



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRENO MAIA BEZERRA DE ARAUJO URTIGA

**Análise comparativa das propriedades de solda GMAW de aços AHSS FB 440/580  
aplicados à indústria automotiva usando técnica de planejamento de experimentos**

Recife

2018

BRENO MAIA BEZERRA DE ARAÚJO URTIGA

**Análise comparativa das propriedades de solda GMAW de aços AHSS FB 440/580 aplicados à indústria automotiva usando técnica de planejamento de experimentos**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho.

Recife

2018

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

U82a Urtiga, Breno Maia Bezerra de Araujo.  
Análise comparativa das propriedades de solda GMAW de aços AHSS  
FB 440/580 aplicados à indústria automotiva usando técnica de planejamento  
de experimentos / Breno Maia Bezerra de Araujo Urtiga. - 2018.  
63 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. AHSS. 3. Ferrita-Bainita. 4. GMAW. 5.  
Planejamento de experimentos. I. Urtiga Filho, Severino Leopoldino.  
(Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-105

BRENO MAIA BEZERRA DE ARAÚJO URTIGA

**Análise comparativa das propriedades de solda GMAW de aços AHSS FB 440/580 aplicados à indústria automotiva usando técnica de planejamento de experimentos**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 19 / 03 / 2018.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Flávio Jose da Silva (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Edval Gonçalves de Araújo (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família por serem exemplos de que o estudo acadêmico engrandece o ser humano em vários aspectos. Pelo apoio e torcida durante minha trajetória profissional e acadêmica. A meu pai que sempre me apoiou e me incentivou a seguir este percurso tão gratificante.

Agradeço a meu orientador Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho, que me guiou durante este projeto desafiador de tantas formas. Sem ele este projeto, certamente, não teria sido executado.

Agradeço aos docentes do PPGEM pela oportunidade de aprendizado e realização deste trabalho. Agradecimento especial ao Prof. Dr. Edval Gonçalves de Araújo como mentor na ferramenta de planejamento de experimentos, tão importante e ao mesmo tempo pouco difundida na indústria brasileira.

Agradeço à Fiat Chrysler Automobiles pelo suporte e encorajamento da iniciativa de cursar o mestrado, mesmo em momentos tão difíceis.

Agradeço ao CompoLab pela realização das análises dos experimentos e ao apoio incondicional de Prof. Dr. Severino Urtiga Filho, de Dra. Ivanilda Ramos de Melo no suporte científico e auxílio nas análises experimentais e os demais técnicos que deram suporte à realização deste trabalho.

Agradeço à CMA e Magnetti Marelli pela realização dos experimentos de soldagem. Este tipo de colaboração é indispensável para a elaboração de trabalhos efetivos entre a indústria e a academia.

Agradeço, por fim, à minha esposa, Maria Luiza Marinho Oliveira, que me motivou, diariamente, para a continuidade desta empreitada, e me fazer acreditar em mim. Seu apoio foi fundamental ao longo da realização deste trabalho.

## **RESUMO**

Neste trabalho foi realizado um estudo das características de solda GMAW de um aço AHSS FB440/580 com microestrutura ferrita-bainita produzido em duas fontes diferentes. A oportunidade de utilização do aço nacional configura uma redução de custo para a Fiat Chrysler Automobiles, o que motivou o trabalho. A técnica de planejamento de experimentos foi aplicada e os fatores velocidade e corrente foram selecionados como principais variáveis com interesse tecnológico de serem estudadas. O experimento foi realizado, portanto, como fatorial completo de dois níveis e três variáveis: origem do material, velocidade e corrente de soldagem. Experimentos foram conduzidos no processo de produção de componentes comercializados, de modo automatizado. Os corpos de prova foram cortados, embutidos em resina, lixados, polidos e atacados quimicamente para revelação de microestrutura. Foram analisados, macroestrutura, microestrutura, dureza e microdureza Vickers, e esta última foi usada como resposta no DOE fatorial. Os resultados obtidos mostraram que as juntas soldadas aparentam possuir características de dureza, microdureza, e microestrutura similares independentemente da proveniência do material.

Palavras-chave: AHSS. Ferrita-Bainita. GMAW. Planejamento de experimentos.

## **ABSTRACT**

GMAW welding characteristics of an AHSS Ferrite-Bainite steel supplied by two different production plants were studied. A cost reduction opportunity for Fiat Chrysler Automobiles with the nationalization of the material was the main motivation for the study. Design of experiments technique was applied where speed and current factors were selected as main variables with technological interest to be thoroughly understood. Experiments were conducted as a full factorial of two levels and three variables. They were running at the welding line which produce end-use parts for commercialized vehicles and automatically. The specimens were metallographically prepared to reproduce microstructure, hardness and microhardness Vickers were also obtained and the last was used as return value for the factorial DOE. Results obtained showed that welded joints seemed to have equivalent characteristics in hardness, microhardness and microstructure, independently of the material source.

Keywords: AHSS. Ferrite-Bainite. GMAW. Design of experiments.

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                                                                                                         |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 -  | Diagrama Resistência versus Ductilidade dos aços AHSS atualmente disponíveis.....                                                                       | 17 |
| Figura 2 -  | Utilização de AHSS em carroceria para produção de veículos leves na América do Norte.....                                                               | 18 |
| Figura 3 -  | Emissões de Gases causadores do efeito estufa de veículos com aços convencionais (referência), contendo ligas de alumínio e AHSS.....                   | 19 |
| Figura 4 -  | Zonas de deformação e segurança de um veículo durante impacto.....                                                                                      | 20 |
| Figura 5 -  | Curvas tensão x deformação de materiais segundo aplicações típicas em carrocerias automotivas considerando suas respectivas performances mecânicas..... | 21 |
| Figura 6 -  | Esquema da microestrutura do aço Ferrita-Bainita (A), e Microestrutura obtida por MEV (B).....                                                          | 22 |
| Figura 7 -  | Faixa de propriedades dos aços Ferríticos-Bainíticos comparativa com outros aços aplicados na indústria automotiva. ....                                | 23 |
| Figura 8 -  | Aços FB aplicados na indústria automotiva.....                                                                                                          | 24 |
| Figura 9 -  | Expansão de furo comparativa entre DP e FB.....                                                                                                         | 25 |
| Figura 10 - | Diagrama esquemático TTT de aço hipotético com fases Perlita, Martensita e Bainita definidas.....                                                       | 26 |
| Figura 11 - | Micrografia eletrônica de transmissão de um feixe de bainita superior da liga Fe-0,43%C-2%Si-3%Mn, parcialmente transformada.....                       | 27 |
| Figura 12 - | Representação dos principais tipos de Bainita diferenciados pela forma de precipitação de carbonetos.....                                               | 28 |
| Figura 13 - | Representação da temperatura atingida numa junta soldada ao longo da sessão transversal ao cordão de solda.....                                         | 30 |
| Figura 14 - | Desenho esquemático do processo de análise experimental de processos.....                                                                               | 33 |
| Figura 15 - | Limitação da abordagem OVAT em sistema simples, com dois fatores.....                                                                                   | 36 |
| Figura 16 - | Fluxograma utilizado no desenvolvimento da pesquisa.....                                                                                                | 38 |
| Figura 17 - | Conjunto usado na soldagem das amostras investigadas.....                                                                                               | 40 |
| Figura 18 - | Dispositivo de fixação dos Corpos de Prova e esquema de soldagem adotado.....                                                                           | 41 |
| Figura 19 - | Macroestrutura com indicação das linhas de medição de dureza e microdureza.....                                                                         | 45 |

|             |                                                                                                           |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 20 - | Regiões da junta soldada de acordo com efeitos térmicos. MB, ZTAMB, ZTAZF e ZF.....                       | 45 |
| Figura 21 - | Macroestrutura das juntas soldadas nas condições dos ensaios.....                                         | 47 |
| Figura 22 - | Microestrutura do metal de base.....                                                                      | 50 |
| Figura 23 - | Microestrutura da zona termicamente afetada próxima ao metal de base.....                                 | 50 |
| Figura 24 - | Microestrutura da zona termicamente afetada próxima à zona fundida.....                                   | 51 |
| Figura 25 - | Microestrutura com identificação da martensita na zona fundida.....                                       | 51 |
| Figura 26 - | Perfil de macrodureza da amostra 3.....                                                                   | 52 |
| Figura 27 - | Perfil de microdureza das amostras 6 e 1.....                                                             | 53 |
| Figura 28 - | Valores da microdureza, para todas as amostras ensaiadas.....                                             | 54 |
| Figura 29 - | Gráficos comparativos de microdureza entre material nacional e importado em função do aporte térmico..... | 56 |
| Figura 30 - | Gráficos de resposta do Minitab para Microdureza.....                                                     | 58 |

## LISTA DE TABELAS

|            |                                                                                       |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - | Nomenclatura dos aços conforme sua microestrutura.....                                | 37 |
| Tabela 2 - | Planejamento experimental.....                                                        | 39 |
| Tabela 3 - | Composição química e carbono equivalente do consumível e do material<br>de base ..... | 42 |
| Tabela 4 - | Planejamento experimental com valores dos níveis.....                                 | 43 |
| Tabela 5 - | Design de experimento com respostas.....                                              | 57 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |                                                                        |
|--------|------------------------------------------------------------------------|
| UHSS   | Ultra High Strength Steel (Aço avançado de altíssima resistência)      |
| GMAW   | Gas Metal Arc Welding (Soldagem a arco com proteção gasosa)            |
| DOE    | Design of experiments (Planejamento de experimentos)                   |
| AHSS   | Advanced High Strength Steel (Aço avançado de alta resistência)        |
| OVAT   | One variable at a time (Uma variável por vez)                          |
| AT     | Aporte térmico [J.mm <sup>-1</sup> ]                                   |
| MS     | Aço martensítico                                                       |
| FB     | Aço ferrítico bainítico                                                |
| TRIP   | Com plasticidade induzida por deformação                               |
| CP     | Comercialmente puro                                                    |
| NCAP   | New Car Assessment Programme (Programa de avaliação de novos veículos) |
| HHE    | High hole expansion (Alta expansão de furo)                            |
| TTT    | Diagrama tempo-temperatura-transformação                               |
| ZTA-ZF | Zona termicamente afetada próxima à zona fundida                       |
| ZTA-MB | Zona termicamente afetada próxima ao metal de base                     |
| Fe     | Ferro                                                                  |
| H      | Hidrogênio                                                             |
| HCP    | Hexagonal compacta                                                     |
| HE     | Extrusão hidrostática                                                  |
| HV     | Dureza Vickers [HV]                                                    |
| MB     | Metal base                                                             |
| MEV    | Microscópio Eletrônico de Varredura                                    |
| MO     | Microscópio ótico                                                      |
| N      | Nitrogênio                                                             |
| O      | Oxigênio                                                               |
| Ti     | Titânio                                                                |
| ZTA    | Zona termicamente afetada                                              |
| D0     | Diâmetro inicial de furo                                               |
| Df     | Diâmetro final de furo                                                 |

Letras gregas

$\alpha$  Fase alfa

|           |                       |
|-----------|-----------------------|
| $\beta$   | Fase beta             |
| $\mu$     | Coeficiente de atrito |
| $\lambda$ | Expansão de furo      |



## SUMÁRIO

|              |                                              |           |
|--------------|----------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                       | <b>13</b> |
| 1.1          | CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....                  | 13        |
| 1.2          | JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIAS.....            | 14        |
| 1.3          | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....                | 14        |
| 1.4          | OBJETIVOS.....                               | 14        |
| <b>1.4.1</b> | <b>Objetivo Geral.....</b>                   | <b>15</b> |
| <b>1.4.2</b> | <b>Objetivos Específicos.....</b>            | <b>15</b> |
| <b>2</b>     | <b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>             | <b>16</b> |
| 2.1          | AÇOS NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....       | 16        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Aço AHSS.....</b>                         | <b>16</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Aço Ferrita-Bainita.....</b>              | <b>22</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Transformações Bainíticas.....</b>        | <b>26</b> |
| 2.2          | MICROESTRUTURA DE JUNTAS SOLDADAS.....       | 29        |
| 2.3          | PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE) .....     | 32        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Importância do DOE.....</b>               | <b>32</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b>OVAT vs DOE.....</b>                      | <b>34</b> |
| <b>3</b>     | <b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>        | <b>37</b> |
| 3.1          | PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....               | 38        |
| 3.2          | REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL.....                 | 39        |
| 3.3          | ANÁLISE EXPERIMENTAL.....                    | 43        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>          | <b>46</b> |
| 4.1          | MACROESTRUTURA DE JUNTAS SOLDADAS.....       | 46        |
| 4.2          | MICROESTRUTURA DE JUNTAS SOLDADAS.....       | 48        |
| 4.3          | MACRODUREZA DAS JUNTAS SOLDADAS.....         | 51        |
| 4.4          | MICRODUREZA DAS JUNTAS SOLDADAS.....         | 53        |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÕES.....</b>                       | <b>59</b> |
| <b>6</b>     | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b> | <b>60</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                      | <b>61</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma breve introdução do tema estudado, com o posicionamento de sua importância e alcance, a justificativa e relevância do tema, a estruturação da dissertação, e os objetivos geral e específicos que fundamentaram a execução dos experimentos.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria automotiva está em constante evolução tecnológica no desenvolvimento de novos produtos e processos produtivos que permitem melhor eficiência energética, segurança e emissões reduzidas. Estes são os três pilares de maior consideração deste ramo quando o futuro, de seus produtos, é considerado. Deste modo, o desenvolvimento de novos aços que apresentem propriedades mecânicas específicas para aplicações otimizadas em veículos, tem papel fundamental na redução de peso e melhoria de segurança. A melhoria de peso e segurança, com utilização de aços avançados de alta resistência, contribui para um menor nível de emissões de gases efeito estufa, quando comparado com outras soluções atualmente conhecidas. Exemplos são ligas de alumínio, magnésio. Outro ponto favorece o investimento neste tipo de solução é que, a utilização destes aços é tecnologicamente pouco complexa quando considerados com os processos produtivos já estabelecidos (que usam aços convencionais e de alta resistência). Em vários casos são necessários apenas ajustes de parâmetros de processo para sua aplicação, pois estes aços avançados têm microestrutura diferenciada e, normalmente, menor espessura.

A indústria automotiva tem investido vultosos recursos no desenvolvimento de aços avançados de alta resistência, que são uma tendência mundial, e está em constante crescimento. Veículos atualmente comercializados têm um percentual relevante do uso deste tipo de aço em suas estruturas e, a tendência é que sua utilização aumente.

Este trabalho estuda juntas soldadas de aços avançados de alta resistência do tipo ferrítico-bainítico, nacional e importado, utilizando planejamento de experimentos como metodologia estatística. Juntas foram soldadas com variação de velocidade e corrente da soldagem e foram realizadas análises de dureza e microdureza Vickers, macroestrutura e microestrutura.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Além de sempre evoluir, a indústria se torna a cada dia mais competitiva. Com o aumento da oferta de produtos, as empresas precisam oferecer soluções mais atraentes e diferenciais para atrair consumidores. Esta estratégia normalmente torna-se bastante onerosa e muito investimento é feito em pesquisa e desenvolvimento para realizá-la. Assim, para manter-se no mercado, a otimização dos processos produtivos se faz necessária no intuito de melhoria de margem de lucro dos seus produtos para não se limitar a gerar riqueza, objetivo de qualquer negócio, mas também para custear a constante necessidade de melhoria e superação.

Este trabalho foi concebido para dar subsídios técnicos e científicos à oportunidade de nacionalização de um dos aços que compõem a maior parte da travessa de suspensão dianteira de veículos da Fiat Chrysler Automobiles. Ele foi realizado em parceria com o Laboratório de Materiais Compósitos e Integridade Estrutural (COMPOLAB) da Universidade Federal de Pernambuco, a Magnetti Marelli, a ArcelorMittal, a CMA e a Fiat Chrysler Automobiles.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo aborda as considerações iniciais sobre o tema do estudo, motivações e os objetivos geral e específicos desse trabalho.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, que dá o fundamento teórico para o desenvolvimento do tema, destacando o planejamento estatístico de experimentos, os aços Ferríticos-Bainíticos e a soldagem MIG.

No terceiro capítulo estão descritos os materiais utilizados, a metodologia, os experimentos e as análises e testes realizados sobre eles.

Os resultados e a discussão da pesquisa são apresentados no quarto capítulo.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões da dissertação, o sexto traz sugestões para trabalhos futuros e o sétimo as referências bibliográficas utilizadas durante o estudo.

## 1.4 OBJETIVOS

As atividades desenvolvidas para a realização dos experimento e obtenção dos resultados que nortearam a elaboração desta dissertação foram fundamentadas nos Objetivos Específicos e no Objetivo Geral, que são apresentados abaixo.

### **1.4.1 Objetivo Geral**

O principal objetivo deste trabalho de pesquisa é analisar as propriedades de solda GMAW do aço Ferrítico-Bainítico, de proveniência nacional e importada, aplicados na indústria automotiva. Portanto, dar respaldo técnico e científico para a abordagem da nacionalização do aço de microestrutura ferrita-bainita utilizado na travessa de suspensão dianteira veicular que, por ser produzido localmente, tem menor custo.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Mostrar que o aço FB 440/580 produzido na Bélgica e no Brasil têm mesma propriedade de solda
- Estabelecer o conhecimento e aplicação da metodologia de planejamento de experimentos no procedimento de ensaios e estudo empírico de fenômenos
- Analisar a influência dos parâmetros de velocidade e corrente na microestrutura e dureza do aço FB 440/580

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica sobre o tema de estudo e apresentados os estudos mais recentes que contemplam os temas tratados neste trabalho.

### 2.1 AÇO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Os aços aplicados na produção de veículos, pela indústria automotiva é objeto de estudos de desenvolvimentos de novas ligas e de procedimentos de fabricação, que tem assegurado a evolução tecnológica necessária para atender aos rígidos requisitos impostos pelo mercado, e as legislações governamentais.

#### 2.1.1 Aço AHSS

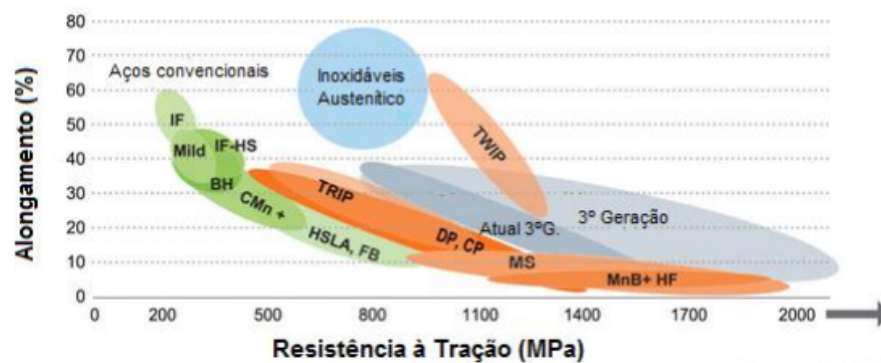
A indústria automotiva tem passado por um processo de constante evolução tecnológica para atender as demandas de mercado e governamentais. Nas duas últimas décadas, ela tem sido fortemente afetada pelos três fatores seguintes: eficiência energética, segurança para passageiros e redução de emissões de carbono. Melhor eficiência energética é conseguida, primordialmente, através da redução de peso dos subcomponentes do veículo. Contudo, o fator segurança veicular é também determinante e seus requisitos têm sido cada vez mais severos. Deste modo, o desenvolvimento de aços com propriedades otimizadas para determinadas aplicações foi realizado para atender esta demanda. Estes aços são denominados AHSS (aços avançados de alta resistência) e são capazes de garantir aos veículos ótima performance em impacto com peso reduzido (SHOME, TUMULURU, 2015).

