MÁRCIO BATISTA

**Desenvolvimento de um processo de soldagem a
ponto por resistência elétrica utilizando
manufatura aditiva**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

São Paulo

2020

MÁRCIO BATISTA

**Desenvolvimento de um processo de soldagem a
ponto por resistência elétrica utilizando
manufatura aditiva**

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

2020

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

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Batista, Márcio

Desenvolvimento de um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizando manufatura aditiva / M. Batista -- versão corr. -- São Paulo, 2020.

303 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Soldagem a ponto por resistência elétrica 2.Manufatura aditiva
3.Deposição a Laser 4.Indústria automotiva 5.Soldagem a ponto
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, a meus pais Antônio Batista (in memorian) e Encarnacion Batista, aos meus irmãos Marcelo e Karine.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar;

Ao Professor Dr. Sérgio Duarte Brandi, pela orientação, apoio, confiança e incentivo nesta árdua tarefa;

A toda minha família pelo seu amor, carinho e dedicação;

A minha esposa Simone pelo apoio e paciência durante a execução deste trabalho;

Ao meu amigo Dr. Valdir Furlanetto da empresa *Welding Science* pela ajuda nos experimentos;

Aos meus amigos da USP Poli - Metalurgia: Jeferson José de Carvalho, Nicollas, Gustavo Suto, Thiago Ferreira Martins, David, Suellen, Rodolfo, Cristiana, entre muitos outros;

Aos meus colegas de trabalho pela ajuda e incentivo para a execução deste trabalho, em especial a Danilo Souza, Wagner Luiz, Demétrio Ferreira, Murilo, Israel, Daniel e Valdir.

A todos que, direta ou indiretamente, ajudaram na execução do presente trabalho.

Que Deus os abençoe e recompense por tudo!

RESUMO

Há várias décadas, o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica tem sido amplamente utilizado na fabricação de estruturas em chapas metálicas principalmente em carrocerias automotivas. Nota-se que neste período não houve desenvolvimento significativo para este processo de soldagem. Porém, nos últimos anos, com o intuito de atender a demanda de veículos mais leves devido as exigências ambientais, mais econômicos, mais seguros e de baixo custo, o setor de manufatura da indústria automotiva está passando por uma revolução em relação a utilização de combinações de chapas de aço com alta resistência mecânica, composições químicas e de espessuras diferentes. Dentro deste contexto, o presente trabalho será voltado para o estudo e desenvolvimento de uma nova tecnologia de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva em chapas de aço revestidas com zinco e sem revestimento empregadas na indústria automotiva. A título de comparação foi também realizado soldagem a ponto pelo processo convencional. Foram feitos diagramas de soldabilidade com o propósito de encontrar os parâmetros otimizados de soldagem. Posteriormente, utilizando os parâmetros otimizados, foram analisadas as propriedades mecânicas através dos ensaios de tração (por cisalhamento, por deslocamento e com chapas cruzadas) e ensaios de fadiga em carregamentos cíclicos. A fim de compreender os fenômenos que ocorrem durante a soldagem, foram estudas e analisadas os comportamentos das resistências dinâmicas, das magnitudes das energias elétricas de soldagem, da força entre os eletrodos e da expansão térmica do ponto de solda. Para análise das dimensões geométricas e dos fenômenos metalúrgicos dos pontos de solda foram realizadas macrografias, micrografias, composição química e ensaios de microdureza Vickers. Também foram realizados ensaios de corrosão em névoa salina em chapas pintadas conforme o processo da indústria automotiva. Destacam-se entre os resultados que o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), através dos parâmetros otimizados, se comparado ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) apresentou maior eficiência na geração de energia via calor, menor força entre os eletrodos, maior tensão máxima de tração em relação aos ensaios de: cisalhamento,

desplacamento e com chapas cruzadas (tração perpendicular ao ponto de solda). Observou-se também que os limites de fadiga não apresentaram diferenças significativas e que nos ensaios em névoa salina não se observou corrosão para ambos os processos de soldagem a ponto.

Palavras-Chave: Soldagem a ponto por resistência elétrica; Manufatura aditiva; Deposição a Laser; Indústria automotiva.

ABSTRACT

For several decades, the electric resistance spot welding process has been widely used in the manufacture of sheet metal structures mainly in automotive bodies. It has been noted that during this period there was no significant development for this welding process. However, in the last few years, in order to meet the demand for lighter, more economical, safer and lower cost vehicles due to environmental requirements, the automotive manufacturing industry is undergoing a revolution in the use of combinations of steel sheets with high mechanical resistance, different chemical compositions and thicknesses. Within this context, the present work will be focused on the study and development of a new spot welding technology using additive manufacturing in zinc coated and uncoated steel sheets employed in the automotive industry. By way of comparison, a spot welding by the conventional process was also performed. In order to find the optimal welding parameters, weldability diagrams were made. Subsequently, using the optimized parameters, the mechanical properties were analyzed through tensile tests (tensile shear test, pull test and cross tension test) and fatigue tests in cyclic loads. In order to understand the phenomena occurred during welding, the behaviors of the dynamic resistances, the magnitudes of the welding electric energies, the force between the electrodes and the thermal expansion of the weld spot were studied and analyzed. For the analysis of the geometrical dimensions and the metallurgical phenomena of the weld spot, macrographs, micrographs, chemical composition and Vickers microhardness tests were performed. Corrosion tests were also carried out in salt spray on painted plates according to the automotive industry process. What stands out among the results is that the spot welding process using additive manufacturing (AMSW), through the optimized parameters, compared to the conventional spot welding process (RSW) showed higher efficiency in heat energy generation, lower force between the electrodes, higher maximum tensile stress in relation to the tests of: shear, pull and cross-tension (tensile perpendicular to the weld point). It was also observed that the fatigue limits showed no significant differences and that in the salt spray tests no corrosion was observed for both spot welding processes.

Keywords: Resistance spot welding; Additive Manufacturing; Laser deposition; Automotive industry.

LISTA DE FIGURAS:

Figura 3.1: Cronologia da evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos [18].....	43
Figura 3.2: Equipamento para soldagem por resistência elétrica com auxílio de pressão mecânica (Soldagem a Topo). Patenteado por Elihu Thomson em 1888 [22].....	45
Figura 3.3: Desenho esquemático do processo de soldagem por costura [12].....	46
Figura 3.4: Desenho esquemático do processo de soldagem por projeção [12].....	47
Figura 3.5: Desenho esquemático do processo de soldagem a topo [19].....	47
Figura 3.6: Desenho esquemático do princípio de operação do processo de soldagem a ponto por resistência [12].....	48
Figura 3.7: Dispositivo de soldagem a ponto por resistência elétrica, utilizando água para refrigeração dos eletrodos, patenteado por Thomson em 1918 [34].....	50
Figura 3.8: Principais resistências elétricas durante a soldagem a ponto [10].....	55
Figura 3.9: Resistividade Elétrica em relação a temperatura: Aço, Alumínio e Cobre [10].....	56
Figura 3.10: Área efetiva de contato elétrico na interface dos condutores [43].....	57
Figura 3.11: Correlação entre a resistência de contato e a pressão dos eletrodos para diferentes materiais [20].....	58
Figura 3.12: Resistência de contato para diferentes condições de superfície [10].....	59
Figura 3.13: Resistência Dinâmica do aço e do alumínio durante o processo de soldagem a ponto por resistência [10].....	61
Figura 3.14: Principais estágios da resistência dinâmica durante o processo de soldagem a ponto. Adaptado da referência [45].....	62
Figura 3.15: Comportamento da resistência dinâmica em chapas revestidas com zinco, utilizando corrente alternada - CA (linha azul) e corrente contínua- CC (linha vermelha) [40].....	64
Figura 3.16: Desenho esquemático da volatilização do Zn: estágios 2 e 3 do gráfico da resistência dinâmica da Figura 3.17 [40].....	65
Figura 3.17: Evolução da formação do ponto de solda, através da resistência dinâmica, em chapas revestidas com zinco, utilizando um equipamento de ultrassom de imagem [46].....	66
Figura 3.18: Expansão térmica ou volumétrica em função da temperatura da liga de Alumínio (Al-Mg) e Ferro puro (Fe) [10].....	67
Figura 3.19: Forças intrínsecas durante a soldagem a ponto por resistência elétrica [10].....	68
Figura 3.20: Comportamento do deslocamento dos eletrodos durante a soldagem a ponto por resistência elétrica [10].....	69
Figura 3.21: Esquema do ciclo total de soldagem a ponto por resistência elétrica [19].....	70
Figura 3.22: Distribuição da pressão na interface de contato entre as chapas para eletrodos alinhados e desalinhados [10].....	73

Figura 3.23: Representação esquemática das forças atuantes entre os eletrodos e as chapas na região de soldagem [57].....	74
Figura 3.24: Aumento da deformação e da área de contato dos eletrodos durante o processo produtivo [61].....	76
Figura 3.25: Fresadora de eletrodos automatizada, utilizada em estações de soldagem robotizadas na indústria automotiva [63].....	76
Figura 3.26: Simulação computacional da distribuição da temperatura durante a soldagem a ponto por resistência. [61].....	77
Figura 3.27: Sistema de refrigeração dos eletrodos, referente ao processo de soldagem a ponto por resistência. [57].....	78
Figura 3.28: Principais geometrias de eletrodos utilizados na soldagem a ponto por resistência. [57].....	79
Figura 3.29: Diâmetro da área de contato do eletrodo (deformação) versus a quantidade de pontos de solda, comparando chapas de aço de baixo carbono sem revestimento em relação a chapas de aço revestidas com zinco de alta resistência mecânica (DP600) [65].....	80
Figura 3.30: Profundidade da Indentação (a) e marca da indentação na superfície da chapa (b) [66].....	81
Figura 3.31: Ponto de solda com separação excessiva entre as chapas, causada por uma indentação profunda [40].....	82
Figura 3.32: Profundidade da Indentação versus Parâmetros de soldagem: tempo (ms), corrente (KA) e força constante de 180Kgf [66].....	82
Figura 3.33: Mapeamento da profundidade da indentação nos diagramas de soldabilidade, tempo versus corrente (força constante de 230kgf). Em (a) para o equipamento de corrente contínua e em (b) para o equipamento de corrente alternada [67].....	83
Figura 3.34: Diagrama de Soldabilidade ou Janela Operacional [68].....	84
Figura 3.35: Exemplo de diagrama de soldabilidade em três dimensões contendo os parâmetros: tempo, corrente e força. E também mostra a metodologia para a escolha dos parâmetros otimizados [40].....	85
Figura 3.36: Macrografia de um ponto de solda mostrando uma solidificação uniforme e simétrica (Aço Inoxidável Duplex: UNS S32205) [71].....	87
Figura 3.37: Diagrama de fase e as microestruturas do ponto de solda, associadas a distribuição de temperatura durante a soldagem a ponto por resistência em chapas de aço carbono [10].....	89
Figura 3.38: Desenho esquemático de uma fratura interfacial (a) e de uma fratura dúctil (b), referente ao ponto de solda [19].....	90
Figura 3.39: Influência da composição química e do processo de fabricação para diferentes tipos de aço em relação as propriedades mecânicas [10].....	91
Figura 3.40: Principais fenômenos de transferência de energia via calor referentes ao processo de soldagem a ponto por resistência [41].....	92
Figura 3.41: Diagramas de soldabilidade em chapas de aço sem revestimento (a); e chapas de aço revestidas com zinco (b), de mesma espessura, composição química e condições de soldagem [40].....	95
Figura 3.42: Desenho esquemático do corpo de prova utilizado para testes de tração por cisalhamento, referente ao processo de soldagem a ponto. Adaptado da referência [12].....	97

Figura 3.43: Desenho esquemático do ensaio de arrancamento (<i>peel test</i>) [12].....	98
Figura 3.44: Exemplo das dimensões do ponto de solda analisadas no ensaio metalográfico [33].....	99
Figura 3.45: Exemplo de ensaio por ultrassom para análise e verificação da qualidade do ponto de solda [47,57].....	100
Figura 3.46: Transdutor matricial de 52 elementos (emissor e receptor) utilizado no “ultrassom de imagem”. Adaptado da referência [47].....	101
Figura 3.47: Exemplo de imagem do ponto de solda obtida pelo transdutor matricial de 52 elementos: antes (lado esquerdo) e após (lado direito) da interpretação dos sinais dos ecos ultrassônicos através do software [47].....	102
Figura 3.48: Principais elementos de uma máquina estacionária padrão utilizada no processo de soldagem a ponto por resistência [19].....	103
Figura 3.49: Exemplo de pinça manual, com transformador interno, utilizada na soldagem a ponto por resistência [19,57].....	104
Figura 3.50: Robô industrial, com seis graus de liberdade, utilizado na soldagem a ponto em linhas de produção automatizadas [40].....	104
Figura 3.51: Exemplo de peça fabricada pelo processo de manufatura aditiva, acrescentando material camada por camada [88].....	105
Figura 3.52: Exemplo de fabricação de geometria complexa utilizando o processo de Manufatura Aditiva [89].....	106
Figura 3.53: Comparação entre o processo de Manufatura Convencional e Manufatura Aditiva em relação ao custo versus complexidade da peça [88].....	106
Figura 3.54: Mapa de relevo topográfico em três dimensões, primeira grande aplicação do método de construção por camadas, patenteada por J.E. Blather em 1892 [87].....	108
Figura 3.55: Desenho esquemático do processo de Manufatura aditiva com deposição a Laser utilizando pó metálico. Adaptado da referência [99].....	110
Figura 3.56: Desenho esquemático de dois tipos de bocais, referente ao processo de manufatura aditiva utilizando pó metálico: (a) Bocal Coaxial e (b) Bocal externo [101].....	111
Figura 3.57: (a) Bocal Coaxial com fluxo de pó metálico com saída em forma de anel [103]; (b) Seção transversal do Bocal Coaxial com saída de pó metálico em forma de anel [86].....	112
Figura 3.58: (a) Bocal Coaxial com fluxo de pó metálico com múltiplas saídas; (b) Seção transversal do Bocal Coaxial com múltiplas saídas de pó metálico [86].....	113
Figura 3.59: Desenho esquemático de manufatura aditiva utilizando tubo lateral para alimentação do pó metálico (Bocal Externo). Adaptado [90].....	114
Figura 3.60: Desenho esquemático das seções transversais de deposições realizadas com o processo de manufatura aditiva, utilizando mesmos parâmetros e condições de deposição com diferentes potências do feixe laser [101].....	117
Figura 3.61: Desenho esquemático da interação do feixe <i>laser</i> com as partículas de pó metálico [90].....	118
Figura 3.62: (a) Distribuição (uniforme) de energia do feixe laser com o ponto focal coincidindo na superfície de deposição. (b) Distribuição (Gaussiana) de	

energia do feixe laser com foco localizado acima ou abaixo da superfície de deposição [110,111].....	119
Figura 3.63: Seções transversais referente ao processo de deposição a laser com pó metálico, em diferentes velocidades de deslocamento do bocal, utilizando mesmos parâmetros e condições de deposição. Adaptado da referência [112].....	120
Figura 3.64: Formato e a densidade de pó metálico em relação à altura do bocal e o jato de pó metálico [99].....	122
Figura 3.65: Lado esquerdo: Pó metálico fabricado pelo processo de atomização a gás, com uma morfologia arredondada, irregular e uma considerável quantidade de satélites. Lado direito: Pó metálico fabricado pelo processo de eletrodo rotativo a plasma, com uma morfologia esférica, de alta densidade e com baixa quantidade de satélites [122].....	125
Figura 4.1: Dimensões dos corpos de prova utilizados nos experimentos, baseado na norma AWS B4.0:2007 [123].....	126
Figura 4.2: Espectrômetro de emissão óptica para análise da composição química das chapas de aço utilizadas nos experimentos.....	127
Figura 4.3: Exemplo de ensaio de tração para a determinação das propriedades mecânicas das chapas de aço utilizadas nos experimentos.....	129
Figura 4.4: Propriedades mecânicas das chapas de aço sem revestimento encontradas através dos ensaios de tração (média de três ensaios)	130
Figura 4.5: Propriedades mecânicas das chapas de aço com revestimento de zinco encontradas através dos ensaios de tração (média de três ensaios)	130
Figura 4.6: Equipamento utilizado para verificação da morfologia e da composição granulométrica do pó metálico: Microscópio eletrônico de varredura (MEV), de alta resolução com emissão de elétrons por um canhão de aplicação de um campo elétrico (FEG)	132
Figura 4.7: Distribuição de frequência em relação ao tamanho das partículas do pó metálico (dados da Tabela 4.4)	133
Figura 4.8: Imagens das amostras do pó metálico 316 L utilizado nos experimentos, obtidas através do equipamento MEV-FEG, para a verificação da morfologia e da composição granulométrica.....	134
Figura 4.9: Imagem com mais detalhes das partículas de pó metálico 316 L (MEV-FEG), para análise da morfologia e composição granulométrica.....	135
Figura 4.10: Desenho esquemático do corpo de prova para a execução da deposição a laser utilizando pó metálico através do processo de manufatura aditiva.	136
Figura 4.11: Desenho esquemático da execução da soldagem por resistência elétrica utilizando manufatura aditiva.....	137
Figura 4.12: Imagem externa e interna, respectivamente, do equipamento de manufatura aditiva de deposição a laser com pó metálico, modelo RPM 535 fabricado pela empresa RPM INNOVATIONS, INC.....	138
Figura 4.13: Imagem interna do equipamento de manufatura aditiva utilizado nos experimentos, com 5 eixos para o controle dos movimentos, mostrando o cabeçote de deposição a laser (3 eixos), assim como, a mesa de fixação (2 eixos)	139

Figura 4.14: Desenho esquemático do bocal coaxial de múltiplas saídas (4 saídas) utilizado nos experimentos, representado por uma perspectiva isométrica e um corte transversal, respectivamente.	140
Figura 4.15: Imagem do Bocal utilizado nos experimentos, mostrando o posicionamento do foco do pó metálico em relação a superfície da chapa.....	141
Figura 4.16: Representação esquemática do posicionamento e diâmetro do feixe laser em relação a superfície da chapa e o ponto focal do pó metálico.....	142
Figura 4.17: Representação esquemática das duas estratégias de impressão ou deposição para análise.....	143
Figura 4.18: Exemplo de impressão ou deposição circular (primeira estratégia) realizada durante os experimentos ($\varnothing$ 4 mm $\pm$ 0.2 e altura de 0.3 mm $\pm$ 0.1)	144
Figura 4.19: Verificação da planicidade com um relógio apalpador da placa adaptada à máquina para a execução das impressões dos pontos.....	146
Figura 4.20: Exemplo de execução, durante os experimentos, das impressões dos pontos em 40 chapas a cada programação.....	147
Figura 4.21: Chapas com 3 impressões para execução de ensaios de tração com chapas cruzadas e ensaios de corrosão.....	148
Figura 4.22: Desenho esquemático do corpo de prova com três deposições ou impressões para execução dos ensaios de tração com chapas cruzadas e ensaios de corrosão.....	148
Figura 4.23 Imagem lateral (superior) e uma imagem frontal (inferior) do equipamento de soldagem utilizado nos experimentos.....	150
Figura 4.24: Vista geral do equipamento de soldagem a ponto por residência elétrica e também dos acessórios utilizados durante os experimentos.....	151
Figura 4.25: Principais equipamentos utilizados para medição e monitoramento das magnitudes de tensão, corrente, força e deslocamento entre os eletrodos durante a soldagem.....	152
Figura 4.26: Conectores instalados nos porta eletrodos para captura das magnitudes da tensão elétrica.....	153
Figura 4.27: Monitoramento durante a soldagem da força do servo motor e da força de expansão térmica do ponto de solda utilizando célula de carga.....	154
Figura 4.28: Geometrias de contato (eletrodo/chapa) e as dimensões dos eletrodos utilizados durante os experimentos, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW: Figura do lado esquerdo) como para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW: Figura do lado direito)	157
Figura 4.29: Dimensões e resistência a tração mínima utilizada para aprovação do ponto de solda durante os experimentos de acordo com a norma.....	158
Figura 4.30: Metodologia utilizada nos ensaios de tração (por cisalhamento, com chapas cruzadas e por deslocamento) e também de arrancamento para a determinação do diâmetro mínimo do ponto de solda; e algumas configurações possíveis de fratura [33,40].....	160
Figura 4.31: Desenho esquemático da penetração (altura do ponto) de solda mínima conforme norma, revelada nos ensaios de macrografia.....	161

Figura 4.32: Desenho esquemático da profundidade máxima permitida da Indentação de acordo com a norma.....	162
Figura 4.33: Desenho esquemático de poros ou cavidades reveladas nos ensaios de macrografias no ponto de solda.....	163
Figura 4.34: Desenho esquemático de trincas internas no ponto de solda reveladas nos ensaios de macrografias.....	164
Figura 4.35: Desenho esquemático da abertura entre as chapas soldadas.....	164
Figura 4.36: Metodologia para a determinação do diagrama de soldabilidade ou janela operacional referente ao processo de soldagem a ponto por resistência convencional (RSW)	166
Figura 4.37: Metodologia para a determinação do diagrama de soldabilidade ou janela operacional referente ao processo de soldagem a ponto por resistência utilizando manufatura aditiva (AMSW)	168
Figura 4.38: Desenho esquemático do ensaio de tração por cisalhamento, baseado na norma AWS B4.0:2007 [123], e uma imagem deste ensaio realizado durante os experimentos.....	169
Figura 4.39: Exemplo de gráfico Tensão-Deformação realizado pelo equipamento de ensaio de tração para análise das forças máximas atingidas pelos pontos de solda.....	170
Figura 4.40: Exemplo de amostras preparadas para os ensaios de tração e também apresenta as amostras que posteriormente foram tracionadas durante os experimentos.....	171
Figura 4.41: Desenho esquemático e exemplos de amostras para o ensaio de tração com chapas cruzadas (tração perpendicular ao ponto de solda), baseado na norma AWS B4.0:2007 [123].....	172
Figura 4.42: Desenho esquemático e uma imagem do dispositivo de fixação utilizado para os ensaios de tração com chapas cruzadas (baseado na norma AWS B4.0:2007) [123].....	173
Figura 4.43: Desenho esquemático e uma imagem do ensaio de tração por deslocamento (<i>pull test</i>) realizada durante os experimentos (baseado na norma AWS B4.0:2007) [123].....	174
Figura 4.44: Exemplos de embutimentos realizados durante os ensaios metalográficos (macrografias e micrografias) dos pontos de solda para ambos os processos de soldagem (AMSW e RSW)	176
Figura 4.45: Equipamento de microdureza Vickers, utilizado nos ensaios, da marca Emco-Test e modelo Durascan 70 com penetrador piramidal.....	177
Figura 4.46: Desenho esquemático das amostras utilizadas nos ensaios de corrosão em névoa salina, assim como as quantidades das amostras para cada processo de soldagem (AMSW e RSW), em chapas com e sem revestimento de zinco.....	178
Figura 4.47: Desenho esquemático das cinco camadas de pintura executadas nas amostras para os ensaios de corrosão em névoa salina, conforme o processo de pintura de carrocerias de veículos.....	179
Figura 4.48: Amostras soldadas, contendo 3 pontos de solda cada, preparação para a execução dos ensaios de corrosão em névoa salina.....	180
Figura 4.49: Processo de fosfatização e processo de eletrodeposição catódica, preparação para a realização dos ensaios de corrosão em névoa salina.....	180

Figura 4.50: Processo de pintura de fundo (<i>primer</i>), processo de pintura de tinta base da cor branca e finalmente a aplicação de verniz, amostras prontas para a realização dos ensaios de corrosão em névoa salina.....	181
Figura 4.51: Equipamento utilizado para os ensaios de corrosão em névoa salina: Marca - Equilam, modelo SSE 1300 G2.....	181
Figura 4.52: Disposição das amostras com uma inclinação de 15° na vertical, dentro do equipamento para ensaios de corrosão em névoa salina.....	182
Figura 5.1: Ensaio para análise da composição química referente a deposição a laser utilizando pó metálico 316 L.....	183
Figura 5.2: Gráfico comparativo entre os principais elementos de liga do pó metálico (316 L) em relação aos elementos de liga do material depositado em chapa com revestimento de zinco e sem revestimento.....	185
Figura 5.3: Exemplo do dimensionamento da deposição (raio e área) capturada pelo microscópio durante os experimentos.....	187
Figura 5.4: Imagens capturadas pelo microscópio para análise da morfologia da superfície da deposição (frente e verso) em chapa sem revestimento.....	188
Figura 5.5: Imagens capturadas pelo microscópio para análise da morfologia da superfície da deposição (frente e verso) em chapa com revestimento de zinco.....	189
Figura 5.6: Exemplo do dimensionamento das áreas utilizando as macrografias e a metodologia para o cálculo da diluição. Adaptado da referência [13].....	190
Figura 5.7: Correlação entre o percentual de diluição, a resistência de contato e a pressão de contato. Adaptado da referência [126].....	192
Figura 5.8: Diagrama de soldabilidade (tempo versus corrente) com força constante entre os eletrodos de 110 kgf, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco.....	195
Figura 5.9: Diagrama de soldabilidade (tempo versus corrente) com força constante entre os eletrodos de 290 kgf, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.....	197
Figura 5.10: Comparação dos diagramas de soldabilidade entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.....	199
Figura 5.11: Diagrama de soldabilidade (tempo versus corrente) com força constante entre os eletrodos de 110 kgf, através do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento.....	200
Figura 5.12: Diagrama de soldabilidade (tempo versus corrente) com força constante entre os eletrodos de 220 kgf, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento.....	202
Figura 5.13: Comparação dos diagramas de soldabilidade entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento.....	204
Figura 5.14: Desenho esquemático referente as dimensões do ponto de solda coletados através das macrografias para ambos os processos de soldagem a ponto: AMSW e RSW.....	206
Figura 5.15: Dimensões do ponto de solda (parâmetros otimizados) coletados através das macrografias, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em chapas sem revestimento e revestidas com zinco.....	207

Figura 5.16: Dimensões do ponto de solda (parâmetros otimizados) coletados através das macrografias, referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), em chapas sem revestimento e revestidas com zinco...	207
Figura 5.17: Imagens capturadas pelo microscópio das superfícies das chapas (CH1) sem revestimento (imagem superior) e revestidas com zinco (imagem inferior), após a execução do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW).....	211
Figura 5.18: Comparação das tensões máximas de tração por cisalhamento entre os pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima da chapa com revestimento de zinco.....	215
Figura 5.19: Comparação das tensões máximas de tração por cisalhamento entre os pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima da chapa sem revestimento.....	217
Figura 5.20: Comparação das tensões máximas de tração dos pontos de solda com chapas cruzadas, entre processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), em relação a tensão máxima da chapa com revestimento de zinco....	222
Figura 5.21: Comparação das tensões máximas de tração dos pontos de solda com chapas cruzadas, entre processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima da chapa sem revestimento.....	224
Figura 5.22: Comparação das tensões máximas de tração por deslocamento dos pontos de solda entre processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima da chapa com revestimento de zinco.....	229
Figura 5.23: Comparação das tensões máximas de tração por deslocamento dos pontos de solda entre processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima da chapa sem revestimento.....	231
Figura 5.24: Gráfico de resistência a fadiga em relação a Carga máxima: $P_{m\acute{a}x}$. (kN) versus Número de ciclos até a falha (N_f), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa com revestimento de zinco.....	234
Figura 5.25: Gráfico de resistência a fadiga em relação ao Fator de carga máxima versus Número de ciclos até a falha (N_f), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa com revestimento de zinco.....	235
Figura 5.26: Característica da falha em relação ao regime de fadiga de baixo ciclo (a, c) e alto ciclo (b, d), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa revestida com zinco.....	236
Figura 5.27: Gráfico de resistência a fadiga em relação a Carga máxima: $P_{m\acute{a}x}$. (kN) versus Número de ciclos até a falha (N_f), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa sem revestimento.....	239
Figura 5.28: Gráfico de resistência a fadiga em relação ao Fator de carga máxima versus Número de ciclos até a falha (N_f), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa sem revestimento.....	240
Figura 5.29: Característica da falha em relação ao regime de fadiga de baixo ciclo (a, c) e alto ciclo (b, d), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa sem revestimento.....	241

Figura 5.30: Fractografia da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC, referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco.....	242
Figura 5.31: Fractografia da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco.....	244
Figura 5.32: Fractografia da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC, referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento.....	245
Figura 5.33: Fractografia da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC, referente ao processo de soldagem a ponto convencional (AMSW) em chapa sem revestimento.....	246
Figura 5.34: a) Mapeamento de microdureza Vickers da amostra com a deposição (antes da soldagem a ponto AMSW) em chapa sem revestimento (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm). b) Macrografia da amostra com a deposição em chapa sem revestimento.....	248
Figura 5.35: a) Mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) em chapa sem revestimento (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm). b) Macrografia do ponto de solda (AMSW – chapa sem revestimento).....	249
Figura 5.36: a) Mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm). b) Macrografia do ponto de solda (RSW – chapa sem revestimento).....	251
Figura 5.37: Comparação dos valores das médias de microdureza Vickers, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento.....	252
Figura 5.38: Diagrama de Schaeffler para a determinação da microestrutura da zona fundida (ZF) do ponto de solda (AMSW) em chapa sem revestimento. Adaptado da referência [125].....	253
Figura 5.39: a) Mapeamento de microdureza Vickers da amostra com a deposição (antes da soldagem a ponto AMSW) em chapa com revestimento de zinco (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm). b) Macrografia da amostra com a deposição em chapa com revestimento de zinco.....	254
Figura 5.40: a) Mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) em chapa com revestimento de zinco (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm). b) Macrografia do ponto de solda (AMSW - chapa com revestimento de zinco).....	255
Figura 5.41: a) Mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm). b) Macrografia do ponto de solda (RSW – chapa com revestimento de zinco)....	257
Figura 5.42: Comparação dos valores das médias de microdureza, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o processo de soldagem convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.....	258

Figura 5.43: Diagrama de Schaeffler para a determinação da microestrutura da zona fundida (ZF) do ponto de solda (AMSW) em chapa com revestimento de zinco. Adaptado da referência [125].....	260
Figura 5.44: a) Macrografia e b) micrografia (Aumento: 200x) da deposição a laser utilizando pó metálico (Aço inoxidável: 316L) em chapa com revestimento de zinco.....	262
Figura 5.45: a) Macrografia e b) micrografia (Aumento: 200x) da deposição a laser utilizando pó metálico (Aço inoxidável: 316L) em chapa sem revestimento.....	263
Figura 5.46: Macrografia do ponto de solda executado pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco.....	264
Figura 5.47: Micrografias do ponto de solda executado pelo processo AMSW em chapa revestida com zinco, conforme mostra a Figura 5.43. a) Chapa sem deposição (superior). b) Chapa com deposição (inferior). Aumento: 200x.....	265
Figura 5.48: Micrografia da zona fundida (ZF) do ponto de solda executado pelo processo AMSW em chapa revestida com zinco, conforme mostra a Figura 5.43 (retângulo: c). Aumento: 500x.....	266
Figura 5.49: a) Macrografia e b) micrografia (Aumento: 200x) do ponto de solda executado pelo processo de soldagem convencional (RSW) em chapa revestida com zinco.....	268
Figura 5.50: Macrografia do ponto de solda executado pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento.....	269
Figura 5.51: Micrografias do ponto de solda executado pelo processo AMSW em chapa sem revestimento, conforme mostra a Figura 5.47. a) Chapa sem deposição (superior). b) Chapa com deposição (inferior). Aumento: 200x.....	270
Figura 5.52: a) Macrografia e b) micrografia (Aumento: 200x) do ponto de solda executado pelo processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento.....	272
Figura 5.53: Comparação da resistência dinâmica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento de zinco.....	274
Figura 5.54: Comparação da energia elétrica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento de zinco.....	276
Figura 5.55: Comparação do comportamento da força entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento de zinco.....	277
Figura 5.56: Resistência dinâmica do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e do processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.....	278
Figura 5.57: Comparação da energia elétrica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.....	280
Figura 5.58: Comparação do comportamento da força entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.....	281

Figura 5.59: Resistências dinâmicas do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento.....	283
Figura 5.60: Comparação de energia elétrica do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento.....	284
Figura 5.61: Comparação do comportamento da força do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento.....	285
Figura 5.62: Exemplos de amostras referente aos ensaios de corrosão em névoa salina após 60 ciclos (60 dias): soldagem a ponto convencional (RSW) e soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW).....	286

LISTA DE TABELAS:

Tabela 3.1: Resistividade elétrica de alguns materiais a 20°C [38].....	52
Tabela 3.2: Coeficientes de temperatura de resistividade de alguns materiais a 20°C [38].....	53
Tabela 3.3: Principais parâmetros do processo de deposição a laser utilizando pó metálico [86].....	116
Tabela 4.1: Composição química das chapas de aço, revestidas com zinco e sem revestimento, utilizadas nos experimentos (média de três análises).....	128
Tabela 4.2: Composição química do pó metálico - Aço Inoxidável 316L.....	131
Tabela 4.3: Propriedades físicas do pó metálico - 316 L: Densidade Aparente, Escoamento, Resistividade Elétrica e a Condutividade Térmica.....	132
Tabela 4.4: Composição Granulométrica ou a Granulometria do pó metálico (aço inoxidável austenítico: 316 L) utilizado nos experimentos.....	133
Tabela 4.5: Principais características do equipamento (modelo RPMI 535) para deposição a laser com pó metálico utilizado nos experimentos.....	140
Tabela 4.6: Exemplos de parâmetros executados durante os experimentos para encontrar a melhor impressão do ponto em relação ao dimensional pré-estabelecido.....	145
Tabela 4.7: Parâmetros otimizados para a deposição do ponto utilizados durante os experimentos, para chapas com e sem revestimentos de zinco.....	145
Tabela 4.8: Quantidade de impressões ou deposições realizadas nos experimentos utilizando manufatura aditiva.....	149
Tabela 4.9: Descrição dos principais componentes do equipamento de soldagem utilizado nos experimentos.....	151
Tabela 4.10: Descrição dos principais equipamentos utilizados para medição e monitoramento: tensão, corrente, força e deslocamento entre os eletrodos.....	153
Tabela 4.11: Características dos eletrodos para o processo de soldagem por resistência elétrica, conforme a classificação da norma RWMA [124].....	157
Tabela 5.1: Média da composição química de três amostra da deposição a laser utilizando pó metálico 316 L em chapas com revestimento de zinco.....	184
Tabela 5.2: Média da composição química de três amostra da deposição a laser utilizando pó metálico 316 L em chapas sem revestimento.....	184
Tabela 5.3: Comparação entre a composição química do pó metálico em relação aos resultados das deposições (média) apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2..	184
Tabela 5.4: Dimensional e peso referente a deposição a laser em chapas sem revestimento.....	186
Tabela 5.5: Dimensional e peso referente a deposição a laser em chapas com revestimento de zinco.....	186
Tabela 5.6: Média (3 amostras) da diluição (%) referente a deposição em chapa com zinco.....	191
Tabela 5.7: Média (3 amostras) da diluição (%) referente a deposição em chapa sem zinco.....	191
Tabela 5.8: Percentual da diluição para os principais elementos de liga, referente a deposição em chapa sem revestimento, comparando com a análise química.....	191

Tabela 5.9: Percentual da diluição para os principais elementos de liga, referente a deposição em chapa com zinco, comparando com a análise química.....	192
Tabela 5.10: Parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos, diâmetro e força de tração dos pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas com revestimento de zinco.....	196
Tabela 5.11: Parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos, diâmetro e força de tração dos pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.....	198
Tabela 5.12: Parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos, diâmetro e força de tração dos pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas sem revestimento.....	201
Tabela 5.13: Parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos, diâmetro e força de tração dos pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento.....	203
Tabela 5.14: Valores das dimensões dos pontos de solda através das macrografias, empregando os parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas sem revestimento.....	208
Tabela 5.15: Valores das dimensões dos pontos de solda, através das macrografias empregando os parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento.....	208
Tabela 5.16: Valores das dimensões dos pontos de solda, através das macrografias empregando os parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas com revestimento de zinco.....	209
Tabela 5.17: Valores das dimensões dos pontos de solda, através das macrografias empregando os parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.....	209
Tabela 5.18: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por cisalhamento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco.....	212
Tabela 5.19: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por cisalhamento, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.....	213
Tabela 5.20: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por cisalhamento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento.....	213
Tabela 5.21: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por cisalhamento, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento.....	213
Tabela 5.22: Comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento dos pontos de solda entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a chapa revestida com zinco.....	215
Tabela 5.23: Comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento dos pontos de solda, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura	

aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a chapa sem revestimento.....	217
Tabela 5.24: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas com revestimento de zinco.....	219
Tabela 5.25: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.....	220
Tabela 5.26: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas sem revestimento.....	220
Tabela 5.27: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento.....	220
Tabela 5.28: Comparação da tensão máxima de tração dos pontos de solda com chapas cruzadas, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a chapa revestida com zinco.....	222
Tabela 5.29: Comparação da tensão máxima de tração dos pontos de solda com chapas cruzadas, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação as chapas sem revestimento.....	224
Tabela 5.30: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por deslocamento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas com revestimento de zinco.....	226
Tabela 5.31: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por deslocamento, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.....	227
Tabela 5.32: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por deslocamento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas sem revestimento.....	227
Tabela 5.33: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por deslocamento, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento.....	227
Tabela 5.34: Comparação da tensão máxima de tração por deslocamento dos pontos de solda entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a chapa revestida com zinco.....	229
Tabela 5.35: Comparação da tensão máxima de tração por deslocamento dos pontos de solda entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a chapa sem revestimento.....	230
Tabela 5.36: Ensaio de fadiga, processo de soldagem RSW em chapa revestida com zinco.....	233
Tabela 5.37: Ensaio de fadiga, processo de soldagem AMSW em chapa revestida com zinco.....	233
Tabela 5.38: Ensaio de fadiga, processo de soldagem RSW em chapa sem revestimento.....	237

Tabela 5.39: Ensaio de fadiga, processo de soldagem AMSW em chapa sem revestimento.....	238
Tabela 5.40: Valores das médias de microdureza Vickers para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) e para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento.....	251
Tabela 5.41: Composição química dos principais elementos de liga da zona fundida (ZF), referente ao ponto de solda (AMSW) em chapa sem revestimento, executada via MEV-EDS.....	253
Tabela 5.42: Valores das médias de microdureza Vickers para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) e para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.....	258
Tabela 5.43: Composição química dos principais elementos de liga da zona fundida (ZF), referente ao ponto de solda (AMSW) em chapa com revestimento de zinco, executada via MEV- EDS.....	259
Tabela 5.44: Parâmetros Otimizados de Soldagem, em relação aos processos AMSW e RWS, em chapas com revestimento de zinco e sem revestimento....	273

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS:

A:	Área de contato.
A ₁ :	Profundidade da Indentação (chapa 1).
A ₂ :	Profundidade da Indentação (chapa 2).
a _{c12} :	Abertura entre as chapas 1 e 2.
b:	Dimensão (comprimento) de contato do eletrodo.
Cp:	Porcentagem da área metálica condutora em contato.
CC:	Corrente Contínua.
CA:	Corrente Alternada.
CAD:	<i>Computer Aided Design</i> - Desenho Assistido por Computador
CH ₁ :	Chapa 1 (sem deposição).
CH ₂ :	Chapa 2 (com deposição).
3D:	Três Dimensões ou Tridimensional.
d _{L min.} :	Diâmetro do ponto de solda (massa fundida).
d _{ZAC1} :	Diâmetro da ZAC (Zona afetada pelo calor).
d _{p1} :	Diâmetro do ponto de solda (massa fundida).
d _{i1} , d _{i2} :	Diâmetro da indentação, respectivamente chapas 1 e 2.
d _{pf} :	Diâmetro do ponto focal.
D _{F.L} :	Diâmetro do feixe <i>laser</i> .
d _{p médio} :	Diâmetro do ponto médio.
D.Deposição:	Diâmetro da Deposição.
Ø D.P.:	Diâmetro do ponto de solda (massa fundida).
D _{MÁX.} :	Diâmetro Máximo do ponto de solda.
D _{MÍN.} :	Diâmetro Mínimo do ponto de solda.

D_B :	Diâmetro do bocal (mm).
e :	Espessura da chapa.
e_c :	Espessura resultante das chapas soldadas.
EDS:	Espectroscopia por energia dispersiva.
$E_{F.L.}$:	Densidade de energia do feixe <i>laser</i> (J/mm ²).
E_P :	Densidade de potência do feixe <i>laser</i> (W/mm ²).
F_{Total} :	Força total entre os eletrodos (kgf).
FEG:	Field Emission Gun.
f_{pf} :	Ponto focal (Laser / Pó Metálico).
H:	Abertura entre as chapas.
I:	Intensidade de corrente (Ampere - A).
i_s :	Corrente de soldagem.
$I_{s\ RMS}$:	Corrente de soldagem eficaz (RMS).
$i_{CH.1}$:	Indentação da chapa 1.
$i_{CH.2}$:	Indentação da chapa 2.
l :	Comprimento do condutor.
$L_{A.C}$:	Dimensão (largura) de contato do eletrodo.
L_B :	Altura do Bocal / Material de Base.
$L_{P.L.}$:	Potência do Feixe <i>Laser</i> (W).
AMSW:	<i>Additive Manufacturing Spot Welding.</i> (Soldagem a Ponto utilizando Manufatura Aditiva)
MEV:	Microscópio Eletrônico de Varredura.
m_p :	Quantidade de pó (g).
m/v:	massa do soluto / volume da solução

n :	Números de pontos por unidade de área.
P_1 :	Penetração na chapa 1 (CH_1).
P_2 :	Penetração na chapa 1 (CH_2).
P_{total} :	Pressão total durante a soldagem.
$P_{fusão}$:	Pressão de fusão (transformação de fase sólido/líquido).
P_{exp} :	Pressão da expansão térmica no estado líquido.
P_{vapor} :	Pressão dos vapores do metal líquido.
P_{lubrif} :	Pressão dos vapores dos agentes superficiais.
P_p :	Penetração do ponto.
P_{ZAC} :	Penetração total da ZAC.
P_{ZAC1} :	Penetração da ZAC, chapas 1.
P_{ZAC2} :	Penetração da ZAC, chapas 2.
$P_{F.L.}$:	Potência do feixe <i>laser</i> (W).
PDD :	Massa do pó depositado (g/mm^2).
P_s :	Potência Ativa (Watts).
$P_{CH.1}$:	Penetração na chapa 1.
$P_{CH.2}$:	Penetração na chapa 2.
$P_{.TOTAL}$:	Penetração total nas chapas 1 e 2.
Q :	Quantidade de calor gerado durante a soldagem (cal).
r :	Raio de contato na interface de soldagem.
R :	Resistência do condutor (Ω).
R_0 :	Resistência à temperatura ambiente (Ω).
R_c :	Resistência de contato ($\mu \Omega$).
$R_{T.A.P.}$:	Taxa de alimentação do pó metálico (g/s).
$R_{din.}$:	Resistência dinâmica ($\mu \Omega$).

$R_{tensão}$:	Razão de tensão.
RMS:	<i>Root Mean Square.</i>
RSW:	<i>Resistance Spot Welding.(Soldagem a Ponto por Resistência)</i>
RWMA:	<i>Resistance Welders Manufacturers Association</i>
T_0 :	Temperatura ambiente (°C).
T :	Temperatura de trabalho (°C).
t :	Tempo de circulação da corrente de soldagem.
t_{ch} :	Espessura da chapa.
$t_{dep.}$:	Tempo de deposição.
t_1 :	Espessura da chapa 1.
t_2 :	Espessura da chapa 2.
V :	Diferença de potencial (Volt - V).
$V_{D.B.}$:	Velocidade de Deslocamento do Bocal (mm/s).
$V_{el. RMS}$:	Tensão eficaz (RMS) entre os eletrodos.
$V_{el.}$:	Tensão de soldagem entre os eletrodos.
W_0 :	Raio do Feixe <i>Laser</i> .
Y :	Limite de escoamento (Kgf / m ²).
ZAC:	Zona afetada pelo calor.
ZF:	Zona fundida.

LISTA DE SÍMBOLOS:

ρ :	Resistividade a temperatura de trabalho (Ω m).
ρ_0 :	Resistividade a temperatura ambiente (Ω m).
α :	Coeficiente de temperatura do material a 20°C ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
β :	Ângulo do Fluxo de Pó Metálico.
σ_{esc} :	Tensão de escoamento da chapa (kgf/mm^2).
$\sigma_{mín.}$:	Tensão mínima.
$\sigma_{máx.}$:	Tensão máxima.
CO_2 :	Dióxido de carbono.
Nd:YAG :	Neodímio: (Ítrio – Alumínio – Granada)
HCl :	Ácido Clorídrico.

