CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI
CARLOS EDUARDO CIARDI BARBOSA

SOLDA POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA A PONTO EM CHAPAS
AUTOMOTIVAS DE AÇO DE BAIXO TEOR DE CARBONO

São Paulo

2021

CARLOS EDUARDO CIARDI BARBOSA

**SOLDA POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA A PONTO EM CHAPAS
AUTOMOTIVAS DE AÇO DE BAIXO TEOR DE CARBONO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Centro Universitário da FEI, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do
Título de Mestre em Engenharia
Mecânica, orientada pelo Prof. Dr. Sérgio
Delijaicov.

São Paulo

2021

Barbosa, Carlos Eduardo.

SOLDA POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA A PONTO EM
CHAPAS AUTOMOTIVAS DE AÇO DE BAIXO TEOR DE
CARBONO / Carlos Eduardo Barbosa. São Paulo, 2021.
160 p. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Delijaicov.

1. Solda a Ponto. 2. Solda por atrito e mistura. 3. Chapas Automotiva.
4. FSSW. I. Delijaicov, Sérgio, orient. II. Título.

Aluno: Carlos Eduardo Ciardi Barbosa

Matrícula: 219305-0

Título do Trabalho: SOLDA POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA A PONTO EM CHAPAS AUTOMOTIVAS DE AÇO DE BAIXO TEOR DE CARBONO.

Área de Concentração: Materiais e Processos

Orientador: Prof. Dr. Sergio Delijaicov

Data da realização da defesa: 05/11/2021

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

A banca constituída pelos professores Adalto de Farias, Márcio Batista e Sergio Delijaicov, consideraram o candidato Carlos Eduardo Ciardi Barbosa aprovado.

São Bernardo do Campo, / / .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sergio Delijaicov

Ass.: _____

Prof. Dr. Adalto de Farias

Ass.: _____

Prof. Dr. Márcio Batista

Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA
EXAMINADORA

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jorge Eloi Barbosa Junior e Alessandra Kally Ciardi, pelo apoio e incentivo nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Sérgio Delijaicov, por acreditar no meu potencial e estar sempre presente orientado e ensinando em todos os momentos.

Ao Prof. Gustavo Donato, que me mostrou a importância do entendimento acadêmico e a necessidade de compreender os detalhes e complexidade nos assuntos científicos.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco, que de forma coesa e clara sempre me orientou e esclareceu minhas dúvidas.

A minha noiva, Mariana Costa da Silva, pela paciência e compreensão nos momentos de ausência.

Ao CLM Centro de Laboratórios Mecânicos da FEI, pela ajuda e atenção no desenvolvimento do ferramental.

Ao André do IPT, pelo comprometimento e apoio na execução do trabalho.

Ao Jose Verissimo, do Laboratório de materiais SENAI Mario Amato, pelo suporte e ajuda técnica.

Ao Dr. Marcio Batista que me incentivou e apresentou a área acadêmica.

Ao professor Dr. Adalto de Farias pelas contribuições e avaliações sobre o estudo.

RESUMO

Os processos de solda na manufatura automobilística estão em constante aprimoramento e um fator determinante é necessidade de minimizar custos mantendo a qualidade das juntas sobrepostas no processo de armação. Neste contexto a soldagem por fricção e mistura mecânica a ponto (Friction Stir Spot Welding - FSSW), decorrente do processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (Friction Stir Welding - FSW) é um processo ainda pouco aplicado neste meio, principalmente em juntas de aço. Inventado e patentado em 1991 por Thomas, W.M. et al., no The Weld Institute (TWI) do Reino Unido, o processo FSW utiliza de uma técnica extremamente prática, que consiste em unir materiais no estado sólido por atrito, através de altas taxas de deformação plástica. Friction Stir Spot Welding é um processo versátil, sustentável e com baixo consumo de energia, possibilitando assim grandes ganhos econômicos na sua aplicação. O presente trabalho investigou a utilização deste processo em chapas de baixo teor de carbono, com espessura de 0,7 milímetros. Devido as particularidades do processo foi desenvolvido um perfil de ferramenta diferenciado visando ganho de resistência e sua aplicabilidade. Para isso foi avaliando a influência dos parâmetros do processo como rotação do pino, profundidade de penetração e o tempo de permanência, correlacionando os resultados da resistência máxima de cisalhamento, com a força axial aplicada, o torque utilizado, a potência, a temperatura nas zonas termicamente afetadas e a microestrutura obtida no corpo de prova após o processo de solda. Os resultados mostraram uma solda de alta qualidade e resistência para a aplicação do perfil da ferramenta no material selecionado. Os valores médios de força máxima de cisalhamento obtidos foram de 7,48 kN, com desvio padrão de 0,98 kN. As variáveis de profundidade de penetração e rotação mostraram grande influência na obtenção e qualidade da junta, influenciando diretamente na temperatura durante o processo. O tempo de permanência não mostrou significância estatística como variável sensível neste estudo. Dentro da janela de parâmetros selecionados, os valores de rotação 1700 rpm e penetração 0,97 milímetros, levaram às temperaturas mais elevadas. Os valores otimizados sugeridos para aplicação são a rotação de 1400 rpm, penetração de 0,8 a 0,9 milímetros, tempo de permanência 3 segundos.

Palavras-chave: solda a ponto; solda por atrito e mistura; chapas automotivas; FSW; FSSW.

ABSTRACT

Welding processes in automobile manufacturing are constantly being improved and a determining factor is the need to minimize costs while maintaining the quality of overlapping joints in the frame process. In this context, friction welding and mechanical mixing at the spot (Friction Stir Spot Welding - FSSW), resulting from the process of welding by friction and mechanical mixing (Friction Stir Welding - FSW) is a process not often applied in the field, especially in joints of steel. Invented and patented in 1991 by Thomas, WM et al., at The Weld Institute (TWI) in the United Kingdom, the FSW process uses an extremely practical technique, which consists of joining materials in solid state by friction, through high rates of plastic deformation. Friction Stir Spot Welding is a versatile, sustainable process with low energy consumption, thus enabling great economic gains in its application. The present work investigated the use of this process in low-carbon plates, with a thickness of 0.7 mm. Due to the particularities of the process, a differentiated tool profile was developed to gain strength and its applicability. For this, the influence of process parameters such as pin rotation, penetration depth and residence time was evaluated, correlating the results of maximum shear strength, with the axial force applied, the torque used, the power, the temperature in the zones thermally affected and the microstructure obtained in the specimen after the welding process. The results showed a high-quality weld and strength for the application of the tool profile on the selected material. The mean values of maximum shear force obtained were 7.48 kN, with a standard deviation of 0.98. The penetration depth and rotation variables showed influence in obtaining the quality of the joint, directly influencing the temperature during the process. Time of permanence did not show statistical significance as a sensitive variable in this study. Within the selected parameter window, the values of rotation 1700 rpm and penetration 0.97 millimeters led to higher temperatures. The suggested optimized values for application are 1400 rpm rotation, 0.8 to 0.9 mm penetration, dwell time 3 seconds.

Keywords: spot welding; friction welding and mixing; automotive plates; FSW; FSSW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases do processo FSW	20
Figura 2 – Representação processo FSW configuração do material e ferramenta.....	21
Figura 3 – Ferramenta de solda linear por atrito e mistura.....	22
Figura 4 – Variações da superfície do ombro na ferramenta FSW	23
Figura 5 – Variações da superfície do pino na ferramenta FSW	23
Figura 6 – Esquema da secção transversal FSW	24
Figura 7 – Secção transversal solda FSW em uma junta de aço.	25
Figura 8 – Secção transversal solda FSW sem ZTMA.....	25
Figura 9 – Ilustração processo FSSW	26
Figura 10 – Aspecto visual e macrográfico de secção transversal por FSSW.	27
Figura 11 – Macrografia de uma secção transversal solda FSSW aço DP600.....	28
Figura 12 – Macrografia de uma secção transversal solda ponto FSSW aço TRIP	28
Figura 13 – Fluxo de material no processo FSSW	29
Figura 14 – Ilustração esquemática junta FSSW.....	30
Figura 15 – Ilustração esquemática da variante FSpW	31
Figura 16 – Dados de tensão cisalhamento em diversas juntas de Al e Mg.....	32
Figura 17 – Aparência macroscópica de uma solda FSSW com refil	32
Figura 18 – Ilustração do processo FSSW sem pinos.	33
Figura 19 – Força axial em função da rotação... ..	35
Figura 20 – Força axial em função da velocidade de penetração.. ..	36
Figura 21 – Torque, força axial e deslocamento em função do tempo.....	38
Figura 22 – Temperatura e força axial em função do tempo	38
Figura 23 – Carga máxima de cisalhamento com relação a profundidade de penetração.....	39
Figura 24 – Carga máxima de cisalhamento com relação a tempo de permanência	39
Figura 25 – Perfil de dureza ao longo da secção transversal.....	40
Figura 26 – Perfil de dureza ao longo da secção transversal ligas de alumínio... ..	41
Figura 27 – Perfil de dureza ao longo da secção aço TRIP.....	42
Figura 28 – Força máxima de cisalhamento aço TRIP com relação ao tempo de mistura.. ..	43
Figura 29 – Força máxima de cisalhamento aço de baixo teor de carbono galvanizado....	44

Figura 30 – Micrografia de solda FSSW em aço baixo carbono com galvanização	45
Figura 31 – Fluxograma de atividades	46
Figura 32 – Tabela de equivalência de normas para aços.	47
Figura 33 – Composição química aços baixo carbono	48
Figura 34 – Limites de composição química do material G5.....	48
Figura 35 – Características mecânicas NBR 5007 para material G5 RL.....	49
Figura 36 – Limites de composição química do material AISI 1006.....	49
Figura 37 – Características mecânicas AISI 1006.....	50
Figura 38 – Representação de dimensões dos Corpos de Prova.	51
Figura 39 – MTS 810 com garras hidráulicas.	52
Figura 40 – Gráfico de tensão deformação do material base.	52
Figura 41 – Ferramenta FSSW	54
Figura 42 – Representação de dimensões dos Corpos de Prova.	57
Figura 43 – Representação de dimensões da Junta Soldada.....	58
Figura 44 – Máquina CNC para soldagem de FSW.	59
Figura 45 – Haste para soldagem de FSSW.....	60
Figura 46 – Projeto base para solda FSSW.....	61
Figura 47 – Base para solda FSSW.	61
Figura 48 – Base de apoio	62
Figura 49 – Base de fixação	63
Figura 50 – Sujeitador lado direito	63
Figura 51 – Disco de sacrifício.....	64
Figura 52 – Vista ilustrativa da ferramenta durante o processo FSSW.....	65
Figura 53 – Câmera térmica FLIR T450sc.....	66
Figura 54 – Corpo de prova para microdureza.	67
Figura 55 – Corpo de prova para microdureza secção transversal	67
Figura 56 – Microdurômetro Shimadzu HMV-2.....	68
Figura 57 – Microscópio óptico Olympus BX60MF5.....	69
Figura 58 – Microscópio ZEISS Axio Scope A1.	70
Figura 59 – Microscópio Varredura Eletrônica MEV TESCAN.	71
Figura 60 – Medição da largura na interface.	72
Figura 61 – Representação esquemática ensaio tração	73
Figura 62 – Gráfico do deslocamento e força axial pelo tempo	74
Figura 63 – Gráfico do deslocamento e torque pelo tempo.....	75

Figura 64 – Gráfico deslocamento e potência pelo tempo	76
Figura 65 – Gráfico da força axial pelo tempo nos ensaios de 1,07 mm de penetração. 77	
Figura 66 – Gráfico da força axial pelo tempo com a penetração de 0,97 mm nos pontos centrais.....	78
Figura 67 – Gráfico da força axial pelo tempo com as rotações máxima e mínima.	79
Figura 68 – Gráfico da força axial pelo tempo com tempo de permanência máximo e mínimo.....	80
Figura 69 – Gráfico do torque pelo tempo com solicitação de máximo e mínimo	81
Figura 70 – Gráfico do torque pelo tempo para diferentes rotações	82
Figura 71 – Gráfico da potência pelo tempo com a rotação máxima e mínima	83
Figura 72 – Gráfico da potência pelo tempo com o tempo de permanência máximo e mínimo	83
Figura 73 – Gráfico da temperatura pelo tempo com o tempo de permanência 4 segundos.	84
Figura 74 – Gráfico da temperatura pelo tempo com rotações máxima e mínima.....	85
Figura 75 – Gráfico da temperatura pelo tempo com rotação 1500 rpm.....	86
Figura 76 – Gráfico da temperatura pelo tempo com rotação de 1700 rpm	86
Figura 77 – Gráfico da temperatura pelo tempo com rotação de 1900 rpm.....	87
Figura 78 – Gráfico da temperatura pelo tempo com rotação de 1700 nos pontos centrais.....	88
Figura 79 – Análise fatorial da força cisalhamento máxima.	90
Figura 80 – ANOVA da força cisalhamento máxima	90
Figura 81 – Superfície de resposta da força máxima de cisalhamento da rotação pela penetração.....	90
Figura 82 – Gráfico do torque pelo tempo	91
Figura 83 – Superfície de resposta força máxima de cisalhamento com rotação pelo tempo de permanência FSSW.....	92
Figura 84 – Análise fatorial da força axial máxima	92
Figura 85 – ANOVA da força axial máxima.....	93
Figura 86 – Gráfico de Pareto efeitos das variáveis na força axial.....	93
Figura 87 – Superfície de resposta da força axial com relação a rotação pela penetração.....	94
Figura 88 – Superfície de resposta da força axial com relação a rotação pelo tempo de permanência.....	95

Figura 89 – Gráficos força axial pelo tempo com tempos de permanências 3 segundos.	96
Figura 90 – Gráficos força axial pelo tempo com tempos de permanências 4 segundos....	97
Figura 91 – Gráficos força axial pelo tempo com tempos de permanências 5 segundos....	98
Figura 92 – Análise fatorial do torque máximo.....	99
Figura 93 – ANOVA do torque máximo.	99
Figura 94 – Gráfico de Pareto efeitos das variáveis no torque.	98
Figura 95 – Superfície de resposta do torque com relação a rotação pela penetração ..	100
Figura 96 – Superfície de resposta do torque com relação a rotação pelo tempo de permanência.....	101
Figura 97 – Análise fatorial da máxima potência.....	101
Figura 98 – ANOVA da máxima potência	102
Figura 99 – Gráfico de Pareto efeitos das variáveis na potência.....	102
Figura 100 – Superfície de resposta DOE da potência com relação a rotação pela penetração	104
Figura 101 – Superfície de resposta da potência com relação a rotação pelo tempo de permanência.....	104
Figura 102 – Gráficos força axial pelo tempo com tempos de permanências 3 segundos....	105
Figura 103 – Gráficos força axial pelo tempo com tempos de permanências 4 segundos....	105
Figura 104 – Gráficos força axial pelo tempo com tempos de permanências 5 segundos....	106
Figura 105 – Análise fatorial de máxima temperatura	106
Figura 106 – ANOVA da máxima temperatura.	107
Figura 107 – Gráfico de Pareto efeitos das variáveis na máxima temperatura	107
Figura 108 – Superfície de resposta da máxima temperatura com relação a rotação pela penetração	108
Figura 109 – Superfície de resposta da máxima temperatura com relação a rotação pelo tempo de permanência.....	109
Figura 110 – Micrografia ensaio 19 C.....	110

Figura 111 – Micrografia ensaio 20 C.....	110
Figura 112 – Micrografia ensaio Adicional.....	111
Figura 113 – Diagrama de transformação de fase Ferro Carbono	112
Figura 114 – Micrografia região B1 ensaio 19 C.	113
Figura 115 – Micrografia região B2 ensaio 20 C.....	113
Figura 116 – Micrografia região B3 ensaio adicional.....	114
Figura 117 – Micrografia região C2 ensaio 20 C.	115
Figura 118 – Microdureza ensaio 19 C.	116
Figura 119 – Microdureza ensaio 19 C detalhe.....	117
Figura 120 – Variação da microdureza - ensaio 19 C	117
Figura 121 – Microdureza ensaio 20 C.....	118
Figura 122 – Microdureza ensaio 20 C detalhe.....	118
Figura 123 – Variação da microdureza ensaio 20 C.....	119
Figura 124 – Peso inicial ferramenta 1	120
Figura 125 – Peso inicial ferramenta 2.....	121
Figura 126 – Desgaste da ferramenta.....	122
Figura 127 – Força máxima de cisalhamento pela rotação.....	124
Figura 128 – Força máxima de cisalhamento pela penetração.....	124
Figura 129 – Força máxima de cisalhamento pelo tempo	125
Figura 130 – Ruptura do ensaio 2.....	126
Figura 131 – Fluxo de mistura angular.....	127
Figura 132 – Relação entre linha de interface e buraco de fechadura ensaio 19 C.....	128
Figura 133 – Relação entre linha de interface e buraco de fechadura ensaio 20 C.....	128
Figura 134 – Micrografia evidenciando a difusão parcial na intersecção das chapas.....	129
Figura 135 – Medição da largura na zona de mistura ensaio 19 C.....	130
Figura 136 – Medição da largura na zona de mistura ensaio 20 C.....	130
Figura 137 – Medição da largura na zona de mistura ensaio adicional.....	131
Figura 138 – Ilustração esquemática gancho	131
Figura 139 – Ausência do gancho na micrografia do ensaio 19 C.....	133
Figura 140 – Ausência do gancho na micrografia do ensaio 20 C.....	133
Figura 141 – Perfil geométrico do gancho na micrografia do ensaio 19 C lado esquerdo.....	134
Figura 142 – Perfil geométrico do gancho na micrografia do ensaio 20 C.....	134
Figura 143 – Precipitado de manganês na Material Base.....	135

Figura 144 – EDS dos Ponto 5 no ensaio 19C.....	135
Figura 145 – EDS dos Ponto 6 no ensaio 19C.....	136
Figura 146 – Macrografia do Material Base.....	136
Figura 147 – Macrografia do Zona de Mistura.....	137
Figura 148 – Posicionamento do Macrografia Zona ZTMA.....	138
Figura 149 – Macrografia Zona Termomecanicamente Afetada ZTMA.....	138
Figura 150 – Macrografia Zona Termomecanicamente Afetada próximo ao Disco de Sacrifício.....	139
Figura 151 – Macrografia região ZTMA.....	140
Figura 152 – EDS Ponto 1 Ensaio Adicional.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores máximos e mínimos das variáveis independentes	55
Tabela 2 – Planejamento experimental.....	56
Tabela 3 – Dados técnicos da câmera térmica FLIR T450sc	66
Tabela 4 – Dados de entrada DOE Statistica.....	89
Tabela 5 – Força máxima de cisalhamento nos ensaios.....	123

