



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

Caracterização da união por brasagem MIG entre o aço endurecido na estampagem a quente (PHS) e o aço carbono (CR4) utilizando ensaios metalográficos e mecânicos e por correlação de imagens digitais (DIC)

LARISSA ABBADE MARCELO

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

Orientador:

Prof. Dr. Cristiano Stefano Mucsi

São Paulo
2021

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

Caracterização da união por brasagem MIG entre o aço endurecido na estampagem a quente (PHS) e o aço carbono (CR4) utilizando ensaios metalográficos e mecânicos e por correlação de imagens digitais (DIC)

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

LARISSA ABBADE MARCELO

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

Orientador:

Prof. Dr. Cristiano Stefano Mucsi

São Paulo
2021

Fonte de Financiamento: Auxílio CAPES: Processo n. 88882.333428/2019-01

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

Como citar:

MARCELO, L. A. ***Caracterização da união por brasagem MIG entre o aço endurecido na estampagem a quente (PHS) e o aço carbono (CR4) utilizando ensaios metalográficos e mecânicos e por correlação de imagens digitais (DIC)***. 2021. 99 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

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

Marcelo, Larissa Abbade
Caracterização da união por brasagem MIG entre o aço endurecido na estampagem a quente (PHS) e o aço carbono (CR4) utilizando ensaios metalográficos e mecânicos e por correlação de imagens digitais (DIC) / Larissa Abbade Marcelo; orientador Cristiano Stefano Mucsi. -- São Paulo, 2021.
99 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2021.

1. Brasagem MIG. 2. 22MnB5. 3. Aço carbono. 4. Al-Si. 5. DIC . I. Mucsi, Cristiano Stefano, orient. II. Título.

Dedico aos meus familiares, amigos e professores que me auxiliaram durante o processo de construção desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

A Deus por guiar meu caminho e fornecer a oportunidade de concluir o curso de pós-graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cristiano Stefano Mucsi, por compartilhar todo o seu conhecimento científico em cada etapa, pela paciência, dedicação, mas principalmente, por acreditar na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi, não só pelos momentos de parceria, que jamais esquecerei, mas principalmente agradeço os conselhos que levarei para a vida.

Ao Prof. Me. José Agustin Castillo Lara, que sempre serei grata por ser meu ombro amigo em momentos de extrema necessidade, por todo conhecimento técnico compartilhado, mas principalmente por nunca desistir deste trabalho e acreditar na minha capacidade como profissional e aluna.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), por conceder espaço, recursos e conhecimento científico.

A todos os professores e colegas do curso de Pós-Graduação do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CECTM).

A coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (CAPES), pelo financiamento da bolsa de mestrado.

Ao Centro Universitário Fundação Santo André (CUFSA), por disponibilizar seu laboratório, colaboradores e seus materiais.

As empresas Lincoln Electric do Brasil e Bruning Tecnometal por serem parceiras nesse trabalho e fornecerem auxílio com materiais e com o tempo de seus profissionais.

Agradeço imensamente aos meus familiares que me permitiram chegar onde cheguei. Sem vocês eu não seria nada. É muito bom poder colher os frutos de um trabalho bem feito, com muito esforço e dedicação.

“Você pode sonhar, criar, desenhar e construir o lugar mais maravilhoso do mundo. Mas é necessário ter pessoas para transformar seu sonho em realidade.”

Walt Disney (1901-1966).

RESUMO

MARCELO, L. A. **Caracterização da união por brasagem MIG entre o aço endurecido na estampagem a quente (PHS) e o aço carbono (CR4) utilizando ensaios metalográficos e mecânicos e por correlação de imagens digitais (DIC).** 2021. 99 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

A busca em fabricar veículos cada vez mais sustentáveis e seguros, por conta da crise dos recursos naturais e a preocupação com a segurança veicular, fez crescer o uso de novas matérias e métodos de conformação e união dos componentes da carroceria. As propriedades da coluna B determinam a segurança dos passageiros em caso de colisão lateral. A coluna B é constituída por materiais diferentes, e por isso, necessitam de uma técnica de reparo com a mesma qualidade da fabricação das montadoras. Assim, o objetivo do presente trabalho é realizar a caracterização mecânica da união entre o aço 22MnB5 endurecido na estampagem a quente e o aço CR4, pela brasagem MIG com adição do arame Cu-Si e o gás de proteção argônio. Os materiais utilizados foram, amostras do aço 22MnB5 revestidas por Al-Si e CR4 revestido por zinco. A união foi realizada a partir de dois projetos de corpo de prova, nomeados de furo regular circular e furo oblongo regular. Os ensaios realizados (dureza Vickers, metalografia e tração), se enquadram na norma AWS A5 C3. 3-2008. Os resultados obtidos, demonstraram uma queda na resistência mecânica na zona termicamente afetada pelo calor do aço 22MnB5 e sugere-se problemas no reaquecimento da região que apresentou mudanças na microestrutura. Porém no ensaio de tração com a técnica de correlação de imagens digitais (DIC), as propagações das trincas e as fraturas ocorreram no material de base CR4.

Palavras-chave: Brasagem MIG, CR4, 22MnB5, Al-Si, DIC.

ABSTRACT

MARCELO, L. A. **Caracterização da união por brasagem MIG entre o aço endurecido na estampagem a quente (PHS) e o aço carbono (CR4) utilizando ensaios metalográficos e mecânicos e por correlação de imagens digitais (DIC).** 2021. 99 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

The search to manufacture increasingly sustainable and safe vehicles, due to the crisis in natural resources and the concern with vehicle safety, has increased the use of new materials and methods of forming and joining body components. The properties of the B-pillar determine the safety of the passengers in a lateral collision. The B-pillar is made up of different materials, and therefore requires a repair technique of the same quality as that used by the manufacturers. Thus, the objective of this work is to perform the mechanical characterization of the joint between 22MnB5 steel hardened in hot stamping and CR4 steel, by MIG brazing with addition of Cu-Si wire and argon shielding gas. The materials used were, Al-Si coated 22MnB5 steel samples and zinc coated CR4 steel samples. The joining was performed from two specimen designs, named regular circular hole and regular oblong hole. The tests performed (Vickers hardness, metallography and traction), conform to the AWS A5 C3. 3-2008. The results obtained showed a drop in the mechanical resistance in the heat affected zone of the 22MnB5 steel and it is suggested problems in the reheating of the region that presented changes in the microstructure. However in the tensile test with the digital image correlation (DIC) technique, crack propagation and fractures occurred in the CR4 base material.

Keywords: MIG Brazing, CR4, 22MnB5, Al-Si, DIC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Processo de estampagem a quente.	20
Figura 2: Processo termomecânico da estampagem a quente.....	20
Figura 3: Aplicação dos aços estampados a quente em carroceria.....	21
Figura 4: Resistência do aço 22MnB5 antes e depois da estampagem a quente.	22
Figura 5: Diagrama TTT do aço 22MnB5.	23
Figura 6: Transformação do aço 22MnB5 na estampagem a quente.....	23
Figura 7: Microestrutura do aço 22MnB5.....	24
Figura 8: Microestrutura do aço martensítico.....	26
Figura 9: Coluna B e a brasagem MIG.....	27
Figura 10: Preenchimento e dimensões do furo circular regular.	28
Figura 11: Processo de união por Brasagem.....	29
Figura 12: Processo de brasagem.	30
Figura 13: Condições de molhabilidade de uma superfície.....	31
Figura 14: Esquema representativo do processo de brasagem MIG.....	32
Figura 15: Brasagem na fabricação de carrocerias.	34
Figura 16: Processo STT braze.....	35
Figura 17: Diagrama tensão x deformação convencional.....	39
Figura 18: Esquema representativo da técnica de correlação digital de imagens.....	40
Figura 19: Correlação de cores x deformação da amostra.....	41
Figura 20: Materiais, métodos e etapas dos testes.....	43
Figura 21: Desenho esquemático do ferramental utilizado.....	44
Figura 22: Detalhe dos equipamentos utilizados.....	45
Figura 23: Design furo (a) Furo regular circular e (b) Furo oblongo regular.	47
Figura 24: Dispositivo desenvolvido para o processo de brasagem MIG.	47
Figura 25: Maquinário do processo brasagem MIG.....	48
Figura 26: Controlador STT Braze.	49
Figura 27: Equipamento do ensaio de macrografia.....	50
Figura 28: Equipamento do ensaio de micrografia.....	51
Figura 29: Esquema representativo do ensaio de microdureza.....	52
Figura 30: Máquina de tração e posição da amostra.....	52
Figura 31: Microestrutura do aço 22MnB5.	54
Figura 32: Diferença na dureza antes e após o tratamento térmico.	56

Figura 33: Diferença entre os valores de dureza do aço 22MnB5 e do aço CR4.....	58
Figura 34: Parâmetros T1 e T2.....	60
Figura 35: Parâmetro T3 sem espaçamento.....	61
Figura 36: Parâmetro T3 com espaçamento.....	63
Figura 37: Parâmetro T4 sem espaçamento.....	65
Figura 38: Parâmetro T4 com espaçamento.....	67
Figura 39: Macrografia das amostras P1.2 e P1.3.....	70
Figura 40: Macrografia das amostras P2.1, P2.2 e P2.3.....	71
Figura 41: Microestrutura da amostra P1.2.....	73
Figura 42: Microestrutura da amostra P1.3.....	74
Figura 43: Microestrutura da amostra P2.1.....	74
Figura 44: Microestrutura da amostra P2.2.....	76
Figura 45: Microestrutura da amostra P2.3.....	77
Figura 46: Dureza da amostra P1.2.....	79
Figura 47: Dureza da amostra P1.3.....	80
Figura 48: Dureza da amostra P2.1.....	81
Figura 49: Dureza da amostra P2.2.....	82
Figura 50: Dureza da amostra P2.3.....	83
Figura 51: Ensaio de tração da amostra P5.2.....	84
Figura 52: Ensaio de tração da amostra P8.3.....	85
Figura 53: Ensaio de tração da amostra P11.2.....	85
Figura 54: Ensaio de tração da amostra P14.2.....	86
Figura 55: Correlação de imagem digital do corpo de prova P5.2.....	88
Figura 56: Correlação de imagem digital do corpo de prova P8.3.....	90
Figura 57: Correlação de imagem digital do corpo de prova P11.2.....	91
Figura 58: Correlação de imagem digital do corpo de prova P14.2.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas do aço 22MnB5.....	24
Tabela 2: Composição química do aço 22MnB5.....	44
Tabela 3: Parâmetros do processo de estampagem a quente.	46
Tabela 4: Composição química do aço CR4.....	46
Tabela 5: Resultados da microdureza do aço 22MnB5.....	55
Tabela 6: Resultados da microdureza do PHS.....	56
Tabela 7: Resultados da microdureza do CR4.....	57
Tabela 8: Parâmetros para união por brasagem MIG.	59
Tabela 9: Carga máxima obtida no ensaio de tração.	87
Tabela 10: Extensão máxima obtida no ensaio de tração.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS	American Welding Society
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCJ	Comissão de Constituição de Justiça
CECTM	Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais
CID	Correlação de Imagens Digitais
CUFSA	Centro Universitário Fundação Santo André
DIC	Digital Image Correlation
DIN	Deutsches Institut Fur Normung
GMAW	Gas Metal Arc Welding
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
MB	Material de Base
MIG	Metal Inert Gas
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PHS	Press Hardening Steel
PIB	Produto Interno Bruto
UHSS	Aços de Ultra Alta Resistência
ZF	Zona de Fusão
ZTA	Zona Termicamente Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1.	Segurança veicular.....	18
3.2.	Processo de estampagem.....	18
3.3.	Aço estampado a quente.....	19
3.4.	Aço 22MnB5.	21
3.5.	Aço CR4.	24
3.6.	Revestimento.....	25
3.7.	Reparo em aço martensítico.	25
3.8.	Brasagem.	28
3.9.	Umectação ou molhabilidade.....	31
3.10.	Brasagem MIG.	32
3.10.1.	Sistema STT Braze	34
3.10.2.	Parâmetros para brasagem MIG.	35
3.10.3.	Material de adição.	36
3.10.4.	Gás de proteção.	36
3.11.	Ensaio mecânicos.....	37
3.11.1.	Ensaio de dureza.....	37
3.11.2.	Ensaio metalografico.	38
3.11.3.	Ensaio de tração.....	38
3.11.4.	Correlação de imagens digitais (CID).	39
3.11.5.	Software para Correlação de imagens digitais (CID).	40
3.11.6.	Preparação de amostras para correlação de imagens digitais.....	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
4.1.	Material de base.....	43
4.2.	Corpos de prova.....	46
4.3.	Dispositivo para união dos corpos de prova.	47
4.4.	Processo de união.....	48
4.5.	Célula robótica.....	48
4.6.	Parâmetro de soldagem.....	49
4.7.	Ensaio metalografico.....	50

4.8. Microdureza Vickers.	51
4.9. Ensaio de tração/Correlação de imagens digitais (CID).	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1. Caracterização do material de base.	54
5.2. Análise dos parâmetros.	58
5.3. Análises metalográficas.....	69
5.4. Análise dos valores de dureza Vickers (HV).	78
5.5. Resultados do ensaio de tração.	83
5.6. Análise com correlação de imagem digital.	88
6 CONCLUSÃO.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos cresceu a preocupação por segurança veicular e eficiência energética. A indústria automobilística se transforma constantemente para diminuir as estatísticas alarmantes de mortes no trânsito e isso justifica os avanços das tecnologias. Segundo estimativa da OMS (Organização Mundial da Saúde), cerca de 1,35 milhão de pessoas morrem por ano vítimas de acidentes de trânsito no mundo (WHO, 2018).

Em 2013 no Brasil, os acidentes de transporte terrestre mataram por volta de 43 mil pessoas, sendo que cerca de 10 mil perderam suas vidas na modalidade de acidentes com automóvel. Diminuir esses números é um grande desafio e faz parte dos objetivos e metas da 70.^a Assembleia Geral das Nações Unidas, ocorrida em 2015, onde os representantes dos países membros da ONU (Organização das Nações Unidas) adotaram a rota 2030 (CARVALHO, 2016).

As obrigações da rota 2030 é de que todos os veículos leves (automóvel, utilitário, caminhonete e camioneta), deverão seguir o mínimo de 65% de uma lista básica de sete dispositivos estruturais, que compreende: proteção de impacto lateral, controle eletrônico de estabilidade, indicador de direção lateral, farol de rodagem diurna, aviso de não afivelamento do cinto, aviso de frenagem de emergência e visibilidade traseira (ROTA2030, 2020).

Outra medida securitária que foi aprovada pela CCJ (Comissão de Constituição de Justiça) do senado brasileiro, é o Projeto de Lei n° 152 de 2017, cujo objetivo é tornar obrigatório, que somente poderão ser vendidos os modelos de automóveis que tenham alcançado resultados mínimos em testes de impacto lateral.

O impacto lateral, quando comparado com o frontal e o traseiro, é a segunda causa de morte no trânsito. Isso infelizmente acontece pois há pouco espaço e material nessa região. A coluna B é o componente estrutural responsável por absorver a maior parte da energia dessa colisão e é produzida, na maioria dos veículos, por aços de alta resistência endurecidos por prensagem (OLIVEIRA; MENDES, 2020).

Ao longo dos anos, o processo de estampagem a quente, alcançou enorme sucesso na produção de peças com geometrias complexas, baixa espessura e alta resistência mecânica. O aço estampado a quente, do inglês press hardening steel (PHS), mais comercializado pela indústria automobilística é o 22MnB5 revestido por uma camada de Al-Si (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

Para a união da coluna B com outros elementos estruturais da carroceria, a soldagem é o processo mais utilizado, sendo que cada veículo leva em média 3 mil pontos de solda (CHOI, 2011). Todavia, quando um automóvel sofre um impacto lateral, caso os danos não sejam graves, é possível realizar um reparo e a qualidade deve seguir as mesmas regras impostas no momento da fabricação.

O reparo em aços avançados é um assunto estudado pela indústria e pela literatura. Alguns autores, dizem que, a melhor forma de reparar uma solda, é seguir as recomendações do fabricante do veículo, se não existirem, utilizar o processo GMAW (*gas metal arc welding*), mais conhecido como soldagem MIG (*metal inert gas*) (CATTERALL, 2018).

Os aços com resistência mecânica de 1.500 MPa danificados por colisão, devem ser substituídas conforme especificação do fabricante. A soldagem a ponto é o método de fixação recomendado pela maioria das montadoras, no entanto, a brasagem MIG deve ser feita em locais de difícil acesso para as garras (HONDA, 2013).

A brasagem MIG consiste na união de aços, utilizando parte da técnica de aquecimento a arco elétrico, acrescentando um metal de adição, parecido com o processo de brasagem. Uma das características deste processo é a menor incidência de calor no metal de base, em relação ao MIG convencional e que a união se faz por difusão do metal de adição (HARRIS, 2015).

O presente trabalho apresenta a caracterização da união brasada entre o aço estampado a quente 22MnB5 revestido por Al-Si e o aço baixo carbono CR4 revestido por zinco, com a finalidade de avaliar o desempenho deste processo em relação às recomendações de reparo pela indústria automobilística.

2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho é realizar a caracterização da união entre o aço estampado a quente 22MnB5 e o aço baixo carbono CR4, pelo processo de brasagem MIG, utilizando duas recomendações de projetos: furo circular regular e furo oblongo regular e sugerir o melhor parâmetro para unir o PHS com revestimento de Al-Si e o CR4 com revestimento de zinco (Zn).

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Segurança veicular.

Os acidentes de trânsito são reconhecidos pela organização mundial de saúde como um grave problema de saúde pública e uma das principais causas de óbitos e lesões. Além do elevado custo para os serviços de saúde e para as economias dos países, podendo atingir de 1% a 3% do produto interno bruto (PIB) (WHO, 2018).

A maneira mais eficiente de se testar a segurança de um automóvel é por meio dos testes de impacto (do inglês *crash tests*). Essas avaliações simulam diversas categorias de acidentes, averiguando assim os danos causados aos ocupantes do veículo e a validação da segurança em casos de colisões frontais, laterais ou perda de controle (OLIVEIRA; MENDES, 2020).

De acordo com os estudos divulgados pela OMS, os países que mais investiram na segurança dos automóveis foram as que demonstraram maior sucesso na redução de acidentes e conseqüentemente de mortes (WHO, 2018). Também os veículos comercializados em nações com reduzido número de óbitos possuem maior qualidade na fabricação e uso de aços de ultra alta resistência (do inglês *ultra high strength steel - UHSS*).

Entre as diversas aplicações para os aços alta resistência no setor automotivo, o critério baixo peso e segurança são as prioridades, devido à necessidade de estruturas mais leves e a necessidade de garantir segurança aos passageiros através de estruturas com capacidade de absorção de energia durante a aplicação de cargas dinâmicas (GORNÍ, 2010).

O processo de estampagem a quente une a conformabilidade das maiores temperaturas de deformação atingidas e as transformações que as microestruturas sofrem durante o resfriamento rápido (têmpera). O método de endurecimento por têmpera é utilizado para a fabricação de componentes estruturais de automóveis que tenham resistência de 1.500 MPa (ARCELORMITTAL, 2016).

3.2. Processo de estampagem.

O processo de estampagem é um meio de conformação mecânica, que pode ser por meio a frio ou a quente, dependendo da utilização desejada pela indústria. Este processo de conformação pode ser compreendido por um conjunto de

operações, onde uma chapa plana é submetida a transformações geométricas de modo a adquirir uma nova forma (CHIAVERINI, 2002).

Segundo Gorni (2010) a deformação plástica proveniente do processo ocorre por conta da utilização das prensas de estampagem, contando com ajuda de outros dispositivos especiais que são denominados de estampos ou matrizes. Simplificadamente, o processo de estampagem acontece devido as seguintes operações: corte, dobramento e estampagem profunda.

O corte e o dobramento são etapas que normalmente são realizadas a frio, ou seja, abaixo da temperatura de recristalização da peça que será conformada. Todavia a estampagem profunda é a etapa que pode ser realizada a quente e é desenvolvida de acordo com as necessidades técnicas do projeto em questão (ALTAN, 2007).

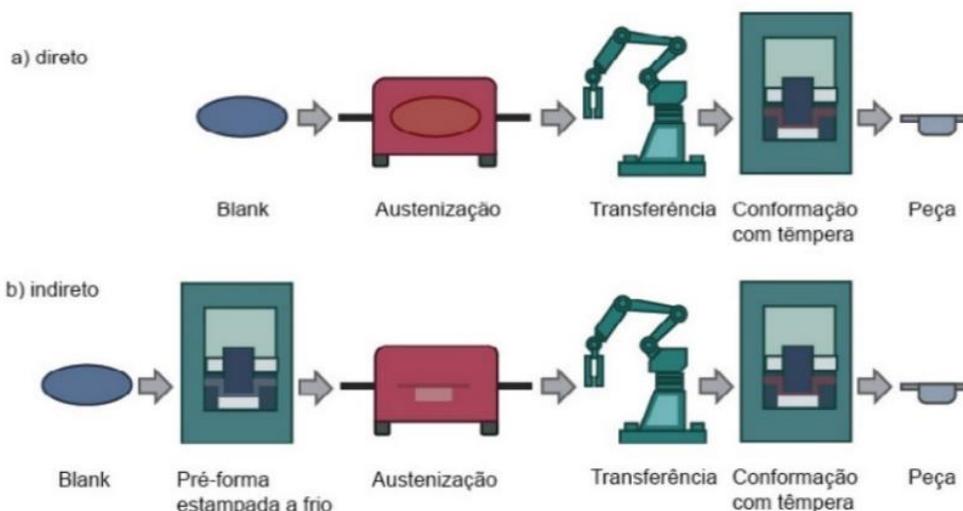
No processo de estampagem as etapas consistem em converter uma chapa plana em uma peça final, sempre atento para que não haja fratura ou afinamento excessivo. As chapas usadas na estampagem são deformadas pelo punção e pela matriz (ALTAN, 2007).

3.3. Aço estampado a quente.

Segundo Turetta (2008), a possibilidade de promover a estampagem em elevadas faixas de temperatura ofereceu a vantagem de se ter uma maior conformabilidade, junto da considerável diminuição do efeito mola. Isso garante a obtenção de peças com uma boa resistência mecânica, através da obtenção de uma estrutura martensítica.

A figura 1 ilustra o processo de estampagem a quente onde (a) compreende o sistema direto e (b) indireto. O processo indireto é composto por uma pré-forma onde é feita o corte inicial do blanque a frio, um forno de aquecimento contínuo, do sistema de transferência do blanque e de uma prensa de estampagem. Já o processo direto consiste de todas as etapas, porém sem a pré-forma a frio (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

Figura 1: Processo de estampagem a quente.

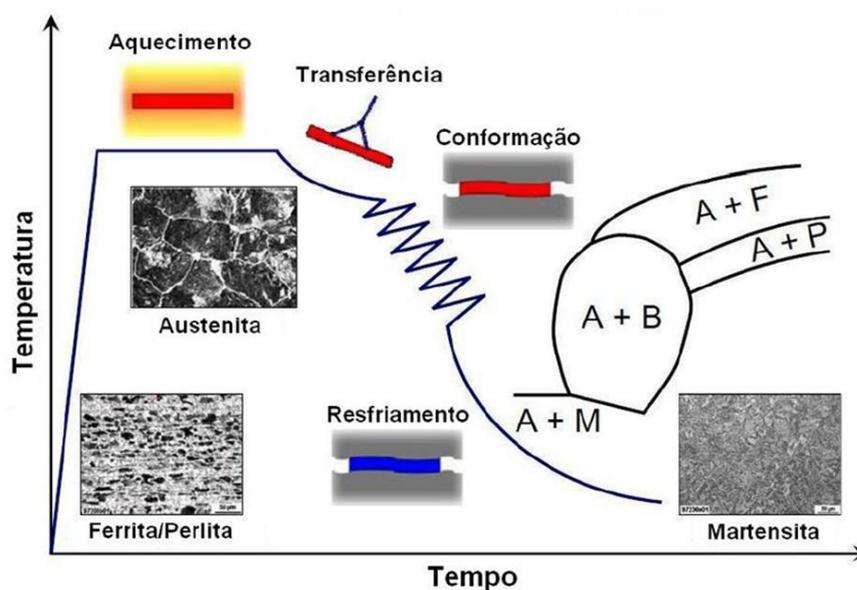


Fonte: Karbasian; Tekkaya, 2010.

Segundo Gorni (2010) a estampagem a quente se caracteriza como um processo de conformação termomecânica, pois o aquecimento, a conformação da chapa e o resfriamento acontece quase que simultaneamente, de maneira controlada, com a finalidade de obter-se a estrutura e as propriedades ideais.

A principal vantagem do processo de estampagem a quente é permitir a combinação da deformação com o resfriamento de forma rápida e simples, conforme figura 2, que ilustra em forma de gráfico as mudanças da microestrutura do material.

Figura 2: Processo termomecânico da estampagem a quente.



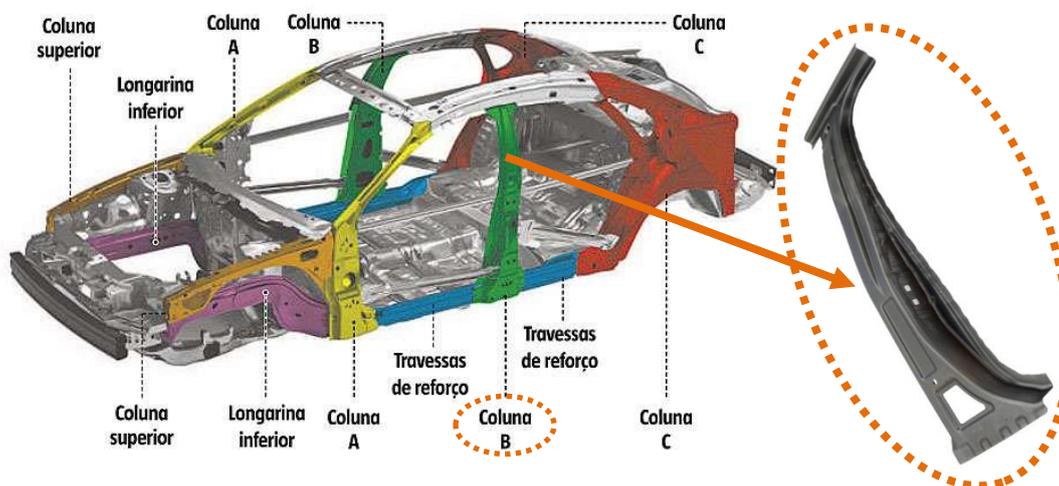
Fonte: Turetta, 2008.

Antes de começar o processo de conformação, o blanque possui uma microestrutura formada por uma matriz de ferrita/perlita, com o aumento da temperatura ocorre a austenitização na qual apresenta elevada estampabilidade, e em sequência um rápido resfriamento (têmpera), que possibilita adquirir uma microestrutura martensítica (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

Segundo Altan (2007) o ciclo total de tratamento, envolvendo as operações de transferência, conformação e resfriamento, deve durar cerca de 15 a 25 segundos. Para que a técnica de estampagem a quente apresente os resultados desejados, é necessário utilizar um material apropriado, ou seja, um aço que tenha temperabilidade.

No cenário atual automobilístico o aço estampado a quente é utilizado em: barras de impacto das portas; colunas; reforço frontal e traseiro; reforço de colisão; longarina inferior e entre outros elementos da carroceria dos veículos. A figura 3 ilustra algumas das aplicações dos aços estampados a quente na carroceria de um veículo leve, com destaque para a coluna B que absorve a energia de um impacto lateral (GORNI, 2010).

Figura 3: Aplicação dos aços estampados a quente em carroceria.



Fonte: Adaptado, Gorni, 2010

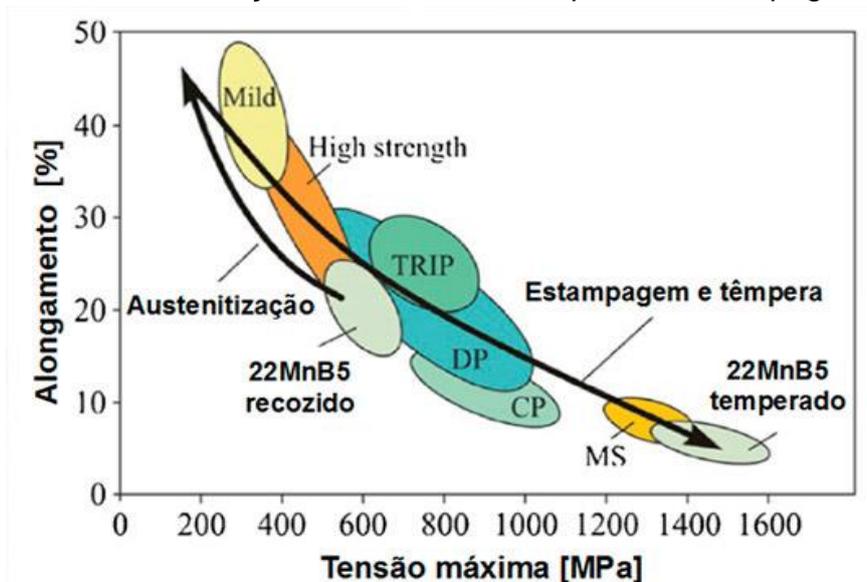
3.4. Aço 22MnB5.

