

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Klaus Higor dos Santos Silva

**CARACTERIZAÇÃO DE CONJUGADOS PRODUZIDOS PELO PROCESSO DE
REVESTIMENTO POR ATRITO**

Belo Horizonte

2020

Klaus Higor dos Santos Silva

**CARACTERIZAÇÃO DE CONJUGADOS PRODUZIDOS PELO PROCESSO DE
REVESTIMENTO POR ATRITO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Alexandre Mendes Abrão

Coorientador: Marcelo Araújo Câmara

Belo Horizonte

2020

S586c

Silva, Klaus Higor dos Santos.

Caracterização de conjugados produzidos pelo processo de revestimento por atrito [recurso eletrônico] / Klaus Higor dos Santos Silva. - 2020.

1 recurso online (135 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Alexandre Mendes Abrão.

Coorientador: Marcelo Araújo Câmara.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndice: f. 135.

Bibliografia: f. 128-134.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Revestimentos - Teses.
3. Asperidade de superfície - Teses. 4. Microestrutura – Teses.
I. Abrão, Alexandre Mendes. II. Câmara, Marcelo Araújo.
III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
IV. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata da Sessão Pública da defesa de tese de **KLAUS HIGOR DOS SANTOS SILVA**, de registro Número 2015710196, aluno do Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais. Sendo a participação de todos os membros da Banca, inclusive do Discente, por videoconferência, às 13:30 horas do dia quatro de setembro de 2020. A Banca Examinadora indicada pelo Colegiado do Curso, foi constituída pelos professores: Dr. Alexandre Mendes Abrão (orientador/Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Marcelo Araújo Câmara (coorientador/Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Paulo Jose Modenesi (Ex-Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/UFMG), Dr. Rolf Bertrand Schroeter (Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC), Dr. Pedro Paiva Brito (Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/PUC-Minas) e Dr. Paulo Cesar de Matos Rodrigues (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG). O Presidente da Banca Examinadora, Prof. Alexandre Mendes Abrão, abriu a Sessão Pública de defesa Nº 201/2020, para avaliar a Tese do aluno **Klaus Higor dos Santos Silva**, intitulada: **"Caracterização de Conjugados Produzidos Pelo Processo de Revestimento por Atrito"** requisito final para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica, na área de concentração "Processos de Fabricação" e, após dar conhecimento aos presentes o teor das normas regulamentares do trabalho final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa do candidato. Após a defesa, os membros da Banca Examinadora realizaram a avaliação, por meio eletrônico, do trabalho sem a presença do candidato, para julgamento e expedição do resultado final. Foi atribuída a seguinte indicação: o candidato foi considerado **APROVADO**, por unanimidade. O resultado final foi comunicado ao candidato pelo Senhor Presidente da Banca Examinadora. Nada mais havendo a tratar, lavrou-se a presente Ata que será assinada eletronicamente pelos membros da Banca.

Belo Horizonte, 04 de setembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Mendes Abrão, Professor do Magistério Superior**, em 10/09/2020, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Araujo Camara, Professor do Magistério Superior**, em 10/09/2020, às 16:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Cesar de Matos Rodrigues, Professor do Magistério Superior**, em 16/09/2020, às 01:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Pedro Paiva Brito, Usuário Externo**, em 16/09/2020, às



07:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Jose Modenesi, Membro**, em 16/09/2020, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rolf Bertrand Schroeter, Usuário Externo**, em 18/09/2020, às 08:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0252355** e o código CRC **B6E3F007**.

Klaus Higor dos Santos Silva

**CARACTERIZAÇÃO DE CONJUGADOS PRODUZIDOS PELO PROCESSO DE
REVESTIMENTO POR ATRITO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica, na área de concentração de Processos de Fabricação.

Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão (Orientador) – UFMG

Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara (Coorientador) – UFMG

Prof. Dr. Paulo César M. Rodrigues – UFMG

Prof. Dr. Paulo José Modenesi – UFMG

Prof. Dr. Pedro Paiva Brito – PUC-MG

Prof. Dr. Rolf Bertrand Schroeter – UFSC

Belo Horizonte, 14 de julho de 2020

Dedico esse trabalho a Deus e minha família.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço imensamente a Deus, por iluminar os meus passos e dar força para sempre continuar.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, fica expresso minha gratidão, especialmente:

ao meu filho João Victor Monteiro Silva que transformou minha vida e passou a ser a razão de todas as minhas ações;

à minha esposa Dayse Cristina Monteiro Morais Silva, que me acompanha durante toda a jornada, sempre ao meu lado me dando forças com muito carinho;

à minha família, Arlete de Souza dos Santos Silva, José Maria da Silva Filho e Karen Ketleen dos Santos Silva, que sempre me incentivam e apoiam nos momentos de dificuldades, cada um de sua maneira;

aos amigos da PUC-MG, em especial, ao professor Pedro Paiva Brito, Ítalo Bruno dos Santos, Edilene Aparecida Braga Carvalho, pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

aos professores Alexandre Mendes Abrão e Marcelo Araújo Câmara, pela orientação, aprendizado e apoio em todos os momentos necessários;

ao professor Raphael Gomes de Paula pelo auxílio para realização da análise química do material de estudo;

ao professor Janes Landre pelo auxílio nas realizações das análises termográficas;

ao professor Ubirajara Domingos de Castro pelo auxílio e apoio para a realização dos ensaios de dobramento;

ao professor Hermano pelo auxílio nas realizações das análises químicas dos materiais estudados;

ao engenheiro Omar Ribas pelo auxílio nas realizações das análises de tensão residual;

RESUMO

A tribologia é o segmento da engenharia que estuda os fenômenos que ocorrem nas superfícies dos materiais quando colocados em contato entre si. Um dos pilares da tribologia é o estudo do desgaste e seus mecanismos. Sabe-se que uma das maneiras de retardar ou até mesmo coibir o desgaste dos materiais seria a ação de revestir com materiais mais resistentes para determinada aplicação. Dentre as técnicas de revestimento, pode-se destacar o processo de revestimento por atrito (*friction stir surfacing* – FSS), que vem atraindo o interesse das comunidades acadêmica e industrial por ser aplicável a uma grande variedade de materiais similares e dissimilares. Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência das alterações nos parâmetros de entrada do processo de revestimento por atrito, quais sejam, rugosidade média quadrática (R_q) do substrato (0,43, 1,75 e 2,54 μm), rotação da haste consumível (1500, 2250 e 3000 rpm) e velocidade de deposição (190, 285 e 380 mm/min) sobre a eficiência e controle térmico do processo, morfologia e dimensionamento da camada revestida além das propriedades metalúrgicas (microestrutura e tensão residual) e mecânicas (microdureza e resistência ao dobramento) dos conjugados. Utilizou-se neste estudo o aço ASTM A36 como substrato e aço ABNT 4340 como haste consumível e as deposições dos revestimentos foram realizadas em um centro de usinagem. Os parâmetros de entrada de deposição foram selecionados segundo planejamento fatorial completo em três níveis. Notou-se as melhores eficiências para os conjugados obtidos com os parâmetros de entrada nos níveis mais baixos. Entretanto, em todas as condições de deposição foram obtidos conjugados com aspectos morfológicos uniformes, sem falhas aparentes. Verificou-se que a rugosidade do substrato influencia no mecanismo de adesão do revestimento, entretanto não possui influência significativa sobre a evolução da temperatura durante o processo, a geometria do revestimento, a microestrutura, a tensão residual ou as propriedades mecânicas (microdureza e resistência ao dobramento). Os parâmetros rotação e velocidade de deposição por sua vez, influenciam de maneira significativa o aspecto morfológico e dimensional do revestimento, a quantidade de energia que entra no processo e consequentemente a taxa de resfriamento dos conjugados, acarretando variações nas propriedades mecânicas e no comportamento metalúrgico (microestrutura e tensão residual) de cada conjunto avaliado.

Palavras-chaves: revestimento por atrito; aço ABNT 4340, aço ASTM A36; rugosidade; adesão; microdureza; microestrutura.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Rugosidade dos substratos do grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$).....	62
Gráfico 4.2 – Rugosidade dos substratos do grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$).....	63
Gráfico 4.3 – Rugosidade dos substratos do grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$).....	63
Gráfico 4.4 – Conservação da massa no Grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$)	Erro! Indicador não definido.
Gráfico 4.5 – Conservação da massa no Grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$).....	Erro! Indicador não definido.
Gráfico 4.6 – Conservação da massa no Grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$)	Erro! Indicador não definido.
Gráfico 4.4 – Eficiência de processo no Grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$)	64
Gráfico 4.5 – Eficiência de processo no Grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$).....	65
Gráfico 4.6 – Eficiência de processo no Grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$)	66
Gráfico 4.7 – Perfil térmico do proceso FSS para as amostras do grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$)	72
Gráfico 4.8 – Perfil térmico do proceso FSS para as amostras do grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$)	72
Gráfico 4.9 – Perfil térmico do proceso FSS para as amostras do grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$)	73
Gráfico 4.10 –Taxa de resfriamento em função da temperatura para o grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$)	74
Gráfico 4.11 –Taxa de resfriamento em função da temperatura para o grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$)	75
Gráfico 4.12 –Taxa de resfriamento em função da temperatura para o grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$)	76
Gráfico 4.13 – Influência dos parâmetros de deposição sobre a largura dos revestimentos.....	79
Fonte: dados do autor	79

Gráfico 4.14 – Influência dos parâmetros de deposição sobre a espessura dos revestimentos.....	79
Gráfico 4.15 – Força de dobramento versus deslocamento. Grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$). ...	98
Gráfico 4.16 – Força de dobramento versus deslocamento. Grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$).	99
Gráfico 4.17 – Força de dobramento versus deslocamento. Grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$)	99
Gráfico 4.18 – Força de dobramento versus deslocamento para os conjugados AAA, ACC e substrato (SUB).	100
Gráfico 4.19 – Força de dobramento versus deslocamento para os conjugados BAA, BCC e substrato (SUB).	101
Gráfico 4.20 – Força de dobramento versus deslocamento para os conjugados CAA, CCC e substrato (SUB).	101
Gráfico 4.21 – Perfil de microdureza direção perpendicular à superfície no entro da amostra. Grupo A ($R_q=0,43 \mu\text{m}$).	104
Gráfico 4.22 – Perfil de microdureza direção perpendicular à superfície no entro da amostra. Grupo B. ($R_q=1,75 \mu\text{m}$).	104
Gráfico 4.23 – Perfil de microdureza direção perpendicular à superfície no entro da amostra. Grupo C. ($R_q=2,54 \mu\text{m}$).	105
Gráfico 4.24 – Perfil de microdureza na direção paralela à superfície na região de ZTA. Grupo A. ($R_q=0,43 \mu\text{m}$).	106
Gráfico 4.25 – Perfil de microdureza na direção paralela à superfície na região de ZTA. Grupo B. ($R_q=1,75 \mu\text{m}$).	107
Gráfico 4.26 – Perfil de microdureza na direção paralela à superfície na região de ZTA. Grupo C. ($R_q=2,54 \mu\text{m}$).	107
Gráfico 4.27 – Coeficiente de atrito versus distância percorrida referente ao grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$) e rotações de 1500, 2250 e 3000 rpm.	112
Gráfico 4.28 – Coeficiente de atrito versus distância percorrida referente ao grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$) e rotações de 1500, 2250 e 3000 rpm.	113
Gráfico 4.29 – Coeficiente de atrito versus distância percorrida referente ao grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$) e rotações de 1500, 2250 e 3000 rpm.	114

Gráfico 4.30 – Tensão residual em diferentes regiões dos conjugados.....	115
---	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema do processo de revestimento por atrito.	6
Figura 2.2 – Etapas do processo FSS: (a) aproximação da haste consumível e substrato, (b) pré-aquecimento e início da plastificação e (c) configuração do revestimento	7
Figura 2.3 – (a) Imagem termográfica do processo FSS no tempo de 65 s. (b) Evolução da térmica nos estágios do processo FSS.....	9
Figura 2.4 – Combinações de geometrias e materiais dos substratos e hastes consumíveis para FSS	12
Figura 2.5 – Exemplo de uma boa morfologia do revestimento via FSS.....	12
Figura 2.6 – Análise Macrográfica de revestimentos via FSS variando parâmetros de força axial (F_z) e velocidade de deposição dos revestimentos (V_d).....	13
Figura 2.7 – Influência da pressão axial e da rotação da haste consumível sobre: (a) espessura e (b) largura do revestimento	14
Figura 2.8 –Influência da força axial sobre a profundidade da ZTA.....	14
Figura 2.9 – Variação de dureza a partir da distância da interface revestimento/substrato em função da velocidade de rotação da haste consumível	15
Figura 2.10 – Influência da rotação da haste consumível sobre: (a) largura e (b) espessura do revestimento.	16
Figura 2.11 – Aspecto do revestimento com a variação da rotação da haste consumível	16
Figura 2.12 – Distribuição da energia de revestimento entre haste consumível e substrato em função da variação da rotação.....	17
Figura 2.13 – Influência da pressão axial e rotação sobre a eficiência do processo	18
Figura 2.14 – Padrões circulares nas superfícies de revestimentos: (a) AISI H13 sobre AISI 1020, (b) AA2017 sobre AA5052 e (c) AISI 310 sobre AISI 1020	19
Figura 2.15 – Influência da velocidade de deposição sobre: (a) profundidade da ZTA e (b) eficiência do processo (c) consumo da haste.....	20
Figura 2.16 – Microestruturas: (a) haste consumível de aço ferramenta AISI H13 e (b) revestimento do aço AISI H13 sobre aço baixo carbono	22

Figura 2.17 – Esquema da formação da camada pastosa no processo FSS.	23
Figura 2.18 –Região de contato e seção transversal da haste consumível.	24
Figura 2.19 – (a) Haste consumível após revestimento apresentando concavidade ao centro; (b) final do depósito apresentando uma forma espiral (direita).	25
Figura 2.20 – Esquema da seção transversal hastes consumíveis com a posição e número de furos realizados para inserção das partículas de SiC, assim como as dimensões das partículas.	26
Figura 2.21 – Esquema da seção transversal das hastes consumíveis para deposição em multicamadas e em detalhe revestimento realizado.	26
Figura 2.22 - Pistas de desgastes do ensaio pino sobre disco dos revestimentos.....	28
Fonte: adaptado de Gandra et al. (2014, p.2865).....	28
Figura 2.23 – Figura de Polo Inverso no centro das ligas: (a) AA6082 e (b) AA5083.....	29
Figura 2.24 – Representação esquemática de uma superfície metálica em contato com o ar	30
Figura 2.25 – Representação da área real de contato em função da carga normal: (a) $A_R \ll A$; (b) $A_R < A$; (c) $A_R = A$;	31
Figura 2.26 – Representação esquemática dos mecanismos de adesão	32
Figura 2.27 – Mecanismos de adesão propostos por Ohring (1992): (a) interface abrupta, (b) interface composta, ...	33
(c) interface difusa e (d) interface de ancoragem mecânica.....	33
Figura 2.28 – Interface de adesão do revestimento de aço AISI H13 sobre aço baixo carbono realizados sob diferentes rotações da haste: (a) 800 rpm, (b) 1600 rpm, (c) 2000 rpm e (d) 2400 rpm.....	34
Figura 2.29 - Interface de adesão do revestimento de aço AISI H13 sobre aço baixo carbono realizados em diferentes velocidades de deposição: (a) 800 rpm, (b) 1600 rpm, (c) 2000 rpm e (d) 2400 rpm.	35
Figura 2.30 – Detalhe da interface do revestimento para velocidade de deposição de 4,4 mm/s evidenciando regiões de ancoramento mecânico: (a) região de vale do revestimento e (b) região de pico do revestimento.....	35

