



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**O *CLINCHING* E A SOLDA A PONTO EM AÇO AVANÇADO BIFÁSICO DE 1,3
GPa DE RESISTÊNCIA MECÂNICA**

VANDERLEI MARTINS BASTOS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais.

Orientador:

Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi

São Paulo

2022

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

O *CLINCHING* E A SOLDA A PONTO EM AÇO AVANÇADO
BIFÁSICO DE 1,3 GPa DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

VANDERLEI MARTINS BASTOS

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

BASTOS, V. M. *O clinching e a solda a ponto em aço avançado bifásico de 1,3 GPa de resistência mecânica*. 2022, 66p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, Universidade de São Paulo - USP - São Paulo.

Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa).

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Bastos, Vanderlei Martins

O *CLINCHING* E A SOLDA A PONTO EM AÇO AVANÇADO BIFÁSICO DE 1,3 GPA DE RESISTÊNCIA MECÂNICA / Vanderlei Martins Bastos; orientador Jesualdo Luiz Rossi. - São Paulo, 2022.
66 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2022.

1. clinching. 2. solda a ponto por resistência elétrica. 3. aço bifásico (dual phase) 1,3 GPa. I. Rossi, Jesualdo Luiz. orientador. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Vanderlei Martins Bastos

Título: O *clinch* e a solda a ponto em aço avançado bifásico de 1,3 GPa de resistência mecânica

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear - Materiais da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: 06 / 09 / 2022

Banca Examinadora

Prof. Dr.: Gilmar Ferreira Batalha

Instituição: EP – USP

Julgamento: _____

Prof. Dr.: Jesualdo Luiz Rossi (Presidente)

Instituição: IPEN – IPEN

Julgamento: _____

Prof. Dr.: Marco Antônio Colosio

Instituição: GMB - Externo

Julgamento: _____

Prof. Dr.: Cristiano Stefano Musci (Suplente)

Instituição: IPEN - IPEN

Julgamento: _____

Prof. Dr.: Edilson Rosa Barbosa de Jesus (Suplente)

Instituição: Instituto Federal Bragança Paulista

Julgamento: _____

DEDICATÓRIA

Dedico esta contribuição à minha esposa preferida Marta, por sua postura leve e incentivadora, também aos filhos Áquila, Emilly e Nicolás que entendendo o período abriram mão de diversos feriados e passeios para que eu pudesse levá-la a cabo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida sem boleto concernente a cota diária de oxigênio e repleta da evidência de Seu Amor.

Acredito que não seria capaz de citar todos que contribuíram separadamente, no entanto, gostaria de registrar minha gratidão:

Ao meu orientador Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi, pela tolerância a cada sugestão, por seu tempo e experiência científica em favor deste resultado.

Aos meus interlocutores que desde o início deste projeto incentivaram, ofereceram conselhos, repartiram recursos e tempo na:

AR Instrumentos Cirúrgicos, Dr. Robson Cruz;

Brassinter, Fernando Araújo;

Eckold DE, Florian Unger;

Estamparia Uliana, Alexandre Silva, Cícero Silva, José Honório, Leandro Silva, Luiz Sbragia;

Fundação Santo André, Daniela Santos e Prof. José A. Castillo Lara, Dr. Marco A. Colósio;

Instituto Mauá de Tecnologia, Prof. Alisson Sarmiento, Kenner Mendes, Matheus Oliveira;

Provisão Projetos, Osvaldo Muniz;

SSAB, Bruno Pastre e Tony Nilsson;

TOX BR, Beatriz Knopik, Célio Liermann, Luciana Lein e Renan Dalmazos;

TOX DE, Andreas Bartoch, Klimens Uebele, Manfred Kaplan, Marcus Matzke and Susanne Ritter;

Verder Scientific, Jonas Nascimento;

e

Aos professores do IPEN que evidenciam um apreço em compartilhar o conhecimento que lhes é caro por ter preço de vida em especial à Dra. Luzinete Pereira Barbosa;

Aos colegas alunos do IPEN que se mostraram interessados, em especial ao doutorando Luis Augusto Mendes dos Reis;

Quem pode discernir os próprios erros?

Davi, de Judá

Salmo davídico, capítulo 19 verso 12a

1000 BC

RESUMO

BASTOS, V. M. *O clinching e a solda a ponto em aço avançado bifásico de 1,3 GPa de resistência mecânica*. 2022 66p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

No campo de materiais para o setor automotivo, o uso do aço avançado de primeira geração bifásico de 1,3 GPa de resistência mecânica, cuja microestrutura ferrita/martensita confere ultra-alta resistência à tração, pode ser soldado a ponto por resistência elétrica ou unido à frio por conformação plástica e ancoramento (*clinching*). Algo benéfico é que isto pode ser executado com equipamentos já existentes coadunando para a construção leve. A aplicação do aço avançado de primeira geração bifásico 1,3 GPa de até 1,50 mm de espessura se mostra atrativa para substituir componentes obtidos por estampagem a quente no setor automotivo como barras de proteção lateral, reforços no assoalho e outros componentes relevantes no sistema de gerenciamento da segurança ativa. O presente trabalho visou correlacionar aspectos das uniões por *clinching* e por solda a ponto por resistência elétrica, quanto à resistência à tração para cisalhamento e para destacamento de corpos de prova preparados em corte por laser. As alterações na região de ancoramento do *clinching* e da zona afetada pelo calor na solda a ponto foram avaliadas em termos microestruturais e de microdureza. As cargas observadas durante os ensaios de destacamento do *clinching* com ruptura completa da região de estrição ou zona de estrição se mostraram mais elevadas do que quando ocorreu o desenbricamento da união mecânica. Quanto à solda ponto, apesar das variações adicionadas pelo processo térmico como queda da microdureza e da ruptura na região subcrítica no ensaio de resistência ao destacamento, ainda assim a resistência mecânica à ruptura foi 62% superior ao *clinching* na média. Os resultados permitiram concluir que, nas condições experimentais do presente trabalho, o *clinching* é exequível para materiais de ultra-alta resistência e permitiu uma correlação de 3 *clinchings* para cada 2 pontos de solda para ensaio quase estático.

Palavras-chaves: *clinching*, solda a ponto por resistência elétrica, aço bifásico, *RSW*, *UHSS*, *AHSS*

ABSTRACT

BASTOS, V. M. *Clinching and spot welding in 1.3 GPa advanced dual phase steel*. 2022, 66p. Dissertation (Master in Nuclear Technology - Materials), Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

In the material's field for the automotive sector, the usage of advanced first-generation dual-phase steel of 1.3 GPa of mechanical strength, whose ferrite/martensite microstructure gives ultra-high tensile strength, can be spot welded by electrical resistance or cold joined by plastic forming and interlock (*clinching*). A beneficial aspect is that it can be done with existing equipment, matching for lightweighting. The application of advanced first-generation dual-phase 1.3 GPa steel up to 1.50 mm thick proves to be attractive to replace components obtained by press hardened steel (PHS). The production cost of side protection bars, floor reinforcements and other relevant components in the crash management system is reduced. The present work aimed to correlate aspects of *clinching* and electrical resistance spot welding, as to the tensile strength for shear and pull of specimens obtained by laser cutting. Changes in the *clinching* interlock region as well as in the heat-affected zone in the spot weld were evaluated in microstructural and microhardness terms. The loads observed during the *clinching* pull tests with complete rupture of the necking region were higher than when the mechanical union disengagement. As for spot welding, despite the variations added by the thermal process such as drop in microhardness and breakage in the subcritical region in the pull strength test, the mechanical break strength was 62% higher than *clinching* on average. The results allowed us to conclude that, under the present work's experimental conditions, *clinching* is feasible for ultra-high strength materials and allowed a correlation of 3 *clinchings* for every 2 weld spots for quasi-static trial.

Keywords: *clinching*, resistance spot weld, dual-phase steel, AHSS, UHSS

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Sistema de manufatura DIN 8580.	2
Figura 2 - Quadros da simulação da solda a ponto por resistência elétrica.....	6
Figura 3 - Ruptura por cinzel entre as chapas para confirmar a união por fusão na região do entorno do botão de solda (a); Imagem obtida por ultrassom para confirmar a regularidade da região fundida e diâmetro do botão de solda sem destruição do conjunto (b).....	7
Figura 4 - Eletrodo F16 5,5 mm (a); Desenho utilizado para adequar a área de contato do eletrodo a 7 mm (b); Imagem do resultado para o eletrodo customizado (c).	8
Figura 5 - Esquema da seção do botão da solda a ponto por resistência elétrica: zona de fusão (ZF); zona afetada pelo calor (ZAC); material inalterado de base (MB); linha do regime A_{C1} ; indentação pela força de sujeição.....	9
Figura 6 - Esquema das potenciais falhas da solda a ponto por resistência elétrica.	10
Figura 7 - <i>Clinching</i> em quatro chapas de aço de 0,40 mm de espessura. Imagem da seção transversal de amostra obtida no laboratório da TOX.....	11
Figura 8. Possível ciclo para se obter o <i>clinchings</i>	13
Figura 9 - Sequência do <i>clinchings</i> em 8 etapas e as interações entre prensa chapas, punção, chapas e matriz rígida.	13
Figura 10 - Esquema de espessuras das chapas (a); diâmetros de <i>clinchings</i> (b).....	14
Figura 11 - Seções de <i>clinchings</i> que mostram variações nas características de punção e matriz em chapas de aço de diferentes espessuras, 1,20 mm e 0,65 mm (a); chapas de cobre 5 mm e 7 mm de espessura (b); chapas de aço inoxidável 0,80 mm de espessura (c); chapas de latão 1,5 mm e 0,80 mm (d).....	15
Figura 12 - Características geométricas de uma união por <i>clinchings</i> baseadas na norma DVS 3420.....	16
Figura 13 - Modos de falhas típicos do <i>clinchings</i>	16
Figura 14 - Variedade de perfis de punções e matrizes para <i>clinchings</i>	17

Figura 15 - Não recomendado para aplicações que requerem estanqueidade ou exposição às intempéries (a); sem cisalhamento das chapas e aplicável em conjuntos que requerem estanqueidade ou exposição à intempéries (b e c).	18
Figura 16 - Sistema de designação de punções e matrizes para <i>clinch</i> sem cisalhamento.	19
Figura 17 - Espessímetros à esquerda digitais e à direita analógicos podem ter extensão de acessos de 35 mm a 200 mm até o centro do <i>clinch</i>	20
Figura 18 - Variantes de células de carga (a); recorte da tela de IHM mostrando a linha e as janelas de medição (b); transdutor linear de curso (c); transdutor de posição (d).	21
Figura 19 - Conjunto formado por servo prensa, controlador e IHM (a); definição dos parâmetros como janelas, curvas ou a combinação dos dois de acordo com o processo de prensagem (b); exemplos de prensas elétricas com controle de força e posição (c).	21
Figura 20 - Diagrama esquemático de curvas de resfriamento indicando os métodos utilizados para obter uma microestrutura ferrita-martensita ou bifásico.	22
Figura 21 - Imagem típica da microestrutura de aço bifásico de primeira geração composto de ilhas de martensita em uma matriz de ferrita após ataque com Nital.	23
Figura 22 - Parte dos corpos-de-prova - CPs para ensaio de resistência à tração o aço bifásico 1300M em processo de corte por laser (a); parte dos CPs (b); CPs com sessão reduzida r_{45} (b ₁); r_{90} (b ₂); r_0 (b ₃); CPs para cisalhamento e destacamento r_{45} (b ₄); r_{90} (b ₅); r_0 (b ₆).	27
Figura 23 - Parte das amostras para <i>DoE</i> r_0 (a); parte dos CPs para ensaio de resistência à tração r_{90} ; (b); oleando o CP antes do <i>clinch</i> (c); conjunto unido por <i>clinch</i> posicionado para ensaio de resistência à tração por cisalhamento (d); conjunto unido por solda a ponto por resistência elétrica (e).	28
Figura 24 - Equipamento TOX CEU 015 com monitoramento de curso e forças aplicadas na prensagem e no prensa-chapas.	29
Figura 25 - Conjuntos para ajuste (a); macrografia da seção do <i>clinch</i> (b); os conjuntos para cisalhamento e destacamento antes e depois de dobrados (c); r_{45} (c ₁); r_0 (c ₂); r_{90} (c ₃).	30
Figura 26 - Obtenção dos corpos de prova para ajuste e ensaios de resistência à tração.	33

Figura 27 - Gráfico do ensaio de resistência à tração (a); corpos-de-prova cortados por laser de acordo com a norma ASTM E517-2019 e rompidas nos ensaios (b).	34
Figura 28 - Imagem da microestrutura de chapa do aço DP1300M, obtida por microscopia óptica de onde pode-se inferir estrutura completamente martensítica. Ataque Nital 2%.....	35
Figura 29 - Série de sete pontos de dureza Knoop _{0,5}	36
Figura 30 - Série de sete pontos de dureza Vickers _{0,5}	37
Figura 31 - Série de três pontos para dureza Vickers _{0,5} da seção reduzida dos corpos-de-prova (r ₀ , r ₄₅ e r ₉₀) e as disposições no CP, micrografias e gráfico.	37
Figura 32 - Em sentido horário a partir do centro: equipamento TOX CEU 015 140 kN; Sistema de monitoramento de força e posição; prensa-chapas, ponta do punção e conjunto montado em aço DP 1300M (25x50x3,00 mm) ainda não removido da cavidade da matriz.....	39
Figura 33 - Desenho referência para programar o equipamento de corte laser e obter os corpos-de-prova.	40
Figura 34 - Conjuntos montados para ensaio de resistência à tração por cisalhamento e destacamento <i>clinch</i>	41
Figura 35 - <i>DoE</i> para a escolha do conjunto de punção e matriz (a); seção do <i>clinch</i> resultante dos parâmetros escolhidos (b); o conjunto de punção e matriz preconizados c ₁ e c ₂	42
Figura 36 - Seção dimensionada do TOX <i>clinch</i> do aço DP 1300M - duas chapas de 1,5 mm de espessura usando punção A541005 e matriz BD 8016.....	43
Figura 37 - Esquema com macrografia / micrografia do <i>clinch</i> de chapas do DP 1300M (a); os detalhes da formação da região de estrição após ataque com Nital 2% (b - c); os artefatos causando a região azulada como resultado do agente de ataque químico que aflorou do embutimento.	43
Figura 38 - Microscopia eletrônica de varredura da região de cisalhamento indicando fratura dúctil.	44
Figura 39 - Gráfico de cisalhamento dos três conjuntos montados por <i>clinch</i> e sentido da laminação r ₀	45
Figura 40 - Gráfico de cisalhamento dos três conjuntos montados por <i>clinch</i> e sentido da laminação r ₄₅	45
Figura 41 - Gráfico de cisalhamento dos três conjuntos montados por <i>clinch</i> e sentido da laminação r ₉₀	45

Figura 42 - Gráfico de destacamento dos três conjuntos montados por <i>clinch</i> e sentido da laminação r_0	45
Figura 43 - Gráfico de cisalhamento dos três conjuntos montados por <i>clinch</i> e sentido da laminação r_{45}	46
Figura 44 - Gráfico de cisalhamento dos três conjuntos montados por <i>clinch</i> e sentido da laminação r_{90}	46
Figura 45 - Gráfico delimitando os parâmetros para a corrente (I) correlacionando ao modo de falha.	47
Figura 46 - Gráfico dos resultados para a determinação da vida útil do eletrodo.	48
Figura 47 - As curvas para as cargas de destacamento quando (I_{min}).	49
Figura 48 - As curvas para as cargas de destacamento quando (I_{max}).	50
Figura 49 - Equipamento para os ensaios de resistência à tração 30 kN.....	51
Figura 50 - Imagens dos corpos-de-prova para destacamento de <i>clinch</i> (a); dois tipos de falha um sendo o deslizamento e o destacamento, que é quando ocorre a ruptura (b); o inserto mostra uma imagem de elétrons secundários obtidas no MEV do detalhe na região da fratura na região de estrição do <i>clinch</i> (c).	51
Figura 51 - Correlação entre os pontos medidos na amostra e os valores com o esquema da distribuição de dureza.	53
Figura 52 - Pontos de aquisição da microdureza emulando a linha de ancoramento lado punção e lado matriz.....	53
Figura 53 - Linha de pontos lado punção (cor verde), lado matriz (cor azul), mapa com 400 pontos na região da linha de ancoramento (cor verde escuro) e os pontos de medição no conjunto soldado a ponto por resistência (cor lilás).	54
Figura 54 - Macrografia da seção dos conjuntos <i>clinch</i> no embutimento e solda a ponto por resistência elétrica.	55
Figura 55 - Macrografia da seção do <i>clinch</i> do aço DP 1300M mostrando as distintas formações microestruturais geradas pelo processo mecânico do material de base MB e da região de estiramento de grãos EG.	56
Figura 56 - Macrografia da seção do botão de solda a ponto por resistência elétrica do aço DP 1300M.....	57

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Composição química nominal, (% em massa máximo) do aço Docol DP 1300M (1,5 mm de espessura).	24
Tabela 2 - Corpos de prova obtidos por meio de corte à laser.	27
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos corpos-de-prova CPs ensaiados em máquina de ensaio de tração universal, sendo utilizado um CP por sentido da laminação em linha com boletim técnico do fabricante.	34
Tabela 4 - Resultados das sequências de sete pontos de medição da dureza Vickers e Knoop na superfície da amostra do aço DP 1300M.	38
Tabela 5 - Resultados das sequências de três pontos de medição de dureza Vickers _{0,5} na superfície transversal da seção reduzida das amostras dos corpos-de-prova com seção reduzida do aço do DP 1300M.	38
Tabela 6 - Sumário dos resultados obtidos após a execução dos corpos-de-prova de ajuste, obtidos em d_f e esforço encontrado para os 18 conjuntos montados sendo três para cada sentido da laminação nos ensaios de resistência ao cisalhamento e ao destacamento em kN.	44
Tabela 7 - Faixa de corrente escolhida com ênfase no modo falha FA cuja extensão varia entre 6,0 kA e 7,9 kA.	48
Tabela 8 - Mínima corrente (I_{min}) para falha por arrancamento.	49
Tabela 9 - Máxima corrente (I_{max}) para falha por arrancamento.	50

LISTA DE ABREVIACOES, SÍMBOLOS E NOTACOES

Acrnimos	Descrição	Unidade (quando aplicável)
a	Ancoramento	[mm]
A	Austenita	
A_{C1}	Temperatura de transformação eutetóide $\gamma + \alpha + Fe_3C$ (aquecendo)	
A_{C3}	Temperatura de transformação austenítica $\gamma + \alpha$ (aquecendo)	
AE	rea de encruamento	
AHSS	<i>Advanced high strength steel</i> (Aços avançados de alta resistência)	
ap	Calor aportado na solda a ponto por resistência elétrica	[J]
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>	
BiW	<i>Body-in-white</i> (Carroçarias)	
<i>Clinching</i>	União  frio por conformação plástica e ancoramento	
CP(s)	Corpo(s)-de-prova	
d	Diâmetro do botão de solda	[mm]
d_f	Dimensão final	[mm]
d_i	Diâmetro interno	[mm]
d_m	Dimensão da matriz	[mm]
DoE	<i>Design of experiments</i> (Empirismo)	
d_p	Dimensão final	[mm]
DP	<i>Dual phase</i> , bifásico	
Docol DP 1300M	<i>Ultra-high strength steel dual-phase 3rd gen</i> Aço bifásico de terceira geração e ultra-alta resistência	
DVS	<i>Deutscher Verband fr Schweien</i>	
Dz	Falha por deslizamento do <i>clinching</i>	
e	Espessura da chapa	[mm]
EFB	<i>Europische Forschungsgesellschaft fr Blechverarbeitung</i>	
EG	Estiramento de gros	
e_m	Espessura lado matriz	[mm]

ϵ_p	Espessura lado punção	[mm]
ϵ_t	Espessura total	[mm]
F	Ferrita	
FA	Falha de arrancamento	
FI	Falha interfacial	
FIP	Falha interfacial parcial	
GPa	Giga pascal	[Pascal.10 ⁹]
HK	<i>Knoop hardness</i> (Dureza Knoop)	[N/m ²]
HV	<i>Vickers hardness</i> (Dureza Vickers)	[N/m ²]
HSS	<i>High strength steel</i> (Aço de alta resistência)	
I	Intensidade da corrente de solda	[A]
ICE	<i>Internal combustion engines</i>	
IHM	Interface homem-máquina	
JIS	<i>Japanese Industrial Standard</i>	
kA	Quilo ampere	[A.10 ³]
	(mede o fluxo de elétrons ou corrente num condutor elétrico)	
kN	Quilo newton	[N.10 ³]
	(unidade de força para acelerar 1000 quilos a um m/s ²)	
kVA	Quilo volt-ampere	[VA.10 ³]
MB	Material de base	
MEV	Microscopia eletrônica de varredura	
MF	Região de baixa dureza	
MGG	Martensita em grãos grandes	
MO	Microscopia óptica	
MPa	Mega pascal	[Pascal.10 ⁶]
MT	Martensita	
MT _h	Martensita de alta dureza	
°C	Graus celsius	
	<i>Press-hardened steel</i>	
PHS	(Aços estampados a quente)	
p _m	Profundidade da matriz	[mm]
p _p	Profundidade da penetração	[mm]

R	Resistência elétrica	[Ω]
r_0	Fator de anisotropia longitudinal em relação ao sentido da laminação	
r_{45}	Fator de anisotropia 45° em relação ao sentido da laminação	
r_{90}	Fator de anisotropia transversal em relação ao sentido da laminação	
r_m	Média ponderada de deformação plástica para ruptura	[kN]
Rp	Falha por ruptura da região de estrição do <i>clinch</i>	
RSW	<i>Resistance spot weld</i> (Solda a ponto por resistência elétrica)	
s	Tempo em segundos	
Suc-C	<i>Sub critical softening zone</i> (Região de redução da dureza)	
t	Tempo de aplicação da corrente	[ciclos]
UHSS	<i>Ultra-high strength steel</i> (Aços de ultra alta resistência)	
V_m	Volume de martensita	[%]
ZAC	Zona afetada pelo calor	
ZF	Zona de fusão	
α	Ferrita	
γ	Austenita	

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO GERAL	4
2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Solda a ponto por resistência elétrica.	5
3.2 O processo <i>clinchng</i>	11
3.2.1 Tipos de materiais	17
3.2.2 Monitoramento da qualidade	19
3.2.2.1 Manual	19
3.2.2.2 Monitoramento do processo ou controle automatizado do processo	20
3.3 Os aços de ultra-alta resistência bifásicos	22
3.4 Prática na indústria	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 Preparação de corpos-de-prova	26
4.2 Execução do processo <i>clinchng</i>	28
4.3 Da solda a ponto por resistência elétrica do aço bifásico 1,3 GPa com 1,5 mm de espessura.	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 O aço bifásico Docol DP 1300M	32
5.2 Os conjuntos unidos por <i>clinchng</i>	39
5.3 Os conjuntos unidos por solda a ponto por resistência elétrica.	46
5.4 Ensaios de resistência à tração para cisalhamento e destacamento	51

5.5 Ensaio de microdureza.....	52
5.6 Observação metalográfica da microestrutura	55
6 CONCLUSÃO	58
7 TRABALHOS FUTUROS.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
APÊNDICES.....	I

1 INTRODUÇÃO

A transformação tecnológica das linhas de manufatura para oferecer adaptabilidade às novas exigências governamentais e mercadológicas é bem notada na indústria automotiva, na indústria de linha branca, e.g., refrigeradores, máquinas de lavar e fogões. Na construção leve, a redução na quantidade de matérias-primas é uma realidade. No setor automotivo, o objetivo é a produção de carroçarias de veículos seguindo o conceito de construção leve e ao mesmo tempo adequadamente rígidas e resistentes a colisões. Além disto, às premissas de redução na pegada de carbono, do consumo de combustível e consequentemente dos volumes de emissão de gases dos veículos é imperativa.

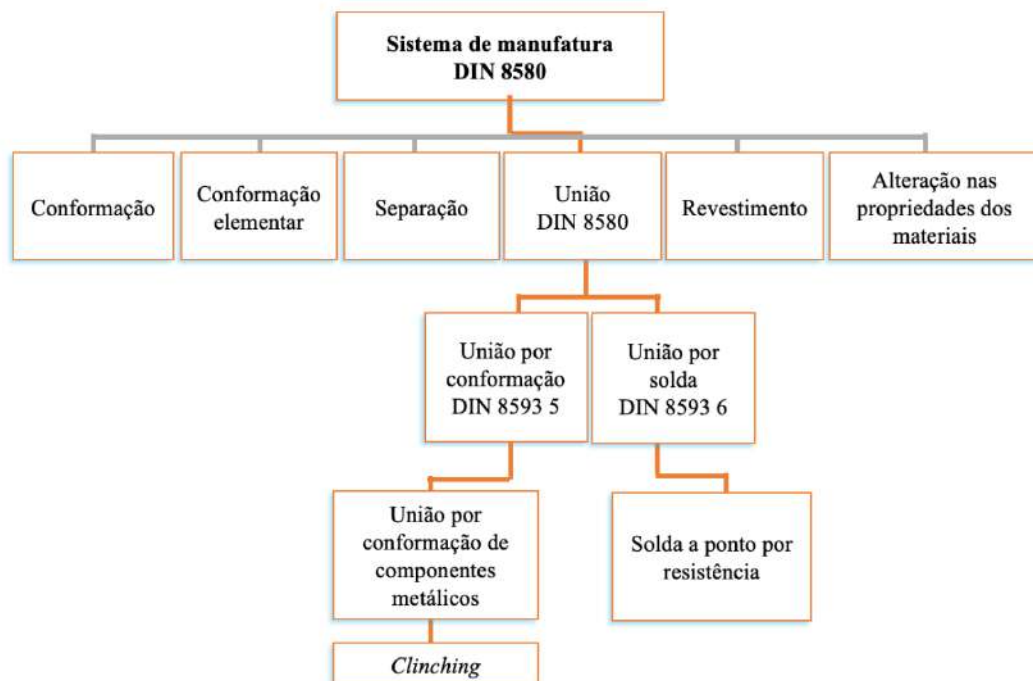
A introdução de normas técnicas restritivas no que tange a emissão de gases do efeito estufa e em especial o CO₂ promove desdobramentos na indústria automotiva para reduzir a massa total dos veículos, acelerar a adoção da eletrificação e consequente definição de prazos para a substituição de veículos equipados com motores de combustão interna (*ICE* do inglês *internal combustion engines*) colocando em curso um abrangente movimento para lançar veículos mais leves, eficientes, limpos e elétricos (Automotive in 2022 - A report by EIU, 2022). O pacote *Fit for 55* da Comissão Europeia é um conjunto de novas medidas e ajustes para rever e atualizar a legislação existente com o objetivo de eliminar progressivamente os veículos *ICE* ou a redução de ao menos 55% das emissões até 2030 com base em 1990 e neutralidade em 2050 (FIT FOR 55, 2022). Os novos materiais e sua união são um processo essencial para aprimoramento das condições de vida do ser humano e tem sido aplicada em componentes cirúrgicos ou em veículos automotivos, isto para citar alguns.

Um processo, dos mais antigos e amplamente utilizado para construir conjuntos em chapas de aço na indústria, a solda a ponto por resistência elétrica (*RSW* do inglês *resistance spot weld*), foi inventada por acidente por Elihu Thompson em 1885 ao fundir cabos de cobre durante um experimento (ELIHU THOMPSON PAPERS, 1944) e é empregada aos milhares em carroçarias de veículos de passeio e comerciais por ser facilmente automatizada (AWS INTERNATIONAL, 1997; ZHANG et al., 2015; ZIRNGIBL et al., 2020). A norma DIN 8580:2003 classifica a solda a ponto no subgrupo 8593-6 e para clareza, foi adicionado a Figura 1. Por conta do efeito joule, a corrente

elétrica excede a resistência do material (CAHN e HAASEN, 1996) e por meio das pontas de contato dos eletrodos, certa pressão de sujeição é aplicada as chapas, criando uma região fundida com os materiais comumente conhecida como botão de solda (FINE e FOSTINI, 1979; GOULD, 1987; KHAN e PANDEY, 2013; MARCONI et al., 2018).

O *clinch*ing é um processo de manufatura que propicia a união a frio por conformação plástica e ancoramento, também classificado pela norma DIN 8580:2003 grupo 8593-5, consistindo em unir a frio duas ou mais peças sobrepostas que podem ser chapas, tubos, perfis usando punção e matriz intencionalmente desenhados. O punção penetra parcialmente os componentes destinados à união deslocando o material das peças pra preencher a cavidade da matriz, criando uma união por compressão ou extrusão plástica e permanente (DVS/EFB, 2021). Esta união transfere para as propriedades dos materiais envolvidos a responsabilidade de repetir os resultados nos ensaios de resistência à tração quase-estáticos a carga para cisalhar ou destacar. Em alguns casos, há inclusive micro ligação entre os materiais favorecendo o fluxo elétrico (TOX PRESSOTECHNIK, 2020). A necessidade de elementos adicionais auxiliares é dispensada, entretanto o acesso bilateral é mandatório. As uniões híbridas envolvendo adesivos são exequíveis e materiais auxiliares como fluidos ou líquidos voláteis para estampagem podem ser necessários para materiais como alumínio ou aço inox (BRECKWEG, 2007).

