Varis (2006) ela

surgiu na década de 1980 na indústria automotiva, sendo utilizada na montagem de partes móveis agregadas à carroceria, tais como tampa dianteira, portas e tampa traseira.

A técnica consiste em unir chapas a frio por meio da ação de um punção que deforma plasticamente as chapas contra uma matriz. A deformação produz uma região de entrosamento (*interlocking*) que une as chapas, ficando com a aparência de uma solda ponto, conforme pode ser observado na FIGURA 1.

FIGURA 1 – *Clinching* mecânico: (a) Chapas unidas (fonte: Mucha, 2011) e (b) vista da junta em corte.



Mori *et al.* (2013) citam as principais vantagens dessa técnica:

- (i) Permite unir uma vasta quantidade de materiais, incluindo metais com não metais;
- (ii) Menores distorções, fragilização e tensão residual;
- (iii) Alta repetibilidade de processo e controle de qualidade simples; e
- (iv) Ambiente de trabalho seguro.

Samento *at al.* (2011) registra que a substituição da união soldada pelo *clinch*ing revela vantagens como a possibilidade de união de chapas de diferentes materiais, não geração de Zona Termicamente Afetada (ZTA), não emissão de gases, não alteração da proteção anticorrosiva da chapa e aumento da resistência em fadiga por baixos esforços. Observa algumas desvantagens do processo como o ressalto na região do ponto, menor resistência ao esforço estático e dificuldade na união de mais de duas chapas.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Assim como acontece em diversos processos de conformação plástica, a eficiência na união por *clinch*ing é dependente de uma ferramenta bem projetada e da definição adequada dos parâmetros de processo. Entretanto, pelo fato do *clinch*ing ser uma técnica de união relativamente recente, a literatura técnica sobre o tema é ainda muito limitada quando comparada com outras técnicas e processos de conformação. Por tudo isso, a influência da geometria e dos parâmetros de ferramenta no processo de *clinch*ing, tais como o formato, profundidade da matriz e folga entre punção/matriz, além da espessura de fundo que é um parâmetro de processo, ainda não são totalmente compreendidos.

Atualmente, a definição da ferramenta com geometria ideal dos parâmetros de processo adequados é muito dependente da experiência humana (*know how*) ou de testes empíricos que podem ser demorados e elevar o custo do processo ou da fabricação da ferramenta.

1.3 JUSTIFICATIVA

Aumentar o conhecimento sobre a influência da geometria da ferramenta de *clinch*ing, dos parâmetros de processo e de ferramenta na qualidade da união de chapas, é importante para ampliar a utilização dessa técnica na indústria.

Durante a fase de projeto de uma ferramenta de *clinch*ing é necessário que o projetista conheça a influência de cada parâmetro de ferramenta e processo a ser considerados para obtenção da melhor qualidade final da junta. Isso vai interferir

diretamente na qualidade, no custo e no tempo de concepção da ferramenta. Da mesma forma, o operador, no chão de fábrica, precisa conhecer a influência desses parâmetros e dos materiais a serem unidos, para escolher a melhor ferramenta e definir os melhores parâmetros de processo no equipamento de *clinch*ing.

Além da necessidade de conhecer com mais profundidade a influência dos parâmetros envolvidos no *clinch*ing de chapas, existe a carência por ampliar ou facilitar a utilização do processo para materiais com características diferentes, como por exemplo, um aço de alta resistência avançado com uma liga de alumínio ou dois aços com características diferentes, ou de um aço com um polímero e assim por diante.

1.4 HIPÓTESE

Paula *et al.* (2007) estudaram a influência de alguns aspectos geométricos da ferramenta de *clinch*ing. Conhecer como a geometria influencia a junta pode ajudar no projeto da ferramenta. Mucha e Witkowski (2014) estudaram a influência da espessura de fundo na resistência ao arrancamento. Eles verificaram que o aumento da resistência pode ser conseguido pela redução da espessura de fundo da junta. Abe *et al.* (2014) investigaram o *clinch*ing de chapas de aço de resistência ultra-alta modificando o diâmetro e a profundidade da matriz. Eles verificaram que a profundidade da matriz interfere diretamente na resistência da junta. A pouca profundidade pode diminuir o fluxo do material para dentro do canal da matriz diminuindo o entrosamento entre as chapas. Os autores conseguiram um entrosamento com chapas de aço de 980 MPa maior do que com chapas de aço de 780 MPa, aumentando a profundidade da matriz. Mucha e Kascák (2011) analisaram o efeito de diferentes combinações de espessura de chapas e diferentes matrizes na resistência do *clinch*ing. Eles concluíram que a combinação de diferentes espessuras das chapas é um fator muito importante no projeto de uma junta unida por *clinch*ing.

Conhecer como aspectos geométricos da ferramenta e os parâmetros envolvidos no processo influencia a resistência de uma junta abotoada pode ajudar na criação de uma metodologia para escolha dos parâmetros, facilitando a vida do projetista e do operador.

1.5 OBJETIVOS DA PESQUISA

Identificar a influência da geometria da ferramenta, dos parâmetros de processo e do material da chapa na união por *clinch*.

1.5.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo principal da pesquisa foi necessário realizar e atingir os seguintes objetivos específicos:

- Construir um modelo computacional por elementos finitos que permitisse identificar como aspectos da geometria da ferramenta influência m na resistência da junta abotoada.
- Analisar por meio de elementos finitos como parâmetros de processo podem interferir na resistência da junta abotoada.
- Construir um ferramental para a realização de experimentos práticos para comparação com resultados obtidos por simulação computacional.
- Analisar o comportamento de materiais diferentes unidos por *clinch*, no caso aço e alumínio.
- Analisar a microestrutura e a morfologia do grão na seção transversal da junta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ABORDAGEM DO TEMA

Por ser um processo de desenvolvimento tecnológico relativamente novo, a aplicação do *clinch* na indústria tomou força apenas nos anos 80, sendo a partir daí estudado com maior profundidade por pesquisadores.

Paula *et al.* (2007) estudaram a influência de alguns aspectos geométricos da ferramenta de *clinch*. Conhecer como a geometria pode influenciar a junta pode ajudar no projeto da ferramenta.

Mucha e Witkowski (2014) estudaram a influência da espessura de fundo na resistência ao arrancamento. Nesses estudos, verificaram que o aumento da resistência pode ser conseguido pela redução da espessura de fundo das chapas, reduzindo-se a profundidade da matriz.

Abe *et al.* (2014) investigaram o *clinch* de chapas de aço de resistência ultra-alta modificando o diâmetro e a profundidade da matriz. Verificaram que a profundidade da matriz interfere diretamente na resistência da junta, e a pouca profundidade pode diminuir o fluxo do material para dentro do canal da matriz diminuindo o entrosamento entre as chapas. Os autores conseguiram um entrosamento com chapas de aço de 980 MPa maior do que com chapas de aço de 780 MPa, aumentando a profundidade da matriz.

Mucha e Kascák (2011) analisaram o efeito de diferentes combinações de espessura de chapas e diferentes matrizes na resistência do *clinch*. Eles concluíram que a combinação da espessura das chapas na matriz é um parâmetro muito importante no projeto de uma junta por *clinch*.

Sarmiento A. A. (2012) analisou a resistência mecânica da união de chapas de aço por conformação a frio sob carga multiaxial, concluindo que o *clinch* proporciona significativo aumento da resistência mecânica da união devido ao encruamento do material, mas não recomenda a utilização do *clinch* em regiões da peça onde a planicidade é um requisito para facilitar e/ou permitir a montagem de contrapeças.

2.2 UNIÃO DE CHAPAS

Junção é a ligação permanente ou uma colocação em contato de duas ou mais peças com uma determinada forma geométrica ou até mesmo de peças com material sem forma definida, em um processo no qual a composição local é alterada e misturada como um todo (BATALHA, 2003).

Neste processo é possível utilizar uma ampla variedade de materiais, agrupadas em diversas combinações, as quais podem ser utilizadas de forma direta ou indireta.

A forma direta de junção, de característica permanente, é verificada nos processos de soldagem, brasagem e deformação plástica. A forma indireta de união, de característica desmontável, pode ser obtida com a utilização de elementos adicionais de fixação e junção, através de parafusos, rebites, pinos e cavilhas.

2.3 UNIÃO DESMONTÁVEL

No tipo de união móvel ou desmontável, os elementos de fixação podem ser colocados ou retirados do conjunto sem causar qualquer tipo de dano às peças que foram unidas. Os exemplos típicos de elementos utilizados para a união desmontável são os parafusos, pinos e cavilhas.

A técnica de união por parafusos mantém as chapas unidas usando a força obtida ao apertar o parafuso para comprimir as chapas. Este efeito de compressão além de garantir a resistência à tração da junta pode ser dimensionado para garantir também a resistência ao cisalhamento, já que a força de compressão aumenta a força de atrito existente ao cisalhar as chapas. Parafusos são elementos bastante versáteis, uma vez que existem inúmeros tipos de parafusos para as mais diversas aplicações. As uniões de chapas desmontáveis costumam ser acompanhados de uma porca, responsável por tracionar o parafuso e duas arruelas para distribuir a carga em torno da união.

Por sua vez, a união de chapas com rebites é realizada, conforme a própria denominação, com a aplicação de um rebite que transpassa um furo previamente manufaturado nas chapas a serem unidas, o qual é deformado em uma de suas

extremidades. Os rebites são peças que podem ser fabricadas em aço, alumínio, cobre ou latão, e servem para unir rigidamente peças ou chapas, principalmente em estruturas metálicas de reservatórios, caldeiras, navios, aviões, veículos e treliças. Possuem vantagens por serem de execução simples, de fácil reparação e de baixo custo, mas apresenta como desvantagens o aumento do peso da união, a redução do campo de aplicação (chapas) e não são recomendáveis para sistemas de carregamentos dinâmicos, como a exemplo da indústria aeronáutica.

Já a união por pinos tem a finalidade de alinhar ou fixar os elementos, permitindo a união de duas ou mais peças, e são utilizados em junções onde se necessita maior resistência à vibrações.

Na união de chapas ou peças por cavilha é feita diretamente no furo aberto por broca, dispensando-se o acabamento e a precisão do furo alargado. A cavilha é uma peça cilíndrica, fabricada em aço, cuja superfície externa recebe entalhes ressaltados.

2.4 UNIÃO PERMANENTE

Na união permanente de chapas os elementos de fixação, uma vez unidos, não podem ser retirados sem que suas partes fiquem inutilizadas. Os exemplos típicos de uniões permanentes são as realizadas por soldagem, rebitagem, colagem e união mecânica decorrentes da deformação plástica dos materiais, como o *clinchng*.

2.4.1 Soldagem

O processo de soldagem consiste na coalescência localizada de metal, onde a coalescência é produzida pelo aquecimento à temperaturas convenientes, com ou sem a aplicação de pressão e como ou sem a aplicação de metal de adição (WAINER, 2002).

A soldagem visa a união localizada de duas partes metálicas, similares ou não, baseada na ação de forças em escala atômica semelhantes às existentes no

interior do material e é a forma de união permanente mais usada na indústria (PAREDES, 2013).

Na soldagem por resistência – solda por pontos, as chapas a serem soldadas são pressionadas umas contra outra, por meio de eletrodos não consumíveis, fazendo passar por estes uma alta corrente que, segundo a Lei de Joule, gera uma quantidade de calor proporcional ao tempo, resistência elétrica e intensidade de corrente, a qual deverá ser suficiente para permitir que a região de contato entre as chapas a serem soldadas atinja o ponto de fusão.

O equipamento utilizado consiste em dois eletrodos dispostos em forma de pinça que ao pressionarem as chapas fecham um circuito elétrico e promovem o aquecimento por efeito Joule em uma região localizada. A FIGURA 2 mostra a formação do ponto de solda.

FIGURA 2 – Formação do ponto de solda



Segundo Marques *et al.* (2009), a soldagem por pontos – denominado pela AWS por Resistance Spot Welding (RSW) é um processo largamente empregado na indústria automotiva durante a montagem de carrocerias e conjuntos estruturais.

A soldagem por pontos é usualmente utilizada para chapas com espessuras de até 3,0mm e em aplicações que permitam o uso de juntas sobrepostas, desde que não tenha requisitos de estanqueidade. Este processo apresenta diversas vantagens, tais como um pequeno custo de equipamento e de mão de obra, a dispensa de operações de usinagem, a não utilização de materiais consumíveis, o alto potencial de automação, a alta velocidade de execução, a elevada resistência mecânica e um excelente acabamento final.

Apesar disso, o processo de soldagem por pontos apresenta algumas desvantagens, quando comparado ao processo de *clinch*, uma vez que durante este processo ocorre o aparecimento de micro trincas nas proximidades da solda pela fragilização por têmpera nos aços. Isto favorece o aparecimento de falhas quando em condições de carregamento dinâmico. Neste aspecto, quando se trabalha com ligas de alumínio, a elevada condutividade térmica e a camada superficial do óxido de alumina, verificada pela baixa temperatura de fusão desse elemento, torna-se também um grande complicador para este processo. Além disso, durante o processo de soldagem pode ocorrer uma aspersão violenta de respingos de solda (*splash*), os quais são nocivos para o operador do equipamento.

2.4.2 União por rebite tradicional

O rebite é um fixador mecânico metálico, semipermanente. Antes de sua instalação, consiste num cilindro com uma cabeça em uma das extremidades, similar a um prego ou pino.

Na rebitagem tradicional a instalação é feita num orifício pré-perfurado, através do achatamento (deformação por golpes) da ponta, quando a espiga preenche o orifício, prendendo o rebite, expandindo-se até 1,5 vezes o seu diâmetro original e prendendo-o de forma definitiva. A FIGURA 3 ilustra a união de chapas rebitadas.

FIGURA 3 – União de chapas rebitadas na fuselagem de aeronave



Fonte: GODOY A. R. et al. (2008)

2.4.3 União por rebite auto perfurável

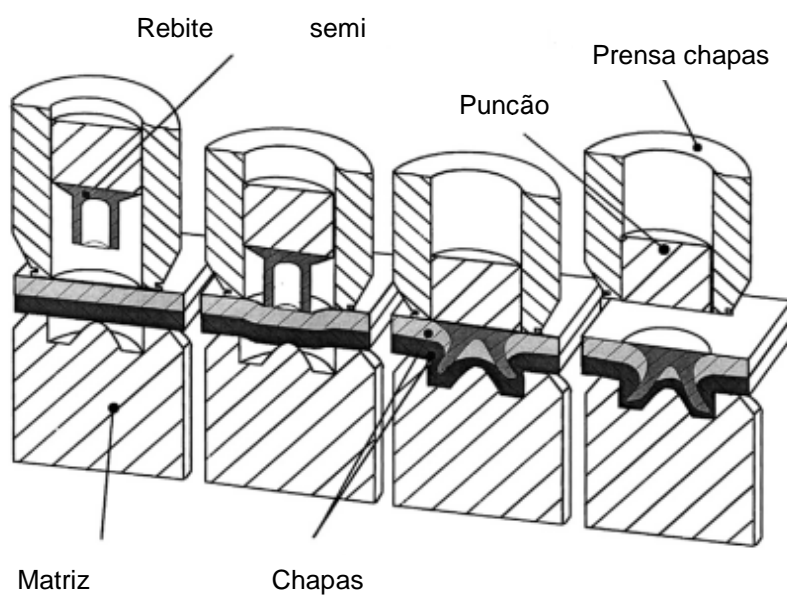
Na rebiteagem auto perfurável (SPR), embora o processo tenha originado a aproximadamente meio século atrás, só nos últimos 20 anos é que a tecnologia da SPR progrediu significativamente, alavancada pela busca na redução de peso dos veículos automotivos, visando a conseqüente diminuição do consumo de combustível. Vários fabricantes de automóveis utilizam esta técnica para montar carrocerias monobloco de automóveis de alumínio (HE *et al.* 2008).

Os autores ainda descrevem que, essencialmente, o processo de SPR é uma operação de modelagem a frio usada para prender duas ou mais chapas de material por condução de um rebite semitubular, o qual penetra nas chapas pré-perfuradas espalhando a saia do rebite sob uma matriz adequada. Como não há nenhuma exigência para os orifícios pré-perfurados nos materiais da chapa, o processo SPR elimina a necessidade de um alinhamento exato entre os componentes e a máquina de rebite. À medida que o processo depende de uma interligação mecânica, em vez de fusão, ele pode ser utilizado em diversas combinações de materiais, como a exemplo dos aços revestidos de zinco, aços revestidos ou pré-pintados com compostos orgânicos, combinações de aços para ligas de alumínio e alguns plásticos com metais.

Para o aço, as junções podem ser feitas em chapas a partir de cerca de 0,5 a 3 mm espessura, com uma espessura total de articulação de até cerca de 6 mm. Para as ligas leves, uma espessura total de articulação de até cerca de 10 mm pode ser rebitada. Os rebites são feitos de aço de alta resistência, tendo formas e diâmetros adequados para cada tipo de união requisitada.

A FIGURA 4 ilustra o processo de rebiteagem auto perfurável e a FIGURA 5 mostra a seção de um corpo de prova deste processo.

FIGURA 4 – Processo de rebiteagem auto perfurável



Fonte: Groche *et al.* (2014)

FIGURA 5 – Corpo de prova de rebiteagem auto perfurável



Fonte: Mori *et al.* (2012)

2.4.4 União por colagem

Normalmente, a ligação adesiva é utilizada como uma técnica de suporte para aumentar a resistência das juntas, isto é, o adesivo aplicado entre as chapas unidas determina uma melhora na resistência ao cisalhamento das chapas, além de tornar a união impermeável à água.

A união por colagem pode ser realizada de forma híbrida. Combinando o *clinch* com o uso de adesivo cria uma união com novos potenciais para aplicações na indústria de transformação.

2.4.5 União por deformação plástica

A deformação plástica na fabricação é geralmente usada em processos de conformação para moldar peças e controlar as suas propriedades mecânicas. No entanto, a deformação plástica pode também ser usada para unir partes suficientemente dúcteis sem o calor externo de alimentação usada em soldagem por fusão (MORI *et al.*, 2013). Processos para união de chapas, por deformação plástica, são convenientemente divididos em duas categorias:

a) União metalúrgica

- Soldagem a frio por laminação, extrusão, forjamento.
- Soldagem por fricção.
- Solda por resitência.

b) União mecânica

- União por conformação eletromagnética.
- União por hidroconformação sem matriz.
- União por cravamento mecânico e hidráulico.
- União por conformação incremental.
- União de tubo por rolagem.
- União por soldagem por impulso magnético.
- União por dobramento de borda.
- Manufatura de flange em eixo tubular.
- União por *clinch* (*clinch*)

2.5 CLINCHING MECÂNICO

O *clinch*ing é um processo de união mecânica que é destinado principalmente a chapas metálicas, em que nenhum elemento de ligação adicional é utilizado (VARIS, 2003).

A ferramenta do punção pressiona simplesmente as chapas dentro de um molde da matriz de uma forma que bloqueie as placas em conjunto.

A primeira patente relacionada ao assunto foi concedida em 1897, mas o processo foi adotado na indústria somente na década seguinte. O passo mais notável foi quando Mercedes-Benz introduziu o processo na produção em série de peças de carroçaria de automóveis de passageiros. Um ano depois, a técnica foi introduzida em uma exposição internacional de máquinas-ferramenta (EMO). Hoje em dia, o processo é amplamente utilizado em diferentes áreas de fabricação de produtos que utilizam chapas, e há uma infinidade de aplicações operacionais. (VARIS, 2005).

A FIGURA 6 mostra as partes dos veículos que utilizam a tecnologia do *clinch*ing pela indústria automotiva.