Segundo a World Auto Steel (2017), AHSS é um material complexo e sofisticado, cuja composição química e microestrutura multifásica foram selecionadas cuidadosamente através de controle preciso de processo de aquecimento e resfriamento. Diversos mecanismos de endurecimento são aplicados para obtenção de resistência, ductilidade, dureza e propriedades de fadiga adequadas à sua utilização.

Deste modo, o AHSS é subdividido em diversas categorias de aços de acordo com suas características. São exemplos os aços bifásicos (DP), ferrítico-bainítico (FB), plasticidade induzida por transformação de fase (TRIP), martensíticos (MS) e *Complex-Phase* (CP). A Figura 1 mostra a ampla gama de aços desenvolvidos que têm aplicações em partes diversas de veículos. As siglas se referem aos seguintes aços: TWIP – Plasticidade Induzida por Maclação, TRIP – Plasticidade Induzida por Transformação de Fase, DP – Bifásicos, MS – Martensíticos,

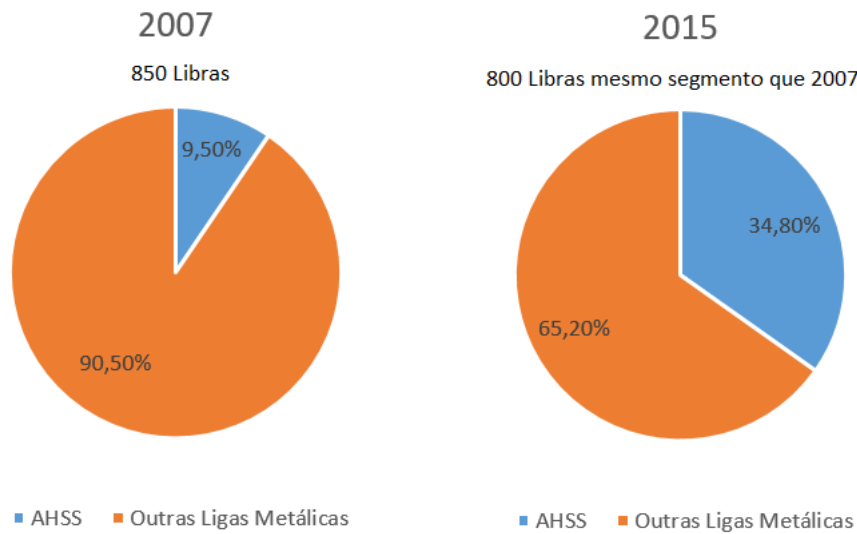
CP – *Complex-Phase*, FB – Ferrítico-Bainítico, IF – *Interstitial-Free* ou livre de elementos intersticiais, BH – *Bake-Hardening* ou Envelhecido por Deformação Elástica, MnB – Com Liga de Manganês Bórico, HF – Laminados a Quente, Mild – Aço Doce, HS – Estampado a Quente, Mild – Aço Carbono com baixo teor de carbono, CMn – Liga Carbono Magnésio. Por exemplo, aços DP e TRIP são aplicados em zonas de impacto devido à alta energia de absorção que possuem. Aços de altíssima resistência (MS) podem ser aplicados em componentes estruturais do cockpit para garantir maior segurança para os passageiros. A tendência de utilização destes materiais avançados foi observada na América do Norte entre os anos de 2007 e 2015 quando, no início, o uso de AHSS correspondia a 9,5% da massa média de veículos leves e, ao fim do período, este número aumentou para 34,8% conforme mostrado na Figura 2. (KEELER et al., 2017). Dimensão

**Figura 1 – Diagrama Resistência versus Ductilidade dos aços AHSS atualmente disponíveis.**



Fonte: Adaptado de Keeler et al., 2017.

**Figura 2 – Utilização de AHSS em carroceria para produção de veículos leves na América do Norte**



Fonte: Adaptado de Keeler et al., 2017.

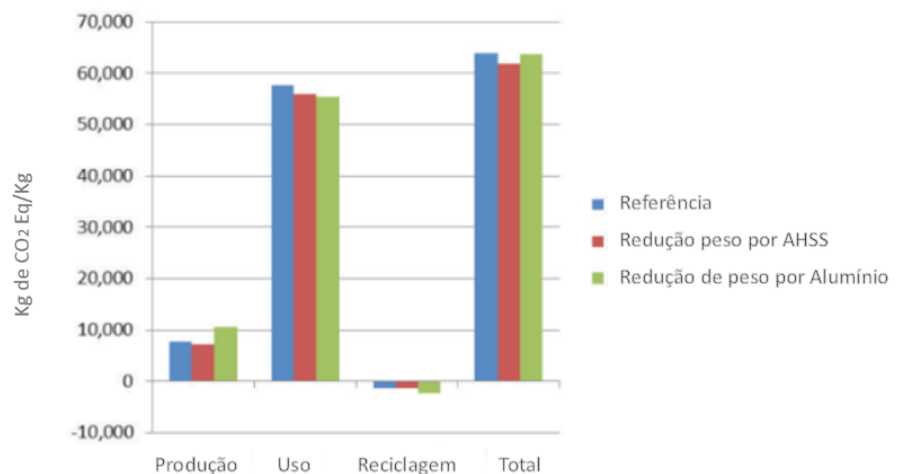
As vantagens da utilização de AHSS no lugar de aços carbono convencionais são várias, no quesito redução de peso, Baluch et al (2014), estimaram que a redução de peso, em geral, pode chegar a 50% quando AHSS são aplicados em substituição a aços carbono convencionais. Os veículos médios e grandes, em especial os SUVs, são bastante beneficiados com esta aplicação conseguindo maior eficiência energética.

Outra alternativa para a redução de peso é a utilização de alumínio. Apesar de amplamente aplicada na indústria automotiva, esta opção é mais onerosa que a utilização de AHSS, oferecendo a mesma redução de peso. A formação de perfis complexos também é tecnologicamente mais difícil com alumínio que usando AHSS (BALUCK et al, 2014). Outro ponto importante na utilização de AHSS como estratégia de redução de peso é a quantidade de emissões de gases que causam o efeito estufa, terceiro fator preponderante no desenvolvimento automotivo nas últimas décadas. Estudos realizados pela Steel Recycling Institute mostram que os aços avançados de alta resistência têm menor impacto em emissões de gases causadores do efeito estufa que o alumínio. Os resultados foram colhidos em 5000 veículos de variados segmentos e toda a cadeia de dos materiais foi analisada, produção, utilização e reciclagem. Conforme a Figura 3 mostra, em 90% dos casos, as emissões em AHSS é menor que ligas contendo alumínio. Adicionalmente, foi verificado que, com a frota de veículos da América do Norte em 2016, a substituição de ligas de alumínio por AHSS resultaria numa redução de 12 toneladas de gases causadores do efeito estufa que equivale às emissões necessárias para abastecer energeticamente 1,6 milhões de residências no continente. (STEEL RECYCLING

INSTITUTE, 2018), onde toda a cadeia produtiva foi considerada. Além dos fatores citados acima, o sucesso da aplicação de AHSS na indústria automotiva também está relacionado com a fabricação de componentes com estes aços. Basicamente são usados os mesmos meios tecnológicos com pequenos ajustes devido às características mecânicas específicas e baixas espessuras. Deste modo, aços mais leves que os convencionais são facilmente aplicados na indústria automotiva de modo eficiente (BALUCH et al, 2014).

Além da oportunidade em redução de massa descrita acima, os aços AHSS desempenham um papel importantíssimo no cumprimento de requisitos de segurança em constante evolução. A capacidade do material de se comportar de acordo com um determinado requerimento técnico para absorver cargas estáticas e dinâmicas são fatores preponderantes no projeto de estruturas automotivas. Deste modo, a seleção de materiais e o projeto dos componentes determinará como as cargas serão absorvidas. A cinética da deformação de um automóvel durante um impacto pode ser dividido em duas partes: zona de deformação e zona de segurança, conforme esquematizado na Figura 4. Deste modo, a energia de colisão precisa ser absorvida em praticamente sua totalidade nas regiões de deformação de modo a manter a zona de segurança, ou habitáculo, intacto, tenha o evento ocorrido em alta ou baixa velocidade.

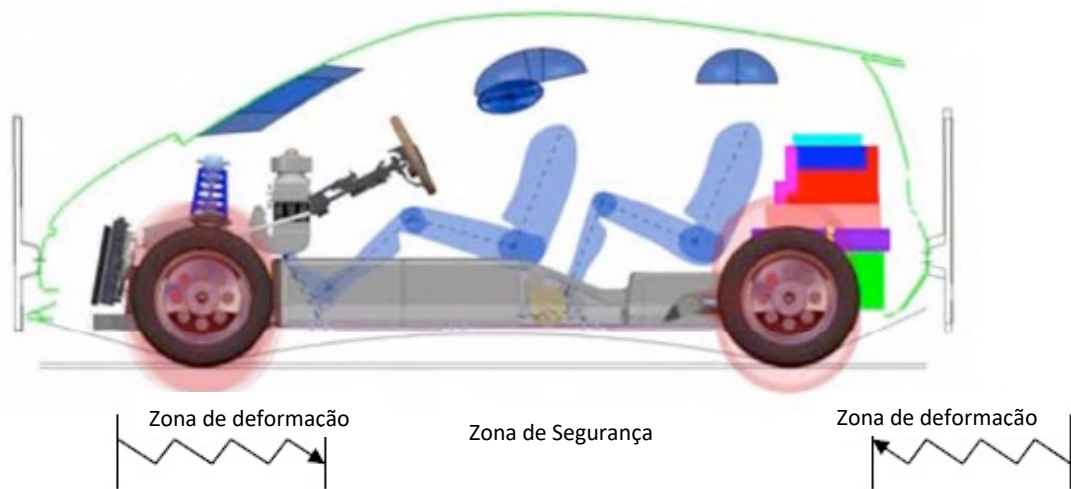
**Figura 3 – Emissões de Gases causadores do efeito estufa de veículos com aços convencionais (referência), contendo ligas de alumínio e AHSS.**



Fonte: Adaptado de Green Car Cogress, 2018.



**Figura 4 – Zonas de deformação e segurança de um veículo durante impacto.**

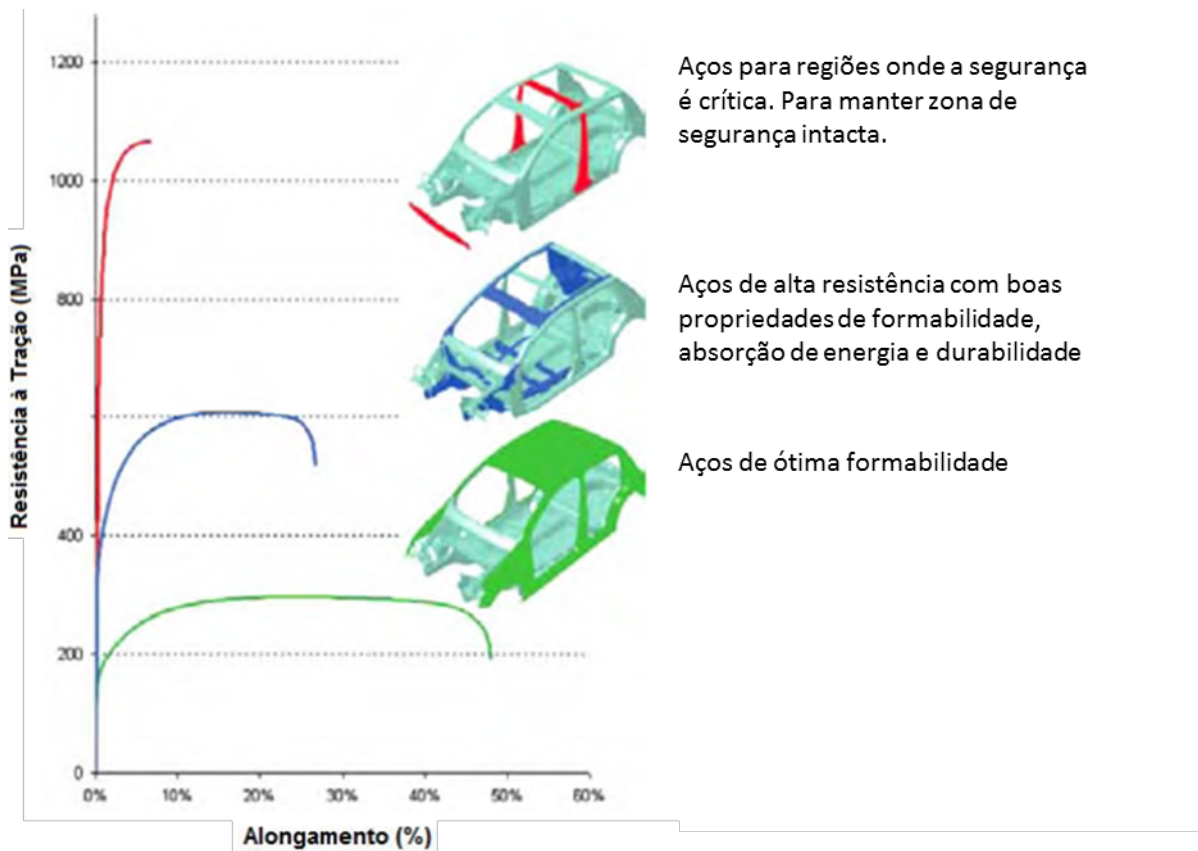


Fonte: Adaptado de Keeler et al., 2017.

A performance dos materiais para as diferentes zonas deve, portanto, ser específica para seus respectivos requerimentos. Deste modo, a zona de deformação deve conter materiais com alta ductilidade e com ampla zona plástica, ou seja, com grande área abaixo da curva tensão-deformação para garantirem máxima absorção energética por deformação. São exemplos de aplicação: aços DP e TRIP. Em contrapartida, na região de segurança, os aços não devem apresentar deformação durante um impacto, portanto os materiais adequados para esta aplicação devem ter altíssima tensão de escoamento, por exemplo, aços martensíticos ou dupla fase com alto limite de escoamento ( $>980\text{MPa}$ ). (KEELER et al., 2017).

A Figura 5 mostra uma estrutura típica de carroceria com os diferentes tipos de materiais segundo suas curvas de tensão deformação. Assim, visualiza-se claramente como deve ser o comportamento dos materiais para determinadas regiões do automóvel. Em vermelho são aplicados aços para garantia estrutural do habitáculo, assim, a barra mais à frente do veículo tende a distribuir carga de modo homogêneo segundo seção transversal do veículo e a outra indicada no habitáculo evita torções na estrutura da carroceria. Os componentes em azul têm um bom compromisso de tensão de escoamento e deformação plástica, garantindo que a zona de segurança permaneça com mínimas deformações. Em verde as zonas estão as regiões onde deformações devem ocorrer para absorver a energia de impacto. (KEELER et al., 2017).

**Figura 5 – Curvas tensão x deformação de materiais segundo aplicações típicas em carrocerias automotivas considerando suas respectivas performances mecânicas.**



Fonte: Adaptado de Keeler et al., 2017.

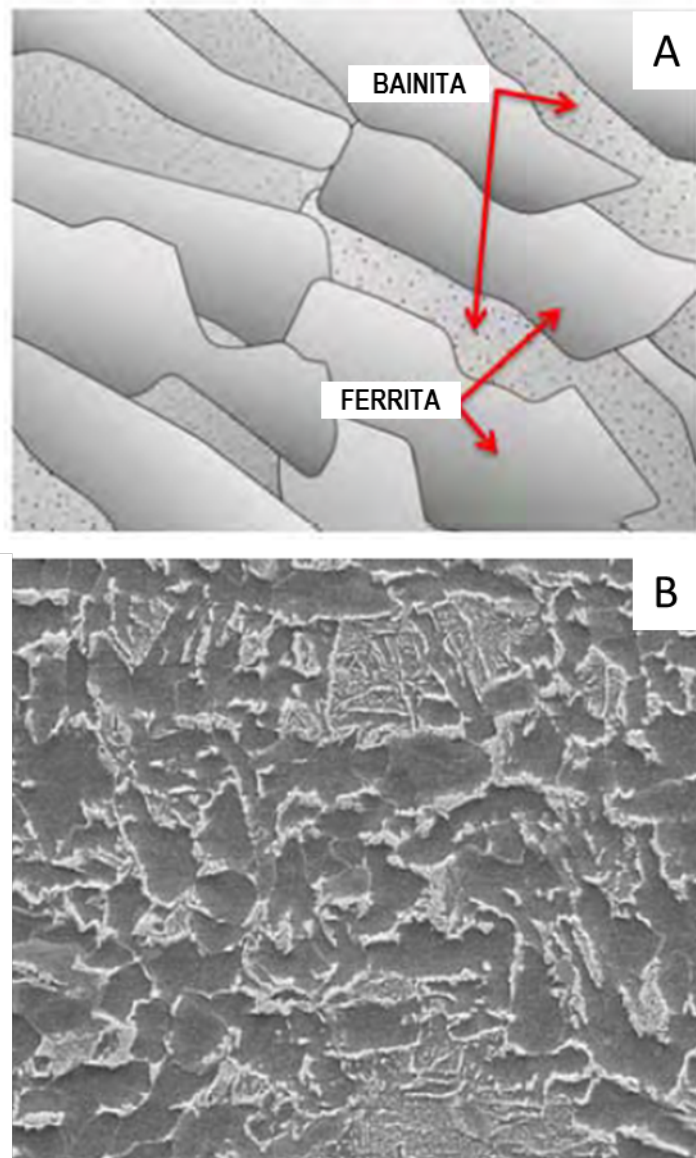
O uso de aço AHSS é, portanto, uma solução para a redução de massa geral do veículo melhorando sua eficiência energética e propriedades mecânicas otimizadas garantindo melhor performance em provas de impacto e menor nível de emissões de gases do efeito estufa. Contudo a estratégia de utilização desta categoria de material na indústria automotiva foi adotada devido à sua viabilidade técnica e econômica. Os aços disponíveis no mercado mundial permitem a produção de veículos com redução significativa de massa, atingindo objetivos de segurança e funcionais e preservando a sua viabilidade financeira. (KEELER et al., 2017).

Em 2015 o Jeep Renegade obteve no Programa de avaliação de Carros Novos para America Latina (Latin NCAP) 5 estrelas, nota máxima, em segurança para ocupantes adultos e ocupantes infantis nas provas de impacto frontal e lateral (LATIN NCAP, 2015). A ótima performance deste veículo em segurança está relacionada a seu design pensado para segurança. Deste modo uma composição otimizada de tipos variados de aço foi selecionada para sua carroceria tendo em vista conferir ao veículo esta performance exemplar (FIAT CHRYSLER AUTOMOBILES, 2018).