Figura 1 - Sistema de manufatura DIN 8580.



Fonte: adaptado da norma DIN 8580.

Os aços avançados de alta resistência (*AHSS* do inglês *advanced high strength steel*) são uma família em constante evolução da qual os aços bifásicos (*DP*, do inglês *dual-phase*) fazem parte. Não há entendimento para os fabricantes sobre quando um bifásico deve ser classificado como de ultra-alta resistência (*UHSS* do inglês *ultra-high strength steel*), pois para alguns se inicia em 600 MPa para outros em 1,2 GPa de resistência à tração (OIKAWA et al., 2007; THYSSENKRUPP, 2016; UTSUMI et al., 2017; ARCELORMITTAL, 2017; VARBAI et al., 2019; KOBELCO, 2019; SSAB, 2020; POSCO, 2021). O fato é que os aços bifásicos oferecem maior resistência e boa conformabilidade, tornando-os objeto de grande interesse para a indústria automotiva desde os anos 1970 (SAWHILL e FURR, 1981; MURTI et al., 1993).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O propósito do presente trabalho é correlacionar o *clinch* e a união por solda a ponto do aço bifásico 1,3 GPa com 1,50 mm de espessura a ele mesmo.

2.2 Objetivo específico

A análise do perfil resultante na microdureza, da microestrutura observada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies circunvizinhas às uniões e região da fratura. Além disso, obter os resultados dos ensaios de resistência à tração uniaxial quase-estático para cisalhamento e destacamento de corpos-de-prova cortados em equipamento laser.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, o assunto foi dividido, para maior clareza, em caracterização do processo de solda a ponto por resistência elétrica, o processo *clinch*ing e aspectos inerentes ao aço de ultra-alta resistência bifásico de 1,3 GPa.

3.1 Solda a ponto por resistência elétrica

A soldagem a ponto por resistência é um método de união baseado no processo termomecânico ou calor, portanto os parâmetros de soldagem precisam ser otimizados para evitar defeitos internos como poros, trincas, vazios causados por expulsão de metais e juntas frias (POURANVARI e RANJBARNOODEH, 2011). O processo para unir duas partes é esquematicamente mostrado na Figura 2.

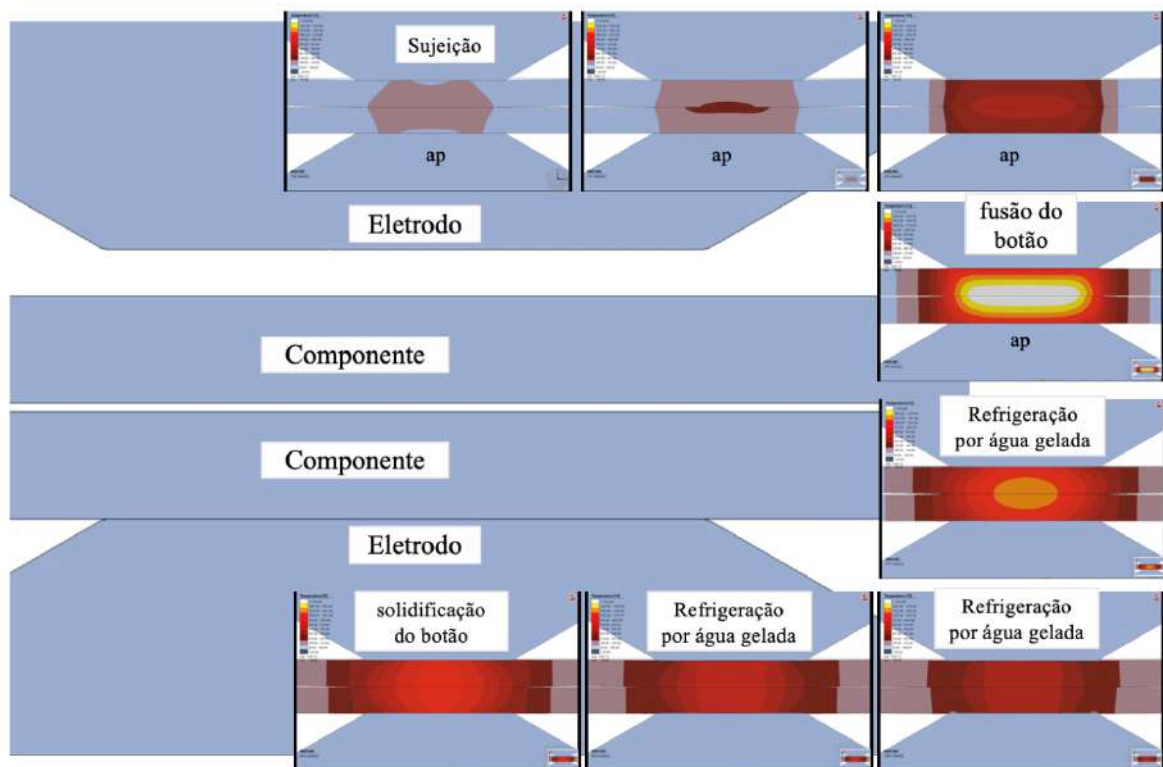
O aço comum ou os resultantes de composição e processos sofisticados como os *AHSS*, com espessuras diversas e revestimentos variados, podem ser soldados, objetivando robustez e leveza ao construir os conjuntos que formarão a carroçaria (*BiW*, do inglês *body in white*) dos veículos (ASM INTERNATIONAL, 1993; KHAN e PANDEY, 2013; HILDITCH et al., 2015; CHABOK, 2019; ROY et al., 2019; BAMBERG et al., 2022). As variáveis que podem influenciar a obtenção de adequados pontos de solda a ponto por resistência elétrica (FINE e FOSTINI, 1979; KHANNA e LONG, 2008) levaram a um substancial aumento na quantidade de pontos soldados por conjunto, resultando em um maior consumo de energia, de eletrodos e de tempo, implicando em maiores custos de fabricação (OUISSSE e COGAN, 2010; ZHANG et al., 2015).

O aporte de calor (ap) pela resistência ao fluxo de energia através dos materiais das chapas do conjunto produz a fusão ou uma poça dos materiais, sendo que, ao ser interrompido o (ap), haverá a solidificação da poça resultando o ponto de união das chapas (HERSH, 1970; CHABOK, 2019). A forma dos eletrodos e a sequência dos ciclos de soldagem, a saber corrente inicial, subida de corrente, corrente de soldagem, descida de corrente e tempo e corrente de revenimento são parâmetros que criteriosamente devem ser escolhidos (CHABOK, 2019).

Além disso, há aspectos como trinca, poros, indentação excessiva, expulsão e queima do revestimento que prejudicam a qualidade da solda a ponto por resistência elétrica (KHANNA e LONG, 2008; CHABOK et al., 2017; BAMBERG et al., 2022). Os parâmetros elementares que ganham atenção podem ser resumidos em intensidade da corrente elétrica, força de sujeição, espessura, tipo dos materiais, tempos da soldagem, calor e resfriamento tipo e formato do eletrodo (HERSH, 1970; MURTI et al., 1993; HILDITCH et al., 2015; UTSUMI et al., 2017).

Por conta da imperativa necessidade de reduzir peso nas carroçarias de veículos, conforme endossado pelo órgão do governo dos Estados Unidos da América - EUA (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2020) e de igual forma, nas garantias de fabricação dos veículos de passeio, que em 1925 eram de 90 dias (CLEVELAND HISTORICAL, 2021) e hoje há garantias que excedem 10 anos, pelo menos contra a corrosão, para o uso de chapas de aço cada vez mais finas e, portanto, implicando em estruturas mais leves e com aços mais resistentes, com o advento da prensagem a quente, houve a necessidade de se proteger a superfície das chapas com revestimentos metálicos tipo zinco-alumínio, alumínio-silício ou puramente zinco além de manter controlada a atmosfera dos fornos.

Figura 2 - Quadros da simulação da solda a ponto por resistência elétrica.

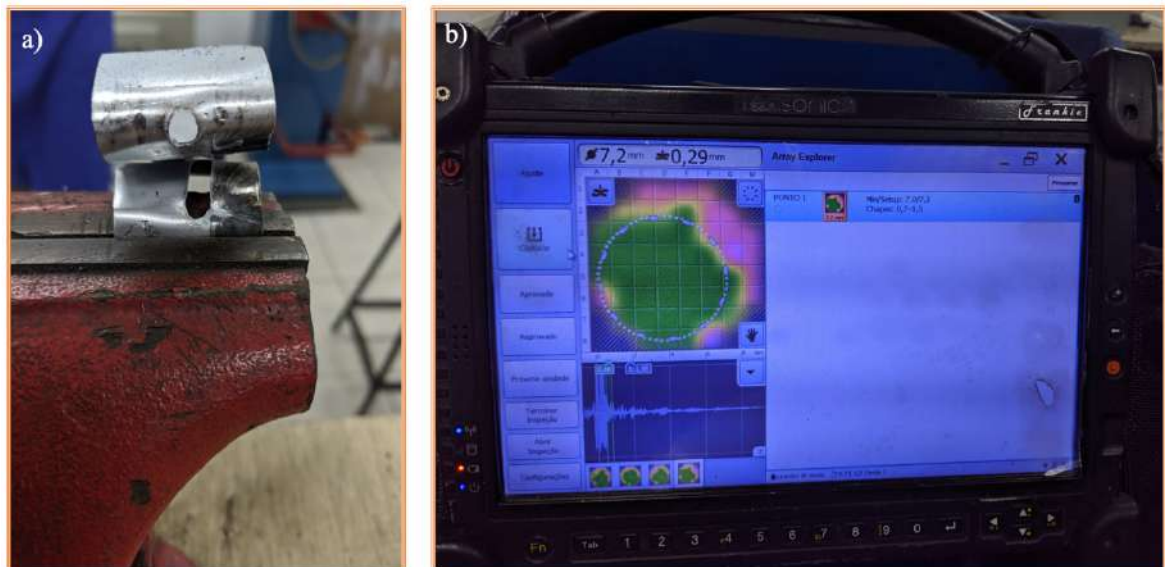


Fonte: adaptado de (ASM INTERNATIONAL, 1997) com base nas imagens de Simufact.

A utilização desses tipos de chapas de aço revestidas causou uma diminuição da vida útil dos eletrodos devido ao menor tempo entre dressagens, que são necessárias para manter a área de contato eletrodos-chapas dentro de faixas específicas por conta da menor resistência elétrica e temperatura de fusão do revestimento (SAWHILL e FURR, 1981; UTSUMI et al., 2017; MARCONI et al., 2018).

No processo de solda a ponto a robustez da união é confirmada cravando-se um cinzel entre as chapas objetivando a ruptura de uma das chapas no entorno do botão de solda como mostrado ou quando há disponibilidade de equipamento de ultrassom e a confirmação da regularidade do botão poderá ser obtida num processo não destrutivo, conforme é mostrado nas imagens da Figura 3 a - b.

Figura 3 - Ruptura por cinzel entre as chapas para confirmar a união por fusão na região do entorno do botão de solda (a); Imagem obtida por ultrassom para confirmar a regularidade da região fundida e diâmetro do botão de solda sem destruição do conjunto (b).



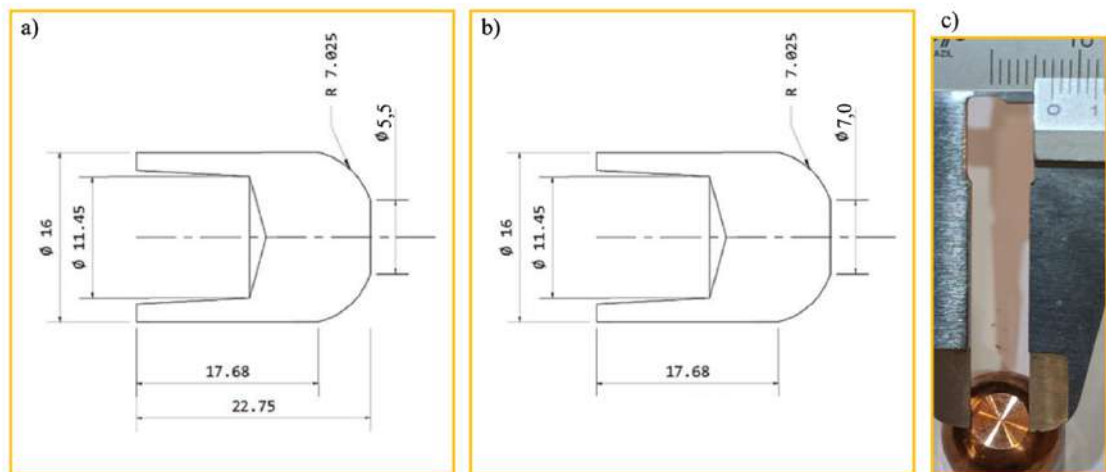
Fonte: o autor.

O exame da qualidade de uma união por solda a ponto se dá pela avaliação da resistência ao cisalhamento, entretanto, o processo de puxar uma das chapas do conjunto soldado para ver o material rasgar no entorno do botão da solda é realizado para julgar se os ajustes nos parâmetros tempo, pressão e aporte de calor estão adequados. O critério da carga esperada é obtido dos valores de resistência à tração até a ruptura de corpos-de-prova com seção reduzida. O que determina soldas boas e ruins é a manutenção dos parâmetros adequados como que se estivessem sempre ocorrendo pela primeira vez, pois o acúmulo de

resíduo do revestimento ou aumento da área de contato do eletrodo com a chapa altera o resultado (CHABOK, 2019). A qualidade da solda pode ser resumida em quatro níveis, ou seja, ruim, boa, excelente e expulsão (do inglês *splash*) (ZHANG et al., 2015).

O procedimento para realizar a soldagem a ponto por resistência de aços bifásicos utiliza equipamentos convencionais existentes que podem ser equipados com eletrodos para chapas de aço de baixo carbono e usinados para oferecer o diâmetro (d) de contato útil, como mostrado na Figura 4 a - c.

Figura 4 - Eletrodo F16 5,5 mm (a); Desenho utilizado para adequar a área de contato do eletrodo a 7 mm (b); Imagem do resultado para o eletrodo customizado (c).



Fonte: o autor.

A literatura evidencia o botão com um diâmetro mínimo = $4\sqrt{t}$ onde (t) é a espessura da chapa mais fina, (OIKAWA et al., 2007; VARBAI et al., 2019). Não obstante, diâmetros maiores são estudados desde 1970 (HERSH, 1970; FINE e FOSTINI, 1979; SAWHILL e FURR, 1981; GOULD, 1987; KHAN e PANDEY, 2013; UTSUMI et al., 2017; CHABOK et al., 2017; MARCONI et al., 2018).

O diâmetro do botão da solda a ponto por resistência elétrica exerce grande influência na resistência à tração, conforme destacado pela norma japonesa JIS-Z3140:1989 assim como a norma alemã DVS2923:1986-2007. Um incremento de 12,5% no diâmetro de contato de $4\sqrt{t}$ para $4,5\sqrt{t}$ chegando a 5,5 mm para chapas com espessura de 1,5 mm conforme mostrado na Equação 1:

$$d = 4,5\sqrt{t} \quad (\text{Eq. 1})$$

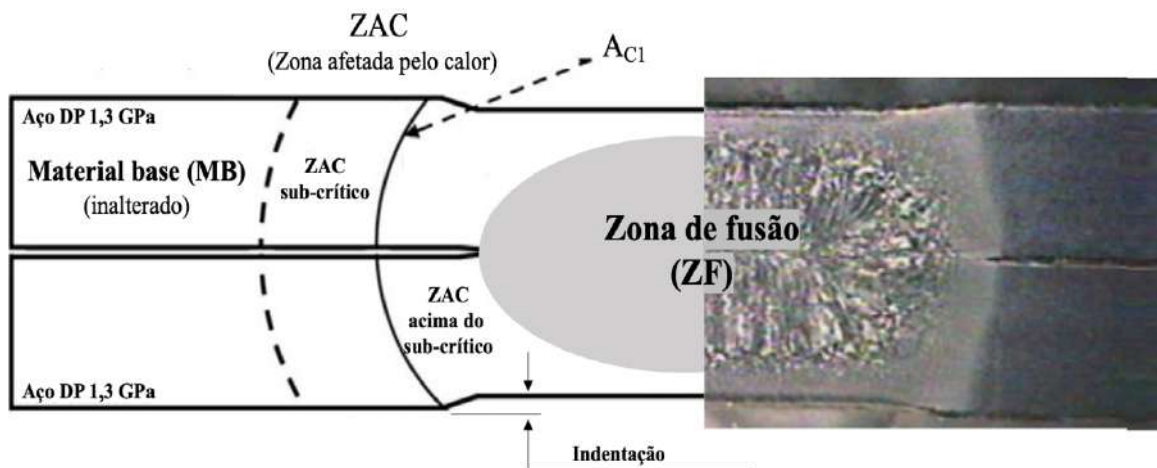
O aporte de calor (ap) para realizar a solda a ponto por resistência elétrica é definido como corrente ao quadrado (I^2) vezes resistência (R), vezes o tempo (t), ou como mostra a Equação 2:

$$ap = I^2Rt \quad (\text{Eq. 2})$$

A corrente é o parâmetro mais relevante, pois influencia a quantidade de calor entregue na zona de fusão. No caso do DP 1300M (1,3 GPa de limite de resistência), a corrente será de menor tensão se comparada à utilizada para aços comuns.

O esquema na Figura 5 ilustra as zonas concernentes quando a solda a ponto por resistência elétrica é executada adequadamente com área de contato dos eletrodos com $d = 5,5$ mm.

Figura 5 - Esquema da seção do botão da solda a ponto por resistência elétrica: zona de fusão (ZF); zona afetada pelo calor (ZAC); material inalterado de base (MB); linha do regime A_{C1} ; indentação pela força de sujeição.



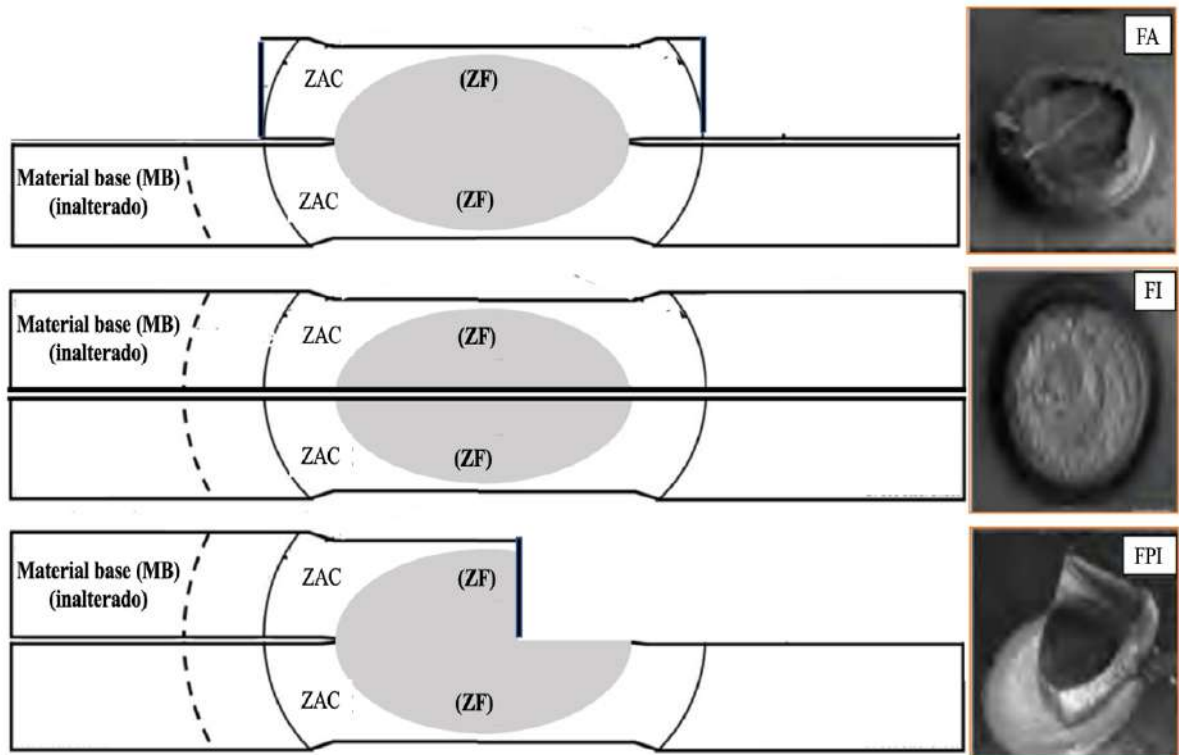
Fonte: o autor.

Além de encontrar os parâmetros adequados e mantê-los, faz-se necessário evitar alguns artefatos comumente conhecidos inerentes ao processo de solda a ponto por resistência elétrica. Pode-se citar a degradação por contaminar a ponta de contato ou desgaste do eletrodo, o vão entre as chapas por conta das tolerâncias em estampados, excentricidade entre os eletrodos, indentação excessiva, fragilização do metal líquido, efeito de derivação (do inglês *shunt effect*), tensão residual, expansão e contração térmicas

e também o efeito *shunt* especificamente quando adesivo é utilizado (ASM INTERNATIONAL, 2003). De acordo com a literatura, os problemas associados à falhas na solda a ponto por resistência elétrica de aços bifásicos são a elevada suscetibilidade a inadequada fusão dos materiais produzindo a falha interfacial, o *splash*, a formação de vazios, alta dureza da zona de fusão por conta da formação de martensita que terá um efeito adverso na falha em especial durante ensaios de destacamento (ASM INTERNATIONAL, 1997; CHABOK, 2019).

A solda a ponto por resistência elétrica pode falhar em três modos distintos, quais sejam, falha interfacial (FI), quando ocorre a propagação de trincas através da zona de fusão (ZF); a falha de arrancamento (FA) em que a falha ocorre através da retirada completa do botão de solda de uma das chapas pela outra; e a falha parcial interfacial (FPI). Na Figura 6 é visto um esquema com os tipos de falha e o aspecto da região do botão de solda após a falha.

Figura 6 - Esquema das potenciais falhas da solda a ponto por resistência elétrica.



Fonte: baseado em (AWS INTERNATIONAL, 1997).

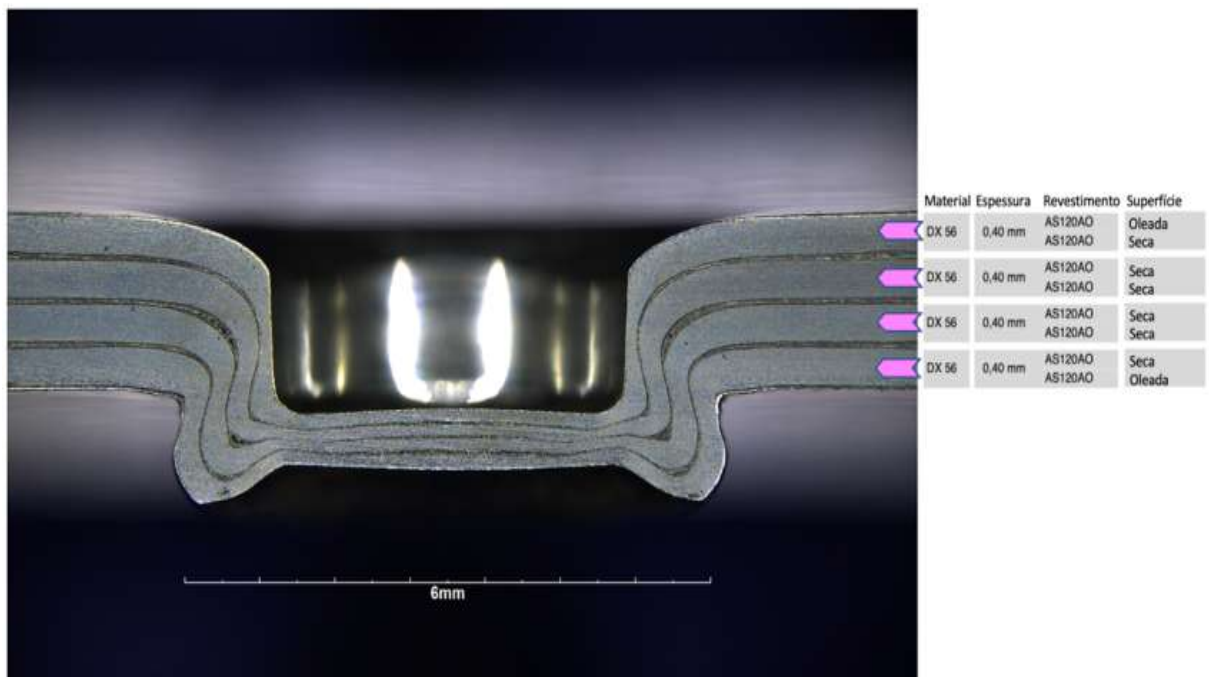
A solda de materiais dissimilares como aço e alumínio apresenta barreiras robustas e o *clinchng* é a escolha quando se busca evitar a adição de rebites ou parafusos (VARIS, 2006), como será visto a seguir.

3.2 O processo *clinch*

A evolução das tecnologias na fabricação de chapas de aço coadunou para que houvesse o desencadeamento da necessidade de alternativas para se obter conjuntos, preservando o substrato e os revestimentos, ainda que fosse uma camada de tinta, como é o caso das chapas utilizadas em gabinetes de geladeiras, refrigeradores, máquinas de lavar roupas, isto na linha branca.

A união de chapas a frio também conhecida como *toggning*, *toxing*, *spot clinching*, *clinch spot*, *shear clinching* ou *clinch* (BRECKWEG, 2007; BTM, 2020; ECKOLD, 2020; TOX PRESSOTECHNIK, 2020; BOLLHOFF, 2022) e que será referida daqui para a frente, no presente trabalho, como *clinch*, tem se tornado cada dia mais importante na indústria em função do uso de materiais dissimilares em conjuntos, tais como alumínio unido ao aço, alumínio e compósitos incluindo fibras de vidro ou mesmo a de carbono, aço mola com pré-furo e aço inoxidável objetivando a construção leve (MESCHUT et al., 2019).

Figura 7 - *Clinching* em quatro chapas de aço de 0,40 mm de espessura. Imagem da seção transversal de amostra obtida no laboratório da TOX.



Fonte: adaptado do acervo da TOX Pressotechnik do Brasil.

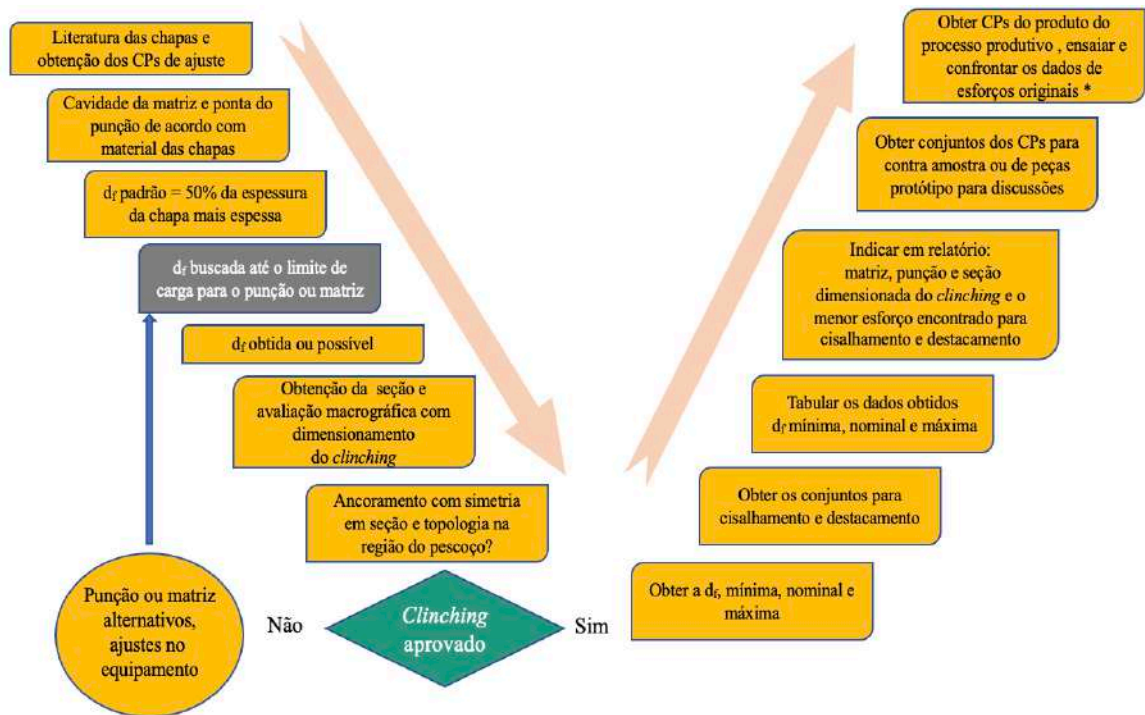
O *clinch*ing é um processo de união por conformação para unir peças de chapas, tubos assim como perfis de aço, aço inoxidável, metais não ferrosos, especialmente alumínio e plásticos reforçados com fibra. A técnica de união por *clinch*ing permite que dois ou mais componentes objetivados para a união sejam sobrepostos e unidos exclusivamente com base na conformação a frio local. A principal característica deste processo, além da facilidade de automação, é que os elementos da união ou ancoramento são formados a partir do material das peças a serem unidas, não sendo necessário adicionar rebites, parafusos ou materiais auxiliares de enchimento, propiciando excelente custo benefício. Os componentes a serem unidos são conformados de modo que um ancoramento por interação não destacável é obtido (MESCHUT e MATZKE, 2019).