FIGURA 6 – Utilização do *Clinching* pela indústria automotiva (Adaptado de Sarmento A. A. et al., 2011)

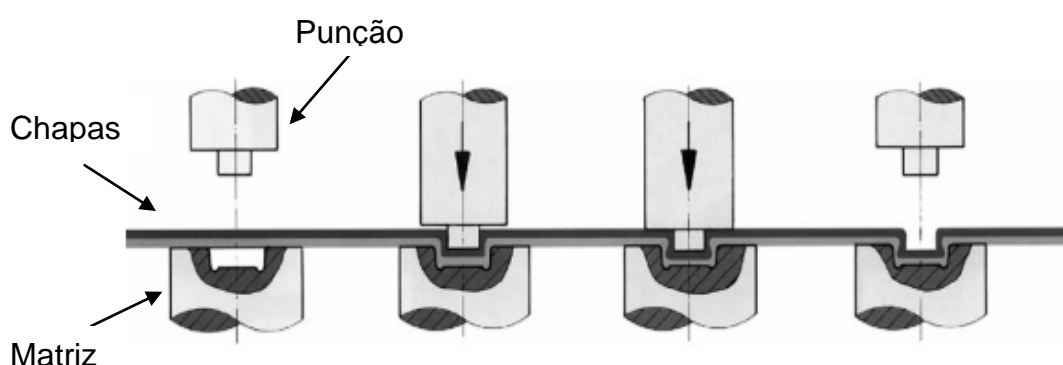
Marca	Modelo	Parte do veículo que utiliza a tecnologia de <i>Clinching</i>
	A3 - AU 353	Tampa Dianteira, Tampa Traseira e Soleira
	Polo - VW 240	Tampa Dianteira e Tampa Traseira
	Grand Cherokee	Tampa Traseira, Paralamas e Suporte da Antena
	X5	Tampa Dianteira
	Classe C	Modulo do Quadro Dianteiro (Front End)
	911	Tampa Dianteira e Tampa Traseira
	Epsilon - GMX 353	Tampa Dianteira
	Mustang	Portas e Tampa de Combustível
	Altima	Tampa Dianteira e Guia do Banco
	Lexus	Assoalho Dianteiro e Teto Solar

A união por *clinch*, objeto de estudo deste trabalho, caracteriza-se pela união de chapas metálicas por conformação a frio, cujo processo consiste em imprimir uma deformação localizada em duas ou mais chapas superpostas, obtendo assim o travamento destas. A operação assemelha-se ao processo de estampagem, sendo diferenciado do *clinch* devido ao entrosamento das chapas realizado por forjamento. Quando se comprime as chapas contra o fundo da matriz, o material escoar para a periferia, formando a placa responsável pelo travamento das chapas, de acordo com a geometria da matriz.

Segundo Mori *et al.* (2013), durante o processo de *clinch* ocorre o encruamento do material devido à deformação plástica a frio imposta pela ferramenta. Este encruamento aumenta a resistência do material nos locais onde o enchimento do canal da matriz é verificado.

A FIGURA 7 ilustra o processo de união de chapas por *clinch*.

FIGURA 7 – Processo de união de chapas por *clinch*.



Fonte: VARIS (2006)

A tecnologia de *clinch* mecânico se destaca particularmente de outras técnicas de união pelo fato de que os elementos são conformados a frio, formando a união a partir do próprio material das peças a serem unidas.

O processo de *clinch* possibilita unir chapas de até 3,0 mm de espessura, o que confere as seguintes vantagens ao processo:

- Alta produtividade;
- Boa repetibilidade;
- Não envolve fusão;

- Alto potencial de automação;
- Elevada velocidade de execução;
- Dispensa operações de usinagem;
- Não gera gases ou vapores tóxicos;
- Bom desempenho sob cargas dinâmicas;
- Não requer pré-tratamento de superfícies;
- Permite unir chapas de materiais diferentes;
- Não exige a utilização de materiais adicionais para união;
- Processo “verde”: Não gera cavaco, nem respingos e fumos;
- Não requer nenhuma medida à prova de oxidação (ferrugem);
- Possibilita a utilização de chapas de diferentes espessuras e materiais;
- Não utiliza fonte de energia que não seja necessária a corrente elétrica ou ar comprimido; e
- A qualidade da união depende apenas da geometria da ferramenta.

Apesar dos vários fatores positivos citados, é necessário identificar algumas desvantagens verificadas neste processo de conformação, as quais são atribuídas em decorrência de:

- Resistência estática inferior à obtida com outros processos;
- Encruamento das chapas nas proximidades da junta;
- Verificação de marca na peça na região da união; e
- Saliência exterior no produto final.

A resistência da junção das chapas unidas por *clinch*ing pode ser avaliada pela sua resistência mecânica a carregamentos de tração e cisalhamento, tanto por carga estática quanto dinâmica.

A resistência a carregamentos estáticos, que será avaliada neste trabalho, é determinada por dois parâmetros geométricos da junta obtida, sendo eles:

- a) Espessura do pescoço, que se refere à espessura da chapa superior após a conformação; e

- b) Espessura de entrosamento, que se refere à medida de quanto o material da chapa superior penetrou na chapa inferior .

Segundo De Paula *et al.* (2006), afirmam que independentemente da forma da carga aplicada, a união das chapas irá falhar por um dos seguintes modos:

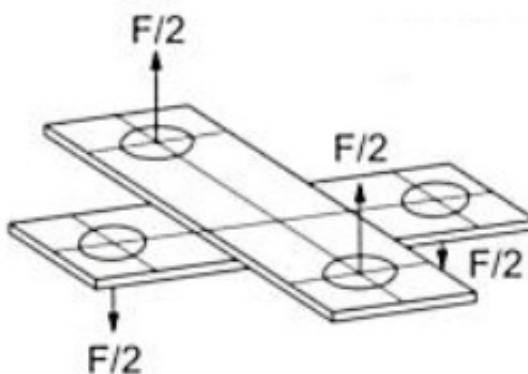
- a) Cisalhamento, quando a região de travamento escoa, liberando as chapas, conforme representado na FIGURA 8.

FIGURA 8 – Arrancamento por cisalhamento



- b) Arrancamento, quando ocorrer o rompimento da parede da chapa superior, conforme representado na FIGURA 9.

FIGURA 9 – Arrancamento cruzado por tração



O *clinch* mecânico pode ser realizado de diversas formas, de acordo com a especificação e acabamento desejados. As principais formas encontradas são o *clinch* plano, *clinch* com corte e o *clinch* circular.

2.5.1 *Clinching* plano

A tecnologia do *clinching* mecânico oferece inúmeras vantagens, como por exemplo a não influência térmica na microestrutura e redução de peso, e também não necessitando de elementos adicionais para a ocorrência da união.

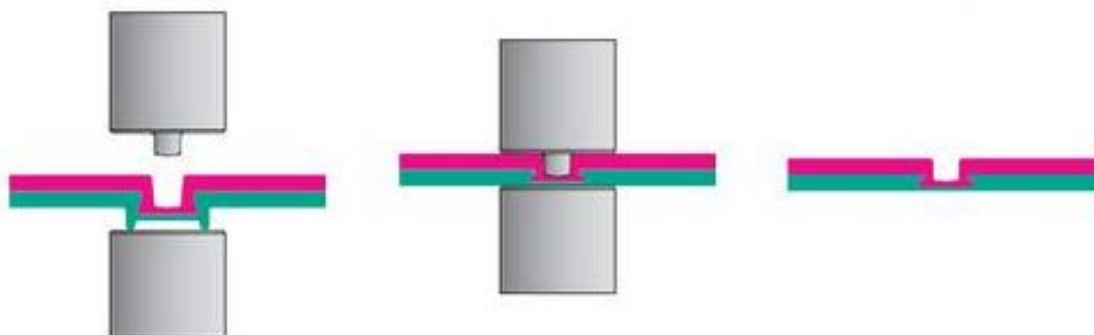
No entanto, a mais significativa limitação é a verificação de saliência exterior, que resulta em uma lombada que se projeta para fora do plano da chapa. Devido a esta saliência, a tecnologia do *clinching* não pode ser utilizado para áreas visíveis, como por exemplo, em peças externas de automóveis, ou em superfícies funcionais de deslizamento.

Conforme descrito por Gerstmann *et al.* (2014), para evitar este problema, foi desenvolvido na Chemnitz University of Technology um processo de formação de passo único, que produz uma ligação plana puntiforme unilateral, substituindo-se a cavidade da matriz por um batente planar.

Com isto, torna possível gerar uma ligação robusta que pode ser usada para aplicações em áreas visíveis e superfícies funcionais.

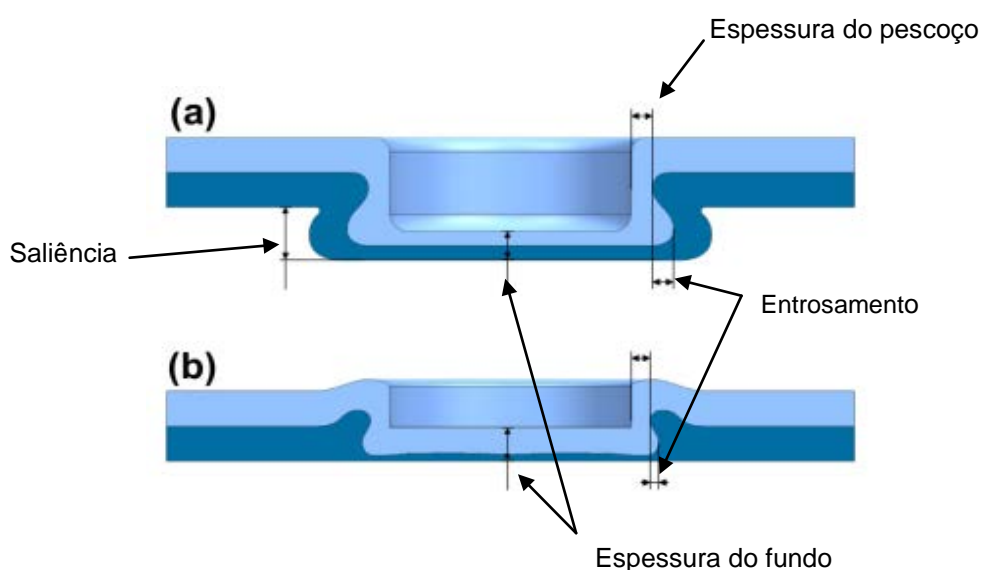
A FIGURA 10 demonstra o processo de *clinching* plano e a FIGURA 11 mostra um comparativo entre as secções transversais esquemáticas do *clinching* convencional(a) e do *clinching* plano(b), bem como os respectivos parâmetros de geometria: espessura do pescoço, de espessura de fundo, travamento e a saliência.

FIGURA 10 – Processo de *clinching* plano.



Fonte: TOX, GmbH (2003)

FIGURA 11 – Comparação entre o *clinch* convencional (a) e plano (b).



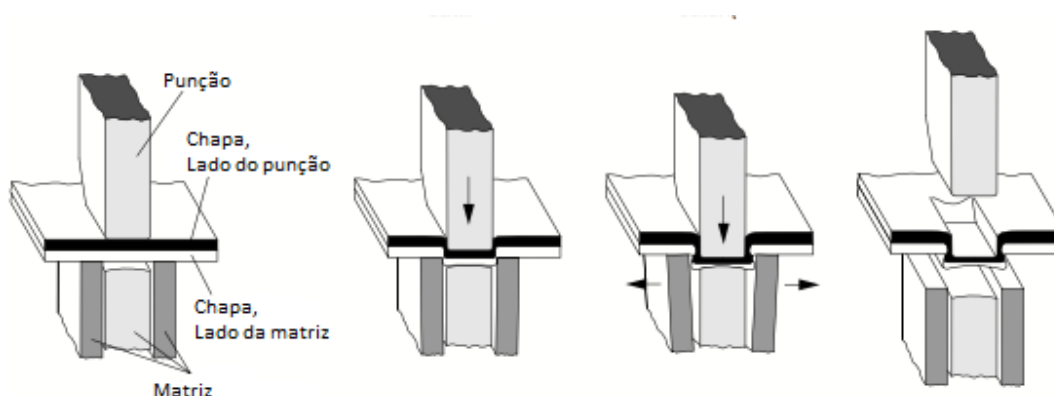
Fonte: Gerstmann *et al.* (2014)

2.5.2 *Clinch* com corte

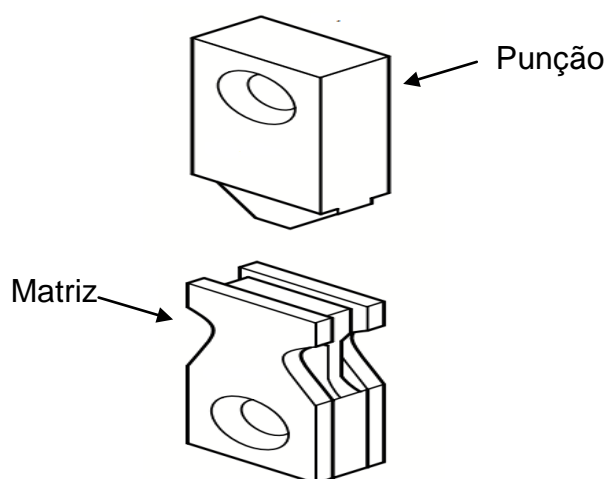
Dependendo da configuração da ferramenta, o processo de *clinch* pode ser realizado com corte parcial. Para realizar o *clinch* de corte é necessário executar inicialmente um corte na camada inferior de aço, seguido por uma pressão que provoca o deslocamento lateral do material. A ação de corte do punção sobre este tipo de fixação reduz a potência necessária para executar o processo, permitindo-se que durante o processo sejam utilizadas ferramentas manuais mais leves. Com isto consegue-se uma boa resistência à rotação relativa entre as camadas, sendo, portanto, recomendado em situações em que um único conjunto é usado (Manual ECKOLD, 2009).

A geometria da ferramenta pode ser escolhida de modo que o corte da folha sobre do lado da matriz não avance até o final da conformação. Devido ao corte parcial reduzido, a chapa do lado do punção não é cortada.

A FIGURA 12 e FIGURA 13 mostram, respectivamente, o processo do *clinch* com corte parcial e detalhes do punção e da matriz.

FIGURA 12 – Processo de *clinch*ing com corte parcial

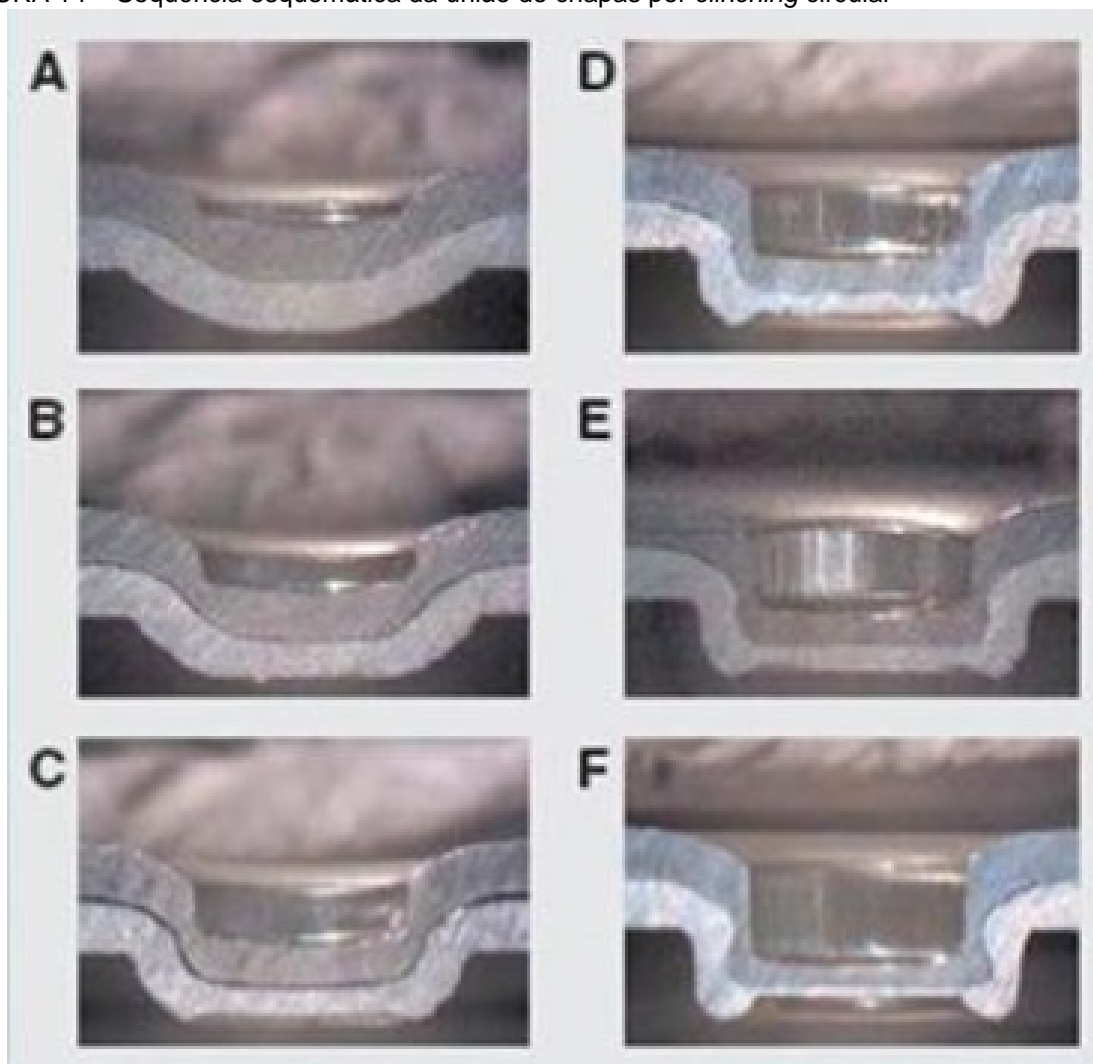
Fonte: Eckold, GmbH (2009)

FIGURA 13 – Detalhe do punção e da matriz no *clinch*ing com corte parcial retangular

Fonte: Eckold, GmbH (2009)

2.5.3 *Clinching* circular

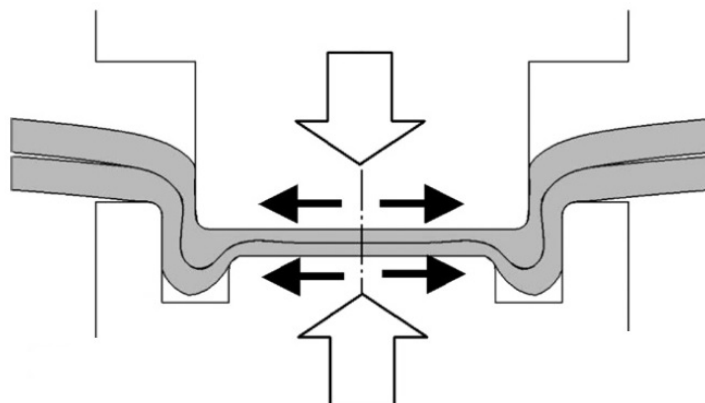
O *clinch*ing circular é caracterizado pela visualização de um selo redondo do lado onde as chapas foram puncionadas e um botão redondo no lado oposto. Neste processo o travamento é de 360° de circunferência, o que confere uma união impermeável à passagem da água e excelente desempenho em relação a cargas cíclicas. A FIGURA 14 apresenta a visão esquemática da união de chapas por *clinch*ing circular.

FIGURA 14 – Sequência esquemática da união de chapas por *clinch* circular

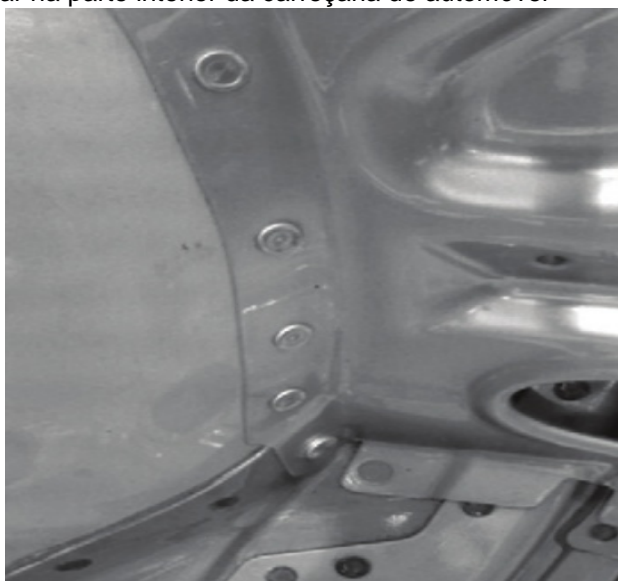
Fonte: Scheid *et al.*, 2009

O processo de formação do *clinch* circular é feito em uma prensa mecânica que une as chapas a frio. Tem grande aplicação na fabricação de estruturas de paredes finas, em particular na indústria automotiva. Ele consiste em prender várias chapas por uma extrusão de impacto entre um punção e uma matriz. As categorias e os tipos de juntas abotoadas são numerosos (OUDJENE, 2008).