Os materiais estampados a quente são utilizados pela indústria automobilística por sua característica de boa ductilidade, o que permite conformar com boa precisão peças de alta complexidade. Segundo Naderi (2007) outra grande vantagem dos

materiais estampados a quente é a possibilidade de se produzir peças com alta resistência mecânica evitando o efeito mola (do inglês *springback*).

A figura 4 ilustra a resistência a tração do aço 22MnB5, antes e após o processo de estampagem a quente. De acordo com a figura é possível concluir que ocorre um aumento na resistência do material devido à microestrutura martensítica.

Figura 4: Resistência do aço 22MnB5 antes e depois da estampagem a quente.

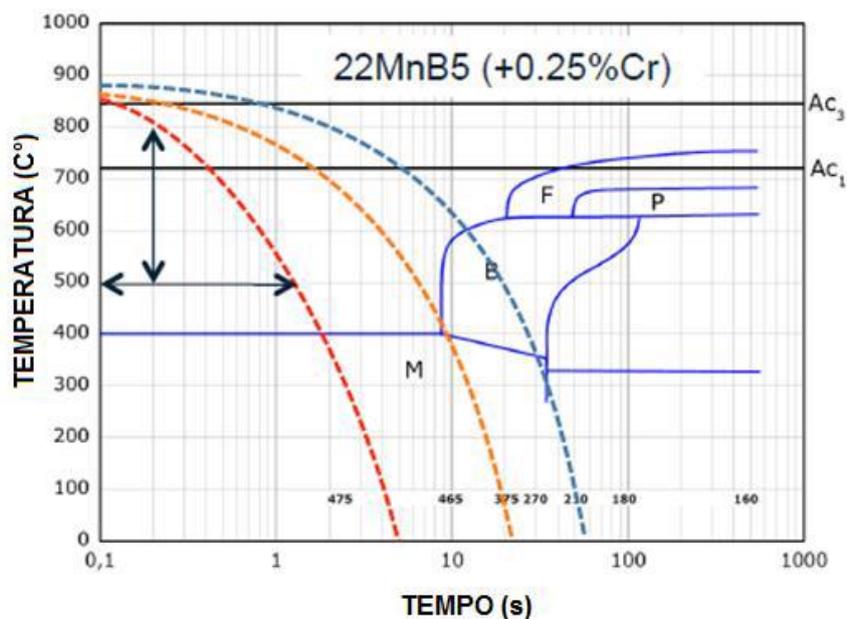


Fonte: Karbasian; Tekkaya, 2010.

O aço 22MnB5, possui substratos de carbono (C) e manganês (Mn) com adições de boro (B). Nesses aços o carbono atua como agente estabilizador da austenita, além de aumentar a dureza da martensita formada. O manganês é uma ótima substância para aumentar a dureza e também retardar a reação de decomposição da austenita, e a adição de alumínio (Al) e do titânio (Ti) inibem a formação do nitreto de boro (BN) (NADERI, 2007).

De modo a alcançar resistência à tração de até 1500 MPa, é necessária uma transformação completa da fase austenítica para a microestrutura martensítica. Portanto, as taxas de arrefecimento mais rápidas têm que ser alcançadas para evitar transformação perlítica, bainítica ou mesmo ferrítica, como ilustra a curva de transformação de resfriamento contínuo (TTT) na figura 5 (NADERI, 2007).

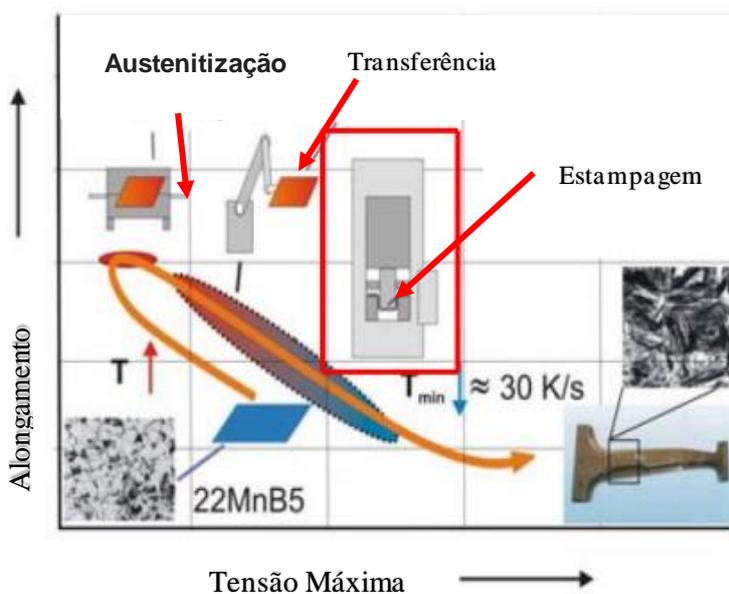
Figura 5: Diagrama TTT do aço 22MnB5.



Fonte: Adaptado de FAN; KIM; COOMAN, 2009.

Segundo Altan (2007), a dureza Vickers desse material é entorno de 430 HV. O método de endurecimento por têmpera é utilizado para a fabricação de componentes estruturais de automóveis. A figura 6 as etapas de transformação do aço 22MnB5 na estampagem a quente, onde a microestrutura se transforma de perlita/ferrita para totalmente martensítica.

Figura 6: Transformação do aço 22MnB5 na estampagem a quente.



Fonte: Bangkok, 2014.

Em sua composição química, a presença de boro na liga de aço reduz a taxa de resfriamento crítico e o carbono equivalente diminui a soldabilidade (NADERI, 2007). O cromo e manganês contribuem para o aumento da resistência a tração após têmpera, suas propriedades mecânicas diferenciadas é ilustrada na figura 7.

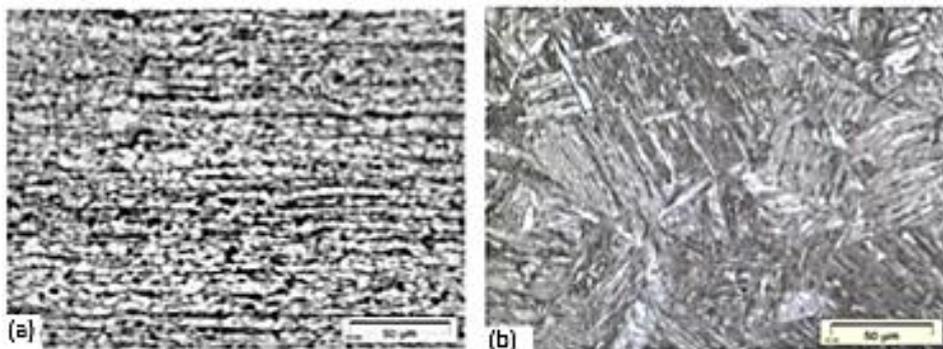
Tabela 1: Propriedades mecânicas do aço 22MnB5.

Propriedades mecânicas do aço 22MnB5	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%) L ₀ = 80 mm Espessura < 3 mm
Antes da estampagem a quente	320-550	500-700	≥10
Depois da estampagem a quente	1100	1500	6

Fonte: Adaptado de Naderi; Akbari; Bleck, 2008.

De acordo com Naderi (2008) no processo de têmpera o aço sofre um resfriamento brusco, apresentando uma microestrutura completamente martensítica, podendo atingir valores de limite de resistência que ultrapassam 1500 MPa, conforme pode ser observado na figura 7.

Figura 7: Microestrutura do aço 22MnB5.



Fonte: Adaptado de Naderi, 2007.

3.5. Aço CR4.

O aço CR4, também conhecido como DC01 1.0330, é um material laminado a frio, que por sua vez, foi um aço laminado a quente que teve mais processamento. O material é arrefecido à temperaturas ambientes e em seguida recozido. Com esse processo o aço sofre redução de espessura (EUROPEAN STEEL AND ALLOY GRADES, 2020). As características deste aço são:

- Resistência à tração: 270-410 MPa;
- Resistência ao escoamento mínimo: 280 MPa;
- Alongamento $L_0 = 80$ mm: 28% e;
- Dureza Vickers (HV): 105.

3.6. Revestimento.

O contato com o ar atmosférico durante a transferência para a prensa de estampagem, pode causar oxidação do aço. Para evitar esses problemas, o aço é protegido com revestimentos metálico. O revestimento metálico mais aplicado no aço 22MnB5 é o Al-Si, que é depositado por imersão a quente (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

O banho compreende cerca de 10% de silício e o restante é alumínio. O revestimento é conhecido por fornecer uma grande resistência à corrosão e é o mais importante entre as ligas, principalmente por sua alta fluidez, baixa contração nos fundidos, boa soldabilidade, fácil brasagem e seu baixo coeficiente de expansão térmica (GUI, 2014).

Segundo Gui (2014) a microestrutura deste revestimento, consiste de uma fase primária de alumínio (fase α) ou de silício (fase β) e de uma estrutura eutética exibindo a fase β . Assim a dureza das partículas de silício promove o aumento da resistência ao desgaste destas ligas.

A quantidade de revestimento necessária depende da aplicação final da chapa. Normalmente o aço laminado a frio é revestido e esse revestimento normalmente é realizado por zincagem e é aplicada por galvanização. O zinco na maioria dos casos atua como protetor contra o ataque corrosivo e também como protetor galvânico, devido ao fato de ser eletroquimicamente mais ativo do que o aço (SSAB, 2020).

Os aços com revestimento metálico podem ser unidos por várias técnicas de soldagem, incluindo diferentes métodos (resistência, a laser e a arco elétrico). Porém é necessário o controle da espessura da camada de revestimento. A soldagem de materiais com revestimento metálico exige uma corrente um pouco maior, devido a uma resistência de contato menor (SSAB, 2020).

3.7. Reparo em aço martensítico.

Um reparo estrutural de qualidade é necessário para manter a resistência e as propriedades do componente e também para garantir a restauração do veículo ao

desempenho original, com durabilidade e nível de proteção contra futuras colisões. Para isso é necessário qualificação da mão de obra (ANDERSON, 2017).

De acordo com Catterall (2018), os aços endurecidos por têmpera são normalmente produzidos por ciclos térmicos não tradicionais e contêm constituintes microestruturais, como a martensita, cujas propriedades mecânicas podem ser alteradas pela exposição a temperaturas elevadas, ou seja, o reparo desse material é desafiador.

A sensibilidade a temperaturas de retrabalho pode alterar o comportamento mecânico durante a soldagem, afetando seriamente o desempenho estrutural dos componentes. Sendo que é indispensável que o reparo tenha a mesma qualidade que o fabricado pela montadora (CATTERALL, 2018).

Segundo Anderson (2017), aços martensíticos têm resistência à tração muito alta e são produzidos pela transformação da austenita no processo de estampagem a quente ou durante o resfriamento (têmpera). Esses aços são caracterizados por uma matriz martensítica contendo mínimas quantidades de ferrita e/ou bainita, conforme mostrado na figura 8.

Figura 8: Microestrutura do aço martensítico.

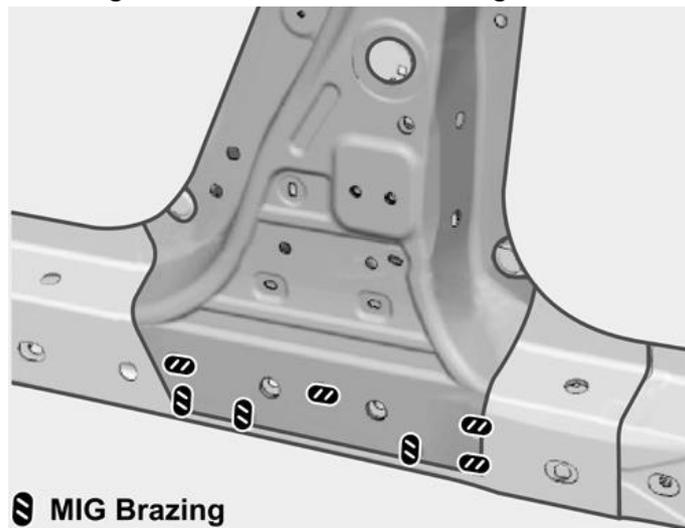


Fonte: Catterall, 2018.

De acordo com as informações de serviço da Honda (2013), afirmam que se as peças classificadas para 1.500 MPa estiverem danificadas, elas devem ser substituídas conforme especificação do fabricante. A soldagem a ponto é o método de fixação recomendado pela maioria das montadoras, no entanto, a brasagem MIG deve ser feita em peças de aço de 1.500 MPa em locais de difícil acesso para as garras.

Além da coluna B, a brasagem MIG também é usada para anexar outras peças estruturais como a coluna A e C, pois essa categoria de união há pouca entrada de calor no metal de base, uma zona termicamente afetada pelo calor menor e mínima presença de respingos no cordão. A figura 9 ilustra os locais onde a brasagem MIG é indicada de acordo com as recomendações de serviço da Honda (2013).

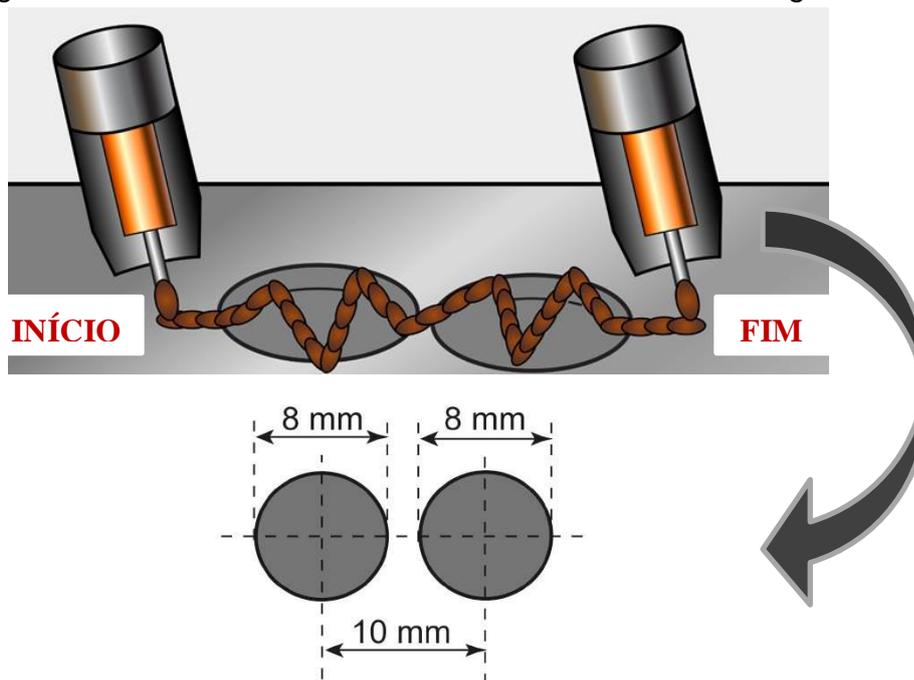
Figura 9: Coluna B e a brasagem MIG.



Fonte: Catterall, 2018.

A brasagem MIG é mais frequentemente feita em fendas, porque é um processo de adesão e não de fusão. As especificações da Honda (2013) mencionam dois furos no lugar de oblongo. A figura 10 ilustra as dimensões necessárias para o furo circular regular o e padrão de preenchimento. O procedimento exige a perfuração de dois furos de 8 mm (diâmetro interno), lado a lado, com uma medição de centro a centro de 10 mm.

Figura 10: Preenchimento e dimensões do furo circular regular.



Fonte: Adaptado de Honda, 2013.

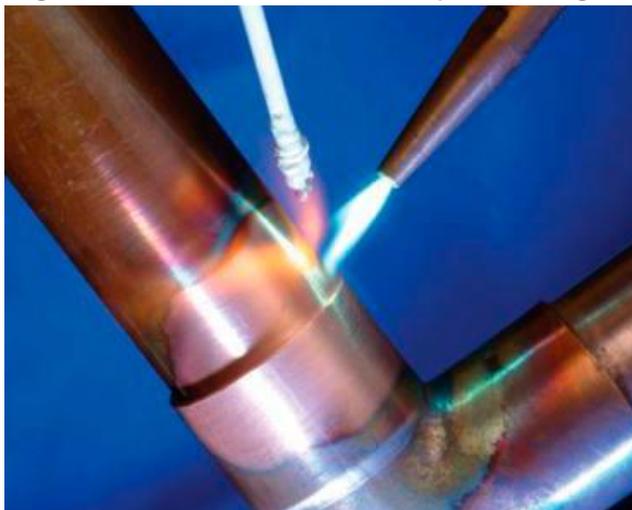
3.8. Brasagem.

Segundo Batalha (2003), um dos processos mais antigos com o principal objetivo de unir dois ou mais materiais é a brasagem. A brasagem até agora é muito utilizada pela indústria com diversas finalidades e aplicações, por ser capaz de unir materiais de composição dessemelhante.

Esse processo tem como principal característica a união de dois ou mais materiais por meio do uso de um metal de adição, denominado de arame, que normalmente possui uma temperatura de fusão superior ou igual a 450°C, porém o mesmo deve ter ponto de fusão menor que o do material de base (BATALHA, 2003).

A figura 11 ilustra o processo de brasagem no qual além de não ocorrer fusão do metal de base, a adesão ocorre pela adição do metal de adição que preenche a junta pela ação da capilaridade, ou seja, o arame em estado líquido preenche as lacunas entre os metais de base (CORREIA, 2017).

Figura 11: Processo de união por Brasagem.



Fonte: Correia, 2017.

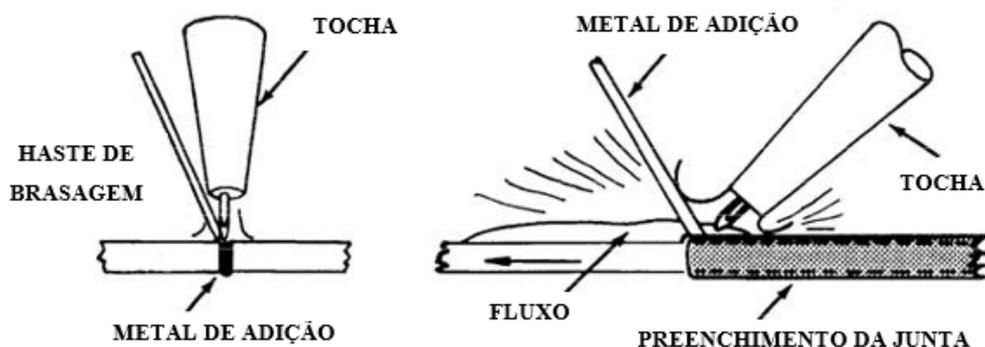
Segundo Batalha (2003), para manter qualidade da união brasada, deve ocorrer molhabilidade entre o material de base e o material de adição (arame). Para que ocorra a plena molhabilidade, é preciso que a superfície do metal de base esteja totalmente eximido de óxidos, graxas e qualquer categoria de sujeira. Além de uma superfície isentas de inclusões, existem outras condições para que ocorra a molhabilidade, sendo elas:

- A temperatura da área de junção deve ser igual à temperatura do material de brasagem fundido;
- É necessário que haja limpeza da superfície e;
- Gás de proteção, meio fluxante ou vácuo.

Também deve ter um espaçamento entre os materiais a serem unidos para que o material de adição penetre de forma uniforme. Todavia, é necessário um controle rígido desse espaçamento, pois, se a distância for pequena, pode ocorrer um preenchimento parcial da junta, porém, se o espaçamento for muito grande, o processo será lento, contribuindo para o aparecimento de bolhas, sujeiras e óxidos (BATALHA, 2003).

A figura 12 ilustra o processo de brasagem onde ocorre algumas fases importantes, sendo elas: aquecimento da área de união; ativação do gás de proteção; fusão meio de brasagem; molhamento do material de base e a formação de solução sólidos.

Figura 12: Processo de brasagem.



Fonte: Adaptado, Batalha, 2003.

Segundo Batalha (2003), no processo de brasagem é importante ajustar a tocha para uma chama neutra, isso entregará um resultado melhor em condições normais. A aparência clara do fluxo indica que é hora de começar a adicionar o metal de adição (arame). O calor da junta é que deve fundir o metal de adição.

Quando a temperatura, a posição e o espaçamento são adequados, o metal de adição (arame) se espalha sobre a superfície da junta por atração capilar. O fluxo deve ser interrompido após o metal de adição cobrir completamente a superfície da junta. É necessário aguardar o resfriamento total para remover os suportes ou grampos. O processo de brasagem possui até agora um enorme número de aplicações na indústria, sendo elas (CORREIA, 2017):

- Junção de metais dissimilares;
- União de peças de pequena espessura;
- União de materiais tratados termicamente e;
- União metal-cerâmica.

A maior diferença entre a soldagem e a brasagem é de que o segundo processo apresenta um fluxo de menor aporte de calor. Sendo assim, o processo de brasagem apresenta algumas vantagens em relação aos processos de soldagem convencional (MICALLI; BATALHA; RAZERA, 2002):

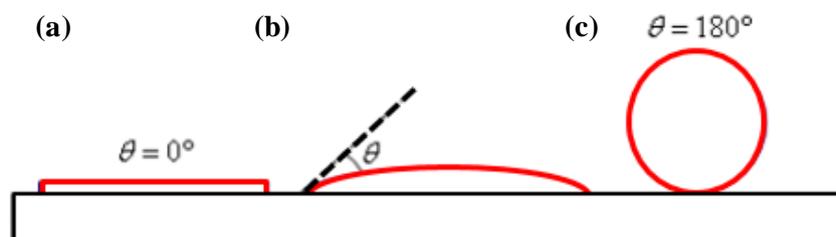
- Menor aporte de calor porém o processo é mais lento;
- O metal de adição (arame) no geral apresenta baixa tensão residual;
- A união possui resistência mecânica adequada;
- O maquinário do processo é simples e de fácil utilização e;
- Une materiais frágeis sem necessidade de pré-aquecimento.

Segundo Correia (2017) outro fator importante na brasagem, é a escolha do metal de adição (arame), que deve ser feita em função de alguns fatores como, o metal de base, o método de aquecimento e do desenho da junta. Além desses fatores, o metal de adição deve ter uma temperatura de fusão adequada, boa molhabilidade, boa fluidez e especificações mecânicas compatíveis com a aplicação da união.

3.9. Umectação ou molhabilidade.

Segundo Okimoto (2005), a capacidade de uma fase líquida espalhar-se sobre a superfície de um sólido é chamada de molhabilidade. A figura 13 ilustra uma representação esquemática com três casos do grau de molhabilidade, onde a fase líquida representa o metal de adição fundido e a superfície de um sólido representada pelo material de base.

Figura 13: Condições de molhabilidade de uma superfície.



Fonte: Adaptado de Okimoto, 2005.

Em (a) o efeito da alta molhabilidade ocorre quando o metal de adição fundido se espalha por completo sobre a superfície. Nesse primeiro caso, a molhabilidade é perfeita, e o contato entre a fase líquida e a superfície da fase sólida é a maior possível. Na brasagem, quando a molhabilidade é completa a união terá maior resistência mecânica.

Já em (b) o efeito da molhabilidade é parcial e o espalhamento do metal de adição fundido sobre a superfície do material base é aparentemente limitado. A molhabilidade moderada existe contato físico entre a fase líquida e a fase sólida, o que permite a união entre os materiais, porém a resistência mecânica pode ser prejudicada.

Em (c) há baixa molhabilidade e o fundido não apresenta nenhuma tendência ao espalhamento sobre o substrato sólido e não molha a superfície. Na brasagem, a baixa molhabilidade não permite que ocorra a união entre os materiais de base.

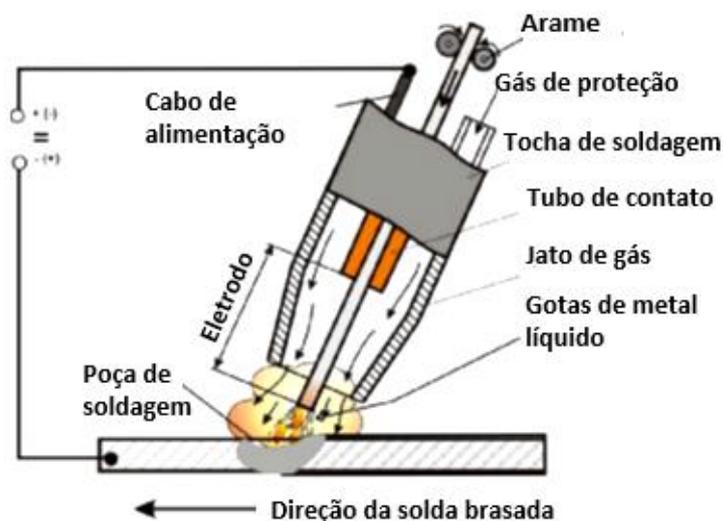
De acordo com Batalha (2003), na brasagem, o efeito físico da molhabilidade de um metal de adição sobre um material base, dependerá de inúmeros fatores, sendo eles:

- Efeito da capilaridade: quando um substrato é molhado por uma fase líquida ocorre o efeito físico da capilaridade. Após ocorrer a molhabilidade, a fase líquida tende a subir acima do nível normal através de efeito capilar. A capilaridade é maior quanto menor for o espaçamento entre os materiais de base.
- Espaçamento: o preenchimento do espaçamento entre os materiais base depende também da capacidade do metal de adição fundido aplicar-se os conceitos da molhabilidade. O enchimento é mais fácil quando a folga é menor, porém a redução excessiva do espaçamento acarreta dificuldades da atuação do fluxo no processo de brasagem.

3.10. Brasagem MIG.

No processo brasagem MIG, o material de adição é em forma de arame e é alimentado de forma contínua, já o arco elétrico é protegido por uma atmosfera de gás inerte, geralmente é utilizado o argônio (Ar). A figura 14 ilustra o esquema representativo do processo de brasagem MIG.

Figura 14: Esquema representativo do processo de brasagem MIG.



Fonte: Pikuła; Pfeifer; Mendakiewicz, 2014.

Esse processo de união se tornou adequada para a junção de chapas finas de aço carbono destinadas à indústria automobilística, pois para evitar problemas com corrosão, a maioria das chapas utilizadas nos veículos são revestidas a base de Zn, e a técnica brasagem MIG aquece o material de adição de modo que o Zn é vaporizado parcialmente (HARRIS, 2015). Assim, o processo apresenta às seguintes vantagens:

- Menor distorção por utilizar menor quantidade de calor;
- É indicado para união de metais diferentes;
- A resistência obtida é adequada para muitas finalidades automotivas;
- Permite aplicação em diversas posições de soldagem e;
- Preserva a camada de revestimento inibindo a corrosão.

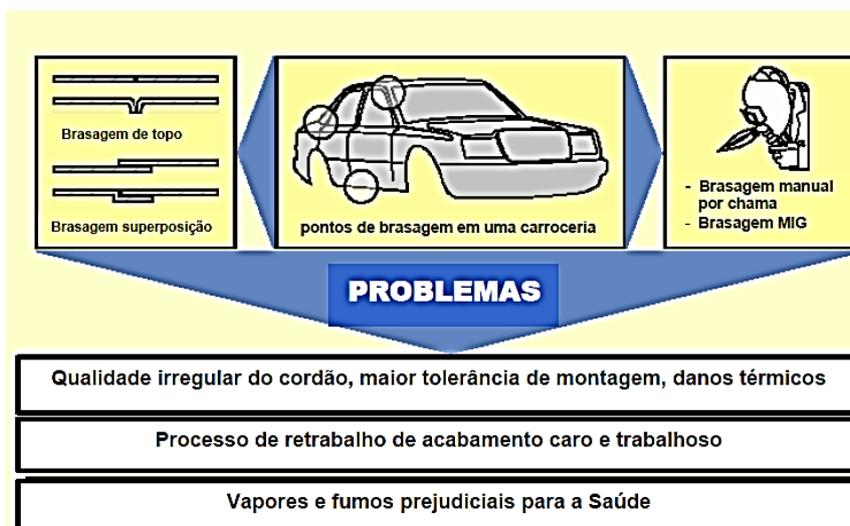
A entrada de calor mais baixa queima uma quantidade mínima da proteção contra corrosão do revestimento de zinco. Geralmente a temperatura de fusão do fio do eletrodo de soldagem convencional é mais alta do que a temperatura de evaporação do zinco 910°C, fazendo com que o zinco vaporize (HARRIS, 2015).

À medida que os materiais automotivos ficam mais finos, a brasagem MIG se torna mais crítica nas operações de fabricação de automóveis. O ponto de fusão inferior do próprio metal de adição nos fornece a capacidade de operar nesses materiais sem desgaste ou outros defeitos possíveis.