O processo *clinch*ing permite unir duas, três ou mais chapas, como mostra a Figura 7, por meio da deformação plástica a frio, havendo diversas empresas capacitadas a prover o processo no mercado (MESCHUT et al., 2014; ZIRNGIBL et al., 2020; ABE e MORI, 2021; STEINFELDER et al., 2022). A norma DIN 8580 também classifica o *clinch*ing no subgrupo 8593-5, conforme esquema anteriormente mostrado na Figura 1.

O *clinch*ing é obtido num ciclo constante, portanto, exceto pelo *shear clinch*ing, o processo requer equipamento acionado apenas de um lado, mesmo para geometrias de punção e matriz escolhidos de acordo com as áreas de aplicação distintas. Há variantes de *clinch*ing com e sem cisalhamento parcial das chapas.

Mais especificamente, o processo *clinch*ing pode ser sumarizado pela conformação para gerar o ancoramento de duas ou mais chapas, formando um conjunto por meio de ferramentas de cavidade intencionalmente desenhadas na matriz e do punção provido de ponta e tratamentos superficiais peculiares (BRECKWEG, 2007; MESCHUT et al., 2014; MESCHUT e MATZKE, 2019).

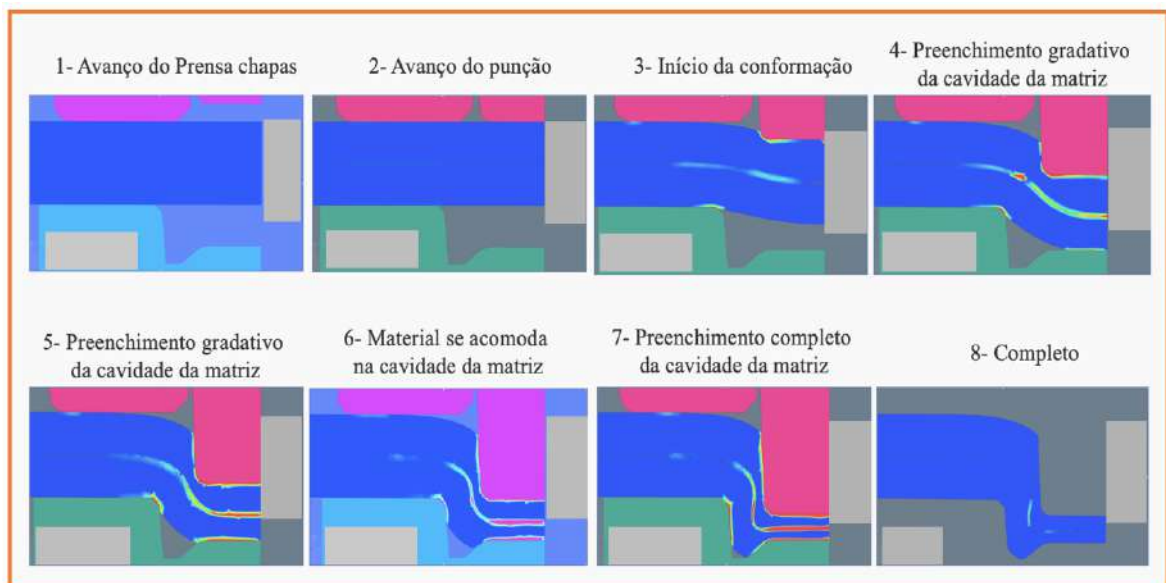
Um possível processo do início da necessidade à avaliação dos corpos-de-prova extraídos de conjuntos finais produzidos na indústria é apresentado no esquema da Figura 8, considerando que haja conhecimento suficiente, os equipamentos necessários e um técnico capacitado. No esquema mostrado na Figura 9, pode ser observada a sequência típica obtida por meio de simulação computacional em oito passos (INTERACTION OF CLINCH SPOTS, 2015).

Figura 8. Possível ciclo para se obter o *clinch*ing.

Fonte: o autor.

Além disto, com a evolução dos adesivos estruturais e sua ampla aplicabilidade em meios produtivos automatizados, possibilita uso do processo *clinch*ing de forma híbrida oferecendo resultados de destacamento e cisalhamento elevados e, desta forma, estendendo a aplicação para áreas médicas e aeroespaciais (DILLARD, 2010).

Figura 9 - Sequência do *clinch*ing em 8 etapas e as interações entre prensa chapas, punção, chapas e matriz rígida.

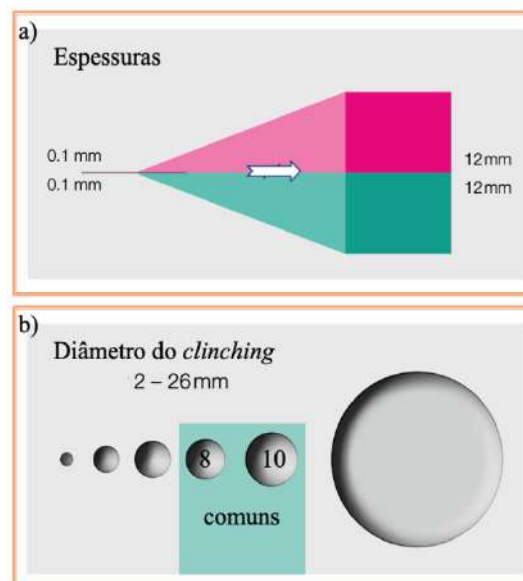


Fonte: adaptado da simulação (SIMUFACT FORMING, 2015).

Uma ampla gama de materiais, mesmo dissimilares como citado anteriormente, podem ser unidos por meio do processo *clinch*, havendo também vantagens quanto à limpeza, preservação do substrato e revestimento, bem como redução no consumo de energia elétrica, redução na quantidade de parâmetros de processo necessariamente controlados ao comparar ao ciclo da solda a ponto por resistência elétrica. Quanto à vida útil de um conjunto de punção e matriz para o processo *clinch*, esta pode variar de acordo com os materiais a serem unidos. Quando o processo envolve aço inoxidável, a vida útil pode estar entre 100 mil e 200 mil ciclos e mais longa para aços pré-pintados, de baixo carbono ou cobre, podendo superar um milhão de ciclos, como mostram os registros encontrados na literatura e na prática (VARIS, 2006; DVS/EFB, 2021; FERNANDES, 2021).

O *clinch*, sendo resultado de conformação tem uma aparente saliência (exceto quando um segundo ciclo com matriz plana é adotado) diretamente relacionada ao diâmetro e profundidade da matriz que, por sua vez, reflete a espessura e propriedades mecânicas dos materiais envolvidos. A extensão da espessura das chapas pode variar de 0,10 mm a 12 mm e o diâmetro da cavidade da matriz entre 2 mm e 26 mm, como pode ser observado no esquema na Figura 10 a - b. Além disso, há diversos tipos de *clinchings* e, por conseguinte, diversas características de punções e de cavidades de matrizes. O punção desloca o material dos componentes envolvidos para preencher a cavidade da matriz intencionalmente projetada e, por meio da deformação plástica e fluxo reverso do material, a união forma um ancoramento para gerar a força de retenção.

Figura 10 - Esquema de espessuras das chapas (a); diâmetros de *clinch* (b).

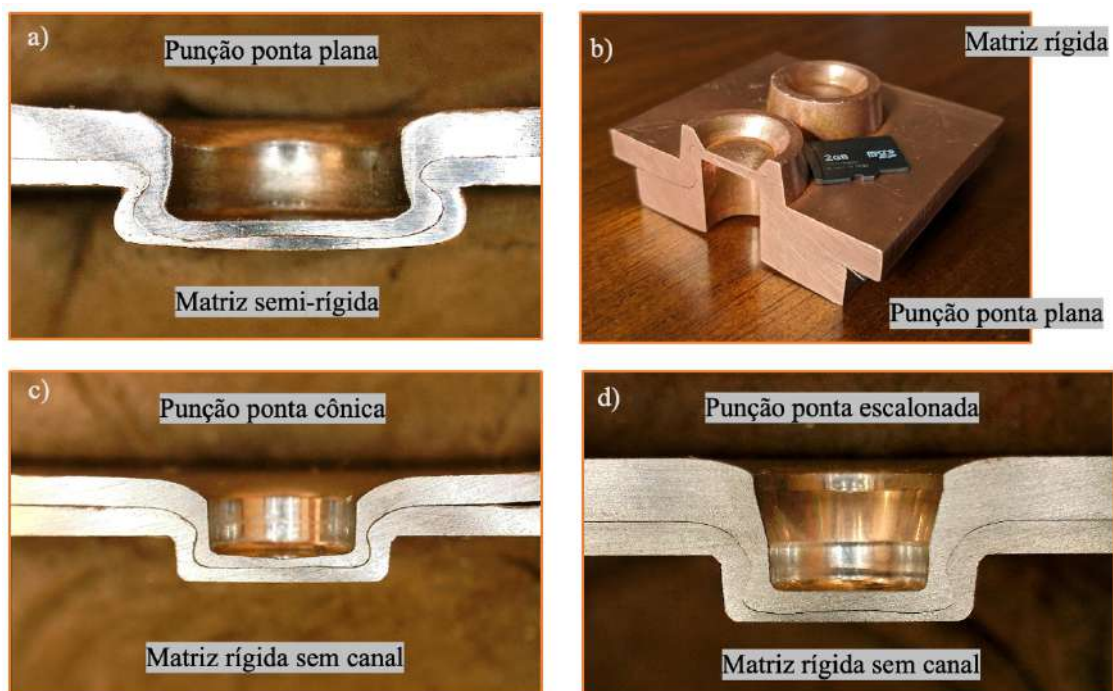


Fonte: adaptado do catálogo (TOX, 2022).

O procedimento para a realização do *clinchings* consiste em estudar entre diversas combinações e variações de parâmetros como força de prensagem e força de sujeição no prensa-chapas e a combinação entre punção e matriz (BRECKWEG, 2007; MESCHUT e MATZKE, 2019; ABE, YOHEI et al., 2020), que resultem na melhor ancoragem ou interação no pescoço entre as chapas, vide seção de *clinchings* exemplificando variantes para punções e matrizes na Figura 11 a - d. A seção do *clinchings* está diretamente correlacionada à geometria do conjunto de punção e matriz.

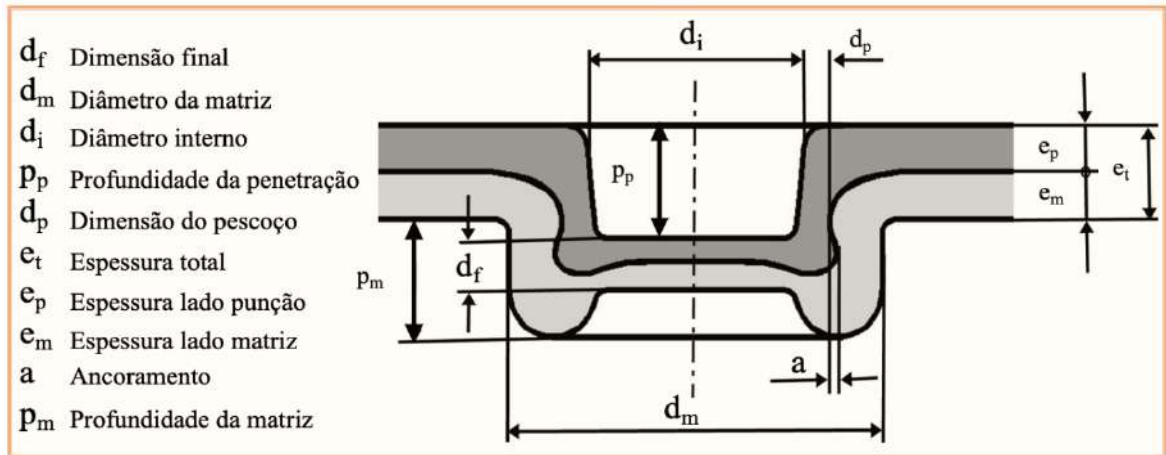
O *clinchings* é executado em equipamentos hidráulicos, hidropneumáticos ou servo prensas (STEINFELDER et al., 2022). A definição do diâmetro (d_m), da força de prensagem e da dimensão final (d_f), do ancoramento (a) entre outros parâmetros são demonstrados no esquema na Figura 12. A conformação do *clinchings* e suas peculiaridades tais como o ancoramento, espessuras, ausência de trincas e simetrias transversal e longitudinal podem ser avaliadas macroscopicamente ao cortar, lixar e polir a amostra. Os cuidados nesta preparação independentemente do sistema de ferramentas, devem ser realizados por técnico experiente (PENG et al., 2020; DVS/EFB, 2021).

Figura 11 - Seções de *clinchings* que mostram variações nas características de punção e matriz em chapas de aço de diferentes espessuras, 1,20 mm e 0,65 mm (a); chapas de cobre 5 mm e 7 mm de espessura (b); chapas de aço inoxidável 0,80 mm de espessura (c); chapas de latão 1,5 mm e 0,80 mm (d).



Fonte: seções de amostras produzidas no laboratório da TOX Pressotechnik.

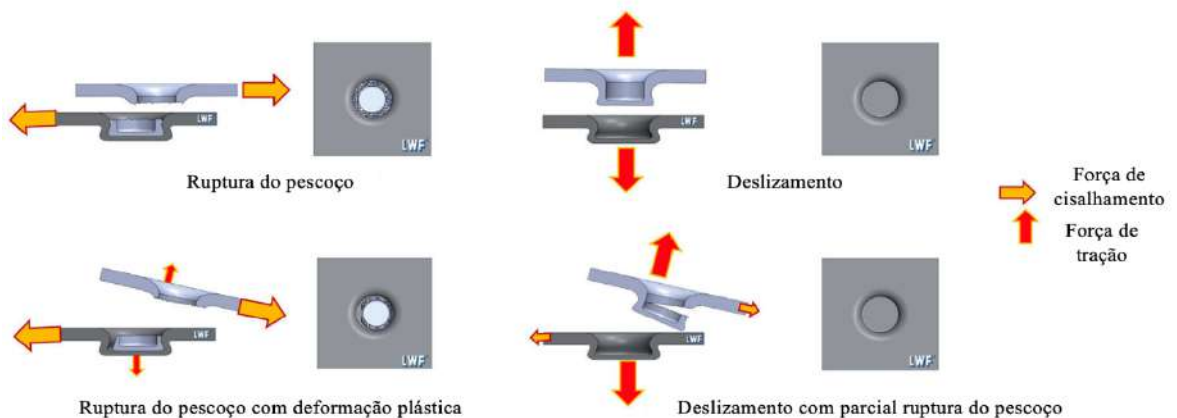
Figura 12 - Características geométricas de uma união por *clinch* baseadas na norma DVS 3420.



Fonte: adaptado de (DVS/EFB, 2021).

Um equipamento que disponha de controle da força aplicada no punção, da força de sujeição no prensa-chapas e do curso total ou posição final de conformação é utilizado de forma empírica. A simulação em softwares é um recurso que permite à engenharia de produto da indústria, em especial automotiva, trabalhar em avançado, mas ainda requer experimentos conforme apresentado por BOS et al., 2011. Amostras de chapas reais e definitivas, objeto da união, são imperativas para se obter aspecto da seção, topologia e forças de cisalhamento e destacamento estáveis, redundando na adoção da combinação de punção e matriz mais adequada e registro em relatório rastreável quando não se utiliza simulação para estudo em avançado (PENG et al., 2020; ZIRNGIBL et al., 2020). Os modos de falha típicos de um *clinch* consistem da ruptura da região de estrição (R_p), do deslizamento (Dz) ou da combinação destes dois, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Modos de falhas típicos do *clinch*



Fonte: adaptado de (DVS/EFB, 2021).

3.2.1 Tipos de materiais

O *clinch*ing pode ainda ser aplicado em casos considerados difíceis envolvendo chapas metálicas de significativa diferença de espessuras, sendo a cavidade da matriz do lado de menor espessura ou também exequível, posicionando-a do lado da chapa mais espessa, entretanto, a relação de um para quatro tem se mostrado limítrofe para a maioria dos materiais (BTM, 2021; ECKOLD, 2021; TOX, 2022).

O desenho das ferramentas, isto é, punção e matriz, segue critérios peculiares e diversas empresas concebem características marcantes para obter registro de patente e assim garantir o diferencial. Na Figura 14 é possível diferenciar os tipos de ferramentas por seu revestimento, uso de molas, lamelas, elastômeros e mesmo as matrizes rígidas.

Figura 14 - Variedade de perfis de punções e matrizes para *clinch*ing.



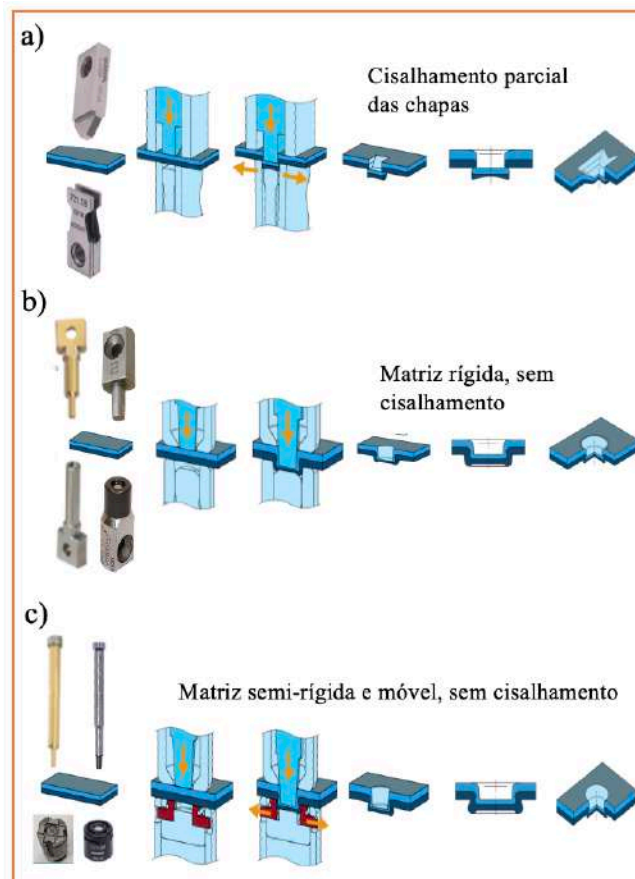
Fonte: (DVS/EFB, 2021).

A união de materiais de alta resistência à tração (*HSS*), do inglês *high strength steel* com materiais dúcteis, pode ser citada como a aplicação do *clinch*ing para unir combinações de chapas metálicas e aço fundido ou aço mola, além de componentes em alumínio injetado sob pressão ou extrudado à chapas metálicas (MESCHUT et al., 2019).

O *clinch*ing tem sido aplicado para unir chapas metálicas a materiais não metálicos, como por exemplo, plásticos, elastômeros, papelão e até mesmo papel, destacando-se de outras técnicas de união com vantagens, tais como a ausência de efeitos térmicos na área de união, por não gerar gases ou vapores tóxicos, não danificar o revestimento ou camada de tinta depositados sobre a chapa em processos pós-laminação siderúrgica, eliminar a

necessidade de componentes adicionais ou auxiliares e prescindir de pré-tratamento da superfície. Além disso, o processo *clinch* acomoda adequadamente as tolerâncias, típicas do processo siderúrgico de laminação, na espessura da chapa e em especial, as matrizes semirrígidas, bipartidas ou mesmo tripartidas podem ser preconizadas em aplicações automatizadas em que os conjuntos têm combinações distintas de chapas metálicas e espessuras variadas (OUDJENE e BEN-AYED, 2008).

Figura 15 - Não recomendado para aplicações que requerem estanqueidade ou exposição às intempéries (a); sem cisalhamento das chapas e aplicável em conjuntos que requerem estanqueidade ou exposição à intempéries (b e c).

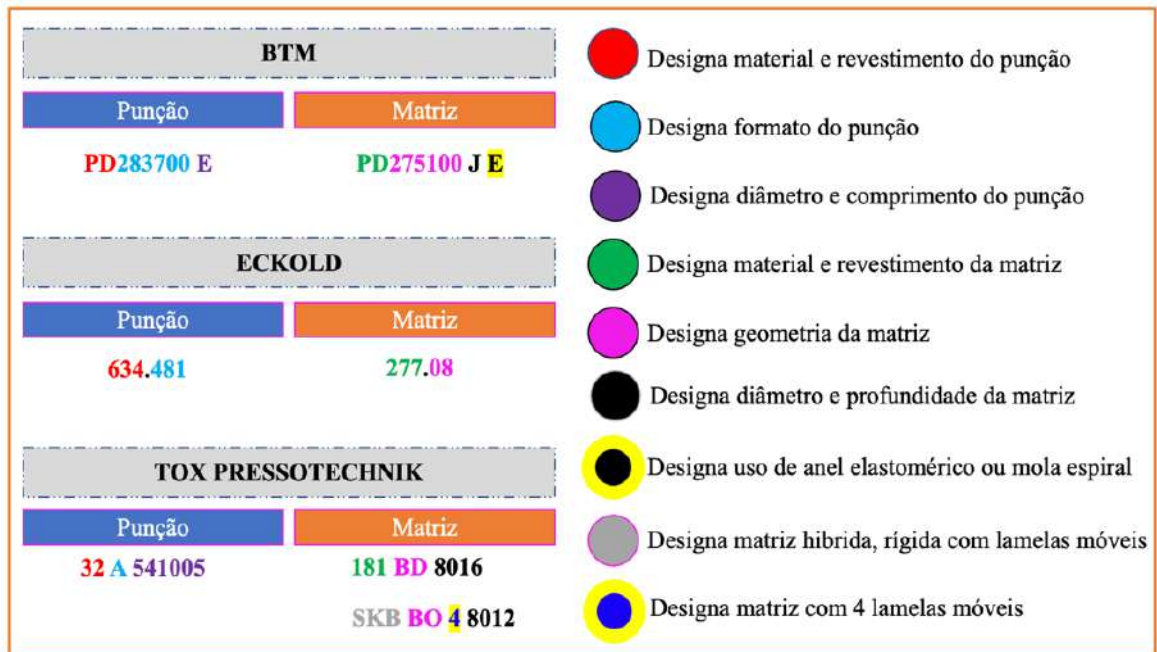


Fonte: adaptado do catalogo dos fabricantes (ECKOLD, 2021; TOX, 2022).

A forma para distinguir o tipo de *clinch* aplicado pode ser guiada pelo esquema apresentado na Figura 15 a - c. A designação de punção e matriz por diversos fabricantes segue os critérios sumarizados no esquema da Figura 16. O tipo de aço, o revestimento, e outros aspectos permanecem guardados como segredo industrial, pois estão diretamente relacionados à vida útil e em especial ao custo de fabricação. É possível afirmar que as matrizes sem partes móveis, ou seja, rígidas têm menor custo no processo de fabricação

assim como o *clinch* proveniente destas, favorável modos de falha. Há recomendações quanto a aplicação do punção na chapa mais espessa ou resistente entretanto, ainda que possível, a inversão quando imperativa retorna cargas para destacamento e cisalhamento inferiores (TOX, 2021).

Figura 16 - Sistema de designação de punções e matrizes para *clinch* sem cisalhamento.



Fonte: Elaborado com base em (MESCHUT e MATZKE, 2019; BTM, 2021; ECKOLD, 2021; TOX, 2022).

3.2.2 Monitoramento da qualidade

O monitoramento da qualidade pode ser manual ou automatizado e está detalhado nesta seção.

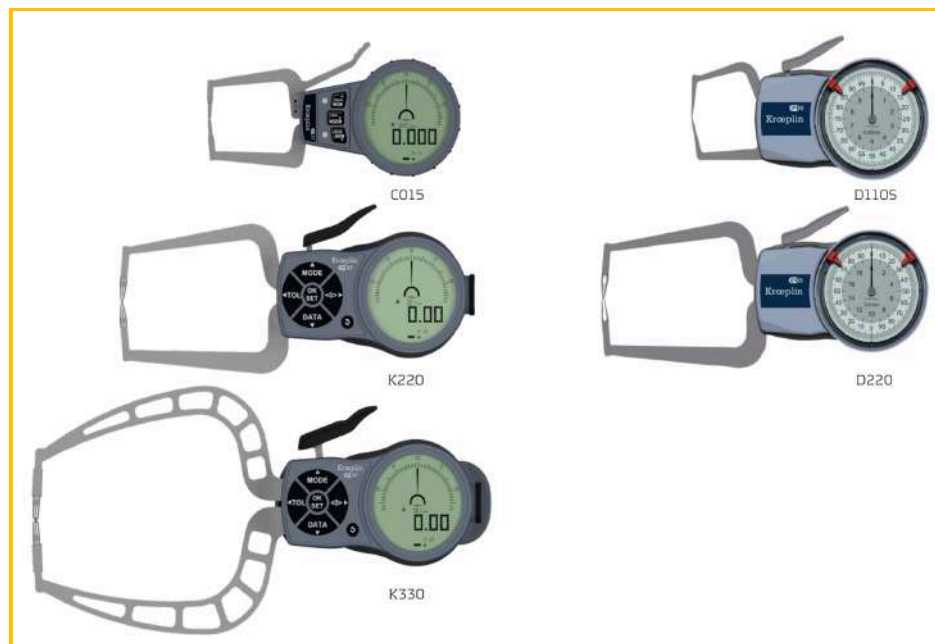
3.2.2.1 Manual

No processo de solda a ponto por resistência elétrica a robustez da união é confirmada cravando-se um cinzel entre as chapas objetivando a ruptura de uma delas no entorno do botão, e assim, destruindo o conjunto avaliado. Em contraste, a qualidade do *clinch* pode ser verificada de forma não destrutiva ou simplesmente medindo a (d_f) dimensão final, utilizando-se de um instrumento chamado espessímetro. O espessímetro pode ser digital ou analógico conforme mostrado na Figura 17. O diâmetro externo gerado

pelo preenchimento da cavidade da matriz pode ser aferido com instrumento de medição paquímetro.

Quando manuseados adequadamente, a precisão desses instrumentos é considerada suficiente para determinar a d_f do *clinking*. E como qualquer outro equipamento de medição, a calibração regular é recomendada.

Figura 17 - Espessímetros à esquerda digitais e à direita analógicos podem ter extensão de acessos de 35 mm a 200 mm até o centro do *clinking*.

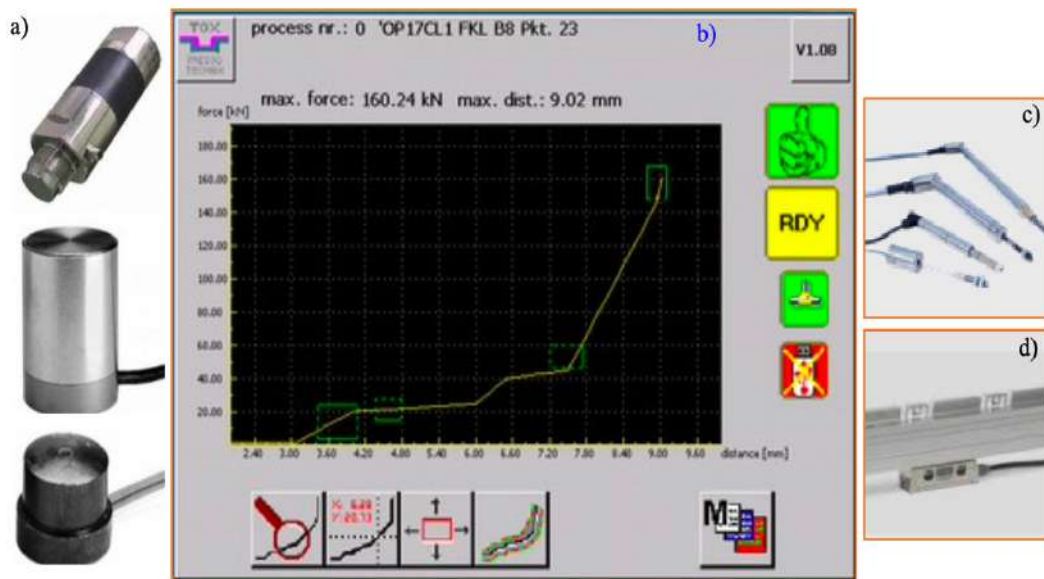


Fonte: recorte do catálogo (KROEPLIN, 2021).