A FIGURA 15 representa esquematicamente a formação do *clinch* circular e a FIGURA 16 exemplifica a utilização do *clinch* circular na industrial automotiva.

FIGURA 15 – *Clinching* circular

Fonte: de Paula *et al.* (2007).

FIGURA 16 – *Clinching* circular na parte interior da carroçaria de automóvel

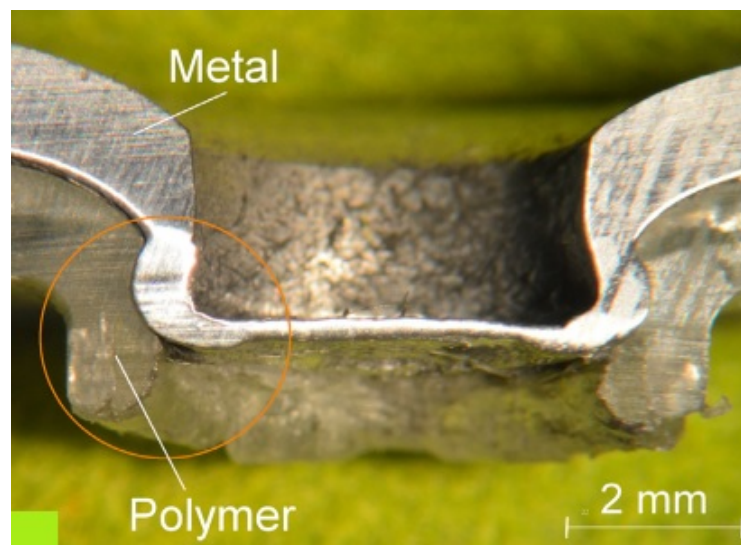
Fonte: Mucha *et al.*(2011).

Devido a sua característica geométrica, o *clinching* circular não apresenta faces de corte parcial da chapa, o que confere a este tipo de união a verificação de um selo mecânico na região abotoada, a qual não permite a penetração de elementos comuns como fluídos e gases. Entretanto, como esta penetração de elementos pode ocorrer a partir das extremidades dos componentes cortados, o processo de *clinching* pode ser combinado com o processo de colagem, o que confere às chapas unidas melhor selagem e, por consequência, maior resistência ao arrancamento.

Lambiase (2013) utilizou experimentalmente o processo de *clinch* circular para a união de chapas de diferentes materiais (metal-polímero semicristalino), identificando a necessidade da utilização de um pré-aquecimento inicial da chapa do polímero, desde que observado o tempo de pré-aquecimento do ar soprado e a temperatura de transição vítrea do polímero. Em temperatura ambiente não é possível obter-se a união das chapas composta com material plástico, devido à propriedade frágil da fase cristalina do polímero.

Na FIGURA 17 é apresentada a união de metal-polímero produzida com o aquecimento do polímero na ordem de 400 °C.

FIGURA 17 – Seção transversal da união de metal-polímero semicristalino



Fonte: Lambiase (2015).

2.5.4 Comparativos entre *clinch* versus soldagem

A alternativa de *clinch* sempre deve ser vista como uma opção quando, por exemplo, um ou mais dos seguintes critérios deve ser cumprido no processo de produção:

- O investimento ou custos decorrentes do processo de união devem ser minimizados;
- Há a utilização de componentes pintados, com camada de óxido, contaminadas com óleo e decapados;

- Existem adesivos, camadas de absorção de vibrações ou películas de plástico entre as camadas das chapas;
- O produto será submetido a altas tensões dinâmicas; e
- O produto será submetido a tensões corrosivas.

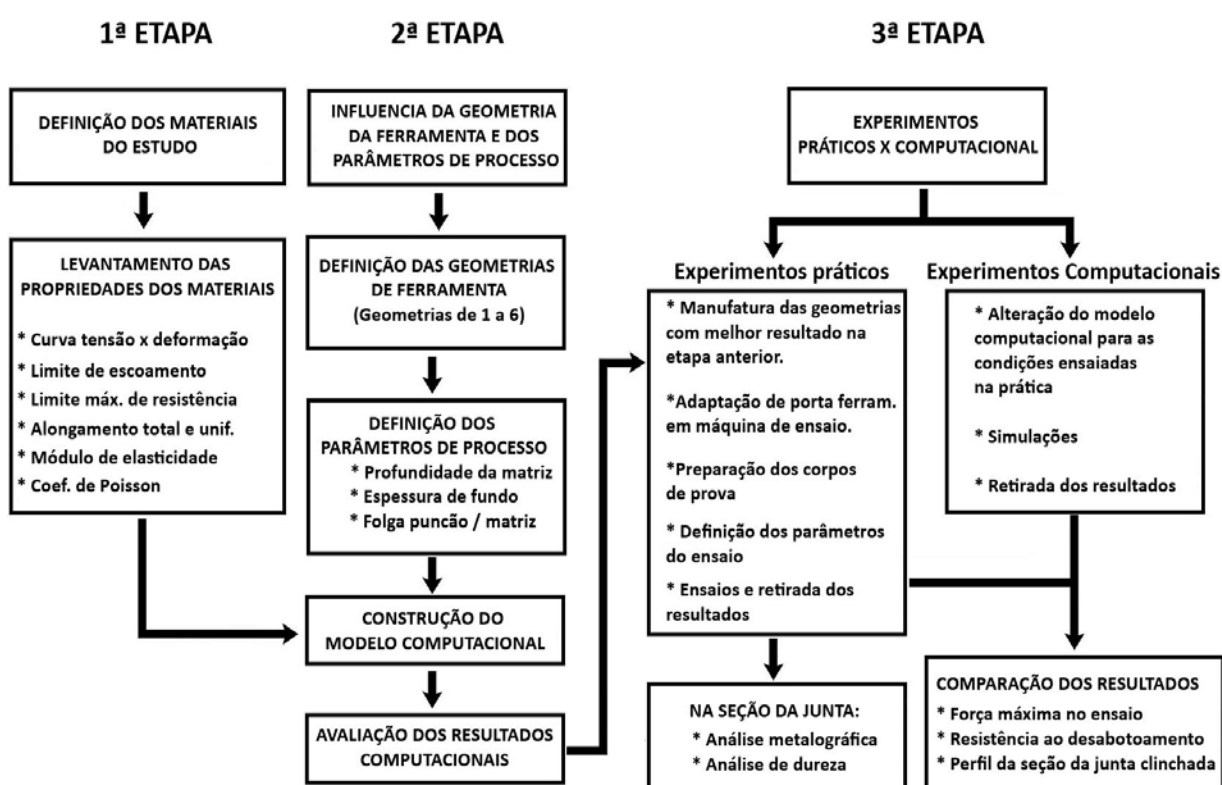
Em comparação à solda a ponto, o *clinch* mecânico apresenta especificamente as seguintes vantagens:

- Nenhum efeito térmico sobre a junta:
 - ✓ Torna possível a união de chapas pintadas ou revestidas com plástico;
 - ✓ Dispensa medidas de preservação subsequentes na área da junção;
 - ✓ Não gera gases ou vapores tóxicos.
- Dispensa pré-tratamento da superfície da chapa
- Não depende da resistência de contato dos materiais empregados:
 - ✓ Torna possível a união de chapas com materiais entre elas (sanduíche); Dispensa medidas de preservação subsequentes na área da junção;
 - ✓ Nenhuma fonte de corrente é exigida (soldas especiais)
- Não suscetível à alteração das condições do processo:
 - ✓ Dispensa pré-tratamento da superfície das peças;
 - ✓ Permite variações na espessura da chapa no intervalo da norma DIN.
- Baixo consumo de energia:
 - ✓ Não há picos de tensão na rede elétrica;
 - ✓ Dispensa a utilização de água de refrigeração.

3 METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia apresentada a seguir tem o objetivo de investigar por meio de experimentos práticos e computacionais os parâmetros da técnica de união de chapas por *clinch*. O fluxograma ilustrado na FIGURA 18 representa esquematicamente as principais etapas do trabalho.

FIGURA 18 – Fluxograma com as etapas experimentais do trabalho



A primeira etapa, apresentada na seção 3.1 deste trabalho, trata da definição dos materiais a serem estudados e suas respectivas propriedades mecânicas.

Na segunda etapa (seção 3.2) trata de experimentos computacionais por meio do método dos elementos finitos (MEF), com objetivo de analisar a influência de diferentes geometrias de ferramenta e parâmetros de processo na resistência ao arrancamento de chapas metálicas.

Na seção 3.3, as duas melhores geometrias encontradas na etapa anterior de simulação foram manufaturadas. Com o objetivo de avaliar a coerência de resultados obtidos por simulação computacional, novos experimentos – práticos e computacionais - foram conduzidos e seus resultados foram comparados.

A descrição detalhada de cada etapa é apresentada na seqüência.

3.1 MATERIAIS

Foram escolhidos três materiais distintos para os experimentos de união mecânica por *clinch*.

O primeiro é um aço de alta resistência e baixa liga HSLA 420/490, reforçado principalmente por elementos micro-ligados que contribuem para a precipitação de finos carbeto e refinamento do tamanho de grão (ARCELORMITTAL, 2009). O HSLA foi escolhido porque é um aço amplamente utilizado na indústria automotiva, especialmente em componentes estruturais, muitas vezes unido em um “*tailored blank*” com outro material.

O segundo material é um aço de baixo carbono com matriz ferrítica e menor resistência mecânica (ARC05 - EN 10130). O ARC05 é um material projetado para aplicações em estiramento e embutimento profundo, mas tem vasta aplicação na indústria da linha branca, automotiva, coberturas e entre outras.

O terceiro material é a liga de alumínio (ABNT 5052F), conhecido comercialmente como alumínio naval, sendo também um material largamente utilizado e de grande disponibilidade comercial. Inicialmente, o interesse deste trabalho era estudar alguma liga de alumínio automotivo como, por exemplo, a liga 6061, mas devido à dificuldade em conseguir esse material na forma de chapa, na espessura e na têmpera desejada, inviabilizou os estudos com essa liga e forçou a substituição pela liga 5052F.

3.1.1 Propriedades mecânicas dos materiais

Na TABELA 1 são apresentadas algumas propriedades mecânicas dos materiais utilizados e na FIGURA 19 pode ser vista as respectivas curvas de tensão

versus deformação verdadeira dos aços HSLA 420/490, ARC05 e da liga de alumínio 5052F.

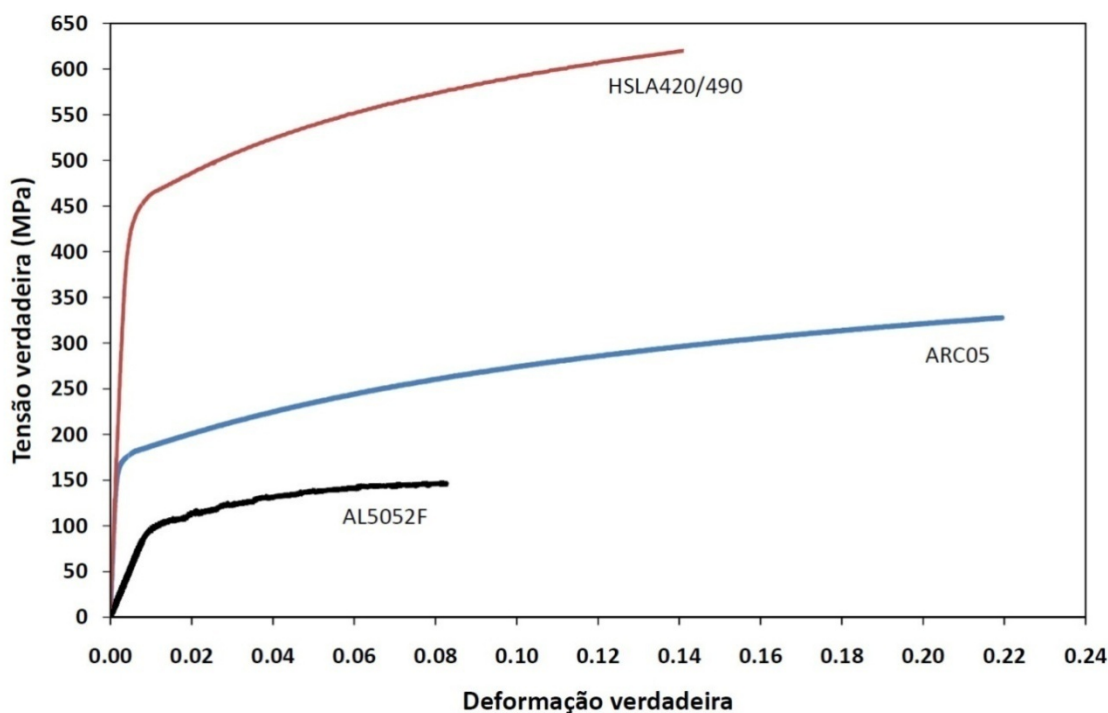
TABELA 1 - Propriedades mecânicas e espessuras dos materiais

Material	Espessura (mm)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência máxima (MPa)	Along. Unif. (%)	Along. Total (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefic. de Poisson
HSLA 420/490*	1.50	415	542	12,3	17,5	208	0,3
Aço ARC05* (EN 10130)	1,5	176	280	24,2	39,3	206	0,3
Liga de Alum. ABNT 5052F	1,5	90	151	8,2	9,4	72*	0,32

*Fonte: LAJARIN (2012)

Vale observar que as propriedades mecânicas para a liga de alumínio ABNT 5052F geralmente não estão disponibilizadas em catálogo de fornecedores, sendo a liga obtida por enquanto através de processos de conformação em que não se emprega qualquer controle especial sobre as condições térmicas ou de encruamento. Por isso, pode haver variações consideráveis nas propriedades mecânicas entre lotes e fornecedores.

FIGURA 19 – Curvas tensão x deformação verdadeira dos materiais usados.



3.2 ESTUDO PELO MEF DOS PARÂMETROS DE PROCESSO E GEOMETRIA DE FERRAMENTA

3.2.1 Definição das geometrias das ferramentas

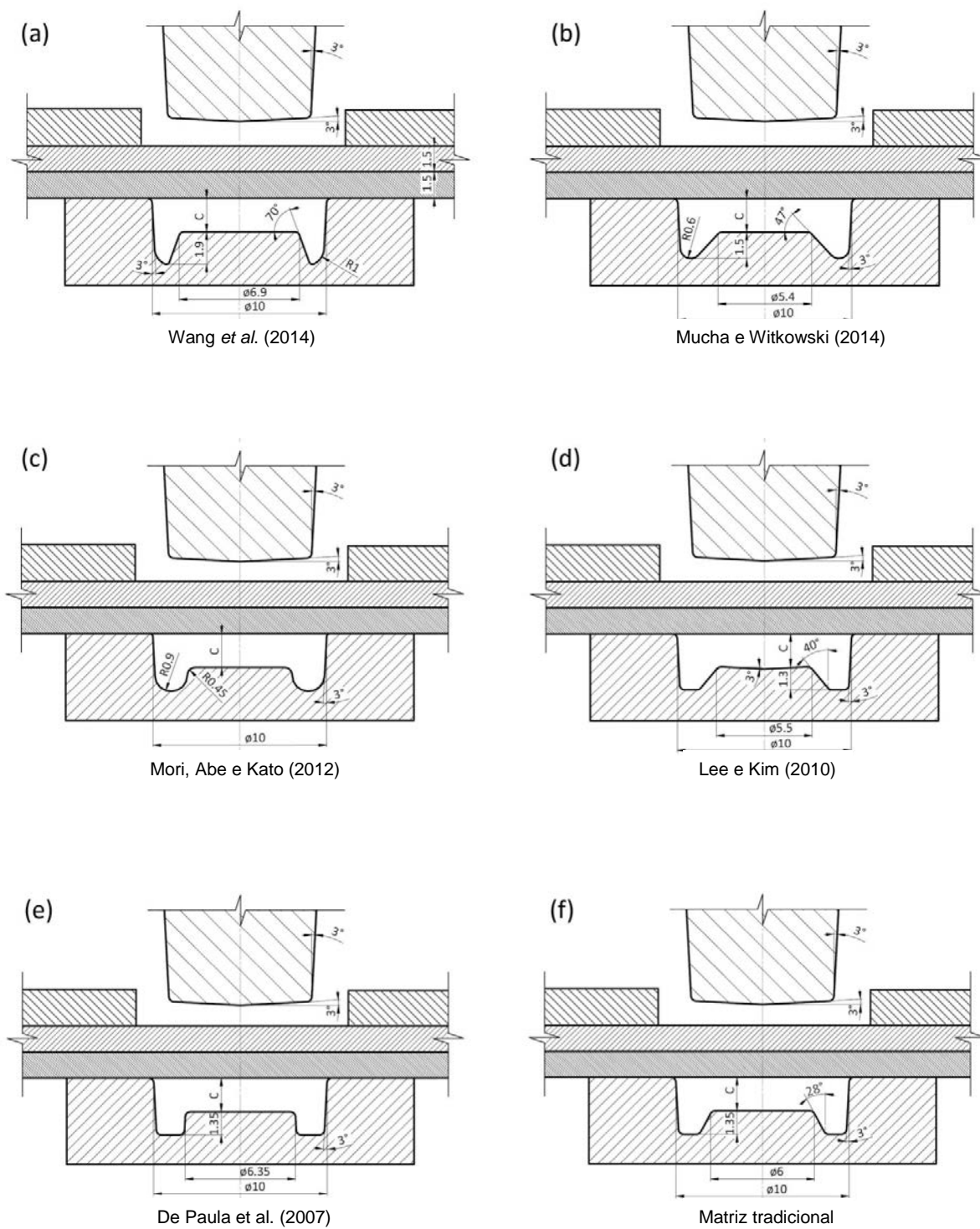
Foram testadas seis geometrias de ferramentas de *clinch* diferentes com objetivo de analisar a influência dessas geometrias na resistência ao arrancamento de chapas metálicas após a união por *clinch*. As seis geometrias, apresentadas na FIGURA 20 foram definidas a partir de trabalhos consultados em literatura.

A geometria [a] foi baseada no trabalho de Wang *et al.* (2014), e apresenta matriz com canal circunferencial mais estreito e profundo, com inclinação de 70°. A geometria [b], baseada no trabalho de Mucha e Witkowski (2014), possui matriz com canal circunferencial e raio no fundo com face inclinada de 47°. A geometria [c], baseada no trabalho de Mori, Abe e Kato (2012), possui uma matriz com canal circunferencial totalmente em arco. A geometria [d] foi baseada no trabalho de Lee e Kim (2010), possui uma matriz com canal fundo plano e parede inclinada de 40°, tendo como diferencial, em relação à geometria [c], o fundo da matriz levemente cônico. A geometria [e] foi baseada nos trabalhos de De Paula *et al.* (2007) e Oudjene *et al.* (2008), tendo uma matriz de canal circunferencial, com perfil quadrado. A geometria [f] é uma geometria bastante comum em ferramentas de *clinch*, ela tem um canal circunferencial de fundo plano, lateral inclinada e fundo da matriz plano.

As geometrias da matriz foram adaptadas para um diâmetro fixo de 10 mm e a geometria do punção, com inclinação de 3° na parede cilíndrica e no topo cônico foi fixa.

Na FIGURA 20 são representadas as seis diferentes geometrias de ferramenta de *clinch* analisadas no presente trabalho.

FIGURA 20 – Geometrias de ferramenta de *clinch* analisadas. a) Wang *et al.* (2014); b) Mucha e Witkowski (2014); c) Mori, Abe e Kato (2012); d) Lee e Kim (2010); e) De Paula *et al.* (2007); f) Matriz tradicional.



3.2.2 Definição dos parâmetros de ferramenta e processo

De acordo com Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001) o primeiro passo do planejamento de um experimento consiste em determinar quais são os fatores e as respostas de interesse para o sistema que se deseja estudar.