ABREVIACÕES

AG	Altura do Gancho
AISI	American Iron and Steel Institute
DO	Diâmetro do Ombro
DP	Diâmetro do Pino
DOE	Design of Experiment
EC	Espessura da Chapa
ECC	Espessura Efetiva da Chapa
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
FSP	Friction Stir Processing
FW	Friction Welding
FSW	Friction Stir Welding
FSSW	Friction stir spot welding
GKSS	Forschungszentrum (atual Helmholtz Zentrum Geesthacht)
HAZ	Heat-Affected Zone
HRC	Dureza Rockwell
ISO	International Standardization Organization
MB	Metal Base
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MF	Mergulho da Ferramenta
MO	Mergulho do Ombro
NZ	Nugget Zone
NS	Nucleo da Solda
PM	Parent Material
RSC	Região de Soldagem Completa
RPS	Região de Soldagem Parcial
RSS	Região sem Soldagem
SAE	Society of Automotive Engineers
SRP	Solda por Resistência a Ponto
TMAZ	Termomachanically Affected Zone
TRIP	Steel Transformation Induced Plasticity
TWI	The Welding Institute

UM	Unaffected Material
ZM	Zona de Mistura
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTMA	Zona Termomecanicamente Afetada

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVO GERAL.....	19
2.1. Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. O processo FSW (Friction stir welding).....	20
3.1.1. Ferramenta.....	21
3.1.2. Regiões da Microestrutura	23
3.2. Soldagem por Fricção e Mistura por Ponto	26
3.2.1. Microestrutura no Processo	27
3.2.2. Solda por Fricção por Ponto e Refil	30
3.2.3. Soldagem por Fricção e Mistura por Ponto sem Pinos.....	33
3.2.4. Temperatura no Processo FSSW	33
3.2.5. Força Axial no Processo FSSW.....	34
3.2.6. Parâmetros do Processo FSSW.....	36
3.2.7. Microdureza.....	40
3.2.8. Força máxima de cisalhamento em juntas de FSSW.....	42
4. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	46
4.1. Materiais e Métodos.....	47
4.1.1. Material das chapas	47
4.1.2. Ferramenta	53
4.1.3. Definição dos Parâmetros de Solda	54
4.1.4. Preparação do Corpo de Prova	57
4.1.5. Equipamento para solda pelo processo FSSW	58
4.1.6. Base para Solda FSSW.....	60
4.1.7. Medição de Temperatura.	66
4.1.8. Microdureza.....	67

4.1.9.	Metalografia.....	70
4.1.10.	Medição da Largura na Interface da Solda	71
4.1.11.	Ensaio da Tração.....	72
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.1.	Parâmetros do Processo.....	74
5.1.1.	Resultados das Variáveis Dependentes	74
5.1.2.	Força Axial	76
5.1.3.	Torque.....	80
5.1.4.	Potência	82
5.2.	Temperatura	84
5.3.	Análise do Planejamento Experimental	88
5.4.	Resultados da Microscopia Óptica	109
5.5.	Resultado Microdureza	116
5.6.	Desgaste da Ferramenta	119
5.7.	Força Máxima de Cisalhamento	122
5.8.	Análise do Gancho.....	131
5.9.	Análise Microscopia eletrônica por varredura.....	135
4.	CONCLUSÃO.....	141

1. INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem vêm sendo desenvolvidos desde 1800 e sua constante evolução deu origem a diversos processos, que são amplamente utilizados na indústria automobilista, como o processo de solda a ponto por resistência e solda a laser. Com o passar dos anos a busca por produtos na indústria automotiva de menor consumo de combustível, menor custo de produção, mais leves com processos sustentáveis e adaptados a novas tecnologias, fez com que surgisse a necessidade de processos de solda mais eficientes com características de maior aplicabilidade em novos materiais, menor custo, com utilização mínima de insumos e obedecendo a segurança e resistência cada vez mais exigente no mercado automobilístico.

Neste contexto, situa-se como inovação a solda por fricção e mistura a ponto (Friction Stir Spot Welding - FSSW), variante do processo de solda por fricção e mistura (Friction Stir Welding) desenvolvida pelo W.M. Thomas e outros pesquisadores do The Welding Institute (TWI) do Reino Unido. Este processo possui características de obtenção de juntas, em diferentes materiais metálicos, no estado sólido e comparado a outros métodos de solda, apresenta um menor consumo de energia possuindo características sustentáveis, devido a não necessidade de insumos. Conforme relatado pela Mazda, o processo FSSW aplicado em ligas de alumínio apresentou 90% de economia e 40% de redução de capital de investimentos, (BAEK, 2010) e 80% de economia em materiais metálicos. (HANCOCK, 2004).

Até a presente data diversos estudos foram feitos utilizando este processo em ligas de alumínio devido a demanda da indústria aeronáutica. Estudos de relevância também podem ser encontrados na aplicabilidade do processo de solda em aço de alta resistência, utilizado nas regiões estruturais da carroceria de veículos. Pouco estudos abordam a utilização do processo com relação a aços de baixo teor de carbono em espessuras menores que 1 milímetro.

Este trabalho consiste na análise das propriedades mecânicas e características metalúrgicas de soldagem por FSSW (Friction Stir Spot Welding), da junta de espessura total de 1.4 mm material de baixo teor de carbono, caracterizado pela norma SAE 1006, equivalente pela ABNT como G5 laminado a frio. Para este estudo foi desenvolvido um ferramental específico, com características personalizadas para dimensões de pontos utilizados na indústria automotiva. O intuito do trabalho é avaliar a rotação, a profundidade de penetração e o tempo de permanência do ferramental, através de um

planejamento experimental, possibilitando a avaliação dos resultados relacionados a força máxima de cisalhamento do ponto, a força axial gerada no processo, o torque, a temperatura e a potência, para obter-se uma superfície de resposta otimizada, correlacionando com a resistência obtida no melhor desempenho, além de analisar as características macroestruturais da junta.

As amostras foram produzidas utilizando uma janela de parâmetros de 1500 a 1900 rpm, com tempo de permanência da 3 a 5 segundos e profundidade de penetração de 0,87 a 1,07 milímetros. Análises da secção transversal dos pontos de solda foram feitos através de microscopia ótica e perfis de microdureza, além da caracterização da resistência a tração por ensaio de tração.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento mecânico da solda FSSW (Friction Stir Spot Welding), suas características e particularidades da microestrutura em juntas de aço de baixo teor de carbono utilizados em carrocerias automotivas.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência das variáveis de rotação, tempo de permanência e profundidade de penetração nas soldas, gerando uma superfície de resposta correlacionada com a resistência mecânica da junta e os parâmetros utilizados;
- Verificar a microestrutura das soldas através da Microscopia Ótica e analisar as possíveis transformações de fase na região termicamente afetada, a área da zona de mistura e a largura na posição da interface das chapas, verificando a relação com a resistência mecânica obtida no ensaio de tração, além de analisar a microdureza da secção de corte transversal e sua influência na junta.
- Avaliar a aplicabilidade do processo de soldagem FSSW e sua resistência mecânica no processo automotivo, relativamente ao perfil desenvolvido no ferramental.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.O PROCESSO FSW (FRICTION STIR WELDING)

A soldagem por fricção e mistura FSW (Friction Stir Welding), foi inventada e patenteada no The Welding Institute (TWI) do Reino Unido no ano de 1991, pelo pesquisador W.M. Thomas e outros pesquisadores, como uma técnica de união no estado sólido, inicialmente aplicado a ligas de alumínio (MISHRA; MAHONEY, 2007; THOMAS, 1991). As vantagens deste tipo de processo consistem em uma microestrutura de solda fina e uniforme, alta eficiência de soldagem e processo de solda verde, que recebeu considerável atenção na soldagem de ligas de alumínio, (DAWES; THOMAS, 1996). No FSW, uma ferramenta rotativa não consumível com um ombro e um pino concêntrico é trazida para as bordas opostas das folhas a serem soldadas e se move ao longo da junta, conforme Figura 1. A ferramenta fornece calor devido ao atrito na espessura e na superfície da peça, e a agitação mecânica mistura os dois lados do material da peça. (MISHRA; MA, 2005). Portanto, durante o processo FSW, o material sofre uma intensa deformação plástica, a uma temperatura moderada (abaixo da temperatura de fusão), fazendo com que sejam gerados grãos recristalizados finos e equiaxiais (RHODES, 1997).

Figura 1 – Fases do processo FSW

O fluxo de calor é gerado pelo trabalho da força de atrito e pela deformação, porém não é suficiente alto para levar a fusão dos materiais. (BUFFA; CAMPANILE, 2009). Diversos métodos de união têm sido utilizados em estruturas metálicas e o FSW destaca-se dentre as técnicas tradicionais por necessitar de pouca energia, ser inteiramente no estado sólido, ser praticamente não poluente e não por necessitar de metal de adição (VIDAL e INFANTE, 2013). O processo FSW tem sido bem-sucedido quando aplicado em ligas de alumínio promovendo melhores propriedades mecânicas às juntas. Por não apresentar uma temperatura elevada no processo de soldagem outros materiais têm apresentado ótimos resultados na junção de diversas ligas. Ligas como magnésio, cobre, aço, titânio, dentre outros de baixa soldabilidade, também têm sido unidas com sucesso com o FSW, sem trazer os problemas relacionados à fusão (JONCKHEERE e MEESTER, 2012). Devido a essas características, o processo FSW é amplamente usado no segmento aeronáutico com foco em ligas de alumínio. A Figura 2 ilustra uma representação do processo.

Figura 2 – Representação processo FSW configuração do material e ferramenta.

Fonte: Autor

3.1.1. FERRAMENTA

No processo de soldagem linear por mistura e atrito a ferramenta é uma parte fundamental do processo, de acordo com solicitação da solda a ser executada. Suas características, materiais e geometria impactam diretamente na qualidade e eficiência do

processo. Basicamente a estrutura da ferramenta FSW obedece a uma geometria, conforme exemplificado na Figura 3.

Figura 3 – Ferramenta de solda linear por atrito e mistura.

Fonte: Autor

A ferramenta de soldagem no processo FSW é constituída por corpo, ombro e pino, no qual o ombro é o principal responsável pela geração de calor, restringindo o fluxo de material, enquanto o pino é responsável pela mistura mecânica no material base. Logo no início do desenvolvimento do processo FSW foi notado a importância do fluxo de material base ao redor do pino para a obtenção de uma solda com boa qualidade. (THOMAS, 2006). A qualidade só é atingida fazendo-se uso da ferramenta apropriada combinada com os parâmetros de solda corretos. (THOMAS; JOHNSON; WIESNER, 2003).

Existem diversas variações no desenvolvimento das ferramentas para FSW, variações essas que se adaptam a um determinado tipo de componente a ser soldado. A superfície do ombro pode ser apresentada em três padrões usuais, o plano, o convexo e o côncavo. Essas variações de perfis também podem ser combinadas com acabamentos das superfícies na área de contato do ombro, sendo eles círculos concêntricos, sulco helicoidais entre outros, conforme Figura 4.

Figura 4 - Variações da superfície do ombro na ferramenta FSW

Fonte: MISHIRA; MAHONEY, 2007.

Variações na geometria do pino estão diretamente ligadas a qualidades obtidas na solda, já que a mesma atua diretamente no núcleo da solda ou zona de mistura, alterando o fluxo de material ao redor do pino e refletindo nas forças transversais e momentos atuantes na ferramenta. Dentro dessas variações a mais amplamente utilizadas são do tipo Whorl, conforme a Figura 5, e o MX Triflute.

Figura 5 - Variações da superfície do pino na ferramenta FSW

Fonte: Adaptado MISHIRA; MAHONEY, 2007.

3.1.2. REGIÕES DA MICROESTRUTURA

Threadgill (2007) definiu quatro diferentes regiões na solda FSW. À região mais distante, que não teve sua microestrutura afetada pelo calor gerado durante o processo, dá-se o nome, de material não afetado, Unaffected Material (UM), parent material (PM), ou metal de base (MB), identificadas na Figura 4; Heat-affected zone (HAZ) ou zona termicamente afetada (ZTA), região que apesar de termicamente afetada, não sofre

deformação plástica, porém ocorre a modificação na sua microestrutura; Thermomechanical affected zone (TMAZ) ou zona termomecanicamente afetada (ZTMA), é a zona afetada pela deformação plástica e térmica devido a ação da ferramenta durante o processo, gerando uma região com grãos recristalizados; por fim, a Nugget zone (NZ) ou núcleo da solda (NS), que é a região pela qual o pino passou, impondo intensa deformação plástica e intensa geração de calor por atrito, resultando em uma microestrutura com grãos recristalizados finos e equiaxiais, conforme a figura 6 (THREADGILL, 2007).

Figura 6 – Esquema da secção transversal FSW: (A) MB, (B) ZTA, (C) ZTMA e (D) NS.

Fonte: Adaptado THREADGILL, 2007.

O comportamento da solda FSW em aços possui algumas diferenças em relação as microestruturas e as zonas apresentadas no processo aplicado ao alumínio. A Figura 7 apresenta uma secção transversal de uma junta de 12 milímetros de aço soldada linearmente por atrito, (MATSUSHITA; KITANI; IKEDA, 2015).

Figura 7 – Secção transversal solda FSW em uma junta de aço.

Fonte: Adaptado de MATSUSHITA; KITANI; IKEDA, 2015.

Nota-se que existem similaridades com relação as zonas nas juntas de alumínio, porém, nas juntas de aço, as zonas não são tão claramente definidas, apresentando geometrias diferentes e a região do núcleo não aparece isolada. Em alguns tipos de aço pode não ocorrer a zona termomecanicamente afetada (ZTMA), como apresentado na Figura 8 (SHARMA; DWIVEDI, 2017).

Figura 8 – Secção transversal solda FSW sem ZTMA.

Fonte: Autor. Adaptado de SHARMA; DWIVEDI, 2017

A ausência de ZTMA, zona termomecanicamente afetada, pode ocorrer devido as transformações alotrópicas apagarem evidências na região, descaracterizando assim a zona. Essas sub-regiões ocorrem, assim como nos processos de solda por arco elétrico, devido aos ciclos térmicos localizados que são diferentes entre si conforme nos afastamos da linha central da solda (LIENERT, 2003).

3.2. SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA POR PONTO

Derivado do processo FSW (Friction Stir Welding) o processo de soldagem de fricção por atrito e mistura por ponto FSSW (Friction Stir Spot Welding), foi inventado pela Mazda Motor Corporation em 1993, consistindo em três estágios: mergulho, agitação e retração. O processo começa com a ferramenta girando em alta velocidade angular e em seguida forçada em sentido axial nas peças das juntas, até que o ombro da ferramenta entre em contato com a superfície superior formando um ponto de solda. O movimento de mergulho da ferramenta causa a expulsão de materiais. Após o mergulho, o estágio de agitação começa quando a ferramenta atinge uma profundidade predeterminada, denominada profundidade de penetração. Nesta etapa, a ferramenta continua girando nas peças de trabalho, propiciando calor de atrito que somados nos estágios de imersão, possibilita aos materiais adjacentes à ferramenta que sejam aquecidos, amolecidos e misturados, formando assim a junta de estado sólido. Quando é obtida uma ligação aceitável, a ferramenta entra na etapa de retração recuando da superfície da junta ainda em rotação. Devido à geometria da ferramenta e ao trabalho unicamente axial, o resultado da junta possui um “buraco de fechadura” característico, localizado no centro da área de atuação do pino, que diminui significativamente as propriedades mecânicas das articulações. (YANG; FU; LI, 2014). A Figura 9 ilustra esse procedimento.

Figura 9 – Ilustração processo FSSW: (a) Mergulho, (b) Agitação e (c) Retração.

Fonte: Adaptado de NGUYEN; KIM, 2014.

3.2.1. Microestrutura no processo

Assim como no processo FSW, a microestrutura de ligas soldadas por FSSW pode ser dividida em três regiões distintas, além do metal de base (MB): zona recrystalizada dinamicamente ou zona de mistura (ZM), zona termomecanicamente afetada (ZTMA) e zona termicamente afetada (ZTA). Apesar de utilizar a mesma nomenclatura do FSW (Friction Stir Welding) é possível verificar que a geometria final das zonas afetadas difere neste processo (zona de mistura a região de contato com a superfície do pino e ombro), além da ausência do núcleo da solda (NS). A Figura 10 apresenta uma junta típica obtida por FSSW, (SU, 2005).

Figura 10 – Aspecto macrográfico de secção transversal por FSSW.

Fonte: Adaptado SU, 2005.

A zona de mistura (ZM), se caracteriza pela intensa deformação plástica e alta temperatura, levando à recrystalização do material e a mistura entre as chapas; já a zona termomecanicamente afetada (ZTMA), é caracterizada por menor plastificação do material e temperatura inferior à da zona de mistura, podendo apresentar a ocorrência de recrystalização; Zona termicamente afetada (ZTA), onde os grãos não foram deformados plasticamente, mas a microestrutura sofreu alterações devido ao ciclo térmico. A região caracterizada como Material Base (MB) é o material não deformado e não afetado pelo calor em termos de microestrutura.

Com relação a aplicação do processo em aços, a Figura 11 (FENG, 2005), mostra um ponto de solda em uma liga de aço DP600, onde é possível identificar MB (a), zona de interface (b) e ZTMA (c). Essa caracterização também pode ser utilizada para as

aplicações em ligas de aço, proveniente das microestruturas geradas no processo que diferem das ligas de alumínio.

Figura 11 – Macrografia de uma secção transversal de uma solda FSSW aço DP 600.

Fonte: Adaptado FENG, 2005.

A Figura 12 (MAZZAFERRO, 2008), mostra as macrografias da secção transversal de duas soldas FSSW produzidas com tempos de soldagem diferentes na obtenção de juntas sobrepostas. O material é um aço TRIP 800, nas quais são visíveis as delimitações das diferentes zonas.

Figura 12 – Macrografia de uma secção transversal de uma solda ponto FSSW

Fonte: Adaptado de MAZZAFERRO, 2008.

Considerando a Figura 12, é possível verificar que o valor da rotação aumenta o tamanho da zona termicamente afetada, juntamente com o aumento do tempo de permanência da ferramenta. Através das macrografias é possível verificar que o aumento da rotação proporciona uma maior área total termicamente afetada e uma maior distorção na área da solda. Conforme (MAZZAFERO, 2008), pode-se afirmar que o aumento na velocidade de rotação provoca um aumento no aporte de energia, pois o tamanho global das zonas I+II+III aumenta.

Segundo (NORTH, BENDZSAK, 2008), durante o processo de FSSW, ocorre duas zonas distintas de fluxo de material na zona de mistura: zona de fluxo interno adjacente ao pino, e outra externa, onde o material se move em espiral, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxo de material no processo FSSW

Fonte: Adaptado de NORTH; BENDEZSACK, 2008.

Alguns autores atribuem ao processo FSSW a formação de um defeito geométrico na interface das duas chapas soldadas, denominado de “hook”, em português conhecido como “gancho” (ROSENDO, 2015). A força axial aplicada no processo é um fator determinante durante penetração da ferramenta para formar a geometria do gancho. Segundo (BABU, SANKAR, 2012) os dois parâmetros das microestruturas mais importantes na região do gancho são: região de soldagem completa (RSC) e altura do gancho (AG). Ilustrados na Figura 14.