SUMÁRIO:

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA:	38
2. OBJETIVO:	40
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:	41
3.1 Definição de Soldagem:	41
3.1.1 Processos de Soldagem:	41
3.2 Breve Histórico da Soldagem:	42
3.3 Soldagem por Resistência Elétrica:	43
3.3.1 Breve Histórico da Soldagem por Resistência Elétrica:	44
3.3.2 Soldagem por Costura:	46
3.3.3 Soldagem por Projeção:	46
3.3.4 Soldagem a Topo:	47
3.4 Soldagem a ponto por resistência elétrica:	48
3.4.1 Breve Histórico da Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica:	49
3.4.2 Fundamentos do processo de soldagem a ponto por resistência:	51
3.4.2.1 Resistência Elétrica:	51
3.4.2.2 Segunda Lei de Ohm:	52
3.4.2.3 Geração de energia via calor:	54
3.4.3 Resistências Elétricas do processo de soldagem a ponto:	54
3.4.4 Resistência Elétrica de Contato:	56
3.4.5 Resistência Dinâmica de Contato:	60
3.4.6 Expansão Térmica:	66
3.5 Principais Parâmetros de Soldagem:	70
3.5.1 Corrente de Soldagem:	71
3.5.2 Tempo de Soldagem:	71
3.5.3 Forças dos Eletrodos:	72
3.6 Eletrodo na Soldagem a Ponto por Resistência:	75
3.7 Indentação:	80
3.8 Diagrama de Soldabilidade:	84
3.9 Metalurgia na Soldagem a Ponto por Resistência:	86
3.10 Soldabilidade no Processo de Soldagem a Ponto por Resistência:	90
3.10.1 Soldabilidade em Aços revestidos:	93
3.10.2 Soldabilidade em Aços sem revestimento:	94
3.11 Controle de Qualidade na Soldagem a Ponto por Resistência:	95
3.11.1 Ensaios Destrutivos:	96
3.11.1.1 Ensaio de tração:	96
3.11.1.2 Ensaio de arrancamento (<i>peel test</i>):	97
3.11.1.3 Ensaio metalográfico:	98
3.11.2 Ensaios não destrutivos:	99
3.11.2.1 Ensaio por ultrassom:	100
3.12 Equipamento para a Soldagem a Ponto por Resistência:	102
3.13 Manufatura Aditiva:	105
3.13.1 Breve Histórico da Manufatura Aditiva:	107
3.14 Processo de Manufatura Aditiva com deposição a laser utilizando pó metálico:	109
3.14.1 Bocal Coaxial:	111

3.14.2 Bocal externo:	113
3.14.3 Tipos de Laser utilizado no Processo de Manufatura Aditiva:	114
3.15 Parâmetros do Processo de Manufatura Aditiva com deposição a laser utilizando pó metálico:	115
3.15.1 Potência do Laser:	116
3.15.2 Distância do ponto focal do Laser:	118
3.15.3 Velocidade de Deslocamento do Bocal:	119
3.15.4 Taxa de Alimentação do pó Metálico:	121
3.15.5 Distância do Ponto Focal do pó Metálico:	121
3.15.6 Fluxo de Gás de Proteção e de Transporte:	122
3.15.7 Correlação entre os Parâmetros no Processo de Manufatura aditiva com deposição a laser utilizando pó metálico:	123
3.16 Propriedades da deposição a laser utilizando pó metálico:	123
3.17 Características do Pó Metálico no processo de manufatura aditiva:	124
4. MATERIAIS E MÉTODOS:	126
4.1 Características dos corpos de prova utilizados nos experimentos:	126
4.1.1 Composição Química dos corpos de prova:	127
4.1.2 Propriedades mecânicas das chapas de aço:	128
4.2 Características do pó metálico para a deposição a laser (manufatura aditiva) utilizado nos experimentos:	131
4.2.1 Composição química do pó metálico:	131
4.2.2 Propriedades físicas do pó metálico:	131
4.2.3 Composição Granulométrica do pó metálico:	132
4.3 Processo de Manufatura Aditiva para deposição a laser com pó metálico utilizado nos experimentos:	136
4.3.1 Equipamento de Manufatura Aditiva para deposição a laser com pó metálico utilizado nos experimentos:	137
4.3.2 Características do Bocal para deposição a laser com pó metálico utilizado nos experimentos:	140
4.3.3 Características do Feixe Laser utilizado nos experimentos:	141
4.3.4 Estudo das estratégias para impressão do ponto:	143
4.3.5 Seleção dos parâmetros para impressão do ponto:	144
4.3.6 Execução da impressão dos pontos nas chapas utilizando manufatura aditiva:	146
4.4 Características do Equipamento de Soldagem a ponto por resistência elétrica utilizado nos experimentos:	149
4.5 Medição e Monitoramento da Tensão, Corrente, força e deslocamento dos eletrodos durante a soldagem:	152
4.6 Cálculo da Resistência Dinâmica:	155
4.7 Cálculo da Potência ativa e Energia elétrica durante a Soldagem:	156
4.8 Eletrodos utilizados nos experimentos:	156
4.9 Critérios de aceitação do ponto de solda:	157
4.9.1 Determinação do diâmetro mínimo do ponto de solda (d_p mín.) para os ensaios de tração e arrancamento (<i>peel test</i>):	159
4.9.2 Penetração ou altura do ponto de solda:	161
4.9.3 Profundidade da indentação:	162
4.9.4 Porosidades no ponto de solda:	163
4.9.5 Trincas internas no ponto de solda:	163
4.9.6 Abertura entre as chapas soldadas:	164

4.10	Determinação dos diagramas de soldabilidade e os parâmetros otimizados de soldagem:	165
4.10.1	Determinação dos diagramas de soldabilidade para o processo de soldagem a ponto por resistência (convencional):	165
4.10.2	Determinação dos diagramas de soldabilidade para o processo de soldagem a ponto por resistência utilizando manufatura aditiva:	167
4.11	Determinação das propriedades mecânicas dos pontos de solda:	168
4.11.1	Ensaio de tração por cisalhamento:	169
4.11.2	Ensaio de tração com chapas cruzadas:	172
4.11.3	Ensaio de tração por deslocamento (<i>pull test</i>):	174
4.11.4	Ensaio de fadiga:	174
4.12	Caracterização metalográfica:	175
4.13	Ensaio de microdureza Vickers:	176
4.14	Ensaio de corrosão:	177
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO:	183
5.1	Deposição a laser utilizando pó metálico (manufatura aditiva):	183
5.1.1	Análise química da deposição a laser utilizando pó metálico 316L:	183
5.1.2	Análise dos dimensionais e dos pesos das deposições em chapa revestida com zinco e sem revestimento:	186
5.1.3	Análise da morfologia da superfície da deposição em chapa revestida com zinco e sem revestimento:	187
5.1.4	Análise da profundidade da penetração da deposição a laser utilizando pó metálico (316L), em chapa revestida com zinco e sem revestimento, através dos ensaios de macrografias:	190
5.2	Diagramas de soldabilidade:	193
5.2.1	Diagrama de soldabilidade referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco:	194
5.2.1.1	Diagrama de soldabilidade referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco:	196
5.2.1.2	Comparação entre os diagramas de soldabilidade do processo de soldagem a ponto convencional (RSW) e do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em chapa com revestimento de zinco:	198
5.2.2	Diagrama de soldabilidade referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento:	199
5.2.2.1	Diagrama de soldabilidade referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:	201
5.2.2.2	Comparação entre os diagramas de soldabilidade do processo de soldagem a ponto convencional (RSW) e do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento:	204
5.3	Comparação das dimensões dos pontos de solda, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento:	205

5.4 Ensaio de tração por cisalhamento, com os parâmetros otimizados, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestida com zinco e sem revestimento:.....	212
5.4.1 Comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestida com zinco e sem revestimento:.....	214
5.4.1.1 Comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco:.....	214
5.4.1.2 Comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:.....	216
5.5 Ensaio de tração com chapas cruzadas, com os parâmetros otimizados, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestida com zinco e sem revestimento:.....	219
5.5.1 Comparação da tensão máxima de tração com chapas cruzadas, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento:.....	221
5.5.1.1 Comparação da tensão máxima de tração com chapas cruzadas, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco:.....	221
5.5.1.2 Comparação da tensão máxima de tração em chapas cruzadas, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:.....	223
5.6 Ensaio de tração por deslocamento (<i>pull test</i>), com os parâmetros otimizados, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestida com zinco e sem revestimento:.....	226
5.6.1 Comparação da tensão máxima de tração por deslocamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento:.....	228
5.6.1.1 Comparação da tensão máxima de tração por deslocamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco:.....	228
5.6.1.2 Comparação da tensão máxima de tração por deslocamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:.....	230
5.7 Ensaio de fadiga:.....	232

5.7.1 Comparação dos ensaios de fadiga entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), com os parâmetros otimizados, em chapas com revestimento de zinco:.....	232
5.7.2 Comparação dos ensaios de fadiga entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), com os parâmetros otimizados, em chapas sem revestimento:.....	237
5.8 Análise fractográfica:.....	242
5.8.1 Comparação das fractografias entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco:.....	242
5.8.2 Comparação das fractografias entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:.....	244
5.9 Ensaio de microdureza Vickers:.....	247
5.9.1 Comparação do mapeamento de microdureza Vickers entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:.....	247
5.9.1.1 Análise do mapeamento de microdureza Vickers referente a deposição em chapa sem revestimento antes do processo de soldagem a ponto AMSW:.....	247
5.9.1.2 Análise do mapeamento da microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento:.....	248
5.9.1.3 Análise do mapeamento da microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento:.....	250
5.9.1.4 Resumo da análise comparativa referente ao mapeamento da microdureza Vickers entre o processo de soldagem AMSW e RSW em chapa sem revestimento:.....	251
5.9.2 Comparação do mapeamento de microdureza Vickers entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco:.....	254
5.9.2.1 Análise do mapeamento de microdureza Vickers referente a deposição em chapa revestida com zinco antes do processo de soldagem a ponto AMSW:.....	254
5.9.2.2 Análise do mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco:.....	255
5.9.2.3 Análise do mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco:.....	256
5.9.2.4 Resumo da análise comparativa referente ao mapeamento de microdureza Vickers entre o processo de soldagem AMSW e RSW em chapas com revestimento de zinco:.....	257
5.10 Caracterização metalográfica:.....	261

5.10.1 Análise comparativa da caracterização metalográfica referente a deposição a laser utilizando pó metálico (manufatura aditiva) entre as chapas com e sem revestimento de zinco:.....	261
5.10.2 Análise comparativa da caracterização metalográfica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco:.....	264
5.10.3 Análise comparativa da caracterização metalográfica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:.....	268
5.11 Análise da resistência dinâmica, energia elétrica, do comportamento da força entre os eletrodos e da expansão térmica, utilizando os parâmetros otimizados em chapas revestidas com zinco e sem revestimento:.....	273
5.11.1 Análise comparativa da resistência dinâmica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapas sem revestimento:.....	273
5.11.1.1 Análise comparativa da energia elétrica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapas sem revestimento:.....	275
5.11.1.2 Análise comparativa do comportamento da força entre os eletrodos em relação ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapas sem revestimento:.....	276
5.11.2 Análise comparativa da resistência dinâmica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapas com revestimento de zinco:.....	278
5.11.2.1 Análise comparativa da energia elétrica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapas com revestimento de zinco:.....	279
5.11.2.2 Análise comparativa do comportamento da força entre os eletrodos em relação ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapas com revestimento de zinco:.....	281
5.11.3 Análise comparativa das resistências dinâmicas, através dos parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento:.....	282
5.11.3.1 Análise comparativa da energia elétrica, através dos parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento:.....	283

5.11.3.2 Análise comparativa da força entre os eletrodos, através dos parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento:.....	284
5.12 Análise dos ensaios de corrosão em névoa salina:.....	286
6. CONCLUSÕES:	287
7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS:	292
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	293

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA:

Soldabilidade é a capacidade de um material ser unido sob certas condições de fabricação e que possam garantir um adequado desempenho em serviço. Para o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, os materiais que possibilitam uma longa vida útil aos eletrodos, propiciam grandes janelas operacionais e que constantemente produzem pontos de solda aceitáveis são considerados de boa soldabilidade. A composição química e as condições de superfície do material a ser soldado também são duas variáveis que possuem um importante efeito na soldabilidade [1-3].

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica geralmente é utilizado para unir chapas de espessuras e composições químicas semelhantes. As principais vantagens deste processo incluem a facilidade de automação e alta velocidade de soldagem. Embora esse processo possa parecer simples, é necessário controlar um grande número de variáveis para produzir uma soldagem satisfatória em um ambiente de produção automatizado e de grande escala [1,2,4,5]. A soldagem a ponto por resistência é um processo de união amplamente utilizado para fabricar estruturas de chapas metálicas, como: automóveis, ônibus, cabines de caminhões, aviões, veículos ferroviários, eletrodomésticos, etc. Particularmente na indústria automotiva este processo é largamente utilizado por décadas. Um automóvel, por exemplo, possui de 4.000 a 12.000 pontos de solda dependendo do tamanho do veículo. Este fato evidencia a importância deste processo na indústria automotiva [4,6,7]. Os pontos de solda não são realizados nas mesmas condições de um ponto para outro, devido ao desalinhamento das chapas em relação aos eletrodos, bem como as condições das superfícies e das suas interfaces.

Por esse motivo, este processo necessita de condições ideais durante a soldagem, para que permita uma tolerância em valores paramétricos, com a finalidade de atingir uma boa qualidade de soldagem durante o processo produtivo. Estas condições ideais devem considerar a magnitude e a duração da corrente elétrica, a geometria de contato entre o eletrodo e a chapa, as propriedades do material dos eletrodos, as condições das superfícies das chapas e a força entre os eletrodos [4,6,8]. Deste modo, o comportamento do

processo de soldagem a ponto por resistência elétrica é extremamente importante para a qualidade de toda a estrutura soldada. Além disso, os fabricantes de automóveis devem atender as expectativas dos clientes para lidar com a concorrência mundial. Dentre as expectativas estão a resistência à corrosão, chapas com alta resistência mecânica, a rigidez da junta soldada quando exposta a uma força externa, a capacidade de absorver impactos, a estética da superfície acabada, baixo custo, conforto, normas ambientais, entre outros [5-7,9]. Com relação a estética da superfície acabada o processo de soldagem a ponto deixa marcas visíveis e permanentes, este fato é intrínseco para este processo. Em certas aplicações, como por exemplo, nos painéis externos de um veículo, estas marcas são inaceitáveis, são consideradas como demérito de qualidade [1,10].

Atualmente, na indústria automotiva, estão sendo utilizados aços de alta resistência mecânica principalmente com a finalidade de melhorar a segurança e reduzir o peso do carro devido a questões ambientais. Também estão sendo utilizadas combinações de materiais dissimilares e de espessuras diferentes, estes são especificados para adequar as propriedades dos materiais aos requisitos solicitados em locais específicos do veículo [4,3,11].

Como observado, o setor de manufatura na indústria automotiva está passando por uma revolução em relação as novas tecnologias de construção de peças, desenvolvimento de novos materiais com composições químicas diferentes e resistências mecânicas elevadas. Dentro deste contexto, é de se esperar que a formação do ponto de solda e seu comportamento durante a soldagem sejam diferentes quando este ponto for efetuado sobre estas novas circunstâncias. Estes fatos justificam o desenvolvimento de um novo processo de soldagem para que sejam observadas melhores condições de soldabilidade, assim como a qualidade estrutural e a estética das novas carrocerias de veículos. Portanto, o presente trabalho será voltado para o desenvolvimento de uma nova tecnologia de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva, mais especificamente, o processo de deposição a laser em pó metálico. Para o estudo e análise da soldabilidade foram utilizadas chapas de aço de baixo carbono, revestidas com zinco (EN-10346-DX54D) e sem revestimento (EN-10130-06-DC04), empregadas na indústria automotiva. A título de comparação foram realizados pontos de solda pelo processo de soldagem convencional (RSW).

2. OBJETIVO:

Este trabalho tem por objetivos:

- Desenvolver um processo de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizando manufatura aditiva, em chapas de aço carbono revestidas e não revestidas com zinco, empregadas na indústria automotiva;
- Comparar este processo com o processo de soldagem a ponto convencional; (diagramas de soldabilidade, arrancamento (*peel test*), indentação, resistências dinâmicas, energia gasta, expansão térmica, metalografias e fractografias).
- Quantificar o efeito das variáveis de soldagem nos desempenhos dos pontos produzidos pelos dois processos.
 - (mapeamento de microdureza, ensaio de tração por cisalhamento, tração com chapas cruzadas, deslocamento (*pull test*) e ensaio de fadiga);
 - (ensaio de corrosão em névoa salina).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

3.1 Definição de soldagem:

Soldagem é um processo permanente de união entre dois materiais metálicos, que ocorre através de uma fusão localizada, resultado de uma apropriada combinação de temperatura, pressão e condições das chapas a serem soldadas [1,12].

3.1.1 Processos de soldagem:

Os processos de soldagem devem assegurar uma continuidade completa entre as partes que estão sendo unidas e em consequência suas características mecânicas e químicas. Os principais fatores para escolha de um determinado processo de soldagem são: tipo de material de base e suas características metalúrgicas; tipo de junta, sua localização e posição de soldagem; custo de produção; tamanho da estrutura; desempenho desejado; acessibilidade da junta e a precisão de montagem requerida. De modo geral, vários processos podem ser utilizados para o mesmo trabalho de soldagem, a escolha do processo de soldagem mais adequado deve ser feita em termos de requisitos técnicos e custos [1,12].

As considerações econômicas e de segurança influenciam a qualidade da solda, considerações econômicas exigem que um produto seja competitivo no mercado, enquanto que as considerações de segurança exigem que o produto funcione sem apresentar risco para as pessoas [1,12]. Para atender os níveis exigidos de vida útil, as juntas soldadas devem ser projetadas adequadamente para suportar tensões dinâmicas e oscilantes, pois nestas circunstâncias é possível ocorrer falha por fadiga, ou seja, em um nível de tensão inferior ao limite de resistência a tração ou ao limite de escoamento para uma carga estática. Um importante aspecto para evitar ou reduzir falhas em uma junta soldada é o uso de normas, que são específicas para cada processo de soldagem, e que resultam em uma produção mais uniforme e com menor variabilidade [13,14].

3.2 Breve histórico da soldagem:

A arte de unir materiais metálicos já era conhecida desde as eras pré-históricas. Como por exemplo, na Pérsia por volta de 4000 A.C, artefatos de ouro e cobre foram fabricados utilizando processos de soldagem [13,15].

Há aproximadamente 3000 anos, a soldagem por forjamento foi à primeira técnica utilizada para unir materiais ferrosos [16]. Um dos mais antigos relatos sobre este tipo de soldagem é da espada de Damasco (1300 A.C) [17]. Com a revolução industrial de 1800, iniciou-se o avanço da tecnologia de soldagem. Na década de 1880, foram utilizados arco elétrico e tocha de acetileno para algumas das primeiras soldagens por fusão, mas foi apenas na década de 1920 que a soldagem foi totalmente adotada como um processo de união para uso comercial. Nos primórdios da indústria de soldagem, o fraco desempenho era comum. Um dos fatores mais importantes para viabilizar a utilização da soldagem entre 1920 a 1940 foi o desenvolvimento de normas. Durante a Segunda Guerra Mundial, a soldagem foi utilizada em grande escala devido à necessidade da fabricação de navios em períodos mais curtos e com menores custos [16].

Atualmente, a tecnologia de soldagem tem sido utilizada nas mais rigorosas aplicações, como: vasos de pressão para usinas de energia nuclear, submarinos, dutos de petróleo e gás, motores de foguete para a indústria aeroespacial, estrutura de carroceria para automóveis, etc. A indústria de soldagem tem crescido muito e tem um enorme efeito sobre a economia. Como exemplo, nos Estados Unidos, 50% da economia está relacionada com a soldagem de alguma forma. Hoje, praticamente todos os setores de fabricação utilizam o processo de soldagem, tanto na confecção do produto quanto na manutenção dos equipamentos. O processo de soldagem tornou-se chave na manufatura de produtos duráveis devido à alta velocidade e baixo custo da maioria dos seus processos [6,15,16]. Na Figura 3.1, apresenta-se a cronologia da evolução referente aos processos de soldagem ao longo dos anos.

Figura 3.1: Cronologia da evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos [18].

3.3 Soldagem por resistência elétrica:

A soldagem por resistência elétrica abrange um conjunto de processos que tem como resultado a união das superfícies de contato pela energia via calor obtido por efeito Joule e com a aplicação de pressão. Gases de proteção não são necessários para este processo, pois o ar é excluído da superfície de contato pela força dos eletrodos. A indústria de veículos, dentre outras, emprega extensivamente os processos de soldagem por resistência elétrica em aplicações nas quais o desenho do produto especifica chapas sobrepostas. O acesso a ambos os lados das chapas também é necessário para que os eletrodos apliquem a força. Sistemas totalmente automatizados e robóticos são utilizados para muitas destas aplicações [1,2,19,20].

Os processos de soldagem por resistência elétrica mais utilizados nas indústrias são: soldagem a ponto, soldagem por costura, soldagem por projeção

e soldagem a topo. As principais variáveis associadas a estes processos são: corrente de soldagem, tempo de soldagem, a força entre os eletrodos, o material de base e sua configuração e a geometria da ponta dos eletrodos. Uma vez que os parâmetros para estas variáveis forem corretamente ajustados, muito pouca habilidade é necessária para operar o equipamento. Estes processos são utilizados amplamente na união de metais com até 6 mm de espessura e que podem ser limitados pela força entre os eletrodos. A maior parte do aquecimento durante a soldagem ocorre no local de contato ou na interface das chapas onde a resistência elétrica é maior. Por este motivo, é essencial que os metais a serem soldados tenham resistência elétrica maior em relação aos eletrodos de cobre e suas ligas [12,19,20].

3.3.1 Breve histórico da soldagem por resistência elétrica:

Em 1840, o físico inglês James Prescott Joule (1818-1889) publicou a lei que associa a corrente elétrica e a resistência do condutor a energia térmica gerada e que posteriormente ficou mundialmente conhecido como a Lei de Joule ou Efeito Joule. Alguns anos mais tarde, em 1856, Joule acidentalmente realiza uma soldagem por resistência elétrica em fios de aço [17].

Apenas duas décadas depois, em 1877, o Engenheiro elétrico e Inventor inglês Elihu Thomson (1853-1937) elabora e projeta um mecanismo para soldagem por resistência elétrica com auxílio de pressão mecânica. Devido a este fato, Thomson é considerado pai da soldagem por resistência elétrica. A primeira patente foi em março de 1886. Logo após, surgiram aproximadamente outras 150 patentes, as quais eram especificamente para unir fios metálicos [17].

Com a invenção desta técnica de soldagem deu-se a origem em vários outros processos de soldagem por resistência elétrica, como: soldagem a topo, soldagem por costura, soldagem a ponto e soldagem por projeção [1,21]. A Figura 3.2 mostra uma das primeiras patentes de Elihu Thomson de 1888, referente a soldagem a topo por resistência elétrica com auxílio de pressão mecânica [22].

(No Model.)

4 Sheets—Sheet 1.

E. THOMSON.

DIRECT ELECTRIC WELDING MACHINE.

No. 385,386.

Patented July 3, 1888.

Figura 3.2: Equipamento para soldagem por resistência elétrica com auxílio de pressão mecânica (Soldagem a Topo). Patenteado por Elihu Thomson em 1888 [22].

3.3.2 Soldagem por costura:

A soldagem por costura é um processo de união por pontos contínuos em que as chapas sobrepostas a serem soldadas são pressionadas entre um par de eletrodos de liga de cobre em formato de disco [12,17,20]. Estes conduzem a corrente elétrica para produzir uma solda contínua, conforme mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3: Desenho esquemático do processo de soldagem por costura [12].

3.3.3 Soldagem por projeção:

A soldagem por projeção é um processo que produz soldas pela energia via calor obtida através da resistência a passagem da corrente elétrica, as quais estão localizadas em pontos predeterminados por projeções produzidas na superfície de apenas uma das chapas sobrepostas [12,17,20]. As projeções são utilizadas para produzir uma concentração localizada de corrente elétrica e, conseqüentemente, um maior aquecimento nesta região por efeito Joule gerando o ponto de solda, conforme mostra a Figura 3.4.

Figura 3.4: Desenho esquemático do processo de soldagem por projeção [12].

3.3.4 Soldagem a topo:

A soldagem a topo produz soldas por meio da resistência ao fluxo da corrente de soldagem através da área em que as superfícies estão em contato e com aplicação da pressão, conforme apresenta a Figura 3.5. Este processo de soldagem requer que ambas as peças sejam mantidas juntas em contato sob pressão antes da passagem da corrente elétrica [13,19,20].

Figura 3.5: Desenho esquemático do processo de soldagem a topo [19].

3.4 Soldagem a ponto por resistência elétrica:

No processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, as partes a serem unidas normalmente são sobrepostas e o material de base se funde na interface entre as partes devido ao aquecimento por resistência elétrica (efeito Joule). As peças são fixadas e pressionadas entre dois eletrodos de cobre e suas ligas, que geralmente são refrigerados a água. Na passagem de uma elevada corrente elétrica transitória a interface (entre as chapas) se funde formando um ponto de solda [1,12,13,20]. O princípio do processo, referente a soldagem a ponto, é mostrado esquematicamente na Figura 3.6.

Figura 3.6: Desenho esquemático do princípio de operação do processo de soldagem a ponto por resistência elétrica [12].

Assim, o processo de soldagem a ponto por resistência elétrica envolve aplicação de uma corrente de soldagem através dos eletrodos, cujas funções são de concentrar a corrente elétrica e aplicar a pressão na área de soldagem [1,13,20]. Este processo de soldagem é autógeno, utilizado principalmente para união de chapas com espessuras de até 6,0 mm. Espessuras maiores podem ser soldadas, mas o processo não é economicamente viável, pois requer máquinas especiais [20,23]. O equipamento básico utilizado no processo de soldagem a ponto por resistência consiste de um circuito elétrico, um equipamento de controle e um sistema de aplicação de força. Este processo pode ser realizado utilizando uma variedade de equipamentos de soldagem, que vão desde simples equipamentos até sistemas sofisticados automatizados que

fazem centenas de soldas em poucos segundos. Como exemplo, uma carroceria de veículo requer em média mais de 3000 pontos de solda, para isto são utilizados sistemas robóticos automatizados [1,24]. O curto tempo de soldagem e a mínima habilidade do operador são as principais vantagens deste processo. Outra importante vantagem é a facilidade de automação, que proporcionam altos índices de produtividade. A principal desvantagem é a necessidade de ter acesso a ambos os lados da peça a ser soldada. Outra desvantagem é a sobreposição da junta, que aumenta o peso e o custo do material utilizado [1,2].

3.4.1 Breve histórico da soldagem a ponto por resistência elétrica:

A primeira utilização do processo da soldagem a ponto por resistência foi em 1898 para fabricação de utensílios de cozinha [25]. Em 1915, já estava sendo utilizado na construção de estruturas em chapas de aço para carrocerias de automóveis. A abordagem das pesquisas e publicações desta época eram basicamente voltadas para as definições e/ou otimizações de parâmetros de soldagem [25,26].

A partir de 1930, com melhores equipamentos para monitoramento e maior preocupação com os fenômenos envolvidos neste processo, a soldagem por resistência elétrica tornou-se mais segura e econômica [20,27].

Durante a segunda guerra mundial, com uma grande necessidade de produção em massa, a indústria norte americana utilizou em grande escala o processo de soldagem por resistência elétrica. Por este motivo, numerosas aplicações foram descobertas, como por exemplo, na indústria aeronáutica com pesquisas e publicações para ligas não ferrosas principalmente o alumínio [28,29]. A importante difusão do processo de soldagem a ponto por resistência se deve em grande parte aos controles eletrônicos para o monitoramento dos parâmetros. Estes dispositivos de controle possibilitam a precisão necessária na parametrização, como por exemplo, a magnitude da corrente, a força entre os eletrodos e os tempos de soldagem [28,30-32].

Atualmente, a maior parte da utilização do processo de soldagem a ponto por resistência ocorre dentro da indústria automotiva. Somente na América do Norte são realizados anualmente mais de 70 bilhões de pontos solda [1,33]. A

Figura 3.7 mostra o desenho de uma das patentes de Thomson de 1918 sobre o processo de soldagem a ponto por resistência utilizando água para refrigeração dos eletrodos [34].

Figura 3.7: Dispositivo de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizando água para refrigeração dos eletrodos, patenteado por Thomson em 1918 [34].

3.4.2 Fundamentos do processo de soldagem a ponto por resistência:

No processo de soldagem a ponto por resistência, dois ou três componentes estampados ou chapas sobrepostas podem ser soldados em conjunto como resultado da energia via calor gerado pela resistência a passagem da corrente elétrica, conhecido como efeito Joule. A corrente de soldagem deve passar pelos eletrodos e através das peças sobrepostas, sua continuidade é assegurada pela força aplicada entre os eletrodos [8,35]. Este processo deve primeiro desenvolver energia via calor suficiente para aumentar o volume confinado de metal no estado líquido. O metal líquido é solidificado sob pressão dos eletrodos, até ter uma resistência mecânica adequada, para manter as peças unidas. A densidade de corrente elétrica e a força entre os eletrodos devem ser suficientes para que o ponto de solda se forme sem que o metal no estado líquido seja expelido da zona de soldagem. A duração da corrente de soldagem deve ser suficientemente curta para evitar o aquecimento excessivo das faces dos eletrodos [36,37].

3.4.2.1 Resistência elétrica (primeira lei de Ohm):

Caso se aplique uma diferença de potencial através de uma seção de um condutor, como um fio metálico, é possível produzir uma corrente elétrica. A magnitude da diferença de potencial necessária para produzir uma determinada corrente depende da seção do condutor e do seu material. Esta propriedade é chamada de resistência elétrica [14,38], e pode ser definida (considerando constante a temperatura do condutor) conforme a equação (1):

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

Onde:

R = Resistência do condutor (Ohm - Ω)

V = Diferença de potencial (Volt - V)

I = Intensidade de corrente (Ampere - A)

3.4.2.2 Segunda lei de Ohm:

Uma das características elétricas mais importantes de um material sólido é a facilidade com que o mesmo transmite uma corrente elétrica. A resistência elétrica de um condutor é diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à área de sua seção transversal. Portanto, a segunda lei de Ohm pode ser expressa pela seguinte equação (2) [14,38]:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

Onde:

R = Resistência do condutor (Ohm - Ω)

l = Comprimento do condutor (m)

ρ = Resistividade do Material ($\Omega \cdot m$)

A = Área de contato (m^2)

A dependência da resistência elétrica em relação ao material do condutor é representada por um fator de proporcionalidade chamado resistividade, conforme mostra a Tabela 3.1 [38].

Tabela 3.1: Resistividade elétrica de alguns materiais a 20°C [38].

Material	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Prata	$1,68 \times 10^{-8}$
Cobre	$2,35 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,65 \times 10^{-8}$
Tungstênio	$5,65 \times 10^{-8}$
Níquel	$6,84 \times 10^{-8}$
Ferro	$9,71 \times 10^{-8}$
Platina	$10,60 \times 10^{-8}$
Chumbo	$20,65 \times 10^{-8}$

A resistividade não depende apenas do material, mas também da temperatura à qual esse material está submetido [38], conforme mostra a equação (3):

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (3)$$

Onde:

ρ = Resistividade à temperatura de trabalho ($\Omega.m$)

ρ_0 = Resistividade à temperatura ambiente (20°C) ($\Omega.m$)

T_0 = Temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$)

T = Temperatura de trabalho ($^\circ\text{C}$)

α = Coeficiente de temperatura do material a 20°C ($^\circ\text{C}^{-1}$)

O aumento da resistividade está relacionado a maior interação dos núcleos dos átomos com os elétrons livres, decorrente da maior vibração da rede cristalina com o aumento da temperatura, que é o efeito predominante em materiais condutores de eletricidade [39]. A Tabela 3.2 mostra os coeficientes de temperatura de resistividade a 20°C de alguns materiais [38].

Tabela 3.2: Coeficientes de temperatura de resistividade de alguns materiais a 20°C [38].

Material	Coeficiente - α ($^\circ\text{C}^{-1}$)
Prata	$3,8 \times 10^{-3}$
Cobre	$3,9 \times 10^{-3}$
Ouro	$3,4 \times 10^{-3}$
Alumínio	$3,9 \times 10^{-3}$
Tungstênio	$4,5 \times 10^{-3}$
Níquel	$6,0 \times 10^{-3}$
Ferro	$5,0 \times 10^{-3}$
Platina	$3,9 \times 10^{-3}$
Chumbo	$4,3 \times 10^{-3}$

3.4.2.3 Geração de energia via calor:

A energia via calor necessária para este processo de soldagem é produzido pela resistência a passagem da corrente elétrica dos materiais sobrepostos. Devido ao curto percurso da corrente elétrica e ao tempo de soldagem limitado, são necessárias correntes relativamente altas para desenvolver energia via calor suficiente para soldagem [35,36].

A quantidade de energia via calor gerado durante a soldagem depende principalmente de três fatores: corrente elétrica, a resistência elétrica do condutor e o tempo de duração da passagem da corrente. Estes três fatores ou variáveis afetam a geração de energia via calor durante a soldagem [8,36,37], como expresso na equação (4):

$$Q = k \int_0^t R(t).I^2 .dt \quad (4)$$

Onde:

Q = Energia via calor gerado (cal).

R = Conjunto de resistência elétrica (Ohms).

t = Intervalo de tempo de passagem de corrente (segundos).

I = Corrente de soldagem (Amperes).

k = 1/4,185.

3.4.3 Resistências elétricas do processo de soldagem a ponto:

Existem pelo menos cinco resistências elétricas conectadas em série que representam a distribuição de energia via calor, as quais produzem diferentes temperaturas durante a soldagem, conforme apresenta a Figura 3.8. O circuito secundário de uma máquina de soldagem a ponto e a peça a ser soldada constituem uma série de resistências elétricas [2,10]. Assim sendo, conforme mostra a Figura 3.8, a somatória das principais resistências elétricas durante a soldagem é expressa pela equação (5) [2,10,40]:

$$R = R1_{\text{eletrodo / peça A}} + R2_A + R3_{\text{solda}} + R4_B + R5_{\text{eletrodo / peça B}} \quad (5)$$

A resistência R3, mostrada na equação 5, possui maior relevância para a formação do ponto de solda, e está localizada na interface das chapas a serem soldadas. Quanto maior a magnitude da resistência elétrica na interface das chapas sobrepostas (R3), maior será a soldabilidade para este processo [2,10,20].

Figura 3.8: Principais resistências elétricas durante a soldagem a ponto [10].

A magnitude total da resistência elétrica depende das condições de superfície do material de base, das dimensões, da geometria de contato e da força entre os eletrodos. A somatória das resistências, representada pela equação 5, é influenciada pela pressão de soldagem através do efeito da resistência de contato na interface das peças, ou seja, quando maior a força entre os eletrodos maior deverá ser a corrente de soldagem para compensar a diminuição da resistência elétrica. As peças a serem soldadas devem ser

pressionadas firmemente entre os eletrodos para permitir uma constante passagem da corrente elétrica durante o processo produtivo [20,36,40].

Os eletrodos são geralmente refrigerados com água e fabricados com ligas de cobre. A resistividade do cobre é significativamente menor que a do aço, mesmo a temperaturas elevadas, conforme mostra a Figura 3.9. Portanto, quando a corrente de soldagem é aplicada, maior energia via calor é gerado entre as chapas de aço sobrepostas se comparado aos eletrodos [10,41].

Figura 3.9: Resistividade elétrica em relação a temperatura: Aço, Alumínio e Cobre [10].

3.4.4 Resistência elétrica de contato:

A resistência de contato é normalmente muito sensível à distribuição de pressão, além das condições superficiais nas interfaces de contato. Em geral, apenas uma pequena porção da área está em contato elétrico efetivo, a qual é formada por irregularidades, na forma de picos e vales (rugosidade), entre as interfaces das chapas [10,42], conforme mostra a Figura 3.10.

Figura 3.10: Área efetiva de contato elétrico na interface dos condutores [43].

Durante a soldagem, a pressão nas interfaces das chapas, criada pela força dos eletrodos, colapsa as irregularidades da rugosidade e provoca uma diminuição na resistência de contato devido ao aumento da área. Deste modo, quanto maior a força dos eletrodos maior será a área de contato e menor o valor da resistência elétrica [10,40,42]. Na Figura 3.11 mostra a correlação entre a resistência de contato e a pressão dos eletrodos para diferentes superfícies.

Figura 3.11: Correlação entre a resistência de contato e a pressão dos eletrodos para diferentes materiais. Adaptado da referência [20].

A resistência de contato é afetada pelas condições de superfície das chapas, como por exemplo: a magnitude da rugosidade, revestimento, a presença de óleo, sujidade, óxidos, tintas, ou seja, qualquer conteúdo externo nas interfaces das chapas provoca uma significativa alteração na resistência. Assim sendo, a resistência de contato diminui com o aumento da pressão aplicada e é altamente suscetível ao acabamento superficial das chapas [20,42,44]. Na Figura 3.12 apresenta a resistência elétrica de contato para diferentes condições de superfície, com pressão constante entre os eletrodos e fazendo uma abordagem com uma considerável quantidade de amostra para cada condição de superfície.

Figura 3.12: Resistência de contato para diferentes condições de superfície utilizando pressão constante entre os eletrodos [10].

Através de ajustes experimentais e estudos teóricos foi desenvolvida a seguinte equação (6) para o cálculo da resistência de contato [20]:

$$R_c = \frac{0,85 \cdot \rho \cdot \sqrt{Y}}{\sqrt{\pi \cdot n \cdot C_p}} \quad (6)$$

Onde:

R_c = Resistência de contato. ($\mu\Omega$)

Y = Limite de escoamento. (Kgf / m^2)

C_p = porcentagem da área metálica condutora em contato.

ρ = Resistividade do material. ($\Omega \cdot \text{m}$)

n = números de pontos por unidade de área.

A equação (6) pode ser utilizada em metais ferrosos e pressões de magnitude entre 0,3 a 0,8 do limite de escoamento (Y) [20].

3.4.5 Resistência dinâmica de contato:

No processo de soldagem a ponto por resistência elétrica, a energia via calor total é determinado pela resistência elétrica das chapas sobrepostas e dos eletrodos, isto é, a soma de resistências individuais, conforme mostrado no item 3.4.3. Portanto, uma mudança na resistência total reflete as mudanças nos valores individuais de resistência, que são induzidos pelos processos físicos durante a soldagem. O fator chave para esta abordagem é que a resistência elétrica de contato depende da topografia de superfície e das propriedades termofísicas, ou seja, da temperatura, da área de contato, da resistência mecânica e da resistividade do material a ser soldado [10,20,42].

A magnitude da resistência de contato aumenta com o aumento da temperatura durante a soldagem, assim sendo a mesma é de natureza dinâmica. Deste modo, para um condutor de comprimento e de área transversal constante a resistência elétrica em função da temperatura é expressa pela equação (7) [38]:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (7)$$

Onde:

R = Resistência à temperatura ambiente

R_0 = Resistência à temperatura ambiente

α = Coeficiente de temperatura do material a 20°C (°C⁻¹)

T = Temperatura de trabalho °C

T_0 = Temperatura ambiente °C

Examinando o valor da resistência elétrica durante a soldagem é possível compreender os processos físicos que ocorrem durante a formação do ponto de solda [45]. A Figura 3.13 mostra a comparação das alterações da resistência elétrica durante a soldagem, tanto para o aço quanto para o alumínio.

Figura 3.13: Resistência dinâmica do aço e do alumínio durante o processo de soldagem a ponto por resistência [10].

Para o alumínio, a presença de óxido de alumínio nas superfícies torna a resistência total muito alta no início da soldagem, porém, há uma queda acentuada uma vez que a corrente de soldagem é aplicada. Este fato é devido que a camada de óxido de alumínio é rompida pelo resultado da força do eletrodo e da energia via calor. Após a queda inicial, a resistência elétrica continua a diminuir, mas a um ritmo muito mais lento. A resistividade do alumínio aumenta com a temperatura no estado sólido e líquido (durante a fusão), no entanto a resistência mecânica do alumínio diminui com aumento da temperatura, o que resulta num aumento da área de contato entre o eletrodo e a peça. Por conseguinte, devido ao aumento da área de contato, a resistência total diminui ligeiramente [10,29].

Devido às diferenças nas propriedades elétricas e mecânicas entre o alumínio e o aço a resistência elétrica durante a soldagem é bastante diferente.

No aço existe também uma queda na resistência total no início da soldagem, como na soldagem em alumínio, entretanto de modo mais lento. Esta diminuição pode ser atribuída às mudanças na resistência de contato através da queima de agentes superficiais como sujeira, graxa, etc. É importante ressaltar que a camada superficial do aço tem uma resistência elétrica muito menor se comparada a camada de óxido de alumínio. Em seguida observa-se um aumento no valor da resistência quando a soldagem continua. Isto corresponde ao aumento da resistividade do aço com o aumento da temperatura [40,45]. Na Figura 3.14 apresenta o comportamento da resistência dinâmica, dividida em 5 estágios, durante a soldagem a ponto por resistência elétrica [45].

Figura 3.14: Principais estágios da resistência dinâmica durante o processo de soldagem a ponto. Adaptado da referência [45].

Com base na Figura 3.14 pode-se observar [45]:

- **Estágio I:** Este estágio compreende o começo da soldagem, após a aplicação da força pelos eletrodos. A magnitude da resistência elétrica inicial é elevada devido a presença de contaminantes superficiais nas peças. A geração de energia via calor nos primeiros ciclos de soldagem está concentrada na

interface das chapas. Este fato faz com que haja a fragmentação dos contaminantes como óxidos, óleo, graxa, etc. Outro fenômeno importante que ocorre neste estágio é o colapso das rugosidades devido ao aumento da temperatura, resultando no aumento da área de contato. Portanto, em consequência destes fatos citados acima, neste estágio inicial da soldagem a resistência diminui.

- **Estágio II:** Este estágio é caracterizado por dois efeitos conflitantes. O primeiro é a diminuição da resistência devido ao aumento da área de contato causado pelo colapso das rugosidades. O segundo é o aumento da resistência correspondente ao aumento da temperatura. A competição entre estes dois efeitos defini o ponto ' α '.

- **Estágio III:** Este estágio é definido pelo aumento da resistência elétrica devido ao aumento da temperatura. O ponto de inflexão da curva marca o início da fusão de micros contatos nas interfaces das chapas, assim como a transição para o estágio IV.

- **Estágio IV:** Este estágio é caracterizado por três mecanismos que diminuem e aumentam a resistência elétrica. Primeiro, a resistência continua aumentando devido ao aumento da temperatura. Segundo, com o aumento da área de fusão entre as chapas a resistência diminui. Terceiro, a resistência mecânica do material diminui com o aumento da temperatura, devido a este fato ocorre uma penetração dos eletrodos nas superfícies das chapas. Deste modo, a área de contato entre eletrodo/peça aumenta fazendo com que a resistência elétrica diminua, este fenômeno define o ponto ' β ' até o início do estágio V.

- **Estágio V:** Neste estágio a resistência diminui devido ao crescimento do ponto de solda e também com o aumento da área de contato eletrodo/peça. Neste período final da formação do ponto de solda se a energia for muito alta pode ocorrer a expulsão de material.

Na Figura 3.15 mostra o comportamento da resistência dinâmica em chapas revestidas com zinco, utilizando corrente alternada (linha azul) e corrente contínua (linha vermelha) [40].

Figura 3.15: Comportamento da resistência dinâmica em chapas revestidas com zinco, utilizando corrente alternada - CA (linha azul) e corrente contínua - CC (linha vermelha) [40].

Ainda pela análise da Figura 3.15, pode-se observar que existem dois pontos de máximo (2) e dois pontos de mínimo (3), que ocorrem praticamente em tempos iguais. Isto mostra que ocorre primeiro a volatilização da camada de Zn antes da fusão do aço, para um tempo de 17ms [40]. A Figura 3.16 ilustra a volatilização do revestimento de Zn, representado nos estágios 2 e 3, mostrado no gráfico da resistência dinâmica da Figura 3.15. Observa-se no desenho esquemático (Figura 3.16) que o revestimento de Zn preenche toda a rugosidade do material. Este preenchimento nos vales e picos da rugosidade do material de base não permite uma deformação por completo da rugosidade. Após a volatilização do Zn, os picos e vales da rugosidade do material de base se encontram e acontece o colapso das rugosidades. Este colapso aumenta a área de contato diminuindo a resistência dinâmica, como mostra o gráfico (estágios 2 e 3) da Figura 3.15 [40].

Figura 3.16: Desenho esquemático da volatização do Zn: estágios 2 e 3 do gráfico da resistência dinâmica da Figura 3.15 [40].

A Figura 3.17 mostra a evolução da formação do ponto de solda, através da resistência dinâmica, em chapas revestidas com zinco utilizando um equipamento de ultrassom de imagem. Este equipamento permite observar com detalhes e também medir o diâmetro da massa fundida do ponto de solda, a imagem é formada por uma matriz de 52 sensores. Ainda pela análise da Figura 3.17, mais especificamente no estágio III, a queda da resistência dinâmica mostra claramente que a volatização da camada de zinco é uma parte natural do processo de soldagem. Devido a este fato é importante ressaltar que com a eliminação da técnica da “queima” (volatização) da camada de zinco antes da soldagem, frequentemente utilizada na indústria automotiva, é possível produzir um ponto de solda com menor tempo e menor energia [46,47].

Figura 3.17: Evolução da formação do ponto de solda, através da resistência dinâmica, em chapas revestidas com zinco, utilizando um equipamento de ultrassom de imagem [46].

3.4.6 Expansão térmica:

A expansão térmica ou volumétrica ocorre durante o aquecimento do metal no estado sólido, assim como na transformação de fase de sólido para líquido e também no aquecimento no estado líquido, conforme mostra a Figura 3.18. Assim sendo, as fases sólida e líquida de um metal expandem-se por aquecimento, contudo a quantidade de expansão térmica é diferente para cada material [10,33,48].

Figura 3.18: Expansão térmica ou volumétrica em função da temperatura da liga de Alumínio (Al-Mg) e Ferro puro (Fe) [10].

O aquecimento adicional do líquido produz um aumento de volume maior do que a expansão térmica no estado sólido. No entanto, uma livre expansão volumétrica do metal no estado líquido durante a soldagem não é possível devido à compressão dos eletrodos [10,33,48]. Esta compressão é necessária para manter o contato elétrico e térmico nas interfaces e para evitar a expulsão de metal líquido durante a soldagem, conforme apresenta a Figura 3.19 [10].

Figura 3.19: Forças intrínsecas durante a soldagem a ponto por resistência elétrica [10].

Uma grande expansão volumétrica necessita de grande força entre os eletrodos resultando em profundas indentações. O processo de expansão térmica durante a soldagem é refletido diretamente no deslocamento dos eletrodos. Quando a energia via calor gerada devido ao aquecimento por efeito joule ultrapassa a perda de energia via calor devido à dissipação através dos eletrodos refrigerados com água, este fato faz com que os eletrodos se desloquem em sentido contrário ao da força aplicada. Entretanto, este deslocamento dos eletrodos permite uma boa indicação térmica e metalúrgica para este processo de soldagem [10,33,49].

As técnicas utilizadas para detectar a expansão térmica durante a soldagem fornecem dados importantes para a compreensão do fenômeno de expulsão do material líquido do ponto de solda [33,50]. Conforme mostra a Figura 3.20, o deslocamento entre os eletrodos indica o crescimento do ponto de solda com o aumento da expansão térmica e também quando os eletrodos entram em colapso devido a expulsão de material líquido.

Figura 3.20: Comportamento do deslocamento dos eletrodos durante a soldagem a ponto por resistência elétrica [10].