Embora a brasagem MIG não seja um processo de fusão como a soldagem MIG convencional, a quantidade de metal de adição que adere à superfície dos metais básicos e flui entre os metais fornece a união adequada. O custo é uma grande desvantagem da brasagem MIG. O metal de adição de bronze silício é baseado em cobre, por isso é significativamente mais caro do que um metal de adição de aço tradicional (HARRIS, 2015).

A figura 15 ilustra a localização, posição e categoria de brasagem que pode ser empregado pela indústria automotivas. Na mesma figura é possível visualizar os problemas que podem ocorrer pela aplicação deste processo nas carrocerias.

Figura 15: Brasagem na fabricação de carrocerias.



Fonte: Batalha, 2003.

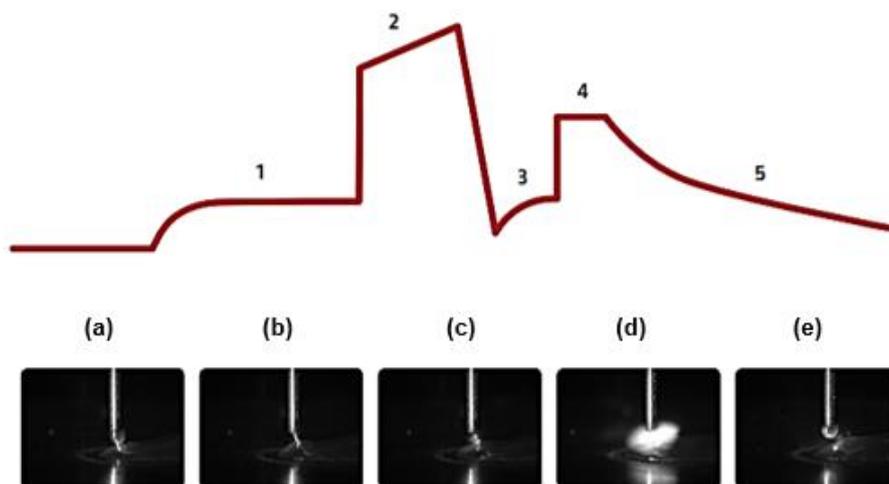
3.10.1. Sistema STT Braze.

Uma vantagem da brasagem MIG é que ela pode ser realizada usando equipamento de soldagem convencional. Para tornar o trabalho ainda mais fácil, existem programas de soldagem para unir materiais finos usando brasagem MIG. Este é o caso do sistema STT Braze (patente da empresa Lincoln *Electric*), com base em uma plataforma tecnológica.

Um dos maiores desafios na brasagem MIG são os respingos, pois o metal de adição tem uma temperatura de fusão muito baixa, qualquer respingo que resulte do arco irá aderir à peça, ao ferramental e a outros equipamentos, fazendo com que os trabalhos sejam executados com menos eficiência (LINCOLN ELECTRIC, 2019).

Os problemas com respingos é que precisam ser limpos e isso causa perda de tempo de inatividade devido à limpeza das ferramentas de trabalho. A figura 16 ilustra a utilização do sistema STT braze para reduzir o número de peças que exigiam trabalho de limpeza secundária. O sistema STT braze foi projetado para chapas finas, e o resultado é estável, com poucos respingos.

Figura 16: Processo STT braze.



Fonte: Lincoln electric, 2019.

Na figura 16 (a) o material de adição faz contato inicial com o material de base e a corrente é mantida constante. Já em (b) à medida que o arame (metal de adição) desce, um circuito especial determina que o curto está prestes a começar. Em seguida ocorre (c) a troca rápida reduz a corrente no instante em que a gota se desprende, reduzindo os respingos. Em (d) a corrente e o comprimento do arco são pré-definido. Por fim (e) o tamanho da poça fundida é consistente nesse processo, mantendo uma junta uniforme (LINCOLN ELECTRIC, 2019).

3.10.2. Parâmetros para brasagem MIG.

Entender os parâmetros dos processos de união é de extrema importância, as variáveis como, corrente; voltagem; velocidade de deposição; posição da solda; categoria de gás e; vazão, influenciam muito nos resultados finais da junção que se deseja obter. Porém, quando os parâmetros são controlados de forma eficiente pelo soldador, os metais de adição fornecem uniões de excelente qualidade (MICALLI; BATALHA; RAZERA, 2002).

De acordo com Harris (2015), na brasagem MIG, em posições diferentes da horizontal plana, é recomendado que se utilize o método de deposição por curto-circuito, desta forma, a tensão deve ficar entre 15V e 25V, a corrente entre 40A e 200A, e a velocidade de deposição deve ser menor. Isso possibilita que o corção seja formado de forma homogênea.

Outro parâmetro importante a ser acompanhado na brasagem MIG é a inclinação da tocha, pois, a corrente de ar no local de união pode arrastar o gás de

proteção, isso pode acarretar na formação de óxidos na poça de metal fundido, levando a problemas com porosidade e conseqüentemente perda da resistência mecânica da junta soldada (MICALLI; BATALHA; RAZERA, 2002).

3.10.3. Material de adição.

Para determinar o material de adição na técnica brasagem MIG é importante lembrar que esse processo possui as mesmas características da brasagem. Desta maneira, o arame a ser utilizado também deve possuir ponto de fusão inferior ao do material de base e permitir que a zona de ligação seja caracterizada pela formação de uma interface, entre o material de base e o metal de adição (SCOTTI; MORAIS; VILARINHO, 2006).

De acordo com Batalha (2003), o elemento cobre (Cu) é utilizado com frequência no processo de brasagem convencional, por apresentar facilidade de formar ligas. Como o ponto de fusão do cobre é de 1083,62°C, a temperatura líquida das ligas deve ser abaixo do ponto de fusão dos aços, para que esses possam ser utilizados pela indústria automobilística.

O material de adição mais utilizado na brasagem MIG é o arame CuSi3, onde suas especificações estão nas norma americana AWS A5.7 e na alemã DIN 1733. De acordo com as normas os valores de resistência a tração desta liga estão entre 330 MPa à 370 Mpa, alongamento cerca de 40% e dureza de 80 HV. Essa liga tem como base o cobre, onde o principal elemento de adição é o silício com porcentagens entre 2,8% a 4%.

3.10.4. Gás de proteção.

Conforme a norma AWS A5.32, os gases de proteção geralmente utilizados nos processos de soldagem, são classificados como gases Inertes ou Ativos. Os gases inertes são aqueles que não reagem quimicamente com o metal de adição, por exemplo, o argônio (Ar) e o hélio (He).

Já os ativos são aqueles que reagem quimicamente, porém de maneira moderada e controlada, quem utiliza desses gases realiza o planejamento técnico para não prejudicar o trabalho, como por exemplo, dióxido de carbono (CO₂), o oxigênio (O₂), o nitrogênio (N₂) e o óxido de nitrogênio (NO) (SCOTTI; MORAIS; VILARINHO, 2006).

3.11. Ensaio mecânicos.

Segundo Souza (1982), os ensaios mecânicos são utilizados para determinar as propriedades de um material. Esses ensaios geralmente são destrutíveis, pois fazem com que o corpo de prova tenha sua completa ruptura. A escolha do ensaio mecânico mais adequado para cada aço depende da finalidade do componente, dos esforços que esse material irá sofrer e das propriedades que se deseja medir.

3.11.1. Ensaio de dureza.

No teste de dureza os métodos usados para caracterizar o material são conhecidos como Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop. A propriedade denominada de dureza, pode ser demonstrada através de várias escalas que estão vinculadas a pressão aplicada pelos indentadores para deformar a superfície do corpo de prova (SOUZA, 1982).

Segundo Callister (2012), em relação aos metais, a propriedade dureza está diretamente relacionada à tensão de escoamento em relação a deformação causada pela endentação. Tenacidade, resistência ao desgaste e usinabilidade, são propriedades que podem ser estimadas pelo ensaio de dureza. O teste de dureza é talvez o ensaio mais simples e de mais baixo custo para caracterização dos materiais.

O ensaio de dureza Vickers visa calcular a resistência de um material ao endentar o mesmo sob análise, com um indentador de diamante, em formato que se assemelha a de uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de 136° , usando uma carga de 1 até 100 kgf (SOUZA, 1982).

Durante o ensaio, a carga é aplicada normalmente em um espaço de tempo entre 10 a 15 segundos, sendo considerado um processo rápido. Com o uso do microscópio são medidas as duas diagonais da endentação deixadas na superfície do material depois da aplicação da carga (CALLISTER, 2012). O cálculo da área da superfície inclinada da endentação, é dado pela equação 1.

$$HV = \frac{1.8544 \times F^2}{D^2} \quad (1)$$

Onde: HV = valor da dureza *Vickers*;

F = é a carga em kgf;

D = é a média aritmética entre as duas diagonais, d1 e d2 em mm.

De acordo com a equação 1, o valor do ensaio da dureza Vickers é o quociente dividindo a carga (em kgf) pela área da endentação.

3.11.2. Ensaio metalográfico.

Segundo Rohde (2010), a metalografia é um ensaio considerado um dos controles de qualidade de um material. O ensaio de metalografia visa relacionar a estrutura do material com as suas propriedades físicas, com o seu processo de fabricação, com o desempenho de suas funções e entre outros. Este ensaio pode ser macrográfico ou micrográfico.

Segundo Callister (2012), o ensaio micrográfico é realizado por um microscópio, com a finalidade do estudo dos materiais, onde pode ser observado as fases presentes e identificar a característica da granulação do material, o teor de carbono presente, entre outras propriedades presentes na amostra.

3.11.3. Ensaio de tração.

O ensaio de tração consiste em aplicar cargas de tração em um corpo de prova, do material a ser caracterizado, até a sua total ruptura. Este ensaio é amplamente utilizado na indústria automobilística, por conta da necessidade de conhecer a qualidade e característica mecânica dos materiais (CALLISTER, 2012).

Segundo Garcia (2010), quando a carga máxima de resistência do material é atingida, inicia o aparecimento do fenômeno de estricção. A quebra ou ruptura do corpo de prova se dá na região de seção transversal mais estreita, porém, pode ocorrer a quebra em outra região se houver um defeito interno no material que leve a ruptura.

De acordo com Callister (2012), no ensaio de tração o corpo de prova é preso pelas garras de fixação do maquinário. A máquina de tração é projetado para alongar o corpo de prova a uma taxa constante. Mas o que importa para determinar as propriedades do material é a relação entre a tensão e a deformação.

Pode ser dito que a tensão corresponde à força dividida pela área da seção sobre a qual a força é aplicada (CALLISTER, 2012). Com a aplicação da equação 2 abaixo, é possível encontrar os valores da tensão e fazer o gráfico conhecido como tensão-deformação, como é demonstrado na figura 17.

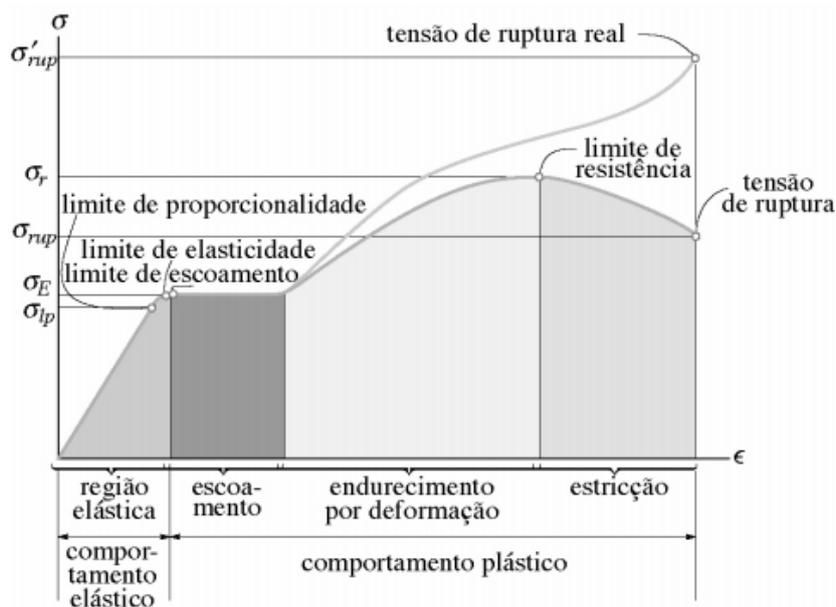
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

Onde: σ = tensão (MPa, Kgf/cm², Kgf/mm², N/ mm²);

F = força (carga) aplicada (N ou lbf);

A = área da seção reta transversal (cm², mm²).

Figura 17: Diagrama tensão x deformação convencional.



Fonte: Buffoni, 2015.

Fratura é denominada como a fragmentação de um corpo sólido em várias partes, quando submetido a ações de tensão, e pode ser considerada existentes quando ocorre nucleação e propagação de uma trinca. As fraturas podem ser classificadas em dúctil ou frágil (CALLISTER, 2012).

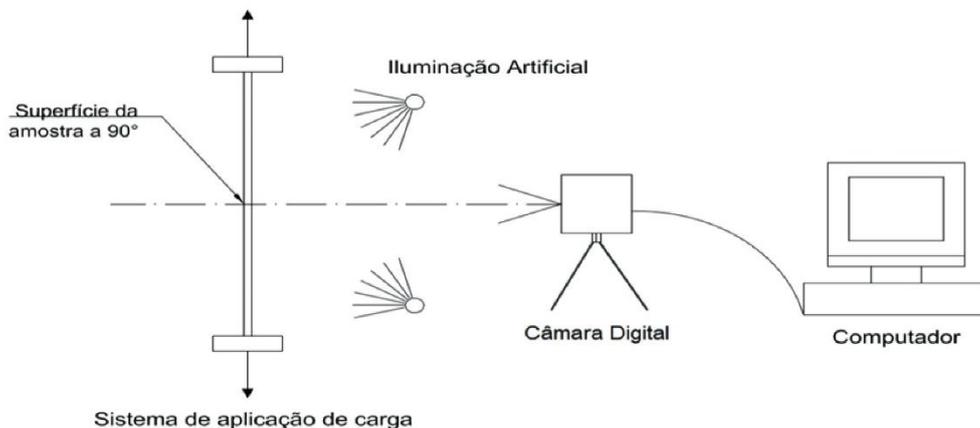
Quando a fratura é caracterizada com dúctil, ocorre o aparecimento de deformação plástica antes e durante a propagação da trinca. Por outro lado, a fratura quando é frágil, é caracterizada pela propagação da trinca ser de forma rápida (GARCIA, 2010).

3.11.4. Correlação de imagens digitais (CID).

A correlação de imagens digitais (do inglês Digital Image Correlation Technology – DIC) é uma técnica de ensaio óptico idealizado para determinar inumeros campos de deslocamento e de deformação (NUNES, 2007). A figura 18

ilustra a necessidade de um sistema óptico para capturar as imagens de uma amostra, antes, durante e depois de sofrer esforços de cargas.

Figura 18: Esquema representativo da técnica de correlação digital de imagens.



Fonte: Adaptado, QUIAN; XIE; ASUNDI, 2009.

De acordo com Berfield (2007), após os ensaios os padrões são processados e por meio de algoritmos de correlação de imagens é possível analisar os campos de deformação e deslocamentos.

A correlação de imagens digitais é realizada independentemente do material da amostra, podendo ser: metal; polímeros ou compósitos. Os modelos matemáticos que são utilizados, podem ser, uma função, um grupo ou uma equivalência (NUNES, 2007). Desta forma, os modelos matemáticos dos softwares dessa técnica apresentam algumas vantagens, como por exemplo:

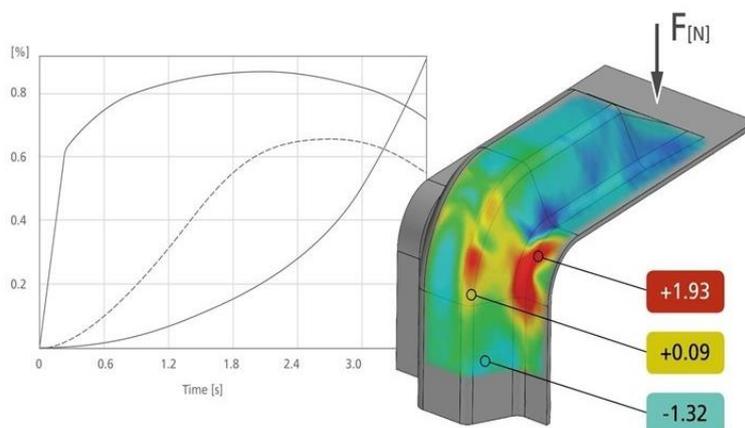
- Geração de análise e gráficos de deformação;
- Utilização de extensômetro virtual;
- Podem ser utilizadas iluminação ambiente e;
- O método sofre pouca influência à vibração.

3.11.5. Software para Correlação de imagens digitais (CID).

Existem alguns software para correlação de imagens digitais, dentre eles o programa GOM correlate da empresa Vtech. Ele desenvolve uma correlação de cores com a deformação da amostra durante o ensaio. Nele é possível alterar alguns fatores dependendo do material e do ensaio, com seus diversos comportamentos e

finalidades (VTECH, 2016). A figura 19 ilustra os padrões de cores, sendo os tons quentes com as maiores deformações e as cores frias com as menores deformações.

Figura 19: Correlação de cores x deformação da amostra.



Fonte: Vetch, 2020.

O software começa analisando as áreas de imagem por marcadores de ponto de referência, esses pontos são padrões que devem ser aplicados na superfície da amostra. O GOM utiliza das orientação desses pontos de referência e o contraste no limite entre as cores para identificação da deformação que ocorreu na amostra (VETCH, 2016).

A distribuição aleatória dos padrões ao longo da imagem assegura que uma faceta possa ser identificada e sua deformação auxilia na leitura do programa. A amostra ideal tem um padrão distinto e bem disperso. Todavia, mais fatores devem ser considerados (SUTTON; ORTEU; SCHREIER, 2019), por exemplo:

- O desfoque da imagem;
- Distorções da perspectiva e;
- O deslocamento da binarização.

A versão oferecida para estudantes gratuitamente (*freeware*) do software realiza uma operação de correlação bidimensional entre dois momentos diferentes das imagens das faces. Esta operação de correlação fornece deformação nas duas direções linearmente X e Y (VETCH, 2016).

No software a operação é automatizada para permitir a análise das deformações de cada face e em toda a superfície durante o período de ensaio. Após esta operação, uma interpolação bidimensional dos resultados permite a geração

tanto de um mapa de cores das amostras bem como as curvas de deformação (BERFIELD, 2007).

Pela sua versatilidade, o software GOM correlate pode ser utilizado para medir as deformações no plano, combinado com mapeamento de imagem, como por exemplo, campos vetoriais, ângulos, acelerações, entre outros. Assim sua aplicação na indústria é ampla, como por exemplo:

- Para ensaios de tração e flexão;
- Avaliação da zona de trinca;
- Ensaios de cisalhamento de acordo com a ASTM;
- Análise de movimento em biomecânica e;
- Em teste de impacto.

3.11.6. Preparação de amostras para correlação de imagens digitais.

A preparação das amostras para o ensaio de correlação de imagens digitais é complexo, uma vez que, estruturas orientadas como linhas limitam a determinação dos vetores de movimento do software e podem levar a perda da qualidade da leitura, pois os padrões utilizados aderem à superfície e deformam-se com ela (SUTTON; ORTEU; SCHREIER, 2019).

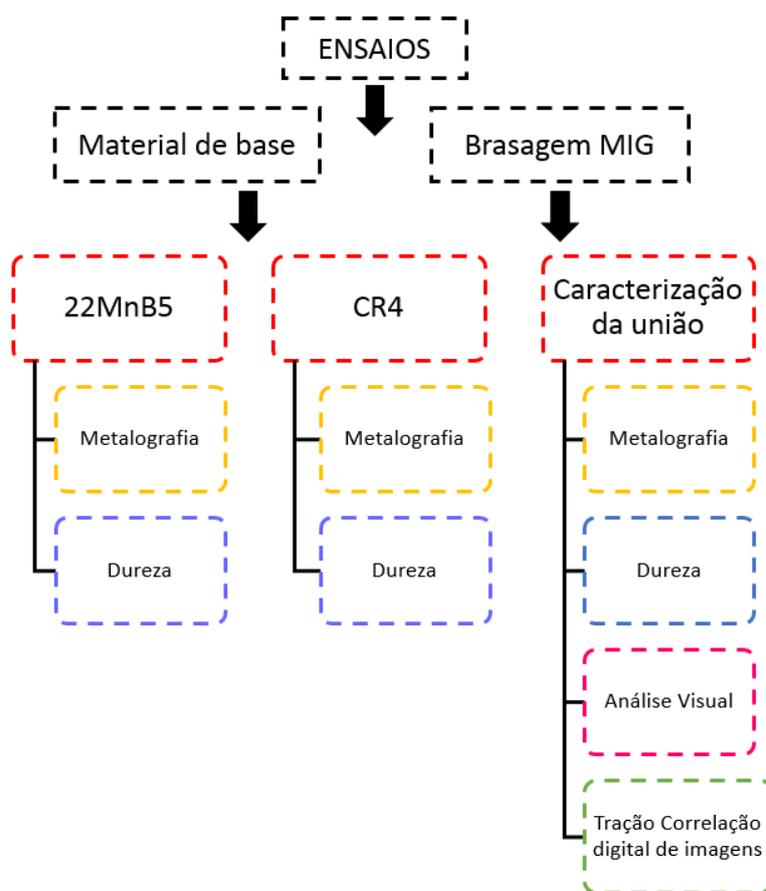
Dessa forma, a textura ideal da superfície do corpo de prova, deve ter uma orientação preferencialmente aleatória com elevado conteúdo de informações. Por outro lado, a repetição de texturas pode levar a problemas de registo incorreto do software (SUTTON; ORTEU; SCHREIER, 2019).

Nesse caso, os requisitos mínimos para uma boa leitura do software é utilizar texturas aleatórias, tais como o padrão de manchas formado por um *spray*, um jato de tinta e/ou padrões de manchas a laser e a necessidade de contraste entre o fundo e os pontos. Dois itens imprescindíveis para que o programa efetue a análise de correlação das imagens de forma satisfatória (BERFIELD, 2007).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a descrição dos materiais e métodos utilizados na etapa experimental, relativa à aplicação do processo brasagem MIG na união das amostras de PHS e CR4, utilizando a combinação de um único tipo de arame, duas recomendações de projeto (furo circular regular e furo oblongo regular) e um único gás de proteção. A figura 20 ilustra os materiais e métodos utilizados ao longo do presente trabalho e ilustra as etapas em que os ensaios foram realizados.

Figura 20: Materiais, métodos e etapas dos testes.



Fonte: Próprio autor.

4.1. Material de base.

Para a união por meio da brasagem MIG foram utilizados dois tipos de material de base, sendo eles:

- Aço 22MnB5: foram fabricadas para análise da brasagem MIG, amostras do aço 22MnB5, revestidas por Al-Si, tratadas termicamente (têmpera), com

espessura de 1,40 mm, nas dimensões 75x150 mm. Dados de composição química das amostras podem ser visualizados na Tabela 2.

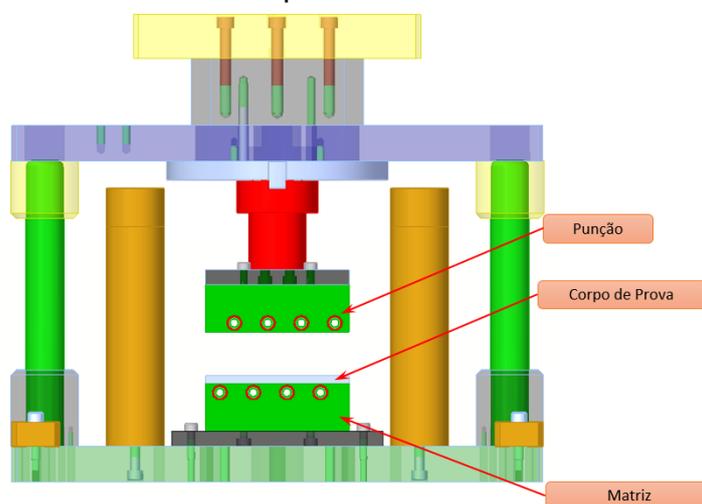
Tabela 2: Composição química do aço 22MnB5.

Composição Química	
Carbono- C (%)	0,22 - 0,25
Manganes- Mn (%)	1,20 - 1,40
Silício – Si (%)	0,20 - 0,30
Enxofre – S (%)	0,005 MÁX.
Alumínio - Al (%)	0,020 - 0,050
Cromo - Cr (%)	0,11 - 0,20
Boro - B (%)	0,0020 - 0,0035

Fonte: Gorni, 2010.

A Figura 21 apresenta de forma esquemática o ferramental projetado e fabricado para o processo de estampagem a quente. A ferramenta consiste de uma matriz e punção com canais de refrigeração.

Figura 21: Desenho esquemático do ferramental utilizado.

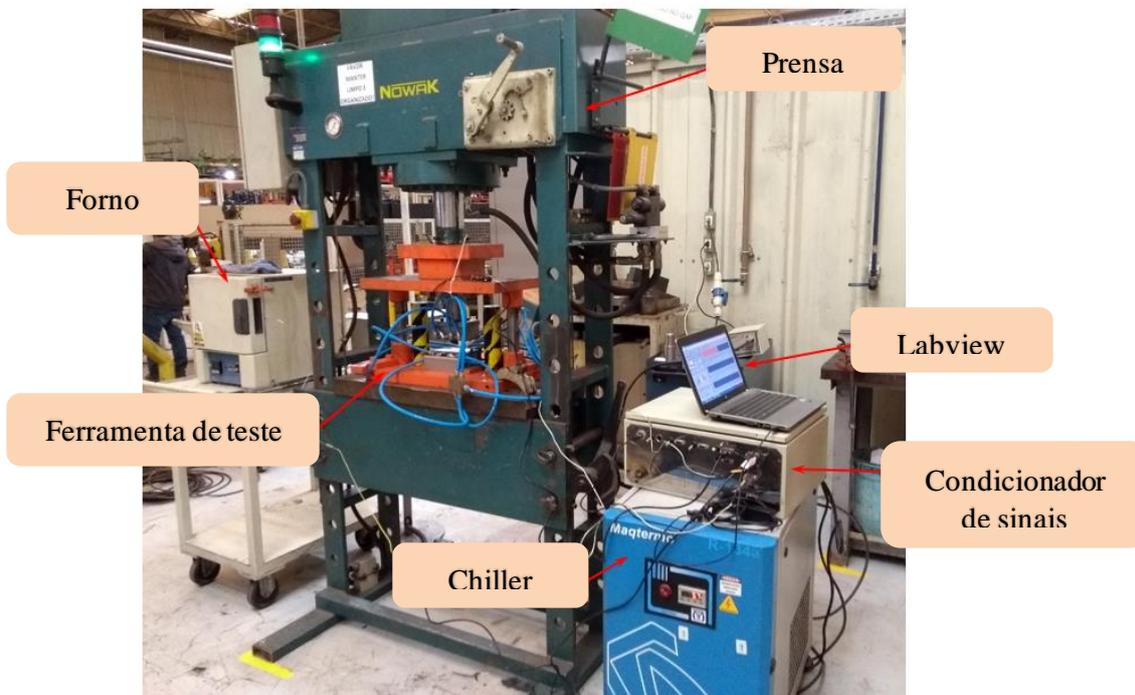


Fonte: Próprio autor.

Para a realização deste trabalho foi utilizado uma prensa hidráulica de 100T, modelo TM 100 do fabricante Nowak, um forno semelhante a mufla para altas temperaturas, modelo BF 51848A do fabricante Lindberg/Blue, um refrigerador de

água (chiller) modelo R134-a do fabricante Maqtermo. Detalhes do aparato utilizado para o teste podem ser visualizados na figura 22.

Figura 22: Detalhe dos equipamentos utilizados.



Fonte: Próprio autor.

É conhecido que para se evitar a formação bainítica e obter uma microestrutura 100% martensítica que é o esperado do processo de estampagem a quente, a taxa de resfriamento deve ser no mínimo de 27°C/s . A taxa de resfriamento pode ser acelerada usando um líquido de arrefecimento com uma baixa temperatura a fim de aumentar a diferença de temperatura entre o refrigerante e a ferramenta.

O tempo de transferência do blank do forno até a prensa deve ser reduzido o máximo possível, pois as perdas de temperatura do blank podem ser superiores a várias dezenas de $^{\circ}\text{C/s}$, o que permite que a exposição do aço não revestido ao ar atmosférico sob tais condições provoque sua imediata oxidação e descarbonetação, a qual é extremamente dura e promove o desgaste acelerado da matriz de estampagem. Nas variáveis do processo citadas acima, a tabela 3 resume os parâmetros do processo empregados neste estudo.