Figura 2.31 – Corpos de prova após de ensaio de dobramento do aço AISI H13 sobre aço baixo carbono: (a) trinca propagada para a região do substrato e (b) trincas paralelas apenas no revestimento.	36
Figura 2.32 – Macrografias (vista de topo) de revestimentos multicadas por FSS.	37
Figura 2.33 – Macrografias (seção transversal) de revestimentos multicadas por FSS... ..	38
Figura 2.34 - Revestimento de alumínio em aço carbono: (a) região próxima à borda do revestimento evidenciando a solda fria; (b) região próxima ao centro do revestimento.	39
Figura 3.1 – Fluxograma dos procedimentos experimentais.....	44
Figura 3.2 (a) Substrato de aço ASTM A36 antes do processo de deposição; (b) haste consumível de aço ABNT 4340 antes do processo de deposição.....	46
Figura 3.3 – Esquema para o processo FSS: (a) estágio 1 e (b) estágio 4	51
Figura 3.4 – Aparato experimental para medição das temperaturas do processo de deposição	52
Figura 3.5 – Exemplos de imagens obtidas nas medições das temperatura dos procesos de deposição	52
Figura 3.6 – Montagem da MMC para medição das dimensões dos revestimentos.....	53
Figura 3.7 – Diagrama para análise das micrografias via MO e MEV.	54
Figura 3.8 – Diagrama para análise das tensões residuais	56
Figura 3.9 – Ensaio de dobramento em três pontos	57
Figura 3.10 – Diagrama de medição de microdureza.	57
Figura 4.1 – Vista de topo das amostras principais após a deposição dos revestimentos do Grupo A (0,43 μm)	68
Figura 4.2 – Vista de topo das amostras após a deposição dos revestimentos do Grupo B (1,75 μm).....	69
Figura 4.3 – Vista de topo das amostras após a deposição dos revestimentos do Grupo C (2,54 μm).....	69
Figura 4.4 – Conjugados e haste consumível após a deposição dos revestimentos: (a) AAA e (b) ACC.	70

Figura 4.5 – Micrografia do substrato de aço ASTM A36.....	81
Figura 4.6 – Micrografia da haste consumível de aço ABNT 4340 no estado normalizado	82
Figura 4.7 – Micrografia do conjugado AAA ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$): (a) revestimento, (b) ZTA, (c) transição entre ZTA e substrato e (d) substrato	83
Figura 4.8 – Micrografia do conjugado BAA ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$): (a) revestimento, (b) ZTA, (c) transição entre ZTA e substrato e (d) substrato.	84
Figura 4.9 – Micrografia do conjugado CAA ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$): (a) revestimento, (b) ZTA, (c) transição entre ZTA e substrato e (d) substrato.	85
Figura 4.10 – Micrografias das interfaces dos conjugados: (a) amostra ACC, (b) amostra BCC e (c) amostra CCC.....	86
Figura 4.11 – (a) Micrografia do conjugado CAA ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$) evidenciando a região de solda fria. (b) detalhe da região de solda fria....	87
Figura 4.12 – Micrografia do conjugado CAA evidenciando em detalhe a região de refino de grão.	88
Figura 4.13 – Micrografia do conjugado CAC ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$) evidenciando a região de mistura mecânica.	89
Figura 4.14 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica.	89
Figura 4.15 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região de revestimento.....	90
Figura 4.16 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região de mistura.	90
Figura 4.17 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região do substrato.	91
Figura 4.18 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e mapa de EDS.	91

Figura 4.19 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região de revestimento.....	92
Figura 4.20 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região de mistura.	93
Figura 4.21 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região do substrato.	93
Figura 4.22 – Detalhe da micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e linha de EDS.....	94
Figura 4.23 – Imagem do substrato de aço ASTM A36 sem revestimento após ensaio de dobramento.	95
Figura 4.24 – Imagens das amostras do grupo A ($R_q = 0,43 \mu m$) após ensaio de dobramento.	96
Figura 4.25 – Imagens das amostras do grupo B ($R_q = 1,75 \mu m$) após ensaio de dobramento.	96
Fonte: dados do autor	96
Figura 4.26 – Imagens das amostras do grupo C ($R_q = 2,54 \mu m$) após ensaio de dobramento.	97
Figura 4.27 – Tamanho do grão da austenita prévia – interface revestimento/ambiente: (a) conjugado BAA e (b) conjugado (CAA)	108
Figura 4.28 – Tamanho do grão da austenita prévia – região central do revestimento: (a) conjugado BAA e (b) conjugado (CAA)	109
Figura 4.29 – Tamanho do grão da austenita prévia – Interface revestimento/substrato: (a) conjugado BAA e (b) conjugado (CAA)	109
Figura 4.30 – Imagem termográfica do resfriamento do conjugado CCC.....	117

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1.....	41
Resumo das influências dos parâmetros de entrada nas repostas no processo FSS	41
TABELA 3.1.....	45
Propriedades mecânicas típicas dos aços ASTM A36 e ABNT 4340	45
TABELA 3.2.....	47
Parâmetros de corte utilizado na preparação dos substratos	47
TABELA 3.3.....	47
Comprimentos de amostragem e de avaliação conforme o recomendado pela norma ISO 4288 (2008)	47
TABELA 3.4.....	49
Resumo do planejamento fatorial	49
TABELA 4.1.....	59
Nomenclatura apresentada para discussão dos resultados	59
TABELA 4.2.....	60
Nomenclatura proposta de acordo com as condições de deposição	60
TABELA 4.3.....	61
Composição química do aço A36.....	61
TABELA 4.4.....	61
Composição química do aço ABNT 4340	61
TABELA 4.5.....	78
Largura e espessura dos revestimentos	78
TABELA 4.6.....	116
Resultados dos ensaios de tensão residual.....	116

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – Instituto Americano de Ferro e Aço (*American Iron and Steel Institute*)

ASM – Sociedade Americana de Metais (*American Society for Metals*)

ASTM – Sociedade Americana de Ensaios e Materiais (*American Society for Testing and Materials*)

AWS – Sociedade Americana de Soldagem (*American Welding Society*)

CCC – Cúbica de corpo centrado

CDTN – Centro de desenvolvimento de Tecnologia Nuclear

CFC – Cúbica de face centrada

CNC – Comando numérico computadorizado

CVD – Deposição Química a Vapor (*Chemical Vapor Deposition*)

DP – Desvio padrão

EDS – Espectroscopia de energia dispersiva

FCA – Fiat Chrysler Automobiles

FSS – Revestimento por Atrito (*Friction stir surfacing*)

HB – Dureza Brinell (*Hardness Brinell*)

HV – Dureza Vickers (*Hardness Vickers*)

ISO – Organização Internacional para Padronização (*International Organization for Standardization*)

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MMC – Máquina de medição por coordenadas

MO – Microscopia óptica

PAGB – Tamanho de Grão da Austenita Prévia (*Prior Austenite Grain Boundaries*)

PSD – Pino sobre disco

PUC-MG – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

PVD – Deposição Física a Vapor (*Physical Vapor Deposition*)

SAE – Sociedade de Engenheiros Automotivos (*Society of Automotive Engineers*)

SUB – Substrato

TWI – Instituto de Soldagem (*The Welding Institute*)

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

WC+Co – Carboneto de tungstênio ligado ao cobalto (Metal Duro)

ZTA – Zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área aparente

a_p – Profundidade de corte

A_R – Área real

F_c – Força de cisalhamento

f_z – Avanço por dente

F_z – Força axial

l_n – Comprimento de avaliação

l_r – Comprimento de amostragem

N – Força normal

n – Rotação

R_a – Rugosidade média aritmética

R_q – Rugosidade média quadrática

v_c – Velocidade de corte

V_d – Velocidade de deposição

V_z – Velocidade de avanço inicial da haste consumível no eixo z

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.2 Objetivo Geral	3
1.3 Objetivos específicos.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Revestimento por atrito (Friction Stir Surfacing - FSS).....	5
2.1.1 Parâmetros do processo	10
2.1.1.1 Força axial (Fz)	13
2.1.1.2 Velocidade de rotação da haste consumível	15
2.1.1.3 Velocidade de deposição (Vd).....	18
2.1.1.4 Diâmetro da haste consumível.....	20
2.2 Efeitos Metalúrgicos	21
2.3 Mecanismos de Adesão.....	29
2.4 Considerações parciais	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 Definição e seleção dos materiais	45
3.2 Análises químicas dos materiais.....	45
3.3 Preparações dos substratos e hastes consumíveis.....	45
3.4 Seleção dos parâmetros de revestimento	48
3.5 Planejamento fatorial	48
3.6 Verificação da conservação de massa e eficiência do processo	49
3.7 Execução dos revestimentos.....	50
3.8 Análise termográfica e visual do processo e dos conjugados.....	51
3.9 Análise dimensional dos revestimentos	53
3.10 Caracterização Metalúrgica	54
3.10.1 Análise Microscópica.....	54
3.10.2 Análise da Austenita Prévia – Prior Austenite Grain Boundaries.....	55
3.10.3 Análise de tensões residuais	56
3.11 Ensaios Mecânicos	56
3.11.1 Ensaio de dobramento.....	56
3.11.2 Ensaio de microdureza.....	57
3.11.3 Ensaio de pino sobre disco	58

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 Análise química.....	61
4.2 Rugosidade do substrato	61
4.3 Verificação da conservação de massa e eficiência do processo	64
4.4 Análise visual dos revestimentos	67
4.5 Análise térmica	70
4.6 Avaliação dimensional dos revestimentos	77
4.7 Análise das microestruturas após o processo de FSS.....	80
4.8 Ensaio de dobramento.....	95
4.9 Ensaio de microdureza	103
4.10 Ensaios de pino sobre disco	112
4.11 Ensaio de tensão residual	115
 5 CONCLUSÕES.....	 119
 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	 126
 ABSTRACT	 127
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 128
 APÊNDICE	 135

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente competitividade, a indústria tem buscado cada vez mais a melhora dos produtos ofertados aliada à redução de custos de produção. Uma das formas de redução de custo é a constante pesquisa por novas tecnologias e materiais que possuam comportamento mais previsível em serviço e que apresentem menor suscetibilidade ao desgaste, entre outras características.

A engenharia de superfície é uma importante subárea da engenharia mecânica que estuda os eventos que possam ocorrer nas superfícies dos materiais, tais como desgaste, fadiga, corrosão, etc. Esses eventos podem acarretar falhas prematuras e assim comprometer o pleno funcionamento de componentes e sistemas de engenharia. Para se conseguir melhores respostas e até mesmo aumentar a vida desses componentes, alguns procedimentos podem ser adotados, dentre os quais se destacam os processos de revestimento. Revestir consiste em depositar uma camada superficial de um determinado material com propriedades mais adequadas para a aplicação em questão. Alguns processos de revestimento ocorrem a partir da fusão do material base (substrato) e/ou do material que será revestido, o que pode alterar as propriedades mecânicas do conjugado.

Dentre as técnicas de revestimento, tem-se a deposição física de vapor (PVD – *Physical Vapor Deposition*), deposição química de vapor (CVD - *Chemical Vapor Deposition*), deposição por arco elétrico, deposição por solgel, tratamentos termoquímicos, deposição por atrito e mistura mecânica (FSS - *friction stir surfacing*), entre outras. A tecnologia de revestimento por atrito e mistura mecânica (FSS), tema deste trabalho, apresenta como vantagem o fato de ser realizada no estado sólido. De acordo com Sociedade Americana de Soldagem (AWS - *American Welding Society*), a deposição por atrito - FSS é considerada um processo de revestimento derivado da soldagem por atrito, que ocorre no estado sólido, *i.e.*, sem fusão dos materiais envolvidos. Este processo ocorre a partir da deformação plástica dos materiais. Inicialmente, uma haste consumível (material de deposição) é colocada em rotação e pressionada contra o substrato sob determinada carga axial. Esta carga, associada ao movimento da haste, gera um aumento da temperatura na interface devido ao atrito entre os materiais. A combinação entre pressão e temperatura produz uma camada viscoplástica na interface do conjugado e dessa forma, ao deslocar a haste consumível no sentido longitudinal do substrato, ocorre o recobrimento.

Por ocorrer no estado sólido, uma grande vantagem do processo de deposição por atrito é conseguir trabalhar com pares de materiais similares ou dissimilares, aumentando o seu campo de aplicação, como por exemplo, manutenção em superfícies desgastadas, bem como recobrimentos pontuais de superfícies submetidas às condições severas de trabalho com o intuito de melhorar suas propriedades.

Segundo Ravisekhar *et al.* (2017), as aplicações de tecnologias baseadas em revestimento por atrito estão aumentando em vários setores industriais, como aeroespacial, automotivo e geração de energia. O processo de revestimento por atrito vem sendo explorado e há relatos de aplicações diversas, tais como recuperação de peças desgastadas e recobrimentos preventivos em peças sujeitas à corrosão e desgaste. Gandra *et al.* (2014) relatam a utilização do processo de revestimento por atrito para reparo de eixos e peças de máquinas agrícolas, revestimento de bronze sobre aço em aplicações de ladrilhos deslizantes ou na restauração de buchas e juntas rolantes. A aplicação industrial surgiu em 1990 com a patente de Bedford e Richards para fabricação de ferramentas de corte como guilhotinas, lâminas e facas para a indústria de embalagens. Aplicações para bombas, tubulações, vasos de pressão para indústrias petroquímicas foram sugeridas por diversos autores, dentre os quais Dunkerton e Thomas (1984) e Govardhan *et al.* (2012). Reparos localizados em lâminas de turbina foram relatados por Amos (1993) e de trilhos ferroviários por Doughty *et al.* (2009), para serem realizados *in situ*, reduzindo o custo de remoção de peças e o tempo de manutenção dos produtos.

O revestimento por atrito é um processo com grande potencial de desenvolvimento e tem despertado bastante interesse na comunidade científica, uma vez que o processo por ser realizado no estado sólido pode ser realizado em pares de materiais similares e dissimilares, onde outras técnicas conhecidas para revestir são inviáveis tecnicamente.

Embora não possa ser considerado novo (sua patente foi depositada em 1941 por Klopstock e Neelands), com a necessidade de se conseguir soluções para revestimentos, o interesse da comunidade acadêmica e da indústria torna o processo alternativo promissor.

Para se obter um revestimento de boa qualidade com morfologia e dimensões controladas, resistência mecânica elevada, tensão residual conhecida e boa adesão ao substrato, o estudo dos parâmetros de entrada, tais como rotação e velocidade de deposição (velocidade de deslocamento da haste consumível), carga axial imposta pela haste consumível ao substrato, entre outros, torna-se essencial.

Um parâmetro pouco discutido é a influência da rugosidade do substrato sobre o processo de revestimento por atrito. Sabe-se que a rugosidade tem grande influência sobre o atrito e mecanismos de adesão. Dessa forma, avaliar o efeito da alteração da superfície do substrato se faz necessário, uma vez que a resposta aos parâmetros selecionados para o processo de deposição depende inteiramente do contato entre os elementos do conjugado.

1.2 Objetivo Geral

Pretende-se avaliar o efeito da alteração da rugosidade do substrato (aço ASTM A36), da rotação da haste consumível (aço ABNT 4340) e da velocidade de deposição sobre o comportamento do conjugado no que diz respeito à eficiência e controle térmico do processo, morfologia e dimensões da camada revestida, além das propriedades metalúrgicas (microestrutura e tensão residual), mecânicas (microdureza e resistência ao dobramento) e tribológicas (coeficiente de atrito).

1.3 Objetivos específicos

Mais especificadamente, pretende-se:

- avaliar a eficiência do processo FSS quando alterada a rugosidade do substrato, rotação da haste consumível e velocidade de deposição do revestimento por meio da análise de transferência de massa da haste consumível para o substrato;
- estudar o comportamento térmico durante o processo de deposição e resfriamento dos conjugados utilizando a técnica de termografia para compreender as possíveis alterações microestruturais e das propriedades mecânicas;
- compreender a influência dos parâmetros de entrada (rugosidade do substrato, rotação da haste consumível e velocidade de deposição do revestimento) sobre as seguintes respostas do conjugado: morfologia, dimensões, resistência mecânica por meio de ensaios de dobramento e microdureza.
- analisar a influência da rugosidade do substrato sobre a qualidade da adesão do revestimento sob a solicitação de dobramento;

- realizar o ensaio de pino sobre disco para obter o coeficiente de atrito no primeiro contato entre haste consumível e substrato até a formação da camada viscoplástica visando à otimização do processo de deposição.
- analisar a evolução da microestrutura e a possibilidade de difusão entre os revestimentos e substratos a partir da caracterização por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e por meio da técnica de espectroscopia de energia dispersiva;
- investigar o comportamento da tensão residual para compreender a influência dos parâmetros de entrada (rugosidade do substrato, rotação e velocidade de deposição) nos conjugados produzidos por FSS utilizando a técnica de difração de raios x usando a metodologia $\text{sen}^2\psi$;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos últimos anos, a quantidade de pesquisas realizadas a respeito do processo FSS tem aumentado consideravelmente. Os estudos são embasados em variáveis de entrada do processo, diferentes materiais dos conjugados e máquinas operatrizes. Neste capítulo são discutidas questões teóricas, a partir da bibliografia consultada, sobre o processo de revestimento por atrito, suas principais vantagens e desvantagens e aplicações industriais. Além de relacionar os principais parâmetros do processo e como estes influenciam o comportamento do revestimento, são abordados possíveis mecanismos de adesão do revestimento, bem como os efeitos metalúrgicos intrínsecos ao processo.