### 2.1.2 Aços Ferríticos-Bainíticos

Os aços Ferríticos-Bainíticos são uma variante dos aços bifásicos (DP) que contêm uma microestrutura composta por ferrita e bainita, no lugar de ferrita e martensita como ocorre nos aços bifásicos, conforme Figura 6, onde (A) Mostra uma representação esquemática dos feixes de Bainita na matriz ferrítica, e (B) Microestrutura obtida por MEV. A ferrita confere ao aço a propriedade de alongamento enquanto que a bainita, fase dura, contribui com resistência mecânica (SHOME, TUMULURU, 2015).

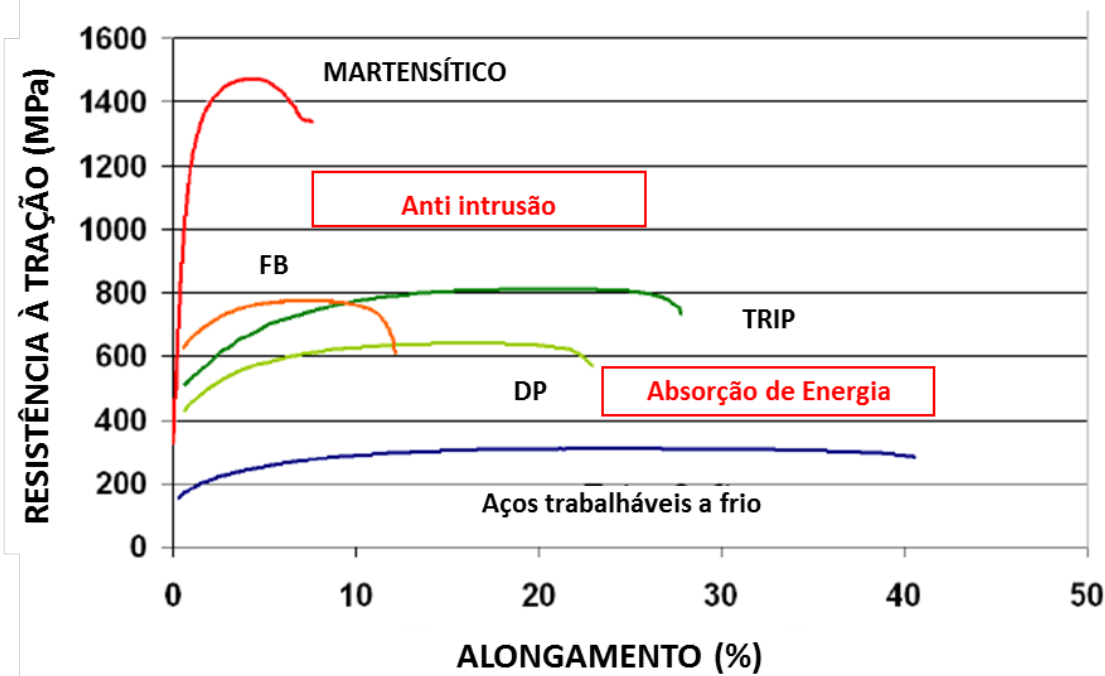
**Figura 6 – Esquema da microestrutura do aço Ferrita-Bainita (A), e Microestrutura obtida por MEV (B).**



Fonte: Adaptado de Keeler et al., 2017.

A Figura 7 ilustra esquematicamente o um aço típico ferrítico-bainítico com outros tipos de AHSS, onde são identificadas duas regiões segundo propriedades mecânicas: anti intrusão e absorção de energia. A combinação das propriedades de resistência mecânica e alongamento permite o desempenho otimizado quando usados em regiões de carroceria que necessitam de manutenção da zona de segurança intacta, anti-intrusão, mas ao mesmo tempo de elevada capacidade de absorção de energia (SHOME, TUMULURU, 2015; KEELER et al., 2017; ARCELOR, 2012).

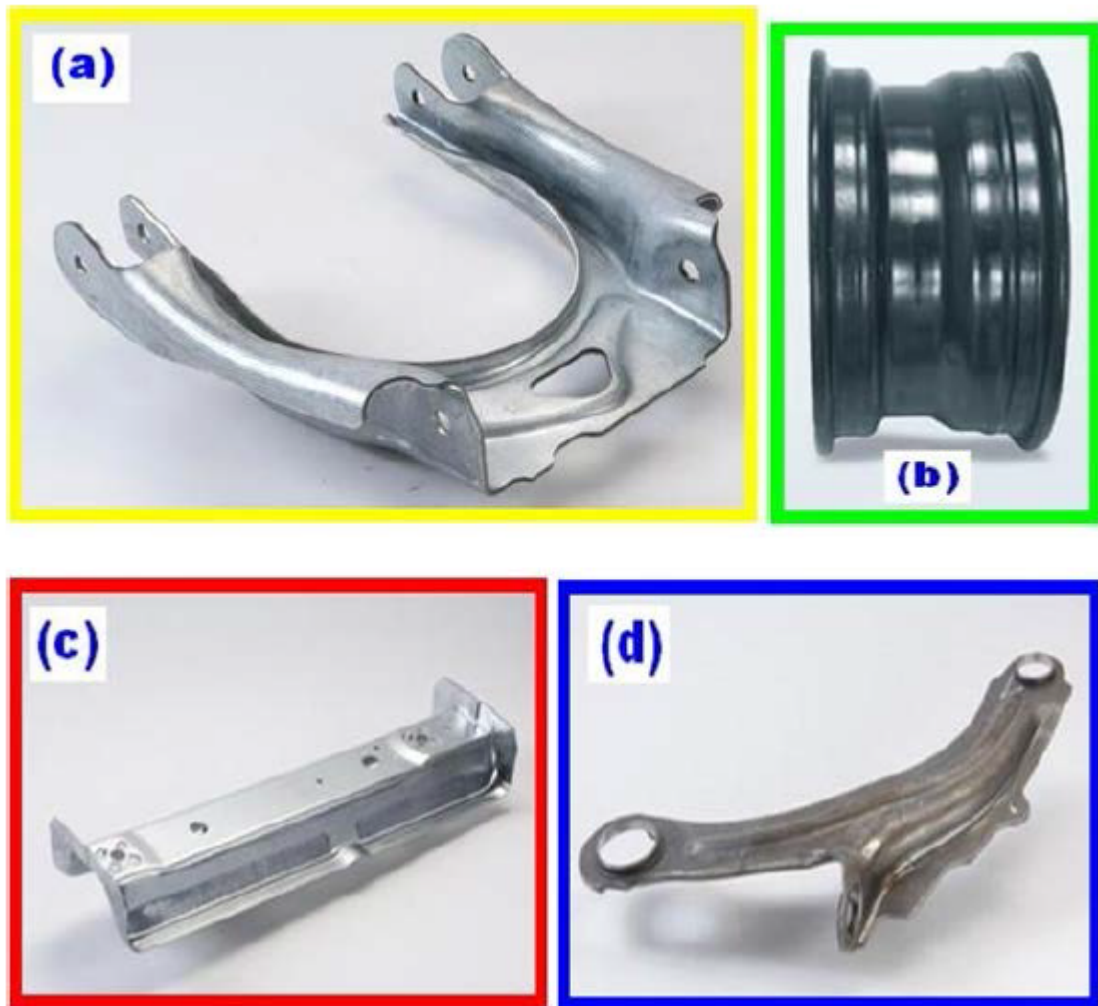
**Figura 7 – Faixa de propriedades dos aços Ferríticos-Bainíticos comparativa com outros aços aplicados na indústria automotiva.**



Fonte: Adaptado de Arcelor, 2012.

A combinação das fases ferrita e bainita na microestrutura destes aços, além das características de alongamento e resistência já descritas, torna estes aços particularmente resistentes a cargas dinâmicas. Esta característica é notoriamente importante em eventos de impacto devido à sua alta capacidade de absorção energética e ao mesmo tempo ótima resistência à fadiga. (ZHAO E JIANG, 2017). A Figura 8 traz algumas aplicações típicas de aços FB na indústria automotiva. Componentes de suspensão veicular e rodas recebem cargas dinâmicas constantemente e requerem as características supracitadas. A Figura 8 (a) mostra um braço oscilante de suspensão, a Figura (b) exibe uma roda, a Figura (c) estrutura de suporte para bancos e a Figura (d) mostra outro braço oscilante de suspensão. (CHATTERJEE, 2017). A performance superior destes aços em fadiga também está relacionada à baixa incidência de formação de trincas nas zonas de bainita durante operações de corte, como puncionamento (SHOME, TUMULURU, 2015)

**Figura 8 – Aços FB aplicados na indústria automotiva**



Fonte: Arcelor, 2012.

A literatura (ZHAO E JIANG, 2017; Keeler et al, 2017 e SHOME, TUMULURU, 2015) traz uma nomenclatura alternativa para estes aços, que podem ser referenciados, também, como aços de alta expansão de furo.

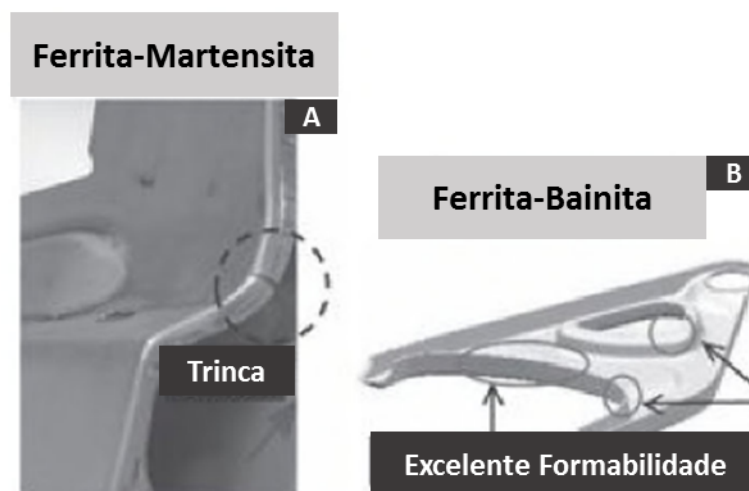
Expansão de furo é uma grandeza largamente utilizada na indústria automotiva para estabelecer um parâmetro comparativo de conformação dos materiais, ou de estampabilidade. Ela é medida como o percentual de deformação resultante de um cone padrão forçado numa chapa furada. O trabalho é executado até o aparecimento de trincas na superfície do furo da chapa a ser testada. A equação abaixo mostra a expansão de furo:

$$\lambda = \frac{D_f - D_0}{D_0} \times 100$$

Onde  $\lambda$  é a expansão de furo, em percentual,  $D_f$  é o diâmetro final do furo após o ensaio e  $D_0$  é o diâmetro inicial (SYMMACH, 2016).

Esta propriedade está intimamente ligada com a capacidade de formação de perfis e formas complexas com baixo risco de formação de trincas durante operações de trabalho a frio. Este ponto permite o desenvolvimento de componentes que atendem aos requisitos de redução de peso veicular sem comprometer a segurança dos ocupantes. A diferença fundamental entre os aços FB e as demais categorias para aplicações similares, como DP e aços de alta tensão e baixa liga, é sua alta capacidade de expansão de furo (SHRAMA, 2015). A Figura 9 ilustra esta particularidade dos aços FB na formação de perfis complexos sem apresentar trincas. Na esquerda observa-se um aço bifásico, composto por ferrita e martensita, com uma trinca no perfil trabalhado. Em contrapartida, na direita está um componente de aço FB com perfis que requerem ótima estampabilidade, exemplificando a ótima performance deste aço nesta característica (ZHAO E JIANG, 2017).

**Figura 9 – Expansão de furo comparativa entre DP e FB**



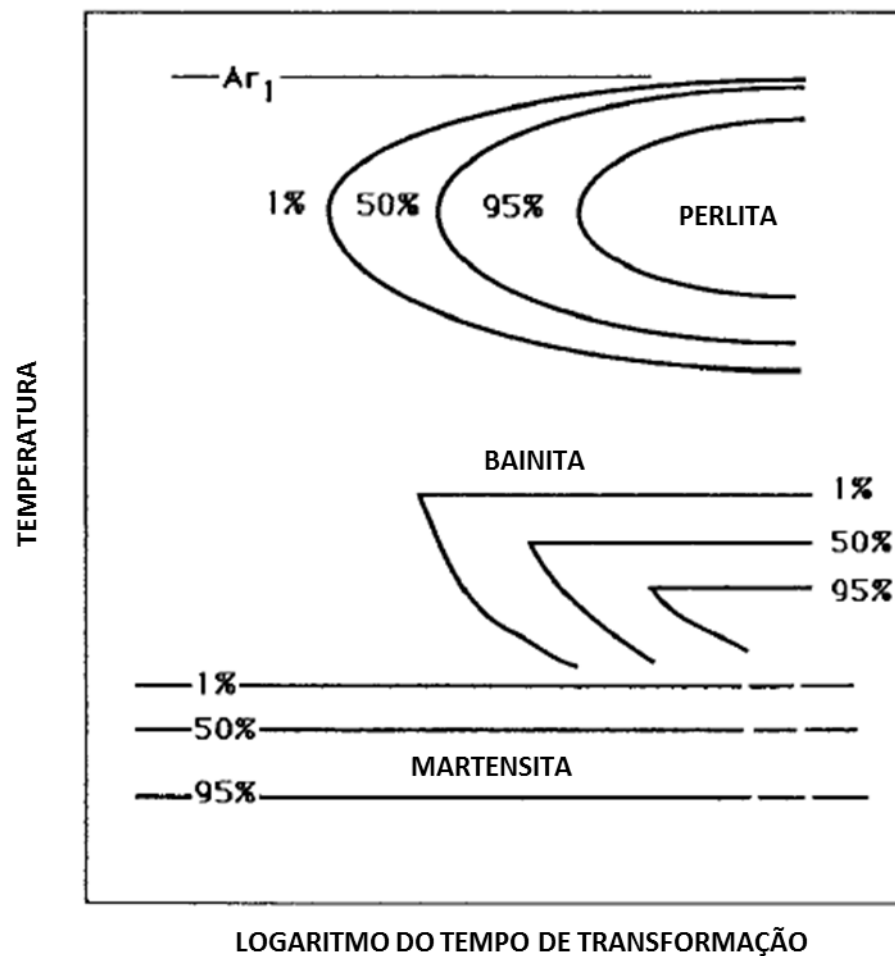
Fonte: Adaptado de Zhao e Jiang, 2017.

Elementos de liga podem ser adicionados aos aços FB para auxiliar na resistência mecânica. Hu (2014), verificou que a adição de Nb auxilia no refinamento de grãos austeníticos e, após transformação de fase, gera uma bainita refinada com melhores propriedades mecânicas. Ele também verificou que a adição de Mo favorece a precipitação da fase bainita, constituinte duro da liga FB, aumentando assim sua resistência. Em contrapartida, a adição dos dois elementos concomitantemente não tem efeito aditivo nas propriedades mecânicas. Hu verificou que o Nb atrapalha o efeito facilitador de transformação da bainita do Mo. Cai et al. (2011), também verificou que a adição de Si como elemento de liga em aços bifásicos FB, até 0.5%, auxilia no refinamento de grãos da fase ferrítica e melhora o limite de escoamento.

### 2.1.3 Transformações Bainíticas

A bainita é um tipo de microestrutura que é formada em transformações isotérmicas em temperaturas abaixo da formação da perlita e acima da formação da martensita. A Figura 10 mostra um diagrama esquemático tempo-temperatura-transformação (TTT) com indicação clara das fases perlita, martensita e bainita. (Bhadeshia, 2001)

**Figura 10 – Diagrama esquemático TTT de aço hipotético com fases Perlita, Martensita e Bainita definidas**



Fonte: Adaptado de Bhadeshia, 2001.

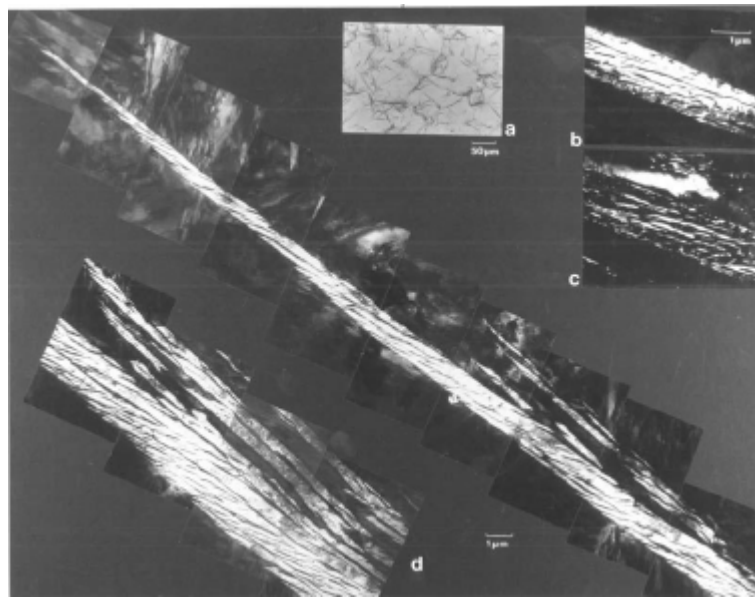
A bainita, por ter uma microestrutura que se forma em temperaturas entre a formação de perlita e martensita, tem características similares a estas duas. Ela assemelha-se da perlita pois ocorre pelo mecanismo de difusão e, conseqüentemente, constituída de ferrita e carbonetos, contudo não se apresenta em forma de lamelas. Adicionalmente, a bainita é semelhante à martensita por formar sua ferrita por mecanismo de cisalhamento e que em muitos casos são aciculares (CRUZ, 2011).

A formação da bainita ocorre em dois estágios, primeiro a transformação de ferrita a partir da austenita, e o segundo a precipitação de carbonetos. Ela é constituída por agregados



de placas de ferrita separados por precipitados de carbonetos, normalmente cementita, mas ocorrem outros como martensita e austenita retida. Os agregados de placa são chamados de feixes e são compostos por finas placas ou subunidades que têm forma de agulhas. A Figura 11 mostram a morfologia de um feixe de bainita por microscopia eletrônica de transmissão de uma liga em liga Fe-0,43%C-2%Si-3%Mn parcialmente transformada, onde em (a) é apresentada uma micrografia óptica, em (b) e (c) são apresentadas imagens de campo claro e imagem de campo escuro da austenita retida e, em (d) uma montagem ilustrando estrutura do feixe. (BHADESHIA, 2001).