Tabela 3: Parâmetros do processo de estampagem a quente.

Amostra	Temperatura nos canais refrigeração [°C]	Transferência CP para ferramenta [s]	Vazão do fluido nos canais de refrigeração [l/min]	Pressão de contato [MPa]	Temperatura de encharque [°C]	Tempo de encharque [s]
1	5	< 7	12,6	18	950	5
2					900	10
3					900	5

Fonte: Próprio autor.

- Aço CR4: para análise da brasagem MIG, foram recebidas amostras do aço CR4, laminado a frio, revestido por zinco, com espessura de 0,6mm. Foram cortadas nas dimensões 75x150 mm. Na tabela 4 é possível visualizar a composição química do aço CR4.

Tabela 4: Composição química do aço CR4.

Composição Química	
Carbono- C (%)	0,12
Manganês - Mn (%)	0,6
Fósforo – P (%)	0,045
Enxofre – S (%)	0,045 MÁX.

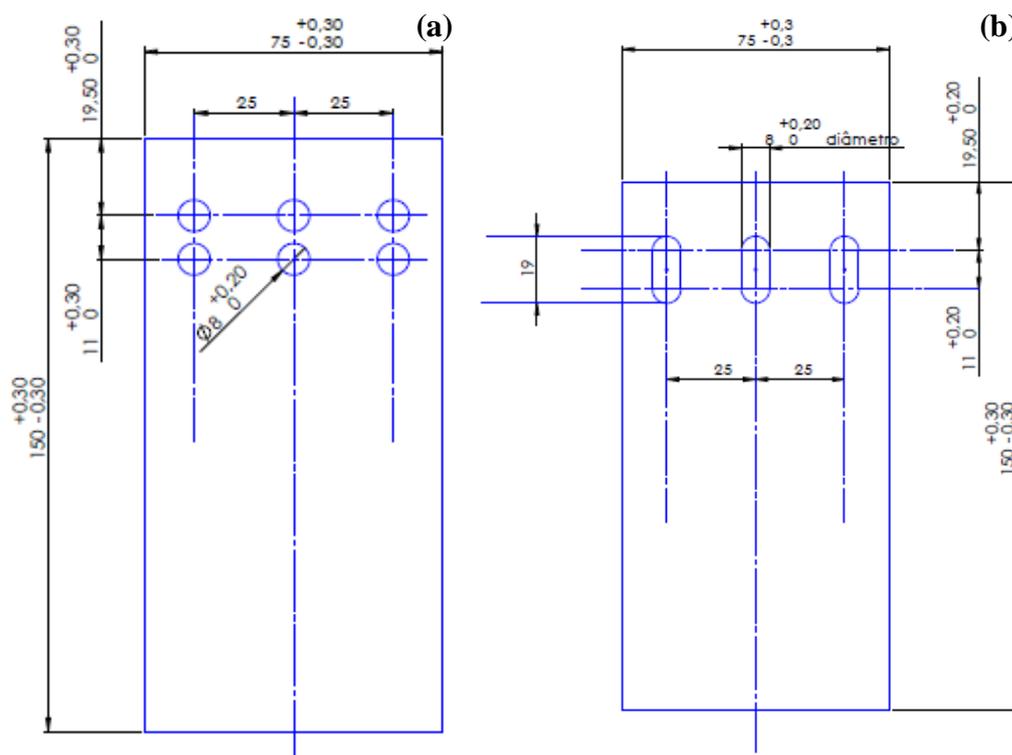
Fonte: European steel and alloy grades, 2020.

4.2. Corpos de prova.

Os corpos de prova foram desenvolvidos e desenhados em conformidade com as recomendações da norma AWS C3.3:2008, com aplicativo CAD, utilizando dois projetos, nomeados de: furo circular regular e Furo oblongo regular.

Também ficou definido que os cortes a *laser* seriam feitos nas amostras de CR4. Na figura 23 é possível visualizar as dimensões dos corpos de prova sendo, (a) Furo circular regular e (b) Furo oblongo regular.

Figura 23: Design furo (a) Furo regular circular e (b) Furo oblongo regular.



Fonte: Próprio Autor.

4.3. Dispositivo para união dos corpos de prova.

Para garantir simetria e similaridade de posicionamento, foi desenvolvido e construído, pelo próprio autor, um dispositivo específico para o processo de união. Na figura 24, é possível visualizar o dispositivo fabricado de aço e revestido de dacromet e suporte tempeado com fixação por parafusos allen 8.

Figura 24: Dispositivo desenvolvido para o processo de brasagem MIG.



Fonte: Próprio Autor.

4.4. Processo de união.

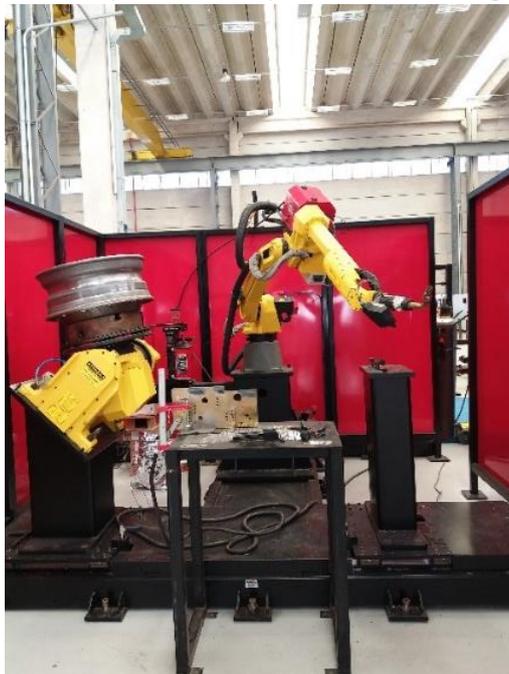
O processo de união dos corpos de prova pelo processo de brasagem MIG, foi realizado em parceria com a empresa Lincoln Electric, onde se utilizaram todos os equipamentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Incluindo a célula robótica, o material de adição e o gás de proteção.

4.5. Célula robótica

O processo de união ocorreu em uma célula robótica denominada de “*Power Wave*”, conforme figuras 25 e 26, onde o sistema é automatizado em uma plataforma de soldagem avançada.

O sistema é composto por uma máquina de solda, pela vazão do gás de proteção, pela alimentação do material de adição e por um módulo de controle dos parâmetros denominado de *STT Braze*. Os corpos de prova foram unidos na posição horizontal, porém não plana.

Figura 25: Maquinário do processo brasagem MIG.



Fonte: Próprio autor.

Figura 26: Controlador STT Braze.



Fonte: Próprio autor.

4.6. Parâmetro de soldagem.

Em conformidade com a norma AWS A5.31M os parâmetros de soldagem foram avaliados inúmeras vezes durante a fase de teste, até que os valores ideais fossem alcançados. O objetivo dos testes iniciais é garantir a melhor versão da união pela técnica brasagem MIG.

Para reproduzir os processos utilizados pela indústria automobilística, foi adicionado em alguns corpos de prova um espaçador com espessura de 0,8 mm entre as amostras de PHS e o CR4, com o objetivo de avaliar a penetração do material de adição.

Em todo o processo de união das amostras de PHS e CR4, foi utilizado como material de adição o arame sólido CuSi3, classificados segundo a Norma AWS A5.7 (ERCuSi-A).

Em todo o processo de união pela técnica brasagem MIG e em combinação com o material de adição utilizou-se o gás inerte de proteção argônio (Ar) puro, com vazão de 16 l/mim, conforme orientações da norma AWS A5.32.

4.7. Ensaio metalografico.

O ensaio de metalografia foi realizado para relacionar a estrutura interna do material com suas propriedades físicas. Também ficou dividido o ensaio de metalografia em dois subgrupos, sendo eles:

- *Macrografia:*

Ensaio foi realizado com uma ampliação de até 50 vezes, que visou observar o aspecto da superfície das amostras e ajudou a medir as dimensões e a molhabilidade, após preparo convencional. As imagens da macrografia, foram realizadas por meio do microscópio estéreo Digimicro, com resolução máxima de até 1280x1024, conforme figura 27. Para esse ensaio acontecer, foi necessário preparar as amostras de forma padrão seguindo as seguintes etapas:

- (a) Embutimento a quente com baquelite ;
- (b) Lixamento;
- (c) Polimento;
- (d) Ataque com Nital 5%.

Figura 27: Equipamento do ensaio de macrografia.



Fonte: Próprio autor.

- *Micrografia:*

O ensaio micrográfico consistiu em observar, com o auxílio de um microscópio conforme figura 28, as fases presentes nas amostras, como o tamanho dos grãos, as formas e a qualidade da união. Ainda foi possível verificar o tratamento térmico realizado e a camada de revestimento, bem como averiguar a presença de inclusões indesejadas ou outros defeitos microscópicos.

Figura 28: Equipamento do ensaio de micrografia.



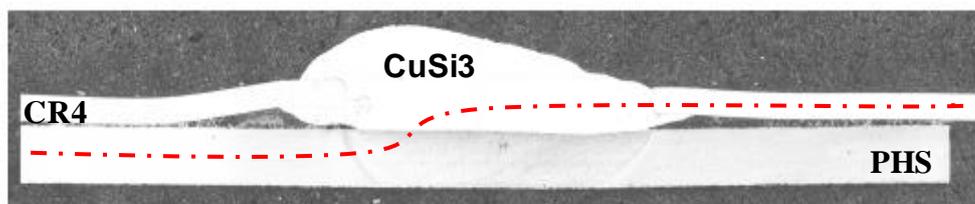
Fonte: Próprio autor.

4.8. Microdureza Vickers.

O ensaio de microdureza Vickers se baseou na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , sob uma determinada carga de 0,5 kgf, e uma distância entre pontos de $0,25 \mu\text{m}$. O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) deixada no corpo ensaiado.

Os pontos de microdureza foram realizados de forma a compreender toda a área de união, passando pelos três materiais: CR4, PHS e material de adição. A figura 29 ilustra a forma com que o ensaio foi realizado. O número de pontos também variou de acordo com o tamanho da amostra.

Figura 29: Esquema representativo do ensaio de microdureza.



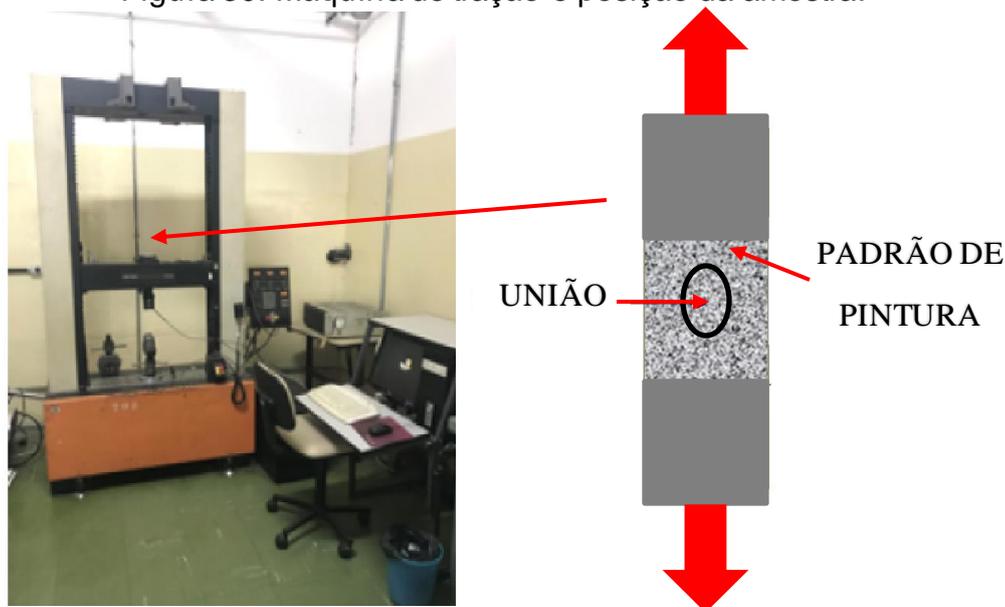
Fonte: Próprio autor.

Os pontos da microdureza, foram distribuídos de forma a analisar o material de base PHS (MB1), a zona termicamente afetada pelo calor do PHS (ZTA1), a zona fundida que representa o material de adição (ZF), a zona termicamente afetada pelo calor do CR4 (MB2) e o material de base CR4 (MB2).

4.9. Ensaio de tração/Correlação de imagens digitais (CID).

O ensaio de tração foi realizado na máquina universal da marca Instron, modelo 4400R. Capacidade máxima 10 toneladas, software Instron serie IX, velocidade máxima 500mm/min., equipadas com sensores para registrar a força e o alongamento do corpo de prova em função do tempo. A figura 30 mostra a máquina para ensaio de tração e a posição das amostras em relação ao equipamento.

Figura 30: Máquina de tração e posição da amostra.



Fonte: Próprio autor.

Os corpos de prova foram tracionadas no laboratório de ensaios mecânicos do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) - SP.

Foi realizado os ensaios de tração por cisalhamento nos corpos de prova do projeto furo oblongo regular P5.2 (sem espaçamento) e P8.3 (com espaçamento). Também nos corpos de prova do projeto furo circular regular P11.2 (sem espaçamento) e P14.2 (com espaçamento).

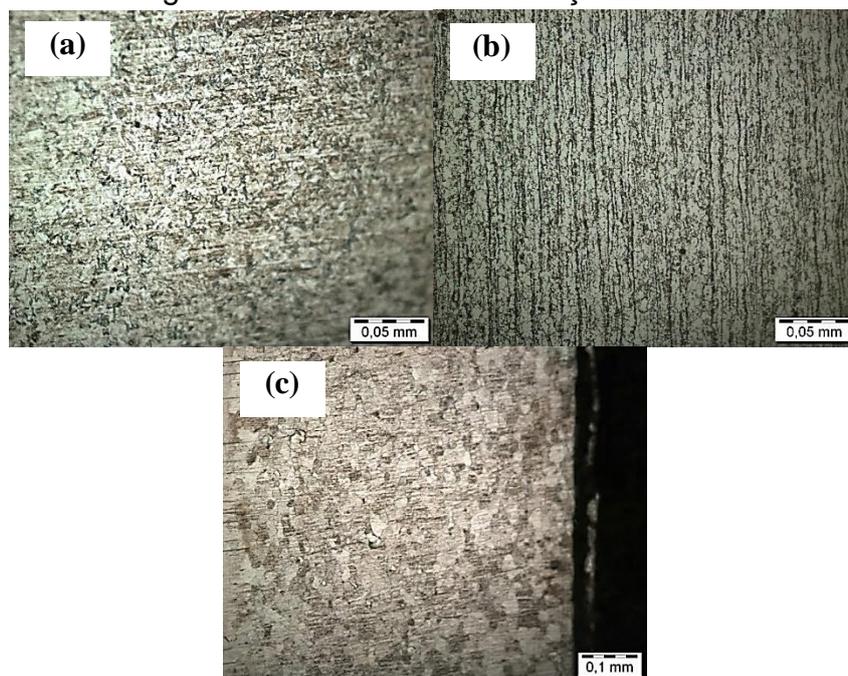
Para a correlação de imagens digitais, foi realizado uma pintura específica na superfície da peça, sendo utilizada uma tinta branca como fundo para dar contraste, aplicada de forma a cobrir toda a superfície do corpo de prova, sendo base da próxima tinta. Em seguida é adicionada a tinta preta, pulverizada em forma de névoa sobre a tinta branca, para geração dos pontos aleatórios. O software utilizado foi o GOM correlate *free* da empresa Vtech.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do material de base.

Os materiais de base analisados foram o CR4 e o aço 22MnB5, antes e após a estampagem a quente. Na figura 31 é possível analisar (a) a microestrutura do aço 22MnB5 antes do processo de estampagem, (b) 22MnB5 após a conformação a quente e (c) o aço CR4.

Figura 31: Microestrutura do aço 22MnB5.



Fonte: Próprio autor.

Conforme Altan (2006), antes do processo de estampagem a quente, o aço 22MnB5 é basicamente formado por áreas claras que representam a ferrita e as áreas escuras que correspondem a perlita. Desta forma, na figura 31 (a) é possível visualizar a micrografia da perlita com lamelas de cementita em uma matriz ferrítica na direção de laminação. Como o aço foi conformado abaixo da temperatura eutetóide, foi produzido uma perlita grosseira.

Também de acordo com Altan (2006), após o processo de estampagem a quente, o aço 22MnB5 é formado por uma matriz martensítica. Na figura 31 (b) é possível visualizar a microestrutura totalmente martensítica, devido ao endurecimento por têmpera. Como o carbono fica retido e não tem espaço para ele, ocorre uma expansão, gerando alta resistência mecânica e dureza.

O CR4 é basicamente formado por áreas claras que representam a ferrita e as áreas escuras, que correspondem a perlita. Deste modo, na figura 31 (c) é possível visualizar a microestrutura ferrita/perlita, onde pode ser observado os contornos de grão da amostra.

A tabela 5 ilustra os valores de dureza Vickers obtidos para a amostra do aço 22MnB5 antes do tratamento térmico. Devido ao tamanho da amostra foram realizados 30 pontos de microdureza, uma distância entre os pontos de 0,25 mm e com uma carga de 0,5 kgf.

Tabela 5: Resultados da microdureza do aço 22MnB5.

N°	Dureza	N°	Dureza	N°	Dureza
1	185	2	187	3	196
4	199	5	200	6	196
7	185	8	184	9	191
10	198	11	182	12	192
13	199	14	202	15	177
16	200	17	184	18	188
19	185	20	186	21	192
22	181	23	175	24	208
25	197	26	185	27	168
28	186	29	176	30	168

Fonte: Próprio autor.

De acordo com Gorni (2010), a dureza do aço 22MnB5 antes do processo de estampagem a quente, é em torno de 160 HV. Na tabela 4, os valores obtidos não estão na média dos valores encontrados na literatura. Também é possível associar a figura 31 (a) onde a matriz do aço 22MnB5 é ferrita/perlita.

Já na tabela 6, é possível visualizar os valores de dureza Vickers obtidos para a amostra de PHS. Devido ao tamanho da amostra foram realizados 30 pontos de microdureza, uma distância entre os pontos de 0,25 mm.

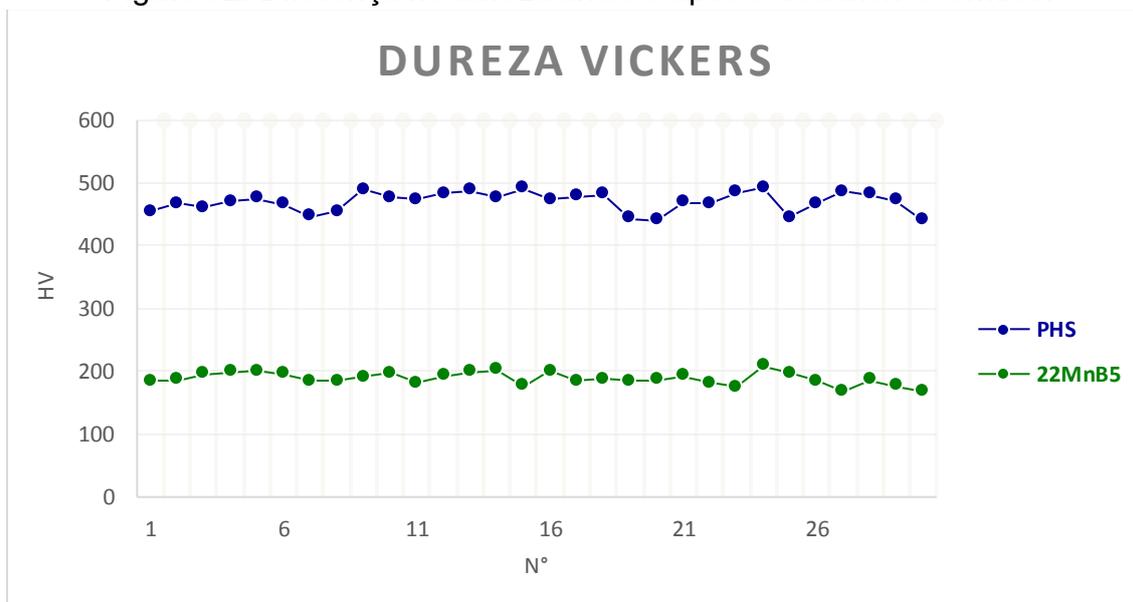
Tabela 6: Resultados da microdureza do PHS.

N°	Dureza	N°	Dureza	N°	Dureza
1	454	2	467	3	461
4	470	5	476	6	466
7	447	8	454	9	490
10	477	11	474	12	484
13	488	14	477	15	492
16	474	17	479	18	481
19	443	20	440	21	469
22	468	23	485	24	493
25	446	26	468	27	487
28	482	29	472	30	440

Fonte: Próprio autor.

Segundo Gorni (2010), a dureza do PHS, é em torno de 430 HV. Na tabela 5, os valores obtidos, não estão na média dos valores encontrados na literatura. Também é possível associar a figura 31(b) onde a microestrutura do PHS é martensítica. A figura 32 ilustra a diferença entre os resultados de dureza para o aço 22MnB5 antes e após o processo de estampagem a quente (PHS).

Figura 32: Diferença na dureza antes e após o tratamento térmico.



Fonte: Próprio autor.

A amostra do aço 22MnB5 antes do processo de estampagem a quente, possui valores de dureza menores que a amostra de PHS, isso ocorre devido ao tratamento térmico (têmpera). Esse resultado se confirma com as imagens da microestrutura de ambos, onde o aço 22MnB5 antes da estampagem tem uma matriz composta por ferrita/perlita e o PHS possui uma matriz totalmente martensítica.

Na tabela 7, é possível visualizar os valores de dureza Vickers obtidos para a amostra do CR4. Por conta do tamanho da amostra, foram realizados 25 pontos de microdureza e uma distância entre os pontos de 0,25 mm.

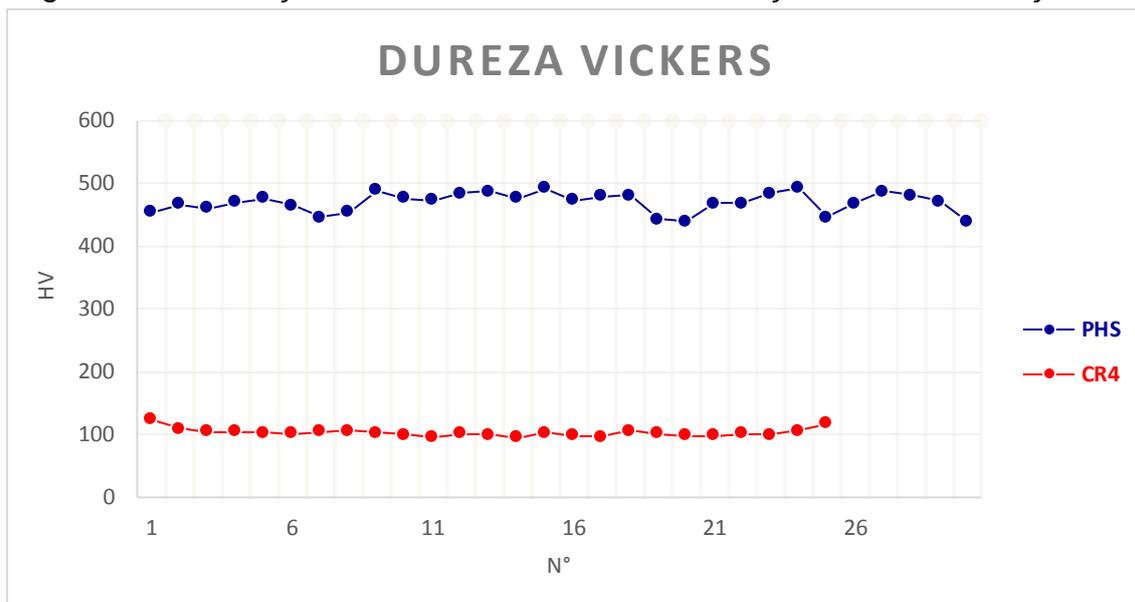
Tabela 7: Resultados da microdureza do CR4.

N°	Dureza	N°	Dureza	N°	Dureza
1	124	2	109	3	105
4	105	5	103	6	102
7	104	8	106	9	103
10	99,20	11	95,70	12	102
13	100	14	95,80	15	103
16	98,70	17	96,90	18	106
19	101	20	98,40	21	97,60
22	102	23	100	24	106

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a literatura, por possuir uma microestrutura basicamente de perlita com lamelas de cementita em uma matriz ferrítica, a dureza do CR4, conforme figura 30(c), fica em torno de 105 HV. Os valores encontrados no ensaio de dureza estão em conformidade com as normas. A figura 33 ilustra a diferença entre os resultados de dureza para o aço PHS e o aço CR4.

Figura 33: Diferença entre os valores de dureza do aço 22MnB5 e do aço CR4.



Fonte: Próprio autor.

Na figura acima nota-se que o aço PHS tem valores de dureza maiores que a amostra de CR4. Este resultado se confirma com as imagens da microestrutura de ambos, onde o aço CR4 possui uma matriz composta por ferrita/perlita e o PHS possui uma matriz totalmente martensítica.

5.2. Análise dos parâmetros.

Na tabela 8 é possível verificar os resultados obtidos para os parâmetros da união das amostras de PHS e CR4 pelo processo de brasagem MIG. No total foram encontrados 4 tipos diferentes de parâmetros aceitáveis.

Tabela 8: Parâmetros para união por brasagem MIG.

Parâmetros	T1	T2	T3	T4
Velocidade de alimentação do arame (m/s)	55×10^{-3}	55×10^{-3}	54×10^{-3}	55×10^{-3}
Velocidade de deslocamento (m/s)	$4,2 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$
Corrente (A)	104,8	127,4	95,6	87,5
Voltagem (V)	11,4	10,6	13,4	12,6
Comprimento do arame (m)	0,33	0,28	0,27	0,30
Secção Transversal (m ²)	$13,339 \times 10^{-8}$	$11,116 \times 10^{-8}$	$10,945 \times 10^{-8}$	$12,126 \times 10^{-8}$
Energia aportada / Fator energético	0,28 kJ/mm	0,26 kJ/mm	0,25 kJ/mm	0,24 kJ/mm

Fonte: Próprio autor.

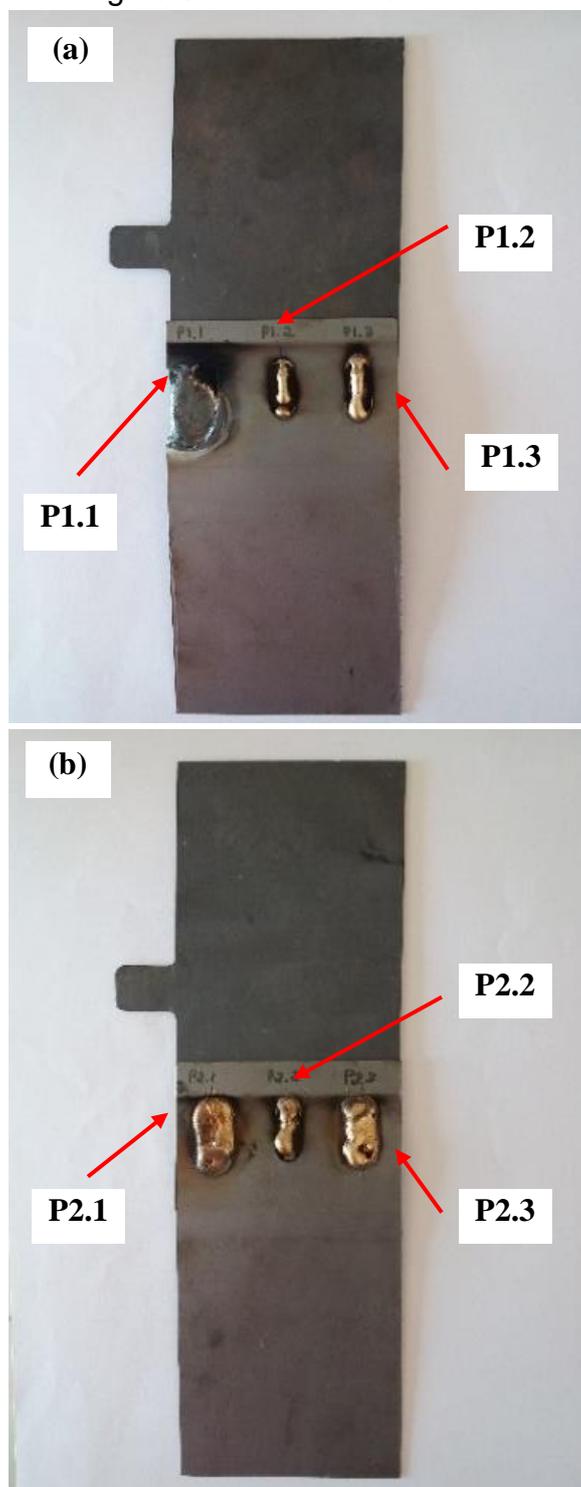
De acordo com Harris (2015), em posições diferentes da horizontal plana, é recomendado que se utilize o método de deposição por curto-circuito, desta forma, a tensão deve ficar entre 15 V e 25 V, a corrente entre 40 A e 200 A, e a velocidade de deposição deve ser menor.

