

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI
EDSON SOARES SILVA

**EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE UNIÃO DOS COMPONENTES DE
CARROCERIAS EM FUNÇÃO DO IMPACTO LATERAL**

São Bernardo do Campo

2013

EDSON SOARES SILVA

**EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS DE UNIÃO DOS COMPONENTES DE
CARROCERIAS EM FUNÇÃO DO IMPACTO LATERAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro
Universitário da FEI para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica, orientado pelo
Prof. Dr. Roberto Bortolussi

São Bernardo do Campo

2013

Silva, Edson Soares

Evolução dos processos de união dos componentes de carrocerias em função do impacto lateral / Edson Soares Silva. São Bernardo do Campo, 2013.

103 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Bortolussi.

1. Solda de carrocerias. 2. Uniões híbridas. 3. Impacto lateral. I. Bortolussi, Roberto, orient. II. Título.

CDU 621.791



Centro Universitário da FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGM-10

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Edson Soares Silva

Matrícula: 212311-5

Título do Trabalho: Evolução dos processos de união dos componentes de carrocerias em função do impacto lateral

Área de Concentração: Materiais e Processos

ORIGINAL ASSINADA

Orientador: Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Data da realização da defesa: 02/10/2013

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

São Bernardo do Campo, 02 de Outubro de 2013.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Ass.: _____

Prof. Dr. Maurício David Martins das Neves

Ass.: _____

Prof. Dr. José Roberto Berretta

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

DEDICATÓRIA

Ao grande amigo Paulo G. Nanini.
(in memoriam)

AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho de mestrado não é uma atividade solitária e no meu caso muitas pessoas contribuíram de forma decisiva para que o desafio de produzir algo digno de apresentação fosse atingido.

Aos professores Dra. Adriana M. Catelli de Souza, Dr. Agenor de Toledo Fleury, Dr. Gustavo A. B. Donato, Dr. Francisco Ambrózio Filho, Dr. Rodrigo Magnabosco, Dr. Sergio Delijaicov, que me apoiaram desde o primeiro contato para entrevista de admissão no programa de mestrado, passando pelo desafiante período de realização dos créditos, até o momento da entrega da dissertação, agradeço por dedicarem tempo e paciência me apoiando nas diversas ocasiões onde pensei ter atingido o limite da minha capacidade e cada um, a sua maneira, me abriu novos horizontes e perspectivas de desenvolvimento.

Aos colegas Kriscia Elizabeth Rosa de Souza, Adilson Pessoa, Alex P. Campanharo, Fabio Felpa, Fabio Graton Rossi, Felipe A. Frank, Fernando A. C. Machado, Gustavo Imbrizi Prado, Henrique Capobianco de Almeida Soares, Leandro Veronezi Cernelós, Marcos Roberto de Castro, Rodrigo Borrero de Oliveira, Sebastião Pedro Chagas, agradeço a paciência e dedicação nos diversos momentos em que abandonaram suas atividades para me socorrer na execução dos testes, pesquisas, ou em discussões técnicas que nortearam a realização deste trabalho.

Agradeço à Volkswagen do Brasil Ltda. na pessoa do Dr. Egon Feichter pelo apoio material e intelectual incondicional dispensado, mesmo quando atividades do mestrado dificultavam minhas atribuições durante o trabalho.

Ao Sr. Antonio Carnielli Junior, que durante os últimos três anos, foi muito mais amigo do que chefe, agradeço pelo companheirismo, pelo apoio incondicional e pelos diversos momentos divertidos que vivemos juntos durante a realização dos créditos do mestrado.

Ao meu orientador, Dr. Roberto Bortolussi, agradeço imensamente a liberdade, o apoio e confiança depositados, principalmente pelos longos períodos de afastamento devido às atividades profissionais, mas que em nenhum momento duvidou da seriedade e atenção que dei a seus conselhos e orientações para aprimorar o resultado do trabalho.

Agradeço à Fernanda B. Silva, minha filha, pelo amor com o qual por diversas vezes me fez enxergar melhores caminhos a seguir na execução do trabalho. À minha filha, Natália B. Silva, e minha esposa, Sueli B. Silva, que em função da realização do trabalho, tiveram

que em diversas ocasiões abrir mão de minha companhia, mas sempre o fizeram com doçura e amor.

Finalmente, aos meus pais, irmão e amigos, agradeço as demonstrações de apoio e orgulho por me verem neste momento da vida e carreira profissional dedicando tempo e esforço para aprimoramento intelectual.

Muito obrigado!

RESUMO

A proteção dos ocupantes de automóveis em acidentes que envolvam impactos laterais despertou a atenção dos pesquisadores e engenheiros a partir da década de 1960 e, desde então, é fonte de interesse no desenvolvimento tecnológico de materiais, processos de produção e métodos construtivos de estruturas laterais de veículos, pois da integridade destas estruturas durante o impacto depende a segurança dos ocupantes. A resistência das colunas laterais de veículos é definida principalmente por suas características geométricas, combinadas com resistência dos materiais aplicados, além da integridade das uniões entre seus componentes. A dicotomia causada pela evolução das regulamentações de segurança veicular e contra emissões de poluentes tem forçado o desenvolvimento tecnológico das construções de carrocerias no sentido de aumentar sua resistência para o bem da segurança dos ocupantes, e reduzir seu peso diminuindo consequentemente o consumo de combustíveis fósseis e a emissão de poluentes. Neste trabalho investigou-se as características construtivas de colunas estruturais de carrocerias de veículos pequenos para cinco passageiros, bem como a evolução do uso de aços microligados, aços *dual phase*, aços estampados a quente e a eficácia da solda ponto por resistência isoladamente e combinada com adesivo estrutural na união dos componentes das colunas estruturais laterais de carroceria. A caracterização da resistência à tração, variação de composição química e caracterização microestrutural dos aços, a resistência de uniões por solda ponto das combinações de materiais utilizados na construção das colunas veiculares das décadas de 1970, 1980/90 e 2000, a avaliação da resistência de adesivos estruturais aplicados em uniões híbridas (solda ponto + adesivo estrutural), e a determinação da sensibilidade à taxa de deformação do adesivo estrutural, permitiram avaliar os fatores que viabilizaram a aplicação de uniões híbridas na construção de colunas estruturais veiculares.

Palavras-chave: Solda de carrocerias. Uniões híbridas. Impacto lateral.

ABSTRACT

Car accidents involving side impacts are since 1960's a preoccupation for researchers and engineers, since the car occupant injury protection related to this kind of impact were up to that period not properly addressed. The development of materials, production processes and body geometry definition, to improve the side impact safety, is a premise to be respected ever since. The protection of vehicle occupants in case of an accident depends basically on the body structure integrity during the impact. The structure stiffness is defined mainly by its geometry combined with the material mechanical properties, and the processes applied to join its components. The dichotomy created by the safety regulations combined with the emissions legislations forced the development of lighter and stronger body structures which improve the safety levels, and at the same time reduce fossil fuel consumption and consequently pollution. This work investigated the constructive characteristics of car body B-Pillars of small five passenger vehicles, the evolution of steel use beginning with microalloyed steel, through dual phase steel, up to the hot stamped steel, the effectiveness of spot welding alone and combined with structural epoxy adhesives to join B-Pillar components. The determination of the stiffness, the chemical and the metallographic structure of the steels used in B-Pillar constructions in 1970, 1980/90 and 2000, and evaluation of the resistance of spot weld joining, alone and combined with epoxy adhesive, and the determination of the epoxy adhesive strain speed variation sensitivity gave the insights about the factors that directed to the use of hybrid joining in the car body construction.

Key words: Body welding. Hybrid joints. Side impact.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dureza e estimativa de resistência à tração das amostras de 22MnB5.....	53
Tabela 2 – Resultados médios dos ensaios de tração dos materiais metálicos.....	54
Tabela 3 – Tenacidade dos tipos de aços.	58
Tabela 4 – Parâmetros de solda.	60
Tabela 5 – Tabela de resultados médios dos ensaios das uniões de chapas.....	67
Tabela 6 – Teste estatístico comparativo das uniões soldadas.	74
Tabela 7 – Comparação do perfil de resistência dos pontos de solda.....	79
Tabela 8 - Medição de micro-dureza / resistência a tração HX340LAD+DP780	81
Tabela 9 – Medição de micro-dureza / resistência à tração HX340LAD + 22MnB5.....	82
Tabela 10 – Medição de micro-dureza / resistência à tração DP780 + 22MnB5	83
Tabela 11 – Dados dos ensaios do adesivo a baixa velocidade.....	88
Tabela 12 – Dados dos ensaios do adesivo a alta velocidade.....	88

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Energia de solda (J - Joule)
I	Corrente de solda (A - Ampere)
R	Resistência a corrente elétrica do material a ser soldado (Ω - Ohm)
t	Tempo de aplicação de corrente de solda (ms - Milisegundos)
$R_{p0,2}$	Limite de escoamento inferior conforme ABNT 6152
R_m	Resistência máxima a tração conforme ABNT 6152
A_{80}	Alongamento percentual total na ruptura conforme ABNT 6152
$\bar{x}_n$	Média dos dados obtidos em medições
s_n	Desvio padrão dos dados obtidos em medições
S_p	Variância dos dados obtidos em medições
n_n	Numero de amostras consideradas
t_0	Teste estatístico referente tabela de Student

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de teste de deformação de portas FMVSS 214.....	19
Figura 2 - Barreira deformável FMVSS 214.	21
Figura 3 - Diagrama de ensaio dinâmico FMVSS 214.	22
Figura 4 - Diagrama de ensaios dinâmico ECE R95.	23
Figura 5 - Diagrama de ensaio frontal parcial.	23
Figura 6 - Comparação de seções transversais de colunas B.	26
Figura 7 - Vistas explodidas de colunas B, comparação de pesos e deformações.	28
Figura 8 - Deformações de colunas B em testes de impacto da FMVSS214.	29
Figura 9 - Esquema básico de sistema de execução de solda ponto por resistência.	30
Figura 10 - Microestrutura típica de união por ponto de solda.	32
Figura 11 - Perfil de micro dureza Vickers de ponto de solda.	33
Figura 12 -Diagrama de ruptura de solda ponto.	33
Figura 13 - Seções transversal e do perímetro do ponto de solda.....	34
Figura 14 - Ponto de solda rompido na zona termicamente afetada (ZAT).	35
Figura 15- Micro estrutura de ponto de solda DP600.....	35
Figura 16 - Solda em “overlapping”.	36
Figura 17 - Colagem entre painéis de portas.	37
Figura 18 - Sentidos de esforços em juntas coladas.	38
Figura 19 - Colagem entre flanges de solda.	39
Figura 20 - Diferenças de aplicação de materiais em carrocerias VW GOL.	40
Figura 21 - Indicação do limite de escoamento.	43
Figura 22 - Processo de estampagem a quente.	44
Figura 23 - Pêndulo de ensaio conforme DIN EN ISO 11343.	46
Figura 24 - Materiais do estudo experimental.	48
Figura 25 - Composição química das amostras.	49
Figura 26 - Composição química das amostra.....	49
Figura 27 - Foto micrográfica do aço HX340LAD.	51
Figura 28 - Foto micrográfica do aço DP780.	51
Figura 29 - Foto micrográfica do aço 22MnB5 após tratamento térmico.....	51
Figura 30 - Padrão de corpo de prova para ensaio de tração ASTM.....	52
Figura 31 - Resultado comparativo dos ensaios de tração dos materiais metálicos.	54
Figura 32 - Diagrama tensão por deformação de aço microligado HX340L	55

Figura 33 - Diagrama tensão por deformação de aço “Dual Phase” DP780.....	55
Figura 34 - Diagrama tensão por deformação de aço 22MnB5 Base	56
Figura 35 - Diagrama tensão por deformação de aço 22MnB5 Temperado	56
Figura 36 - Diagrama tensão por deformação comparativa entre amostras dos aços.....	57
Figura 37 - Fotos dos corpos de prova do ensaio de tração conforme ASTM E8/E8M	57
Figura 38 - Diagrama força por deslocamento comparativo dos aços investigados.....	58
Figura 39 - Dados técnicos do adesivo.....	59
Figura 40 - Tipos de corpos de prova para ensaios de tração.....	59
Figura 41 - Corpo de prova soldado.....	60
Figura 42 - Corpo de prova soldado e colado.....	60
Figura 43 - Soldagem dos corpos de prova.	61
Figura 44 – Esquema de execução de endentações	62
Figura 45 - Corpo de prova colado.	63
Figura 46 - Preparação dos corpos de prova colados.....	64
Figura 47 - Montagem para determinação da sensibilidade a deformação do adesivo.....	64
Figura 48 - Esquema de integração pelo método do trapézio.....	65
Figura 49 - Resultados dos ensaios de tração das uniões soldadas / soldadas e coladas.	67
Figura 50 - Detalhe das uniões soldadas rompidas HX340LAD + DP780.....	68
Figura 51 - Diagrama do ensaio de tração HX340LAD +DP780 (soldado).	69
Figura 52 - Diagrama do ensaio de tração HX340LAD +DP780 (solda+Cola).....	69
Figura 53 - Detalhe das uniões soldadas rompidas HX340LAD + 22MnB5.....	70
Figura 54 - Diagrama do ensaio de tração HX340LAD +22MnB5 (soldado).	71
Figura 55 - Diagrama do ensaio de tração HX340LAD +22MnB5 (solda+Cola).....	71
Figura 56 - Detalhe das uniões soldadas rompidas DP780 + 22MnB5.	72
Figura 57 - Diagrama do ensaio de tração DP780+22MnB5(soldado).....	73
Figura 58 - Diagrama do ensaio de tração DP780+22MnB5 (solda+Cola).	73
Figura 59 - Esforço de arrancamento do adesivo estrutural.	74
Figura 60 - União soldada HX340LAD – DP780 (20X).	75
Figura 61 - União soldada HX340LAD – DP780 (200X).	76
Figura 62 - União soldada HX340LAD – TL4255 (20X).....	76
Figura 63 - União soldada HX340LAD – TL4255 (200X).....	77
Figura 64 - União soldada DP780 – TL4255 (20X).	77
Figura 65 - União soldada DP780 – TL4255 (200X).	78
Figura 66 - Pontos de solda executados DP780 com 22MnB5.	78

Figura 67 – Indentações de microdureza HX340LAD – DP780	81
Figura 68 - Indentações de microdureza HX340LAD – 22MnB5.....	82
Figura 69 - Indentações de microdureza DP780 – 22MnB5	83
Figura 70 – Perfis de resistência a tração dos pontos de solda.....	84
Figura 71 - Diagrama de medição de aceleração e velocidade calculada.	85
Figura 72 - Diagrama de medição de aceleração e força.	86
Figura 73 - Diagrama de força por tempo do ensaio de tração de alta velocidade.....	86
Figura 74 - Diagrama de força por tempo do ensaio de tração de baixa velocidade.	87
Figura 75 - Ponto de solda em flange de carroceria.....	90
Figura 76 - Comparação de dimensões de veículos.....	91
Figura 77 - Detalhe da ruptura do adesivo em corpo de prova.....	92
Figura 78 - Área adesivada de união híbrida de coluna B.....	93
Figura 79 - Barreira de impacto lateral IIHS.....	94
Figura 80 - Simulação de impacto lateral para deslocamento de 100mm.....	95

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVO	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Resistência das estruturas de carroceria contra impactos laterais	19
3.2	Construção de colunas B de carrocerias automotivas.....	25
3.3	Processos de união das chapas.....	29
3.3.1	Solda ponto por resistência.....	29
3.3.2	Solda ponto por resistência associada a adesivos estruturais	37
3.4	Características dos materiais de construção de colunas de carrocerias	39
3.4.1	Materiais utilizados em construção de carrocerias	39
3.4.2	Aços micro ligados	41
3.4.3	Aços <i>Dual Phase</i>	42
3.4.4	Aços para estampagem a quente.....	44
3.4.5	Adesivo estrutural	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1	Escolha dos materiais para pesquisa	48
4.2	Determinação da composição química dos materiais metálicos envolvidos.....	49
4.3	Determinação da estrutura metalográfica dos materiais metálicos envolvidos.....	50
4.4	Medição da resistência à tração dos materiais metálicos envolvidos	52
4.5	Composição química e propriedades mecânicas do adesivo.....	59
4.6	Método de levantamento da resistência a tração de uniões.....	59
4.7	Método de determinação da resistência através da micro dureza.....	62
4.8	Método de determinação da sensibilidade à taxa de deformação.....	62
4.9	Método de integração matemática dos dados	65
4.10	Teste estatístico dos resultados de ensaios de tração	65

5	RESULTADOS.....	67
5.1	Ensaio de tração de uniões	67
5.2	Análise metalográfica das uniões soldadas	75
5.3	Determinação da resistência nas regiões da solda ponto (ZF, ZAT, MB).....	79
5.4	Sensibilidade à taxa de deformação do adesivo.....	84
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	89
6.1	Resistência dos materiais metálicos.....	89
6.2	Análise das uniões e comparação com a construção automotiva	90
6.3	Ensaio de resistência de uniões adesivadas	91
6.4	Desenvolvimentos futuros para aplicação de aços de ultra alta resistência	95
7	CONCLUSÃO	97

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica estrutural dos automóveis tem sido impulsionada nas três últimas décadas basicamente pela necessidade de aprimoramento da proteção aos ocupantes e redução da emissão de poluentes.

Estes dois objetivos são em grande medida concorrentes, pois a redução da emissão de poluentes pressupõe a redução da queima de combustíveis fósseis, o que demanda veículos mais leves; por outro lado, o aumento da proteção dos ocupantes exige que as estruturas das carrocerias sejam mais resistentes contra impactos, o que resulta em construções mais robustas e dependendo da tecnologia aplicada, mais pesadas.

As exigências legais e comerciais para o desenvolvimento de veículos mais seguros contra impactos frontais teve como consequência a necessidade de aprimoramento na estrutura dos veículos de modo global, uma vez que, o choque entre veículos não está restrito apenas a impactos frontais.

Particularmente o impacto lateral, que para os ocupantes apresenta grande severidade demandou o desenvolvimento de estruturas, especialmente, dedicadas ao aumento da proteção dos passageiros e ao funcionamento adequado dos sistemas de *air-bags* laterais.

O aprimoramento das tecnologias de desenvolvimento de estruturas veiculares com a aplicação de cálculos estruturais mais precisos indicou a necessidade de desenvolvimento de novos materiais, mais resistentes e com propriedades específicas tanto para seu processamento como aplicação.

A evolução dos materiais, por sua vez, criou novas possibilidades e necessidades que também demandaram, em certo momento, a evolução, e em outros, a revolução dos processos produtivos tanto na área de conformação como na união dos componentes de carrocerias, especialmente nas regiões estruturais.

As relações entre os diversos aspectos que influenciam no desempenho apropriado das estruturas veiculares, em particular das colunas laterais, mas comumente denominadas na indústria automobilística como “colunas B”, justificam o estudo dos materiais, métodos de desenvolvimento e processos de fabricação aplicados na produção destas estruturas.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é investigar através de ensaios de resistência mecânica a evolução dos materiais, a evolução nos métodos construtivos e os fatores que determinaram a aplicação de juntas híbridas desde o advento das normas que regem os requisitos para homologação de veículos através de impactos laterais.

A investigação experimental envolveu a avaliação das propriedades de resistência dos aços utilizados nas construções de colunas laterais a partir do uso de aços micro ligados até a introdução dos aços de alta resistência estampados a quente.

Por serem determinantes no desempenho das estruturas, são investigados também os métodos de união destes componentes, que envolvem o processo de união por solda a ponto e o uso de adesivos estruturais combinados com a solda ponto.

As investigações experimentais foram orientadas pelos métodos construtivos utilizados para fabricação de veículos da classe A0, ou seja, veículos pequenos para cinco passageiros, que foram homologados atendendo os requisitos das normas internacionais para impacto lateral vigente à época de seu lançamento no mercado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resistência das estruturas de carroceria contra impactos laterais

O desenvolvimento de automóveis mais seguros tem sido um dos principais motivadores no aprimoramento da tecnologia de construção de carrocerias que aumentem o nível de proteção dos ocupantes em acidentes.

Seja através da introdução de normas de homologação restritivas, ou com a divulgação, por institutos independentes, dos resultados dos testes de veículos para influenciar na decisão de compra ou os valores de seguro, o tema segurança veicular passou a figurar como premissa básica no desenvolvimento de veículos.

A vulnerabilidade dos passageiros com relação a impactos laterais foi evidenciada por pesquisadores nos Estados Unidos no final da década de 1960 (DOT HS 809 004 NHTSA/99).

Com base nos resultados de pesquisa de segurança veicular existentes na época, foi elaborada a primeira versão da norma da *Federal Motor Vehicle Safety Standards* (FMVSS) 214 (Figura 1), que exigia das portas dos veículos resistência em níveis pré-determinados de esforços em ensaios de deformações em laboratório.

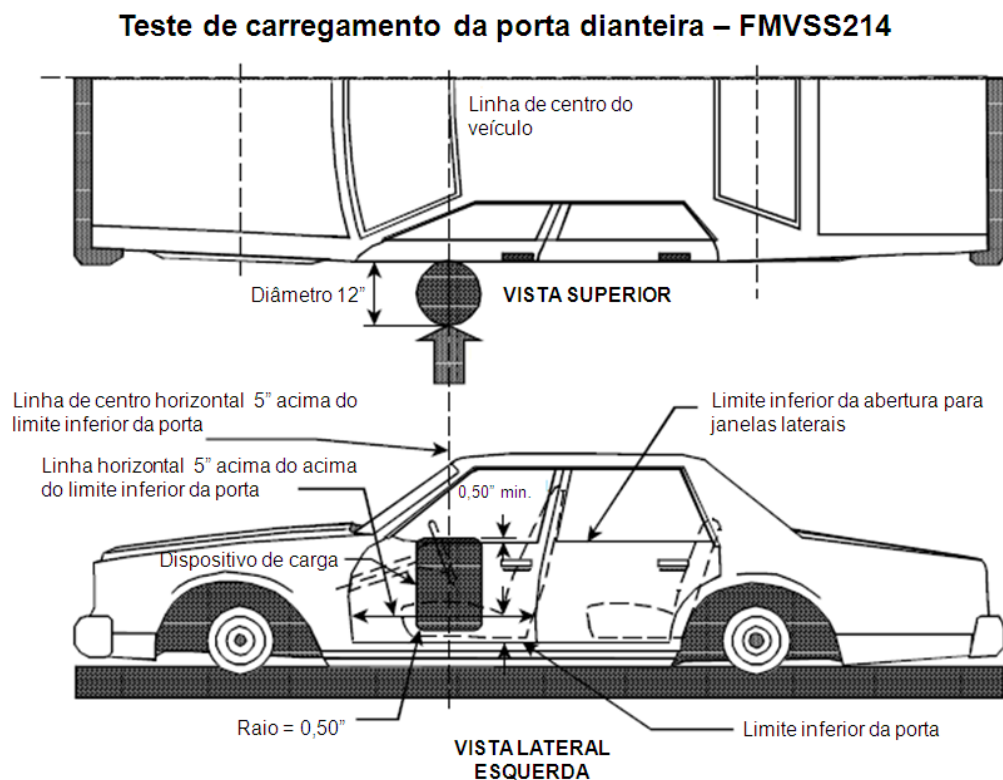


Figura 1 - Esquema de teste de deformação de portas FMVSS 214.
Fonte: Autor "adaptado de" FMVSS 214 Static, 1992, p. 12.

O ensaio previsto na norma FMVSS 214 estático foi o pioneiro em determinar requisitos mínimos para a homologação de veículos novos de peso bruto de até 10000 lbs (4536 kg) a partir de 1974.

O procedimento de ensaio previa a aplicação de força nas portas laterais dianteiras através de uma sonda acionada por sistema hidráulico, de forma que o trabalho de deformação atingisse valores mínimos para determinados níveis de deformação.

Os requisitos da norma FMVSS 214 indicavam que a porta deveria resistir no mínimo 10008 N a 152,4 mm, 15569 N a 304,8 mm e um pico de carga de não menor que 31139 N ou duas vezes o peso total do veículo em ordem de marcha, o que for menor, antes da falência total da estrutura.

A alternativa técnica encontrada pela indústria automobilística para atender aos requisitos da norma foi introdução de barras de impacto lateral, tubulares ou estampadas, fabricadas com aços temperados com resistência a tração superior a 1000 MPa.

Apesar de não fornecerem a proteção esperada aos ocupantes, as barras contra impactos laterais demonstraram-se eficientes em relação a impactos contra obstáculos fixos como indicaram os dados de acidentes nos Estados Unidos de 1982, conforme relatório da *National Highway Traffic Safety Administration* NHTSA (DOT HS 809 004 NHTSA Technical Report, p. 14).

Com o intuito de aumentar a proteção aos passageiros contra impacto lateral veículo contra veículo, foi adotada em 1994 uma nova edição da norma FMVSS 214, na qual foram mantidas todas as exigências anteriores para ensaios estáticos, e acrescentados novos requisitos quanto a ensaios dinâmicos.

A configuração do ensaio estabelecido pela norma FMVSS 214 determinava o uso de uma barreira móvel, com face de contato deformável em estrutura de alumínio com níveis de absorção de energia pré-definidos (Figura 2).

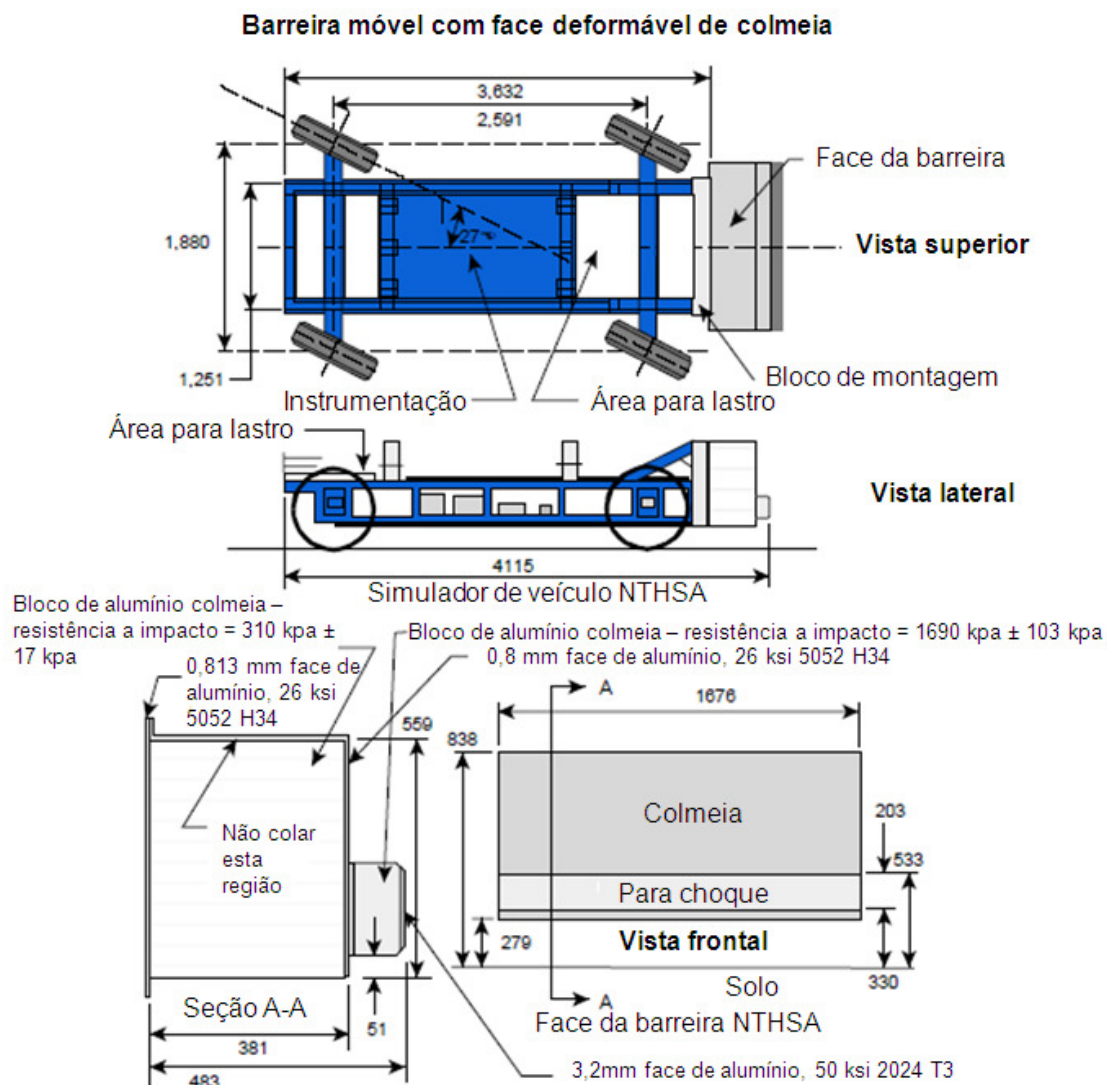


Figura 2 - Barreira deformável FMVSS 214.

Fonte: Autor “adaptado de” NHTSA FMVSS 214 dynamic, 2006, p. 17.

A energia gerada pelo impacto da barreira móvel de $1461 \pm 4,5$ kg (Figura 3), que em movimento oblíquo colide com o veículo a 54 km/h, deveria ser absorvida pela estrutura do veículo, e não impor aos manequins biométricos esforços na cabeça, no tórax e na pélvis superiores aos níveis pré-determinados pela norma.

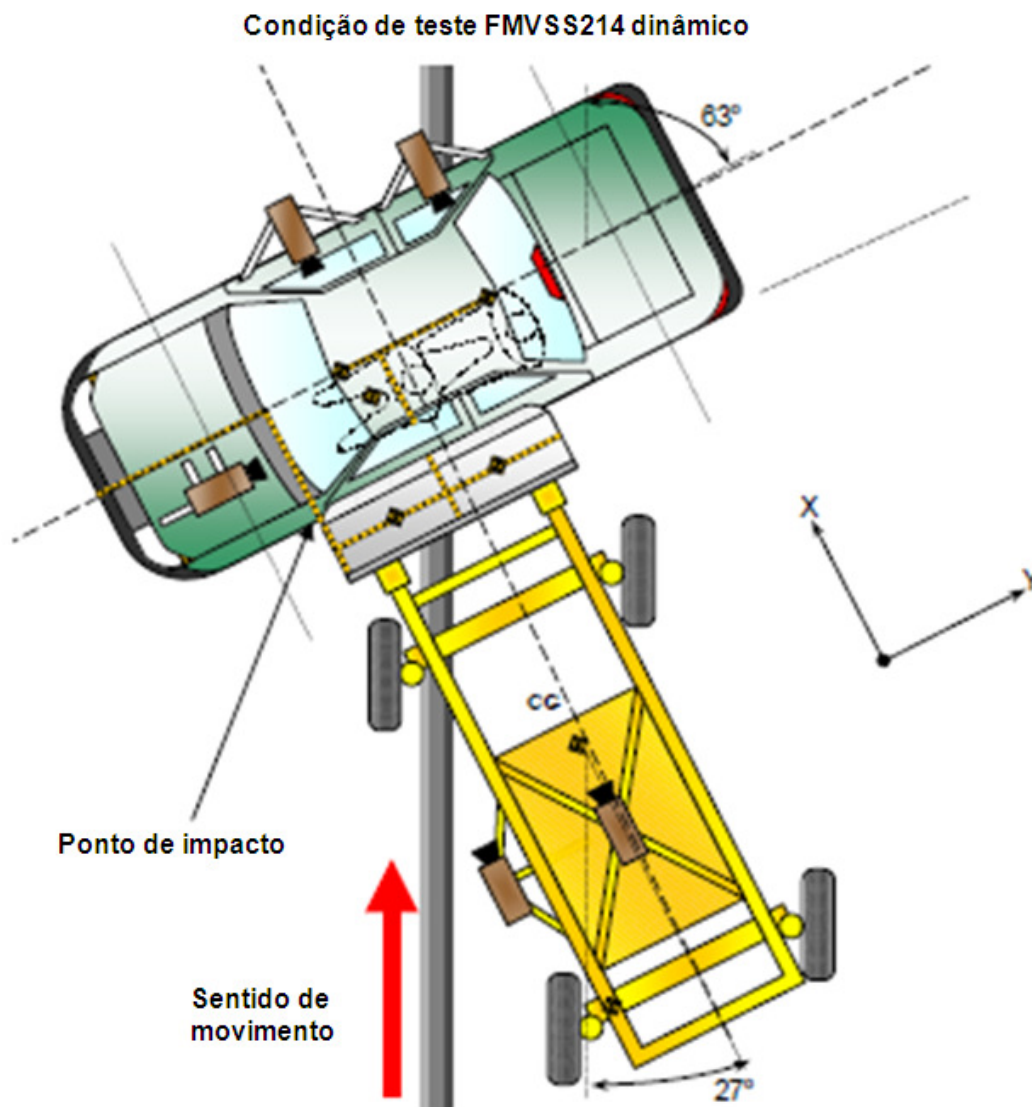


Figura 3 - Diagrama de ensaio dinâmico FMVSS 214.

Fonte: Autor “adaptado de” NHTSA FMVSS 214 dynamic, 2006, p.43.

Para atender aos requisitos dos ensaios estáticos e dinâmicos determinados pela norma FMVSS 214, a indústria automobilística utilizou durante as décadas de 1970 e 1980 a combinação tecnológica da união de reforços localizados nas colunas de portas, e uso barras de impacto de alta resistência dentro das portas.