3.2.2.2 Monitoramento do processo ou controle automatizado do processo

A força para deslocar o material das chapas para dentro da cavidade da matriz assim como o curso do punção para obter a d_f são preconizados em relatório do (*DoE*) do inglês *design of experiments*. O monitoramento do processo com base em célula de carga e transdutor linear incorporados ao equipamento mono ou multi *clinking* mostra os sinais do deslocamento e da força aplicada em painéis de controle ou interface de homem e máquina (IHM) conforme mostrado na Figura 18 a - d, propiciando a interrupção para o próximo ciclo, caso um dos parâmetros preconizados não seja atendido. Isto evita o desperdício de produzir sem qualidade. Este conceito de monitoramento é comumente utilizado em prensas hidráulicas ou hidropneumáticas.

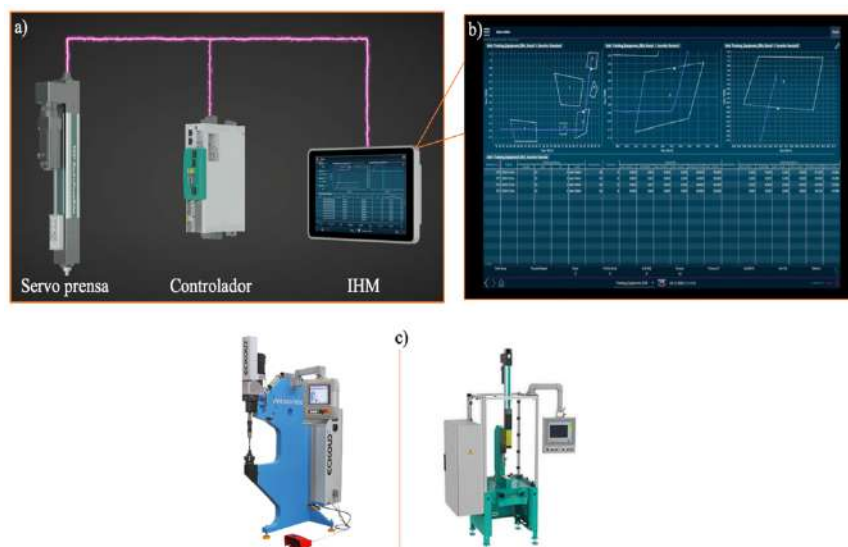
Figura 18 - Variantes de células de carga (a); recorte da tela de IHM mostrando a linha e as janelas de medição (b); transdutor linear de curso (c); transdutor de posição (d).



Fonte: adaptado de (TOX, 2021).

O uso de servo prensa, mais recentemente, permite controlar o processo gerando uma curva correlacionando a posição e a força com tamanha precisão que, se a espessura somada das chapas envolvidas estiver centésimos de milímetro fora da extensão preconizada, o ciclo pode ser interrompido.

Figura 19 - Conjunto formado por servo prensa, controlador e IHM (a); definição dos parâmetros como janelas, curvas ou a combinação dos dois de acordo com o processo de prensagem (b); exemplos de prensas elétricas com controle de força e posição (c).



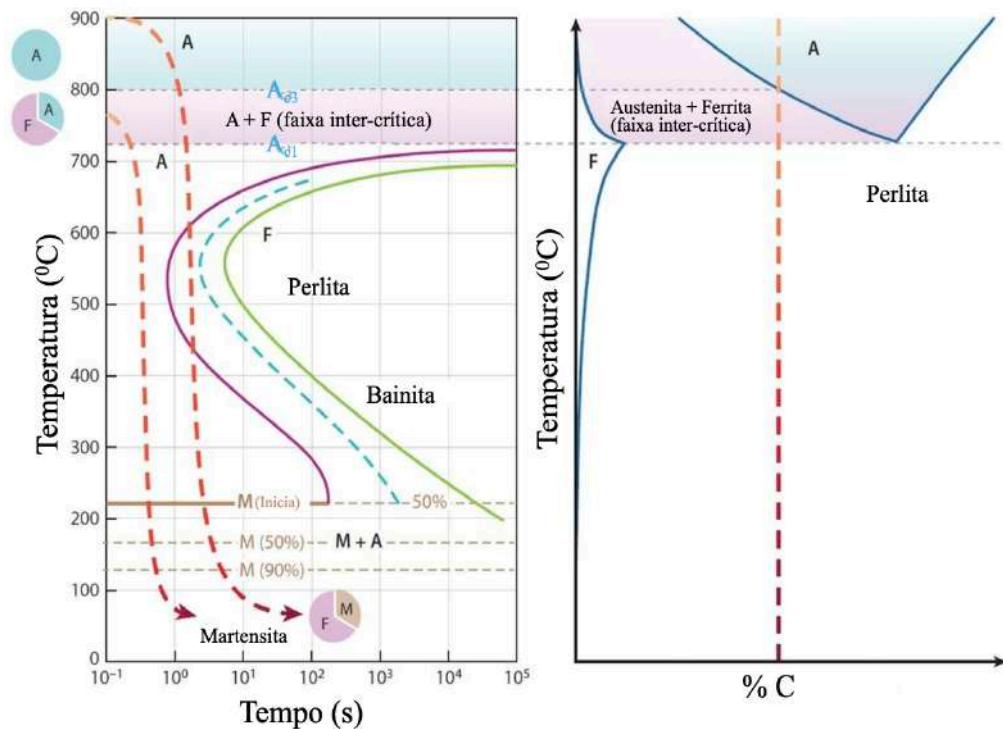
Fonte: adaptado de (ECKOLD, 2022; TOX, 2022).

A curva de prensagem também é mostrada em IHM ou mesmo em monitor conforme apresentado na Figura 19 a - c, de forma a propiciar o acompanhamento a cada ciclo (ECKOLD, 2021; TOX PRESSOTECHNIK, 2022)

3.3 Os aços de ultra-alta resistência bifásicos

O aço bifásico é resultado de criterioso processo termomecânico e tem origem a partir de um aço de baixo carbono submetido à faixa intercrítica, (TASAN et al., 2015; YOON et al., 2019).

Figura 20 - Diagrama esquemático de curvas de resfriamento indicando os métodos utilizados para obter uma microestrutura ferrita-martensita ou bifásico.



Fonte: adaptado de (TASAN et al., 2015).

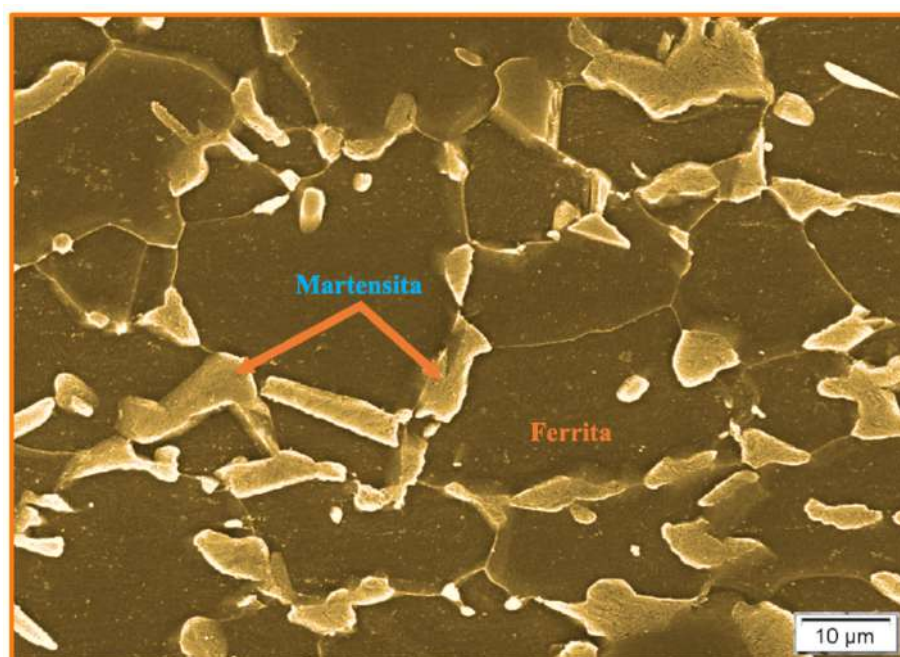
O processo consiste em aquecer e manter a temperaturas entre A_{C1} e A_{C3} do diagrama ferro-carbono para obter a austenitização parcial e resfriamento controlado, objetivando a transformação de toda a austenita em martensita (MURAKAMI e IMAI, 1942a, b; TYRKEL, 1968; TATARU et al., 2014; TASAN et al., 2015). E com o intuito de oferecer melhor compreensão do esquema gráfico, considerar que onde A, austenita; F, ferrita; M, martensita estão indicados como abreviaturas. As temperaturas relevantes nas quais a formação da austenita começa e termina (A_{C1} , a temperatura na qual a austenita

começa a se formar durante o aquecimento e A_{C3} , a temperatura na qual a transformação da ferrita em austenita é completada durante o aquecimento) dependem da liga, conforme apresentado no esquema gráfico da Figura 20.

Está amplamente documentado que os aços avançados são respostas das aciarias para se contraporem ao avanço na aplicação de alumínio nas carroçarias, especialmente por ser notória a vantagem em termos de peso/peça em favor do alumínio. Entretanto, quando observada a pegada de carbono, mesmo no Brasil que é considerada baixa 4,2 t de CO_2eq/t ao compará-la a média mundial que está em 9,7 t de CO_2eq/t (REVISTA ALUMÍNIO, 2021). Esta vantagem brasileira se dá pelo perfil da matriz elétrica estar em 83% renovável (EPE, 2021).

O aço gera 1,89 t de CO_2eq/t (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2021), logo 5 vezes menos que o alumínio e deverá manter a hegemonia por décadas mesmo sendo responsável por volta de 8% de toda a emissão de CO_2 no planeta. Além disso, as carroçarias leves podem ser construídas com pouco ou nenhum custo adicional em comparação as convencionais, incentivando os fabricantes de aço a envidar esforços para seguir elevando o limite das propriedades mecânicas como descreveu CHABOK, 2019 e alta conformabilidade com os aços avançados de terceira geração (ARCELOMITTAL, 2020; SSAB, 2020).

Figura 21 - Imagem típica da microestrutura de aço bifásico de primeira geração composto de ilhas de martensita em uma matriz de ferrita após ataque com Nital.



Fonte: adaptado de catálogo da (POSCO, 2021).

Os aços bifásicos são aceitos como parte da primeira família de aços avançados com aplicação na indústria automotiva. A microestrutura do aço bifásico apresenta ilhas duras de martensita (SARWAR et al., 1996; HARRIS et al., 1997; VARBAI et al., 2019;) dispersas em matriz maleável ferrítica, conforme pode ser observado na Figura 21. Esta constituição favorece a alta resistência à tração na faixa de 500 MPa a 1,7 GPa (TASAN et al., 2015). Além disso, apesar de o processo *clenching* poder ser modelado em computadores gerando na prática uma microestrutura bastante próxima a dos bifásicos laminados a frio e recozidos conforme BOS et al., 2011, ensaios em laboratório com as amostras dos materiais definitivos se fazem necessários para a obtenção definitiva das cargas suportadas.

Este aspecto atraente quanto à conformabilidade é indicado para a produção de peças estampadas tais como barra de impacto, painéis do assoalho, colunas e reforços de colunas, barras de proteção para citar alguns (CRAWLEY et al., 1983; KHAN et al., 2008; KHAN e COGAN, 2010; PANDEY, 2013; OUISSE et al., 2017; VARBAI et al., 2019; SSAB, 2020). Há aplicações de *clenching* para montar conjuntos em aços de 980 MPa de resistência à tração (MESCHUT et al., 2014).

O aço bifásico é produzido de forma contínua por meio de laminação e recozimento, além do teor de carbono exíguo, havendo limites para elementos de liga como mostra a Tabela 1 para propiciar temperabilidade adequada durante o resfriamento rápido e controlado (SARWAR et al., 1996; CERDA et al., 2019). O aço bifásico utilizado neste trabalho tem como nomenclatura do fabricante SSAB, Docol DP1300M e atende a norma VDA 239-100:2016 conforme literatura no apêndice 2. Normalmente, o procedimento final de recozimento para aços bifásico consiste em manter o material em um regime $\gamma - \alpha$ (austenita-ferrita) na faixa inter-crítica ($A_{C1} - A_{C3}$) seguido de têmpera mais manutenção em temperaturas ligeiramente abaixo da temperatura inicial da martensita, onde a fração austenita se transforma em martensita.

Tabela 1 - Composição química nominal, (% em massa máximo) do aço Docol DP 1300M (1,5 mm de espessura).

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb+Ti	Cr+Mo	B	Cu
0,16	0,40	1,80	0,020	0,010	0,015	0,10	1,00	0,005	0,20

Fonte: boletim técnico (SSAB, 2018).

A presença de outras fases como bainita, austenita retida e perlita, será resultado de processos termomecânicos inadequados (GOTO et al., 2015; TASAN et al., 2015; KHOSRAVANI et al., 2020).

3.4 Prática na indústria

Um processo que pode ser automatizado e que utiliza equipamentos existentes ou consolidados tem preferência e, por esta razão, prospera. Outro aspecto mandatório é o retorno sobre o investimento das propostas de manufatura cujo tempo, em alguns casos, deve ocorrer dentro do ano fiscal. Além disto, busca-se por meio de simulação virtual reduzir a dependência de fornecedores especialistas para a definição em avançado com ensaios custosos e, em alguns casos, demorados (OUDJENE e BEN-AYED, 2008; ZIRNGIBL et al., 2020). O ciclo para realizar a soldagem a ponto por resistência pôde ser facilmente robotizado devido ao processo de redução das dimensões e peso dos equipamentos e seu tempo de ciclo inferior a dois segundos na maioria dos casos.

A infraestrutura predial com os barramentos elétricos devidamente dimensionados para disponibilidade de correntes elevadas, sistema de exaustão, sistema de água gelada, mão de obra especializada para operar equipamentos estacionários, a segurança ocupacional e a insalubridade imposta aos operadores pelos fumos oriundos do processo de aporte de calor e fusão dos revestimentos e substratos das chapas envolvidas são aspectos relevantes para novos investimentos e comparativamente à solda a ponto por resistência elétrica, o *clinch* propicia reduções por prescindir completamente de todos os aspectos anteriormente citados, inclusive na emissão de gases do efeito estufa (SULLIVAN et al., 2010). Uma limitação comum aos dois processos está no que tange à possibilidade de desmontar os conjuntos.

A pesquisa e desenvolvimento da *RSW* de *AHSS* e *UHSS* pode ser dividida em dois grupos, além do aprimoramento dos equipamentos. A modelagem por elementos finitos (FEM) e a melhoria dos parâmetros de forma empírica ou *DoE* (*AWS INTERNATIONAL*, 1997; VARBAI et al., 2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A estrutura necessária para a execução experimental foi dividida em 3 partes para melhor clareza e é detalhada a seguir.

4.1 Preparação de corpos-de-prova

O aço bifásico 1300M tal qual recebido em chapas, com dimensões 1250 x 2000 mm e espessura de 1,5 mm tem o boletim técnico adicionado ao apêndice 2, de onde se obteve um total de 219 corpos-de-prova (CPs) sendo 60 para ajustes da solda a ponto e *clinch* medindo 25 x 50 mm e 144 para destacamento e cisalhamento medindo 110 x 30 mm no total. Os CPs foram obtidos por meio de equipamento CNC de corte por laser com potência de 2000 W, operando com gás de proteção de nitrogênio e mesa de 1500 x 3000 mm, conforme mostrado na Figura 22 a - b. Do total, outros 15 CPs foram preparados com seção reduzida, medindo 250 x 22,5 mm reduzidos em raio de 15 mm bilateral até 12,5 mm, como o desenho utilizado na programação do equipamento laser para obter os corpos-de-prova com seção reduzida apresentado no apêndice 3 para os ensaios de resistência à ruptura por tração conforme a norma ASTM-E517-2019. O propósito foi calcular a média ponderada de deformação plástica para ruptura (r_m) conforme notado na Equação 3.

$$r_m = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde r_m (resistência média) é a média da somatória das cargas para ruptura em ensaio de tração dos corpos-de-prova em 4 posições ou 0°, -45°, 45° e 90° sendo os corpos-de-prova extraídos no sentido da laminação representados por r_0 , o dobro de r_{45} , corpos-de-prova extraídos à 45 graus do sentido da laminação e r_{90} , corpos-de-prova extraídos transversalmente ao sentido da laminação.

Os 110 CPs foram cortados com base na norma JIS Z 3136:1999 para os testes de resistência à tração por cisalhamento e destacamento, sendo o objetivo preconizado no plano de trabalho utilizar 24 corpos-de-prova para cada orientação da laminação ou r_0 , r_{45} e

r_{90} . Além disto, para iniciar o *DoE* para o *clinking* um total de 30 CPs de 25 x 50 mm foram cortados conforme evidente na Tabela 2.

Figura 22 - Parte dos corpos-de-prova - CPs para ensaio de resistência à tração o aço bifásico 1300M em processo de corte por laser (a); parte dos CPs (b); CPs com sessão reduzida r_{45} (b_1); r_{90} (b_2); r_0 (b_3); CPs para cisalhamento e destacamento r_{45} (b_4); r_{90} (b_5); r_0 (b_6).



Fonte: o autor.

Tabela 2 - Corpos de prova obtidos por meio de corte à laser.

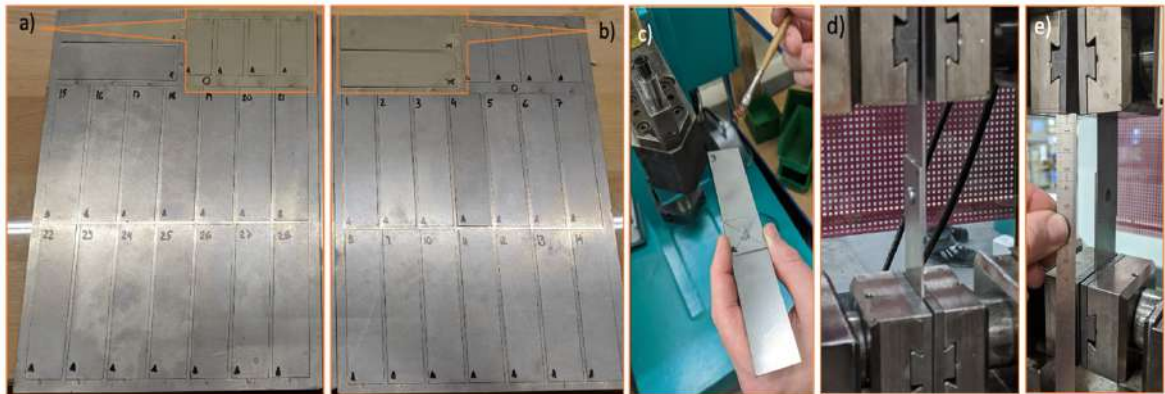
Corpos de Prova (unidades)									
Ajuste 25 x 50 mm	Destacamento			Cisalhamento			Seção reduzida		
	110 x 30 mm			110 x 30 mm			250 x 22,5 (12,5) mm		
	r_0	r_{45}	r_{90}	r_0	r_{45}	r_{90}	r_0	r_{45}	r_{90}
60	24	24	24	24	24	24	5	5	5

Fonte: o autor

O aproveitamento e disposição dos CPs na chapas são mostrados na Figura 23 a - b. Além disto, para minimizar as forças de extração tanto do punção quanto da matriz o oleamento de ambos os lados do conjunto foi adotado antes do processo *clinking*. Um lubrificante foi recomendado com viscosidade em torno de 40 cSt ou $\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$ com base em aditivos e ésteres para oferecer a lubrificidade, cujas literaturas podem ser encontradas no

apêndice 4. Os conjuntos montados devidamente posicionados no equipamento para o ensaio de resistência à tração são mostrados nas imagens na Figura 23 c - e.

Figura 23 - Parte das amostras para *DoE* r_0 (a); parte dos CPs para ensaio de resistência à tração r_{90} ; (b); oleando o CP antes do *clinch* (c); conjunto unido por *clinch* posicionado para ensaio de resistência à tração por cisalhamento (d); conjunto unido por solda a ponto por resistência elétrica (e).



Fonte: o autor.

4.2 Execução do processo *clinch*

Um equipamento TOX CEU 015 com monitoramento de força e posição com capacidade máxima de 140 kN foi utilizado para o *DoE* e desta forma, definir qual o conjunto de punção e matriz apropriado para se obter as amostras de conjuntos de chapas por *clinch* destinados aos ensaios de resistência à tração de cisalhamento e destacamento conforme mostrado na Figura 24.

Os recursos de energia necessários são 6 bar de pressão de ar comprimido, prescindindo do uso de energia para água gelada, dressagem dos eletrodos e exames de ultrassom para avaliar a regularidade e diâmetro do botão da solda como no processo *RSW*. Além disso, nenhuma estrutura de exaustão para os gases gerados pela queima do revestimento ou do substrato das chapas envolvidas foi necessária como ocorre quando o processo de soldagem a ponto é adotado.

Os conjuntos unidos por *clinch* para ajuste até a determinação dos parâmetros mais apropriados, a macrografia e os conjuntos para os ensaios de resistência à tração podem ser observados na Figura 25 a - c. A escolha para oferecer representatividade, foi obter 9 conjuntos para cisalhamento e 9 conjuntos para destacamento (3 conjuntos para cada sentido da laminação: r_0 , r_{45} e r_{90}).

Figura 24 - Equipamento TOX CEU 015 com monitoramento de curso e forças aplicadas na prensagem e no prensa-chapas.



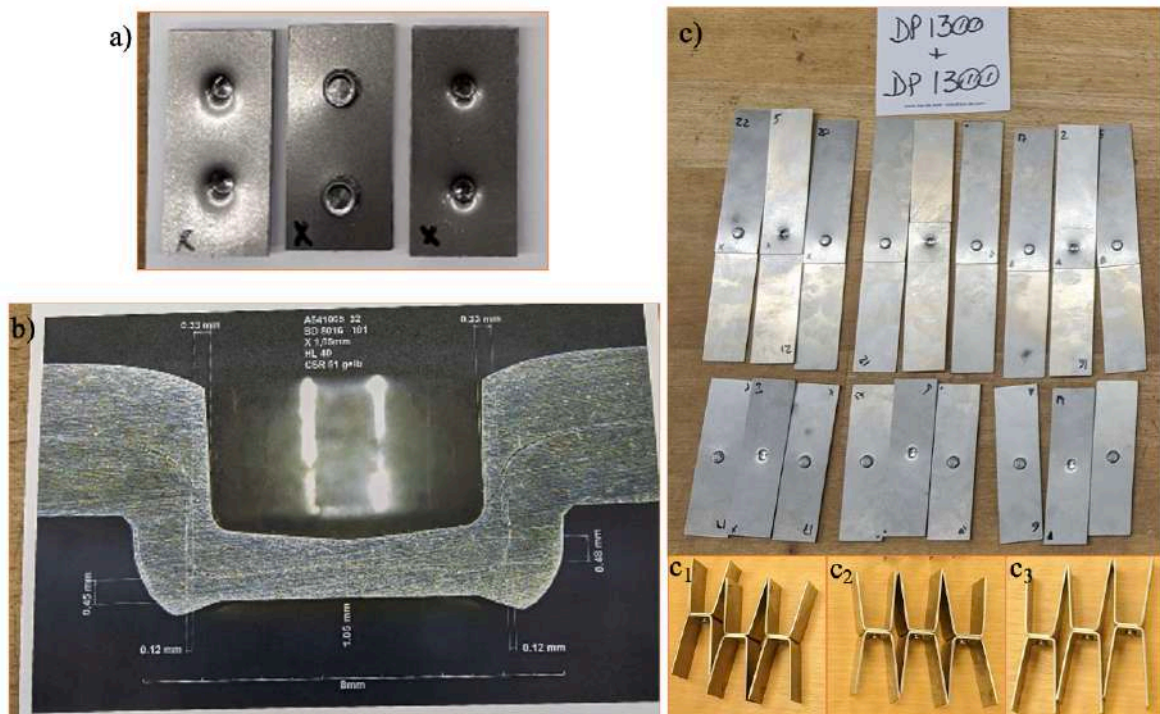
Fonte: o autor.

4.3 Da solda a ponto por resistência elétrica do aço bifásico 1,3 GPa com 1,5 mm de espessura

O método utilizado para se obter as soldas a ponto por resistência elétrica foi baseado em experimentos com os corpos-de-prova para ajustes do aço bifásico 1,3 GPa e também num estudo realizado pelo fabricante do Docol DP 1300M para a indústria automotiva alemã. O primeiro, fruto de um *DoE*, consistiu de um equipamento manual tipo C Düring programado por meio do software Pegasus HWH e um par de eletrodos padrão

F16 usinados para obter contato de 7 mm de diâmetro. A força de sujeição foi ajustada para 3,5 kN, a corrente em 11,9 kA e o tempo total de soldagem 370 μ s com vazão constante de resfriamento de água de 5 L.min⁻¹. Além dos ensaios de bancada para gerar a ruptura dos conjuntos soldados e assim ajustar os parâmetros de soldagem, o diâmetro do botão foi conferido em equipamento de ultrassom F1 Platform e a caracterização microestrutural por microscopia óptica, para analisar a microestrutura da seção dos botões de solda resultantes dos parâmetros escolhidos.

Figura 25 - Conjuntos para ajuste (a); macrografia da seção do *clinch* (b); os conjuntos para cisalhamento e destacamento antes e depois de dobrados (c); r45 (c1); r0 (c2); r90 (c3).



Fonte: o autor.

O segundo, consistiu em apresentar os dados obtidos em ensaios quase-estáticos de resistência ao cisalhamento e destacamento, perfil de dureza na região de solda e vida útil do eletrodo (SSAB, 2015). Neste estudo, os recursos para a realização das soldas a ponto por resistência elétrica consistiram no uso de equipamento de corrente contínua, eletrodo F16, com diâmetro de 5,5 mm resultando em no mínimo $5,5\sqrt{t}$ como diâmetro do botão (d). A força de sujeição em 4,5 kN dispõem de controle de corrente constante cujo o delta está em 1,9 kA para o range de 6,0 kA e 7,9 kA com tempo total de soldagem em 340 μ s. Além destas referências, foi realizada a caracterização microestrutural por microscopia óptica,

para analisar a microestrutura da seção do botão de solda e a projeção da vida útil do eletrodo objetivando 2000 ciclos.

A lista de equipamentos de suporte para que os processos *clinking* e solda a ponto por resistência elétrica pudessem ser adequadamente correlacionados, compreendeu para ambos, uma bancada com morsa, ferramentas como traçador, escala, martelo, dispositivo para conformar os conjuntos destinados ao destacamento sem afetar as uniões, cortadora e lixadeira metalográfica, os equipamentos para ensaios de tração além da solução de ataque metalográfico Nital 2%. Os recursos específicos para o *clinking* foram o espessímetro CTM085 e o óleo base éster com viscosidade em torno de 40 cSt para minimizar o atrito entre punção e matriz com as chapas. Quando os conjuntos estavam executados, i.e., unidos, as análises exigiram uma máquina de corte, uma de embutimento, uma de lixamento e polimento automática, durômetro para microdureza, microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura para caracterização microestrutural. No Apêndice 1 há a tabela com imagens e descritivo para melhor referência e pode ser consultada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, o assunto foi dividido, para maior clareza em caracterização mecânica do aço de ultra-alta resistência bifásico, o processo *clinch*ing e o processo de solda a ponto por resistência elétrica.

5.1 O aço bifásico Docol DP 1300M

As propriedades mecânicas dos aços bifásicos dependem diretamente de sua microestrutura correlacionada à composição assim como do processo produtivo, resultando na distribuição de ilhas martensíticas dispersas em matriz ferrítica. Os corpos-de-prova foram extraídos por meio de corte por laser seguindo as três direções, no sentido de laminação (r_0), a 45° em relação ao sentido da laminação (r_{45}) e no sentido transversal a laminação (r_{90}) como preconizado no desenho mostrado na Figura 26.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração das amostras com seção reduzida nos três sentidos de laminação propiciaram calcular a resistência média (r_m) utilizando a Equação 3, descrita na página 26. As curvas típicas de tensão de deformação do DP 1300M obtidas por meio de ensaios de resistência a tração seguindo a norma ASTM-E517-2019 são mostradas na Figura 27, juntamente com imagens de corpos-de-prova ensaiados e rompidos na sessão útil.