Os parâmetros encontrados estão em conformidade com a literatura no que se diz respeito a corrente (A), porém a voltagem (V) ficou abaixo da recomendada. Mesmo assim esses foram os melhores resultados obtidos na união. Antes disso foram perdidas inúmeras amostras.

Porém nem todas as amostras foram perdidas por conta dos parâmetros incorretos, a maior parte ocorreu devido ao despreparo do operador e da forma incorreta de se utilizar o maquinário.

Na figura 34 é possível visualizar os resultados em (a) amostras (P1.1; P1.2 e P1.3) unidas pelo parâmetro T1 e (b) amostras (P2.1; P2.2 e P2.3) unidas pelo parâmetro T2.

Figura 34: Parâmetros T1 e T2.



Fonte: Próprio autor.

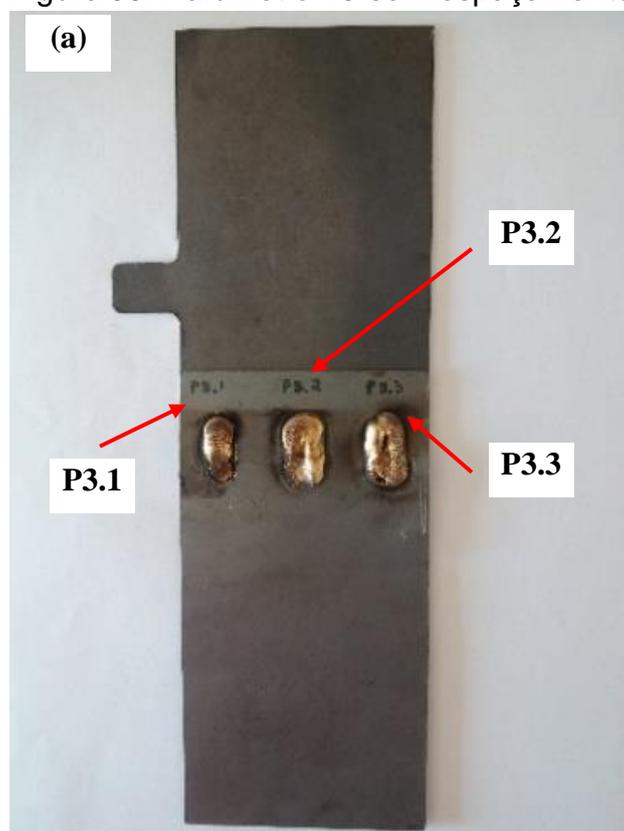
A figura 34 (a) ilustra P1.1, onde o material CR4 sofreu danos e o PHS permaneceu intacto, isso ocorreu devido a um erro na utilização do equipamento e

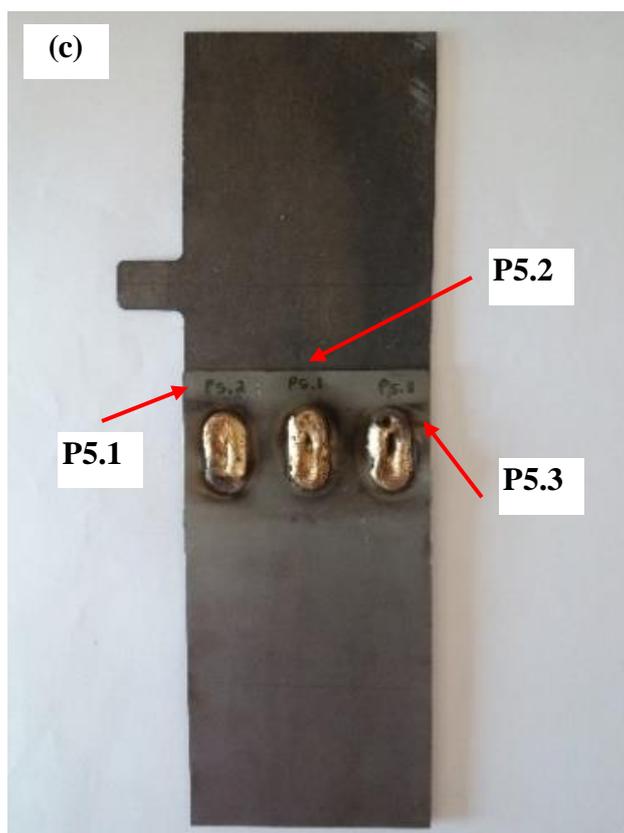
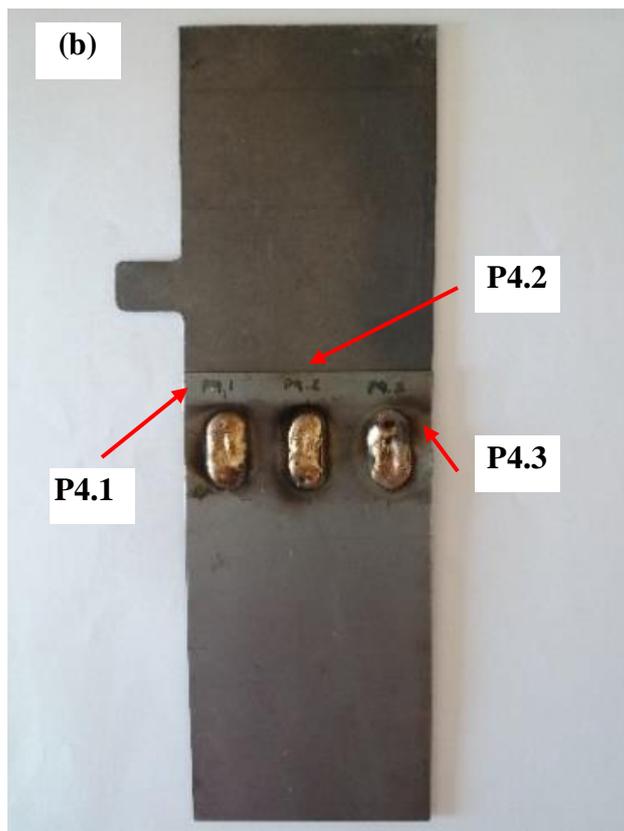
falha do operador. Em P1.2 e P1.3, o material de adição não preencheu completamente o furo oblongo regular.

Já na figura 34 (b), em P2.1, ocorreu o preenchimento completo do furo oblongo regular, assim como em P2.2 e P2.3, porém observa-se que houve uma quantidade de material de adição superior à desejada. Sugerem-se problemas com a alta velocidade de deposição do arame.

Depois desses testes iniciais todas as amostras do projeto furo oblongo regular foram soldadas com os parâmetros T3, até mesmo as que possuem espaçamento de 0,8 mm. Na figura 35, é possível visualizar os resultados em amostras de oblongo sem espaçamento, unidas pelo parâmetro T3.

Figura 35: Parâmetro T3 sem espaçamento.

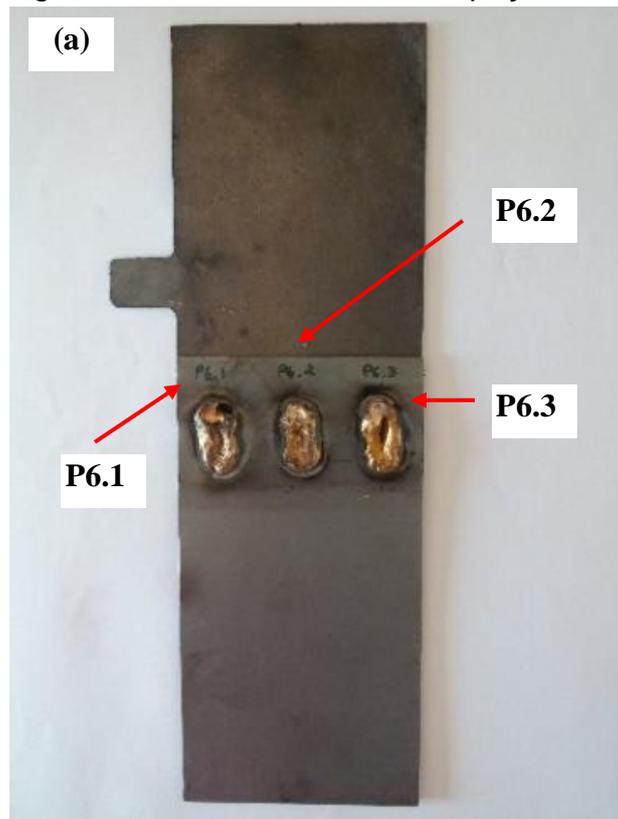


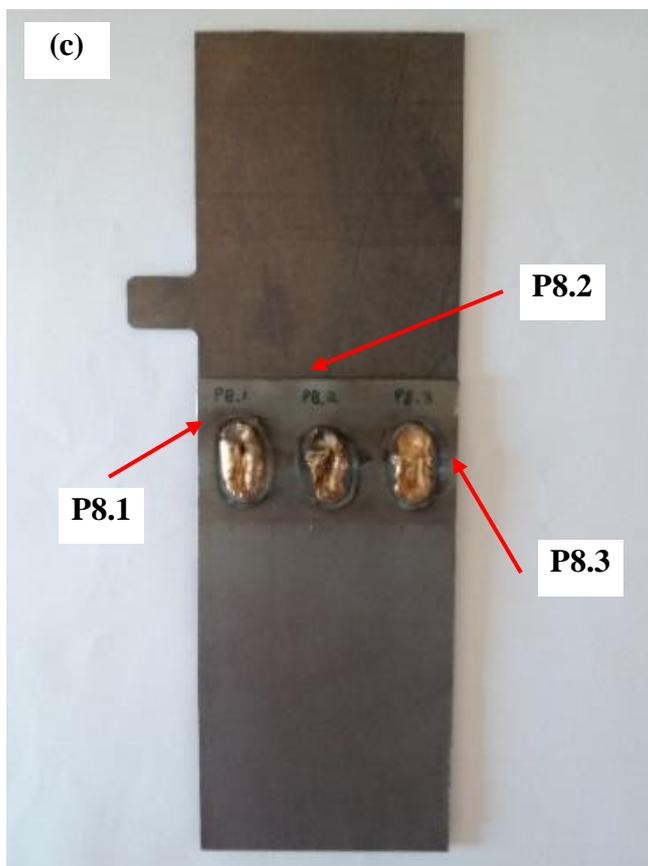
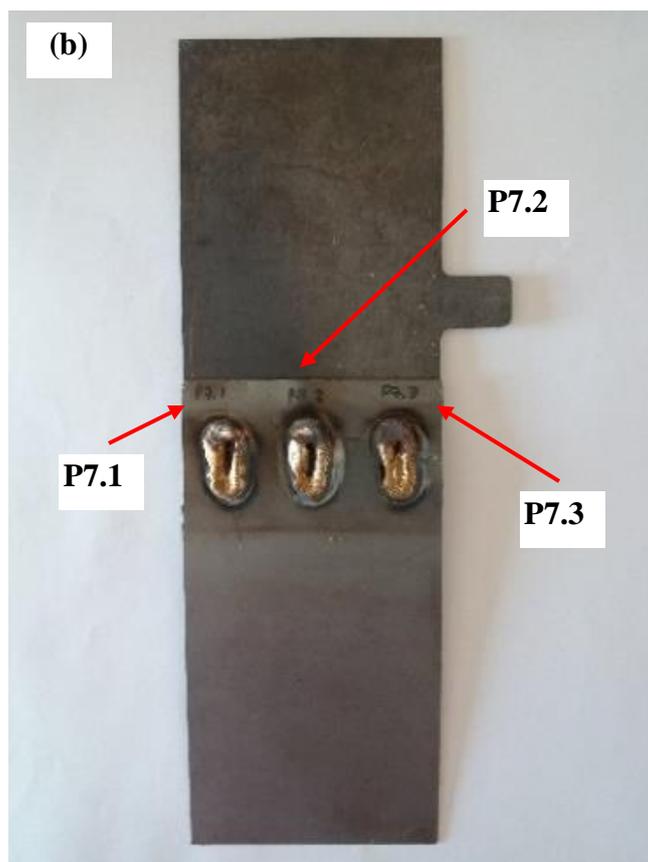


Fonte: Próprio autor.

Como observado na figura 35 todas as amostras tiveram bons resultados em relação ao preenchimento do projeto furo oblongo regular e uma deposição do material de adição equilibrada. A coloração escura em torno da poça de soldagem é devido à utilização do gás de proteção e a inclinação da tocha. A figura 36 ilustra as amostras de oblongo unidas pelo mesmo parâmetro T3, porém com espaçamento de 0,8mm.

Figura 36: Parâmetro T3 com espaçamento.



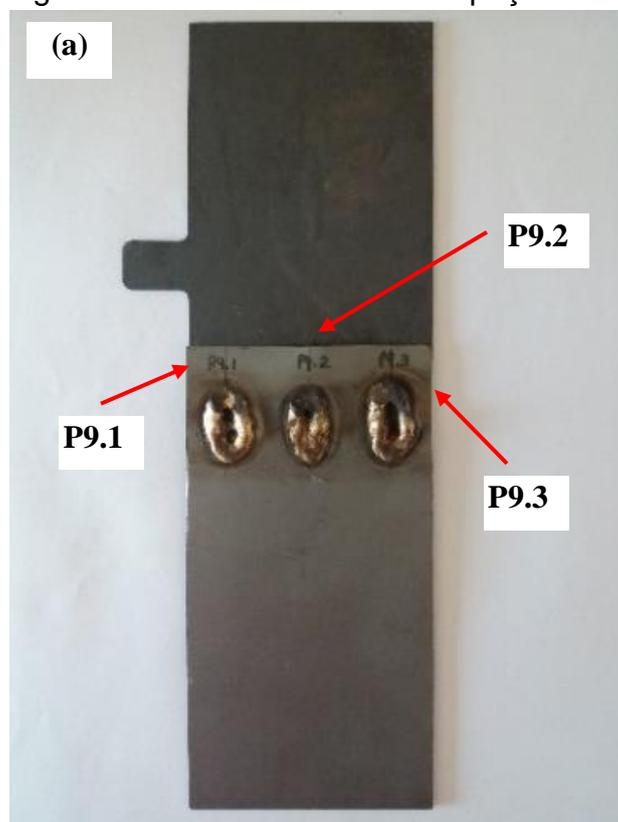


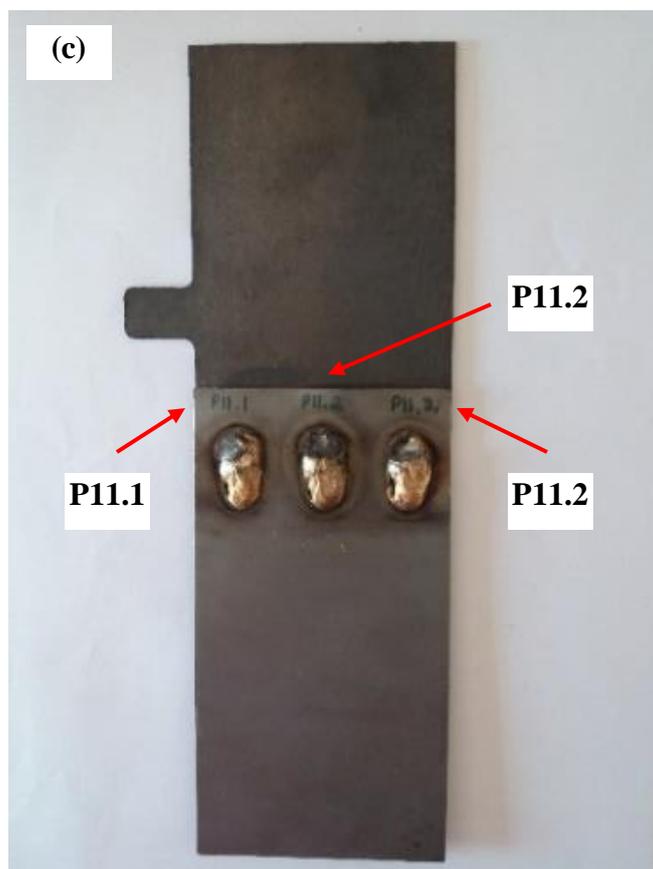
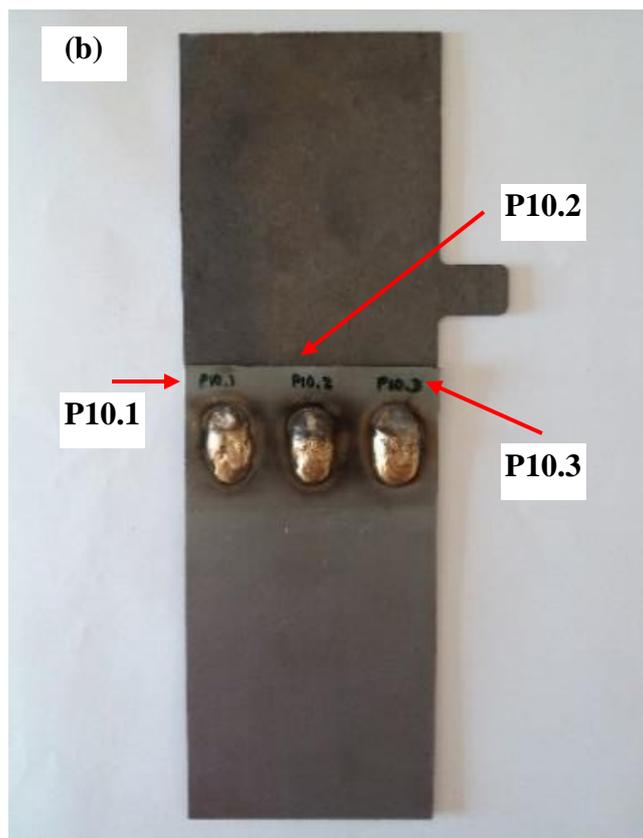
Fonte: Próprio autor.

Nota-se que o espaçamento de 0,8 mm, forneceu uma maior área de penetração do material de adição, deixando a união aparentemente mais uniforme. Porém segundo Okimoto (2005), a ação da capilaridade é maior quanto menor for o espaçamento entre os materiais de base, mas a redução excessiva do espaçamento acarreta dificuldades no processo de união.

Os parâmetros foram ajustados para unir os corpos de prova denominados de furo circular regular. Todas essas amostras foram unidas com os parâmetros T4, até mesmo as que possuem espaçamento de 0,8 mm. Na figura 37, é possível visualizar os resultados sem espaçamento, unidas pelo parâmetro T4.

Figura 37: Parâmetro T4 sem espaçamento.

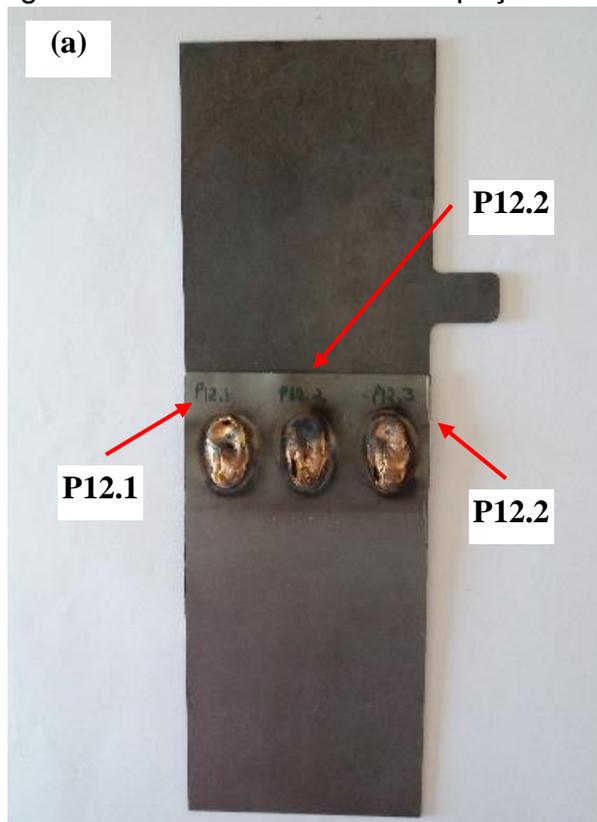


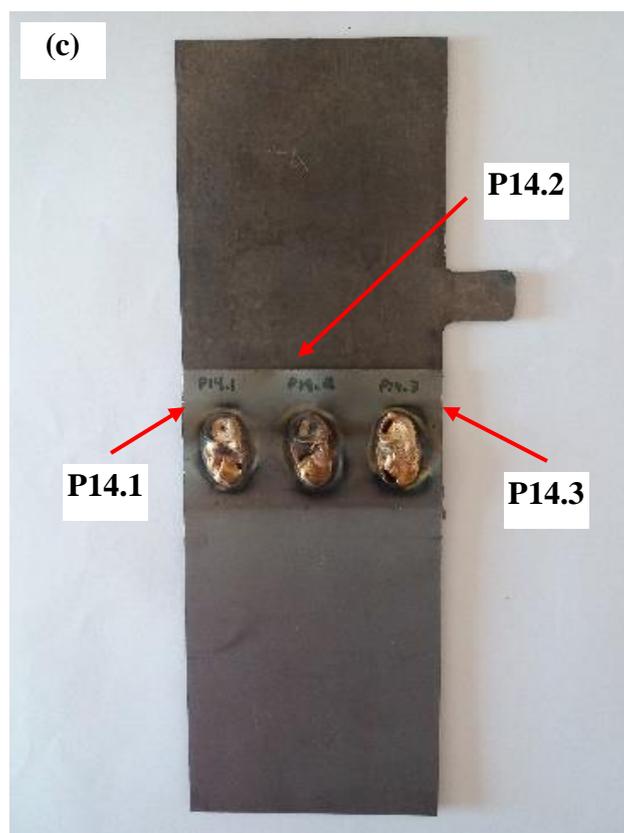
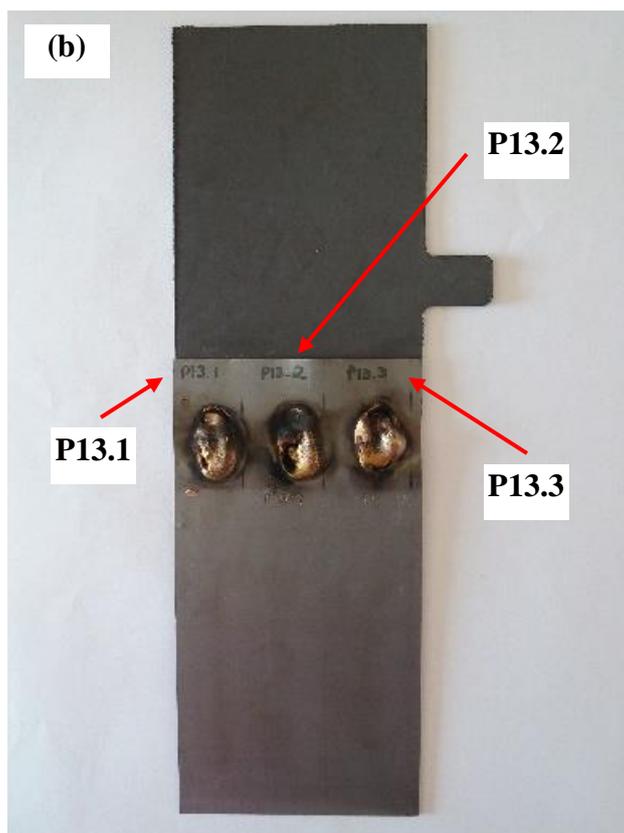


Fonte: Próprio autor.

Na figura 37 (a), nota-se que ocorreu um problema de preenchimento completo do furo circular regular, sugere-se que isso ocorreu devido a má alimentação do material de adição. A figura 38 apresenta as amostras de furo unidas pelo mesmo parâmetro T4, porém com espaçamento de 0,8 mm.

Figura 38: Parâmetro T4 com espaçamento.





Fonte: Próprio autor.

Segundo o manual de operação da Lincoln Electric (2019), um dos maiores desafios na brasagem MIG são os respingos, pois o metal de adição tem uma temperatura de fusão muito baixa, qualquer respingo que resulte do arco irá aderir à peça. Porém todas as amostras unidas com o sistema STT Braze não apresentaram respingos aparentes na união.

A deposição do material de adição na maioria das amostras foi exagerada para a aplicação em estudo. Levando em consideração que essas chapas são utilizadas na cluna B de uma carroceria, um oblongo ou furo com espessura superior a especificação das montadoras, além de prejudicar a aparência, possivelmente também diminui a qualidade.

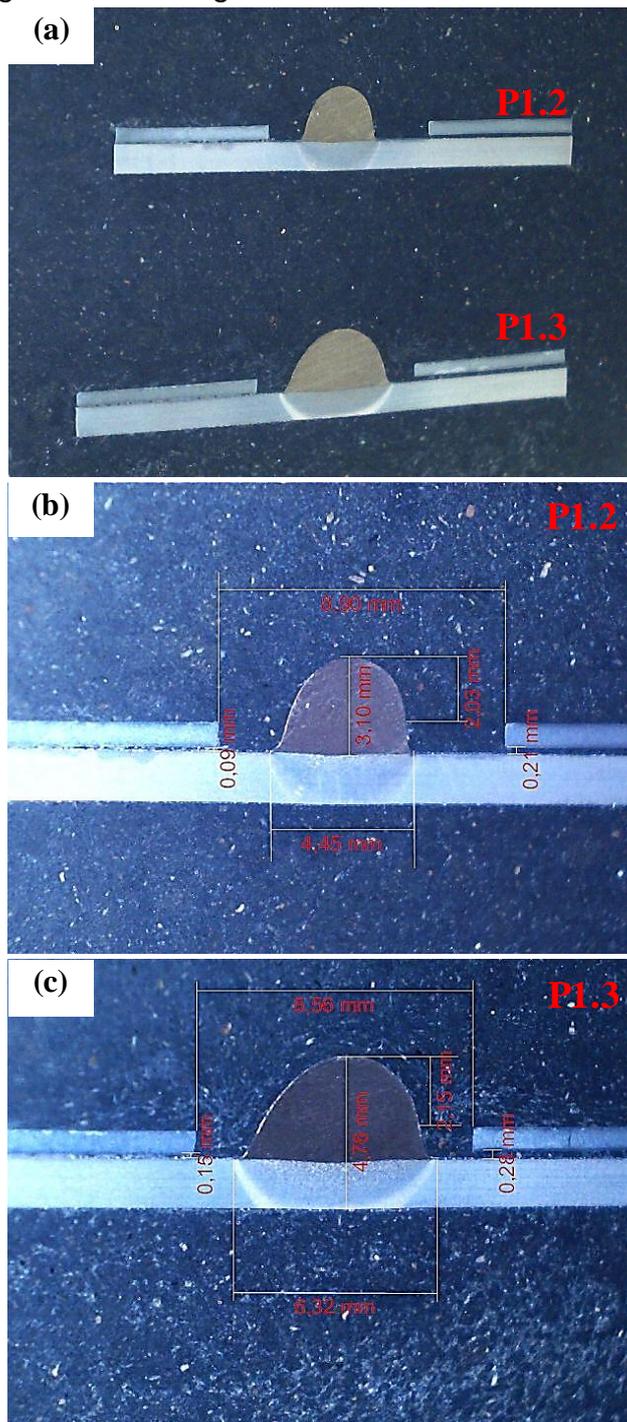
5.3. Análises metalográficas.

O ensaio foi realizado para relacionar a estrutura interna do material com suas propriedades físicas. Também ficou dividido em dois subgrupos:

- *Macrografia:*

A macrografia teve como objetivo analisar superficialmente as características da união, como por exemplo, homogeneidade, zona termicamente afetada pelo calor, diâmetro, espessura e a molhabilidade do material de adição. A figura 39 ilustra a macrografia das amostras, onde (a) é a distribuição das amostras na baquelite, (b) são as dimensões de P1.2 e (c) são as dimensões de P1.3.

Figura 39: Macrografia das amostras P1.2 e P1.3.