Em 1998 a comunidade europeia introduziu a exigência da execução de teste de impacto lateral conforme a norma ECE R95 para a homologação de veículos novos.

Esta regulamentação previa a execução de teste de impacto lateral com barreira móvel deformável, de 950 kg a 50 km/h contra as laterais do veículo, e também o impacto contra um poste de diâmetro igual a 254 mm a 29 km/h (Figura 4).

Assim como no teste executado nos Estados Unidos, os testes europeus determinam o êxito ou não de um dado veículo em cumprir os requisitos com base no atendimento dos índices biomecânicos.

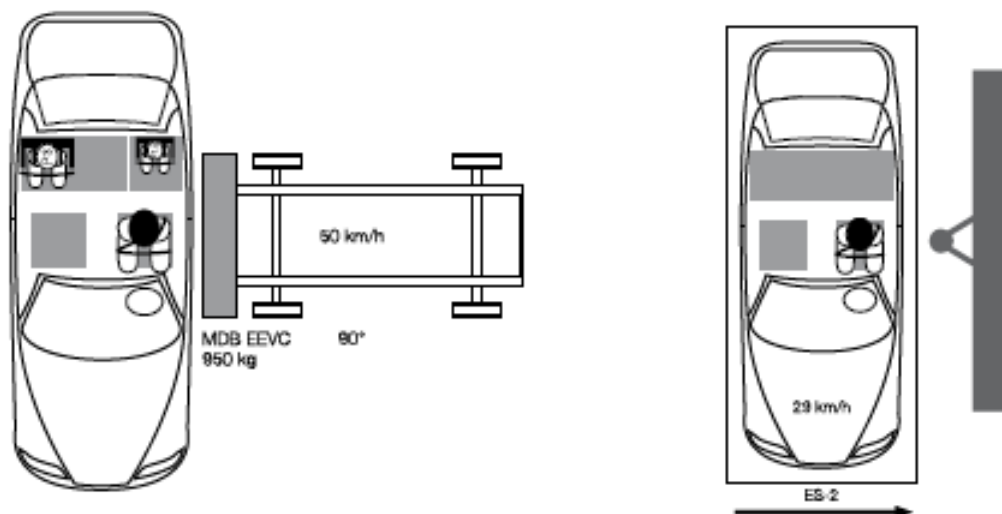


Figura 4 - Diagrama de ensaios dinâmico ECE R95.
Fonte: Safety Companion 2011, p. 20.

A introdução do impacto frontal parcial na década de 90, no qual os veículos são arremessados contra uma barreira deformável fixa, influenciou no aumento das exigências das normas de teste de impacto lateral (Figura 5).

O teste de impacto contra 40% da porção frontal dos veículos a 40 km/h (FMVSS 208), e 56 km/h (ECE R94), resultou em construções mais rígidas da região frontal, causando em contrapartida a necessidade de aumento da resistência lateral dos veículos, pois a determinação a resistência da barreira de impacto lateral é baseada na resistência da região frontal dos veículos.

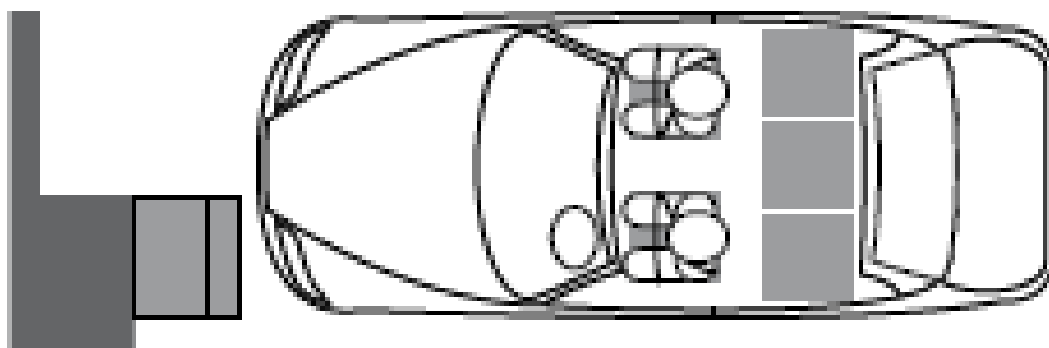


Figura 5 - Diagrama de ensaio frontal parcial.
Fonte: Safety Companion 2011, p. 16.

A criação dos critérios de classificação de carros novos a partir de avaliações mais severas e detalhadas dos dados dos manequins biométricos demandou uma nova abordagem da indústria automobilística, em relação à segurança dos ocupantes.

Os critérios mais severos definidos por institutos independentes ligados a automóveis clubes, institutos representantes de seguradoras, associações de medicina do trânsito e a Federação Internacional de Automobilismo, determinaram a criação em diversos países do programa de classificação de veículos novos *New Car Assessment Program* (NCAP).

Os programas NCAP (Euro NCAP, US NCAP, S NCAP, Latin NCAP), categorizam os veículos em classes que vão de zero a cinco estrelas, com base em avaliações dos resultados de índices biomecânicos, valores de deformação em determinadas regiões consideradas críticas, e critérios de salvamento de vítimas de acidentes, além de considerarem, em alguns países, a proteção para crianças e pedestres.

As classificações dos veículos testados são divulgadas abertamente ao público, e apesar de não afetarem a homologação do veículo para venda, determinam a imagem que o público terá de determinado produto, e da marca a ele atrelada. Por este motivo, estes critérios são, ao mesmo tempo, usados pelas indústrias como apelo mercadológico quando apresentam resultados positivos comparativamente aos concorrentes.

Em relação ao desenvolvimento das estruturas das carrocerias frente a este novo cenário, a indústria automobilística passou a enfrentar novos desafios como consequência direta do seu aprimoramento.

Antes da introdução de sistemas de *air-bags* as estruturas veiculares eram dimensionadas para se deformarem absorvendo a energia do impacto, tendo como limite a zona de proteção dos ocupantes.

A introdução de *air-bags* obrigou que o processo de deformação das carrocerias durante o impacto tivesse que ser modulado, para que houvesse sincronismo entre o tempo de expansão do sistema e o encontro do ocupante com a bolsa do *air-bag*.

Sistemas de *air-bags* tem um volume que ocupam o espaço entre o passageiro e as partes internas do veículo durante o impacto, e devem se expandir completamente em menos de 30 ms após o choque para que o benefício esperado pelo uso de sistemas de amortecimento seja atingido. Não deve haver contato do passageiro antes que o *air-bag* esteja totalmente inflado, caso contrário, haveria soma ao invés de absorção de energia durante o contato entre passageiro e *air-bag*.

Um efeito colateral indesejado do aprimoramento dos sistemas de proteção aos ocupantes foi o aumento de sobreviventes com ferimentos graves nos membros inferiores.

A consequência direta foi que não só portas, colunas e longarinas deveriam resistir aos impactos, mas também a região dos membros inferiores e a pélvis deveriam ser protegidas.

Estudo sobre fatores que influenciam a ocorrência de lesões nas regiões pélvicas e torácica em impactos laterais indicam que há uma relação direta entre a ocorrência e a gravidade das lesões e o grau de intrusão na região das portas (TENCER et al., 2005, p. 292; SCHIFF et al., 2008, p. 389).

Com o desafio de aumentar a resistência do habitáculo, sincronizar o funcionamento dos sistemas de *air-bags* à estrutura, e ao mesmo tempo reduzir o peso da carroceria, a indústria automobilística desenvolveu, em parceria com seus fornecedores de chapas metálicas, novos materiais e sistemas de montagem que permitiram a produção de veículos mais leves, mais resistentes, e mais seguros.

3.2 Construção de colunas B de carrocerias automotivas

A resistência mecânica das colunas laterais de carrocerias automobilísticas, antes das regulamentações contra impacto lateral, limitava-se a garantir a durabilidade e funcionalidade do veículo em seu uso normal.

Os critérios de homologação baseados nos índices dos manequins biométricos em ensaios de impacto lateral alteraram a orientação construtiva dos veículos. Estruturas que eram baseadas na soma de resistência mecânica obtida por meio de adição de reforços foram substituídas gradualmente por soluções técnicas mais sofisticadas, mas que eram limitadas, pelo nível de desenvolvimento tecnológico dos materiais metálicos e processos de produção existente à época.

As dimensões das colunas laterais, especialmente nos carros médios e pequenos para cinco passageiros, não se alteraram muito no decorrer do tempo, pois se por um lado as dimensões externas dos veículos não devem ser aumentadas para não mudá-los de classe, por outro lado, as medidas internas devem preservar o conforto dos usuários.

Uma avaliação da evolução das larguras das colunas desde a década de oitenta do século passado (modelo A), passando pela década de noventa (modelo B) e os veículos atuais (modelo C), indica que a largura destas estruturas varia entre 66 mm e 73 mm (Figura 6).

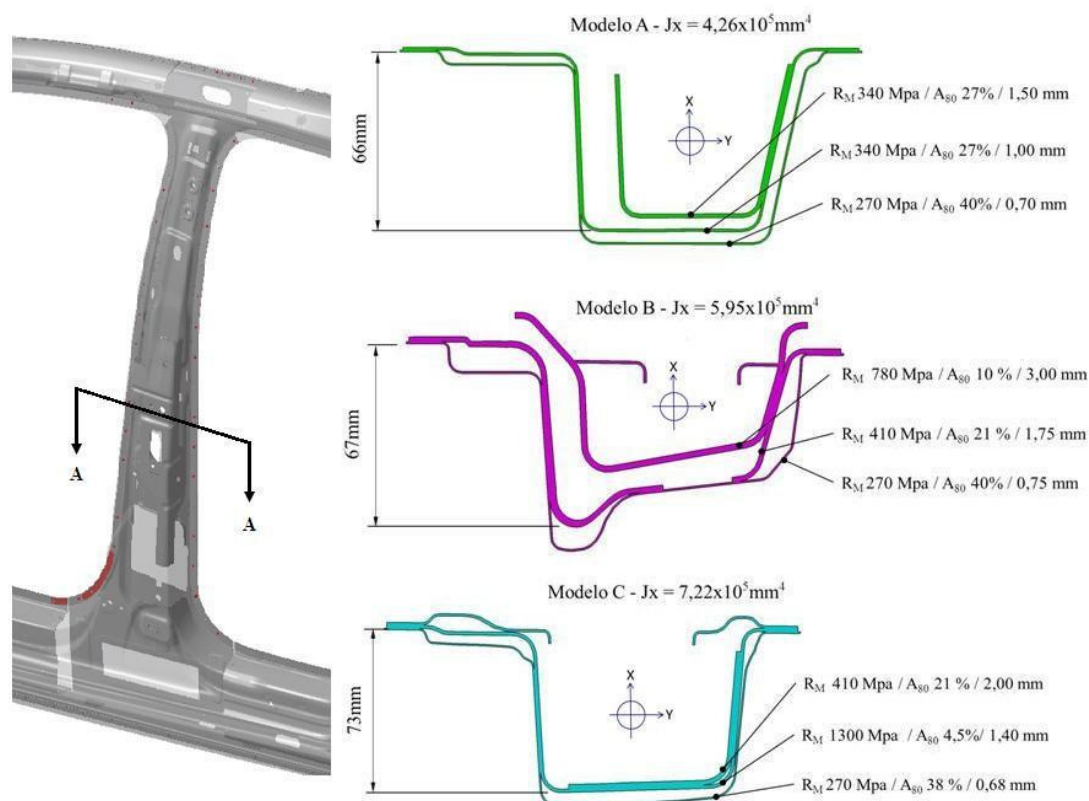


Figura 6 - Comparação de seções transversais de colunas B.
Fonte: Autor.

Antes do advento da aplicação do cálculo de elementos finitos no desenvolvimento de carrocerias, o enrijecimento das estruturas era baseado no cálculo do momento de inércia, que indicava o quanto a seção transversal deveria aumentar para atingir os objetivos de rigidez.

Este método não permitia a avaliação quantitativa precisa do aumento de resistência obtido, mas sim a avaliação qualitativa baseada no acréscimo relativo do momento de inércia da região estudada, seja pela mudança de geometria, aumento da espessura das chapas, ou adição de reforços.

Além disso, não se levava em consideração as propriedades de resistência mecânica dos materiais aplicados na construção. Para a validação do conceito eram necessários testes de impacto lateral na fase de desenvolvimento de protótipos.

Os exemplos de seções transversais apresentados neste trabalho indicam o crescimento dos valores de momento de inércia em três modelos de mesma classe de veículo para cinco passageiros.

No modelo A, o momento de inércia de $4,26 \times 10^5 \text{ mm}^4$ foi atingido com a aplicação de uma geometria convencional, onde reforços de 1,50 mm e 1,00 mm de espessura se somam à superfície externa da coluna com espessura de 0,70 mm.

O momento de inércia de $5,95 \times 10^5 \text{ mm}^4$ do modelo B foi obtido principalmente através do aumento das espessuras dos reforços para 2,25 mm e 1,75 mm, uma vez que a geometria principal da estrutura (largura vs. comprimento) não se alterou significativamente.

No modelo C, também houve aumento do momento de inércia, mas neste caso isso ocorreu basicamente por otimização de geometria, pois as espessuras dos reforços foram reduzidas para 2,00 mm e 1,4 mm. O aumento do momento de inércia chegou ao seu limite quando a espessura dos reforços e a resistência dos aços não permitia aumentos adicionais de espessura ou profundidade de estampagem (modelo B), onde já se aplicava aços de ultra-alta resistência (780 MPa, 3 mm).

No modelo C a utilização de aços *dual-phase* combinados com aços 22MnB5 estampados a quente permitiu que tanto a barreira da profundidade de estampagem como o da resistência dos materiais aplicados fosse ultrapassada.

A aplicação de aços estampados a quente, que viabiliza maior profundidade de estampagem e redução da espessura sem perda de resistência, permitiu a elevação do momento de inércia para $7,22 \times 10^5 \text{ mm}^4$, mas o grande salto de qualidade na estrutura foi obtido pelo aumento da resistência do reforço interno da coluna para valores da ordem de 1300 MPa.

A introdução dos métodos construtivos baseados em cálculos de elementos finitos sofisticou a elaboração da geometria das estruturas, permitindo que os engenheiros, através dos resultados obtidos pelos programas de simulação, considerassem parâmetros mais precisos acerca da geometria da estrutura e também avaliassem se as propriedades de resistência mecânica dos materiais e métodos de união envolvidos nas construções eram suficientes para atingir os resultados desejados nos ensaios de impacto.

Como as simulações de elementos finitos permitem uma avaliação precisa sobre o comportamento da estrutura em ensaios de impacto, os testes em protótipos tornaram-se, em sua maioria, desnecessários para avaliação da estrutura da carroceria. Testes de homologação ainda são necessários para atendimento aos requisitos legais, mas o trabalho de desenvolvimento pode ser feito basicamente de forma virtual.

A comparação dos resultados de ensaios de impacto conforme a norma FMVSS214 das três estruturas avaliadas indica que o aumento de resistência estrutural da coluna B proporcionou uma redução significativa das deformações após o impacto (Figura 7).

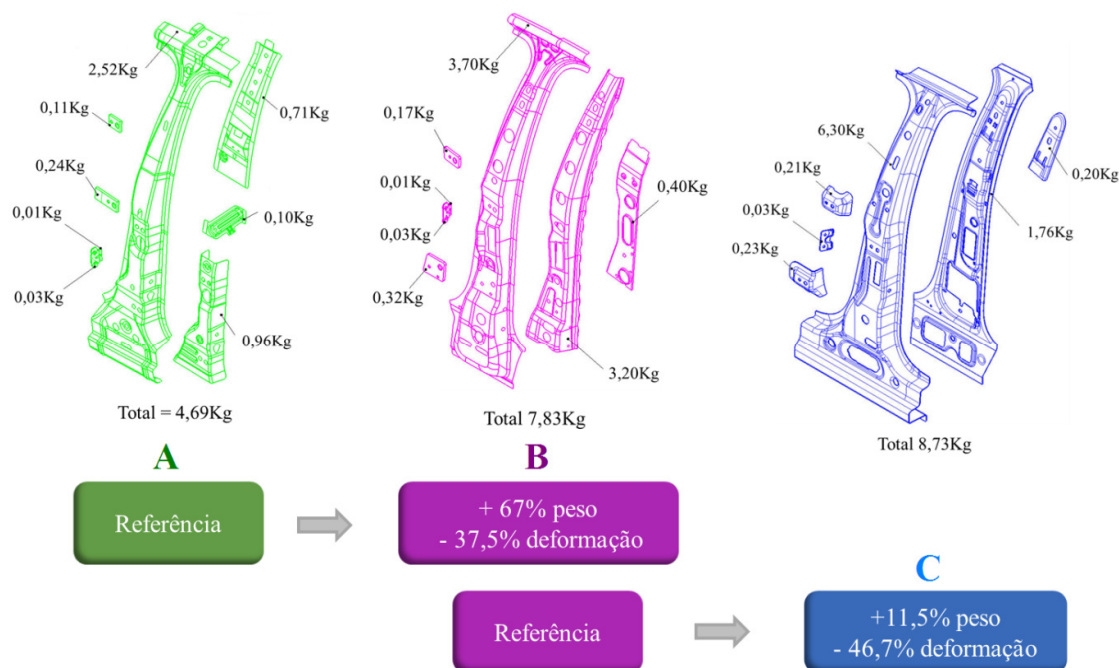


Figura 7 - Vistas explodidas de colunas B, comparação de pesos e deformações.
Fonte: Autor.

Outro aspecto decorrente da evolução dos materiais foi a mudança na tendência de aumento de peso para ganho de resistência.

Tomando-se como base o modelo “A”, que atinge o peso de 4,69 kg por conjunto, e deformação no teste de impacto lateral da ordem de 240 mm, verifica-se que o aumento de peso para ganho de resistência no modelo “B” resultou em um conjunto com 7,83 kg e deformação de 150 mm. A mudança de tecnologia com a aplicação dos aços estampados a quente elevou o peso do conjunto para 8,73 kg, entretanto reduziu a deformação no ensaio de impacto lateral para 80 mm, conforme indicado na Figura 8; ou seja, o salto tecnológico permitiu o aumento de resistência para garantir a segurança dos ocupantes, sem aumento de peso na mesma proporção.

A redução da deformação nos ensaios de impacto lateral de 240 mm para 80 mm, ou seja, uma redução de deformação para 66,6% foi obtida através de aplicação de novas tecnologias de projeto, construção e materiais combinadas, o que elevou o peso do conjunto coluna B de 4,69 kg para 8,73 kg, ou seja, aumento de peso de 86,1%. O aumento de peso comparado à redução de deformação mostra um grande avanço tecnológico cumprindo o objetivo de aumento da resistência com o menor impacto possível no peso da estrutura (KARBASIAN et al., 2010, p. 2103; KUMAR et al., 2007, p. 270).

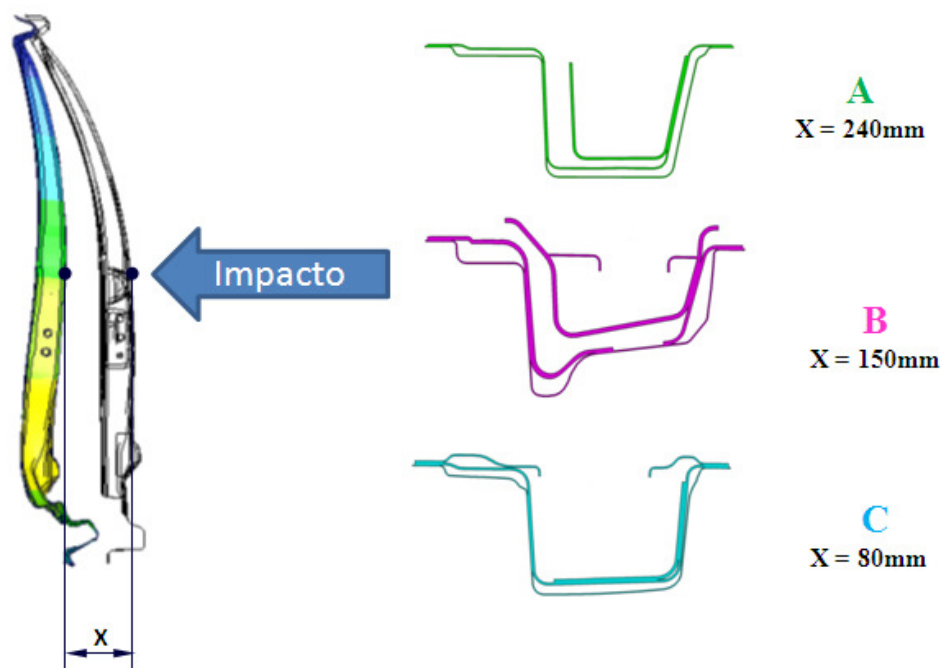


Figura 8 - Deformações de colunas B em testes de impacto da FMVSS214.
Fonte: Autor

3.3 Processos de união das chapas

3.3.1 Solda ponto por resistência

O processo de solda ponto por resistência foi patenteado nos Estados Unidos da América por Mr. Elihu Thomson sob o número 1.097.895 em 26 de maio de 1914, e vem desde então recebendo aprimoramentos tecnológicos, o que o torna o método mais aplicado isoladamente ou em conjunto com adesivos estruturais na união de peças metálicas de carrocerias automotivas (WOLFF, 2008, p. 3).

A solda a ponto por resistência consiste basicamente na fusão da região de contato entre duas ou mais chapas sobrepostas, que sob a pressão gerada pela força com a qual os eletrodos as comprimem, se fundem em função da energia produzida pela passagem de corrente elétrica entre os eletrodos (Figura 9).

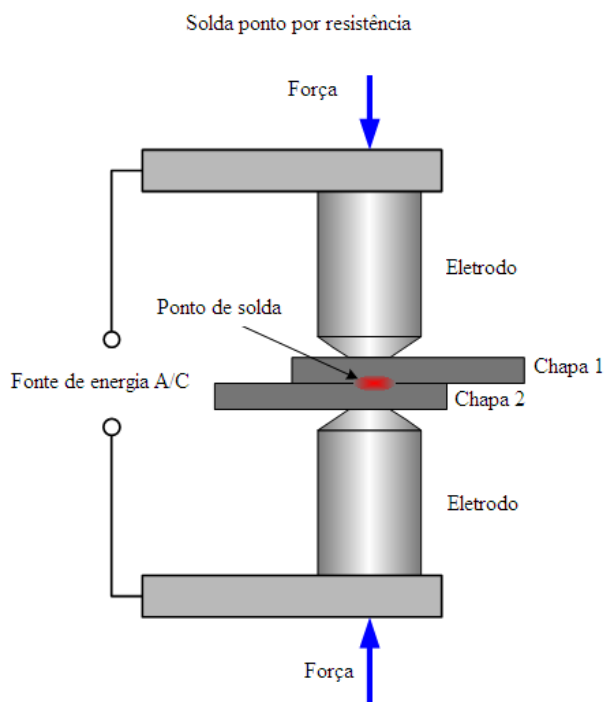


Figura 9 - Esquema básico de sistema de execução de solda ponto por resistência.
Fonte: Autor

O manual da American Welding Society, assim como os manuais de processo dos fabricantes de equipamentos de solda indicam os parâmetros para execução do processo de soldagem de forma a executar pontos de solda no menor tempo possível, visando otimização do ciclo de produção seriada, mas que garantam a qualidade da união soldada.

A energia necessária para a execução da solda é regida pela lei de Joule (equação 1).

$$(Q = I^2 R t) \quad (1)$$

Onde (Q) é a energia produzida pela passagem de corrente elétrica (I), através dos materiais a serem soldados, consequência da resistência elétrica (R) dos materiais e sua interação por determinado tempo (t).

Para que a estrutura da união soldada obtida apresente características metalográficas e de resistência adequadas, o ciclo de cada ponto de solda é definido segundo os seguintes parâmetros:

- a) Pré-pressão (daN)¹;
- b) Pulso de solda (kA/ciclos)
- c) Retenção (ms).

¹ A terminologia “pré-pressão”, comumente utilizada na indústria, refere-se na verdade à força aplicada entre as chapas a serem soldadas, isto explica a unidade de medida em daN.

No ciclo de pré-pressão, as chapas a serem soldadas são pressionadas com força suficiente para que o processo de passagem de corrente ocorra de forma pontual entre os eletrodos, e pode variar de 170 daN para chapas 0,5 mm de espessura, até 1150 daN para chapas galvanicamente zincadas de 3 mm de espessura (<http://www.duering-schweisstechnik.de>).

No ciclo de pulso de solda ocorre a aplicação da corrente elétrica que determina a fusão do material. Em equipamentos modernos, com controle eletrônico, a corrente elétrica é modulada de forma a considerar a variação da resistência elétrica do material em função do aumento de temperatura (CALLISTER, 2006, p. 362), e aumento da área de contato com os eletrodos, pois a corrente será proporcional ao comprimento do condutor e inversamente proporcional à área de passagem da corrente (CALLISTER, 2006, p. 356).

Os parâmetros de corrente de solda (kA) e tempo de aplicação (ciclos) conforme especificação do fornecedor de equipamentos de solda ponto Düring Schweisstechnik GmbH podem variar de 8 kA a 20 kA e de 2 a 50 ciclos respectivamente para o mesmo intervalo de espessuras de chapas indicado acima.

A última fase na execução do ponto de solda é dedicada a retenção da pressão dos eletrodos sobre a união, para que o sistema de refrigeração do equipamento de solda retire o calor da união soldada a taxas elevadas, o que proporciona na região de fusão de solda a formação de uma microestrutura martensítica (LIAO, et al., 2010, p. 342; PURANVARI et al., 2010, p. 3649).

A análise de uma região unida por solda ponto indicará três tipos distintos de microestrutura (Figura 10):

- a) Região de fusão (ZF)
- b) Região termicamente afetada (ZAT)
- c) Material base (MB)

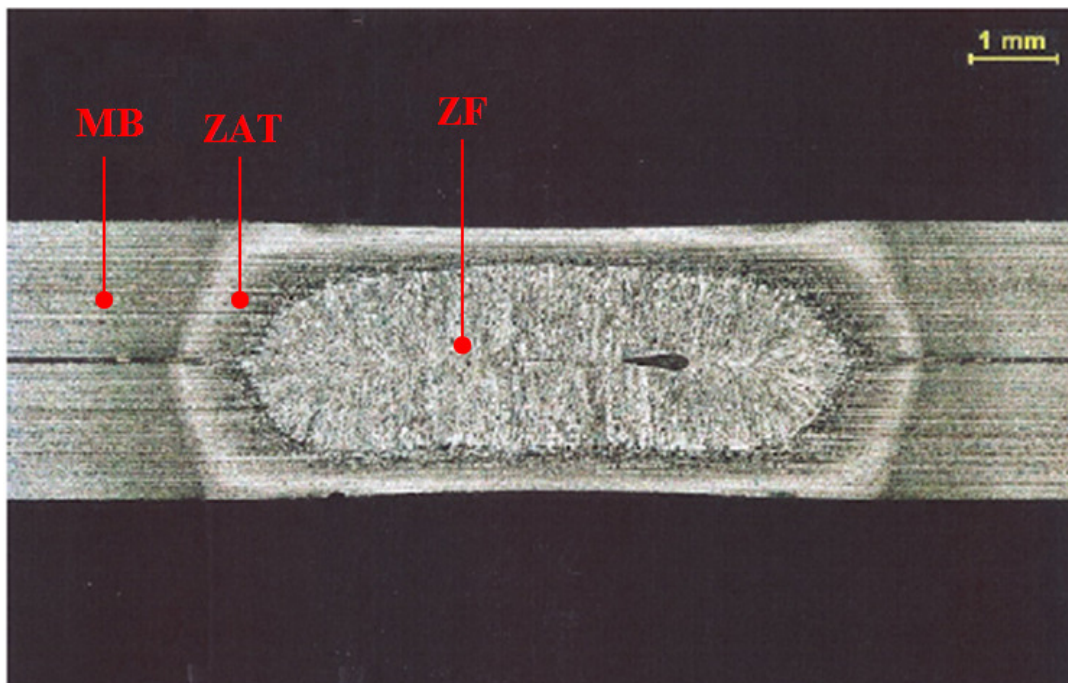


Figura 10 - Microestrutura típica de união por ponto de solda.
Fonte: Autor “adaptado de” Xin Sun et al., 2007, p. 359.

A resistência da união soldada é função da resistência dos materiais a serem unidos (MB) e da correção dos parâmetros definidos para o processo de soldagem, pois estes parâmetros definirão o diâmetro do ponto de solda (ZF) e da zona termicamente afetada (ZAT).

As regiões típicas de um ponto de solda são configuradas a partir das transformações de fase que ocorrem no processo de aquecimento e resfriamento na formação do ponto, apresentam diferentes níveis de dureza e consequentemente resistência mecânica (XIN SUN et al., 2007, p. 359).

Um dos processos utilizados para avaliação da resistência das regiões de um ponto de solda é a medição de dureza da seção transversal, tomando-se como referência o centro do ponto de solda, e estimando a resistência a tração a partir de dados normalizados.

Um ponto de solda típico apresenta zona de fusão (ZF) com maior resistência que o material base e a zona termicamente afetada (ZAT) com resistência que decresce do valor atingido na zona de fusão (ZF) até o valor de resistência do material base (MB) (Figura 11).

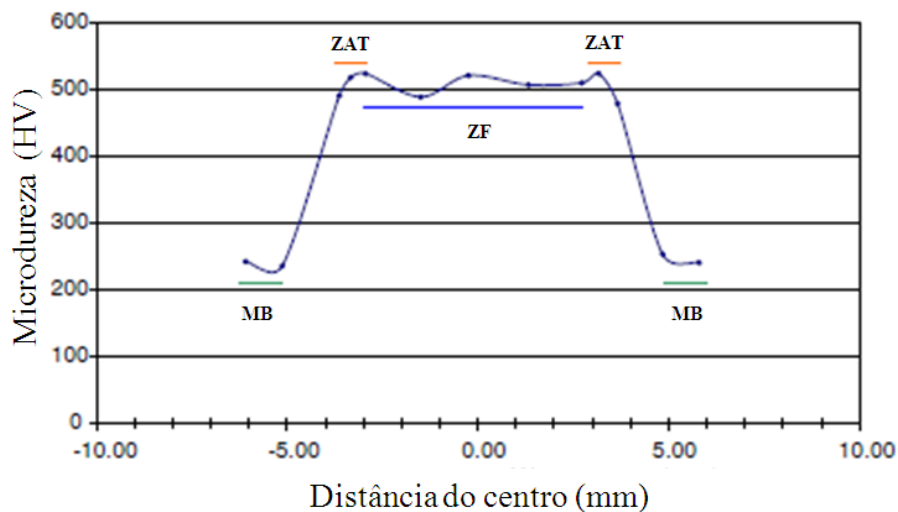


Figura 11 - Perfil de micro dureza Vickers de ponto de solda.
 Fonte: Autor “adaptado de” Xin Sum et al., 2007 , p. 359.

A avaliação da resistência de uniões soldadas através do diâmetro da região de fusão (XIN SUN et al., 2007, p. 357), indica que esta é a dimensão mais crítica para determinação da resistência da união, mas não é a única.

Tanto os manuais de solda como os estudos pesquisados neste trabalho indicam que uniões soldadas feitas com parâmetros de solda adequados com chapas de aço com espessuras que variem entre 0,5 mm e 3 mm, que são as mais comumente usadas na construção de carrocerias automotivas, atingem o maior pico de carga quando se rompem em torno do ponto de solda (XIN SUN et al., 2007, p. 357; M. PURANVARI et al., 2010, p. 3651).

Isto é compreensível quando se analisa o processo de ruptura de um ponto de solda como sendo a competição entre o diâmetro do ponto, e a carga de cisalhamento imposta à união em situações de tração (Figura 12).

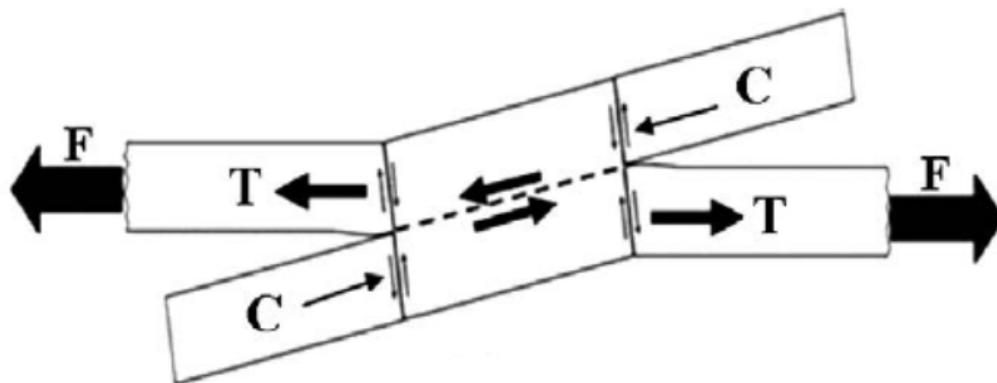


Figura 12 -Diagrama de ruptura de solda ponto.
 Fonte: Autor “adaptado de” Pouranvari, 2010, p. 3650.