**Figura 11 – Micrografia eletrônica de transmissão de um feixe de bainita superior da liga Fe-0,43%C-2%Si-3%Mn, parcialmente transformada.**

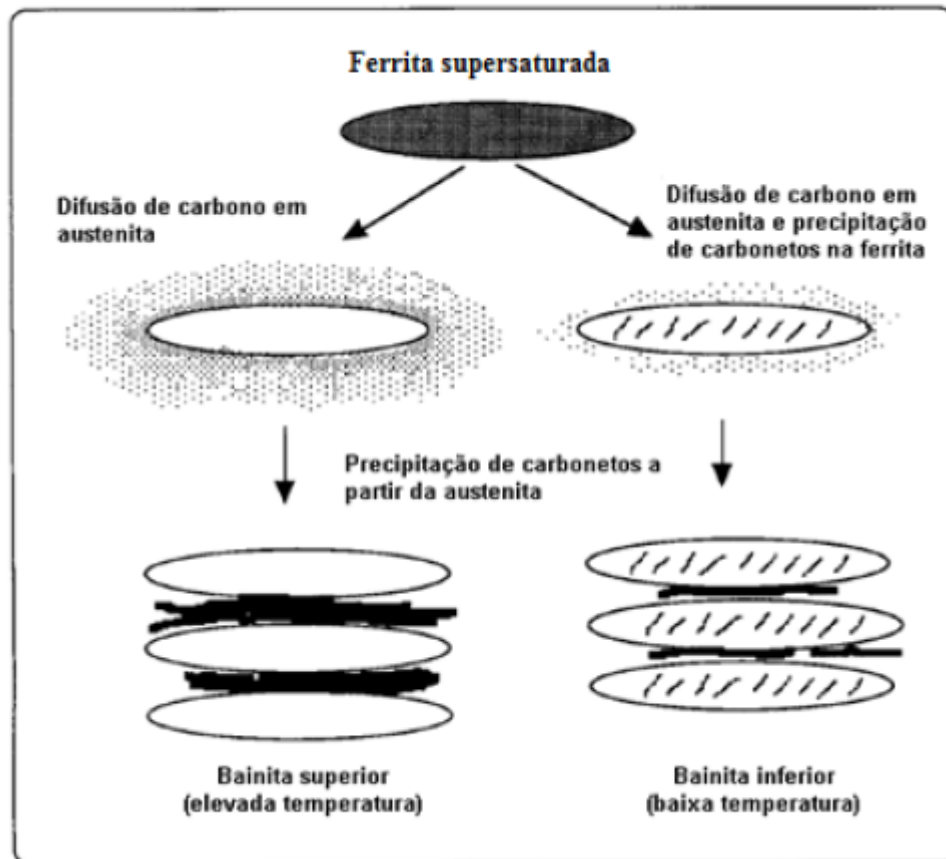


Fonte: Bhadeshia, 2001.

Várias formas de bainita podem ser encontradas, contudo duas são particularmente importantes e mais utilizadas: a bainita inferior e superior. A diferença principal entre elas está no mecanismo de precipitação de carbonetos, esta que está relacionada com a temperatura de transformação. Enquanto que uma tem formação de precipitados na região de contorno de grãos de ferrita, a outra contém precipitados no interior dos grãos ferrita (BHADESHIA, 2001). A Figura 12 mostra uma representação esquemática das duas tipologias mais conhecidas de bainita e suas respectivas morfologias de microestrutura. Na esquerda encontra-se a bainita superior, e na direita a bainita inferior (Cruz, 2011).



**Figura 12 – Representação dos principais tipos de Bainita diferenciados pela forma de precipitação de carbonetos**



Fonte: Cruz, 2011.

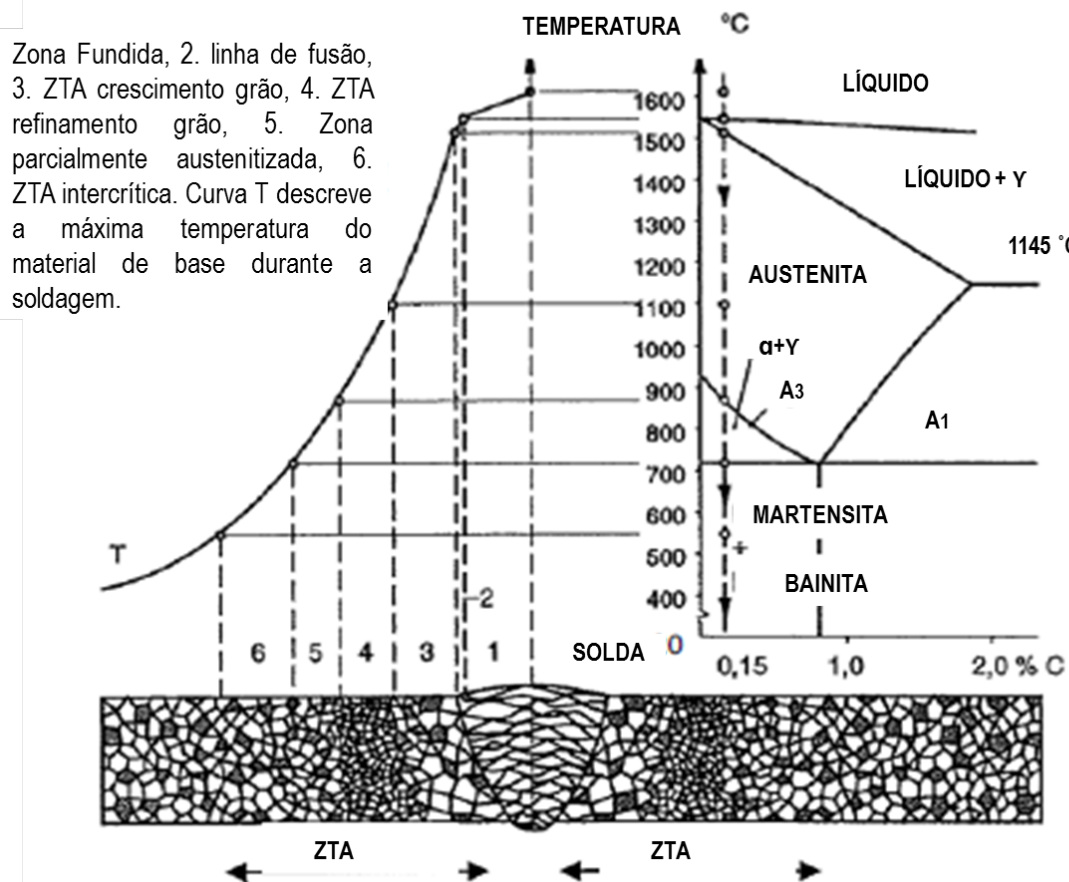
A bainita superior ocorre em temperaturas normalmente abaixo da mínima temperatura de formação da perlita, entre 400 e 500°C e, devido à alta temperatura, a precipitação de carbonetos ocorre nas regiões intergranulares de ferrita com forma grosseira e alongada. Nesta configuração, a difusão de carbono e outros elementos de liga é facilitada e, conseqüentemente, as precipitações limitam-se aos contornos de grão.

Já a bainita inferior, ocorre com temperaturas inferiores a 400°C e superiores à máxima de formação da martensita. Esta transformação ocorre, usualmente próximo a 300°C. Com a temperatura reduzida, o mecanismo de difusão é dificultado, favorecendo, assim, a formação de precipitados intragranulares, além dos intergranulares observados na bainita superior. Contudo, os feixes de precipitados deste tipo de bainita são altamente refinados (KAUSS, 2005).

## 2.2 MICROESTRUTURA DE JUNTAS SOLDADAS

O aporte térmico envolvido na operação de soldagem é suficiente para gerar a fusão do material de base e material de adição na região de zona fundida (ZF). O calor associado a esta operação é então propagado pela chapa do metal de base (MB) e, devido às altas temperaturas atingidas, existe a suscetibilidade de ocorrência de várias transformações de fase. A Figura 13 ilustra os níveis de temperatura atingidos, assim como uma representação gráfica da microestrutura da junta soldada com suas várias formas devido à ação térmica. Na Figura também estão representadas as zonas relativas a uma junta soldada, elas são enumeradas de 1 a 6, onde 1 é a zona fundida, 2 é a linha que divide material fundido de material que não sofreu fusão e 3, 4, 5 e 6 são subdivisões da zona termicamente afetada (PIRINEN, 2013). Uma vez que a temperatura de austenitização é atingida em vários pontos, transformações de fase podem ocorrer, e estas podem conferir ao material propriedades mecânicas diferentes do metal de base (CALLISTER, RENTHWISCH, 2014).

**Figura 13 – Representação da temperatura atingida numa junta soldada ao longo da sessão transversal ao cordão de solda.**



Fonte: Adaptado de Pirinen, 2013.

O aporte térmico e o tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C alteram a microestrutura do metal de base soldado e estes dois fatores precisam ser controlados durante operação de soldagem (PIRINEN, 2013). Além disso, a microestrutura e dureza da zona fundida são afetados pela composição química do metal de base, da taxa de resfriamento e da composição química do metal de adição (KAPUTSKA et al., 2008).

A literatura mostra perfis de dureza similares para diferentes tipos de aços soldados em processos distintos. Aços de baixo teor de carbono soldados pela metodologia eletrodo revestido (BOUMERZOU, DERFOUF, BAUDIN, 2010) apresentam padrões de alterações de dureza similares a aços avançados de alta resistência, bifásicos, soldados a laser. Em geral a zona de fusão apresenta o maior valor de dureza da junta, seguido da zona termicamente afetada que apresenta dureza intermediária. Em alguns casos, uma redução na dureza nas regiões adjacentes pode ser verificada, principalmente em aços bifásicos, uma vez que a martensita desta região pode sofrer tratamento devido ao ciclo térmico de soldagem (ESQUEVIEL, 2012).

Nayak et al. (2012) realizou um trabalho semelhante de soldagem a ponto por resistência de aços TRIP que também apresentaram perfil de microdureza da junta soldada similar.

As alterações de dureza ocorrem devido às transformações de fase da ZF e ZTA, contudo prever a microestrutura a ser encontrada após a realização da solda é bastante complexo uma vez que envolve fatores como: microestrutura do metal de base, composição química do metal de base e arame e energia de soldagem, conforme explicado acima.

## 2.3 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)

A adoção de estudo prévio dos procedimentos experimentais é uma ferramenta usada em ambientes acadêmicos e industriais, no intuito de aumentar o conhecimento e o domínio sobre os processos de manufatura, racionalização no número de experimentos a serem realizados, e outras vantagens. A aplicação desta ferramenta em atividades de pesquisa, propicia maior eficiência com menores custos.

### 2.3.1 Importância do DOE

Procedimentos experimentais são usados em ambientes industriais no intuito de aumentar o conhecimento e o domínio sobre os processos de manufatura. A correlação entre estudo científico de processos industriais e a qualidade dos produtos produzidos vem cada vez mais sendo reconhecida (MASON, GUNST, HESS, 2003). Ao realizar experimentos e analisar seus resultados, as empresas aumentam seu *know-how* sobre o comportamento, a variabilidade das operações de produção e os impactos nos produtos acabados. Em ambientes de desenvolvimento, experimentos são aplicados para entender os dados de processo, determinar os efeitos das variáveis de processo na performance do produto e para confirmar as estimativas teóricas com dados experimentais (ANTONY, 2003).

O mercado globalizado conta com diversas empresas fabricando produtos similares para um grupo limitado de consumidores, o que tem aumentado a competitividade (MASON, GUNST, HESS, 2003). Com a alta competitividade do comércio atual, torna-se notória a necessidade de escolha de um método experimental adequado onde o máximo de precisão e respostas sobre o comportamento de um experimento é obtido com o mínimo de corridas, minimizando, assim, os custos a ele associados (GOUPY E CREIGHTON, 2007).

O DOE tem um papel fundamental no adequado dimensionamento do experimento a ser realizado que represente o processo de modo fidedigno e que correlacione satisfatoriamente as variáveis ou fatores-chaves, também chamados de valores de entrada, com as características de performance ou qualidade a serem estudados, também chamados valores de saídas do processo. Deste modo, o planejamento de experimentos atua na elaboração da melhor estratégia para que se obtenha conclusões válidas, com elevado grau de confiabilidade e custos otimizados, embasados por técnicas estatísticas (ANTONY, 2003). Define-se DOE como uma técnica estatística que faz uso da variação simultânea de vários fatores com intuito de obter um espaço de reação usando um número relativamente pequeno de amostras, torna-se possível a identificação de toda a superfície de resposta (MURRAY et al., 2015).

A Figura 14 mostra um fluxo para análise de sistemas e a principal área de atuação do planejamento de experimentos, . Parte-se de um processo desconhecido onde se tem interesse de domínio (GOUPY E CREIGHTON, 2003). A primeira etapa a ser seguida é a de *brainstorming*, quando vários questionamentos são realizados sobre os fatores que influenciam o processo, como o experimento deve ser realizado e, o que se deseja obter de resultado. É imprescindível que uma equipe com *background* técnico diverso seja montada, podendo incluir colaboradores do processo produtivo e especialistas como descrito por Box (1957). Segue-se com uma revisão bibliográfica, quando será identificado quais respostas às perguntas da etapa anterior já foram respondidas por outros trabalhos ou estudos e que variáveis são realmente importantes para a análise. A etapa subsequente é a primeira de atuação do planejamento de experimentos, denominada escolha do método experimental. Nela teremos a aplicação do planejamento adequado de modo a minimizar a quantidade de corridas de um experimento e a obter o máximo de precisão do efeito das variáveis sobre as performances estudadas. Deste modo temos uma otimização dos custos e resultados. A próxima etapa de atuação do planejamento de experimentos vem após a atividade experimentação em si quando se analisa os resultados obtidos. Com um experimento escolhido adequadamente, as respostas serão suficientes para uma análise satisfatória e concisa. Atualmente softwares auxiliam na interpretação dos resultados, inclusive com auxílio de representação gráfica (GOUPY E CREIGHTON, 2003). O caminho indicado em vermelho com balões pretos, na Figura 14, deve ser percorrido caso conhecimento suficiente do processo não tenha sido obtido até o momento.

**Figura 14 – Desenho esquemático do processo de análise experimental de processos.**



Fonte: Goupy e Creighton, 2007.

Uma vez realizada as análises do experimento, caso as respostas tenham sido adequadamente analisadas, pode-se inferir ter domínio sobre o processo e encerrar a atividade experimental. Contudo, em processos complexos, corriqueiramente são realizadas corridas

iniciais com amplo número de variáveis no intuito de realizar um primeiro refinamento ou filtro das que são relevantes (este processo normalmente é realizado com a aplicação de experimentos fatoriais que será descrito em seguida) e posteriormente é realizado um processo de obtenção progressiva de conhecimento, esta é a terceira etapa de atuação do DOE (GOUPY E CREIGHTON, 2003).

O uso do planejamento experimental com auxílio de estatística garante, portanto, a ausência de fontes tendenciosas, certifica que o experimento fornece informações adequadas e precisas sobre o fenômeno estudado e evita que custos desnecessários sejam despendidos (MASON, GUNST, HESS, 2003).

### **2.3.2 OVAT vs DOE**

Um estudo conduzido por Tanco et al. (2008), concluiu que 80% das empresas na região europeia denominada País Basco usa o método de uma variável por vez (OVAT) para seus estudos experimentais. Isso significa, portanto, que apenas 20% das indústrias desta região usam planejamento estatístico para condução de seus ensaios e consequentemente otimizam os custos associados aos estudos. O experimento de Tanco et al. (2008), também obteve como resultado que o conhecimento e aplicação da técnica de planejamento de experimentos tem dependência bastante relevante em relação ao tamanho da companhia. Apenas 22% das pequenas empresas usam o planejamento de experimentos. Nas grandes empresas, este percentual aumenta para 76% (Apud ANTONY, 2008).

Antony (2008) descreve que o sucesso da utilização da OVAT depende de sorte, experiência e intuição. Montgomery (2012) também deixou claro sua opinião comparativa quando escreveu que um experimento realizado em uma variável por vez sempre será menos eficiente que a utilização de métodos estatísticos para seu planejamento.

Além das razões citadas no subitem 2.3.1 relativas às vantagens da utilização de um planejamento estatístico adequado para um experimento (otimização de custo, tempo e resultados), a metodologia OVAT pode não representar sistemas em sua integralidade e consequentemente mostrar otimizações falsas. Isso se dá, em especial, quando um processo ou sistema a ser estudado contém variáveis que se correlacionam ou contém interação. Interação entre duas variáveis ocorrem quando o efeito de um fator ou variável na resposta depende do nível ou valores de outro fator ou variável. Reconhece-se como efeito de um fator a variação na média dos resultados devido a alterações dos níveis deste fator (ANTONY, 2008).

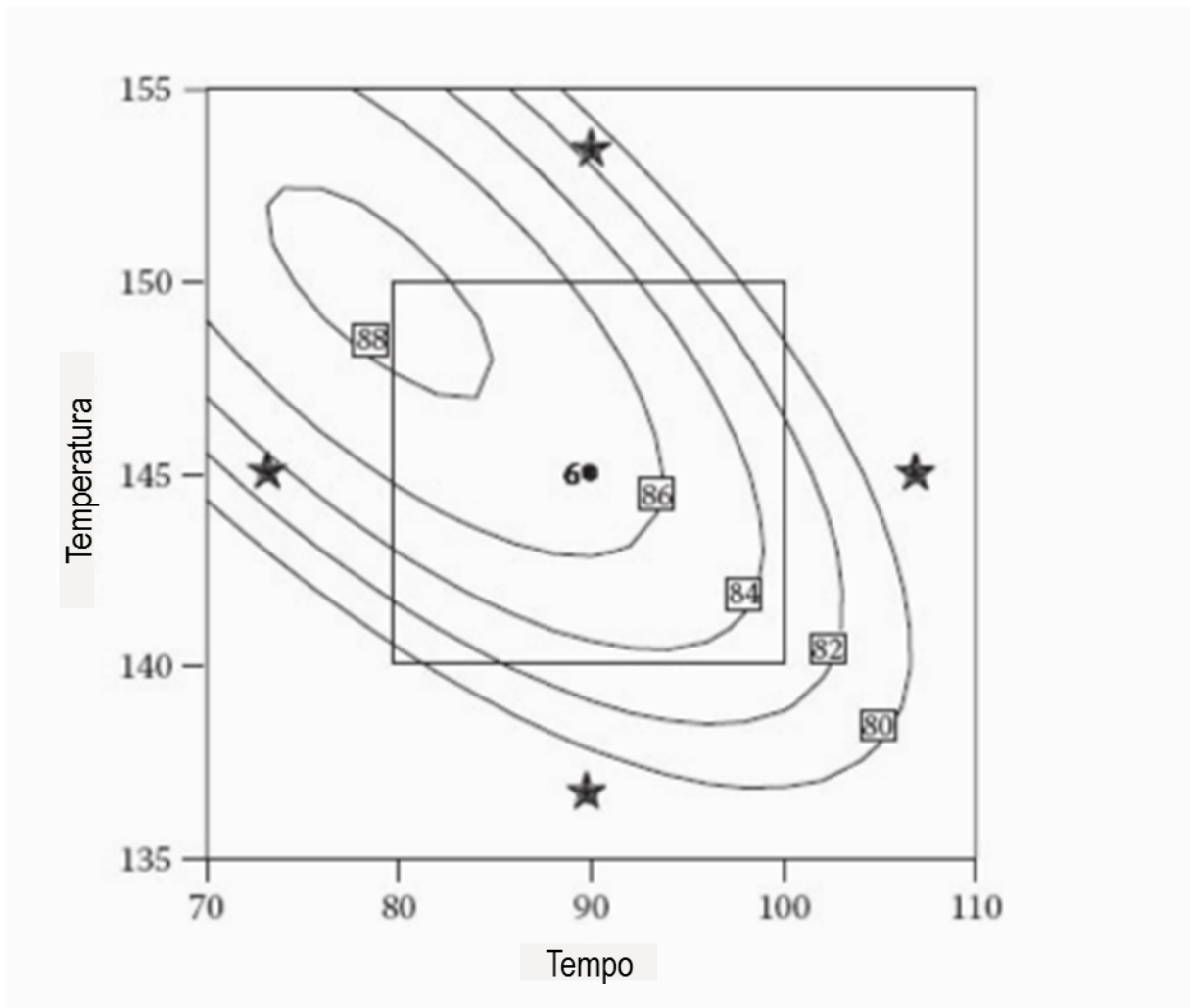
Uma situação hipotética é apresentada na Figura 15. Os efeitos do tempo e temperatura são estudados e a resposta está identificada em forma de superfície de resposta (valores apresentados dentro do gráfico). Percebe-se que a otimização a partir da metodologia OVAT pode se tornar ineficaz com a obtenção de um falso ponto ótimo. Como ilustrado na Figura 15, ao tomar-se como referência o tempo = 90 e fazer a otimização do fator temperatura, pode-se obter temperatura = 145 como ótimo. A consequente otimização do tempo (com a temperatura já otimizada em 145), traz como resposta o ponto indicado na Figura 15, como 6, e a resposta ótima seria 86.