2.1 Revestimento por atrito (*Friction Stir Surfacing* - FSS)

Desenvolvido a partir do processo de soldagem por atrito, o processo FSS e o seu conceito foram demonstrados em patente proposta por Klopstock e Neelands em 1941 (Gandra *et al.*, 2014). Segundo Kumar e Satish (2012), o processo FSS é uma técnica avançada de fabricação derivada do processo de soldagem por atrito com um grande potencial industrial.

Por sua vez, Bishop (1960) destaca que o processo FSS tenha sido, de fato, desenvolvido nos anos 1950 na União das Repúblicas Socialistas Soviéticas e permanecido sem maiores desenvolvimentos até os anos 1980. Com a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias de revestimento e com os estudos voltados para os efeitos do atrito, o processo FSS voltou a despertar o interesse dos pesquisadores em função de o mesmo ocorrer no estado sólido e produzir revestimentos com características importantes para o incremento da resistência ao desgaste e à corrosão, uma vez que a microestrutura do revestimento se apresenta com granulação fina e homogênea (Nicholas, 1993; Nicholas, 2003). Em 1984, estudiosos ingleses publicaram trabalhos realizados pelo *The Welding Institute Ltd* (TWI) e *Portsmouth Polytechnic* demonstrando sobre FSS, entre outras vantagens, a praticidade do processo para revestir alguns aços (Thomas, 1985; Thomas, 1994). Contudo, segundo Batchelor (1996), uma tecnologia comercialmente viável só apareceu nos anos 1990, quando o processo foi patenteado como “FRICTEC”, desenvolvido para fornecer um revestimento por atrito com facilidade de operação. O processo FRICTEC é caracterizado por uma alta pressão de contato (acima de 100 MPa), durante a aplicação do revestimento, o que exige um maquinário dedicado e torna o processo caro. Percebe-se, entretanto, que desde 1990 houve um grande número de trabalhos desenvolvidos utilizando o processo FSS.

Segundo Gandra *et al.* (2012), o processo de revestimento por atrito e mistura mecânica se destaca dos demais processos de revestimento por ocorrer no estado sólido por ação de deformação de uma haste consumível rotativa. A haste é colocada em rotação (n) e pressionada contra o substrato a ser revestido com determinada força axial (F_z). Esse contato entre o consumível e o substrato gera uma camada limite viscoplástica na interface e devido à combinação de pressão e temperatura pode haver um processo de interdifusão entre os materiais do substrato e revestimento. Simultaneamente, desloca-se a haste consumível nas direções axial (z) e longitudinal (x), mantendo constante a rotação e pressão para deposição do revestimento sobre o material base a uma velocidade de deposição geralmente constante (V_d). Parte do material da haste consumível é depositada no substrato, configurando o revestimento enquanto parte desse material escoar radialmente, o que gera uma região conhecida como *flash*. Um esquema do processo de deposição por atrito pode ser visto na Figura 2.1.

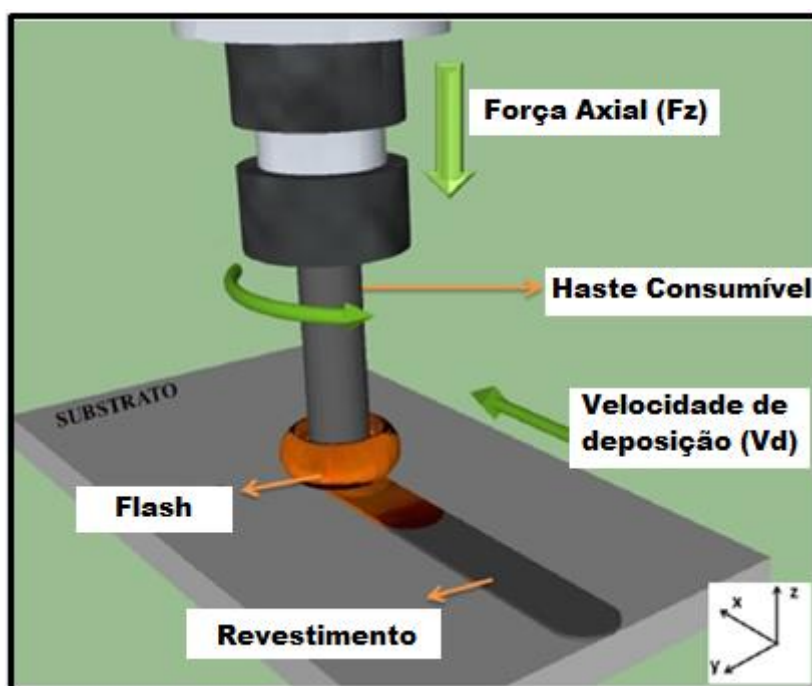


Figura 2.1 – Esquema do processo de revestimento por atrito.
Fonte: Adaptado de Troysi (2016, p. 42).

A formação do revestimento pode ser discretizada em quatro etapas, conforme representado na Figura 2.2: inicialmente, vide Figura 2.2(a), a haste consumível é rotacionada e aproximada do substrato no local onde se deseja iniciar o revestimento e logo que as superfícies entram em contato inicia-se o processo. Essa etapa é definida como estágio 1. Em um segundo momento (estágio 2), o movimento relativo entre as superfícies da haste consumível e o substrato gera o aquecimento em função do atrito entre elementos e em poucos segundos a temperatura aumenta consideravelmente.

Em função da alta temperatura e aplicação da força axial (F_z), a extremidade haste consumível se deforma plasticamente e em seguida forma-se uma camada viscoplástica, que gera uma região de cisalhamento local em função da redução da resistência mecânica dos materiais do conjugado, referida por Tyayar (1959a e 1959b) como “camada quase líquida”, e por Fukukasa (1996) como “plano de contato rotacional”. Essa camada tende a aderir à superfície do substrato, conforme pode ser observado na Figura 2.2(b), estágio 3. Após a formação da camada plastificada, atribui-se, ou a haste consumível ou ao substrato, um deslocamento no sentido longitudinal e ao longo desse percurso uma porção do material da haste consumível é depositada sobre o substrato, enquanto parte do material é recalcada, fluindo radialmente da haste consumível (*flash*), conforme se verifica na Figura 2.2c, estágio 4. Segundo Nicholas *et al.* (1993), esse fenômeno prejudica a adesão das laterais do revestimento.

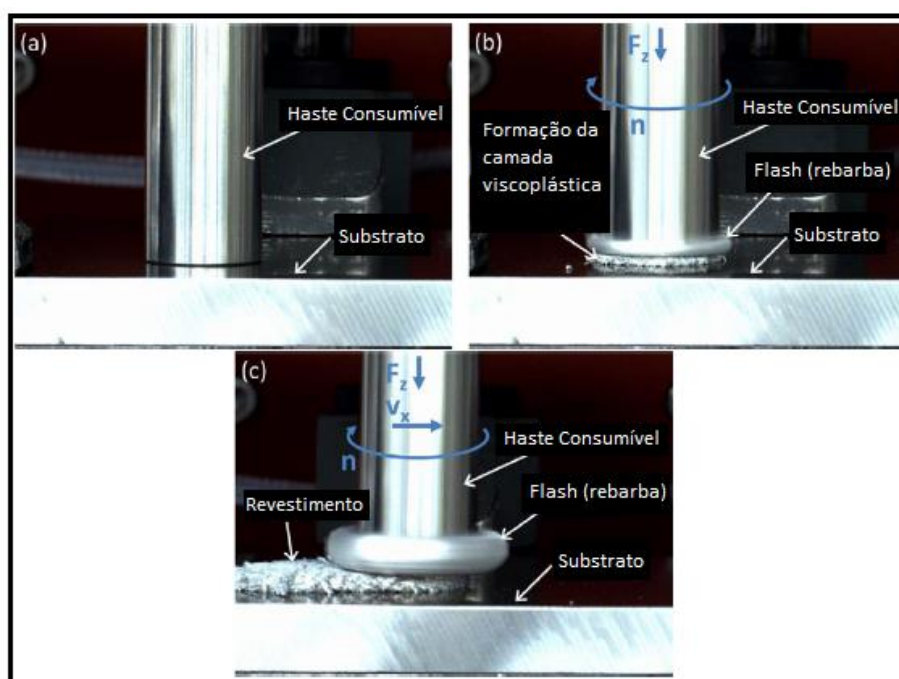


Figura 2.2 – Etapas do processo FSS: (a) aproximação da haste consumível e substrato, (b) pré-aquecimento e início da plastificação e (c) configuração do revestimento
 Fonte: adaptado de Hanke et al. (2017, p. 258).

Rao *et al.* (2012b) estudaram a formação do revestimento utilizando a técnica de termografia para o acompanhamento do gradiente da temperatura e do ciclo térmico do processo de deposição. Os autores afirmam que para entender o processo globalmente, é necessária a compreensão do ciclo térmico e como ele interfere na formação do revestimento. Contudo, realizar medições na interface

revestimento e substrato é praticamente impossível por técnicas convencionais. No trabalho foram utilizados três pares tribológicos para a formação dos conjugados haste consumível e substrato: aço ferramenta e aço baixo carbono, cobre e aço baixo carbono além de cobre e cobre. Observa-se na Figura 2.3 uma imagem e um perfil térmico gerado pela câmera termográfica. Os autores puderam observar a partir do perfil termográfico a existência dos quatro estágios diferentes no processo de deposição.

O comportamento térmico dos quatro estágios estudados por Hanke *et al.* (2017) corrobora o que foi exposto por Rao *et al.* (2012 a). Percebe-se no estágio 1, logo após o contato das superfícies, um aumento lento e gradual da temperatura na qual a geração de calor é controlada pelo coeficiente de atrito entre os materiais em questão. Segundo Rao *et al.* (2012 a), quanto maior o coeficiente de atrito, maior a taxa de geração de calor. No estágio 2 tem-se um aumento brusco da temperatura de aproximadamente 200 °C para 900 °C, que pode ser explicado pela remoção de uma camada de óxido existente entre os materiais ao final do estágio 1. O contato entre os materiais da haste consumível e substrato pode gerar por fenômeno conhecido como “*stick-slip*” a adesão seguida de cisalhamento nas regiões de contato entre as asperezas das superfícies em função do torque da haste consumível. Nesse estágio a geração de calor ocorre mais rapidamente que a sua dissipação promovendo uma condição de aquecimento adiabático. Ao alcançar uma temperatura de aproximadamente 900 °C a geração de calor diminui em função da componente de atrito diminuir por atingir uma região de dissipação de calor viscosa até uma temperatura próxima de 1075 °C, região definida como estágio 3. A partir desta temperatura (1075 °C), forma-se a camada viscoplástica e a temperatura se mantém constante em um estado estacionário (estágio 4) até o fim do processo.

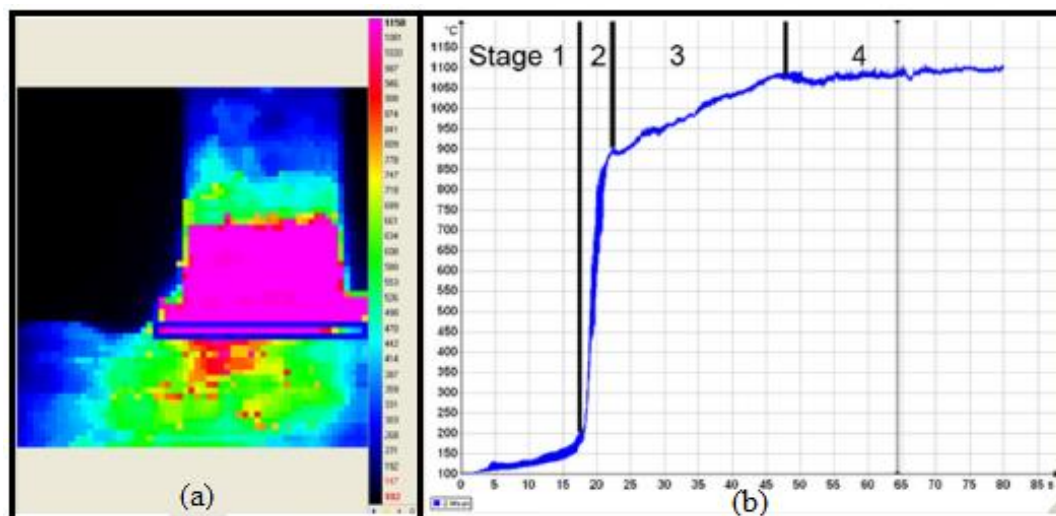


Figura 2.3 – (a) Imagem termográfica do processo FSS no tempo de 65 s. (b) Evolução térmica nos estágios do processo FSS.

Fonte: adaptado Rao et al. (2012, p. 404).

Gandra *et al.* (2014) observaram que o atrito entre a haste consumível e o substrato causa deformação plástica e libera calor, produzindo um revestimento com uma camada contínua e com uma microestrutura refinada a partir do consumo progressivo da haste. Observaram ainda que o calor oriundo do atrito entre os materiais do conjugado promove altos valores de temperatura (acima da temperatura de recristalização e abaixo da temperatura de fusão). Ainda segundo Gandra *et al.* (2014), uma possível explicação para o processo FSS ocorrer no estado sólido seja o fato de o aumento da temperatura diminuir o atrito na interface substrato/haste consumível, onde a temperatura é muito alta e praticamente impossível de se mensurar e assim não existiria ou seria insignificante o efeito do atrito, interrompendo a geração de calor e impedindo o aumento subsequente da temperatura e, consequentemente, a fusão dos materiais.

Dessa forma, Fukukasa *et al.* (1996) e Vitanov *et al.* (2001) sugerem que a transferência do material da haste consumível para o substrato ocorre por ação de cisalhamento de um plano rotacional formado entre esses elementos, provocando o deslizamento do material da haste para o substrato. Gandra *et al.* (2014) observaram que mantendo a rotação e com uma redução da velocidade de deposição, a interface de cisalhamento viscoplástica afasta-se da superfície do substrato, aumentando a espessura da camada revestida. No entanto, os principais efeitos que contribuem para a adesão na interface são a difusão atômica, a deformação plástica e, eventualmente, a mistura mecânica de partículas de lado

a lado. Todos esses efeitos tornam-se possíveis pelo aquecimento promovido pelo atrito (GANDRA *et al.*, 2014).

2.1.1 Parâmetros do processo

Para se obter resultados satisfatórios no procedimento de revestimento por atrito, incluindo o aspecto visual, largura, espessura e adesão adequados, os parâmetros de entrada do processo devem ser selecionados de forma particular para cada conjunto de materiais, uma vez que os estudos indicam que apesar de se ter controle do que ocorre durante o procedimento de revestimento, cada par tribológico apresenta comportamento particular e dessa forma deve ser avaliado de forma independente. Entretanto, percebe-se que a variação alguns parâmetros apresentam certa tendência de comportamento que converge entre os resultados apresentados na literatura, tais como largura e espessura do revestimento em função da velocidade de deposição.

Nos últimos 20 anos, vários pesquisadores (Shinoda 1998; Vitanov 2000 e 2005; Rafi 2010; Gandra 2012 e 2014; Kumar 2015; Marek 2018, entre outros) estudaram os efeitos das variáveis no processo de revestimento por atrito. Estes autores citam a força axial (F_z), velocidade de rotação da haste consumível (n), velocidade de deposição do revestimento (V_d) e diâmetro da haste consumível como os principais parâmetros a serem controlados para se alcançar os resultados desejáveis.

Para ocorrer de forma satisfatória, o processo de revestimento por atrito necessita do controle do consumo da haste em função da sua rotação, da velocidade de deposição e da força ou pressão da haste contra o substrato. Dessa forma, Vitanov *et al.* (2010) propõem o uso de máquinas controladas numericamente (CNC) como alternativa para viabilizar e tornar o processo comercial. O uso do CNC transforma a força axial em uma reposta, e não um parâmetro de entrada, uma vez que o controle será realizado a partir da velocidade de deposição da haste. Estes autores demonstraram que a força axial e a taxa de consumo da haste estão intimamente relacionadas. Com base nesse estudo, sugerem que a deposição do revestimento por atrito de forma comercial apresente o controle da velocidade de deposição e a rotação da haste consumível como parâmetros de maior importância para o controle do processo. Entretanto, quando realizado em máquinas com controle da carga, o processo provavelmente apresentará resultados mais adequados quanto à força de adesão e morfologia do revestimento, uma vez que é possível determinar a força axial necessária para se estabelecer ligações adequadas no conjugado.