Tomando como exemplo a soldagem de duas chapas de baixo teor de carbono de 1 mm de espessura, aplicando-se corretamente os parâmetros de solda indicados pelo fabricante do equipamento de solda (por ex.: Düring Schweistechnik GmbH), obtém-se pontos de solda com diâmetro de 6mm, de um material que teria o dobro da dureza do material base (MUKHOPADHAYAY et al., 2008; p. 2001; XIN SUN et al., 2007; p. 359; POURANVARI et al., 2010. P. 3648), ou seja, resistência a tração muito superior ao do material base (CALLISTER, 2006, p. 161).

A seção transversal do ponto de solda de diâmetro igual a 6 mm equivale a $28,3\text{mm}^2$ ($\pi.r^2$), enquanto que a área em torno do ponto de solda em cada chapa soldada equivale a $18,8\text{mm}^2$ ($2.\pi.r.\text{espessura da chapa}$) (Figura 13).

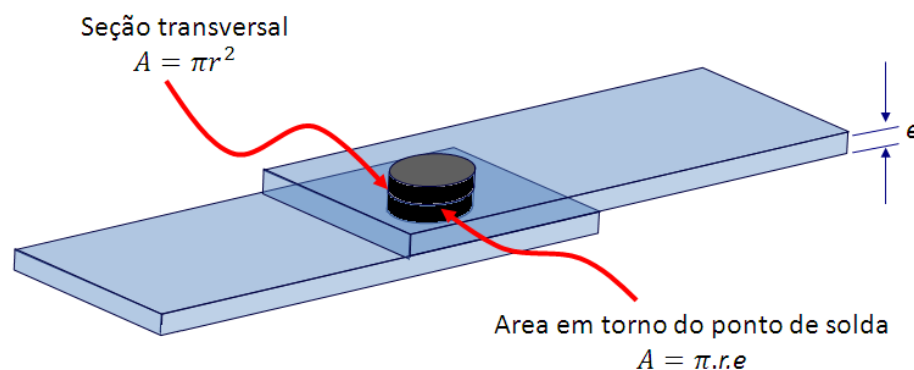


Figura 13 - Seções transversal e do perímetro do ponto de solda.
Fonte: Autor.

Mesmo sendo complexo o sistema de ruptura que se dará em torno do ponto de solda, por envolver tração, compressão e cisalhamento combinados, a área e a resistência menores da zona termicamente afetada (ZAT) em torno do ponto de solda indica que a maior probabilidade de ruptura do ponto se dá em torno da zona de fusão (ZF) de uma das chapas soldadas, e não na seção transversal do ponto de solda (Figura 14).



Figura 14 - Ponto de solda rompido na zona termicamente afetada (ZAT).

Fonte: Autor.

A taxa de resfriamento decorrente do processo de solda ponto superior a 2000°C/s determina, como já mencionado, a formação de estrutura martensítica na zona de fusão com alta probabilidade de formação de micro trincas e falhas estruturais, como indicado na pesquisa com aços DP600 (MA et al., 2008, p. 338), ou até em aços baixo carbono como o AISI 1080 (Pouranvari et al., 2010, 1391).

Em aços de alta resistência, a fração em massa de estrutura martensítica no ponto de solda aumenta devido ao maior teor de carbono existente no material, e a probabilidade de ruptura do ponto de solda da zona afetada termicamente (ZAT) se altera para a região de fusão do ponto de solda (ZF), em função de vazios que se formam na lentilha de solda durante o resfriamento do material (Figura 15).

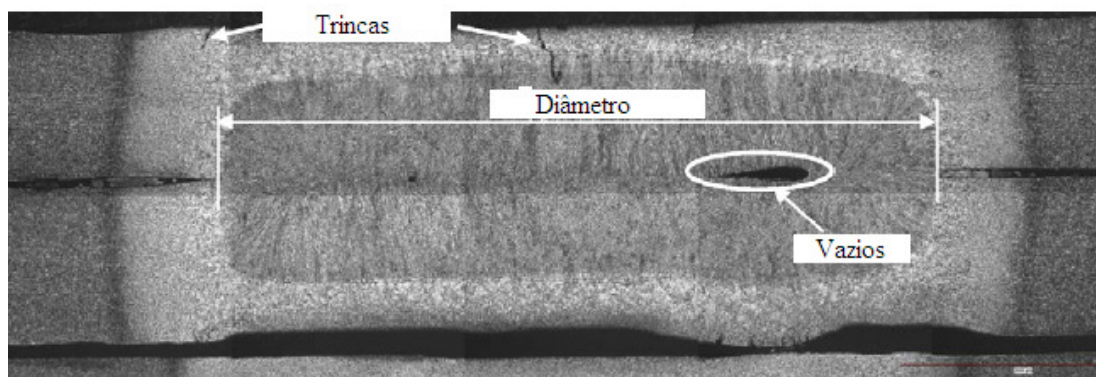


Figura 15- Micro estrutura de ponto de solda DP600.

Fonte: Autor “adaptado de” MA et al., p. 336.

O resfriamento acelerado do material na zona de fusão combinado com a retirada da pressão dos eletrodos antes da solidificação total do material na zona de fusão aumentam a probabilidade de ocorrência de trincas e vazios, que pode ser minimizada através do controle mais preciso dos parâmetros de soldagem (pré-pressão, pulso de solda, e retenção), entretanto os dois primeiros fatores dependem sobremaneira do ajuste entre as peças a serem soldadas, pois em havendo desajuste, parte da pré-pressão será usada para aproximar as peças alterando totalmente os parâmetros do processo, e conseqüentemente gerando uma união com defeitos facilitadores de ruptura (WOLFF, 2008, p. 8).

Como o processo de solda ponto depende de um ajuste perfeito entre as superfícies de contato das chapas para atingir valores ótimos de resistência, a indústria automobilística teve de desenvolver métodos para minimizar os efeitos negativos que eventuais desajustes entre as chapas pudessem causar no processo de união.

A soldagem em dispositivos automáticos com sujeição das peças por alicates, ou a definição de ordens de montagem da menor para a maior espessura são alternativas para minimizar as conseqüências que os desajustes das peças trazem para o processo de solda.

A solda em *overlapping* para uniões com mais do que duas chapas (Figura 16), é um exemplo de construção alternativa desenvolvida para evitar que o efeito *springback* do processo de estampagem cause deficiência na soldagem a ponto (HOSFORD, 2007, p. 195).

Trata-se de uma alternativa interessante, mas demanda cuidados no que se refere à forma dos recortes para redução da quantidade de chapas a serem unidas por cada ponto, e eventualmente há necessidade de comandos variáveis nos equipamentos de solda devido à soma das espessuras das chapas não ser constante.

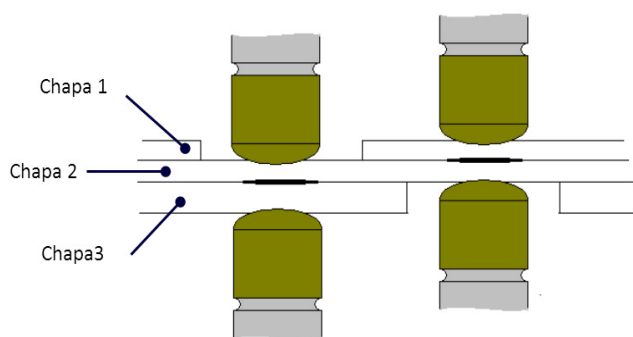


Figura 16 - Solda em "overlapping".
Fonte: Autor.

O aumento da resistência mecânica das chapas usadas nas construções de carroceria automotiva trouxe como conseqüência a necessidade do aumento da resistência entre suas

uniões, o que não seria obtido somente com o aprimoramento do processo de solda, apesar de todos os esforços tecnológicos.

3.3.2 Solda ponto por resistência associada a adesivos estruturais

A combinação do processo de solda com a aplicação de adesivos estruturais nas regiões, onde a união entre os componentes se mostra mais crítica em situações de esforços localizados, foi a saída encontrada pelos engenheiros para aumentar a resistência das uniões de componentes das carrocerias.

O uso de adesivos em veículos teve sua aplicação inicial na união entre painéis internos e externos das portas.

Esta aplicação tinha basicamente o objetivo de diminuir a possibilidade de corrosão nas regiões de grafagem, e como efeito colateral positivo aumentava a resistência da união entre as chapas (Figura 17).

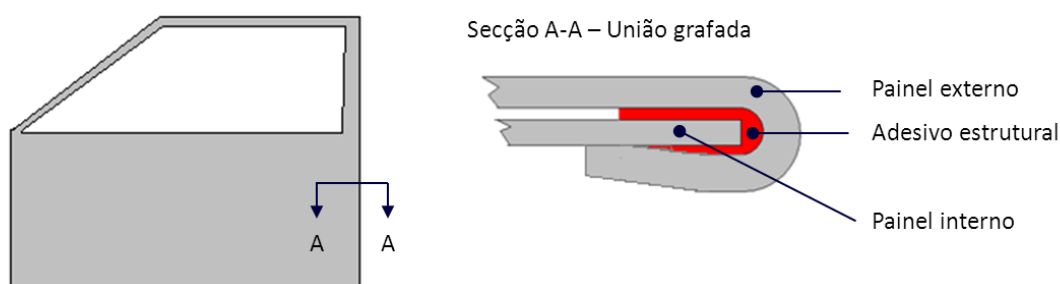


Figura 17 - Colagem entre painéis de portas.
Fonte: Autor.

Funcionando como selante, o adesivo ocupa o espaço entre as chapas evitando que a umidade relativa do ar causasse, através da condensação, a formação de atmosfera corrosiva entre os painéis, provocando a corrosão em frestas (CALLISTER, 2006, p. 516).

Os fatores que contribuem para formação de corrosão nestas regiões, tais como; superfície de corte das chapas sem a proteção galvânica, temperaturas elevadas, rebarbas remanescentes do processo de corte ou soldagem e umidade são eliminados ou neutralizados pela aplicação do adesivo.

Estes adesivos não se prestavam a função principal de aumento de resistência, pois eram a base de PVC com coeficiente de alongamento acima de 200% (DIN 53504), e resistência à tração máxima entre 5,0 a 7,5 MPa.

A introdução de adesivos de base epóxi com coeficiente de alongamento menores que 5% (DIN EN ISO 527-1) e níveis de resistência a tração superiores a 30 MPa, conferiu ao

adesivo a função principal de aumento da resistência nas uniões, viabilizando sua aplicação em outros tipos de união, como por exemplo: uniões de flanges em regiões com concentração de tensão devido às solicitações causadas por impactos.

A análise comparativa de uniões soldadas e uniões coladas e soldadas indicou aumento na resistência a tração e aumento da frequência natural da estrutura devido à melhor distribuição de carga na união soldada e colada (SILVA et al., 2011, p. 17).

O sucesso na aplicação de adesivos não depende somente de sua resistência mecânica, mas também das condições de contorno que envolvem o processo de colagem.

As superfícies de contato devem ser limpas; a camada de adesivo deve ser delgada, no caso dos adesivos estruturais automotivos entre 0,4 mm e 0,8 mm (ARENAS et al., 2009, p. 164). Este valor é perfeitamente compatível com as especificações de planicidade de flanges de solda, que nas construções avaliadas tem tolerâncias de superfície de $\pm 0,5$ mm, o que na pior condição de afastamento determinará espessura do adesivo de 1 mm.

A geometria da união deve privilegiar o esforço de cisalhamento, uma vez que juntas adesivadas não funcionam adequadamente quando solicitadas no sentido de deslocamento (Figura 18).

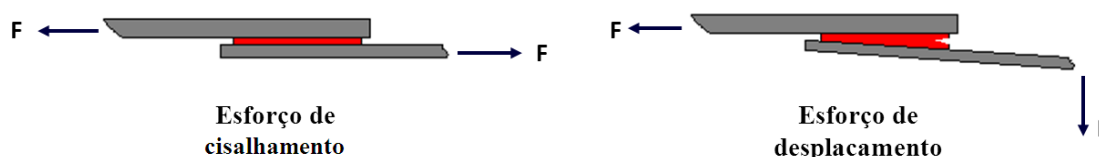


Figura 18 - Sentidos de esforços em juntas coladas.
Fonte: Autor.

A resistência mecânica proporcionada pelos adesivos estruturais está ligada à sensibilidade ao deslocamento apresentada pelos polímeros (CANEVAROLO, 2006, p. 207).

Em condições de impactos, os deslocamentos decorrentes das deformações que absorvem a energia ocorrem em curtos intervalos de tempo, em ensaios de impacto menos de 0,2 seg. Portanto, principalmente nestas situações é que a sensibilidade à deformação dos adesivos contribui para aumento da resistência da estrutura.

Nas regiões de flanges da carroceria o adesivo estrutural trabalha em conjunto com os pontos de solda aumentando a resistência da região de forma significativa pois, ao invés de trabalhar de forma discreta, como cada ponto de solda, o adesivo age de forma integrada por toda área adesivada (Figura 19), contribuindo para a resistência da estrutura e evitando o início da ruptura dos pontos de solda (AGNIESZKA et al., 2007, p. 157).

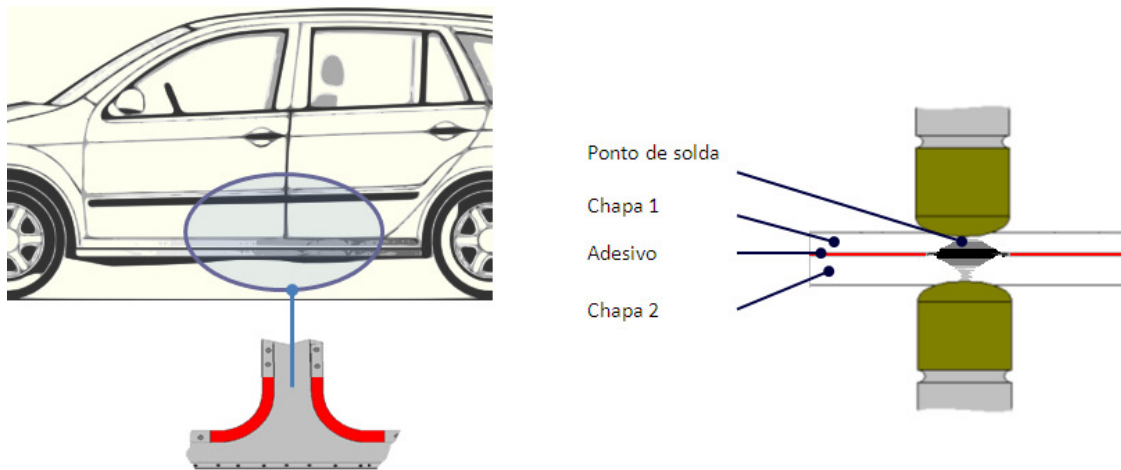


Figura 19 - Colagem entre flanges de solda.
Fonte: Autor.

A aplicação de adesivos estruturais para formação de uniões híbridas, ou seja, solda ponto combinada com adesivo, é executada ainda no processo de armação dos subconjuntos da carroceria, antes do processo de soldagem.

Uma vez sobrepostas e pré-fixadas com dispositivos de montagem, são executados os pontos de solda dos conjuntos de peças.

A cura final do adesivo ocorre durante o processo de pintura, onde a carroceria, após passagem pela lavagem e aplicação de pré-tratamento anticorrosivo, é aquecida à temperatura superior a 140°C , por pelo menos 30 minutos.

Para produção em série prefere-se a aplicação automática, por ser mais estável quanto ao volume de adesivo e velocidade de aplicação, portanto mais segura.

Para produtos de baixo volume utiliza-se a aplicação semiautomática com uso de bombas e pistolas manuais.

A maioria dos adesivos de alta resistência de base epóxi necessita de aquecimento prévio até 40°C para aplicação, por causa da sua alta viscosidade em temperatura ambiente.

3.4 Características dos materiais de construção de colunas de carrocerias

3.4.1 Materiais utilizados em construção de carrocerias

A utilização de chapas de aço na construção de carrocerias é desde os primórdios da indústria automobilística, e será por tempo ainda indeterminado, a alternativa econômica e tecnicamente recomendável, uma vez que não existem no mercado materiais com as propriedades mecânicas equivalentes às do aço a custos competitivos, principalmente para veículos de produção em larga escala.

O estudo das consequências do uso do alumínio para construção de carrocerias no final da década de 1990, principalmente para redução de peso e emissão de CO₂, indicava que a indústria do aço reagiria para manter sua competitividade, desenvolvendo materiais que através do ganho de resistência mecânica competiriam com o alumínio em desempenho, uma vez que a vantagem de custo em favor do aço nunca foi ameaçada (CARLE, 1999, p. 271).

O tempo demonstrou que a indicação estava correta, e o desenvolvimento de aços especiais denominados *Advanced High Strength Steels* (AHSSs), e *Ultra High Strength Steels* (UHSSs) estabeleceu um novo patamar de resistência dos aços aplicados na construção de carrocerias, e o uso de materiais alternativos ao aço para produção em larga escala ainda não foi viabilizado.

A aplicação de aço na construção de carrocerias, em especial nos reforços estruturais, demanda a escolha do material com as propriedades adequadas à função a ser exercida e ao processo produtivo planejado.

Exemplos divulgados pela indústria ilustram como cada componente em determinadas funções requerem soluções diferenciadas para atender requisitos de qualidade de superfície, como nos painéis de teto, tampas e portas, ou então elevada resistência mecânica como os materiais escolhidos para longarinas, travessas e colunas de portas (Figura 20).

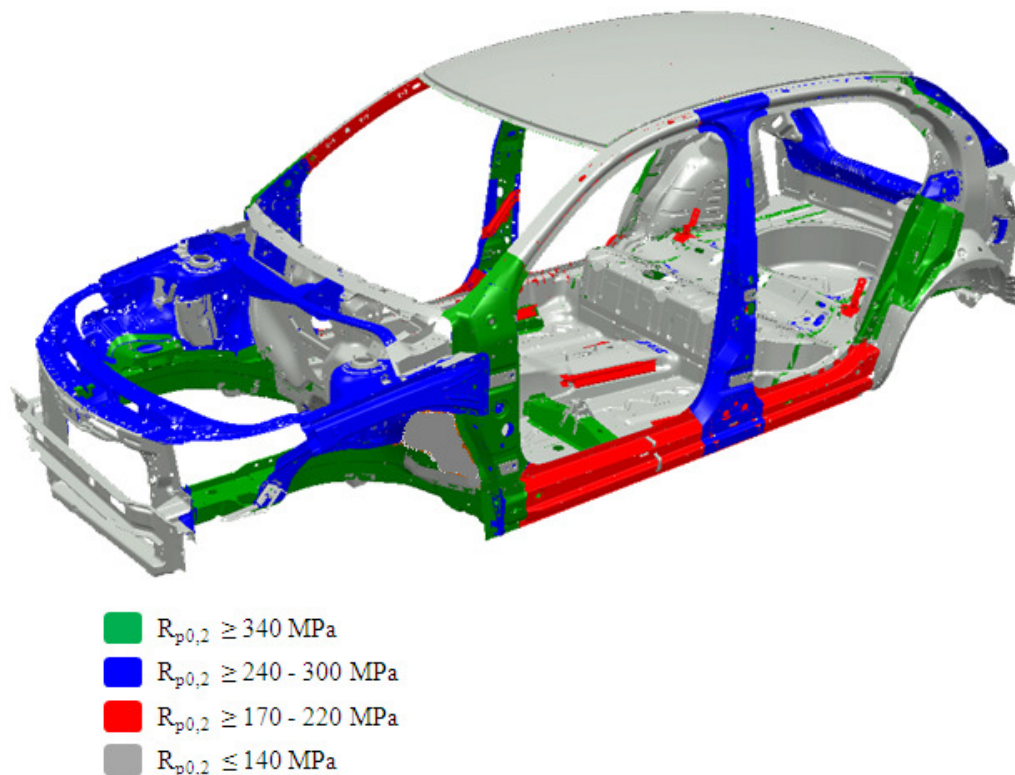


Figura 20 - Diferenças de aplicação de materiais em carrocerias VW GOL.
Fonte: Volkswagen do Brasil Ltda.

No caso das estruturas dedicadas à proteção dos ocupantes contra impactos, a aplicação de aços estruturais exigiu evoluções tecnológicas que ocorreram paralelamente na indústria siderúrgica e nas montadoras.

A aplicação de aços micro ligados, que por suas propriedades favoreciam a estampabilidade com índice de alongamento mínimo A_{80} de 24%, tinha por objetivo viabilizar a geometria de estampagem profunda das peças, pois na década de 1970 os requisitos legais contra impacto lateral ainda se restringiam a avaliação, em laboratório, da intrusão nas portas, como já mencionado.

A partir da introdução dos testes de impactos laterais na década de 1980, as colunas laterais passaram a ser construídas com reforços em aços *dual phase*, com maior resistência mecânica devido a sua estrutura metalográfica, mas que apresentavam restrições ao processo de estampagem profunda devido a redução do índice de alongamento A_{80} para valores abaixo de 20%.

A solução para o aumento da resistência das colunas estruturais combinada à necessidade de redução de peso das carrocerias foi a introdução dos aços estampados a quente na construção destes componentes.

Estes materiais permitiam o aumento da resistência do componente pronto em até três vezes os valores obtidos com os aços *dual phase*, com menores restrições à profundidade de estampabilidade, uma vez que no processo de estampagem a quente o material é conformado em uma condição de maior plasticidade pela alta temperatura em que é levado à ferramenta.

A aplicação de métodos para tomada de decisão como o *Quality Function Deployment* (QFD) ou *Analytical Hierarchy Process*, nos quais parâmetros quantitativos e qualitativos orientam a escolha entre diversos materiais para uma determinada aplicação, indicaram que, pelo menos para as colunas estruturais de veículos, o aço ainda é a melhor alternativa (MAYYAS, 2011, p. 2779).

3.4.2 Aços micro ligados

A evolução da metalurgia de produção em série, em conjunto com as necessidades de melhorias nos processos produtivos da indústria automobilística, resultou no desenvolvimento de aços de ligas especiais chamados “aços micro ligados”, que são os indicados para determinadas aplicações em construções de carrocerias (WAGENER, 1997, p. 343).

Estes aços, que tem em sua composição a adição controlada de elementos químicos, tais como nióbio (Nb), titânio (Ti), vanádio (V), resultam em materiais que apresentam

modificações em suas propriedades mecânicas, que favorecem seu processamento e aplicação.

A adição de Nb, Ti e V na liga aumenta os limites de alongamento, permitindo a produção de formas mais profundas em processo de estampagem, o que é necessário para conformação de perfis com grande profundidade de estampagem, como os perfis de colunas B de veículos, por exemplo.

Os aços micro ligados especificados na norma DIN EN 10346 que apresentam resistência à tração variando de 380 MPa a 590 MPa são indicados para estampagem profunda, portanto indicados para construção de perfis estruturais como longarinas e colunas de portas.

3.4.3 Aços *Dual Phase*

Aços *dual phase* (DP) classificados internacionalmente como *advanced high strength steels* (AHSS), foram desenvolvidos na década de 1930 e tiveram grande evolução a partir da década de 1970 devido a necessidade da indústria automobilística de aços com maior resistência mecânica, e que ao mesmo tempo apresentassem qualidade de estampabilidade elevada.

Conforme a norma DIN EN 10346 estes aços apresentam resistência mecânica que varia de 450 MPa até 980 MPa e alongamento A_{80} que varia de 27% a 10% respectivamente.

Os aços *dual phase* são produzidos a partir do recozimento em temperatura intercrítica de aços compostos de austenita e ferrita, e posterior resfriamento forçado para obter a proporção desejada de martensita em sua microestrutura (KUMAR et al., 2007, p. 270).

Este tipo de aço apresenta duas fases bem definidas constituídas de ilhas dispersas de martensita (18 a 25%) e bainita em uma matriz de ferrita, e sua principal característica é a elevada resistência mecânica para limites de escoamento relativamente altos quando comparado ao de aços baixo carbono (SARWAR et al., 2002, p. 274).

Na pesquisa realizada por (QU et al., 2008, p. 101) utilizando um aço DP laminado a frio de 1,7 mm de espessura e resistência à tração de 600 MPa, foi demonstrado que a expansão da fração martensítica imprime alterações nas propriedades mecânicas do aço, aumentando sua resistência à tração.

Os aços *dual phase* apresentam características especiais para soldabilidade, nem sempre vantajosas, apesar de sua maior resistência.

A fração martensítica e componentes de liga fazem com que este tipo de aço necessite de maior força de compressão dos eletrodos de solda e menor corrente de solda devido às maiores dureza e resistividade elétrica respectivamente (WOLF, 2008, p. 34).

Uma particularidade dos aços *dual phase* é a passagem do limite de proporcionalidade para fase de deformação plástica sem apresentar o patamar de escoamento contínuo.

Este comportamento é decorrente da transformação de austenita em martensita durante a têmpera em água, o que causa aumento de volume (cerca de 4%), causando deformações plásticas na matriz ferrítica e aumentando o volume de discordâncias que impedem a formação das atmosferas de Cottrell, que são responsáveis por caracterizar a força de limite de escoamento (BHAGAVATHI, 2010, p. 3).

A Figura 21 indica a característica de ensaios de tração de um aço baixo carbono micro ligado (1), e um aço *dual phase* (2).

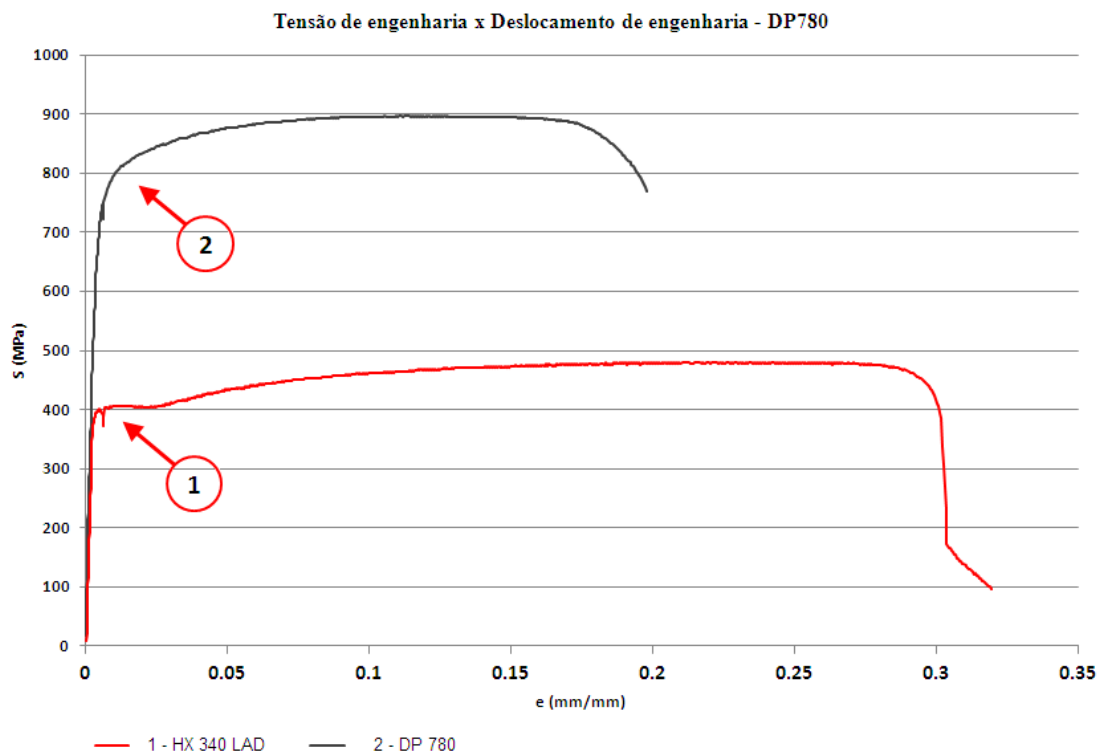


Figura 21 - Indicação do limite de escoamento.
Fonte: Autor.

Outra característica de interesse para a indústria automobilística é que a formação de microestrutura com menor potencial eletrodinâmico (ferrita / martensita) ao invés de (ferrita / perlita), confere aos aços *dual phase* maior resistência à corrosão (BHAGAVATHI, 2010, p. 5).

3.4.4 Aços para estampagem a quente

Os aços para estampagem a quente são classificados internacionalmente como *ultra high strength steels* (UHSS), e foram desenvolvidos e patenteados pela empresa sueca Plannja em 1977. Desde então, para atender às exigências de redução de peso e aumento de resistência mecânica, várias montadoras adotaram seu uso em posições estratégicas das carrocerias (KARBASIAN et al., 2010, p. 2103).

Por não encontrar referências normalizadas para especificação técnica de aços para estampagem a quente, foi adotada neste trabalho a norma Volkswagen VW TL4225 que define os parâmetros técnicos para liberação de componentes produzidos com aço 22MnB5 especial para estampagem a quente.

Este material apresenta resistência máxima à tração de 1300 MPa a 1650 MPa. e alongamento mínimo A_{80} igual a 4,5% após tratamento térmico.

O alto grau de conformabilidade que o aço 22MnB5 apresenta em altas temperaturas, permite a conformação de peças com geometria relativamente complexa, com estrutura final martensítica e espessura reduzida, além de melhor precisão geométrica devido a redução do efeito *springback* (LIU et al., 2010, p. 223).

Dois processos de estampagem a quente são aplicados pela indústria automotiva, o direto e o indireto (Figura 22).

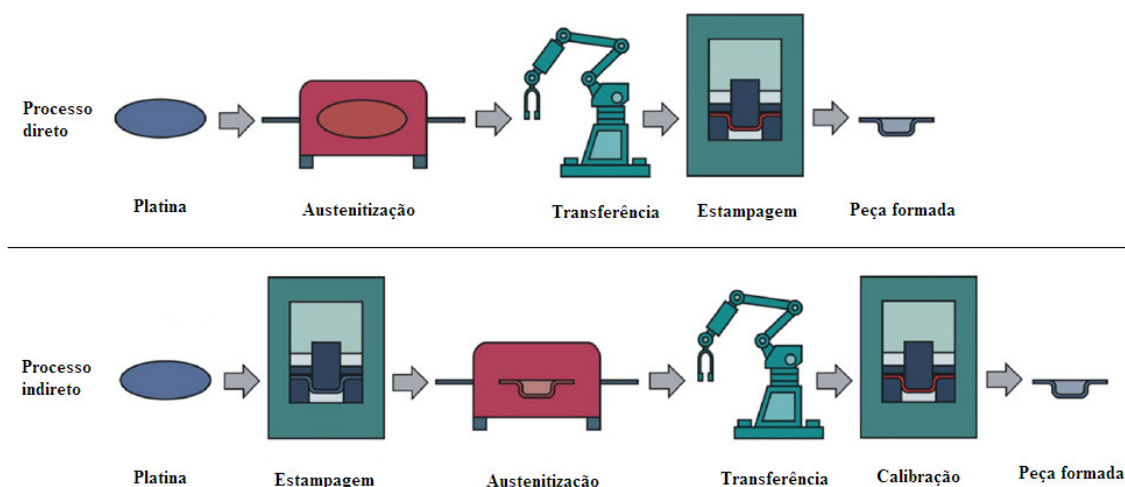


Figura 22 - Processo de estampagem a quente.

Fonte: Autor “adaptado de” H Karbasian et al., 2010 p 2104.

No processo direto a chapa é aquecida e então prensada em ferramenta refrigerada, o que provocará o resfriamento rápido do produto gerando uma microestrutura martensítica.

No processo indireto, a conformação do produto se dá à temperatura ambiente em processo de estampagem convencional e a transformação martensítica se faz no produto já conformado em uma operação de calibração.

A revisão bibliográfica efetuada por (KARBASIAN et al., 2010, p. 2104 - 2116) indica as fases e particularidades a serem observadas na configuração de processos de estampagem a quente;

- a) Material base
- b) Tratamentos superficiais da chapa
- c) Ciclo de aquecimento
- d) Tipos de fornos
- e) Características do ferramental
- f) Transformações de fase
- g) Qualidade do tratamento resultante
- h) Aspectos sobre proteção contra corrosão
- i) Aspectos de soldabilidade

O processo de estampagem direta apresenta vantagens ao necessitar de um ferramental único, reduzindo relativamente o investimento necessário, e apresentar um ciclo de produção menor; entretanto, aspectos construtivos do componente, tais como furos ou contornos específicos devem permitir sua aplicação, pois o pós-processamento só é possível através de operações de corte a laser, jato de água ou corte a quente devido a alta resistência do material (KARBASIAN et al., 2010, p. 2114).

A estampagem a quente de chapas sem proteção superficial gera formação de óxidos durante o processo de austenitização e têmpera, o que ocorre principalmente com o contato da chapa com o ar ao ser retirada do forno a cerca de 900°C (MORI, 2009, p. 267).

Como a carroceria deve ser enviada para o processo de pré-tratamento anticorrosivo e de pintura isenta de óxidos, há a necessidade de eliminação destes antes da montagem do componente estampado a quente, para evitar que mesmo entre flanges de soldagem existam resíduos causadores de corrosão decorrentes do processo de estampagem.

O uso de chapas previamente galvanizadas não é viável, devido a temperatura de fusão do zinco ser muito inferior à temperatura de autenitização do aço, o que causaria a destruição do tratamento superficial dentro do forno antes do processo de estampagem.

Alternativamente ao processo de limpeza dos óxidos por jateamento após a estampagem, foi desenvolvido o tratamento superficial de Al-Si (10% Si, 3% Fe e 87% Al),

que nas condições específicas do processo de austenitização gera uma camada protetora que evita a formação de óxidos na superfície da peça (KARBASIAN et al., 2010, p. 2104).