Em contrapartida, ao analisar a Figura 15, percebe-se que existe uma região de resposta onde os valores de retorno atingem 88, verdadeiro ótimo do sistema. Este valor pode ser evidenciado com a obtenção do espaço de resposta, este elaborado com a técnica DOE e ponto central. O DOE é a ferramenta eficaz para otimização de processos (M. Anderson e P. Whitcomb, 2016).

Assim, a Figura 15 representa a limitação do método uma variável por vez (OVAT) para otimização levando a um falso ótimo do sistema (ponto 6). As curvas apresentadas no gráfico são uma representação em duas dimensões da superfície de resposta, onde os níveis de cada linha estão indica



Figura 15 – Limitação da abordagem OVAT em sistema simples, com dois fatores.



Fonte: Adaptado de M. Anderson e P. Whitcomb, 2016.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental, utilizado para o desenvolvimento das atividades dessa pesquisa, é apresentado no fluxograma contido na Figura 16. Primeiramente, está estabelecida a necessidade da FCA em analisar o aço FB, nacional e importado, com especificação de limite de escoamento 440 MPa e limite de resistência de ruptura de 580 MPa. A necessidade industrial é relacionada a redução de custos de produção de veículos da FCA, conferindo uma melhoria de margem anual significativa para a companhia. Para fins de nomenclatura, este trabalho irá adotar a mesma metodologia de classificação de aços usada pela WorldAutoSteel (2017), amplamente utilizada na indústria. Por exemplo: a ArcelorMittal e a FCA utilizam nomenclatura bastante similares. A referência estabelece que o aço deve ser classificado como “XX aaa/bbb”, onde “XX” trata do tipo de aço, conforme Tabela 1 abaixo, “aaa” referência o limite mínimo de escoamento em MPa e “bbb” o limite mínimo de ruptura ou resistência, também em MPa.

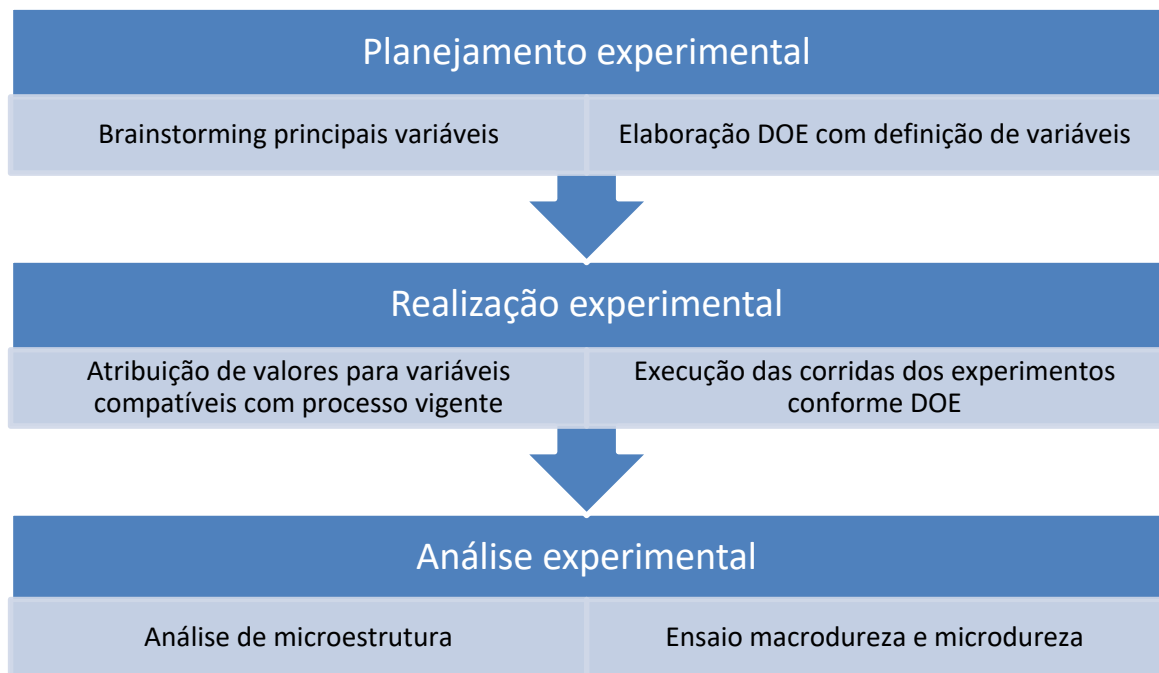
**Tabela 1 Nomenclatura dos aços conforme sua microestrutura**

| <b>XX</b> | <b>Tipo de Aço</b>                      |
|-----------|-----------------------------------------|
| HSLA      | Alta resistência, baixa liga            |
| DP        | Bifásico                                |
| FB        | Ferrita Bainita                         |
| TRIP      | Plasticidade induzida por transformação |

Fonte: O Autor, 2018.

O aço analisado no trabalho será chamado, portanto, de FB 440/560. Ele é fornecido em bobinas e, após conformação mecânica a frio, ou estampagem, e soldagem MIG, formam a travessa de suspensão dianteira que serve de ancoragem das partes de movimentação dinâmica para veículos do grupo FCA.

**Figura 16 – Fluxograma utilizado no desenvolvimento da pesquisa**



Fonte: O Autor, 2018.

### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Dada a necessidade de análise deste aço proveniente das duas fontes, foi realizada a etapa de planejamento experimental, quando um time multifuncional da Fiat Chrysler Automobiles, Magnetti Marelli e Universidade Federal de Pernambuco foi montado para realização de *brainstorming* de quais variáveis desempenham papel importante nas propriedades de regiões soldadas destes materiais conforme recomendação de Box (1957). Após discussão, o time percebeu que variáveis como ângulo de solda, composição do gás de proteção e a composição química do arame podem ser considerados constantes no experimento, pois não representam interesse industrial de investigação. Tendo em vista o número limitado de amostras, oito, e de recursos para realização dos experimentos na linha de produção da Magnetti Marelli, onde as travessas são atualmente soldadas, foram selecionadas as variáveis corrente e velocidade de soldagem, pois são as que mais diferem nos demasiados cordões de solda que compõem o produto final acabado.

Foi decidida a realização de um experimento fatorial completo para permitir análise de influência de interações entre variáveis (ANTONY, 2008), pois a possibilidade da determinação do efeito que as variáveis velocidade e corrente têm sobre a origem do material é de extrema relevância para este trabalho, uma vez que isto pode representar limitações em termos de propriedades de solda na utilização do aço nacional. O planejamento de experimento está,

portanto, descrito na Tabela 2 abaixo. Devido a uma limitação tecnológica dos robôs no processo produtivo da Magnetti Marelli, o experimento precisou ser realizado seguindo uma blocagem pela da velocidade de solda.

**Tabela 2 - Planejamento experimental**

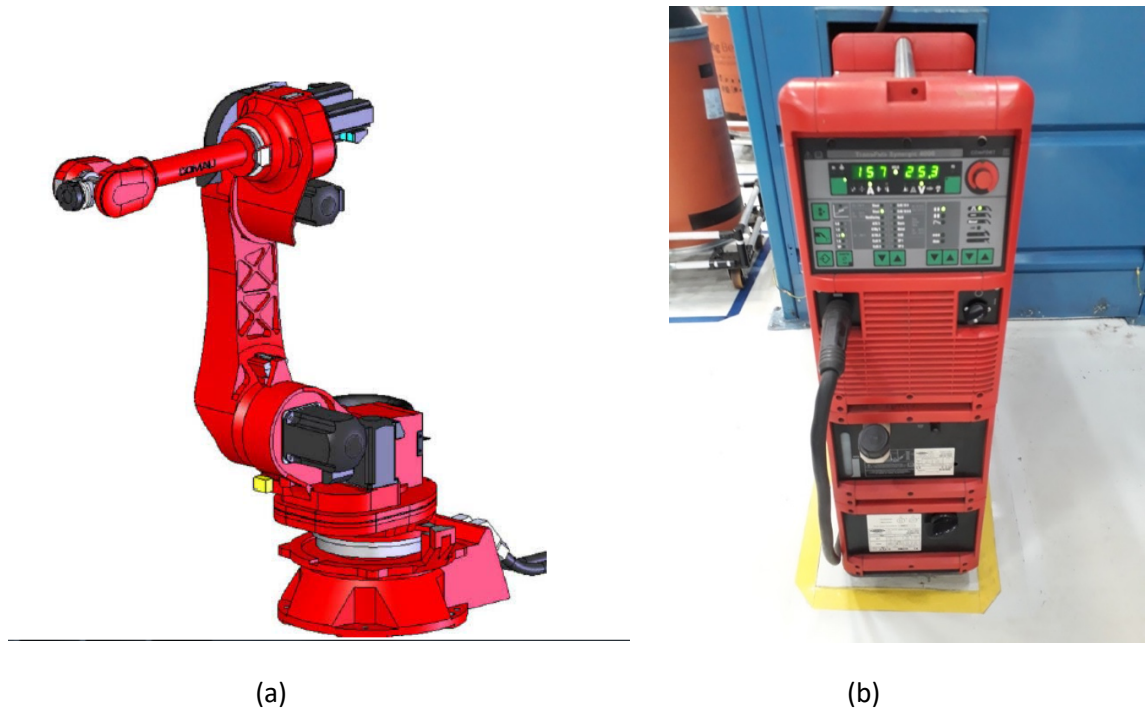
| <b>Corrida</b> | <b>Fonte do Aço</b> | <b>Corrente</b> | <b>Velocidade</b> |
|----------------|---------------------|-----------------|-------------------|
| 1              | -                   | -               | +                 |
| 2              | +                   | +               | +                 |
| 3              | +                   | -               | +                 |
| 4              | -                   | +               | +                 |
| 5              | +                   | -               | -                 |
| 6              | -                   | -               | -                 |
| 7              | -                   | +               | -                 |
| 8              | +                   | +               | -                 |

Fonte: O Autor, 2018.

### 3.2 REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL

A Figura 17 apresenta o conjunto de equipamentos usados. As soldagens foram realizadas no processo produtivo da Magnetti Marelli, com uma das máquinas automáticas de soldagem MIG que são usadas na produção de peças para veículos. O robô utilizado para realizar as soldas foi o Comau Smart NS 12-1.85 Arc, apresentado na Figura 17 (a). Ele é alimentado por uma fonte Fornius Transplus Synergic 4000, mostrado na Figura 17 (b). A soldagem foi feita com corrente contínua e polaridade inversa, ou seja, o eletrodo é positivo.

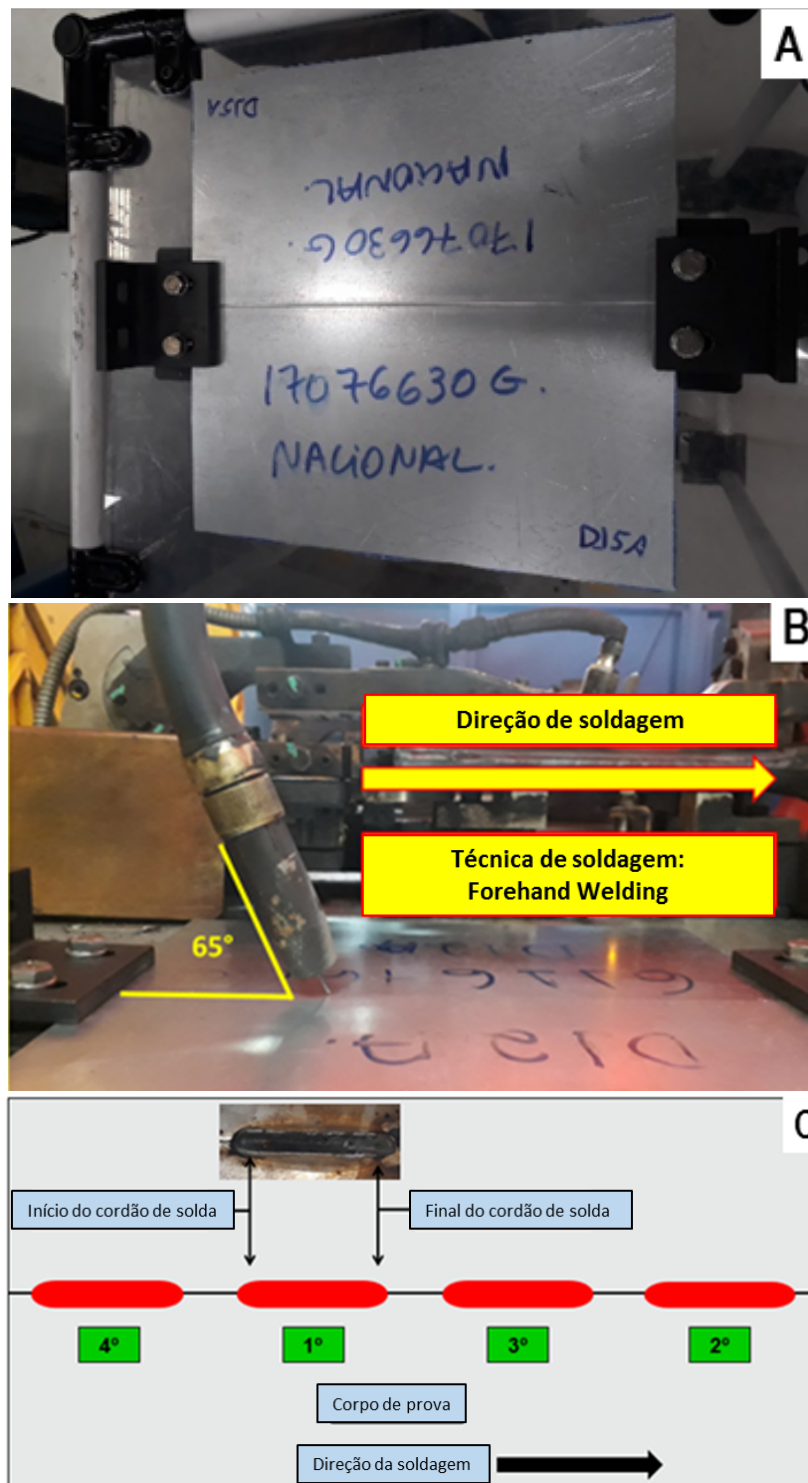
**Figura 17 – Conjunto usado na soldagem das amostras investigadas.**



Fonte: Magnetti Marelli, 2018.

Foram cortadas 16 chapas para realização de oito experimentos de solda com dimensões 120x250mm e 2mm de espessura, oito com material nacional e oito com material importado. Estas chapas tiveram as bordas fresadas por um torno CNC, deixando-as suficientemente planas para serem soldadas. A Figura 18 (a) mostra a disposição das chapas no momento da soldagem que foram fixadas nas duas extremidades por dispositivos parafusados. A Figura 18 (b) é esquemática da operação de soldagem efetuada, com ângulo de 65° em relação ao plano da chapa, portanto o ângulo de solda é 25°, com técnica operativa de solda empurrando a poça de fusão e mostra o sentido da solda, sempre repetido. A Figura 18 (c) é esquemática da disposição dos cordões de solda equidistantes entre si ao longo das chapas soldadas, com a sequência de cordões sempre respeitado pelo programa da soldagem automatizada. Em cada corrida foram realizadas quadruplicada de cordões de solda com 30mm de comprimento, espaçados de 30mm, contudo apenas um cordão de solda por chapa soldada foi analisado, o restante será utilizado em trabalhos futuros. A temperatura inicial das chapas entrepasses foi controlada por pirômetro ótico e se manteve constante em 29°C.

Figura 18 – Dispositivo de fixação dos Corpos de Prova e esquema de soldagem adotado.



Fonte: O Autor, 2018.

Na Tabela 3 está apresentada a composição química do material de base que foi fornecida pela ArcelorMittal, tanto da proveniência nacional quanto da importada, e a

composição do arame de solda usado no experimento foi fornecido pela Magnetti Marelli. Este arame também é fornecido pela Belgo Bekaert, é do tipo BME-C4 e respeita a norma AWS A5.18 ER70S-6 e tem 1,2mm de diâmetro. Também foi calculado o carbono equivalente da liga metálica e, apesar dos valores serem próximos, o material nacional apresenta um  $C_{eq}$  maior que o importado.

O gás de soldagem tem mistura de 82% de Ar e 18% de  $CO_2$  e vazão de 19 l/min. A distância entre o eletrodo de solda e a junta soldada, *stick-out*, também foi controlada e definida em 15mm. Portanto, fatores que podem influenciar a qualidade da solda, mas são mantidos constantes na produção de componentes no processo produtivo da Magnetti Marelli foram considerados como constantes pois não fornecem interesse ao trabalho em questão. Como descrito acima, eles são: vazão do gás, composição do gás, *stick-out*, diâmetro do arame, composição química do arame, temperatura interpasse, e ângulo de soldagem.

**Tabela 3 – Composição química e carbono equivalente do consumível e do material de base (% em peso)**

|                        | Fe   | C      | Al     | Cr     | Cu     | Mn    | Mo     | Ni     | P      | S      | Si    | V      | $C_{eq}$ |
|------------------------|------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|----------|
| FB440/580<br>Nacional  | Bal. | 0,0719 | 0,043  | 0,023  | 0,021  | 1,57  | 0,002  | 0,006  | 0,016  | 0,0035 | 0,019 | 0,001  | 0,341    |
| FB440/580<br>Importado | Bal. | 0,081  | 0,025  |        | 0,099  | 1,453 |        |        | 0,012  | 0,0026 | 0,008 |        | 0,33     |
| Consumível             | Bal. | 0,074  | 0,0024 | 0,0155 | 0,0164 | 1,492 | 0,0021 | 0,0101 | 0,0138 | 0,009  | 0,85  | 0,0042 | 0,329    |

Fonte: Arcelor Mittal, 2018.