Figura 14 – Ilustração esquemática junta FSSW

AG - Altura do Gancho; **RSC** - Região de Soldagem Completa; **RPS** - Região de Soldagem parcial; **RSS** - Região sem Soldagem; **ZM** - Zona da Mistura; **EEC** - Espessura Efetiva da Chapa; **EC** - Espessura da Chapa; **MO** - Mergulho do Ombro; **MF** - Mergulho da Ferramenta; **DO** - Diâmetro do Ombro; **DP** - Diâmetro do Pino

Fonte: Adaptado de BABU; SANKAR, 2012.

A presença do gancho prejudica a integridade do botão de solda, pois, quando aplicada uma carga externa o início e propagação de uma trinca tende a ocorrer nessa região (BADARINARAYAN, YANG e OKAMOTO, 2010).

3.2.2. Solda por Fricção por Ponto e Refil

Outra variante do processo FSW é o processo de soldagem por fricção por ponto e refil (FSpW) (Friction Spot Welding), desenvolvido pelo centro de pesquisa GKSS Forschungszentrum (atual Helmholtzzentrum Geesthacht) na Alemanha (SCHILLING; DOS SANTOS, 2005) com objetivo de preencher a junta soldada, evitando, assim, o furo na superfície da peça e prevenindo, com isto, corrosão e concentradores de tensão. O processo é constituído por um ferramental não consumível formado por três componentes: o anel de fixação que atua como um sujeitador na região da solda, envolvendo a camisa e o pino, a camisa que rotaciona e penetra no material de forma independente e o pino que retrai no primeiro instante, possibilitando o escoamento do material e posteriormente, em rotação reposiciona o material plasticamente conforme avança. Com esta variante do processo obtém-se a região da solda completamente preenchida no final do processo, sem a característica do buraco de fechadura. Nota-se na Figura 15, tanto a atuação da “penetração do pino”, quanto a “penetração da camisa”, embora a “penetração do pino” seja executada com maior facilidade por demandar

intensidades menores de força e torque, possibilitando uma maior vida útil à ferramenta. Já a “penetração da camisa” fornece uma junta soldada de tamanho maior e, conseqüentemente, de resistência mecânica mais elevada. (ARBEGAST, 2007).

Figura 15 - Ilustração esquemática da variante FSpW: (a) fixação e rotação, (b) penetração da camisa e retração do pino, (c) retorno para a superfície e (d) remoção da ferramenta.

Fonte: Adaptado CAMPANELLI; ALCANTRA; DOS SANTOS, 2011.

Essa característica do processo FSpW, possibilita uma melhora significativa no desempenho mecânico da junta, já que elimina o furo do processo convencional. Os valores de tensão de cisalhamento das juntas obtidas por FSpW, em comparação com a convencional FSSW, para as ligas de Al e Mg são muito superiores. Uma junta soldada por FSpW em comparação com o processo FSSW apresenta um acréscimo na resistência ao cisalhamento de cerca de 85%. (CAMPANELLI; ALCANTRA; SANTOS, 2011), como pode-se verificar na Figura 16:

Figura 16 – Dados de tensão cisalhamento em diversas juntas de Al e Mg

Fonte: Adaptado CAMPANELLI; ALCANTRA; DOS SANTOS, 2011.

Para padrões de solda FSSW por refil adota-se, segundo (UEMATSU, 2008), três zonas, classificadas em: zona mista (MZ), zona de agitação (SZ) e metal original (PM), conforme a Figura 17. Segundo (UEMATSU, 2008), a aparência macroscópica é influenciada pela temperatura e pela deformação plástica do material. Além disso, os parâmetros de soldagem (velocidade de rotação, tempo de permanência, profundidade e taxa de imersão) influenciam diretamente no calor de atrito durante a soldagem. Portanto, a aparência macroscópica muda com a alteração dos parâmetros de soldagem.

Figura 17 – Aparência macroscópica de uma solda FSSW com refil: (a) Vista superior da solda, (b) Secção transversal da solda.

Fonte: Adaptado UEMATSU, 2008.

3.2.3. Soldagem por Fricção e Mistura por Ponto sem Pinos

Nesse processo uma ferramenta com uma ranhura de rolagem no ombro, possibilita um processo mais simples e rápido na soldagem por fricção por ponto. Desenvolvido por Tazokai em 2009. (TOZAKI; UEMATSU; TOKAJI, 2010), este tipo de processo apresenta diversas vantagens, como ser mais simples, não ter penetração do pino e de apresentar melhor aparência. O processo consiste em um estágio único e garante maior velocidade comparado aos demais. Recentemente, dados preliminares mostraram que essa abordagem pode ser usada para produzir soldas de alta resistência com um curto tempo de espera, (PRANGNELL, BAKAVOS, 2010). Este processo é mostrado esquematicamente na Figura 18:

Figura 18 – Ilustração do processo FSSW sem pinos: (a) Mergulho, (b) Agitação e (c) Retração.

Fonte: Adaptado COX; GIBSSON; STRAUS, 2012.

3.2.4. Temperatura no processo FSSW

A relação entre a interface da ferramenta com as chapas determina um limite para a elevação da temperatura. Inicialmente existe uma aderência (*stick*) entre metal e ferramenta e na medida que a ferramenta gira, deforma o material plasticamente elevando a temperatura. Quando a temperatura atinge um certo nível, o material amolecido “perde” a adesão à ferramenta, provocando um o patinamento (*slip*). O patinamento leva à diminuição da temperatura que, por sua vez, restabelece a condição de adesão. Esse processo de transição adesão/patinamento (*stick/slip*) se mantém durante o processo e atua como um limitador da temperatura. (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006).

Para processos de solda FSSW em alumínio, sugere-se que um grande aporte de calor deve ser empregado, durante a soldagem por fricção e mistura mecânica, para

realizar a dissolução de partículas de segunda fase antes de atingir a temperatura eutética (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006). Assim o aumento da velocidade angular resulta na mistura do material em volta do pino que, por sua vez, aumenta a temperatura do metal. (VENKATESWARLU e DAVIDSON, 2012). Observa-se, também, o amolecimento do material devido ao aumento da temperatura e pode ocorrer a dissolução de precipitados (BUFFA, 2009).

Conforme ocorre o contato do ferramental, em princípio do pino em relação ao material base ou chapa a ser soldada, inicia-se o processo de aumento de calor gerado pelo atrito, porém somente quando o ombro da ferramenta entra em contato é que o aumento da temperatura cresce possibilitando a deformação plástica da zona e mistura. Após a retração da ferramenta a peça retorna à temperatura ambiente suavemente (PATEL, SEJANI, 2016). A temperatura abaixo da ferramenta em processos de solda em ligas de alumínio é suficiente para amolecer o material, porém sem atingir a temperatura de fusão, caracterizando o processo em uma soldagem no estado sólido (PATHAK, 2012). Com o acréscimo da velocidade de rotação e profundidade de penetração do ombro da ferramenta aumenta-se o calor aportado e essa é a razão principal para o aumento de tamanho da zona de mistura.

3.2.5. Força axial no processo FSSW

O esforço gerado no sentido axial está diretamente relacionado a rotação da ferramenta e afeta principalmente a característica do gancho, relacionada ao processo FSSW. Verifica-se que com o aumento da velocidade de rotação ocorre a diminuição da força axial, conforme a Figura 19. Também é possível notar que a força cresce rapidamente com o contato do ombro na superfície superior da junta (LATHABAI, PAINTER, 2006).

Figura 19 – Força axial em função da rotação

Fonte: Adaptado LARTHABAI; PAINTER, 2006

Analisando a velocidade de penetração é possível verificar que a mesma exerce influência sobre a força axial, onde menores valores são observados para velocidades de penetração menores (LARTHABAI, PAINTER, 2006). Conforme a velocidade de penetração aumenta, maior é o gradiente de temperatura obtido na junta. É possível verificar também que a força axial aumenta rapidamente a partir do contato do pino com a chapa superior e a força máxima se dá no momento do contato do ombro da ferramenta com a superfície da chapa superior (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006). Maiores velocidades de penetração oferecem maior produtividade, porém as maiores forças axiais tendem a diminuir a vida da ferramenta (LARTHABAI, PAINTER, 2006), além de intensificar o gancho obtido na junta, afetando a resistência, conforme Figura 20.

Figura 20 – Força axial em função da velocidade de penetração.

Fonte: Adaptado LARTHABAI; PAINTER, 2006

3.2.6. Parâmetros do processo FSSW

Segundo (LOHWAZZER e CHEN,2010), os parâmetros que influenciam o processo são: Rotação da ferramenta, Velocidade de deslocamento e Força axial no eixo da ferramenta. Tendo como parâmetros secundários:

- Profundidade de penetração da ferramenta;
- Tempo de penetração;
- Tempo de permanência em penetração (dwell time);
- Velocidade de recolhimento da ferramenta.

Definido por (MISHRA; MAHONEY, 2007) a influência na qualidade e obtenção de resultados conclusivos na solda a ponto por fricção (FSSW) e sua respectiva influência, são determinadas principalmente por:

- Rotação da ferramenta (rpm): está relacionada com o aquecimento do material. Conforme a velocidade de rotação da ferramenta aumenta, o gradiente de temperatura é afetado diretamente. Se este gradiente for muito elevado em relação ao material, ocorre o deslizamento da ferramenta, não gerando a deformação plástica.
- Penetração da ferramenta (mm): está relacionada com a profundidade da junta e excesso de rebarba, sendo uma variável extremamente importante para juntas sobrepostas.

- c) Força axial (N): A força axial tem grande importância sobre o processo, pois contribui para a geração de calor e formação de defeitos.
- d) Geometria da ferramenta: a ferramenta é geralmente de forma cilíndrica, constituída de um ombro e de um pino. A geometria e o material da ferramenta devem ser cuidadosamente selecionados para suprir as necessidades que o material das peças exige.
- e) O tempo de permanência ou patamar (dwell) da ferramenta, na profundidade máxima em contato com a junta, é outro parâmetro relevante na qualidade e influência no processo FSSW. Segundo estudos de (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006) o acréscimo do tempo de patamar de 1 a 4 segundos se ocasiona o aumento do tamanho de grão na região da solda e recristalização mais estável.

Os parâmetros relacionados ao torque no processo foram avaliados no estudo de (LATHABAI, PAINTER, 2006), com relação a carga máxima de cisalhamento (Figura 21). No mesmo estudo, foram obtidas curvas de carga versus temperatura no processo, conforme a Figura 22. O estudo foi realizado em chapas de liga AA 6060-T5 com espessura de 1,77 milímetros, onde se notou que maiores profundidades de penetração possibilitaram o aumento na carga máxima de cisalhamento da junta (Figura 23), além de que o patamar de 4 segundos de tempo de permanência influencia diretamente na força máxima de cisalhamento da junta, conforme Figura 24.

Figura 21 – Torque, força axial e deslocamento em função do tempo

Fonte: Adaptado LARTHABAI; PAINTER, 2006

Figura 22 – Temperatura e força axial em função do tempo

Fonte: Adaptado LARTHABAI; PAINTER, 2006

Figura 23 – Carga máxima de cisalhamento com relação a profundidade de penetração

Fonte: Adaptado LARTHABAI; PAINTER, 2006

Figura 24 – Carga máxima de cisalhamento com relação a tempo de permanência

Fonte: Adaptado LARTHABAI; PAINTER, 2006

3.2.7. Microdureza

Os perfis de dureza em Vickers na região de junta soldada por FSW são mostrados por alguns autores em estudos referentes a ligas de Alumínio para caracterizar a região da solda e avaliar a microestrutura proveniente do processo. Segundo (MILAN, TARPANE e BOSE FILHO, 2006) é possível verificar o amolecimento da solda, particularmente na transição entre ZTA e ZTMA, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Perfil de dureza ao longo da secção transversal.

Fonte: Adaptado LARTHABAI; PAINTER, 2006

Diversos outros autores também utilizaram a avaliação de microdureza para quantificar e caracterizar ligas endurecíveis por precipitação, soldadas pelos processos de solda por FSW em alumínio, tal como (BIALLAS, 1999) para a liga AA2024-T3 e para a liga AA2024-T351 (BUSSU, 2003) e como mostrado no estudo comparativo entre as ligas de alumínio realizado por (HANCOCK, 2004), na Figura 26. É possível verificar um aumento de microdureza em relação ao material base para a liga AA6111- T4, enquanto, para a liga AA5052-H32, ocorre uma diminuição na dureza na região soldada devido a formação de precipitados, provenientes da influência da temperatura no processo.

Figura 26 – Perfil de dureza ao longo da secção transversal ligas de alumínio.

Fonte: Adaptado HANCOCK, 2004

Para juntas de ligas de aço TRIP, obtidas pelo processo FSSW, é possível verificar o aumento da dureza com relação ao metal base (MB). Esse aumento de dureza ocorre devido a austenitização do metal base, decorrente temperatura e força de forjamento. Em relação as microestruturas resultantes no processo, observou-se que o aumento na velocidade de rotação da ferramenta, considerando o mesmo tempo de mistura, causou um aumento na quantidade de ferrita alotriomórfica, ferrita de Wildmanstätten, constituintes de martensita-austenita na zona de mistura. (MAZZAFERO, 2008). Na Figura 27, é possível verificar o comportamento da dureza, em relação ao “buraco de fechadura,” alcançada em diferentes parâmetros de rotação e tempo de permanência, com relação a aço TRIP.

Figura 27 – Perfil de dureza ao longo da secção aço TRIP.

Fonte: Adaptado MAZZAFERO, 2008

3.2.8. Força máxima de cisalhamento em juntas de FSSW.

Com relação às propriedades mecânicas obtidas no processo de solda FSSW, destaca-se o estudo de MAZZAFERO, 2008, em aços TRIP 800. Neste estudo, foi utilizado, como material base para a junta, chapas de 1 milímetro de espessura laminadas a frio e com uma camada de Zinco de 7,5 μ m em cada superfície. Foram avaliados os parâmetros de rotação e tempo de permanência com relação a resistência máxima de cisalhamento da junta. Verificou-se que as menores rotações possibilitaram condições de

maior resistência a cisalhamento, conforme a Figura 28, sendo a influência do Zinco no processo, um fator determinante para o modo de falha da solda. (MAZZAFERO, 2008). As forças máximas de cisalhamento com relação ao aço Trip foram devidas as transformações de fase, obtidas durante o processo da solda, onde a alta porcentagem de carbono na liga, possibilita a transformação na zona de mistura do material base em austenita retida, bainita e martensita devido a taxa de resfriamento.

Figura 28 – Força máxima de cisalhamento aço TRIP com relação ao tempo de mistura.

Fonte: Adaptado MAZZAFERO, 2008

Destaca-se também o estudo realizado por BAEK, S.; CHOI, D.; LEE, C; AHN, B.; YEON, Y.; SONG, K.; & JUNG, S. (2010). Neste estudo, foi avaliado o uso de um ferramental de carboneto de tungstênio, na aplicação de FSSW em solda em chapas de baixo teor de carbono galvanizadas. Utilizando de chapas de 0,6 milímetros laminadas a frio, o estudo mostrou a relação da profundidade de penetração com a força máxima de cisalhamento obtida, conforme a Figura 29.

Figura 29 – Força máxima de cisalhamento aço de baixo teor de carbono galvanizado.

Fonte: Adaptado BAEK, S.; CHOI, D.; LEE, C; AHN, B.; YEON, Y.; SONG, K.; & JUNG, S. (2010)

Segundo os autores, as forças máximas de cisalhamento estão relacionadas a difusão gerada pelo atrito e pressão do ferramental. A pouca penetração do ferramental não permitiu a deformação plástica das chapas e, conseqüentemente, a mistura mecânica no processo, fazendo com que os grãos, abaixo do pino, coalescessem devido a temperatura. Outro ponto interessante é a interferência causada pelo Zinco no processo, que mostrou ser fator determinante no modo de falha e ruptura da solda, conforme a Figura 30. Segundo os autores devido a temperatura máxima de 1020,28 °C obtida durante o processo, o Zinco, presente na superfície entre as chapas, atingiu a temperatura de fusão e ebulição, ficando retido na junta pela atuação do ferramental, conforme o detalhe em vermelho na Figura 30.

Figura 30 – Micrografia de solda FSSW em aço baixo carbono com galvanização

Fonte: Adaptado BAEK, S.; CHOI, D.; LEE, C; AHN, B.; YEON, Y.; SONG, K.; & JUNG, S. (2010)

4. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para realização deste trabalho a metodologia experimental utilizou do fluxograma abaixo e sua descrição, conforme Figura 31.

Figura 31 – Fluxograma de atividades

4.1. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.1. Material das chapas

Neste trabalho foram utilizadas chapas de aço AISI/SAE 1006, com porcentagem máxima de 0,6 de carbono, laminados a frio e com espessura de 0,7 mm. Este material foi selecionado por ser amplamente utilizado nas regiões estruturais da carroceria de veículos leves na manufatura automobilística.

Segundo a indústria automotiva, as tiras laminadas de aços de baixo teor de carbono, para estampagem a frio, devem obedecer a norma DIN EN 10139 e classificadas no grau DC05, equivalente a norma ABNT NBR 5007:2020 com a classificação de grau G5 RL, conforme a Figura 32.

Figura 32 – Tabela de equivalência de normas para aços

Tabela de Equivalência de Normas para Aços Relaminados de Baixo Teor de Carbono											
Tabela de Equivalências Internacionais ⁽¹⁾											
ABNT ⁽²⁾				DIN ⁽²⁾		JIS ⁽²⁾		BS ⁽²⁾		ASTM ⁽³⁾	
NBR 5007 : 1982 ⁽⁴⁾		NBR 5007 : 2008		1624 : 1987		EN 10139 : 1997		G 3141 : 1996		1449 : 1991	
Grau	Classe	Grau	Classe	Grau	Classe	Grau	Classe	Grau	Classe	Grau	Classe
-	-	G2	R	St 2	G	DC01	A	SPCC	A	-	-
G2	RL	G2	RL	St 2	LG	DC01	LC	SPCC	S	-	-
G2	L32	G2	L290	St 2	K 32	DC01	C290	SPCC	8 ⁽³⁾	-	-
-	-	-	-	-	-	DC01	C340	-	-	-	-
G2	L40	G2	L390	St 2	K 40	DC01	C390	SPCC	4 ⁽³⁾	-	-
G2	L50	G2	L490	St 2	K 50	DC01	C490	SPCC	2 ⁽³⁾	-	-
G2	L60	G2	L590	St 2	K 60	DC01	C590	SPCC	1 ⁽³⁾	-	-
G2	L70	G2	L690	St 2	K 70	DC01	C690	SPCC	1 ⁽³⁾	CS4	H6
G3	R	G3	R	St 3	G	DC03	A	SPCD	A	-	-
G3	RL	G3	RL	St 3	LG	DC03	LC	SPCD	S	-	-
G3	L32	G3	L290	St 3	K 32	DC03	C290	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	DC03	C340	-	-	-	-
G3	L40	G3	L390	St 3	K 40	DC03	C390	-	-	-	-
G3	L50	G3	L490	St 3	K 50	DC03	C490	-	-	-	-
G3	L60	G3	L590	St 3	K 60	DC03	C590	-	-	-	-
G4	R	G4	R	St 4	G	DC04	A	SPCE	A	CS4	Annealed
G4	RL	G4	RL	St 4	LG	DC04	LC	SPCE	S	CS4	Strip annealed
G4	L32	G4	L290	St 4	K 32	DC04	C290	-	-	CS4	H1
-	-	-	-	-	-	DC04	C340	-	-	CS4	H2
G4	L40	G4	L390	St 4	K 40	DC04	C390	-	-	-	-
G4	L50	G4	L490	St 4	K 50	DC04	C490	-	-	-	-
G4	L60	G4	L590	St 4	K 60	DC04	C590	-	-	CS4	H5
-	-	G5	RL	-	-	DC05	LC	-	-	-	-
-	-	G6	RL	-	-	DC06	LC	-	-	-	-

(1) Esta tabela refere-se à equivalência entre normas apenas com o propósito de orientação, necessitando de análise da especificação do cliente.