Outra fonte de pressão durante a soldagem está relacionada ao vapor do metal, este fenômeno é devido que acima da temperatura de fusão um sistema fechado tende a atingir o equilíbrio líquido-vapor, de acordo com os princípios gerais da termodinâmica. Além da pressão do vapor do metal, a pressão dos gases resultantes da decomposição de agentes superficiais também deve ser considerada [10,13,38,42]. Portanto, há quatro componentes principais de pressão no metal líquido durante a soldagem a ponto por resistência [10], que é expressa pela equação (8):

$$P_{\text{total}} = P_{\text{fusão}} + P_{\text{exp}} + P_{\text{vapor.}} + P_{\text{lubríf.}} \quad (8)$$

Onde:

P_{total} = Pressão total durante a soldagem;

$P_{\text{fusão}}$ = Pressão de fusão (transformação de fase sólido/líquido);

$P_{\text{exp.}}$ = Pressão da expansão térmica no estado líquido;

$P_{\text{vapor.}}$ = Pressão dos vapores do metal líquido;

$P_{\text{lubríf.}}$ = Pressão dos vapores dos agentes superficiais.

3.5 Principais parâmetros de Soldagem:

A soldagem a ponto por resistência elétrica é um processo que envolve fenômenos elétricos, térmicos e mecânicos. Este processo compreende uma grande variedade de parâmetros, visto que os principais deles são: corrente elétrica, força entre os eletrodos, tempo de soldagem, bem como a geometria de contato e o material dos eletrodos [5,36].

Alcançar uma boa qualidade de soldagem começa com a escolha de parâmetros adequados. O diâmetro do ponto de solda desejado só pode ser obtido ajustando adequadamente a intensidade da corrente elétrica em função do tempo de soldagem. Quando o tempo de soldagem é curto, o diâmetro do ponto diminui, no entanto, quando o tempo de soldagem é longo a quantidade de metal fundido aumenta podendo causar expulsão de material, como resultado deste fato a resistência mecânica do ponto de solda diminui [5,36]. O ciclo total de soldagem para este processo consiste basicamente em quatro fases: tempo de estabilização da força; tempo de soldagem; tempo de solidificação e tempo de abertura da pinça, conforme mostra a Figura 3.21 [19,20].

Figura 3.21: Esquema do ciclo total de soldagem a ponto por resistência elétrica [19].

Ainda pela análise da Figura 3.21, nota-se que o tempo de estabilização da força (a) é o intervalo de tempo para garantir que a força entre os eletrodos estabeleça a magnitude desejada antes da aplicação da corrente de soldagem. O tempo de soldagem (b) é o intervalo de tempo na qual a corrente elétrica passa

através das peças a serem unidas. O tempo de solidificação (c) é o tempo que a força entre os eletrodos é mantida nas peças após o término da passagem da corrente de soldagem permitindo que o ponto de solda se solidifique até obter uma resistência mecânica adequada. O tempo de abertura de pinça (d) é o tempo durante o qual os eletrodos estão fora da peça de trabalho, para que os mesmos possam ser deslocados para o próximo ciclo de soldagem [19].

3.5.1 Corrente de Soldagem:

De acordo com a lei de Joule, apresentado no item 3.4.2, o parâmetro de maior influência na geração de energia via calor durante a soldagem é a corrente elétrica. Este fato é devido que a energia via calor gerado pela corrente de soldagem é proporcional ao quadrado de sua intensidade, conforme mostra a equação 4. No processo de soldagem a ponto por resistência podem ser utilizados tanto corrente alternada (AC) quanto corrente contínua (DC) de média frequência. O transformador da máquina de soldagem converte a alimentação da linha de alta tensão (primário) em uma potência de soldagem (secundário) de baixa tensão e alta intensidade de corrente. A corrente contínua de média frequência é utilizada em aplicações que requerem altas intensidades de corrente de soldagem e também para reduzir perdas de energia elétrica no circuito secundário [3,19,40].

A corrente de soldagem necessária para união de duas chapas com uma determinada espessura depende de vários fatores, como: estado da superfície, dureza e composição química das chapas; força e diâmetro de contato dos eletrodos; etc [9,40]. Aços com revestimentos de zinco necessitam de correntes maiores, devido a boa condutividade elétrica do zinco [8,39,40,51].

3.5.2 Tempo de Soldagem:

No processo de soldagem a ponto por resistência somente uma fração da energia via calor é consumida para zona de soldagem, grande parte das perdas é dissipada pela água de refrigeração dos eletrodos e/ou pelas peças. O

rendimento para este processo de soldagem é definido como o volume de material fundido (correspondente a uma determinada quantidade de energia via calor) pelo volume que poderia ser fundido se não houvesse perdas. Para evitar as perdas excessivas deve-se utilizar tempo mínimo de soldagem [17]. Quando o tempo é excessivo a quantidade de metal fundido aumenta podendo ocorrer expulsão de material líquido, bem como mudanças indesejáveis da microestrutura na região soldada [8,36,52].

Existem vários tipos de ciclo de soldagem especiais utilizados para metais e juntas especiais dentro dos quais podem ocorrer mudanças de corrente e tempo de soldagem. Alguns destes ciclos especiais incluem o tratamento térmico pós soldagem, através da passagem de corrente após um período adequado de resfriamento, com o intuito da melhoria da ductilidade do ponto de solda [13]. O tempo e a intensidade de corrente de soldagem são dois parâmetros independentes, os quais combinados com as resistências elétricas da junta pode ser realizado um número infinito de combinações possíveis para se obter um ponto de solda. Porém, não se pode diminuir indefinidamente o valor da corrente e aumentar o tempo, pois existe uma intensidade mínima de corrente na qual a soldagem é possível. Esta intensidade mínima depende das características dos materiais a serem soldados, assim como da força e dimensões dos eletrodos. Os tempos de soldagem para aços galvanizados não devem ser muito longos, visto que implicam em maior reatividade entre o revestimento (zinco) e o eletrodo (cobre) [52-54].

3.5.3 Força entre os eletrodos:

A força entre os eletrodos tem como função aproximar as peças uma contra a outra criando uma área de contato onde será efetuada a soldagem. A força entre os eletrodos pode ser dividida basicamente em três estágios: antes, durante e após a passagem da corrente de soldagem. A força aplicada deve ser suficiente para vencer as reações mecânicas (elásticas) e até mesmo deformações plásticas se necessário, para assegurar uma adequada e constante resistência de contato entre as interfaces das peças [33,42,55].

Outro fator importante é o alinhamento dos eletrodos para que a força seja distribuída simetricamente no ponto de solda. Com a força distribuída igualmente uma pressão adequada ocorre ao redor da borda do eletrodo. Este fato desempenha um papel importante na geometria do ponto de solda, assim como na prevenção de uma possível expulsão de material líquido da área de soldagem [10,33,42], conforme mostra a Figura 3.22.

Figura 3.22: Distribuição da pressão na interface de contato entre as chapas para eletrodos alinhados e desalinhados [10].

A composição química dos materiais também interfere nos valores das forças necessárias para soldagem. Quanto maior a dureza do metal maior deve ser a força, isto se faz necessário para um melhor assentamento nas interfaces das chapas fornecendo um bom contato elétrico [42,56].

Para a determinação da força entre os eletrodos através de cálculo teórico, admite-se que durante a soldagem a ponto a chapa estará sujeita a duas forças (F): força de compressão e força de flexão, conforme expressa pela equação (9) [57,58]:

$$F_{Total} = F_{compressão} + F_{flexão} \quad (9)$$

A força de compressão é responsável por melhorar o contato entre as chapas comprimindo os picos e vales encontrados na rugosidade superficial. A força de flexão é responsável por corrigir a flecha existente no centro do ponto de solda durante a soldagem, admitindo que os extremos do raio de contato “r” tem a função de apoio quando aplicado conceito de viga bi apoiada. Na Figura 3.23 mostra uma representação esquemática da região da soldagem na qual a força entre os eletrodos atua, fazendo uma analogia com uma viga bi apoiada [57,58].

Onde:

F_{Total} = Força (kgf)

b = Dimensão (comprimento) de contato do eletrodo (mm)

e = espessura da chapa (mm)

$L_{A.C}$ = Dimensão (largura) de contato do eletrodo (mm)

r = Raio de contato na interface de soldagem (mm)

Figura 3.23: Representação esquemática das forças atuantes entre os eletrodos e as chapas na região de soldagem [57].

Decompondo as forças da equação 9, obtém-se duas fórmulas (10 e 11) [57,58]:

$$F_{flexão} = \frac{\sigma_{esc.} \times b \times e^2}{L_{A.C} \times 0,75} \quad (10)$$

$$F_{compress\tilde{a}o} = \sigma_{esc.} \times A \quad (11)$$

Onde:

σ_{esc} = Tens\~ao de escoamento da chapa (kgf/mm²)

b = Dimens\~ao (comprimento) de contato do eletrodo (mm)

e = espessura da chapa (mm)

$L_{A.C}$ = Dimens\~ao (largura) de contato do eletrodo (mm)

A = \r{e}rea total de contato do eletrodo (mm²)

Assim sendo, associando as equa\~oes 10 e 11 \r{e} poss\~ivel encontrar a for\~ca de soldagem em fun\~cao da tens\~ao de escoamento do material das chapas (a\~co carbono), da espessura e da \r{e}rea de contato eletrodo/pe\~ca. Deste modo, a for\~ca total de soldagem pode ser expressa pela equa\~ao (12) [57,58]:

$$F_{Total} = \sigma_{esc.} \left[\left(\frac{e^2}{0,75} \right) + (\pi \times r^2) \right] \quad (12)$$

Onde:

F_{Total} = For\~ca total de soldagem (kgf)

σ_{esc} = Tens\~ao de escoamento da chapa (kgf/mm²)

e = espessura da chapa (mm)

r = Dimens\~ao do raio de contato do eletrodo (mm)

3.6 Eletrodo na soldagem a ponto por resist\~encia:

Os eletrodos para soldagem a ponto por resist\~encia t\~em como fun\~cao exercer press\~ao concentrada na superf\~icie das pe\~cas, conduzir a corrente de soldagem e dissipar rapidamente a energia via calor da regi\~ao de soldagem [2,54,59]. A \r{e}rea de contato do eletrodo controla a magnitude da densidade da

corrente de soldagem e o tamanho do ponto de solda resultante. Os eletrodos devem ter boa condutividade elétrica, mas também devem ter resistência e dureza adequada para resistir às deformações causadas pelas repetidas solicitações mecânicas [13,54,60]. As deformações da face do eletrodo aumentam a área de contato e por consequência diminuem a densidade de corrente e a pressão de soldagem, conforme mostra a Figura 3.24.

Figura 3.24: Aumento da deformação e da área de contato dos eletrodos durante o processo produtivo [61].

A qualidade do ponto de solda é prejudicada à medida que a deformação da face do eletrodo avança. Deste modo, os eletrodos devem ser fresados (remodelados a geometria original) ou substituídos em intervalos de tempos, com o intuito de manter uma geração de energia via calor adequada para se obter propriedades aceitáveis no ponto de solda [54,60,62,63], conforme apresenta a Figura 3.25.

Figura 3.25: Fresadora de eletrodos automatizada, utilizada em estações de soldagem robotizadas na indústria automotiva [63].

A magnitude da geração de energia via calor depende das condições da superfície do material de base, da área de contato e da força dos eletrodos. A interface eletrodo/peça é um ponto de alta geração de energia via calor [36,42,61]. A Figura 3.26 mostra a distribuição da temperatura através de uma simulação computacional durante a soldagem a ponto por resistência.

Figura 3.26: Simulação computacional da distribuição da temperatura durante a soldagem a ponto por resistência [61].

A superfície eletrodo/peça não atinge a temperatura de fusão durante a passagem da corrente elétrica, devido à alta condutividade térmica dos eletrodos (ligas de cobre) e também pelo fato de serem geralmente refrigerados a água [13,36,41], como mostra a Figura 3.27.

Figura 3.27: Sistema de refrigeração dos eletrodos, referente ao processo de soldagem a ponto por resistência. Adaptado da referência [57].

As espessuras das chapas a serem soldadas governam as dimensões das faces de contato eletrodo/peça, as quais determinam o diâmetro do ponto de solda e conseqüentemente a resistência mecânica. Se a dimensão da face do eletrodo for pequena pode causar um ponto de solda com pouca resistência mecânica como também uma indentação excessiva. Porém, se a dimensão for grande pode causar pressão insuficiente, assim como uma baixa densidade de corrente de soldagem, diminuindo a qualidade do ponto de solda [20,60,63].

A face de contato eletrodo/peça é de aproximadamente 1,6 vezes maior em relação ao diâmetro do ponto de solda e está relacionada com a espessura da peça a ser soldada. De modo geral, o diâmetro do ponto de solda pode ser calculado pela equação (13) [20,40,63]:

$$d_{L \text{ mín.}} \geq 5 \sqrt{t_{ch}} \quad (13)$$

Onde:

$d_{L \text{ mín.}}$ = diâmetro do ponto de solda;

t_{ch} = espessura da chapa.

O cálculo do diâmetro do ponto de solda também pode estar compreendido entre $3\sqrt{t_{ch}}$ e $6\sqrt{t_{ch}}$, entretanto, na maioria das normas o diâmetro do ponto de solda está localizado entre $4\sqrt{t_{ch}}$ e $5\sqrt{t_{ch}}$ [20,24,63].

Quando se deseja soldar peças de mesma composição química e espessura, o material e geometria de contato dos eletrodos devem ser os mesmos. Contudo, para peças de espessuras diferentes, deve-se utilizar maior diâmetro de contato (eletrodo/peça) na superfície da chapa com maior espessura para melhorar o equilíbrio térmico durante a soldagem. Na soldagem de materiais dissimilares, a mesma consideração anterior pode ser feita, ou seja, deve-se utilizar maior diâmetro do eletrodo com a chapa de maior resistividade, ou utilizar um material mais resistivo para o eletrodo em contato com a peça de maior condutividade [54,63-65]. Portanto, as principais considerações para a escolha do formato dos eletrodos são: espessura, composição química e as propriedades mecânicas das chapas. A Figura 3.28 apresenta alguns dos modelos mais utilizados na soldagem a ponto.

Figura 3.28: Principais geometrias de eletrodos utilizados na soldagem a ponto por resistência [57].

As propriedades mecânicas do material de base influenciam na vida útil do eletrodo [10,65]. A Figura 3.29 mostra um gráfico referente a deformação ou diâmetro da área de contato em função da quantidade de pontos de solda, bem como apresenta uma comparação entre chapas de mesma espessura com diferentes limites de resistência mecânica, quais sejam: chapas de aço de baixo carbono sem revestimento com limite de resistência a tração de 290MPa, e chapas de aço DP600 revestidas com zinco e com limite de resistência a tração de 600MPa [65].

Figura 3.29: Diâmetro da área de contato do eletrodo (deformação) versus a quantidade de pontos de solda, comparando chapas de aço de baixo carbono sem revestimento em relação a chapas de aço revestidas com zinco de alta resistência mecânica (DP600) [65].

3.7 Indentação:

A indentação¹ é a profundidade produzida nas superfícies das chapas causada pela penetração dos eletrodos durante a soldagem a ponto por resistência, como mostra a Figura 3.30 [10,60,66].

¹ Palavra utilizada coloquialmente no meio industrial. Da língua inglesa *indentation*. Entalhe, marcação em profundidade de uma superfície.

Figura 3.30: Profundidade da Indentação (a) e marca da indentação na superfície da chapa (b) [66].

Devido ao fato de ser muito difícil eliminar a indentação, a não ser que sejam utilizados eletrodos e procedimentos especiais, é permitida até uma determinada profundidade. As principais normas de soldagem a ponto especificam a profundidade no máximo de 20% a 30% da espessura de cada chapa sobreposta. A indentação excessiva não é permitida considerando a sua implicação estética no acabamento superficial e da capacidade limitada de suportar cargas tanto estáticas como dinâmicas [10,66].

A indentação pode resultar em uma ligação fraca entre as chapas soldadas devido à redução de espessura na área do ponto de solda. Uma grande profundidade da indentação geralmente é o resultado de um aquecimento excessivo, este fato é devido aos parâmetros de soldagem impróprios. E que frequentemente está relacionado a alguns tipos de descontinuidades, como por exemplo, porosidades (causadas pela expulsão de material líquido) e trincas na superfície do ponto de solda são normalmente associados à grandes profundidades de indentação [19,66].

A tensão residual é o resultado da interação termomecânica com o material de base, esta pode causar fratura por fadiga, a qual está constantemente associada ao grau de distorção e da profundidade da indentação do ponto de solda. A escolha correta dos parâmetros de soldagem permite que a profundidade da indentação seja controlada resultando em uma penetração e resistência mecânica necessária para a aplicação desejada [10,61].

Uma grande profundidade de indentação também pode causar uma separação excessiva entre as chapas, diminuindo a resistência mecânica do ponto de solda principalmente em solicitações dinâmicas [10,19], como mostra a Figura 3.31.

Figura 3.31: Ponto de solda com separação excessiva entre as chapas, causada por uma indentação profunda. Adaptada da referência [40].

Conforme apresenta a Figura 3.32, o parâmetro de soldagem de maior importância para o aumento da profundidade da indentação é a corrente elétrica, se comparado com os parâmetros tempo e força, por sua maior influência na geração de energia térmica durante a soldagem [33,66,67].

Figura 3.32: Profundidade da Indentação versus Parâmetros de soldagem: tempo (ms), corrente (KA) e força constante de 180Kgf [66].

A Figura 3.33 mostra os diagramas de soldabilidade ou janelas operacionais (linhas amarelas), tanto para corrente contínua (CC) quanto para corrente alternada (CA), assim como apresenta o mapeamento das profundidades das indentações (representadas por cores diferentes) de: 10% até > 25% em relação a espessura da chapa. Pode-se observar que as profundidades das indentações são maiores para corrente contínua (CC). Este resultado está relacionado com a maior eficiência em geração de energia via calor para corrente contínua (CC) se comparada com a corrente alternada (CA), utilizando os mesmos parâmetros de soldagem [67].

Figura 3.33: Mapeamento das profundidades das indentações representado nos diagramas de soldabilidade, tempo versus corrente (força constante de 230kgf). Em (a) para o equipamento de soldagem de corrente contínua (CC) e em (b) para o equipamento de corrente alternada (CA) [67].

3.8 Diagrama de soldabilidade:

Um importante método para determinação dos parâmetros de soldagem é através da elaboração do diagrama de soldabilidade ou também conhecido como janela operacional. Este diagrama é uma representação gráfica dos intervalos das variáveis de soldagem: tempo versus corrente, utilizando uma força constante entre os eletrodos. O diagrama é formado de pontos de solda aprovados conforme a determinação da norma, de acordo com a composição química e espessura do material a ser soldado [10,40,45]

O diagrama de soldabilidade determina dois limites aceitáveis, quais sejam: limites mínimos e limites máximos. Assim sendo, existem dois extremos em termos da quantidade de energia via calor gerada durante a soldagem a ponto por resistência. Limite máximo: se a quantidade de energia via calor gerada for muito alta ocorre a expulsão de material líquido. Limite mínimo: se a quantidade de energia via calor gerada for muito baixa ocorre a formação de ponto pequeno, ou seja, diâmetro do ponto menor em relação ao mínimo especificado na norma. Deste modo, a quantidade de energia via calor necessário para a formação de um ponto de solda (aprovado conforme norma) deve estar localizada entre os limites máximos e mínimos do diagrama de soldabilidade ou janela operacional, conforme mostra a Figura 3.34 [10,40,68].

Figura 3.34: Diagrama de Soldabilidade ou Janela Operacional [68].

É possível também projetar em terceira dimensão (3D) os volumes resultantes dos encontros das áreas comuns (tempo versus corrente e força versus corrente). Este diagrama em três dimensões fornece os três principais parâmetros de soldagem: tempo, corrente e força. A Figura 3.35 mostra um exemplo de diagrama de soldabilidade em três dimensões contendo os três parâmetros de soldagem: tempo, corrente e força, assim como apresenta a metodologia para escolha dos parâmetros otimizados, que consiste em um ponto (com maior grau de liberdade) na região de maior área dentro do volume, conforme apresenta o Corte C-C da Figura 3.35 [40].

Figura 3.35: Exemplo de diagrama de soldabilidade em três dimensões contendo os parâmetros: tempo, corrente e força, e também apresenta a metodologia para a escolha dos parâmetros otimizados [40].

3.9 Metalurgia na soldagem a ponto por resistência:

As propriedades das chapas utilizadas no processo de soldagem a ponto por resistência, como aços ou ligas de alumínio, são modificadas por trabalho a quente ou a frio, como por exemplo, em operações de laminação e tratamentos térmicos. No processo de laminação das chapas os grãos são refinados através de trabalho a frio e as estruturas são homogeneizadas através de tratamentos térmicos, ou então pelo processo de laminação a quente com controle de temperatura e resfriamento. No entanto, tais operações de otimização das características das chapas são difíceis de reproduzir na soldagem, especialmente na soldagem a ponto por resistência, uma vez que a fusão e a solidificação ocorrem entre duas chapas. Os parâmetros de soldagem como o tempo e corrente podem ser alterados até certo ponto a fim de realizar um tratamento térmico das estruturas soldadas. Contudo, devido ao acentuado gradiente de temperatura na soldagem, à alta taxa de resfriamento e ao curto espaço de tempo, tal tratamento não é comparável aos processos controlados de tratamento térmico realizados na fabricação de chapas laminadas. Assim sendo, as microestruturas e as propriedades na região da solda geralmente não são otimizadas como no material de base [8,69,70].

Durante a soldagem a solidificação de um ponto de solda é semelhante ao processo de fundição de metal, o qual consiste em duas etapas: nucleação de uma fase sólida e subsequente crescimento de dendritas, similar à solidificação em um molde para lingote. O processo de solidificação é controlado pela dissipação de energia via calor através do material de base e pelos eletrodos refrigerados com água. A direção e a taxa de resfriamento, além da composição química da liga, afetam o tipo, tamanho e orientação dos grãos formados. Durante a solidificação do ponto de solda ocorre uma alteração na distribuição da composição química da liga em comparação com a composição química original. No caso de um resfriamento muito rápido durante o processo de soldagem a ponto a taxa de difusão nos grãos não é suficiente para conseguir um equilíbrio na distribuição da composição da liga durante a solidificação. Devido a este fato, são formados grãos constituídos por camadas de diferentes composições químicas. Esse fenômeno é chamado de microsegregação e as propriedades mecânicas e elétricas desta microestrutura são diferentes do

material de base. A diferença de composição química entre o núcleo e a camada externa de um grão aumenta com o aumento da distância da solidificação fora das condições de equilíbrio e diminui com o aumento da taxa de difusão e o intervalo de tempo para a solidificação [14,69,70].

A formação de diferentes microestruturas na solidificação, incluindo dendritas, estruturas colunares e estruturas celulares, é determinada pela composição química e pela transferência de energia via calor através da interface sólido/líquido. A solidificação inicia quando o ponto de solda no estado líquido alcança a temperatura *liquidus* da liga representado no diagrama de fases, contudo, é importante ressaltar que um super-resfriamento constitucional pode ocorrer, fazendo com que a temperatura *liquidus* seja menor em comparação ao valor registrado no diagrama de fases, este fenômeno está relacionado ao acúmulo de soluto na interface sólido/líquido. Os grãos parcialmente fundidos na zona afetada pelo calor (ZAC) servirão como núcleos para crescimento de futuros grãos. Sob condições adequadas de soldagem os eletrodos refrigerados a água e o material de base atuam como um grande dissipador de energia via calor durante a soldagem. Este resfriamento adicional produzido pela água nos eletrodos resulta em grãos colunares em direções aproximadamente normal a linha de fusão [10,20,69].

O restante do metal fundido no centro do ponto solidifica por último e pode formar grãos equiaxiais. Dependendo dos parâmetros de soldagem e outras condições várias microestruturas podem ser formadas no ponto de solda. O cenário ideal é quando ocorre uma solidificação simétrica de maneira uniforme em todos os lados ao redor do sólido, em direção de ambos os eletrodos e das chapas [20,69,70], conforme mostra a Figura 3.36.

Figura 3.36: Macrografia de um ponto de solda mostrando uma solidificação uniforme e simétrica (Aço Inoxidável Duplex: UNS S32205) [71].

Deste modo, a microestrutura de um ponto de solda é determinada pela composição da liga, pela temperatura alcançada durante a soldagem e pela velocidade de resfriamento. Consequentemente, pode ser predita (apenas como referência) pelos diagramas de fase, assim sendo é fundamental obter a distribuição de temperatura durante a soldagem. No entanto, é difícil obter o gradiente de temperatura na região do ponto de solda, apesar disso, o perfil de temperatura pode ser estimado com base nas microestruturas do ponto, as quais são reveladas pelo ensaio metalográfico e utilizando o diagrama de fase do material de base como referência [10,70,72].

A Figura 3.37 mostra uma relação aproximada entre o diagrama de fase e as microestruturas do ponto de solda em um aço de baixo carbono, associadas a distribuição de temperatura atingidas durante a soldagem a ponto por resistência [2,10].

Ainda pela análise da Figura 3.37, pode-se notar que estas estruturas são diferentes do material de base, pois foram modificadas durante a soldagem pelos ciclos de aquecimento e resfriamento. Na Figura 3.37 (a), pode-se observar que não apresenta mudança estrutural no material de base (MB), a temperatura é inferior da A1. Na Figura 3.37 (b), mostra a zona de transição entre o material de base e a zona afetada pelo calor (ZAC), a temperatura está acima da A1 e abaixo da A3, sendo caracterizada pela transformação parcial da estrutura original do material de base, como por exemplo, o formato e o tamanho do grão. Nesta região se forma ferrita e austenita no aquecimento, podendo produzir no resfriamento ferrita e perlita e/ou martensita dependendo da velocidade do resfriamento e da composição química do material de base. A Figura 3.37 (c), compreende a zona do material de base mais próxima da zona fundida (ZF), cuja a temperatura está acima da A3, nesta circunstância a estrutura austenítica sofre um grande crescimento de grão, de modo geral, esta região é caracterizada por uma estrutura de granulação grosseira. A Figura 3.37 (d), apresenta a zona fundida (ZF), onde o material de base está no estado líquido, formando no resfriamento grãos colunares em direção normal a linha de fusão e alinhados com a direção do fluxo de calor.

Figura 3.37: Diagrama de fase e as microestruturas do ponto de solda associadas a distribuição de temperatura durante a soldagem a ponto por resistência em chapas de aço carbono. Adaptado da referência [10].

A microestrutura desempenha um papel importante na resistência mecânica do ponto de solda. Uma estrutura dúctil é desejável para evitar uma fratura interfacial no ponto de solda [1,19], conforme apresenta a Figura 3.38.

Figura 3.38: Desenho esquemático de uma fratura interfacial (a) e de uma fratura dúctil (b), referente ao ponto de solda [19].

3.10 Soldabilidade no processo de soldagem a ponto por resistência:

As propriedades das chapas utilizadas no processo de soldagem a ponto por resistência são caracterizadas tanto pela composição química das ligas quanto pelas condições de fabricação, tais como: tratamento térmico, trabalho a quente e trabalho a frio. A Figura 3.39 mostra a influência da composição química e do processo de fabricação para diferentes tipos de aço em relação às suas propriedades mecânicas [52,73].

Figura 3.39: Influência da composição química e do processo de fabricação para diferentes tipos de aço em relação às propriedades mecânicas [10].

De modo geral, os aços de baixo carbono possuem baixa resistência à tração e alta ductilidade, porém, à medida que a resistência a tração aumenta a ductilidade diminui. Contudo, as propriedades mecânicas obtidas através de sofisticados processos metalúrgicos durante a fabricação das chapas podem desaparecer na região do ponto de solda. Conforme mostra o item 3.9, uma importante ferramenta para a compreensão das transformações metalúrgicas durante a soldagem é o diagrama de fases. Assim sendo, as propriedades dos metais têm uma grande influência no processo de soldagem a ponto. As principais propriedades dos metais que determinam a soldabilidade para o processo de soldagem a ponto por resistência são: resistividade elétrica, condutividade térmica, expansão térmica, propriedades mecânicas, resistência a oxidação, deformação plástica e propriedades metalúrgicas [7, 9,10,24].

Para o processo de soldagem a ponto por resistência, a resistividade elétrica do material de base provavelmente é a mais importante propriedade de soldagem, já que a energia via calor gerado pela corrente é diretamente proporcional à resistência elétrica. É necessária uma quantidade maior de corrente de soldagem para gerar energia via calor para um metal de baixa resistividade se comparado ao metal de alta resistividade. Por exemplo, o cobre puro tem pouca resistividade elétrica e por este motivo a soldagem a ponto por

3.10.1 Soldabilidade em aços revestidos:

Muitos aços revestidos podem ser unidos pelo processo de soldagem a ponto, mas a qualidade do ponto de solda geralmente é afetada pela composição e espessura do revestimento. Os revestimentos em aço são normalmente aplicados para resistência à corrosão e estética ou uma combinação de ambos. Os procedimentos de soldagem devem assegurar uma razoável preservação da função do revestimento, bem como produzir pontos de solda com resistência mecânica adequada. Os ajustes referentes aos parâmetros de soldagem para compensar o revestimento na superfície da chapa são determinados por uma série de fatores, incluindo o efeito do revestimento na resistência elétrica de contato, na profundidade da indentação e a tendência do revestimento se fundir com os eletrodos [8,9,19,40].

Conforme mencionado no item 3.4.2.3, a energia via calor gerado durante a soldagem é diretamente proporcional à resistência elétrica. Deste modo, a espessura do revestimento e sua resistividade são as variáveis mais importante para a soldabilidade dos aços revestidos. Quando a espessura do revestimento apresenta problemas na soldagem, pontos de solda de melhor qualidade podem ser obtidos diminuindo a espessura do revestimento. Um ponto de solda do tamanho desejado pode ser obtido utilizando maior corrente de soldagem, maior força entre os eletrodos e maior tempo de soldagem se comparado com os parâmetros de soldagem utilizadas em chapas de mesma espessura e sem revestimento [8,40,73].

Na soldagem a ponto por resistência o fator determinante na formação do ponto de solda é a resistência elétrica de contato nas interfaces das chapas, esta é a principal variável responsável pela geração de energia via calor necessário para fusão. Na soldagem em chapas cujo o revestimento possui um baixo ponto de fusão e baixa resistividade elétrica, como por exemplo o zinco, se faz necessário a utilização de corrente mais elevada [8,40,42]. Este fato implica num maior aquecimento das pontas dos eletrodos e tende a diminuir sua vida útil [60,77].

3.10.2 Soldabilidade em aços sem revestimento:

Na soldagem a ponto por resistência em chapas sem revestimento os primeiros três ciclos da corrente de soldagem causam um aquecimento nas interfaces das chapas. Nos cinco ou seis ciclos de corrente de soldagem restantes ocorre a fusão e o crescimento do ponto de solda. O efeito da refrigeração dos eletrodos mantém a superfície eletrodo/chapa no estado sólido. A temperatura do material fundido apresenta-se uniforme devido à agitação eletromagnética. Uma vez que o fluxo de corrente é interrompido começa a solidificação do ponto. A soldagem a ponto em aços sem revestimento exhibe temperatura mais elevada do que os aços revestidos. A maior geração de energia via calor entre eletrodo/chapa e na interface das chapas sem revestimento é devido a maior resistência elétrica se comparada as chapas revestidas [8,40,42]. Estudos experimentais e teóricos mostram que as temperaturas das faces dos eletrodos, para soldagem de aços sem revestimento, alcançam entre 600°C e 800°C. Estas temperaturas elevadas permitem uma deformação mais rápida das faces dos eletrodos [61,78,79].

Devido a maior resistência elétrica das chapas sem revestimento, o ponto de solda se forma em magnitudes de correntes menores, nas mesmas condições e parâmetros se comparada por exemplo com chapas revestidas com zinco. Desta forma, em consequência dos fatos citados acima, chapas sem revestimento possuem melhor soldabilidade. A Figura 3.41 apresenta os diagramas de soldabilidade em chapas de aço revestida com zinco e sem revestimento de mesma: espessura, composição química e condições de soldagem. Ainda pela análise da Figura 3.41, é possível notar que devido a maior resistência elétrica das chapas sem revestimento, pontos de solda são produzidos com menores correntes de soldagem se comparado aos pontos de solda em chapas revestidas com zinco [8,40].

Figura 3.41: Diagramas de soldabilidade em chapas de aço sem revestimento (a); e chapas de aço revestidas com zinco (b), de mesma espessura, composição química e condições de soldagem [40].

3.11 Controle de qualidade na soldagem a ponto por resistência:

O controle de qualidade na soldagem a ponto por resistência tem como objetivo definir padrões da qualidade do ponto de solda, bem como garantir a repetibilidade de uma dada condição de soldagem especificada. O controle de qualidade envolve diversos aspectos, quais sejam: o planejamento da soldagem,

parâmetros adequados, a estabilidade e confiabilidade da máquina de soldagem no que se refere aos instrumentos de controle dos parâmetros, o preparo ou treinamento do operador para inspeção, e aos ensaios não destrutivos e destrutivos para a caracterização do ponto de solda. Os ensaios devem garantir para uma dada condição de soldagem especificada ou predeterminada que todas as amostras tenham resultados iguais ou maiores aos valores mínimos previamente estabelecidos na norma [1,4,21,77].

3.11.1 Ensaios destrutivos:

Os ensaios destrutivos utilizam corpos de prova do mesmo material que a estrutura a ser soldada sendo muito comum a utilização de partes do próprio produto. Cada empresa tem sua especificação ou norma para os testes na verificação da qualidade dos pontos de solda. Os ensaios destrutivos mais utilizados no processo de soldagem a ponto por resistência são: ensaio de tração por cisalhamento, ensaio por arrancamento e o ensaio metalográfico [12,80-82].

3.11.1.1 Ensaio de tração por cisalhamento:

O ensaio de tração por cisalhamento é o método mais utilizado para determinar a resistência mecânica dos pontos de solda, assim como é frequentemente utilizado para avaliação de parâmetros de soldagem para ligas ferrosas e não ferrosas. A definição da força mínima de tração por cisalhamento depende do material, espessura e da utilização que cada empresa estabelece para seu produto. O corpo de prova é feito de duas chapas sobrepostas com um ponto de solda no centro da área da sobreposição, conforme mostra a Figura 3.42 [12,81,83].

Figura 3.42: Desenho esquemático do corpo de prova utilizado para testes de tração por cisalhamento, referente ao processo de soldagem a ponto. Adaptado da referência [12].

Este ensaio consiste em submeter o corpo de prova a um esforço crescente na direção axial do mesmo até o seu rompimento, geralmente é utilizado uma máquina com atuadores servo-hidráulicos para realização dos experimentos [12,81,82].

3.11.1.2 Ensaio de arrancamento (peel test):

Uma variação do ensaio de tração é o ensaio de arrancamento, este é comumente utilizado como controle de produção durante a parametrização da soldagem devido sua praticidade, este ensaio tem como finalidade controlar o diâmetro do ponto de solda. O tamanho ou diâmetro mínimo do ponto de solda

está correlacionado as propriedades mecânicas conhecidas e devem ser produzidas por parâmetros de soldagem adequados. Na Figura 3.43 mostra o desenho esquemático do ensaio de arrancamento, como pode ser observado este ensaio é de fácil e rápida execução, devido a este fato é bastante utilizado nas linhas de produção [1,12, 40].

Figura 3.43: Desenho esquemático do ensaio de arrancamento (*peel test*) [12].

3.11.1.3 Ensaio metalográfico:

O ensaio metalográfico pode ser considerado o ensaio mais preciso na detecção de descontinuidades encontradas no ponto de solda, tal como na verificação das dimensões do ponto, como mostra o exemplo da Figura 3.44.

Este ensaio é principalmente aplicado nas linhas de produção na fase de validação dos parâmetros de soldagem e pode ser utilizado periodicamente para o controle de qualidade do ponto de solda [47]. Este também compreende a análise das microestruturas, fases presente e suas propriedades [1,17,80].

Onde:

d_{p1} = Diâmetro do ponto (massa fundida).

P_p = Penetração do ponto.

P_1, P_2 = Penetração do ponto, respectivamente chapas 1 e 2.

d_{ZAC1} = Diâmetro da ZAC (Zona afetada pelo calor).

P_{ZAC} = Penetração total da ZAC.

P_{ZAC1}, P_{ZAC2} = Penetração da ZAC, respectivamente chapas 1 e 2.

e_c = Espessura resultante das chapas soldadas.

d_{i1}, d_{i2} = Diâmetro da indentação, respectivamente chapas 1 e 2.

a_{c12} = Abertura entre as chapas 1 e 2.

Figura 3.44: Exemplo das dimensões do ponto de solda analisadas no ensaio metalográfico [33].

3.11.2 Ensaios não destrutivos:

Os ensaios não destrutivos são aqueles que quando realizados sobre a peça não interferem em seu funcionamento, ou seja, são ensaios que não deixam vestígios na peça. A nucleação de trincas por fadiga, imperfeições internas da peça e/ou na solda poderão comprometer o sucesso do componente em operação. Estes ensaios permitem analisar a peça soldada obtendo-se informações tanto quantitativas quanto qualitativas sobre a integridade da solda

antes e durante sua utilização. O ensaio não destrutivo mais utilizado no processo de soldagem a ponto por resistência é o de ultrassom [17,47,81].

3.11.2.1 Ensaio por ultrassom:

O ensaio por ultrassom apresenta uma quantidade menor de detalhes se comparada, por exemplo, com ensaios metalográficos. Contudo, por não ser destrutivo é muito utilizado na indústria automotiva para análise rápida da dimensão do diâmetro, da profundidade da indentação e das falhas internas do ponto de solda. Na Figura 3.45 apresenta um exemplo de ensaio por ultrassom, através da análise do gráfico, referente ao comportamento dos sinais ultrassônicos aplicados no local do ponto [2,47,81].

Figura 3.45: Exemplo de ensaio por ultrassom para análise e verificação da qualidade do ponto de solda [47,57].

O transdutor do ultrassom apresentado na Figura 3.45 emite um impulso ultrassônico através de um único emissor e receptor, o qual atravessa as chapas e reflete nas suas interfaces originando sinais ou gráficos na tela do equipamento. Já em se tratando do estado da arte, em relação ao ensaio de ultrassom para análise dos pontos de solda, este utiliza um transdutor matricial de 52 elementos de emissores e receptores, conforme mostra a Figura 3.46 [47,81], o qual também é conhecido no meio industrial por “ultrassom de imagem”.

Figura 3.46: Transdutor matricial de 52 elementos (emissor e receptor) utilizado no “ultrassom de imagem”. Adaptado da referência [47].

Este equipamento faz a varredura dos 52 elementos (emissores e receptores) e um software interpreta o sinal dos ecos colorindo o pixel com verde se houver fusão ou amarelo se não houver fusão, formando uma imagem que representa a imagem transversal do ponto de solda, através desta imagem é possível medir o diâmetro do ponto, conforme mostra a Figura 3.47.

A grande diferença do equipamento de ultrassom que utiliza um transdutor matricial com 52 elementos (ultrassom de imagem) quando comparado ao equipamento com transdutor de um único elemento (Figura 3.45), é que além de informar o diâmetro e a profundidade da indentação, o mesmo gera uma imagem

do ponto de solda facilitando a análise, ou seja, não há necessidade da interpretação dos gráficos [47,81].

Figura 3.47: Exemplo de imagem do ponto de solda obtida pelo transdutor matricial de 52 elementos: antes (lado esquerdo) e após (lado direito) da interpretação dos sinais dos ecos ultrassônicos através do software [47].

3.12 Equipamento para a soldagem a ponto por resistência:

A soldagem a ponto por resistência elétrica fornece uma maneira rápida e econômica de unir todos os tipos de aços revestidos ou não revestidos, aços com alto ou baixo teor de carbono, aços tratáveis termicamente e aços inoxidáveis. Outros materiais, incluindo ligas de alumínio, titânio e cobre, também são comumente unidos por este processo de soldagem [24,29,85]. As principais vantagens no processo de soldagem a ponto são: alta velocidade e adaptabilidade à automação para a produção de estruturas, como exemplo: carroceria de automóvel [1,13,19].

A seleção dos equipamentos de soldagem por resistência é geralmente determinada pelos seguintes requisitos: geometria da junta, material da peça, qualidade requerida, tempo de produção e considerações econômicas. As configurações dos equipamentos vão desde máquina padrão até sistemas complexos especialmente projetados [19,20]. Os principais elementos de uma máquina padrão tipicamente utilizada neste processo são:

- Circuito elétrico primário composto por um transformador para produzir elevada magnitude de corrente de soldagem (corrente alternada ou corrente contínua) e baixa tensão elétrica. E um circuito secundário que inclui os eletrodos que conduzem a corrente à peça.

- Sistemas mecânicos para aplicação de pressão, como: cilindros pneumáticos e/ou hidráulicos ou ainda através de servo-motor, estes podem ser acionados manualmente ou automaticamente.

- Sistema de controle eletrônico (comando de solda) para monitorar ou parametrizar as variáveis mais importantes para este processo, quais sejam: força entre os eletrodos, intensidade da corrente e o tempo de soldagem [13,19,20]. A Figura 3.48 mostra os principais elementos de uma máquina estacionária padrão utilizada no processo de soldagem a ponto por resistência, conforme descrito acima.

Figura 3.48: Principais elementos de uma máquina estacionária padrão utilizada no processo de soldagem a ponto por resistência [19].

A Figura 3.49 mostra dois exemplos de pinça manual para soldagem a ponto por resistência. Nos equipamentos mais modernos o transformador é montado no próprio corpo da pinça, para evitar perdas de energia [19].

Figura 3.49: Exemplos de pinça manual, com transformador interno, utilizada na soldagem a ponto por resistência [19,57].

Quando é necessário um elevado volume de produção ou um grande número de pontos de solda deve ser considerado um equipamento especial. Na maioria dos casos um maior nível de flexibilidade e produtividade pode ser alcançado utilizando um robô industrial, conforme apresenta a Figura 3.50. A sequência e a parametrização dos pontos de solda podem ser individualmente selecionadas de acordo com os seus requisitos ou características [1,19].

Figura 3.50: Robô industrial com seis graus de liberdade, utilizado na soldagem a ponto em linhas de produção automatizadas [40].

3.13 Manufatura aditiva:

A manufatura aditiva é um método de produção que possui a capacidade de fabricar componentes diretamente de dados geométricos computacionais com uma modelagem tridimensional (3D) da peça, como por exemplo, em um sistema CAD (*Computer Aided Design*). Adicionando material camada por camada até um componente final ser alcançado, conforme mostra a Figura 3.51 [86,87].

Figura 3.51: Exemplo de peça fabricada pelo processo de manufatura aditiva, acrescentando material camada por camada [88].

O processo de manufatura aditiva permite fabricar componentes a partir de vários tipos de materiais em diferentes formatos, faz isso adicionando material onde foi programado. As principais fontes de energia térmica empregada para este processo são: laser (pó metálico e arame); arco elétrico (aramé); e plasma (pó metálico e arame). Deste modo, os componentes podem ser manufaturados com mínimo de desperdício de material se comparados aos métodos de fabricação de subtração convencionais (torneamento, fresagem, furação, etc.) que produzem consideravelmente mais resíduos [86,87]. Além disso, fornece uma liberdade construtiva que é incomparável com outros métodos de fabricação, como por exemplo, na confecção de peças com geometrias complexas sem a necessidade de ferramentas caras ou o seu desenvolvimento, conforme apresenta a Figura 3.52. Por este motivo, uma das áreas de maior atratividade para este processo é o desenvolvimento de protótipos [88].

Figura 3.52: Exemplo de fabricação de geometria complexa utilizando o processo de Manufatura Aditiva [89].

Dependendo da complexidade geométrica, as peças fabricadas pelos métodos convencionais podem chegar a um ponto em que não são viáveis financeiramente e/ou tecnicamente em relação ao processo de manufatura aditiva, conforme apresenta a Figura 3.53 [88].

Figura 3.53: Comparação entre o processo de Manufatura Convencional (subtrativa) e Manufatura Aditiva em relação ao custo versus complexidade da peça [88].

O processo de manufatura aditiva possui a capacidade única de produzir mudanças nas propriedades em diferentes regiões de um mesmo componente, devido sua característica de produção camada por camada essas mudanças podem ser na composição química, microestrutura e geometria da peça. Estas alterações podem ser distribuídas de tal forma que os desempenhos mecânicos ou térmicos sejam adaptados para aplicações específicas de cada componente [90-92].

Devido a característica intrínseca ao processo de manufatura aditiva de necessitar de menores quantidades de etapas de produção, se comparado aos processos convencionais, a energia total necessária para produzir um componente será menor. No entanto, para fabricação de grandes componentes, de baixa complexidade e que já possuem uma linha de produção eficiente, a mudança para manufatura aditiva poderá ter um efeito inverso sobre o consumo de energia [90,91].

Uma das limitações do processo de manufatura aditiva é sua taxa de produção, que é relativamente baixa em comparação aos métodos convencionais. Este fato limita as aplicações às quais a manufatura aditiva é economicamente viável, como por exemplo, peças complexas com pequenas dimensões, reparos e produção de componentes que não podem ser fabricados por nenhum outro método convencional [91-93].

3.13.1 Breve histórico da manufatura aditiva:

Embora a tecnologia de manufatura aditiva apenas ter sido introduzida em aplicações industriais nas últimas décadas, as ideias por trás deste processo começaram em 1890 quando Joseph E. Blather sugeriu um método em camadas para construção de moldes para mapas de relevo topográfico em três dimensões [87,94].

Neste método as linhas dos relevos topográficos eram impressas em placas de cera e empilhadas uma sobre a outra, obtendo-se desta forma a reprodução de superfícies tridimensionais, conforme mostra a Figura 3.54.

J. E. BLANTHER.
MANUFACTURE OF CONTOUR RELIEF MAPS.
No. 473.901. Patented May 3, 1892.

Figura 3.54: Mapa de relevo topográfico em três dimensões, primeira grande aplicação do método de construção por camadas, patenteada por Joseph E. Blanthier em 1892 [87].

Posteriormente, este método de criação de um objeto em três dimensões camada por camada foi adaptada pelo Ross F. Housholder em 1979, que patenteou o primeiro processo de sinterização a laser utilizando pó, na qual as camadas poderiam ser solidificadas seletivamente [87,94].

A medida que os processos de manufatura aditiva baseada na construção em camadas começaram a evoluir, tornou-se evidente que havia oportunidades para que este processo fosse utilizado industrialmente. Assim sendo, foram desenvolvidas diferentes tecnologias de manufatura aditiva, como a fusão de leito de pó e a deposição com energia direcionada. Estes processos diferem

: pelos tipos de peças produzidas em relação as geometrias que podem ser criadas, os materiais a partir dos quais são feitas, a precisão e a qualidade final. Novos processos de manufatura aditiva continuaram a se desenvolver até 1991, a partir deste momento, as melhorias se concentraram principalmente no aumento da velocidade de construção das peças e também nos tipos de materiais utilizados [95-97].