Tendo estabelecido as condições de contorno para a realização do experimento, foram definidos os valores de máximo e mínimo para corrente e velocidade de solda na tentativa de reproduzir as operações de soldagem aplicadas na produção dos componentes usados nos veículos. Testes foram realizados para verificação preliminar do aspecto da solda nas variações acordadas. A Tabela 4 mostra o planejamento experimental com os valores de máximo e mínimo para as variáveis e, como dito no subitem anterior, o fator velocidade foi variado com blocagem devido a limitações tecnológicas.

Tabela 4 - Planejamento experimental com valores dos níveis

| Corrida | Fonte do Aço | Corrente (A) | Velocidade (mm/min) | Blocagem |
|---------|--------------|--------------|---------------------|----------|
| 1       | Nacional     | 126          | 680                 | 1        |
| 2       | Importado    | 132          | 680                 | 1        |
| 3       | Importado    | 126          | 680                 | 1        |
| 4       | Nacional     | 132          | 680                 | 1        |
| 5       | Importado    | 126          | 655                 | 2        |
| 6       | Nacional     | 126          | 655                 | 2        |
| 7       | Nacional     | 132          | 655                 | 2        |
| 8       | Importado    | 132          | 655                 | 2        |

Fonte: O Autor, 2018.

### 3.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Conforme apresentado na Figura 19, foram realizadas análises de dureza, microdureza, micrografia e macrografia das juntas soldadas. Foram retirados corpos de prova das chapas soldadas em cortes transversais aos cordões de solda, utilizando uma cortadeira metalográfica Struers Discoton-100. As amostras foram embutidas a quente em baquelite de forma a mostrar a sessão interna da junta soldada. Os corpos de provas embutidos foram, portanto, preparados de modo convencional para análise metalográfica em operações que envolveram lixamento, polimento e ataque químico. O lixamento foi realizado com lixa de granulometria 220, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2000, consecutivamente, e o polimento foi feito com pasta de diamante 3 e 1µm. As amostras foram atacadas com Nital a 2% por 10 segundos para revelar a macro e microestrutura. A macroestrutura foi obtida com auxílio de um estereomicroscópio de marca Zeiss modelo V16. A análise de microestrutura foi realizada com microscópio metalográfico de platina invertida da marca Zeiss modelo Observer.

Foi realizado um ensaio de revelação colorida em uma amostra para observação da formação de diferentes fases no material. A técnica adotada para este trabalho foi a LePera modificada que, conforme descrito por Colpaert (2008), consiste em duas partes. Parte I: 1g de metabissulfito de sódio diluído em 100mL de água destilada. Parte II: 4g de ácido pícrico em 100mL de etanol. Após limpeza com ultrassom, realiza-se ataque prévio com Nital 2%, 30s para

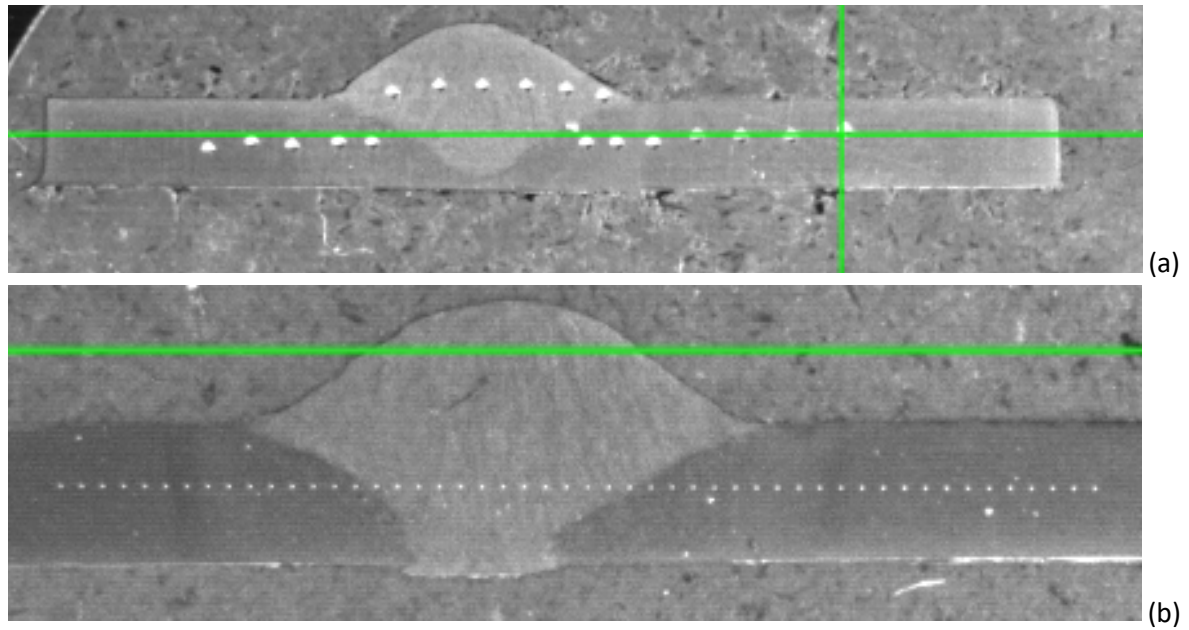


definição dos contornos de grão. Misturar 60% da parte I com 40% da parte II e atacar por 35s. Os reagentes precisam ser conservados a 0°C. A bainita aparecerá escurecida, a ferrita em cor de pele e a martensita será branca.

Os ensaios de microdureza e macrodureza Vickers foram realizados utilizando o equipamento EMCO TEST DuraScan 70 G5 com penetrador de diamante com geometria piramidal de base quadrada com ângulos entre faces de 136°. Para o ensaio de macrodureza Vickers HV10 foi usada uma carga de 10Kgf e um tempo de permanência de 10s. As endentações foram feitas ao longo da seção transversal ao cordão de solda em uma varredura abrangendo o metal base, a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona de fusão (ZF), três regiões conforme indicado pela Figura 19 (a). Ao todo foram realizadas dezoito endentações em cada uma das juntas soldadas. Para o ensaio de microdureza Vickers HV0,2, foram feitas 50 medidas abrangendo toda a região da solda. A carga aplicada é de 0,2Kgf e o tempo de permanência de 10 segundos, mostrado na Figura 19 (b).

A Figura 20 mostra a separação da junta soldada nas seguintes regiões: MB para metal de base, ZTA MB para zona termicamente afetada próxima ao metal de base, ZTA ZF para zona termicamente afetada próxima à zona fundida e ZF para zona fundida. O critério para definição de ZTAMB e ZTAZF foi a coloração e o aspecto visual. A região ZTAMB é mais clara que as duas regiões adjacentes sendo facilmente detectável. Esta divisão foi usada para as análises e discussões de microestrutura e microdureza e seus resultados respaldam a necessidade de separação das regiões.

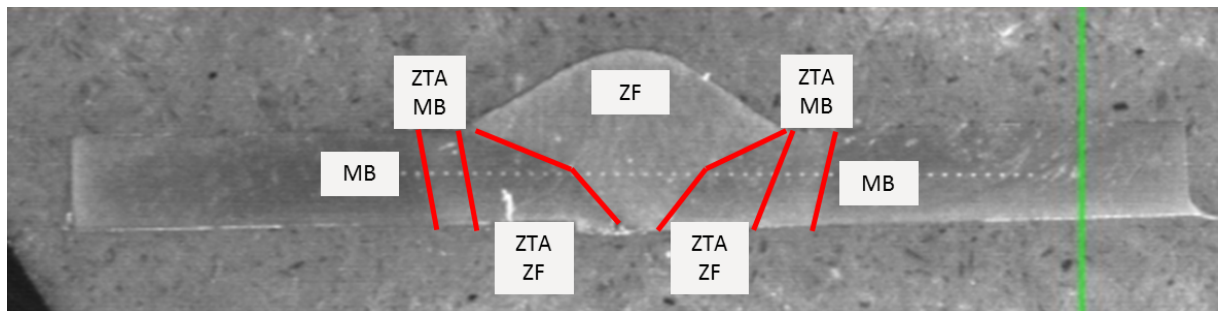
**Figura 19** – Macroestrutura com indicação das linhas de medição de dureza e microdureza.



(a) Endentações do ensaio de dureza (b) Endentações do ensaio de microdureza

Fonte: O Autor, 2018.

**Figura 20** – Regiões da junta soldada de acordo com efeitos térmicos. MB, ZTAMB, ZTAZF e ZF



Fonte: O Autor, 2018.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos realizados e estão relacionados com a análise das micro e macroestruturas, e com os resultados obtidos dos ensaios de macro e microdureza. Estes resultados são relacionados com os materiais usados nos experimentos, e com os procedimentos de soldagem.

### 4.1 MACROESTRUTURA DAS JUNTAS SOLDADAS

As macroestruturas das amostras analisadas estão na Figura 21, onde são apresentadas (I) Macroestrutura da corrida 1, (II) Macroestrutura da corrida 2, (III) Macroestrutura da corrida 3, (IV) Macroestrutura da corrida 4, (V) Macroestrutura da corrida 5, (VI) Macroestrutura da corrida 6, (VII) Macroestrutura da corrida 7 e (VIII) Macroestrutura da corrida 8.

As análises destas macrografias mostram que o procedimento de soldagem foi efetivo mesmo com todas as variações de corrente e velocidade tanto para o material nacional quanto importado. Em outras palavras, a união das partes foi efetuada de modo satisfatório para todas as operações experimentais. Fica evidente a deposição excessiva de material de adição, provavelmente oriundo dos parâmetros de solda escolhidos, principalmente diâmetro do arame e velocidade de solda, no experimento onde existe oportunidade de otimização. Contudo, o aspecto geral da forma do cordão de solda está coerente com resultados encontrados na literatura, por exemplo no trabalho publicado por Nemecek, Muzik e Misek (2012).

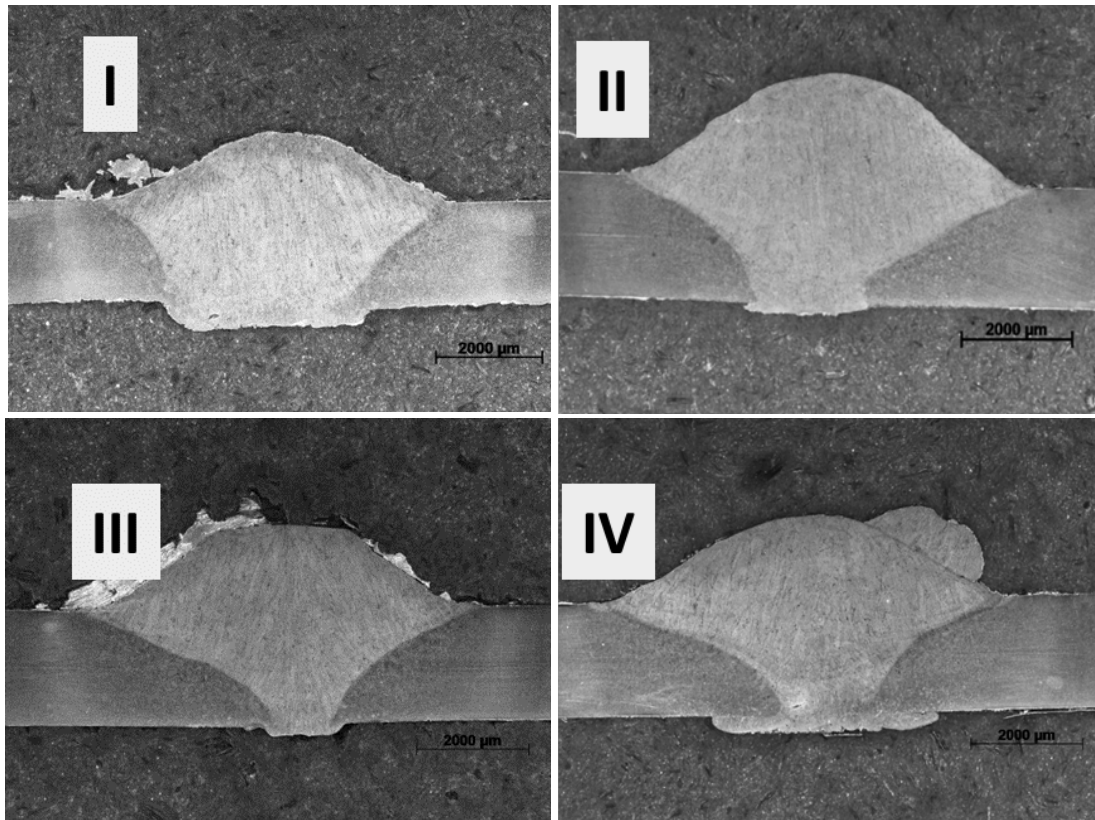
Nas amostras 1, 5 e 6, Figura 21 (a), (d) e (f), existe um desalinhamento entre as chapas soldadas. Este desalinhamento está, normalmente, relacionado com pequenas deformações das chapas durante o procedimento de solda oriundas do aporte térmico do processo de soldagem. A geometria dos corpos de prova – chapas finas e planas – favorece o empenamento, mas o produto utilizado na indústria contém reforços e dobras tornando este efeito pouco provável. Apesar do leve desalinhamento, as chapas tiveram penetração ao longo de toda a junta soldada e foram consideradas satisfatórias para os demais ensaios.

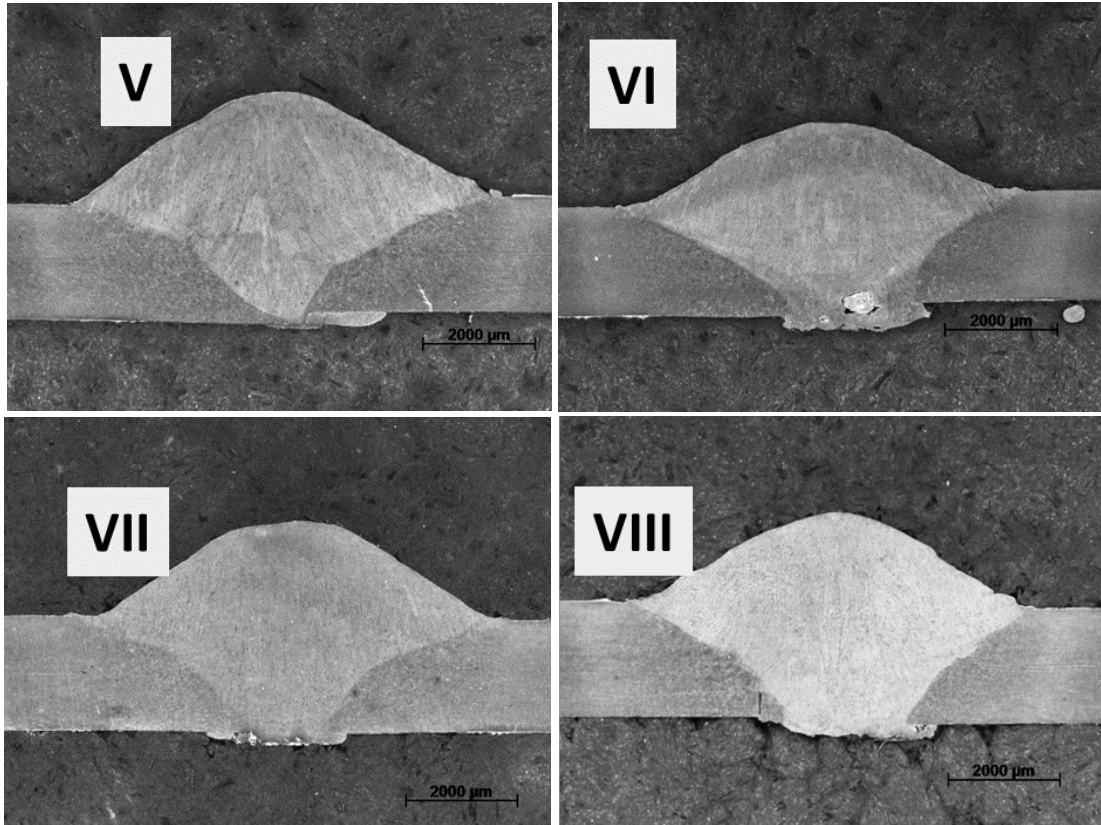
Em geral as amostras não apresentam macroestrutura com diferenças significativas que estejam alinhadas com os parâmetros de soldagem. O efeito dos parâmetros será discutido com mais detalhes nos ensaios de microdureza.

Foi identificado que a amostra oito apresentou uma falha operacional no posicionamento do equipamento de solda. Deste modo, uma região da junta ficou sem fusão apesar do aspecto geral da solda sem considerar este defeito ser bom. Se este corpo de prova fosse usado para testes de tração, fadiga ou qualquer outro que envolvesse performance mecânica da junta

soldada, esta amostra teria que ser rejeitada. Tendo em vista que os ensaios subsequentes levam em conta a relação de aporte térmico e seu efeito na microestrutura do material, a pequena descontinuidade apresentada não foi considerada como inadmissível para a continuidade do experimento.

**Figura 21 – Macroestrutura das juntas soldadas nas condições dos ensaios.**





(I) Macroestrutura da corrida 1 (II) Macroestrutura da corrida 2 (III) Macroestrutura da corrida 3, (IV) Macroestrutura da corrida 4, (V) Macroestrutura da corrida 5, (VI) Macroestrutura da corrida 6, (VII) Macroestrutura da corrida 7 e (VIII) Macroestrutura da corrida 8

Fonte: O Autor, 2018.

## 4.2 MICROESTRUTURA DAS JUNTAS SOLDADAS

Primeiramente foi verificada a diferença de microestrutura entre os materiais nacional e importado, que está apresentado na Figura 22. A Figura 22 (a) mostra o material nacional com aumento de 500x e 21 (b) retrata o material importado também com aumento de 500x. Percebe-se uma diferença dos precipitados presentes nos materiais, onde o nacional tem uma bainita muito mais refinada, provavelmente consequência de uma transformação com temperatura mais baixa configurando bainita inferior. Já o material importado apresenta maior difusão carbono, tornando sua estrutura grosseira, oriundo de transformação com temperaturas mais altas.