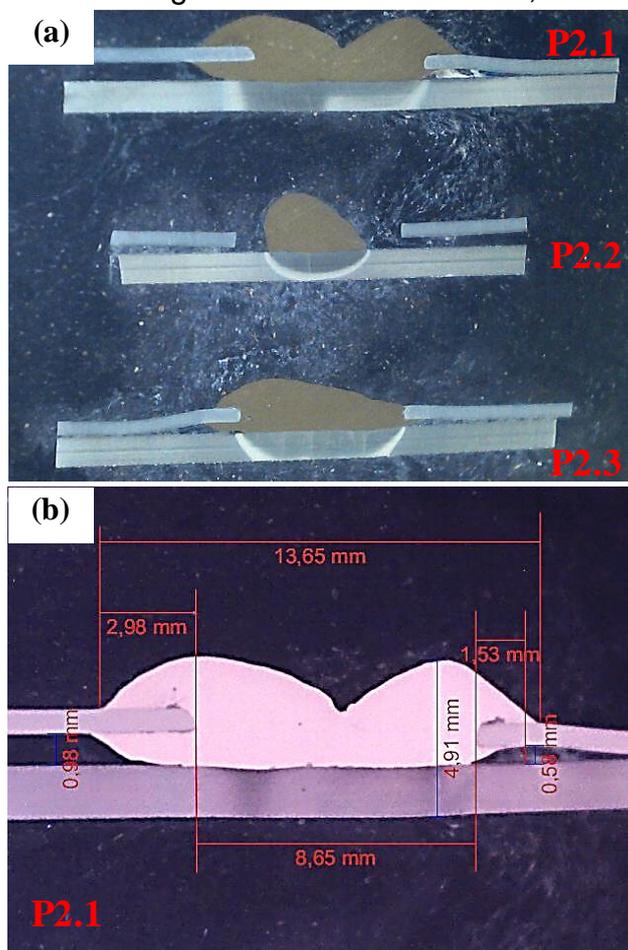


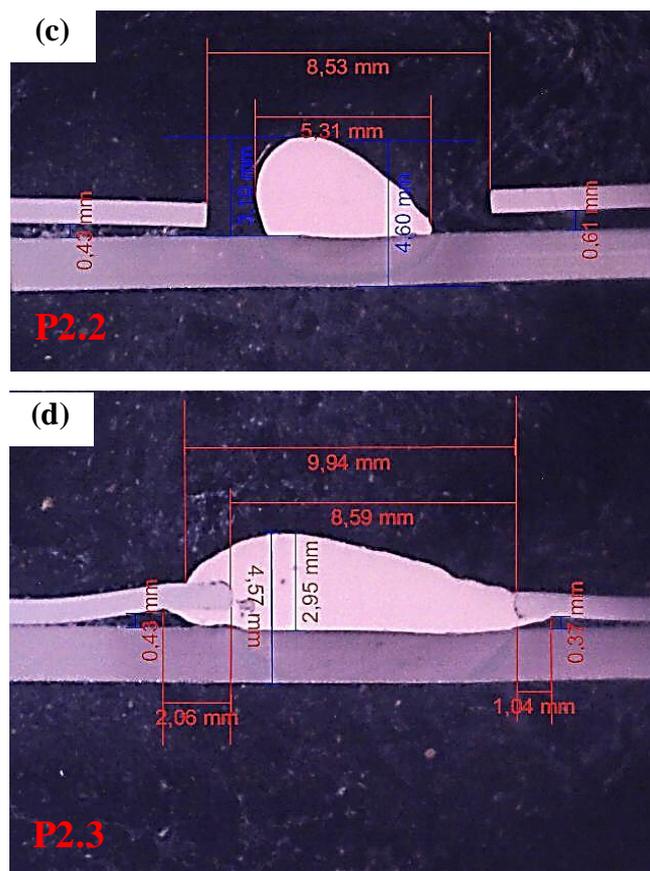
Fonte: Próprio autor.

Nas amostras de P1.2 e P1.3, nota-se que ambos não tiveram um preenchimento completo do furo oblongo circular, conforme descrito acima, porém nas imagens da macrografia foi possível visualizar que o material de adição apresentou baixa molhabilidade com o PHS. Sugere-se que o problema de interação entre esses materiais é o revestimento de Al-Si que dificulta esse processo.

A figura 40 ilustra a macrografia das amostras P2.1; P2.2 e P2.3, onde (a) é a distribuição das amostras no baquelite, (b) são as dimensões da amostra P2.1, (c) são as dimensões da amostra P2.2 e (d) são as dimensões das amostras P2.3.

Figura 40: Macrografia das amostras P2.1, P2.2 e P2.3.





Fonte: Próprio autor.

Em conformidade com a norma AWS C3. 3-2008, na amostra P2.1 nota-se que o material de adição teve uma penetração mínima de 2 mm, o diâmetro passou de aproximadamente 8,65 mm para 13,65 mm. Mesmo a amostra P2.1 partindo de um espaçamento 0 mm, após o processo, a distância entre o PHS e o CR4 ficou entre 0,4 mm e 0,6 mm.

A amostra P2.2, nota-se que o material de adição não preencheu todo o diâmetro, isso ocorreu devido a um problema na alimentação do arame e um erro do operador. Mesmo a amostra P2.2 partindo de espaçamento 0 mm, após o processo, a distância entre o PHS e o CR4 ficou entre 0,9 mm e 0,5 mm, isso ocorreu devido à penetração por molhabilidade do material de adição das amostras P2.1 e P2.3.

A amostra P2.3 apresentou visualmente a melhor área brasada, isso ocorreu devido a homogeneidade dos valores obtidos. O diâmetro do furo oblongo regular passou de aproximadamente 8,59 mm para 9,94 mm. Novamente, mesmo que a amostra partiu de espaçamento 0 mm, a distância entre o PHS e o CR4 ficou entre 0,4 mm e 0,3 mm.

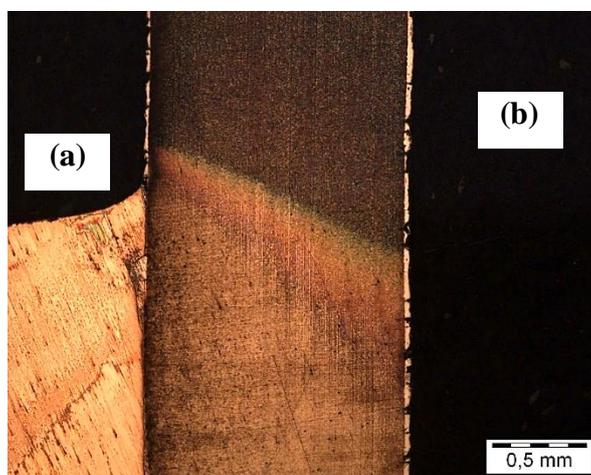
Nota-se que as três amostras acima não tiveram alta molhabilidade do material de adição com o PHS. Porém com o CR4 a molhabilidade em relação ao material ocorreu de forma satisfatória, uma vez que o ângulo é quase 0°.

De acordo com Batalha (2003) o processo de brasagem MIG aquece o material de adição de modo que o zinco (revestimento do CR4) é vaporizado parcialmente, porém há indícios de fusão da camada galvanizada. Dessa forma, sugere-se que o material de base não retirou a camada de proteção do aço CR4 e a interface desse material está em conformidade com as normas.

- *Micrografia:*

O ensaio metalográfico foi realizado para avaliar toda a mudança da microestrutura da união por brasagem MIG, por conta do calor propagado pelo processo, a zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) aparece bem expressiva no material PHS. Na figura 41 é possível verificar a microestrutura da amostra P1.2, onde (a) é o material de adição e (b) é o PHS.

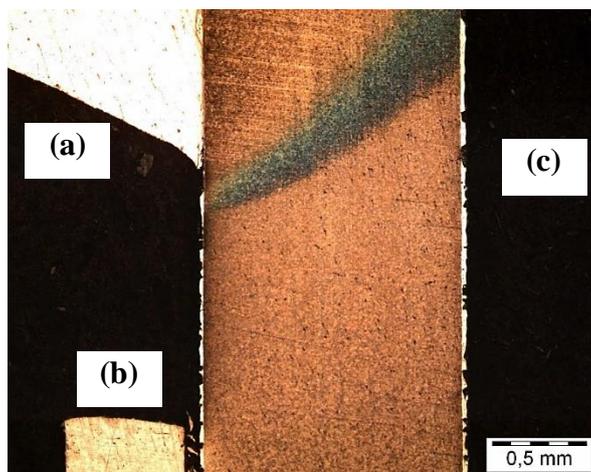
Figura 41: Microestrutura da amostra P1.2.



Fonte: Próprio autor.

Em P1.2, a amostra apresentou uma variação na microestrutura do PHS. A zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) começa na região onde material de adição é fundido. Normalmente a região da ZTA é onde ocorre a diminuição da resistência do material. Na figura 42 é possível verificar a microestrutura da amostra P1.2, onde (a) é o material de adição e (b) é o CR4 e (c) é o PHS.

Figura 42: Microestrutura da amostra P1.3.

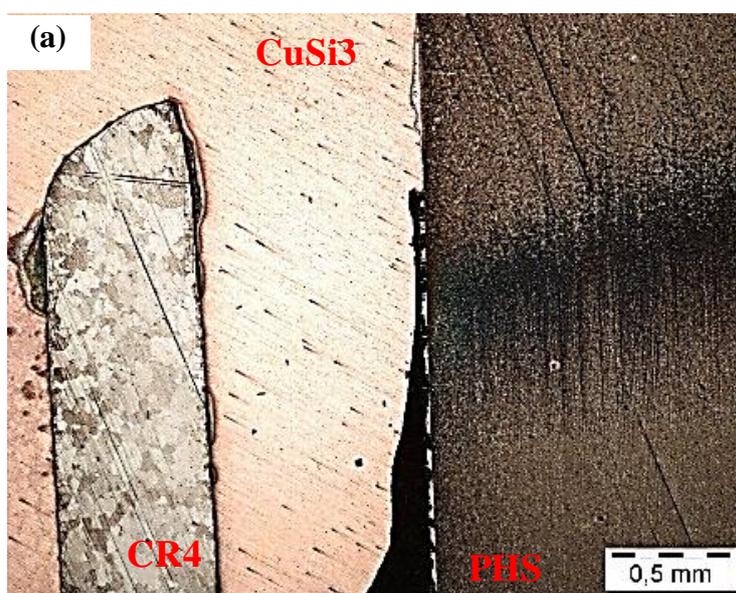


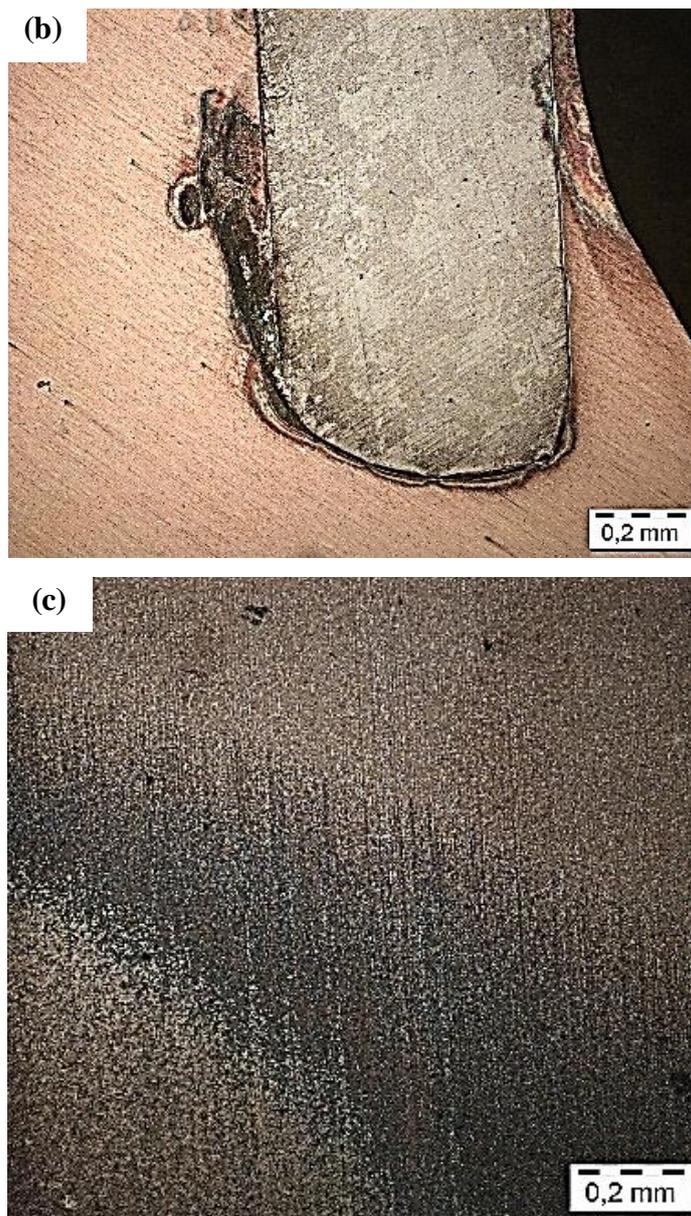
Fonte: Próprio autor.

Devido à qualidade do aparelho utilizado para gravar as imagens, não foi possível observar as características do material de adição da amostra P2.3. Já o PHS apresentou uma mudança de microestrutura também na região da ZTA que abrange a área em que o material de adição é fundido.

Na figura 43 é possível verificar a microestrutura da amostra P2.1, onde (a) interface do material de adição com o aço PHS e o CR4, (b) ZTA do aço CR4 e (c) ZTA do PHS.

Figura 43: Microestrutura da amostra P2.1.



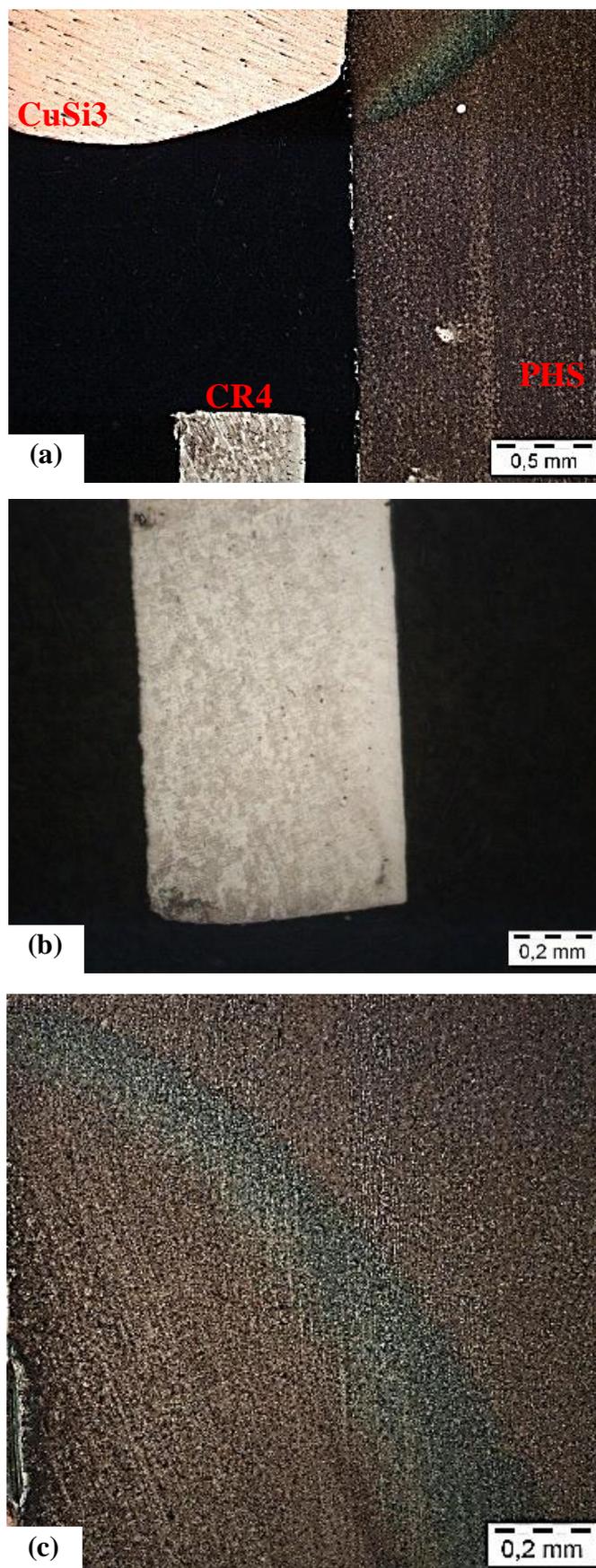


Fonte: Próprio autor.

Nas imagens da microestrutura da amostra P2.1 nota-se a interação da interface entre o material de base com o CR4, já a interface entre o PHS e o CuSi3 é muito pequena. Também é possível verificar a modificação da microestrutura. No PHS a mudança é ainda mais perceptível com a zona termicamente afetada pelo calor bem expressiva.

Na figura 44 é possível verificar a microestrutura da amostra P2.2, onde (a) interface do material de adição com o aço PHS e o CR4, (b) ZTA do aço Cr4 e (c) ZTA do PHS.

Figura 44: Microestrutura da amostra P2.2.

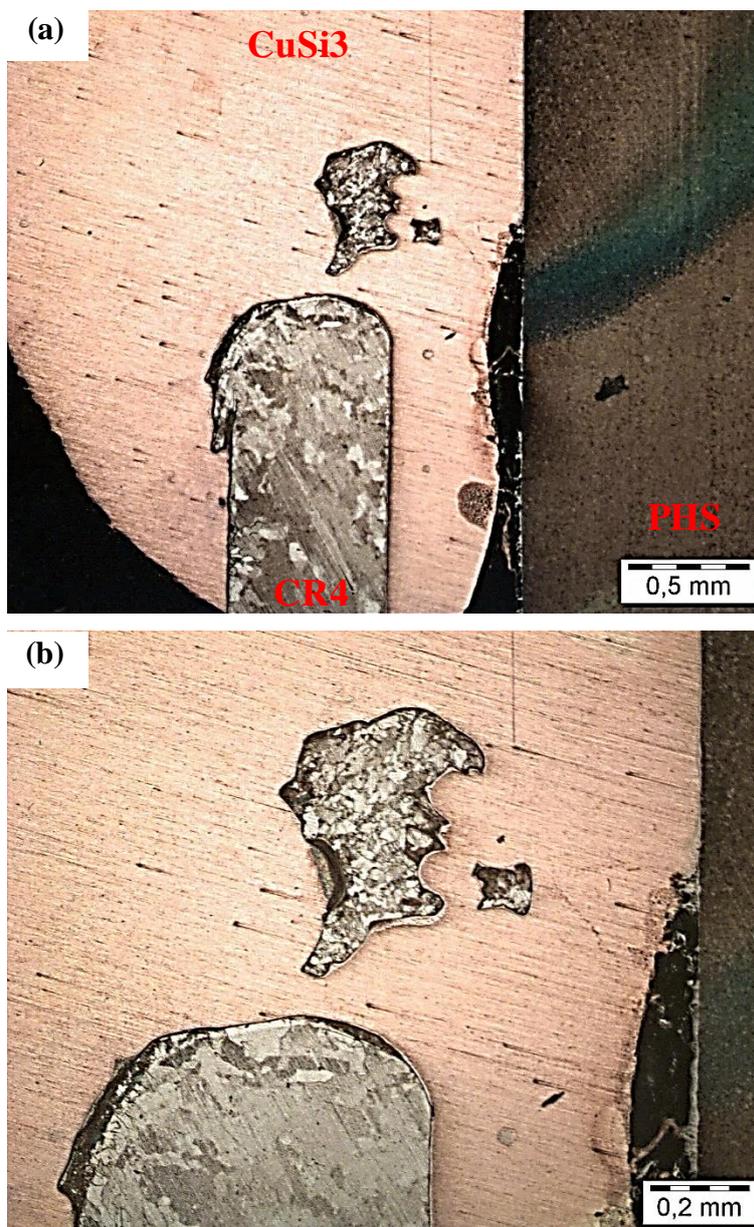


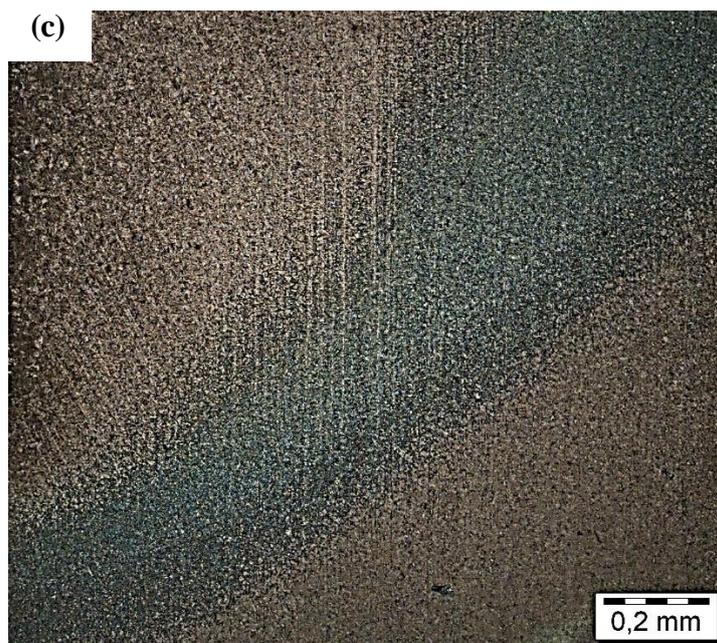
Fonte: Próprio autor.

Já nas imagens da micrografia da amostra P2.2 nota-se que também não foi possível o preenchimento do furo oblongo regular. Mesmo assim a molhabilidade do PHS com o material de adição é praticamente de 180° , ou seja, a molhabilidade é muito pequena.

Na figura 45 é possível verificar a microestrutura da amostra P2.3, onde (a) Interface do material de adição com o aço PHS e o CR4, (b) ZTA do aço CR4 e (c) ZTA do PHS.

Figura 45: Microestrutura da amostra P2.3.





Fonte: Próprio autor.

Na micrografia da amostra P2.3 nota-se a interação da interface entre o material de base com o CR4, já a interface entre o PHS e o CuSi3 é muito pequena. Também é possível verificar a rebarba do CR4 no meio do material de adição fundido, isso ocorre devido a incorreta etapa de lixamento e polimento.

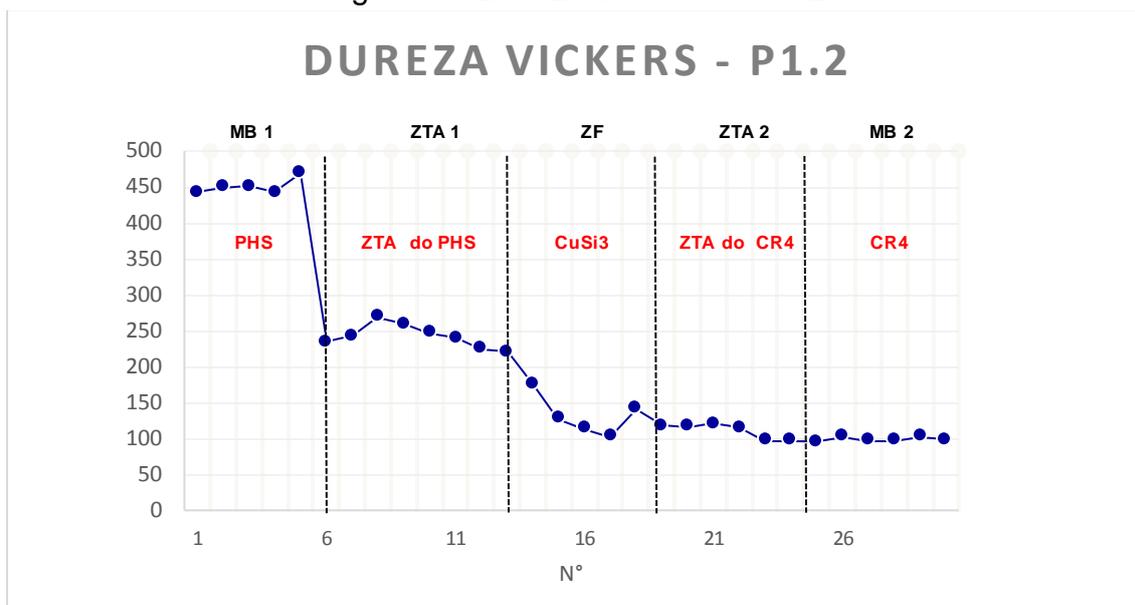
De acordo com Harris (2005) o ponto de fusão do metal de adição é menor que dos materiais de base geralmente utilizados na indústria, diminuindo o desgaste e outros defeitos possíveis, porém mesmo com o baixo aporte de calor do processo de brasagem MIG, a modificação da microestrutura ainda é bem expressiva.

Segundo Gorni (2010) o aço 22MnB5 após o processo de conformação a quente apresenta uma microestrutura totalmente martensítica e isso que garante o aumento de resistência mecânica do material. Todavia a adição do aporte de calor proveniente do processo união pode resultar na perda dessa propriedade.

5.4. Análise dos valores de dureza Vickers (HV).

Para validar as imagens acima foi realizado o teste de dureza Vickers. Por conta do tamanho da amostra P1.2, foram realizados 30 pontos de microdureza, com uma carga de 0,5 kgf e uma distância entre os pontos de 0,25 mm. Na figura 46 é possível visualizar a distribuição dos pontos de microdureza ao longo a junta.

Figura 46: Dureza da amostra P1.2.



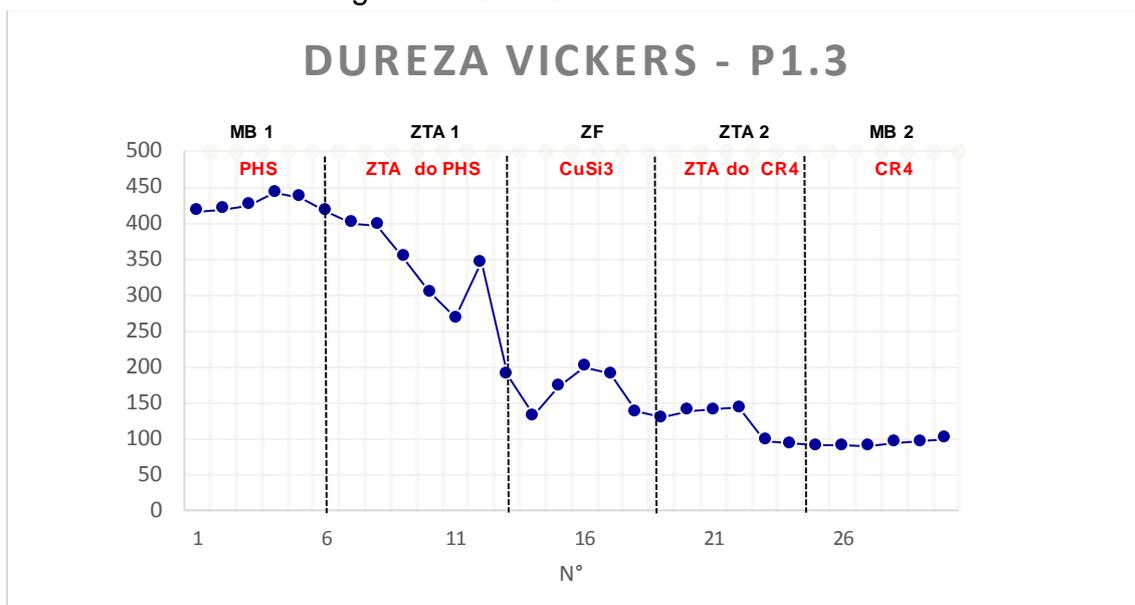
Fonte: Próprio autor.

Para P1.2, Nota-se que os resultados da microdureza do PHS estão em conformidade com as normas. Sobre a queda de resistência na ZTA do PHS, sugere-se que ocorreu devido ao reaquecimento da região e a mudança na microestrutura.

De acordo com a literatura a dureza do material de base CuSi3 é de aproximadamente 80 HV e os resultados nessa região estão aceitáveis. Em relação ao CR4, no material de base e na ZTA, os valores estão constante e em conformidade com a literatura.

Na amostra P1.3, foram realizados 30 pontos de microdureza, com uma carga de 0,5 kgf e uma distância entre os pontos de 0,25 mm. Na figura 47 é possível visualizar a distribuição dos pontos de microdureza ao longo da amostra P1.3.

Figura 47: Dureza da amostra P1.3.