Em estudos preliminares, observou-se que a escolha dos parâmetros de processo e ferramenta pode afetar significativamente o resultado de uma junta abotoada. Segundo estudos apresentados por Lee *et al.* (2010), os parâmetros de ferramenta que mais influenciam na resistência de uma união por *clinch* é a profundidade de matriz e folga entre punção e matriz, e o parâmetro de processo que mais influencia é a espessura de fundo, demonstrados na FIGURA 1(b). Sendo assim, para que a escolha desses parâmetros não compromettesse os resultados das seis diferentes geometrias, optou-se por conduzir análises com as seis geometrias com parâmetros definidos em três níveis, ou seja, 6 geometrias x 3 níveis de parâmetros, totalizando, portanto, 18 ensaios computacionais para cada material estudado. Nessa primeira etapa de experimentos computacionais foram realizados estudos apenas com os dois aços: HSLA 420/490 e ARC05, por isso foram 18 ensaios x 2 materiais.

Na TABELA 2 podem ser vistos os fatores de controle e os níveis definidos para os ensaios. Os níveis foram definidos com base nos estudos de Caron e Lajarin (2014) e, também, a partir de testes preliminares ao presente estudo. A espessura de fundo, por exemplo, foi definida com 0,54 mm no primeiro nível, o que corresponde a 18% da espessura das chapas a serem unidas (3 mm), o segundo nível 0,75 mm (25%) e o terceiro em 0,90 mm (30%), e assim sucessivamente.

TABELA 2 - Fatores de controle.

	Fatores de controle	Nível 1		Nível 2		Nível 3	
		(mm)	*%	(mm)	*%	(mm)	*%
A	Espessura de fundo	0,54	18%	0,75	25%	0,90	30%
B	Folga punção-matriz por lado	1,30	43%	1,65	55%	1,95	65%
C	Profundidade da matriz	1,65	55%	1,95	65%	2,25	75%

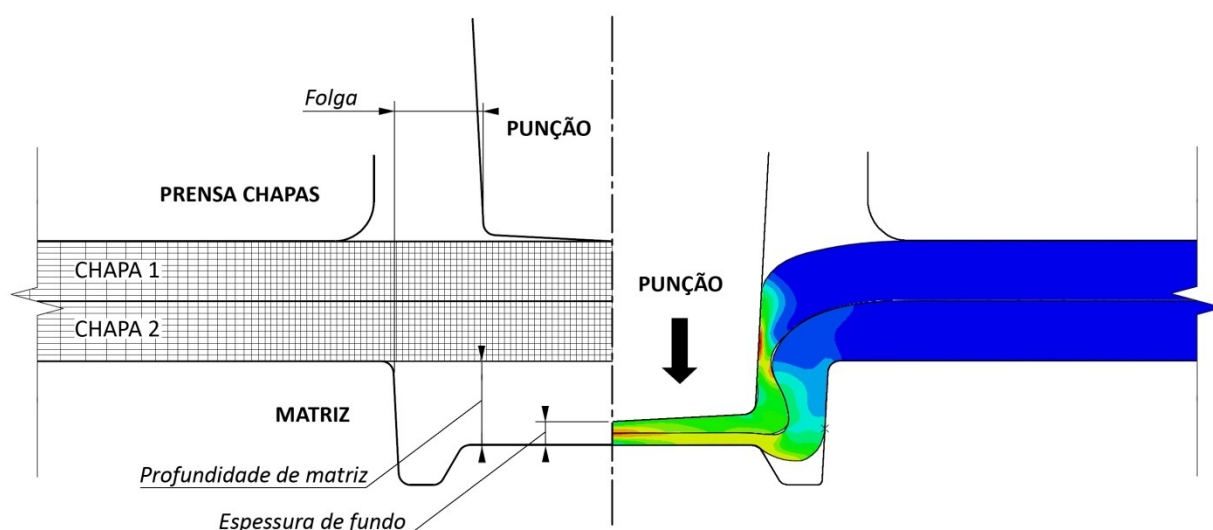
* Percentual da espessura das chapas a serem unidas.

3.2.3 Modelo computacional por meio do MEF

O modelo computacional para simulação da operação de união por *clinch* foi realizado no aplicativo comercial ABAQUS®, com abordagem dinâmica explícita. Devido a ferramenta ser de formato cilíndrico, foi construído um modelo axissimétrico para redução de tempo computacional. O punção, a matriz e o prensa-chapas são considerados componentes rígidos e as chapas deformáveis malhadas com elementos sólidos quadriláteros com quatro nós e integração reduzida - CAX4R (ABAQUS, 2012). Para manter a boa qualidade da malha sobre grande deformação na região do *clinch*, foi utilizada uma técnica de malha adaptativa que combina análises Lagrangiana e Euleriana.

Para o malhamento foram definidos 10 elementos ao longo da espessura. Na FIGURA 21 pode ser visto o esquema de malhamento das chapas. Na região de maior deformação foram definidos elementos com 0.08 mm na horizontal, porém, fora da região de deformação, os elementos foram aumentados gradualmente na horizontal até atingir 1 mm na extremidade da chapa.

FIGURA 21 - Modelo computacional da ferramenta do clinching.



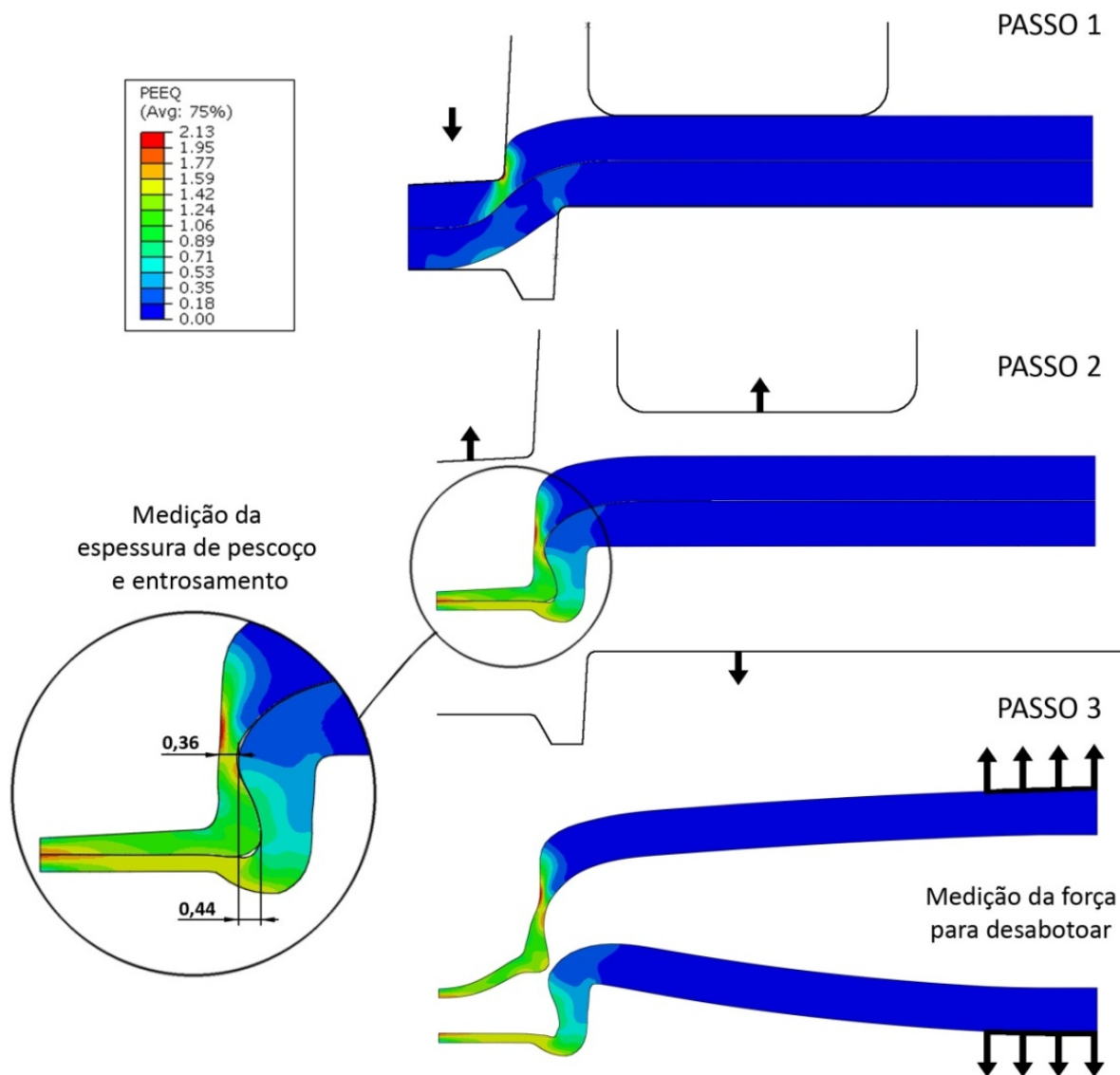
Os materiais foram definidos no aplicativo de simulação por meio da sua densidade, que no caso dos aços é de $7.8E-9 \text{ Ton/mm}^3$ (equivalente a 7800 kg/m^3).

O regime elástico foi caracterizado pelo módulo de elasticidade (E) e pelo coeficiente de Poisson (ν).

O comportamento em regime plástico foi definido pela curva de tensão versus deformação verdadeira em regime plástico.

As interações de contato no modelo foram definidas aos pares e obedecem ao algoritmo de penalidade (*Penalty contact method*), embora seja menos preciso que o algoritmo de cinemática (*Kinematic contact method*) é mais abrangente no tratamento de condições de contato (ABAQUS, 2012). Foi definido um atrito com coeficiente de 0,1, valor este comumente encontrado na estampagem com pouca lubrificação.

As simulações foram realizadas em três passos (*steps*), conforme pode ser visto na FIGURA 22. No primeiro passo o punção se desloca empurrando as chapas contra a matriz, produzindo o entrosamento entre elas. No segundo passo as ferramentas sólidas são afastadas e realizada a medição da espessura do pescoço e de entrosamento entre as chapas. A espessura do pescoço é obtida pela medição da distância, na chapa superior, da borda da matriz até o ponto de encontro desta com a chapa inferior, e a espessura de entrosamento é determinada pela medição da penetração da chapa superior na chapa inferior, conforme destaque na FIGURA 22. No terceiro passo foi simulado o arrancamento, onde as chapas foram puxadas pelas extremidades em sentidos opostos. Foi registrada a força resultante, para comparação da resistência ao arrancamento entre as diferentes geometrias.

FIGURA 22 – Passos da simulação do *clinch* ao arrancamento.

Para a medição das espessuras de pescoço e entrosamento foi usado o aplicativo comercial AutoCAD®. Imagens com o resultado das uniões abotoadas obtidas no ABAQUS® foram exportadas para dentro do AutoCAD®. A escala das imagens foi corrigida e, posteriormente, foram medidas as distâncias entre as extremidades do pescoço e do entrosamento.

3.3 COMPARAÇÃO DE EXPERIMENTOS PRÁTICOS E COMPUTACIONAIS

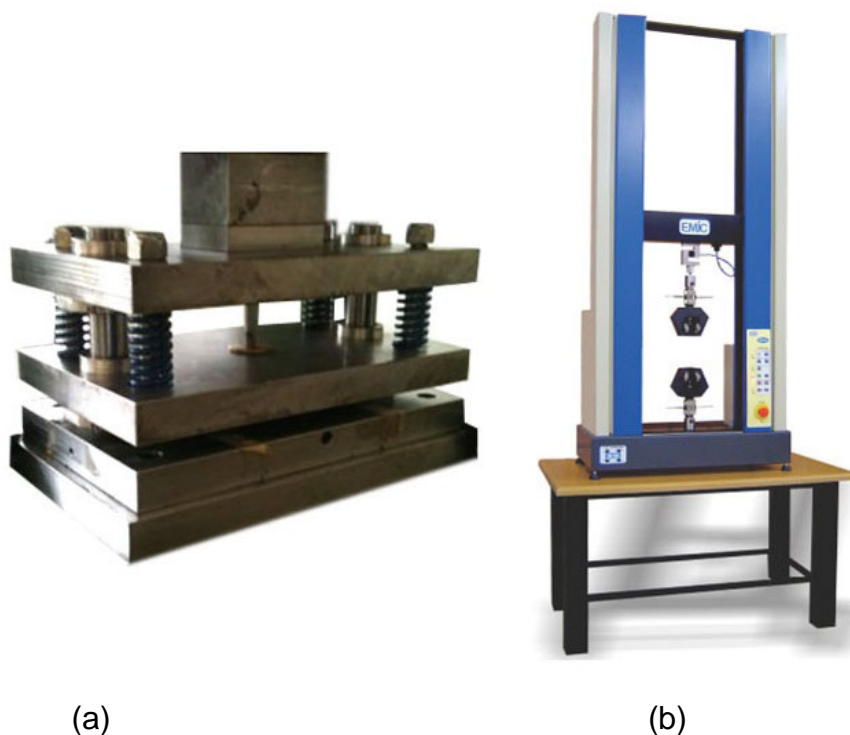
3.3.1 Ensaios de *clinch*ing

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos por meio da simulação computacional por MEF, foram conduzidos experimentos práticos para a conformação por *Clinching*. As duas geometrias de matrizes que propiciaram os melhores resultados na etapa anterior de simulação computacional foram manufaturadas. Os projetos de execução podem ser vistos em apêndice 1.

As ferramentas (duas matrizes e um punção) foram usinadas em aço ferramenta para trabalho a frio VC131 (C 2,10%; Cr 11,5%; W 0,70% e V 0,15%), tratadas termicamente por têmpera e revenimento, resultando em uma dureza média de 60 HRC.

A matriz e o punção foram adaptadas e montadas em um porta-ferramenta de puncionamento construído e utilizado por Gipiela (2012) e, posteriormente o porta-ferramenta foi montado em uma máquina de ensaio uniaxial de tração, conforme FIGURA 23 (a) e (b).

FIGURA 23 – Máquina e porta-ferramenta para os ensaios de *clinch*ing; em (a) porta-ferramenta e em (b) máquina de ensaio uniaxial de tração.



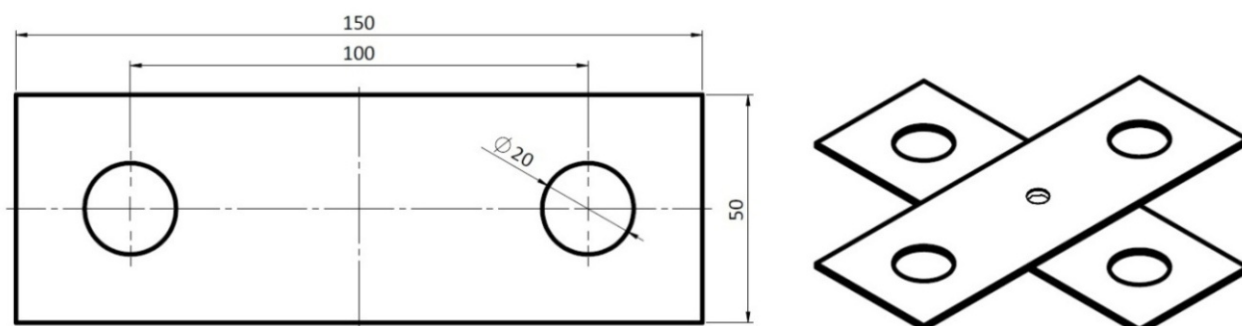
A utilização de uma máquina e ferramentas não específicas de *clinch* gerou algumas limitações no ensaio. A primeira foi que o equipamento não teve a rigidez e nem a força necessária para ensaiar o aço de alta resistência HSLA 420/490. Devido a essa limitação foram conduzidos ensaios com o aço ARC05 e substituído o HSLA 420/490 pela liga de alumínio 5052F, que é um material mais dúctil e de menor resistência.

Além disso, a máquina não foi capaz de atingir com nenhum desses materiais a espessura de fundo simulada computacionalmente. Por exemplo, a espessura de fundo de 0,54 mm que proporcionou a maior resistência ao arrancamento na simulação não foi conseguida no ensaio preliminar prático, pois a máquina não teve rigidez e nem força suficiente para tal. Por isso, a profundidade da matriz foi mantida em 1,65 mm (melhor valor encontrado na primeira etapa), a folga entre punção e matriz foi mantida em 1,30 mm (melhor valor encontrado na primeira etapa) e a espessura de fundo foi alterada para 1,40 mm, valor mínimo conseguido no experimento prático.

Corpos de prova foram cortados de chapas de 1,5 mm de espessura com o formato e dimensões ilustradas na FIGURA 24. Eles foram posicionados em par cruzado sobre a matriz para a união por *clinch* no centro.

Foram realizados ensaios em duas geometrias de matriz (a,e), para dois diferentes materiais (ARC05 e Al5052F) e 4 repetições (2 para ensaios de arrancamento e 2 para análise metalográfica e dureza), totalizando 16 ensaios.

FIGURA 24 – Corpo de prova para ensaios de *clinch*

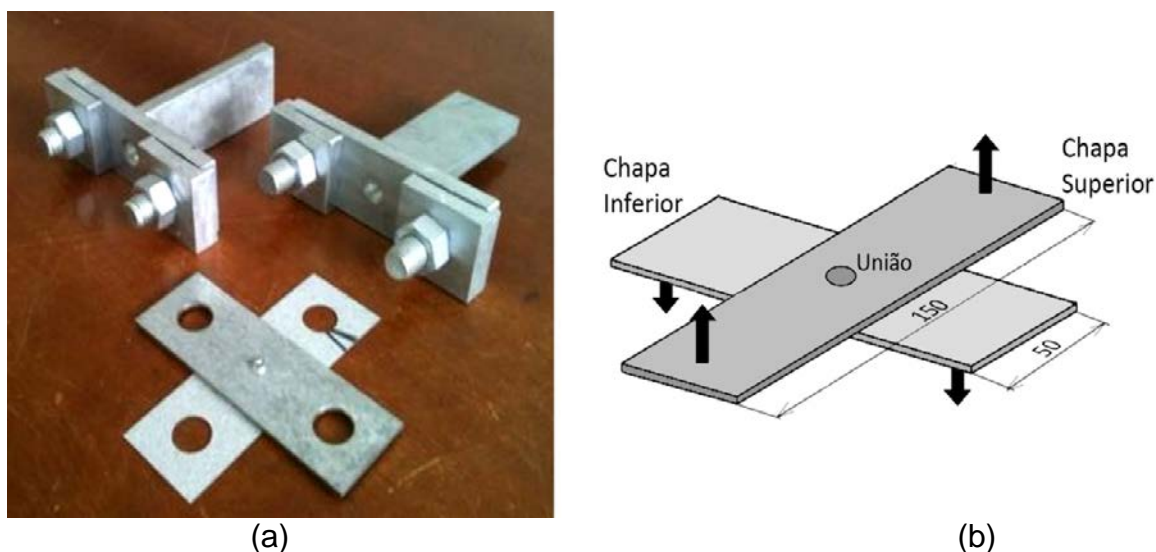


O ensaio computacional de *clinch* e a simulação de arrancamento foram realizados conforme descrição feita na primeira etapa (seção 3.2.3).

3.3.2 Ensaio de arrancamento

O ensaio prático de arrancamento também foi realizado em uma máquina de ensaio uniaxial, reportada na FIGURA 23(b). As chapas cruzadas unidas ao centro foram montadas no dispositivo ilustrado na FIGURA 25(a). A velocidade de arrancamento foi mantida constante em 0,2 mm/s.

FIGURA 25 – Arrancamento; em (a) dispositivo para ensaio e (b) ilustração do ensaio.



O aplicativo da máquina de ensaio de tração (Tesc[®]) registra o deslocamento e a força necessária para o arrancamento da junta. Os valores foram comparados com os obtidos por meio da simulação por MEF. A avaliação da resistência ao arrancamento foi realizada apenas no ensaio de tração; não foi realizado o ensaio de arrancamento por deslizamento (cisalhamento) devido às limitações para execução do modelo tridimensional da amostra.

3.3.3 Análise metalográfica das juntas

A característica da microestrutura, formato, tamanho e direção dos grãos, assim como o fluxo do material podem explicar algum comportamento diferenciado do material durante o ensaio do *clinking* e após o arrancamento.