Chandrasekaran *et al.* (1997) avaliaram a capacidade do processo FSS de trabalhar com materiais dissimilares. Foram investigadas as possibilidades de revestir aço baixo carbono (substrato) utilizando como haste consumível os seguintes materiais: aço ferramenta, ligas à base de níquel (Inconel), alumínio e titânio. Além disso, avaliou-se o revestimento de uma liga de alumínio, utilizando aço inoxidável, aço carbono e Inconel como materiais de revestimento. Os autores perceberam que tanto o aço ferramenta como o Inconel apresentaram uma boa resposta ao serem depositados sobre o aço baixo carbono, contudo, para se obter essa mesma resposta verificou-se a necessidade de se aumentar a força axial aplicada ao depositar o alumínio. Não foi possível, entretanto, obter uma resposta satisfatória no depósito da liga de titânio nas condições avaliadas. Na avaliação do alumínio como substrato, os três materiais testados como revestimento (aço carbono, aço inoxidável e Inconel) foram depositados com êxito. Todavia, observou-se que para os pares alumínio e aço carbono bem como alumínio e Inconel houve a formação de uma camada intermetálica, decorrente da provável fusão do alumínio, o que não é desejável no processo FSS.

A partir de observações microscópicas dos conjugados das amostras de aço carbono como substrato verificou-se que houve a deformação subsuperficial do substrato pela ação do atrito, ausência de mistura mecânica na interface além do aumento da rugosidade superficial do revestimento. Algo semelhante foi observado nos substratos em liga de alumínio. Concluiu-se que os materiais do substrato e haste consumível bem como o controle dos parâmetros do processo (velocidade de deposição, rotação e carga aplicada) são de grande importância para a qualidade do revestimento.

Vitanov *et al.* (2000) investigaram técnicas para a otimização do processo, realizando mais de 1200 experimentos para verificar a importância de fatores como força, temperatura e tempo de deposição, utilizando diferentes materiais e geometrias para a haste consumível e o substrato. Na Figura 2.4 observa-se um resumo das combinações de materiais e geometria do substrato e haste consumível para a aplicação do processo FSS. Na parte superior da mesma figura pode-se notar diferentes geometrias e trajetórias de revestimentos, enquanto na parte inferior as marcações, indicam os pares de materiais (substrato e haste consumível) que foram avaliadas. A partir dos testes, os autores buscaram entender o comportamento dos parâmetros utilizados e criar um banco de dados com os parâmetros mais indicados para se obter sucesso nos revestimentos levando em consideração os pares tribológicos em questão e a trajetória de deposição avaliando as seguintes variáveis de resposta: largura e espessura do revestimento, bem como a força de adesão do conjugado.

				
				
Substrato	Al	AC	SS	Ti
Haste Consumível				
Alumínio (Al)				
Aço Carbono (AC)				
Aço Inox (SS)				
Aço Rápido				
Stellite 6,12				

Figura 2.4 – Combinações de geometrias e materiais dos substratos e hastes consumíveis para FSS
 Fonte: adaptado de Vitanov et al. (2000, p. 237).

Vitanov *et al.* (2000) apresentam na Figura 2.5 o que seria um revestimento com uma boa morfologia, além de demonstrar a partir do Gráfico da Figura 2.6 os efeitos da seleção dos parâmetros otimizados para se obter respostas satisfatórias quanto à morfologia dos revestimentos. Um trapézio sobreposto ao Gráfico indica a região de parâmetros que garantirá um comportamento morfológico satisfatório e dessa forma que merecem maior atenção para estudos mais aprofundados.

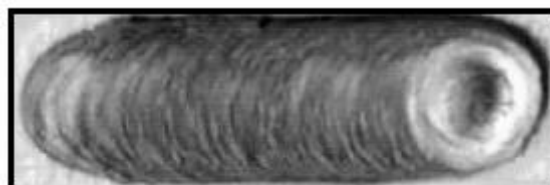


Figura 2.5 – Exemplo de uma boa morfologia do revestimento via FSS
 Fonte: adaptado de Vitanov et al. (2000, p. 237).

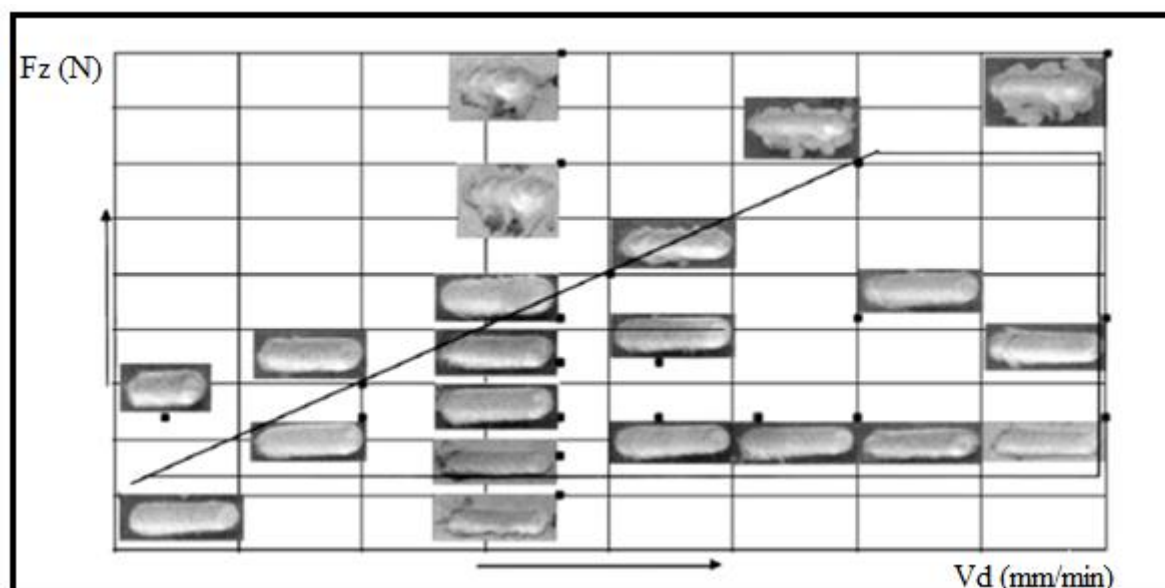


Figura 2.6 – Análise Macrográfica de revestimentos via FSS variando parâmetros de força axial (F_z) e velocidade de deposição dos revestimentos (V_d).

Fonte: adaptado Vitanov et al. (2000, p. 238).

2.1.1.1 Força axial (F_z)

A força axial deve ser discutida em função de sua importância para a morfologia do revestimento, assim como para a força de adesão entre o revestimento e o substrato. Vitanov *et al.* (2000) observaram que o aumento da força axial tende a reduzir de maneira proporcional a espessura do revestimento enquanto, em contrapartida, aumenta a sua largura. Essa afirmação corrobora o que foi proposto por Shinoda *et al.* (1998), contudo estes autores sugerem uma maior influência da força axial em relação à largura do revestimento, indicando que a espessura pode sofrer maiores alterações a partir da alteração da rotação da haste consumível. Na Figura 2.7 pode ser observada a relação entre força axial, ora apresentada como pressão axial, e rotação da haste consumível frente à morfologia do revestimento obtida por Shinoda *et al.* (1998). Nota-se que ao aumentar a pressão axial de 25 para 50 MPa a espessura permanece praticamente inalterada em 1,3 mm enquanto a largura, por sua vez, apresenta um aumento de 15 para 18 mm. Contudo, verifica-se que a rotação é mais influente sobre a espessura e largura uma vez que ao aumentar o seu valor de 800 para 1600 rpm para uma pressão axial de 25 MPa, observou-se uma redução da espessura e largura, respectivamente, de cerca de 1,3 mm para 0,8 mm e de 15 mm para 11 mm.

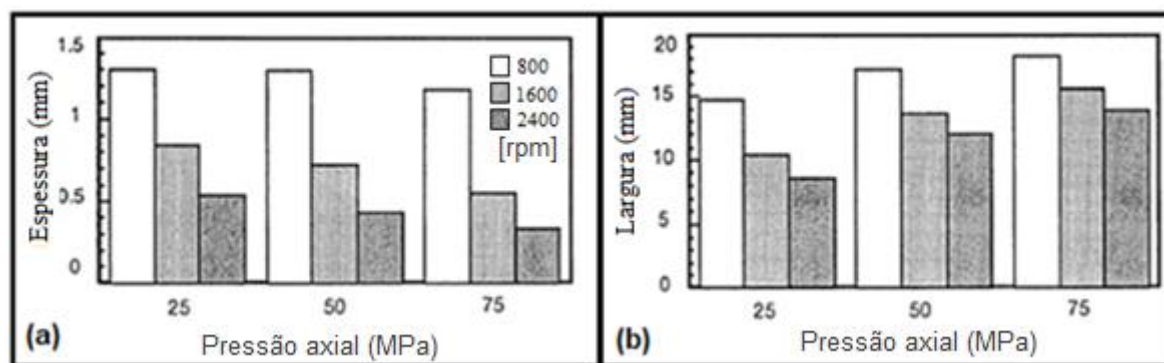


Figura 2.7 – Influência da pressão axial e da rotação da haste consumível sobre: (a) espessura e (b) largura do revestimento

Fonte: Adaptado de Shinoda et al., (1998, p. 213)

Vitanov *et al.* (2000) indicam ainda que o aumento da força axial tende a elevar a adesão entre o revestimento e o substrato e, dessa forma, reduzir possíveis regiões de solda fria. Entretanto, Van Kalken (2001) observou que a elevação da força axial aumenta a profundidade da zona termicamente afetada (ZTA), conforme pode ser verificado na Figura 2.8. Além disso, Li *et al.* (2000) relataram um aumento da formação de rebarba (*flash*) com o aumento de F_z , o que diminui a eficiência do processo.

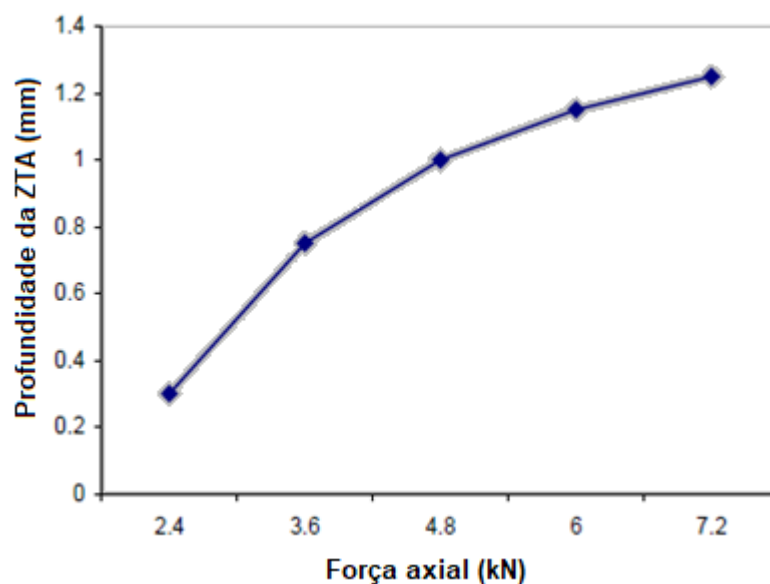


Figura 2.8 –Influência da força axial sobre a profundidade da ZTA

Fonte: Adaptado de Van Kalken, (2001, p. 49)

2.1.1.2 Velocidade de rotação da haste consumível

A rotação da haste consumível desempenha um importante papel no controle da rugosidade espessura e largura do revestimento, além de influenciar a qualidade da adesão do consumível no substrato. Em um estudo realizado por Shinoda *et al.* (1998) de deposição do aço inoxidável martensítico AISI 440C sobre aço carbono SM490A, notou-se que a rotação da haste consumível pode influenciar também o valor da dureza da interface revestimento/substrato em função da taxa de calor gerada pelo atrito nessa região; isso pode ser afirmado em função dos resultados obtidos em experimentos realizados pelos autores e que podem ser observados na Figura 2.9, onde percebe-se que a dureza da camada revestida é altamente dependente da velocidade de rotação e seus valores são inversamente proporcionais.

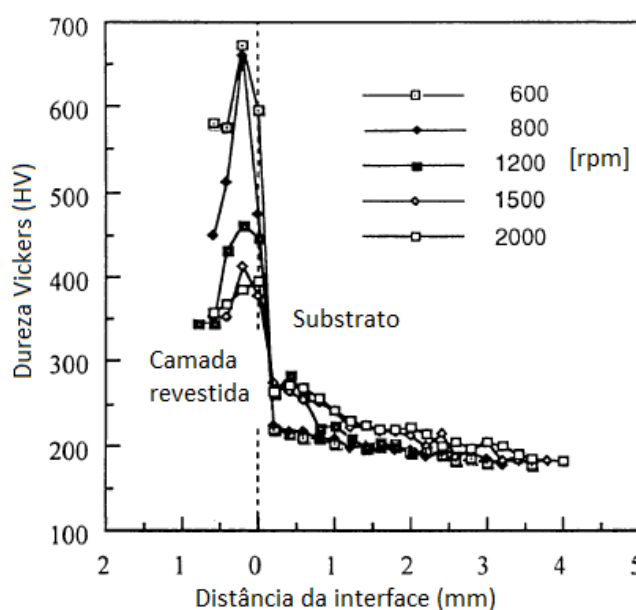


Figura 2.9 – Variação de dureza a partir da distância da interface revestimento/substrato em função da velocidade de rotação da haste consumível

Fonte: adaptado de Shinoda *et al.* (1998, p. 213)

Rafi *et al.* (2010) mostraram que a variação da velocidade de rotação da haste consumível influencia de maneira inversa a largura do revestimento, ou seja, com o aumento da velocidade de rotação, a largura do revestimento diminui. Além disso, a espessura também sofre influência da velocidade de rotação da haste, entretanto, de maneira não tão significativa, uma vez que o parâmetro mais influente,

ainda segundo Rafi *et al.* (2010), seria a velocidade de deposição, conforme pode ser observado na Figura 2.10.

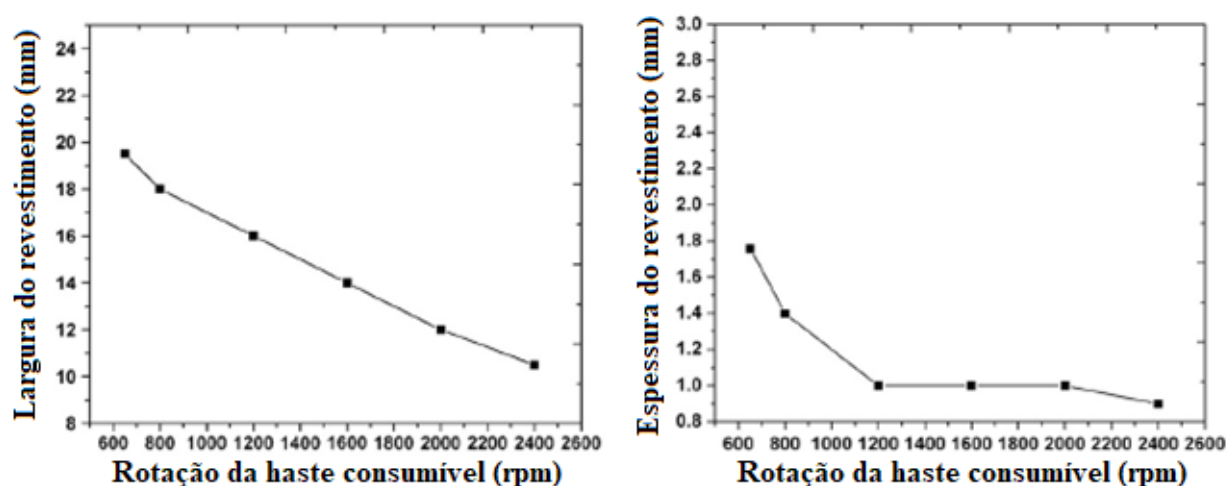


Figura 2.10 – Influência da rotação da haste consumível sobre: (a) largura e (b) espessura do revestimento.
Fonte: adaptado de Rafi *et al.* (2010, p. 235)

Ainda segundo Rafi *et al.* (2010), melhor acabamento superficial do revestimento é obtido quando há o aumento da velocidade de rotação da haste consumível, conforme pode ser observado na Figura 2.11. Esta Figura mostra ainda como o aumento da velocidade de rotação diminui a largura do revestimento. Os autores relacionam esse comportamento à presença de um plano rotacional de contato, que se refere a um plano de contato instantâneo entre a haste consumível e o substrato durante o processo de revestimento, o qual gera a transferência de material. Percebe-se que a área do plano rotacional de contato diminui com o aumento da rotação, logo a transferência de material é restrita a um menor plano e com isso são formados revestimentos mais estreitos.