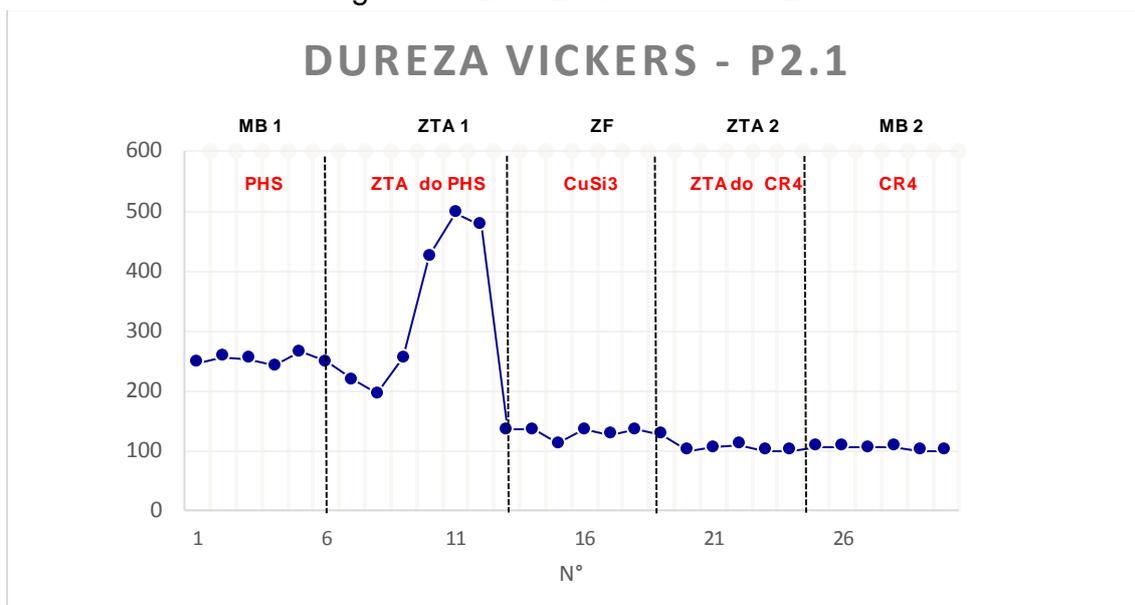


Fonte: Próprio autor.

Em P1.3 encontramos resultados parecidos com P1.2. Ambas as amostras mantiveram a dureza do PHS na região de base e uma queda na resistência na ZTA desse material. Em relação ao material de adição e o CR4, ambos mantiveram os resultados esperados de acordo com a literatura. Porém se compararmos a ZTA de ambas as amostras veremos que em P1.3, a dureza nessa região foi maior.

Por conta do tamanho da amostra P2.1, foram realizados 30 pontos de microdureza, com uma carga de 0,5 kgf e uma distância entre os pontos de 0,25 mm. Na figura 48 é possível visualizar a distribuição dos pontos de microdureza da união.

Figura 48: Dureza da amostra P2.1.



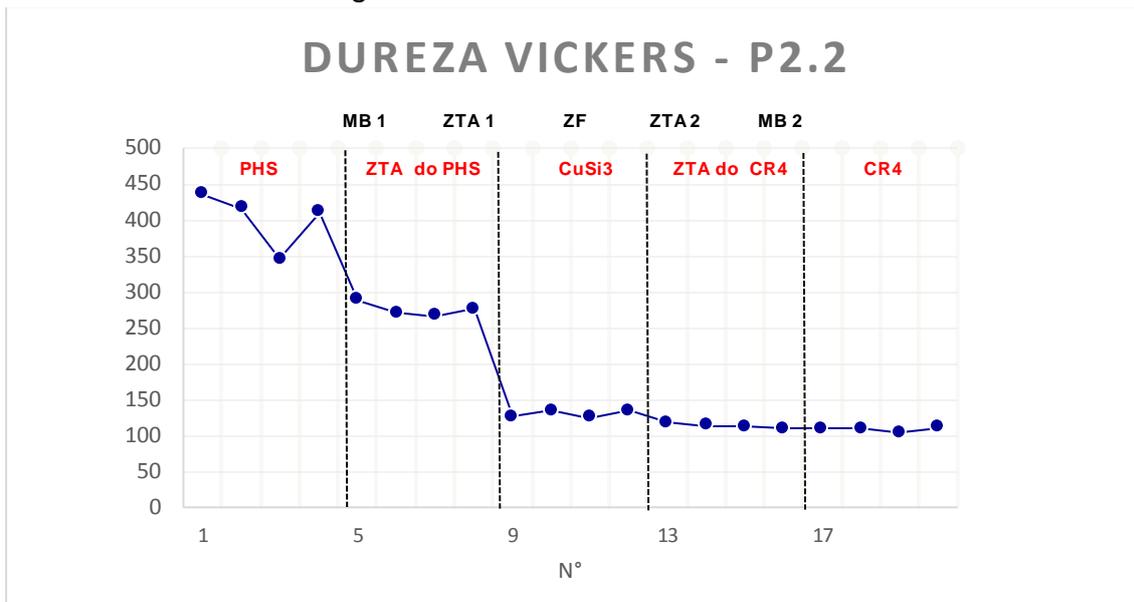
Fonte: Próprio autor.

Os resultados de dureza Vickers na amostra P2.1, apresentou valores de resistência diferentes aos encontrados na literatura, de acordo com Gorni (2010), a dureza Vickers desse material após o processo de estampagem a quente é de aproximadamente 430 HV. Porém no ensaio os valores variaram entre 250 HV.

Também de acordo com os resultados obtidos em P2.1, na zona termicamente afetada pelo calor os valores não estão em conformidade com os encontrados na literatura. Normalmente essa região é fragilizada pelo processo de união, porém os resultados apontam um ganho de dureza até a interface do material de adição.

Para a amostra P2.2, foram realizados 20 pontos de microdureza, com uma carga de 0,5 kgf e uma distância entre os pontos de 0,25 mm. Na figura 49 é possível analisar a distribuição dos pontos de microdureza ao longo da união.

Figura 49: Dureza da amostra P2.2.

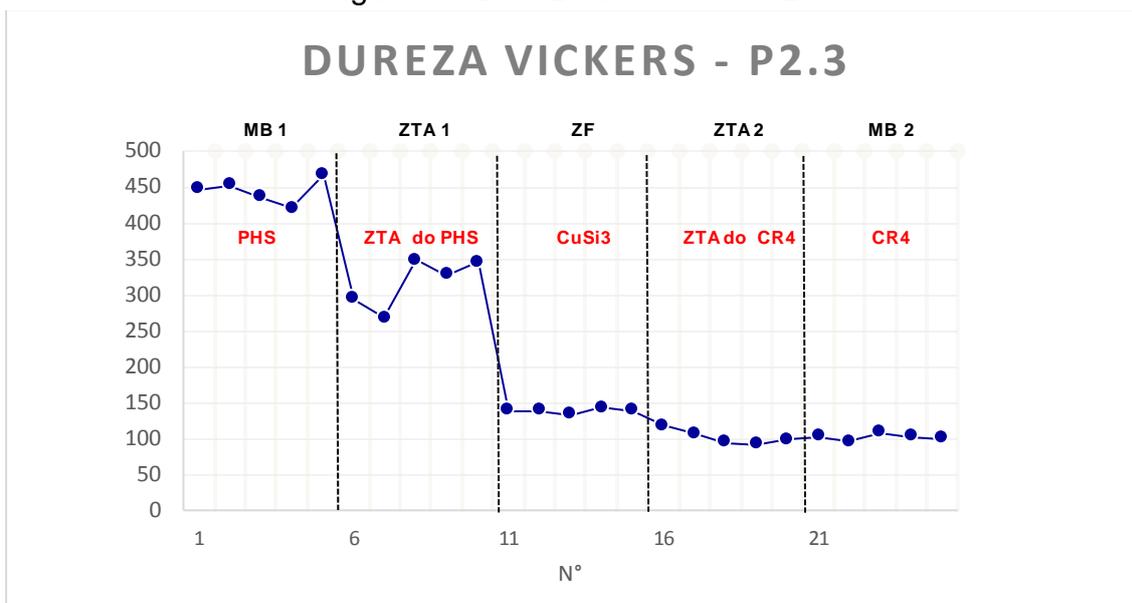


Fonte: Próprio autor.

Já na amostra P2.2, o ensaio de dureza apresentou resultados mais consistente. A dureza do PHS está de acordo com os ensaios iniciais do material de base e em conformidade com a literatura, até mesmo a queda de dureza na zona termicamente afetada pelo calor está coerente com o reaquecimento da região. O CR4 novamente manteve estabilidade nos valores de dureza até mesmo na ZTA.

Para a amostra P2.3, por conta do tamanho da amostra, foram realizados 25 pontos de microdureza. Na figura 50 é possível analisar a distribuição dos pontos de microdureza ao longo da união.

Figura 50: Dureza da amostra P2.3.



Fonte: Próprio autor.

Na amostra P2.3 os resultados da microdureza estão em conformidade com os encontrados em norma e na literatura. O aço PHS, apresentou uma perda de dureza, na zona termicamente afetada pelo calor, porém mesmo nessa região os valores ficaram em torno de 300 HV, o que não afeta em tese a qualidade da união.

Após o ensaio de microdureza Vickers na união entre PHS e CR4, sugere-se que a queda nos valores de dureza na zona termicamente afetada pelo calor do aço estampado a quente é devido ao reaquecimento da região durante a brasagem MIG. Mesmo que o aporte de calor desse processo é menor que a soldagem convencional, o PHS é um material sensível devido ao seu processo de fabricação.

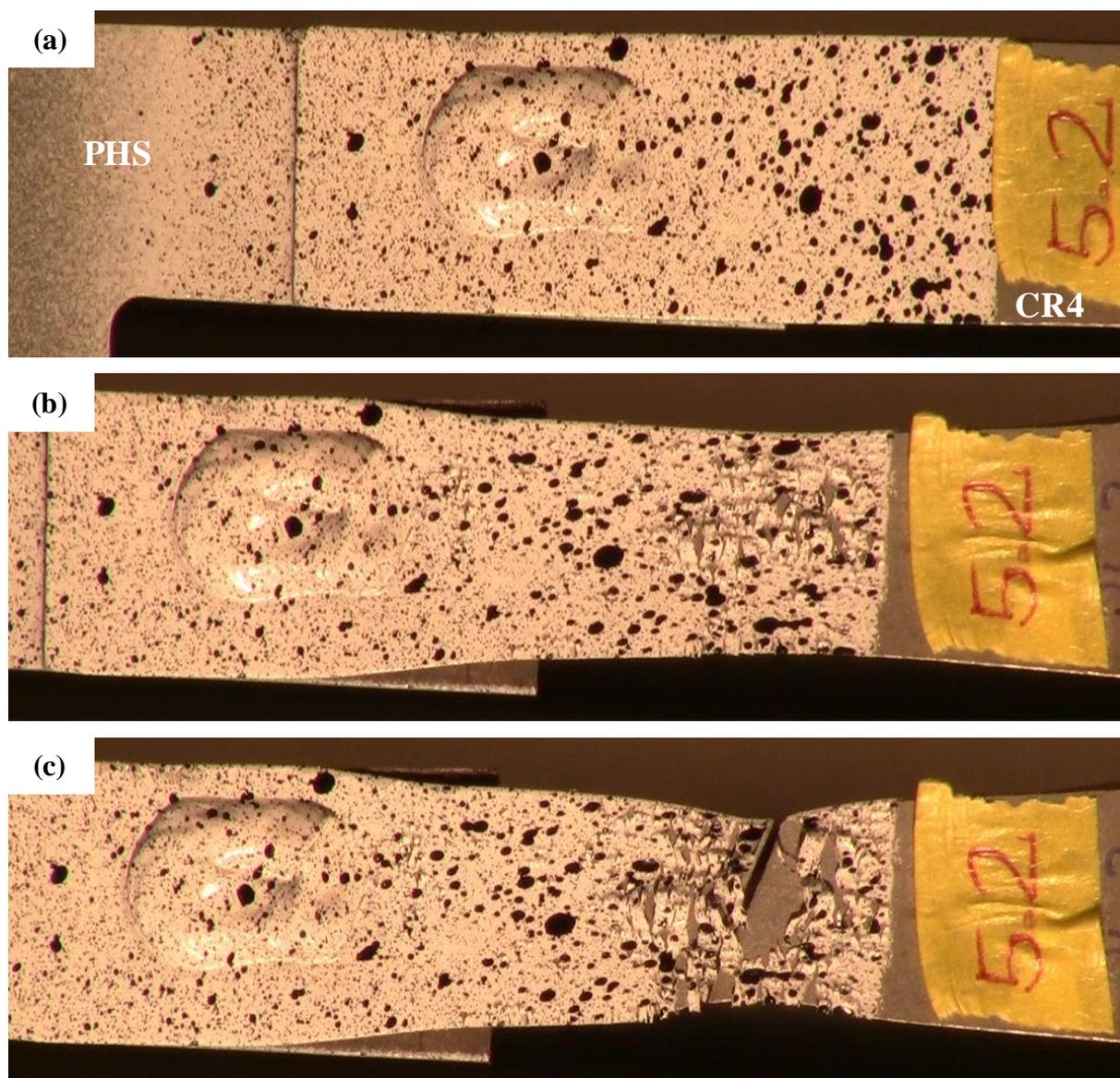
Pois de acordo com Gorni (2010), para adquirir microestrutura totalmente martensítica, o aço estampado a quente é submetido a elevadas temperaturas e brusca taxa de arrefecimento.

De qualquer forma, mesmo com a queda de dureza, os valores encontrados são aceitáveis, pois quando analisamos toda a interface da união brasada, os valores de dureza no PHS ainda são superiores as do CR4 e do material de adição.

5.5. Resultados do ensaio de tração.

A figura 51 ilustra os resultados do ensaio de tração para P5.2 onde em (a) o corpo de prova está intacto no começo do ensaio, em (b) começa a propagação da trinca no CR4 e em (c) ocorreu a fratura total do material.

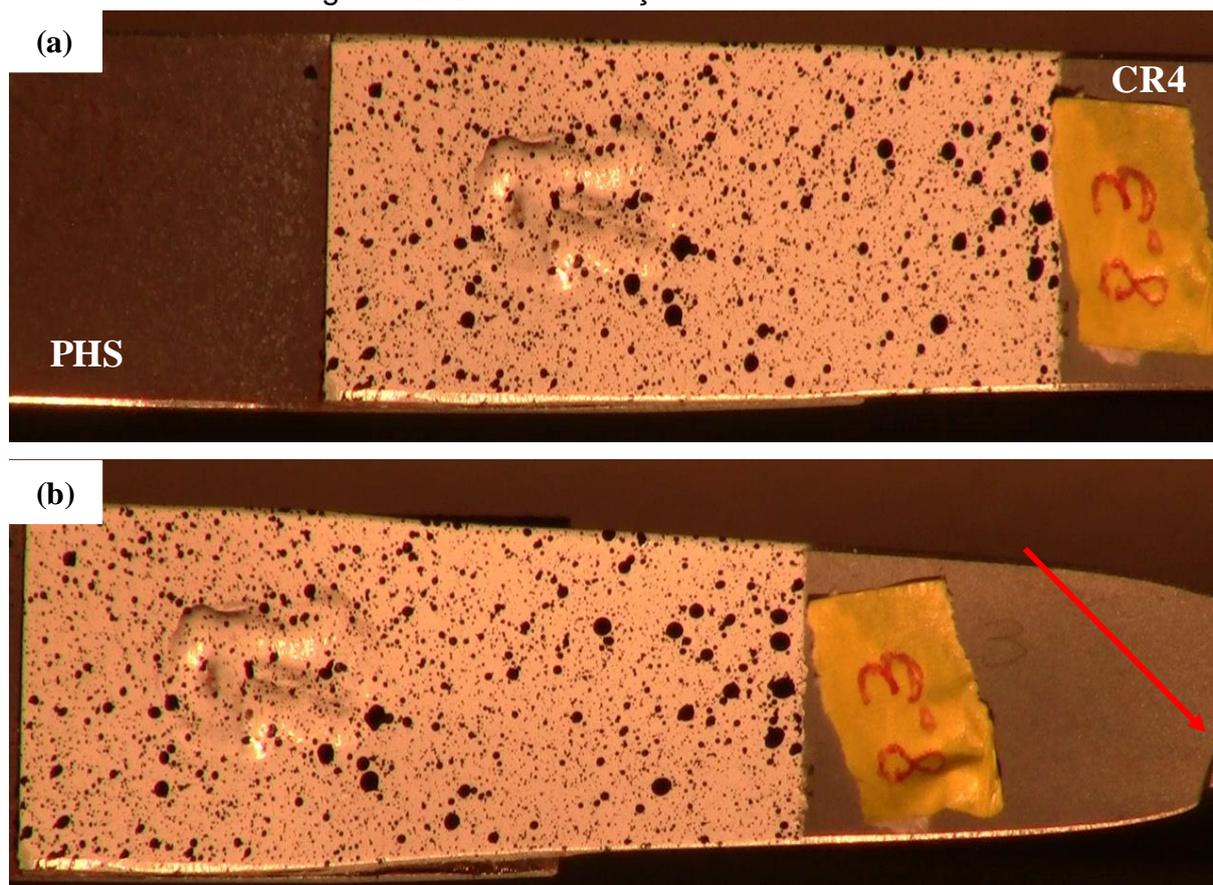
Figura 51: Ensaio de tração da amostra P5.2.



Fonte: Próprio autor.

A figura 52 ilustra os resultados do ensaio de tração para P8.3 onde em (a) o corpo de prova está intacto e em (c) ocorreu a fratura total no final do material de base CR4. Devido a localização da propagação da trinca, não foi possível captar por imagem.

Figura 52: Ensaio de tração da amostra P8.3.

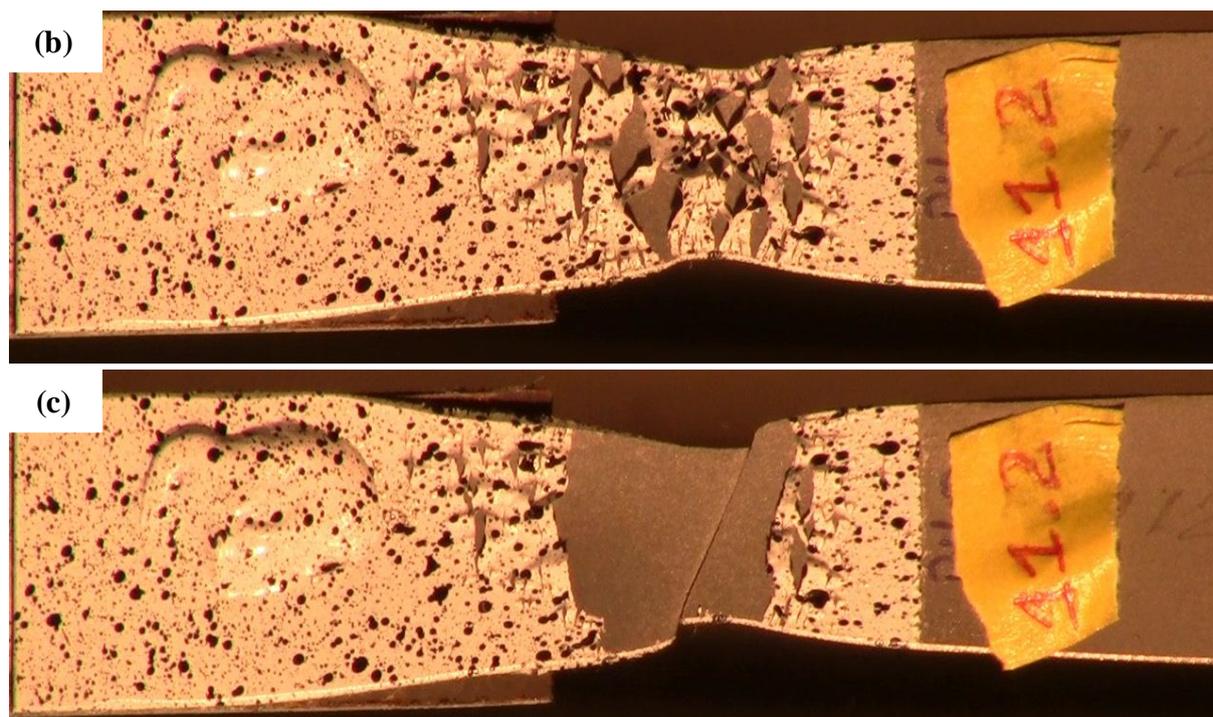


Fonte: Próprio autor.

A figura 53 ilustra os resultados do ensaio de tração para P11.2 onde em (a) o corpo de prova está intacto no começo do ensaio, em (b) começa a propagação da trinca no CR4 e em (c) ocorreu a fratura total do material.

Figura 53: Ensaio de tração da amostra P11.2.

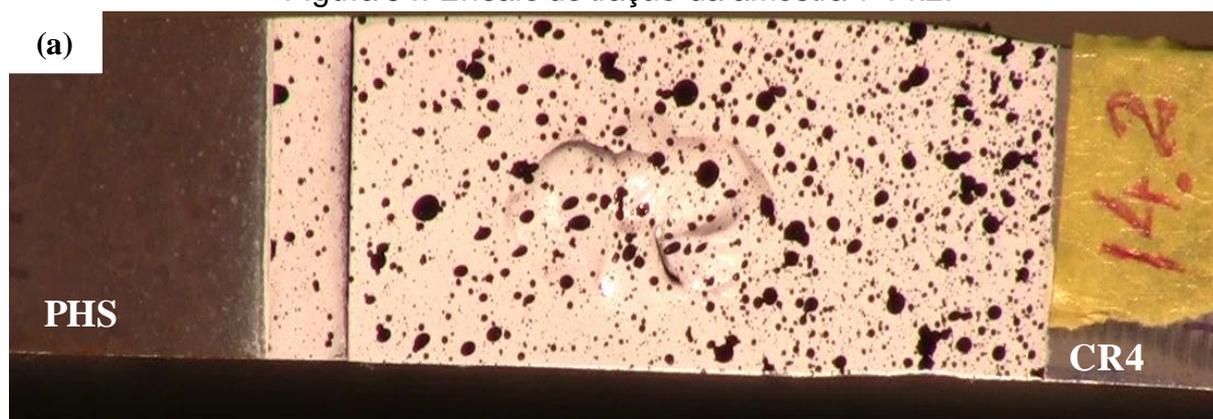


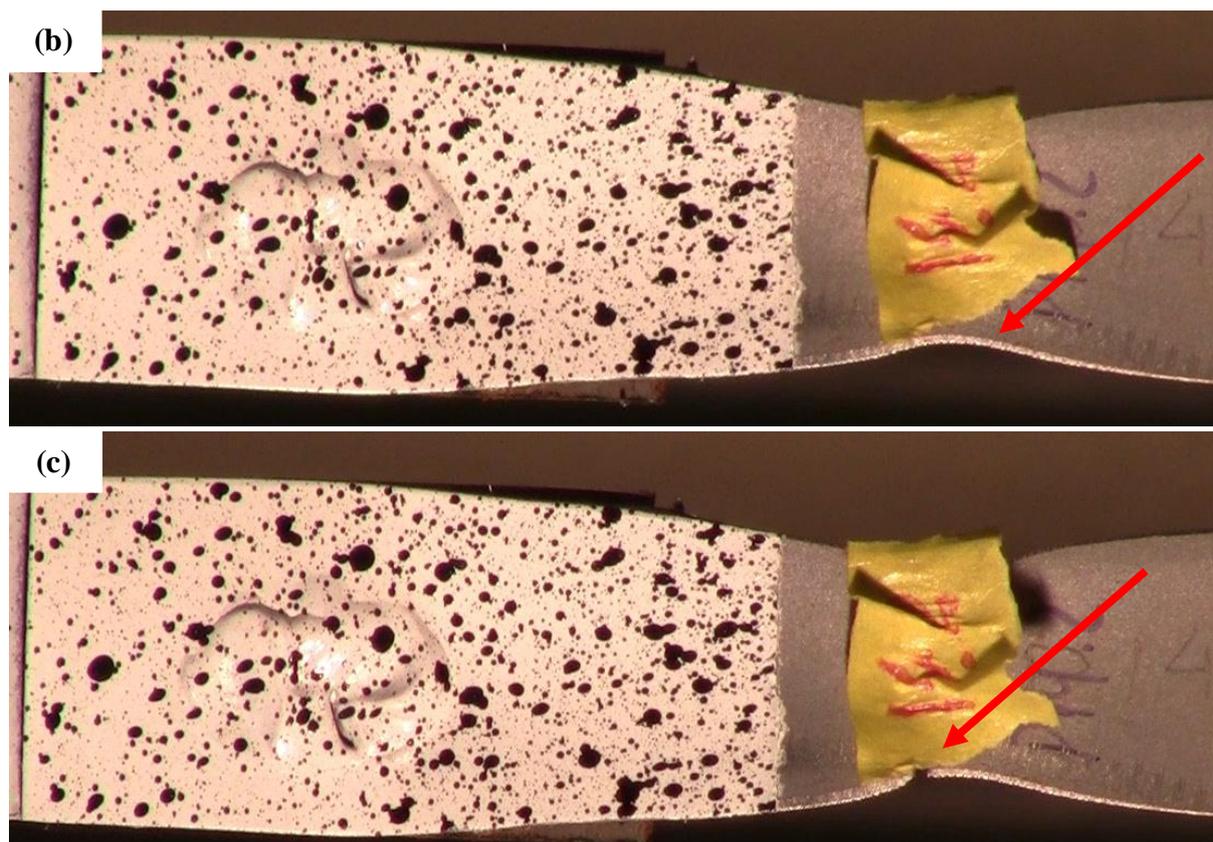


Fonte: Próprio autor.

A figura 54 ilustra os resultados do ensaio de tração para P14.2 onde em (a) o corpo de prova está intacto no começo do ensaio, em (b) a trinca começa a se propagar no CR4 e em (c) ocorreu a fratura total no final do material de base CR4. Devido a localização da propagação da trinca, não foi possível captar por imagem o momento da fratura.

Figura 54: Ensaio de tração da amostra P14.2.





Fonte: Próprio autor.

Em todas os corpos de prova a propagação da trinca e a fratura do material ocorreu no CR4 e a união se mantém intacta. Mesmo que no ensaio metalografico o material de adição apresentou melhor ângulo de molhabilidade nas amostras de CR4, a união entre o PHS também é resistente. A tabela 9 apresenta a carga máxima obtida para cada projeto.

Tabela 9: Carga máxima obtida no ensaio de tração.

Carga máxima em Newton (Kgf)			
Furo oblongo regular		Furo circular regular	
P5.2	P8.3	P11.2	P14.2
424.16000	492.07998	457.98002	427.38000

Fonte: Próprio autor.

Apesar das fraturas dos corpos de prova do projeto furo oblongo regular terem ocorrido na zona termicamente afetada pelo calor, a amostra P8.3 obteve o melhor resultado de carga máxima. A tabela 10 apresenta a extensão máxima obtida para cada projeto.

Tabela 10: Extensão máxima obtida no ensaio de tração.