(2) Material pode ser fornecido, dependendo da necessidade, com tipos específicos de revestimento e tratamentos de superfície.

(3) Para estes graus os valores de tração e alongamento não são aplicáveis, somente dureza será garantida de acordo com a JIS G3141 Tabela 5.

(4) Esta edição foi cancelada e substituída pela ABNT NBR 5007:2008 (segunda edição).

A composição química do material é definida como G5, segundo NBR 5007:2008, conforme Figura 33.

Figura 33 – Composição química aços baixo carbono

Grau^a	Carbono máx %	Manganês máx %	Fósforo máx %	Enxofre máx %	Alumínio min %	Titânio máx %
G2 ^b	0,12	0,60	0,040	0,050	-	-
G3	0,10	0,50	0,030	0,040	-	-
G4	0,08	0,50	0,030	0,035	0,020	-
G5	0,06	0,45	0,030	0,030	0,020	-
G6	0,02	0,40	0,025	0,020	0,010	0,3 ^c

^a Em todos os aços-carbono existem pequenas quantidades de elementos residuais provenientes das matérias-primas utilizadas na fabricação do aço, como cobre, níquel, molibdênio e cromo. Estes elementos são considerados residuais, desde que não interfiram na aplicação final do produto.

^b Para o grau G2 L690, admite-se o valor de carbono $\leq 0,23$ %.

^c O titânio pode ser substituído pelo nióbio, ou conter outros elementos cuja soma não ultrapasse 0,30 % máximo.

Fonte: ABNT NBR5007:2020

A composição química das chapas, segundo a o grau G5 para este estudo, é caracterizada pela porcentagem dos elementos presentes na liga, sendo: silício (Si), manganês (Mn), fosforo (P), enxofre (S), alumínio (Al), titânio (Ti) e cobre (Cu), conforme a Figura 34:

Figura 34 – Limites de composição química do material G5.

Carbono máx %	Manganês máx %	Fósforo máx %	Enxofre máx %
0,06	0,45	0,03	0,03

Fonte: Adaptado ABNT

Segundo a norma NBR 5007, as características mecânicas do material selecionado (G5 RL) são, limite de escoamento igual a 210 Mpa, limite de resistência a tração entre 270 a 350 MPa (de acordo com a espessura selecionada) , alongamento mínimo de 42%

Figura 37 – Características mecânicas AISI 1006

Propriedades	Métrica	Imperial
Resistência à tracção	330 MPa	47900 psi
Força de escoamento (dependendo do temperamento)	285 MPa	41300 psi
Módulo elástico	190-210 GPa	27557-30458 ksi
Módulo de massa (típico para aço)	140 GPa	20300 ksi
Módulo de cisalhamento (típico para aço)	80,0 GPa	11600 ksi
Coefficiente de Poisson	0,27-0,30	0,27-0,30
Alongamento na ruptura (em 50 mm)	20%	20%
Redução de área	45%	45%
Dureza, Brinell	95	95
Dureza, Knoop (convertido a partir da dureza Brinell)	113	113
Dureza, Rockwell B (convertido a partir da dureza Brinell)	55	55
Dureza, Vickers (convertido a partir da dureza Brinell)	98	98
Usinabilidade (com base no aço AISI 1212 como usinabilidade 100) A usinabilidade de barras, hastes e produtos de arame do grupo I pode ser melhorada por trefilação a frio)	50	50

Fonte: Adaptado AISI

O material base foi submetido a um ensaio de tração, no Centro de Laboratório Mecânicos (CLM) da FEI em São Bernardo do Campo, para caracterização mecânica. Foram produzidos 3 corpos de prova para o ensaio de tração, cujas dimensões estão mostradas na Figura 38, conforme norma EN 10002-1 e NBR 6892. Os ensaios foram executados de acordo com a norma ASTM E8M-08, com 1mm/min velocidade primária e secundária de 2mm/min. As medidas de alongamento foram efetuadas a partir de um comprimento inicial de 50 mm.

Figura 38 – Representação de dimensões dos corpos de prova

Fonte: Próprio Autor

O equipamento utilizado para tração é do modelo MTS 810, servo hidráulico, com sistema computadorizado de aquisição de dados e capacidade nominal de 250kN, conforme a Figura 39.

Figura 39 – MTS 810 com garras hidráulicas

Fonte: Próprio Autor

A Figura 40 mostra os resultados obtidos e a curva tensão x deformação do material base. A resistência mecânica a tração média dos três ensaios foi de 339 MPa.

Figura 40 – Gráfico de tensão deformação do material base

Fonte: Próprio Autor

4.1.2. Ferramenta

Com base na revisão bibliográfica, o material definido para o ferramental foi o metal duro B10C, fabricado pela empresa Brassinter através da metalurgia do pó. O produto é obtido pelo processo de prensagem seguido de sinterização a temperaturas aproximadas de 1400 °C, com excelentes características de dureza e resistência a fratura em temperaturas de trabalho acima de 1800°C. Manufaturado em uma liga com aproximadamente 10% Cobalto, 0,5% Carboneto de Titânio e 89,5% de Carboneto de Tungstênio o material do ferramental possui um dureza de 89,9 HRA, uma densidade aproximada de 14,5 gramas por centímetro cúbico e uma resistência a ruptura transversal 3100 MPa.

A geometria do pino foi desenvolvida com objetivo de minimizar o efeito do buraco de fechadura, conforme as dimensões da ferramenta especificadas na Figura 41, sendo diferenciada do padrão convencional. O pino projetado tem a geometria trapezoidal para maximizar o esforço de cisalhamento da junta, respeitando as dimensões de maior solicitação na manufatura automotiva e obedecendo a norma ISO 14273 e DIN 10130. No desenvolvimento do ombro, selecionamos um ângulo negativo de 16,7 graus, diferente do ângulo reto convencional, para que a penetração da ferramenta limitasse a área de mistura e gerasse concentração da deformação e temperatura na região. Os detalhes do ferramental são encontrados no Anexo I.

Figura 41 – Ferramenta FSSW

Fonte: Próprio Autor

4.1.3. Definição dos parâmetros de Solda

O processo FSSW é amplamente utilizado em ligas de alumínio, porém sua aplicação em aços ainda é algo relativamente novo. Para alcançar um desempenho aplicável na indústria automotiva é necessária uma janela de parâmetros de soldagem que possibilitem uma solda ideal. Para definirmos as variáveis independentes envolvidas neste trabalho foi considerando os trabalhos referentes ao processo FSSW publicados de (BAEK, 2009) que utilizou 1600 rpm no estudo em aços galvanizados com uma ferramenta de carboneto de tungstênio, no qual avalia a influência do tratamento superficial de zinco na microestrutura obtida no processo de solda. Também consideramos o artigo relativo a aplicação do processo FSSW em aços TRIP, com ferramenta de nitreto cúbico de boro, para soldas realizadas a 1500 rpm, conforme (MAZZAFERO, 2008), onde se avaliou a resistência e microestrutura obtidas em juntas de 2mm com variações nos parâmetros do processo. Para ligas de alumínio AA6060-T5, com rotações entre 1500 a 2000 rpm em juntas manufaturadas por FSSW, AITA, 2017 utilizou uma ferramenta de AISI M2.

Utilizando os dados reunidos na revisão bibliográfica e tabela do apêndice A, as variáveis independentes definidas para este estudo foram a rotação da ferramenta, a

profundidade de penetração e o tempo de permanência do ombro na superfície da junta, conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Valores máximos e mínimos das variáveis independentes

Variáveis Independentes	Valores	
	Min	Max
Rotação (rpm)	1500	1900
Profundidade de penetração (mm)	0,87	1,07
Tempo de permanência [dwell time] (s)	3	5

Fonte: Próprio Autor

A metodologia estatística abordada neste trabalho é o delineamento central composto, utilizando os tratamentos definidos nas variáveis independentes pelo software Statistica, versão 12.0, através da ferramenta DOE. O planejamento selecionado para o estudo foi o planejamento cúbico de 3 fatores onde as 8 primeiras linhas da Tabela 2 são referentes aos pontos fatoriais, somados de mais 6 pontos estelares e 4 repetições no ponto central. Desta forma foi possível determinar todas as combinações do estudo e construir a tabela 2, com corridas definidas aleatoriamente.

O intuito de estudar esta janela de parâmetros foi de verificar o quanto as grandezas estão relacionadas com as propriedades mecânicas obtidas, com objetivo de gerar uma superfície de resposta para verificar o melhor desempenho e as diferenças causadas.

Tabela 2 – Planejamento experimental

Ensaio	Rotação (rpm)	Penetração (mm)	Permanência (s)
5	1900	0,87	3,0
16 C	1700	0,97	4,0
14	1700	0,97	5,7
13	1700	0,97	2,3
2	1500	0,87	5,0
3	1500	1,07	3,0
9	1363	0,97	4,0
7	1900	1,07	3,0
10	2036	0,97	4,0
8	1900	1,07	5,0
18 C	1700	0,97	4,0
6	1900	0,87	5,0
4	1500	1,07	5,0
12	1700	1,13	4,0
17 C	1700	0,97	4,0
1	1500	0,87	3,0
15 C	1700	0,97	4,0
11	1700	0,8	4,0
19 C	1700	0,97	4,0
20 C	1700	0,97	4,0
Adicional	1500	1,13	5,0

Fonte: Próprio Autor

Para análise das microestruturas e microdurezas foram produzidos três ensaios extras, sendo dois ensaios com parâmetros dos pontos centrais (rotação de 1700 rpm, penetração e 0,97 e tempo de permanência de 4 segundos), identificados no trabalho como 19 C e 20 C e uma amostra adicional com os parâmetros da corrida 2, (rotação de 1500 rpm, penetração 1,13 milímetros e 5 segundos de tempo de permanência).

4.1.4. Preparação do Corpo de Prova

Os corpos de prova foram usinados utilizando um equipamento de corte a jato d'água com abrasivo, para obtenção de tiras de chapas de 45mm de largura, 105 mm de comprimento e 0,7 mm de espessura, representados pela Figura 42. Essa geometria, escolhida de acordo com o ensaio de cisalhamento da norma ISO14273:2002 “Specimens Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot, Seam and Embossed Projection Welds”, possibilitou o processamento das juntas sobrepostas de 1,4mm através da soldagem por FSSW.

Figura 42 – Representação de dimensões dos Corpos de Prova

Fonte: Próprio Autor

Para manufatura da junta FSSW posicionou-se os corpos de prova na base de fixação, de acordo com a norma ISO14273:200 (Figura 43), utilizando-se das tampas da base e da geometria da bigorna para o correto posicionamento e fixação da junta. Anexo II.

Figura 43 – Representação de dimensões dos Corpos de Prova

Fonte: Próprio Autor

4.1.5. Equipamento para solda pelo processo FSSW

Para a realização das soldas foi utilizado o equipamento fabricado pela empresa americana MTI, modelo GG-7, instalado no Laboratório de Estruturas Leves (LEL) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), sediado no Parque Tecnológico da cidade de São Jose dos Campos, conforme a Figura 44. De uso específico para soldas FSW, este equipamento possui uma mesa de 3800 por 3900 mm, com capacidade de aplicação de 80kN de força axial, 3000 rpm de rotação, 3000mm/min de velocidade de avanço e 280 N m de torque. Em seu cabeçote existe um conjunto de células de carga que possibilitam o monitoramento e obtenção dos dados relacionados aos esforços durante o processo. O controle do equipamento é feito através de comando numérico computacional (CNC), onde é possível preparar e monitorar os parâmetros programados para o processo de solda. Os parâmetros monitorados no equipamento durante obtenção das juntas de FSSW, foram deslocamento da ferramenta, em milímetros, em relação a mesa fixação, o torque da ferramenta e o esforço axial.

Figura 44 – Máquina CNC para soldagem de FSW

Fonte: Próprio Autor

Devido a particularidade do equipamento, foi necessário o desenvolvimento de uma haste de fixação para o ferramental, manufaturada de SAE 1045 torneada e eletroerodida, conforme o desenho da Figura 45, com detalhes no Anexo III.

Figura 45 – Haste para soldagem de FSSW

Fonte: Próprio Autor

4.1.6. Base para solda FSSW.

Devido a máquina fornecida IPT do Centro Tecnológico de São José dos Campos ser específica para FSW, foi necessário o desenvolvimento de uma base de fixação para adaptar o processo de FSSW. A base tem como objetivo a fixação dos corpos de prova seguindo a norma ISO14273:2002, para os ensaios de cisalhamento, conforme Figura 46 e 47. Outros detalhes da geometria, características e especificações técnicas do dispositivo estão disponíveis no Anexo IV a VII.

Figura 46– Projeto base para solda FSSW

Fonte: Próprio Autor

Figura 47– Base para solda FSSW

Fonte: Próprio Autor

A base adaptadora, peça identificada em azul na Figura 46, foi confeccionada de material de SAE 1020 e tem a função de possibilitar a sujeição na mesa do equipamento de FSW. Suas dimensões são mostradas na Figura 48, com detalhes no Anexo IV

Figura 48 – Base de apoio

Fonte: Próprio Autor

Com o objetivo de garantir o posicionamento do corpo de prova e manter a localização do ponto em todos os ensaios, foi projetada a base de fixação, identificada em cinza na Figura 46, manufaturada de SAE 1045, com tratamento térmico de têmpera total com dureza aproximada de 50 HRC e, posteriormente, retificada e eletroerodida na região do ponto de solda para fixação do disco de sacrifício, conforme Figura 49 e Anexo V.

Figura 49 – Base de fixação

Fonte: Próprio Autor

Para o conjunto foi necessário a confecção de dois sujeitadores identificados como laranja na Figura 46. Utilizando 4 parafusos, possibilitaram, a fixação e o posicionamento dos corpos de provas, conforme a Figura 50 (sujeitador do lado direito) e Anexo VI.

Figura 50 – Sujeitador do lado direito

Fonte: Próprio Autor

Por fim, conforme estabelecido na literatura, o disco de sacrifício, identificado na Figura 46 na cor roxa, manufaturado com o mesmo material do ferramental pelo processo de eletroerosão, tendo como objetivo possibilitar o uso da base de fixação para demais ensaios e futuros experimentos, uma vez que pode ser substituído facilmente sem comprometer a fixação da base. As dimensões do disco, ilustradas na Figura 51, podem ser encontradas do Anexo VII.

Figura 51 – Disco de sacrifício

Fonte: Próprio Autor

A Figura 52 apresenta uma vista ilustrativa da posição da ferramenta durante a solda por atrito e mistura mecânica a ponto (FSSW), assim como as dimensões e características utilizadas neste projeto.

Figura 52 – Vista ilustrativa da ferramenta durante o processo FSSW

Fonte: Próprio Autor

Na figura 52 estão representados:

- ØD : Diâmetro do ombro
- $\text{Ø}d_1$: Diâmetro base do pino
- $\text{Ø}d_2$: Diâmetro ponta do pino
- e : Profundidade de penetração do ombro
- F : Força axial ou força de forjamento
- ℓ : Comprimento do pino
- t : Espessura da chapa
- p : Profundidade de penetração da solda
- ω : Rotação da Ferramenta

4.1.7. Medição de temperatura.

Para medir a temperatura durante o processo da soldagem da junta, foi utilizado o equipamento do fabricante FLIR, modelo T450sc, apresentado na Figura 53, cujas características técnicas estão detalhadas na Tabela 3.

Posicionada na parte frontal da base de fixação, com foco no ponto de fixação da junta, a medição foi realizada através de filmagem de cada um dos corpos de provas obtidos pelo processo de soldagem. Utilizando os dados obtidos, fez-se compilação dos valores de temperatura em intervalos de aproximadamente 0,1 segundos, obtendo-se, assim, a média e o desvio padrão da temperatura de cada corpo de prova.

Figura 53 - Câmera térmica FLIR T450sc

Fonte: FLIR, 2016.

Tabela 3 – Dados técnicos da câmera térmica FLIR T450sc

Sistema	
Tipo de detector	Microbolômetro não-resfriado
Faixa espectral	7.5 a 13 μm
Resolução	320 x 240
Passo do detector	25 μm
NETD	< 30 mK
Imagem /Eletrônica	
Constante de tempo	< 12 ms
Taxa de frames	60 Hz
Faixa dinâmica	14-bit
Medição	
Faixa de temperatura	1000 a 1600 $^{\circ}\text{C}$
Precisão	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 1\%$

Fonte: FLIR, 2016.

4.1.8. Microdureza

Para a obtenção dos valores de microdureza no estudo, os corpos de prova relacionados aos pontos centrais, foram preparados para as medidas na região da solda. Para esta preparação foi necessário o corte das arestas do CP, utilizando o equipamento de corte de jato d'água, considerando a geometria de 40 x 40 mm e centralizando o ponto de solda, conforme Figura 54. Posteriormente foi executado o corte na secção transversal da região soldada, conforme a Figura 55.

Figura 54 – Corpo de prova para microdureza

Fonte: Próprio Autor

Figura 55 – Corpo de prova para microdureza secção transversal

Fonte: Próprio Autor

Com os corpos de prova preparados, foram realizadas as endentações com o microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2, conforme a Figura 56. O equipamento possui uma mesa micrométrica para fixação do corpo de prova que possibilita movimentação longitudinal e transversal. Os corpos de prova foram posicionados com o ponto de solda no centro do equipamento e a carga selecionada foi de 500 gramas (HV0.5), com avanço de 0.2 mm para cada medida.