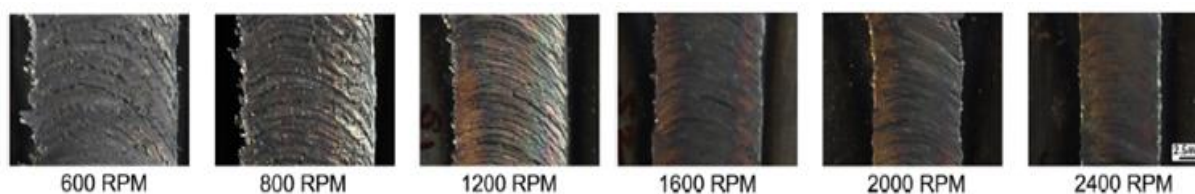


Figura 2.11 – Aspecto do revestimento com a variação da rotação da haste consumível
Fonte: adaptado de Rafi *et al.*, (2010, p. 235)

Shinoda *et al.* (1998) relatam que o aumento da rotação reflete pouco na taxa de entrada de calor total (revestimento + substrato) para o processo, entretanto, a taxa de entrada de calor apenas no revestimento é aumentada consideravelmente, conforme verifica-se na Figura 2.12. Como há fluxo de calor do revestimento para o substrato, é possível então realizar o controle de entrada de calor tanto no revestimento como no substrato por meio da variação da velocidade de rotação da haste consumível. Esse fenômeno condiz com os resultados obtidos por Bedford e Richards (1985) e Fukakusa (1996) nos quais notou-se que a área de contato entre o substrato e o revestimento diminui com o aumento da velocidade de rotação e que a transferência de calor gerado pelo atrito para o substrato se torna menor, o que tenderia a diminuir a ZTA. Em seguida, Shinoda *et al.* (1998) verificaram que a taxa de entrada de calor no substrato torna-se maior com velocidades de rotação mais baixas da haste e, de forma geral, resulta em maiores valores de dureza do conjugado, conforme pode ser observado na Figura 2.9.

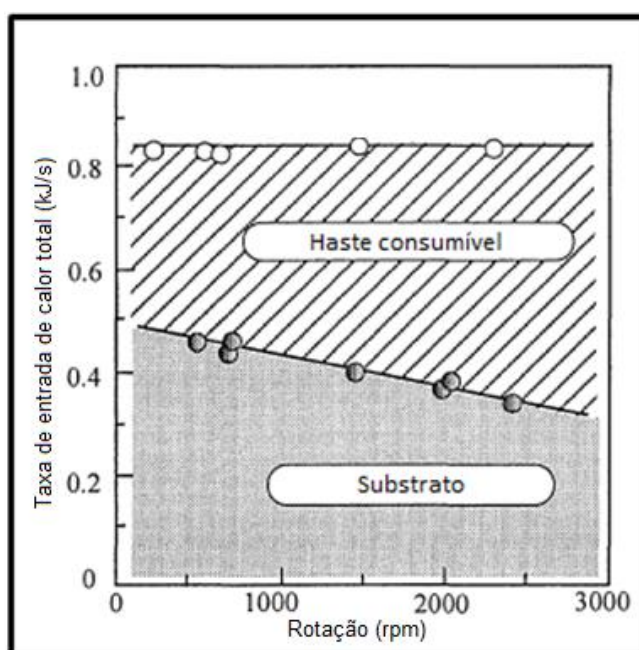


Figura 2.12 – Distribuição da energia de revestimento entre haste consumível e substrato em função da variação da rotação

Fonte: adaptado de Shinoda et al., (1998, p. 214)

Segundo Li e Shinoda (2000), o *flash* formado em todo processo de revestimento por atrito não permite que a eficiência do processo seja total (medida como a razão entre metal depositado e metal consumido). A força axial e a rotação da haste consumível são parâmetros que influenciam a

eficiência da operação e os autores sugerem que os melhores resultados quanto à eficiência acontecem quando menores valores de pressão axial e rotação são empregados, conforme verifica-se na Figura 2.13.

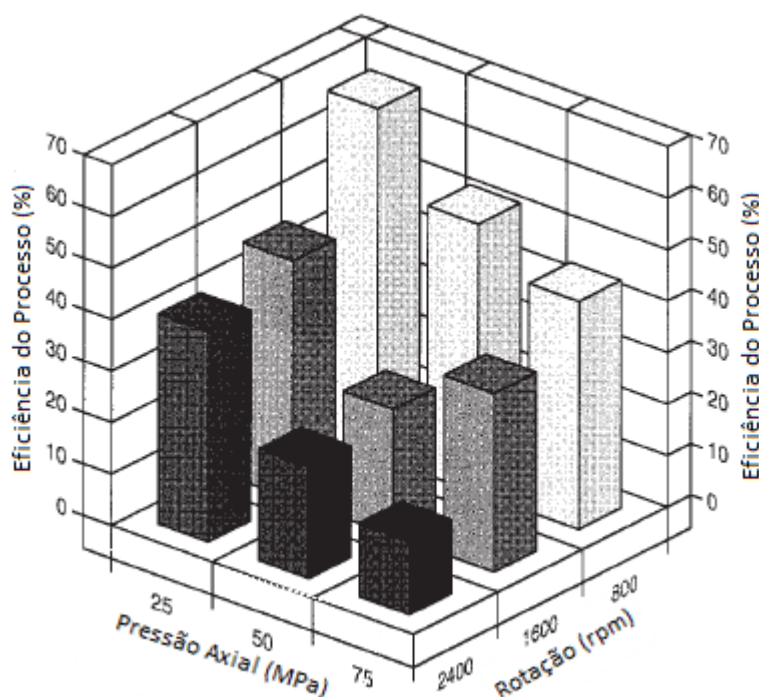


Figura 2.13 – Influência da pressão axial e rotação sobre a eficiência do processo
Fonte: adaptado de Li e Shinoda, (2000, p.33)

2.1.1.3 Velocidade de deposição (V_d)

Tokisue *et al.* (2005) observaram a ocorrência de padrões circulares na superfície dos revestimentos independentemente dos materiais e/ou parâmetros selecionados para o processo. Entretanto, notaram que esses padrões se apresentam mais estreitos quando a rotação da haste consumível é aumentada e quando a velocidade de deposição é reduzida. Na Figura 2.11 podem ser verificados os padrões circulares nas superfícies de revestimentos (início do revestimento à esquerda e o fim à direita). Na Figura 2.14(a) pode-se observar um revestimento de aço AISI H13 sobre o aço AISI 1020, realizado por Rafi *et al.* (2011 a). A Figura 2.14(b) mostra o revestimento realizado por Tokisue *et al.* (2006) de liga de alumínio AA2017 sobre a liga AA5052 e a Figura 2.14(c) mostra o revestimento de aço inoxidável AISI 310 sobre o aço AISI 1020 realizado por Rafi *et al.* (2011b). Apesar das variações

nos materiais da haste consumível e do substrato, nota-se o padrão circular nas superfícies dos revestimentos conforme o proposto por Tokisue *et al.* (2005).

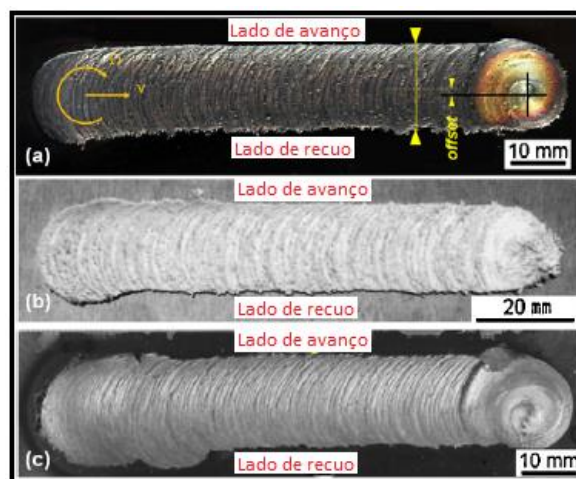


Figura 2.14 – Padrões circulares nas superfícies de revestimentos: (a) AISI H13 sobre AISI 1020, (b) AA2017 sobre AA5052 e (c) AISI 310 sobre AISI 1020

Fonte: adaptado de Gandra *et al.* (2014, p.1065)

Rafi *et al.* (2010) estudaram a variação da largura e espessura do revestimento, além da resistência da ligação (adesão) do revestimento ao substrato em função da variação da rotação e da velocidade de deposição da haste consumível. Os autores chegaram à conclusão que a variação da velocidade de deposição exerce muito pouca influência sobre a largura do revestimento, entretanto, foi percebido que a espessura do revestimento diminuiu pela metade quando a velocidade de deposição foi aumentada de 1,2 mm/s para 4,4 mm/s.

Bedford *et al.* (2001) já haviam observado alterações na largura e com maior intensidade na espessura do revestimento com a variação da velocidade de deposição. Foi observada ainda influência direta sobre a eficiência do processo e a formação da ZTA, a qual está relacionada à temperatura na interface e ao tempo de contato entre haste consumível e substrato, sendo reduzida quando se aumenta a velocidade de deposição.

O estudo realizado por Van Kalken (2001) corrobora o que foi proposto por Bedford *et al.* (2001). Van Kalken (2001) afirma que a quantidade de calor de entrada é reduzida quando há o aumento da velocidade de deposição. Isso resulta em uma menor camada viscoplástica e, por consequência, em uma menor influência da temperatura (menor ZTA). Adicionalmente, Van Kalken (2001) notou que o consumo da haste é inversamente proporcional à velocidade de deposição, gerando um *flash* menor

e aumentando a eficiência do processo. Os resultados obtidos por Van Kalken (2001) são mostrados nas Figuras 2.15. Nos experimentos realizados foram mantidos constantes a velocidade de rotação da haste em 3000 rpm e a força axial em 4,8 kN.

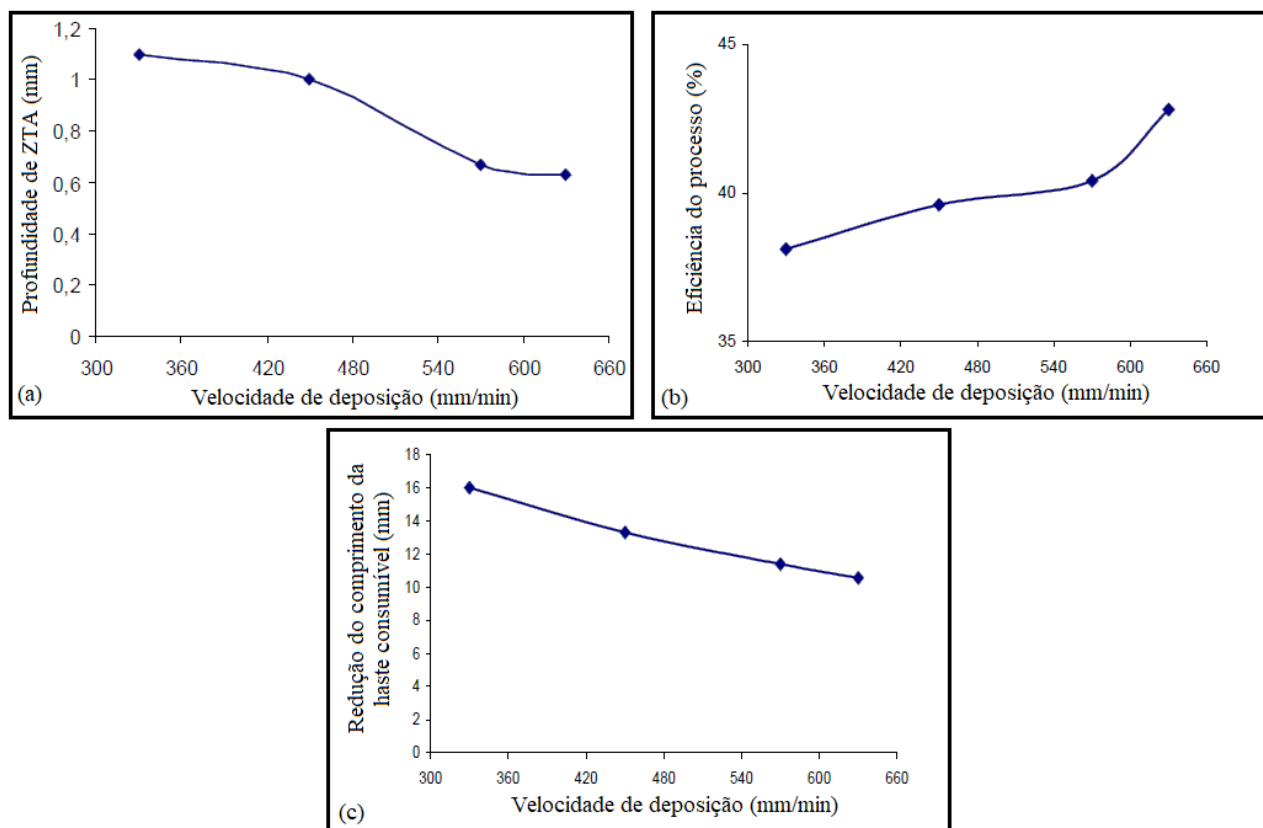


Figura 2.15 – Influência da velocidade de deposição sobre: (a) profundidade da ZTA e (b) eficiência do processo (c) consumo da haste.

Fonte: adaptado de Van Kalken (2001, p. 50)

2.1.1.4 Diâmetro da haste consumível

Conforme Bedford *et al.* (2001), em se tratando de aços, o tempo de permanência do revestimento acima da temperatura crítica (austenitização) está relacionado com diâmetro da haste consumível, uma vez que a temperatura atingida na interface é reduzida quando há a troca de calor com o substrato por condução. Dessa forma, quanto maior o diâmetro da haste, mais longo será o tempo de permanência do revestimento sob temperaturas acima da crítica. Por outro lado, entende-se que será necessário um tempo mais longo para atingir essa temperatura no aquecimento em função do aumento da área de contato.

Sabe-se ainda que o diâmetro da haste consumível tem uma relação óbvia e direta com a largura do revestimento, ou seja, quanto maior o diâmetro da haste, maior será a largura do revestimento, entretanto, o aumento do diâmetro da haste exige uma maior potência da máquina, sendo então limitado pela capacidade desta.

2.2 Efeitos Metalúrgicos

Conforme descrito na seção 2.1, o processo de revestimento por atrito depende das combinações de materiais e parâmetros selecionados para sua execução. Uma camada viscoplástica é gerada na interface quando atingida uma determinada temperatura, intrínseca para cada seleção de materiais e parâmetros. Em função dessas combinações de parâmetros, uma alta taxa de deformação plástica é imposta na interface haste – substrato, o que leva a temperaturas elevadas o suficiente para causar alterações nas microestruturas, nas propriedades mecânicas, na formação de ZTA, etc.

Segundo Bedford *et al.* (1990), a camada depositada pode ser caracterizada por uma microestrutura refinada devido ao processo de recristalização dinâmica semelhante ao que ocorre em operações de conformação a quente, com excelente adesão devido a possível difusão e ancoragem mecânica na interface. Os autores sugerem ainda que a interface se apresenta isenta de alguns defeitos comuns em processos de soldagem por fusão, tais como: vazios, porosidades e inclusões, além de não ser evidenciada uma região de zona fundida em função do processo acontecer no estado sólido.