Com objetivo de analisar a microestrutura, morfologia dos grãos e comportamento do fluxo do material após a junção, foi realizada análise metalográfica na seção das juntas dos corpos de prova abotoadas e também no pós-arrancamento.

O procedimento de preparação e análise seguiu recomendações encontradas em Metals Handbook (1973) que, de forma simplificada, compreende as seguintes etapas:

- (i) Embutimento dos corpos de prova em baquelite;
- (ii) Lixamento por meio de quatro granulações diferentes de lixa; granulometrias entre 220~1200 e polimento;
- (iii) Polimento com pano de feltro e abrasivo alumina, para o aço e eletrolítico para o alumínio;
- (iv) Ataque químico com solução de ácido nítrico e álcool (Nital 3%) para o aço e ataque por via eletrolítica da superfície utilizando eletrólito a base de ácido perclórico (H_3ClO_4), 2 volts, a 10 segundos.; e
- (v) Análise microscópica.

A análise de microscopia foi realizada no laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR, microscópio ótico marca Olympus BX51M, equipado com câmera CCD (Dispositivo de carga acoplada), com captura de imagem utilizando-se o Solutions Image Software – SIS Olympus®. A microestrutura foi caracterizada a partir da descrição da estrutura.

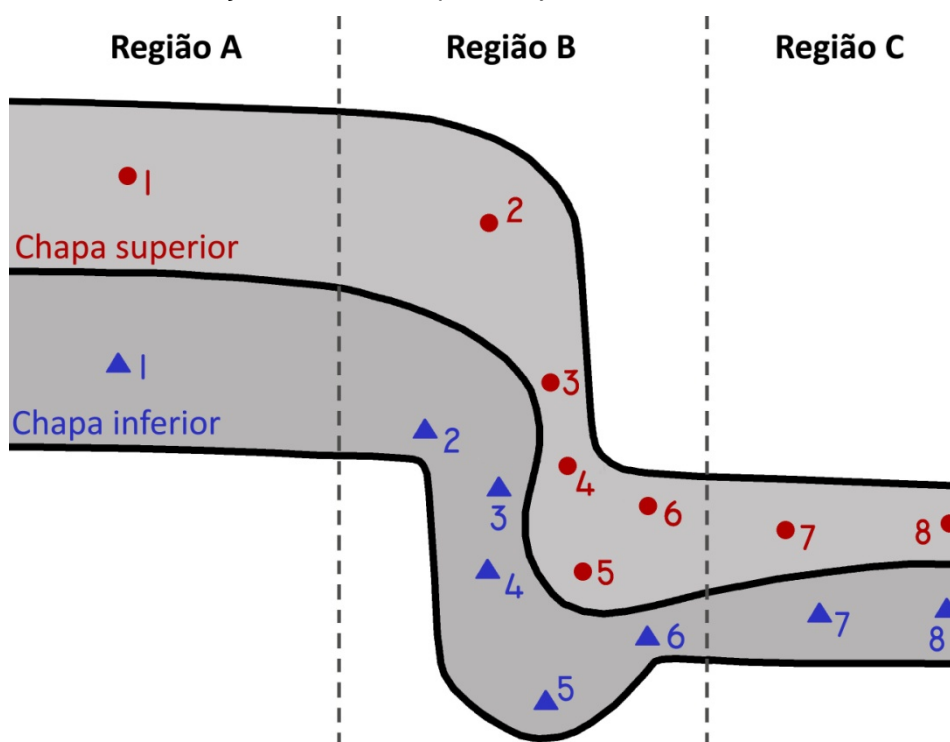
3.3.4 Análise de dureza das juntas

Foram feitas medições de microdureza na seção das duas chapas unidas para avaliar como o encruamento do material em diferentes regiões das chapas pode atuar no processo de união. Foi utilizado o durômetro da marca Shimadzu HMV-2T, com um penetrador piramidal tipo Vickers com carga aplicada de 300 gf (~2940 mN).

A seção das chapas unidas foi separada em três regiões: (A) região não deformada plasticamente, (B) região de entrosamento das chapas e (C) região

central da junta. Nessas regiões foram determinados oito pontos de medição, conforme pode ser visto na FIGURA 26. Em cada ponto foram realizadas três medições. Foi utilizada a metodologia empregada para realização das medições de dureza conforme norma ABNT NBR 6672/81, observada a distância mínima usual de 3 vezes ao comprimento da marcação do indentador e o distanciamento da borda. Nas regiões onde a espessura da chapa era pequena (por exemplo, pontos 3 e 4) os três pontos foram feitos alinhados e nas demais regiões foram trianguladas.

FIGURA 26 - Pontos da medição de dureza no perfil da junta



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da comparação entre os resultados observados na simulação computacional e os experimentos práticos, são apresentados nesta seção os resultados dos estudos realizados com o objetivo de identificar o melhor dimensionamento da geometria de ferramenta no processo de união de chapas por conformação (*clinch*) e as melhores condições de *clinch* mecânico para os materiais escolhidos.

4.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

São apresentados nesta seção os resultados computacionais da união por *clinch* com os aços HSLA 420/490 e ARC05. Após a simulação do *clinch*, as ferramentas (punção, matriz e prensa-chapas) foram afastadas e foi gerada uma imagem de cada condição simulada, sendo essa imagem inserida em um aplicativo CAD para medição da espessura de entrosamento, conforme pode ser revisto no detalhe na FIGURA 22. Posteriormente, as chapas foram puxadas pelas extremidades em sentidos opostos para realizar simulação computacional do arrancamento da junta. Nesse momento foi registrada a força máxima necessária para provocar a separação da junta.

Na FIGURA 27 pode ser verificado o resultado da força máxima registrada no arrancamento para seis diferentes geometrias, três fatores de controle e dois diferentes materiais. As geometrias [a], [e] e [f], nessa respectiva ordem, proporcionaram as maiores resistências ao arrancamento. Foi observado que o dimensionamento da menor largura do canal circunferencial é desejável para aumentar a resistência da junta, pois ela direciona o fluxo do material para dentro do canal, gerando uma espessura de entrosamento maior. Além disso, pequenas variações na geometria do canal, como raios e paredes inclinadas também são essenciais para produzir uma junta resistente ao arrancamento.

A geometria [a] possui o canal mais estreito entre as geometrias testadas; o canal é profundo e possui a parede interna levemente inclinada. Essa combinação produziu o melhor resultado entre as seis geometrias, para os três níveis de

parâmetros e entre os dois aços ensaiados. O resultado obtido com a geometria [e] foi muito próximo ao da geometria [a], pois o canal estreito com perfil quadrado também ajudou a direcionar o fluxo do material para dentro do canal de forma a produzir um grande entrosamento entre as chapas.

No geral, a geometria [d] proporcionou o pior resultado. Isso foi motivado pela conicidade no fundo da matriz que direciona parte do fluxo do material para o centro da matriz e não para dentro do canal circunferencial, gerando uma menor espessura de entrosamento.

A diferença no resultado entre as seis geometrias foi bastante significativa para o aço HSLA 420/490, mais resistente, chegando a variar mais de 2000 N entre as geometrias [a] e [d] no nível 2. Por outro lado o aço ARC05 mais dúctil e menos resistente, sofreu menos a influência da geometria da ferramenta, com variação máxima de 1100 N entre as geometrias [a] e [b] no nível 2.

Na FIGURA 27, FIGURA 28 e FIGURA 29 é mostrada a relação entre a resistência ao arrancamento com as seis diferentes geometrias e a espessura de entrosamento. Existe uma relação entre espessura de entrosamento e a resistência da junta, ou seja, quanto maior a espessura de entrosamento, maior é a resistência obtida na junta. Ainda nestas figuras, pode-se verificar que os parâmetros de processo influenciam grandemente os resultados do clinching.

Os ensaios realizados com os fatores de controle no nível 1, ou seja, ensaios com menor folga entre punção e matriz, menor profundidade de matriz e menor espessura de fundo, produziram maior entrosamento e conseqüente maior resistência ao arrancamento, tanto para o aço HSLA 420/490 quanto para o ARC05. A geometria [a] com o nível 1 e aço HSLA 420/490 alcançou resistência ao arrancamento de 4050 N, enquanto que no nível 3 a resistência foi de 2650 N. Isso deixa claro que não basta apenas escolher a geometria certa da ferramenta, mas é necessário também escolher adequadamente os parâmetros do processo.

FIGURA 27 – Força máxima no arrancamento para seis diferentes geometrias em três níveis de parâmetros de processo.

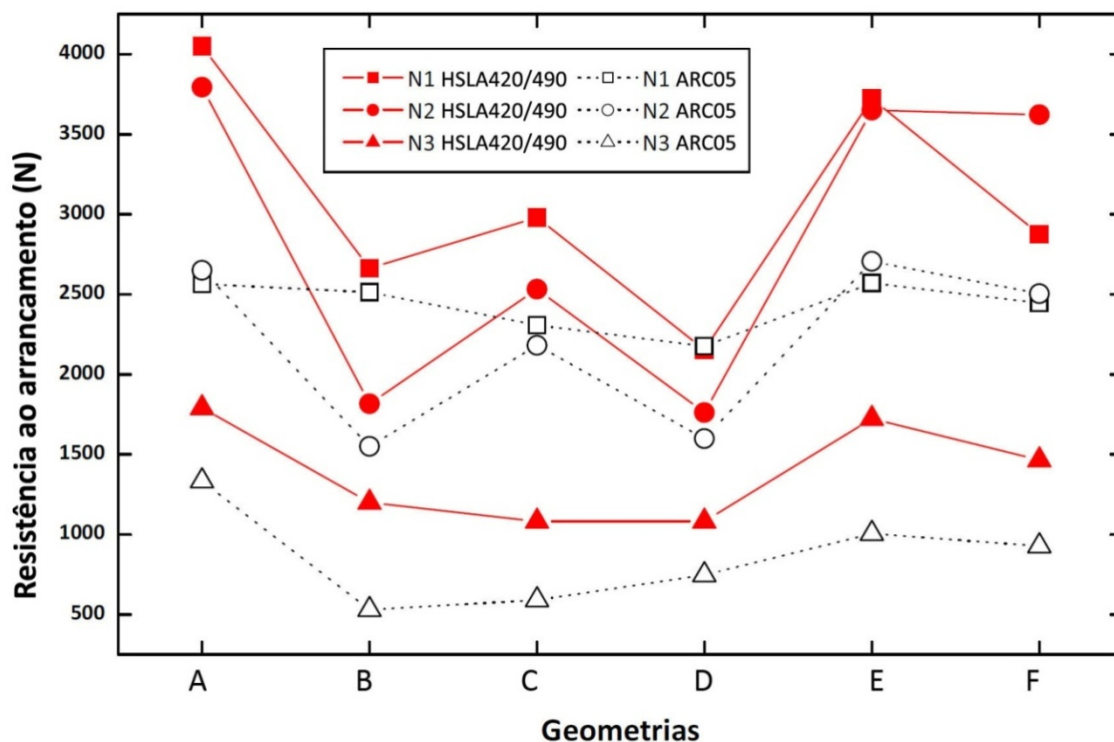


FIGURA 28 – Relação da força máxima no arrancamento com a espessura de entrosamento para seis diferentes geometrias em três níveis de parâmetros de processo com o aço HSLA 420/490.

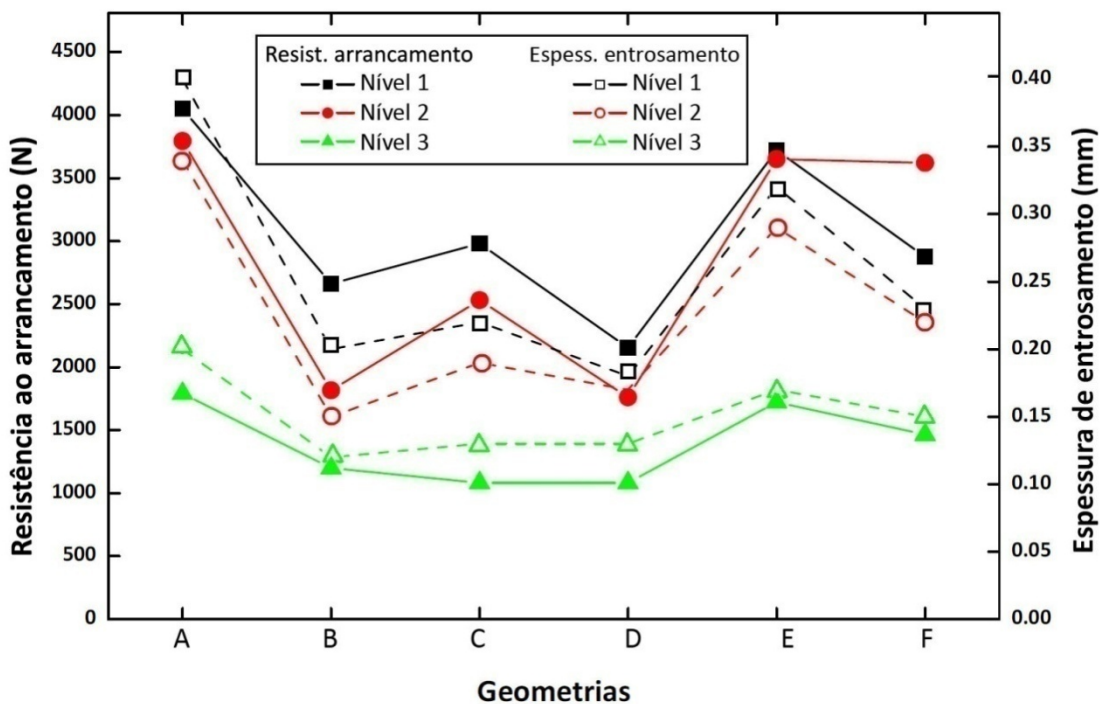
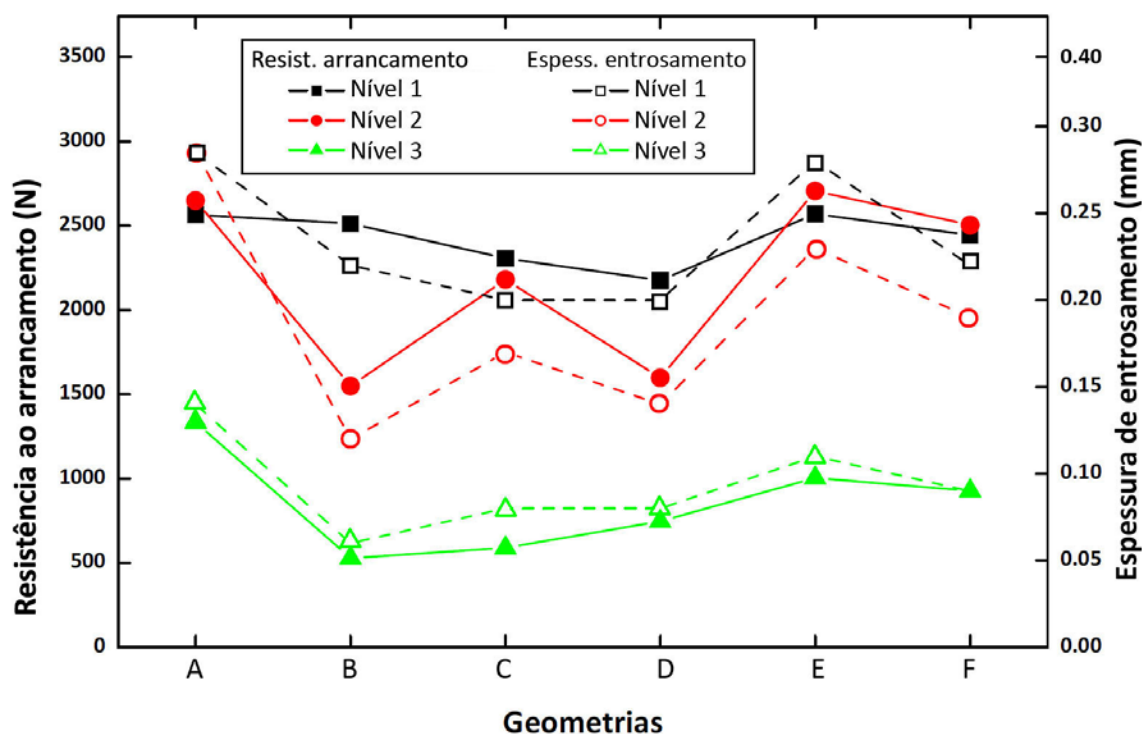


FIGURA 29 – Relação da força máxima no arrancamento com a espessura de entrosamento para seis diferentes geometrias em três níveis de parâmetros de processo com o aço ARC05



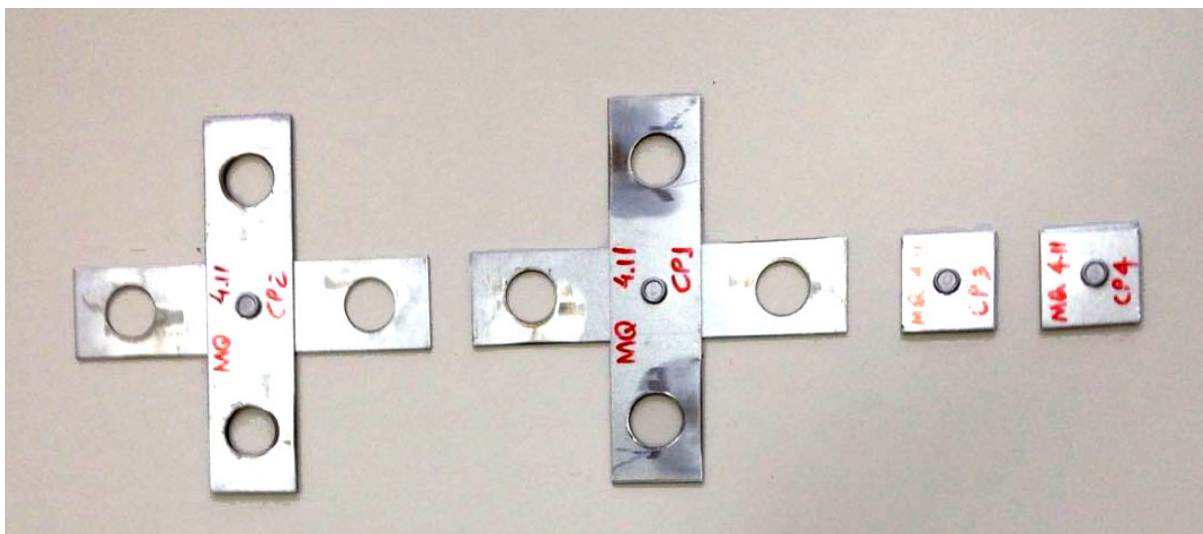
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRÁTICOS VERSUS SIMULAÇÃO

Nessa etapa, o objetivo foi comparar resultados de experimentos práticos com resultados obtidos por meio da simulação computacional por MEF e analisar a viabilidade do uso de ferramentas computacionais no projeto de um ferramental de *clinch*. Foram testados dois materiais distintos (ARC05 e Al 5052F) e seus resultados são descritos na sequência.