Figura 56 – Microdurômetro Shimadzu HMV-2

Fonte: Próprio Autor

Para finalizar a medição da microdureza foi utilizado um microscópio óptico com câmera digital acoplado a um computador, com um software para aquisição e processamento de imagem. O microscópio, do fabricante Olympus modelo BX60MF5, ilustrado pela Figura 57, e o software analySIS, versão 5.1 (build 2640), também da Olympus, possibilitaram obter o perfil de microdureza em Vickers na superfície do ponto de solda.

Figura 57 – Microscópio óptico Olympus BX60MF5

Fonte: Próprio Autor

4.1.9. Metalografia

Os seccionamentos das amostras foram feitos com disco abrasivo para corte em precisão. Para caracterização na região do ponto as amostras foram cortadas de forma transversal ao corpo de prova. Na etapa seguinte, foi realizado o processo de embutimento em baquelite da secção cortada, seguido de lixamento em lixas circulares de granulometrias 180, 220, 320, 400 e 600, facilitando a etapa seguinte de polimento. A granulometria dos panos utilizados no polimento foi de 6 a 1 μm , para obtenção de uma superfície mais polida possível, isenta de riscos, não interferindo nas análises com o microscópio óptico. Após o polimento as amostras foram atacadas com reagente Nital durante 10s.

A análise foi feita em um equipamento de microscopia ZEISS Axio Scope A1, com câmera fotográfica ZEISS AxioCan Cr.3 e software AxioVs40 versão 4.8.2.0, conforme Figura 58.

Figura 58 – Microscópio ZEISS Axio Scope A1

Fonte: Próprio Autor

Utilizando os ensaios adicionais específicos 19 C, 20 C e Ensaio Adicional, segregados do planejamento experimental, os mesmos foram analisados pela Microscopia Eletrônica de Varredura MEV, com objetivo de caracterizar os tamanhos de grãos do material base e as transformações das microestruturas na região do pontos de solda.

A análise foi feita em um equipamento de Eletrônica de Varredura MEV, do fabricante TESCAN modelo VEGA 3 LMU, com detector de Espectroscopia por energia dispersiva EDS, marca Oxford modelo X-Act. Figura 59. O equipamento está localizado no Laboratório de Materiais do SENAI Mario Amato, São Bernardo do Campo.

Figura 59 – Microscópio Varredura Eletrônica MEV TESCAN

Fonte: Próprio Autor

4.1.10. Medição da largura na interface da solda

Com objetivo de caracterizar a área da zona de mistura ZM, foram exportadas as imagens obtidas na microscopia, utilizando-se o software AxioVs40 versão 4.8.2.0, para o Microstation com a finalidade de medir as larguras na posição da interface das chapas, conforme Figura 60.

Figura 60 – Medição da largura na interface

Fonte: Autor

Esse procedimento teve como objetivo de avaliar a influência do tamanho da zona de mistura e da largura na interface, com relação ao comportamento mecânico da junta após ensaio de tração.

4.1.11. Ensaio da tração

Após a inspeção visual, as amostras selecionadas foram submetidas ao ensaio de tração, no Centro de Laboratório Mecânicos (CLM) da FEI em São Bernardo do Campo no equipamento descrito no item 4.1.1 deste estudo.

Para o ensaio foi desenvolvido 2 calços nos corpos de prova, para garantir o esforço de direção única, resultando em um esforço axial. A representação esquemática para do ensaio está ilustrada, conforme Figura 61.

Figura 61 – Representação esquemática ensaio tração

Fonte: Próprio Autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. PARÂMETROS DO PROCESSO

5.1.1. Resultados das variáveis dependentes

Após a confecção das juntas no equipamento de FSW, foi gerado um arquivo com os dados relacionados às variáveis dependentes, que possibilitou realizar a análise do processamento de cada ensaio, de acordo com o planejamento experimental. Os tratamentos desses dados permitiram a análise, para cada uma das variáveis dependentes, isto é, a força axial, o torque e a potência.

Conforme a Figura 62, é possível verificar, no ensaio do corpo de prova 3, a Força Axial aplicada no processo com relação ao deslocamento da ferramenta. Nota-se que os três picos de esforço da força axial, correspondem ao início da atuação do pino no corpo de prova, posteriormente, a ação do ombro e pôr fim a penetração final da ferramenta. Os dados coincidem com as informações da revisão bibliográfica, onde a força axial cresce rapidamente com o contato do ombro na superfície da solda, (LATHABAI, PAINTER, 2006). Essas variações foram observadas nos gráficos de cada um dos ensaios, conforme Anexo VIII.

Figura 62 – Gráfico do deslocamento e força axial pelo tempo

Fonte: Autor

Com os dados obtidos, foi verificado o torque em relação ao deslocamento do ferramental, em cada uma das corridas do planejamento. Quando a ferramenta entra em contato com a chapa superior, o torque começa a crescer devido ao esforço de atrito, possibilitando a deformação do material base. Ao atingir o valor máximo de penetração, em 4,42 segundos, mostrado na Figura 63, o aumento de torque chega ao seu limite no processo, evidenciando, após seu valor máximo, que a mistura mecânica ocorreu de forma decrescente até a saída do ferramental, no tempo de 8,85 segundos. Em outras palavras, após atingir o ponto máximo nota-se a diminuição gradativa do torque, proveniente da estabilização do volume de mistura, conforme a Figura 63, relativa ao ensaio 5.

Figura 63 – Gráfico do deslocamento e torque pelo tempo

Fonte: Autor

Com o torque e a rotação, foram calculadas a potência em quilowatts durante o processo, possibilitando a criação do respectivo gráfico com relação ao deslocamento da ferramenta, com o intuito de identificar a relação da potência utilizada com a resistência máxima do cisalhamento da junta, propiciando um valor de comparação entre o desempenho e o consumo da aplicação. A Figura 64 refere-se ao ensaio 10, o restante dos gráficos relacionados aos ensaios estão anexados no final do trabalho.

Figura 64 – Gráfico deslocamento e potência pelo tempo

Fonte: Autor

5.1.2. Força Axial

Com os dados obtidos da força axial durante o processo de solda, foi possível verificar a sua correlação com a profundidade de penetração do ferramental. Como se observa na Figura 65, os maiores valores da força axial no processo são encontrados entre as corridas 3, 4, 7 e 8, que possuem os valores de penetração conforme o planejamento experimental (Tabela 2, página 56), de 1,07 milímetros. Conforme citado por (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006), a força axial aumenta rapidamente a partir do contato do pino com a chapa superior e seu valor máximo se dá no momento do contato do ombro da ferramenta com a superfície da chapa superior. Verifica-se também que a força axial nessas corridas tem um pico de valor entre 14 kN e 17 kN. O esforço mais elevado, na maior profundidade de penetração, ocorre devido ao maior volume de material envolvido na zona de mistura e à pressão que o ferramental realiza para deformar plasticamente a região. A queda do valor de força axial, após a máxima profundidade de penetração, se manteve em todos os ensaios.

Figura 65 – Gráfico da força axial pelo tempo nos ensaios de 1,07 mm de penetração

Fonte: Próprio Autor

O esforço do ferramental se comportou de maneira mais estável após a penetração máxima, nos parâmetros do ponto central (Figura 66), dados por 1400 rotações por minuto, 0,97 milímetros de profundidade de penetração e 4 segundos de tempo de permanência. Ao compararmos com os dados da Figura 65, verifica-se que mesmo com alteração da rotação, os valores de força axial se mantiveram entre 14 a 17 kN, confirmando que o fator da profundidade de penetração influencia diretamente a força axial do processo.

Figura 66 – Gráfico da força axial pelo tempo com a penetração de 0,97 mm nos pontos centrais

Fonte: Autor

Também é possível verificar que os fatores de tempo de permanência e rotação, não foram fatores significativos se comparados com a penetração. Como mostrado na Figura 67, o valor para a maior rotação de 2036 rpm se manteve próximo ao valor de força axial para a rotação mínima de 1363 rpm, assim como os valores de força axial relacionados ao tempo de permanência, conforme a Figura 68. Nota-se que nos ensaios 13 e 14, com rotação de 1700 rpm, as forças obtidas tiveram comportamento próximos, mesmo com parâmetros de tempo no máximo de 5,7 segundos e mínimo de 3,2 segundos.

Figura 67 – Gráfico da força axial pelo tempo com as rotações máxima e mínima

Fonte: Autor

Figura 68 – Gráfico da força axial pelo tempo com tempo de permanência máximo e mínimo

Fonte: Autor

5.1.3. Torque

A análise dos dados obtidos do torque, mostraram o trabalho de mistura realizado pelo ferramental. Verifica-se que o torque sofreu influência significativa com relação a rotação e penetração dos parâmetros selecionados nas variáveis dependentes. O comportamento do torque se manteve estável na maioria dos ensaios, com valores de 35 a 50 N m, em aproximadamente 90% das solicitações. Como se pode observar na Figura 69, a solicitação crítica (ensaio 8 definido com 1900 rpm, 0,97 milímetros de penetração e 5 segundos de permanência) gerou o maior pico de torque com relação aos demais ensaios. Da mesma forma, o ensaio 11 (rotação de 1700 rpm, penetração de 0,80 milímetros e tempo de permanência de 4 segundos), teve o menor valor de torque obtido nos ensaios. A relação do torque com os valores de penetração e rotação está vinculada ao fluxo de material na zona de mistura. Quanto maior o volume de material devido a penetração, maior o atrito e, consequentemente, maior o torque que o ferramental tem que exercer para deformar plasticamente a zona de mistura, no mesmo intervalo de tempo.

Maiores rotações tendem a deformar plasticamente em maior velocidade, facilitando a assimilação de mais material, conforme ocorre a penetração da ferramenta. Conforme mostrado no estudo (LATHABAI, PAINTER, 2006) na Figura 22, o torque durante processo apresenta seu valor máximo quando atinge a profundidade de penetração estabelecida. Com relação aos demais ensaios o torque durante o processo se manteve constante, conforme Figura 70.

Figura 69 – Gráfico do torque pelo tempo com solicitação de máximo e mínimo

Fonte: Autor

Figura 70 – Gráfico do torque pelo tempo para diferentes rotações

Fonte: Autor

5.1.4. Potência

A potência, nos dados relacionados, foi obtida através da rotação e do torque fornecidos como parâmetros pelo equipamento de soldagem. Assim como o torque, a potência demonstrou valores diretamente ligados a rotação e penetração no processo, Figura 71. No caso da potência o tempo é um fator considerável na busca por um desempenho mais econômico, mesmo não demonstrando relações significativas com a conformação mecânica no processo. A Figura 72, estabelece uma relação de equivalência, se comparado a área de cada um dos ensaios. Se considerarmos o valor de energia realizado pelo intervalo de tempo do processo, nota-se uma média de 41,6 kW/s, com desvio padrão de 1,69 kW/s, podendo-se, assim, considerar os menores valores de tempo para um resultado eficiente na obtenção da junta.

Figura 71 – Gráfico da potência pelo tempo com menores tempos de permanência

Fonte: Autor

Figura 72 – Gráfico da potência pelo tempo com o tempo de permanência máximo e mínimo

Fonte: Autor

5.2. TEMPERATURA

As temperaturas obtidas tiveram como área de medição as regiões termomecanicamente afetadas (ZTMA) das chapas soldadas, uma vez que as limitações do equipamento e projeto só possibilitaram o enfoque nas regiões próximas as superfícies do ombro da ferramenta. Os dados obtidos mostraram que o aporte de energia foi proporcional a rotação e a penetração para cada corrida. Exemplifica-se com o ensaio 9, que se caracterizou pela menor rotação aplicada (1363 rpm) e que apresentou o menor valor de temperatura durante o processo, identificado na Figura 73 pela linha laranja. Já a corrida 12 que apresentou o maior valor de penetração 1,14 milímetros, identificado pela linha ocre, o valor temperatura máxima ocorreu em um menor tempo, condizente com a situação de maior esforço do ferramental. O ensaio 10, que apresentou a maior rotação aplicada do planejamento (2036 rpm), mostrou um valor de temperatura mais estável, evidenciando que o atrito entre a ferramenta e o material base se manteve durante mais tempo em relação as demais soldas.

Figura 73 – Gráfico da temperatura x tempo com o tempo de permanência 4 segundos

Fonte: Autor

Avaliando as temperaturas máxima e mínima, obtidas nos ensaios, identificamos a relação do aumento de rotação com o aumento de temperatura, onde a máxima rotação de 2036 rpm gerou uma temperatura de processo próxima de 710° C, já a mínima rotação de 1363 rpm gerou uma temperatura máxima de 500° C, como vemos na Figura 74.

Figura 74 – Gráfico da temperatura pelo tempo com rotações máxima e mínima

Fonte: Autor

As temperaturas obtidas estão relacionadas com a janela de parâmetros selecionada no planejamento experimental, isto é, se verificarmos a relação das temperaturas com as variáveis independentes, veremos que, para rotações de 1500 rpm, temos uma faixa de temperaturas de 450 a 610° C (Figura 75). Para rotações de 1700 rpm, os valores de temperatura aumentam, estando na faixa de 650 a 920° C (Figura 75). Porém com o aumento da rotação para 1900 rpm a temperatura volta a diminuir, ficando em uma faixa de 400 a 500° C, Figura 77.

Figura 75 – Gráfico da temperatura x tempo com rotação 1500 rpm

Fonte: Autor

Figura 76 – Gráfico da temperatura pelo tempo com rotação de 1700 rpm

Fonte: Autor

Figura 77 – Gráfico da temperatura pelo tempo com rotação de 1900 rpm

Fonte: Autor

Essa diminuição na temperatura com o aumento da rotação está ligada a relação do atrito do ferramental com o material base. Pode-se verificar que a rotação de 1700 rpm é uma rotação crítica, onde o ferramental tende trabalhar no máximo atrito, tendo um maior fluxo de mistura e consequentemente uma maior temperatura. Como pode-se verificar na Figura 78, as temperaturas máximas, em graus Celsius, atingidas nos pontos centrais (936 no ensaio 15C, 779 no ensaio 16C, 934 no ensaio 17C, 823 no ensaio 18C, 707 no ensaio 19C e 927 ensaio 20C), indicam que, o material chegou a temperaturas de transformação de fase completa de ferrita para austenita durante o processo, uma vez que os valores estão relacionados a zona termomecanicamente afetada ZTMA, e a temperatura abaixo da ferramenta que, seguramente, foi mais elevada devido ao atrito e a pressão. Com o aumento da temperatura, já próximo da transformação de fase total da austenita, tanto a rugosidade quando o volume do material foi modificado, assim a transformação total da austenita, acrescida do esforço em altas temperaturas, cria um efeito de recristalização completa na zona de mistura, diminuindo o encruamento e tensões geradas pela mistura na região da solda e diminuindo o esforço máximo de cisalhamento.

Figura 78 – Gráfico da temperatura pelo tempo com rotação de 1700 nos pontos centrais

Fonte: Autor

5.3. ANÁLISE DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A análise do planejamento experimental, elaborado para esta pesquisa, foi executada no software Statistica. Os dados utilizados na obtenção da análise foram os dados máximos obtidos durante o processo, mostrados na Tabela 4. Dentro da ANOVA do DOE, foi gerado uma análise fatorial e superfície de resposta visando o melhor desempenho para o processo em cada variável dependente.

Tabela 4 – Dados de entrada DOE Statistica

Ensaio	Rotação (rpm)	Penetração (mm)	Permanência (s)	Temperatura Max (°C)	Força Max Cisalhamento (N)	Força Axial Max (N)	Torque Max (N m)	Potência Max (kW)
1	1500	0,87	3,0	944,72	7212,79	11441,41	33,02	5,19
2	1500	0,87	5,0	536,86	7288,30	5990,24	33,50	5,26
3	1500	1,07	3,0	682,17	6380,21	13969,77	45,42	7,13
4	1500	1,07	5,0	476,68	8314,08	15396,27	47,80	7,51
5	1900	0,87	3,0	590,03	7669,78	10078,23	46,85	9,32
6	1900	0,87	5,0	497,21	7823,75	10284,76	50,24	9,99
7	1900	1,07	3,0	524,23	7594,27	16712,50	44,94	8,94
8	1900	1,07	5,0	497,64	6723,44	17063,47	67,94	13,52
9	1363	0,97	4,0	502,13	8325,85	13280,15	50,24	7,18
10	2036	0,97	4,0	726,69	8136,58	12966,90	47,80	10,19
11	1700	0,8	4,0	692,41	6661,66	9906,38	32,48	5,78
12	1700	1,14	4,0	790,99	7731,56	16507,08	50,24	8,94
13	1700	0,97	2,3	835,17	7960,06	14779,40	45,42	8,08
14	1700	0,97	5,7	808,36	6399,82	12954,96	46,37	8,25
15 C	1700	0,97	4,0	779,07	7439,32	13375,91	47,32	8,42
16 C	1700	0,97	4,0	934,76	8466,08	12223,34	46,37	8,25
17 C	1700	0,97	4,0	823,02	7755,10	11292,32	40,65	7,24
18 C	1700	0,97	4,0	927,42	6935,29	10816,57	45,89	8,16

Fonte: Autor

5.3.1.1. Resultado do DOE da força máxima de cisalhamento

A análise fatorial e a ANOVA, com relação a força máxima de cisalhamento, não gerou uma correlação entre as variáveis, e isso ocorreu devido a seleção dos parâmetros utilizados no planejamento experimental (Figuras 79 e 80). Os resultados coincidem com as observações que foram feitas em relação a rotação e profundidade de penetração, descrita nos tópicos anteriores, devido a sua correlação com o torque no processo, que determinou o volume da zona de mistura na solda. A superfície de resposta, comparada com os valores escolhidos na janela de variáveis, corresponde a uma boa previsão, uma vez que os resultados foram entre 6,6 e 8,4 kN, obtendo-se soldas com altas características de resistência ao cisalhamento. Como é possível verificar na Figura 81, a rotação de 1300 rpm se mostrou mais favorável com a penetração média de 0,97 mm a 1,07 mm, para um esforço máximo de cisalhamento de 8,4 kN. Nota-se que a utilização de rotações maiores, como 2050 rpm, também possibilitou uma alta resistência na junta, porém, em profundidades de penetração menores. Entende-se que a correlação entre os resultados está ligada a atuação do torque do ferramental, uma vez que o resultado possibilita o

mesmo trabalho de mistura plástica, descrito pelo torque no tópico relacionado aos dados do equipamento e evidenciado na Figura 82.