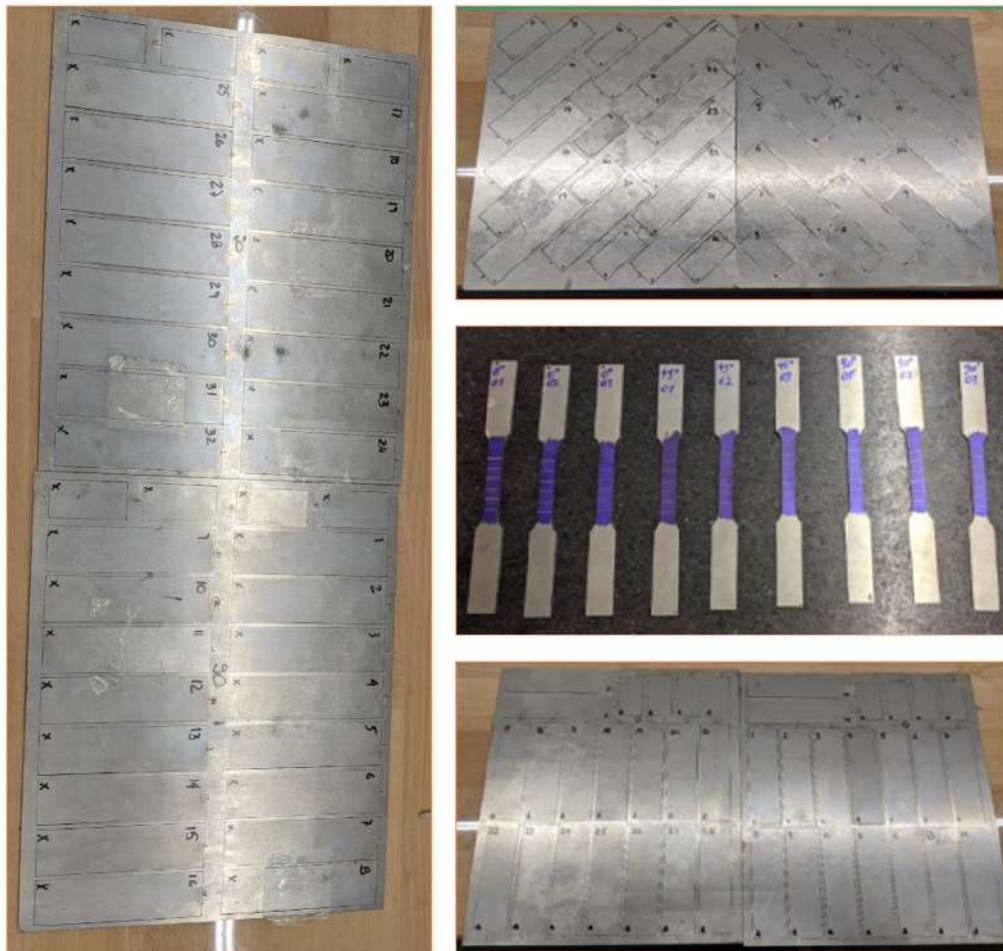
O intuito de se obter os corpos-de-prova para ensaios de resistência ao destacamento e ao cisalhamento da união por *clinch*ing e de seção reduzida para ensaio de tração até ruptura nos três sentidos da laminação permitiu esclarecer se há resultados significativamente distintos ou estes estariam dentro da variação já estudada quando se restringe tais ensaios a corpos-de-prova apenas no sentido da laminação.

Os resultados das cargas obtidas pelo *clinch*ing estão apresentados na Tabela 6. Os resultados retornados nos ensaios de tração no sentido da laminação dos corpos-de-prova com seção reduzida, retornaram 29,4% e 23,5% maior alongamento e estrição respectivamente, ao comparar os resultados no sentido da laminação e transversal ao

sentido da laminação, como mostrado na Tabela 3 e estão de acordo com a literatura do fabricante do aço Docol DP 1300M (SSAB, 2018).

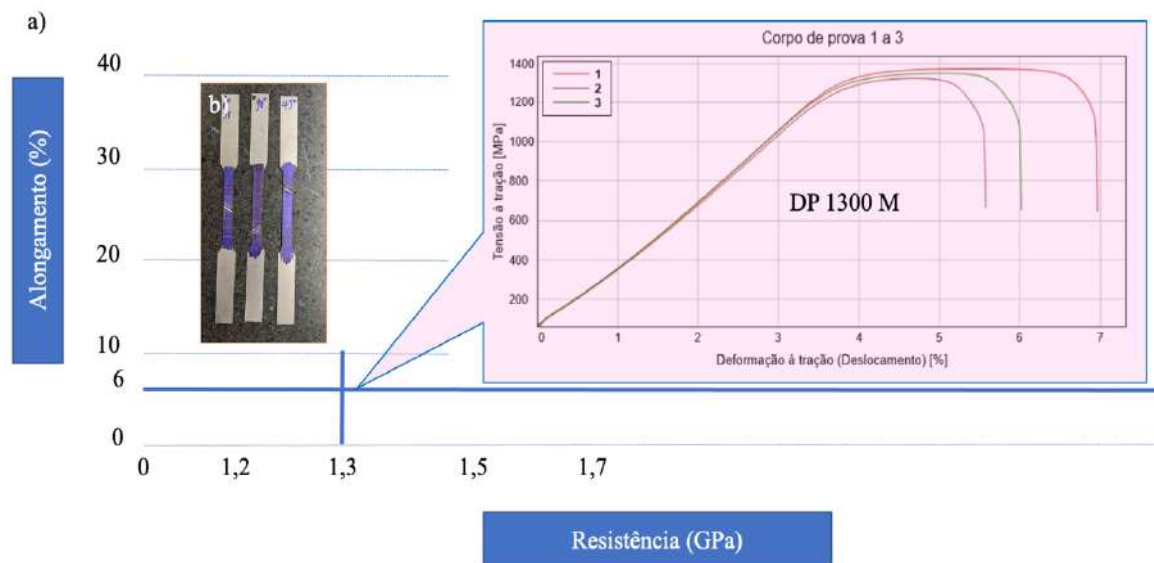
Desde o início, o que se buscava avaliar era se a taxa de conformabilidade propiciada pelo Docol DP 1300M seria suficiente para obter a conformação exigida quando se busca obter o ancoramento pelo processo *clinch*. Este processo empírico trazia risco de fratura do punção, da matriz ou dos dois ao objetivar uma linha de ancoramento aceitável dada a ultra-alta resistência de 1,3 GPa caso, este não se rompesse. Nota-se que diferentemente do que foi publicado no guia de aplicações para aços avançados (WORLD AUTO STEEL, 2021), onde para um aço DP 980 MPa ocorreu trincas na chapa do lado matriz rígida e a utilização de *clinch* com cisalhamento parcial das chapas foi recomendada, no âmbito do presente trabalho é possível afirmar que o aço avançado de primeira geração bifásico 1,3 GPa foi unido por *clinch* sem trincas do lado do punção ou da matriz.

Figura 26 - Obtenção dos corpos de prova para ajuste e ensaios de resistência à tração.



Fonte o autor.

Figura 27 - Gráfico do ensaio de resistência à tração (a); corpos-de-prova cortados por laser de acordo com a norma ASTM E517-2019 e rompidas nos ensaios (b).



Fonte: o autor.

A falha dúctil por cisalhamento dos corpos-de-prova com seção reduzida ocorreu de forma localizada após estrição média de 10,6% em consonância com a literatura do fabricante e com a literatura (SSAB, 2018; LIU et al., 2019).

Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos corpos-de-prova CPs ensaiados em máquina de ensaio de tração universal, sendo utilizado um CP por sentido da laminação em linha com boletim técnico do fabricante.

Resistência à tração (GPa)	Alongamento até a fratura (%)	Estricção da área (%)	Tipo do corpo-de-prova
1,3716	6,60	11,49	r0
1,3482	5,60	10,93	r45
1,3236	5,10	9,30	r90

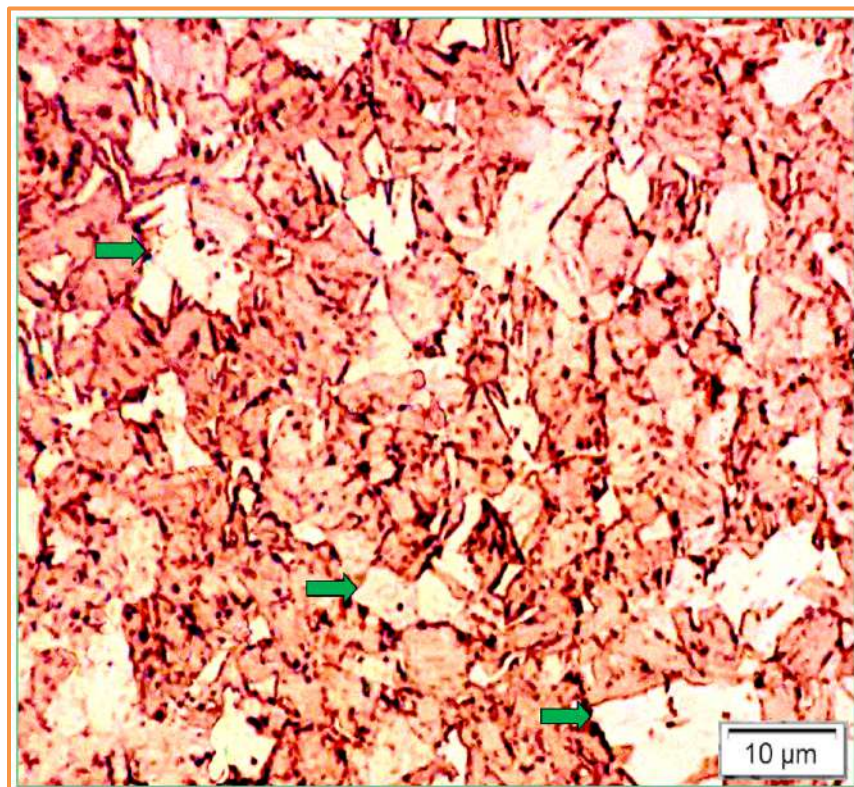
(-) Presente trabalho.

O benefício da capacidade de absorção da energia em caso de colisão amplamente difundido na indústria automotiva torna o aço bifásico de primeira geração preferencial para componentes como barra de proteção lateral, para-choques e outros componentes estruturais.

As amostras recebidas foram cortadas de 1250 x 2000 mm em peças de 250 x 300 mm e depois nos formatos para ajustes de parâmetros e para os ensaios de resistência à tração para cisalhamento e destacamento. Suas características foram avaliadas por meio de microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV), para se estimar o volume de martensita V_m e observar a microestrutura.

Aços bifásicos têm suas frações de martensita diretamente influenciadas ao processo termomecânico de fabricação e respectivas composições químicas. As médias desta fração, segundo a literatura, está em 9% para o DP 600, 17% para o DP 780, 33% para o DP 980 e 63% para o DP 1200 (LI et al., 2019). As amostras do aço DP 1300M foram polidas e atacadas com Nital 2%, sendo que a microestrutura é mostrada na Figura 28. Há limitação para se definir a matriz ferrítica e o volume de martensita (V_m) podendo ser considerado completamente martensítico o Docol DP 1300M conforme classifica o fabricante (SSAB, 2018). A sinergia alcançada pela presença dessas fases dura (martensita) e maleável (ferrita) propicia equilíbrio entre a resistência e conformabilidade (ASM INTERNATIONAL, 2012).

Figura 28 - Imagem da microestrutura de chapa do aço DP1300M, obtida por microscopia óptica de onde pode-se inferir estrutura completamente martensítica. Ataque Nital 2%.

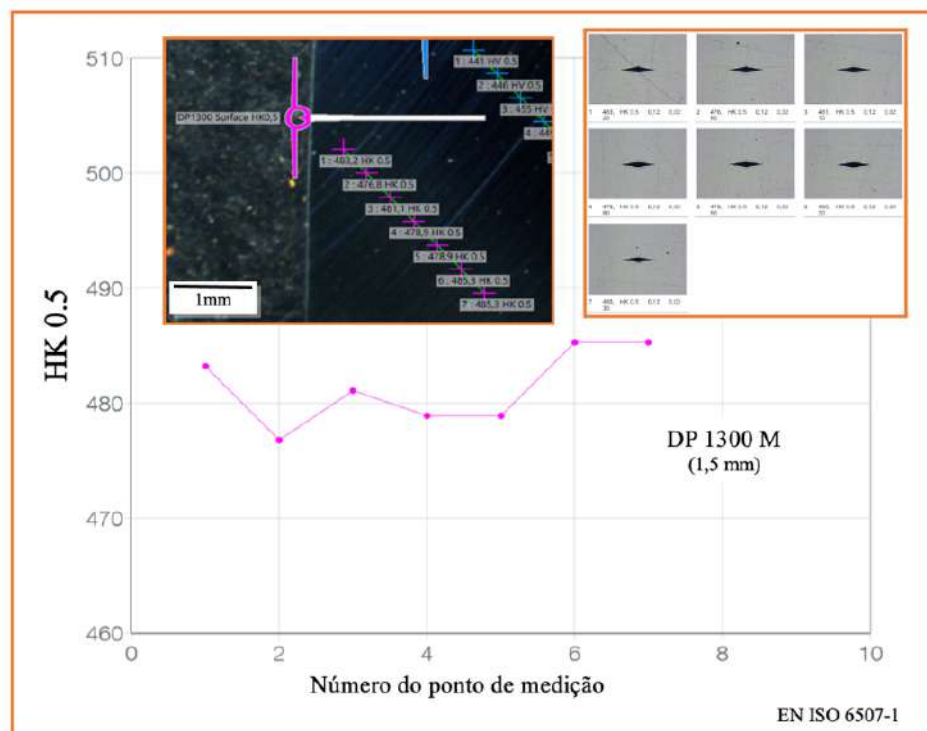


Fonte: o autor.

O perfil de microdureza foi realizado em equipamento automatizado Qness 60 A+ de acordo com a norma EN ISO 6507-1:2007. A média dos valores obtidos foi de 481 $HK_{0.5}$ e 449 $HV_{0.5}$ para duas sequências de sete pontos. Além disto, a média dos resultados obtidos de amostras da face transversal da seção reduzida dos corpos-de-prova r_0 , r_{45} e r_{90} está em 471 $HV_{0.5}$ conforme apresentado na Figura 29 - 31.

A literatura consultada recomenda obter a dureza de aços de ultra-alta resistência completamente martensíticos por meio da nanoindentação por conta da heterogeneidade da microestrutura i.e., diferentes fases, diferentes estruturas cristalinas e locais com diferentes composições químicas que poderá ser definida por análise de difração de raios X. (MILLAN-ESPITIA e KALIDINDI, 2022).

Figura 29 - Série de sete pontos de dureza Knoop_{0,5}.

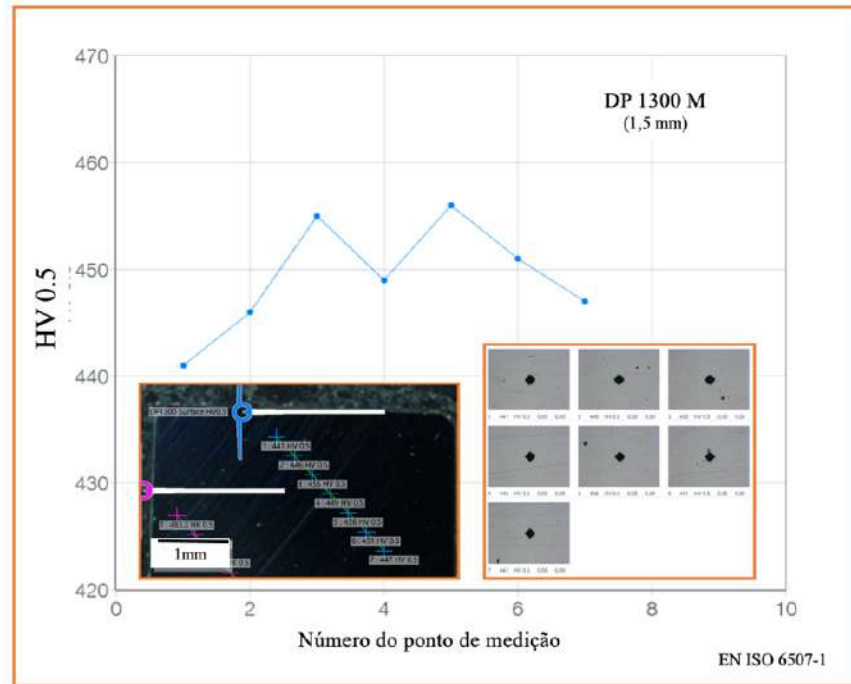


Fonte: o autor

As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores médios obtidos, assim como o desvio padrão calculado para pontos de medição por meio de microindentação realizados na face transversal dos corpos-de-prova obtidos da seção reduzida das amostras para ensaio de resistência à tração. O segmento selecionado estava na região mais distante possível da área de ruptura para evitar influência pela deformação por alongamento e possível

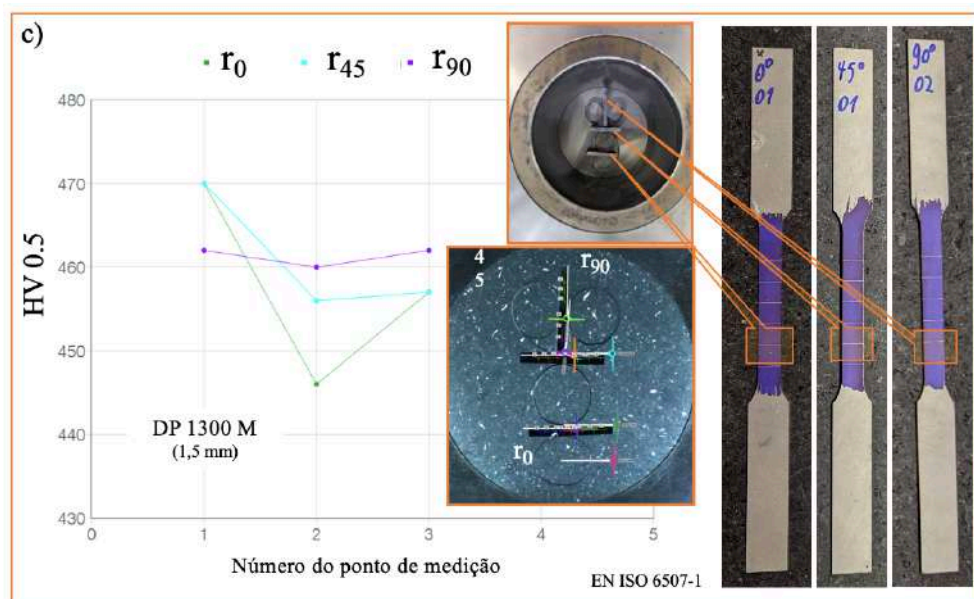
encruamento. Além desta técnica coadunar à possibilidade de se obter medições em áreas mais exíguas como a região de estricção ou pescoço do *clinch*, o menor desvio padrão consolidou a escolha por dureza Knoop.

Figura 30 - Série de sete pontos de dureza Vickers_{0,5}.



Fonte: o autor

Figura 31 - Série de três pontos para dureza Vickers_{0,5} da seção reduzida dos corpos-de-prova (r_0 , r_{45} e r_{90}) e as disposições no CP, micrografias e gráfico.



Fonte: o autor.

Tabela 4 - Resultados das sequências de sete pontos de medição da dureza Vickers e Knoop na superfície da amostra do aço DP 1300M.

	HV _{0,5}	HK _{0,5}
1	441	483
2	446	477
3	455	481
4	449	479
5	456	479
6	451	485
7	447	485
	Média e desvio padrão	
	449 ± 5	481 ± 3

Fonte: o autor.

Tabela 5 - Resultados das sequências de três pontos de medição de dureza Vickers_{0,5} na superfície transversal da seção reduzida das amostras dos corpos-de-prova com seção reduzida do aço do DP 1300M.

	HV _{0,5}		
	r0	r45	r90
1	470	502	470
2	446	487	456
3	457	491	457
	Média e desvio padrão		
	458 ± 10	493 ± 6	461 ± 6

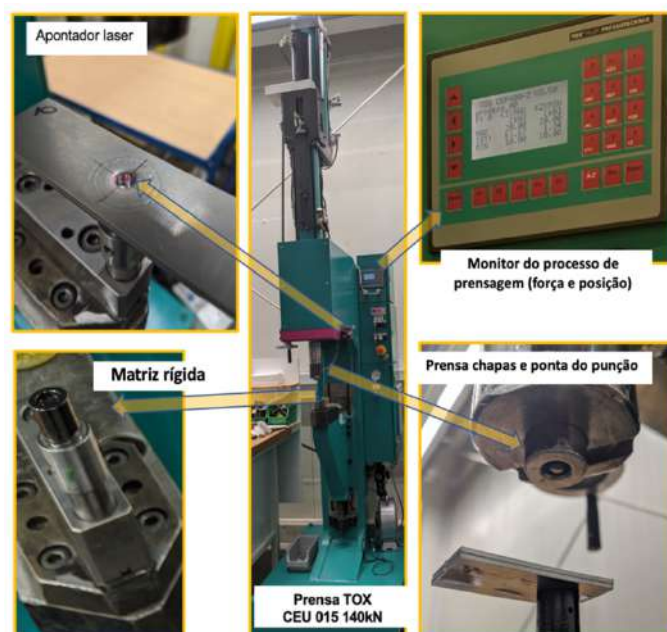
Fonte: o autor.

5.2 Os conjuntos unidos por *clinking*

A base epistemológica acerca do diâmetro do *clinking* preliminarmente escolhido, resulta que, tal diâmetro advém do esforço para cisalhamento e destacamento preconizados, da espessura e propriedades mecânicas dos materiais dos componentes a serem unidos e da otimização do espaço, acesso, flange disponível ou a combinação destes fatores.

A força de prensagem é proporcional ao diâmetro do *clinking* e das propriedades mecânicas dos materiais envolvidos. O procedimento para a realização e otimização do *clinking* durante o *DoE* com diversas combinações e variações de parâmetros como força de prensagem e força de sujeição no prensa-chapas buscando a melhor combinação entre punção e matriz, assim como obter a *df* mais adequada, dadas as propriedades do aço objeto deste experimento, para o ancoramento. O equipamento hidropneumático utilizado dispõe de monitoramento de curso total, força aplicada e apontador laser para adequado posicionamento do *clinking* nos conjuntos como mostrado na Figura 32 com capacidade para 140 kN.

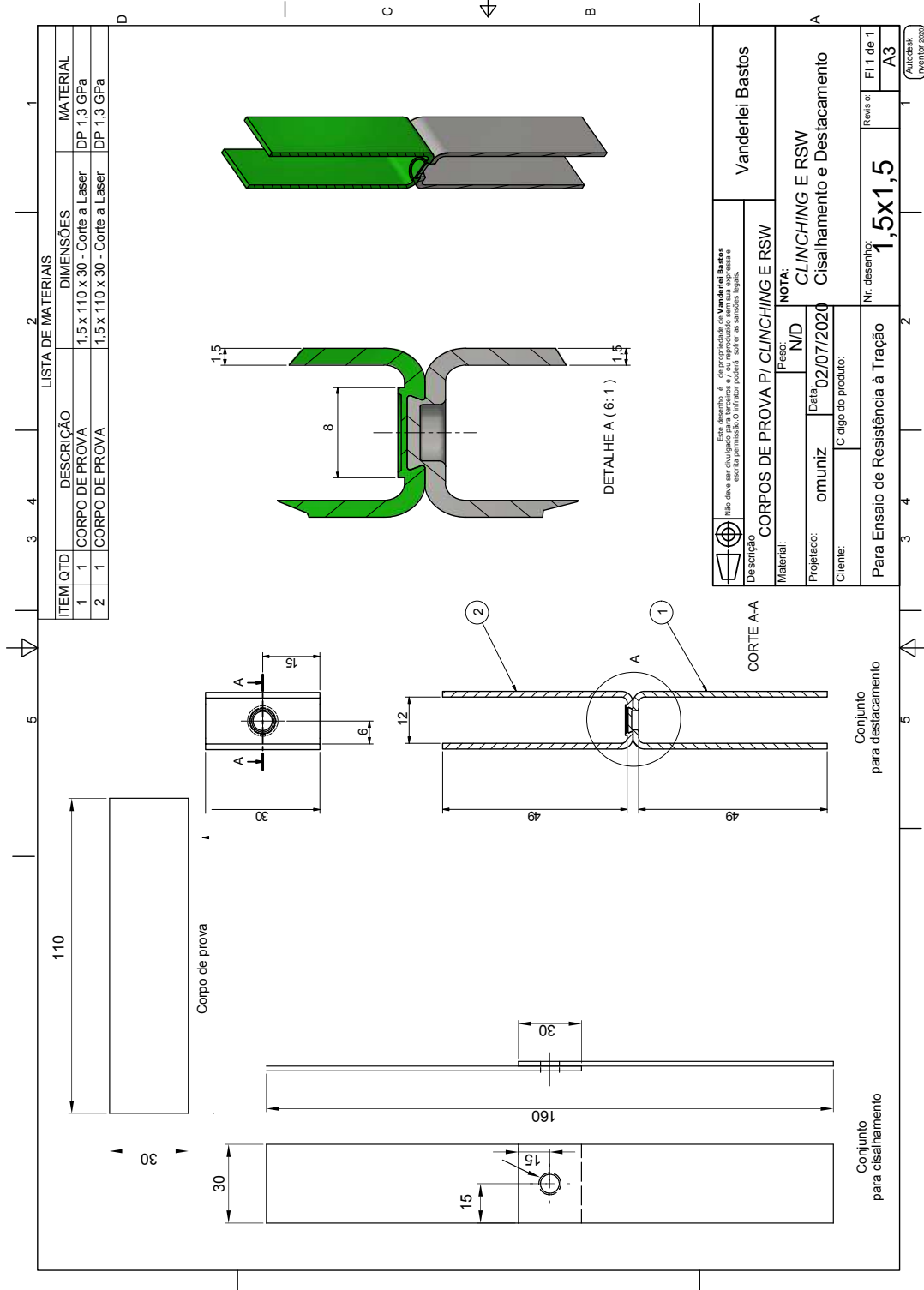
Figura 32 - Em sentido horário a partir do centro: equipamento TOX CEU 015 140 kN; Sistema de monitoramento de força e posição; prensa-chapas, ponta do punção e conjunto montado em aço DP 1300M (25x50x3,00 mm) ainda não removido da cavidade da matriz.



Fonte: o autor.

As amostras para ensaio de cisalhamento e destacamento do aço DP 1300M para o processo *clinch* foram preparadas com base na norma JIS Z 3136:1999, conforme anexo 2. As dimensões da amostra e a localização do *clinch* estão apresentadas na Figura 33.

Figura 33 - Desenho referência para programar o equipamento de corte laser e obter os corpos-de-prova.



Fonte: o autor.

A sobreposição das chapas a serem unidas foi ajustada para 30 mm no caso do conjunto para o ensaio de resistência à tração para cisalhamento e total para o ensaio de resistência à tração para o destacamento, como pode ser observado na Figura 34. Além disto, para o destacamento, um dispositivo foi utilizado em morsa de bancada para garantir a deformação adequada para a garra do equipamento utilizado para os ensaios de resistência à tração sem dilapidar a robustez dos conjuntos unidos.

Figura 34 - Conjuntos montados para ensaio de resistência à tração por cisalhamento e destacamento *clinchng*.



Fonte: o autor.

O *clinchng* resultado de matriz rígida e de cavidade com 8 mm de diâmetro, foi a escolha após sete variantes do *DoE* conforme mostra a Figura 35 a -c. As melhores práticas preconizam isenção de artefatos como trincas, excentricidade entre punção e matriz assim como um perpendicularismo inferior a 3° de inclinação em relação ao plano do conjunto a ser unido. Após a escolha, um experimento com 10 amostras do DP 1300M com dimensões de 25x50x1,50 mm foi realizado com dois *clinchings* cada.

Os resultados obtidos por meio da análise dos dados de força de prensagem, assim como e aspecto resultantes quanto à topologia, forças de sujeição no prensa-chapas, assim como a necessária combinação de punção e matriz foram preconizadas. O *DoE* permitiu estabelecer as premissas para a obtenção dos conjuntos por *clinch* destinados aos ensaios de resistência à tração. O *clinch* otimizado requereu 87 kN de força aplicada no punção e 32 kN de força de sujeição no prensa-chapas. A matriz dentre as nove experimentadas foi a BD8016 e possui cavidade com 1,6 mm de profundidade. O punção A541005 foi preconizado dentre os cinco testados e possui ponta cônica e diâmetro de 5,4 mm. A simetria necessária para o *clinch* foi obtida e é evidenciada pela área de estrição (p) de 0,33 mm e ancoramento (a) de 0,12 mm com a dimensão final (d_f) mínima obtida de 1,05 mm como pode ser observado na seção dimensionada na Figura 36.

Figura 35 - *DoE* para a escolha do conjunto de punção e matriz (a); seção do *clinch* resultante dos parâmetros escolhidos (b); o conjunto de punção e matriz preconizados c_1 e c_2 .