4.2.1 Resultados dos experimentos de *clinch* com o aço ARC05

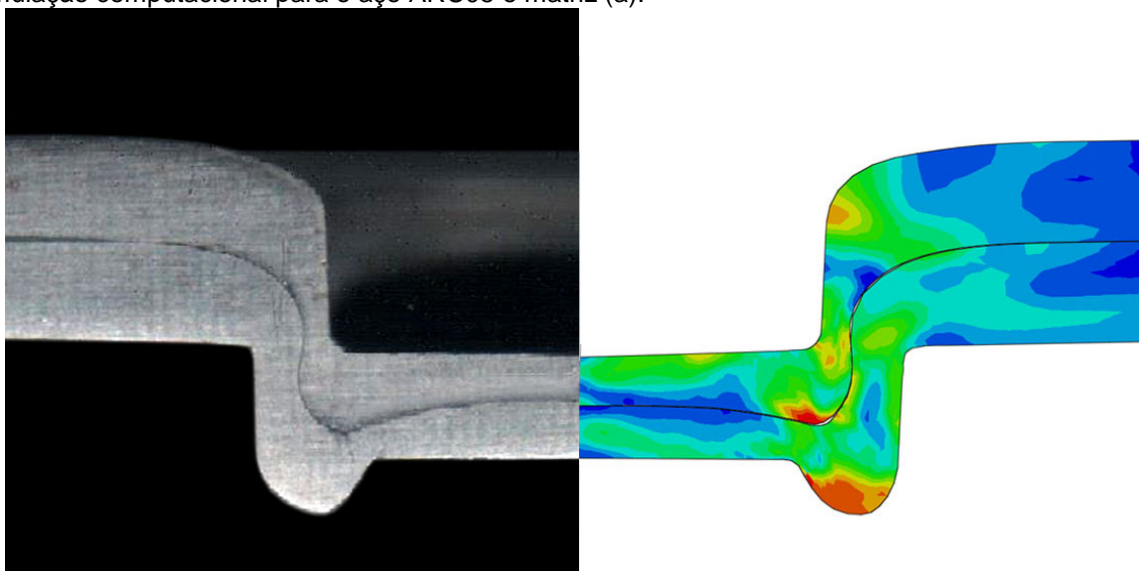
Na FIGURA 30 podem ser vistos os corpos de prova do aço ARC05 unidos por *clinch* usando a matriz (e). Foram feitos quatro ensaios para cada uma das duas matrizes. Dois corpos de prova foram submetidos a etapa de arrancamento para registro da resistência da junta e os demais foram seccionados para avaliação do perfil da seção, análise metalográfica e medição de dureza.

FIGURA 30 - Corpos de prova do aço ARC05 para matriz (e) unidos por *clinch*ing.



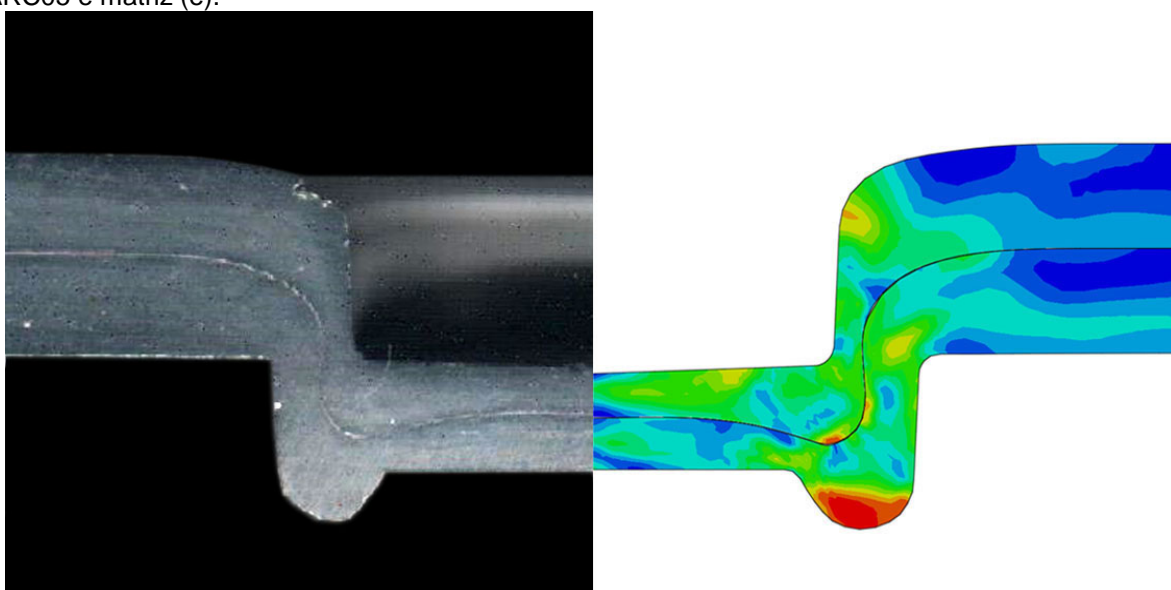
Na FIGURA 31 é mostrada uma macrografia com o perfil da seção da junta obtida no experimento prático em comparação com a simulação computacional para o aço ARC05, utilizando-se a matriz (a). Foi observado que o perfil da seção da junta simulada computacionalmente ficou compatível com o verificado no experimento prático. O entrosamento entre as chapas foi de 0,08 mm e 0,06 mm para os experimentos práticos e simulação, respectivamente. Essa medição foi realizada em um aplicativo CAD sobre uma imagem da seção da junta. Devido à baixa resolução da imagem, a precisão da medição ficou comprometida.

FIGURA 31 - Comparação do perfil de *clinch*ing: macrografia dos experimentos práticos versus simulação computacional para o aço ARC05 e matriz (a).



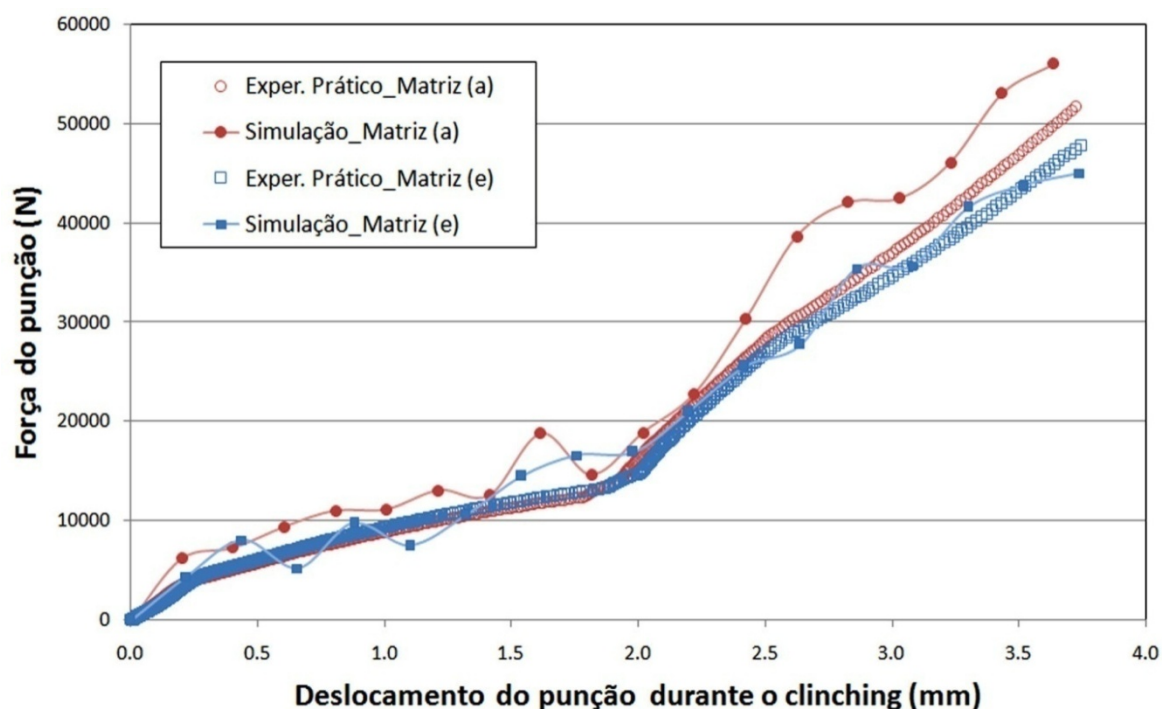
Na FIGURA 32 é mostrada macrografia do perfil da seção da junta obtida no experimento prático em comparação com a simulação computacional para o aço ARC05, utilizando-se a matriz (e). Assim como no caso anterior, o perfil da seção da junta simulada computacionalmente ficou bem parecida com a do experimento prático. O entrosamento entre as chapas foi de 0,07 mm e 0,05 mm para os experimentos práticos e simulação, respectivamente.

FIGURA 32 - Comparação do perfil de *clinch*ing: experimentos práticos versus simulação para o aço ARC05 e matriz (e).



Na FIGURA 33 é apresentado a curva de variação da força aplicada durante o ensaio do *clinch*ing com o aço ARC05. O punção empurra as chapas e por volta dos 2 mm de deslocamento as chapas encostam no fundo da matriz, fazendo com que a força aumente ainda mais, pois o material é forçado a escoar para o canal da matriz. Pode ser observado que os resultados práticos e computacionais foram muito próximos. Na matriz (a) a força máxima na simulação atingiu 56000 N e no experimento prático 53000 N.

FIGURA 33 - Resultado da força do punção durante o *clinch* com o aço ARC05.



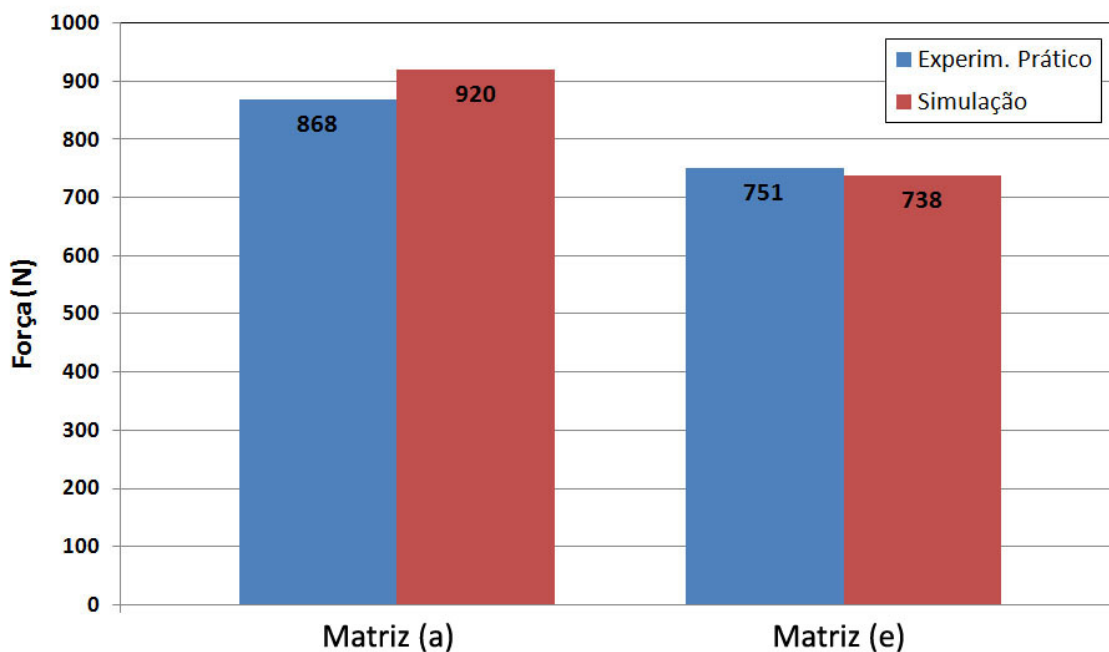
Após a etapa de união das chapas, os corpos de prova foram submetidos ao teste de arrancamento axial.

A FIGURA 34 mostra os resultados da força máxima durante a etapa de arrancamento do aço ARC05. Para as amostras unidas utilizando a matriz (a), obteve-se força máxima de 868 N e 920 N, respectivamente, entre o experimento prático e a simulação. Para as amostras unidas utilizando a matriz (e), obteve-se força máxima de 751 N e 738 N, respectivamente para o experimento prático e a simulação.

Os resultados de força máxima no arrancamento com o ARC05 mostrou que o modelo computacional conseguiu simular com bastante proximidade os resultados práticos, com diferenças de 6% e 1,7% para as matrizes (a) e (e), respectivamente.

Pode ser observado ainda que a resistência ao arrancamento obtida com a matriz (a) foi maior do que com a matriz (e), em torno de 16%. Devido aos parâmetros de processo serem os mesmos, esse resultado foi influenciado exclusivamente pela geometria da matriz, mostrando que a escolha da geometria da matriz pode afetar significativamente a resistência da junta.

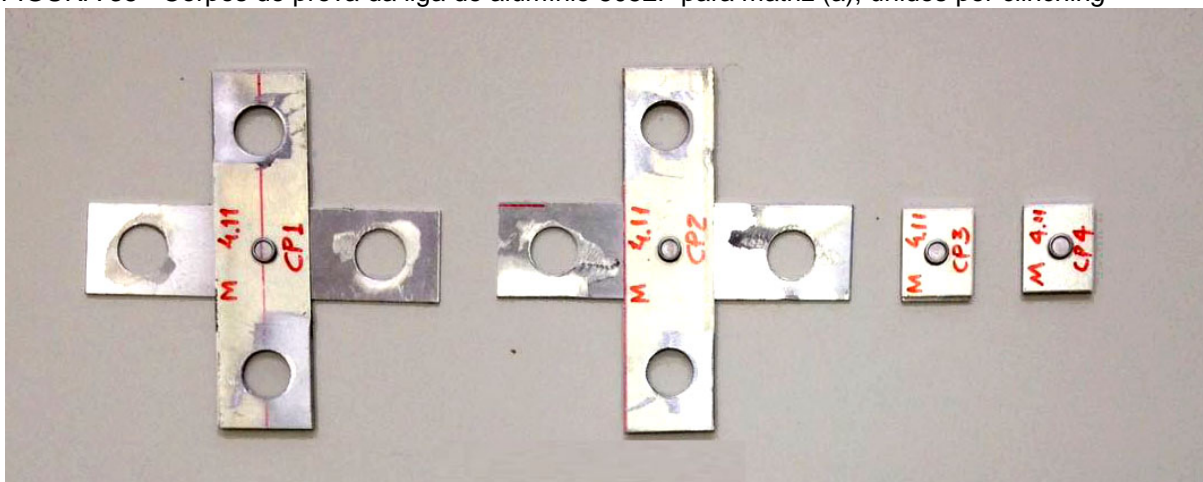
FIGURA 34 – Resultado da força máxima no arrancamento prático versus simulação com o aço ARC05.



4.2.2 Resultado dos experimentos de *clinking* com a liga de alumínio 5052F

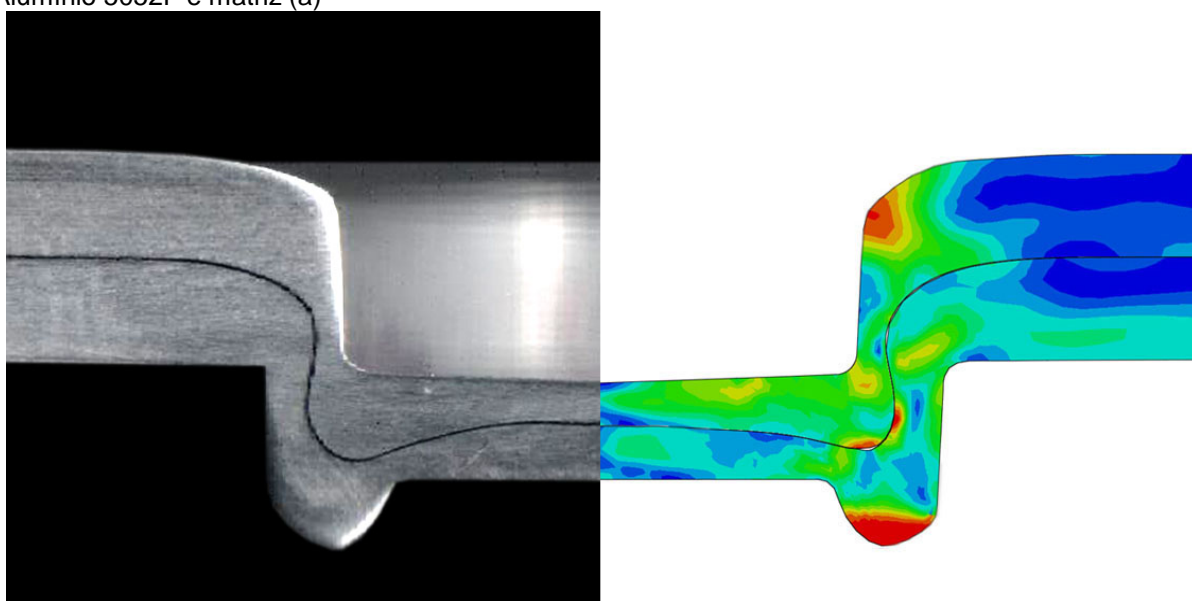
Na FIGURA 35 podem ser observados os corpos de prova da liga de alumínio unidos por *clinking* usando a matriz (a). Assim como aconteceu para o aço ARC05, foram feitos quatro ensaios para cada uma das duas matrizes.

FIGURA 35 - Corpos de prova da liga de alumínio 5052F para matriz (a), unidos por *clinking*



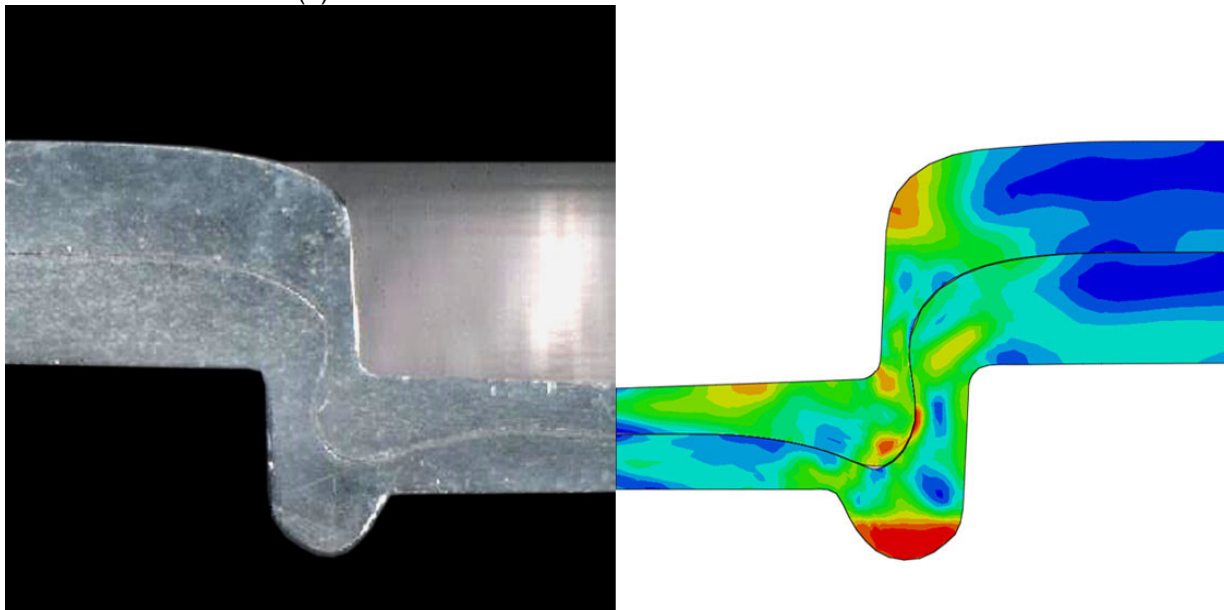
Na FIGURA 36 é mostrado o perfil da seção da junta obtida no experimento prático em comparação com a simulação computacional para a liga de alumínio 5052F, utilizando-se a matriz (a). Assim como ocorreu nos experimentos com o aço ARC05, o perfil da seção da junta simulada computacionalmente ficou muito parecido ao do experimento prático. O entrosamento entre as chapas foi de 0,14 mm e 0,13 mm para os experimentos práticos e simulação, respectivamente.

FIGURA 36 - Comparação do perfil de *clinch*ing, experimentos práticos versus simulação para o Alumínio 5052F e matriz (a)



Na FIGURA 37 é mostrado o perfil da seção da junta obtida no experimento prático em comparação com a simulação computacional para a liga de alumínio 5052F, utilizando-se a matriz (e). O resultado também ficou visualmente muito parecido. O entrosamento entre as chapas foi de 0,13 mm e 0,09 mm para os experimentos práticos e simulação, respectivamente.