3.14 Processo de manufatura aditiva com deposição a laser utilizando pó metálico:

O processo de manufatura aditiva com deposição a laser que utiliza pó metálico como adição de material, confecciona peças através de máquina com controle numérico computadorizado (CNC) ou robô para guiar o feixe laser e o fluxo de pó metálico sobre a superfície de deposição. A Figura 3.55 apresenta um desenho esquemático com as principais dimensões ou variáveis entre o bocal e o material de base para este processo, as quais possuem importante influência na geometria final da deposição [87,98,99].

Onde:

- f_{pf} = Dimensão entre o bocal e o ponto focal (Laser / Pó Metálico).
- d_{pf} = Diâmetro do ponto focal (Laser / Pó Metálico).
- L_B = Altura entre o bocal e o material de base.
- β = Ângulo do fluxo do pó metálico.

Figura 3.55: Desenho esquemático do processo de manufatura aditiva com deposição a Laser utilizando pó metálico. Adaptado da referência [99].

Para este processo existem diferentes tipos de bocais que fornecem o pó metálico para poça de fusão [100-102]. Os principais são: bocal coaxial e bocal externo, conforme apresenta a Figura 3.56.

Figura 3.56: Desenho esquemático de dois tipos de bocais, referente ao processo de manufatura aditiva utilizando pó metálico: (a) Bocal Coaxial e (b) Bocal externo [101].

Ainda pela análise da Figura 3.56, nota-se que antes de passar pelo bocal o feixe laser passa por uma lente focalizadora. Nota-se também que o bocal tem a função de fornecer o gás de proteção sobre a poça de fusão, esta proteção é garantida por esse fluxo axial e também pelo gás de transporte do pó metálico. Geralmente o gás de proteção utilizado para este processo é o argônio [87,98].

O bocal coaxial tem a vantagem de ser direcionalmente independente, pois há uma simetria entre o pó metálico e o feixe laser. Em contrapartida, com o bocal externo, mostrado na Figura 3.56 (b), o pó é alimentado lateralmente em relação ao eixo do feixe laser, o que significa que a eficiência do processo pode variar com as mudanças na direção da deposição [90,99-101].

3.14.1 Bocal coaxial:

Existem dois tipos de bocais coaxiais, a diferença entre eles é a configuração da saída do fluxo de pó metálico, o primeiro tipo possui uma saída em formato de anel e o segundo tipo utiliza múltiplas saídas, conforme mostram as Figuras 3.57 e 3.58, respectivamente. Estes bocais são tipicamente

confeccionados com latão ou cobre devido estes materiais possuírem elevada refletividade, os quais são menos susceptíveis de absorver o feixe laser disperso. Outra característica importante dos bocais coaxiais é que estes permitem ajustar a posição (individualmente) tanto do foco do pó metálico quanto a do feixe laser. De modo geral, ambos os pontos focais citados são posicionados coincidentemente sobre a superfície do material de base, devido esta configuração possuir maior eficiência de deposição [103-105].

O bocal coaxial com fluxo de pó metálico com saída em formato de anel é composto de dois cones concêntricos, através do qual o fluxo de pó é dirigido para o ponto focal em formato de cone, conforme mostra a Figura 3.57 (a). Devido sua característica de construção, este tipo de bocal apresenta uma seção muito fina na ponta, que pode ser facilmente danificada por colisões, conforme apresenta a Figura 3.57 (b). Estes danos podem introduzir turbulência e dispersão do pó metálico causando possíveis descontinuidades na deposição [86,99,103].

Figura 3.57: (a) Bocal Coaxial com fluxo de pó metálico com saída em forma de anel [103]; (b) Seção ou corte transversal do Bocal Coaxial com saída de pó metálico em forma de anel [86].

Em relação aos bocais coaxiais com múltiplas saídas, estes possuem canais tubulares equidistantes e com ângulos fixos, através dos quais o pó metálico flui juntamente com o gás de transporte, estes se convergem formando um foco em pó metálico simetricamente e no mesmo eixo que o feixe laser, conforme mostra a Figura 3.58 (a). Os bocais coaxiais com múltiplas saídas apresentam maior robustez se comparados aos bocais coaxiais com saída em forma de anel, este fato está relacionado com suas características geométricas de construção, conforme apresenta a Figura 3.58 (b), por este motivo são menos sensíveis a problemas causados por respingos e colisões [86,99,103].

Figura 3.58: (a) Bocal Coaxial com fluxo de pó metálico com múltiplas saídas; (b) Seção ou corte transversal do Bocal Coaxial com múltiplas saídas de pó metálico [86].

3.14.2 Bocal externo:

Os bocais externos utilizam um tubo lateral para alimentar o pó metálico em direção a poça de fusão [90,100,101], conforme mostra a Figura 3.59. Este tipo de bocal é menos eficiente do que os bocais coaxiais apresentados anteriormente. Este fato é devido que parte do pó metálico, o qual é alimentado

pelo tubo lateral em direção a poça de fusão, não se funde totalmente, ocasionando uma geometria de deposição não homogênea, assim como um acabamento superficial contendo maiores magnitudes de rugosidades. Em contrapartida, em casos específicos o bocal externo pode ter uma melhor acessibilidade, como por exemplo, perto de uma parede ou ao depositar em determinados tipos de geometrias de chanfros. Devido ao tubo de alimentação do pó metálico, este tipo de bocal é direcionalmente dependente. Deste modo, é mais apropriado utiliza-lo em uma única direção, pois a mudança repentina na direção da deposição pode ocasionar descontinuidades [90,99].

Figura 3.59: Desenho esquemático de manufatura aditiva utilizando tubo lateral para alimentação do pó metálico (Bocal Externo). Adaptado da referência [90].

3.14.3 Tipos de laser utilizado no processo de manufatura aditiva:

No processo de manufatura aditiva utiliza-se cinco tipos de *Laser*, quais sejam: CO₂, Nd:YAG, a fibra, a disco e semicondutores [86].

- *Laser* do tipo CO₂: A molécula de CO₂ vibra de acordo com os estados quânticos de energia e emitem fóton em uma magnitude de comprimento de onda 10,6 μm , na faixa do infravermelho. Este tipo de *laser* é bem absorvido

pelos materiais cerâmicos e polímeros, portanto, adequados para estes tipos de materiais. No entanto, isso não significa que este tipo de *laser* não possa ser utilizado em outras classes de materiais [2,87,101].

- *Laser* do tipo Nd:YAG: Tem um comprimento de onda de 1,06 μm , nesta faixa é mais adequado sua utilização para materiais metálicos. O meio ativo é um cristal de granada de ítrio-alumínio dopado com neodímio. Este tipo de laser tem algumas desvantagens: manutenção constante e baixa qualidade do feixe [2,87,106].

- *Laser* a fibra: O meio ativo é a própria fibra óptica, que é dopada com terras raras. As redes de Bragg, gravada na fibra óptica, operam como um filtro espectral reflexivo que seleciona um comprimento de onda que tenham sido acoplados à fibra. Este tipo de laser é utilizado principalmente em materiais metálicos. O comprimento de onda está na faixa de 1,07 μm . Possuem baixa manutenção e uma excelente qualidade de feixe [87,106].

- *Laser* a disco: Possui um fino disco de vidro dopado por terras raras. A amplificação da radiação é realizada pela reflexão múltiplas nas suas paredes. O comprimento de onda está na faixa de 1 μm , com uma excelente qualidade de feixe e são utilizados em materiais metálicos [87].

- *Laser* do tipo semiconductor ou *laser* diodo: É o mais utilizado para deposição de revestimentos, devido à sua capacidade de operar com potências em até 6 kW e por ter a particularidade de possuir elevada eficiência energética (60%), se comparados a outros tipos de *laser*. Este tipo de laser consiste numa cavidade ótica (Fabry-Perrot) na qual se encontra um meio ativo que possibilita a emissão de luz quando se estabelece uma diferença de potencial entre dois eletrodos. Comprimento de onda está na faixa de 0.8 μm a 1 μm . Entretanto, o laser de semicondutores apresenta baixa qualidade do feixe que produz, limitando a sua aplicação em revestimentos que exijam elevada precisão [87,106].

3.15 Parâmetros do processo de manufatura aditiva com deposição a laser utilizando pó metálico:

A Tabela 3.3 apresenta os principais parâmetros para o processo de manufatura aditiva com deposição a laser utilizando pó metálico. Estes

parâmetros citados na Tabela 3.3, do mesmo modo que as características do pó metálico e as características do material de base, exercem forte influência na deposição, quais sejam: propriedades mecânicas, microestruturas, defeitos ou descontinuidades e na morfologia do metal depositado. Ainda em relação a influência dos parâmetros na deposição para este processo, como por exemplo, com o aumento da potência do laser aumenta-se a diluição e diminui-se a altura da deposição, em contrapartida, com o aumento do diâmetro do feixe laser diminui-se a diluição e aumenta-se a altura da deposição [86,101,107].

Tabela 3.3: Principais parâmetros do processo de deposição a laser utilizando pó metálico [86].

PARÂMETRO	UNIDADE	DESCRIÇÃO
Potência do Laser	W	Potência do Laser para fundir o pó metálico com o material de base.
Velocidade de Deslocamento	mm/s	Velocidade de deslocamento do Robô em relação ao material de base.
Diâmetro do Laser	mm	Diâmetro mínimo do ponto focal do Laser.
Distância do Ponto Focal do Laser	mm	A distância entre o ponto focal do laser e a superfície de deposição.
Distância do Ponto Focal do Pó	mm	A distância entre o ponto focal do pó metálico e a superfície de deposição.
Taxa de Alimentação do Pó Metálico	g/s	A quantidade de pó metálico que é transferida para poça de fusão.
Taxa do Fluxo de Gás	L/min	Volume do fluxo de gás de proteção e de transporte para o pó metálico.

3.15.1 Potência do feixe laser:

A potência do feixe laser é um dos parâmetros mais importantes no processo de manufatura aditiva, este tem uma grande influência nas características do material depositado [107], e pode ser expressa pela seguinte equação (14) [108]:

$$P_{FL} = E_P \times \pi \times W_0^2 \quad (14)$$

Onde:

P_{FL} = Potência do feixe laser (W)

E_P = Densidade de potência do feixe *laser* (W/mm²)

W_0 = Raio do feixe laser (mm)

Através do aumento da potência do feixe laser é possível aumentar a diluição, a profundidade de penetração e a largura da deposição, por outro lado, com o aumento da potência do feixe laser diminui-se a altura, a dureza e a nucleação de trincas [100,101]. A Figura 3.60 apresenta um desenho esquemático do efeito da variação da potência do laser sobre o comportamento da geometria da camada depositada.

Figura 3.60: Desenho esquemático das seções transversais de deposições realizadas com o processo de manufatura aditiva, utilizando mesmos parâmetros e condições de deposição com diferentes potências do feixe laser [101].

Outro aspecto importante é que a potência do feixe laser afeta a microestrutura da deposição, uma menor potência favorece uma estrutura de grãos colunares, proporcionada através de um aumento do gradiente de temperatura [100,101]. A Figura 3.61 apresenta um desenho esquemático da interação do feixe laser com as partículas de pó metálico, referente ao processo de manufatura aditiva. O laser será parcialmente absorvido pelas partículas de pó metálico criando uma poça de fusão, outra parte será perdida pelos fenômenos ópticos da reflexão e dispersão [90,108].

Figura 3.61: Desenho esquemático da interação do feixe *laser* com as partículas de pó metálico [90].

3.15.2 Distância do ponto focal do feixe laser:

A distância do ponto focal tem um efeito em relação a dimensão do diâmetro do feixe laser sobre a superfície de incidência. Como observado anteriormente na equação 14, a dimensão do diâmetro do feixe laser afeta a magnitude da densidade de potência na superfície da peça, este fato é devido que a dimensão do raio do feixe laser tem uma relação quadrática e inversamente proporcional com a densidade de potência [104,108,109]. Outro fator importante para este processo é a distribuição de energia do feixe laser, este é dependente da localização do seu foco em relação a superfície de incidência, como por exemplo, uma distribuição uniforme e de maior densidade de potência é alcançada quando o foco do laser coincide com a superfície, como mostra a Figura 3.62 (a), enquanto que uma distribuição Gaussiana e de menor densidade de potência é obtida quando o foco está acima ou abaixo da superfície de incidência [110,111], conforme apresenta a Figura 3.62 (b).

Figura 3.62: (a) Distribuição (uniforme) de energia do feixe laser com o ponto focal coincidindo na superfície de deposição. (b) Distribuição (Gaussiana) de energia do feixe laser com foco localizado acima ou abaixo da superfície de deposição [110,111].

3.15.3 Velocidade de deslocamento do bocal:

A velocidade de deslocamento do bocal ou a velocidade de escaneamento, assim como a potência do feixe laser, são os parâmetros de maior influência no resultado da deposição. A velocidade do bocal determina o tempo de interação entre o material de base e o feixe laser. Uma baixa velocidade do bocal indica uma maior interação do feixe laser em relação ao material de base, este fato resulta em maior diluição, maior altura e largura da

deposição, e uma superfície com menores rugosidades. Porém, alta velocidade do bocal produz baixa interação entre o feixe laser e o material de base podendo ocasionar baixos índices de diluição, bem como descontinuidades e uma superfície grosseira na deposição. A densidade de energia fornecida pelo feixe laser é inversamente proporcional a velocidade de deslocamento do bocal, ou seja, quanto menor a velocidade de deslocamento do bocal maior será a densidade de energia fornecida para a poça de fusão, [101,106,112,113], conforme mostra a equação (15):

$$E_{F.L} = \frac{P_{F.L}}{V_{D.B} \times D_{F.L}} \quad (15)$$

Onde:

$E_{F.L}$ = Densidade de energia do feixe *laser* (J/mm²)

$P_{F.L}$ = Potência do feixe *laser* (W)

$V_{D.B}$ = Velocidade de Deslocamento do Bocal (mm/s)

$D_{F.L}$ = Diâmetro do feixe *laser* (mm)

A Figura 3.63 apresenta a influência da velocidade do bocal em relação a geometria do material depositado, considerando os demais parâmetros constantes, assim como as mesmas condições de deposição. Ainda pela análise da Figura 3.63, é possível notar que quanto maior a velocidade de deslocamento do bocal menor será a altura, largura e penetração da deposição, este fato está relacionado com a diminuição da densidade de energia sobre a superfície do material de base [112,113].

Figura 3.63: Seções transversais referente ao processo de deposição a laser com pó metálico, em diferentes velocidades de deslocamento do bocal, utilizando mesmos parâmetros e condições de deposição. Adaptado da referência [112].

3.15.4 Taxa de alimentação do pó metálico:

Um aumento da taxa de alimentação de pó metálico significa que mais material é fornecido para poça de fusão, este fato resulta em uma redução de incidência do feixe laser sobre a superfície do material de base, ocasionando uma diminuição da temperatura. Assim sendo, com o aumento da taxa de alimentação do pó metálico aumenta-se a largura e a altura da deposição, em contrapartida, diminui-se a diluição. A taxa de alimentação do pó metálico é a relação entre a quantidade de pó que é depositada na poça de fusão pelo tempo da deposição [106,113-115], como expresso pela equação (16):

$$R_{T.A.P} = \frac{m_p}{t_{dep.}} \quad (16)$$

Onde:

$R_{T.A.P}$ = Taxa de alimentação do pó metálico (g/s)

m_p = Quantidade de pó (g)

$t_{dep.}$ = Tempo de deposição (s)

3.15.5 Distância do ponto focal do pó metálico:

A eficiência máxima de deposição é alcançada quando a distância do foco do pó metálico coincide com a superfície do material de base. Quando o foco do pó se move abaixo ou acima da superfície obtém-se uma menor eficiência de deposição, este fato está relacionado com a quantidade ou densidade de pó metálico em relação a área de incidência do feixe laser. A densidade do pó metálico é dependente da posição ou altura entre o jato de pó metálico e o material de base [99,104,114], conforme mostra a Figura 3.64.

Figura 3.64: Formato e a densidade do pó metálico em relação à altura do bocal [99].

3.15.6 Fluxo de gás de proteção e de transporte:

No processo de deposição a laser utilizando pó metálico, o fluxo de gás de transporte e o fluxo de gás de proteção, que tipicamente é o argônio, tem por finalidade transferir o pó metálico do alimentador para poça de fusão e evitar que a poça de fusão entre em contato com a atmosfera que a envolve. O aumento do fluxo de gás de transporte resulta em maior penetração, em menor largura e altura e menores magnitudes de rugosidades da deposição. Um elevado volume de gás, tanto o de proteção quanto o de transporte, pode resultar em uma menor densidade de pó metálico na poça de fusão, o que diminui a eficiência do processo. A otimização dos parâmetros, referente ao fluxo de gás de proteção e ao fluxo de gás de transporte, possui uma importante influência na diminuição da quantidade de porosidade no material depositado, assim como ajuda na prevenção de respingos que podem danificar a lente óptica laser [87,115,116].

3.15.7 Correlação entre os parâmetros no processo de manufatura aditiva com deposição a laser utilizando pó metálico:

No processo de manufatura aditiva com deposição a laser utilizando pó metálico há uma correlação entre os principais parâmetros, os quais determinam as características do material depositado. Os parâmetros como a potência e o diâmetro do feixe laser, a velocidade de deslocamento do bocal, a taxa de alimentação do pó metálico e o diâmetro do bocal referente a saída do pó metálico, são as principais variáveis para o controle deste processo [106,113,117,118]. A quantidade de material ou a massa de pó metálico depositado pode ser calculado através da correlação dos principais parâmetros, os quais foram citados anteriormente [106], conforme mostra a equação (17):

$$PDD = \frac{R_{T.A.P} \times D_{F.L}}{V_{D.B} \times D_B^2} \quad (17)$$

Onde:

PDD = Massa do pó metálico depositado (g/mm²)

$R_{T.A.P}$ = Taxa de alimentação do pó metálico (g/s)

$V_{D.B}$ = Velocidade de Deslocamento do Bocal (mm/s)

$D_{F.L}$ = Diâmetro do feixe laser (mm)

D_B = Diâmetro do bocal referente a saída do pó metálico (mm)

3.16 Propriedades da deposição a laser utilizando pó metálico:

As principais propriedades ou características para análise referente ao processo de deposição a laser utilizando pó metálico podem ser divididos em quatro grupos, quais sejam: dimensões geométricas (altura, largura e rugosidade); propriedades mecânicas (distribuição da dureza, tensão residual, resistência a deformação e resistência a tração); propriedades metalúrgicas

(microestrutura, diluição e resistência a corrosão); e propriedades qualitativas (porosidade e trincas). É importante ressaltar que as propriedades citadas anteriormente podem estar correlacionadas, como por exemplo, a taxa de diluição com a distribuição da dureza. De modo geral, é difícil produzir uma deposição que atenda a todos os requisitos desejados, assim sendo, um equilíbrio deve ser encontrado entre as propriedades [101,107,118].

A diluição referente a este processo deve ser a menor possível, deste modo, a liga depositada terá suas propriedades ou características preservadas em uma região de maior percentual em relação a sua composição química. A taxa de diluição pode ser determinada através da análise comparativa da composição química entre o material depositado e o material de base, assim como através do método das áreas, com auxílio de um software para análise de imagem [2,14,106]

Outra característica que possui uma importante influência na propriedade da deposição é a sua densidade relativa que está diretamente relacionada com a porosidade. Esta pode ser causada por vários motivos, como por exemplo, o resultado da formação de bolhas de gás que ficam presas na poça de fusão durante a solidificação. Os principais parâmetros que influenciam na formação de poros para este processo são: densidade de energia, velocidade de deslocamento do bocal, taxa de alimentação do pó metálico, a vazão do fluxo de gás de proteção e de transporte e a distância do ponto focal do pó metálico em relação a superfície de deposição [90,101,117,119].

3.17 Características do pó metálico no processo de manufatura aditiva:

O pó metálico utilizado no processo de manufatura aditiva é tipicamente fabricado pelos processos de atomização a gás, atomização a plasma e atomização por eletrodo rotativo a plasma. Em relação ao processo de atomização a gás os gases mais utilizados são: argônio, hélio e nitrogênio. De modo geral, as partículas fabricadas pelo processo de atomização a gás possuem uma morfologia arredondada, irregular e com alguns satélites. Outra importante característica do processo de atomização a gás está relacionada as

inclusões de gás aprisionadas nas partículas durante o processo de fabricação, este fenômeno pode causar um aumento da quantidade de porosidade na deposição [119-121]. Existem diferentes tipos de ligas de pó metálico para o processo de manufatura aditiva, contudo, cada liga fornece diferentes faixas de tamanho de partícula e que pode variar de $5\mu\text{m}$ a $150\mu\text{m}$ [90,99,120]. A morfologia das partículas é uma característica importante que influencia na deposição em termos de fluidez e densidade. Geralmente, o pó metálico fabricado pelo processo de atomização por eletrodo rotativo a plasma tem uma morfologia mais esférica, com maior densidade e com menores quantidades de satélites se comparado ao processo de atomização a gás, que por sua vez possui uma morfologia arredondada, irregular e uma considerável quantidade de satélites [90,122], conforme a apresenta a Figura 3.65.

Figura 3.65: Lado esquerdo: pó metálico fabricado pelo processo de atomização a gás, com uma morfologia arredondada, irregular e uma considerável quantidade de satélites. Lado direito: pó metálico fabricado pelo processo de eletrodo rotativo a plasma, com uma morfologia esférica, de alta densidade e com baixa quantidade de satélites [122].

4. MATERIAIS E MÉTODOS:

4.1 Características dos corpos de prova utilizados nos experimentos:

Para a realização dos experimentos foram utilizadas chapas de aço de baixo carbono do seguimento automotivo sem revestimento (EN-10130-06-DC04) e revestidas com zinco (EN-10346-DX54D) pelo processo de imersão a quente. As chapas foram sobrepostas e soldadas através de um ponto realizado no meio desta área. Deste modo, foram realizadas soldagem a ponto por resistência utilizando manufatura aditiva, assim como a título de comparação pelo processo de soldagem a ponto convencional. As dimensões dos corpos de prova foram baseadas na norma AWS B4.0:2007 [123], conforme apresenta a Figura 4.1.

	Chapa com Revestimento de Zinco (mm)	Chapa sem Revestimento (mm)
Espessura (e) mm	0,8	0,7

Figura 4.1: Dimensões dos corpos de prova utilizados nos experimentos, baseado na norma AWS B4.0:2007 [123].

4.1.1 Composição química dos corpos de prova:

Para análise da composição química das chapas de aço foi utilizado um espectrômetro de emissão óptica da marca Spectro, modelo SpectroMaXx, conforme mostra a Figura 4.2.

Figura 4.2: Espectrômetro de emissão óptica para análise da composição química das chapas de aço utilizadas nos experimentos.

Os resultados das composições químicas apresentadas na Tabela 4.1 são uma média de três análises, tanto para chapa de aço sem revestimento quanto para chapa revestida com zinco. É importante ressaltar que o revestimento de zinco foi removido antes das análises.

Tabela 4.1: Composição química das chapas de aço, revestidas com zinco e sem revestimento, utilizadas nos experimentos (média de três análises).

Elemento Químico	Chapa com Revestimento de Zinco (%)	Chapa sem Revestimento (%)
C	0.0030	0.0040
Si	0.0770	0.0320
Mn	0.6100	0.1140
P	0.0330	0.0120
S	0,0046	0.0059
Cr	0.0230	0.0071
Ni	0.0056	0.0073
Mo	0.0020	0.0020
Al	0.0500	0.0640
Cu	0.0180	0.0170
Co	0.0015	0.0015
Ti	0.0480	0.0730
Nb	0.0051	0.0048
V	0.0047	0.0020
W	0.0140	0.0130
Pb	0.0030	0.0030
Mg	0.0010	0.0010
B	0.0010	0.0005
Sn	0.0020	0.0010
Zn	0.0096	0.0092
As	0.0046	0.0085
Bi	0.0065	0.0065
Ce	0.0063	0.0063
Zr	0.0051	0.0044
La	0.0010	0.0010
Fe	99.1	99.6

4.1.2 Propriedades mecânicas das chapas de aço (corpos de prova):

Foram realizados ensaios de tração para a determinação das propriedades mecânicas das chapas de aço utilizadas nos experimentos, conforme apresenta a Figura 4.3. Para isto foi utilizado um equipamento de tração da marca INSTRON, Modelo 3384.

Figura 4.3: Exemplo de ensaio de tração para a determinação das propriedades mecânicas das chapas de aço utilizadas nos experimentos.

As propriedades mecânicas encontradas através dos ensaios de tração foram: limite de escoamento [MPa]; limite máximo de resistência a tração [MPa] e alongamento [%]. Os resultados apresentados são uma média de três ensaios, tanto para chapas de aço sem revestimentos quanto para chapas revestidas com zinco, conforme mostra a Figura 4.4 e 4.5.

PROPRIEDADES MECÂNICAS: CHAPAS SEM REVESTIMENTO	
LIMITE DE ESCOAMENTO [MPa]	136.55 ± 4.17
LIMITE MÁX. DE RESISTÊNCIA [MPa]	262.74 ± 0.06
ALONGAMENTO [%]	55.84 ± 0.69

Figura 4.4: Propriedades mecânicas das chapas de aço sem revestimento encontradas através dos ensaios de tração (média de três ensaios).

PROPRIEDADES MECÂNICAS: CHAPAS COM REVESTIMENTO	
LIMITE DE ESCOAMENTO [MPa]	187.76 ± 16.93
LIMITE MÁX. DE RESISTÊNCIA [MPa]	371.55 ± 1.46
ALONGAMENTO [%]	43.87 ± 0.59

Figura 4.5: Propriedades mecânicas das chapas de aço com revestimento de zinco encontradas através dos ensaios de tração (média de três ensaios).

4.2 Características do pó metálico para a deposição a laser (manufatura aditiva) utilizado nos experimentos:

O pó metálico utilizado nos experimentos, através do processo de manufatura aditiva com deposição a laser, foi o aço inoxidável austenítico 316L fabricado pela empresa Höganäs pelo processo de atomização a gás.

4.2.1 Composição química do pó metálico:

A Tabela 4.2 apresenta a composição química do pó metálico utilizado nos experimentos tal como recebido, a mesma foi realizada pelo laboratório da empresa Höganäs (ferro (Fe) é o elemento base da liga).

Tabela 4.2: Composição química do pó metálico - Aço Inoxidável 316L.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA: PÓ METÁLICO - 316 L					
C (%)	Mo (%)	Ni (%)	Mn (%)	Cr (%)	Si (%)
0.015	2.6	13.1	1.6	17.2	0.7

4.2.2 Propriedades físicas do pó metálico:

A Tabela 4.3 mostra a densidade aparente, que é o peso de uma unidade de volume do pó solto ou a relação do peso para o volume em g/cm³ [120]. A Tabela 4.3 também apresenta a magnitude da resistividade elétrica e a condutividade térmica, assim como o escoamento que é o tempo necessário para uma amostra do pó de peso determinado (50g) escoar, nas condições atmosféricas [120]. É importante ressaltar que em comparação ao material de base (MB), a resistividade elétrica do material depositado é maior em aproximadamente 4,6 vezes ($7.4 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ / $1.6 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$), bem como a condutividade térmica do material depositado é menor em aproximadamente 3,2 vezes (51.9 W/m.K / 16.2 W/m.K).

Tabela 4.3: Propriedades físicas do pó metálico - 316 L: Densidade Aparente, Escoamento, Resistividade Elétrica e a Condutividade Térmica.

PROPRIEDADES FÍSICAS: PÓ METÁLICO - 316 L	
DENSIDADE APARENTE [g/cm ³]	4.15
ESCOAMENTO [seg./50g]	17.3
RESISTIVIDADE ELÉTRICA [Ω.m]	7.4×10^{-7}
CONDUTIVIDADE TÉRMICA [W/m.K]	16.2

4.2.3 Composição granulométrica do pó metálico:

O equipamento utilizado para verificação da morfologia e da composição granulométrica do pó metálico foi um microscópio eletrônico de varredura (MEV) de alta resolução com emissão de elétrons por um canhão de aplicação de um campo elétrico (FEG - “*Field Emission Gun*”). O modelo utilizado foi o SUPRA 55VP fabricado pela empresa ZEISS, conforme mostra a Figura 4.6.

Figura 4.6: Equipamento utilizado para verificação da morfologia e da composição granulométrica do pó metálico: Microscópio eletrônico de varredura (MEV), de alta resolução com emissão de elétrons por um canhão de aplicação de um campo elétrico (FEG).

A Tabela 4.4 apresenta a composição granulométrica ou a granulometria do pó metálico 316 L utilizado nos experimentos. A composição granulométrica mostra a distribuição das dimensões das partículas em uma amostra de pó metálico.

Tabela 4.4: Composição Granulométrica ou a Granulometria do pó metálico (aço inoxidável austenítico: 316 L) utilizado nos experimentos.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PÓ METÁLICO - 316 L	
TAMANHO DAS PARTÍCULAS [μm]	QUANTIDADE (%)
150	0.44
125	11.05
106	13.50
71	49.54
63	14.61
53	9.96
45	0.84
< 45	0.06

O tamanho das partículas para este tipo de deposição a laser deve ter uma distribuição entre 50 μm e 150 μm . Na Figura 4.7 apresenta a distribuição de frequência em relação ao tamanho das partículas do pó metálico (de acordo com os dados da Tabela 4.4), é possível observar que as dimensões das partículas estão dentro do recomendado para este processo.

Figura 4.7: Distribuição de frequência em relação ao tamanho das partículas do pó metálico (dados da Tabela 4.4).

Pode-se notar nas Figuras 4.8 e 4.9 que as partículas possuem uma morfologia arredondada, irregular e com alguns satélites, as quais são características tipicamente obtidas pelo processo de atomização a gás.

Figura 4.8: Imagens das amostras do pó metálico 316L utilizado nos experimentos, obtidas através do equipamento MEV-FEG, para a verificação da morfologia e da composição granulométrica.

A Figura 4.9 apresenta imagens com mais detalhes das partículas de pó metálico 316 L utilizado nos experimentos, para a verificação da morfologia e da composição granulométrica.

Figura 4.9: Imagem com mais detalhes das partículas de pó metálico 316 L (MEV-FEG), para análise da morfologia e composição granulométrica.

Ainda pela análise das Figuras 4.8 e 4.9, é possível observar que as dimensões das partículas apresentam uma distribuição dentro da recomendada para este processo (50 μ m a 150 μ m).

4.3 Processo de manufatura aditiva para deposição a laser com pó metálico utilizado nos experimentos:

A soldagem a ponto por resistência elétrica utilizando manufatura aditiva (AMSW) foi executada em dois estágios. No primeiro estágio foi realizado a deposição ou impressão do ponto com uma geometria predeterminada (altura e diâmetro) em chapas individuais, conforme mostra a Figura 4.10. A geometria escolhida para deposição ou impressão na chapa foi a circular para posteriormente ser comparada com o processo de soldagem a ponto convencional (RSW).

Figura 4.10: Desenho esquemático do corpo de prova para a execução da deposição a laser utilizando pó metálico através do processo de manufatura aditiva.

No segundo estágio as chapas foram sobrepostas, uma chapa com deposição e a outra sem. Posteriormente, os eletrodos foram posicionados nas

chapas nas mesmas coordenadas da deposição para a execução da soldagem por resistência elétrica, conforme apresenta a Figura 4.11. As dimensões do corpo de prova para a realização da soldagem foram apresentadas no item 4.1.

Figura 4.11: Desenho esquemático da execução da soldagem por resistência elétrica utilizando manufatura aditiva.

Ainda pela análise da Figura 4.11 é possível observar que para este tipo de processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) existem duas principais resistências elétricas, quais sejam: a resistência elétrica da deposição, a qual sua magnitude é dependente do material depositado (R_1) e a resistência elétrica de contato entre a deposição e a superfície da chapa (R_2). É importante ressaltar que a resistência elétrica entre o eletrodo e a chapa podem ser consideradas desprezíveis devido à grande área de contato do eletrodo.

4.3.1 Equipamento de manufatura aditiva para deposição a laser com pó metálico utilizado nos experimentos:

O equipamento utilizado nos experimentos para execução das deposições a laser com pó metálico foi o modelo RPMI 535, fabricado pela empresa RPM INNOVATIONS, INC. Este equipamento possui 5 eixos para o controle dos movimentos, dos quais 3 eixos são para movimentação do bocal e 2 são para movimentação da mesa de fixação, conforme mostram as Figuras 4.12 e 4.13.

Este equipamento utiliza laser a fibra, cujo meio ativo para amplificar a luz ou gerar o feixe laser é a própria fibra ótica.

Figura 4.12: Imagem externa e interna, respectivamente, do equipamento de manufatura aditiva para deposição a laser com pó metálico, modelo RPM 535 fabricado pela empresa RPM INNOVATIONS, INC.

Figura 4.13: Imagem interna do equipamento de manufatura aditiva utilizado nos experimentos, com 5 eixos para o controle dos movimentos, mostrando o cabeçote de deposição a laser (3 eixos), assim como a mesa de fixação (2 eixos).

A Tabela 4.5 apresenta as principais características do equipamento de manufatura aditiva para deposição a laser (modelo RPMI 535) utilizado nos experimentos.

Tabela 4.5: Principais características do equipamento (modelo RPMI 535) para deposição a laser com pó metálico utilizado nos experimentos.

CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO DE DEPOSIÇÃO A LASER COM PÓ METÁLICO	
POTÊNCIA DO LASER - MÁX. [W]	3000
VOLUME MÁXIMO DE CONSTRUÇÃO [mm ³]	1524 x 914 x 1524
CONCENTRAÇÃO DE CO ₂ EM ATM. CONTR. [ppm]	< 10
NÚMERO DE EIXOS PARA O CONTROLE DE MOVIMENTO	5
VELOCIDADE DE ESCANEAMENTO [mm/s]	Máx. 42,3
DIÂMETRO FOCAL DO FEIXE LASER [mm]	0,77 - 3,6
ESPESSURA DA CAMADA DEPOSITADA [mm]	0,25 - 0,76
RUGOSIDADES (Ra) [μm]	25 - 100
VELOCIDADE DE PRODUÇÃO [cm ³ /h]	5. - 50

4.3.2 Características do bocal para deposição a laser com pó metálico utilizado nos experimentos:

Para deposição a laser nos experimentos foi utilizado um bocal coaxial para fluxo de pó metálico com múltiplas saídas ou mais especificamente com 4 saídas, em um ângulo de convergência de 45°, conforme mostra a Figura 4.14. O gás de proteção utilizado nas deposições, assim como o gás de transporte para o pó metálico foi o argônio.

Figura 4.14: Desenho esquemático do bocal coaxial de múltiplas saídas (4 saídas) utilizado nos experimentos, representado por uma perspectiva isométrica e um corte transversal, respectivamente.

Ainda pela análise da Figura 4.14, é possível notar que as dimensões 6,6mm e 9,8mm estão relacionadas com o foco do pó metálico. Nos experimentos o foco do pó metálico estava localizado em cima das superfícies das chapas, conforme apresenta a Figura 4.15.

Figura 4.15: Imagem do Bocal utilizado nos experimentos, mostrando o posicionamento do foco do pó metálico em relação a superfície da chapa.

4.3.3 Características do feixe laser utilizado nos experimentos:

Nos experimentos o foco do feixe laser ficou posicionado 12,751mm abaixo da superfície de deposição. Assim sendo, o diâmetro do feixe utilizado nas deposições, localizado em cima da superfície da chapa, foi de 1,02mm, conforme mostra a Figura 4.16.

Figura 4.16: Representação esquemática do posicionamento e diâmetro do feixe laser em relação a superfície da chapa e o ponto focal do pó metálico.

4.3.4 Análise e o estudo das estratégias para impressão do ponto:

Para a impressão ou deposição do ponto na superfície da chapa, com diâmetro de 4mm e altura de 0,3mm utilizando manufatura aditiva, foi analisado o comportamento de duas estratégias. Para que posteriormente fosse escolhida a estratégia que apresentasse o melhor comportamento e repetibilidade geométrica. A primeira estratégia foi feita com 3 círculos concêntricos, visto que, foi realizado a impressão do ponto tanto de dentro para fora quanto de fora para dentro. Na segunda estratégia foi executado um círculo externo e depositadas 2 linhas paralelas, assim como a primeira estratégia o ponto foi impresso tanto de dentro para fora quanto de fora para dentro, conforme mostra a Figura 4.17.

Figura 4.17: Representação esquemática das duas estratégias de impressão ou deposição para análise.

Após as impressões ou deposições dos pontos, observou-se que a primeira estratégia, com a impressão do ponto de dentro para fora, ou seja, o círculo menor primeiro, apresentou um melhor comportamento, repetibilidade geométrica e preenchimento de toda área impressa, conforme apresenta a Figura 4.18.

Figura 4.18: Exemplo de impressão ou deposição circular (primeira estratégia) realizada durante os experimentos ($\varnothing 4 \text{ mm} \pm 0.2$ e altura de $0.3 \text{ mm} \pm 0.1$).

4.3.5 Seleção dos parâmetros para impressão do ponto:

A Tabela 4.6 apresenta os parâmetros que foram executados durante os experimentos, com o intuito de encontrar o conjunto de parâmetros com a melhor impressão ou deposição em relação as dimensões pré-estabelecidas do ponto, ou seja, altura do ponto de 0.3mm com uma tolerância de $\pm 0.1\text{mm}$ e com diâmetro do ponto de 4mm com uma tolerância de $\pm 0.2\text{mm}$. Os mesmos parâmetros foram avaliados comparando 4 estratégias de sequência de impressão, quais sejam: círculos de dentro para fora e de fora para dentro; linhas paralelas mais círculo e círculo mais linhas paralelas, conforme mostrado anteriormente na Figura 4.17.

Tabela 4.6: Exemplos de parâmetros executados durante os experimentos para encontrar a melhor impressão do ponto em relação ao dimensional pré-estabelecido.

Chapa	Vazão Mássica [g/min]	Velocidade de Escaneamento [mm/s]	Potência [W]	Estratégia de Deposição	Altura do Ponto (h) [mm]	Diâmetro do Ponto $\varnothing$ [mm]

sem Zinco esp. 0,7 mm	10	20,32	300	Círculos : Dentro p/ fora	0.97	4.17
				Círculos: Fora p/ dentro	1.09	3.87
				Linhas paralelas + Círculo	0.49	3.99
				Círculo + Linhas Paralelas	0.75	3.85
	8	16,93	400	Círculos : Dentro p/ fora	0.49	3.99
				Círculos: Fora p/ dentro	0.95	4.04
				Linhas paralelas + Círculo	0.47	3.91
				Círculo + Linhas Paralelas	0.62	3.80
com Zinco esp. 0,8 mm	10	20,32	300	Círculos : Dentro p/ fora	0.50	3.90
				Círculos: Fora p/ dentro	0.73	3.67
				Linhas paralelas + Círculo	0.50	3.76
				Círculo + Linhas Paralelas	0.59	3.85
	8	16,93	400	Círculos : Dentro p/ fora	0.27	3.96
				Círculos: Fora p/ dentro	0.58	3.74
				Linhas paralelas + Círculo	0.26	3.76
				Círculo + Linhas Paralelas	0.47	3.80

Após mais experimentos realizados com parâmetros intermediários em relação a Tabela 4.6, o conjunto de parâmetros otimizados que foram utilizados para impressão ou deposição dos pontos estão descritos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Parâmetros otimizados para a deposição do ponto utilizados durante os experimentos, para chapas com e sem revestimentos de zinco.

Chapa	Vazão Mássica [g/min]	Velocidade de Escaneamento [mm/s]	Potência [W]	Estratégia de Deposição	Altura do Ponto (h) [mm]	Diâmetro do Ponto $\varnothing$ [mm]

sem Zinco	8	25.39	400	Círculos : Dentro p/ fora	0.37	4.01
com Zinco	7.2	16,93	350	Círculos : Dentro p/ fora	0.36	4.17

4.3.6 Execução da deposição dos pontos nas chapas utilizando manufatura aditiva:

Para facilitar e otimizar a impressão ou deposição de múltiplas chapas simultâneas uma placa foi adaptada à mesa da máquina. Com um relógio apalpador verificou-se sua planicidade, conforme mostra a Figura 4.19. A placa apresentou um desvio de $\pm 0,20$ mm, o que é aceitável para este tipo de processo.

Figura 4.19: Verificação da planicidade com um relógio apalpador da placa adaptada à máquina para a execução das impressões dos pontos.

Para cada execução das impressões dos pontos foram posicionadas 40 chapas na placa, conforme mostra a Figura 4.20. As dimensões das deposições foram programadas conforme apresentadas no item 4.3.

Figura 4.20: Exemplo de execução, durante os experimentos, das impressões dos pontos em 40 chapas a cada programação.

Também foram realizados 3 impressões ou deposições em cada chapa, tanto para chapas revestidas com zinco quanto para chapas sem revestimento, conforme mostra a Figura 4.21.

Figura 4.21: Chapas com 3 deposições para execução de ensaios de tração com chapas cruzadas e ensaios de corrosão.

A Figura 4.22 apresenta as dimensões dos corpos de prova com 3 deposições. Estas foram utilizadas para os ensaios de tração com chapas cruzadas e ensaios de corrosão.

Figura 4.22: Desenho esquemático do corpo de prova com três deposições ou impressões para execução dos ensaios de tração com chapas cruzadas e ensaios de corrosão.

A Tabela 4.8 mostra a quantidade de pontos impressos nas chapas com revestimento de zinco, assim como, em chapas sem revestimento, utilizando manufatura aditiva com pó metálico. Foram utilizadas 560 chapas, visto que, 280 chapas com revestimento de zinco com espessura de 0.8mm e 280 chapas sem revestimentos com espessura de 0.7mm. A quantidade total de impressões ou deposições executadas para os experimentos foram de 880 pontos.

Tabela 4.8: Quantidade de impressões ou deposições realizadas nos experimentos utilizando manufatura aditiva.

Chapa	Tipo de Deposição	Quantidade de Chapas	Quantidade de Pontos
sem Zinco	Único	200	200
	Triplo	80	240
com Zinco	Único	200	200
	Triplo	80	240
Total (s/Zinco + c/Zinco)		560	880

4.4 Características do equipamento de soldagem a ponto por resistência elétrica utilizado nos experimentos:

Nos experimentos foi utilizado um equipamento estacionário de soldagem a ponto por resistência elétrica fabricado pela empresa *Welding Science*. Este equipamento possui um servo motor para o sistema de força e movimentação entre os eletrodos. A corrente de soldagem utilizada foi de corrente contínua (CC) de média frequência. As Figuras 4.23 e 4.24 mostram uma imagem frontal e lateral do equipamento de soldagem, assim como uma vista geral do equipamento e acessórios utilizados nos experimentos, respectivamente.

Figura 4.23: Imagem lateral (superior) e uma imagem frontal (inferior) do equipamento de soldagem utilizado nos experimentos.

Figura 4.24: Vista geral do equipamento de soldagem a ponto por resistência elétrica e também os acessórios utilizados durante os experimentos.

Este equipamento de soldagem possui a capacidade de capturar as magnitudes da resistência dinâmica e também da expansão térmica através do deslocamento dos eletrodos. A Tabela 4.9 apresenta a descrição dos principais componentes do equipamento de soldagem apresentados nas Figuras 4.23 e 4.24.

Tabela 4.9: Descrição dos principais componentes do equipamento de soldagem utilizado nos experimentos.

COMPONENTES DO EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	
COMPONENTE	DESCRIÇÃO
Estrutura da Pinça	Material: Liga de Alumínio (Duralumínio)
Transformador	Marca: ARO, Modelo: VCMA 4594 - 380Vac, 36kVA
Controlador de Solda	Marca: Marimax, Modelo: MCR 50 - 380Vac, 50kVA.
Sensor Efeito Hall	LEM HAZ 14000 - SB, AC/DC, 5kHz, 15Vdc
Sensor de Deslocamento	Marca: Gefran, Modelo: LTM0050P - Curso: 50mm
Servo Motor	Marca: WEG, Modelo: SWA56-8.0-20, Torque 5kN
Drive - Servo Motor	Marca: WEG, Mod.: WEG SCA05 - Controle: Torque, Posição e Velocidade
Sensor de Força	Carga Máxima 5kN

4.5 Medição e monitoramento da tensão, corrente, força e deslocamento dos eletrodos durante a soldagem:

Para medição e monitoramento das magnitudes da tensão, corrente, força e deslocamento entre os eletrodos foi utilizado um osciloscópio digital, assim como um circuito de amplificação de instrumentação para sensor de força e sensor de deslocamento linear, o qual é dedicado para o processo de soldagem por resistência elétrica. A título de comparação com os ensaios de arrancamento (*peel test*), utilizou-se um equipamento de ultrassom de imagem para análise das dimensões dos diâmetros dos pontos de solda. Os sinais capturados pelos conversores Analógico/Digital do osciloscópio foram monitorados e tratados por um programa desenvolvido pela empresa *Welding Science*. A Figura 4.25 mostra os principais equipamentos para as medições utilizados durante a soldagem.

Figura 4.25: Principais equipamentos utilizados para medição e monitoramento das magnitudes de tensão, corrente, força e deslocamento entre os eletrodos durante a soldagem.

A Tabela 4.10 apresenta a descrição dos principais equipamentos utilizados nos experimentos para medição e monitoramento das grandezas: tensão, corrente, força e o deslocamento entre os eletrodos.

Tabela 4.10: Descrição dos principais equipamentos utilizados para medição e monitoramento: tensão, corrente, força e deslocamento entre os eletrodos.

EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO UTILIZADOS DURANTE A SOLDAGEM	
EQUIPAMENTO	DESCRIÇÃO
Osciloscópio GWINSTEK	GDS-2104A - 100MHs
Ultrassom de Imagem	Telsonic - SWA - F1
Computador	Interface do controlador do servo-motor: Panasonic - Windows XP
Amplificador de Instrumentação	2 canais diferenciais, G=1000, CMRR>80db

A captura da tensão elétrica durante a soldagem foi executada através de conectores instalados nos porta eletrodos, conforme mostra a Figura 4.26.

Figura 4.26: Conectores instalados nos porta eletrodos para captura das magnitudes da tensão elétrica.

Para medir e monitorar a corrente de soldagem utilizou-se um sensor de efeito Hall, o qual está instalado no barramento rígido do equipamento de soldagem. Em relação ao sensor de deslocamento linear ou potenciômetro linear que está fixado no fuso do servo motor, conforme mostrado anteriormente na

Figura 4.23, este tem por função medir a profundidade da indentação e o comportamento da força durante a soldagem.