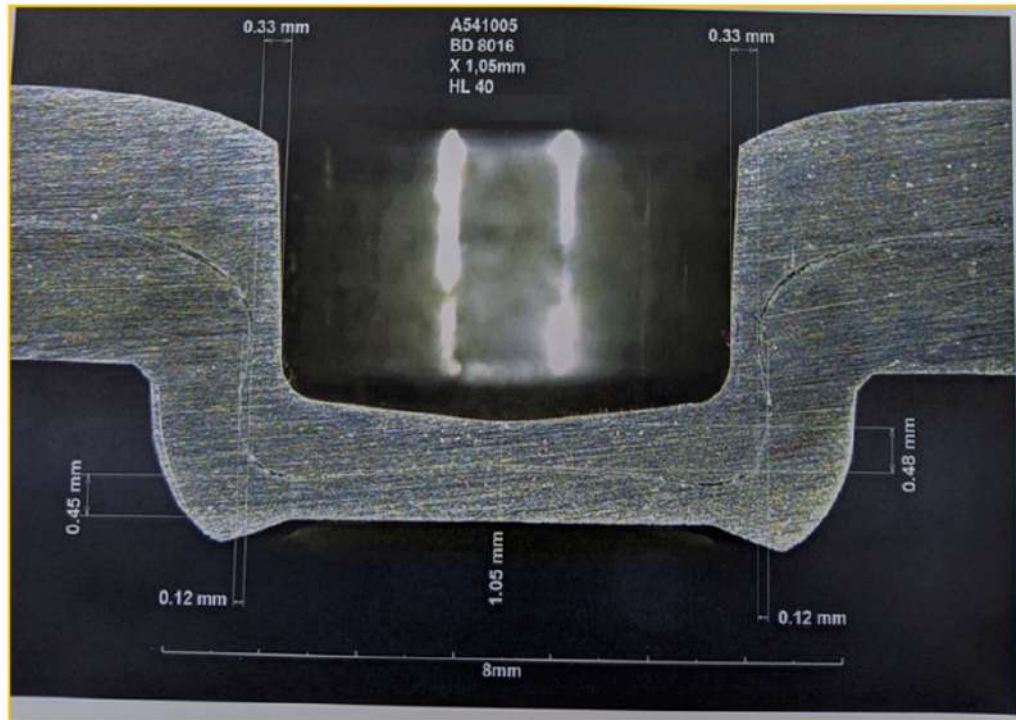


Fonte: o autor.

O resultado dos 18 conjuntos unidos pelo processo *clinch* para cisalhamento e para destacamento, sendo três conjuntos para r_0 , r_{45} e r_{90} requereram 87 kN de força aplicada no punção e 32 kN no prensa-chapas. O conjunto matriz BD8016 de 8 mm de diâmetro com cavidade 1,6 mm de profundidade e punção A541005 com ponta cônica e diâmetro de 5,4 mm puderam executar os ciclos e não apresentaram fragilização em inspeção visual. Apesar do uso de baquelite para borda, após o ataque com Nital 2%, interrupção em água e enxague com álcool, o agente de ataque afluou tardiamente o que

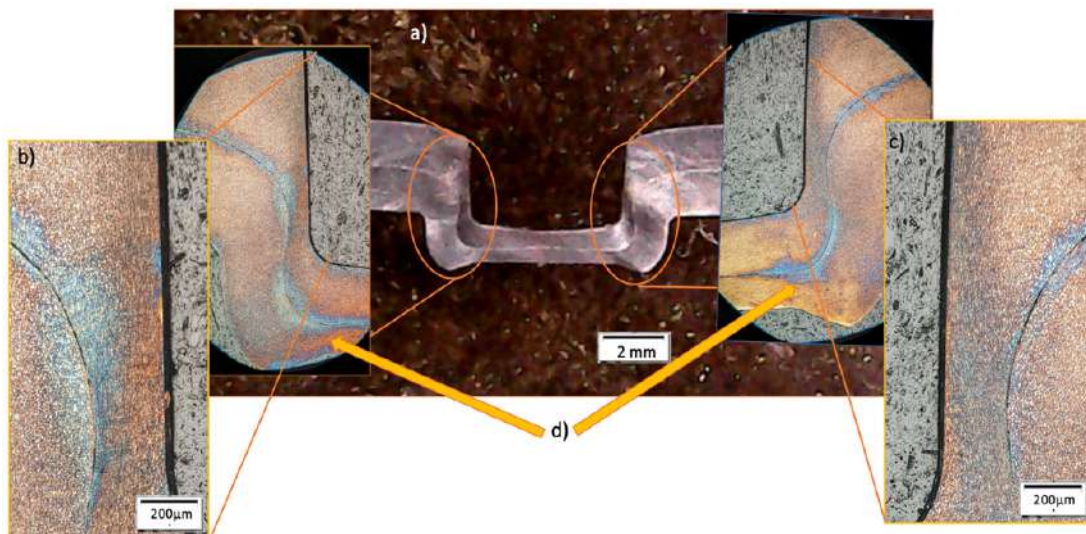
explica as regiões azuladas no esquema apresentado com macrografia e micrografias na Figura 37.

Figura 36 - Seção dimensionada do TOX *clinking* do aço DP 1300M - duas chapas de 1,5 mm de espessura usando punção A541005 e matriz BD 8016.



Fonte: o autor.

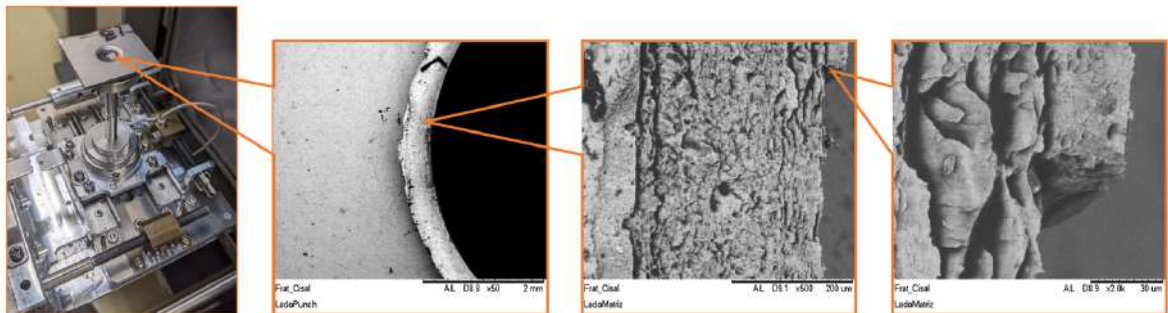
Figura 37 - Esquema com macrografia / micrografia do *clinking* de chapas do DP 1300M (a); os detalhes da formação da região de estricção após ataque com Nital 2% (b - c); os artefatos causando a região azulada como resultado do agente de ataque químico que aflorou do embutimento.



Fonte: o autor.

Uma avaliação da região de fratura nos corpos-de-prova unidos por *clinching* e utilizados nos ensaios de resistência à tração por cisalhamento foi executada e os resultados indicam fratura dúctil como esperado para um procedimento quase-estático e pode ser observada em detalhes na Figura 38. Os gráficos para cisalhamento e destacamento são apresentados nas Figuras 39 a 44.

Figura 38 - Microscopia eletrônica de varredura da região de cisalhamento indicando fratura dúctil.



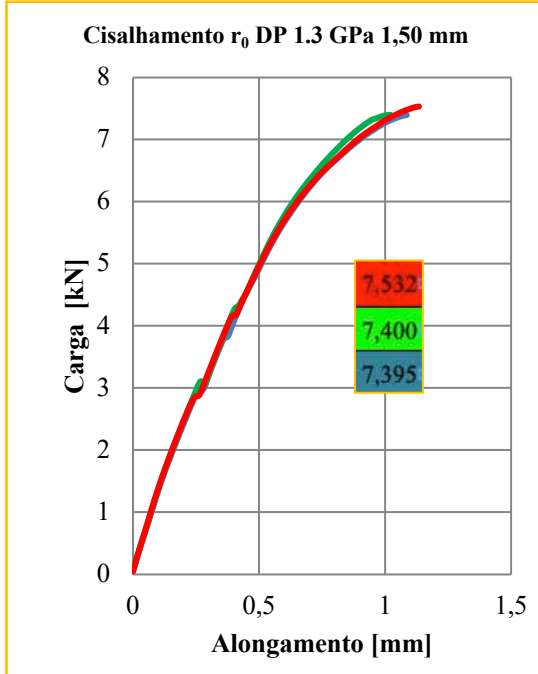
Fonte: o autor.

Tabela 6 - Sumário dos resultados obtidos após a execução dos corpos-de-prova de ajuste, obtidos em d_f e esforço encontrado para os 18 conjuntos montados sendo três para cada sentido da laminação nos ensaios de resistência ao cisalhamento e ao destacamento em kN.

Clinching DP 1300M + DP 1300M											
Corpos-de-prova	Lado punção espessura (mm)	Lado matriz espessura (mm)	TOX_Rep ort #	Dimensão final d_f			Amostras para cisalhamento		Amostras para destacamento		
				d_f nominal (mm)	d_f mínima (mm)	d_f máxima (mm)	d_f aferida (mm)	Resultados (kN)	d_f aferida (mm)	Resultados (kN)	
r ₀	1,50	900001 01DE-1	1,05	0,95	1,15	3 - 1,04	7,532	4 - 1,02	5,592		
						2 - 1,05	7,400	6 - 1,05	4,253		
						1 - 1,00	7,395	5 - 1,02	4,202		
1 - 1,07						7,378	5 - 1,05	5,102			
2 - 1,08						7,317	4 - 0,99	4,969			
3 - 1,03						7,289	6 - 1,05	4,178			
1 - 1,04						7,613	4 - 1,05	5,055			
2 - 1,02						7,325	6 - 0,98	4,457			
3 - 1,02						7,177	5 - 1,00	4,125			
Punção	A541005					Auxiliar para estampagem		InduOil HL40			
Matriz	BD8016										

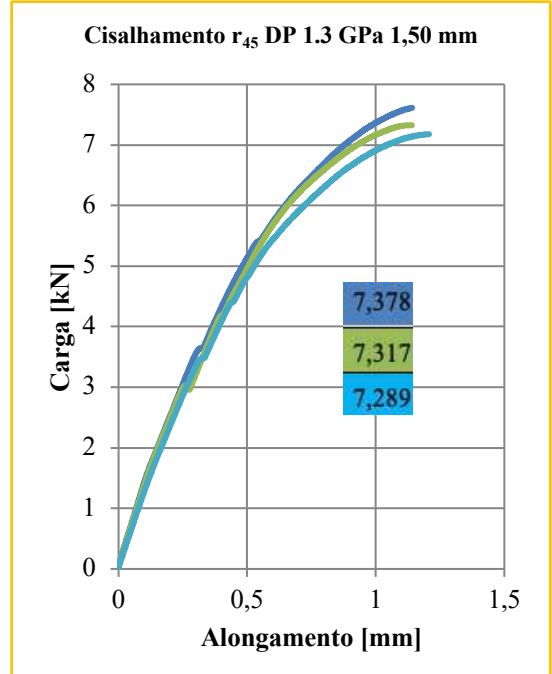
Fonte: o autor.

Figura 39 - Gráfico de cisalhamento dos três conjuntos montados por *clinch*ing e sentido da laminação r_0 .



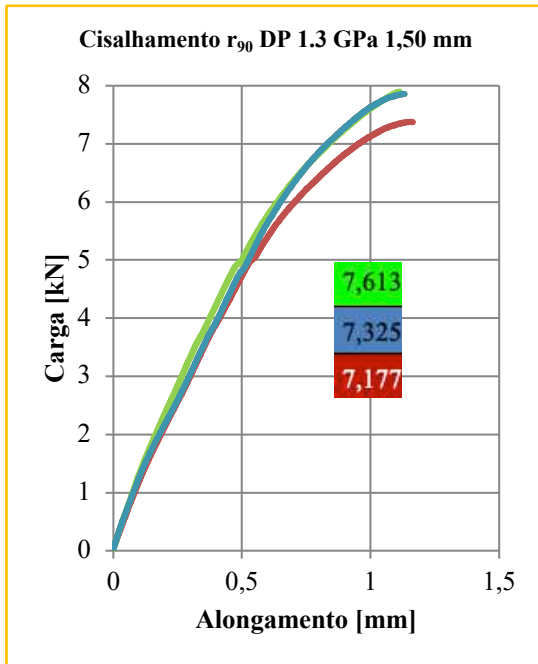
Fonte: o autor.

Figura 40 - Gráfico de cisalhamento dos três conjuntos montados por *clinch*ing e sentido da laminação r_{45} .



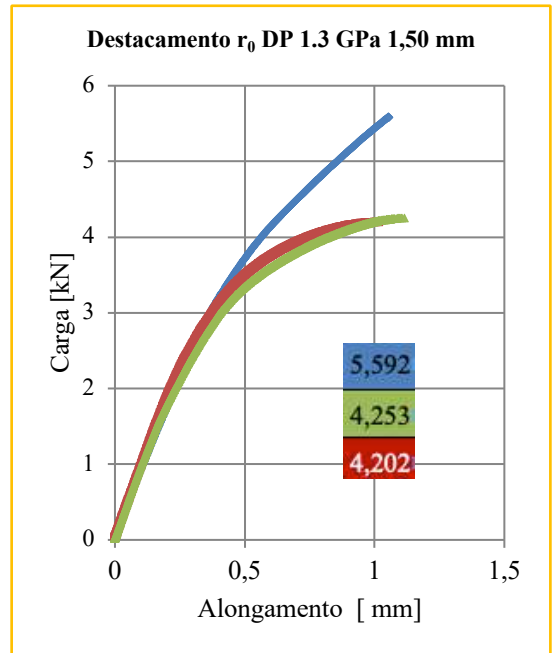
Fonte: o autor.

Figura 41 - Gráfico de cisalhamento dos três conjuntos montados por *clinch*ing e sentido da laminação r_{90} .



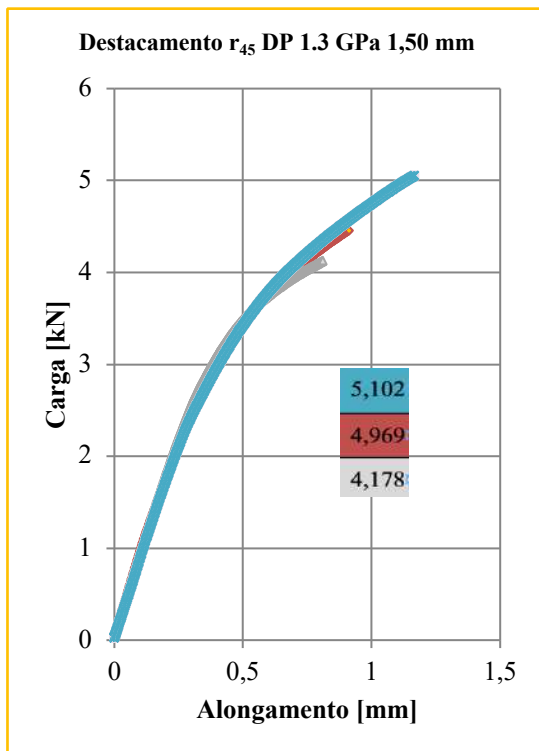
Fonte: o autor.

Figura 42 - Gráfico de destacamento dos três conjuntos montados por *clinch*ing e sentido da laminação r_0 .



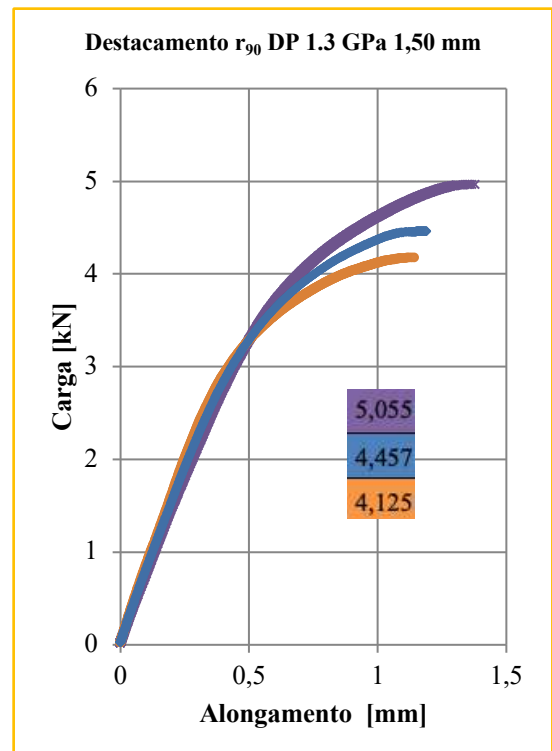
Fonte: o autor.

Figura 43 - Gráfico de cisalhamento dos três conjuntos montados por *clinch* e sentido da laminação r₄₅.



Fonte: o autor.

Figura 44 - Gráfico de cisalhamento dos três conjuntos montados por *clinch* e sentido da laminação r₉₀.



Fonte: o autor.

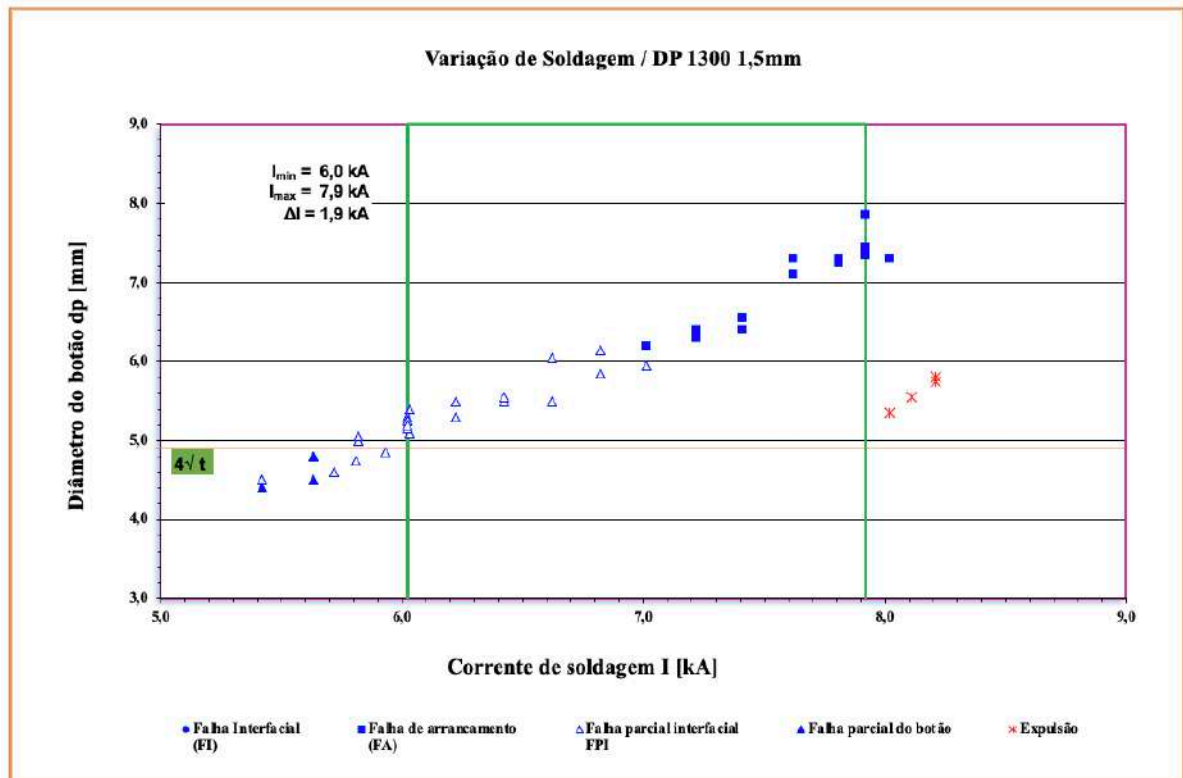
5.3 Os conjuntos unidos por solda a ponto por resistência elétrica

As referências para a solda a ponto por resistência elétrica do aço bifásico de 1,3 GPa de resistência foram obtidas de duas formas, sendo um ensaio em laboratório com os corpos de prova até a caracterização microestrutural da seção e baseado no estudo realizado em 2014 pela *Svenskt Stål Aktiebolag* (SSAB) para a aplicação na indústria automotiva e cumprindo as instruções do guia *SEP 1220-2* e aqui estão resumidos para facilitar a apresentação no âmbito desta dissertação. A solda a ponto por resistência elétrica foi realizada com máquina de solda de corrente contínua (*MFDC*), eletrodo F16 de cobre com área no diâmetro de contato em 5,5 mm, a força de sujeição de 4,5 kN e tempo total de 340 μ s para soldagem.

O protocolo de área de soldagem é mostrado na Tabela 7. O ajuste dos parâmetros de corrente e diâmetro do botão *d* para a soldagem foram definidos conforme evidenciam as linhas verdes na Figura 45. Os dados utilizados para a definição dos parâmetros também

podem ser observados na Tabela 7, assim como na Figura 46, as referências para determinação de vida útil do eletrodo.

Figura 45 - Gráfico delimitando os parâmetros para a corrente (I) correlacionando ao modo de falha.

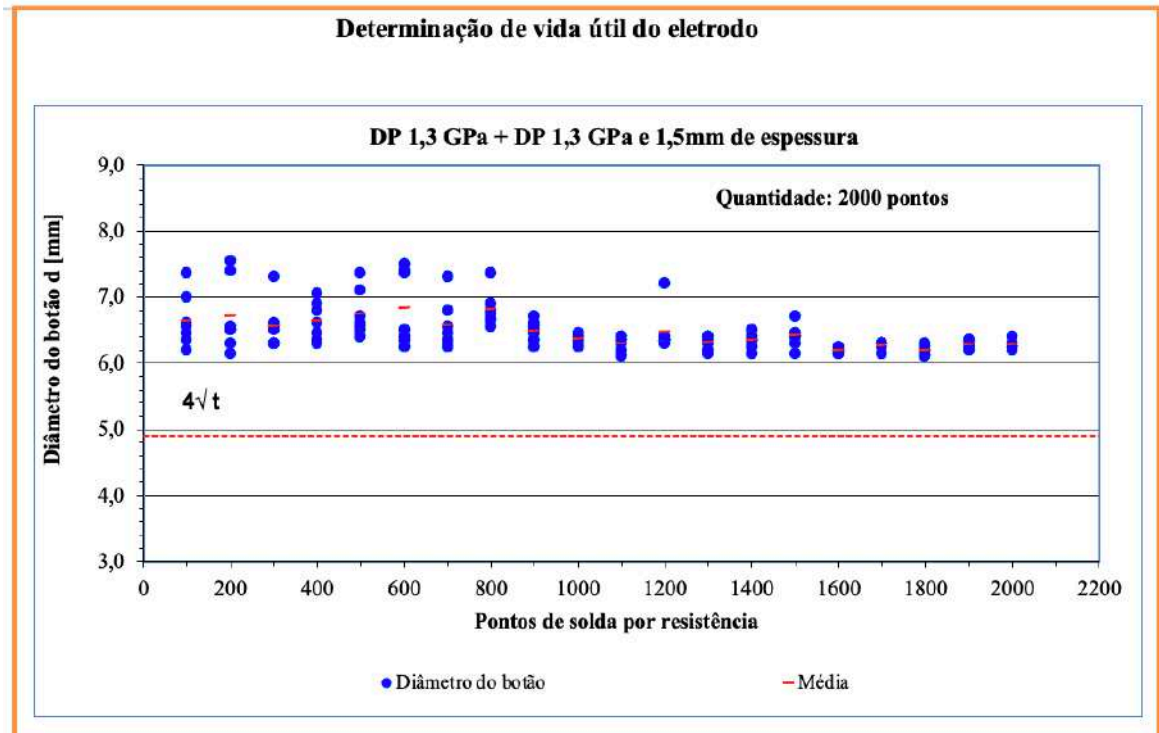


Fonte: adaptado de (SSAB, 2015).

O comportamento da corrente de soldagem a ponto por resistência elétrica quando esperado um $d = 6\sqrt{t}$ foi determinado na corrente mínima e máxima e é representado na Tabela 7. Na Tabela 8, os resultados para os conjuntos soldados de 1 a 5, em mínima corrente de soldagem retornou média de 6,51 kN de resistência para destacamento. Já na Tabela 9 são mostrados os resultados para os conjuntos soldados e 6 a 10 em máxima corrente de soldagem, retornou média de 9,31 kN.

As Figuras 47 e 48 permitem observar os gráficos das curvas concernentes para cisalhamento e destacamento nos ensaios de resistência a tração quase-estáticos.

Figura 46 - Gráfico dos resultados para a determinação da vida útil do eletrodo.



Fonte: adaptado de (SSAB, 2015).

Tabela 7 - Faixa de corrente escolhida com ênfase no modo falha FA cuja extensão varia entre 6,0 kA e 7,9 kA.

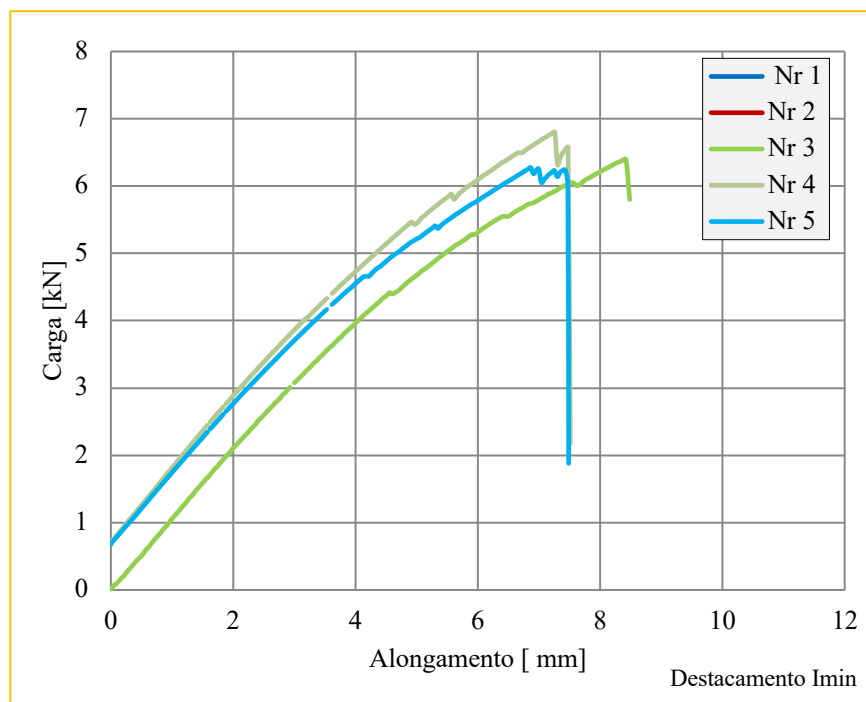
		Variação de soldagem para definir a corrente (I)					
	Corrente kA	Falha Interfacial (FI)	arrancamento (FA)	Falha parcial interfacial FPI	botão	Expulsão	$4\sqrt{t}$
I_{max}	7,92		7,85				4,90
	7,92		7,35				
	7,92		7,45				
	5,63				4,50		
	5,72			4,60			
	5,81			4,75			
I_{min}	5,93			4,85			
	6,02			5,30			

Fonte: adaptado de (SSAB, 2015).

Tabela 8 - Mínima corrente (I_{min}) para falha por arrancamento.

Min. Corrente de soldagem. I_{min}				
Corpos- de-prova nr	Destma x [kN]	AlongFma x [mm]	d [mm]	Modo de falha
1	6,25	8,69	5,0	FA
2	6,84	8,85	5,1	FA
3	6,39	8,42	5,0	FA
4	6,80	7,26	5,2	FA
5	6,27	6,86	4,9	FA
Média	6,51	8,02	5,04	
Max	6,84	8,85	5,20	
Min	6,25	6,86	4,90	
Desvio +	0,33	0,83	0,16	
Desvio -	0,26	1,16	0,14	
Des. padrão	0,26	0,80	0,10	

Fonte: adaptado de (SSAB, 2015).