3.4.5 Adesivo estrutural

Os adesivos utilizados na indústria automobilística para aumento da resistência de regiões estruturais são normalmente de base epóxi classificados quanto a sua resistência conforme a norma DIN EN ISO 11343, a qual descreve os parâmetros de testes de deslocamento de corpos de prova colados em ensaio de impacto em pêndulo específico (Figura 23).

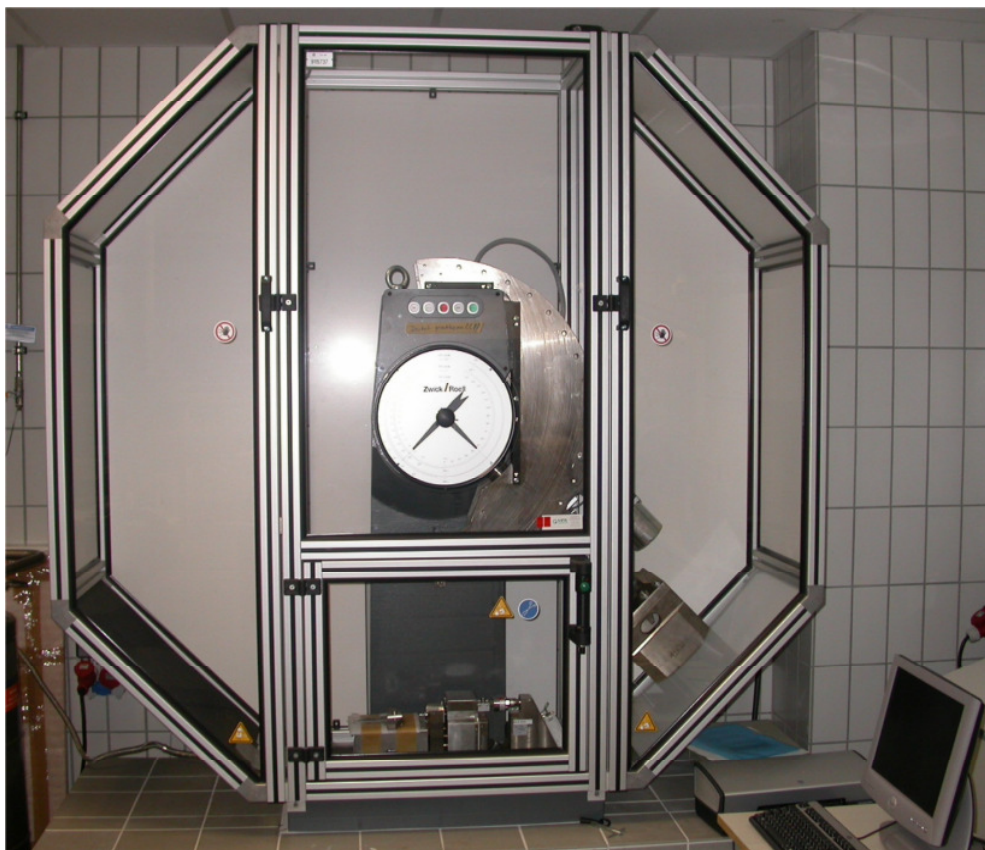


Figura 23 - Pêndulo de ensaio conforme DIN EN ISO 11343.

Fonte: Volkswagen AG.

Neste ensaio, o valor médio de energia absorvida de cinco amostras deve ser avaliado comparativamente, pois não há valor normalizado a ser respeitado.

A importância deste ensaio na qualificação do adesivo estrutural deve-se à alta sensibilidade à taxa de deformação apresentada pelos adesivos, quando comparada aos metais.

Enquanto para metais o coeficiente que determina a taxa de sensibilidade à deformação a temperatura ambiente se situa entre 0 e 0,03 (HOSFORD, 2007, p52), os

adesivos estruturais de base epóxi apresentam valores de resistência à tração crescentes, com valores que podem até dobrar a resistência a tração em função da taxa de deformação aplicada durante um impacto (CANEVAROLO, 2006, p. 206).

A composição química exata dos adesivos é propriedade intelectual do fabricante e não divulgada, e suas propriedades mecânicas são normalmente relacionadas a normas específicas escolhidas por cada fabricante, de forma que não é fácil a comparação direta entre produtos de fabricantes diversos.

Atualmente os adesivos estruturais utilizados em uniões de colunas de porta de carrocerias tem tensão de ruptura entre 30 MPa e 40 MPa.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Escolha dos materiais para pesquisa

A escolha dos materiais metálicos e do adesivo estrutural para a execução da investigação experimental orientou-se pelos tipos de materiais usados na indústria automobilística, mais especificamente na Volkswagen do Brasil Ltda.

Estes materiais são ou foram utilizados na construção de colunas de portas em veículos classe A0, ou seja, veículos pequenos para cinco passageiros.

A designação técnica normatizada dos materiais escolhidos para a pesquisa é indicada na Figura 24.

Item	Material	Especificação	Espessura / Tipo
1	Aço HX340 LAD	DIN EN 10346	0,9 mm
2	Aço DP 780	DIN EN 10346	2,0 mm
3	22MnB5	VW TL4255 ²	1,9 mm
4	Adesivo estrutural base epóxi	Sika Power 492	-

Figura 24 - Materiais do estudo experimental.

Fonte: Autor

O aço HX340 LAD é um aço micro ligado, indicado para construções mecânicas estruturais e é usado normalmente em peças de carroceria de estampagem profunda ou geometria complexa devido a raios pequenos e profundos.

O aço DP780 é um aço *dual phase* indicado para aplicações estruturais de alta resistência, utilizado em construções de colunas, longarinas e reforços localizados em regiões de ligação de componentes estruturais.

O aço 22MnB5 é um aço especialmente desenvolvido para estampagem a quente. Em estado de fornecimento é semelhante a aços baixo carbono *dual phase* no que se refere a sua composição química, entretanto, quanto austenitizado e temperado no processo de estampagem a quente, atinge alto nível de resistência mecânica devido a transformação martensítica.

Os valores de resistência a tração especificados, assim como os obtidos nos ensaios de tração conforme a norma ASTM E8/E8M 09, são indicados em conjunto nos resultados dos ensaios das amostras.

Os materiais metálicos utilizados foram obtidos do fornecedor ArcelorMittal Brasil, no estado de entrega à montadora, exceto o aço 22MnB5 que não é disponível no momento

² A norma VW TL4255 é uma especificação da Volkswagen AG, editada internamente em maio de 2006 para especificar as características de fornecimento de chapas de aço 22MnB5 para aplicações de estampagem a quente.

no Brasil e foi cedido pela empresa SSAB Swedish Steel a partir de sua fábrica em Borlänge na Suécia.

O adesivo estrutural Sika Power 492, importado da Alemanha, foi cedido pela empresa SIKA Group em bisnagas de 300 ml para aplicação com pistola pneumática manual.

4.2 Determinação da composição química dos materiais metálicos envolvidos.

A determinação da composição química dos materiais foi executada através de espectrometria de emissão atômica, conforme procedimento ASTM E1915 e E1097.

Para os materiais HX340 LAD e DP780 ensaios foram executados no centro de pesquisas químicas do Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais da Fundação Educacional Inaciana Pe. Saboia de Medeiros – FEI, e do material 22MnB5 executado no laboratório de materiais da Volkswagen do Brasil Ltda.

Os ensaios de espectrometria de emissão atômica indicaram as composições químicas dos materiais metálicos apresentados nas Figura 25 e Figura 26.

Amostra	Elementos (%) em massa							
	Fe	C	Si	S	Mn	Cr+Mo	Al	Nb+Ti
HX340LAD	97,07	0,16	0,38	0,02	2,30	0,041	0,023	-
DIN EN 10346	Balanço	Max. 0,11	Max. 0,50	Max. 0,025	Max. 1,00	N/A	N/A	N/A
DP780	98,09	0,24	0,27	0,001	1,18	0,17	0,050	0,036
DIN EN 10346	N/A	Max. 0,18	Max. 0,80	Max. 0,015	Max. 2,50	Max. 1,00	≤ 2,00	Max. 0,15

Figura 25 - Composição química das amostras.

Fonte: Autor / centro de pesquisas químicas do Centro Universitário da FEI

Amostra	Elementos (%) em massa					
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo
22MnB5	98,13	0,25	0,26	1,10	0,16	0,08
TL4255	Balanço	0,20 a 0,25	0,15 a 0,40	1,10 a 1,40	≤0,35	≤0,35
Amostra	P	S	Ti	Al	B	
22MnB5	0,012	<0,001	0,038	0,039	0,0033	
TL4255	≤0,025	≤0,005	0,020 a 0,050	0,020 a 0,050	0,020 a 0,050	

Figura 26 - Composição química das amostras.

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

Os resultados obtidos indicam que os materiais HX340LAD e DP780 apresentam desvios em relação à especificação.

O aço HX340LAD apresenta desvio de 0,04% na composição de C (permitido desvio de ±0,02%) e desvio de 1,3% na composição de Mn (desvio permitido de ± 0,10%).

O aço DP780 apresenta desvio de 0,06% na composição de C (desvio permitido de $\pm 0,02\%$)

Os desvios no percentual em massa de C na composição dos aços HX340LAD e DP780 não indicam mudança significativa em suas características de resistência ou de processamento, pois em ambos os casos, o percentual de C está abaixo de 0,25%, o que ainda os inclui na classe de aços de baixo teor de C em sua composição (CALLISTER, 2006, p. 397-398).

Considerando que estes materiais foram produzidos no Brasil e que conforme a norma NBR 10735 o percentual máximo de C pode atingir 0,2, em relação a este componente químico não há desvio em relação à especificação brasileira.

A mesma norma especifica que outros elementos químicos podem ser adicionados à liga para atendimento das propriedades mecânicas sem especificar limites.

O aço 22MnB5 não apresentou desvios em relação à especificação adotada.

4.3 Determinação da estrutura metalográfica dos materiais metálicos envolvidos

As características metalográficas dos materiais metálicos envolvidos foram examinadas em microscópio Olympus BX60M com ampliação 1000X através do programa de computador de aquisição de imagens *Analysis Image Processing Olympus*.

Esta avaliação se fez necessária para certificar qual o tipo de estrutura metalográfica dos materiais estaria envolvida nos processos de união por solda a ponto.

A preparação dos corpos de prova para análise metalográfica seguiu as seguintes etapas:

- a) Embutimento dos materiais em baquelite
- b) Lixamento com prato 120 em água por 2 minutos
- c) Polimento para 9 μ por 3 minutos
- d) Polimento para 3 μ por 20 minutos
- e) Polimento para 1 μ por 5 minutos
- f) Ataque com Nital 3%

Preparação executada em politriz *Struers Tegra POL-15*.

Ensaio realizado no laboratório de materiais da Volkswagen do Brasil Ltda.

As características metalográficas dos aços com ampliação de 1000 vezes são indicadas nas imagens a seguir.

As indicações longitudinal e transversal referem-se ao sentido de laminação das amostras informadas pelo fornecedor no ato da entrega.

O aço HX340 LAD apresentou estrutura ferrítica com pequenas inclusões, não indicando orientação dos grãos decorrente o sentido de laminação (Figura 27).

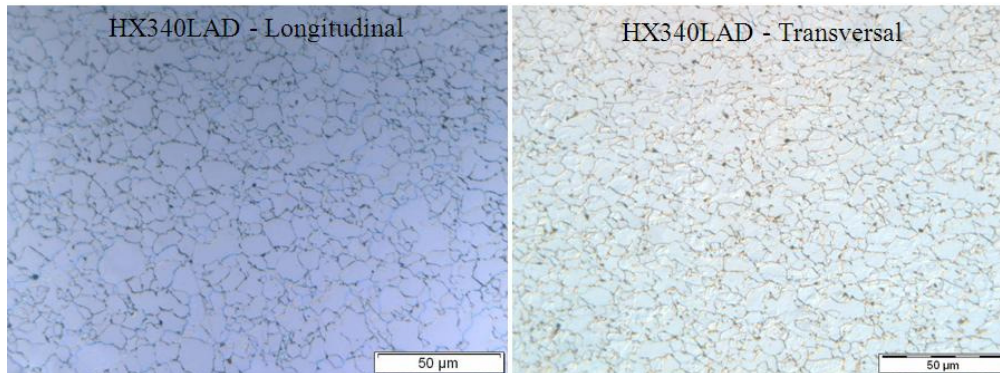


Figura 27 - Foto micrográfica do aço HX340LAD.

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

O aço DP780 apresenta matriz ferrítica com ilhas dispersas de martensita característica de aços *dual phase* e clara indicação do sentido de laminação (Figura 28).

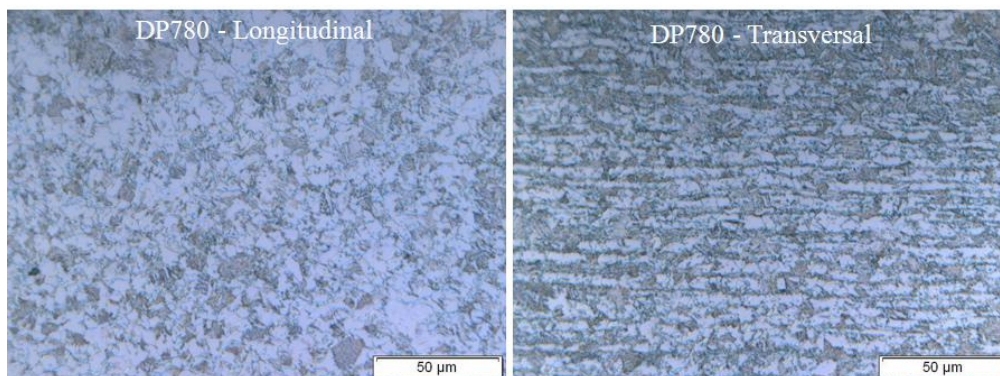


Figura 28 - Foto micrográfica do aço DP780.

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

O aço 22MnB5 após tratamento térmico apresentou estrutura martensítica grosseira (Figura 29).

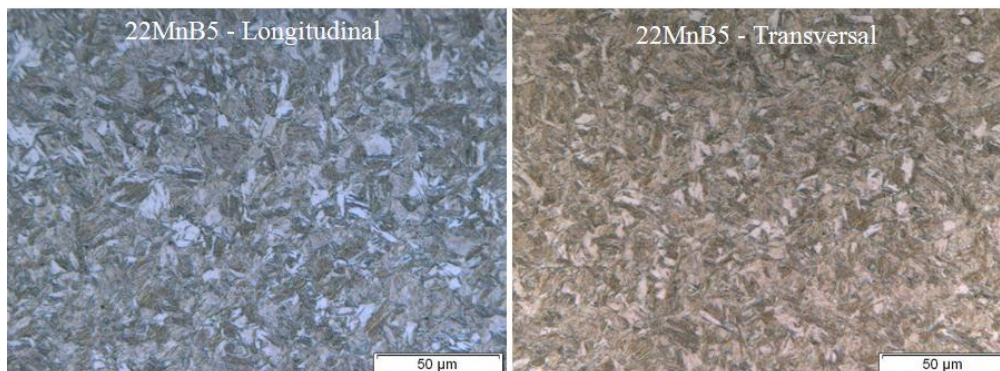
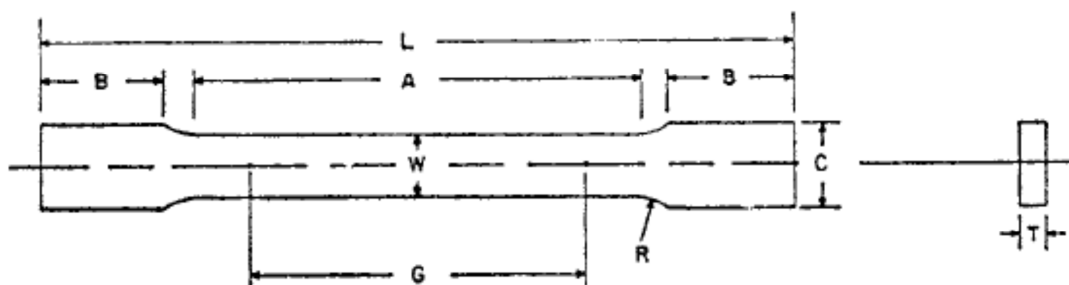


Figura 29 - Foto micrográfica do aço 22MnB5 após tratamento térmico.

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

4.4 Medição da resistência à tração dos materiais metálicos envolvidos

A caracterização dos índices de resistência à tração dos materiais metálicos foi executada através de ensaios de tração, em corpos de prova de dimensões conforme ASTM E8/E8M 09, tipo chapa (Figura 30).



G	W	T	R	L	A	B	C
50,0mm	12,5mm	Espessura	12,5mm	200mm	57mm	50mm	20mm

Figura 30 - Padrão de corpo de prova para ensaio de tração ASTM

Fonte: ASTM E8/E8M-09

A preparação dos corpos de prova envolveu corte por jato de água para evitar que tensões residuais decorrentes de processo de corte por cisalhamento influenciassem nos resultados obtidos.

Conforme especificado na norma DIN EN 10346 e VW TL 4225, as amostras para ensaio de tração foram preparadas no sentido transversal ao sentido de laminação.

Por orientação da norma, utiliza-se o sentido transversal ao sentido de laminação para ensaios de tração, a favor da segurança da construção.

Esta orientação é adotada na Volkswagen, pois o sentido de laminação tem relação direta com a resistência à fadiga das chapas laminadas e, quando possível, adota-se o sentido longitudinal de laminação para o posicionamento da chapa para que esforços de fadiga no componente sejam perpendiculares ao sentido de laminação.

Para determinação das características de resistência do material 22MnB5 no estado processado, ou seja, temperado no processo de estampagem a quente, corpos de prova com as mesmas dimensões dos utilizados nos ensaios de tração conforme ASTM E8/E8M 09 foram tratados termicamente de acordo com as seguintes etapas:

- Decapagem para remoção química do revestimento de alumínio/silício (AlSi).
- Pré-aquecimento: 400°C (60').
- Austenitização: 930°C (10').
- Martêmpera: 160°C (3').
- Resfriamento final: ao ar

A resistência à tração obtida através do tratamento térmico foi estimada com base nos resultados de medição da dureza superficial dos corpos de prova (CALLISTER, 2006, p. 161).

Apesar da imprecisão relacionada a este método, este recurso foi utilizado para verificação da eficácia do tratamento térmico de forma simplificada, antes dos ensaios de tração planejados.

Os valores de dureza Rockwell foram obtidos através de medição em durômetro Microtest 3212B conforme norma ABNT NM ISO 6507-1 e comparados os valores obtidos com a tabela de correlação da norma DIN EN ISO 18265 no laboratório de materiais da Volkswagen do Brasil Ltda. (Tabela 1).

Tabela 1 – Dureza e estimativa de resistência à tração das amostras de 22MnB5

Amostra	Dureza (HRC)	Tensão (MPa)
26	46	1485
27	44	1420
30	42	1320
31	46	1485
32	44	1420
33	42	1320
Média		1408
Desvio da amostra (s)		74
Especificação		Rm = 1300 a 1600 MPa

Fonte: Autor

Os resultados indicaram que o processo de tratamento térmico produziu amostras com resistência compatível à especificada para o material 22MnB5 após processo de estampagem a quente.

Para certificação dos valores de resistência dos materiais escolhidos, foram realizados ensaios em máquina de tração universal conforme ASTM E8/E8M, determinados média e desvio padrão da amostra, e comparados com a especificação do referido material (Tabela 2).

Tabela 2 – Resultados médios dos ensaios de tração dos materiais metálicos

Material tipo 1 (HX340 LAD)	$\sigma = 479 \text{ MPa} \pm 1,8 \text{ MPa}$
Especificação DIN EN 10346	$R_m = 410 \text{ MPa} - 510 \text{ MPa}$
Material tipo 2 (DP780)	$\sigma = 894 \text{ MPa} \pm 17,3 \text{ MPa}$
Especificação DIN EN 10346	$R_m = 780 \text{ MPa}$ mínimo
Amostra tipo 3 (22MnB5)	$\sigma = 638 \text{ MPa} / \pm 7,0 \text{ MPa}$ (base)
Especificação VW TL4225	$R_m = 500 \text{ MPa} - 700 \text{ MPa}$
Amostra tipo 4 (22MnB5)	$\sigma = 1536 \text{ MPa} / \pm 13,8 \text{ MPa}$ (temperado)
Especificação VW TL4225	$R_m = 1300 \text{ MPa} - 1650 \text{ MPa}$

Fonte: Autor

A comparação do resultado médio de cinco amostras para cada tipo de material contra sua especificação indicou que todos os materiais correspondem a especificação técnica de resistência à tração.

Os resultados médios dos ensaios, assim como os valores mínimos e máximos são indicados abaixo (Figura 31).

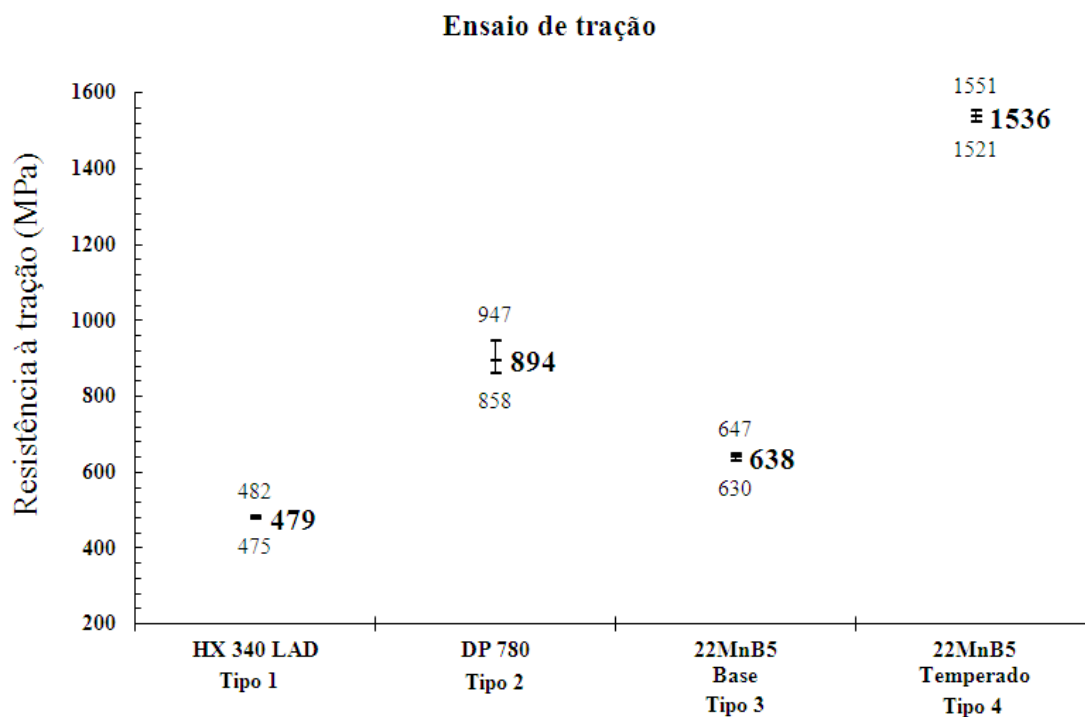


Figura 31 - Resultado comparativo dos ensaios de tração dos materiais metálicos.

Fonte: Autor.

Os diagramas a seguir caracterizam os ensaios de tração dos materiais metálicos (Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35), e a Figura 36 indica comparativamente o comportamento de cada tipo de material utilizado na pesquisa no ensaio de tração.

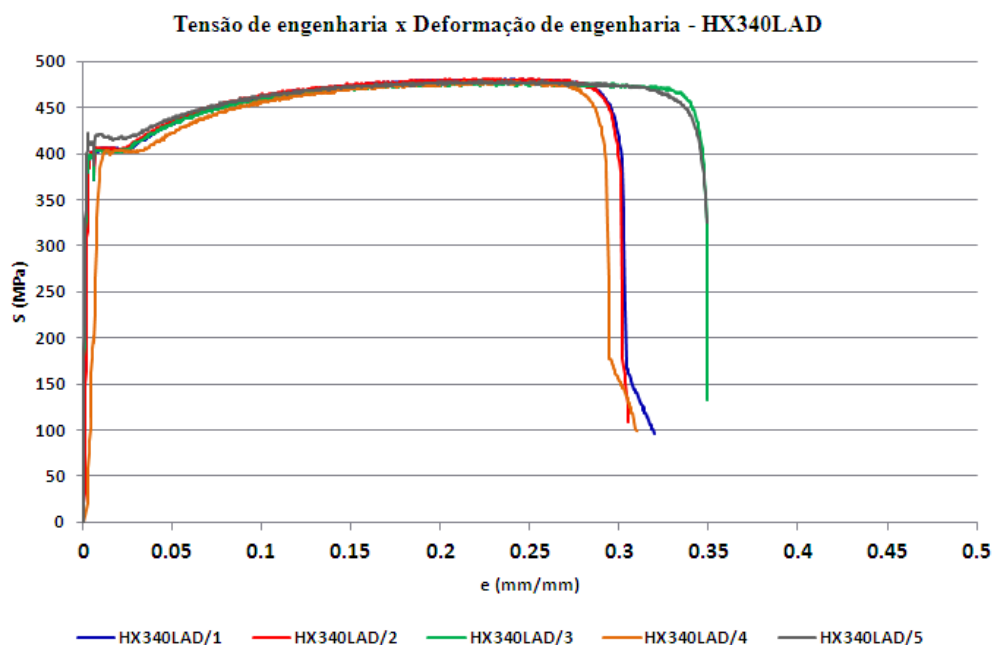


Figura 32 - Diagrama tensão por deformação de aço microligado HX340L
Fonte: Autor

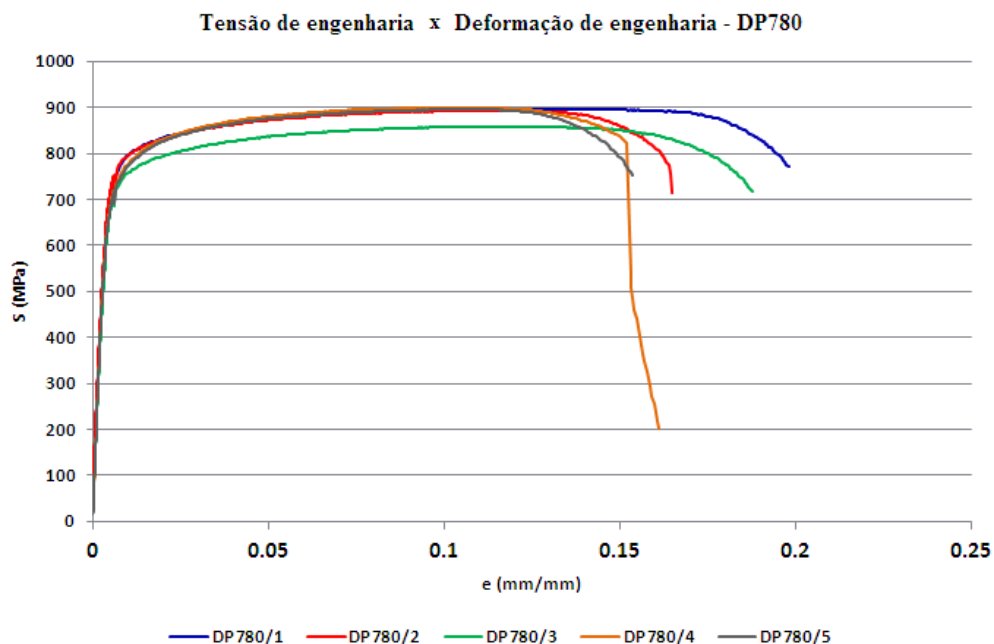


Figura 33 - Diagrama tensão por deformação de aço “Dual Phase” DP780
Fonte: Autor.

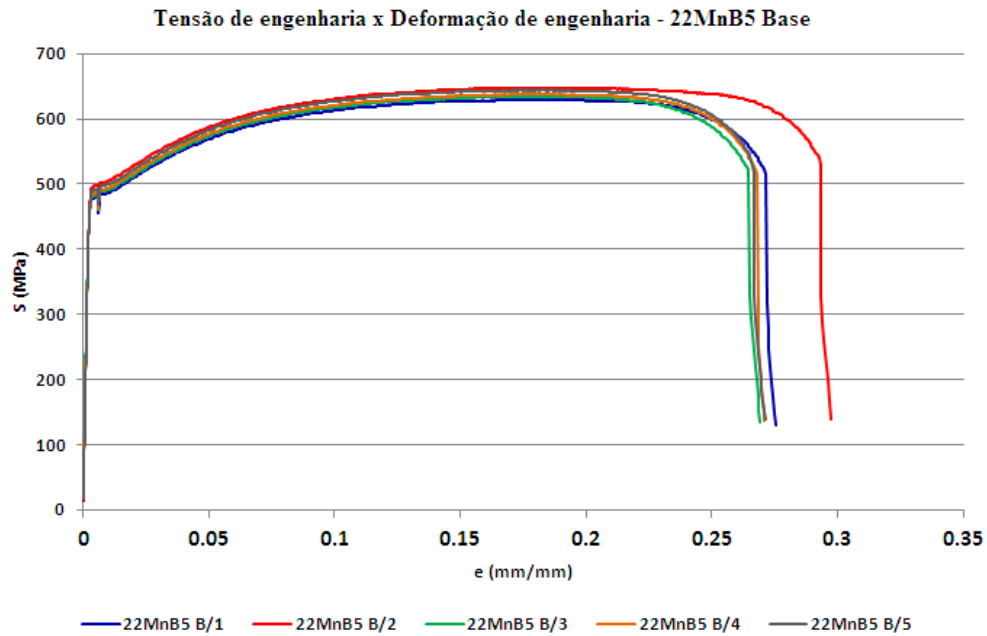


Figura 34 - Diagrama tensão por deformação de aço 22MnB5 Base
Fonte: Autor

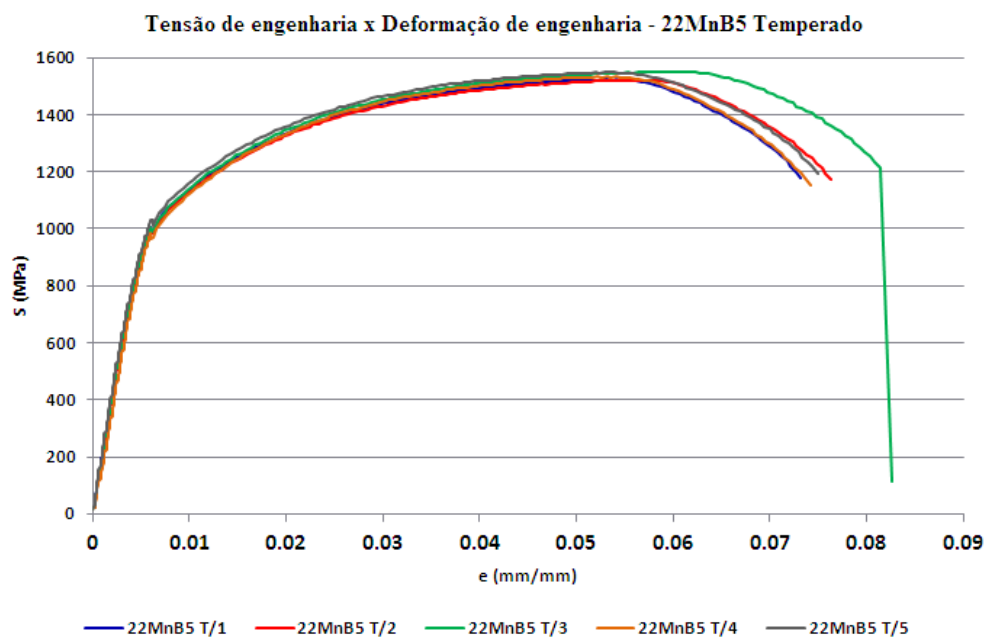


Figura 35 - Diagrama tensão por deformação de aço 22MnB5 Temperado
Fonte: Autor

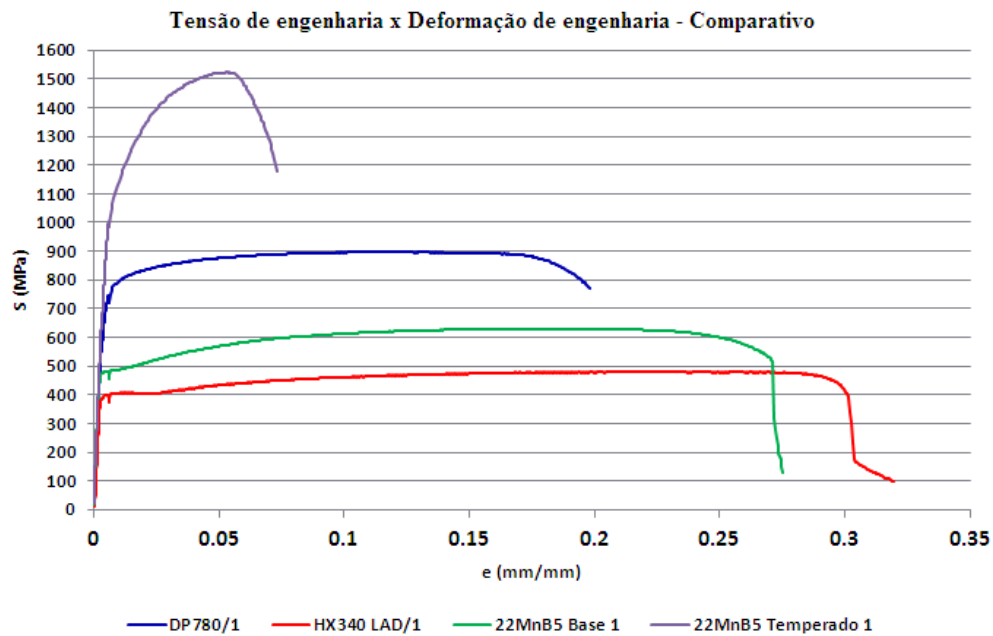


Figura 36 - Diagrama tensão por deformação comparativa entre amostras dos aços
Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram fotografados após os ensaios (Figura 37).