Figura 79 – Análise fatorial da força cisalhamento máxima

Effect Estimates: Var: Força de Cis Max (N); R-sqr= 41074; Adj: 0, (2**(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 ([No active dataset]) in Resultado 1) 3 factors, 1 Blocks, 18 Runs; MS Residual=543184,7 DV: Força de Cis Max (N)											
Factor	Effect	Std. Err.	t(8)	p	-95, % Cnf Limit	+95, % Cnf Limit	Coeff.	Std Err. Coeff.	-95, % Cnf Limit	+95, % Cnf Limit	
Mean/Interc.	7656,356	367,9641	20,80734	0,000000	6807,83	8504,883	7656,356	367,9641	6807,830	8504,883	
(1)Rotação (rpm)(L)	43,575	398,8673	0,10925	0,915697	-876,21	963,365	21,788	199,4336	-438,107	481,682	
Rotação (rpm)(Q)	345,369	414,4507	0,83332	0,428842	-610,36	1301,094	172,684	207,2253	-305,178	650,547	
(2)Penetração (mm)(L)	119,608	398,8673	0,29987	0,771920	-800,18	1039,398	59,804	199,4336	-400,091	519,699	
Penetração (mm)(Q)	-386,205	414,4507	-0,93185	0,378679	-1341,93	569,520	-193,102	207,2253	-670,965	284,760	
(3)Tempo de Permanência (s)(L)	-194,991	398,8673	-0,48886	0,638059	-1114,78	724,798	-97,496	199,4336	-557,390	362,399	
Tempo de Permanência (s)(Q)	-397,993	414,4507	-0,96029	0,365029	-1353,72	557,732	-198,997	207,2253	-676,859	278,866	
1L by 2L	-342,253	521,1452	-0,65673	0,529788	-1544,02	859,510	-171,126	260,5726	-772,008	429,755	
1L by 3L	-681,562	521,1452	-1,30782	0,227264	-1883,32	520,201	-340,781	260,5726	-941,662	260,101	
2L by 3L	208,392	521,1452	0,39987	0,699714	-993,37	1410,155	104,196	260,5726	-496,686	705,077	

Fonte: Autor

Figura 80 – ANOVA da força cisalhamento máxima

ANOVA: Var: Força de Cis Max (N); R-sqr= 41074; Adj: 0, (2**(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 ([No active dataset]) in Resultado 1) 3 factors, 1 Blocks, 18 Runs; MS Residual=543184,7 DV: Força de Cis Max (N)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Rotação (rpm)(L)	6483	1	6482,9	0,011935	0,915697
Rotação (rpm)(Q)	377197	1	377196,9	0,694417	0,428842
(2)Penetração (mm)(L)	48844	1	48844,1	0,089922	0,771920
Penetração (mm)(Q)	471669	1	471669,3	0,868340	0,378679
(3)Tempo de Permanência (s)(L)	129814	1	129813,7	0,238986	0,638059
Tempo de Permanência (s)(Q)	500903	1	500902,9	0,922159	0,365029
1L by 2L	234274	1	234273,8	0,431297	0,529788
1L by 3L	929052	1	929052,4	1,710380	0,227264
2L by 3L	86854	1	86854,4	0,159898	0,699714
Error	4345478	8	543184,7		
Total SS	7374433	17			

Fonte: Autor

Figura 81 – Superfície de resposta da força máxima de cisalhamento da rotação pela penetração.

Fonte: Autor

Figura 82 – Gráfico do torque pelo tempo

Fonte: Autor

Com relação ao tempo de permanência, a superfície de resposta apresenta os tempos maiores entre 3,5 e 5,5 segundos para rotação de 1300 rpm, enquanto que no intervalo de 2000 a 2100 rpm, o tempo de melhor resultado foi de 2,0 a 3,5 segundos. Isso mostra que existe uma relação entre o atrito da ferramenta e a mistura no processo, em que os parâmetros no ponto central do planejamento perdem eficiência devido a maior temperatura, como se pode identificar na Figura 83.

Figura 83 – Superfície de resposta força máxima de cisalhamento com rotação pelo tempo de permanência

Fonte: Autor

5.3.1.2. Resultado do DOE com relação a força axial

Na análise dos dados do DOE, com relação a força máxima axial gerada durante o processo da solda FSSW, é possível verificar que o gráfico de Pareto mostra que o fator determinante, com relação aos parâmetros no processo, é a penetração do ferramental, como se verifica nas Figuras 84 a 86.

Figura 84 – Análise fatorial da força axial máxima

Effect Estimates; Var.:Força Axial Max (N); R-sqr= 85247; Adj. 6865 (2**(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 (No active dataset)) in Resultado 1) 3 factors, 1 Blocks, 18 Runs; MS Residual=2519663, DV: Força Axial Max (N)											
Factor	Effect	Std. Err.	t(8)	p	-95, % Cnf. Limit	+95, % Cnf. Limit	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95, % Cnf. Limit	+95, % Cnf. Limit	
Mean/Interc.	11969,20	792,507	15,10296	0,000000	10141,67	13796,72	11969,20	792,5068	10141,67	13796,72	
(1)Rotação (rpm)(L)	997,95	859,065	1,16167	0,278853	-983,06	2978,96	498,98	429,5324	-491,53	1489,48	
Rotação (rpm)(Q)	468,71	892,628	0,52509	0,613756	-1589,69	2527,12	234,36	446,3138	-794,85	1263,56	
(2)Penetração (mm)(L)	5337,74	859,065	6,21343	0,000256	3356,74	7318,75	2668,87	429,5324	1678,37	3659,37	
Penetração (mm)(Q)	527,55	892,628	0,59100	0,570835	-1530,86	2585,95	263,77	446,3138	-765,43	1292,97	
(3)Tempo de Permanência (s)(L)	-957,10	859,065	-1,11412	0,297578	-2938,11	1023,91	-478,55	429,5324	-1469,05	511,95	
Tempo de Permanência (s)(Q)	994,56	892,628	1,11419	0,297550	-1063,85	3052,96	497,28	446,3138	-531,92	1526,48	
1L by 2L	369,65	1122,422	0,32933	0,750364	-2218,66	2957,96	184,82	561,2111	-1109,33	1478,98	
1L by 3L	1145,54	1122,422	1,02060	0,337313	-1442,77	3733,85	572,77	561,2111	-721,38	1866,93	
2L by 3L	1755,53	1122,422	1,56405	0,156435	-832,78	4343,84	877,76	561,2111	-416,39	2171,92	

Fonte: Autor

Figura 85 – ANOVA da força axial máxima

ANOVA: Var. Força Axial Max (N), R-sq= 85247, Adj. 6865 (2**(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 ([No active dataset]) in Resultado 1) 3 factors, 1 Blocks, 18 Runs; MS Residual=2519663, DV: Força Axial Max (N)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Rotação (rpm)(L)	3400242	1	3400242	1,34948	0,278853
Rotação (rpm)(Q)	694729	1	694729	0,27572	0,613756
(2)Penetração (mm)(L)	97276039	1	97276039	38,60676	0,000256
Penetração (mm)(Q)	880078	1	880078	0,34928	0,570835
(3)Tempo de Permanência (s)(L)	3127562	1	3127562	1,24126	0,297578
Tempo de Permanência (s)(Q)	3127954	1	3127954	1,24142	0,297550
1L by 2L	273276	1	273276	0,10846	0,750364
1L by 3L	2624531	1	2624531	1,04162	0,337313
2L by 3L	6163745	1	6163745	2,44626	0,156435
Error	20157306	8	2519663		
Total SS	136631247	17			

Fonte: Autor

Figura 86 – Gráfico de Pareto efeitos das variáveis na força axial

Fonte: Autor

Através das superfícies de resposta, podemos verificar que as melhores condições para força axial estão localizadas nos menores parâmetros de penetração. A força axial está diretamente ligada ao desgaste da ferramenta e, segundo (BABU, SANKAR, 2012), ao efeito gancho na estrutura da solda. Conforme a superfície de resposta, o desempenho que gera uma força axial menor que 8 kN foi obtido para uma penetração de 0,75 a 0,8 mm, conforme a Figura 87. Com relação ao tempo de permanência, a análise do DOE apresentou um falso resultado para a força axial e o tempo de permanência, como se pode verificar que na Figura 88. Os menores valores estão na rotação de 1300 rpm e tempo de permanência de 5 a 6 segundos, porém, se avaliarmos os gráficos obtidos pelos dados do equipamento, Figura 89 a 91, veremos que o tempo não influi na força axial. Essa

diferença de valores apresentada ocorre devido o DOE avaliar somente os valores máximos obtidos durante o processo.

Figura 87 – Superfície de resposta da força axial com relação a rotação pela penetração

Fonte: Autor

Figura 88 – Superfície de resposta da força axial com relação a rotação pelo tempo de permanência

Fonte: Autor

Figura 89 – Gráficos força axial pelo tempo com tempos de permanências 3 segundos

Fonte: Autor

Figura 90 – Gráficos força axial pelo tempo com tempos de permanências 4 segundos

Fonte: Autor

Figura 91 – Gráficos força axial pelo tempo com tempos de permanências 5 segundos

Fonte: Autor

5.3.1.3. Resultado do DOE com relação ao torque

Segundo a análise dos dados do torque, a única variável que se mostrou significativa, foi a penetração da ferramenta, conforme a ANOVA e do gráfico de Pareto, (Figuras 92 a 94), e esse resultado coincide com os valores apresentados na Figura 60. É visível que a rotação também tem seu valor considerável, porém não há significância de 5% considerado pelo método. Como citado anteriormente, a análise do DOE só considera os fatores máximos, porém a rotação tem sua parcela de influência no torque. Como descrito no tópico 5.1.3, o volume deformado plasticamente na zona de mistura é proporcional a rotação, pois maiores rotações possibilitam maiores misturas em função do tempo. Porém como os dados referentes ao DOE foram analisados em relação aos valores máximos, não é possível encontrar esta proporcionalidade nas superfícies de resposta.

Figura 92 – Análise fatorial do torque máximo

Effect Estimates: Var.:Torque Max (N.m); R-sqr=,7517; Adj.:47236 (2**(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 (No active dataset)) in Resultado 1) 3 factors, 1 Blocks, 18 Runs, MS Residual=33,55686 DV: Torque Max (N.m)										
Factor	Effect	Std. Err.	t(8)	p	-95 % Cnf.Limt	+95 % Cnf.Limt	Coeff.	Std. Err.	-95 % Cnf.Limt	+95 % Cnf.Limt
Mean/Inter.	45,02059	2,892161	15,56642	0,000000	38,3513	51,68992	45,02059	2,892161	38,35125	51,68992
(1)Rotação (rpm)(L)	6,75605	3,135056	2,15500	0,063280	-0,4734	13,98550	3,37802	1,567528	-0,23670	6,99275
Rotação (rpm)(Q)	3,13379	3,257540	0,96201	0,364216	-4,3781	10,64569	1,56689	1,628770	-2,18906	5,32284
(2)Penetração (mm)(L)	10,59758	3,135056	3,38035	0,009637	-3,3681	17,82703	5,29879	1,567528	1,68406	8,91352
Penetração (mm)(Q)	-2,28166	3,257540	-0,70042	0,503520	-9,7936	5,23024	-1,14083	1,628770	-4,89678	2,61512
(3)Tempo de Permanência (s)(L)	4,52042	3,135056	1,44189	0,187310	-2,7090	11,74987	2,26021	1,567528	-1,35452	5,87494
Tempo de Permanência (s)(Q)	0,92125	3,257540	0,28281	0,784505	-6,5906	8,43315	0,46063	1,628770	-3,29532	4,21658
1L by 2L	-2,72670	4,096148	-0,66567	0,524344	-12,1724	6,71904	-1,36335	2,048074	-6,08622	3,35952
1L by 3L	5,88550	4,096148	1,43684	0,188697	-3,5602	15,33124	2,94275	2,048074	-1,78012	7,66562
2L by 3L	5,37890	4,096148	1,31316	0,225541	-4,0668	14,82464	2,68945	2,048074	-2,03342	7,41232

Fonte: Autor

Figura 93 – ANOVA do torque máximo

ANOVA: Var.:Torque Max (N.m); R-sqr=,7517; Adj.:47236 (2**(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 (No active dataset)) in Resultado 1) 3 factors, 1 Blocks, 18 Runs, MS Residual=33,55686 DV: Torque Max (N.m)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Rotação (rpm)(L)	155,839	1	155,8389	4,64403	0,063280
Rotação (rpm)(Q)	31,056	1	31,0557	0,92546	0,364216
(2)Penetração (mm)(L)	383,446	1	383,4457	11,42675	0,009637
Penetração (mm)(Q)	16,463	1	16,4628	0,49059	0,503520
(3)Tempo de Permanência (s)(L)	69,767	1	69,7667	2,07906	0,187310
Tempo de Permanência (s)(Q)	2,684	1	2,6839	0,07998	0,784505
1L by 2L	14,870	1	14,8698	0,44312	0,524344
1L by 3L	69,278	1	69,2782	2,06450	0,188697
2L by 3L	57,865	1	57,8651	1,72439	0,225541
Error	268,455	8	33,5569		
Total SS	1081,164	17			

Fonte: Autor

Figura 94 – Gráfico de Pareto efeitos das varáveis no torque

Fonte: Autor

Verificando as superfícies de respostas, é possível avaliar que os valores relacionados às menores penetrações e rotações, definidas no planejamento, possibilitam

torques mínimos de 40 a 24 N m, como mostrado nas Figuras 95 e 96. Pode-se concluir, devido ao resultado do esforço máximo de cisalhamento, que esses valores correspondem aos melhores resultados com relação a eficiência do processo. Nota-se que a superfície de resposta também coincide com a relação ao trabalho plástico em função do tempo, ou seja, com maiores rotações o tempo necessário para executar a mistura na zona ZM, é menor.

Figura 95 – Superfície de resposta do torque com relação a rotação pela penetração

Fonte: Autor

Figura 96 – Superfície de resposta do torque com relação a rotação pelo tempo de permanência

Fonte: Autor

5.3.1.4. Resultado do DOE com relação a potência

Os dados relacionados a potência máxima no processo também foram tratados, segundo o DOE e as variáveis que mais influenciaram, segundo a ANOVA, foram a rotação e a penetração da ferramenta, como se pode ver nas figuras 97 a 99.

Figura 97 – Análise fatorial da máxima potência

Effect Estimates, Var.: Potencia Max (kW); R-sqr= 86425; Adj.: 71154 (2**(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 ([No active dataset]) in Resultado 1) 3 factors, 1 Blocks, 18 Runs, MS Residual=1,104027 DV: Potencia Max (kW)											
Factor	Effect	Std. Err.	t(8)	p	-95, % Cnf. Limit	+95, % Cnf. Limit	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95, % Cnf. Limit	+95, % Cnf. Limit	
Mean/Interc.	7,965391	0,524592	15,18397	0,000000	6,755689	9,175102	7,965391	0,524592	6,755689	9,175102	
(1)Rotação (rpm)(L)	3,184817	0,568649	5,60067	0,000510	1,87351	4,496125	1,592409	0,284325	0,936755	2,248063	
Rotação (rpm)(Q)	0,619378	0,590866	1,04825	0,325155	-0,74316	1,981918	0,309689	0,295433	-0,371581	0,990959	
(2)Penetração (mm)(L)	1,854659	0,568649	3,26152	0,011501	0,54335	3,165967	0,927329	0,284325	0,271676	1,582983	
Penetração (mm)(Q)	-0,314303	0,590866	-0,53194	0,609221	-1,67684	1,048236	-0,157151	0,295433	-0,838421	0,524118	
(3)Tempo de Permanência (s)(L)	0,876899	0,568649	1,54207	0,161628	-0,43441	2,188206	0,438449	0,284325	-0,217205	1,094103	
Tempo de Permanência (s)(Q)	0,255892	0,590866	0,43308	0,676396	-1,10665	1,618431	0,127946	0,295433	-0,553324	0,809216	
1L by 2L	-0,260373	0,742976	-0,35045	0,735052	-1,97368	1,452933	-0,130187	0,371488	-0,986840	0,726466	
1L by 3L	1,200896	0,742976	1,61633	0,144685	-0,51241	2,914202	0,600448	0,371488	-0,256205	1,457101	
2L by 3L	1,050346	0,742976	1,41370	0,195161	-0,66296	2,763652	0,525173	0,371488	-0,331480	1,381826	

Fonte: Autor

Figura 98 – ANOVA da máxima potência

ANOVA: Var. Potencia Max (kW); R-sqr= 86425; Adj. 71154 (2**(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 ([No active dataset]) in Resultado 1) 3 factors, 1 Blocks, 18 Runs; MS Residual=1,104027 DV: Potencia Max (kW)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Rotação (rpm)(L)	34,63058	1	34,63058	31,36750	0,000510
Rotação (rpm)(Q)	1,21315	1	1,21315	1,09884	0,325155
(2)Penetração (mm)(L)	11,74408	1	11,74408	10,63749	0,011501
Penetração (mm)(Q)	0,31239	1	0,31239	0,28296	0,609221
(3)Tempo de Permanência (s)(L)	2,62536	1	2,62536	2,37799	0,161628
Tempo de Permanência (s)(Q)	0,20707	1	0,20707	0,18756	0,676396
1L by 2L	0,13559	1	0,13559	0,12281	0,735052
1L by 3L	2,88430	1	2,88430	2,61253	0,144685
2L by 3L	2,20645	1	2,20645	1,99855	0,195161
Error	8,83222	8	1,10403		
Total SS	65,06437	17			

Fonte: Autor

Figura 99 – Gráfico de Pareto efeitos das variáveis na potência

Fonte: Autor

Nos dados fornecidos nas superfícies de resposta nota-se que, para penetrações de 0,75 a 0,87 e rotações de 1300 a 1500 rpm, as potências mostram valores de 3 a 5 kW, conforme a Figura 100. Considerando o resultado da resistência ao cisalhamento máxima, esses valores correspondem a um menor consumo de energia e garantem as propriedades mecânicas da junta. Já com relação ao tempo de permanência (Figura 101), as rotações de 1300 a 1400 rpm apresentam a menor potência quando submetidos de 4 a 6 segundos, conforme citação de LATHABAI, PAINTER, 2006, referente a Figura 24. Porém não é

condizente com a aplicação para este estudo, pois os parâmetros obtidos no equipamento durante a solda, mostraram que tempos de permanência maiores requerem maiores potencias durante o processo, como se evidencia nas Figuras 102 a 104.

Figura 100 – Superfície de resposta DOE da potência com relação a rotação pela penetração

Fonte: Autor

Figura 101 – Superfície de resposta da potência com relação a rotação pelo tempo de permanência

Fonte: Autor

Figura 102 – Gráficos da potência pelo tempo com tempos de permanências 3 segundos

Fonte: Autor

Figura 103 – Gráficos da potência pelo tempo com tempos de permanências 4 segundos

Fonte: Autor

Figura 104 – Gráficos da potência pelo tempo com tempos de permanências 4 segundos

Fonte: Autor

5.3.1.3. Resultado do DOE com relação a temperatura

Por fim, foi analisada a influência dos parâmetros do processo sobre as temperaturas máximas medidas durante o processo de soldagem na região termomecanicamente afetada (ZTMA). Segundo a análise da ANOVA, a variável que mais impacta no processo com relação a temperatura é a rotação do ferramental, como se pode verificar nas figuras 105 a 107.