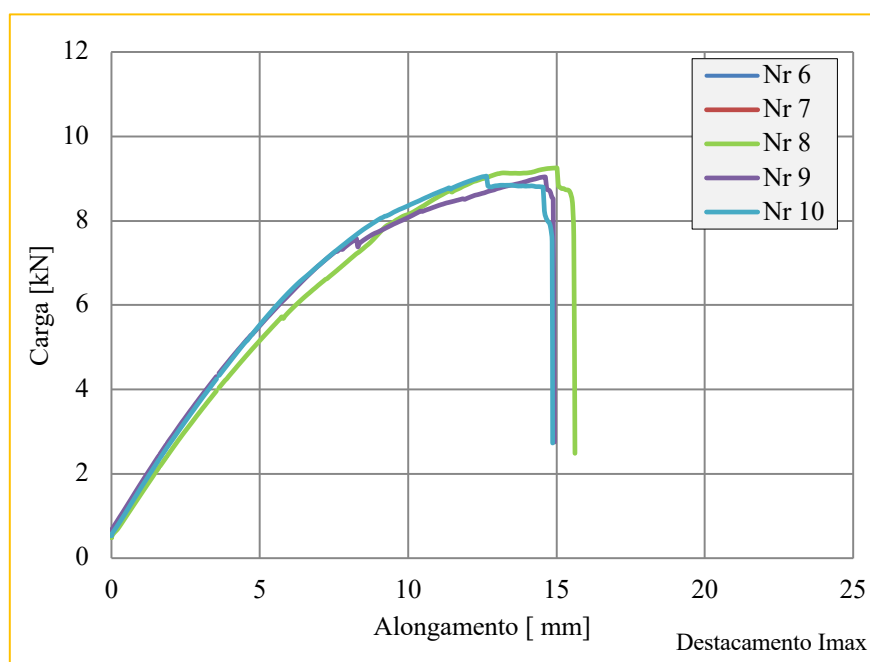
Figura 47 - As curvas para as cargas de destacamento quando (I_{min}).

Fonte: adaptado de (SSAB, 2015).

Tabela 9 - Máxima corrente (I_{max}) para falha por arrancamento.

Max. Corrente de soldagem I_{max}				
Corpos- de-prova nr	Destmax [kN]	AlongFma x [mm]	d [mm]	Modo de falha
6	9,86	14,50	7,6	FA
7	9,32	12,76	7,4	FA
8	9,26	14,98	7,3	FA
9	9,04	14,59	7,3	FA
10	9,06	12,64	7,5	FA
Média	9,31	13,89	7,42	
Max	9,86	14,98	7,60	
Min	9,04	12,64	7,30	
Desvio +	0,55	1,09	0,18	
Desvio -	0,27	1,25	0,12	
Des. padrão	0,30	0,99	0,12	

Fonte: adaptado de (SSAB, 2015).

Figura 48 - As curvas para as cargas de destacamento quando (I_{max}).

Fonte: adaptado de (SSAB, 2015).

5.4 Ensaio de resistência à tração para cisalhamento e destacamento

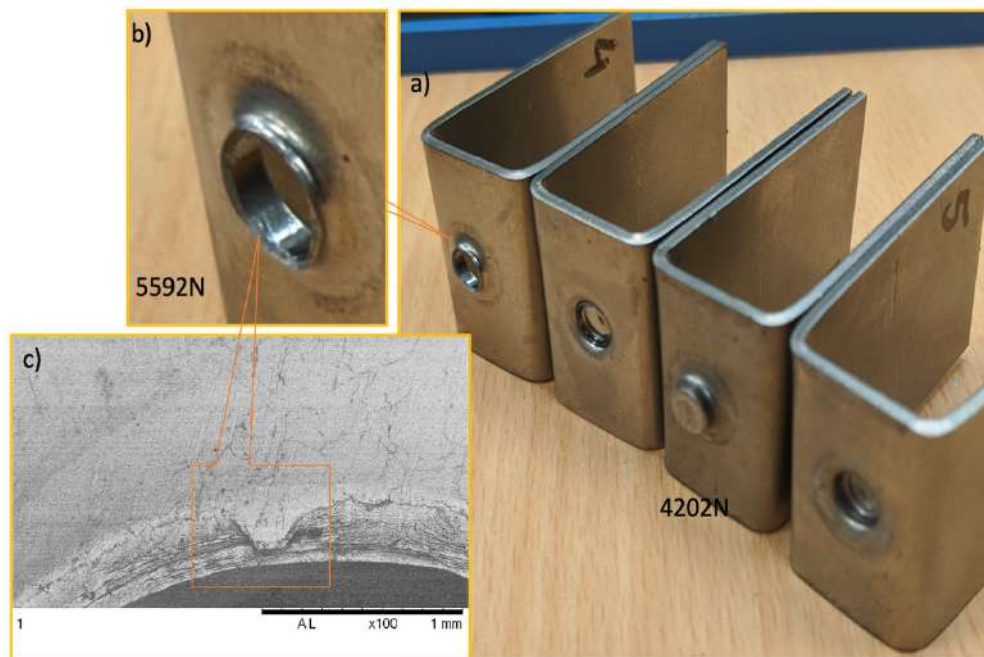
Os ensaios de resistência à tração para cisalhamento e destacamento foram realizados em um equipamento Zwick/Roell Z030 de ensaio de resistência à tração conforme mostrado na Figura 49.

Figura 49 - Equipamento para os ensaios de resistência à tração 30 kN.



Fonte: o autor.

Figura 50 - Imagens dos corpos-de-prova para destacamento de *clinchng* (a); dois tipos de falha um sendo o deslizamento e o destacamento, que é quando ocorre a ruptura (b); o inserto mostra uma imagem de elétrons secundários obtidas no MEV do detalhe na região da fratura na região de estrição do *clinchng* (c).



Fonte: o autor

Os valores dos esforços nos ensaios de tração para cisalhamento e destacamento foram obtidos e podem ser revisitados na tabela 6 ao avaliar 36 CPs, sendo três conjuntos montados para cada sentido da laminação r_0 , r_{45} e r_{90} . A distância ou abertura de prendimento dos conjuntos para cisalhamento foi ajustada para 90 mm e para destacamento em 30 mm. Além disso, avaliações visual, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura foram feitas para discernir o esquema dos mecanismos de falha e são apresentados na Figura 50 a - b.

Após a conformação com estiramento de grãos encruando material e produzindo uma redução na espessura da chapa de 1,5 mm para 0,33 mm na região de estricção do *clinch*, na chapa do lado do punção a fratura é mostrada no detalhe da Figura 50 c.

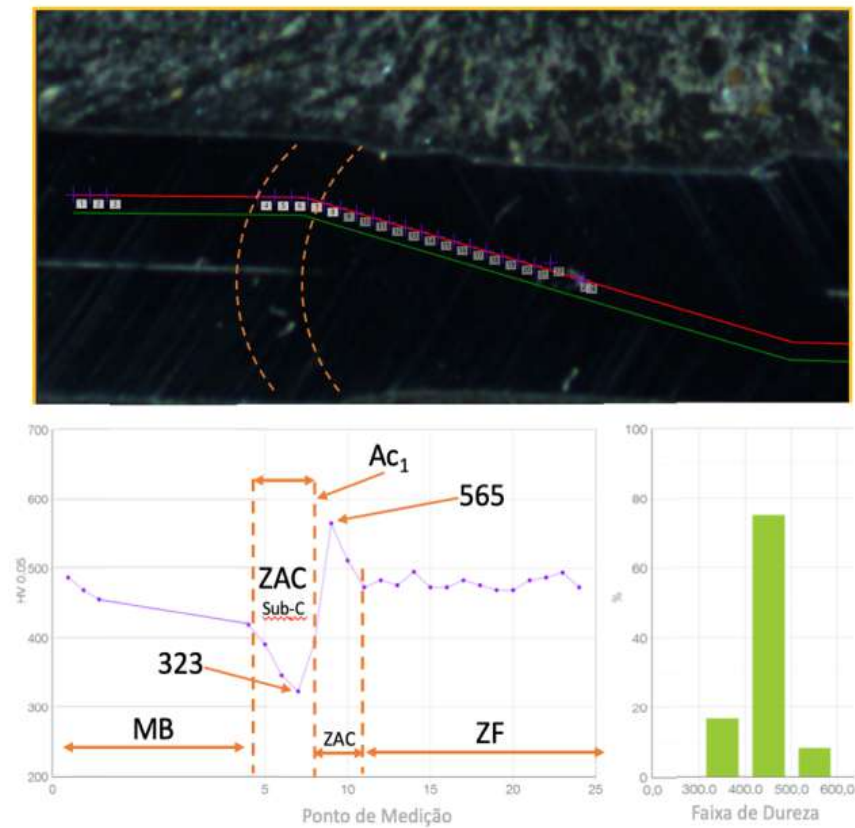
5.5 Ensaio de microdureza

O teste de microdureza foi realizado com base no que preconiza a EN ISO 6507-1:2007. A correlação entre microdureza Vickers_{0,5} e Knoop_{0,5} pode ser estabelecida, de acordo com os dados da Tabela 4, em valores 7,1% superiores para Koop. O ensaio de microdureza HV_{0,05} com o tempo de cinco segundos de carga foi realizado em 24 pontos na seção do botão da solda a ponto por resistência elétrica (CHUKO; GOULD, 2002). As informações sobre alterações de microdureza em áreas específicas das uniões foram obtidas e são cruciais para evidenciar a diferença entre estes dois métodos.

No caso de solda a ponto por resistência elétrica, foram avaliados o material de base (MB), a zona afetada pelo calor (ZAC) e a zona de fusão (ZF). Observou-se a linha que forma o típico perfil de chapéu (do inglês *top-hat*). A microdureza oscilou do menor valor em 323 HV_{0,05} e o maior em 565 HV_{0,05} corroborando na diferenciação dos métodos com e sem processo térmico como mostra a Figura 51.

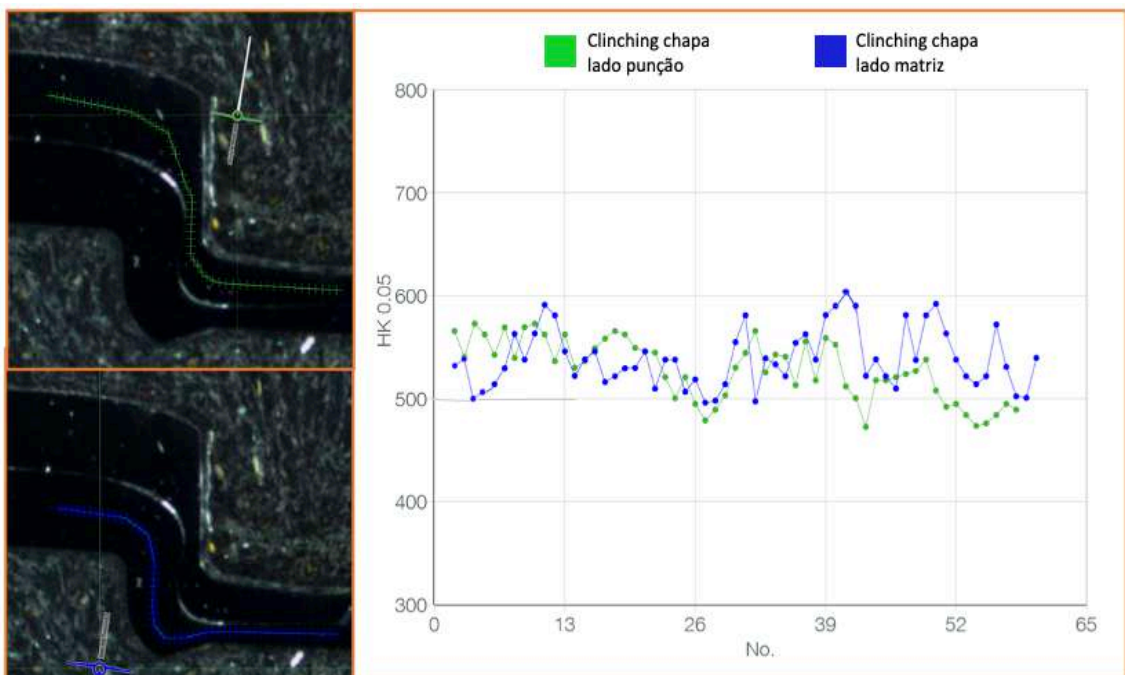
O *clinch* por ser um método de união baseado em conformação a frio, a variação na dureza se dá pelo encruamento do material em especial na região de estricção, mas no âmbito deste estudo se manteve acima de 480 HK_{0,05}. Além disso, 58 pontos com espaçamento de 130 μ m entre eles do MB passando pela região de estricção e região da dimensão final foram obtidos em média 534 HK_{0,05} lado matriz e 528 HK_{0,05} lado punção conforme mostrado na Figura 52.

Figura 51 - Correlação entre os pontos medidos na amostra e os valores com o esquema da distribuição de dureza.



Fonte: o autor.

Figura 52 - Pontos de aquisição da microdureza emulando a linha de ancoramento lado punção e lado matriz.



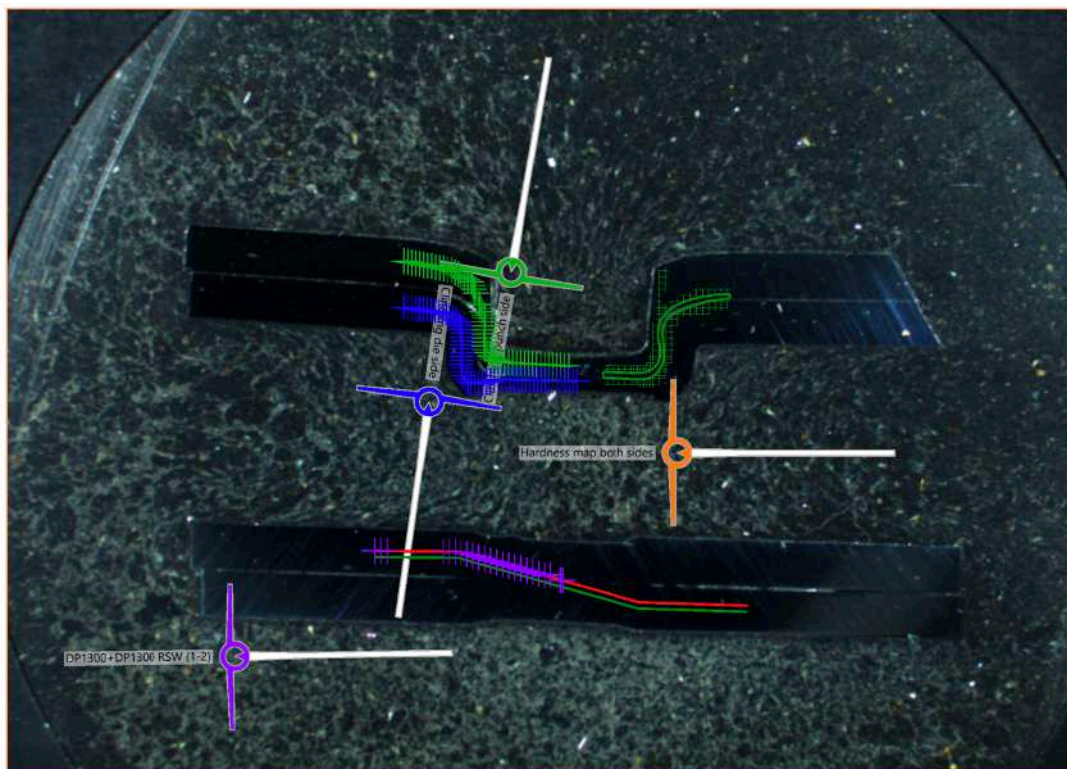
Fonte: o autor.

Uma região delimitada com auxílio de microscopia óptica foi delineada para medir em pontos das regiões do (MB) e de encruamento (AE) do *clinch*, mapeando o entorno da linha de ancoramento em 400 pontos com distâncias entre eles de 130 μm como mostrado na Figura 53.

A variação nos valores da microdureza na linha de ancoramento do *clinch* é menor que a observada no seção do botão de solda a ponto por resistência elétrica como esperado pela ausência do processo de aporte de calor.

O maior valor de microdureza no *clinch*, ou seja, 602 $\text{HK}_{0,05}$, foi obtido na zona de preenchimento do anel da matriz indicando nesta medição uma área predominante de martensita. Os valores de microdureza na solda a ponto por resistência elétrica foram menores na zona afetada pelo calor na faixa *Sub-C* (do inglês *sub critical softening zone*) caindo para 323 $\text{HV}_{0,05}$ cerca de 57% do valor na área da zona de fusão. A variação dos extremos de dureza na solda a ponto por resistência elétrica é esperada, no entanto para o *clinch* apenas uma elevação para os pontos de encruamento mais acentuado na região da região de estrição, quando comparados ao material de base.

Figura 53 - Linha de pontos lado punção (cor verde), lado matriz (cor azul), mapa com 400 pontos na região da linha de ancoramento (cor verde escuro) e os pontos de medição no conjunto soldado a ponto por resistência (cor lilás).



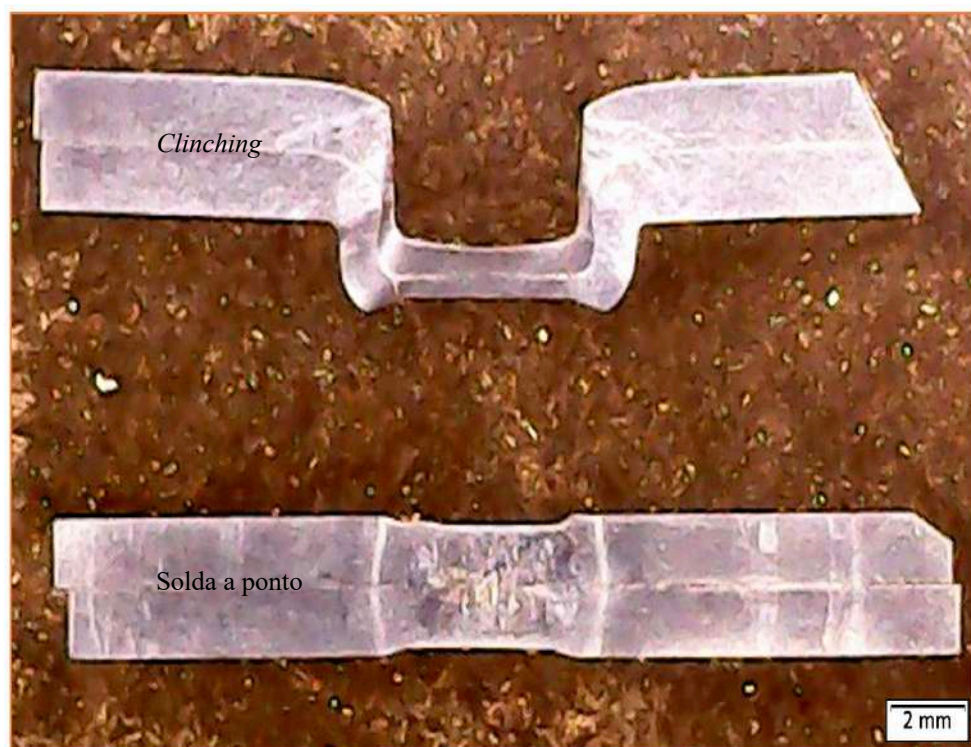
Fonte: o autor

Nas áreas do MB a microdureza do *clinch* retornou média para a chapa do lado punção de 528 HK_{0,05} e para a chapa do lado matriz 534 HK_{0,05}, sendo que nos pontos de maior encruamento das chapas é possível observar um incremento de 18% em relação à média tendo como pico 602 HK_{0,05}.

5.6 Observação metalográfica da microestrutura

A macrografia da seção dos conjuntos obtidos por solda a ponto por resistência elétrica e por *clinch* em aço DP 1300M é mostrada na Figura 53. Não foram observados defeitos nas estruturas das uniões. As alterações na microestrutura da região da região de estrição onde ocorre o estiramento de grãos (EG) e no preenchimento do anel da matriz do *clinch* indicam o encruamento e potencial aumento da dureza, mas como a resistência do aço DP 1300M é ultra-alta, a influência das ilhas de martensita nos pontos de medição restringe disparidades elevadas como na solda a ponto por resistência elétrica, sendo mostrado nas Figura 53 e Figura 54, onde nesta figura são mostrados em detalhe a região MB e EG, material de base e região de estiramento de grãos.

Figura 54 - Macrografia da seção dos conjuntos *clinch* no embutimento e solda a ponto por resistência elétrica.

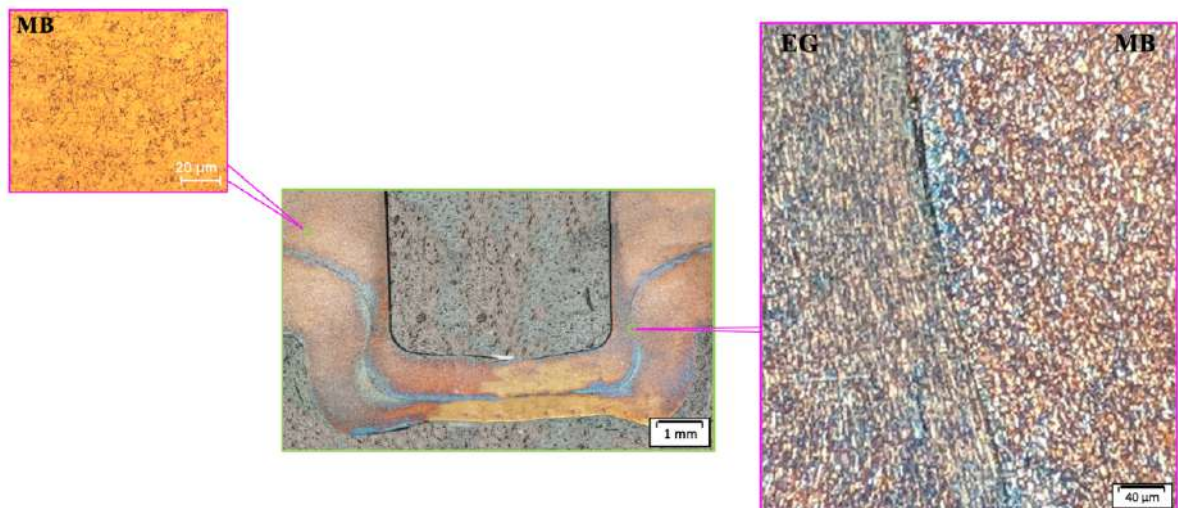


Fonte: o ator.

A imagem da seção do *clinch* na chapa do lado da matriz mostra preenchimento da cavidade. O ancoramento mecânico ocorreu entre as chapas. A chapa lado punção está devidamente ancorada na área do “pescoço” do *clinch*. Esta é a região mais propensa para ocorrer falhas prematuras quando ocorre a conformabilidade insuficiente. Nenhum defeito foi observado na microestrutura do *clinch*. O ancoramento ocorreu adequadamente entre os materiais unidos.

Na solda a ponto por resistência elétrica, a observação metalográfica mostra as regiões onde é possível encontrar a formação microestrutural de característica em sua totalidade martensita (MT) no botão de solda. A esquerda na sequência, a formação que indica matriz ferrítica e martensita em grãos grandes (MGG), uma faixa de transição mostrando a matriz ferrítica e martensita em grãos finos (MTh) onde ocorre a mais alta dureza, o resultado do revenimento e baixa dureza na região (MF) e na sequência o material de base MB, conforme mostrado na Figura 55. O tamanho do botão corresponde ao diâmetro da área de contato das pontas dos eletrodos usados.

Figura 55 - Macrografia da seção do *clinch* do aço DP 1300M mostrando as distintas formações microestruturais geradas pelo processo mecânico do material de base MB e da região de estiramento de grãos EG.

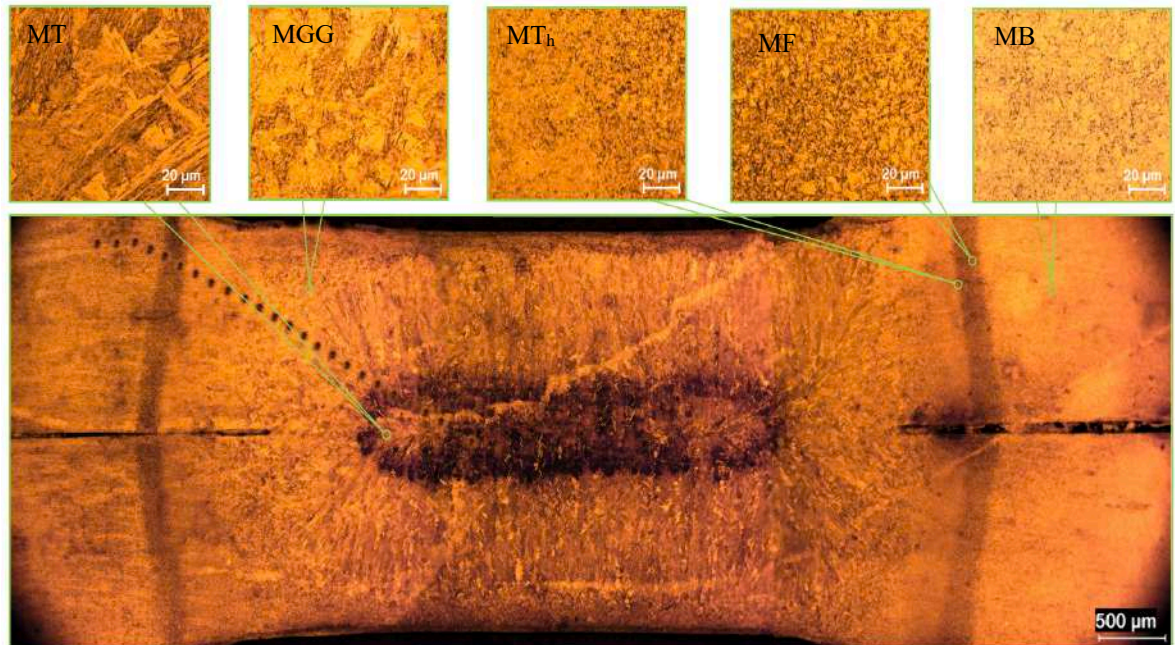


Fonte: o autor.

As imagens na Figura 56, mostram as distintas formações microestruturais geradas pelo processo térmico ou aporte de calor para se obter a solda a ponto por resistência elétrica, sendo a martensita (MT), martensita em grãos grandes (MG), uma faixa de

transição mostrando a matriz ferrítica e martensita em grãos finos (MF), o resultado do revenimento e baixa dureza na região (MF) e na sequencia o material de base MB.

Figura 56 - Macrografia da seção do botão de solda a ponto por resistência elétrica do aço DP 1300M



Fonte: o autor.

6 CONCLUSÃO

É possível realizar o *clinch*ing do aço Docol DP 1300M na espessura de 1,50 mm apesar do alongamento médio de 5,7% sem falhas como trincas visíveis, e sem danificar o punção e matriz de acordo com os parâmetros e material, escolhidos no âmbito deste trabalho.

Os resultados das micrografias ópticas nas regiões de interesse no *clinch*ing apresentam microestrutura de estiramento de grãos evidenciando encruamento na região de estrição, já na solda a ponto por resistência elétrica mostram aspectos da consequência do processo termomecânico com microestruturas bem definidas e distintas.

O teste de microdureza confirma as diferenças esperadas entre os processos de união. A solda a ponto por resistência elétrica baseada em calor, entrega 323 HV_{0,05} a 565 HV_{0,05} refletindo a transformação de fase durante o processo de soldagem e menores valores de microdureza, já no *clinch*ing a variação nos valores de microdureza do material na região de conformação do *clinch*ing está contida entre 480 HK_{0,05} e 602 HK_{0,05} em linha com a microdureza apresentada pelo material de base.

O *clinch*ing resultou 62% da carga tipicamente apresentada pela solda a ponto por resistência elétrica em ponto único nos ensaios de resistência a tração para destacamento quase-estático.

A correlação entre um ponto de solda por resistência e um *clinch*ing no aço bifásico de 1,3 GPa de resistência está em 1,5 *clinch*ing para cada ponto de solda quando adotada a corrente de 6 kA (I_{\min}) e 1,7 *clinch*ing quando adotada a corrente de 7,9 kA (I_{\max}) nas condições do presente trabalho.

7 TRABALHOS FUTUROS

Verificar quais seriam as cargas de cisalhamento e destacamento do *clinch* em materiais dissimilares sendo o Docol DP 1300M 1,5 mm de espessura ou similar e um aço de médio carbono de 0,65 mm e 0,60 mm de espessura.

Analisar por meio de ensaios de nanoindentação na linha de ancoramento do *clinch* do aço Docol DP 1300M se confirmam ou refutam a estabilidade de dureza, mesmo em região de encruamento como na região de estrição ou pescoço e df.

Avaliar como se comporta a resistência das uniões por solda a ponto e por *clinch* submetidas a impacto.

Correlacionar do resultado obtido com módulos de simulação para *clinch* e os resultados deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 ABE, Y.; MORI, K. Mechanical *clinching* and self-pierce riveting for sheet combination of 780-MPa high-strength steel and aluminium alloy A5052 sheets and durability on salt spray test of joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, n. 12, p. 15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06545-7> %0AORIGINAL.

2 ABE, Y.; MAEDA, T.; YOSHIOKA, D.; MORI, K. I. Mechanical *clinching* and self-pierce riveting of thin three sheets of 5000 series aluminium alloy and 980 MPa grade cold rolled ultra-high strength steel. *Materials*, v. 13, n. 21, p. 1-22, 2020.

3 ARCELOMITTAL. *Mobility Solutions*. Disponível em: <https://automotive.arcelormittal.com/products>. Acesso em: 12 nov. 2020.