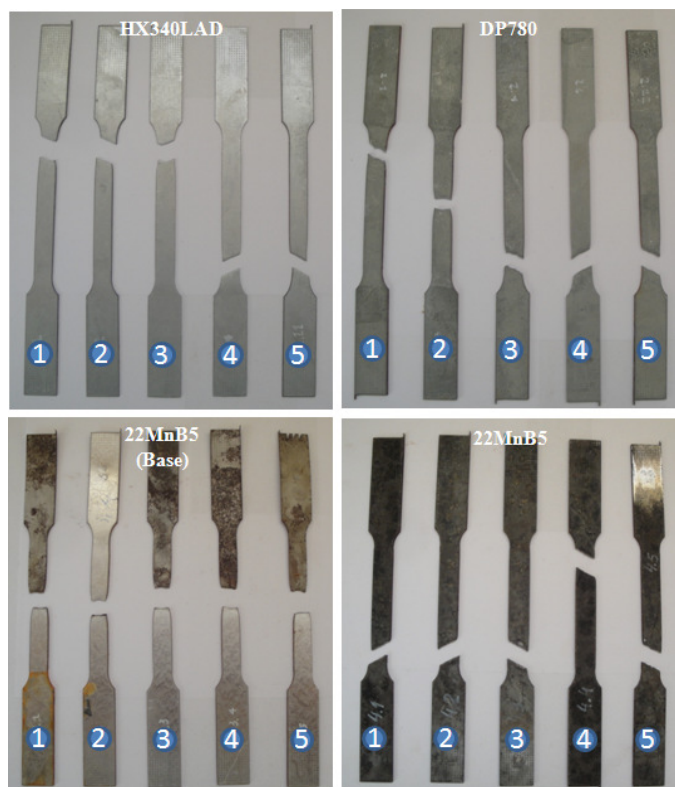


Figura 37 - Fotos dos corpos de prova do ensaio de tração conforme ASTM E8/E8M
Fonte: Autor

Os ensaios de tração conforme ASTM E8/E8M 09 foram conduzidos no laboratório de materiais da FEI, em máquina de tração universal *MTS 810 Material Test System*, com velocidade de ensaio de 5 mm/min.

Para efeito de comparação das propriedades de absorção de energia dos materiais aplicados nas estruturas investigadas neste trabalho, relevante para aplicação em colunas laterais de veículos, foram calculados os valores de tenacidade das amostras de HX340LAD, DP780 e 22MnB5 temperado (Tabela 3), determinando-se a área sob os diagramas de ensaio de tração (força x deslocamento) até o ponto de ruptura de uma amostra de cada tipo de aço (Figura 38).

Tabela 3 – Tenacidade dos tipos de aços.

Material	HX340LAD	DP780	22MnB5 Temp
Espessura	0,9 mm	2,0 mm	1,9 mm
Tenacidade	8850 Nm	22500 Nm	11440 Nm

Fonte: Autor

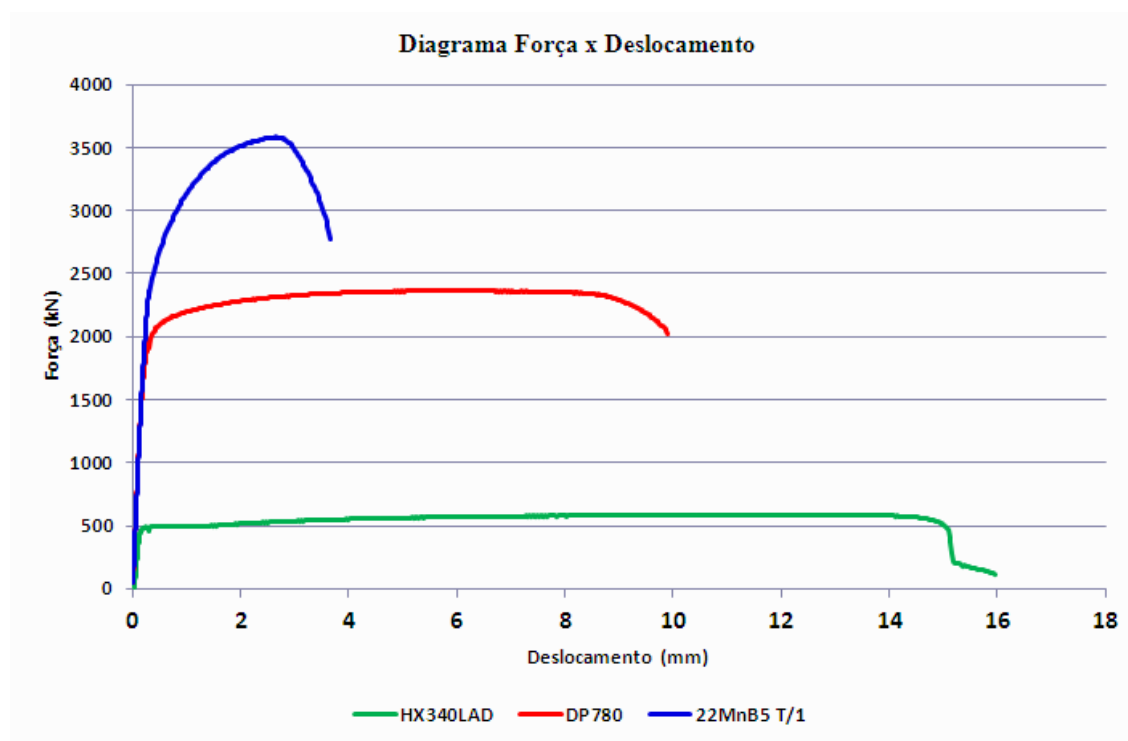


Figura 38 - Diagrama força por deslocamento comparativo dos aços investigados.

Fonte: Autor

4.5 Composição química e propriedades mecânicas do adesivo

A composição química do adesivo Sika Power 492 é propriedade intelectual protegida da empresa Sika Automotive GmbH, e não foi investigada no âmbito desta pesquisa.

As características técnicas do adesivo publicadas pelo fabricante estão indicadas abaixo (Figura 39).

Informações técnicas do adesivo SikaPower® 492:	
Base química	Epóxi
Densidade antes / após cura	1,30 / 1,35 kg/l
Temperatura de aplicação	50°C – 60°C
Tempo e temperatura de cura	20min / 75°C
Resistência a tração (ISO 527)	30 MPa (2mm/min)
Alongamento para ruptura	8%
TGV (Temperatura de transição vítrea)	105°C

Figura 39 - Dados técnicos do adesivo.

Fonte: Catálogo técnico da empresa Sika Automotive GmbH.

Os ensaios de tração conduzidos para avaliação da sensibilidade à taxa de deformação confirmaram a resistência à tração do adesivo em tração a baixa velocidade.

Os resultados dos ensaios de tração do adesivo são apresentados em conjunto com os dados dos ensaios de tração com alta taxa de deformação para determinação da sensibilidade do adesivo à taxa de deformação.

4.6 Método de levantamento da resistência a tração de uniões

Para avaliar comparativamente a resistência das uniões de chapas em relação à evolução da resistência mecânica dos materiais aplicados nas construções automobilísticas, foram preparados corpos de prova para ensaios de tração (Figura 40).

Tipo	Material A	Material B	Solda	Adesivo
1	HX340LAD	DP780	Sim	Não
2	HX340LAD	DP780	Sim	Sim
3	HX340LAD	22MnB5	Sim	Não
4	HX340LAD	22MnB5	Sim	Sim
5	DP780	22MnB5	Sim	Não
6	DP780	22MnB5	Sim	Sim

Figura 40 - Tipos de corpos de prova para ensaios de tração.

Fonte: Autor.

A definição das dimensões dos corpos de prova de 1 a 6 visou garantir que o ponto de solda fosse posicionado em relação à borda da chapa a uma distância maior do que nos flanges soldados em colunas de veículos (de 15 mm a 18 mm), para evitar que a resistência da secção transversal do corpo de prova viesse a influenciar a resistência do ponto de solda e, portanto não mais comparável a construção da estrutura automobilística.

O processo de solda foi executado em máquina de solda Düring X215 / 75 kVA com eletrodos semiesféricos com diâmetro de 16 mm, na área de construção de protótipos da Volkswagen do Brasil Ltda.

Os parâmetros de soldagem utilizados respeitaram a definição indicada no manual do fabricante do equipamento de solda (Tabela 4).

Visando manter a comparabilidade dos resultados foram mantidas as dimensões para os corpos de prova soldados e colados (Figura 41 e Figura 42).

Tabela 4 – Parâmetros de solda.

Espessuras (mm)	Tempo de Pré-Pressão	1ª solda	1º Refrig.	2ª solda	Tempo de Pós-pressão	Força dos eletrodos
0,9 x 1,9	1000 ms	100 ms / 5 kA	20 ms	500 ms / 6 kA	1000 ms	2 kN
0,9 x 2,0	1000 ms	100 ms / 5 kA	20 ms	500 ms / 6 kA	1000 ms	2 kN
1,9 x 2,0	1000 ms	100 ms / 3 kA	50 ms	600 ms / 5 kA	1000 ms	2 kN

Fonte: Autor

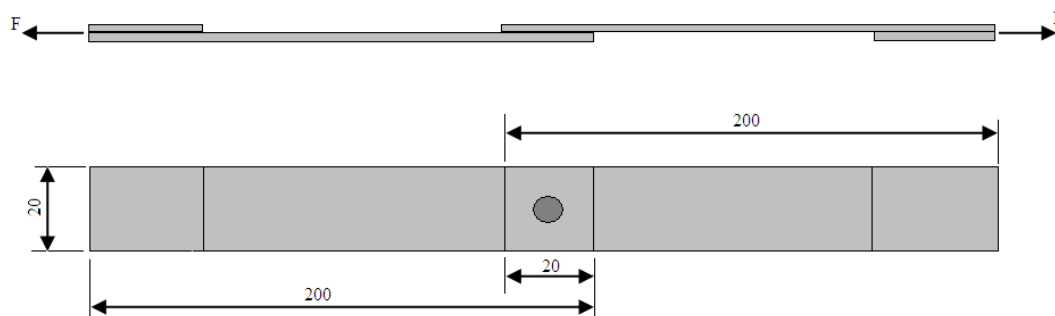


Figura 41 - Corpo de prova soldado.

Fonte: Autor.

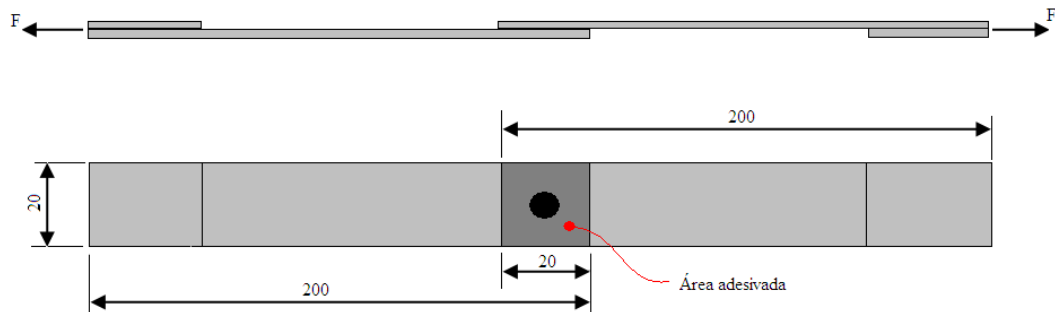


Figura 42 - Corpo de prova soldado e colado.

Fonte: Autor.

Seguindo o padrão utilizado na indústria automobilística e resultados experimentais da investigação de ARENAS et al. (2009, p.163), a espessura do adesivo entre chapas foi mantida entre 0,4 mm e 0,8 mm, por ser este o intervalo que apresenta maior resistência a tração.

A área de aplicação do adesivo foi assegurada com o uso de proteção sobre as chapas nas regiões onde o adesivo não deveria atuar, e o comprimento total dos corpos de prova assegurado com a utilização de dispositivo de montagem dos corpos de prova (Figura 43).

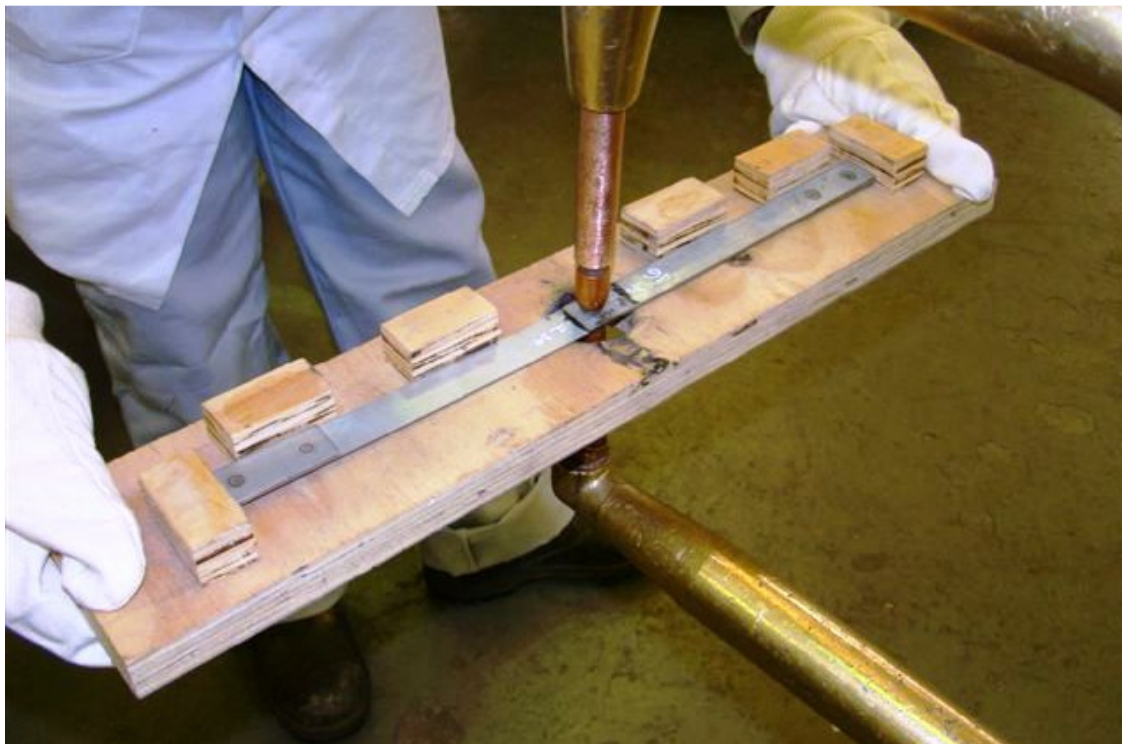


Figura 43 - Soldagem dos corpos de prova.
Fonte: Autor.

O ponto de solda foi efetuado sobre a superfície com adesivo, porém antes da cura, obedecendo a ordem do processo de montagem de carrocerias na indústria.

A cura do adesivo foi obtida em estufa com circulação de ar com temperatura de 80°C por 20 minutos.

Para evitar que o desalinhamento do esforço de tração em relação ao centro da união gerasse momento e consequentemente esforço de flexão na união, foram soldados calços nas extremidades dos corpos de prova para todos os ensaios entre uniões. Este recurso também foi utilizado por outros pesquisadores (XIN SUN et al., 2007, p.360; Wolff, 2008, p. 43).

A verificação da influência da adição de adesivo na variação da resistência das uniões soldadas foi efetuada através da aplicação do teste estatístico de hipótese de duas distribuições e variâncias desconhecidas com significância de 5%.

4.7 Método de determinação da resistência através da micro dureza

A resistência mecânica dos materiais metálicos nas três partes características de pontos de solda, ou seja, zona de fusão (ZF), zona afetada termicamente (ZAT), e material base (MB), pode ser determinada pelo levantamento de perfil de micro dureza da região soldada.

Esta técnica é validada pela proporcionalidade entre a dureza do material e o limite de resistência à tração (CALLISTER, 2006, p. 160-161).

Portanto, foram determinados os perfis de micro dureza Vickers conforme norma ABNT NM ISO 6507-1, e comparados os valores obtidos com a tabela de correlação da norma DIN EN ISO 18265 em durômetro *Microtest* 3212B no laboratório de materiais da Volkswagen do Brasil Ltda.

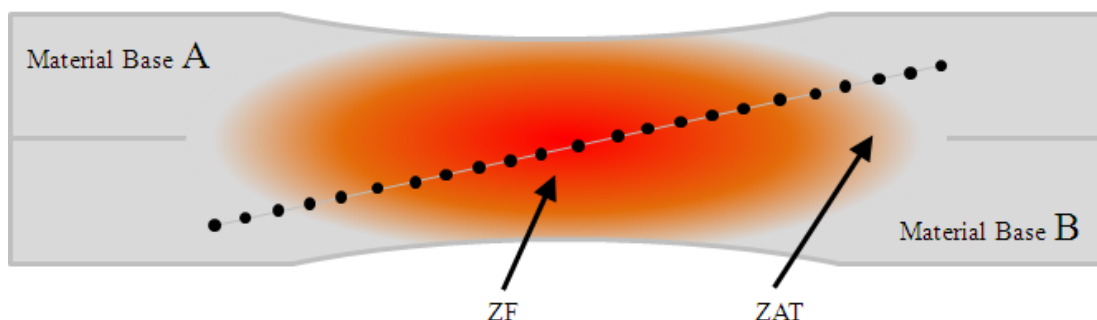


Figura 44 – Esquema de execução de endentações
Fonte: Autor

4.8 Método de determinação da sensibilidade à taxa de deformação

Para investigar a sensibilidade à taxa de deformação do adesivo foram realizados testes de tração em atuador hidráulico com variação da velocidade de afastamento dos cabecotes de fixação do corpo de prova.

Em função da disponibilidade e por ter resistência a tração suficiente para garantir a realização dos ensaios de tração do adesivo, o material metálico escolhido para execução destes ensaios foi o aço micro ligado HX340LAD.

As dimensões dos corpos de prova foram reduzidas para aumentar a resistência relativa do adesivo ao da espessura da chapa utilizada no ensaio.

A preparação dos corpos de prova seguiu a seguinte sequência:

- Preparação das chapas com material (Figura 45).
- Colagem dos corpos de prova.
- Cura do adesivo em estufa a temperatura de 80°C por 20 minutos.

Para garantir as dimensões da área adesivada entre as chapas, as regiões adjacentes à superfície a ser colada foram protegidas com fita adesiva, e as chapas foram montadas em um dispositivo que orientou posicionamento nas dimensões estabelecidas para os corpos de prova (Figura 46).

Também nesta montagem foram colados calços nas extremidades dos corpos de prova para evitar desalinhamento do esforço de tração em relação à área colada, a exemplo do que foi executado nos ensaios de tração dos corpos de prova soldados. Apesar de não indicado especificamente, este recurso também foi aplicado por (ARENAS et al., 2010, p. 162).

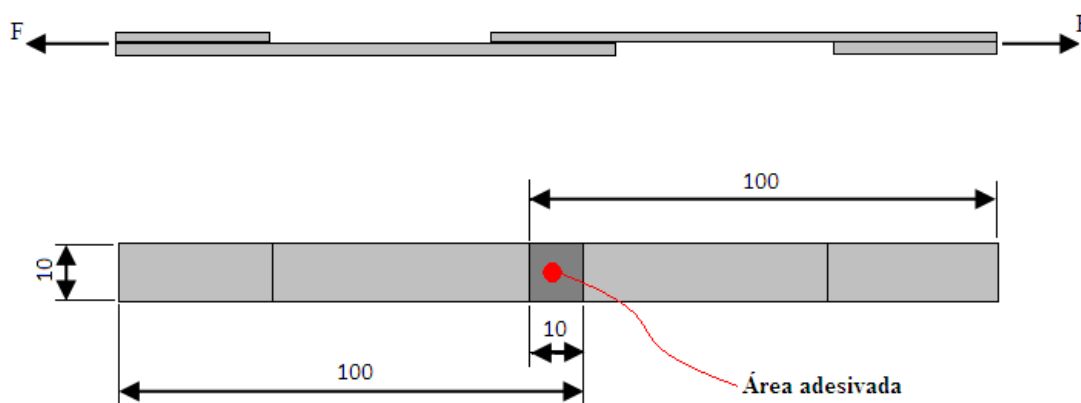


Figura 45 - Corpo de prova colado.
Fonte: Autor.

A determinação da velocidade de ensaio foi executada de forma indireta, através da integração eletrônica do pulso de aceleração imposta ao cabeçote móvel, para determinação da velocidade relativa de afastamento dos cabeçotes de fixação dos corpos de prova.

Visando evitar que eventuais escorregamentos entre as chapas e o cabeçote de fixação influenciassem no sinal de aceleração, o acelerômetro utilizado para aquisição do sinal foi colado na chapa fixada no cabeçote móvel (Figura 47).

O pulso de aceleração foi obtido através de acelerômetro triaxial modelo 2422-050 Silicon Designs, conectado ao sistema de aquisição de dados modelo Quantum X MX840 HBM.



Figura 46 - Preparação dos corpos de prova colados.
Fonte: Autor.

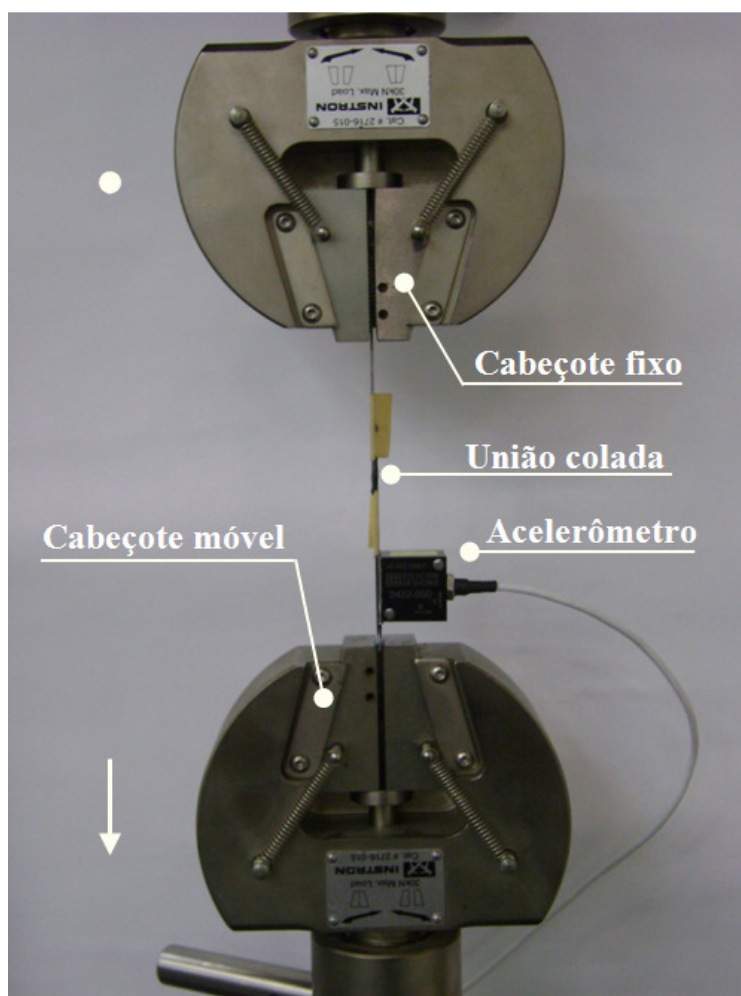


Figura 47 - Montagem para determinação da sensibilidade a deformação do adesivo
Fonte: Autor

4.9 Método de integração matemática dos dados

Para obtenção dos valores de tenacidade dos corpos de prova dos ensaios de tração conforme ASTM E8/E8M 09, assim como velocidade e deslocamento nos ensaios de tração para determinação da sensibilidade à taxa de deformação do adesivo estrutural, foram efetuados cálculos de integração aproximada aplicando-se a regra do trapézio (Figura 48)

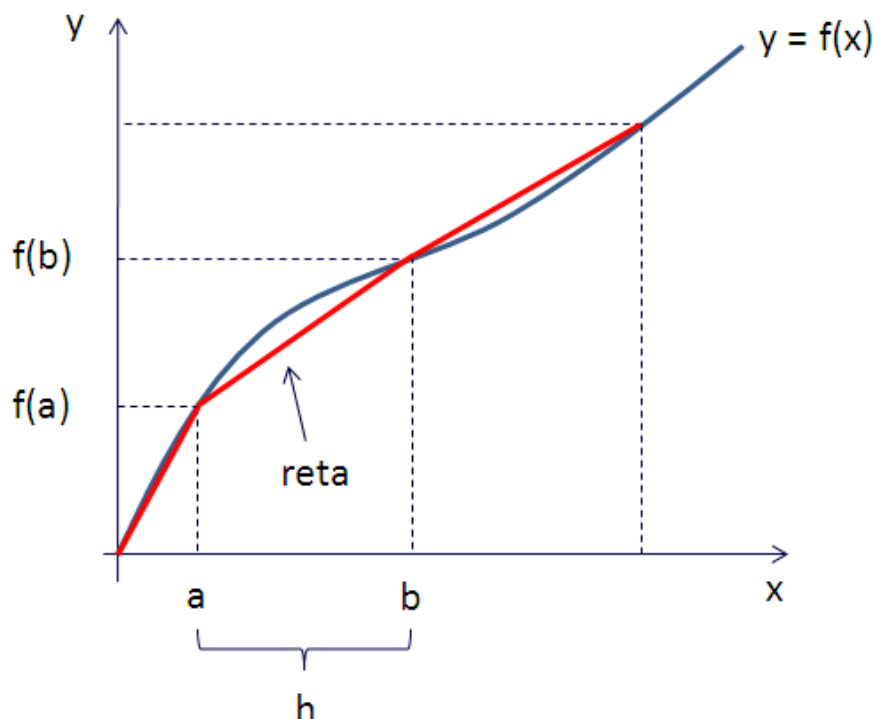


Figura 48 - Esquema de integração pelo método do trapézio.
Fonte: Autor.

A área abaixo da curva obtida a partir dos dados dos ensaios foi determinada com a integração aproximada (equação 4).

$$\int_a^b f(x) dx \cong (b-a) \left(\frac{f(a) + f(b)}{2} \right) \quad (4)$$

Não foram calculados os erros decorrentes da aplicação desta regra, uma vez que para o objetivo das comparações os mesmos foram considerados irrelevantes.

4.10 Teste estatístico dos resultados de ensaios de tração

Para a avaliação da possível influência do adesivo na resistência da união foi aplicado o teste estatístico de hipótese de duas distribuições e variâncias desconhecidas com significância de 5%, tomando como base os resultados dos ensaios de tração das uniões.

O teste de hipótese aplicado seguiu as equações 5 e 6:

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1).S_1^2 + (n_2 - 1).S_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)} \quad (5)$$

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (6)$$

Onde:

$\bar{x}_1$ e $\bar{x}_2$ = Médias dos ensaios de tração das amostras

s_1 e s_2 = Desvio padrão dos ensaios de tração das amostras

n_1 e n_2 = Número de amostras consideradas (5)

S_p = Variância

t_0 = Teste estatístico usando tabela de Student

5 RESULTADOS

5.1 Ensaio de tração de uniões

Os resultados médios obtidos nos ensaios de tração efetuados com uniões unicamente soldadas, assim como as uniões soldadas e coladas são indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela de resultados médios dos ensaios das uniões de chapas.

Amostra (n)	Força de ruptura da união (kN)					
	Tipo 1 HX340LAD DP780 Soldado	Tipo 2 HX340LAD DP780 Soldado+Cola	Tipo 3 HX340LAD 22MnB5 Soldado	Tipo 4 HX340LAD 22MnB5 Soldado+Cola	Tipo 5 DP780 22MnB5 Soldado	Tipo 6 DP780 22MnB5 Soldado+Cola
1	8.0	7.9	7.2	8.2	22.2	31.2
2	7.7	7.5	7.1	8.0	26.5	26.9
3	8.0	8.0	7.2	8.1	24.5	29.6
4	8.2	7.9	7.9	7.5	28.5	31.3
5	7.6	7.7	8.0	8.3	28.6	24.8
Média	7.9	7.8	7.5	8.0	26.0	28.8
Desvio padrão	0.2	0.2	0.4	0.3	2.4	2.6

Fonte: Autor.

O diagrama da Figura 49 indica comparativamente os valores médios, máximos e mínimos dos ensaios de tração efetuados com uniões.

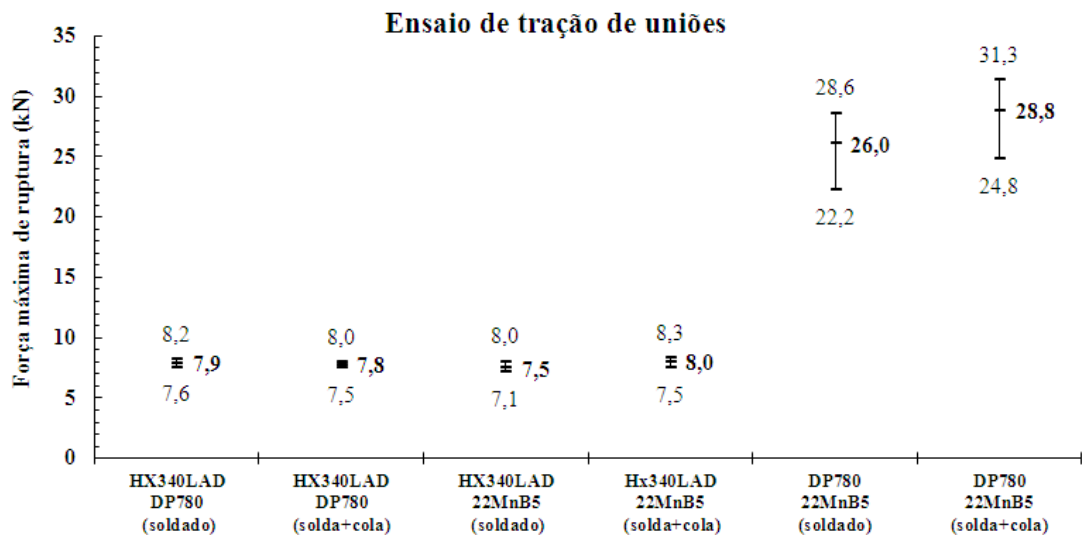


Figura 49 - Resultados dos ensaios de tração das uniões soldadas / soldadas e coladas.

Fonte: Autor.

Os testes de tração das uniões indicaram que a variação da força de ruptura tem relação com a resistência da chapa mais fraca, e a adição de adesivo estrutural não causou

influência significativa na resistência da união em situação de tração a baixa velocidade (5 mm/min).

Nos ensaios envolvendo o material HX340LAD com o material DP780 a ruptura ocorreu sempre na região adjacente ao ponto de solda na chapa do material HX340LAD (Figura 50), indicando que a seção transversal da chapa apresenta resistência inferior ao ponto de solda.

Os diagramas de força por deslocamento dos ensaios (Figura 51 e Figura 52) indicam força de ruptura com desvios de 0,2 kN, caracterizando estabilidade do esforço necessário para ruptura total do corpo de prova, entretanto devido a combinação de esforços tração, compressão e cisalhamento que agem sobre a união a partir da deformação causada pelo desalinhamento das chapas após o início da ruptura, o deslocamento total até o rompimento das uniões variam significativamente entre as amostras.