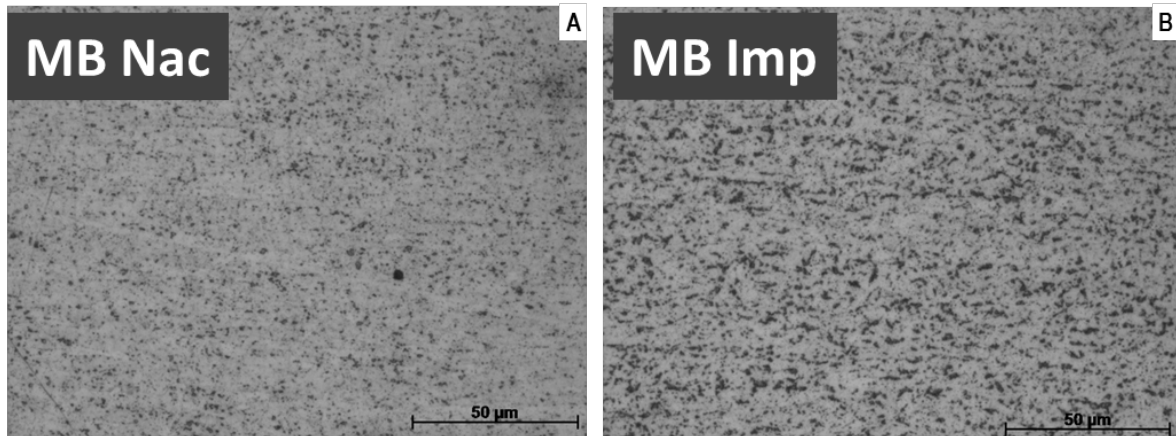
A Figura 23 mostra a primeira região afetada pela solda, denominada neste estudo como zona termicamente afetada próxima à região de solda, ZTAMB, para o material nacional, amostra 4, e material importado, amostra 2, referidos como (a) e (b), respectivamente. As duas amostras tiveram as mesmas condições de soldagem e foram apenas diferenciadas pela origem do material. Percebe-se que o importado (b) apresenta diferenças na orientação dos precipitados e veios ainda maiores de bainita. Em contrapartida, a amostra nacional apresenta microestrutura

parecida com a do metal de base, diferenciada pelos precipitados que provavelmente sofreram difusão e se formaram em veios mais grosseiros. Esta diferença fundamental entre os dois materiais se dá, principalmente, pela microestrutura original das peças, como mostrado na Figura 23.

A zona termicamente afetada mais próxima da zona fundida, referida como ZTAZF, apresenta elevação de temperatura e taxa de resfriamento maior que as zonas acima. Deste modo, a formação de estruturas alongadas e dendríticas é esperada. A Figura 24 mostra a microestrutura de duas amostras desta região, com ampliação de 500x. (a) apresenta a amostra 2, soldada com material importado, 680 mm/min e corrente de 132 A, já (b) tem a amostra 3, soldada com material importado, 680 mm/min e 126 A de corrente. A amostra 2, por ter sofrido maior aporte térmico, tem microestrutura de forma acicular, alongada e refinada, típico de resfriamento acelerado, diferente da amostra 3, que por ter recebido menor aporte térmico não apresentou tal grau de refinamento. Este resultado foi compatível com o estudo realizado por Varol et al, (2013) que variaram a corrente de soldagem e perceberam a formação de microestrutura acicular e refinada em elevados valores de corrente, num aço TRIP e técnica de soldagem MIG-Brazing.

A zona fundida dos materiais apresentou aspecto similar de microestrutura independentemente da origem dos materiais. Devido à alta amplitude térmica e resfriamento desta região, a formação da martensita foi favorecida. Em contrapartida, a diferenciação de bainita e martensita não pode ser realizada de modo efetivo com uso de técnicas comuns de ataque químico e revelação em preto e branco sendo fortemente indicado o uso de metalografia colorida. (Zakerinia, H., Kermanpur A., Najafizadeh, A., 2009). A Figura 25 mostra a revelação colorida usando a técnica LePera modificada da amostra 1 diferenciada por (a) metal de base e (b) zona fundida no intuito de ilustrar a formação abundante de martensita nesta segunda região, justificada pelo aporte térmico e taxa de resfriamento.

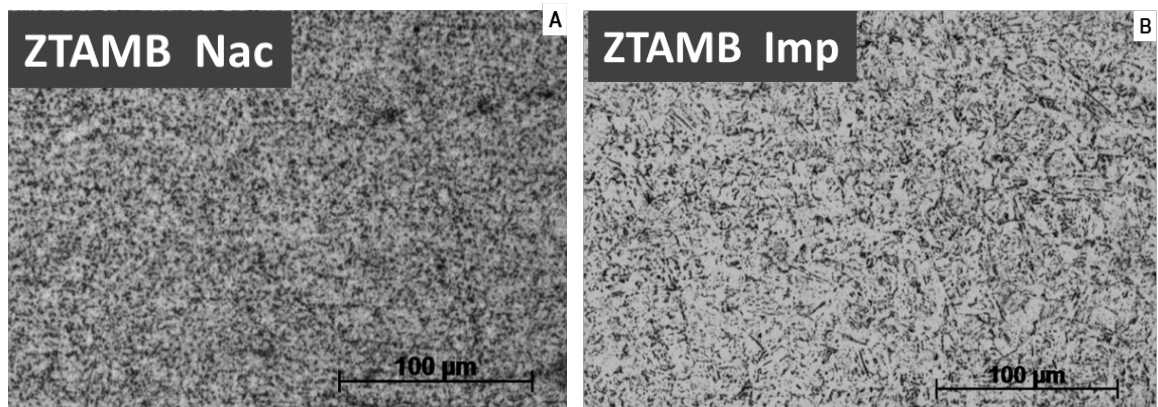
**Figura 22 – Microestrutura do metal de base.**



**(a) material nacional, 500x e (b) material importado, 500x**

Fonte: O Autor, 2018.

**Figura 23 – Microestrutura da zona termicamente afetada próxima ao metal de base.**

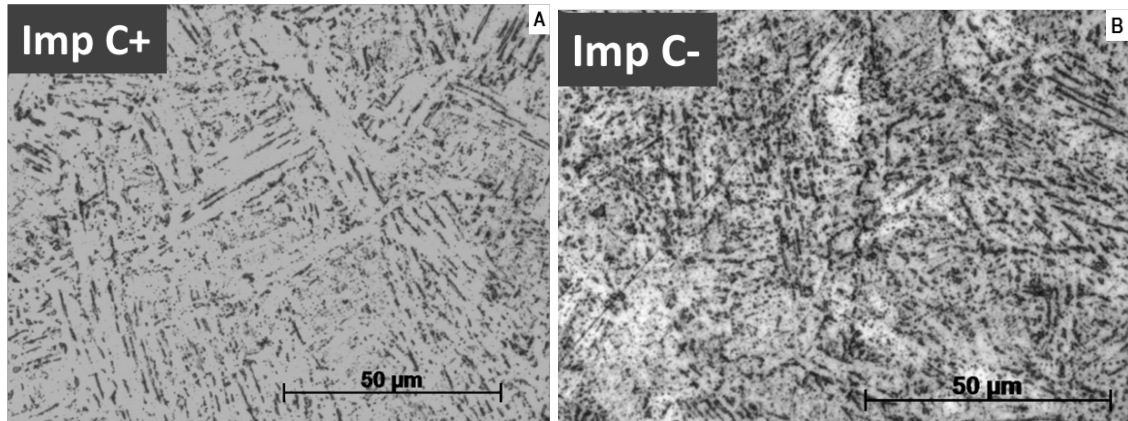


**a) material nacional, 200x e (b) material importado, 200x**

Fonte: O Autor, 2018.



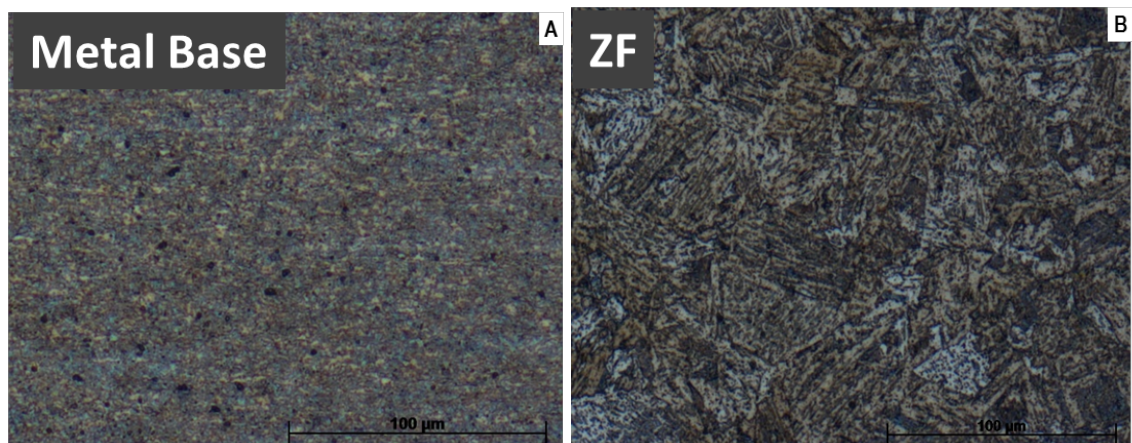
**Figura 24 – Microestrutura da zona termicamente afetada próxima à zona fundida.**



**a) amostra 2, 500x e (b) amostra 3, 500x**

Fonte: O Autor, 2018.

**Figura 25 – Microestrutura com identificação da fase martensita na zona fundida.**



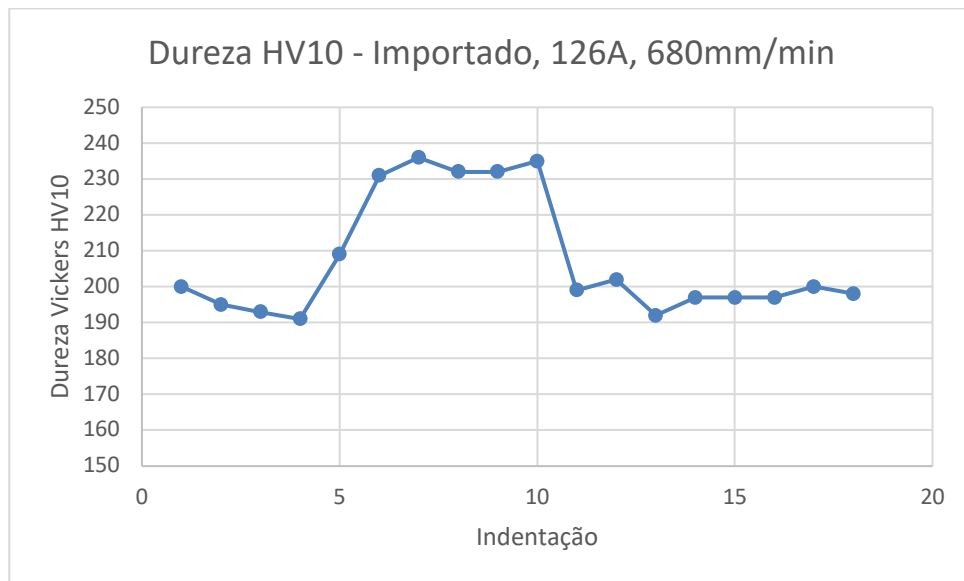
**(a) metal de base, 200x e (b) zona fundida, 200x**

Fonte: O Autor, 2018.

### 4.3 MACRODUREZA DAS JUNTAS SOLDADAS

Os resultados de macrodureza das amostras apresentam aspecto similar entre si com um aumento de dureza na ZF e nas regiões adjacentes. Conforme explicado no procedimento experimental foram realizadas 18 endentações nas três regiões da junta soldada: metal de base, zona termicamente afetada e zona fundida. A Figura 26 mostra a macrodureza da amostra 3 como uma referência pois todas apresentam aspecto similar. Estudos mais detalhados serão mostrados na subseção a seguir.



**Figura 26 – Perfil de macrodureza da amostra 3**

Fonte: O Autor, 2018.

De um modo geral, pode-se inferir que existe uma tendência ao aumento da dureza do material na ZF e regiões adjacentes. Este resultado é condizente com o esperado, uma vez que estas zonas são as de maior aporte térmico, mas também com maior taxa de resfriamento, o que auxilia na formação de fases duras com elevada resistência, em especial a martensita e bainita inferior. Adicionalmente, o metal de adição tem propriedades de dureza e resistência mecânica superiores ao metal de base.

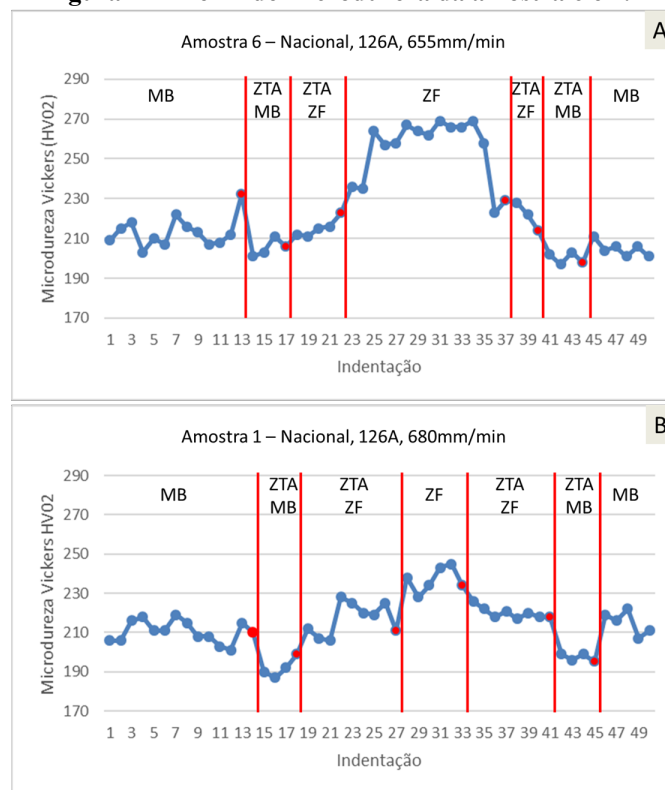
A influência de cada uma das variáveis deste trabalho na dureza das regiões da junta soldada precisa ser analisada com auxílio de estatística de experimentos. Contudo, a macrodureza apresenta tamanho de endentação muito elevado para permitir número suficiente de repetições, portanto este estudo será realizado na microdureza.

#### 4.4 MICRODUREZA DAS JUNTAS SOLDADAS

A microdureza foi subdividida em 4 regiões da solda: ZF, ZTAMB, ZTAZF e MB, assim como realizado na análise de microestrutura. Devido às diferenças de condições de soldagem, as regiões tiveram tamanhos diferentes quando amostras são comparadas, e as endentações estando separadas de 3mm, zonas tiveram diferentes quantidades de medições. Apesar de uma tendência de aumento da microdureza na região da zona fundida poder ser claramente identificada, os resultados obtidos deste ensaio apresentam um valor considerável de dispersão. Este comportamento está, principalmente, ligado à distribuição de precipitados que não se dá de modo homogêneo ao longo das regiões. A Figura 27 (a) mostra o perfil de

microdureza da amostra 6 e Figura 27 (b) da amostra 1. Como pode ser verificado, a amostra 6 apresenta um perfil de microdureza com regiões bem determinadas e considerável elevação na zona fundida. Em contrapartida, a amostra 1, Figura 27 (b) se mostra com maior dispersão nos valores e as diferenças entre regiões são bem menores, dificultando sua interpretação e análise comparativa. Este trabalho baseou-se, portanto, nas médias encontradas pelos valores de microdureza em suas respectivas regiões. A Figura 28 mostra os valores médios de cada região, a quantidade de medições e o desvio padrão a ela associado separado por amostras.

**Figura 27 – Perfil de microdureza da amostra 6 e 1.**



(A) Amostra 6 e (B) Amostra 1

Fonte: O Autor, 2018.

Figura 28 – Valores da microdureza para todas as amostras ensaiadas.

| Amostra 1 Média Contagem Desvio Padrão |        |       |       | Amostra 5 Média Contagem Desvio Padrão |        |       |       |
|----------------------------------------|--------|-------|-------|----------------------------------------|--------|-------|-------|
| MB                                     | 211,68 | 19,00 | 5,72  | MB                                     | 199,38 | 16,00 | 6,06  |
| ZTAMB                                  | 194,63 | 8,00  | 4,57  | ZTAMB                                  | 193,63 | 8,00  | 3,50  |
| ZTAZF                                  | 218,41 | 17,00 | 6,34  | ZTAZF                                  | 210,63 | 16,00 | 9,28  |
| ZF                                     | 237,00 | 6,00  | 6,32  | ZF                                     | 232,80 | 10,00 | 6,73  |
| Amostra 2 Média Contagem Desvio Padrão |        |       |       | Amostra 6 Média Contagem Desvio Padrão |        |       |       |
| MB                                     | 205,52 | 21,00 | 6,19  | MB                                     | 210,58 | 19,00 | 7,68  |
| ZTAMB                                  | 206,60 | 5,00  | 5,55  | ZTAMB                                  | 202,63 | 8,00  | 4,44  |
| ZTAZF                                  | 235,50 | 16,00 | 13,89 | ZTAZF                                  | 217,63 | 8,00  | 6,02  |
| ZF                                     | 254,50 | 8,00  | 11,83 | ZF                                     | 254,87 | 15,00 | 15,75 |
| Amostra 3 Média Contagem Desvio Padrão |        |       |       | Amostra 7 Média Contagem Desvio Padrão |        |       |       |
| MB                                     | 199,05 | 19,00 | 6,51  | MB                                     | 211,16 | 19,00 | 4,69  |
| ZTAMB                                  | 199,50 | 8,00  | 4,69  | ZTAMB                                  | 200,88 | 8,00  | 0,81  |
| ZTAZF                                  | 215,60 | 10,00 | 10,47 | ZTAZF                                  | 223,11 | 9,00  | 9,83  |
| ZF                                     | 232,85 | 13,00 | 8,21  | ZF                                     | 241,86 | 14,00 | 9,81  |
| Amostra 4 Média Contagem Desvio Padrão |        |       |       | Amostra 8 Média Contagem Desvio Padrão |        |       |       |
| MB                                     | 210,43 | 23,00 | 6,89  | MB                                     | 202,29 | 21,00 | 6,01  |
| ZTAMB                                  | 198,60 | 5,00  | 1,82  | ZTAMB                                  | 198,33 | 6,00  | 6,95  |
| ZTAZF                                  | 224,33 | 12,00 | 12,54 | ZTAZF                                  | 218,44 | 9,00  | 8,06  |
| ZF                                     | 240,80 | 10,00 | 9,19  | ZF                                     | 247,93 | 14,00 | 12,29 |

\*Valores médios de microdureza, quantidade de medições e desvio padrão.

Fonte: O Autor, 2018.

Analisando as médias de microdureza, percebe-se que o metal de base Nacional tem valores superiores ao material importado. O valor médio geral do material nacional é de 210,1 HV, enquanto que o material importado apresentou 203,6 HV. Esta diferença é consequência da composição química e do processamento do material durante sua produção. Como apresentado e discutido na subseção 4.2, a microestrutura destes materiais é diferente e indica que o material importado provavelmente foi produzido com temperaturas mais elevadas.

A Figura 29 mostra a representação gráfica das médias de microdureza em cada zona da junta soldada de modo comparativo entre o material nacional e importado. As corridas foram agrupadas por aporte térmico (combinação das variáveis velocidade e corrente) e a microdureza do material nacional e importado foi sobreposta. Na Figura 29 (A), a 0,23 KJ/mm, percebe-se que o material importado não apresenta muita alteração de microdureza entre as regiões MB e ZTAMB, apresentando apenas aumento na ZTAZF e chegando a seu patamar máximo na ZF. O material Nacional, contudo, tem maior microdureza que o material importado, apresenta um decaimento acentuado entre MB e ZTAMB atingindo um valor mais baixo que o nível de microdureza do material importado e aumenta novamente na ZTAZF chegando a um valor superior ao conferido no material importado e finalmente tem seu valor mais alto na ZF. A 0,23

KJ/mm, ou seja, corrente a 126A e velocidade a 680mm/min, o material nacional apresentou diferenças de microdureza muito mais acentuadas quando comparado com o importado.