4 ARCELOMITTAL. **Steels for cold stamping** - Fortiform . Disponível em: https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/third_gen_AHSS/fortiform. Acesso em: 15 set. 2022.

5 ASM INTERNATIONAL. *Handbook Failure analysis and prevention*. Materials Park, OH: 2003.

6 ASM INTERNATIONAL. *Handbook of properties and selection: Irons, steels, and high-performance alloys*. 10. ed., Materials Park, OH: 1997. v. 1. 2521 p.

7 ASM INTERNATIONAL. *Handbook of Welding Brazing and Soldering*. Materials Park, OH: ASM International®, 1993. v. 6. 2873 p. Disponível em: <https://metallurgymaterials.files.wordpress.com/2014/03/vol-6-weldingbrazing-and-soldering.pdf>

8 ASM INTERNATIONAL. *Sheet metal forming processes and applications*. 1. ed., Materials Park, OH: ASM International®, 2012, 381 p.

9 ASTM-E517-19. Standard test method for plastic strain ratio r for sheet metal 1. p. 1–8, 2019.

10 AWS INTERNATIONAL. *Handbook of Welding Process*. 8. ed., Miami: 1997. 543–544 p.

11 BAMBERG, P.; SEEWALD, R.; SCHIEBAHN, A.; REISGEN, U.; PRECOMA, N.; EPPERLEIN, M. Improvement of the resistance spot welding of Al-Mg-Si alloys by using cladding technology : An optical and mechanical characterization study. *Journal of Advanced Joining Processes*, v. 5, n. 1, , 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100090>.

- 12 BOLLHOFF. *The tooling range*. Disponível em: <https://bollhoff-attexor.com/en/product/rivclinching-tooling-range>. Acesso em: 29 jan. 2022.
- 13 BOS, C.; MECOZZI, M. G.; HANLON, D. N.; AARNTS, M. P.; SIETSMA, J. Application of a three-dimensional microstructure evolution model to identify key process settings for the production of dual-phase steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 42, n. 12, p. 3602-3610, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0696-x>.
- 14 BRECKWEG, A. *Automatisiertes und prozessüberwachtes radialclinchen höherfester blechwerkstoffe*. 2007. 1-131 p. Universität Stuttgart, 2007. Disponível em: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/frontdoor.php?source_opus=3192&la=de. Acesso em: 17 jun. 2015.
- 15 BTM. *Brochure*. Disponível em: <http://www.clinching.co.uk/wp-content/uploads/2016/06/btm-catalog-oval-loc-tooling.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2022.
- 16 CAHN, R.; HAASEN, P. *Physical Metallurgy*. 4. ed., Amsterdam: NORTH-HOLLAND, 1996. v. 1. 942 p.
- 17 CERDA, F.; SCHULZ, B.; CELENTANO, D.; SABIROV, I.; PETROV, R. Exploring the microstructure and tensile properties of cold-rolled low and medium carbon steels after ultrafast heating and quenching. *Materials Science & Engineering A*, v. 745, n. 2, p. 509–516, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.036>.
- 18 CHABOK, A. *Resistance spot welding of advanced high strength steels: Mechanical properties and failure mechanisms*. 2019a. 11-38 p. Groningen, 2019. Disponível em: <https://research.rug.nl/en/publications/resistance-spot-welding-of-advanced-high-strength-steels-mechanic>. Acesso em: 21 jul. 2021.
- 19 CHABOK, A.; VAN DER AA, E.; DE HOSSON, J.; PEI, Y. Mechanical behavior and failure mechanism of resistance spot welded DP1000 dual phase steel. *Materials and Design*, problemas com a RSW de DP1000, v. 124, p. 171-182, 2017.
- 20 CHUKO, W.; GOULD, J. *Development of appropriate resistance spot welding practice for transformation-hardened steels*. Welding JournalMiami, 2002. Disponível em: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/steel/pdfs/report_trp_9934.pdf. Acesso em: 13 mar. 2022.
- 21 CLEVELAND HISTORICAL. *Ford model T plant*. Disponível em: <https://clevelandhistorical.org/items/show/269>. Acesso em: 29 jan. 2021.
- 22 CRAWLEY, A.; SHEHATA, M.; RUDDLE, G. Microstructures, properties and rolling mill requirements for some as-hot-rolled dual phase steels. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 22, n. 4, p. 485-494, 1983.
- 23 DILLARD, D. A. *Advances in structural adhesive bonding*. 2010. 301-312 p.
- 24 DVS/EFB. *Technical bulletin DVS 3420: Clinching basics V10.2 / MF2*. Düsseldorf: DVS/EFB, 2021.
- 25 DVS2923:1986-07. Resistance point welding of steels and aluminium materials in

railway vehicle construction. *Deutscher Verband für Schweißen*, Düsseldorf, 2007.

26 ECKOLD. *Brochure*. Disponível em: https://eckold.com/data/upload/Clinchen/Flyer Mobile Clinchzange MZD 45_35_P.pdf. Acesso em: 29 mar. 2022.

27 Economist Intelligence Unit - EIU. *Automotive in 2022 - A report*. Disponível em: https://www.eiu.com/n/campaigns/automotive-in-2022/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=industries-in-2022&utm_term=automotive&utm_content=general&gclid=Cj0KCQjwpcOTBhCZARIsAEAYLuU8oXdO_mV5hSxsboYk-TImVf78YtFMylsg7AjJ6huh9WoKKmj7scaAokxEALw_wcB. Acesso em: 03 maio 2022.

28 Elihu Thomson Papers, American Philosophical Society. *American Philosophical Society*, v. 1865–1944, n. 74, p. 1-71, 1944. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.197.7025&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 20 fev. 2021.

29 EN ISO 6507-1:2007 - Metallic materials – Vickers hardness test. 6507–1, 2007.

30 Empresa de Pesquisa Energética. *Matriz elétrica brasileira*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 10 set. 2022.

31 FERNANDES, T. *Estudo de caso: Vida útil de punção e matriz: 1:18-1:25*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=hwHnDMODpOQ>. Acesso em: 26 out. 2021.

32 FINE, T.; FOSTINI, R. Spot weldability of high strength, cold rolled steels. In: CONGRESS AND EXPOSITION COBO HALL, DETROIT FEBRUARY 26-MARCH 2, 1979, 1979, Detroit. *SAE Technical Papers Series* p. 1-12.

33 Fit for 55 - *Package by the european union designed to reduce greenhouse gas emissions*. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>. Acesso em: 03 maio 2022.

34 GOTO, S.; KAMI, C.; KAWAMURA, S. *Effect of alloying elements and hot-rolling conditions on microstructure of bainitic-ferrite/martensite dual phase steel with high toughness*. *Materials Science and Engineering A*, v. 648, p. 436-442, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.093>

35 GOULD, J. E. An examination of nugget development during spot welding , using both experimental and analytical techniques. *Welding Journal*, n. 1, p. 1-11, 1987. Disponível em: https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1987_01_s001.pdf. Acesso em: 21 ago. 2021.

38 HARRIS, J.; MARTIN, J. W.; LITTLE, E. A. “Physical metallurgy”. *Materials Science and Technology*, pp 1508, v. 13, n. 8, p. 705-706, 1997.

39 HERSH, M. S. Resistance spot welding of metal matrix composite. *Welding Journal*, n. 6, p. 254-258, 1970.

40 HILDITCH, T.; SOUZA, T.; HODGSON, P. *Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS)*. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2015. 9-28 p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-85709-436-0.00002-3>

- 41 JIS-Z3136. *Japanese Industrial Standard* - Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot and embossed projection welded joints. 1999.
- 42 JIS-Z3140. *Japanese Industrial Standard* - Method of inspection for spot welds. 1989.
- 43 KHAN, M. I.; KUNTZ, M. L.; BIRO, E.; ZHOU, Y. Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded advanced high strength steels. *Materials Transactions*, v. 49, n. 7, p. 1629-1637, 2008.
- 44 KHAN, M.; PANDEY, K. State of art in modern resistance spot welding. *International Journal of Technical Research and Applications*, v. 1, n. 1, p. 19-25, 2013.
- 45 KHANNA, S.; LONG, X. Residual stresses in resistance spot welded steel joints. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 13, n. 3, p. 278-289, 2008.
- 46 KHOSRAVANI, A.; CALIENDO, C.; KALIDINDI, S. New insights into the microstructural changes during the processing of dual-phase steels from multiresolution spherical indentation stress-strain protocols. *Metals*, v. 10, n. 1, p. 23-29, 2020.
- 47 KOBELCO. *Kobe steel cold-rolled steel sheets*. Disponível em: https://www.kobelco.co.jp/english/products/download/steel-aluminum/files/cold980_1470hi.pdf. Acesso em: 01 dez. 2021.
- 48 KROEPLIN. *Brochure*. Disponível em: https://www.kroeplin.com/wp-content/uploads/Kataloge/Katalog_2021_EN.pdf. Acesso em: 06 abr. 2022.
- 49 LI, Y.; SONG, R.; JIANG, L.; ZHAO, Z. Materials Science & Engineering A Deformation response of 1200 MPa grade martensite-ferrite dual-phase steel under high strain rates. v. 750, n. February, p. 40-44, 2019.
- 50 LIU, W.; LIAN, J.; MÜNSTERMANN, S. Damage mechanism analysis of a high-strength dual-phase steel sheet with optimized fracture samples for various stress states and loading rates. *Engineering Failure Analysis*, v. 106, p. 104138, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630718316686>
- 51 MARCONI, C. D.; CASTILLO, M. J.; CONSIGLI, C. F. Optimización del proceso RSW para acero DP 1000. *Revista Matéria*, v. 23, n. 2, p. 14, 2018.
- 52 MESCHUT, G.; MATZKE, M. *Ein Beitrag zum mechanischen fügen von hochmangan- haltigen TWIP-stählen schriftenreihe*. 2019. 120 p. Universität Paderborn, 2019. Disponível em: https://www.shaker.de/de/content/catalogue/Element.asp?ID=&Element_ID=59013&Mode=PageFrameDownload. Acesso em: 19 jan. 2021.
- 53 MESCHUT, G.; MATZKE, M.; HOERHOLD, R.; OLFERMANN, T. Hybrid technologies for joining ultra-high-strength boron steels with aluminum alloys for lightweight car body structures. *Procedia CIRP*, v. 23, n. C, p. 19-23, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.089>.
- 54 MESCHUT, G.; MEYER, S.; DITTER, J.; SCHMAL, C. Joining technologies for the production of hybrid components. *Lightweight Design Worldwide*, v. 12, n. 3, p. 50-57, 2019.

- 55 MILLAN-ESPITIA, N.KALIDINDI, S. Study of a bimodal α - β Ti alloy microstructure using multi-resolution spherical indentation stress-strain protocols. *Journal of Composites Science*, p. 1-13, 2022.
- 56 MURAKAMI, T.; IMAI, Y. The effect of alloying elements on the isothermal transformation of steel 1st report. *The Japan Institute of Metals*, isothermal transformation - martensita, n. 3, p. 145-150, 1942. a.
- 57 MURAKAMI, T.; IMAI, Y. The effect of alloying elements on the isothermal transformation of steel 2st report. *The Japan Institute of Metals*, n. 4, p. 145-152, 1942. b.
- 58 MURTI, V.; SASTRY, Y.; RAO, V.; REDDY, G. Some studies on the service weldability of HSLA steels using 18Cr , 8Ni , 6Mn type austenitic electrodes 1. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 37, p. 759-765, 1993.
- 59 OIKAWA, H.; MURAYAMA, G.; SAKIYAMA, T.; TAKAHASHI, Y.; ISHIKAWA, T. Resistance spot weldability of high strength steel (HSS) sheets for automobiles. *Nippon Steel Technical Report*, n. 95, p. 39-45, 2007.
- 60 OUDJENE, M.; BEN-AYED, L. On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method. *Engineering Structures*, v. 30, n. 6, p. 1782-1788, 2008.
- 61 OUISSE, M.; COGAN, S. Robust design of spot welds in automotive structures: A decision-making methodology. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 24, n. 4, p. 1172-1190, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.09.012>.
- 62 PENG, H.; CHEN, C.; ZHANG, H.; RAN, X. Recent development of improved clinching process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 9, p. 31, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05978-4>.
- 63 POSCO. *Posco automotive steel*. Disponível em: <http://product.posco.com/homepage/product/eng/jsp/industry/s91u1000110a.jsp>. Acesso em: 03 jan. 2022.
- 64 POURANVARI, M.; RANJBARNODEH, E. Resistance spot welding characteristic of ferrite-martensite DP600 dual phase advanced high strength steel-part II: Failure mode. *World Applied Sciences Journal*, v. 15, n. 11, p. 1527-1531, 2011.
- 65 REVISTA ALUMÍNIO. *Alumínio brasileiro tem baixa pegada de carbono: entenda o que isso significa*. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/aluminio-brasileiro-tem-baixa-pegada-de-carbono-entenda-o-que-isso-significa/>. Acesso em: 05 jul. 2022.
- 66 ROY, T.; BHATTACHARYA, B.; GHOSH, C.; AJMANI, S. *Lecture notes in mechanical engineering: Advanced high strength steels*. Jamshedpur,: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019. v. 43. 216 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7892-7>
- 67 SARWAR, M.; PRIESTNER, R.; MATERIALS, M.; CENTRE, S. Influence of ferrite-martensite microstructural morphology on tensile properties of dual-phase steel. *Journal of Materials Science*, v. 31, p. 2091-2095, 1996.

68 SAWHILL, J.; FURR, S. Spot weldability tests for high strength steels. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION COBO HALL, DETROIT, MICHIGAN FEBRUARY 23-27,1981, 1981, *SAE Technical Papers Series* p. 1-11.

69 SIMUFACT-FORMING. *Sumulation of the intereaction of clinch spots*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=WbKkotKJVRc>. Acesso em: 26 fev. 2022.

70 SSAB. *DataSheet Docol 1300M*. Disponível em: <https://www.ssab.com.br/products/brands/docol/products/docol-1300m?accordion=downloads>. Acesso em: 17 maio 2019.

71 SSAB. *The ABC of steel*. Disponível em: <https://www.ssab.com/company/about-ssab/ssab-in-brief/the-abc-of-steel>. Acesso em: 07 out. 2018.

72 SSAB. *The Most Sustainable Solution*. Disponível em: <https://ssabwebsitescdn.azureedge.net/-/media/files/en/docol/320en-the-most-sustainable-solution-v4-2019-web.pdf?m=20191218102819>. Acesso em: 31 jul. 2020.

73 STEINFELDER, C.; ACKSTEINER, J.; GUILLEAUME, C.; BROSIUS, A. Analysis of the interactions between joint and component properties during *clinching*. *Production Engineering*, n. 0123456789, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01102-x>.

74 SULLIVAN, J.; BURNHAM, A.; WANG, M. Energy-consumption and carbon-emission analysis of vehicle and component manufacturing. *Center for Transportation Research*, p. 1-37, 2010. Disponível em: http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=993394. Acesso em: 03 abr. 2015.

75 TASAN, C.; DIEHL, M.; YAN, D.; BECHTOLD, M.; ROTERS, F.; SCHEMMANN, L.; ZHENG, C.; PERANIO, N.; PONGE, D.; KOYAMA, M.; TSUZAKI, K.; RAABE, D. An overview of dual-phase steels : Advances in processing and micromechanically guided design. *The Annual Review of Materials Research*, v. 45, n. April, p. 19.1-19.41, 2015.

76 TATARU, A.; POTEKIN, V.; KAWALLA, R.; LUKIN, A.; DOLGOV, A. Production of auto body dual phase steel with single step cooling on the output conveyer of the 2000 continuous broad strip mill at OAO NLMK. *Izvestiya VUZ Chernaya Metallurgiya*, v. 44, n. 7, p. 26-33, 2014.

77 THYSSENKRUPP. *A new, wider range of dual-phase steels*. Disponível em: www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/automobil_trucks_1/thyssenkrupp_highlightflyer_dualphasen-staehle_steel_en.pdf. Acesso em: 05 jan. 2022.

78 TOX. *Clinching brochure*. Disponível em: https://uk.tox-pressotechnik.com/assets/countries/EN/pdf/TOX_TB_8007_en.pdf. Acesso em: 13 fev. 2022.

79 TOX. *Controls brochure*. Disponível em: <https://pt.tox-pressotechnik.com/produtos/controles-e-monitoramento/monitoramento-de-processos/monitor-de-prensagem-epw/>. Acesso em: 06 abr. 2022.b.

80 TOX. *The electromechanical servo drive range up to 1000kN*. Disponível em:

https://pt.tox-pressotechnik.com/assets/countries/EN/pdf/TOX_ElectricDrive_40_en.pdf. Acesso em: 06 abr. 2022.

81 TYRKEL, E. History of the development of iron-carbon diagrams. *Translated from Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, v. 5, n. 5, p. 344-350, 1968.

82 US DEPARTMENT OF ENERGY. *FY 2019 annual progress report lightweight materials R&D*. 2020. Disponível em: energy.gov/eere. Acesso em: 30 ago. 2020.

83 UTSUMI, Y.; SHIRAKI, A.; HAMAMOTO, S.; KINUGASA, J. Martensitic steel sheets of 1300 and 1500MPa grades. *Kobelco Technology Review*, n. 35, p. 34–38, 2017.

84 VARBAI, B.; SOMMER, C.; SZABÓ, M.; TÓTH, T.; MÁJLINGER, K. Shear tension strength of resistant spot welded ultra high strength steels. *Thin Walled Structures*, n. 4, p. 64-73, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.051>.

85 VARIS, J. Economics of clinched joint compared to riveted joint and example of applying calculations to a volume product. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 172, n. 1, p. 130-138, 2006.

86 VARIS, J. Ensuring the integrity in *clinching* process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 174, n. 1-3, p. 277-285, 2006.

87 WORLD AUTO STEEL. *Advance High-Strength Steels Application Guideline - Mechanical joining*. Disponível em: <https://ahssinsights.org/joining/mechanical-joining/mechanical-joining/>. Acesso em: 12 mar. 2022.

88 WORLDSTEEL ASSOCIATION. *Sustainability Indicators*. Disponível em: <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators/>. Acesso em: 07 maio 2022.

89 YOON, J. I.; JUNG, J.; LEE, H. H.; KIM, J. Y.; KIM, H. S. Relationships between stretch-flangeability and microstructure-mechanical properties in ultra-high-strength dual-phase steels. *Metals and Materials International*, v. 25, n. 5, p. 1-16, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00270-x>



90 ZHANG, H.; WANG, F.; XI, T.; ZHAO, J.; WANG, L. A novel quality evaluation method for resistance spot welding based on the electrode displacement signal and the Chernoff faces technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 62-63, p. 431–443, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.03.007>.

91 ZIRNGIBL, C.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S. Potentiale datengestützter methoden zur gestaltung und optimierung mechanischer fugeverbindungen. In: *DFX-symposium 2020*, v. 31, p. 71-80. Disponível em: <https://doi.org/10.35199/dfx2020.8>.

APÊNDICES

1 Tabela com imagens e breve descritivo dos equipamentos utilizados no âmbito deste estudo.

Recursos miscelânea	Descrição	<i>Clinching</i>	RS W
	Bancada com morsa e martelo	X	X
	Máquina de corte	X	X
	Politriz automática	X	X
	Equipamentos para ensaios de tração	X	X
	Óleo 40 cSt de viscosidade	X	

	Espessímetro	X	
 <p>Jomesa Olympus</p>	Microscópios ópticos	X	X
	Torno universal		X
	Microdurômetro automático	X	X
	Microscópio eletrônico de varredura	X	X

2 - Literatura fornecida pelo fabricante do aço bifásico utilizado neste trabalho



Data sheet 2140 Docol 1300M 2018-08-22

Docol 1300M

General Product Description

A Docol martensitic steel with ultra-high tensile strength. Docol 1300M martensitic steel helps improve crashworthiness and ensure a light-weight design and cost-efficient production methods for the automotive industry. Docol is one of the strongest cold rolled advanced high-strength steels on the market and has become the material of choice for automotive applications such as side impact beams, bumpers and structural components.

Dimension Range

Cold rolled / UC: thickness 0.50-2.10 mm, width up to 1527 mm.

Cold rolled / EG: thickness 0.80-1.80 mm, width up to 1200 mm.

Slit strip and cut to length sheets are available upon request.

Grade and coating specific restrictions on available dimensions may occur.

Mechanical Properties

Steel grade	Standard	Coating	Test direction	Yield strength R_{eL2} (MPa)	Tensile strength R_m (MPa)	Elongation A_{50} (min %)	BH ₁₀ (min MPa)	Min. inner bending radius for 90°
Docol CR 1030Y1300T -MS	VDA 239-100: 2016	UC, EG	L	1030- 1330	1300- 1550	3 ¹⁾	30	3.5 x t

¹⁾ Decreased minimum elongation values apply for product thickness $t < 0.60$ mm (minus 2 units).

The testing of mechanical properties of electrogalvanized products is conducted without coating.

Chemical Composition (Ladle analysis)

Steel grade	Coating	C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Al (min %)	Nb+Ti (max %)	Cr+Mo (max %)	B (max %)	Cu (max %)
Docol CR 1030Y1300T -MS	UC, EG	0.16	0.40	1.80	0.020	0.010	0.015	0.10	1.00	0.005	0.20

Tolerances

Cold rolled (UC, EG): Tolerances in accordance to EN10131.

Customized dimension and shape tolerances available upon request.

Following improved flatness tolerances are available upon request: ¹⁾

Thickness (mm)	Max height ²⁾ (mm)
0.80- 0.99	8
1.00- 1.39	7
1.40- 1.59	6
1.60- 1.79	5
1.80- 2.10	4

¹⁾ EG coated martensitic grades are supplied with improved flatness tolerances.

²⁾ Distance from the top surface of the strip normal to a flat surface. Measured with a ruler on sheets of mother coil width and minimum length 1500 mm. Cross bow and coil set excluded.

Coatings and Surface Treatments

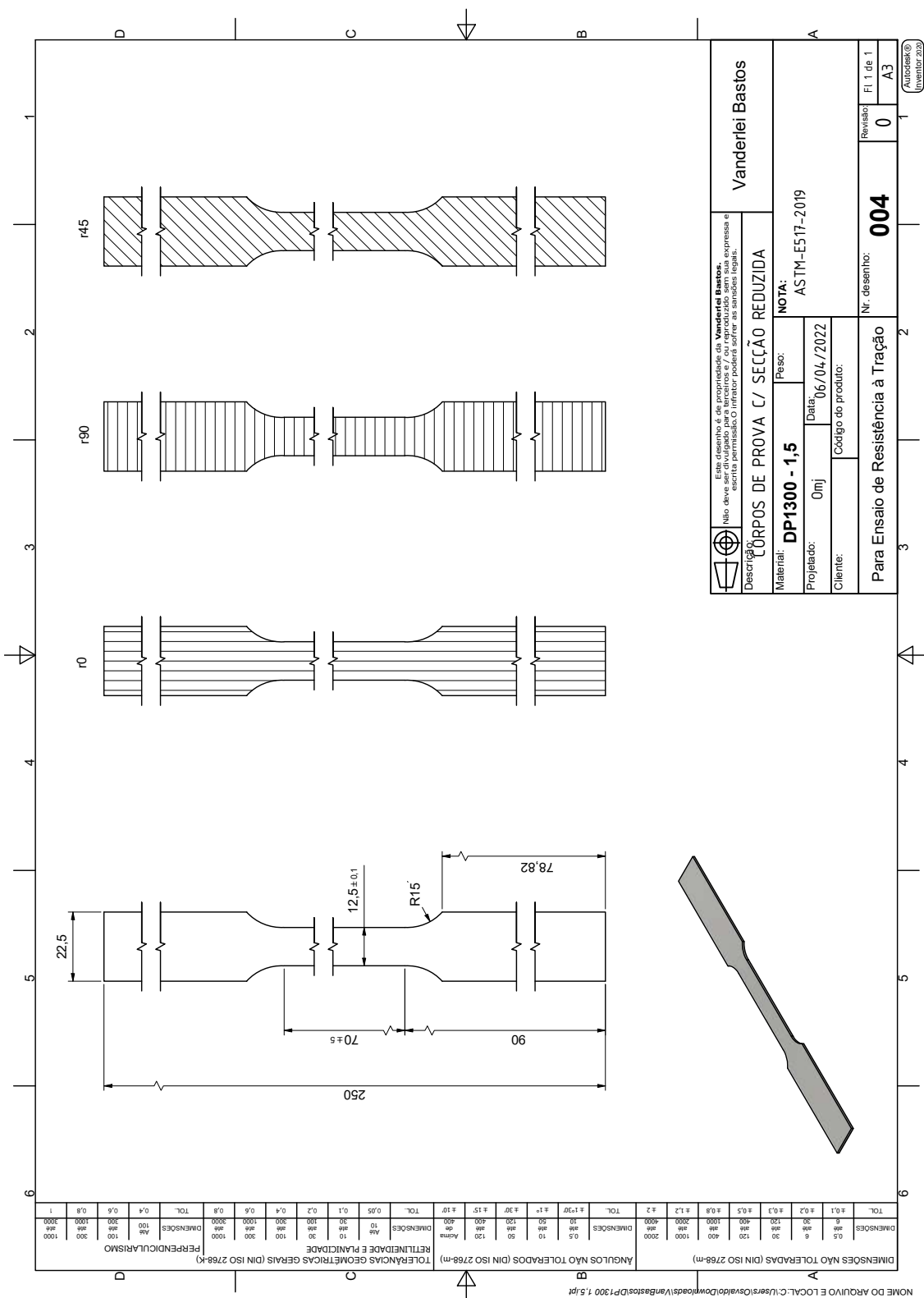
Coatings

The metal coating options for Docol products include:

Electrogalvanized coating (EG) is applied continuously by electro deposition. The coating consists of zinc (>99%). Electrogalvanized steel is characterized by its excellent surface quality and uniform coating thickness.

Grade specific availability of metal coatings for Docol products is given in the Mechanical properties table (Coating).

3 - Desenho para as amostras com seção reduzida



4 - Característica para o óleo auxiliar da extração do punção e da matriz após o processo clinching do aço de ultra-alta resistência Docol DP 1300M

INDUOIL® HL

MMKS minimum volume cooling lubricants

Technical information

INDUOIL® HL 40

Technical data

Colour	colourless to yellow
Odour	characteristics
Viscosity at 40°C	35 mm ² /s
Density at 20°C	920 kg/m ³
Pour point	< - 10°C
Flash point	> 200°C
Aromatic compound content	–

Waste code

13 02 07

Water pollution class

WGK 1

This high-performance oil is

- free of PVB/PCT
- free of phenol
- free of chlorine
- free of silicon
- free of heavy metals (such as barium, zinc, molybdenum, etc.)
- biodegrades quickly
- safe from a toxicological standpoint

Product description

INDUOIL® HL 40 is a mid-viscosity, vegetable-based cutting and deep drawing oil.

Application

During light-duty non-mechanical (i.e. shaping) operations, such as stamping, bending, shaping, drawing, roll forming, but also during chip-cutting machining such as milling, turning, drilling, sawing and tapping.

Material

Non-ferrous metals (Al, Cu)
Heavy metals
Alloy steels (up to STK60)
Electr. contact materials

Application

Non-diluted by spraying, rolling, daubing, shaping or in the drop procedure.

Not suitable for cyclic or mechanical lubrication!

Recommendation

For optimum, inductive and wear-free applications, we recommend the mist-free INDUTECH® MS minimum volume cooling lubricant systems with dual air jacket.

Benefits

INDUOIL® HL 40 offers the following benefits for minimum volume lubrication:

- minimum residue
- dry workpieces, machines and chips
- no disposal of cooling lubricant
- longer tool service lives
- improvements in performance

Degreasing options

Minimum residue when used as intended. For further machining (painting, powder coating etc.), grease can be removed by means of spray, ultrasonic or immersion cleaning using efficient neutral or alkaline cleaners as well as most organic solvents.

The details provided here are based on our current level of knowledge but are not guarantees of product characteristics and form no basis for contractual legal relationships. Depending on the usage profile, if in any doubt, practical tests will be required on site.



Rev.01 05/02/2020

YUSHIRON FORMER S-2280

Fluido para conformação de metais

DESCRIÇÃO

YUSHIRON FORMER S-2280 é um fluido integral. Possui em sua formulação óleo mineral, aditivos anticorrosivos, aditivos EP e passivadores.

Indicado para utilização de operações de corte e conformação de metais. Podendo ser utilizado em todos os tipos de metais.

BENEFÍCIOS

- Apresenta excelente lubricidade, proveniente dos aditivos de alta qualidade utilizados em sua composição;
- Ótimo acabamento.

PROPRIEDADES:

Aparência (visual) (NY-1)	Castanho claro
Densidade, 20/4°C (NY-2)	0,900 a 0,950
Viscosidade a 40°C, cSt (NY-24)	32 a 38
Ponto de fulgor, °C (NY-24)	200 mín.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.