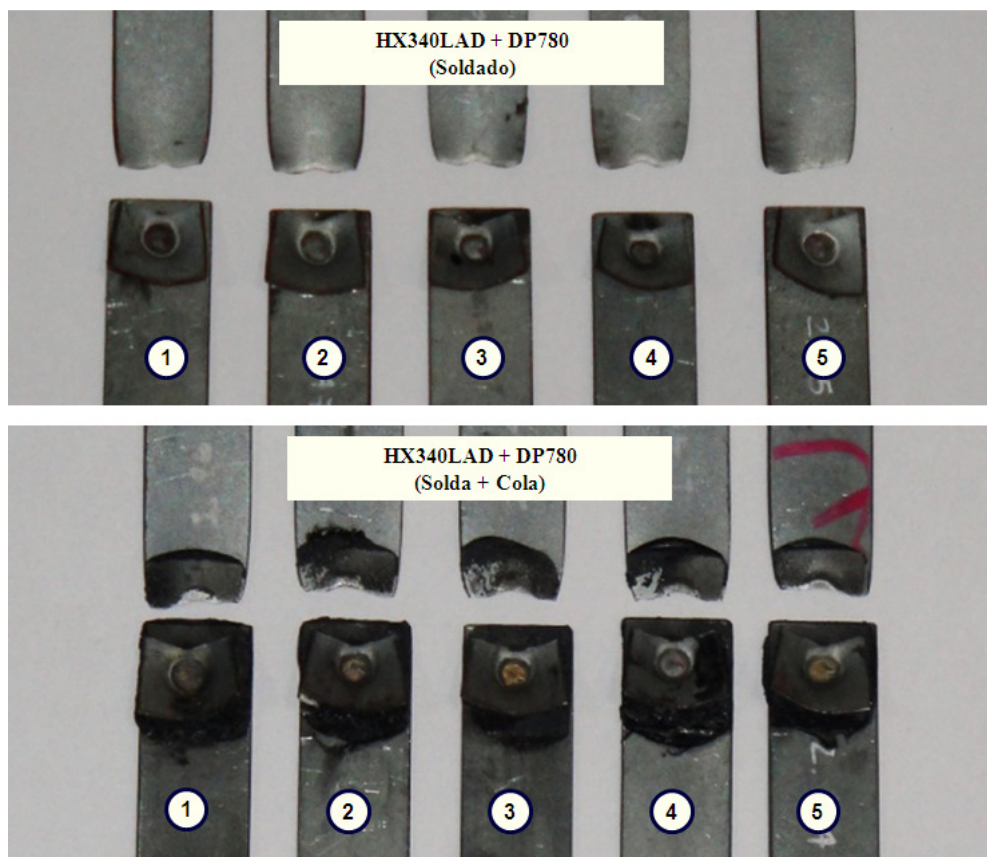


Figura 50 - Detalhe das uniões soldadas rompidas HX340LAD + DP780.
Fonte: Autor.

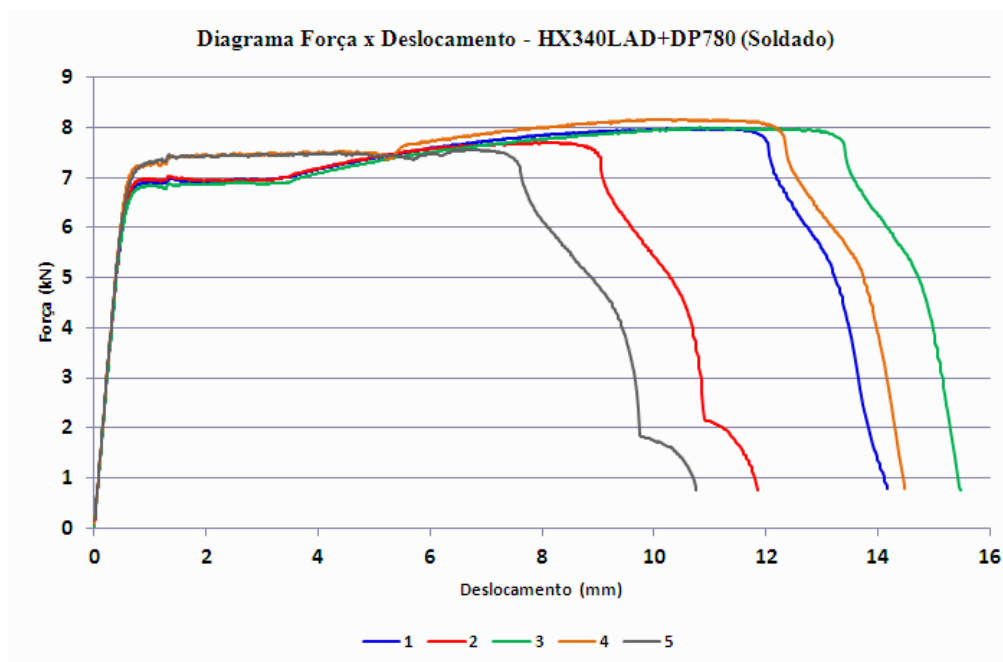


Figura 51 - Diagrama do ensaio de tração HX340LAD +DP780 (soldado).
Fonte: Autor.

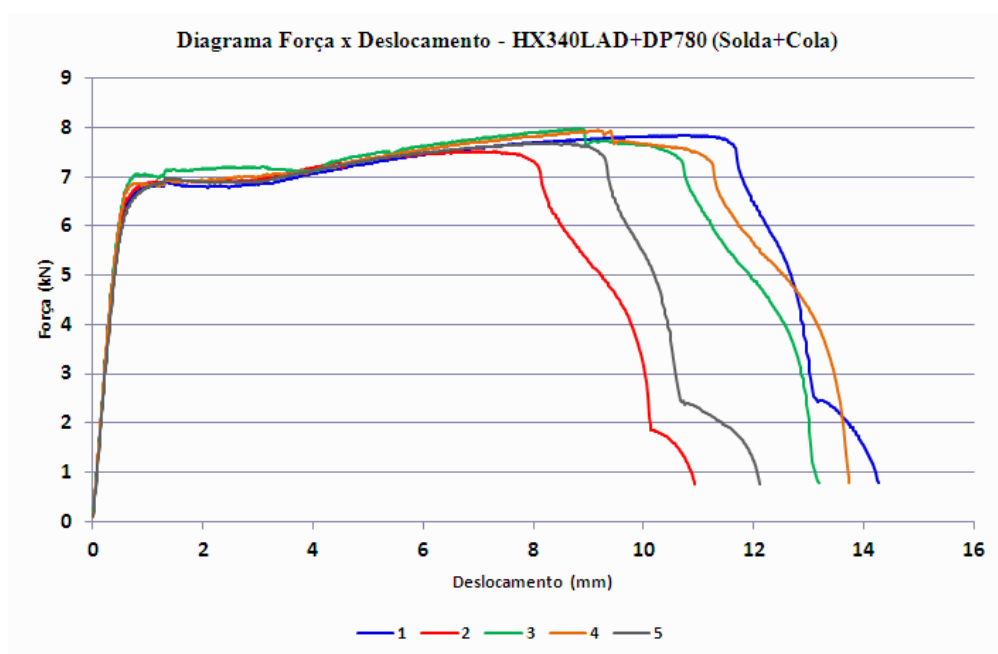


Figura 52 - Diagrama do ensaio de tração HX340LAD +DP780 (solda+Cola).
Fonte: Autor.

Nos ensaios envolvendo o material HX340LAD com o material 22MnB5 a ruptura ocorreu também no material HX340LAD, entretanto em três amostras somente soldadas, ocorreu ruptura em torno do ponto de solda, e em outras duas na região adjacente ao ponto de solda (Figura 53).

As amostras que apresentaram ruptura em torno do ponto de solda (1, 2 e 3), tiveram esforços de ruptura levemente inferiores às amostras que romperam em região adjacente ao ponto de solda.

Os diagramas de força por deslocamento são indicados na Figura 54 e Figura 55.

Da mesma forma como nas uniões de HX340LAD com DP780 os deslocamentos totais até a ruptura do corpo de prova variaram significativamente devido ao sistema complexo envolvendo esforços de tração, compressão e cisalhamento na região de ruptura da amostra.

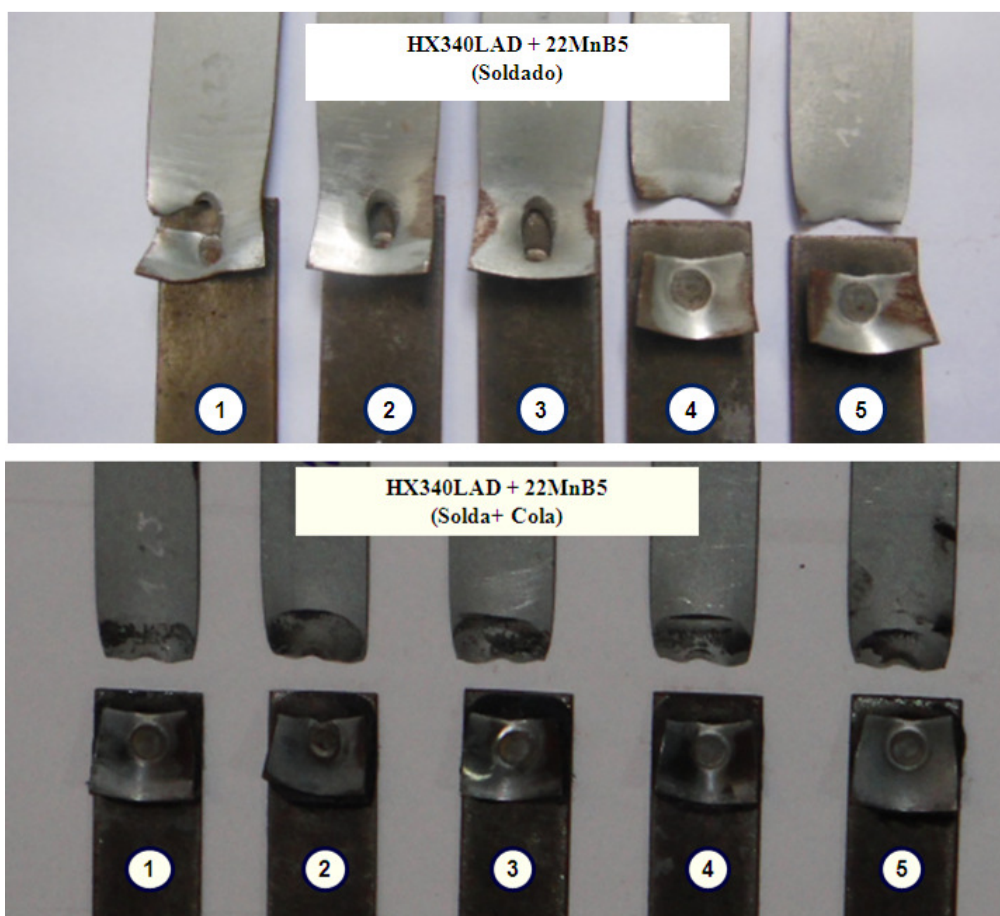


Figura 53 - Detalhe das uniões soldadas rompidas HX340LAD + 22MnB5.

Fonte: Autor.

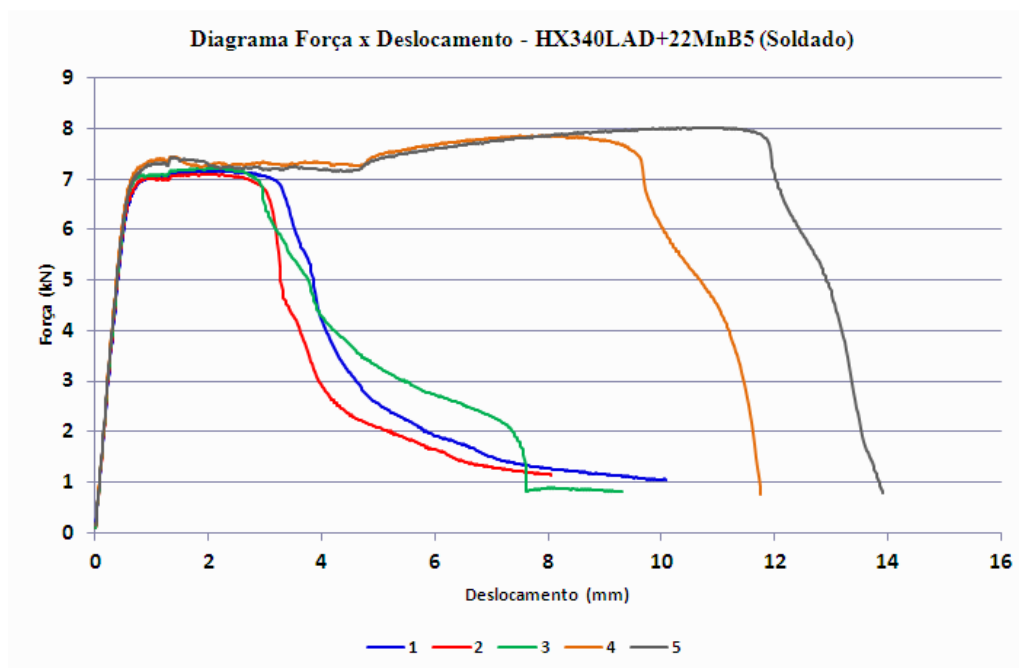


Figura 54 - Diagrama do ensaio de tração HX340LAD +22MnB5 (soldado).
Fonte: Autor.

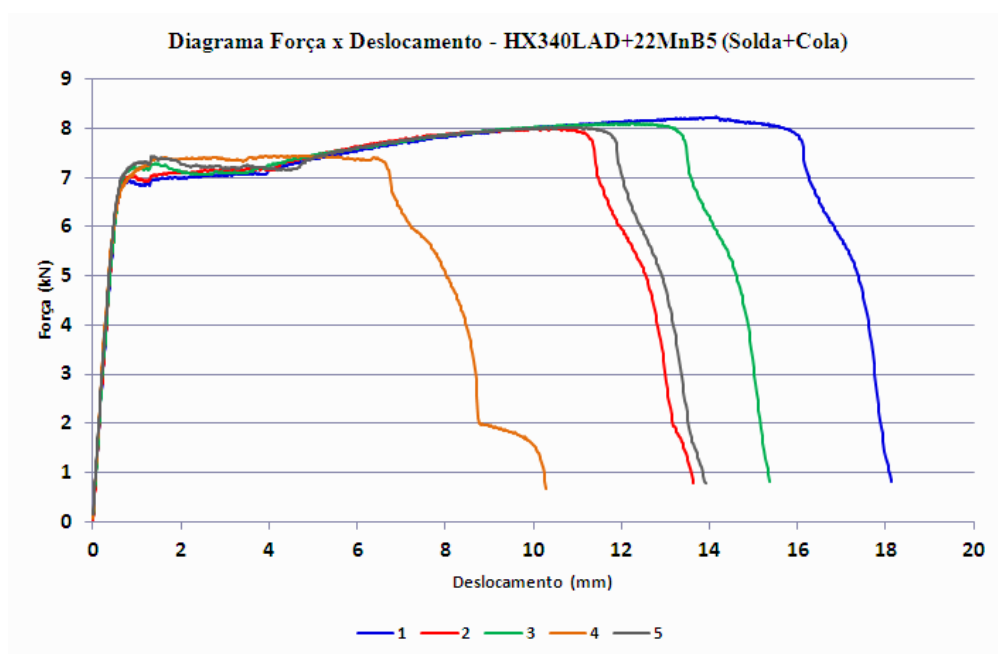


Figura 55 - Diagrama do ensaio de tração HX340LAD +22MnB5 (solda+Cola).
Fonte: Autor.

Nos ensaios da união dos aços 22MnB5 e DP780 os valores de resistência foram significativamente mais elevados e as rupturas ocorreram sempre no ponto de solda, indicando que a resistência da seção transversal do corpo de prova era maior que a resistência da união por solda.

Conforme indica a literatura pesquisada, a ruptura de pontos de solda em chapas com estrutura martensítica, características em aços *dual phase* ou estampados a quente, ocorre aleatoriamente na interface do ponto de solda ou em torno do ponto de solda (Figura 56), fazendo com que a variação da resistência da união seja mais significativa. Nesta pesquisa ficou entre 2,4 kN e 2,6 kN, ou seja, maior do que 10% do valor de resistência da união.

Outra particularidade notada nos testes com este tipo de união foi que a ruptura, quando ocorrida em torno do ponto de solda, destacou a lentilha de solda sempre do material 22MnB5, indicando que as transformações de fase neste material o tornaram, pelo menos na região da ZAT, menos resistente que o material DP780.

Não foi evidenciada relação entre o tipo de ruptura e a resistência máxima da união conforme indicam os diagramas de força e deslocamento da Figura 57 e Figura 58.

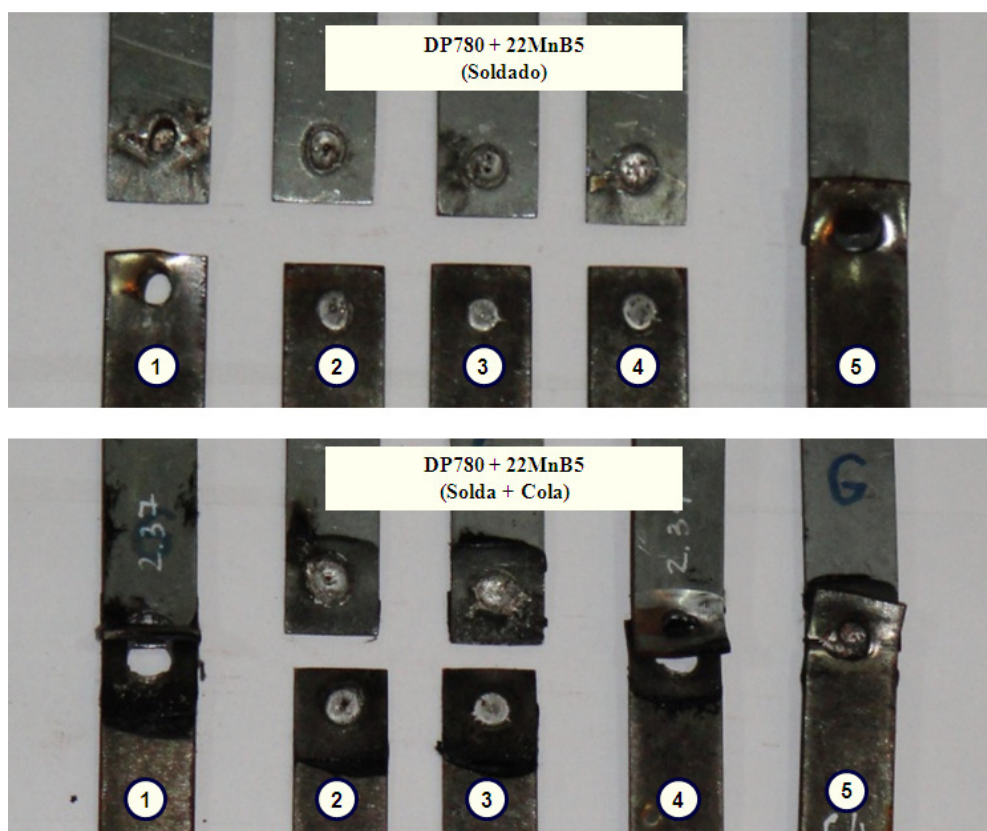


Figura 56 - Detalhe das uniões soldadas rompidas DP780 + 22MnB5.
Fonte: Autor.

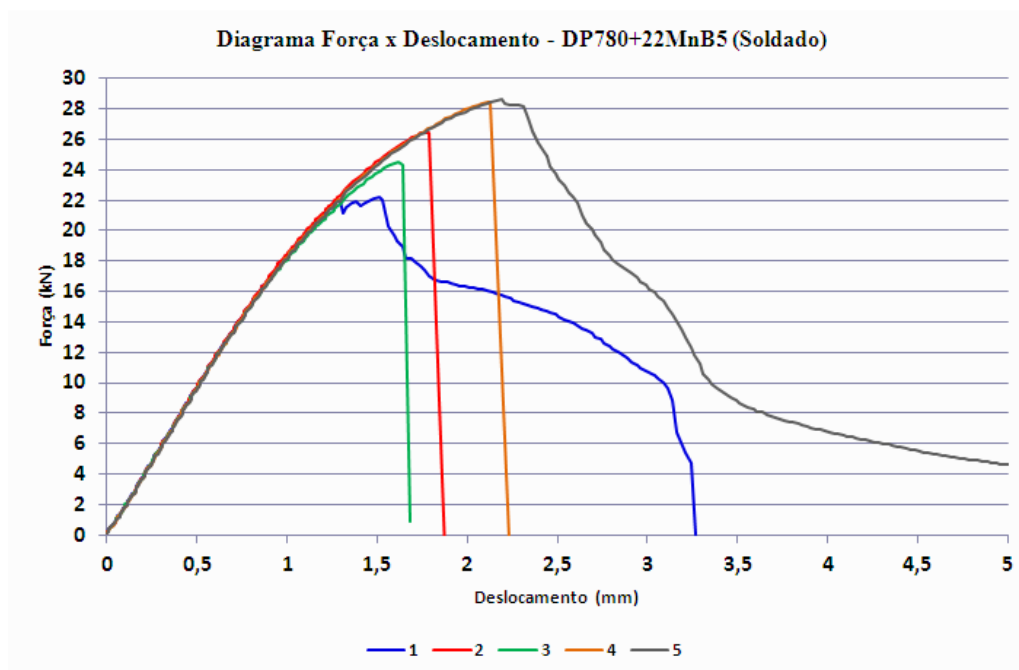


Figura 57 - Diagrama do ensaio de tração DP780+22MnB5(soldado).
Fonte: Autor.

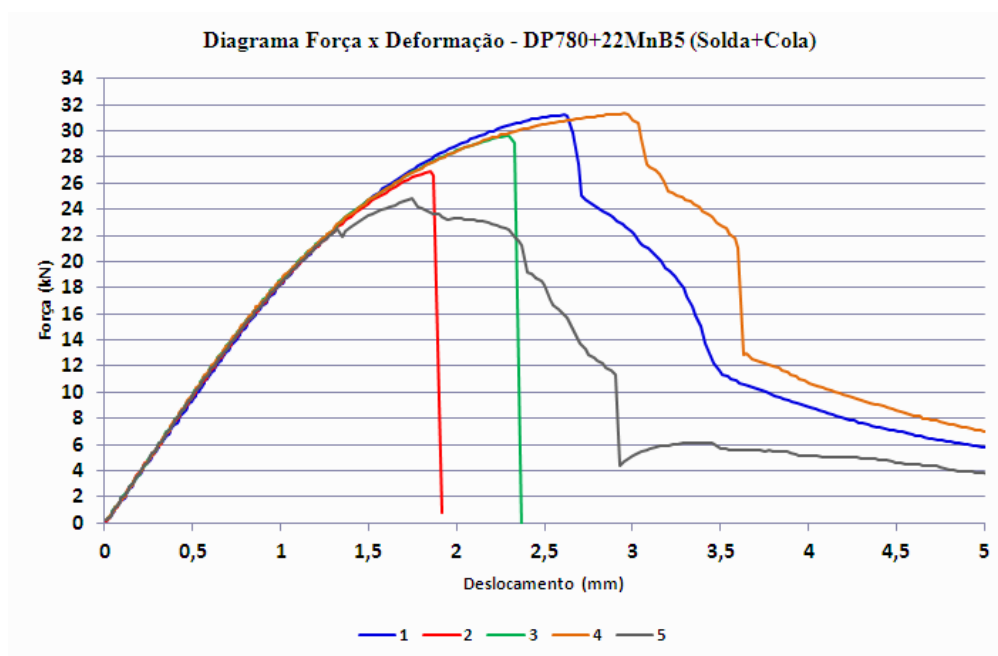


Figura 58 - Diagrama do ensaio de tração DP780+22MnB5 (solda+Cola).
Fonte: Autor.

As alterações de resistência dos materiais decorrente do processo de solda a ponto será discutida mais a frente na avaliação do perfil de resistência dos pontos de solda de cada tipo união.

O teste estatístico relacionando amostras com uniões simples e híbridas indicou que não houve influência da adição de adesivo na união e o esforço máximo de ruptura dos corpos de prova.

Para que houvesse indicação de influência do adesivo na variação de resistência, o valor a ser obtido no teste de hipótese deveria ser $t_{0,25,8} \geq 2,306$, o que não ocorreu em nenhuma das comparações (Tabela 6).

Tabela 6 – Teste estatístico comparativo das uniões soldadas.

Teste estatístico $t_{0,25,8} \geq 2,306$					
Tipo 1 HX340LAD DP780 Soldado	Tipo 2 HX340LAD DP780 Soldado+Cola	Tipo 3 HX340LAD 22MnB5 Soldado	Tipo 4 HX340LAD 22MnB5 Soldado+Cola	Tipo 5 DP780 22MnB5 Soldado	Tipo 6 DP780 22MnB5 Soldado+Cola
0,12809		0,58528		1,09167	

Fonte: Autor

Um detalhe observado na realização dos ensaios foi a deformação das chapas antes da ruptura, que causou efeito de arrancamento do adesivo, ou seja, tração perpendicular à superfície de colagem, ao invés de esforço de cisalhamento (Figura 59).

Este foi um dos fatores para a ineficiência do adesivo estrutural nos ensaios com corpos de prova soldados e colados.

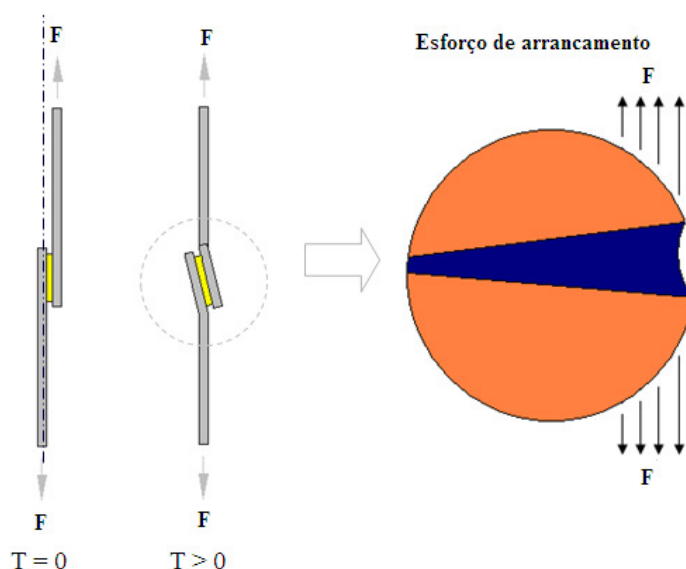


Figura 59 - Esforço de arrancamento do adesivo estrutural.

Fonte: adaptado de http://www.quimica.com.br/revista/qd393/adesivos_tec3.htm . Acesso em 03/12/2012.

O efeito de arrancamento é mencionado na literatura técnica sobre adesivos como sendo um processo de clivagem, o qual reduz a eficiência de adesivos estruturais significativamente.

Assim como no teste de resistência ao impacto da norma DIN EN ISO 11343 mencionado anteriormente, o método ASTM D1062 – 08 (*Standard Test Method for Cleavage Strength of Metal-to-Metal Adhesive Bonds*) avalia comparativamente a resistência de adesivos ao esforço de clivagem.

Por não fazer parte do escopo desta pesquisa este ensaio não foi realizado.

Outro fator que afetou a resistência das uniões soldadas e coladas foi a execução de pontos de solda nas regiões previamente adesivadas.

Apesar de não haver indicação contrária a esta aplicação, a execução da solda sobre a superfície adesivada causa deterioração do adesivo na região afetada termicamente.

5.2 Análise metalográfica das uniões soldadas

Foram efetuadas análises metalográficas dos três tipos de combinações de materiais para avaliação das regiões afetadas pelo processo de solda a ponto.

As micrografias da união soldada dos aços HX340LAD e DP780, assim como dos aços HX340LAD e TL4255 apresentaram estruturas semelhantes, e sem indicação de falhas estruturais nos materiais.

A estrutura metalográfica do ponto de solda no material HX340LAD essencialmente ferrítica passa para estrutura essencialmente martensítica nos aços DP780 ou 22MnB5 (Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63).

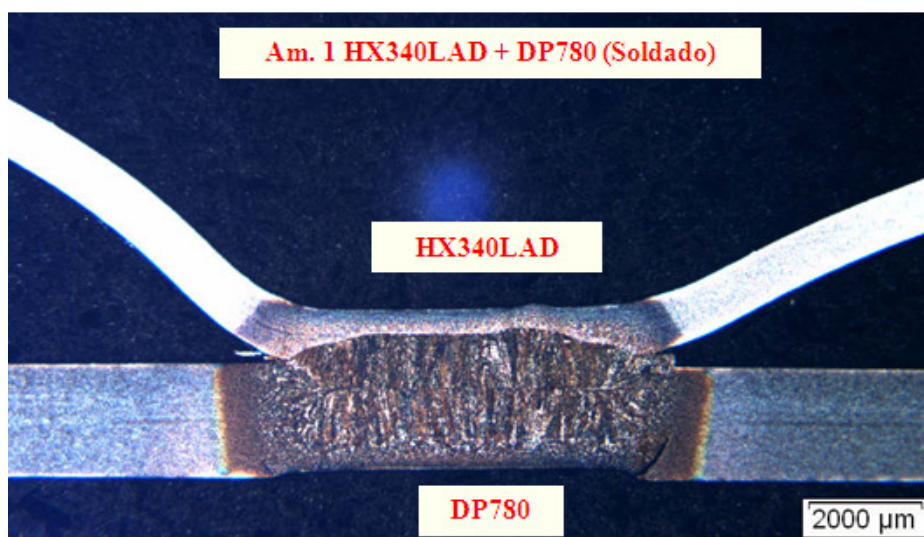


Figura 60 - União soldada HX340LAD – DP780 (20X).

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

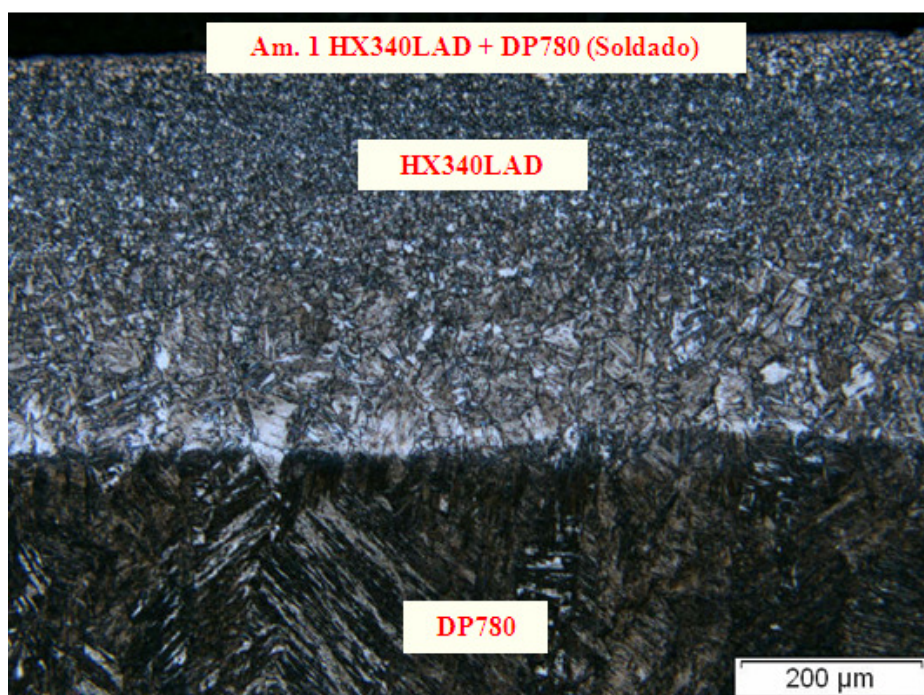


Figura 61 - União soldada HX340LAD – DP780 (200X).

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

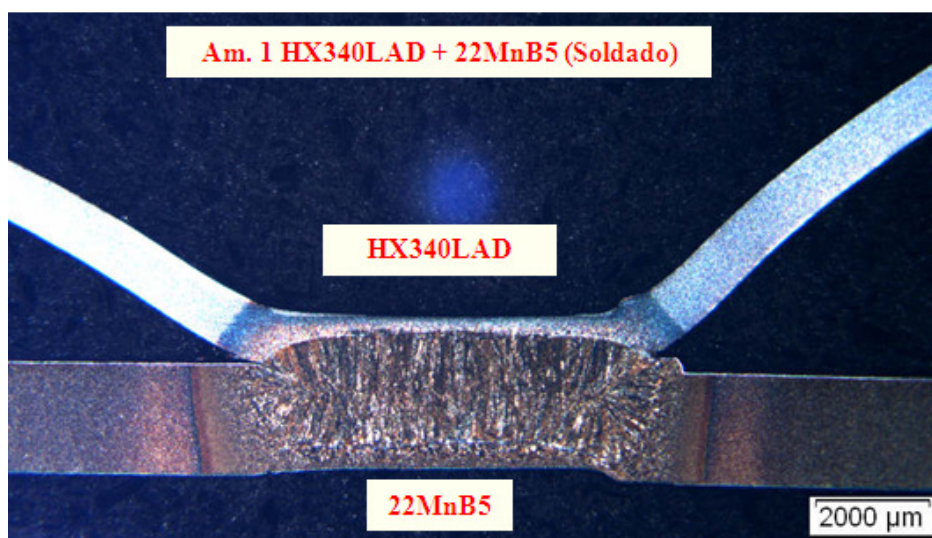


Figura 62 - União soldada HX340LAD – TL4255 (20X).