Figura 105 – Análise fatorial de máxima temperatura

Effect Estimates: Var. Temperatura Max (°C), R-sq=63448, Adj. 22328 (2**(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 ([No active dataset]) in Resultado 1) 3 factors, 1 Blocks, 18 Runs, MS Residual=21388,79 DV: Temperatura Max (°C)										
Factor	Effect	Std Err.	t(8)	p	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt	Coeff.	Std Err.	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt
Mean/Inter:	872,055	73,0171	11,94316	0,000002	703,677	1040,433	872,055	73,01715	703,677	1040,433
(1)Rotação (rpm)(L)	-22,501	79,1494	-0,28429	0,783409	-205,020	160,018	-11,251	39,57472	-102,510	80,009
Rotação (rpm)(Q)	-231,544	82,2417	-2,81540	0,022654	-421,193	-41,894	-115,772	41,12086	-210,597	-20,947
(2)Penetração (mm)(L)	-32,557	79,1494	-0,41134	0,691621	-215,076	149,962	-16,279	39,57472	-107,538	74,981
Penetração (mm)(Q)	-141,537	82,2417	-1,72098	0,123561	-331,186	48,113	-70,768	41,12086	-165,593	24,057
(3)Tempo de Permanência (s)(L)	-113,913	79,1494	-1,43921	0,188045	-296,432	68,606	-56,956	39,57472	-148,216	34,303
Tempo de Permanência (s)(Q)	-84,923	82,2417	-1,03261	0,331992	-274,573	104,726	-42,462	41,12086	-137,287	52,363
1L by 2L	64,340	103,4137	0,62216	0,551151	-174,132	302,813	32,170	51,70686	-87,066	151,406
1L by 3L	123,481	103,4137	1,19405	0,266659	-114,991	361,954	61,741	51,70686	-57,496	180,977
2L by 3L	67,147	103,4137	0,64931	0,534332	-171,325	305,620	33,574	51,70686	-85,663	152,810

Fonte: Autor

Figura 106 – ANOVA da máxima temperatura

ANOVA, Var. Temperatura Max (°C), R-sq= 63448, Adj. 22328 (2*(3) central composite, nc=8 ns=6 n0=2 Runs=16 (No active dataset)) in Resultado 1)					
3 factors, 1 Blocks, 18 Runs, MS Residual=21388,79					
DV: Temperatura Max (°C)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Rotação (rpm)(L)	1728.6	1	1728.6	0.080820	0.783409
Rotação (rpm)(Q)	169538.3	1	169538.3	7.926500	0.022654
(2)Penetração (mm)(L)	3619.0	1	3619.0	0.169201	0.691621
Penetração (mm)(Q)	63349.0	1	63349.0	2.961785	0.123561
(3)Tempo de Permanência (s)(L)	44303.2	1	44303.2	2.071327	0.188045
Tempo de Permanência (s)(Q)	22806.3	1	22806.3	1.066275	0.331992
1L by 2L	8279.3	1	8279.3	0.387086	0.551151
1L by 3L	30495.2	1	30495.2	1.425757	0.266659
2L by 3L	9017.6	1	9017.6	0.421602	0.534332
Error	171110.3	8	21388.8		
Total SS	468132.4	17			

Fonte: Autor

Figura 107 – Gráfico de Pareto efeitos das variáveis na máxima temperatura

Fonte: Autor

Conforme foi possível verificar, na relação da temperatura com o tempo da Figura 78, as temperaturas apresentadas nas superfícies de respostas, mostram que os valores mais altos de temperaturas se concentram nos pontos centrais, onde a rotação é de 1700 rpm, penetração de 0,97 mm e o tempo de permanência de 0,4 segundos.

Nota-se que as superfícies de respostas, com relação as temperaturas, apresentam valores inversos aos de força máxima de cisalhamento, (Figuras 81 e 82), mostrando que temperaturas muito elevadas comprometem a resistência da solda. Outro fator importante é o fato de rotações mais elevadas, com menor penetração, possibilitarem boas

resistências ao cisalhamento, junto a temperaturas mais baixas. As superfícies de respostas (Figuras 108 e 109), mostram as temperaturas máximas com relação aos parâmetros do processo, confirmando que a rotação de 1700 rpm com penetração de 0,97 milímetros são parâmetros críticos do processo, devido ao pico de temperatura. É possível concluir que com maiores rotações ocorre um maior fluxo de mistura ao redor do pino; o fluxo ao redor do pino deve estar em proporção com a profundidade de penetração, para que o volume de material não exceda, gerando assim aumento de temperatura.

Figura 108 – Superfície de resposta da máxima temperatura com relação a rotação pela penetração

Fonte: Autor

Figura 109 – Superfície de resposta da máxima temperatura com relação a rotação pelo tempo de permanência

Fonte: Autor

5.4. RESULTADOS DA MICROSCOPIA ÓPTICA

O resultado da macroestrutura obtida nas corridas dos pontos centrais, relacionados ao planejamento experimental, ensaio 19 C e 20 C são apresentados nas Figuras 110 e 111. Somados a essas duas análises foi feita a macrografia de uma amostra adicional, utilizando os parâmetros de 1500 rpm, é 1,17 milímetros de penetração e 4 segundos de tempo de permanência, mostrado na Figura 112. O objetivo foi avaliar a influência da penetração máxima na microestrutura na corrida adicional.

Figura 110 – Micrografia ensaio 19 C

Fonte: Autor

Figura 111 – Micrografia ensaio 20 C

Fonte: Autor

Figura 112 – Micrografia ensaio Adicional

Fonte: Autor

Devido a máxima porcentagem de carbono presente na liga de AISI 1006 ser de 0,08%, caracterizando uma liga hipoeutetóide, a microestrutura nas três imagens foi identificada como praticamente 100% matriz ferrítica, com mínima presença de perlita nos contornos de grão.

A temperatura foi medida durante o processo, próximo da zona termomecanicamente afetada ZTMA, na superfície do corpo de prova. A região da periferia do ombro, para os ensaios (19C e 20C) foram em média de 800° C. Podemos considerar, ignorando a pressão na região, que a temperatura da microestrutura resultante de contato com a ferramenta na zona de mistura ZM, ultrapassou linha A1, linha Solvus, do diagrama de fases do Ferro Carbono (Figura 113), transformando a microestrutura de ferrita para ferrita mais austenita, abaixo da linha A3 durante o processo de mistura.

Figura 113 – Diagrama de transformação de fase Ferro Carbono

Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2008

Avaliando as regiões de contato do pino, com relação ao ensaio, pontos B1, B2 e B3, nas respectivas figuras 114, 115 e 116, é possível constatar que devido a temperatura gerada na zona de mistura, somado a alta taxa de resfriamento, ocorreu a recristalização do material e posteriormente a nucleação da ferrita pelo contorno de grão da austenita.

Figura 114 – Micrografia região B1 ensaio 19 C

Fonte: Autor

Figura 115 – Micrografia região B2 ensaio 20 C

Fonte: Autor

Figura 116 – Micrografia região B3 ensaio adicional

Fonte: Autor

Com relação aos tamanhos de grãos é possível notar que próximos da superfície de contato do ferramental, devido alta temperatura, a taxa de resfriamento proporcionou primeiramente a nucleação da ferrita, porém não houve tempo de ocorrer a difusão do carbono e, consequentemente, o coalescimento dos grãos para diminuir a energia livre e diminuir as áreas dos contornos. Conforme analisamos o tamanho do grão em direção ao material base, é possível ver que a influência de uma taxa de resfriamento maior, devido a temperatura menor, proporcionou uma maior difusão e, consequentemente, um grão um pouco maior na recristalização, como é possível verificar na Figura 116. Logo, pela densidade de contornos de grãos na área, é possível definir que houve encruamento seguido de recristalização na zona de mistura nesses três ensaios.

Figura 117 – Micrografia região C2 ensaio 20 C

Fonte: Autor

Com relação as zonas termicamente afetadas, a identificação das zonas de transição da solda FSSW em aços é dificultada pelas características estruturais do material, conforme observado por (FENG, 2005) e evidenciado na Figura 11. Devido a estrutura ser praticamente ferrítica, as zonas termicamente afetadas não conseguem ser identificadas, uma vez que as transformações em outras fases não ocorrem. Porém como vemos nas figuras 110 a 112 é possível identificar o final da zona termomecanicamente afetada (ZTMA) com o material base MB, em cada um dos ensaios.

Na Figura 117 também é possível verificar a extrusão causada pela força de compressão da ferramenta com o material base, detalhe em azul, que atua com proporcionalidade à penetração durante o processo. Nota-se também na Figura 117, em vermelho a extrusão relacionada a rotação do pino durante o processo da solda, sob o material base na periferia do ombro, ocorrendo a formação de lamelas.

5.5. RESULTADO MICRODUREZA

O resultado da microdureza, de acordo com as características do material, mostra que, apesar de ocorrer recristalização, a nucleação de demais fases não ocorreu, como já era esperado para a liga de baixo carbono (porcentagem de carbono máxima no AISI 1006 é de 0,08 %). A Figura 118, relativa a micrografia do ensaio 19 C, mostra os pontos de microdureza medidos. A Figura 119 mostra o detalhe das áreas avaliadas no ensaio 19 C próximo a região do gancho. O perfil respectivo da microdureza é dado pelo gráfico da Figura 120, sendo que os valores variaram no intervalo de 100 a 200 HV aproximadamente.

Já na figura 121, relativa ao ensaio 20 C, com detalhamento na Figura 122 e com o gráfico com os valores das microdurezas na Figura 123 variando na faixa de 100 a 180 HV, nota-se que não houve nucleação de outras fases provenientes da austenita em nenhum dos ensaios, assim como a recristalização ocorreu em uma matriz ferrítica, já que tanto na ZM como na ZTMA as durezas apresentadas foram as mesmas do material base.

Figura 118 – Microdureza ensaio 19 C

Fonte: Próprio Autor

Figura 119 – Microdureza ensaio 19 C detalhe

Fonte: Próprio Autor

Figura 120 – Variação da microdureza - ensaio 19 C

Fonte: Próprio Autor

Figura 121 – Microdureza ensaio 20 C

Fonte: Próprio Autor

Figura 122 – Microdureza ensaio 20 C detalhe

Fonte: Próprio Autor

Figura 123 – Variação da microdureza ensaio 20 C

Fonte: Próprio Autor

Nota-se um aumento significativo de aproximadamente 15 % da dureza com relação ao material base, causada pelo encruamento e refino dos grãos recristalizados na região abaixo do pino da ferramenta. Esse valor aproximado foi considerado avaliando o diâmetro de 8 milímetros conformado pela ação final da ferramenta.

5.6. DESGASTE DA FERRAMENTA

Durante o processamento da solda FSSW, foram utilizadas duas ferramentas idênticas, sendo que o peso de cada uma foi medido em uma balança analítica, antes do início do processo da solda. O peso medido para ferramenta 1 apresentou 45,2432 gramas, conforme a Figura 124 e para a ferramenta 2 foi de 45,4727, Figura 125.

Figura 124 – Peso inicial ferramenta 1

Fonte: Próprio Autor

Figura 125 – Peso inicial ferramenta 2

Fonte: Próprio Autor

Após oito ensaios, a ferramenta 1 foi substituída apresentando o peso final de 45,1554 g, mostrando uma perda de 0,0878 gramas durante o processo de solda. Já a ferramenta dois, que foi utilizada do ensaio 9 ao 22, apresentou peso final de 45,6428 g, ou seja, perda de 0,1449 g. Devido as solicitações variarem com a rotação, penetração e tempo de permanência, foi considerado a média de perda com relação ao número de ensaios, gerando um valor aproximado de 0,012 gramas por solda. Se avaliarmos o número de ensaios pela perda em gramas do ferramental é possível verificar que os valores coincidem. Nota-se que o desgaste das ferramentas ocorreu de forma mais intensa na região das bordas dos ombros respectivos, conforme pode-se observar na Figura 126, foto da ferramenta 2 antes e depois de 14 ensaios. Fazendo uma análise do projeto da ferramenta, é relevante aumentar do raio de saída de 0,5 para 2 milímetros (Figura 41), para possibilitar uma área mais robusta, isto é, de maior resistência desta região para futuros trabalhos.

Figura 126 – Desgaste da ferramenta

Fonte: Próprio Autor

5.7. FORÇA MÁXIMA DE CISALHAMENTO

A resistência máxima ao cisalhamento dos corpos de prova mostrou que o perfil da ferramenta adotado, juntamente com a janela de variáveis selecionada, possibilitou um enorme ganho com relação aos esforços máximos das juntas. Apesar de mostrar influência, de acordo com o parâmetro estabelecido, o esforço máximo de cisalhamento apresentou valores entre 7,2 e 7,7 kN. Se comparados com os resultados de BAEK, S.; CHOI, D.; LEE, C.; AHN, B.; YEON, Y.; SONG, K.; & JUNG, S. (2010) os valores apresentaram um excelente valor de resistência ao cisalhamento. Considerando as características do material de baixo carbono, com espessura de 0,7 milímetros, nota-se que os valores são aproximadamente o dobro com relação ao estudo citado. Esse resultado está diretamente relacionado a penetração selecionada no processo, que mesmo no menor

ensaio penetrou a segunda chapa da junta. Outro detalhe é que o material base não possuiu galvanização, excluindo a variável do Zinco no processo.

O ganho na força máxima de cisalhamento, ocorreu devido a penetração do ferramental nas duas chapas e pela rotação que proporcionou uma mistura mecânica encruada. O atrito, por outro lado, possibilitou a obtenção de uma alta temperatura no processo, fazendo com que a matriz ferrítica iniciasse a transformação de fase para austenita e, através da taxa de resfriamento, gerou a recristalização da ferrita na zona de mistura. Além disso a alta taxa de resfriamento impossibilitou a difusão entre os materiais das chapas, criando uma superfície com menores grãos na região afetada pela ferramenta. Os valores máximos da força de cisalhamento são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Força máxima de cisalhamento nos ensaios

Ensaio	Rotação (rpm)	Penetração (mm)	Permanência (s)	Força Max (N)
1	1500	0,87	3,0	7212,79
2	1500	0,87	5,0	7288,30
3	1500	1,07	3,0	6380,21
4	1500	1,07	5,0	8314,08
5	1900	0,87	3,0	7669,78
6	1900	0,87	5,0	7823,75
7	1900	1,07	3,0	7594,27
8	1900	1,07	5,0	6723,44
9	1363	0,97	4,0	8325,85
10	2036	0,97	4,0	8136,58
11	1700	0,8	4,0	6661,66
12	1700	1,14	4,0	7731,56
13	1700	0,97	2,3	7960,06
14	1700	0,97	5,7	6399,82
15C	1700	0,97	4,0	7439,32
16 C	1700	0,97	4,0	6935,26
17 C	1700	0,97	4,0	8466,08
18 C	1700	0,97	4,0	7755,10

Fonte: Autor

Com o tratamento dos dados foi possível verificar a média e o desvio padrão de acordo com a rotação aplicada no processo, conforme a Figura 127. As figuras 128 e 129, mostram as forças máximas de cisalhamento com relação a variável da penetração e do tempo de permanência utilizados no planejamento experimental.

Figura 127 – Força máxima de cisalhamento pela rotação

Fonte: Autor

Figura 128 – Força máxima de cisalhamento pela penetração

Fonte: Autor

Figura 129 – Força máxima de cisalhamento pelo tempo

Fonte: Autor

Avaliando o modo de falha, presente nos testes de cisalhamento, nota-se que o todos os corpos de prova se romperam de modo dúctil, mesmo no ensaio 2 onde os parâmetros de penetração e rotação estão mínimos (rotação de 1500 rpm e penetração de 0,87 milímetros) e não houve a ruptura total da região central, abaixo do pino, conforme se mostra na Figura 130, evidenciando que a resistência da junta teve seu esforço distribuído em toda região abaixo do ombro da ferramenta.

Figura 130 – Ruptura do ensaio 2

Fonte: Próprio Autor

Os valores da força de cisalhamento estão relacionados ao fluxo na zona de mistura, pois o ângulo projetado do tronco cônico do pino da ferramenta fez com que o fluxo de mistura pudesse ocorrer, modificando a geometria padrão do gancho. Na secção transversal da figura 20 C a geometria do gancho está direcionada para baixo da superfície do buraco e fechadura, evidenciados na Figura 111. O perfil projetado da ferramenta permitiu que fluxo de mistura ocorresse de forma angular com relação a material base, exemplificado na Figura 131, diferente do convencional relacionado ao fluxo vertical que afeta a criação do gancho, segundo BABU; SANKAR, 2012, observado na Figura 14.

Figura 131 – Fluxo de mistura angular

Fonte: Autor

Se considerarmos que o mecanismo de falha por cisalhamento se inicia a partir do final da linha de intersecção entre as duas chapas, região do gancho, conforme citado por (BADARINARAYAN, YANG e OKAMOTO, 2010), podemos observar, nas Figuras 132 e 133, que linha de interface criada pela zona de mistura não encontra o buraco de fechadura, linha azul nestas figuras, e, assim considerar, que a interface que resiste ao cisalhamento é aproximadamente a área total da circunferência abaixo do pino.

Sendo a área total da circunferência $50,26 \text{ mm}^2$, considerando 8 milímetros de diâmetro, e aplicando aos dados de tração obtidos nos ensaios dos pontos centrais 18 C e 15 C, a tensão máxima de cisalhamento obtida foi respectivamente 168,42 e 154,28 MPa. Estes resultados são a metade da tensão máxima obtida no ensaio de tração, justificando, assim, o valor da força de cisalhamento máxima obtida pela solda FSSW com o ferramental desenvolvido. Nota-se na Figura 134, que houve difusão na linha de intersecção das chapas, a ponto de descaracterizar a linha conforme detalhes em vermelho. Essa difusão também colabora para o resultado significativo da força máxima de cisalhamento, somando resistência à zona de mistura na junta com relação a solicitação cisalhante.

Figura 132 – Relação entre linha de interface e buraco de fechadura ensaio 19 C

Fonte: Autor

Figura 133 – Relação entre linha de interface e buraco de fechadura ensaio 20 C

Fonte: Autor

Figura 134 – Micrografia evidenciando a difusão parcial na intersecção das chapas

Fonte: Autor

A análise da largura na interface das juntas na zona de mistura foi verificada nos ensaios 19 C, 20 C e ensaio adicional, Figuras 135 a 137. Os valores obtidos mostram uma largura influenciada pelo ângulo desenvolvido do ferramental. Nota-se no ensaio adicional, Figura 137, que a penetração elevada de 1,17 milímetros com uma rotação de 1500, impossibilitou a mistura completa na região da zona de mistura, ZM. O gancho se apresenta de maneira positiva e próxima do perímetro do buraco de fechadura. A imagem mostra que a força de forjamento possibilitou a extrusão do material em direção à zona negativa do ombro, e, devido a baixa rotação, o processo impossibilitou a mistura por atrito. Logo a largura da intersecção no ensaio adicional deve ser ignorada como dado relevante.