A força entre os eletrodos foi monitorada através de uma célula de carga que está localizada abaixo do suporte do eletrodo inferior. Este suporte do eletrodo possui guias lineares que tem como função transmitir a somatória das forças, quais sejam: a força de soldagem exercido pelo servo-motor, bem como a força de expansão térmica do ponto de solda durante a soldagem, conforme apresenta a Figura 4.27.

Figura 4.27: Monitoramento durante a soldagem da força do servo motor e da força de expansão térmica do ponto de solda utilizando célula de carga.

4.6 Cálculo da resistência dinâmica durante a soldagem:

Os sinais capturados pelos equipamentos apresentados no item 4.5 foram monitorados e tratados por um programa computacional desenvolvido pela empresa *Welding Science* para a execução do cálculo da resistência dinâmica. Para estes cálculos foram utilizados tensão e corrente eficaz (RMS). As equações 20, 21 e 22, apresentam a base de cálculos utilizada pelo programa para o desenvolvimento da curva de resistência dinâmica durante a soldagem [33,40].

$$V_{el\ RMS} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t V_{el}^2(t) dt} \quad (20)$$

$$I_{s\ RMS} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i_s^2(t) dt} \quad (21)$$

$$R_{din} = \frac{V_{el\ RMS}}{I_{s\ RMS}} \quad (22)$$

Onde:

R_{din} = Resistência dinâmica.

$V_{el\ RMS}$ = Tensão eficaz (RMS) entre os eletrodos.

$I_{s\ RMS}$ = Corrente de soldagem eficaz (RMS).

V_{el} = Tensão de soldagem entre os eletrodos.

t = Intervalo de tempo.

i_s = Corrente de soldagem.

4.7 Cálculo da potência ativa e energia elétrica durante a soldagem:

O programa de monitoramento e tratamento dos sinais capturados durante a soldagem, apresentados no item 4.5, também foram utilizados para o cálculo da potência ativa e energia elétrica durante a formação do ponto de solda. As equações 23 e 24, apresentam a base de cálculos utilizada pelo programa para o desenvolvimento da curva de potência ativa e energia elétrica durante a soldagem [33,40].

$$P_s = \frac{1}{t} \int_0^t V_{el}(t) i_s(t) dt \quad (23)$$

$$E_s = P_s \cdot t \quad (24)$$

Onde:

P_s = Potência Ativa (Watts).

E_s = Energia Elétrica. (Joule).

t = Intervalo de tempo.

i_s = Corrente de soldagem.

V_{el} = Tensão de soldagem entre os eletrodos.

4.8 Eletrodos utilizados nos experimentos:

Os eletrodos utilizados nos experimentos foram o da classe 1, segundo a norma RWMA [124]. Fabricados de cobre - zircônio (0,15% Zr), com dureza de 70 HB e condutividade 90% IACS. Os eletrodos a base de cobre, para o processo de soldagem por resistência elétrica, estão divididos em 3 classes, conforme apresenta a Tabela 4.11, referente a classificação dos eletrodos pela norma RWMA [124].

Tabela 4.11: Características dos eletrodos para o processo de soldagem por resistência elétrica, conforme a classificação da norma RWMA [124].

Classe - RWMA	Descrição	Condutividade IACS (%)	Dureza (HB)
Classe 1 - RWMA 1	Cobre - Zircônio (0,15% Zr)	90	70
Classe 2 - RWMA 2	Cobre - Cromo (1% Cr)	85	83
Classe 2 - RWMA 2	Cobre - Cromo - Zircônio (1% Cr; 0,25% Zr)	85	83
Classe 20 - RWMA 20	Cobre - Óxido de Alumínio (1,1% Al_2O_3)	85	75

A geometria de contato (eletrodo/chapa) empregada durante os experimentos, referente a soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), foi de face plana com diâmetro de 16mm e altura de 20mm. Já em relação a geometria de contato referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), foi de face esférica com raio de 8mm, com diâmetro de 16mm e altura de 20mm, conforme mostra a Figura 4.28 (AMSW: lado esquerdo e RSW: lado direito).

Figura 4.28: Geometrias de contato (eletrodo/chapa) e as dimensões dos eletrodos utilizados durante os experimentos, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW: Figura do lado esquerdo) como para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW: Figura do lado direito).

4.9 Critérios de aceitação do ponto de solda:

Neste trabalho, os requisitos mínimos dos pontos de solda foram analisados segundo a norma de uma montadora de veículos (item 4.9: 4.9.1 a 4.9.6). Na Figura 4.29 mostra as dimensões mínimas para a aprovação do ponto de solda, assim como a resistência mínima para os ensaios de tração por cisalhamento, os quais estão relacionados de acordo com a espessura da chapa.

- 1- Seção do ponto de solda
- 2- Zona Afetada pelo Calor (ZAC)
- 3- Plano de Junção

Espessura da Chapa t_1 mm	Diâmetro da Seção do Ponto $d_{L \text{ mín.}} \geq 3,5 \sqrt{t_1}$ mm	Diâmetro do Ponto $d_p \text{ mín.} = 1,15 d_{L \text{ mín.}}$ mm	Força mínima de Tração $F_{\text{mín.}}$ kN
0.5	2.5	2.9	1.2
0.6	2.7	3.1	1.5
0.7	2.9	3.3	1.9
0.8	3.1	3.6	2.3
0.9	3.3	3.8	2.7
1.0	3.5	4.0	3.2
1.25	3.9	4.5	4.2
1.5	4.3	4.9	5.1
1.75	4.6	5.3	6.1
2.0	5.0	5.7	7.2
2.25	5.3	6.0	8.3
2.5	5.5	6.4	10.6
2.75	5.8	6.7	11.5
3.0	6.1	7.0	12.4
3.5	6.5	7.5	15.0
4.0	7.0	8.0	18.5

Figura 4.29: Dimensões e resistência a tração mínima utilizada para aprovação do ponto de solda durante os experimentos de acordo com a norma.

Ainda pela análise da Figura 4.29, pode-se observar que as dimensões e a resistência a tração mínima que foram utilizadas para aprovação do ponto de solda estão destacadas na Tabela (cor azul), quais sejam: espessura da chapa 0,7mm (sem revestimento) e 0,8mm (revestida com zinco). A dimensão do diâmetro mínimo da seção do ponto (d_L) foi utilizada para análise nos ensaios de macrografia. De acordo com a Tabela (mostrada na Figura 4.29) o diâmetro mínimo da seção do ponto (d_L) é determinado pela equação (25):

$$d_{L\text{ mín.}} \geq 3,5 \sqrt{t_{ch}} \quad (25)$$

Assim sendo, para chapas revestidas com zinco de espessura (t_{ch}) de 0,8mm o diâmetro mínimo da seção do ponto ($d_{L\text{ mín.}}$) é de 3,1mm. E para chapas sem revestimentos com espessura (t_{ch}) de 0,7mm o diâmetro mínimo da seção do ponto ($d_{L\text{ mín.}}$) é de 2,9mm.

4.9.1 Determinação do diâmetro mínimo do ponto de solda ($d_{p\text{ mín.}}$) para os ensaios de tração e arrancamento (peel test):

A Figura 4.30 apresenta a metodologia utilizada nos ensaios de tração (por cisalhamento, com chapas cruzadas e por deslocamento) e também de arrancamento para a determinação do diâmetro mínimo do ponto de solda ($d_{p\text{ mín.}}$) de acordo com a norma de uma montadora de veículos, bem como algumas configurações possíveis de fratura após o rompimento. Para tal, foi encontrado o valor do diâmetro médio do ponto de solda ($d_{p\text{ médio}}$) a partir de duas dimensões, as quais foram obtidas durante os ensaios com auxílio de um paquímetro digital e posteriormente confrontadas com os valores ($d_{p\text{ mín.}}$) da Tabela mostrada na Figura 4.29, que está representado pela equação (26):

$$d_{p\text{ médio}} \geq \frac{D_{MÁX.} + D_{MÍN.}}{2} \quad (26)$$

Onde:

$d_{p\text{ médio}}$ = Diâmetro médio do ponto de solda

$D_{MÁX.}$ = Diâmetro Máximo do ponto de solda

$D_{MÍN.}$ = Diâmetro Mínimo do ponto de solda

Figura 4.30: Metodologia utilizada nos ensaios de tração (por cisalhamento, com chapas cruzadas e por deslocamento) e também de arrancamento (*peel test*) para a determinação do diâmetro mínimo do ponto de solda; e algumas configurações possíveis de fratura [33,40].

Conforme mostra a Tabela da Figura 4.29, o diâmetro mínimo do ponto ($d_{p\min}$) após os ensaios de tração e arrancamento é expressa pela equação (27):

$$d_{p\min} = 1,15 d_{L\min}. \quad (27)$$

Desta forma, para chapas revestidas com zinco de espessura de 0,8mm o diâmetro mínimo do ponto ($d_{p\min}$) é de 3,6mm. E para chapas sem revestimentos com espessura de 0,7mm o diâmetro mínimo do ponto ($d_{p\min}$) é de 3,3mm.

4.9.2 Penetração ou altura do ponto de solda:

A penetração ou altura do ponto de solda ($P_{CH.1}$, $P_{CH.2}$), de acordo com a norma, deve ter uma dimensão maior ou igual a 0,2mm, conforme mostra a Figura 4.31. Esta penetração poderá ter uma dimensão menor que 0,2mm se os resultados dos testes destrutivos estiverem dentro dos limites mínimos de acordo com a norma.

$$P_{CH.1} \geq 0,2\text{mm}$$

$$P_{CH.2} \geq 0,2\text{mm}$$

Onde:

$P_{CH.1}$ = Penetração na chapa 1

$P_{CH.2}$ = Penetração na chapa 2

Figura 4.31: Desenho esquemático da penetração (altura do ponto) de solda mínima conforme norma, revelada nos ensaios de macrografia.

4.9.3 Profundidade da indentação:

A profundidade da indentação máxima permitida de acordo com a norma é de 20% da espessura de cada chapa, conforme apresenta a Figura 4.32:

$i_{CH.1}$ Máx. 20% de t_1

$i_{CH.2}$ Máx. 20% de t_2

Onde:

$i_{CH.1}$ = Indentação da chapa 1

$i_{CH.2}$ = Indentação da chapa 2

t_1 = espessura da chapa 1

t_2 = espessura da chapa 2

Figura 4.32: Desenho esquemático da profundidade máxima permitida da indentação de acordo com a norma.

Sendo assim, a profundidade da indentação ($I_{CH} = \%$) é expressa pela equação (28):

$$I_{CH} = \frac{i_{CH}}{t_{ch}} 100\% \quad (28)$$

Onde:

i_{CH} = Indentação (mm)

t_{ch} = Espessura da chapa (mm)

4.9.4 Porosidades no ponto de solda:

As porosidades ou cavidades reveladas nos ensaios de macrografia, conforme mostra a Figura 4.33, possuem as seguintes condições de aprovação segundo a norma:

- A soma das áreas dos poros ($P_1 + P_2 + \dots$) não deve ser maior que 15% da área do ponto de solda.
- A soma dos comprimentos dos poros ($L_1 + L_2 + \dots$) deve ser menor que 25% do diâmetro do ponto de solda.
- Os poros ou cavidades devem estar localizados dentro da área limitada de 15% da periferia da zona de fusão, como mostra a Figura 4.33.

Figura 4.33: Desenho esquemático de poros ou cavidades reveladas nos ensaios de macrografias no ponto de solda.

4.9.5 Trincas internas no ponto de solda:

As trincas internas no ponto de solda reveladas nos ensaios de macrografia, conforme mostra a Figura 4.34, possuem as seguintes condições de aprovação segundo a norma:

- A soma dos comprimentos das trincas na zona de fusão ($L_1 + L_2 + \dots$) deve ser menor que 25% do diâmetro do ponto de solda.
- Trincas dentro da zona afetada pelo calor (ZAC) não são permitidas.
- As trincas devem estar localizadas dentro da área limitada de 15% da periferia da zona de fusão, como mostra a Figura 4.34.

Figura 4.34: Desenho esquemático de trincas internas no ponto de solda reveladas nos ensaios de macrografias.

4.9.6 Abertura entre as chapas soldadas:

A abertura entre as chapas soldadas (H), conforme mostra a Figura 4.35, é tolerável se todos os requisitos mínimos da norma forem atendidos.

Figura 4.35: Desenho esquemático da abertura entre as chapas soldadas.

4.10 Determinação dos diagramas de soldabilidade e os parâmetros otimizados de soldagem:

Neste trabalho, foram realizados diagramas de soldabilidade tanto para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) quanto para a soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). A determinação dos diagramas de soldabilidade teve como intuito localizar os parâmetros otimizados de soldagem de cada processo. E posteriormente, os parâmetros otimizados foram utilizados para os seguintes estudos e análises do ponto de solda: as dimensões geométricas (macrografias); as microestruturas (micrografias); propriedades mecânicas (ensaios de tração: por cisalhamento, por arrancamento, por deslocamento, em chapas cruzadas e ensaios de fadiga); medição da resistência dinâmica, energia elétrica e expansão térmica durante a soldagem; ensaios de corrosão e ensaios de microdureza Vickers.

4.10.1 Determinação dos diagramas de soldabilidade para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW):

Para a determinação do diagrama de soldabilidade referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), tempo (ms) versus corrente (kVA), utilizou-se uma força constante entre os eletrodos de 290kgf para chapas com revestimento de zinco e 220kgf para chapas sem revestimento. É importante ressaltar que as forças de soldagem entre os eletrodos (apresentadas anteriormente) foram pré-determinadas empiricamente através de ensaios realizados antes da execução do diagrama de soldabilidade, para tal fim, foram observados os critérios mínimos da norma apresentados no item 4.9.

Os limites mínimos de soldagem foram estabelecidos como sendo aquele tempo e corrente onde pelo menos três amostras, referente aos ensaios de arrancamento, apresentaram um valor mínimo especificado do diâmetro do ponto de solda de acordo com a norma. A partir deste ponto de limite mínimo, a corrente foi aumentada gradualmente em intervalos de 200A até a ocorrência de expulsão de material. Este ponto foi considerado o limite máximo, ou seja, a

magnitude de corrente de soldagem onde abaixo deste ponto não ocorre a expulsão de material, conforme apresenta a Figura 4.36.

Além dos ensaios de arrancamento realizados nos limites mínimos e máximos do diagrama de soldabilidade, também foram executados três corpos de prova por parâmetros, os quais foram utilizados para ensaios de tração por cisalhamento.

Com relação aos parâmetros otimizados para os experimentos, foram localizados no diagrama de soldabilidade a partir do ponto com maior grau de liberdade entre os eixos X (corrente de soldagem) e Y (tempo de soldagem), conforme mostra a Figura 4.36. Para os parâmetros otimizados foram realizadas seis amostras, uma vez que, três para ensaios metalográficos e três para ensaios de tração por cisalhamento.

Figura 4.36: Metodologia para a determinação do diagrama de soldabilidade ou janela operacional referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW).

4.10.2 Determinação dos diagramas de soldabilidade para o processo de soldagem a ponto por resistência utilizando manufatura aditiva (AMSW):

Para a determinação do diagrama de soldabilidade referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), tempo (ms) versus corrente (kVA), utilizou-se uma força constante entre os eletrodos de 110kgf, tanto para chapas com revestimento de zinco como para chapas sem revestimento.

Os limites mínimos de soldagem foram estabelecidos como sendo aquele tempo e corrente onde pelo menos três amostras, referente aos ensaios de arrancamento, apresentaram um valor mínimo especificado (diâmetro do ponto) de acordo com a norma. A partir deste ponto de limite mínimo, a corrente foi aumentada gradualmente em intervalos de 200A, até a ocorrência de uma marca termomecânica ou uma profundidade de indentação maior que 15% em relação a espessura da chapa. Assim sendo, este ponto foi considerado o limite máximo, ou seja, a magnitude de corrente de soldagem onde abaixo deste ponto não ocorre uma profundidade de indentação maior que 15% da espessura da chapa, conforme apresenta a Figura 4.37.

Além dos ensaios de arrancamento executados nos limites mínimos e máximos do diagrama de soldabilidade, também foram efetuados três corpos de prova por parâmetros, os quais foram utilizados para ensaios de tração.

Os parâmetros otimizados para os experimentos foram localizados no diagrama de soldabilidade a partir do ponto com maior grau de liberdade entre os eixos X (corrente de soldagem) e Y (tempo de soldagem), conforme apresenta a Figura 4.37. Para os parâmetros otimizados foram realizadas seis amostras, dos quais, três para ensaios metalográficos e três para ensaios de tração por cisalhamento.

Figura 4.37: Metodologia para a determinação do diagrama de soldabilidade ou janela operacional referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW).

4.11 Determinação das propriedades mecânicas dos pontos de solda:

Para a determinação das propriedades mecânicas dos pontos de solda, executados pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), foram realizados ensaios de tração por cisalhamento, ensaios de tração com chapas cruzadas (tração perpendicular ao ponto de solda), ensaios de tração por deslocamento (*pull test*) e ensaios de fadiga. A título de comparação os mesmos ensaios foram realizados nos pontos de solda executados pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Para os experimentos relacionados aos ensaios de tração foi utilizado um equipamento (máquina de tração) da marca INSTRON, modelo 3384, conforme também apresentado no item 4.1.2.

4.11.1 Ensaio de tração por cisalhamento:

A Figura 4.38 mostra um desenho esquemático referente ao ensaio de tração por cisalhamento, baseado na norma AWS B4.0:2007 [123], assim como uma imagem deste ensaio realizado durante os experimentos.

Figura 4.38: Desenho esquemático do ensaio de tração por cisalhamento, baseado na norma AWS B4.0:2007 [123], e uma imagem deste ensaio realizado durante os experimentos.

Nestes ensaios foram gerados gráficos pelo programa da máquina de tração a fim de analisar e observar as forças máximas atingidas pelos pontos de solda antes do seu rompimento, conforme mostra a Figura 4.39.

Figura 4.39: Exemplo de gráfico: Força (N) versus Deformação (mm) realizado pelo equipamento de ensaio de tração para análise das forças máximas atingidas pelos pontos de solda.

A força mínima de tração por cisalhamento (conforme norma) está relacionada com a espessura da chapa. Assim sendo, conforme apresentado no item 4.9, para chapa revestida com zinco de espessura de 0,8mm a força mínima de tração é de 230kgf, e para chapa sem revestimento de espessura de 0,7mm a força mínima de tração é de 190kgf.

A Figura 4.40 apresenta um exemplo de um conjunto de amostras preparadas para os ensaios de tração, bem como mostra os corpos de prova que foram posteriormente tracionados durante os experimentos. Para cada parâmetro foram executados 3 ensaios de tração, tanto para soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para a soldagem a ponto convencional (RSW), em chapas revestidas com zinco e sem revestimento. Deste modo, os resultados apresentados neste trabalho, referente aos ensaios de tração por cisalhamento, representam uma média de 3 amostras.

Figura 4.40: Exemplo de amostras preparadas para os ensaios de tração e também apresenta as amostras que posteriormente foram tracionadas durante os experimentos.

4.11.2 Ensaio de tração com chapas cruzadas:

A força mínima de tração com chapas cruzadas (conforme a norma) é de 60% da força mínima em relação ao ensaio de tração por cisalhamento, como mostrado no item 4.11.1. Desta maneira, para chapa revestida com zinco de espessura de 0,8mm a força mínima é de 138kgf, e para chapa sem revestimento de espessura de 0,7mm a força mínima de tração é de 114kgf. A Figura 4.41 apresenta um desenho esquemático da amostra para o ensaio de tração com chapas cruzadas e também apresenta exemplos de amostras preparadas durante os experimentos, respectivamente, os quais foram baseados na norma AWS B4.0:2007 [123].

Figura 4.41: Desenho esquemático e exemplos de amostras para o ensaio de tração com chapas cruzadas (tração perpendicular ao ponto de solda), baseado na norma AWS B4.0:2007 [123].

Para o ensaio foi utilizado um dispositivo de fixação para ser adaptado no equipamento de tração. Este dispositivo foi construído baseado na norma AWS B4.0:2007 [123], conforme mostra a Figura 4.42. Pode-se observar também na Figura 4.42 que a força de tração para este tipo de ensaio é perpendicular em relação ao ponto de solda.

Figura 4.42: Desenho esquemático e uma imagem do dispositivo de fixação utilizado para os ensaios de tração com chapas cruzadas (baseado na norma AWS B4.0:2007) [123].

4.11.3 Ensaio de tração por deslocamento (*pull test*):

A força mínima de tração por deslocamento (conforme a norma) é de 20% da força mínima de tração por cisalhamento. Assim sendo, para chapa revestida com zinco de espessura de 0,8mm a força mínima é de 46 kgf, e para chapa sem revestimento de espessura de 0,7mm a força mínima de tração é de 38 kgf. A Figura 4.43 apresenta um desenho esquemático da amostra e uma imagem do ensaio de tração por deslocamento realizada durante os experimentos, o qual foi baseado na norma AWS B4.0:2007 [123].

Figura 4.43: Desenho esquemático e uma imagem do ensaio de tração por deslocamento (*pull test*) realizado durante os experimentos (baseado na norma AWS B4.0:2007) [123].

4.11.4 Ensaio de fadiga:

A Figura 4.1 apresentada no item 4.1, mostra as dimensões dos corpos de prova para a execução referente aos ensaios de fadiga com ciclos regulares de tensão. Os experimentos foram realizados em um equipamento com sistema servo hidráulico com controlador da marca MTS, modelo: 494.10 - Flex Test 100.

Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, em carregamento cíclico com frequência de 20 Hz (onda senoidal), utilizando uma razão de tensão $R = 0,1$, seguindo as orientações da norma AWS B4.0:2007 [123]. A razão de carga ou tensão (R) é a relação entre as amplitudes das tensões mínima e máxima, conforme mostra a equação (29) [81,82]:

$$R_{tensão} = \frac{\sigma_{mín.}}{\sigma_{máx.}} \quad (29)$$

Onde:

$R_{tensão}$ = Razão de tensão

$\sigma_{mín.}$ = Tensão mínima

$\sigma_{máx.}$ = Tensão máxima

Foram plotadas curvas de carga em função do número de ciclos até a fratura. Para esse fim, foram utilizados 7 níveis de carga com 3 ensaios em cada nível. Os níveis de carga máxima foram obtidos a partir dos resultados de tração por cisalhamento. O menor nível de carga foi executado até um limite de vida em fadiga em torno de 10^7 ciclos. Logo após os ensaios de fadiga foram realizados os ensaios de fractografias via microscopia eletrônica de varredura (MEV), estas análises obtiveram suas fraturas em um regime de alto ciclo ($>10^5$), ou seja, baixo nível de carregamento cíclico.

4.12 Caracterização metalográfica:

Foi realizado a caracterização metalográfica dos pontos de solda (macrografias e micrografias) utilizando um microscópio óptico, os quais foram executados através dos parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento. E a título de comparação foi executado também pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW).

O ensaio de macrografia teve como finalidade capturar e analisar as seguintes dimensões do ponto de solda: diâmetro, penetração, abertura entre as

chapas sobrepostas e a profundidade da indentação. Já em relação ao ensaio de micrografia teve como intuito observar a microestrutura resultante da zona fundida (ZF), da zona afetada pelo calor (ZAC) e do material de base (MB). O reagente utilizado nos ensaios para o ataque foi o Vilela: 1g ácido pícrico + 5ml HCl + 100ml etanol. A Figura 4.44 apresenta exemplos de embutimentos executados durante os ensaios metalográficos.

Figura 4.44: Exemplos de embutimentos realizados durante os ensaios metalográficos (macrografias e micrografias) dos pontos de solda para ambos os processos de soldagem (AMSW e RSW).

É importante ressaltar que os embutimentos também foram utilizados para a determinação da composição química da zona fundida (ZF), referente aos pontos de solda executados pelo processo AMSW, através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) via espectrômetro por dispersão de energia (EDS).

4.13 Ensaio de microdureza Vickers:

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados com uma força de 0,025 kgf e com uma distância de espaçamento entre as pirâmides de 0,08 mm.

As medições de microdureza (mapeamento) foram executadas em toda a área do ponto de solda, assim como no material de base, tanto no ponto de solda utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o ponto de solda realizado pelo processo de soldagem convencional (RSW). Todos os pontos de solda utilizados para estes ensaios foram os de parâmetros otimizados, encontrados através das janelas operacionais dos diagramas de soldabilidade realizadas neste trabalho (item 5.2). Através das impressões foram gerados mapas de microdureza, executados pelo software do equipamento, cujo nome é Ecos Workflow, versão V.2.11.0. Para estes ensaios foi utilizado um equipamento automatizado da marca Emco-Test e modelo Durascan 70, com penetrador piramidal, conforme mostra a Figura 4.45.

Figura 4.45: Equipamento de microdureza Vickers utilizado nos ensaios, da marca Emco-Test e modelo Durascan 70 com penetrador piramidal.

4.14 Ensaio de corrosão em névoa salina:

Foram realizados ensaios de corrosão em névoa salina nas amostras soldadas pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), bem como a título de comparação pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Este tipo de ensaio utilizando nevoa salina é bastante difundido entre as empresas automotivas para verificação da conformidade dos

componentes dos veículos. A Figura 4.46 apresenta um desenho esquemático contendo as dimensões, a distribuição dos pontos de solda e as quantidades das amostras utilizadas nos ensaios de corrosão em névoa salina. Para cada amostra foram executados 3 pontos de solda, em chapas revestidas com zinco e também em chapas sem revestimento.

Figura 4.46: Desenho esquemático das amostras utilizadas nos ensaios de corrosão em névoa salina, assim como as quantidades das amostras para cada processo de soldagem (AMSW e RSW), em chapas com e sem revestimento de zinco.

Depois das amostras soldadas realizou-se o processo de pintura, este foi executado seguindo as mesmas etapas de pintura de uma carroceria de veículo em uma montadora, quais sejam: a primeira etapa é o processo de fosfatização, o qual tem por finalidade preparar a superfície metálica para permitir uma boa aderência da tinta. A segunda etapa é o processo de pintura eletroforética ou

eletrodeposição catódica, este efeito elétrico garante que as partículas de tinta penetrem e cubram integralmente as peças, tem por finalidade proteger contra a corrosão. A terceira etapa é a pintura de fundo, também conhecida por *primer*, este serve de base de preparação antes de receber a pintura final, ou seja, tem por finalidade regularizar as possíveis imperfeições na superfície causadas pela segunda etapa (eletrodeposição). A quarta etapa é a tinta base, este processo de pintura resulta na cor definitiva do veículo. A quinta e última etapa é a camada de verniz, que tem por finalidade proteger a tinta base e assegurar que a mesma permaneça ancorada ou fixada na carroceria do veículo. A Figura 4.47 apresenta de forma resumida e esquemática as cinco etapas ou camadas de pintura que foram realizadas nas amostras para os ensaios de corrosão em névoa salina, estes foram baseados no processo de pintura de carrocerias de veículos.

Figura 4.47: Desenho esquemático das cinco camadas de pintura executadas nas amostras para os ensaios de corrosão em névoa salina, conforme o processo de pintura de carrocerias de veículos.

As Figuras 4.48, 4.49 e 4.50 apresentam a preparação das amostras realizadas para a execução dos ensaios de corrosão em névoa salina. A Figura 4.48 mostra os corpos de prova soldados, conforme apresentado anteriormente na Figura 4.46, contendo 3 pontos de solda em cada amostra, tanto pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW), em chapas com e sem revestimento de zinco. A Figura 4.49, apresenta as amostras que passaram pelo processo de fosfatização e pelo processo de eletrodeposição catódica. E finalmente, a Figura 4.50 apresenta as amostras prontas para os ensaios de

corrosão em névoa salina, estas passaram pelos processos de pintura de fundo (*primer*), tinta base da cor branca e posteriormente a aplicação de verniz.

Figura 4.48: Amostras soldadas contendo 3 pontos de solda cada, preparação para a execução dos ensaios de corrosão em névoa salina.

Figura 4.49: Processo de fosfatização e processo de eletrodeposição catódica, preparação para a realização dos ensaios de corrosão em névoa salina.

Figura 4.50: Processo de pintura de fundo (*primer*), processo de pintura de tinta base da cor branca e finalmente a aplicação de verniz, amostras prontas para a realização dos ensaios de corrosão em névoa salina.

O equipamento utilizado para os ensaios acelerados de corrosão em névoa salina foi uma câmara cíclica da marca Equilam, modelo SSE 1300 G2, com volume de 1300 Litros, conforme mostra a Figura 4.51.

Figura 4.51: Equipamento utilizado para os ensaios de corrosão em névoa salina: Marca - Equilam, modelo SSE 1300 G2.

Os ensaios de corrosão em névoa salina consistiram em dispor as amostras espaçadas umas das outras com uma inclinação de 15° na vertical, conforme apresenta a Figura 4.52. Os ensaios foram executados em 60 ciclos de 24 horas, ou seja, um total de 1440 horas (60 dias). Visto que, cada ciclo (24 horas) foi dividido em três etapas: a primeira etapa foi a de névoa salina, foram 4 horas com névoa de solução de NaCl a 5% m/v, a uma temperatura de 35°C . A segunda etapa foi a de clima padrão, foram 4 horas com umidade relativa de 50% a uma temperatura de 23°C . A terceira etapa foi a de umidade, foram 16 horas de umidade relativa de 98% a uma temperatura de 40°C .

Figura 4.52: Disposição das amostras com uma inclinação de 15° na vertical, dentro do equipamento para ensaios de corrosão em névoa salina.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

5.1 Deposição a laser utilizando pó metálico (manufatura aditiva):

Neste item serão apresentados os resultados referente a deposição utilizando manufatura aditiva ou mais especificamente o processo de deposição a laser utilizando pó metálico (aço inoxidável austenítico – 316 L), em chapa revestida com zinco e chapa sem revestimento.

5.1.1 Análise química da deposição a laser utilizando pó metálico 316L:

Antes da execução da soldagem foi realizada análise da composição química da deposição a laser utilizando pó metálico 316 L. Neste ensaio foi utilizado um espectrômetro de emissão óptica da marca Spectro e modelo SpectroMaXx. Para tal fim, utilizou-se amostras contendo três deposições, assim sendo o resultado apresentado da composição química é a média de três amostras (em chapas com e sem revestimento de zinco), como mostra a Figura 5.1.

Figura 5.1: Ensaio para análise da composição química referente a deposição a laser utilizando pó metálico 316 L.

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os resultados das médias (três amostras) da composição química referente a deposição a laser utilizando pó metálico 316L em chapa com revestimento de zinco e sem revestimento.

Tabela 5.1: Média da composição química de três amostra da deposição a laser utilizando pó metálico 316 L em chapas com revestimento de zinco.

ELEMENTOS DE LIGA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) - DEPOSIÇÃO EM CHAPAS COM ZINCO					
	C (%)	Mo (%)	Ni (%)	Mn (%)	Cr (%)	Si (%)
AMOSTRA 1	0,017	1,65	8,04	1,48	10,53	0,44
AMOSTRA 2	0,022	1,76	8,31	1,53	11,42	0,57
AMOSTRA 3	0,014	1,59	7,81	1,40	10,38	0,39
MÉDIA	0,018	1,67	8,05	1,47	10,78	0,47
DESVIO PADRÃO	0,004	0,09	0,25	0,07	0,56	0,09

Tabela 5.2: Média da composição química de três amostra da deposição a laser utilizando pó metálico 316 L em chapas sem revestimento.

ELEMENTOS DE LIGA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) - DEPOSIÇÃO EM CHAPAS SEM ZINCO					
	C (%)	Mo (%)	Ni (%)	Mn (%)	Cr (%)	Si (%)
AMOSTRA 1	0,018	1,41	6,39	1,24	8,83	0,39
AMOSTRA 2	0,016	1,22	5,74	0,87	8,22	0,47
AMOSTRA 3	0,023	1,57	7,12	1,44	9,12	0,52
MÉDIA	0,019	1,40	6,42	1,18	8,72	0,46
DESVIO PADRÃO	0,004	0,18	0,69	0,29	0,46	0,07

A Tabela 5.3 mostra a comparação entre a composição química do pó metálico (316 L), tal como recebido, em relação aos resultados encontrados das médias das composições químicas das deposições, tanto em chapa com revestimento de zinco quanto em chapa sem revestimento, apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.3: Comparação entre a composição química do pó metálico em relação aos resultados das deposições (média) apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

ELEMENTOS DE LIGA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)					
	C (%)	Mo (%)	Ni (%)	Mn (%)	Cr (%)	Si (%)
PÓ METALICO - 316 L	0,015	2,6	13,1	1,6	17,2	0,7
MÉDIA DA DEPOSIÇÃO - CHAPA COM ZINCO	0,018	1,67	8,05	1,47	10,78	0,47
MÉDIA DA DEPOSIÇÃO - CHAPA SEM ZINCO	0,019	1,40	6,42	1,18	8,72	0,46

A Figura 5.2 apresenta graficamente a composição química dos principais elementos de liga, comparando o percentual em peso dos elementos do pó metálico 316 L (como recebido) em relação as médias dos elementos das deposições em chapa revestida de zinco e sem revestimento, apresentadas anteriormente na Tabela 5.3.

Figura 5.2: Gráfico comparativo entre os principais elementos de liga do pó metálico (316 L) em relação aos elementos de liga do material depositado em chapa com revestimento de zinco e sem revestimento.

Pela análise da Figura 5.2, observa-se que o teor de Cr referente ao pó metálico em comparação a deposição em chapa com revestimento de zinco e sem revestimento houve uma redução de 37,3% e 49,3%, respectivamente. O mesmo ocorreu para o teor de Ni onde houve uma redução em relação ao pó metálico de 38,5% em chapa com revestimento de zinco e 50,9% em chapa sem revestimento. Nota-se também que o teor de Mo em relação ao pó metálico apresentou-se menor em 35,7% e 46,2% para chapa com revestimento de zinco e sem revestimento, respectivamente. Esta maior redução dos principais elementos de liga em relação a chapa sem revestimento está relacionada a sua maior taxa de diluição, conforme mostra o item 5.1.4, a diluição em chapa sem revestimento foi de 48,19% e 40,85% para chapa revestida com zinco.

5.1.2 Análise dos dimensionais e dos pesos das deposições em chapa revestida com zinco e sem revestimento:

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam o valor máximo e mínimo, a média e o desvio padrão das seguintes magnitudes das deposições: diâmetro, altura, área e o peso. Os valores citados foram coletados em uma amostragem de 150 deposições, tanto em chapa revestida com zinco quanto em chapa sem revestimento.

Tabela 5.4: Dimensional e peso referente a deposição a laser em chapas sem revestimento.

Deposição a Laser - Manufatura Aditiva				
Chapas sem Revestimento				
	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	Área [mm ²]	Peso [g]

Valor Máximo	4.18	0.48	14.24	0.075
Valor Mínimo	3.72	0.13	12.61	0.012
Média	3.94	0.276	13.22	0.033
Desvio Padrão	0.08	0.066	0.28	0.017

Tabela 5.5: Dimensional e peso referente a deposição a laser em chapas com revestimento de zinco.

Deposição a Laser - Manufatura Aditiva				
Chapas com Zinco				
	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	Área [mm ²]	Peso [g]

Valor Máximo	4.40	0.52	15.12	0.094
Valor Mínimo	4.02	0.17	13.83	0.011
Média	4.18	0.34	14.38	0.039
Desvio Padrão	0.06	0.069	0.24	0.022

A partir da análise das Tabelas 5.4 e 5.5, observa-se que em relação à média do diâmetro, altura, área e peso, as deposições em chapa com revestimento de zinco apresentaram valores ligeiramente maiores se comparadas as deposições em chapas sem revestimento. No que se refere ao desvio padrão, nota-se que os valores se mostraram semelhantes. Este resultado está relacionado a repetibilidade da deposição executada pelo equipamento de manufatura aditiva em relação as tolerâncias predeterminadas no desenho. Pode-se notar também que em média o diâmetro e a altura das deposições apresentaram-se dentro das tolerâncias descritas no desenho. A Figura 5.3 mostra um exemplo do dimensionamento da deposição (raio e área) executado através do microscópio durante os experimentos.

Figura 5.3: Exemplo do dimensionamento da deposição (raio e área) capturada pelo microscópio durante os experimentos.

5.1.3 Análise da morfologia da superfície da deposição em chapa revestida com zinco e sem revestimento:

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam imagens da deposição (frente e verso) capturadas através do microscópio para análise da morfologia da superfície em chapa revestida com zinco e sem revestimento.

Figura 5.4: Imagens capturadas pelo microscópio para análise da morfologia da superfície da deposição (frente e verso) em chapa sem revestimento.

Figura 5.5: Imagens capturadas pelo microscópio para análise da morfologia da superfície da deposição (frente e verso) em chapa com revestimento de zinco.

Pela análise da Figura 5.4, pode-se observar que a deposição em chapa sem revestimento apresentou um diâmetro ligeiramente assimétrico e sem respingos. No verso da deposição ocorreu uma marca térmica e uma sutil deformação ou abaulamento logo abaixo da deposição. Em relação a Figura 5.5, nota-se que a deposição mostrou um diâmetro simétrico e com alguns respingos. Uma possível explicação para a ocorrência de respingos está relacionada aos gases causados pela volatilização do revestimento de zinco. No verso da deposição ocorreu uma marca térmica ocasionada pela volatilização parcial do zinco e uma pequena deformação ou abaulamento logo abaixo da deposição.

5.1.4 Análise da diluição da deposição a laser utilizando pó metálico (316L), em chapa revestida com zinco e sem revestimento, através dos ensaios de macrografias:

A Figura 5.6 apresenta um exemplo do dimensionamento das áreas utilizando as macrografias, assim como mostra a metodologia para o cálculo da diluição [13,125].

$$\text{Diluição (\%)} = \frac{B}{A + B} \times 100$$

Onde:

A = Área da face da solda.

B = Área fundida do material de base.

MB = Material de base.

Figura 5.6: Exemplo do dimensionamento das áreas utilizando as macrografias e a metodologia para o cálculo da diluição. Adaptado da referência [13].

As Tabelas 5.6 e 5.7 mostram os resultados das médias (3 amostras) da diluição da deposição referente ao processo de manufatura aditiva utilizando pó metálico (316L) em chapa revestida com zinco e sem revestimento, respectivamente, estas foram coletadas através dos ensaios de macrografias, conforme apresentado anteriormente na Figura 5.6.

Tabela 5.6: Média (3 amostras) da diluição (%) referente a deposição em chapa com zinco.

	DILUIÇÃO (%) - DEPOSIÇÃO EM CHAPA COM ZINCO			
	ÁREA (A) mm ²	ÁREA (B) mm ²	ÁREA TOTAL (A+B) mm ²	DILUIÇÃO (%)
AMOSTRA 1	0,63	0,40	1,03	38,83
AMOSTRA 2	0,64	0,48	1,12	42,86
AMOSTRA 3	0,55	0,38	0,93	40,86
MÉDIA	0,61	0,42	1,03	40,85

Tabela 5.7: Média (3 amostras) da diluição (%) referente a deposição em chapa sem zinco.

	DILUIÇÃO (%) - DEPOSIÇÃO EM CHAPA SEM ZINCO			
	ÁREA (A) mm ²	ÁREA (B) mm ²	ÁREA TOTAL (A+B) mm ²	DILUIÇÃO (%)
AMOSTRA 1	0,53	0,54	1,07	50,47
AMOSTRA 2	0,56	0,47	1,03	45,68
AMOSTRA 3	0,48	0,45	0,93	48,39
MÉDIA	0,52	0,49	1,01	48,19

Ainda pela análise das Tabelas 5.6 e 5.7, pode-se observar que a diluição em chapa sem revestimento e chapa revestida com zinco apresentaram-se em média 48,19% e 40,85% respectivamente, ou seja, a diluição em chapa sem revestimento de zinco mostrou-se maior em 17,97%.

As Tabelas 5.8 e 5.9 apresentam os percentuais da diluição para os principais elementos de liga da deposição, tanto para chapa sem revestimento quanto para chapa revestida com zinco, a fim de comparar com a análise química apresentada no item 5.1.1.

Tabela 5.8: Percentual da diluição para os principais elementos de liga, referente a deposição em chapa sem revestimento, comparando com a análise química (item 5.1.1).

PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)				
	Diluição (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Mn (%)
CHAPA SEM REVESTIMENTO	48,19	0,0019	0,0035	0,001	0,054
PÓ METÁLICO - 316 L	51,81	8,91	6,78	1,35	0,93
TOTAL (100%)		8,91	6,78	1,35	0,98
ANÁLISE QUÍMICA DA DEPOSIÇÃO		8,72	6,42	1,40	1,18

Tabela 5.9: Percentual da diluição para os principais elementos de liga, referente a deposição em chapa com zinco, comparando com a análise química (item 5.1.1).

PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)				
	Diluição (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Mn (%)
CHAPA COM ZINCO	40,85	0,011	0,003	0,00094	0,296
PÓ METÁLICO - 316 L	59,15	10,17	7,75	1,54	0,95
TOTAL (100%)		10,18	7,75	1,54	1,25
ANÁLISE QUÍMICA DA DEPOSIÇÃO		10,78	8,05	1,67	1,47

Pela análise das Tabelas 5.8 e 5.9 observa-se que os percentuais de diluição dos principais elementos de liga da deposição não apresentaram diferenças significativas em relação ao percentual encontrado na análise química para ambas as chapas.

É importante ressaltar que o percentual da diluição, referente a deposição e o material de base, possui uma correlação entre a resistência elétrica de contato e a pressão de contato produzida pelos eletrodos [126], conforme apresenta a Figura 5.7.

Figura 5.7: Correlação entre o percentual de diluição, a resistência de contato e a pressão de contato. Adaptado da referência [126].

Ainda pela análise da Figura 5.7, pode-se observar que a deposição do ponto utilizando manufatura aditiva em chapa sem revestimento apresentou maior resistência de contato em aproximadamente 16,7% se comparado a deposição em chapa com revestimento de zinco. Pode-se notar também que a chapa com zinco apresentou uma menor resistência de contato em aproximadamente 12 vezes em relação a deposição, já referente a chapa sem revestimento a resistência de contato mostrou-se menor em aproximadamente 6 vezes se comparado a deposição. Estes resultados estão relacionados: a menor pressão de contato, a baixa resistência elétrica do revestimento de zinco, a maior resistividade do material depositado e sua respectiva taxa de diluição. Devido a estes fatos mencionados anteriormente, a energia via calor será maior para o processo de soldagem AMSW em chapa sem revestimento apesar dos mesmos parâmetros utilizados para ambas as chapas, conforme também mostra o item 5.11.3.1.

5.2 Diagramas de soldabilidade:

Neste item serão mostrados os diagramas de soldabilidade do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), tanto para chapa com revestimento de zinco quanto para chapa sem revestimento. E também a título de comparação foram realizados diagramas de soldabilidade utilizando soldagem a ponto convencional (RSW). Os diagramas foram realizados com uma força constante pré-determinada, variando-se o tempo e a corrente de soldagem. Os limites mínimos dos diagramas de soldabilidade foram obtidos levando-se em conta a dimensão mínima do diâmetro do ponto de solda e a força mínima da junta em relação aos ensaios de tração por cisalhamento, conforme a norma mostrada no item 4.10. Nos limites máximos dos diagramas de soldabilidade para a soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), além do diâmetro e força mínima do ponto foi também considerado a marca termomecânica ou indentação deixada na superfície da chapa após a soldagem, uma vez que para este novo processo de soldagem a ponto praticamente não há expulsão de material. Assim sendo, os pontos de solda que apresentaram

uma marca termomecânica ou uma profundidade de indentação maior que 15% (em relação a espessura da chapa) foram considerados reprovados. Já os limites máximos dos diagramas executados pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) foram considerados reprovados os que apresentaram expulsão de material. Para cada ponto no diagrama (numerados de 1 a 9) foram realizados: ensaios de arrancamento (*peel test*) para análise e para o dimensionamento do diâmetro do ponto e também ensaios de tração por cisalhamento para determinação da força do ponto de solda. Estes resultados representados nos diagramas são uma média de três amostra para cada parâmetro. Após a execução do diagrama de soldabilidade foram determinados os parâmetros otimizados de soldagem. Estes foram selecionados através de um ponto de maior grau de liberdade dentro da área do diagrama ou janela operacional (metodologia: item 4.10). Posteriormente, os pontos otimizados de soldagem foram utilizados para estudar e analisar as propriedades mecânicas através dos ensaios de tração por cisalhamento, ensaios de tração por deslocamento (*pull test*), ensaios de tração em chapas cruzadas e ensaios de fadiga em carregamentos cíclicos. Assim como os comportamentos das resistências dinâmicas, das magnitudes das energias de soldagem e da expansão térmica do ponto de solda. Também foram realizados ensaios de corrosão em névoa salina em chapas pintadas conforme o processo da indústria automotiva, ensaios de mapeamento de microdureza Vickers e análise das dimensões dos pontos de solda através de macrografias.

5.2.1 Diagrama de soldabilidade referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco:

A Figura 5.8 apresenta o diagrama de soldabilidade tempo (ms) versus corrente (kA) com força constante entre os eletrodos de 110 kgf, em relação ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco. Os pontos (numerados de 1 a 9) representados no diagrama estão descritos: o diâmetro do ponto em milímetros (mm) e a força de tração por cisalhamento em quilograma-força (kgf), respectivamente.

Figura 5.8: Diagrama de soldabilidade (tempo versus corrente) com força constante entre os eletrodos de 110 kgf, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco.

A Tabela 5.10 mostra os parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos dos pontos apresentados no diagrama de soldabilidade da Figura 5.8, assim como os resultados (média de 3 amostras) referentes aos diâmetros dos pontos de solda pelo ensaio de arrancamento (metodologia mostrada no item 4.9.1) e as forças através do ensaio de tração por cisalhamento.

Tabela 5.10: Parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos, diâmetro e força de tração dos pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas com revestimento de zinco.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA					
CHAPAS COM ZINCO					
Nº PONTO	PARÂMETROS DE SOLDAGEM			DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]
	CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]	ENSAIO DE ARRANCAMENTO	TRAÇÃO CISCALHAM.
1	7	20	110	3.64	304.1
2	6	60		3.73	339.8
3	5	100		3.69	332.5
4	7	100		3.84	386.8
5	9	100		4.17	410.3
6	10	60		4.12	418.8
7	11	20		3.92	376.5
8	9	20		3.71	357.2
9	8	60		3.76	361.3

Ainda pela análise da Figura 5.8 é possível notar que os parâmetros otimizados de soldagem estão localizados no ponto de maior grau de liberdade dentro da área do diagrama e estão representados pelo ponto 9. Portanto, os parâmetros otimizados de soldagem adotados foram: corrente de 8 kA; tempo de 60 ms e força entre os eletrodos de 110 kgf. A média do diâmetro do ponto de solda e da força de tração de cisalhamento para este parâmetro otimizado (ponto 9) foi de: Ø 3.76 mm (± 0.09) e 361.3 kgf (± 16.5), respectivamente.