Bedford *et al.* (2001) estudaram o revestimento do aço carbono utilizando como haste consumível os aços rápidos BM2, BT15 e ASP30. Notou-se que a dureza máxima dos conjugados foi muito alta (acima de 700 HV), o que exigiu a realização do tratamento térmico de revenimento após a deposição. Os autores observaram ainda que logo abaixo da haste consumível de aço rápido o revestimento pode atingir temperaturas próximas de 1020 °C até entrar em contato com uma região mais fria do substrato (aço carbono), para onde ocorre a transferência de calor do revestimento. Por meio da ação da temperatura e da carga axial podem ocorrer fenômenos como o aparecimento de uma camada difundida na interface e variações da profundidade da camada afetada pelo calor. Realizado o revestimento, parte do calor é transferida por convecção e radiação para o ambiente, além da perda de calor em função do contato com o substrato a temperatura ambiente, o que acelera o processo de resfriamento do conjugado. Conforme relatado por Bedford *et al.* (2001), o resfriamento é muito

rápido, podendo atingir uma taxa superior a 400 °C/s, promovendo transformações de fase do par envolvido e um revestimento com microestrutura refinada e homogênea.

Segundo Gandra *et al.* (2014), em se tratando de aço carbono pode-se dizer que há a completa austenitização na região da interface entre haste consumível e substrato, uma vez que para se alcançar o estado viscoplástico é necessário que haja a transformação da estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) para cúbica de face centrada (CFC). Os autores, assim como Bedford *et al.* (2001), citam que há um refinamento dos grãos próximos à interface de deposição em função da recristalização dinâmica, além de observarem um aumento na dureza superficial do revestimento em função da taxa de resfriamento e composição química da haste consumível. Adicionalmente, foi observado que partículas de segunda fase podem ser dissolvidas durante a deformação no processo e após o resfriamento os elementos de liga podem permanecer em solução sólida ou voltar a precipitar em partículas finas de segunda fase.

Rafi *et al.* (2011c) observaram a transformação martensítica no revestimento de aço baixo carbono com o aço ferramenta AISI H13. A Figura 2.16(a) mostra que a microestrutura da haste consumível apresentou uma grande quantidade de carbonetos que não foram observados no revestimento (Figura 2.16 b), sugerindo a solubilização desses carbonetos durante a austenitização. Entretanto observou-se no revestimento uma microestrutura com o aspecto de martensita fina e homogênea.

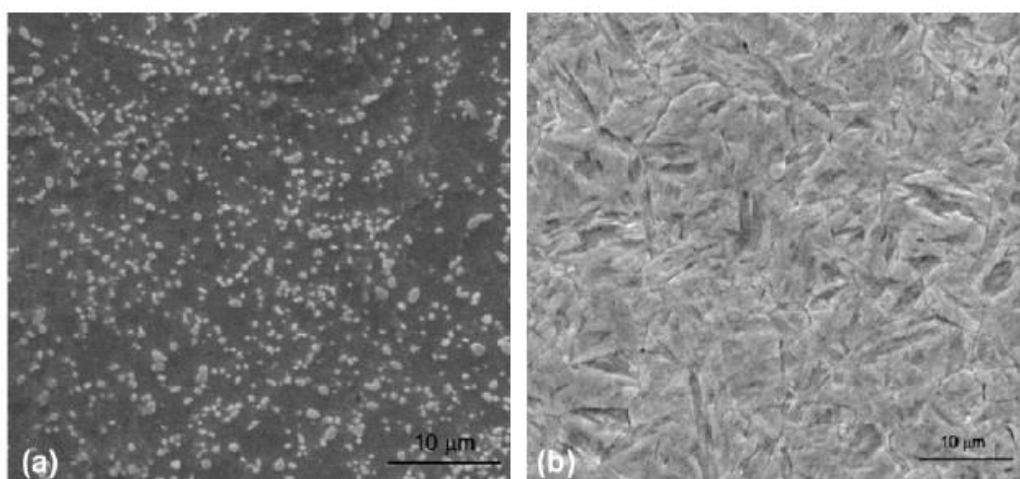


Figura 2.16 – Microestruturas: (a) haste consumível de aço ferramenta AISI H13 e (b) revestimento do aço AISI H13 sobre aço baixo carbono
Fonte: adaptado de Rafi, (2011c)

Liu *et al.* (2008) estudaram o mecanismo de transferência de material da haste consumível para o substrato utilizando a liga 1Cr18Ni9Ti como haste consumível e o aço carbono SAE 1020 como

substrato. Os autores realizaram medições de temperatura com termopar na haste consumível a cada 10 mm partindo da extremidade inferior e na área de contato com o substrato com o intuito de explicar a transferência de calor durante o processo. Notou-se o maior valor da temperatura (próximo ao ponto de fusão da haste de revestimento) no início do processo para, em seguida, diminuir à medida que a operação avança. Os autores propõem que essa temperatura na interface leva à mudança da microestrutura do material da superfície e gera uma camada pastosa que se transporta continuamente para o substrato para formar o revestimento. Na Figura 2.17 pode ser verificado um esquema dessa formação da camada pastosa proposta pelos autores.

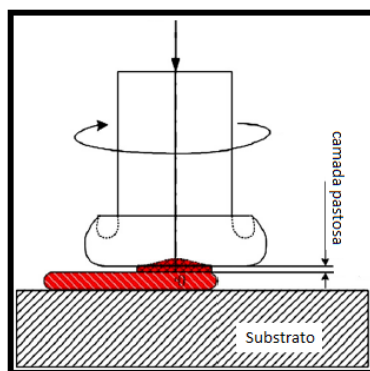


Figura 2.17 – Esquema da formação da camada pastosa no processo FSS.
Fonte: adaptado de Liu et al. (2008, p. 1981).

Ao interromper o processo antes de finalizar o revestimento, percebeu-se que a haste consumível apresentava na sua extremidade uma concavidade localizada no centro (Figura 2.18) com aspecto liso e sem indicativos de atrito e adesão, o que corrobora a ideia da existência de uma camada pastosa.

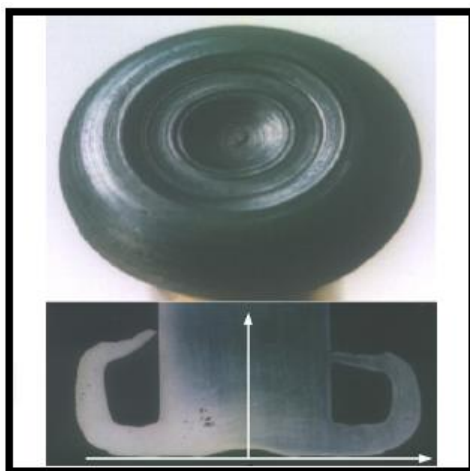


Figura 2.18 –Região de contato e seção transversal da haste consumível.
Fonte: adaptado de Liu et al. (2008, p. 1983).

Posteriormente, Liu *et al.* (2009) utilizaram o método de diferenças finitas para modelar a distribuição da temperatura na haste consumível e concluíram que os resultados são consistentes com os experimentos, com uma variação entre a simulação e os valores medidos menor que 10%, proporcionando embasamentos teóricos na escolha dos principais parâmetros do processo FSS.

Rafi *et al.* (2010) avaliaram os efeitos dos parâmetros do processo sobre as características e integridade do revestimento por atrito, utilizando como substrato e haste consumível, aço baixo carbono e aço ferramenta AISI H13, respectivamente. Foi avaliada a influência da rotação da haste consumível, velocidade de deposição e carga axial, sobre a morfologia do revestimento, microdureza, resistência ao cisalhamento e dobramento. Em um primeiro momento foram fixados os valores da carga axial e velocidade de deposição do substrato, enquanto variou-se a rotação da haste consumível para, em seguida, variar-se a velocidade de deposição, mantendo constantes os valores da carga axial e rotação da haste. Assim como Liu (2008), estes autores também perceberam a formação da concavidade no centro da haste consumível (Figura 2.19 a), entretanto, propuseram que a formação dessa concavidade pode ter ocorrido por um fenômeno conhecido como vórtex, uma vez que não foi observado fusão no material da haste consumível. Essa proposta foi sugerida devido à forma espiral no fim de cada revestimento, conforme verifica-se na Figura 2.19(b).

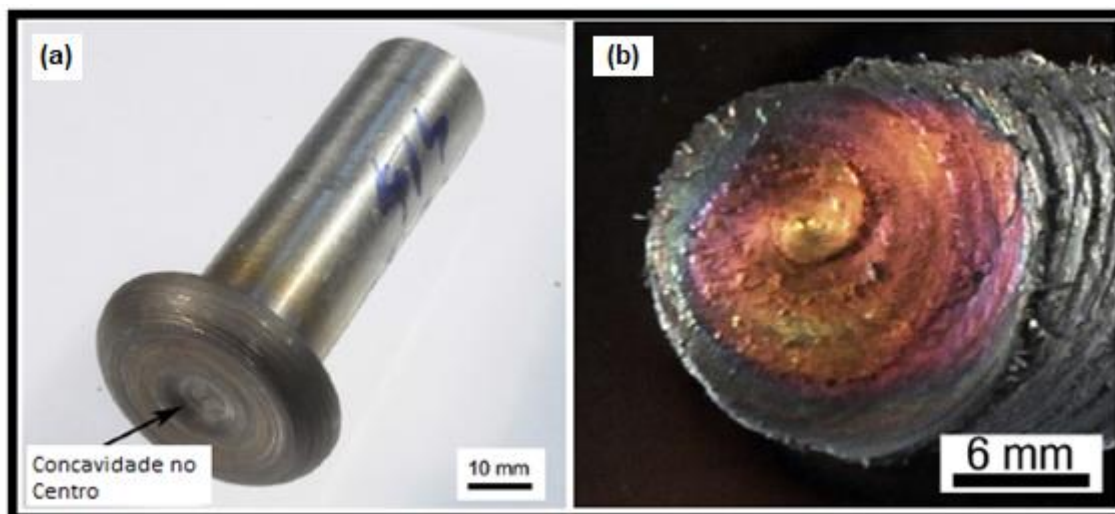


Figura 2.19 – (a) Haste consumível após revestimento apresentando concavidade ao centro; (b) final do depósito apresentando uma forma espiral (direita).

Fonte: adaptado de Rafi et al. (2010, p. 241).

Posteriormente, Rafi *et al.* (2011c) apresentaram um estudo da evolução da microestrutura do revestimento de aço ferramenta AISI H13 sobre aço baixo carbono. O estudo revelou um revestimento sem defeitos e com ligação metalúrgica sólida entre o revestimento e o substrato. Além disso, observou-se o intertravamento mecânico em uma escala muito pequena entre o revestimento e o substrato. Notou-se ainda um acréscimo na dureza no revestimento quando comparada com a haste no estado recozido antes de ser depositada. Os autores julgaram que os parâmetros utilizados foram adequados ao revestimento para o aço ferramenta AISI H13, além de sugerirem a realização de tratamentos térmicos após o revestimento para melhoria das propriedades mecânicas e microestruturas dos conjugados.

Gandra *et al.* (2013) realizaram um estudo da caracterização do desgaste em revestimentos de compósito de Al-SiC. Os autores utilizaram como substrato chapas da liga de alumínio AA2024-T3. Os revestimentos foram produzidos a partir da deposição por atrito de uma haste consumível com diâmetro de 20 mm de alumínio AA6082-T6, na qual partículas de reforços de SiC com tamanho médio de 12,3 – 37,4 e 118,8 μm foram inseridas através de furos de 2 mm. Foram realizados testes variando a quantidade de furos realizados na haste consumível para avaliar a influência da concentração do reforço. Foram também realizados revestimentos sem a presença de partículas de SiC. Um esquema das hastes consumíveis contendo a posição, número de furos assim como a dimensão dos reforços de SiC pode ser visto na Figura 2.20.

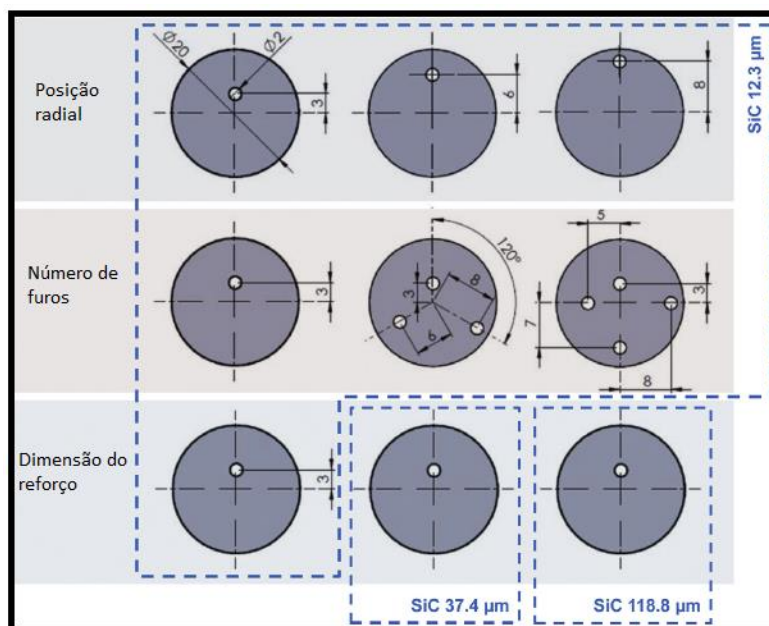


Figura 2.20 – Esquema da seção transversal hastes consumíveis com a posição e número de furos realizados para inserção das partículas de SiC, assim como as dimensões das partículas.

Fonte: adaptado de Gandra et al. (2013, p.375).

Os revestimentos foram realizados em multicamadas variando para cada camada ora a concentração de reforços, ora a dimensão das partículas, conforme pode ser verificado no esquema da Figura 2.21.

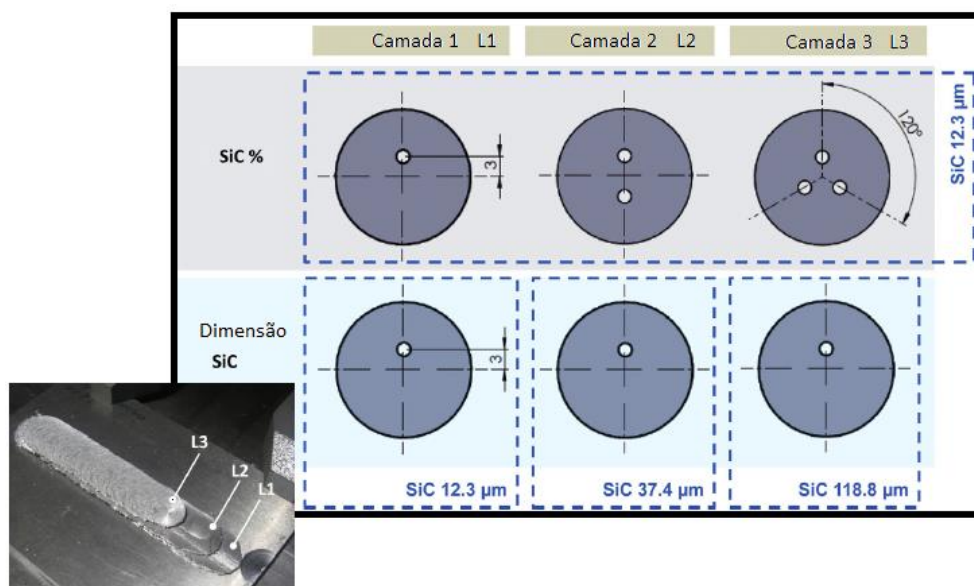


Figura 2.21 – Esquema da seção transversal das hastes consumíveis para deposição em multicamadas e em detalhe revestimento realizado.

Fonte: adaptado de Gandra et al. (2013, p.375).

Os autores observaram que as partículas menores de SiC (12,3 μm) foram mais facilmente incorporadas à matriz durante a deposição e o uso de reforço permitiu aumentar a dureza da superfície do revestimento em 30%, enquanto a taxa de desgaste foi reduzida em 13%. Notou-se ainda que o desgaste do revestimento ocorreu por delaminação, com base na combinação de mecanismos abrasivos e adesivos. Uma evidência de o desgaste abrasivo ocorrer por três corpos foi encontrada nos revestimentos reforçados devido ao desprendimento de partículas de SiC.