Figura 135 – Medição da largura na zona de mistura ensaio 19 C

Fonte: Autor

Figura 136 – Medição da largura na zona de mistura ensaio 20 C

Fonte: Autor

Figura 137 – Medição da largura na zona de mistura ensaio adicional

Fonte: Autor

5.8. ANÁLISE DO GANCHO

Conforme verificado, na resistência máxima ao cisalhamento da junta, a geometria desenvolvida no trabalho aparenta ter impactado na propriedade do gancho dos ensaios. A Figura 138 demonstra segundo BABU; SANKAR, 2012, a característica da geometria do gancho com altura positiva e sua localização próxima da periferia da zona de mistura ZM.

Figura 138 – Ilustração esquemática do gancho

Fonte: Adaptado de BABU; SANKAR, 2012.

Somados às evidências da micrografia dos pontos centrais, ensaios 19 C e 20 C, nota-se a ausência quase que total do gancho no ensaio 19 C, detalhado em vermelho na Figuras 139 e 140. Na Figura 141, a ausência do gancho ocorreu devido ao processo de fluxo de mistura angular, Figura 131, que permitiu que a posição do gancho ficasse mais próxima da zona de mistura ZM. Esse posicionamento permitiu que a temperatura atuasse na geometria do gancho, possibilitando que houvesse a recristalização.

Quanto a geometria no ensaio 20 C, nota-se um padrão geométrico do gancho diferente do abordado por BABU; SANKAR, 2012. Na Figura 142, relativa ao ensaio 20 C, o gancho se apresentou para baixo, detalhado em vermelho, acompanhando o ângulo do pino, linha azul na figura.

Se compararmos os dados obtidos nos dois ensaios, a temperatura no ensaio 19 C teve seu valor máximo de 936,47 °C, enquanto que no ensaio 20 C, o valor foi de 707,58 °C, evidenciando, assim, uma recristalização maior no ensaio 19 C e maior difusão na região do gancho. Somado a esses dados também é possível verificar que a força máxima axial no ensaio 19 C foi de 9,5 kN, enquanto que o torque máximo apresentou valor de 46,85 Nm. Já no ensaio 20 C a força axial máxima foi 11,05 kN e torque de máximo de 44,94 Nm. Logo, o comportamento do gancho pode ser explicado devido ao esforço axial ter sido maior, somado ao torque menor que dificultou a mistura na região da deformação plástica, mais a temperatura que não atingiu totalmente a zona de austenitização. Assim, a formação do gancho negativo ocorreu devido a força de forjamento da ferramenta no material base, somado a difusão na linha de intersecção o material base. .

Figura 139 – Ausência do gancho na micrografia do ensaio 19 C

Fonte: Próprio Autor

Figura 140 – Ausência do gancho na micrografia do ensaio 19 C detalhe

Fonte: Autor

Figura 141 – Perfil geométrico do gancho na micrografia do ensaio 19 C lado esquerdo

Fonte: Autor

Figura 142 – Perfil geométrico do gancho na micrografia do ensaio 20 C

Fonte: Autor

5.9. ANÁLISE MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA

Utilizando dos ensaios 19C na microscopia de varredura eletrônica MEV, foi verificado na microestrutura do material base AISI 1006 a presença de precipitados de Manganês segundo o EDS do equipamento. Conforme os pontos 5 e 6 da Figura 143 e as difrações das Figuras 144 e 145. Supõe-se que a impureza está relacionada na obtenção do aço de baixo carbono.

Figura 143 – Precipitado de manganês na Material Base

Fonte: Autor

Figura 144 – EDS dos Ponto 5 no ensaio 19C

Fonte: Autor

Figura 145 – EDS dos Ponto 6 no ensaio 19C

Fonte: Autor

A análise do material base MB, também propiciou a avaliação do tamanho de grão do material e a orientação preferencial dos grãos devido ao processo de laminação. Verifica-se que a média para os tamanhos de grãos nesta região os valores aproximados de largura de 19,94 μm e altura de 9,81 μm , conforme a Figura 146.

Figura 146 – Macrografia do Material Base

Fonte: Autor

Já a análise da região central abaixo do pino na secção transversal do ponto de solda, verificou-se a recrystalização devido a alta taxa de resfriamento do material, em grãos de diâmetro aproximado 1,07 μm . Conforme Figura 147.

Figura 147 – Macrografia do Zona de Mistura

Fonte: Autor

A macrografia da Figura 148 da zona termomecanicamente afetada ZTMA, estáq localizada em aproximadamente 0,341 milímetros abaixo da superfície de contato com o pino da ferramenta. Nota-se a recrystalização da zona em grãos de diâmetros maiores, aproximados de 7,76 μm . devido a taxa de resfriamento ser menor, conforme Figura 149.

Figura 148 – Posicionamento do Macrografia Zona ZTMA

Fonte: Autor

Figura 149 – Macrografia Zona Termomecanicamente Afetada ZTMA

Fonte: Autor

Por fim no ensaio 19C foi avaliada a região extrema oposta a superfície de contato do ferramental, região da junta próximo ao disco de sacrifício. Verificou-se que houve a recristalização da região com grãos de valores aproximados de 9,36 μm , conforme a Figura 150.

Figura 150 – Macrografia Zona Termomecanicamente Afetada próximo ao Disco de Sacrifício

Fonte: Autor

Pode-se notar através das macrografias que as regiões que foram afetadas termomecanicamente ZTMA durante o processo de FSSW, possibilitaram a recristalização dos grãos de ferrita originários do material base em toda a zona. Essa transformação é evidenciada pelo deslocamento dos precipitados de Manganês para os contornos de grãos devido a maior energia livre dos contornos.

Avaliando o ensaio Adicional (2A) foi verificado a contaminação decorrente do desgaste do ferramental na ZTMA na obtenção da junta. A análise do EDS na macrografia evidencia a presença de Cobalto e Titânio na região do Ponto 1, conforme as Figuras 151 e 152.

Figura 151 – Macrografia região ZTMA

Fonte: Autor

Figura 152 – EDS Ponto 1 Ensaio Adicional

Fonte: Autor

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre soldagem FSSW em juntas sobrepostas em aço de baixo teor de carbono, amplamente utilizado na indústria automobilística. A avaliação das características mecânicas das juntas, com relação ao perfil de ferramenta, desenvolvido foi o objetivo principal desse trabalho. As principais conclusões foram:

- O material selecionado para ferramenta, carboneto de tungstênio se mostrou eficiente para produção de soldas FSSW em aços.
- A janela selecionada para variáveis independentes se mostrou ideal para avaliação do FSSW para aços de baixo carbono, possibilitando além de uma excelente resistência mecânica dados importantes sobre atrito e temperatura críticas durante o processo.
- A força axial de soldagem mostrou comportamentos parecidos com diversos estudos apresentados, além de evidenciar sua relação com o trabalho de mistura da ferramenta e temperatura.
- A velocidade de rotação apresentou correlação direta com a profundidade de penetração no volume total deformado na zona de mistura. Os efeitos conjuntos destes fatores foram críticos para temperatura quando próximo de 1700 rpm e 0,97 milímetros de penetração.
- Na janela de variáveis selecionadas, o torque foi uma variável relevante nos resultados das soldagens; em média para todos os ensaios os valores apresentados foram de 43,45 N m com desvio padrão de 1,25 N m.
- O perfil projetado para o ferramental mostrou grande impacto sobre os resultados obtidos, possibilitando, assim, um fluxo de mistura angular. A altura do pino selecionada também apresentou uma proporção ideal para que o trabalho de mistura ocorresse na segunda chapa, juntamente com o trabalho do ombro, resultando em uma força máxima de cisalhamento com o dobro de valores esperados.
- A resistência ao cisalhamento obtida nas juntas mostrou resultados similares entre todos os ensaios.
- Rotações menores que 1500, com profundidade de penetração entre 0,87 e 0,97 milímetros são variáveis otimizadas para obtenção de juntas FSSW em aços de

0,7 milímetros de espessura, com o modelo de ferramental sugerido neste trabalho.

- A variável de tempo de permanência, não obteve efeito significativo nos resultados medidos. Sugere-se o tempo mínimo de 3 segundos para uma boa qualidade da junta.
- O resultado do gancho apresentou comportamentos diferenciados no processo, necessitando de mais estudos e ensaios para definições mais concretas.
- A avaliação da microestrutura identificou a recristalização da zona termomecanicamente afetada ZTMA.

REFERÊNCIAS

ARBEGAST, W.J. **Refill Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys**. In: IIW International Seminar on Friction based Spot Welding Processes, 2007, Geesthacht, Alemanha. Proceedings... 2007.

AITA, C. A. G. **Estudos do desempenho mecânico de juntas soldadas pelo processo de soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica (FSSW) da liga AA6060-T5**. Universidade federal do Pampa, Alegrete, Rio grande do Sul, 2017.

BABU, S. et al. **Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Aluminum Alloy AA2014**. ASM International, 2012. 71-84

BAEK, S.; CHOI, D.; LEE, C; AHN, B.; YEON, Y.; SONG, K.; & JUNG, S. (2010). **Microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded galvanized steel**. *Materials Transactions*, (2010).

BADARINARAYAN, H.; YANG, Q.; OKAMOTO, K. **Effect of weld orientation on static strength and failure mode of friction stir stitch welds in lap-shear specimens of aluminium 6022-T4 sheets**. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2010.

BIALLAS, G. et al. **Mechanical properties and corrosion behavior of friction stir welded 2024-T3**. In: International Symposium Friction Stir, 1. California 1999.

BUFFA, G. et al. **Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties**. *Materials Science and Engineering A*, 519, Abril 2009. 19-26.

BUSSU, G.; IRVING, P. E. **The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminum joints**. *International Journal of Fatigue*. V.25, n.1, p.77-88, 2003.

CALLISTE JR., W.D., **Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução**, 7ª Edição, Ed. Guanabara, 2008.

CAMPANELLI, L.C.; ALCÂNTARA N. G.; DOS SANTOS, J. F. **Soldagem por ponto no estado sólido de ligas leves**. Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), São Carlos, São Paulo, Brasil. 2011.

COX, C. D; GIBSON B. T; STRAUSS, A. M; COOK, G. E, “**Effect of pin length and rotation rate on the tensile strength of a friction stir spot-welded al alloy: A contribution to automated production,**” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 4, pp. 472–478, 2012.

DAWES, C. J.; THOMAS W. M. **Friction stir process welds aluminum alloys: the process produces low-distortion, high-quality, low-cost welds on aluminum**, *Welding Journal*, vol. 75, no. 3, pp. 41–45, 1996.

FENG, Z. M. et al, **Friction stir spot welding of advanced high-strength steels - a feasibility study**, 2005. Disponível em: <https://www.sae.org/technical/papers/2005-01-1248>. Acesso em: 23 de novembro, de 2020.

GERLICH, A. et. al. **Friction stir spot welding f aluminum and magnesium alloys**. *Materials Science Forum*, v. 29, p. 290-294, 2005

GERLICH, A.; CINGARA, A.; NORTH, T. H. Stir Zone Microstructure and Strain Rate During Al 7075 - T6. **Metallurgical and Materials Transcriptions A**, 37A, September 2006. 2773-2786.

HANCOCK, R. **Friction welding of aluminum cuts energy costs by 99%**. *Welding Journal* 2004, 40, page 40 n 83.

JONCKHEERE, C.; MEESTER, B. D. **Fracture and mechanical proerties of friction stir spot welds in 6063-T6 aliminum alloy**. *The International Journal of AdvancedManufacturing Technology*, 2012. 569-575.

LATHABAI, S. et al. **Friction spot joining of an extruded Al - Mg - Si alloy**. *Scripta Materialia*, Woodville, v. 55, p. 899-902, 2006.

LIENERT, T. J, GOULD, J.E. **Friction Stir Welding of Mild Steel**. *Proceedings of the First International Symposium on FSW*, Thousand Oaks, CA, USA June 1999

LIENERT, T. J, STEELWAG J.R., W.L. GRIMMET, B.B., WARKE, R. W. **Friction Stir Welding of Mild Steel**. *Welding Journal*, v. 82, n. 1, p.1s 2003.

LOHWASSER, D.; CHEN, Z. **Friction stir welding: From basics to applications**. 1. ed. [S.l.]: Woodhead Publishing Limited, 2010. ISBN ISBN 978-1-84569-771-6. Citado na página 22.

MAZZAFERRO, C. C. P.; **Soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica de um**

aço TRIP 800: processo, microestrutura e propriedades. Tese (Doutor em Engenharia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MATSUSHITA, M.; KITANI, Y.; IKEDA, R. **Applicability of friction stir welding (FSW) to steels and properties of the welds.** JFE technical report, Vol. 20, p. 133-140, Mar. 2015. Disponível em <<https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/020/pdf/020-25.pdf>>. Acesso em: 05. Out. 2020.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. **Friction stir welding and processing.** Materials Science and Engineering: R: Reports, v. 50, n. 1–2, p. 1–78, ago. 2005.

MILAN, M. T.; TARPANI, J.R.; BOSE FILHO, W.W. **Fatigue crack growth resistance of friction stir welded AA2024-T3 alloy: longitudinal crack growth.** In INTERNATIONAL FATIGUE CONGRESS, 9. Atlanta USA. 2006.

MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. **Friction Stir Welding and Processing.** 1. ed. [s.l.] ASM International, 2007.

NORTH, T.H; BENDZSAK, G. J; GERLICH, A; SU, P. **Stir zone formation on FSW spot welds.** Proceedings of the AWJT conference. 2005, 20-22 outubro Dailan PR China.

NGUYEN, N. T. D.; KIM Y; KIM H. Y. **Assessment of the failure load for an AA6061-T6 friction stir spot welding joint,** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 225, no. 10, pp. 1746–1756, 2011.
 PATEL, V. V. et al. **Effect of Tool Rotation Speed on Friction Stir Spot Welded AA5052-H32 and AA6082-T6 Dissimilar Aluminum Alloys.** Metallography, Microstructure and analysis, 2016.

PATHAK, N. et al. **Microstructure and mechanical performance of friction stir spotwelded Aluminum-5754 sheets.** Journal of Materials Engineering and Performance, 2012. 131-144.

PRANGNELL, P; BAKAVOS, D. “**Novel approaches to friction spot welding thin aluminum automotive sheet,**” Materials Science Forum, vol. 638-642, pp. 1237–1242, 2010.

ROSENDO, T. et al. **Mechanical performance of AA6181 refill friction spot welds under Lap shear tensile loading.** Fatigue & Fracture of Engineering Materias & Strutures, 38, 2015. 1443 - 1455.

RHODES, C. G. et al. **Effects of friction stir welding on microstructure of 7075**

aluminum. Scripta Materialia, v. 36, n. 1, p. 69–75, 1997.

SHARMA, G. & DWIVEDI, D.K. **Structure and Properties of Friction Stir Weld Joints of Structural Steel.** Transactions of the Indian Institute of Metals. Vol. 70, p. 201-208, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.1007/s12666-016-0876-x>>. Acesso em 25 Nov. 2020.

SCHILLING, C.; DOS SANTOS, J. **Method and Device for Linking at Least Two Adjoining Work Pieces by Friction Welding.** International Patent Publication WO/2001/036144, 25 mai. 2005.

SU, P.; GERLICH, A.; NORTH, T.H. **Friction Stir Spot Welding of Aluminum and Magnesium Alloy Sheets.** SAE International, 2005-01-1255, 2005.

THREADGILL, P.L. **Friction stir welding – the state of the art.** Relatório Técnico TWI, n. 7417, 12.03, 2007.

THOMAS, W. M. et al. **International Patent Application N. PCT/GB92/02203UK,** 1991.

THOMAS, W. M. et al. Friction Stir Welding Tools and Developments. **Welding in the World**, v. 47, n. 11–12, p. 10–17, 2003.

THOMAS, W. M. et al. **Friction stir welding - Process variants and developments in automotive industry.** SAE 2006 World Congress & Exhibition. **Anais...**Detroit, MI, USA: SAE International, 2006

THOMAS, W.; NICHOLAS, D.; STAINES, D.; TUBBY, P. J.; GITTOS, M. F. **FSW Process variants and mechanical properties.** Weld World, United Kingdom, Vol. 49, p. 4-11, 2005. Disponível em <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF03266468>>. Acesso em: 16 Nov. 2020.

THOMAS, W.M.; JOHNSON, K.I.; WIESNER, C.S. **Friction stir welding - recent developments in tool and process technologies.** Advanced Engineering Materials, Vol. 5, p. 485-490, 2003. Disponível em <<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-recent-developments-in-tool-and-process-technologies-july-2003>>. Acesso em: 10 out. 2020

TOZAKI, Y.; UEMATSU, Y.; TOKAJI, K. **“A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance,”** *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 6-7, pp. 844–851, 2010.

TWI. **Friction stir welding.** Disponível em <<https://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/friction-welding/friction-stir-welding>>.

Acesso em 24. Nov. 2020

UEMATSU, Y; TOKAJI, K; TOZAKI, Y; KURITA, T; MURATA, S. **“Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behavior of friction stir spot welded joints in Al-Mg-Si alloy, ”** *International Journal of Fatigue*, vol. 30, no. 10-11, pp. 1956–1966, 2008.

VENKATESWARLU, G.; DAVIDSON, M. J. **Taguchi Optimization of Friction Stir Processing Parameters to Achieve Maximum Tensile Strength of Mg AZ31B Alloy.** Indian institute of Metals, 2012.

VIDAL, C.; INFANTE, V. **Optimization of FS Welding Parameters for Improving Mechanical Behavior of AA 2024-T351 Joints Based on Taguchi Method.** ASM International, n. 1059-9495, 2013. 2261-2270.

YANG X. W.; FU T.; LI W. Y. **Friction stir welding – A review on join macro - and microstructure, property, and process modeling.** Laboratory of Solidification Processing, Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China, Achilleas Vairis. 2014.

ANEXO I

ANEXO II

Vista Isométrica
Escala: 1:1

ANEXO III

ANEXO IV

ANEXO V

ANEXO VI

Vista Isométrica
Escala: 1:1

ANEXO VII

Vista Isométrica
Escala: 1:1

ANEXO VIII

Força Axial com relação a 1900 Rpm (FSSW)

Força Axial com relação a 1700 Rpm Pontos Centrais (FSSW)

Torque com relação 1500 Rpm (FSSW)

Torque com relação 1700 Rpm (FSSW)

Torque com relação 1700 Rpm Pontos Centrais (FSSW)

Potência com relação 1500 Rpm (FSSW)

Potência com relação 1700 Rpm Ponto Central (FSSW)

Temperatura com releção ao 1500 Rpm (FSSW)

Temperatura com releção ao 1700 Rpm (FSSW)

Temperatura com releção ao 1900 Rpm (FSSW)

Temperatura com releção ao Max e Min Rpm (FSSW)

Temperatura com releção ao 1700 Rpm Pontos Centrais (FSSW)