5.2.1.1 Diagrama de soldabilidade referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco:

A título de comparação foi realizado o diagrama de soldabilidade, tempo (ms) versus corrente (kA), pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco. A força entre os eletrodos permaneceu constante durante os experimentos em 290 kgf. No diagrama estão representados para cada ponto a dimensão do diâmetro do ponto de solda em milímetros (mm) e a força de tração por cisalhamento em quilograma-força (kgf), respectivamente, conforme apresenta a Figura 5.9.

Figura 5.9: Diagrama de soldabilidade (tempo versus corrente) com força constante entre os eletrodos de 290 kgf, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.

Nota-se também na Figura 5.9 que os parâmetros otimizados de soldagem estão localizados no ponto de maior grau de liberdade dentro da área do diagrama e estão representados pelo ponto 9. Assim sendo, os parâmetros otimizados de soldagem utilizados foram: corrente de 7.8 kA; tempo de 225 ms e força entre os eletrodos de 290 kgf.

A Tabela 5.11 apresenta os parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos dos pontos indicados no diagrama de soldabilidade da Figura 5.9. E também mostra os resultados (média de 3 amostras) dos diâmetros dos pontos de solda pelo ensaio de arrancamento e as forças obtidas pelo ensaio de tração por cisalhamento. A média do diâmetro do ponto de solda e da força de tração

de cisalhamento para este parâmetro otimizado (ponto 9) foi de: Ø 6.53 mm (± 0.21) e 501.2 kgf (± 25.6), respectivamente.

Tabela 5.11: Parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos, diâmetro e força de tração dos pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO CONVENCIONAL					
CHAPAS COM ZINCO					
Nº PONTO	PARÂMETROS DE SOLDAGEM			DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]
	CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]	ENSAIO DE ARRANCAMENTO	TRAÇÃO CISALHAM.
1	7.0	150	290	5.10	339.6
2	6.9	225		6.22	474.8
3	6.8	300		6.25	522.7
4	7.7	300		6.43	504.5
5	8.6	300		6.35	529.5
6	8.7	225		6.72	522.6
7	8.8	150		6.42	511.2
8	7.9	150		6.32	495.1
9	7.8	225		6.53	501.2

5.2.1.2 Comparação entre os diagramas de soldabilidade do processo de soldagem a ponto convencional (RSW) e do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco:

Pela análise da Figura 5.10 é possível observar em relação aos parâmetros otimizados que o tempo de soldagem e a força entre os eletrodos, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW), apresentaram-se maiores em 275% e 163,6%, respectivamente, se comparado com o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Este resultado está relacionado com a maior concentração de energia em uma área predeterminada executada através da deposição a laser, bem como pela maior resistividade elétrica e menor condutividade térmica do material depositado se comparado ao material de base. Estes fatos resultam em maior eficiência na geração de energia via calor durante a soldagem. Em contrapartida, a corrente de soldagem referente ao processo convencional (RSW) mostrou-se menor em 2,5% em

relação aos parâmetros otimizados do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS). Mas apesar deste resultado a energia total de soldagem referente ao processo de soldagem convencional (RSW) apresentou-se maior em 235,54% se comparado ao processo AMSW, conforme mostra o item 5.11.2.1.

Figura 5.10: Comparação dos diagramas de soldabilidade entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.

Ainda pela análise da Figura 5.10 é possível observar que a área do diagrama do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva é maior 18,52% se comparada com o processo de soldagem a ponto convencional.

5.2.2 Diagrama de soldabilidade referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento:

A Figura 5.11 mostra o diagrama de soldabilidade tempo (ms) versus corrente (kA) com força constante entre os eletrodos de 110 kgf, em relação ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento. Nos pontos do diagrama estão representados a dimensão do diâmetro do ponto de solda em milímetros (mm) e a força de tração por cisalhamento em quilograma-força (kgf), respectivamente.

Figura 5.11: Diagrama de soldabilidade (tempo versus corrente) com força constante entre os eletrodos de 110 kgf, através do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento.

Ainda pela análise da Figura 5.11 é possível notar que os limites mínimos e máximos permaneceram nos mesmos parâmetros se comparados com o diagrama de soldabilidade pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva em chapa com revestimento de zinco, conforme mostrado anteriormente na Figura 5.8. Assim sendo, os parâmetros otimizados também permaneceram iguais: 8 kA; 60 ms e 110 kgf. Este resultado está relacionado com um comportamento estável observado durante a soldagem, devido ao material e a área predeterminada pela deposição a laser. Deste modo, notou-se

que para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) as variáveis mais importantes para a determinação dos parâmetros otimizados de soldagem foram: a composição química e a geometria da deposição. Estas duas variáveis determinaram o comportamento durante a soldagem, independente da espessura, revestimento, propriedades mecânicas e composição química do material de base.

A Tabela 5.12 mostra os parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos dos pontos indicados no diagrama de soldabilidade da Figura 5.11. E também apresenta os resultados (média de 3 amostras) dos diâmetros dos pontos de solda pelo ensaio de arrancamento (metodologia mostrada no item 4.9.1) e as forças obtidas pelo ensaio de tração por cisalhamento. Observa-se que a média do diâmetro do ponto de solda e da força de tração de cisalhamento referente ao parâmetro otimizado (ponto 9) foi de: Ø 3.97mm (± 0.12) e 272.5 kgf (± 9.6), respectivamente.

Tabela 5.12: Parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos, diâmetro e força de tração dos pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas sem revestimento.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA					
CHAPAS SEM REVESTIMENTO					
Nº PONTO	PARÂMETROS DE SOLDAGEM			DIÂMETRO [mm] ENSAIO DE ARRANCAMENTO	FORÇA [kgf] TRAÇÃO CISALHAM.
	CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]		
1	7	20	110	3.31	214.9
2	6	60		3.52	232.8
3	5	100		3.71	234.2
4	7	100		3.98	286.5
5	9	100		4.13	296.7
6	10	60		4.19	310.4
7	11	20		4.12	271.1
8	9	20		3.75	251.8
9	8	60		3.97	272.5

5.2.2.1 Diagrama de soldabilidade referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:

A título de comparação foi também executado o diagrama de soldabilidade, tempo (ms) versus corrente (kA), através do processo de

soldagem a ponto convencional (RSW). A força entre os eletrodos permaneceu constante com uma magnitude de 220 kgf. Para cada ponto no diagrama (numerado de 1 a 9) está representado a dimensão do diâmetro do ponto de solda em milímetros (mm) e a força de tração por cisalhamento em quilograma-força (kgf), respectivamente, conforme apresenta a Figura 5.12.

Figura 5.12: Diagrama de soldabilidade (tempo versus corrente) com força constante entre os eletrodos de 220 kgf, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento.

De acordo com a Figura 5.12, os parâmetros otimizados localizados em uma região de maior grau de liberdade dentro da área do diagrama para o processo de soldagem a ponto convencional utilizando chapa sem revestimento foram: 6.4 kA; 225 ms e 220 kgf. Ainda pela análise da Figura 5.12 é possível observar que o valor da corrente de soldagem (ponto 9 = parâmetro otimizado)

apresentou-se menor em 17,95% se comparado ao processo de soldagem a ponto convencional utilizando chapa com revestimento de zinco, mostrados na Figura 5.9 (ponto 9 = parâmetro otimizado). Este fato está relacionado com a menor resistência a passagem da corrente elétrica do zinco necessitando assim de maiores níveis de corrente para produzir pontos de solda aprovados de acordo com a norma.

A Tabela 5.13 mostra os resultados (média de 3 amostras) dos diâmetros dos pontos de solda pelo ensaio de arrancamento e também as forças obtidas pelo ensaio de tração por cisalhamento. Assim como apresenta os parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos dos pontos indicados no diagrama de soldabilidade da Figura 5.12. É possível notar também na Tabela 5.13 que a média do diâmetro do ponto de solda e da força de tração de cisalhamento referente ao parâmetro otimizado (ponto 9) foi de: Ø 5.28mm (± 0.81) e 316.7 kgf (± 26.5), respectivamente.

Tabela 5.13: Parâmetros de soldagem dos limites mínimos e máximos, diâmetro e força de tração dos pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO CONVENCIONAL					
CHAPAS SEM REVESTIMENTO					
Nº PONTO	PARÂMETROS DE SOLDAGEM			DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]
	CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]	ENSAIO DE ARRANCAMENTO	TRAÇÃO CISALHAM.
1	5.3	150	220	4.12	263.8
2	5.15	225		4.23	265.0
3	5.0	300		4.28	272.6
4	6.35	300		4.67	302.8
5	7.7	300		6.21	346.4
6	7.7	225		5.96	342.0
7	7.7	150		5.42	330.6
8	6.5	150		4.75	305.8
9	6.4	225		5.28	316.7

5.2.2.2 Comparação entre os diagramas de soldabilidade do processo de soldagem a ponto convencional (RSW) e do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento:

Na Figura 5.13 é possível notar, em relação aos parâmetros otimizados, que o tempo de soldagem e a força entre os eletrodos pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) apresentaram-se maiores em 275% e 100%, respectivamente, se comparado ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento.

Figura 5.13: Comparação dos diagramas de soldabilidade entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento.

Tal como mencionados anteriormente, estes resultados estão relacionados com a maior concentração de energia em uma área predeterminada, executada através da deposição a laser e também pela maior resistividade elétrica (aprox. > 4,6 vezes) e menor condutividade térmica (aprox.

< 3,2 vezes) do material depositado (316 L) se comparado ao material de base. Estes fatos resultam em menores perdas e maior eficiência na geração de energia via calor durante a soldagem.

Pode-se observar também que a corrente de soldagem dos parâmetros otimizados, para o processo de soldagem a ponto convencional em chapa sem revestimento, apresentou-se menor em 20% se comparada ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Mas apesar deste resultado a energia total de soldagem, referente ao processo de soldagem convencional (RSW), apresentou-se maior em 132,45% se comparado ao processo AMSW, conforme mostra o item 5.11.1.1.

Ainda pela análise da Figura 5.13, nota-se que a área do diagrama do processo de soldagem a ponto convencional é maior em 19,53% se comparada a área do diagrama do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva em chapa sem revestimento.

5.3 Comparação das dimensões dos pontos de solda, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento:

A Figura 5.14 apresenta o desenho esquemático das dimensões do ponto de solda coletados através dos ensaios de macrografias, em chapas sem revestimento e revestidas com zinco, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW).

Onde:

$\varnothing$ D.P. = Diâmetro do ponto de solda (Zona fundida: ZF).

P_{TOTAL} = Penetração total nas chapas 1 e 2.

P_1 = Penetração na chapa 1 (CH_1).

P_2 = Penetração na chapa 2 (CH_2).

I_1 = Profundidade da Indentação da chapa 1.

I_2 = Profundidade da Indentação da chapa 2.

$D_{Deposição}$ = Diâmetro da Deposição. (Somente para o processo de soldagem AMSW).

CH_1 = Chapa 1 (sem deposição).

CH_2 = Chapa 2 (com deposição: somente para o processo de soldagem AMSW).

H = Abertura entre as chapas.

ZF = Zona fundida.

ZAC = Zona afetada pelo calor.

ZAC_1 = Dimensão da extensão da zona afetada pelo calor (lado esquerdo).

ZAC_2 = Dimensão da extensão da zona afetada pelo calor (lado direito).

MB_1 = Dimensão não afetada pelo aquecimento (chapa superior).

MB_2 = Dimensão não afetada pelo aquecimento (chapa inferior).

Figura 5.14: Desenho esquemático referente as dimensões do ponto de solda coletados através das macrografias para ambos os processos de soldagem a ponto: AMSW e RSW.

As Figuras 5.15 e 5.16 mostram exemplos de macrografias as quais foram coletadas as dimensões dos pontos de solda para ambos os processos de soldagem a ponto: AMSW e RSW, respectivamente.

Figura 5.15: Exemplo das dimensões do ponto de solda (parâmetros otimizados) coletados através das macrografias, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em chapas sem revestimento e revestidas com zinco.

Figura 5.16: Exemplo das dimensões do ponto de solda (parâmetros otimizados) coletados através das macrografias, referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), em chapas sem revestimento e revestidas com zinco.

Pela análise da Figura 5.15 é possível observar que, de maneira geral, obteve-se uma alta magnitude de coeficiente de diluição entre o metal depositado e o material de base (zona fundida), através dos parâmetros otimizados em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Já em relação a Figura 5.16 nota-se uma profundidade excessiva da indentação causada pela penetração do eletrodo durante a soldagem a ponto convencional (RSW), é importante ressaltar que este resultado é intrínseco a este processo.

As Tabelas 5.14 a 5.17 mostram os valores encontrados das dimensões do ponto de solda através dos ensaios de macrografias, utilizando os parâmetros

otimizados de soldagem, para ambos os processos (AMSW e RSW) em chapas sem revestimento e revestidas com zinco.

Tabela 5.14: Valores das dimensões dos pontos de solda através das macrografias, empregando os parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas sem revestimento.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA (AMSW)												
CHAPAS SEM REVESTIMENTO												
DIMENSÕES DO PONTO DE SOLDA (MACROGRAFIA)												
Nº PONTO	Ø D.P. [mm]	P.TOTAL [mm]	P ₁ [mm]	P ₂ [mm]	I ₁ [mm]	I ₂ [mm]	MB ₁ [mm]	MB ₂ [mm]	ZAC ₁ [mm]	ZAC ₂ [mm]	H [mm]	Ø DEPOSIÇÃO [mm]
1	3.71	0.80	0.38	0.42	0.05	0.09	0	0	0.39	0.27	0.12	3.98
2	3.73	0.74	0.29	0.35	0.04	0.07	0	0	0.34	0.32	0.09	4.02
3	3.83	0.79	0.33	0.46	0.06	0.08	0	0	0.37	0.33	0.11	4.01
MÉDIA	3.75	0.78	0.34	0.44	0.05	0.08	0	0	0.36	0.31	0.11	4.00
D. PADRÃO	0.07	0.03	0.04	0.05	0.01	0.01	0	0	0.02	0.03	0.02	0.02

Tabela 5.15: Valores das dimensões dos pontos de solda, através das macrografias empregando os parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO CONVENCIONAL (RSW)											
CHAPAS SEM REVESTIMENTO											
DIMENSÕES DO PONTO DE SOLDA (MACROGRAFIA)											
Nº PONTO	Ø D.P. [mm]	P.TOTAL [mm]	P ₁ [mm]	P ₂ [mm]	I ₁ [mm]	I ₂ [mm]	MB ₁ [mm]	MB ₂ [mm]	ZAC ₁ [mm]	ZAC ₂ [mm]	H [mm]
1	4.79	0.98	0.43	0.55	0.20	0.17	0	0	0.83	0.92	0.27
2	4.88	0.94	0.52	0.42	0.21	0.19	0	0	0.78	0.88	0.31
3	4.97	0.91	0.48	0.43	0.16	0.18	0	0	0.91	0.94	0.33
MÉDIA	4.88	0.94	0.48	0.46	0.19	0.18	0	0	0.84	0.91	0.30
D. PADRÃO	0.10	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0	0	0.06	0.03	0.03

Tabela 5.16: Valores das dimensões dos pontos de solda, através das macrografias empregando os parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas com revestimento de zinco.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA (AMSW)												
CHAPAS COM REVESTIMENTO DE ZINCO												
DIMENSÕES DO PONTO DE SOLDA (MACROGRAFIA)												
Nº PONTO	Ø D.P. [mm]	P.TOTAL [mm]	P ₁ [mm]	P ₂ [mm]	I ₁ [mm]	I ₂ [mm]	MB ₁ [mm]	MB ₂ [mm]	ZAC ₁ [mm]	ZAC ₂ [mm]	H [mm]	Ø DEPOSIÇÃO [mm]
1	3.45	0.67	0.31	0.36	0.04	0.05	0.27	0.20	0.19	0.27	0.12	4.06
2	3.65	0.79	0.37	0.42	0.06	0.08	0.24	0.19	0.16	0.37	0.15	4.14
3	3.71	0.77	0.36	0.41	0.05	0.07	0.19	0.16	0.18	0.35	0.13	4.17
MÉDIA	3.60	0.74	0.34	0.40	0.05	0.07	0.23	0.18	0.17	0.33	0.13	4.12
D. PADRÃO	0.14	0.06	0.03	0.03	0.01	0.02	0.04	0.02	0.01	0.05	0.02	0.06

Tabela 5.17: Valores das dimensões dos pontos de solda, através das macrografias empregando os parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO CONVENCIONAL (RSW)											
CHAPAS COM REVESTIMENTO DE ZINCO											
DIMENSÕES DO PONTO DE SOLDA (MACROGRAFIA)											
Nº PONTO	Ø D.P. [mm]	P.TOTAL [mm]	P ₁ [mm]	P ₂ [mm]	I ₁ [mm]	I ₂ [mm]	MB ₁ [mm]	MB ₂ [mm]	ZAC ₁ [mm]	ZAC ₂ [mm]	H [mm]
1	4.79	0.82	0.39	0.43	0.26	0.19	0	0	0.78	0.64	0.41
2	4.87	0.79	0.42	0.37	0.21	0.22	0	0	0.89	0.69	0.46
3	5.12	0.85	0.41	0.44	0.27	0.18	0	0	0.84	0.72	0.38
MÉDIA	4.92	0.82	0.40	0.42	0.25	0.20	0	0	0.83	0.68	0.42
D. PADRÃO	0.18	0.03	0.02	0.015	0.03	0.02	0	0	0.05	0.03	0.04

Pela análise das Tabelas 5.14 a 5.17, é possível observar que os diâmetros das deposições em chapas sem revestimento e revestidas com zinco, antes do processo de soldagem (AMSW), apresentaram-se maiores em média 6,67% e 14,44%, respectivamente, se comparado com os diâmetros dos pontos de solda referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura

aditiva (AMSW). Nota-se também que os diâmetros dos pontos de solda em chapas sem revestimento e revestidas com zinco, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW), mostraram-se maiores em média 30,13% e 36,67%, respectivamente, em comparação ao processo de soldagem a ponto AMSW. Estes resultados estão relacionados com a limitação da dimensão do diâmetro do ponto de solda pelo processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW), ou seja, a magnitude do diâmetro do ponto de solda possui uma relação direta com a dimensão do diâmetro predeterminado pela deposição. Em relação a profundidade da indentação pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em chapas sem revestimento e revestidas com zinco, pode-se observar que houve uma pequena depressão (I_1 e I_2), possivelmente devido a contração da massa fundida durante a solidificação do ponto de solda, visto que para este processo de soldagem a ponto (AMSW) o eletrodo não colapsa na chapa, este fato é devido aos eletrodos possuírem faces de contatos planas. Apesar deste resultado, a depressão (I_1) referente a superfície da chapa sem deposição (CH_1), apresentou-se imperceptível a olho nu, conforme mostra a Figura 5.17. É possível observar também que as profundidades das indentações em relação ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), tanto para chapa sem revestimento quanto para chapa revestida com zinco, mostraram-se maiores em média 184,62% e 275,0%, respectivamente, se comparado ao processo de soldagem a ponto AMSW. Este resultado está relacionado com o colapso dos eletrodos (face de contato esférico) nas superfícies das chapas, uma vez que é uma característica intrínseca para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Em relação a ZAC, nota-se que para o processo de soldagem RSW a dimensão de sua extensão ($ZAC_1 + ZAC_2$), em chapa revestida com zinco e sem revestimento, apresentou-se maior em 202% e 161%, respectivamente, se comparado a dimensão da ZAC do processo de soldagem AMSW.

Ainda pela análise da Figura 5.17, pode-se observar que para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), mais especificamente na chapa 1 (CH_1) sem deposição, conforme mostra esquematicamente na Figura 5.14, houve apenas uma pequena marca térmica na superfície da chapa sem revestimento. Já em relação a chapa com revestimento de zinco houve uma volatilização parcial do zinco na superfície.

Figura 5.17: Imagens capturadas pelo microscópio das superfícies das chapas (CH_1 - sem deposição) sem revestimento (imagem superior) e revestidas com zinco (imagem inferior), após a execução do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW).

5.4 Ensaios de tração por cisalhamento, com os parâmetros otimizados, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestida com zinco e sem revestimento:

Em relação aos ensaios de tração por cisalhamento os corpos de prova foram preparados de acordo com a norma AWS B4.0:2007 [123], conforme mostra o item 4.11.1. A força mínima de tração por cisalhamento (conforme a norma apresentada no item 4.9) está relacionada com a espessura da chapa, assim sendo, para chapa revestida com zinco de espessura de 0.8mm a força mínima de tração é de 230kgf e para chapa sem revestimento cuja espessura é de 0.7mm a força mínima de tração é de 190kgf.

As Tabelas 5.18 a 5.21 a seguir apresentam os resultados (média de 3 amostras) dos diâmetros dos pontos de solda e também das forças de tração por cisalhamento. As dimensões dos diâmetros dos pontos de solda foram obtidas através da média de duas medidas defasadas a 90° executadas durante os ensaios com auxílio de um paquímetro digital, conforme a metodologia apresentada no item 4.9.1.

Tabela 5.18: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por cisalhamento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA (AMSW)					
CHAPAS COM REVESTIMENTO DE ZINCO					
ENSAIO DE TRAÇÃO POR CISALHAMENTO					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	3.66	344.8	8.0	60	110
2	3.74	361.3			
3	3.87	377.2			
MÉDIA	3.76	361.3			
DESVIO PADRÃO	0.11	16.5			

Tabela 5.19: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por cisalhamento, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO CONVENCIONAL (RSW)					
CHAPAS COM REVESTIMENTO DE ZINCO					
ENSAIO DE TRAÇÃO POR CISALHAMENTO					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	6.29	477.3	7.8	225	290
2	6.63	498.4			
3	6.67	528.0			
MÉDIA	6.53	501.2			
DESVIO PADRÃO	0.21	25.6			

Tabela 5.20: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por cisalhamento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA (AMSW)					
CHAPAS SEM REVESTIMENTO					
ENSAIO DE TRAÇÃO POR CISALHAMENTO					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	3.85	268.7	8.0	60	110
2	3.93	265.4			
3	4.13	283.4			
MÉDIA	3.97	272.5			
DESVIO PADRÃO	0.12	9.6			

Tabela 5.21: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por cisalhamento, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO CONVENCIONAL (RSW)					
CHAPAS SEM REVESTIMENTO					
ENSAIO DE TRAÇÃO POR CISALHAMENTO					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	4.36	336.8	6.4	225	220
2	5.61	286.7			
3	5.87	326.6			
MÉDIA	5.28	316.7			
DESVIO PADRÃO	0.81	26.5			

Pela análise das Tabelas 5.18 a 5.21 é possível observar que o resultado da média da força de tração por cisalhamento, em chapa sem revestimento, apresentou-se maior em 16,22% para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) se comparada ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Em relação a força média de tração por cisalhamento em chapa revestida com zinco, o processo RSW apresentou-se maior em 38,72% em comparação ao processo AMSW. Estes resultados estão relacionados aos maiores diâmetros dos pontos de solda encontrados na soldagem convencional (RSW). É importante ressaltar que a dimensão do diâmetro do ponto de solda, referente ao processo AMSW, é predeterminado e dependente da dimensão do diâmetro da deposição executada pelo processo de manufatura aditiva.

5.4.1 Comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestida com zinco e sem revestimento:

Para a comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva e o processo de soldagem convencional, em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, utilizou-se a título de comparação e como referência a magnitude da tensão máxima de tração das respectivas chapas. Para se obter maior precisão nos cálculos das tensões máximas de tração, foram utilizadas as dimensões médias dos diâmetros dos pontos de solda (D.P.) coletadas através dos ensaios de macrografias (item 5.3).

5.4.1.1 Comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco:

A Tabela 5.22 apresenta os resultados (média de 3 amostras) das tensões máximas de tração por cisalhamento dos pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva, assim como pelo processo de

soldagem a ponto convencional, comparando estes resultados em relação a tensão máxima de tração da chapa revestida com zinco.

Tabela 5.22: Comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento dos pontos de solda entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a chapa revestida com zinco.

TENSÃO MÁXIMA DE TRAÇÃO POR CISALHAMENTO DO PONTO DE SOLDA				
CHAPA REVESTIDA COM ZINCO				
	Ø (MÉDIA)	FORÇA (MÉDIA)	TENSÃO (MÉDIA)	TENSÃO (MÉDIA)
	D.P.	TRAÇÃO (CISALHAMENTO)	MÁX. TRACÃO (CISALH.)	MÁX. TRACÃO (CHAPA)
	[mm]	[kgf]	[kgf/mm ²]	[kgf/mm ²]
AMSW	3.60 ± 0.14	361.3 ± 16.5	35.49 ± 1.1	37.16 ± 0.15
RSW	4.92 ± 0.18	501.2 ± 25.6	26.36 ± 1.4	

A Figura 5.18 apresenta os resultados da Tabela 5.22 através do gráfico de barras, com o intuito de facilitar a análise das diferenças entre as tensões máximas de tração por cisalhamento dos pontos de solda (AMWS versus RSW) em relação a tensão máxima de tração da chapa com revestimento de zinco.

Figura 5.18: Comparação das tensões máximas de tração por cisalhamento entre os pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima da chapa com revestimento de zinco.

Pela análise da Figura 5.18, é possível notar que a tensão máxima de tração por cisalhamento, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentou-se menor 4,49% se comparada com a tensão máxima das chapas revestidas com zinco. No entanto, a tensão máxima de tração por cisalhamento pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) mostrou-se menor em 29,06% em comparação a tensão das chapas com revestimento de zinco. Nota-se também que a tensão máxima de tração por cisalhamento pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) apresentou-se maior em 34,63% em relação ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Este resultado está relacionado com a menor ZAC (zona afetada pelo calor) e também pela ausência de indentação, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW).

5.4.1.2 Comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:

A Tabela 5.23 apresenta os resultados (média de 3 amostras) das tensões máximas de tração por cisalhamento dos pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), assim como pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW), fazendo uma comparação em relação a tensão máxima de tração da chapa sem revestimento.

Tabela 5.23: Comparação da tensão máxima de tração por cisalhamento dos pontos de solda, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a chapa sem revestimento.

TENSÃO MÁXIMA DE TRAÇÃO POR CISALHAMENTO DO PONTO DE SOLDA				
CHAPA SEM REVESTIMENTO				
	Ø (MÉDIA) D.P. [mm]	FORÇA (MÉDIA) TRAÇÃO (CISALHAMENTO) [kgf]	TENSÃO (MÉDIA) MÁX. TRACÃO (CISALH.) [kgf/mm ²]	TENSÃO (MÉDIA) MÁX. TRACÃO (CHAPA) [kgf/mm ²]
AMSW	3.75 ± 0.07	272.5 ± 9.6	24.67 ± 1.0	26.27 ± 0.16
RSW	4.88 ± 0.10	316.7 ± 26.5	16.93 ± 1.7	

Com a finalidade de facilitar a análise das diferenças entre as tensões máximas de tração por cisalhamento dos pontos de solda (para ambos os processos de soldagem: AMSW e RSW) em relação a tensão máxima da chapa sem revestimento, a Figura 5.19 apresenta os resultados da Tabela 5.23 através do gráfico de barras.

Figura 5.19: Comparação das tensões máximas de tração por cisalhamento entre os pontos de solda, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima da chapa sem revestimento.

Em relação a Figura 5.19, é possível observar que a tensão máxima de tração por cisalhamento, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentou-se menor em 6,09% se comparada com a tensão máxima da chapa sem revestimento. Entretanto, a tensão máxima de tração por cisalhamento pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) mostrou-se menor em 35,56 % em comparação a tensão da chapa sem revestimento. Observa-se também que a tensão máxima de tração por cisalhamento pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) apresentou-se maior em 45,72% em relação ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Do mesmo modo que em chapa revestida com zinco, este resultado em chapa sem revestimento está relacionado com a menor ZAC, bem como pela ausência de indentação, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW).

5.5 Ensaios de tração com chapas cruzadas, com os parâmetros otimizados, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestida com zinco e sem revestimento:

Para os ensaios de tração com chapas cruzadas (tração perpendicular ao ponto de solda) foi confeccionado um dispositivo de fixação para possibilitar o correto posicionamento das amostras na máquina de tração, assim como foram preparados os corpos de prova, ambos de acordo com a norma AWS B4.0:2007 [123], conforme mostrado anteriormente no item 4.11.2.

A força mínima de tração com chapas cruzadas para se obter um ponto de solda aprovado conforme a norma é de 60% da força mínima em relação ao ensaio de tração por cisalhamento, ou seja, para chapa revestida com zinco de espessura de 0,8mm a força mínima é de 138kgf e para chapa sem revestimento de espessura de 0,7mm a força mínima de tração é de 114kgf.

As Tabelas 5.24 a 5.27 a seguir apresentam os resultados (média de 3 amostras) dos diâmetros dos pontos de solda e também da força de tração. É importante ressaltar que os valores dos diâmetros foram obtidos através da média de duas medidas defasadas a 90°, executadas durante os ensaios com auxílio de um paquímetro digital, conforme apresentado no item 4.9.1.

Tabela 5.24: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas com revestimento de zinco.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA (AMSW)					
CHAPAS COM REVESTIMENTO DE ZINCO					
ENSAIO DE TRAÇÃO COM CHAPAS CRUZADAS					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	3.37	217.1	8.0	60	110
2	3.55	229.9			
3	3.68	241.4			
MÉDIA	3.53	229.5			
DESVIO PADRÃO	0.16	12.16			

Tabela 5.25: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO CONVENCIONAL (RSW)					
CHAPAS COM REVESTIMENTO DE ZINCO					
ENSAIO DE TRAÇÃO COM CHAPAS CRUZADAS					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	5.98	263.6	7.8	225	290
2	6.07	334.7			
3	6.11	397.9			
MÉDIA	6.05	332.1			
DESVIO PADRÃO	0.07	67.19			

Tabela 5.26: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas sem revestimento.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA (AMSW)					
CHAPAS SEM REVESTIMENTO					
ENSAIO DE TRAÇÃO COM CHAPAS CRUZADAS					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	3.37	155.6	8.0	60	110
2	3.42	166.2			
3	3.52	180.1			
MÉDIA	3.44	167.3			
DESVIO PADRÃO	0.08	12.29			

Tabela 5.27: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO CONVENCIONAL (RSW)					
CHAPAS SEM REVESTIMENTO					
ENSAIO DE TRAÇÃO COM CHAPAS CRUZADAS					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	4.78	270.1	6.4	225	220
2	4.84	277.5			
3	4.97	281.2			
MÉDIA	4.86	276.26			
DESVIO PADRÃO	0.10	5.65			

A partir da análise das Tabelas 5.24 a 5.27, pode-se observar que todos os resultados dos pontos de solda (diâmetro e força) foram aprovados de acordo com os requisitos mínimos da norma. Nota-se também que para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), tanto em chapa sem revestimento como em chapa revestida com zinco, as magnitudes das forças de tração apresentaram-se maiores em 65,12% e 44,71%, respectivamente, se comparada ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Este resultado está relacionado aos maiores diâmetros encontrados na soldagem a ponto convencional (RSW).

5.5.1 Comparação da tensão máxima de tração com chapas cruzadas, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento:

A fim de comparar a tensão máxima de tração do ponto de solda com chapas cruzadas (tração perpendicular ao ponto de solda), entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem convencional (RSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, utilizou-se a título de comparação e como referência a magnitude da tensão máxima de tração das respectivas chapas. Com o intuito de obter maior precisão nos cálculos das tensões máximas de tração foram utilizadas as dimensões médias dos diâmetros dos pontos de solda coletadas através dos ensaios de macrografias (item 5.3).

5.5.1.1 Comparação da tensão máxima de tração com chapas cruzadas, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco:

A Tabela 5.28 apresenta os resultados (média de 3 amostras) das tensões máximas de tração dos pontos de solda com chapas cruzadas através do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva, assim como pelo processo de soldagem a ponto convencional, fazendo uma comparação a tensão máxima de tração referente a chapa revestida com zinco.

Tabela 5.28: Comparação da tensão máxima de tração dos pontos de solda com chapas cruzadas, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a chapa revestida com zinco.

TENSÃO MÁXIMA DE TRAÇÃO DO PONTO DE SOLDA COM CHAPAS CRUZADAS				
CHAPA REVESTIDA COM ZINCO				
	Ø (MÉDIA) D.P. [mm]	FORÇA (MÉDIA) TRAÇÃO (CHAPAS CRUZADAS) [kgf]	TENSÃO (MÉDIA) MÁX. TRACÃO (CH. CRUZ.) [kgf/mm ²]	TENSÃO (MÉDIA) MÁX. TRACÃO (CHAPA) [kgf/mm ²]
AMSW	3.60 ± 0.14	229.5 ± 12.16	22.54 ± 1.69	37.16 ± 0.15
RSW	4.92 ± 0.18	332.1 ± 67.19	17.47 ± 2.53	

A Figura 5.20 mostra os resultados da Tabela 5.28 através do gráfico de barras, a fim de facilitar a análise das diferenças entre as tensões máximas de tração com chapas cruzadas (tração perpendicular ao ponto de solda) em relação a tensão máxima em chapa revestida com zinco.

Figura 5.20: Comparação das tensões máximas de tração dos pontos de solda com chapas cruzadas, entre processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), em relação a tensão máxima da chapa com revestimento de zinco.

Pela análise da Figura 5.20, é possível observar que as tensões referentes aos ensaios de tração por cisalhamento em chapa com revestimento de zinco (item 5.4.1.1) apresentaram-se maiores 57,45% e 50,89% para o processo de

soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), respectivamente, se comparada aos resultados de tração com chapas cruzadas. Este resultado está relacionado com a menor taxa de deformação referente ao ensaio de tração por cisalhamento.

Ainda pela análise da Figura 5.20, pode-se observar que a tensão máxima de tração do ponto de solda com chapas cruzadas, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentou-se menor 39,34% se comparada com a tensão máxima de tração da chapa revestida com zinco. Todavia, a tensão máxima de tração do ponto de solda com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW), mostrou-se menor em 52,98 % em comparação a tensão da chapa com revestimento de zinco. Pode-se observar também que a tensão máxima de tração com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentou-se maior em 29,02% em relação ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Semelhante aos fatos analisados anteriormente, estes resultados em chapa com revestimento de zinco estão relacionados com a menor ZAC e também pela ausência de indentação, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW).

5.5.1.2 Comparação da tensão máxima de tração em chapas cruzadas, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:

A Tabela 5.29 apresenta os resultados das tensões máximas de tração dos pontos de solda em chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), bem como pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima de tração da chapa sem revestimento.

Tabela 5.29: Comparação da tensão máxima de tração dos pontos de solda com chapas cruzadas, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação as chapas sem revestimento.

TENSÃO MÁXIMA DE TRAÇÃO DO PONTO DE SOLDA COM CHAPAS CRUZADAS				
CHAPA SEM REVESTIMENTO				
	Ø (MÉDIA) D.P. [mm]	FORÇA (MÉDIA) TRAÇÃO (CHAPAS CRUZADAS) [kgf]	TENSÃO (MÉDIA) MÁX. TRAÇÃO (CH. CRUZ.) [kgf/mm ²]	TENSÃO (MÉDIA) MÁX. TRAÇÃO (CHAPA) [kgf/mm ²]
AMSW	3.75 ± 0.07	167.3 ± 12.29	15.16 ± 0.97	26.27 ± 0.16
RSW	4.88 ± 0.10	276.26 ± 5.65	14.77 ± 0.30	

Através do gráfico de barras a Figura 5.21 apresenta os resultados da Tabela 5.29, com o intuito de facilitar a análise das diferenças entre as tensões máximas de tração do ponto de solda com chapas cruzadas (tração perpendicular ao ponto de solda) em chapa sem revestimento.

Figura 5.21: Comparação das tensões máximas de tração dos pontos de solda com chapas cruzadas, entre processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima da chapa sem revestimento.

A partir da análise da Figura 5.21, observa-se que as tensões referentes aos ensaios de tração por cisalhamento (mostrados no item 5.4.1.2) apresentaram-se maiores em 62,73% e 14,62% para o processo de soldagem a

ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), respectivamente, se comparada aos resultados de tração com chapas cruzadas (tração perpendicular ao ponto de solda). Como descrito anteriormente, este resultado está relacionado com a menor taxa de deformação para os ensaios de tração por cisalhamento.

Ainda em relação a Figura 5.21, é possível observar que a tensão máxima de tração do ponto de solda com chapas cruzadas, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentou-se menor 42,29% se comparado com a tensão máxima de tração da chapa sem revestimento. Entretanto, a tensão máxima de tração do ponto de solda com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW), mostrou-se menor em 43,78% em comparação a tensão das chapas sem revestimento. É possível observar também que a tensão máxima de tração dos pontos de solda com chapas cruzadas, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentou-se maior em 2,64% em relação ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Diferente dos resultados analisados anteriormente (item 5.5.1.1 - chapa revestida com zinco), observa-se que para os ensaios de tração com chapas cruzadas (tração perpendicular ao ponto de solda) em chapa sem revestimento não houve uma diferença significativa das magnitudes de tensão entre ambos os processos de soldagem (AMSW e RSW).

5.6 Ensaios de tração por deslocamento (pull test), com os parâmetros otimizados, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestida com zinco e sem revestimento:

Para os ensaios de tração por deslocamento os corpos de prova foram preparados de acordo com a norma AWS B4.0:2007 [123], conforme apresentado no item 4.11.3. A força mínima de tração por deslocamento (conforme a norma) é de 20% em relação a força mínima do ensaio de tração por cisalhamento, ou seja, para chapa revestida com zinco de espessura de 0,8mm a força mínima é de 46 kgf e para chapa sem revestimento de espessura de 0,7mm a força mínima de tração é de 38 kgf.

As Tabelas 5.30 a 5.33 a seguir, apresentam os resultados (média de 3 amostras) dos diâmetros dos pontos de solda e também das forças de tração. É importante salientar que os valores dos diâmetros foram obtidos através da média de duas medidas defasadas a 90°, executadas durante os ensaios com auxílio de um paquímetro digital, conforme apresentado no item 4.9.1.

Tabela 5.30: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por deslocamento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas com revestimento de zinco.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA (AMSW)					
CHAPAS COM REVESTIMENTO DE ZINCO					
ENSAIO DE TRAÇÃO POR DESPLACAMENTO					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	3.53	85.50	8.0	60	110
2	3.82	91.69			
3	4.17	101.43			
MÉDIA	3.84	92.87			
DESVIO PADRÃO	0.32	8.03			

Tabela 5.31: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por deslocamento, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO CONVENCIONAL (RSW)					
CHAPAS COM REVESTIMENTO DE ZINCO					
ENSAIO DE TRAÇÃO POR DESPLACAMENTO					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	4.74	71.80	7.8	225	290
2	5.28	76.60			
3	5.35	85.90			
MÉDIA	5.12	78.10			
DESVIO PADRÃO	0.34	7.17			

Tabela 5.32: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por deslocamento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas sem revestimento.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA (AMSW)					
CHAPAS SEM REVESTIMENTO					
ENSAIO DE TRAÇÃO POR DESPLACAMENTO					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	3.69	67.50	8.0	60	110
2	4.06	72.83			
3	4.13	79.42			
MÉDIA	3.96	73.24			
DESVIO PADRÃO	0.23	5.96			

Tabela 5.33: Média do diâmetro e da força do ponto de solda, através dos ensaios de tração por deslocamento, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas sem revestimento.

PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO CONVENCIONAL (RSW)					
CHAPAS SEM REVESTIMENTO					
ENSAIO DE TRAÇÃO POR DESPLACAMENTO					
Nº PONTO	DIÂMETRO [mm]	FORÇA [kgf]	PARÂMETROS OTIMIZADOS		
			CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
1	4.29	74.81	6.4	225	220
2	5.15	96.33			
3	5.38	103.24			
MÉDIA	4.94	91.46			
DESVIO PADRÃO	0.57	14.83			

Pela análise das Tabelas 5.30 a 5.33, é possível observar que tanto os diâmetros dos pontos de solda quanto as forças de tração por deslocamento foram aprovados de acordo com os requisitos mínimos da norma. Observa-se também que as magnitudes das forças de tração, em chapa sem revestimento, apresentaram-se maiores em 24,87% para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) se comparada ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Este resultado está relacionado aos maiores diâmetros encontrados na soldagem a ponto convencional (RSW). Já em relação a chapa com revestimento de zinco, a força de tração por deslocamento (referente ao processo AMSW) apresentou-se maior em 18,91% em comparação ao processo RSW mesmo apresentando um menor diâmetro médio. Uma possível explicação para este resultado é a menor ZAC e a menor indentação encontrada na soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).

5.6.1 Comparação da tensão máxima de tração por deslocamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento:

Com o intuito de comparar a tensão máxima de tração por deslocamento do ponto de solda entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva e o processo de soldagem convencional, em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, utilizou-se como referência a magnitude da tensão máxima de tração das respectivas chapas. É importante ressaltar que para se obter maior precisão nos cálculos das tensões máximas de tração foram utilizadas as dimensões médias dos diâmetros dos pontos de solda coletadas através dos ensaios de macrografias (item 5.3).

5.6.1.1 Comparação da tensão máxima de tração por deslocamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco:

A Tabela 5.34 mostra os resultados (média de 3 amostras) das tensões máximas de tração por deslocamento pelo processo de soldagem a ponto

utilizando manufatura aditiva (AMSW), bem como pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em comparação a tensão máxima de tração da chapa revestida com zinco.

Tabela 5.34: Comparação da tensão máxima de tração por deslocamento dos pontos de solda entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a chapa revestida com zinco.

TENSÃO MÁXIMA DE TRAÇÃO POR DESPLACAMENTO DO PONTO DE SOLDA				
CHAPA REVESTIDA COM ZINCO				
	Ø (MÉDIA) D.P. [mm]	FORÇA (MÉDIA) TRAÇÃO (DESPLACAMENTO) [kgf]	TENSÃO (MÉDIA) MÁX. TRACÃO (DESPLAC.) [kgf/mm ²]	TENSÃO (MÉDIA) MÁX. TRACÃO (CHAPA) [kgf/mm ²]
AMSW	3.60 ± 0.14	92.97 ± 8.03	9.12 ± 0.97	37.16 ± 0.15
RSW	4.92 ± 0.18	78.10 ± 7.17	4.11 ± 0.53	

A Figura 5.22 apresenta os resultados da Tabela 5.34 através do gráfico de barras com o intuito de analisar as diferenças entre as tensões máximas de tração por deslocamento em relação a tensão máxima em chapa revestida com zinco.

Figura 5.22: Comparação das tensões máximas de tração por deslocamento dos pontos de solda entre processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima da chapa com revestimento de zinco.

Pela análise da Figura 5.22, nota-se que a tensão máxima de tração por deslocamento do ponto de solda em relação ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) mostrou-se menor em 75,46% se comparada com a tensão máxima de tração da chapa revestida com zinco. Este resultado está relacionado com a alta taxa de deformação produzida pelo momento fletor entre o ponto de solda e a dobra da chapa durante o ensaio por deslocamento, o qual é uma característica intrínseca para este ensaio mecânico. Pode-se observar também que o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) apresentou-se maior em 121,9% se comparado ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Este resultado está relacionado com a menor ZAC e a menor indentação encontrada no processo de soldagem AMSW em chapa revestida com zinco.

5.6.1.2 Comparação da tensão máxima de tração por deslocamento, com os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:

A Tabela 5.35 apresenta os resultados (média de 3 amostras) das tensões máximas de tração por deslocamento pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), assim como pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima de tração da chapa sem revestimento.

Tabela 5.35: Comparação da tensão máxima de tração por deslocamento dos pontos de solda entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a chapa sem revestimento.

TENSÃO MÁXIMA DE TRAÇÃO POR DESPLACAMENTO DO PONTO DE SOLDER				
CHAPA SEM REVESTIMENTO				
	Ø (MÉDIA) D.P. [mm]	FORÇA (MÉDIA) TRAÇÃO (DESPLACAMENTO) [kgf]	TENSÃO (MÉDIA) MÁX. TRAÇÃO (DESPLAC.) [kgf/mm ²]	TENSÃO (MÉDIA) MÁX. TRAÇÃO (CHAPA) [kgf/mm ²]
AMSW	3.75 ± 0.07	73.24 ± 5.96	6.63 ± 0.58	26.27 ± 0.16
RSW	4.88 ± 0.10	91.46 ± 14.83	4.89 ± 1.2	

A Figura 5.23 apresenta os resultados da Tabela 5.35 através do gráfico de barras, com o propósito de analisar as diferenças entre as tensões máximas de tração por deslocamento dos pontos de solda (para ambos os processos: AMSW e RSW) em relação a tensão máxima em chapa sem revestimento.

Figura 5.23: Comparação das tensões máximas de tração por deslocamento dos pontos de solda entre processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em relação a tensão máxima da chapa sem revestimento.

A partir da análise da Figura 5.23, observa-se que a tensão máxima de tração por deslocamento do ponto de solda, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentou-se menor 74,76% se comparada com a tensão máxima de tração da chapa sem revestimento. Assim como descrito anteriormente no item 5.6.1.1, este resultado ou esta grande diferença de magnitude de tensão está relacionado com as características intrínsecas deste ensaio mecânico, o qual produz um momento fletor entre o ponto de solda e a dobra da chapa, conforme mostra o item 4.11.3. É possível observar também que a tensão máxima de tração por deslocamento, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentou-se maior em 35,58% se comparado ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW).

5.7 Ensaio de fadiga:

Neste item serão apresentados os resultados em relação aos ensaios de fadiga, conforme descrito no item 4.11.4, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) quanto para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), com os parâmetros otimizados, a fim de fazer uma análise comparativa entre ambos os processos de soldagem. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente, com razão de carga $R = 0,1$ e frequência de 20 Hz (onda senoidal). Os níveis de cargas máximas cíclicas utilizados foram determinados a partir dos resultados de tração de cada processo de soldagem, quais sejam: 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 25% e 20% em relação a força máxima encontrada nos ensaios de tração por cisalhamento. Uma vez que, nos itens 5.7.1 e 5.7.2 serão mostrados os resultados dos ensaios de fadiga em chapas com revestimento de zinco e sem revestimento, respectivamente.