Ao analisar a Figura 29 (B), com aporte térmico de 0,26 KJ/mm, os materiais nacional e importado têm efeito similar ao apresentado na Figura 29 (A), contudo percebe-se que os dois materiais atingiram, dessa vez, valores de microdureza mais altos nas zonas ZTAZF e ZF. Nestas zonas, a microdureza do material nacional não chegou a, novamente, passar os valores apresentados no importado. Os gradientes foram menos acentuados.

Na Figura 29 (C), amostras 5 e 6, a energia de soldagem foi de 0,24 KJ/mm, consequência da corrente de 126A e velocidade de 655 mm/min, os dois materiais apresentam curvas similares. Os valores de microdureza do material nacional são mais elevados em todas as regiões e destaca-se o gradiente acentuado entre ZTAZF e ZF. Já a Figura 29 (D), com aporte térmico de 0,27 KJ/mm, o mais elevado de todos os ensaios, mostra o decaimento da microdureza nos dois materiais na ZTAMB e o material importado teve, pela primeira vez, maior aumento relativo entre as zonas ZTAZF e ZF que o material nacional.

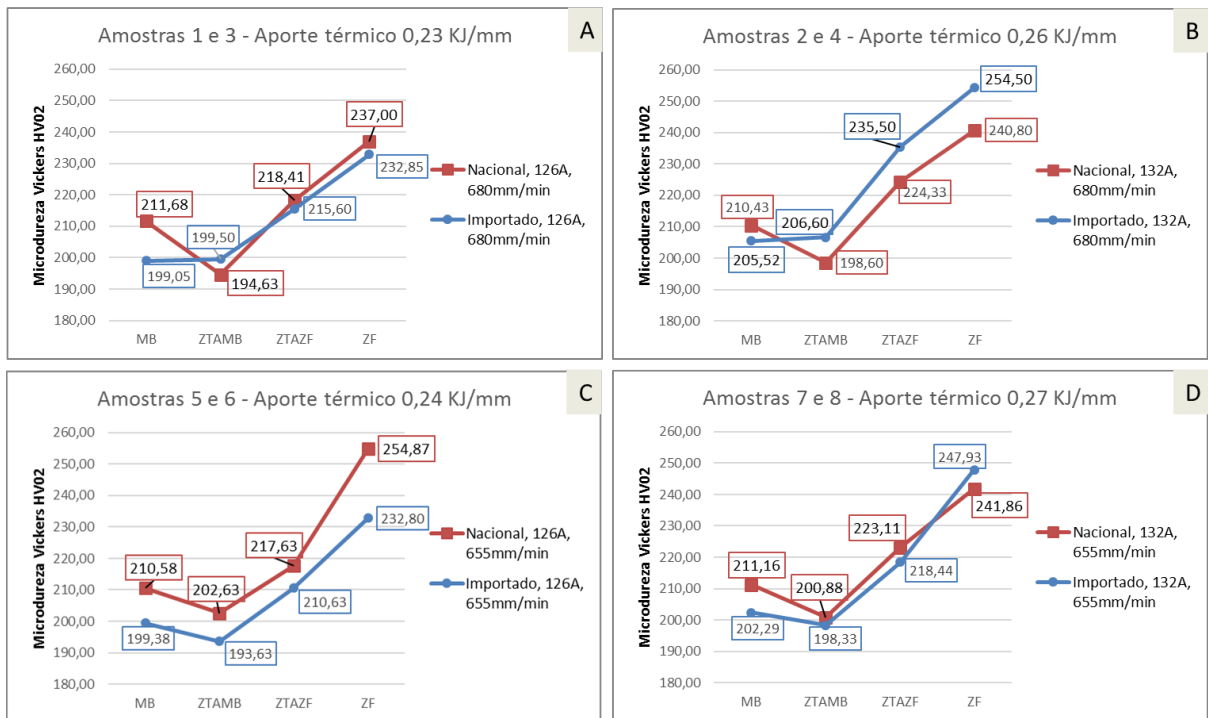
A redução da microdureza na ZTAMB percebida nas amostras (exceto pela 2 e 3) é conhecido na literatura (Esquivel. A. et al., 2012), e está relacionado a um tratamento térmico de alívio de tensões das fases duras desta região, como bainita e martensita. Nayak et al. (2011) realizou um estudo do tratamento não isotérmico destas regiões em aços DP e percebeu que aços com maior teor de carbono equivalente tendem a sofrer o efeito de alívio de tensões mais acentuado, como é o caso do material nacional abordado neste estudo.

Foi verificado em todos os casos que a ZTAZF traz um aumento de microdureza devido à formação de estruturas mais alongadas conforme discutido subitem microestrutura. Por fim, a zona fundida apresenta maior dureza encontrada, como é de se esperar e apresentado no capítulo II.

Apesar das observações mencionadas acima e de os materiais terem comportamento diferentes quando comparados um ao outro, os resultados dos gráficos não aparentam mostrar relação direta entre a energia de soldagem, ou a combinação de corrente e velocidade, e a microdureza dos materiais. O maior valor de microdureza na zona fundida foi encontrado com 0,26 KJ/mm de energia no material importado e 0,24 KJ/mm no material nacional. Ambas encontradas em patamares menores que o máximo imputado no ensaio, 0,27 KJ/mm, que teria a maior taxa de resfriamento. Comparações análogas podem ser feitas com os valores de microdureza das outras zonas. Existe na literatura trabalho que prediz a taxa de redução de dureza de aços DP e martensíticos por formulação matemática, porém o mesmo não é preconizado para aços FB (Biro et al., 2013). Adicionalmente, um estudo realizado por Varol et al. (2013) de juntas soldadas por MIG Brazing com aços TRIP mostrou que, apesar da

resistência mecânica aumentar gradativamente com o aporte térmico da solda, a microdureza não tem o mesmo efeito. Este resultado condiz com os encontrados nos experimentos deste estudo, conforme mencionado acima.

**Figura 29 – Gráficos comparativos de microdureza entre material nacional e importado em função do aporte térmico.**



**(A) 0,23 KJ/mm, (B) 0,26 KJ/mm, (C) 0,24 KJ/mm e (D) 0,27 KJ/mm**

Fonte: O Autor, 2018.

Uma análise do DOE, ou seja, dos efeitos das variáveis material, corrente e velocidade de soldagem aprofundada foi realizada com auxílio do Minitab. Conforme exibido na Tabela 5, foram imputados no programa os valores médios de microdureza separados por região MB, ZTAMB, ZTAZF e ZF segundo as corridas do experimento e a bloqueio pela variável velocidade. Os gráficos dos efeitos das variáveis material, velocidade e corrente estão expressos na Figura 30. A Figura 30 (A) mostra o efeito das variáveis na zona fundida, a Figura 30 (B) na zona termicamente afetada próxima à zona fundida, a Figura 30 (C) ilustra a zona termicamente afetada próxima ao metal de base e, por fim, a Figura 30 (D) o efeito destas variáveis no metal de base. Como pode-se perceber, as variáveis não tiveram influência na microdureza das diferentes zonas da junta soldada. Este resultado está relacionado com alguns fatores importantes do experimento escolhido. Os níveis de corrente e velocidade tiveram uma variação muito pequena, o que ocasiona em pouca diferença de energia de soldagem. Por este motivo, as médias de microdureza se tornam bastante aproximadas e se confundem com o erro

computacional aliado à análise do experimento e do gráfico de respostas. Adicionalmente, como dito anteriormente, a resposta de microdureza medida não aparentou ter relação direta com o nível de aporte térmico da solda, como se esperaria teoricamente. Este comportamento pode ter relação com as pequenas variações dos valores de entrada, mas também pode estar ligado ao relevante desvio padrão das amostras medidas. Por fim, a blocagem da variável velocidade pode estar também influenciando os resultados, um número maior de corridas seria necessário para melhor entendê-lo.

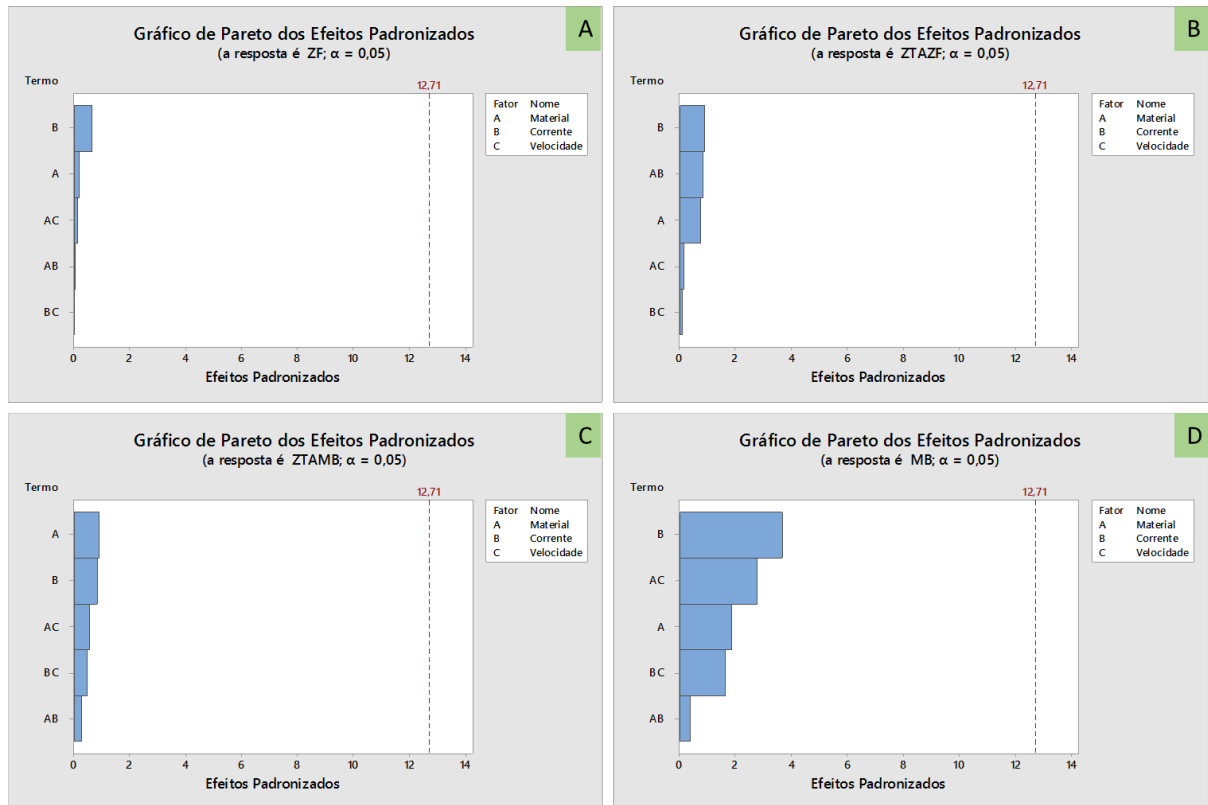
Algumas ações poderiam ser tomadas para aumentar o grau de confiança das respostas do experimento ou melhor representar o efeito das variáveis a serem analisadas na microdureza como, por exemplo, aumentar a diferença entre os níveis das variáveis controladas imputando ao experimento uma faixa maior de aporte térmico. Esta não é, contudo, a finalidade do experimento. O objetivo deste experimento e como ele foi concebido foi para representar as diferentes possibilidades de utilização na produção dos veículos para a FCA, portanto a escolha dos parâmetros de soldagem representa a real utilização da matéria.

**Tabela 5 - Design de experimento com respostas**

| <b>Corrida</b> | <b>Fonte do Aço</b> | <b>Corrente (A)</b> | <b>Velocidade (mm/min)</b> | <b>Blocagem</b> | <b>HV0,2 ZF</b> | <b>HV0,2 ZTAZF</b> | <b>HV0,2 ZTAMB</b> | <b>HV0,2 MB</b> |
|----------------|---------------------|---------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 1              | Nacional            | 126                 | 680                        | 1               | 237             | 218                | 195                | 212             |
| 2              | Importado           | 132                 | 680                        | 1               | 254             | 235                | 207                | 206             |
| 3              | Importado           | 126                 | 680                        | 1               | 233             | 216                | 199                | 199             |
| 4              | Nacional            | 132                 | 680                        | 1               | 241             | 224                | 199                | 210             |
| 5              | Importado           | 126                 | 655                        | 2               | 233             | 211                | 194                | 199             |
| 6              | Nacional            | 126                 | 655                        | 2               | 255             | 218                | 203                | 211             |
| 7              | Nacional            | 132                 | 655                        | 2               | 242             | 223                | 201                | 211             |
| 8              | Importado           | 132                 | 655                        | 2               | 248             | 218                | 198                | 202             |

Fonte: O Autor, 2018.

**Figura 30 – Gráficos de resposta do Minitab para Microdureza.**



(A) Microdureza ZF, (B) Microdureza ZTAZF, (C) Microdureza ZTAMB e (D) Microdureza MB

Fonte: O Autor, 2018.

## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo, estão apresentadas as conclusões obtidas da realização deste trabalho.

- Os resultados de macroestrutura mostram que soldas foram executadas com sucesso, independentemente do material utilizado
- A microestrutura apresentou formação de martensita com a soldagem. Controle de processo produtivo tem que existir para não ocorrer problemas de fragilização, importantes para fadiga
- Dureza e microdureza apresentam resultados condizentes com literatura e não comprometem a estrutura da solda.
- Os resultados obtidos na análise do fatorial completo não podem ser tomados como referência de efeito dos fatores de entrada em relação à dureza por três motivos:
  - A resposta microdureza apresenta dispersão elevada e baixos valores nas regiões de transição aproximam os resultados das corridas
  - As diferenças dos níveis dos fatores são pequenas, deixando o erro experimental e de simulação maior que os efeitos observados
  - Devido à limitação de amostras, o efeito do fator “bloco” não pôde ser avaliado adequadamente.
- Em níveis altos de aporte térmico, o material nacional não apresenta aspecto de solda diferenciado em relação ao importado e não deve oferecer riscos caso seja usado na produção de veículos comerciáveis.



## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros que, acredita-se, poderão contribuir para complementar os resultados obtidos.

- Realizar testes de fadiga e tração em experimentos correlatos.
- Realizar o mesmo experimento com solda na posição sobreposta e comparar com resultados obtidos neste trabalho;
- Analisar as incertezas de medição de microdureza e correlacionar com ANOVA, no intuito de verificar a possibilidade de se obter uma representatividade estatística relevante.
- Realizar análise de influência das condições de contorno controláveis deste experimento. Algumas variáveis são: ângulo de soldagem, composição química do metal de adição, stick-out, vazão do gás e composição do gás.
- Realizar um estudo mais detalhado das microestruturas presentes e correlacionar com as propriedades dos depósitos.
- Comparar com outras metodologias de soldagem, em especial soldagem a laser

## REFERÊNCIAS

ANTONY, J. **Design of experiments for engineers and scientists**. Edimburgo: Elsevier, 2003. V. 2.

ANDERSON, J. M., WHITCOMB, J. P. RSM Simplified: optimizing processes using response surface methods for design of experiments. **Productivity Press**, v. 2, p.108, 2016.

BALUCH, N., UDIN, Z. M., ABDULLAH, C. S. Advanced high strength steel in auto industry: an overview. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, Malasia, v. 4, n. 4, 2014.

BHADESHIA, H.K.D.H., **Bainite in Steels: Transformations, Microstructure and Properties**. 2nd Edition. Cambridge: IOM Communications, 2001. v. 2, p. 19-60, 2001.

BIRO, E.; VIGNIER, S.; KACZYNSKI, C; MCDERMID, J. R.; LUCAS, E.; EMBURY J. D.; and ZHOU Y. N. Predicting transient softening in the sub-critical heat-affected zone of dual-phase and martensitic steel welds. **ISIJ International**, v. 53, n. 1, p. 110-118, 2013.

BOX, G. E. P.; Evolutionary Operation: A Method for Increasing Industrial Productivity. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 6, n. 2, p. 81-110, 1957.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D.G., **Materials Science and Engineering**. New York, NY: John Wiley and Sons, 2014. p. 378-394, v. 9.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Edgard Blucher. 2008. p. 375-380, v.4.

ESQUIVEL, A. S., NAYAK, S. S., XIA M. S., ZHOU, Y., Microstructure, hardness and tensile properties of fusion zone in laser welding of advanced high strength steels. **Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum**, v. 51, n. 3, p. 6, 2012.

GOUPY, J., CREIGHTON, L. **Introduction to design of experiments**. Cary, NC.: SAS PRESS, 2007. p. 472, v. 3.

KAPUSTKA, N. CONRARDY, C. BABY, S. ALBRIGTH, C. Effect of GMAW process and Material Conditions on DP 780 and TRIP 780 Welds. **Welding Journal**, v. 87,p. 135-148, 2008.

KEELER, S., KIMCHI, M., MOONEY, P. J., **Advanced high-strength steels aplication guidelines**. Word Auto Steel, v. 6, 2017.

MASON, L. R., GUNST, F. R., HESS, J. L. **Statistical design and analysis of experiments**: applications to engineering and science. 2ed. Cambridge: Wiley-Interscience, 2003.

MURRAY, P. M., The application of design of experiments (DoE) reaction optimisation and solvent selection in the development of new synthetic chemistry. **Organic & Biomolecular Chemistry**, v. 14, n.8, Dec. 2015.

NAYAK, S. S., BALTAZAR, V.H., ZHOU, Y. Effect of Chemistry on Nonisothermal Tempering and Softening of Dual-Phase Steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Volume 42, Issue 11, pp. 3242-3248, 2011.

NEMECEK, S. MUZIK, T. MISEK, M. Differences between laser and arc welding of HSS steels. **Physics Procedia**, v. 39, p. 67-74, 2012.

PIRINEN, M., **The effects of welding heat input on the usability of high strength steels in welded structures**, 178f. 2013. Tese (Doutorado), Finland: Universty of Tecnology, Lapeenranta, 2013.

SYAMMACH, S. M., **Mechanical properties of steels with a microstructure of bainite/martensite and austenite Islands** 118f. 2016. Dissertação (Mestrado). Engenharia Metalurgica e de Materiais, School of Mines, Faculty and the Board of Trustees, Colorado. 2016.

VAROL, F. FERIK, E. OZSARAC, U. ASLANLAR, S. Influence of current intensity and heat input in Metal Inert Gas-brazed joints of TRIP 800 thin zinc coated steel plates. **Acta Phisics Polonica A**, v. 52, p. 968-971, 2015.

ZAKERINIA, H. KERMANPUR, A. NAJAFIZADEH, A. Color metallography; a suitable method for characterization of martensite and bainite in multiphase steels. **International Journal of ISSI**, v.6, p.14-18, 2009.

Green Car Congress, **Steel LCA study: lightweighting with advanced high-strength steel produces lower GHG emissions Than with aluminum**. Disponível em: [www.greencarcongress.com/2018/02/20180209-sri.html](http://www.greencarcongress.com/2018/02/20180209-sri.html) . Acesso em: 15 de Fevereiro de 2018.