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

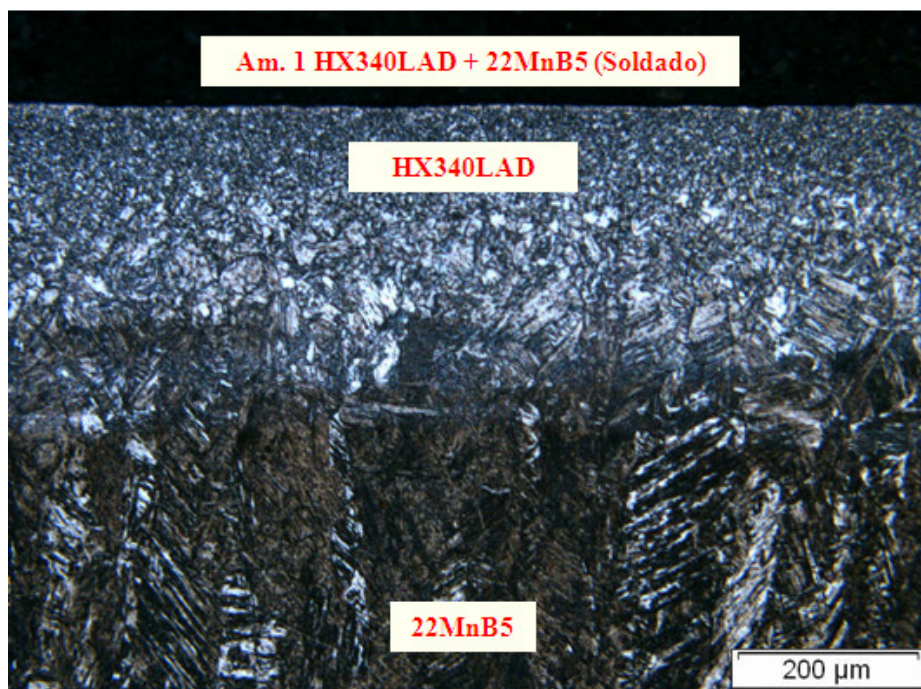


Figura 63 - União soldada HX340LAD – TL4255 (200X).
 Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

A análise metalográfica de um ponto de solda formado nas uniões dos aços DP780 e 22MnB5 apresentou a formação de vazios, principalmente na região de interface das chapas.

As imagens micrográficas de uma amostra de solda a ponto efetuada com os materiais DP780 e 22MnB5, que no ensaio de tração apresentou ruptura na interface, indicam a existência de vazios na união que diminuíram a seção transversal do ponto de solda (Figura 64 e Figura 65).

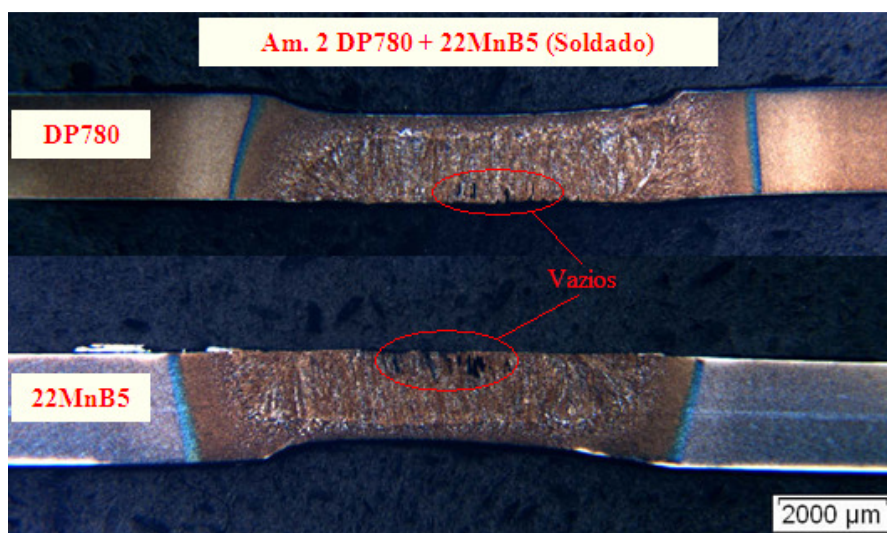


Figura 64 - União soldada DP780 – TL4255 (20X).
 Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

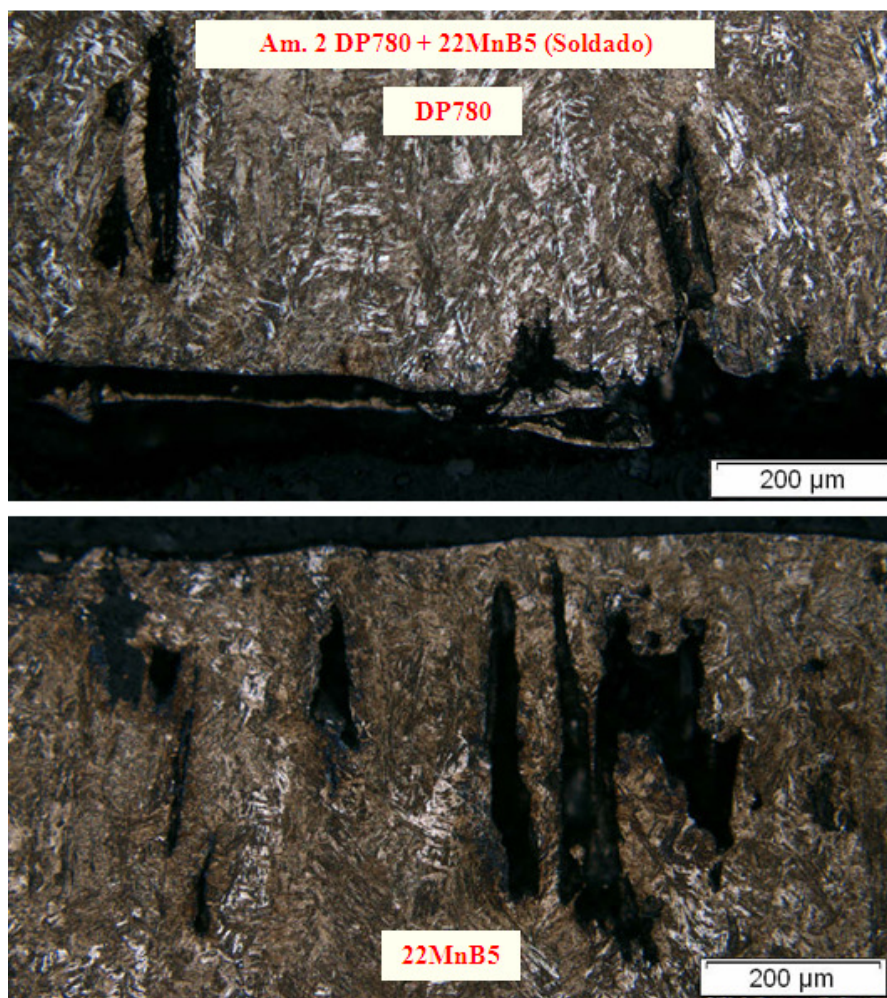


Figura 65 - União soldada DP780 – TL4255 (200X).

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

A formação de vazios nos pontos de solda efetuados em aços martensíticos não é evidência de que ocorrerá ruptura de interface. Corpos de prova que apresentaram ruptura na zona termicamente afetada (ZAT) foram macrografados e as imagens da Figura 66 indicam a ocorrência de vazios na zona de fusão (ZF).



Figura 66 - Pontos de solda executados DP780 com 22MnB5.

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

5.3 Determinação da resistência nas regiões da solda ponto (ZF, ZAT, MB)

Para avaliar a resistência obtida nos pontos de solda efetuados nas uniões que envolveram o material HX340LAD, que não se romperam nos ensaios de tração e as causas de rompimento do material 22MnB5 quando soldado ao material DP780, que é menos resistente que material 22MnB5 no estado de fornecimento, foi investigada a resistência das uniões soldadas através de seu perfil de micro dureza.

Os perfis de micro dureza das uniões soldadas indicaram que na zona de fusão (ZF) de todas as amostras, independente do tipo de combinação de chapas avaliadas, a dureza do material atingiu valores acima de 400 HV10, o que significa conforme a norma DIN EN ISO 18265 resistência à tração superior a 1220 MPa.

A avaliação das zonas termicamente afetadas indicou comportamento diferente entre os materiais.

No material HX340LAD houve aumento de resistência à tração, enquanto nos aços DP780 e 22MnB5 temperado houve redução.

A

Tabela 7 indica os valores de resistência à tração das regiões características de um ponto de solda (ZAT e ZF), relacionados aos valores de resistência à tração do material base (MB) obtida nos ensaios de tração desta pesquisa e a especificação de cada material.

Tabela 7 – Comparação do perfil de resistência dos pontos de solda.

União	Material	Especificação MB	MB	ZAT	ZF
HX340LAD DP780	HX340LAD	430 a 500 MPa	480 MPa	> 575 MPa	>1155 MPa
	DP780	Min. 780 MPa	889 MPa	> 865 MPa	
HX340LAD 22MnB5	HX340LAD	430 a 500 MPa	480 MPa	> 625MPa	>1125 MPa
	22MnB5	1300 a 1650 MPa	1536 MPa	> 785MPa	
DP780 22MnB5	DP780	Min. 780 MPa	889 MPa	> 850 MPa	>1420 MPa
	22MnB5	1300 a 1650 MPa	1536 MPa	> 740MPa	

Fonte: Autor

As mudanças de resistência à tração observadas nas zonas de fusão (ZF) e zonas afetadas termicamente (ZAT) tem sua origem no histórico térmico do processo de solda ponto, que impõe temperaturas e tempos de resfriamentos diferentes nestas regiões, resultando em diferentes estruturas metalográficas.

Na zona de fusão (ZF), a alta temperatura durante a execução do ponto (>1500°C), e a retirada de temperatura a taxas superiores a 2000°C/s, são determinantes para a formação de

martensita, o que dá origem a alta resistência do material (>1125 MPa), entretanto a força entre os eletrodos e o tempo de retenção após os ciclos de aplicação de corrente de solda são fatores que influenciam na formação de vazios na “lentilha” de solda. (MA et al., 2008, p.338).

No material HX340LAD, que tem estrutura monofásica, o aumento de resistência na zona termicamente afetada indica que o ciclo térmico nesta região foi suficiente para causar a recristalização do material aumentando sua resistência à tração.

Nos materiais bifásicos DP780 e 22MnB5, que apresentam até 25% de seu volume de microestrutura martensítica, o amolecimento da zona afetada termicamente (ZAT) tem relação com o tempo de retenção dos eletrodos de solda próximo a temperatura eutetoide, na qual a martensita pode ser decomposta (Kong et al., 2013, 603).

Os dados das medições de micro-dureza e respectiva transformação em valores de resistência à tração conforme norma DIN EN ISO 18265 estão indicados na Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10, e as macro grafias com as indicações das indentações de micro dureza estão indicadas na Figura 67, Figura 68 e Figura 69.

A representação gráfica dos dados de micro dureza é indicada na Figura 70.

Tabela 8 - Medição de micro-dureza / resistência a tração HX340LAD+DP780

HX340LAD+DP780					
Posição	d1	d2	média	HV10	MPa
-4.5	101.6	101.6	101.6	180	575
-4.2	98.4	101.0	99.7	187	595
-3.9	100.0	98.5	99.2	188	610
-3.6	97.0	95.2	96.1	201	640
-3.3	89.5	89.4	89.4	232	740
-3.0	83.6	86.1	84.8	258	835
-2.4	80.5	81.2	80.8	284	915
-2.1	64.0	62.3	63.2	464	1485
-1.8	62.1	62.7	62.4	476	1555
-1.5	62.1	63.0	62.6	473	1520
-1.2	62.4	63.0	62.7	472	1520
-0.9	62.1	62.5	62.3	478	1555
0.0	62.6	65.8	64.2	450	1455
0.3	61.6	63.0	62.3	478	1555
0.6	61.9	63.5	62.7	472	1520
0.9	63.0	65.0	64.0	453	1455
1.2	62.7	63.1	62.9	469	1520
1.5	63.9	63.1	63.5	460	1485
1.8	62.0	62.1	62.1	481	1555
2.1	60.8	61.1	61.0	498	1630
2.4	71.0	72.5	71.8	360	1155
2.7	77.6	77.7	77.7	307	995
3.0	81.0	79.9	80.5	286	915
3.3	80.5	80.1	80.3	288	930
3.6	77.0	78.2	77.6	308	995
3.9	76.0	77.6	76.8	314	995
4.2	78.2	77.5	77.9	306	995
4.5	78.0	80.2	79.1	296	950
4.8	82.9	83.1	83.0	269	865
5.1	81.2	82.0	81.6	278	900

Fonte: Autor



Figura 67 – Indentações de microdureza HX340LAD – DP780

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

Tabela 9 – Medição de micro-dureza / resistência à tração HX340LAD + 22MnB5

HX340LAD+22MnB5					
Posição	d1	d2	média	HV10	MPa
-5.7	97.4	97.0	97.2	196	625
-5.4	95.5	98.2	96.9	198	640
-5.1	93.3	94.2	93.8	211	675
-4.8	91.2	92.7	92.0	219	705
-4.5	92.5	94.9	93.7	211	675
-4.2	94.2	98.1	96.2	200	640
-3.9	93.5	95.6	94.6	207	660
-3.6	88.4	88.0	88.2	238	770
-3.3	82.4	83.4	82.9	270	865
-3.0	81.7	78.1	79.9	290	930
-2.7	61.5	60.6	61.1	497	1630
-2.4	64.0	61.5	62.8	470	1520
-2.1	61.2	62.3	61.8	486	1595
-1.8	60.3	60.5	60.4	508	1665
0.0	62.1	64.9	63.5	460	1485
0.3	62.4	63.2	62.8	470	1520
0.6	61.0	63.5	62.3	478	1555
0.9	62.7	63.5	63.1	466	1520
1.2	62.3	63.2	62.8	470	1520
1.5	63.0	60.5	61.8	486	1595
1.8	63.0	62.5	62.8	470	1520
2.1	60.9	61.5	61.2	495	1595
2.4	71.6	73.4	72.5	353	1125
2.7	87.7	86.2	87.0	245	785
3.0	81.7	82.0	81.9	276	880
3.3	77.5	80.4	79.0	297	950
3.6	74.5	77.1	75.8	323	1030
3.9	77.5	78.5	78.0	305	965
4.2	78.0	77.6	77.8	306	995
4.5	80.0	80.2	80.1	289	930
4.8	77.3	79.0	78.2	303	965

Fonte: Autor

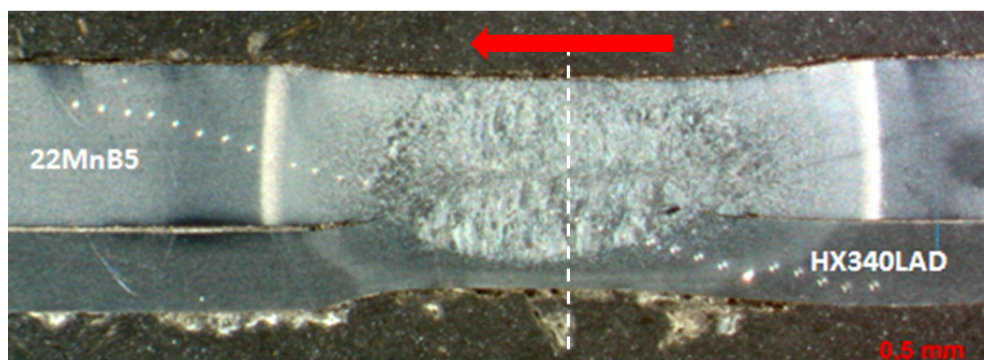


Figura 68 - Indentações de microdureza HX340LAD – 22MnB5

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

Tabela 10 – Medição de micro-dureza / resistência à tração DP780 + 22MnB5

DP780+22MnB5					
Posição	d1	d2	média	HV10	MPa
-4.4	78.0	78.0	78.0	305	965
-4.1	77.0	78.6	77.8	306	995
-3.8	78.1	78.2	78.2	303	965
-3.5	77.4	78.0	77.7	307	995
-3.2	75.2	77.0	76.1	320	1030
-2.9	78.2	78.6	78.4	302	965
-2.6	79.1	75.5	77.3	310	995
-2.3	83.2	84.1	83.7	265	850
-2.0	77.4	79.8	78.6	300	965
-1.7	64.2	64.3	64.3	449	1455
-1.4	63.4	62.5	63.0	443	1420
-1.1	62.8	63.5	63.2	464	1485
-0.8	65.5	63.9	64.7	443	1420
-0.5	63.2	64.0	63.6	458	1485
-0.1	60.0	60.6	60.3	510	1665
0.0	Inclusão – ponto não medido				
0.5	63.2	61.5	62.4	476	1555
0.8	61.2	63.0	62.1	481	1555
1.1	62.0	62.5	62.3	478	1555
1.4	59.2	59.9	59.6	522	1700
1.7	59.3	59.5	59.4	526	1740
2.0	60.7	60.0	60.4	508	1665
2.3	67.1	67.0	67.1	412	1320
2.6	89.5	89.5	89.5	232	740
2.9	88.2	88.3	88.3	238	770
3.2	87.0	88.9	88.0	239	770
3.5	88.0	89.2	88.6	236	755
3.8	88.8	90.0	89.4	232	740

Fonte: Autor

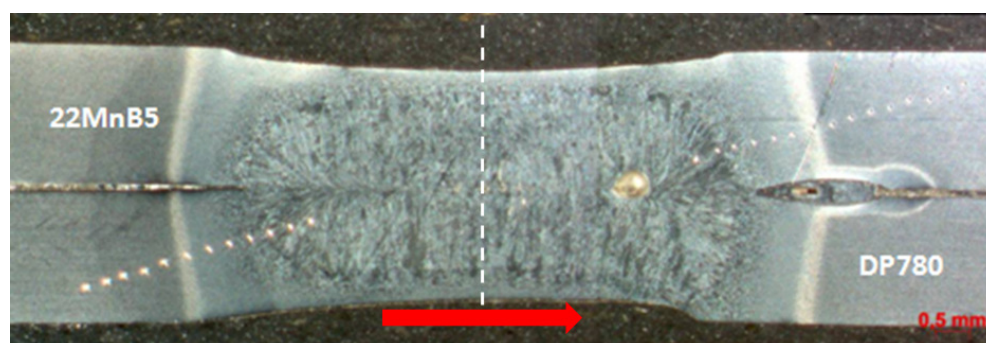


Figura 69 - Indentações de microdureza DP780 – 22MnB5

Fonte: Enga. Kriscia E. R. de Souza / MTC Volkswagen do Brasil Ltda.

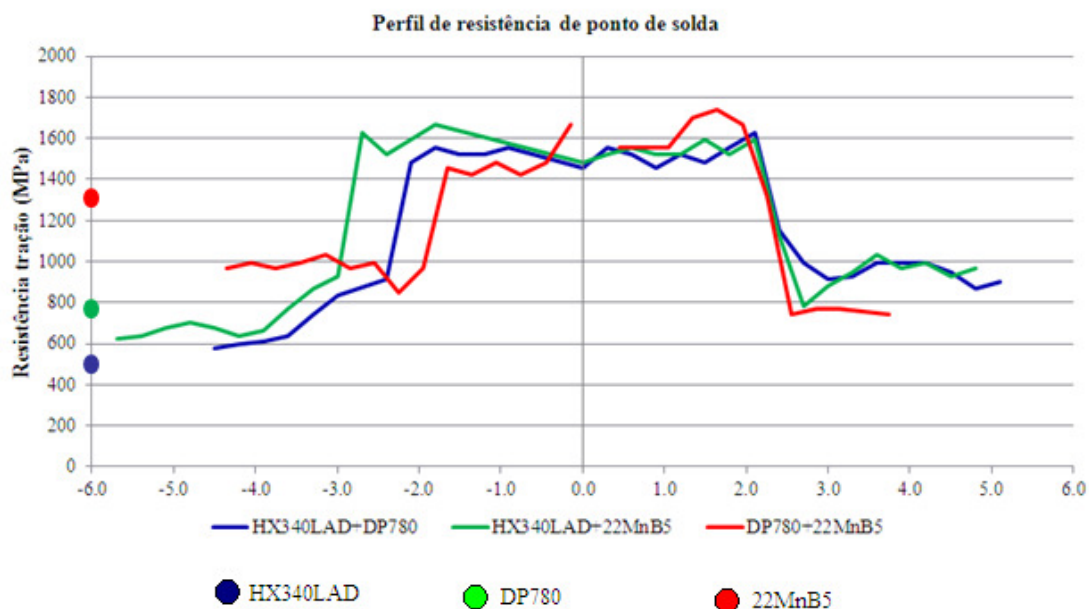


Figura 70 – Perfis de resistência a tração dos pontos de solda.
Fonte: Autor.

5.4 Sensibilidade à taxa deformação do adesivo

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios efetuados para avaliação da sensibilidade à taxa de deformação do adesivo estrutural.

Os diagramas da Figura 71 e Figura 72 são exemplos do processamento dos dados obtidos em um ensaio de tração para determinação da taxa de sensibilidade à deformação do adesivo estrutural Sika Power® 492.

Os dados de aceleração da figura 68 foram obtidos a partir do acelerômetro colado no corpo de prova, já os dados de velocidade foram obtidos a partir da integração dos dados da medição de aceleração.

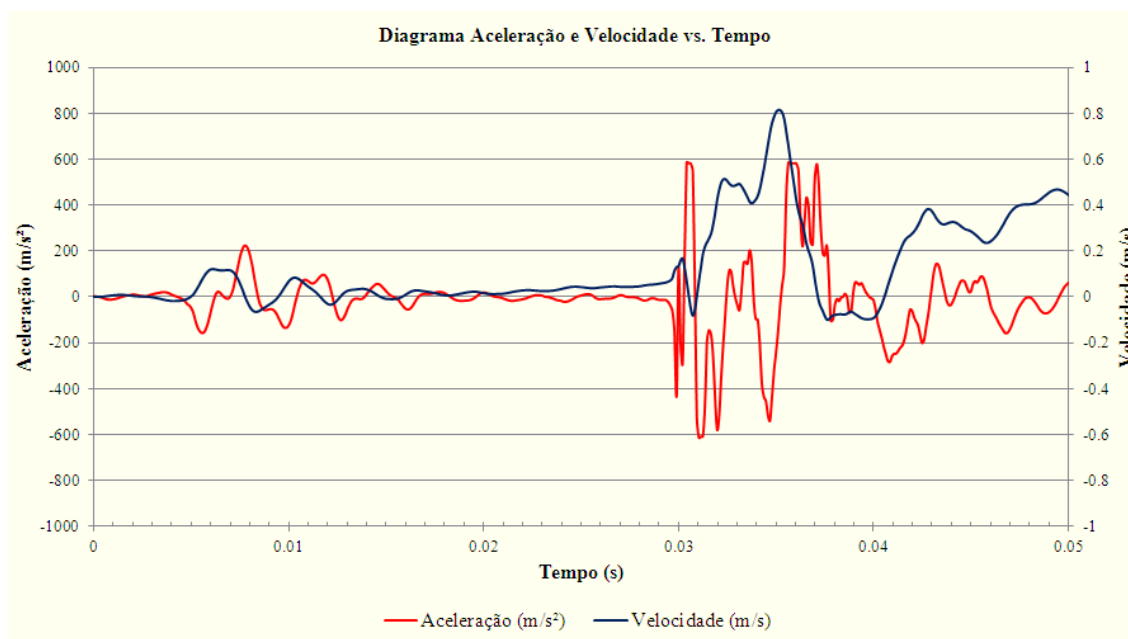


Figura 71 - Diagrama de medição de aceleração e velocidade calculada.
Fonte: Autor.

O pico de velocidade de 0,017 m/s atingido no ponto de ruptura no intervalo de 0,03 s a partir do início da aquisição de dados indica deslocamento da ordem de 0,01 mm, ou seja, o valor pode ser considerado como incerteza do sistema de medição e dos cálculos para determinação da velocidade e posteriormente do deslocamento.

O valor desprezível de deslocamento antes da ruptura confirma a especificação técnica do adesivo que indica alongamento menor que 5%.

O diagrama de força da figura 69 foi obtido a partir dos dados fornecidos pelo sensor de força ligado ao cabeçote de tração do dispositivo de teste.

O diagrama de aceleração sobreposto ao de força por tempo tem o objetivo de indicar que houve movimentação efetiva do sistema somente a partir da ruptura do adesivo estrutural, o que ocorreu, como já mencionado, após aproximadamente 0,03 segundos do início da aquisição de dados.

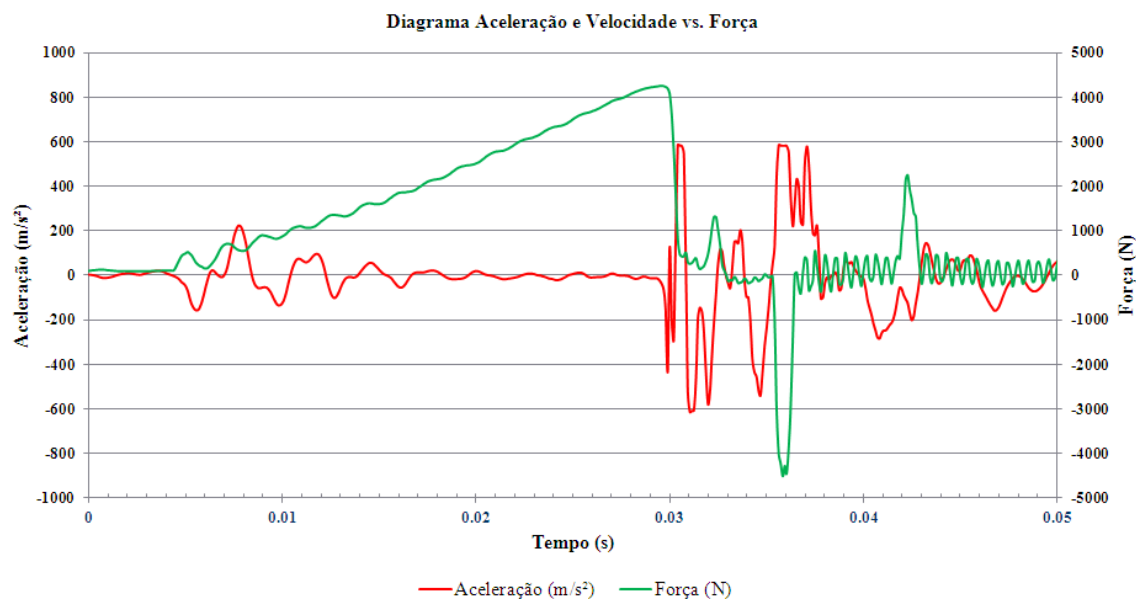


Figura 72 - Diagrama de medição de aceleração e força.
Fonte: Autor.

Os diagramas indicados nas Figura 73 e Figura 74 indicam os valores de força por tempo dos ensaios de tração a altas e baixas velocidades. Note que a base de tempo no diagrama de ensaio de baixa velocidade é dez vezes maior que no ensaio de alta velocidade.

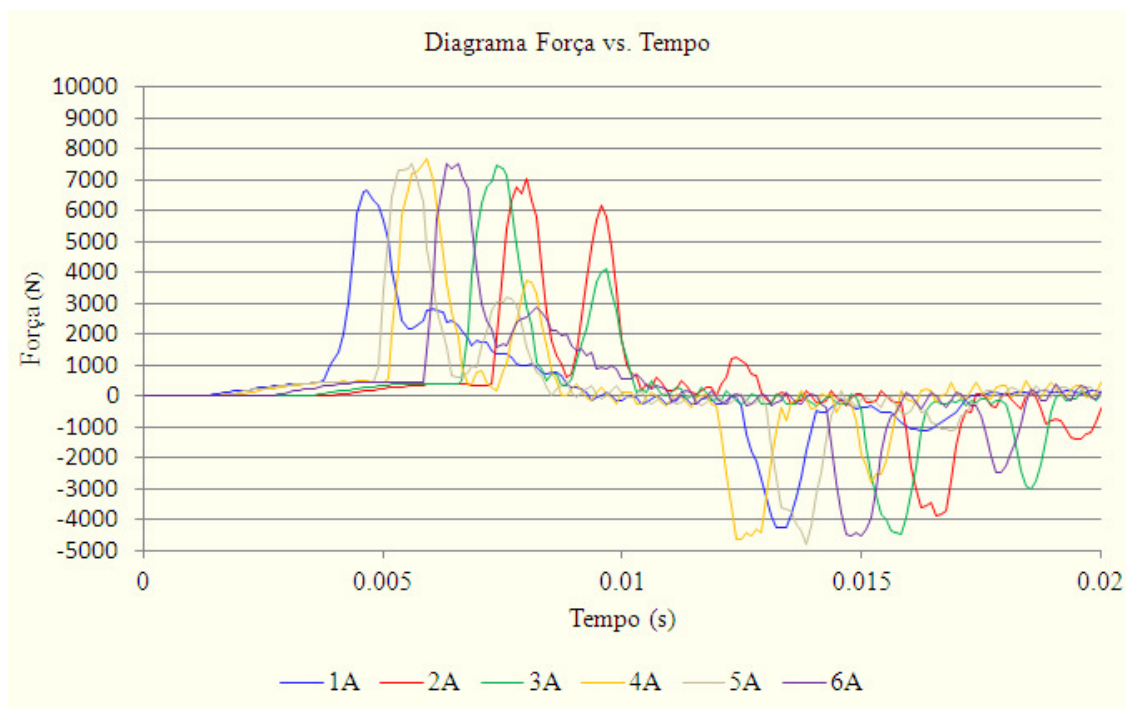


Figura 73 - Diagrama de força por tempo do ensaio de tração de alta velocidade.
Fonte: Autor.

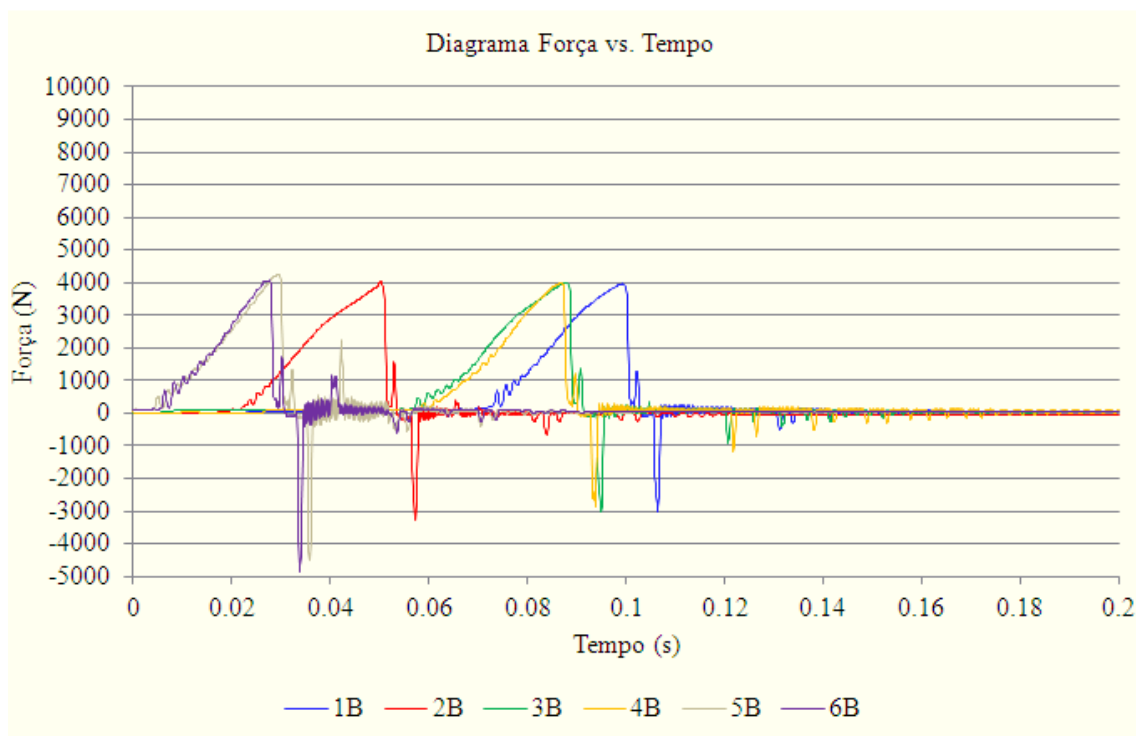


Figura 74 - Diagrama de força por tempo do ensaio de tração de baixa velocidade.
Fonte: Autor.

Os dados indicados nas Tabela 11 e Tabela 12, assim como o diagrama da Figura 76 resumam os valores máximos de resistência à tração determinados nos testes efetuados para avaliação da sensibilidade à taxa de deformação do adesivo estrutural.

São indicados ainda os valores área adesivada e espessura do adesivo em cada corpo de prova.

Os valores da força máxima medida durante o ensaio de tração dividido pela área adesivada determinou a resistência à tração do adesivo e o valor de espessura foi determinado para controle da qualidade da execução das amostras, pois a espessura deveria ser menor que 1 mm.

Os dados obtidos nos ensaios de tração com variação da velocidade indicam que o adesivo estrutural é sensível à taxa de deformação e que sua resistência à tração eleva-se em média 86% nas condições de ensaio executadas.

Tabela 11 – Dados dos ensaios do adesivo a baixa velocidade.

CP	Velocidade (m/s)	Força (N)	Area (mm ²)	Espessura do adesivo (mm)	Resistência a tração (MPa)
1B	0,04	3961,66	94,5	0,6	41,92
2B	0,05	4019,19	104,5	0,6	38,46
3B	0,05	3993,25	104,5	0,6	38,21
4B	0,06	3974,83	95,0	0,5	41,84
5B	0,07	4254,76	104,5	0,9	40,72
6B	0,09	4063,77	99,8	0,5	40,74
				Média	40,32
				Desvio-padrão	1,62

Fonte: Autor.

Tabela 12 – Dados dos ensaios do adesivo a alta velocidade.

CP	Velocidade (m/s)	Força (N)	Area (mm ²)	Espessura do adesivo (mm)	Resistência a tração (MPa)
1A	0,33	6684,29	94,5	0,7	70,73
2A	0,35	7022,58	94,5	0,7	74,31
3A	0,35	7461,10	99,8	0,6	74,80
4A	0,38	7667,07	99,8	0,7	76,86
5A	0,40	7552,78	103,5	0,7	72,97
6A	0,40	7524,59	94,5	0,8	79,63
				Média	74,88
				Desvio-padrão	3,09

Fonte: Autor.