5.7.1 Comparação dos ensaios de fadiga entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), com os parâmetros otimizados, em chapas com revestimento de zinco:

As Tabelas 5.36 e 5.37 apresentam os resultados das resistências a fadiga em número de ciclos até a falha (N_f) em relação ao fator de carga máxima de tração por cisalhamento, onde: $P_{m\acute{a}x.}$ é a carga máxima, e $P_{m\acute{i}n.}$ é a carga mínima, de acordo com cada fator. As Tabelas também mostram a carga máxima de tração por cisalhamento (média de 3 amostras) para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW), executadas em chapa com revestimento de zinco. A partir destes resultados apresentados nas Tabelas 5.36 e 5.37 construiu-se dois gráficos: (Carga máxima (kN) - $P_{m\acute{a}x.}$) versus (Número de ciclos até a falha - N_f), e (Fator de carga máxima) versus (Número de ciclos até a falha - N_f), respectivamente.

Tabela 5.36: Ensaio de fadiga, processo de soldagem RSW em chapa revestida com zinco.

Ensaio de Fadiga - RSW - Chapa com revestimento de zinco: R = 0,1 e Freq. = 20 Hz					
Amostra	N _f Número de Ciclos até a falha	Fator de Carga Máxima (P _{máx.} /P _{máx.} de Tração)	P _{máx.} (kN)	P _{mín.} (kN)	P _{máx.} de Tração(kN)
1	7.729	0,7 (70%)	3,51	0,351	5,01
2	10.621	0,7 (70%)	3,51	0,351	
3	12.081	0,7 (70%)	3,51	0,351	
4	13.697	0,6 (60%)	3,01	0,301	
5	16.140	0,6 (60%)	3,01	0,301	
6	18.286	0,6 (60%)	3,01	0,301	
7	22.476	0,5 (50%)	2,5	0,25	
8	25.505	0,5 (50%)	2,5	0,25	
9	33.472	0,5 (50%)	2,5	0,25	
10	67.123	0,4 (40%)	2,0	0,2	
11	87.239	0,4 (40%)	2,0	0,2	
12	93.428	0,4 (40%)	2,0	0,2	
13	362.693	0,3 (30%)	1,5	0,15	
14	488.934	0,3 (30%)	1,5	0,15	
15	565.723	0,3 (30%)	1,5	0,15	
16	1.390.578	0,25 (25%)	1,25	0,125	
17	1.527.682	0,25 (25%)	1,25	0,125	
18	1.982.332	0,25 (25%)	1,25	0,125	
19	10.000.000	0,2 (20%)	1,0	0,1	
20	10.000.000	0,2 (20%)	1,0	0,1	
21	10.000.000	0,2 (20%)	1,0	0,1	

Tabela 5.37: Ensaio de fadiga, processo de soldagem AMSW em chapa revestida com zinco.

Ensaio de Fadiga - AMSW - Chapa com revestimento de zinco: R = 0,1 e Freq. = 20 Hz					
Amostra	N _f Número de Ciclos até a falha	Fator de Carga Máxima (P _{máx.} /P _{máx.} de Tração)	P _{máx.} (kN)	P _{mín.} (kN)	P _{máx.} de Tração(kN)
1	7.234	0,7 (70%)	2,53	0,253	3,61
2	8.257	0,7 (70%)	2,53	0,253	
3	10.723	0,7 (70%)	2,53	0,253	
4	12.604	0,6 (60%)	2,17	0,217	
5	16.771	0,6 (60%)	2,17	0,217	
6	21.978	0,6 (60%)	2,17	0,217	
7	39.314	0,5 (50%)	1,8	0,18	
8	44.338	0,5 (50%)	1,8	0,18	
9	55.679	0,5 (50%)	1,8	0,18	
10	114.205	0,4 (40%)	1,44	0,144	
11	174.873	0,4 (40%)	1,44	0,144	
12	216.494	0,4 (40%)	1,44	0,144	
13	668.797	0,3 (30%)	1,08	0,108	
14	739.516	0,3 (30%)	1,08	0,108	
15	780.662	0,3 (30%)	1,08	0,108	
16	1.569.950	0,25 (25%)	0,9	0,09	
17	1.929.784	0,25 (25%)	0,9	0,09	
18	2.263.543	0,25 (25%)	0,9	0,09	
19	10.000.000	0,2 (20%)	0,72	0,072	
20	10.000.000	0,2 (20%)	0,72	0,072	
21	10.000.000	0,2 (20%)	0,72	0,072	

A Figura 5.24 apresenta o gráfico de resistência a fadiga para os processos de soldagem RSW e AMSW em chapa com revestimento de zinco, com relação a carga máxima: $P_{m\acute{a}x.}$ (kN) e o número de ciclos até a falha (N_f).

Figura 5.24: Gráfico de resistência a fadiga em relação a Carga máxima: $P_{m\acute{a}x.}$ (kN) versus Número de ciclos até a falha (N_f), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa com revestimento de zinco.

Ainda pela análise da Figura 5.24, pode-se observar que os sete níveis de cargas máximas, referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), mostraram-se maiores se comparado ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Este fato está relacionado ao maior diâmetro do ponto de solda encontrado através do processo RSW, que se apresentou maior em média 74% em relação ao diâmetro do ponto de solda pelo processo AMSW. Assim sendo, para uma melhor análise comparativa dos dados construiu-se um gráfico com o fator de carga (percentual da carga máxima de tração por cisalhamento) em relação ao número de ciclos até a falha, conforme apresenta a Figura 5.25.

Figura 5.25: Gráfico de resistência a fadiga em relação ao Fator de carga máxima versus Número de ciclos até a falha (N_f), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa com revestimento de zinco.

Pela análise da Figura 5.25, pode-se notar que para um regime de fadiga de baixo ciclo ($< 10^5$), ou seja, altos níveis de carregamento principalmente entre 60% e 70% da carga máxima de tração, não houve diferença significativa referente ao número de ciclos até a falha entre os dois processos de soldagem. Em contrapartida, observa-se que para o regime de fadiga de alto ciclo ($> 10^5$), isto é, baixos níveis de carregamento, o ponto de solda executado pelo processo de soldagem AMSW obteve uma resistência a fadiga ou uma magnitude de ciclos até a falha maior em média 28,82% se comparado ao processo de soldagem convencional (RSW), principalmente em níveis de carregamento entre 30% até 50% da carga máxima de tração. Este resultado está relacionado com as baixas magnitudes de indentação referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), assim como a sua menor zona afetada pelo calor (ZAC) se comparado ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), pois todas as amostras obtiveram suas falhas na ZAC, em nenhuma das amostras houve falha ou fratura interfacial, este fato ocorreu para ambos os processos de soldagem. É possível notar também que para ambos os processos

de soldagem (RSW e AMSW) não foi observado falha para o fator de carga de 0,2 (20% da carga máxima de tração por cisalhamento) até um número de ciclos de 10^7 . A Figura 5.26 apresenta a característica da falha referente ao regime de fadiga de baixo ciclo ($< 10^5$) e fadiga de alto ciclo ($> 10^5$), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa revestida com zinco. De modo geral, pode-se observar que para um regime de fadiga de baixo ciclo ou altos níveis de carregamento, a trinca se propaga na ZAC ao redor do ponto de solda (AMSW - Figura: 5.26 a; e RSW - Figura: 5.26 c). Já em relação a característica da falha para um regime de fadiga de alto ciclo ou baixos níveis de carregamento, nota-se que a trinca se propaga inicialmente na ZAC ao redor do ponto de solda e posteriormente se propaga ao longo da chapa em uma direção perpendicular à aplicação da carga (AMSW - Figura: 5.26 b; e RSW - Figura: 5.26 d).

Figura 5.26: Característica da falha em relação ao regime de fadiga de baixo ciclo (a, c) e alto ciclo (b, d), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa revestida com zinco.

5.7.2 Comparação dos ensaios de fadiga entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), com os parâmetros otimizados, em chapas sem revestimento:

É possível observar nas Tabelas 5.38 e 5.39 os resultados das resistências a fadiga em número de ciclos até a falha (N_f) em relação ao fator de carga máxima de tração por cisalhamento para ambos os processos de soldagem em chapa sem revestimento. Com o intuito de comparação foram realizados dois gráficos utilizando os resultados apresentados nas Tabelas 5.38 e 5.39, quais sejam: (Carga máxima (kN) - $P_{m\acute{a}x.}$) versus (Número de ciclos até a falha - N_f) e (Fator de carga máxima) versus (Número de ciclos até a falha - N_f), respectivamente.

Tabela 5.38: Ensaio de fadiga, processo de soldagem RSW em chapa sem revestimento.

Ensaio de Fadiga - RSW - Chapa sem revestimento: R = 0,1 e Freq. = 20 Hz					
Amostra	N_f Número de Ciclos até a falha	Fator de Carga Máxima ($P_{m\acute{a}x.}/P_{m\acute{a}x.}$ de Tração)	$P_{m\acute{a}x.}$ (kN)	$P_{m\acute{m}n.}$ (kN)	$P_{m\acute{a}x.}$ de Tração(kN)
1	12.522	0,7 (70%)	2,21	0,221	3,16
2	14.783	0,7 (70%)	2,21	0,221	
3	17.627	0,7 (70%)	2,21	0,221	
4	23.991	0,6 (60%)	1,89	0,189	
5	31.221	0,6 (60%)	1,89	0,189	
6	34.508	0,6 (60%)	1,89	0,189	
7	44.163	0,5 (50%)	1,58	0,158	
8	47.636	0,5 (50%)	1,58	0,158	
9	52.323	0,5 (50%)	1,58	0,158	
10	66.838	0,4 (40%)	1,26	0,126	
11	83.431	0,4 (40%)	1,26	0,126	
12	91.183	0,4 (40%)	1,26	0,126	
13	286.215	0,3 (30%)	0,95	0,095	
14	352.024	0,3 (30%)	0,95	0,095	
15	514.343	0,3 (30%)	0,95	0,095	
16	1.169.640	0,25 (25%)	0,79	0,079	
17	1.229.784	0,25 (25%)	0,79	0,079	
18	1.528.129	0,25 (25%)	0,79	0,079	
19	10.000.000	0,2 (20%)	0,63	0,063	
20	10.000.000	0,2 (20%)	0,63	0,063	
21	10.000.000	0,2 (20%)	0,63	0,063	

Tabela 5.39: Ensaio de fadiga, processo de soldagem AMSW em chapa sem revestimento.

Ensaio de Fadiga - AMSW - Chapa sem revestimento: R = 0,1 e Freq. = 20 Hz					
Amostra	N _f Número de Ciclos até a falha	Fator de Carga Máxima (P _{máx.} /P _{máx.} de Tração)	P _{máx.} (kN)	P _{mín.} (kN)	P _{máx.} de Tração(kN)
1	11.173	0,7 (70%)	1,90	0,19	2,72
2	15.816	0,7 (70%)	1,90	0,19	
3	16.963	0,7 (70%)	1,90	0,19	
4	21.303	0,6 (60%)	1,63	0,163	
5	28.571	0,6 (60%)	1,63	0,163	
6	32.498	0,6 (60%)	1,63	0,163	
7	36.541	0,5 (50%)	1,36	0,136	
8	41.119	0,5 (50%)	1,36	0,136	
9	50.894	0,5 (50%)	1,36	0,136	
10	88.943	0,4 (40%)	1,09	0,109	
11	96.627	0,4 (40%)	1,09	0,109	
12	117.908	0,4 (40%)	1,09	0,109	
13	383.012	0,3 (30%)	0,82	0,082	
14	471.351	0,3 (30%)	0,82	0,082	
15	644.670	0,3 (30%)	0,82	0,082	
16	1.094.458	0,25 (25%)	0,68	0,068	
17	1.274.095	0,25 (25%)	0,68	0,068	
18	1.693.543	0,25 (25%)	0,68	0,068	
19	10.000.000	0,2 (20%)	0,54	0,054	
20	10.000.000	0,2 (20%)	0,54	0,054	
21	10.000.000	0,2 (20%)	0,54	0,054	

A Figura 5.27 apresenta o gráfico de resistência a fadiga para os processos de soldagem RSW e AMSW (em chapa sem revestimento) em função da carga máxima: P_{máx.} (kN) e o número de ciclos até a falha (N_f).

Figura 5.27: Gráfico de resistência a fadiga em relação a Carga máxima: Pmáx. (kN) versus Número de ciclos até a falha (N_f), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa sem revestimento.

Assim como apresentado anteriormente no item 5.71, observar-se na Figura 5.27 que as cargas máximas, em relação ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), apresentaram-se maiores em comparação ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Este resultado está relacionado a maior magnitude do diâmetro do ponto de solda encontrado através do processo RSW, o qual se apresentou maior em média 33% em relação ao diâmetro do ponto de solda pelo processo AMSW.

Deste modo, para uma melhor análise comparativa dos dados construiu-se um gráfico com o fator de carga (percentual da carga máxima de tração por cisalhamento) em relação ao número de ciclos até a falha, conforme apresenta a Figura 5.28.

Figura 5.28: Gráfico de resistência a fadiga em relação ao Fator de carga máxima versus Número de ciclos até a falha (N_f), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa sem revestimento.

Pela análise da Figura 5.28, é possível notar que para o regime de fadiga de baixo ciclo ($< 10^5$) não foi observado diferença significativa entre os processos de soldagem RSW e AMSW. Por outro lado, observa-se que para o regime de fadiga de alto ciclo ($> 10^5$) o processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW) apresentou um limite de fadiga ligeiramente maior em média 10,21% se comparado ao processo de soldagem convencional (RSW), mais especificamente em níveis de carregamento de 25% até 40% da carga máxima de tração. Uma possível explicação para este resultado são as maiores magnitudes de indentação encontradas para o processo RSW. Porém, de modo geral, não houve diferenças significativas nos limites de fadiga referente aos sete níveis de carregamento para ambos os processos de soldagem. Este resultado pode estar relacionado com o fato de que todas as falhas ou fraturas terem ocorrido na ZAC, para ambos os processos de soldagem. Visto que, para chapa sem revestimento não foi observado diferenças relevantes no tamanho da ZAC em relação aos dois processos de soldagem. É importante ressaltar que para ambos os processos (RSW e AMSW) não houve fratura interfacial e também não foi observado falha para o fator de carga de 0,2 (20% da carga máxima de tração

por cisalhamento) até um número de ciclos de 10^7 . Como pode ser observado na Figura 5.29, de modo geral, o comportamento referente a propagação da trinca para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa sem revestimento, apresentou-se de maneira semelhante se comparado a propagação da trinca em chapa com revestimento de zinco (item 5.71), tanto para um regime de fadiga de baixo ciclo ($< 10^5$) quanto para um regime de fadiga de alto ciclo ($> 10^5$), ou seja, para um regime de fadiga de baixo ciclo (altos níveis de carregamento) a trinca se propaga na ZAC ao redor do ponto de solda (AMSW - Figura: 5.29 a; e RSW - Figura: 5.29 c). E referente ao regime de fadiga de alto ciclo (baixos níveis de carregamento) a trinca se propaga inicialmente na ZAC ao redor do ponto de solda e posteriormente se propaga ao longo da chapa em uma direção perpendicular à aplicação da carga (AMSW - Figura: 5.29 b; e RSW - Figura: 5.29 d).

Figura 5.29: Característica da falha em relação ao regime de fadiga de baixo ciclo (a, c) e alto ciclo (b, d), para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) em chapa sem revestimento.

5.8 Análise fractográfica:

Neste item serão apresentados os resultados das fractografias realizadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), referente aos ensaios de fadiga mostrados anteriormente no item 5.7. É importante ressaltar que todas as amostras para análise fractográfica obtiveram suas fraturas em um regime de alto ciclo ($>10^5$), ou seja, baixo nível de carregamento cíclico, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) quanto para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco e sem revestimento, respectivamente.

5.8.1 Comparação das fractografias entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco:

A Figura 5.30 apresenta a fractografia da amostra referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco.

Figura 5.30: Fractografia da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC, referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco.

Pela análise da Figura 5.30 (a), é possível observar uma vista geral da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC, bem como observa-se a indentação (setas em vermelho) que por consequência da deformação e/ou perda da espessura da chapa diminui significativamente a resistência a fadiga do ponto de solda. Nota-se que uma trinca se propagou na linha de fusão, conforme mostram as setas de cor branca na Figura 5.30 (b). Já as setas de cor amarela, conforme também pode ser visto na Figura 5.30 (b), observam-se estrias as quais são características de superfície de fratura por fadiga, estas se propagaram até a linha de fusão (seta de cor branca). Pode-se observar também que abaixo da linha de fusão há uma região com características de fratura súbita e dúctil, pois, é possível notar nesta região uma considerável deformação plástica com presença de microcavidades, conforme mostra a Figura 5.30 (b), assim como nas Figuras 5.30 (c) - ampliação de 1500x e (d) - ampliação de 3000x.

A Figura 5.31 apresenta a fractografia da amostra referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco. Em relação a Figura 5.31 (a), esta apresenta uma vista geral da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC. É possível observar na Figura 5.31 (b) e (c) marcas de estrias por fadiga onde ocorreu a propagação inicial da trinca, conforme indicado pelas setas em amarelo. Ainda pela análise da Figura 5.31 (b) (seta em verde) nota-se que houve uma alteração na mudança de direção na propagação da trinca, logo na sequência desta região (setas em vermelho) observa-se mais marcas de estrias por fadiga em uma direção perpendicular ao carregamento cíclico. Já em relação as setas em azul na Figuras 5.31 (c) - ampliação de 1500x e na Figura 5.31 (d) - ampliação de 3000x, estas mostram fraturas com característica dúctil, as quais é possível observar uma considerável deformação plástica.

Uma possível explicação para os melhores resultados observados em relação aos ensaios de fadiga através do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), se comparado ao processo de soldagem convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco, é a ausência de indentação, visto que a mesma proporciona uma perda significativa na espessura da chapa fragilizando esta região; bem como uma menor ZAC. É

importante ressaltar também que para ambos os processos de soldagem a fratura por fadiga ocorreu na zona afetada pelo calor (ZAC).

Figura 5.31: Fractografia da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco.

5.8.2 Comparação das fractografias entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:

A Figura 5.32 apresenta a fractografia da amostra referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento. Pela análise da Figura 5.32 (a), é possível observar uma vista geral da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC. Observa-se também a indentação (setas em vermelho) a qual é intrínseca a este processo de soldagem. Na Figura 5.32 (b) nota-se uma fratura com característica dúctil, este fato é evidenciado pela

deformação plástica e principalmente pela presença de microcavidades nesta região. Em relação as Figuras 5.32 (c) - ampliação de 1500x e (d) - ampliação de 3000x, é possível observar marcas de estrias de fadiga se propagando perpendicular à direção da carga cíclica aplicada (setas em amarelo).

Figura 5.32: Fractografia da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC, referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento.

A Figura 5.33 mostra a fractografia da amostra referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento. Em relação a Figura 5.33 (a), é possível observar uma vista geral da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC. Já referente a Figura 5.33 (b), nota-se que existe duas regiões bem definidas, as quais estão separadas através de uma linha branca tracejada. Em relação a parte superior da imagem indicada pela seta em vermelho, observa-se uma região de fratura súbita e dúctil, uma vez que é possível notar uma considerável deformação

plástica e/ou presença de microcavidades. Ainda pela análise da Figura 5.33 (b), mais especificamente na parte inferior da imagem, é possível observar uma superfície de fratura por fadiga, a qual é caracterizada por possuir pouca deformação plástica e com a presença de marcas de estrias indicadas pelas setas em amarelo. Em relação as Figuras 5.33 (c) - ampliação de 1500x e (d) - ampliação de 3000x, é possível observar uma superfície típica de fratura por fadiga com característica transgranular e com pouca deformação plástica. É importante salientar que para ambos os processos de soldagem a fratura por fadiga ocorreu na zona afetada pelo calor (ZAC). Conforme apresentado anteriormente no item 5.7.2 não houve diferença significativa referente aos limites de fadiga para ambos os processos de soldagem em chapa sem revestimento. Uma possível explicação para este fato é que não se observou diferenças relevantes na ZAC, tanto para o processo de soldagem a ponto RSW como para o processo de soldagem a ponto AMWS.

Figura 5.33: Fractografia da região inicial da fratura por fadiga localizada na ZAC, referente ao processo de soldagem a ponto AMSW em chapa sem revestimento.

5.9 Ensaio de microdureza Vickers:

Neste item serão apresentados os resultados referente ao mapeamento de microdureza Vickers, conforme descrito no item 4.13, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) quanto para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), com o intuito de fazer uma análise comparativa entre ambos os processos. Visto que, nos itens 5.9.1 e 5.9.2 serão mostrados os resultados em chapas sem revestimento e com revestimento de zinco, respectivamente.

5.9.1 Comparação do mapeamento de microdureza Vickers entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:

Nos itens 5.9.1.1 a 5.9.1.3 apresentam as análises do mapeamento da microdureza Vickers referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), bem como para o processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento. Em relação ao item 5.9.1.4, este mostra um resumo da análise comparativa entre ambos os processos de soldagem a ponto (AMSW e RSW) no que se refere aos resultados das médias das microdurezas.

5.9.1.1 Análise do mapeamento de microdureza Vickers referente a deposição em chapa sem revestimento antes do processo de soldagem a ponto AMSW:

A Figura 5.34 apresenta o resultado do mapeamento de microdureza Vickers referente a amostra com a deposição realizada em chapa sem revestimento antes da execução da soldagem a ponto pelo processo AMSW.

Figura 5.34: a) Mapeamento de microdureza Vickers da amostra com a deposição (antes da soldagem a ponto AMSW) em chapa sem revestimento (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm - 947 impressões). b) Macrografia da amostra com a deposição em chapa sem revestimento.

Pela análise da Figura 5.34 (a), observa-se no mapeamento que o valor da média de microdureza da zona fundida (ZF) foi de $(337,5 \pm 20,9)$ HV 0,025. Já na região da zona afetada pelo calor (ZAC) obteve-se um valor médio de microdureza de $(128,8 \pm 8,5)$ HV 0,025, ou seja, apresentou-se menor em 61,8% se comparada a ZF. Nota-se também que o material de base apresenta uma média de microdureza de $(104,3 \pm 4,9)$ HV 0,025, isto é, menor em comparação a ZF e a ZAC em média 69,1% e 19,2%, respectivamente.

5.9.1.2 Análise do mapeamento da microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento:

A Figura 5.35 mostra o resultado do mapeamento de microdureza Vickers (a); e a macrografia (b), em relação ao ponto de solda utilizando o processo de manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento.

Figura 5.35: a) Mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) em chapa sem revestimento (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm - 2312 impressões). b) Macrografia do ponto de solda (AMSW – chapa sem revestimento).

Pode-se observar pela análise da Figura 5.35 (a) que o valor médio da microdureza na zona fundida (ZF) do ponto de solda foi de $(313,7 \pm 14,2)$ HV 0,025. Esta magnitude de microdureza da ZF do ponto de solda apresentou-se menor em média 7,1% se comparado com a microdureza da ZF da deposição antes da execução do processo de soldagem. Pode-se observar também que os valores médios da microdureza na ZAC entre a chapa com deposição e a chapa sem deposição, conforme mostra a Figura 5.35 (a), não apresentaram diferenças significativas, os valores médios encontrados foram: $(140,4 \pm 12,8)$ HV 0,025 e $(139,8 \pm 10,3)$ HV 0,025, respectivamente.

Ainda pela análise da Figura 5.35 (a), é possível observar que o valor médio da microdureza da ZAC na chapa com deposição (após o processo de soldagem) apresentou-se maior em média 9% se comparado com a ZAC da chapa com deposição (antes da soldagem), conforme mostrado anteriormente na Figura 5.34 (a). Este resultado pode estar relacionado com o refino de grão devido ao reaquecimento desta região após o processo de soldagem. Observa-se também que o material de base (MB) apresenta uma média de microdureza de $(109,6 \pm 4,2)$ HV 0,025, ou seja, menor em comparação a ZF e a ZAC em

média 65,2% e 21,9%, respectivamente. Nota-se com estes resultados que não houve diferenças significativas nos percentuais após a soldagem.

Pode-se observar também na Figura 5.35 (a) em relação a interface da linha de fusão, a qual está representado predominantemente pelas cores verde e amarela, que a magnitude da microdureza apresentou-se em média $(241,6 \pm 19,8)$ HV 0,025. Este resultado é um valor de microdureza intermediário entre a ZF e a ZAC, assim sendo, esta região apresenta maior tenacidade em comparação a zona fundida.

5.9.1.3 Análise do mapeamento da microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento:

A título de comparação a Figura 5.36 apresenta o mapeamento de microdureza do ponto de solda referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento. É possível notar que o valor médio de microdureza da zona fundida (ZF), referente ao ponto de solda executado pelo processo de soldagem convencional (RSW), apresentou-se menor em média 38,3% se comparado a ZF do processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW), os valores das médias da ZF encontrados foram: RSW = $(193,5 \pm 16,5)$ HV 0,025 e AMSW = $(313,7 \pm 14,2)$ HV 0,025.

Ainda pela análise da Figura 5.36 (a), é possível observar que o valor médio da microdureza na ZAC foi de $(134,3 \pm 9,5)$ HV 0,025. Este resultado não apresentou diferença significativa em comparação com a ZAC referente ao processo de soldagem a ponto AMSW. Nota-se também que o valor da microdureza do material de base (MB), referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), apresentou-se menor em comparação a ZF e a ZAC em 46,8% e 23,4%, respectivamente.

Figura 5.36: a) Mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm - 2062 impressões). b) Macrografia do ponto de solda (RSW – chapa sem revestimento).

5.9.1.4 Resumo da análise comparativa referente ao mapeamento da microdureza Vickers entre o processo de soldagem AMSW e RSW em chapa sem revestimento:

A Tabela 5.40 apresenta de forma agrupada os resultados descritos anteriormente referentes aos valores das médias das microdurezas encontradas no mapeamento em relação a zona fundida (ZF), zona afetada pelo calor (ZAC) e do material de base (MB), bem como o seu respectivo desvio padrão, em chapa sem revestimento. Assim sendo, os valores analisados e mostrados na Tabela 5.40 são para as seguintes amostras: chapa com deposição (antes da soldagem); ponto de solda executado pelo processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW) - chapa com e sem deposição (depois da soldagem); e o ponto de solda realizado pelo processo de soldagem convencional (RSW).

Tabela 5.40: Valores das médias de microdureza Vickers para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) e para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento.

	MICRODUREZA VICKERS (HD 0,025) - CHAPA SEM REVESTIMENTO					
	MÉDIA			DESVIO PADRÃO		
	ZF	ZAC	MB	ZF	ZAC	MB
CHAPA COM DEPOSIÇÃO (ANTES DA SOLDAGEM)	337,5	128,8	104,3	20,9	8,5	4,9
AMSW - PONTO DE SOLDA: CHAPA COM DEPOSIÇÃO	313,7	140,4	106,7	14,2	12,8	3,4
AMSW - PONTO DE SOLDA: CHAPA SEM DEPOSIÇÃO	313,7	139,8	109,6	14,2	10,3	4,2
RSW - PONTO DE SOLDA	193,5	134,3	102,9	16,5	9,5	3,7

A Figura 5.37 apresenta os resultados da Tabela 5.40 através do gráfico de barras com o intuito de facilitar a análise e a comparação dos valores referente as médias de microdureza Vickers, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento.

Figura 5.37: Comparação dos valores das médias de microdureza Vickers, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento.

Ainda pela análise da Figura 5.37, é possível observar de forma resumida que tanto a ZAC quanto a MB não apresentaram diferenças significativas em relação à média da microdureza para ambos processos de soldagem (AMSW e RSW). Em contrapartida, a média da microdureza na zona fundida (ZF) do ponto de solda realizado pelo processo AMSW apresentou-se maior em 62,1% se comparado com a ZF do ponto de solda executado pelo processo convencional (RSW). Esta magnitude de microdureza na ZF, referente ao ponto de solda executado pelo processo AMSW ($313,7 \pm 14,2$ - HV 0,025) em chapa sem revestimento, pode estar relacionado a uma microestrutura predominantemente bainítica, apesar do diagrama de Schaeffler (Figura 5.38) indicar uma região martensítica. Este resultado está relacionado com o baixo percentual de carbono tanto do material de base quanto da deposição. Para a determinação da composição química da zona fundida do ponto de solda (referente ao processo AMSW) foi realizado a microanálise através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) via espectrômetro por dispersão de energia (EDS), conforme apresenta a Tabela 5.41.

Tabela 5.41: Composição química dos principais elementos de liga da zona fundida (ZF), referente ao ponto de solda (AMSW) em chapa sem revestimento, executada via MEV-EDS.

PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA ZONA FUNDIDA (ZF)	PONTO DE SOLDA: AMSW - CHAPA SEM REVESTIMENTO COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)				
	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
	2,35	2,16	0,94	0,73	0,67

Pela análise da Figura 5.38 é possível observar que a taxa de diluição da deposição (ponto 2) apresentou-se 48,19% em relação ao material de base (ponto 4) e o material depositado (ponto 1): aço inoxidável austenítico - 316 L, conforme também apresentado no item 5.1.4. Já em relação a zona fundida do ponto de solda (ponto 3), executado pelo processo AMSW, a taxa de diluição apresentou-se 61,39% e 79,82% em relação ao material de base (ponto 4) e a deposição (ponto 2); e em relação ao material de base (ponto 4) e o material depositado (ponto 1), respectivamente.

- Ponto 1: Material depositado - 316 L ($Cr_{eq} = 20,85$ - $Ni_{eq} = 14,35$)
- Ponto 2: Deposição - ($Cr_{eq} = 10,95$ - $Ni_{eq} = 7,75$)
- Ponto 3: Zona Fundida - ZF ($Cr_{eq} = 4,29$ - $Ni_{eq} = 3,00$)
- Ponto 4: Material de Base - MB ($Cr_{eq} = 0,10$ - $Ni_{eq} = 0,54$)

Figura 5.38: Diagrama de Schaeffler referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento. Adaptado da referência [125].

5.9.2 Comparação do mapeamento de microdureza Vickers entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco:

Em relação aos itens 5.9.2.1 a 5.9.2.3, estes mostram as análises do mapeamento de microdureza Vickers, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o processo de soldagem convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco. Já no item 5.9.2.4, este apresenta um resumo da análise comparativa entre os processos de soldagem (AMSW e RSW) referente aos resultados das médias das microdurezas.

5.9.2.1 Análise do mapeamento de microdureza Vickers referente a deposição em chapa revestida com zinco antes do processo de soldagem a ponto AMSW:

A Figura 5.39 mostra o mapeamento de microdureza Vickers (a) e a macrografia (b), em relação a amostra com a deposição executada em chapa com revestimento de zinco antes do processo de soldagem a ponto AMSW.

Figura 5.39: a) Mapeamento de microdureza Vickers da amostra com a deposição (antes da soldagem a ponto AMSW) em chapa com revestimento de zinco (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm - 1053 impressões). b) Macrografia da amostra com a deposição em chapa com revestimento de zinco.

A partir da análise da Figura 5.39 (a), observa-se no mapeamento que o valor da média de microdureza da zona fundida (ZF) foi de $(272,8 \pm 38,7)$ HV 0,025, observa-se também que nas extremidades da deposição na ZF a microdureza apresentou-se maior se comparada a região central. Este resultado pode estar relacionado ao fato da diluição não se apresentar homogênea em relação a área total da deposição. Enquanto que na região da zona afetada pelo calor (ZAC) obteve-se um valor médio de microdureza de $(185,4 \pm 13,7)$ HV 0,025, isto é, apresentou-se menor em 32,1% se comparada a ZF. Em relação ao material de base (MB) a média de microdureza foi de $(126,3 \pm 4,2)$ HV 0,025, ou seja, menor em comparação a ZF e a ZAC em 53,7% e 31,8%, respectivamente.

5.9.2.2 Análise do mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco:

A Figura 5.40 apresenta o resultado do mapeamento de microdureza Vickers (a); e sua respectiva macrografia (b), referente ao ponto de solda utilizando o processo de soldagem com manufatura aditiva (AMSW) em chapa com revestimento de zinco.

Figura 5.40: a) Mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) em chapa com revestimento de zinco (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm - 2851 impressões). b) Macrografia do ponto de solda (AMSW - chapa com revestimento de zinco).

Pela análise da Figura 5.40 (a) o valor médio da microdureza na zona fundida (ZF) do ponto de solda foi de $(307,8 \pm 13,7)$ HV 0,025, este resultado de microdureza da ZF do ponto de solda apresentou-se maior em média 12,8% se comparado com a microdureza da ZF da deposição antes da execução do processo de soldagem (AMSW). É possível observar também que os valores médios de microdureza na ZAC entre a chapa com deposição e a chapa sem deposição, conforme mostra a Figura 5.40 (a), não apresentaram diferenças significativas, os valores médios encontrados foram: $(198,1 \pm 12,6)$ HV 0,025 e $(201,3 \pm 9,6)$ HV 0,025, respectivamente.

Ainda pela análise da Figura 5.40 (a), nota-se que o valor médio de microdureza da ZAC na chapa com deposição (após o processo de soldagem) mostrou-se maior em média 7,9% se comparado com a ZAC da chapa com deposição (antes da soldagem), apresentado no item 5.9.2.1. Este fato pode estar relacionado com o refino de grão devido ao reaquecimento desta região após o processo de soldagem. Nota-se também que o material de base (MB) apresenta uma média de microdureza de $(130,7 \pm 5,3)$ HV 0,025, ou seja, menor em comparação a ZF e a ZAC em 57,5% e 35,1%, respectivamente, observa-se com estes resultados que não houve diferenças significativas na microdureza nestas regiões após a soldagem.

É possível observar também na Figura 5.40 (a), que na interface da linha de fusão (representado predominantemente pelas cores verde e amarela) a magnitude da microdureza apresentou-se em média $(216,3 \pm 15,4)$ HV 0,025, conseqüentemente, este resultado é um valor de microdureza intermediário entre a ZF e a ZAC. Desta maneira, este fato caracteriza esta região como sendo de maior tenacidade se comparado a zona fundida.

5.9.2.3 Análise do mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem convencional (RSW) em chapas com revestimento de zinco:

Com intuito de comparação, a Figura 5.41 apresenta o mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.

Figura 5.41: a) Mapeamento de microdureza Vickers do ponto de solda referente ao processo de soldagem convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco (força de 0,025 kgf e distância de espaçamento de 0,08mm - 3164 impressões). b) Macrografia do ponto de solda (RSW – chapa com revestimento de zinco).

Nota-se na Figura 5.41 (a) que o valor médio de microdureza da zona fundida (ZF), referente ao ponto de solda executado pelo processo de soldagem convencional (RSW), apresentou-se menor em 22,9% se comparado a ZF do processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW), os valores da ZF encontrados para cada processo foram: $(237,2 \pm 14,3)$ HV 0,025 e $(307,8 \pm 13,7)$ HV 0,025, respectivamente.

Ainda pela análise da Figura 5.41 (a), é possível notar que o valor médio de microdureza na ZAC foi de $(205,1 \pm 7,2)$ HV 0,025. Este resultado não apresentou diferença significativa em comparação com a ZAC referente ao processo de soldagem a ponto AMSW. Nota-se também que o valor da microdureza do material de base (MB), para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), apresentou-se menor em comparação a ZF e a ZAC em 44,7% e 36,1%, respectivamente.

5.9.2.4 Resumo da análise comparativa referente ao mapeamento de microdureza Vickers entre o processo de soldagem AMSW e RSW em chapas com revestimento de zinco:

A Tabela 5.42 mostra os resultados citados anteriormente em relação aos valores das médias das microdurezas encontradas no mapeamento referente a

zona fundida (ZF), zona afetada pelo calor (ZAC) e ao material de base (MB), bem como seu respectivo desvio padrão em chapa com revestimento de zinco. Desta forma, os valores analisados e mostrados na Tabela 5.42 são para as seguintes amostras: chapa com deposição (antes da soldagem); ponto de solda executado pelo processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW) - chapa com e sem deposição (depois da soldagem); e o ponto de solda realizado pelo processo de soldagem convencional (RSW).

Tabela 5.42: Valores das médias de microdureza Vickers para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) e para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.

	MICRODUREZA VICKERS (HD 0,025) - CHAPA COM ZINCO					
	MÉDIA			DESVIO PADRÃO		
	ZF	ZAC	MB	ZF	ZAC	MB
CHAPA COM DEPOSIÇÃO (ANTES DA SOLDAGEM)	272,8	185,4	126,3	38,7	13,7	4,2
AMSW - PONTO DE SOLDA: CHAPA COM DEPOSIÇÃO	307,8	201,3	128,2	13,7	9,6	4,7
AMSW - PONTO DE SOLDA: CHAPA SEM DEPOSIÇÃO	307,8	198,1	130,7	13,7	12,6	5,3
RSW - PONTO DE SOLDA	237,2	205,1	131,1	14,3	7,2	3,8

A Figura 5.42 apresenta os resultados da Tabela 5.42 através do gráfico de barras, a fim de facilitar a análise e a comparação dos valores em relação as médias de microdureza, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o processo de soldagem convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.

Figura 5.42: Comparação dos valores das médias de microdureza, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o processo de soldagem convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.

Pela análise da Figura 5.42, pode-se resumir que, assim como em chapa sem zinco apresentado anteriormente, tanto a ZAC quanto a MB não apresentaram diferenças significativas referente a média da microdureza para ambos processos de soldagem. Em contrapartida, o valor da microdureza na zona fundida (ZF) do ponto de solda realizado pelo processo AMSW apresentou-se maior em média 29,7% em comparação a ZF do ponto de solda executado pelo processo convencional (RSW). Assim como descrito anteriormente no item 5.9.1.4, esta magnitude de microdureza na ZF, referente ao ponto de solda executado pelo processo AMSW ($307,8 \pm 13,7$ - HV 0,025) em chapa revestida com zinco, pode estar relacionado a uma microestrutura predominantemente bainítica, apesar do diagrama de Schaeffler (Figura 5.43) indicar uma região martensítica. Este resultado está relacionado com o baixo percentual de carbono tanto do material de base quanto da deposição. Para a determinação da composição química da zona fundida do ponto de solda (referente ao processo AMSW) foi realizado a microanálise através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) via espectrômetro por dispersão de energia (EDS), conforme apresenta a Tabela 5.43.

Tabela 5.43: Composição química dos principais elementos de liga da zona fundida (ZF), referente ao ponto de solda (AMSW) em chapa com revestimento de zinco, executada via MEV-EDS.

PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA ZONA FUNDIDA (ZF)	PONTO DE SOLDA: AMSW - CHAPA REVESTIDA C/ ZINCO COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)				
	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
	4,58	3,25	1,15	1,63	0,59

Pela análise da Figura 5.43 é possível notar que a taxa de diluição da deposição (ponto 2) mostrou-se 40,85% em relação ao material de base (ponto 4) e o material depositado (ponto 1): aço inoxidável austenítico - 316 L, conforme também apresentado no item 5.1.4. Já no que se refere a zona fundida do ponto de solda (ponto 3), executado pelo processo AMSW, a taxa de diluição apresentou-se 47,31% e 68,73% em relação ao material de base (ponto 4) e a deposição (ponto 2); e em relação ao material de base (ponto 4) e o material depositado (ponto 1), respectivamente.

- Ponto 1: Material depositado - 316 L ($Cr_{eq} = 20,85$ - $Ni_{eq} = 14,35$)
- Ponto 2: Deposição - ($Cr_{eq} = 12,42$ - $Ni_{eq} = 8,47$)
- Ponto 3: Zona Fundida - ZF ($Cr_{eq} = 6,62$ - $Ni_{eq} = 4,50$)
- Ponto 4: Material de Base - MB ($Cr_{eq} = 0,14$ - $Ni_{eq} = 0,40$)

Figura 5.43: Diagrama de Schaeffler referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco. Adaptado da referência [125].

5.10 Caracterização metalográfica:

Neste item será apresentado a caracterização metalográfica, conforme descrito no item 4.12, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS) quanto para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), executados com os parâmetros otimizados, com o intuito de fazer uma análise comparativa entre ambos os processos de soldagem. Neste item também será mostrado a caracterização metalográfica da deposição a laser utilizando pó metálico (manufatura aditiva) antes do processo de soldagem a ponto (AMSW) para ambas as chapas com e sem revestimento de zinco.

5.10.1 Análise comparativa da caracterização metalográfica referente a deposição a laser utilizando pó metálico (manufatura aditiva) entre as chapas com e sem revestimento de zinco:

As Figuras 5.44 e 5.45 mostram as macrografias e as micrografias das deposições a laser utilizando pó metálico (manufatura aditiva) executadas em chapas com e sem revestimento de zinco, respectivamente.

Na Figura 5.44 (a) observa-se a macrografia da deposição a laser utilizando pó metálico (aço inoxidável austenítico: 316 L) em chapa revestida com zinco. É possível notar que a ZAC não atinge toda a espessura da chapa, conforme indicada pela linha branca tracejada. Na Figura 5.44 (b), região indicada pelo retângulo na Figura 5.44 (a), nota-se que a ZAC é composta por grãos grosseiros com uma microestrutura constituída por grãos de ferrita com morfologia alongada e alinhados com a direção do fluxo de energia via calor e agregados de ferrita e carbonetos. É possível observar também que o material de base é composto por uma microestrutura predominantemente ferrítica de grãos com morfologias poligonais irregulares e agregados de ferrita e carbonetos.

Figura 5.44: a) Macrografia e b) micrografia (Aumento: 200x) da deposição a laser utilizando pó metálico (Aço inoxidável: 316L) em chapa com revestimento de zinco.

Em relação a Figura 5.45 (a) nota-se a macrografia da deposição a laser utilizando pó metálico (aço inoxidável austenítico: 316 L) em chapa sem revestimento. É importante ressaltar que, diferente da Figura 5.44 (a) mostrada anteriormente, observar-se que a ZAC atinge toda a espessura da chapa, conforme esboçado pela linha branca tracejada. Este resultado pode estar relacionado com o revestimento de zinco, visto que há uma perda de energia térmica para a volatilização do revestimento de zinco antes de atingir a chapa.

Figura 5.45: a) Macrografia e b) micrografia (Aumento: 200x) da deposição a laser utilizando pó metálico (Aço inoxidável: 316L) em chapa sem revestimento.

Na Figura 5.45 (b), região indicada pelo retângulo na Figura 5.45 (a), nota-se que a ZAC é composta por grãos grosseiros com uma morfologia maior se comparado a mesma região em chapa com revestimento de zinco (Figura 5.44-b). A microestrutura desta região é constituída por grãos de ferrita e agregados de ferrita e carbonetos.

5.10.2 Análise comparativa da caracterização metalográfica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco:

A Figura 5.46 apresenta a macrografia do ponto de solda executado pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco, observa-se que a ZAC não abrange toda a espessura para ambas as chapas, conforme indicada pela linha branca tracejada. Nota-se também que a ZAC da chapa com deposição apresentou-se com grãos mais refinados se comparado a ZAC da chapa sem deposição. Este fato pode ser explicado pelo reaquecimento desta região durante a soldagem. De maneira geral, observou-se que as fraturas durante os ensaios destrutivos, tanto os ensaios estáticos quanto os ensaios dinâmicos (fadiga), ocorreram na chapa sem deposição, conforme mostra esquematicamente na Figura 5.46 (linha vermelha).

Figura 5.46: Macrografia do ponto de solda executado pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco.

Figura 5.47: Micrografias do ponto de solda executado pelo processo AMSW em chapa revestida com zinco, conforme mostra a Figura 5.46. a) Chapa sem deposição (superior). b) Chapa com deposição (inferior). Aumento: 200x.

A Figura 5.47 mostra as regiões indicadas pelos retângulos (a) e (b) da Figura 5.46 (com ampliação de 200x). É possível notar que a microestrutura da ZAC é composta de grãos grosseiros com morfologia alongada e constituída de ferrita e agregados de ferrita e carbonetos para ambas as chapas (chapa com deposição: Figura 5.47-a e chapa sem deposição: Figura 5.47-b). Observa-se também, conforme descrito anteriormente, que a ZAC da chapa com deposição (Figura 5.47-b) possui grãos mais refinados se comparado a ZAC da chapa sem deposição (Figura 5.47-a), este resultado é devido ao reaquecimento desta região durante a soldagem a ponto. Em relação a Figura 5.48, a qual está indicada por um retângulo (c) da Figura 5.46, esta apresenta uma microestrutura predominantemente bainítica, referente a zona fundida (ZF) do ponto de solda executado pelo processo AMSW, conforme também apresentado anteriormente no item 5.9.2.4.

Figura 5.48: Micrografia da zona fundida (ZF) do ponto de solda executado pelo processo AMSW em chapa revestida com zinco, conforme mostra a Figura 5.46 (retângulo: c). Aumento: 500x.

Em relação a Figura 5.49 (a), referente a macrografia do ponto de solda executado pelo processo de soldagem convencional (RSW) em chapa revestida com zinco, nota-se que a ZAC abrange toda a espessura das chapas (representado pela linha branca tracejada). De maneira geral, observou-se também que nos ensaios destrutivos, tanto os ensaios estáticos quanto ensaios os dinâmicos, que a fratura ocorreu na indentação, conforme mostrado esquematicamente pela linha vermelha na Figura 5.49 (a). Este resultado está relacionado com a perda de espessura das chapas causada pela indentação (seta branca) fragilizando esta região, assim como é também fragilizada pela ZAC que abrange toda a espessura das chapas. Pela análise da Figura 5.49 (b), região com ampliação de 200x, é possível observar na zona fundida (ZF) grãos de ferrita com morfologia alongada e alinhados com a direção do fluxo de energia via calor, ferrita com segunda fase alinhada e agregados de ferrita e carbonetos. Na região central da imagem observa-se a ZAC de grãos grosseiros composta de ferrita e agregados de ferrita e carbonetos. Já na região inferior da Figura 5.49 (b), nota-se uma ZAC com grãos mais refinados de ferrita e agregados de ferrita e carbonetos, este resultado pode ser explicado devido esta região ser mais afastada do ponto de solda, a qual é aquecida dentro de uma faixa de temperatura utilizada na normalização que é caracterizada por uma estrutura de granulação mais fina.

Figura 5.49: a) Macrografia e b) micrografia (Aumento: 200x) do ponto de solda executado pelo processo de soldagem convencional (RSW) em chapa revestida com zinco.