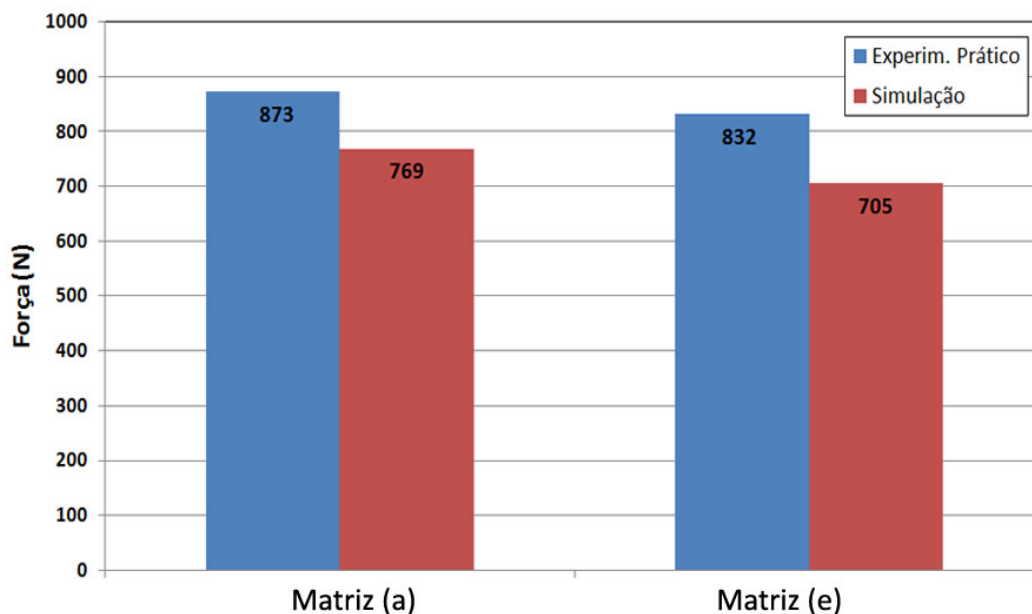
FIGURA 37 - Comparação do perfil de *clinch*, experimentos práticos versus simulação para o Alumínio 5052F e matriz (e) .



Na FIGURA 38 são apresentados os resultados da força máxima no arrancamento do alumínio 5052F. Para a matriz (a), se obteve força máxima de 874 N e 769 N, respectivamente, entre o experimento prático e a simulação. Para a matriz (e), obteve-se força máxima de 832 N e 705 N, respectivamente para o experimento prático e a simulação. Os resultados indicaram também que a força de entrosamento das chapas de alumínio na matriz (a) foi superior à da matriz (e), tanto no experimento prático como no computacional. Esses resultados indicam que a geometria da matriz (a) proporcionou uma união entre as chapas com melhor entrosamento do que a matriz (e), igual ao que foi verificado nos resultados com o ARC05.

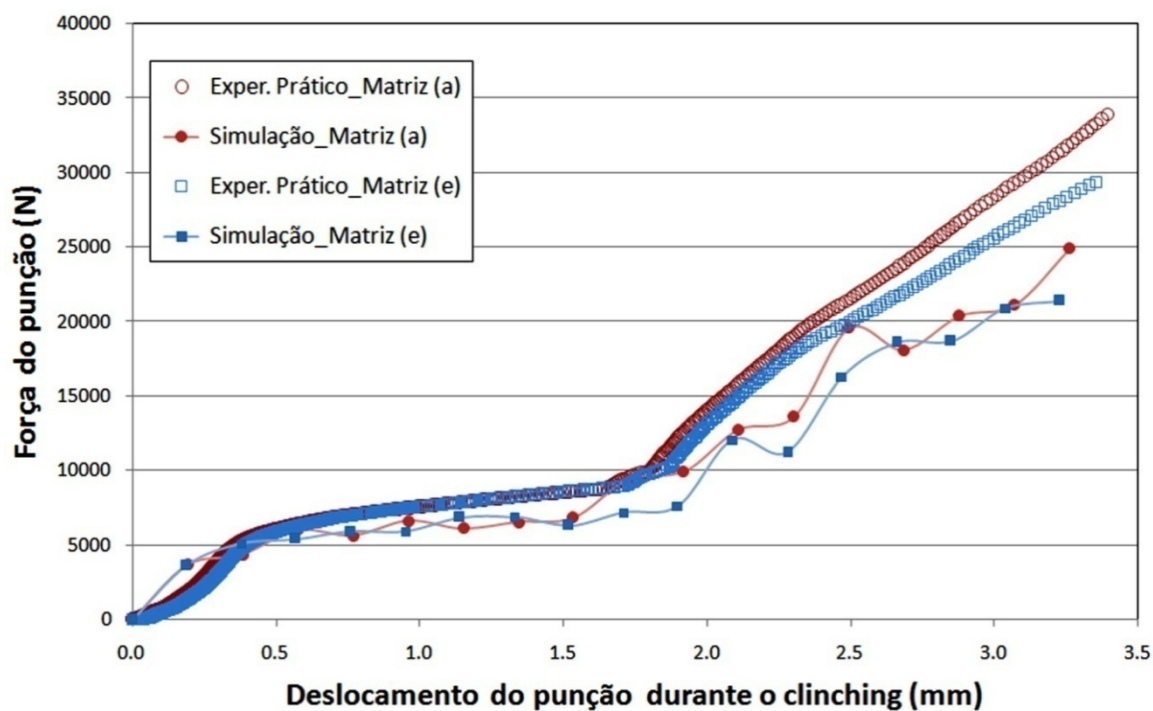
Entretanto, diferentemente ao que ocorreu com o ARC05, a diferença na força máxima no arrancamento obtida na prática e a simulada computacionalmente foi maior, 12% utilizando a matriz (a) e 15% utilizando a matriz (e).

FIGURA 38 - Resultado da força máxima no arrancamento prático versus simulação com a liga de alumínio 5052F.



Na FIGURA 39 é apresentado o resultado da força do punção durante o *clinch* do alumínio 5052F. Na matriz(a), a força máxima atingiu 34000 N na simulação e 20000 N no experimento prático.

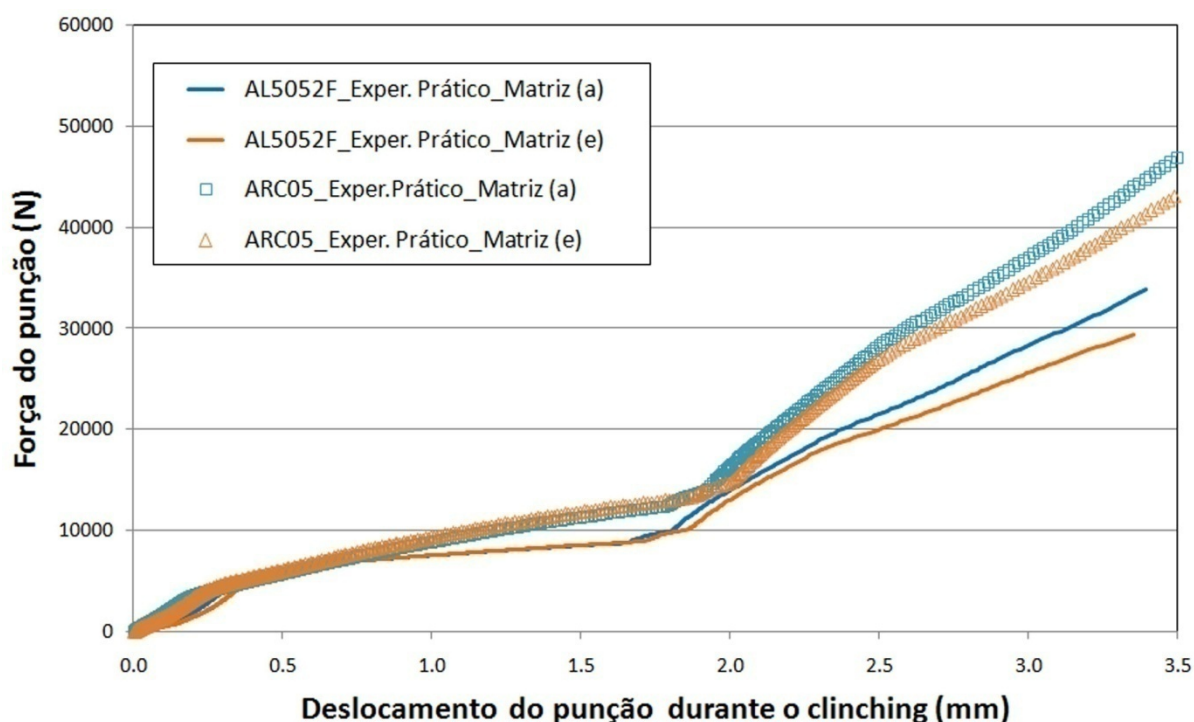
FIGURA 39 - Resultado da força do punção durante o *clinch* com a liga de alumínio 5052F.



4.2.3 Comparativo dos resultados obtidos com o aço ARC05 e a liga de alumínio 5052F

Na FIGURA 40 é observado o comparativo dos resultados da força durante o deslocamento do punção no *clinch* das chapas do aço ARC05 e do alumínio 5052F. Até o deslocamento de 2 mm em ambos os materiais a força exercida pelo punção é próxima, em torno de 12000 N. Após esse deslocamento as chapas encostam no fundo da matriz e começam a escoar para o canal. A partir desse ponto observa-se que a força exigida aumenta proporcionalmente a resistência mecânica de cada material. Quanto maior a resistência do material, maior é a força exigida para escoar o material para o canal da matriz o que dificulta em alguns casos o uso do *clinch* com aços de alta resistência. Em experimentos preliminares foram realizados testes com os aços HSLA 420/490 e DP 350/600 e não foi possível unir as chapas, pois o equipamento utilizado não tinha força suficiente para escoar o material para o canal da matriz e conseqüentemente não produzindo o entrosamento entre as chapas.

FIGURA 40 - Resultado da força do punção durante o experimento prático de *clinch* com o aço ARC05 e a liga de alumínio 5052F.



4.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA E DE DUREZA NA REGIÃO UNIDA POR *CLINCHING*

4.3.1 Análise de micrografia e macrografia

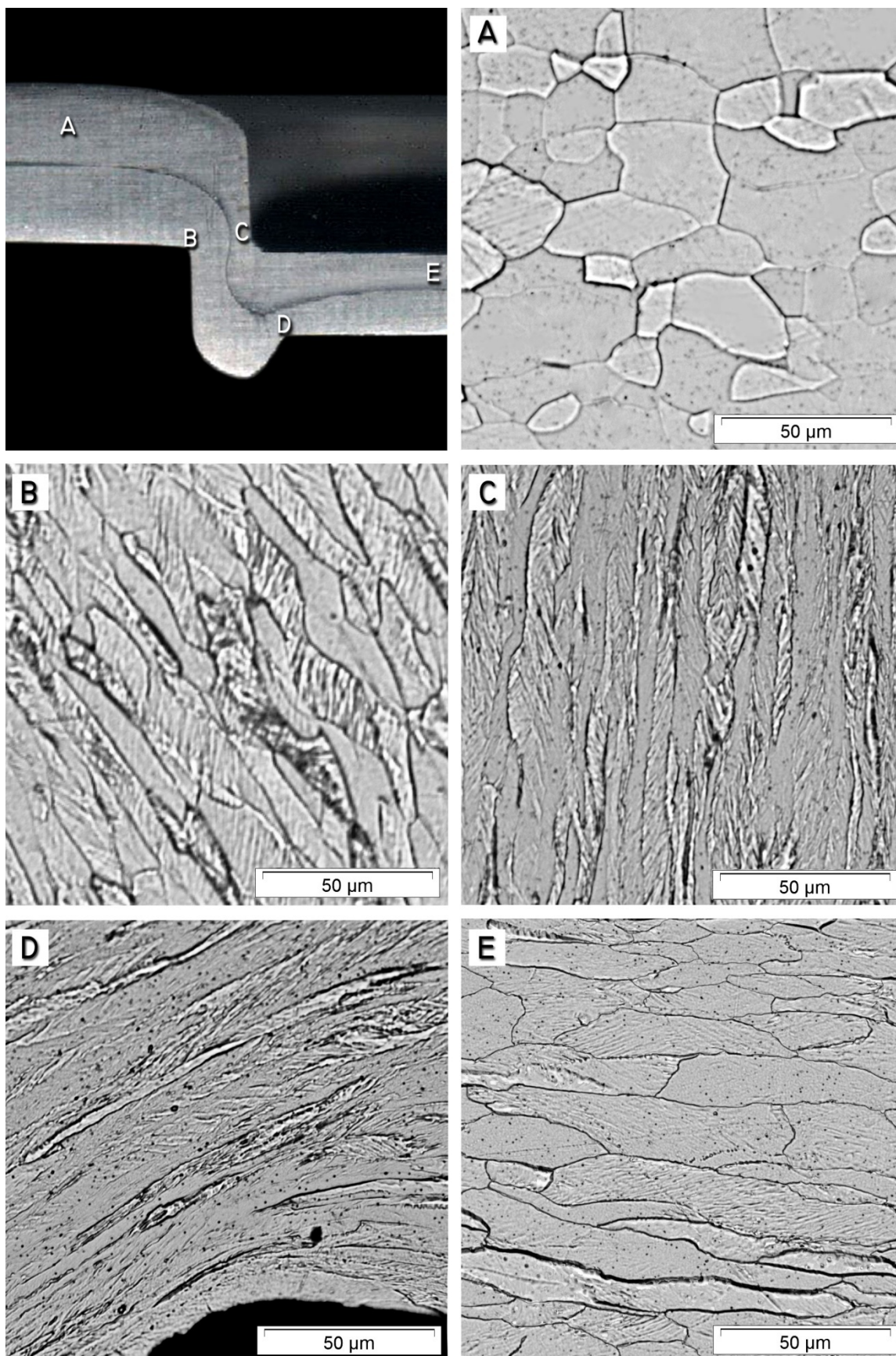
Na FIGURA 41 é visualizada a imagem da micrografia realizada no aço ARC05, após o preparo das amostras com embutimento, lixamento em granulometrias 220~1200, polimento e ataque da superfície com nital a 3%.

Ao se analisar as imagens nas FIGURAS 41 (A), (B), (C),(D) e (E), percebe-se que os resultados obtidos foram suficientemente satisfatórios para indicar que a morfologia do material foi equivalente à deformação nos pontos referenciados naquelas figuras, uma vez que conseguiu-se revelar a microestrutura da amostra do aço ARC05.

Na FIGURA 41 (A) observa-se a estrutura e o contorno dos grãos em uma região que não sofreu deformação plástica durante os ensaios.

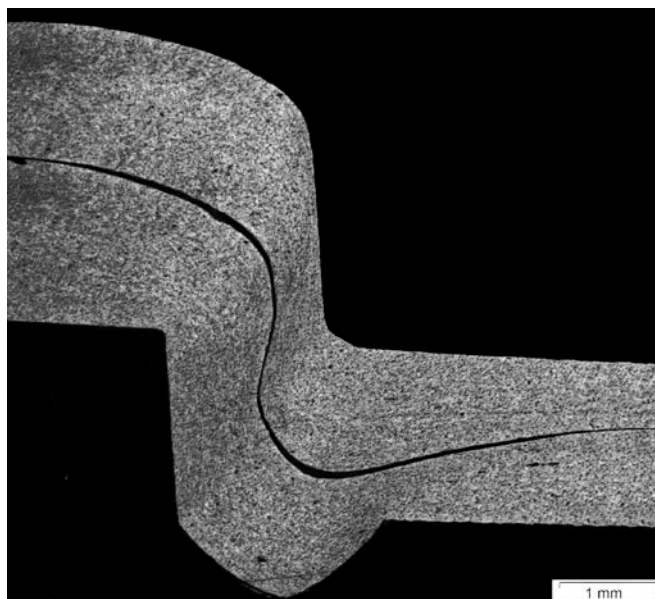
Na FIGURA 41 (B), (C) e (D) apresenta regiões que sofreram grandes deformações plástica com visível alongamento dos grãos seguindo o contorno da matriz.

Na FIGURA 41 (E) observa-se o estiramento dos grãos na região da espessura de fundo do puncionamento.

FIGURA 41 - Metalografia da seção da união por *clinch* com o aço ARC05.

Na FIGURA 42 é apresentada a imagem da macrografia com luz polarizada realizada no alumínio 5052F, após o preparo das amostras com embutimento, lixamento em granulometrias 220~1200, polimento e ataque da superfície com solução eletrolítica com H_3ClO_4 .

FIGURA 42 - Macrografia da região unida por deformação plástica com a liga de Alumínio 5052F.



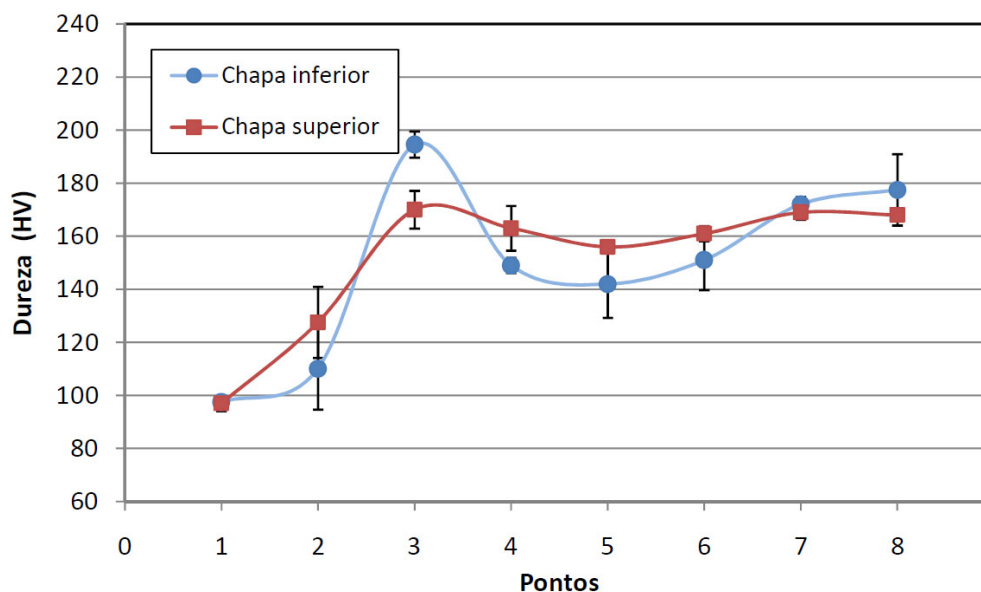
4.3.2 Ensaio de dureza

Conforme descrito na seção 3.4.4, foram feitas medições de microdureza em oito pontos na seção das chapas unidas. A localização dos pontos de dureza ensaiados pode ser vistos na FIGURA 26. Na FIGURA 43 são mostrados os valores das medições feitas nas amostras com o aço ARC05.

A dureza média na região sem deformação plástica de ambas as chapas (pontos 1), foi de 97,3 HV. Os valores dos pontos 3 e 4 aumentaram significativamente, chegando a atingir 194 HV no ponto 3 da chapa inferior (99% maior). O aumento na dureza desses pontos se deve ao elevado encruamento ocorrido na região de entrosamento das chapas. A FIGURA 41 revela a variação morfológica dos grãos do aço ARC05 e pode ser visto que na região de entrosamento os grãos foram extremamente alongados na vertical. Nos pontos 7 e 8 de ambas as chapas, também foi registrado um aumento na dureza, com média de 171 HV. Nessa região os grãos também sofreram um grande alongamento, porém

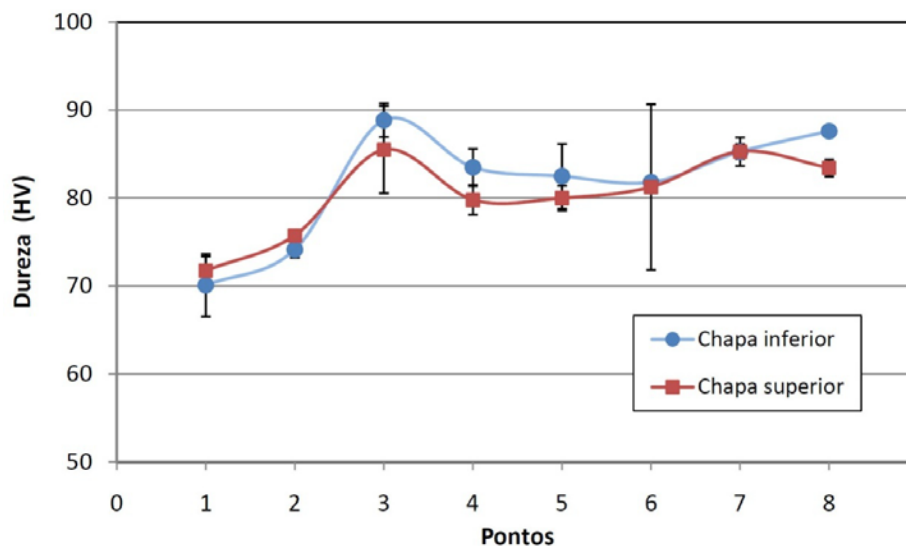
sendo este um alongamento horizontal promovido pelo estiramento das chapas entre o punção e o fundo da matriz.