Gandra *et al.* (2014) continuaram estudando o comportamento tribológico de revestimentos realizados por FSS. Os autores avaliaram o revestimento do substrato de aço baixo carbono utilizando como haste consumível os seguintes aços: AISI 1024, AISI 1045 e AISI H13. O objetivo foi determinar a combinação de materiais mais resistente ao desgaste obtida a partir do processo FSS. Ensaaios mecânicos de pino sobre disco e microdureza, bem como análise por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura foram utilizados para auxiliar na definição do melhor par tribológico dentre os materiais testados. Os autores verificaram que a menor taxa de desgaste foi obtida para o aço AISI 1024, enquanto a maior foi para o aço AISI 1045 devido ao desprendimento de partículas de óxido, o que induziu desgaste abrasivo a três corpos. Verificou-se que os aços AISI 1024 e AISI 1045 apresentaram coeficientes de atrito semelhantes (0,40 e 0,42, respectivamente) e inferiores ao aço AISI H13 (0,57), devido à maior dureza deste (736 HV₁). Quanto aos mecanismos de desgaste, foi sugerido que os desgastes oxidativo e por fratura frágil foram predominantes para todos os materiais. O aço AISI 1045 também apresentou desgaste adesivo e abrasivo por três corpos, enquanto o aço AISI H13 mostrou evidências de desgaste adesivo, abrasivo e delaminação. Na Figura 2.22 podem ser observadas as pistas de desgaste onde foram percebidos os mecanismos de desgaste.

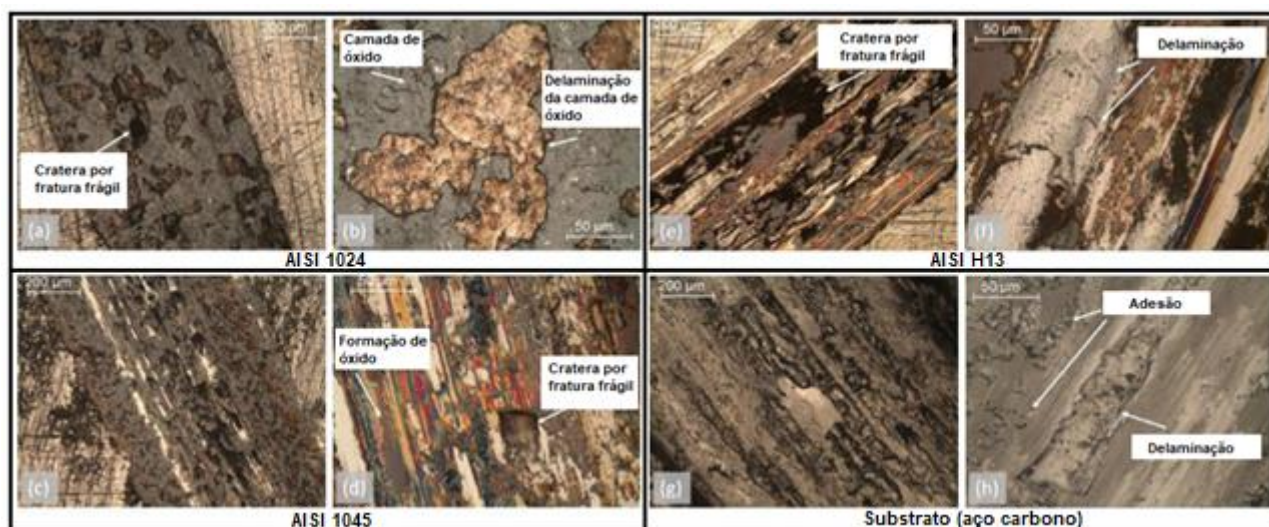


Figura 2.22 - Pistas de desgastes do ensaio pino sobre disco dos revestimentos
 Fonte: adaptado de Gandra et al. (2014, p.2865).

Hanke e Santos (2017) realizaram um estudo comparativo da deformação plástica severa sob temperaturas elevadas de duas ligas de alumínio durante o processo FSS. Foram utilizadas como haste consumível as ligas AA5083 e AA6082 e como substrato a liga AA2024. Mantiveram-se constante os parâmetros de deposição e foram comparadas a força axial, temperatura de processamento, microestrutura dos depósitos, além da eficiência do processo. Foi observada a ocorrência do fenômeno da recristalização dinâmica, no qual ocorre um equilíbrio entre endurecimento do revestimento pela ação da deformação plástica imposta pela carga inicial e deslocamento da haste consumível sobre o substrato e uma instantânea recuperação/recristalização em função da alta temperatura do processo. Verificou-se que a liga AA6082 atinge a região de plastificação mais rapidamente e com menos energia, gerando revestimentos com maiores espessuras e larguras, o que caracteriza uma melhor eficiência em comparação com a liga AA5083. Os autores sugerem que os mecanismos de recristalização dinâmica ou cinética são afetados pelas diferenças na composição química das duas ligas e podem contribuir para o processo. Além disso, as microestruturas de ambas as ligas após FSS se apresentaram semelhantes, com tendência de menor tamanho médio de grão e maior variação nas desorientações dos contornos de grãos na liga AA5083, conforme verifica-se na Figura 2.23. Tal fenômeno é explicado pelos autores em função de um percentual maior de Mg na liga que pode levar a uma mudança do equilíbrio da liga no estado estacionário. Tal situação exige uma menor velocidade de processamento para a liga AA5083 quando comparada a liga AA6082 uma vez que esta pode sofrer cisalhamento mais localizado devido à sua alta taxa de amaciamento térmico

e perda adicional de resistência por dissolução de Mg_2Si com o aumento da temperatura. Isso pode contribuir para uma maior eficiência de deposição de AA 6082 pelo processo de FSS.

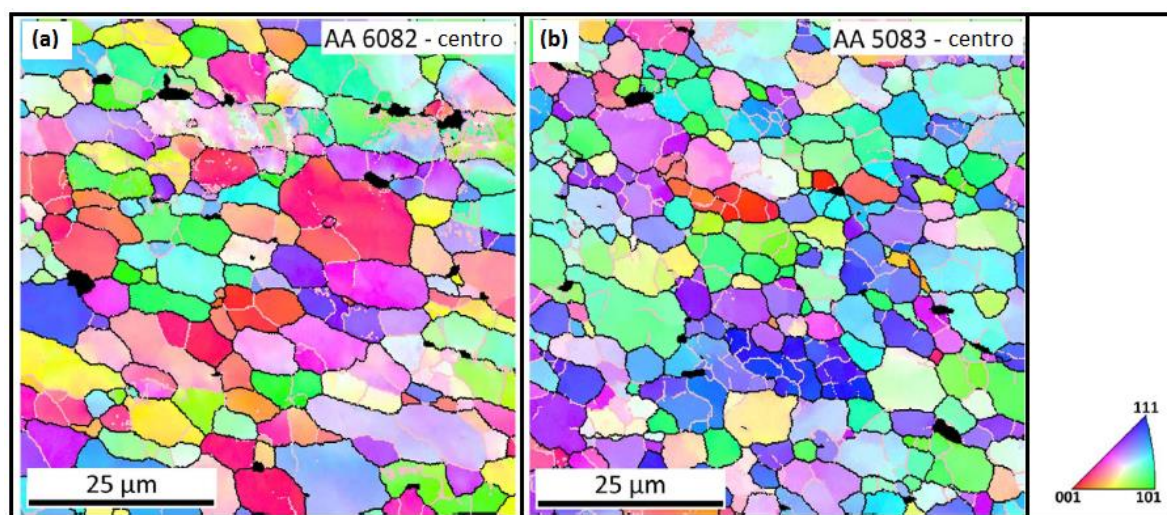


Figura 2.23 – Figura de Polo Inverso no centro das ligas: (a) AA6082 e (b) AA5083.
Fonte: adaptado de Hanke et al. (2017, p.264 e 265).

2.3 Mecanismos de Adesão

Segundo Hutchings (1992), quando duas superfícies sólidas são colocadas em contato podem aparecer forças interativas entre os átomos das superfícies adjacentes, gerando adesão ou ligação através da interface. A força dessa ligação será mais forte quanto maior for a afinidade entre os materiais em contato.

Buckley (1981) observou que na junção de dois materiais metálicos dissimilares a ligação da interface é mais forte que a ligações coesivas do material que apresenta ligações mais fracas. A diferença entre adesão e coesão deve ser esclarecida, uma vez que a coesão representa as forças de ligação atômica associadas a um material de maneira isolada, isto é, a coesão representa as forças que ligam um átomo a outro ou uma molécula a outra. A adesão por sua vez pode ser caracterizada quando há o contato entre dois materiais sólidos, similares ou dissimilares, gerando uma interface de ligação.

De maneira geral, quanto mais limpas as superfícies de contato estiverem, isentas de resíduos químicos, por exemplo, maior será a força de adesão entre os materiais em questão, uma vez que contaminantes tais como óxidos, fluidos lubrificantes, entre outros, enfraquecem a ligação por adesão. Entretanto, em algumas aplicações da engenharia, como na usinagem, por exemplo, a adesão pode ser considerada indesejada, pois pode resultar em desgaste acelerado na ferramenta de corte.

Modenesi *et al.* (2000) indicam que por mais que uma superfície metálica se apresente visualmente limpa, sempre haverá a presença de filme de óxido, gases adsorvidos, compostos orgânicos, entre outras substâncias. A Figura 2.24 ilustra essa situação. Dessa forma, para que haja uma boa adesão ou ligação entre dois metais, a primeira ação a ser realizada deve ser a retirada da camada de óxido e outros contaminantes.

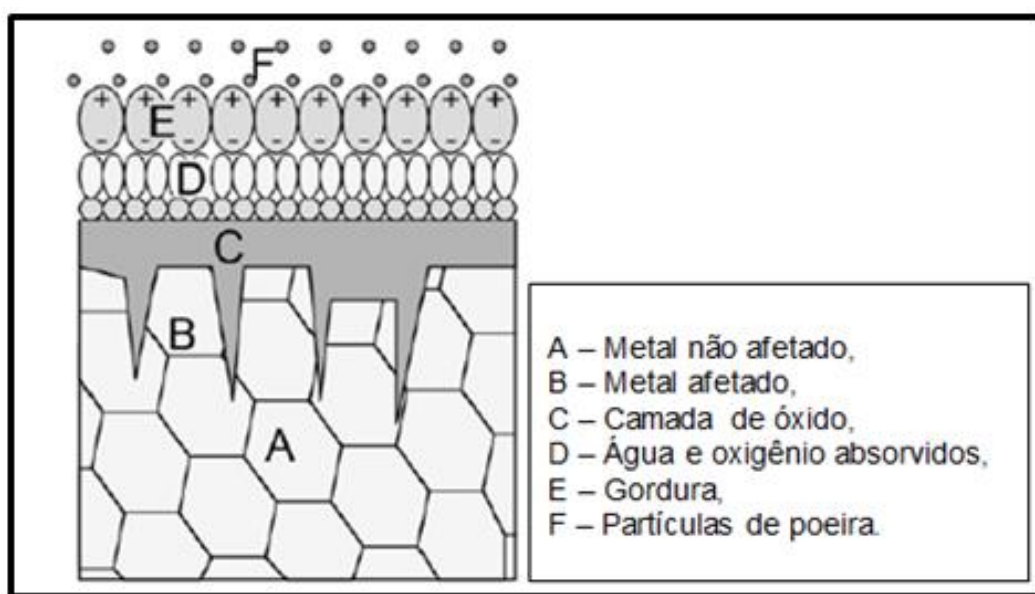


Figura 2.24 – Representação esquemática de uma superfície metálica em contato com o ar
 Fonte: adaptado de Olshansky e Nikolaev (1977, p.15)

Outro fator que pode dificultar a ligação atômica de materiais metálicos, segundo Lebedev *et al.* (1992), é a rugosidade, uma vez que por mais polida que seja a superfície sempre haverá a presença de picos e vales nas superfícies de contato. Quando duas superfícies são aproximadas, o contato inicial será apenas entre os pares de picos existentes entre elas e assim a superfície real de contato será muito pequena e a força de ligação muito baixa. Entretanto, quando há ação de uma força normal (N) externa atuante entre os materiais, a região de contato se deforma plasticamente, aumentando a área real de contato (A_R) até que em um determinado momento a área real será igual à área aparente (A), conforme

pode ser observado na Figura 2.25. Segundo Machado *et al.* (2009), a força normal necessária para que a A_R seja igual a A é definida como “força normal limite” e nesta condição a lei do atrito de Coulomb não é válida, uma vez que não há mais uma proporcionalidade entre as forças normal (N) e cisalhante (F_c).

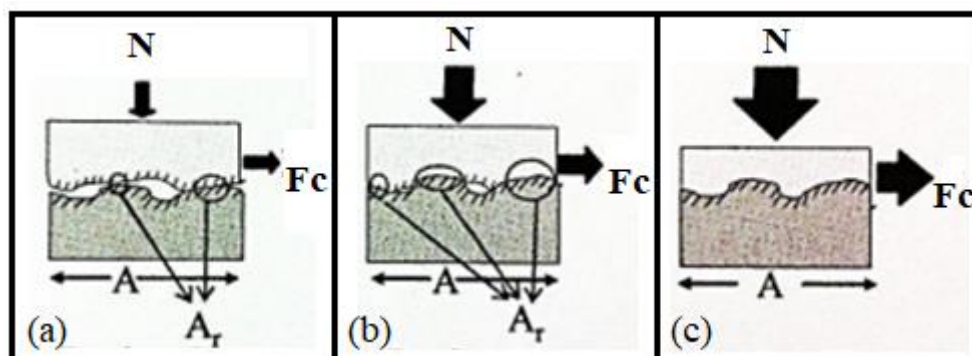


Figura 2.25 – Representação da área real de contato em função da carga normal: (a) $A_R \ll A$; (b) $A_R < A$; (c) $A_R = A$; Fonte: adaptado de Shaw (2005, p. 214)

A adesão é influenciada pelo par de materiais e condições da interface, tais como: estrutura e orientação cristalina, solubilidade de um material em outro, afinidade química, limpeza da superfície, carga normal, temperatura, duração do contato (tempo de permanência). Segundo Weiss (1995), os mecanismos de adesão podem ser divididos em três grandes grupos: ancoramento mecânico, ligações químicas e ligações físicas. O ancoramento mecânico pode ser subdividido em ancoramento por atrito, aumento da área de contato ou ancoramento por engate, enquanto as interações químicas podem se apresentar como ligações iônicas, ligações covalentes e ligações metálicas. As ligações físicas podem ser ligações de Van der Waals e ligações de hidrogênio como resultado de forças intermoleculares (forças secundárias de atração). Em comparação com as ligações químicas, as ligações de Van der Waals e por pontes de hidrogênio são muito mais fracas por não haver o compartilhamento de elétrons entre os materiais. Weiss (1995) representou os mecanismos de adesão, no diagrama na Figura 2.26.

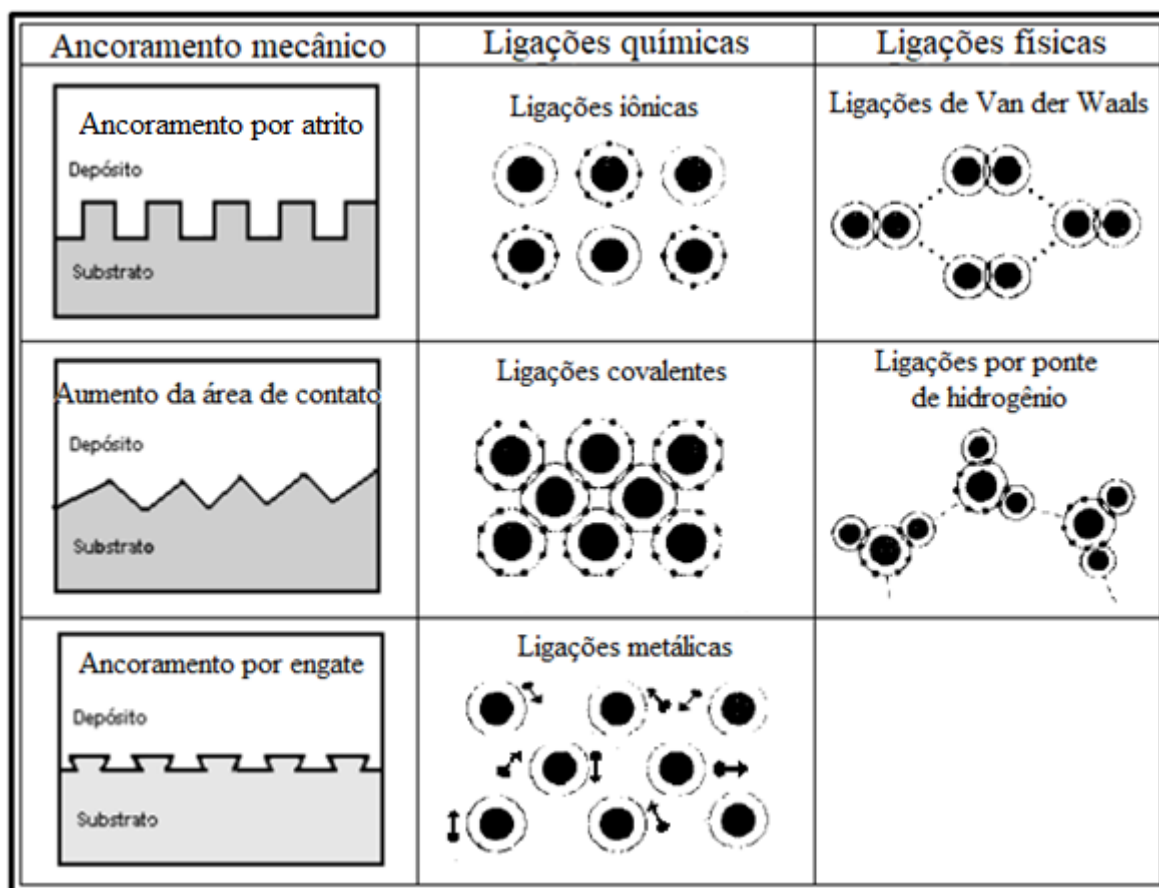


Figura 2.26 – Representação esquemática dos mecanismos de adesão
 Fonte: adaptado de Weiss (1995, p. 202)

Para qualquer seleção dos parâmetros de deposição ocorrerá no mínimo um dos três mecanismos de adesão entre o substrato e revestimento de forma individual ou em conjunto, com um deles sendo predominante.