Nos testes de tração a baixa velocidade, a variação da velocidade de ensaio é atribuída à dificuldade de controle deste parâmetro no tipo de atuador hidráulico utilizado para realização do ensaio, mas apesar da variação, os valores de resistência obtidos são compatíveis com a especificação do adesivo e podem ser considerados para comparação com os ensaios de alta velocidade.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Resistência dos materiais metálicos

Os resultados dos ensaios de tração comprovaram que os materiais metálicos usados nos experimentos atendem às especificações de resistência mecânica conforme as normas DIN EM 10346 para os aços HX340LAD e DP780, e VW TL4255 para o aço 22MnB5, assegurando assim a correlação entre os resultados obtidos e o comportamento das estruturas veiculares que foram comparadas neste trabalho.

Apesar das amostras pertencerem ao mesmo lote de produção e terem sido retiradas de uma região relativamente pequena em relação à bobina laminada (chapas de 1 m x 0,5 m), as variações entre os valores máximos e mínimos menores que 5% indicam estabilidade do processo de produção dos materiais, uma vez que são permitidas, conforme as especificações técnicas, variações de até 20%.

A comparação dos valores de resistência à tração dos três materiais indica que a indústria automobilística ao mudar de aço micro ligado (HX340LAD) para o aço dual phase (DP780), alterou o patamar de resistência das estruturas aplicando materiais com maior resistência a tração e maior tenacidade em volume.

A comparação da tenacidade em volume dos dois materiais na mesma condição de teste indicou que o aço micro ligado apresentou tenacidade aproximada de 8550 Nm, enquanto o material *dual phase* atingiu 22500 Nm, ou seja, tenacidade 263% superior.

Na avaliação de tenacidade não só a resistência intrínseca do material gerou este resultado, pois havia também a mesma diferença de espessura encontrada nas estruturas veiculares avaliadas, o que torna a comparação válida.

A diferença de tenacidade entre as construções conferiu às estruturas de colunas B a possibilidade de absorver mais energia nos impactos laterais e diminuir o nível de deformação (intrusão) das laterais dos veículos, aumentando a segurança dos usuários.

A próxima mudança ocorreu com a introdução dos aços estampados a quente, os quais aumentaram o patamar de resistência à tração, entretanto reduziram a tenacidade.

A avaliação de tenacidade em volume do material 22MnB5 indica que este apresentou valor aproximado de 11440 Nm, ou seja, tenacidade 50% menor que a do material *dual phase* pesquisado, considerando também a espessura usada na construção de colunas estruturais veiculares.

A consequência da redução da tenacidade combinada com o aumento da resistência à tração aumentou probabilidade de ruptura das uniões de componentes, o que de fato foi verificado nos resultados dos ensaios nas uniões soldadas.

O aumento da resistência das estruturas levou à necessidade de aprimoramento dos métodos de uniões entre os componentes, principalmente nos pontos onde os cálculos de elementos finitos indicaram a concentração de tensões em ensaios de impacto lateral.

6.2 Análise das uniões e comparação com a construção automotiva

Considerando que a dimensão dos flanges de solda das carrocerias avaliadas tem largura entre 15 mm e 18 mm, e que o ponto de solda nestas aplicações tem diâmetro médio especificado de 6 mm (Figura 75), a resistência total da seção transversal dos flanges de solda das construções usadas até 1990 foi sempre menor que a do ponto de solda, originando ruptura da chapa ao invés das uniões soldadas.

Para aumentar a resistência da região, a alternativa de aumento da largura do flange não se mostrava conveniente, pois poderia reduzir a área de acesso ao veículo, seu vão livre do solo, ou aumentar a altura total do veículo, afetando consequentemente seus valores aerodinâmicos e/ou seus parâmetros de conforto (Figura 76).

Este argumento pode parecer insuficiente quando comparado à importância da resistência em caso de impactos, entretanto as dimensões dos veículos da mesma classe indicam que a disputa por milímetros que garantam conforto e menores índices aerodinâmicos são tratados com grande atenção por montadoras de um modo geral.

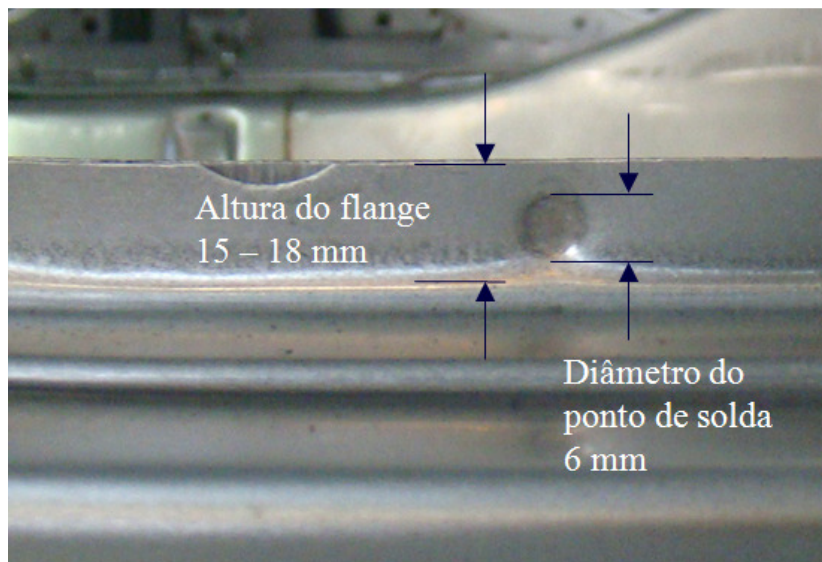


Figura 75 - Ponto de solda em flange de carroceria.
Fonte: Autor.

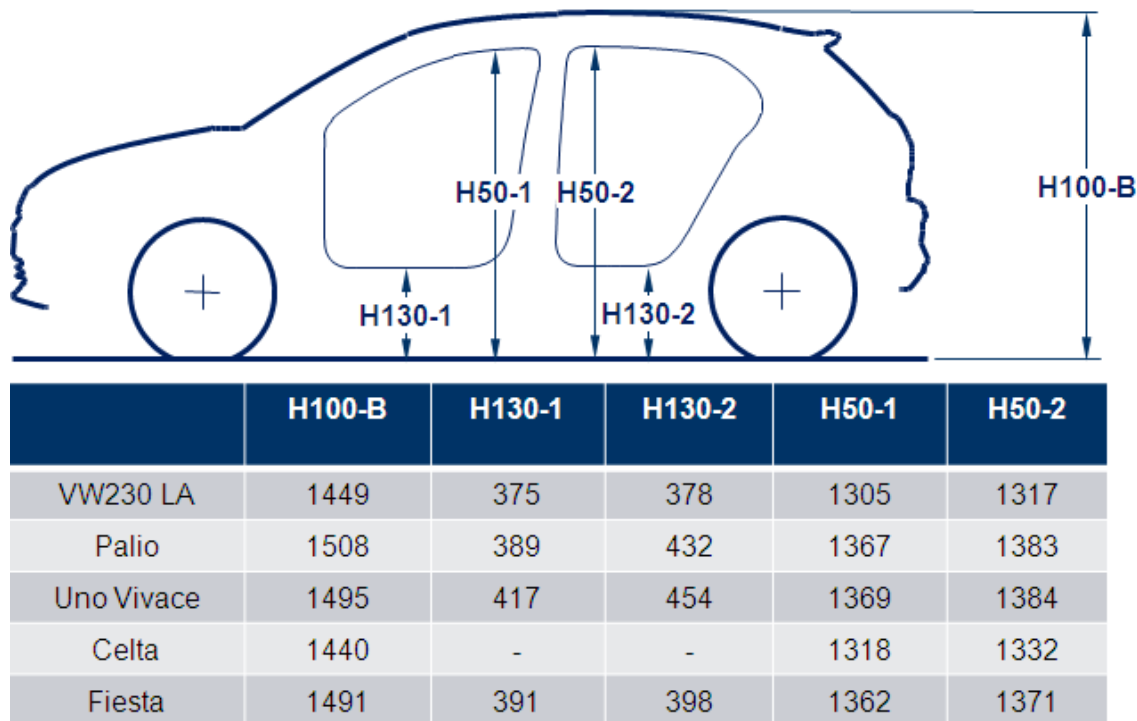


Figura 76 - Comparação de dimensões de veículos.
Fonte: Volkswagen do Brasil Ltda.

A evolução da resistência dos aços teve como consequência a migração da ruptura das chapas dos componentes da estrutura, para a ruptura das uniões destes componentes.

Variáveis inerentes aos processos de produção em massa tais como desvios dimensionais dos componentes na região de flange, impurezas na superfície das peças a serem soldadas, variações de espessura de tratamentos superficiais contra corrosão aplicados nas chapas e instabilidade nos processos de solda dão origem, principalmente nos aços martensíticos, a formação de vazios na zona de fusão dos pontos de solda.

Os vazios na zona de fusão podem levar à ruptura de interface do ponto, reduzindo de forma imprevisível sua resistência.

A alternativa técnica utilizada para compensar esta desvantagem decorrente do processo de solda a ponto foi a execução de uniões híbridas com a combinação de solda a ponto e aplicação de adesivos estruturais de base epóxi.

6.3 Ensaios de resistência de uniões adesivadas

Os adesivos poliméricos aplicados nas uniões de componentes estruturais de carrocerias têm suas propriedades de resistência exploradas principalmente quando expostos a altas taxas de deformação, ou seja, em impactos.

Estes adesivos cuja especificação técnica indica resistência entre 30 MPa e 40 MPa, estabelecida em ensaios de tração a baixa velocidade (10 mm/min), apresentam resistência a tração superior à especificada quando expostos à taxas de deformação elevadas e os ensaios conduzidos durante esta pesquisa comprovaram esta propriedade.

Esta característica dos adesivos é especialmente importante, pois em ensaios de impacto lateral a velocidade inicial de impacto de 50 km/h, ou seja, 13,8 m/s causam deformações com taxas da mesma ordem de grandeza da velocidade de impacto até que o veículo comece a deslizar lateralmente.

Conforme indicado na literatura, a ruptura de adesivos estruturais se dá no sentido paralelo à área de aplicação e de forma coesa (Figura 77) e esta característica é particularmente importante para que haja vantagem na execução de juntas híbridas.

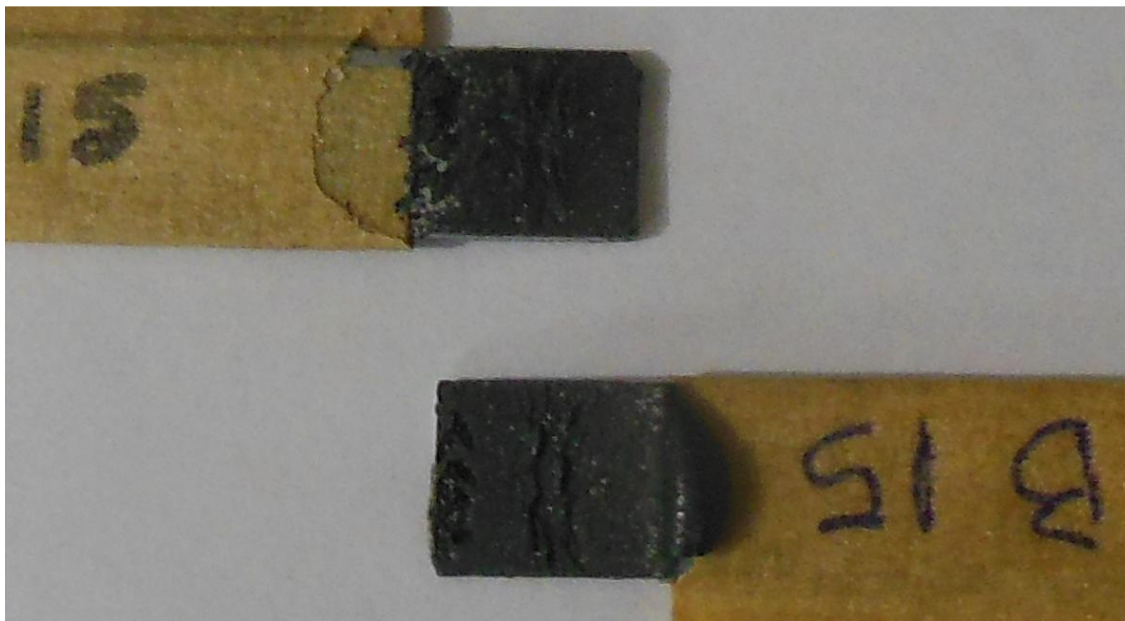


Figura 77 - Detalhe da ruptura do adesivo em corpo de prova.
Fonte: Autor.

Assumindo a resistência especificada do adesivo de 30 MPa, em uma aplicação com um flange de 15 mm de altura e 50 mm de comprimento, a área adesivada equivalente atingiria a resistência de ruptura de 22,5 kN, ou seja, a mesma ordem de grandeza da resistência de um ponto de solda executado em aço de ultra alta resistência conforme dados obtidos nesta pesquisa (Tabela 5).

Dados reais de veículo construído com aço de ultra-alta resistência estampado a quente indicam a construção de uma junta híbrida com 2816,7 mm², o que equivale a resistência a tração de 84,5 kN, considerando a resistência do adesivo igual a 30 MPa (Figura 78).

O valor teórico de resistência equivale a aproximadamente 4 pontos de solda, o que em uma distância de 200 mm, especialmente em uma região de nó estrutural, onde há o encontro de vários reforços é tecnicamente inviável por causa da distância mínima que deve ser mantida entre cada ponto de solda e entre os pontos de solda e o final do flange.

Nestas condições, a união adesivada substitui a solda a ponto com vantagem relevante, especialmente se considerada a elevação da resistência da união em condições de altas taxas de deformações.

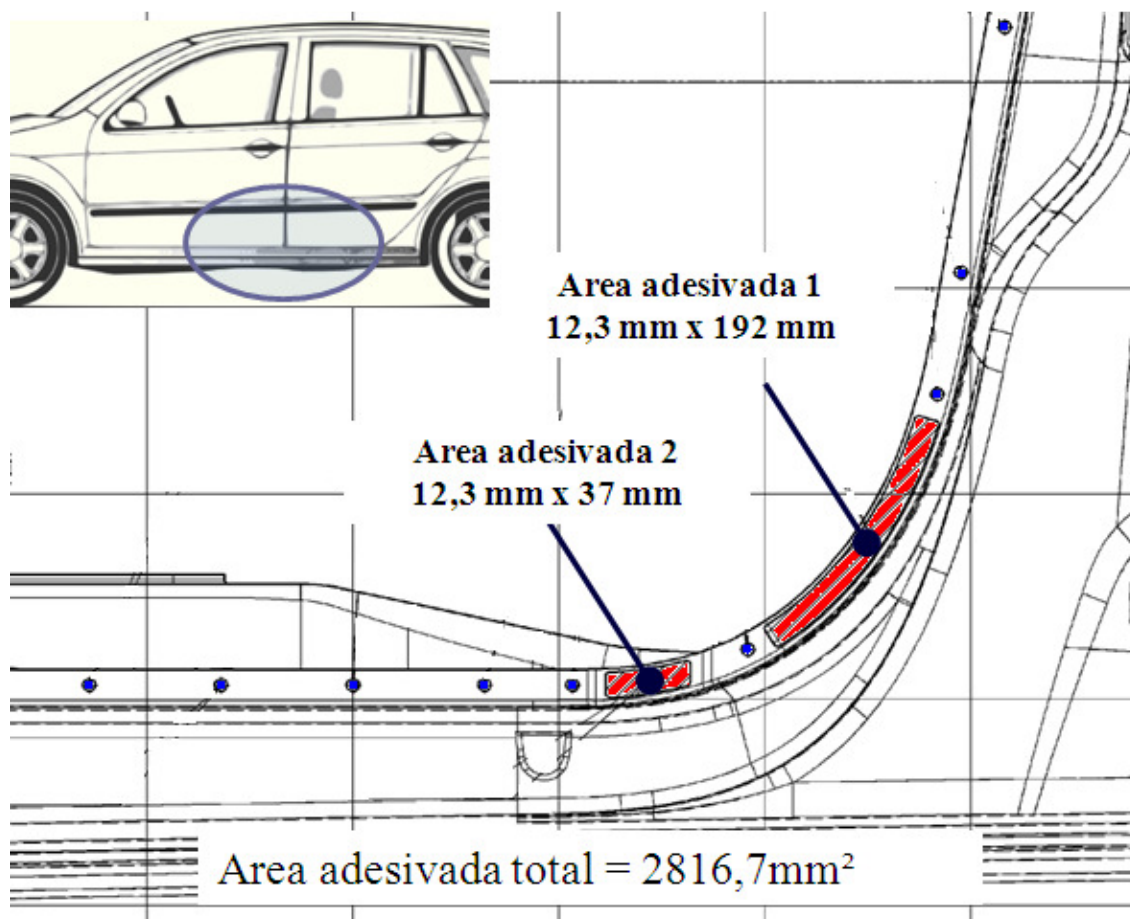


Figura 78 - Área adesivada de união híbrida de coluna B.
Fonte: Volkswagen do Brasil.

Como não é indicado para esforços perpendiculares à superfície de adesivação por causa do efeito de clivagem, o adesivo estrutural deverá ser combinado com outro processo de união para garantir a integridade da estrutura frente aos esforços de torção e flexão da carroceria com baixas taxas de deformação.

No impacto lateral, devido à configuração das barreiras de impacto, que simulam a região frontal de um veículo, a parte inferior da coluna é a primeira e mais afetada nos

instantes iniciais da deformação, justamente quando a estrutura deve se manter íntegra para permitir a abertura dos *air-bags* laterais a uma distância segura dos ocupantes (Figura 79).



Figura 79 - Barreira de impacto lateral IIHS.

Fonte: adaptado de http://www.iihs.org/ratings/images/barriers_superimposed.jpg. Acesso em 10/12/2012.

Considerando as características do impacto lateral, a resistência dos materiais, os recursos técnicos para execução das geometrias das colunas, e combinando técnicas para realização das uniões dos componentes, através da simulação de elementos finitos (Figura 80 **Error! Reference source not found.**), os engenheiros podem dimensionar de forma otimizada as estruturas, evitando custos desnecessários ou geometrias que comprometam a integridade da estrutura.

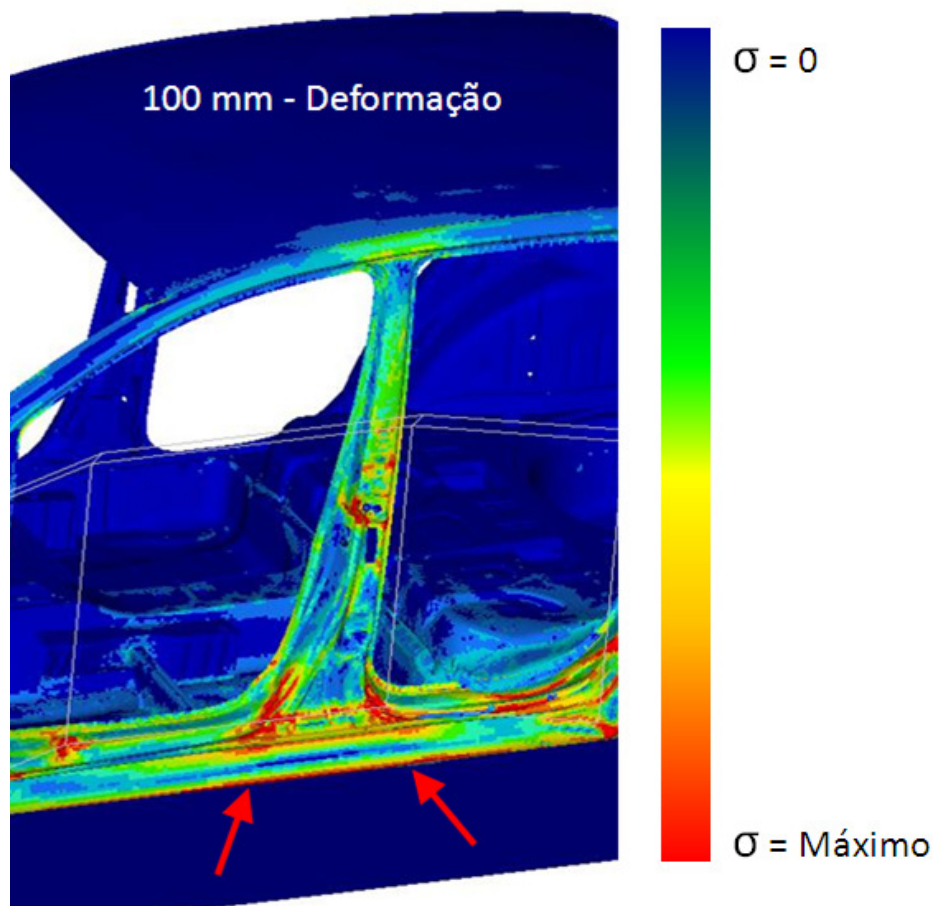


Figura 80 - Simulação de impacto lateral para deslocamento de 100mm.
Fonte: Volkswagen do Brasil Ltda.

6.4 Desenvolvimentos futuros para aplicação de aços de ultra alta resistência

As dificuldades decorrentes da aplicação de solda a ponto em aços de ultra alta resistência motivaram o desenvolvimento de tecnologias alternativas, como a aplicação de solda ponto a laser (YANG et al., 1998, p. 151-152).

Os dados da pesquisa para aplicação de solda ponto a laser efetuada por Yang indicam que processo tem ciclo para execução do ponto entre 0,6 e 1 segundo, portanto comparável à solda ponto por resistência e isto é uma vantagem por não aumentar o tempo ciclo de produção; entretanto uma avaliação mais detalhada em relação à aplicação em aços de ultra alta resistência se faz necessária, uma vez que a pesquisa foi conduzida com aplicação de chapas de aço com resistência a tração de 320 MPa com espessura de 1 mm.

A execução de cordões de solda laser nos flanges de colunas B implementados pela Volvo no modelo XC60 como alternativa à solda ponto é tecnicamente interessante, pois

reduz o aporte térmico sobre o aço de ultra alta resistência e a concentração de tensões decorrente da união por solda ponto (LARSON, 2010, p. 122).

Este tipo de união aplicada na região superior do flange se mostrou eficaz, entretanto além de demandar cuidados especiais em relação às tolerâncias envolvidas no processo, ainda não foi avaliada como alternativa ao processo de união híbrida na base da coluna B.

A tecnologia de união de chapas denominada *stir spot welding* foi avaliada para substituição do processo de solda ponto por resistência (FENG et al., 2005). A união de uma chapa *dual phase* de 600 MPa com aço martensítico de 1300 MPa de 1,6 mm de espessura reproduz a condição de construção mais avançada de colunas B, entretanto o tempo de execução de cada união durante o experimento variou de 1,6 a 3,2 seg, sendo que as uniões com maior tempo de execução tiveram melhor resultado de resistência à tração (10 kN).

Esta tecnologia necessita de aprimoramento tanto em relação à resistência, quanto ao ciclo de produção, pois o valor de resistência alcançado inferior do atingido com solda ponto por resistência e o ciclo de produção muito superior aos atualmente praticados inviabilizam sua aplicação.

A literatura técnica pesquisada não indicou alternativa viável para substituição da solda ponto por resistência combinada com adesivo estrutural na união de componentes de carrocerias.

Entretanto é válido e aconselhável que pesquisas no sentido de substituição da solda ponto por resistência continuem sendo conduzidos, pois as mudanças de fase impostas ao material são intrínsecas à configuração deste processo, e eliminam em parte a vantagem da aplicação de aços de ultra alta resistência.

7 CONCLUSÃO

As investigações efetuadas na elaboração deste trabalho indicaram que o aumento da resistência das colunas de carrocerias que foi obtido inicialmente através do acréscimo de reforços cada vez mais espessos, o que gerou aumento de peso das estruturas, levou a indústria à busca de alternativas técnicas visando a redução de peso combinada com aumento de resistência.

A aplicação de cálculos de elementos finitos no desenvolvimento das estruturas em conjunto com a aplicação de materiais de maior resistência mecânica estabeleceu um novo patamar de rigidez contra impactos laterais das colunas laterais de carroceiras.

A consequência direta da aplicação dos materiais mais resistentes foi a mudança do tipo de ruptura ocorrida nas estruturas em ensaios de impacto, tornando a união soldada o ponto mais suscetível a ruptura.

O ciclo térmico inerente à execução da solda a ponto pode gerar, principalmente em materiais martensíticos, vazios na zona de fusão (ZF) do ponto de solda, ou recozimento do material na zona termicamente afetada (ZAT), o que de uma forma ou de outra reduz significativamente a resistência mecânica da união.

Considerando que os pontos de solda de uma estrutura funcionam de forma discreta, ou seja, a ruptura de cada ponto ocorre de forma independente dos outros e a falha de um ponto reduz a resistência da estrutura e sobrecarrega os demais simultaneamente, a possibilidade de ruptura de pontos de solda durante impactos laterais inviabiliza a aplicação deste método de união isoladamente.

A alternativa técnica encontrada para o aumento da resistência das uniões entre componentes de colunas laterais foi a criação de juntas híbridas pela combinação de adesivos estruturais de base epóxi com a união por pontos de solda.

Os adesivos estruturais por sua vez agem de forma coesa na estrutura, distribuindo a resistência à ruptura por toda área de adesão, e são sensíveis a taxas de deformação, o que faz com que em situações de impacto ofereçam maior resistência à ruptura.

A comprovação, em laboratório, da eficácia do adesivo para o aumento da resistência das estruturas em impactos laterais é particularmente complexa, pois não foram ainda definidos ensaios padronizados para este objetivo; entretanto, os ensaios de tração com a variação da taxa de deformação realizados neste trabalho demonstraram que os adesivos estruturais podem substituir, em determinadas condições, pontos de solda com vantagens se aplicados de acordo com suas especificações técnicas.

Como a execução de juntas híbridas tem se consolidado na indústria automobilística, o desenvolvimento de métodos para certificação e comparação destas uniões é recomendável, pois atualmente as normas existentes limitam-se à comparação das propriedades de resistência mecânica dos adesivos comparativamente, mas sem definição de objetivos a serem atingidos.

Apesar do processo de solda a ponto ter quase cem anos, seu desenvolvimento parece ainda não ter chegado ao limite, pois a necessidade de desenvolvimento de novas formas de refrigeração do ponto de solda e aprimoramento da qualidade da microestrutura da zona de fusão indicam que há campo para pesquisa e aprimoramento.

A investigação das variáveis que determinam a formação ou não de vazios na zona de fusão (ZF) dos pontos de solda é de interesse, especialmente para a indústria automobilística, pois este tipo de ocorrência traz consequências indesejadas na união dos componentes de carroceria.

Em relação aos adesivos estruturais, há a necessidade de desenvolvimento de materiais mais resistentes a esforços perpendiculares à superfície de adesão e que não necessitem de processo de aquecimento suplementar para cura final, ou seja, também a tecnologia de adesivos estruturais é um campo fértil para a pesquisa e desenvolvimento de soluções mais eficazes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

U.S. Department of Transportation. **Federal Motor Vehicle Safety Standards - DOT HS 809 004 NHTSA Technical Report**. Virginia: National Technical Information Service, 1999.

U.S. Department of Transportation. **Federal Motor Vehicle Safety Standards - FMVSS 214 Dinamic**. Washington. D.C.: Office of Vehicle Safety Compliance, 2006.

U.S. Department of Transportation. **Federal Motor Vehicle Safety Standards - FMVSS 214S Static**. Washington. D.C.: Office of Vehicle Safety Compliance , 1992.

U.S. Department of Transportation. **Federal Motor Vehicle Safety Standards – Evaluation of FMVSS 214**. Virginia: National Technical Information Service, 1999.

Official Journal of the European Union. **ECE R94**.[s.n.], 2010.

Official Journal of the European Union. **ECE R95**.[s.n.], 2011.

American Standard for Testing and Materials. **Standard test methods for tension testing of mealllic materials, ASTM E8/E8M-09**. Pennsylvania, 2009.

American Standard for Testing and Materials. **Standard Test Methods for Analysis of Metal Bearing Ores and Related Materials for Carbon, Sulfur, and Acid-Base Characteristics, ASTM E1915**. Pennsylvania, 2011.

American Standard for Testing and Materials. **Standard Guide for Determination of Various Elements by Direct Current Plasma Atomic Emission Spectrometry, ASTM E1097**. Pennsylvania, 2012.

European Comitee for Standardization. **Conversion of hardness values DIN ISSO 18265**. Brussels, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Ensaio de dureza Vickers ABNT NBR NM 6507-1**. Rio de Janeiro, 2008.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**, 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

SCHIFF, M. A.; TENCER, A. F. ; MACK, C. D. Risk factors for pelvic fractures in lateral impact motor vehicles crashes. **Accident Analysis & Prevention**, USA, n. 40, p. 387-391, 2008.

TENCER, A. F. et al., Factors affecting pelvic and thoracic forces in near-side impact crashes a study of US-NCAP,NASS, and CIREN data. **Accident Analysis & Prevention**, USA, n. 37, p. 287-293, 2005.

ABDELRAOOF MAYYAS et al., Using quality function deployment and analytical hierarchy process for material selection of Body-In-White. **Materials and Design**, n. 32, p. 2771-2782, 2011.

DANIEL, C. ; BLOUNT, G. ; The suitability of aluminium as an alternative material for car bodies, **Materials and Design**, n. 20, p. 267-272, 1999.

M. POURANVARI ; MARASHI S.P.H. On the failure of low carbon steel resistance spot welds in quasi-static tensile-shear loading, **Materials and Design**. n. 31, p. 3647-3652, 2010.

SILVA, Lucas Felipe Martins da et al., **Hybrid Adhesive Joints**, Berlin: Springer-Verlag, 2011. p. 17.

WOLF, Marco Antonio. In:_____ **Soldabilidade dos aços dual-phase 600 e 800 via processo de soldagem a pontos média frequência corrente contínua (MFDC) e corrente alternada (AC)**, 2008, f. 3. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DÜRING SCHWEIßTECHNIK GMBH. Introdução a técnica de solda ponto - Manual técnico do fornecedor de pinças de solda ponto. s.d.

XIN SUN, et al., Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions, **Engineering Failure Analysis**. n. 15, p. 356-367, 2007

XINSHENG LIAO et al., Microstructures in a resistance spot welded high strength dual phase steel. **Material Characterization**. n. 61, p. 341-346, 2010.

HOSFORD, WILLIAM F. ; CADDELL, ROBERT M. **Metal Forming**, Cambridge: University Press, 2007. p. 165.

M. SARWAR et al., Influence of martensite volume fraction on fatigue limit of a Dual Phase steel, **Journal of Material Engineering and Performance**, p. 270-277, 2002.

MUKHOPADHAYAY G. ; BHATTACHARYA S. ; RAY K.K. Strength assessment of spot-welded sheets of interstitial free steel; **Journal of materials processing technology**. n. 209, p. 1995-2007, 2008.

MA C. et al., Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel; **Material Science and Engineering**. n. 485, p. 332-346, 2008.

KONG, JONG PAN et al., Effect of boron and welding current on the mechanical properties of electrical resistance spot welds in complex-phases steels; **Materials and Design**. n. 54, p. 598-609, 2013.

M. POURANVARI et al., Influence of fusion zone size mode on mechanical performance of dissimilar resistance spot welds of AISI 1008 low carbon steel and DP600 advanced high strength steel; **Materials and Design**. n. 32, p. 1390-1398, 2010.

Canevarolo Jr., Sebastião V. **Ciência dos Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2ª ed. rev. e ampl., 2006.

ARENAS, JOSE M. et al., Optimum adhesive thickness in structural adhesive joints using statistical techniques based on Weibull distribution. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 30, p. 160-165, 2010.

BRANCO, FELIPE KULIG. Influência da microestrutura na anisotropia de chapas metálicas de diferentes aços estruturais. 2007. 72. (Projeto de iniciação científica) – Centro Universitário da FEI.

DEREWONKO, AGNIESZKA et al. Strength assessment of adhesive-bonded joints, **Computational material science**, n. 43 p. 157-164, 2008.

HANS-WILFRIED WAGENER. New developments in sheet metal forming: sheet materials, tools and machinery, **Journal of Materials Processing Technology**, n. 72, p. 342-357, 1997.

KUMAR, S.B SINGH, K.K. RAY, Influence of bainite/martensite-content on the tensile properties of low carbon dual-phase steels, p. 270-282, *Materials Science and Engineering A* 474, 2007.

KARBASIAN, H. ; TEKKAYA, A.E. A review on hot stamping. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 210, p. 2103 – 2118, 2010.

K. MORI; D. ITO. Prevention of oxidation in hot stamping of quenchable steel sheet by oxidation preventive oil. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, n. 58, p. 267-270, 2009.

MONTGOMERY, D.C. Design and analysis of experiments, 3^a ed. John Wiley, 1991.

YANG, Y. S. ; LEE, S. H. A Study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 152-156, 1998.

LARSON, Johnny K. Avoidance of crack inducement when laser welding hot-formed car body components - A variable analysis. **Physics Procedia**. v 5, p. 115 – 124, 2010.

FENG, Z et al. Friction stir spot welding of advanced high-strength steels – A feasibility study. Oak Ridge: SAE International US Government contract DEAC05-00OR22725, 2005.