FIGURA 43 - Perfil de dureza na região da junta com o aço ARC05



A FIGURA 44 apresenta o resultado das medições de dureza feitas na amostra na liga de alumínio 5052F nos pontos determinados conforme FIGURA 26. A dureza registrada na região não deformada foi de 71 HV. Assim como aconteceu nas amostras do aço ARC05 a dureza nos pontos 3 e 4 aumentou, porém, um aumento menos expressivo atingindo 89 HV (25% maior).

FIGURA 44 - Perfil de dureza na região da junta com a liga de AL 5052F



5 CONCLUSÃO

A escolha adequada da geometria da ferramenta e dos parâmetros de processo são fatores determinantes para aumentar a resistência de uma junta unida por *clinch*. Nos experimentos computacionais a variação na resistência ao arrancamento com o aço HSLA 420/490, entre as seis geometrias analisadas, chegou a 2000 N, e com o aço ARC05 a variação foi de 1100 N.

Foi observado que a geometria das matrizes com canal circunferencial mais estreito proporcionou uma maior resistência ao arrancamento da junta. O canal estreito direciona parte do fluxo do material para dentro do canal produzindo um maior entrosamento entre as chapas. A espessura de entrosamento está diretamente relacionada com a resistência da junta. Entre as seis geometrias estudadas a [a], [e] e [f], nessa ordem, produziram juntas com maior resistência ao arrancamento.

Além da influência da geometria, os parâmetros de processo influenciaram significativamente os resultados. Os ensaios utilizando o nível 1, ou seja, a menor folga entre punção e matriz, a menor profundidade de matriz e a menor espessura de fundo produziram os melhores resultados tanto para o aço ARC05 quanto para o Alumínio 5052F.

A utilização do método dos elementos finitos e o aplicativo comercial ABAQUS se mostraram eficientes para simular o processo de *clinch*, usando-se um modelo axissimétrico. As propriedades da ferramenta e do processo podem ser estabelecidas computacionalmente reduzindo os custos e o tempo com testes práticos. Nos experimentos computacionais versus práticos os seguintes resultados foram observados:

- O perfil da junta simulada computacionalmente ficou compatível com a obtida nos experimentos práticos;
- A força registrada durante o deslocamento do punção ficou muito próxima, tanto para a liga de alumínio quanto para o aço ARC05;
- A força máxima no arrancamento com o ARC05 apresentou resultados bastante próximos, com diferenças de 6% e 1,7% para as matrizes (a) e

(e), respectivamente. Com a liga de alumínio a diferença foi maior, 12% utilizando a matriz (a) e 15% utilizando a matriz (e).

A força exigida na união por *clinch* nos dois materiais ensaiados foi próxima até o deslocamento do punção de 2 mm. A partir dessa profundidade as chapas atingem o fundo da matriz e começam a escoar para o canal, com isso a força exigida aumenta proporcionalmente à resistência mecânica de cada material.

A análise metalográfica revelou que os materiais sofrem elevada deformação plástica durante o *clinch*, com alongamento dos grãos seguindo o contorno da matriz. Na região de entrosamento da junta, o grau de deformação é tão elevado que a microdureza registrada na amostra de aço ARC05 foi 99% maior do que na região não deformada plasticamente e 25% maior na amostra da liga de alumínio 5052F.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das ocorrências constatadas durante a realização da presente pesquisa, recomenda-se para os futuros trabalhos envolvendo estudos do *clinch*ing:

- Explorar a influência dos parâmetros na união de diferentes aços e espessuras.
- Explorar a influência dos parâmetros na união conjugada de diferentes materiais: aço versus alumínio; aço versus polímero; e alumínio versus polímero.

Além disso, para melhorias nas condições de pesquisa nesta Universidade, recomenda-se:

- Aquisição de equipamento específico para a realização do *clinch*ing.
- Aquisição de equipamento para corte a laser.
- Aquisição de equipamento para usinagem por eletroerosão.

REFERÊNCIAS

ABAQUS, Inc. **ABAQUS Theory Manual**, version 6.9, 2009.

ABE, Y.; MORI, K; KATO, T. **Joining of high strength steel and aluminium alloy sheets by mechanical *clinch*ing with dies for control of metal flow**. Journal of Materials Processing Technology, v. 212, p. 884–889, 2012.

ALVES DE SOUSA, R.J.; J.W. YOON, R.P.R. CARDOSO, R.A. FONTES VALENTE, AND J.J. GRACIO. **On the use of a reduced enhanced solid-shell (ress) element for sheet forming simulations**. Int. J. of Plasticity, v. 23(3), p. 490, 2007.

ALVES, J.L.; L.F. MENEZES. **Application of tri-linear and tri-quadratic 3-d solid elements in sheet metal forming process simulations**. In Ken ichiro Mori, editor, Proceedings of NUMIFORM. p. 639 – 644, Toyohashi, Japan, 2001.

ALVES, J.L.; OLIVEIRA, M.C.; MENEZES, L.F. **Springback evaluation with several phenomenological yield criteria**. In Proceedings of the 2nd International Materials Symposium. v. 455-456 of Materials Science Forum, p. 732-736, Caparica, Portugal, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6672/81: Materiais Metálicos –Determinação da Dureza Vickers (Método de Ensaio), 1981.

BATALHA, G. F. PMR 2202 **Introdução a Manufatura Mecânica – Processos de Fabricação: Junção, Soldagem e Brasagem**. EPUSP, São Paulo, P. 1-54, 2003. Disponível em <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/soldagem_brasagem.pdf> Acesso em: 11 out. 2014.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria I**. Campinas, SP : Editora da Unicamp, 2001.

CARON, F. A. S.; LAJARIN, S. F. . **Influência dos parâmetros de processo e ferramenta na união por *clinch*ing (*clinch*ing)**. In: Congresso Sul Brasileiro de Iniciação Científica e Pós Graduação, 2014, Curitiba. III CIC\$PG – PUC/PR, 2014.

DE PAULA, A.A.; M.T.P. AGUILAR; A.E.M. PERTENCE; P.R. CETLIN. **Finite element simulations of the clinch joining of metallic sheets**, Belo Horizonte, Brasil, 2006.

De Paula, A.A., Aguilar, M.T.P., Pertence, A.E.M., Cetlin. P.R. **Finite element simulations of the clinch joining of metallic sheets**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, pp. 352–357, 2007.

GIPIELA, Manolo Lutero. **Estudo da expansão de furos e estampabilidade de chapas de aço multifásico CPW800**. Tese de doutorado (PGMec). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil, 2012.

GODOY A. R.; OLIVEIRA F. G. G.; LIMA, W. F. **Generalidades sobre asas de aviões monomotores e seus componentes**. Monografia de graduação. Faculdade de Ciências Aeronáicas da Universidade Tuiti do Paraná. Curitiba, Brasil, 2008.

HE Xiacong, Ian Pearson, Ken Young. **Self-pierce riveting for sheet materials: State of the art**. Journal of materials processing technology (2008). p. 27-36

LAJARIN, S. F. **Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência**, Tese de Doutorado (PGMEC). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil, 2012.

LAMBIASE, F., DI ILIO, A. **Optimization of the *clinch*ing tools by means of integrated FE modeling and artificial intelligence techniques**. Procedia CIRP 12 p. 163 – 168, 2013

LEE, Chan-Joee; KIM, Jae-Young; LEE, Sang-Kon; KO, Dae-Cheol; KIM, Byung-Min. **Parametric study on mechanical *clinch*ing process for joining aluminum alloy and high-strength steel sheets**. Journal of Mechanical Science and Technology. v. 24. p. 123-126. 2010

LORENTZ, R., GILAPA, G. M. **Avaliação da Conformabilidade de Chapas de Aço Plano**. I Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, pp. 141-150, 1998

Manual Eckold GmbH, 2009

MARQUES, P. V., P. J. MODENESI, A. Q. BRACARENSE. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**, 3ª Ed., Belo Horizonte, Brasil, Editora UFMG, 2009.

METALS HANDBOOK. **Metallography, Structures and Phase Diagrams**. 8th Ed.. pg. 120-124.

MORI, K., ABE, Y., KATO, T. **Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminium alloy sheets joined by mechanical clinching and self-pierce riveting**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, pp. 1900–1905. 2012.

MORI, Ken-ichiro, BAY, Niels, FRATINI, Livan, MICARI, Fabrizio, TEKKAYA, A. Erman. **Joining by plastic deformation**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v..62, p. 673–694, 2013

MUCHA, J. **The analysis of lock forming mechanism in the *clinch*ing joint**, Rzeszów, Polônia, 2011.

MUCHA, J., WITKOWSKI W. **The clinching joints strength analysis in the aspects of changes in the forming technology and load conditions**. Thin-Walled Structures, Vol. 82, pp. 55–66, 2014

OUDJENE, M.; BEN-AYED, L. **On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method**. Engineering Structures 30 (2008). p. 1782–1788

PAREDES, R. S. C. **Introdução à Soldagem**. Material didático da disciplina EME733. PGMEC. Curitiba, 2013.

PORTER, M. E. **Estratégia Competitiva**. Ed. Campus. Rio de Janeiro, 1991

RIETMAN, B., M. G. DOIG, J. WEIHER. **Predicting the quality of clinch joints using FEM**, Liège, Bélgica, 2001.

SARMENTO, A. A. **União de chapas de aço por conformação a frio: análise da resistência mecânica sob carga multiaxial**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2012.

SCHEID, A; XAVIER, C. F. R.; SCHULZE, G.; LEMOS, L.; SCHLACHTER, M.; CONI, N. H. S. **Puncionamento TOX: uma solução para a união de chapas pré-pintadas**. Congresso Corte & Conformação. São Paulo, 2009.

TOX, 2003. Catálogo técnico de produtos. <<http://www.tox-br.com/pt/pagina-inicial.html>> Acessado em 31 de março de 2016.

VARIS, J.P., LEPISTO, J. **A simple testing-based procedure and simulation of the *clinching* process using finite element analysis for establishing *clinching* parameters**, Lappeenranta, Finlândia, 2003.

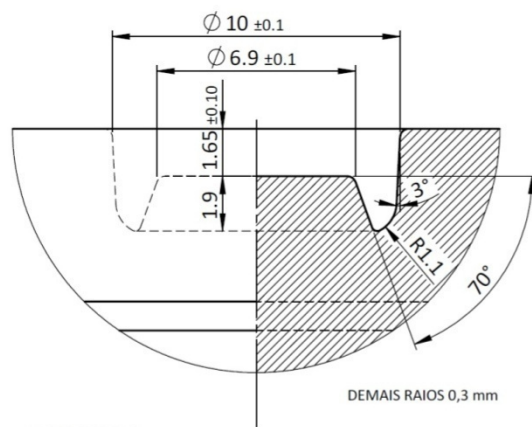
VARIS, J. P. **Economics of clinched joint compared to riveted joint and example of applying calculations to a volume product**. Journal of Materials Processing Technology, v. 172, p. 130-138, 2005.

SARMENTO, A. A.; SARMENTO, C. A.; BATALHA, G. F. **Aplicação do processo de união de chapas metálicas por conformação mecânica (*clinching*) em veículos automotivos**. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Caxias do Sul-RS. 2011.

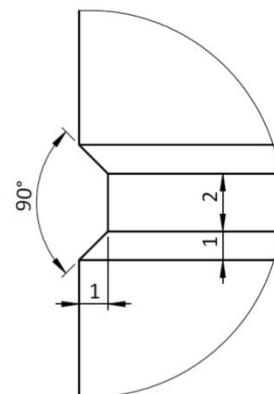
WANG, Chan Chin; KAM, Heng Keong; CHEONG, Wen Chiet. **Effect of tool eccentricity on the joint strength in mechanical *clinching* process**. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, p. 19-24, , Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, October 2014.

WEINER, Emílio. **Soldagem: Processo e Metalurgia**. MESSLER, R. Principles of Welding: Processes, Physics, chemistry and Metallurgy. 2002.

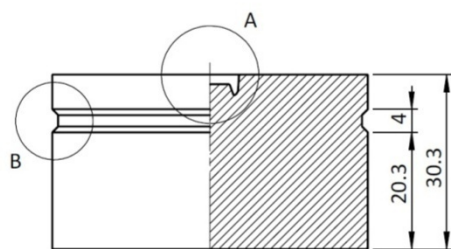
APÊNDICE 1



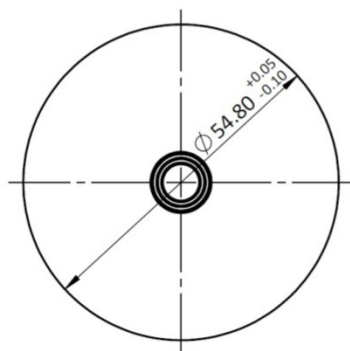
DETALHE A
Esc. 5:1



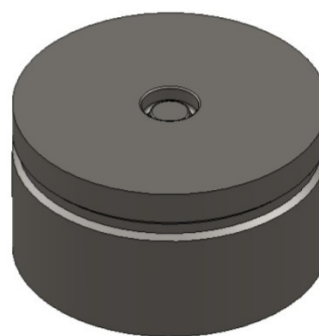
DETALHE B
Esc. 5:1



FRONTAL EM MEIO CORTE



SUPERIOR

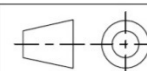


TÍTULO:

Matriz de clinching "a"

PROJETISTA: Fernando

MATERIAL:

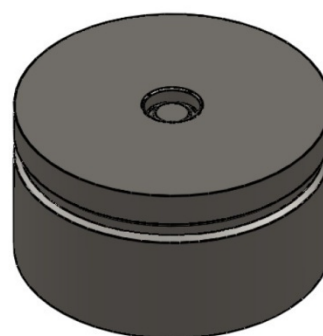
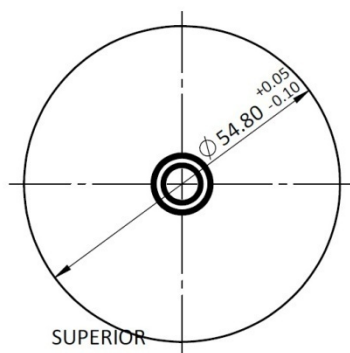
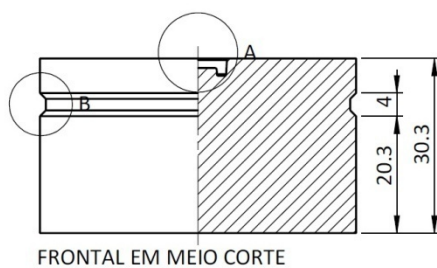
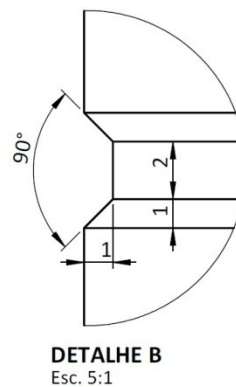
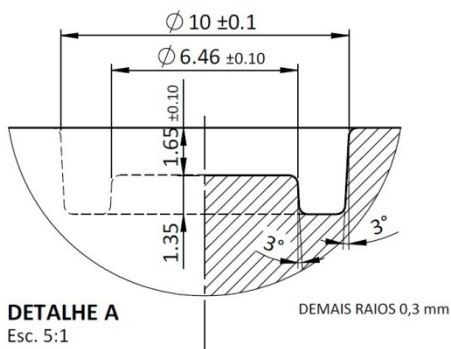


ESCALA:

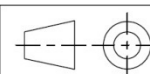
1:1

UNIDADE: mm

DATA: 19/04/2015



TÍTULO:

Matriz de clinching "e"

ESCALA:

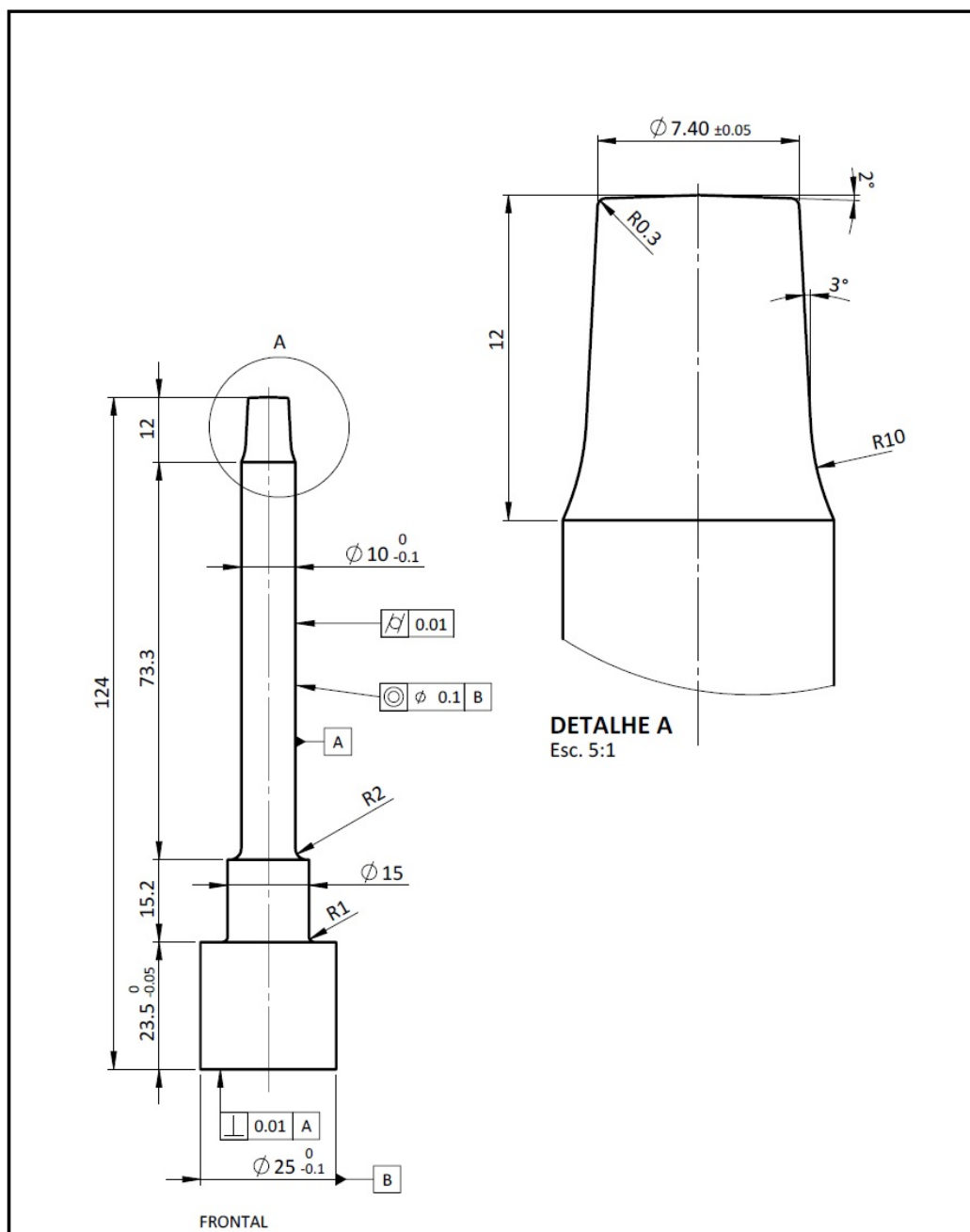
1:1

PROJETISTA: Fernando



UNIDADE: mm

MATERIAL:

DATA: 19/04/2015



* Temperar e revenir

 <p>UFPR</p>	TÍTULO: PUNÇÃO		ESCALA: 1:1
	PROJETISTA: Fernando	UNIDADE: mm	
	MATERIAL: AÇO VC131	DATA: 19/04/2015	