5.10.3 Análise comparativa da caracterização metalográfica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento:

A Figura 5.50 mostra a macrografia do ponto de solda executado pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento, nota-se que diferente do resultado apresentado no item

5.10.2 (Figura 5.46) a ZAC abrange toda a espessura de ambas as chapas, conforme indicada pela linha branca tracejada. Como descrito anteriormente, este resultado pode estar relacionado com o revestimento de zinco, visto que há uma perda de energia térmica para a volatilização do revestimento de zinco antes de atingir a chapa, além desse fato a espessura da chapa sem revestimento é 0,1mm menor se comparada a chapa revestida com zinco.

Figura 5.50: Macrografia do ponto de solda executado pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa sem revestimento.

Ainda pela análise da Figura 5.50 observa-se que a ZAC da chapa com deposição apresentou-se com grãos mais refinados se comparado a ZAC da chapa sem deposição. Este fenômeno pode ser explicado pelo reaquecimento desta região durante a soldagem. Observou-se também que, de modo geral, as fraturas durante os ensaios destrutivos, tanto os ensaios estáticos quanto os ensaios dinâmicos (fadiga), ocorreram na chapa sem deposição, conforme mostra esquematicamente na Figura 5.50 (linha vermelha). Este resultado pode estar relacionado ao refino de grão da ZAC referente a chapa com deposição, possibilitando deste modo uma melhora nas propriedades mecânicas nesta região.

Figura 5.51: Micrografias do ponto de solda executado pelo processo AMSW em chapa sem revestimento, conforme mostra a Figura 5.50. a) Chapa sem deposição (superior). b) Chapa com deposição (inferior). Aumento: 200x.

Em relação a Figura 5.51 é possível notar que, conforme descrito anteriormente, a ZAC referente a chapa com deposição (Figura 5.51 -b) possui grãos mais refinados se comparado a ZAC da chapa sem deposição (Figura 5.51 -a). Este resultado pode estar relacionado ao reaquecimento desta região durante a soldagem a ponto. Já em relação a zona fundida (ZF) do ponto de solda executado pelo processo AMSW, observa-se que esta região é composta de uma microestrutura predominantemente bainítica, conforme também apresentado anteriormente no item 5.9.1.4.

Pela análise da Figura 5.52 (a), referente a macrografia do ponto de solda executado pelo processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento, é possível observar que a ZAC abrange toda a espessura das chapas (representado pela linha branca tracejada). De maneira geral, observou-se também que nos ensaios destrutivos, tanto os ensaios estáticos quanto os ensaios dinâmicos, a fratura ocorreu na indentação, conforme mostrado esquematicamente pela linha vermelha na Figura 5.52 (a). Como descrito anteriormente no item 5.10.2, este resultado está relacionado com a perda de espessura das chapas causada pela indentação (seta branca) fragilizando esta região, bem como fragilizada pela ZAC que abrange toda a espessura das chapas. Em relação a Figura 5.52 (b), região com ampliação de 200x, é possível observar na zona fundida (ZF) grãos com morfologia alongada e alinhados com a direção do fluxo de energia via calor, ferrita primária de contorno de grão, ferrita com segunda fase alinhada e agregados de ferrita e carbonetos. Na parte superior da imagem da Figura 5.52 (b) é possível observar a ZAC com uma estrutura de grãos grosseiros composta de ferrita com morfologia alongada e agregados de ferrita e carbonetos.

Figura 5.52: a) Macrografia e b) micrografia (Aumento: 200x) do ponto de solda executado pelo processo de soldagem convencional (RSW) em chapa sem revestimento.

5.11 Análise da resistência dinâmica, energia elétrica, do comportamento da força entre os eletrodos e da expansão térmica, utilizando os parâmetros otimizados em chapas revestidas com zinco e sem revestimento:

Neste item será apresentado a análise da resistência dinâmica, energia elétrica, o comportamento da força entre os eletrodos e da expansão térmica durante a soldagem, através dos parâmetros otimizados, conforme mostra a Tabela 5.44, para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), assim como a título de comparação será realizado análise com a soldagem a ponto convencional (RSW). Estas análises foram realizadas tanto em chapa revestida com zinco quanto em chapa sem revestimento.

Tabela 5.44: Parâmetros Otimizados de Soldagem, em relação aos processos AMSW e RWS, em chapa com revestimento de zinco e sem revestimento.

	PARÂMETROS OTIMIZADOS DE SOLDAGEM		
	CORRENTE [kA]	TEMPO [ms]	FORÇA [kgf]
AMSW - CHAPAS SEM ZINCO	8.0	60	110
AMSW - CHAPAS COM ZINCO	8.0	60	110
RWS - CHAPAS SEM ZINCO	6.4	225	220
RWS - CHAPAS COM ZINCO	7.8	225	290

5.11.1 Análise comparativa da resistência dinâmica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapa sem revestimento:

A Figura 5.53 mostra a comparação da resistência dinâmica, empregando os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento.

Figura 5.53: Comparação da resistência dinâmica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento de zinco.

Pode-se observar na Figura 5.53 que a resistência dinâmica inicial da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) apresentou-se maior em 5,7% se comparada com o processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Este fato está relacionado com a maior resistividade elétrica do material da deposição e também a menor área de passagem da corrente se comparada ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Nota-se também que o comportamento da resistência dinâmica para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento foi conforme o esperado [40,127], ou seja, houve uma queda inicial da resistência elétrica (1), devido ao aumento da área de contato, através do colapso das rugosidades nas interfaces das chapas. Logo em seguida, houve um aumento da resistência dinâmica devido ao aumento da temperatura (2). E por último, houve uma queda da resistência dinâmica causado pelo aumento da área de contato através da penetração dos eletrodos nas superfícies das chapas (3).

Em relação ao comportamento da resistência dinâmica do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), observou-se que houve uma queda da resistência praticamente constante (4), até o ponto de inflexão da

curva em aproximadamente 40ms (5). Uma possível explicação para esta queda da resistência dinâmica (4) é o aumento da área de contato devido ao colapso da deposição. Referente a inflexão da curva (5) esta pode estar relacionada ao aumento da temperatura, devido ao aumento da massa fundida entre o material depositado e o material de base nos instantes finais na formação do ponto de solda.

5.11.1.1 Análise comparativa da energia elétrica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapa sem revestimento:

A Figura 5.54 apresenta a comparação da energia elétrica de soldagem, através dos parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento. Nota-se que a energia elétrica total referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura (AMSW) foi de 909J e de 2113J para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), ou seja, apresentou-se maior em 132,45% se comparada ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Este resultado está relacionado com a maior concentração de energia térmica em uma área predeterminada, executada através da deposição a laser, bem como a maior resistividade elétrica e menor condutividade térmica do material depositado se comparado ao material de base, conforme apresentado no item 4.2.2. Estes fatos resultam em menores perdas e maior eficiência na geração de energia via calor durante a soldagem.

Figura 5.54: Comparação da energia elétrica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento de zinco.

5.11.1.2 Análise comparativa do comportamento da força entre os eletrodos em relação ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapa sem revestimento:

A Figura 5.55 mostra a comparação do comportamento da força entre os eletrodos, através dos parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento. Pode-se observar que o gráfico apresenta o comportamento da força (versus tempo) de toda a sequência da soldagem, ou seja, a estabilização da força (1), o comportamento da força durante a passagem da corrente elétrica (2), e a força para solidificação ou resfriamento do ponto de solda (3).

Figura 5.55: Comparação do comportamento da força entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa sem revestimento de zinco

Em relação ao comportamento da força entre os eletrodos durante a passagem da corrente elétrica pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW), observou-se uma força de expansão térmica (2) que foi de 220 kgf para 279 kgf, ou seja, um aumento de 26,82%. Este fato é devido a fusão entre as chapas, o metal no estado líquido apresenta uma expansão volumétrica maior que no estado sólido. Em contrapartida, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva, houve uma diminuição da força entre os eletrodos de 110 kgf para 28 kgf durante a passagem da corrente (2), isto é, uma diminuição de 74,54%. Uma possível explicação para este resultado é o colapso instantâneo da deposição durante a passagem da corrente, que por sua vez proporciona uma perda parcial do contato dos eletrodos com as superfícies das chapas.

5.11.2 Análise comparativa da resistência dinâmica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapa com revestimento de zinco:

A Figura 5.56 mostra a comparação da resistência dinâmica, empregando os parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.

Figura 5.56: Resistência dinâmica do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e do processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.

Nota-se na Figura 5.56 que a resistência dinâmica inicial da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) apresentou-se maior em 15,2% se comparada com o processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Como descrito anteriormente no item 5.11.1, este fato é devido a maior resistividade elétrica do material da deposição e também a menor área de passagem da corrente se comparada ao processo de soldagem a ponto convencional. Pode-se observar também que o comportamento da resistência dinâmica para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento

de zinco foi conforme o esperado [40,127], isto é, houve uma queda inicial da resistência elétrica devido a fragmentação de óxidos e ao aumento da área de contato (1) através do colapso das rugosidades nas interfaces das chapas. Na sequência, houve um pequeno aumento da resistência dinâmica por causa do aumento da temperatura (2). Seguido por uma pequena queda na resistência dinâmica (3). Esta pequena queda está relacionada com a volatilização do zinco. Após a volatilização do zinco, os picos e vales da rugosidade do material de base se encontram e acontece o colapso das mesmas. Este colapso aumenta a área de contato diminuindo a resistência dinâmica. Depois deste fato, a resistência dinâmica volta a aumentar devido ao aumento da temperatura (4). E no último estágio, ocorre uma queda da resistência dinâmica causado pelo aumento da área de contato através da penetração dos eletrodos nas superfícies das chapas (5).

Em relação a resistência dinâmica do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco (apresentado na Figura 5.56), houve uma queda da resistência dinâmica desde o início da soldagem até por volta de 40ms (6) onde ocorreu uma inflexão da curva (7). Uma possível explicação para esta queda da resistência dinâmica é o aumento da área de contato devido ao colapso da deposição. Com relação a inflexão da curva este pode estar relacionado com o aumento da temperatura devido ao aumento da massa fundida entre o material depositado e o material de base nos instantes finais na formação do ponto de solda. Logo após a inflexão da curva houve uma súbita queda da resistência dinâmica ou mais precisamente em 46ms (8). Este fato pode estar relacionado com a volatilização do zinco, conforme explicado anteriormente (estágio 3).

5.11.2.1 Análise comparativa da energia elétrica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapa com revestimento de zinco:

A Figura 5.57 apresenta a comparação da energia elétrica de soldagem, através dos parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto

utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco. Pode-se observar que a energia elétrica total referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) foi de 782J e de 2624J para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), ou seja, apresentou-se maior em 235,54% se comparada ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Com descrito anteriormente no item 5.11.1.1, este resultado é devido a maior concentração de energia térmica em uma área predeterminada, realizada através da deposição a laser, e também devido a maior resistividade elétrica e menor condutividade térmica do material depositado em relação ao material de base, conforme apresentado no item 4.2.2. Estes fatos resultam em menores perdas e maior eficiência na geração de energia via calor durante a soldagem.

Figura 5.57: Comparação da energia elétrica entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.

5.11.2.2 Análise comparativa do comportamento da força entre os eletrodos em relação ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), utilizando os parâmetros otimizados em chapa com revestimento de zinco:

A Figura 5.58 mostra a comparação do comportamento da força entre os eletrodos, através dos parâmetros otimizados, entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco.

Figura 5.58: Comparação do comportamento da força entre o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e o processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa com revestimento de zinco.

Pela análise da Figura 5.58, nota-se que o gráfico apresenta o comportamento da força (versus tempo) de toda a sequência do processo de soldagem, ou seja, a estabilização da força (1), o comportamento da força durante a passagem da corrente elétrica (2) e a força para solidificação ou resfriamento do ponto de solda (3).

Referente ao comportamento da força entre os eletrodos durante a passagem da corrente elétrica pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW), observou-se uma força de expansão térmica (2) que foi de 290 kgf para 319 kgf, ou seja, um aumento de 10%. Este fato é devido a fusão entre as chapas, pois o metal no estado líquido apresenta uma expansão volumétrica maior que no estado sólido. Por outro lado, houve uma diminuição da força entre os eletrodos de 110 kgf para 25 kgf durante a passagem da corrente (2), em relação ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), isto é, uma diminuição de 77,27%. Este resultado pode estar relacionado ao colapso instantâneo da deposição durante a passagem da corrente, ocasionando uma perda parcial do contato dos eletrodos com as superfícies das chapas.

5.11.3 Análise comparativa das resistências dinâmicas, através dos parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento:

A Figura 5.59 apresenta a comparação da resistência dinâmica, através dos parâmetros otimizados em chapa revestida com zinco e sem revestimento, pelo do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW).

Pela análise da Figura 5.59, observa-se que houve um comportamento semelhante das resistências dinâmicas durante a soldagem entre as chapas com revestimento de zinco e sem revestimento. Nota-se também que nos primeiros 4ms (1) houve uma queda mais acentuada da resistência dinâmica para ambas as chapas. Após este fato, as resistências dinâmicas apresentaram uma diminuição em uma taxa praticamente constante (2) até aproximadamente 40ms. Uma possível explicação para este resultado é o aumento da área de contato devido ao colapso da deposição. Logo em seguida, ocorreu uma inflexão da curva (3) para ambas as chapas, possivelmente causada pelo aumento da temperatura devido ao aumento da massa fundida entre o material depositado e o material de base nos instantes finais da formação do ponto de solda. Uma diferença significativa entre as resistências dinâmicas aconteceu por volta de

46ms (4) com uma queda súbita logo após a inflexão da curva referente a soldagem em chapa com revestimento de zinco. Este fato pode estar relacionado com a volatilização do zinco, conforme descrito anteriormente no estágio (3) do item 5.3.2. Pode-se observar também que a resistência dinâmica em chapa com revestimento de zinco apresentou-se menor em média 12,72%. Este resultado está relacionado com a menor resistividade elétrica do zinco.

Figura 5.59: Resistências dinâmicas do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento.

5.11.3.1 Análise comparativa da energia elétrica, através dos parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento:

A Figura 5.60 mostra a comparação da energia elétrica, através dos parâmetros otimizados, em chapas revestidas com zinco e sem revestimento pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Pode-se observar que a energia elétrica total referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva, em chapa sem revestimento de zinco, apresentou-se maior em 16,24% (s/ zinco = 909J e c/ zinco = 782J). Este

resultado está relacionado a menor resistência a passagem da corrente elétrica do revestimento de zinco.

Figura 5.60: Comparação de energia elétrica do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento.

5.11.3.2 Análise comparativa da força entre os eletrodos, através dos parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento:

A Figura 5.61 mostra a comparação do comportamento da força entre os eletrodos, através dos parâmetros otimizados, em chapa revestida com zinco e sem revestimento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Nota-se que os comportamentos das forças, tanto para chapa com revestimento de zinco quanto para chapa sem revestimento, apresentaram-se muito semelhantes em toda a sequência do processo de soldagem, ou seja, a estabilização da força (1), o comportamento da força durante a passagem da corrente elétrica (2) e a força para solidificação ou resfriamento do ponto de solda (3).

Figura 5.61: Comparação do comportamento da força do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento.

Ainda pela análise da Figura 5.61, é possível observar também que houve um comportamento muito similar no momento da passagem da corrente de soldagem (2), onde ocorreu uma diminuição da força entre os eletrodos de 110 kgf para 25 kgf (chapa com revestimento de zinco) e de 110 kgf para 28 kgf (chapa sem revestimento), isto é, uma diferença de 10,71%. Em relação a esta diminuição da força para ambas as chapas, uma possível explicação é o colapso instantâneo da deposição durante a passagem da corrente (2) na qual permite uma perda parcial do contato dos eletrodos com as superfícies das chapas. Já em relação a diferença de 10,71%, esta pode estar relacionada com as maiores alturas encontradas nas deposições em chapa revestida com zinco (em média >25,92%).

5.12 Análise dos ensaios de corrosão em névoa salina:

Os ensaios de corrosão em névoa salina foram executados em amostras soldadas pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) e também a título de comparação pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento. Estas amostras foram pintadas de acordo com o processo de pintura de uma montadora de veículos. Estes ensaios tiveram duração total de 60 ciclos (60 dias), as observações e análises ocorreram a cada 15 ciclos, conforme mostrado no item 4.14. No final dos 60 ciclos não foi observado corrosão em nenhum ponto de solda, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), conforme apresenta a Figura 5.62.

Figura 5.62: Exemplos de amostras referente aos ensaios de corrosão em névoa salina após 60 ciclos (60 dias): soldagem a ponto convencional (RSW) e soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW).

6. CONCLUSÕES:

Com base nos materiais utilizados, experimentos realizados e nos resultados obtidos, é possível concluir que:

1. De acordo com os dados das dimensões geométricas da deposição, em média (tanto o seu diâmetro quanto a sua altura) apresentaram-se dentro das tolerâncias predeterminadas pelo desenho, é possível concluir que a tecnologia de manufatura aditiva (deposição a laser utilizando pó metálico) é eficiente para o processo de soldagem a ponto AMSW.
2. A diluição na zona fundida (ZF) do ponto de solda entre o material depositado e o material de base, através dos parâmetros otimizados, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) em chapa revestida com zinco e sem revestimento apresentou-se em 68,73% e 79,83%, respectivamente, devido a elevada taxa de diluição é possível concluir que este processo de soldagem a ponto (AMSW) é por fusão e pressão.
3. Os tempos de soldagem em relação aos parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, apresentaram-se maiores em 275% para ambas as chapas se comparados aos tempos dos parâmetros otimizados referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW). Este resultado está relacionado com a maior concentração de energia em uma área predeterminada, executada através da deposição a laser, assim como devido a maior resistividade elétrica (aprox. > 4,6 vezes) e menor condutividade térmica (aprox. < 3,2 vezes) do material depositado em comparação ao material de base, pode-se concluir que estes fatos resultam em menores perdas e maior eficiência na geração de energia via calor para a formação do ponto de solda (aprovado conforme norma) se comparado ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW).
4. As forças entre os eletrodos referente aos parâmetros otimizados, pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW) em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, apresentaram-se maiores 163,6% e 100%,

respectivamente, em comparação as forças entre os eletrodos do processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), é possível concluir que este resultado está relacionado com a maior concentração da força em uma menor área predeterminada realizada através da deposição.

5. Os diagramas de soldabilidade para ambas as chapas (com revestimento de zinco e sem revestimento), referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentaram-se iguais, ou seja, com os mesmos limites máximos e mínimos, assim como com os mesmos parâmetros otimizados. É possível concluir que independente da espessura e revestimento do material de base a ser soldado, as principais variáveis para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) são: a composição química e a geometria da deposição.
6. A tensão máxima de tração por cisalhamento, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, apresentou-se maior em 34,63% e 45,72%, respectivamente, em comparação a tensão máxima de tração por cisalhamento pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Este resultado está relacionado com a menor ZAC e também pela ausência de indentação do ponto de solda executado através do processo de soldagem AMSW, pode-se concluir que o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em condições otimizadas, possui maior resistência em solicitação estática de tração por cisalhamento se comparada ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW).
7. A tensão máxima de tração com chapas cruzadas, referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, apresentou-se maior em 29,02% e 2,64%, respectivamente, em comparação a tensão máxima de tração com chapas cruzadas pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Do mesmo modo que a tensão de tração por cisalhamento, este resultado está relacionado com a menor ZAC e também pela ausência de indentação do ponto de solda executado através do processo de soldagem AMSW, é possível concluir que o

processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em condições otimizadas, possui maior resistência em solicitação estática perpendicular ao ponto de solda se comparada ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW).

8. A tensão máxima de tração por deslocamento (*pull test*), referente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, apresentou-se maior em 121,9% e 35,58%, respectivamente, em comparação a tensão máxima de tração por deslocamento pelo processo de soldagem a ponto convencional (RSW). Da mesma maneira que a tensão por cisalhamento, bem como em chapas cruzadas (tensão perpendicular ao ponto), este resultado está relacionado com a menor ZAC e também pela ausência de indentação do ponto de solda executado através do processo de soldagem AMSW, pode-se concluir que o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em condições otimizadas, possui maior resistência em solicitação estática por deslocamento se comparada ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW).
9. Os ensaios de fadiga em relação ao regime de baixo ciclo ($< 10^5$ = alto nível de carregamento) não apresentaram diferenças significativas referente ao número de ciclos até a falha entre os dois processos de soldagem (AMSW e RSW), tanto para chapa revestida com zinco como para chapa sem revestimento. Em contrapartida, os ensaios de fadiga referente ao regime de alto ciclo ($> 10^5$ = baixo nível de carregamento) para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) mostraram-se ligeiramente maiores em 28,82% e 10,21% se comparado ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), tanto para chapa revestida com zinco como para chapa sem revestimento, respectivamente. Devido ao fato de que todas as amostras obtiveram sua fratura na ZAC para ambos processos de soldagem e para ambas as chapas, é possível concluir que este resultado está relacionado com a menor magnitude da profundidade de indentação e menor zona afetada pelo calor (ZAC) encontrada no processo de soldagem AMSW. É possível notar também que para ambos os processos de soldagem (RSW e AMSW) e para ambas as chapas não foi observado falha para o fator de

carga de 0,2 (20% da carga máxima de tração por cisalhamento) até um número de ciclos de 10^7 , pode-se concluir também que não há diferença significativa no limite de fadiga para ambos os processos de soldagem a ponto.

10. As resistências dinâmicas, através dos parâmetros otimizados, em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentaram comportamentos semelhantes durante a soldagem, é possível concluir que o comportamento da resistência dinâmica para este processo de soldagem é dependente da geometria e da composição química da deposição.
11. A energia gasta de soldagem, através dos parâmetros otimizados, em relação ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, apresentou-se maior em 235,54% e 132,45%, respectivamente, se comparada ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), pode-se concluir que o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), em condições otimizadas, é mais eficiente na geração de energia via calor se comparado ao processo de soldagem a ponto convencional (RSW), este resultado está relacionado com a maior resistividade elétrica do material depositado (aproximadamente $> 4,6$ vezes), assim como pela sua menor condutividade térmica (aproximadamente $< 3,2$ vezes) em comparação ao material de base.
12. O comportamento da força entre os eletrodos durante todo o processo de soldagem, através dos parâmetros otimizados, em chapas revestidas com zinco e sem revestimento, pelo processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW), apresentou-se praticamente igual para ambas as chapas. Durante a passagem da corrente não foi observado força de expansão térmica, em contrapartida, houve uma queda acentuada da força, uma possível explicação para este fato é o colapso instantâneo da deposição durante a passagem da corrente, na qual permite uma perda parcial do contato dos eletrodos com as superfícies das chapas, é possível concluir que esta característica é inerente ao processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW).

13. A indentação ou marca termomecânica na superfície da chapa (sem deposição), referente ao processo de soldagem utilizando manufatura aditiva (AMSW), através dos parâmetros otimizados, apresentaram-se praticamente imperceptíveis a olho nu, é possível concluir que este processo de soldagem a ponto (em relação a estética) pode ser utilizado em superfície aparente.
14. Nos ensaios de corrosão em névoa salina não se observou corrosão em nenhum ponto de solda, tanto para o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) quanto para o processo de soldagem a ponto convencional (RSW), em chapas revestidas com zinco e sem revestimento; pode-se concluir que, em relação a corrosão, este processo de soldagem a ponto (AMSW) pode ser utilizado em carroceria de veículos.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS:

1. Estudar o comportamento da soldagem utilizando diferentes materiais de deposição, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
2. Estudar o comportamento da soldagem utilizando diferentes geometrias de deposição, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
3. Estudar a soldabilidade com diferentes espessuras, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
4. Estudar a soldabilidade com materiais dissimilares, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
5. Estudar o comportamento da solda em temperaturas criogênicas, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
6. Estudar o comportamento da solda em temperaturas elevadas, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
7. Estudar a soldabilidade em chapas de alumínio, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
8. Estudar a soldabilidade em chapas de aço Inox, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
9. Estudar a soldabilidade em chapas estampadas a quente, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
10. Estudar o comportamento da soldagem utilizando mais de duas chapas, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
11. Estudar a influência dos parâmetros na estética da superfície, através da soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMWS).
12. Estudar o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) com deposição em arame com arco elétrico.
13. Estudar o processo de soldagem a ponto utilizando manufatura aditiva (AMSW) com deposição em arame com LASER.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. AWS WELDING HANDBOOK - Welding science and technology. Vol. 1, 9º Ed. Miami: American Welding Society, 2001. 918 p.
2. ZIEDAS, S; TATINI, I. Coleção Tecnologia SENAI: Soldagem. 1º Ed. São Paulo: SENAI, 1997. 553 p.
3. POURANVARI, M. Susceptibility to interfacial failure mode in similar and dissimilar resistance spot welds of DP600 dual phase steel and low carbon steel during cross-tension and tensile-shear loading conditions. *Materials Science and Engineering A*, v. 546, p. 129–138, March, 2012.
4. MARTÍN, O. et al. Quality assessment of resistance spot welding joints of AISI 304 stainless steel based on elastic nets. *Materials Science and Engineering A*, v. 676, p. 173–181, August, 2016.
5. ANIJDNA, S. et al. Optimization of spot welding process parameters in dissimilar joint of dual phase steel DP600 and AISI 304 stainless steel to achieve the highest level of shear-tensile strength. *Materials Science and Engineering A*, v. 726, p.120–125, April, 2018.
6. ASLANLAR, S. et al. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. *Journal Material and Design, Turkey*, v. 29, p. 1427-1431, October, 2007.
7. BRAUSER, S. et al. Deformation behaviour of spot-welded high strength steels for automotive applications. *Materials Science and Engineering A*, v. 527, p. 7099–7108, July, 2010.
8. EMRE, H. E.; KAÇAR, R. Resistance Spot Weldability of Galvanize Coated and Uncoated TRIP Steels. *Metals*, v. 6, p. 299-309, November, 2016.
9. SPENA, P. R.; ROSSI, S.; WURZER, R. Effects of Welding Parameters on Strength and Corrosion Behavior of Dissimilar Galvanized Q&P and TRIP Spot Welds. *Metals*, v. 7, p. 534-548, December, 2017.
10. ZHANG, H; SENKARA, J. Resistance Welding: Fundamentals and Applications. 1º Ed. London: Taylor & Francis, 2006. 431 p.
11. SPENA, P. et al. Weldability and Monitoring of Resistance Spot Welding of Q&P and TRIP Steels. *Metals*, v. 6, p. 270-285, November, 2016.

12. WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY. 1º Ed. New Delhi: New Age International Publishers, 2007. 278 p.
13. MARQUES, P. V.; MODENESI, J. Q.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p.
14. CALLISTER Jr., W. D. Materials Science and Engineering an Introduction. 6º Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 820 p.
15. OKUMURA, T; TANIGUCHI, C. Engenharia de Soldagem e Aplicações. 1º Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 457 p.
16. CARY, H. B. Modern Welding Technology. 1º Ed. Columbus: Prentice Hall, 1989. 786 p.
17. WAINER, E. et al. Soldagem. 14º Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais (ABM), 1979. 720 p.
18. BRANDI, S. D. Classificação dos processos de soldagem. In: WAINER, E. *et al.* Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. p.1 - 8.
19. AWS WELDING HANDBOOK - Welding processes. Vol. 3, 9º Ed. Miami: American Welding Society, 2007. 624 p.
20. BRANDI, S. D. Soldagem por Resistência. In: WAINER, E. *et al.* Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. p. 217 - 242.
21. REHDER, H. Soldagem. 14º Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais (ABM), 1979. p. 657 - 720.
22. THOMSON, E. Direct Electric Welding Machine. Patent: US 385386 A, USA, July 3, 1888.
23. AWS WELDING HANDBOOK - Welding and Brazing. Resistance Welding. Vol. 6, 9º Ed. Miami: American Welding Society, 1983. p. 468 - 493.
24. RAMAZANI, A. et al. Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded DP600 Steel. Metals, v. 5, p. 1704-1716, September, 2015.
25. MEADOWCROFT, J. W. Resistance Welding Process. Welding Journal, p. 538 - 539, June, 1945.

26. POURANVARI, M.; MARASHI, S. P. H. Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. Controlling factors. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, p. 8337–8343, August, 2011.
27. BUTLER, J. B. Some Conclusions Regarding Resistance Welding and Statistical Quality Control. *Welding Journal*, p. 909 - 914, Oct. 1945.
28. LANE, C. T. et al. Cinematography of Resistance Spot Welding of Galvanized Steel Sheet. *Welding Journal*, p. 260 - 265, Sept. 1987.
29. TURNAGE, S. et al. Influence of variable processing conditions on the quasi-static and dynamic behaviors of resistance spot welded aluminum 6061-T6 sheets. *Materials Science and Engineering A*, v. 724, p. 509–517, March, 2018.
30. HWANG, I. et al. Prediction of Resistance Spot Weld Quality of 780 MPa Grade Steel Using Adaptive Resonance Theory Artificial Neural Networks. *Metals*, v. 8, p. 453-466, May, 2018.
31. YU, J. Adaptive Resistance Spot Welding Process that Reduces the Shunting Effect for Automotive High-Strength Steels. *Metals*, v. 8, p. 775-795, August, 2018.
32. JOHNSON, I. W. Spot Welding of Carbon Steel. *Welding Journal: Research Supplement*, p. 89 - 96, March, 1960.
33. FURLANETTO, V. Desenvolvimento e Instrumentação de um Cabeçote de Soldagem a Ponto por Resistência Elétrica para Aplicação em Condições Industriais. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (USP), 2014. 280 p.
34. THOMSON, E. Cooling Spot Welding Electrode. Patent: US 1256951, USA, May 29, 1917.
35. ASLANLAR, S. et al. Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromed steel sheets in electrical resistance spot welding. *Journal Material and Design, Turkey*, v. 28, p. 2-7, Dec. 2007.
36. ASLANLAR, S. The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. *Journal Materials and Design, Turkey*, v.27, p.125-131, Nov. 2006.
37. FUKUMOTO, S. et al. Small-scale resistance spot welding of austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, v.492, p. 243–249, May, 2008.

38. KELLER, F. J. et.al. Física. 1º Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1999. 615 p.
39. HAN, Z. et al. Resistance Spot Welding: A Heat Transfer Study. Research Supplement, p. 363 – 371, Set. 1989.
40. BATISTA, M. Estudo Comparativo da Soldabilidade de Chapas para Indústria Automotiva utilizando dois Equipamentos de Soldagem a Ponto por Resistência. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), 2011. 194 p.
41. FUKAMIZU, A. S. A influência da refrigeração do eletrodo na soldagem a ponto por resistência em chapas de aço carbono revestidas de zinco. Monografia - Especialização em Engenharia de Soldagem, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2014. 112 p.
42. HAN, J.H.; SHAN, P.; HU, SH. S. Contact analysis of fractal surfaces in earlier stage of resistance spot welding. Mater. Sci. Eng. A 2006, 436, 204-211.
43. BRAUNOVIC, M. et. al. Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology. 1º Ed. New York: Taylor & Francis, 2006. 597 p.
44. MACHADO, I. G. Soldagem e Técnicas Conexas: Processos. 1º Ed. Porto Alegre: UFRGS, 1996. 477 p.
45. DICKINSON, D. W.; FRANKLIN. J.E.; STANYA, A. Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring. Welding Research Council, New York, v. 59, n.6, p. 170-176, Jun. 1980.
46. FURLANETTO, V., BATISTA, M., BATALHA, G. F. Burned Zinc During Welding Nugget Formation. AMPT 2011, Turquia: Istanbul, July, 2011.
47. STOCCO, D. Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), 2010. 110 p.
48. SENKARA, J., ZHANG, H., HU, S. J. Expulsion Prediction in Resistance Spot Welding. Welding Jornal, vol. 83, n.4, p. 123, 2004.
49. PRIGOGINE, I., DEFAY, R. Chemical Thermodynamics. 1º Ed. London (UK): Longmans, 1954. 543 p.
50. NEWTON, C. J., et. al. The Fundamentals of Resistance Spot Welding aluminum. In Proc. AWS Sheet Metal Weld. Conf. VI, Detroit, Paper: n. E2, 1994.

51. MARRA, K. M. Estudo Comparativo da Soldabilidade a Ponto de Um Aço Laminado a Frio e de Alta Resistência Mecânica em Relação a Outro ao Carbono. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 1992.
52. KOUWENHOVEN, W. B. et. al. The Spreading Resistance of Contacts. Welding Journal, p 512 - 520, Oct. 1950.
53. GEDEON, S. A., EDGAR, T. W. Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds. Welding Journal, p. 378 - 385, Dec. 1987.
54. NAKAMURA, E. L., BATISTA, M., FURLANETTO, V., BRANDI, S. D. Estudo comparativo entre dois eletrodos com materiais diferentes na soldagem a ponto por resistência. In: 68º Congresso Internacional - ABM, Belo Horizonte. Associação Brasileira de Metalurgia, 2013. 14 p.
55. LUDWIGSON, D. C. et. al. The Effect, of Composition on the Resistivity of Carbon Steel Sheet. Metallurgical Transaction, vol. 2, p. 3500 - 3501, Dec. 1971.
56. CHANDEL, R. S., et. al. Resistance Spot Welding of Mild Steels – Review. Indian Welding Journal, p. 1 - 7, Jan. 1985.
57. OLIVEIRA, R. D. Estudo da Influência dos Parâmetros na Soldagem a Ponto por Resistência em Chapas de Aço PHS “Press Hardened Steel”. Monografia - Especialização em Engenharia de Soldagem, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2015. 72 p.
58. ZAMPIERI, M., BATISTA, M., BRANDI, D. B. Estudo da Otimização dos Parâmetros no Processo de Soldagem a Ponto por Resistência em Chapas de Aço utilizada no Setor Automotivo. In: Congresso Nacional de Soldagem - XLII Consolda, Belo Horizonte. Associação Brasileira de Soldagem, 2016. 14 p.
59. HEUREUX, G. E., BELOTTE, E. J. Soldadura Por Resistencia. 1º Ed. Barcelona: Hispano Europeia, 1968. p. 40 - 201.
60. VENCEGUERRA, L., BATISTA, M., FURLANETTO, V., BRANDI, S. D. O comportamento da resistência dinâmica com relação à deformação do eletrodo na soldagem a ponto por resistência. In: 68º Congresso Internacional - ABM, Belo Horizonte. Associação Brasileira de Metalurgia, 2013. 15 p.

61. OUELLETTE, A. Analysis of the effect of thermal gradients on the real-time 2D imaging of the spot weld process. Dissertation of Master of Science, University of Windsor, Ontario - Canada, 2015. 102 p.
62. MASATSUME, K. et. al. Degradation mechanism of electrode tip during alternate resistance spot welding of zinc-coated galvanized and uncoated steel sheets. *Welding International*, p. 770 -778, Oct. 2013.
63. SANTOS, R. V. P. Estudo comparativo de soldabilidade utilizando eletrodos com diferentes geometrias de contato na soldagem a ponto por resistência. Monografia - Especialização em Engenharia de Soldagem, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2013. 134 p.
64. GOULD, J. E. An Examination of Nugget Development During Spot Welding, Using Both Experimental and Analytical Techniques. *Welding Journal*, p. 1 -10, 1987.
65. ZHANG, X. Q., CHEN, G. L., ZHANG, Y. S. Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels. *Journal Materials & Design, China*, V.29, p. 279 - 283, Dec. 2006.
66. BATISTA, M., FERREIRA, D., BRANDI, S. D. Estudo da influência dos parâmetros na profundidade da indentação no processo de soldagem a ponto por resistência. In: XLIII Consolda - Congresso Nacional de Soldagem, Joinville - SC. Associação Brasileira de Soldagem, 2017. 10p.
67. BATISTA, M., BRANDI, S. D. Comparação entre dois equipamentos de soldagem a ponto por resistência utilizados na indústria automotiva. In: XXXVI Consolda - Congresso Nacional de Soldagem, Recife - PE. Associação Brasileira de Soldagem, 2010. 15 p.
68. PODRZAJ, P. et. al. Overview of resistance spot welding control. *Science and Technology of Welding and Joining*, V. 13, p. 215 - 224, Nov. 2008.
69. EASTERLING, K. E., Introduction to the physical metallurgy of welding. 2º Ed. Cambridge (GB): Butterworth-Heinemann, 1992. 270 p.
70. GRANJON, H. Fundamentals of welding metallurgy. 1º Ed. Abington (GB): Woodhead Publishing, 1991. 240 p.
71. SILVA, Y. F. Soldagem a ponto em aços inoxidáveis duplex UNS S32204. Monografia - Especialização em Engenharia de Soldagem, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 2013. 108 p.

72. WILLIAMS, N. T. Metallurgical Aspects of Resistance Spot Welding of Steel. British Steel Corporation: Welsh Laboratory, 1980.
73. KHAN, M.S. et. al. Welding behaviour, microstructure and mechanical properties of dissimilar resistance spot welds between galvanized HSLA 350 and DP 600 steels. Science Technology of Welding and Joining, v. 14, p. 616 - 625, June, 2009.
74. TUTAR, M.; AYDIN, H.; BAYRAM, A. Effect of Weld Current on the Microstructure and Mechanical Properties of a Resistance Spot-Welded TWIP Steel Sheet. Metals 2017, 7, 519.
75. CHEN, J.; FENG Z.; WANG, H.P.; CARLSON, B.E.; BROWN, T.; SIGLER, D. Multi-scale mechanical modeling of Al-steel resistance spot welds. Mater. Sci. Eng. A 2018, 735, 143–153.
76. SHIRMOHAMMADI, D.; MOVAHEDI, M.; POURANVARI, M. Resistance spot welding of martensitic stainless steel: Effect of initial base metal microstructure on weld microstructure and mechanical performance. Mater. Sci. Eng. A 2017, 703, 154–161.
77. DAMASCO, A. Soldagem a ponto por resistência elétrica de juntas de chapa/chapa e chapa/tubo de aço de baixo carbono com diferentes composições químicas, espessuras e revestimentos. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, 1995. 247 p.
78. KIM, E. W., EDGAR, T. W. Measurement of Transient Temperature Response During Resistance Spot Welding. Welding Journal Research Supplement, p. 303 – 311, Aug. 1989.
79. GALLAGHER, M. Electrode Wear in the Resistance Spot Welding of Galvanized Steel Sheet. Dissertation of Master of Science, University of Windsor, Ontario - Canada, 2003. 114 p.
80. EDWARDS, E. R. Inspection of Welded. Welding Brazing and Soldering. Metals Handbook, Vol. 6, 10o Ed. American Society of Metals, 1998. p. 2602-2688.
81. GARCIA, A.; SPIM, J.A; SANTOS, C, A. Ensaio dos Materiais. Campinas: LTC, 1999. 247 p.
82. SOUZA, A. S. Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos teóricos e práticos. 5º Ed. São Paulo: Blucher, 1982. 286 p.

83. NAKANO, R. K. A influência da taxa de deformação na falha de união por solda a ponto. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), 2005. 75 p.
84. DENISOV, A. Modeling and Optimization of Non-Phased 2D Ultrasonic Arrays. Ph.D. Thesis, University of Windsor - Canada, 2002.
85. HUIN, T. et al. Investigation of the Failure of Advanced High Strength Steels Heterogeneous Spot Welds. *Metals*, v. 6, p. 111-130, May, 2016.
86. SEGERSTARK, A. Additive Manufacturing using Alloy 718 Powder: Influence of Laser Metal Deposition Process Parameters on Microstructural Characteristics. Ph.D. Thesis, University West - Sweden, 2015. 97 p.
87. VOLPATO, N. et. al. Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da impressão 3D. 1º Ed. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.
88. WAHLSTROM, T., SAHLSTROM, J. Additive Manufacturing in Production: For the Automotive Industry. Master Thesis, Faculty of Engineering LTH, Lund University – Sweden, 2016. 140 p.
89. TRUMPF, Portal. Additive Manufacturing. Disponível em: <https://www.trumpf.com/en_SE/applications/additive-manufacturing/>. Acesso em 15 de agosto de 2017.
90. RALF, C. et. al. Introduction to Additive Manufacturing Technology: A guide for Designers and Engineers. 1º Ed. London – UK: European Additive Manufacturing Group (EPMA), 2013. 41 p.
91. ANTONYSAMY, A. A. Microstructure, texture and mechanical property evolution during additive manufacturing of Ti6Al4V alloy for aerospace applications. Ph.D. Thesis, University of Manchester, 2012. 315 p.
92. SAPATE, K. D. et. al. Metal Fabrication by Additive Manufacturing. *International Journal of Current Engineering and Technology*, V.7, p.9-14, Feb. 2017.
93. KOVACEVIC, R., HU, D. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, V.43, p.51-60, August 2002.
94. BOURELL, D. L. et. al. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking

Ahead. RapidTech: US -Turkey Workshop on Rapid Technologies, p. 5 - 11, Sept. 2009.

95. FRAZIER, E. W. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, V.26, p.1917-1928, June 2014.
96. SCOTT, J. et. al. Additive Manufacturing: Status and Opportunities. Science Technology Policy Institute (IDA), Washington - DC, p.1-29, March 2012.
97. FAHAD, M., HOPKINSON, N. A New Benchmarking Part for Evaluating the Accuracy and Repeatability of Additive Manufacturing (AM) Processes. In: 2nd International Congress on Mechanical Production and Automobile Engineering 2012, Singapore, April 2012. p. 234-238.
98. VOLPATO, N. et. al. Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações. 1ªEd. São Paulo: Blucher, 2007. 272 p.
99. MELO, L. Análise e Qualificação da Distribuição de Partículas em Fluxo de Pó Metálico para o Processo de Deposição de Metais a Laser. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2015. 134 p.
100. ARRIZUBIETA, J. I. et. al. Intelligent nozzle design for the Laser Metal Deposition process in the Industry 4.0. *Science Direct – Procedia Manufacturing*, V.13, p.1237-1244, June 2017.
101. SCHNEIDER, M. F. Laser Cladding with Powder: Effect of some machining parameters on clad properties. Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede - Netherlands, 1998. 181 p.
102. LUDOVICO, A. D., SABINA, L. C. New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems. 1ª Ed. Croatia: Sciyo, 2010. 444 p.
103. GUTJAHR, J. Desenvolvimento e Implementação de um Sistema CNC, Modular e Reconfigurável para Processos Laser. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2016. 196 p.
104. TABERNEIRO, I. et. al. Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, V.210, p.2125-2134, Jan. 2010.

105. KLOCKE, F. et. al. State-of-the-art Laser Additive Manufacturing for Hot-work Tool Steels. Science Direct – Procedia CIRP, V.63, p.58-63, March 2017.
106. SOUTO, H. I. M. Laser Cladding: Sua aplicação à deposição de revestimentos em lâminas de destrocadores de madeira. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia, Porto - Portugal, 2013. 88 p.
107. AMINE, T; NEWKIRK, J. W; LIOU, F. An investigation of the effect of direct metal deposition parameters on the characteristics of the deposited layers. Science Direct – Case Studies in Thermal Engineering, V.3, p.21-34, Feb. 2014.
108. YOUNG, M. Óptica e Laser. 1º Ed. São Paulo: EDUSP - Universidade de São Paulo, 1998. 439 p.
109. KAIERLE, S. et. al. Review on Laser Deposition Welding: From Micro to Macro. Science Direct - Physics Procedia, V.39, p. 336-345, Oct. 2102.
110. KUBIAK, M. et. al. Modelling of laser beam heat source based on experimental research of Yb:YAG laser power distribution. International Journal of Heat and Mass Transfer, V.83, p. 679-689, Jan. 2015.
111. WU, J. Effect of beam profile on heat and mass transfer in filler powder laser welding. Journal of Materials Processing Tech; V.258, p. 47-57, March 2018.
112. GUSEV, D. S; LYUKHTER, A. B. Influence of technological parameters on the geometry of single-track laser clad nickel alloy on grey cast iron substrate. Journal of Physics: III International Conference on Laser and Plasma Researches and Technologies, V.941, p. 1-9, Feb. 2017.
113. GU, D. Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials. 1º Ed. Nanjing - China: Springer, 2015. 311 p.
114. MAZUMBER, J. et. al. Laser aided direct deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability. Materials Science and Engineering A, V.509, p. 98-104, Jan. 2009.
115. SHAH, K. et. al. Effects of Melt Pool Variables and Process Parameters in Laser Direct Metal Deposition of Aerospace Alloys. Materials and Manufacturing Processes, V.25, p. 1372-1380, March 2010.

116. KOVALEV, O. B. et. al. Numerical investigation of gas-disperse jet flow created by coaxial nozzles during the laser direct material deposition. *Journal of Materials Processing Tech*, V.249, p. 118-127, June 2017.
117. MAHAMOOD, R. M. et. al. Characterizing the Effect of Processing Parameters on the Porosity of Laser Deposited Titanium Alloy Powder. *Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists*, V. 2, p. 978-988, March 2014.
118. OCYLOK, S. et. al. Correlations of melt pool geometry and process parameters during laser metal deposition by coaxial process monitoring. *Science Direct: Physics Procedia*, V.56, p. 228-238, Aug. 2014.
119. OGUNLANA, M. O. et. al. Influence of Process Parameters on Porosity Behaviour of Laser Metal Deposition Titanium composites. In: *Proceeding of the World Congress on Engineering and Computer Science Vol.II*, San Francisco – USA, October 2016
120. CHIAVERINI, V. *Metalurgia do Pó*. 4º Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 2001. 326 p.
121. DUNNING, J. S., DOAN, R. C. Microstructural characteristics and gas content of rapidly solidified powders. *Journal of Materials Science*, V.29, p. 4268-4272, Febr. 1994.
122. MARKUSSON, L. Powder Characterization for Additive Manufacturing Processes. Master Thesis, Lulea University of Technology, Lulea – Sweden, 2017. 117 p.
123. AWS B4.0:2007. Standard Methods for Mechanical Testing of Welds. 7º Ed. Miami - USA: American Welding Society - AWS, 2007. 136 p.
124. RWMA - Resistance Welding Manual. 4º Ed. Miami - USA: Resistance Welder Manufactures Association, 2003. 443 p.
125. MODENESI, P. J. *Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis*. 1º Ed. São Paulo: SENAI-SP, 2001. 100 p.
126. NIELSEN, C.V. et. al. Modeling of Thermo Electro Mechanical Manufacturing Processes. Springer, London - UK, 2013. 120p.
127. BATISTA, M., BRANDI, S.D. Use of dynamic resistance and dynamic energy to compare two resistance spot welding equipment for automotive industry in zinc coated and uncoated sheets. *American Journal of Engineering Research*, V. 2, p. 79-93, Aug. 2013.