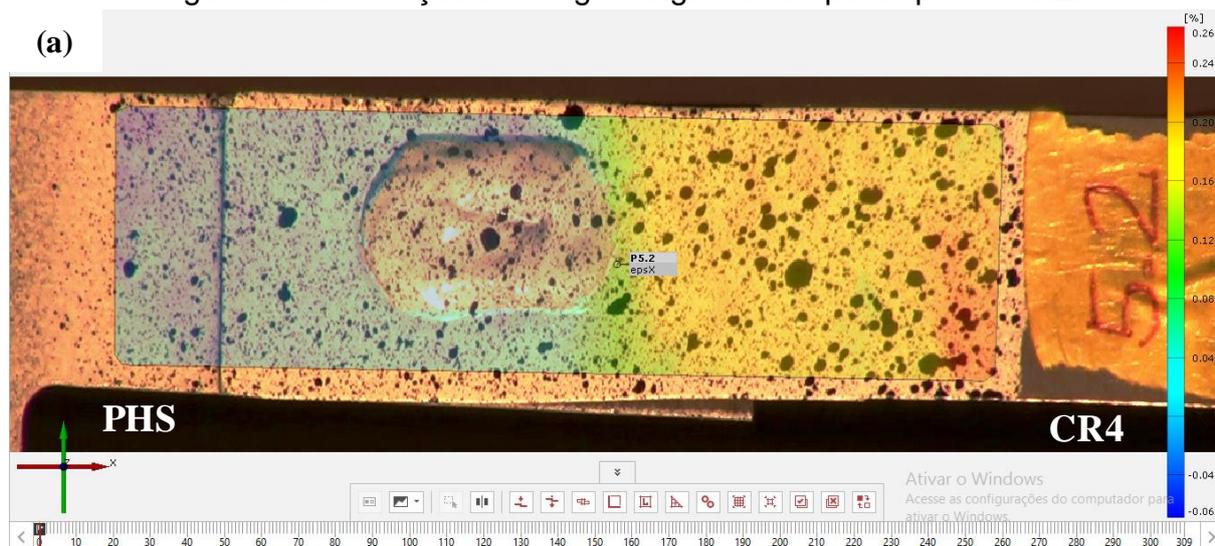
Extensão máxima (mm)			
Furo oblongo regular		Furo circular regular	
P5.2	P8.3	P11.2	P14.2
30.34610	31.49210	33.87340	28.27520

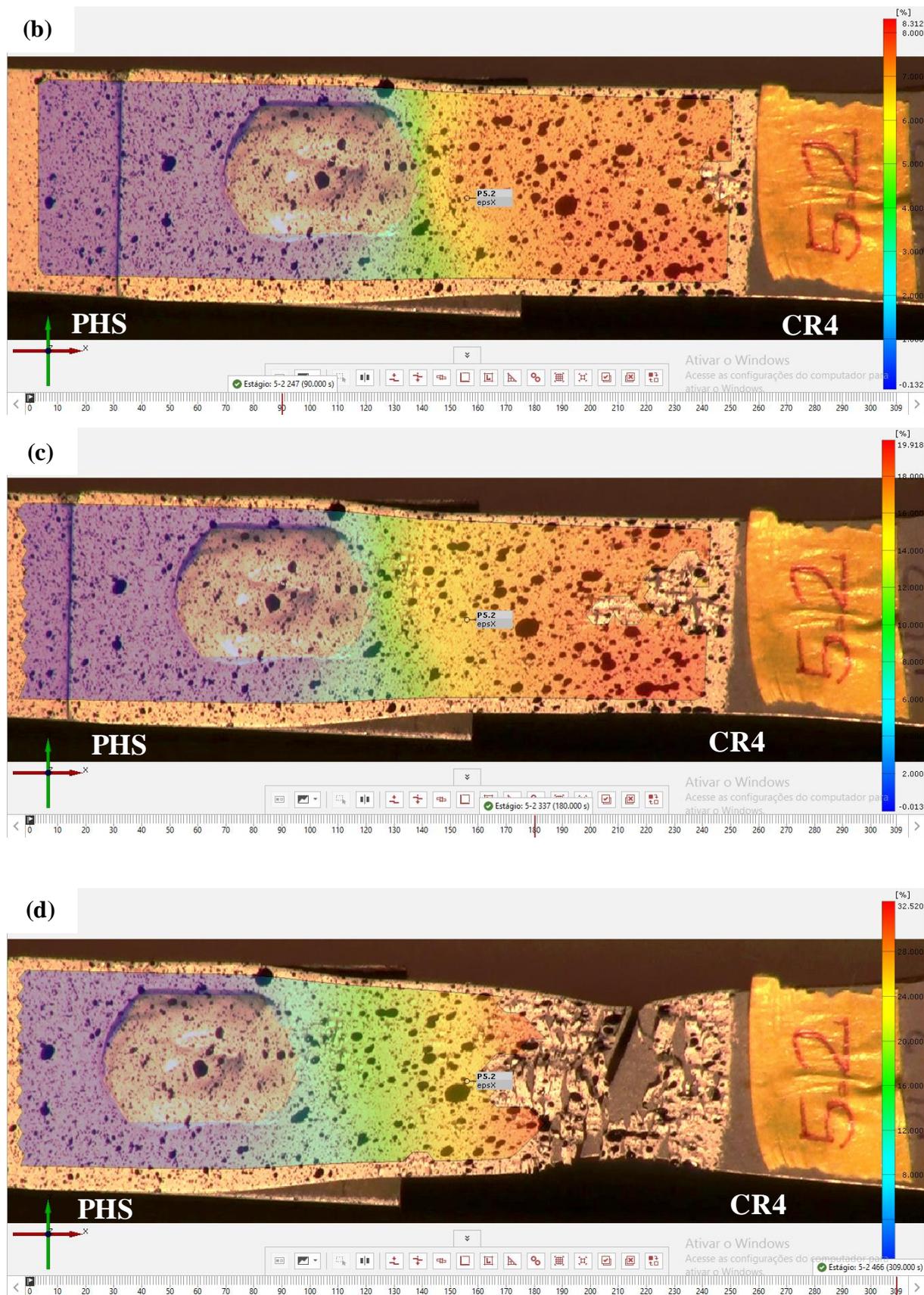
Fonte: Próprio autor.

5.6. Resultados com correlação de imagem digital.

Após o ensaio de tração os dados e imagens foram abertos no programa GOM correlate. A figura 55 ilustra os campos de deslocamento e de deformação do corpo de prova P5.2, onde em (a) é o início das deformações, em (b) o material de base CR4 concentra a maior parte das tensões, em (c) a propagação da trinca e em (d) a fratura total na amostra CR4.

Figura 55: Correlação de imagem digital do corpo de prova P5.2.

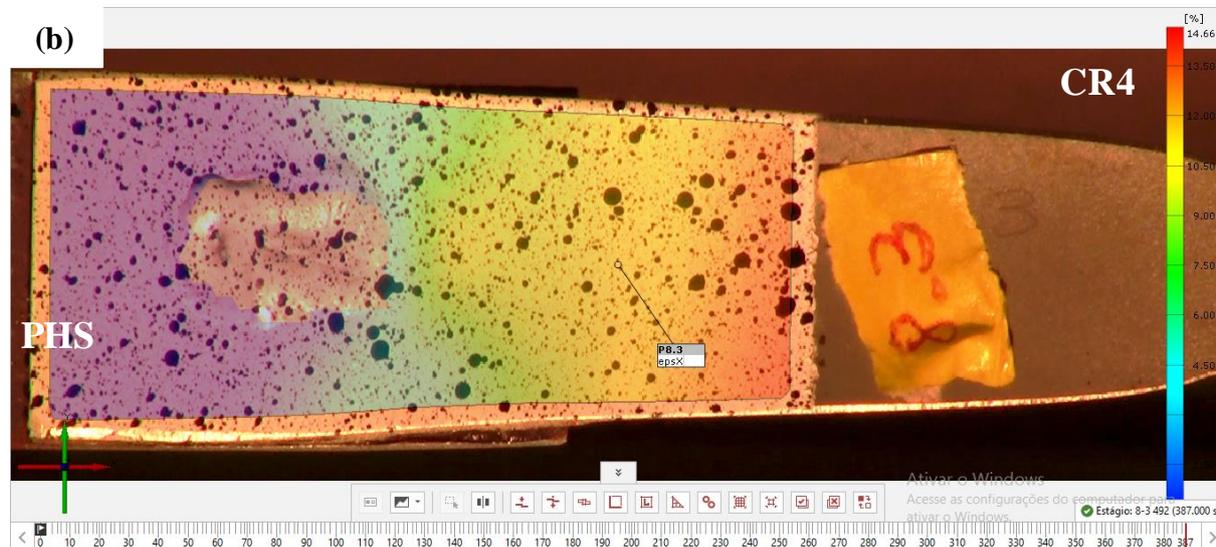
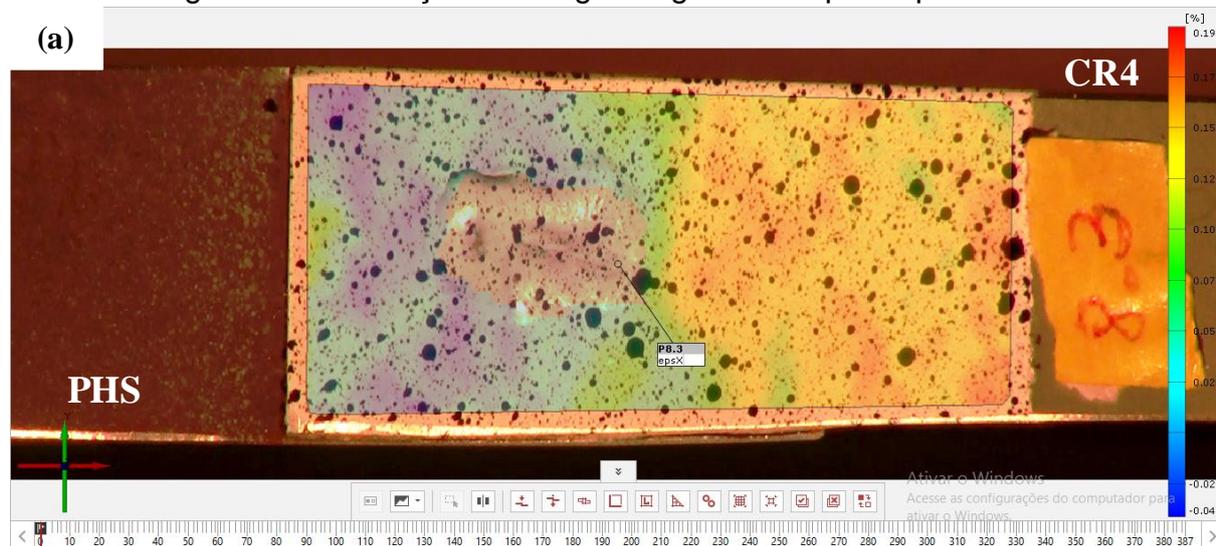




Fonte: Próprio autor.

A figura 56 ilustra os campos de deslocamento e de deformação do corpo de prova P8.3, onde em (a) é o início das deformações e em (b) o material de base CR4 concentra a maior parte das tensões, porém não é possível visualizar a fratura que ocorreu no CR4.

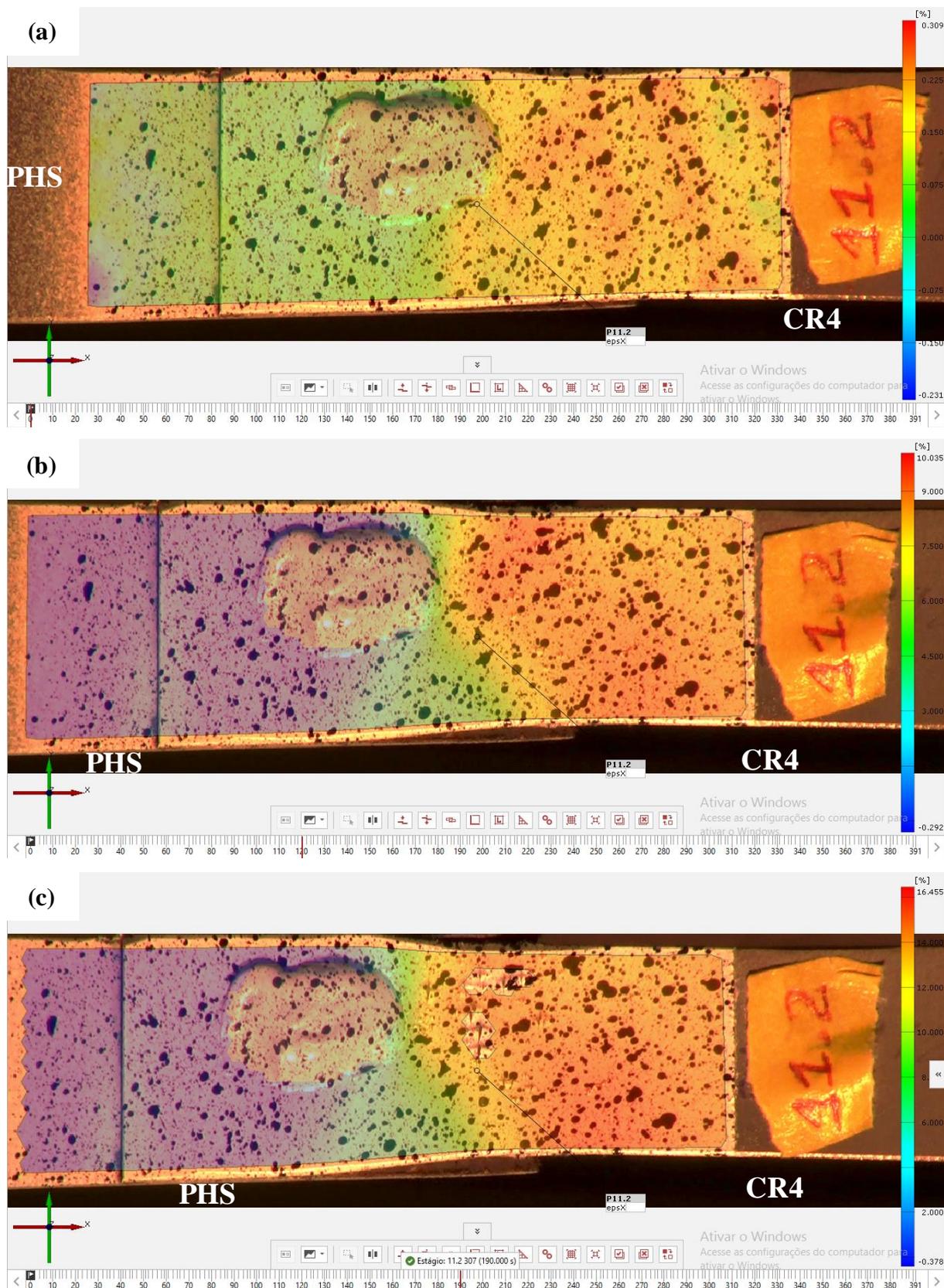
Figura 56: Correlação de imagem digital do corpo de prova P8.3.

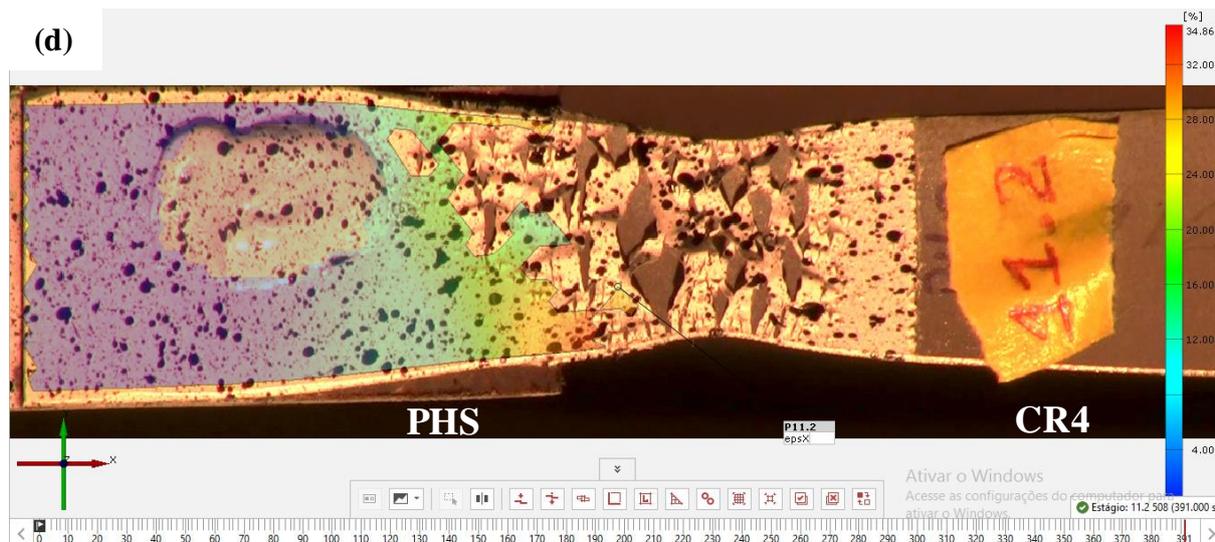


Fonte: Próprio autor.

A figura 57 ilustra os campos de deslocamento e de deformação do corpo de prova P11.2, onde em (a) é o início das deformações, em (b) o material de base CR4 concentra a maior parte das tensões, em (c) a propagação da trinca é evidente e em (d) a fratura total na amostra CR4.

Figura 57: Correlação de imagem digital do corpo de prova P11.2.

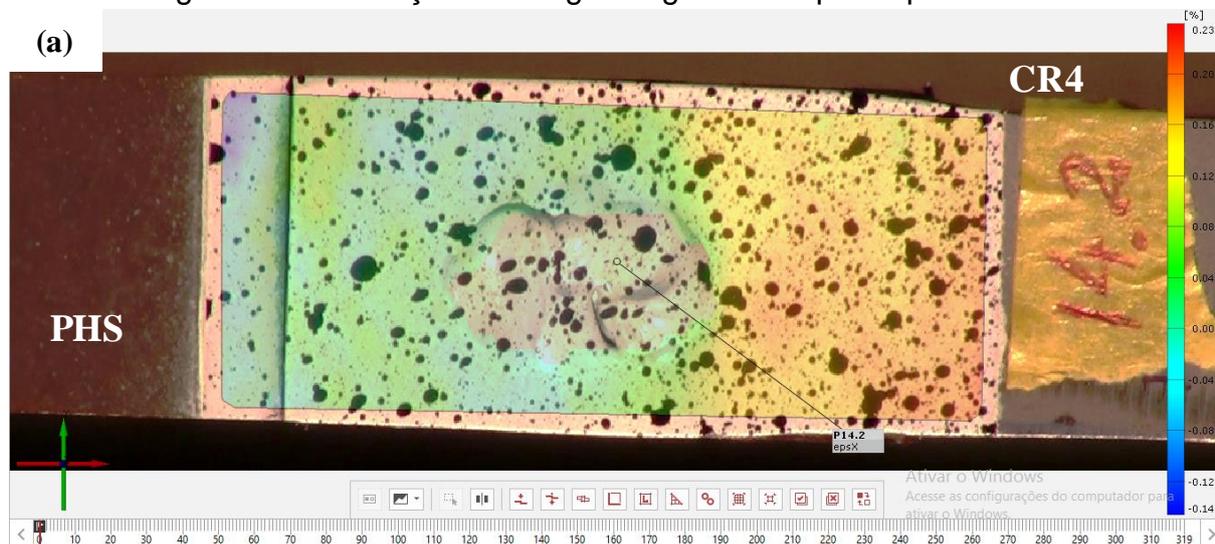


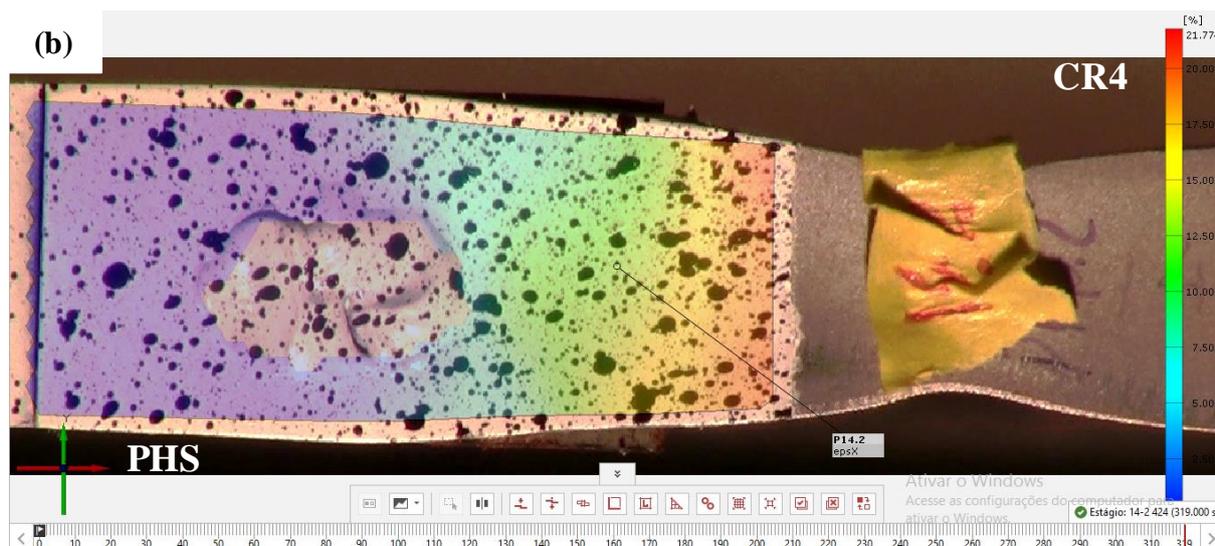


Fonte: Próprio autor.

A figura 58 ilustra os campos de deslocamento e de deformação do corpo de prova P14.2, onde em (a) é o início das deformações e em (b) o material de base CR4 concentra a maior parte das tensões, porém não é possível visualizar a fratura que ocorreu no CR4.

Figura 58: Correlação de imagem digital do corpo de prova P14.2.





Fonte: Próprio autor.

A combinação dos resultados do ensaio de tração com a correlação de imagem digital, mostrou que as amostras com espaçamento de 0,8 mm fraturaram longe da zona termicamente afetada pelo calor. Sugere-se que o espaçamento entre as chapas no processo de brasagem MIG melhora a resistência da união.

6 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados por meio dos ensaios realizados (dureza Vickers, metalografia e tração), podemos concluir que:

1 É necessário o espaçamento entre os materiais de base para que o material de adição preencha o furo oblongo regular e o furo circular regular pela ação da molhabilidade.

2 Com o sistema STT braze não ocorreu formação de respingos nas amostras, porém a quantidade de deposição do material de adição é exagerado para a finalidade de reparo na coluna B, devido a localização desse componente na carroceria.

3 A molhabilidade entre o material de adição (CuSi3) e o PHS não ocorreu de forma satisfatória. Sugere-se problemas com o baixo aporte de calor .

4 A mudança da microestrutura do PHS após o processo de união por brasagem MIG ocorreu na ZTA, mesmo com o menor aporte de calor do que a soldagem convencional.

5 Visualmente o melhor parâmetro para unir as amostras de PHS e CR4, foram T3 para furo oblongo regular, e T4 para furo circular regular, pois apresentaram uma melhor homogeneidade do cordão formado.

6 Os ensaios de dureza mostraram que as amostras tiveram uma queda na resistência na zona termicamente afetada pelo calor no material de base PHS. Sugere-se que isso ocorra devido a fabricação do aço estampado a quente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, D.W. **“A look at Advanced High-Strength Steel repairability”**. Endeavor Business Media, 2017.
- ALTAN, T. **“Hot Stamping Boron-Alloyed Steels for Automotive Parts – Part I: Process Methods and Uses”**. Stamping Journal, 2006, p. 40-41.
- ALTAN, T. **“Hot Stamping Boron-Alloyed Steels for Automotive Parts – Part II: Microstructure, Material Strength Changes During Hot Stamping”**. Stamping Journal, January 2007, 14-15.
- QUIAN, P.B; XIE, K; ASUNDI, H. A. **“Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review.”** Measurement Science and Technology, v. 20, 2009, p. 1-17.
- ARCELORMITTAL. **“Steel for the cars of tomorrow: Usibor® outstanding crash resistance is lighter and even tighter than traditional automotive steel”**. Disponível em: <<http://germany.arcelormittal.com/Innovation/Steel-solutions/Cars/>> Acesso em: 03/05/2016.
- AWS (American Welding Society, Inc.) A5. 32 **“Welding Consumables—Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes”**. Edição 2011.
- AWS (American Welding Society, Inc.) A5.31M/A5.31:2012 **“Specification for Fluxes for Brazing and Braze Welding”**. Edição 2012.
- AWS (American Welding Society, Inc.) A5.7 **“Specification for Copper and Copper Alloy Bare Welding Hot and Electrods”**. Edição 2007, 2007.
- AWS (American Welding Society, Inc.) C3. 3-2008 **“Recommended Practices for the Design, Manufacture, and Examination of Critical Brazed Components”**. Edição 2008.
- BANGKOK, B.B. **“Hot stamping of ultra high strength steel: A key technology for lightweight automotive design”**. Green mobility changing the world. World auto steel. June 2014.
- BATALHA, F. G. **“Processos de Fabricação: Junção, Soldagem e Brasagem”**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – Brasil, 2003.
- BERFIELD, T.A, et al. **“Micro-and nanoscale deformation measurement of surface and internal planes via digital image correlation”**. Experimental Mechanics, v. 47, pp.51-62, 2007.
- BUFFONI, S. **“Propriedades Mecânicas dos Materiais”**. Escola de engenharia industrial metalúrgica de volta redonda. Disponível em: <<http://www.cartografica.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2015/09/Propriedades-Mecanicas-dos-Materiais.pdf>> Acesso em: 25/04/2020.

CALLISTER W.D. "**Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**". LTC Editoras, 2012.

CARVALHO, R. H. C. "**Mortes por acidentes de transporte terrestre no Brasil: análise dos sistemas de informação do ministério da saúde**". Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA; 2016.

CATTERALL, J. "**Repairing martensitic steel in automotive body structures**". Endeavor Business Media, 2018.

FAN, D.W.; KIM, H.S.; COOMAN, B.C. "**A review of the physical metallurgy related to the hot press forming of advanced high strength steel**". Steel Research International, v. 80, n. 3, p. 241-248, 2009.

CHIAVERINI. "**Aços e Ferros Fundidos**". 7ª edição, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2002, p. 22.

CHOI, H. S. et al. "**Evaluation of weldability for resistance spot welded single lap joint between GA780DP and hot-stamped 22MnB5 steel sheets**". Journal of Mechanical Science and Technology, 2011.

CORREIA, A.L.G. "**Soldagem por Brasagem: Processo, aplicações e técnicas**". Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2017.

DIN (Deutsches Institut für Normung) 1733-1 "**Filler metals for welding copper and copper alloys; composition, application and technical delivery conditions**".

EUROPEAN STEEL AND ALLOY GRADES. "**DC01 (1.0330)**". Disponível em: <http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=199> Acesso em:06/11/2020.

GARCIA A. "**Ensaio dos materiais**". Livros técnicos e científicos Editora, 2010.

GUI, Z.; et al. "**Formability of aluminum-silicon coated boron steel in hot stamping process**". Transactions of Nonferrous Metals Society of China. v. 24, p. 1750-1757. 2014

GORNI, A. A. "**Novas tendências para o processo de estampagem a quente**". Editora: Corte & Conformação de Metais, 2010.

HARRIS. "**Boletim técnico processo MIG Brazing**". Sulzer Metco. Santo André – Brasil, 2015.

HONDA. "**Brasagem MIG no Honda Accord 2013**". Edição de 17 de julho de 2013 do I-CAR Advantage Online.

KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A.E. "**A Review on hot stamping**". Journal of Materials Technology, Elsevier, Dortmund, 2010.

LINCOLN ELECTRIC. “**STT® Braze - MIG Brazing Process**”. Disponível em: < <https://m.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/te12027.pdf> > Acesso em: 25/07/2020.

MICALLI, A. R.; BATALHA, J. R.; RAZERA, R. et al. “**Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem**”. Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade, São Paulo/SP, 2002.

NADERI, M. et al. “**A numerical and experimental investigation into hot stamping of boron alloyed heat treated steels**”. Department of Ferrous Metallurgy, RWTH Aachen University, Germany, 2007.

NADERI, M, SAEED-AKBARI, A E BLECK, W. “**The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel**”. Materials Science and Engineering A. 2008, 487, pp. 445–455.

NUNES, L. C. S, et al. “**Parameter estimation using digital image correlation and inverse problems**”. Solid Mechanics in Brazil, vol.1, pp 433-443, 2007.

OKIMOTO, Paulo César. Soldagem, TM 116. Disponível em: < http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM254/Prof_Okimoto/Aula3.pdf > Acesso em: 08/02/2020.

OLIVEIRA, L.; MENDES. P. “**Comissão aprova obrigatoriedade de proteção lateral em carros**”. Disponível em: < <http://g1.globo.com/carros/noticia/2014/11/comissao-aprova-obrigatoriedade-de-protexao-lateral-em-veiculos.html> > Acesso em: 10/06/2020.

PIKULA, J.; PFEIFER, T.; MENDAKIEWICZ, Jerzy. “**Influence of the shielding gas on the properties of VP MIG/MAG braze-welded joints in zinc coated steel sheets**”. 2014.

ROHDE. R, A. “**Metalografia preparação de amostras: Uma abordagem pratica**”. LEMM Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais. Versão 3. 2010.

ROTA 2030. “**O que é o Rota 2030?**”. Disponível em: <<https://www.rota2030.com.br/rota-2030-inovacao/>> Acesso em: 26/02/2020.

SCOTTI, A.; MORAIS, C. O.; VILARINHO, L. O. “**The effect of out-of-phase pulsing on metal transfer in twin wire GMA welding at high current level**”. Welding Journal, Oct. 2006.

SENADO. **Projeto de Lei do Senado nº 152 de 2017**. “Altera a Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, que institui o Código de Trânsito Brasileiro, para determinar que somente poderão ser comercializados os modelos de veículos que tenham alcançado resultados mínimos em testes de impacto (crash tests) ”.

SOUZA. S, A. “**Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**”. Editora Blucher. 5ª Edição. 1982.

SSAB. **“Proteção contra corrosão com revestimento de zinco”**. Disponível em: <<https://www.ssab.com.br/products/steel-categories/metal-coated-steels/coatings/zinc-coating>> Acesso em: 08/04/2020.

SUTTON, M.A; ORTEU, J.J; SCHREIER, H. **“Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications”**. Edição 1. Springer-Verlag US, 2009.

TURETTA, A. **“Investigation of Thermal, Mechanical and Microstructural Properties of Quenchable High Strength Steels in Hot Stamping Operations”**. PhD Thesis - Università degli Studi di Padova, Gennaio, 2008, p. 182.

VTECH CONSULTING LTDA. GOM Testing. **“Technical Documentation as of V8 SR1. Digital Image Correlation and Strain Computations Basics”**. 000000118_004_EN_16-11-2016. Braunschweig, Germany, 2016.

VTECH. **“Software para medição de testes com 3D”** Disponível em:<<https://www.vtech-br.com/gom-correlate>> Acesso em: 23/05/2020.

WHO. **“Global status report on road safety 2018”**. Geneva: World Health Organization; 2018. Licence: CC BYNC-SA 3.0 IGO.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino

Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000

Fone/Fax(0XX11) 3133-8908

SÃO PAULO – São Paulo – Brasil

<http://www.ipen.br>

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