Segundo Weiss (1995), o mecanismo de ancoramento mecânico está intimamente relacionado com a geometria das superfícies e sítios de travamento, sendo a rugosidade um ponto a ser ressaltado, uma vez que o ancoramento irá ocorrer em regiões de picos e vales presentes nas superfícies.

Ohring (1992) observou que a adesão é influenciada por uma série de eventos, tais como morfologia do substrato, interações químicas, taxas de difusão, processos de nucleação e classificou as interfaces de adesão em quatro grupos: interface abrupta, interface composta, interface difusa e interface de ancoragem mecânica (Figura 2.27).

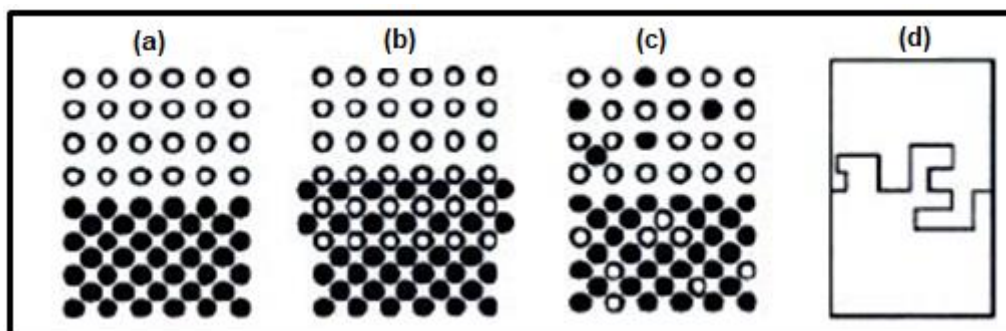


Figura 2.27 – Mecanismos de adesão propostos por Ohring (1992): (a) interface abrupta, (b) interface composta, (c) interface difusa e (d) interface de ancoragem mecânica.
Fonte: adaptado de Ohring (1992, p.441)

Na interface abrupta (Figura 2.27 a), uma mudança repentina do revestimento para o substrato a uma distância da ordem do espaçamento atômico (0,1 a 0,5 nm) é recorrente. Nesse tipo de interface as mudanças das propriedades dos materiais ocorrem devido à falta de interação entre os átomos do revestimento e do substrato, além de apresentar baixa taxa de interdifusão. A adesão tende a ser baixa, entretanto, o aumento da rugosidade do substrato tende a promover uma melhor adesão.

A interface composta (Figura 2.27b) é caracterizada por uma estrutura multicamada, criadas por reação química e/ou difusão entre átomos do revestimento e substrato. Os compostos formados são frequentemente frágeis por causa de altas tensões residuais geradas por mudanças volumétricas em função da reação. A adesão geralmente é boa se a camada interfacial for fina, mas é ruim caso seja formada camadas mais espessas.

A característica da interface difusa (Figura 2.27c) se dá por uma mudança gradual na composição entre revestimento e substrato em função da interdifusão dos materiais envolvidos no processo. A solubilidade mútua do revestimento e do substrato minimiza a formação de compostos interfaciais e obtém-se de forma geral, uma boa adesão.

Na interface por ancoragem mecânica (Figura 2.27d), a adesão se dá pela presença da rugosidade ou reentrâncias da interface entre o revestimento e o substrato. A força de adesão depende principalmente das propriedades mecânicas dos materiais e da geometria da interface, ou seja, a adesão está associada predominantemente a forças mecânicas e não químicas ou físicas, sendo uma interface com superfícies rugosas com maior probabilidade de uma boa adesão.

Batchelor *et al.* (1996) realizaram testes para revestir aço baixo carbono com aço inoxidável, alumínio e latão em condições normais e em uma atmosfera de nitrogênio. Em função do baixo calor gerado pelo atrito tanto do alumínio quanto do latão com o substrato de aço baixo carbono, não houve sucesso na tentativa do revestimento nas duas condições supracitadas, possivelmente devido à alta condutividade térmica dos materiais em questão ou pela baixa quantidade de calor gerado. Entretanto, observou-se que o aço inoxidável apresentou uma força de adesão adequada ao substrato. Batchelor *et al.* (1996) observaram ainda a possibilidade de se realizar o revestimento em multicamadas, o que foi bem sucedido com ao menos três camadas apresentando boa força de adesão.

Rafi *et al.* (2010) avaliaram a força de adesão do aço AISI H13 depositado sobre aço baixo carbono. Os autores investigaram a influência da rotação da haste consumível em resposta da adesão e notaram que as interfaces localizadas ao centro da seção transversal do revestimento se apresentaram livre de descontinuidades físicas, conforme se verifica na Figura 2.28, entretanto, notaram-se alterações nas microestruturas dos conjugados.

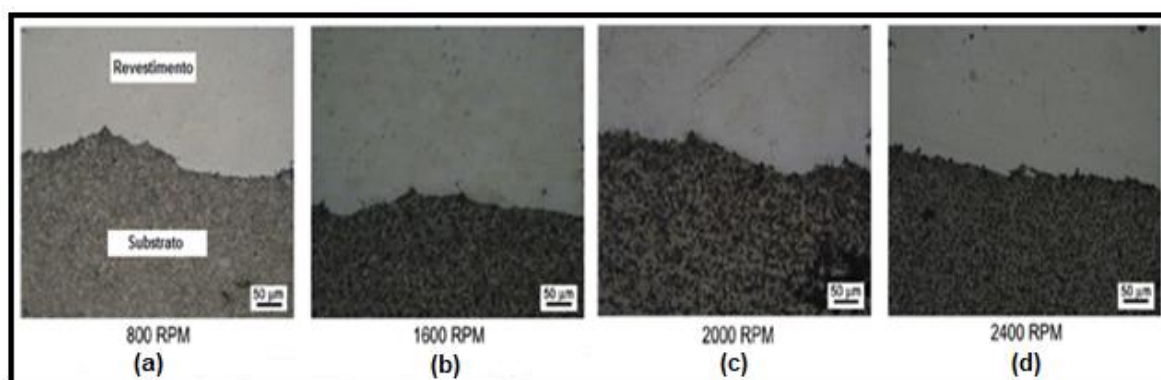


Figura 2.28 – Interface de adesão do revestimento de aço AISI H13 sobre aço baixo carbono realizados sob diferentes rotações da haste: (a) 800 rpm, (b) 1600 rpm, (c) 2000 rpm e (d) 2400 rpm.
Fonte: adaptado de Rafi *et al.* (2010, p.236)

Alterando a velocidade de deposição durante o revestimento, houve uma variação nos mecanismos de adesão, isto é, para velocidades de deposição mais altas o aspecto da interface se apresenta de forma irregular, revelando que além de ligações metalúrgicas pode ser observado um efeito de ancoragem mecânica. Para velocidades de deposição mais baixas, entretanto, notaram-se algumas regiões de descontinuidades na interface. Na Figura 2.29 podem ser observadas as regiões de interface

quando alterada a velocidade de deposição. As regiões de ancoragem mecânica são apresentadas em maiores ampliações na Figura 2.30

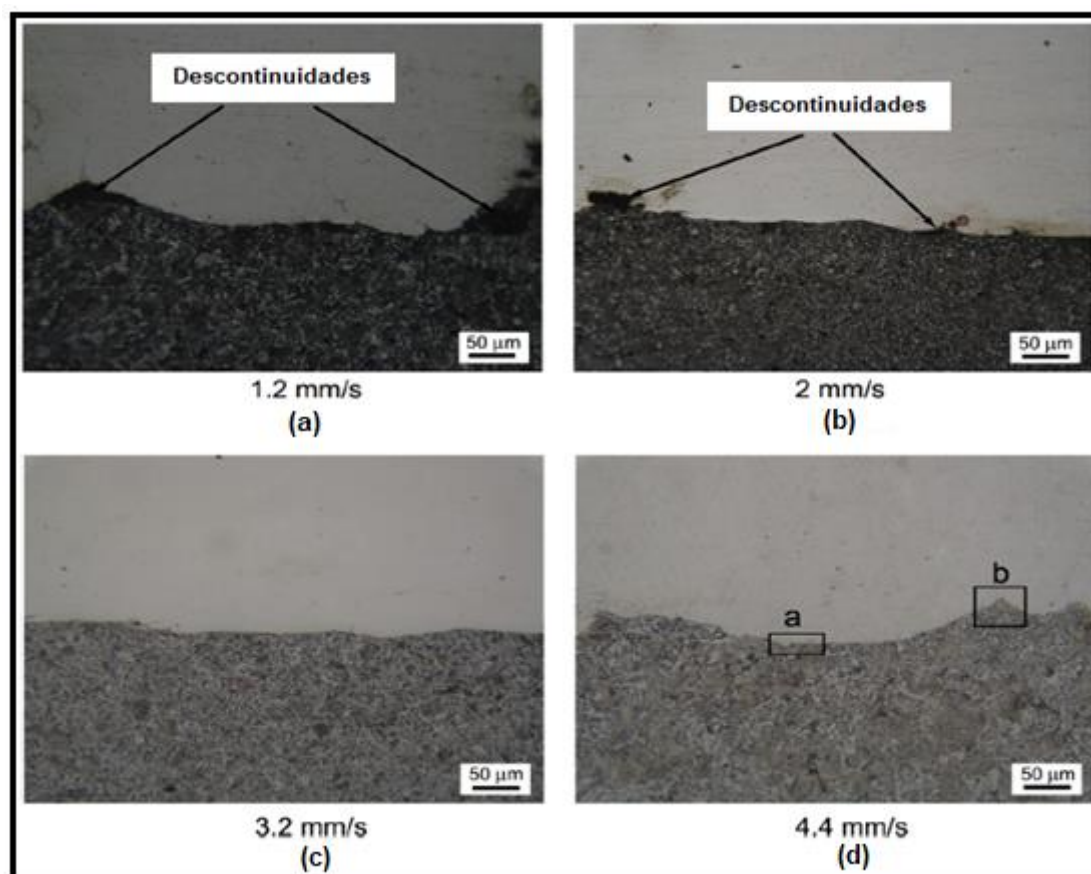


Figura 2.29 - Interface de adesão do revestimento de aço AISI H13 sobre aço baixo carbono realizados em diferentes velocidades de deposição: (a) 800 rpm, (b) 1600 rpm, (c) 2000 rpm e (d) 2400 rpm.
Fonte: adaptado de Rafi *et al.* (2010, p.237)

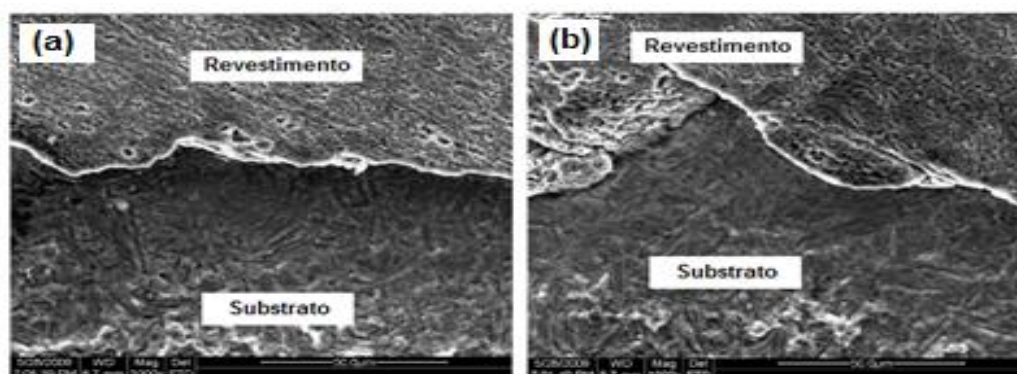


Figura 2.30 – Detalhe da interface do revestimento para velocidade de deposição de 4,4 mm/s evidenciando regiões de ancoramento mecânico: (a) região de vale do revestimento e (b) região de pico do revestimento.
Fonte: adaptado de Rafi *et al.* (2010, p.238)

Ainda referente ao trabalho de Rafi *et al.* (2010), ensaios de dobramento foram realizados e notou-se que os revestimentos de aço AISI H13 apresentaram fissuras quando atingiram um ângulo próximo de 10° . Aumentando o ângulo de dobramento para valores superiores a 90° houve o desenvolvimento de novas trincas, mas sem desprendimento dos revestimentos por delaminação. Adicionalmente, os autores notaram que as trincas inicialmente nucleadas no revestimento se propagaram para o substrato, conforme mostra a Figura 2.31(a), indicando a continuidade das propriedades metalúrgicas semelhante ao que ocorre em processos de união por fusão. Os ensaios de dobramento revelaram melhores resultados para amostras que foram revestidas com maiores valores de rotação da haste consumível, com os revestimentos apresentando trincas paralelas sem, entretanto, qualquer sinal de deslocamento ou elevação do revestimento, conforme pode ser verificado na Figura 2.31(b).

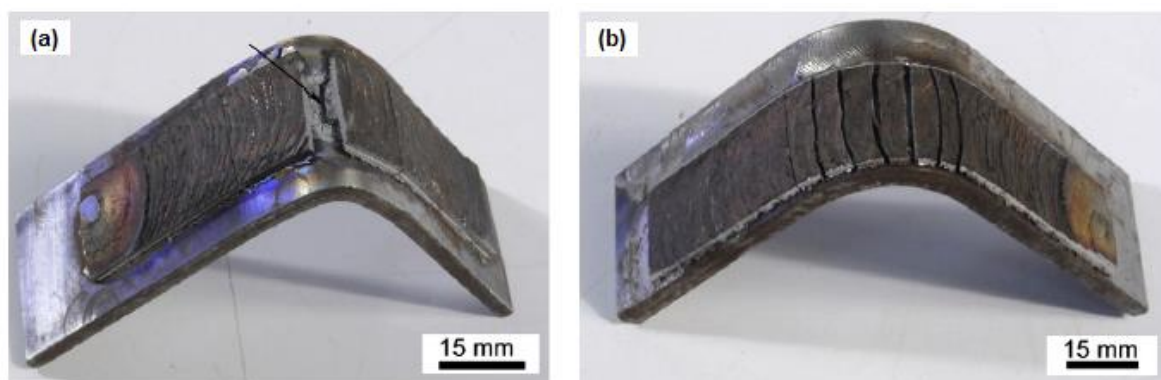


Figura 2.31 – Corpos de prova após de ensaio de dobramento do aço AISI H13 sobre aço baixo carbono: (a) trinca propagada para a região do substrato e (b) trincas paralelas apenas no revestimento.
Fonte: adaptado de Rafi *et al.* (2010, p.239 e 240)

Vitanov *et al.* (2000) relacionaram os parâmetros de entrada (força axial, rotação da haste consumível e velocidade de deposição) com as variáveis de resposta força de adesão, espessura e largura do revestimento. Verificou-se que ao aumentar a força axial, tem-se um acréscimo na força de adesão, ao passo que a espessura do revestimento por sua vez, tende a diminuir. Notou-se ainda que condições extremas de espessura dos revestimentos (muito finas e muito espessas) apresentaram baixa força de adesão. Por fim o comportamento da velocidade de deposição foi inversamente proporcional à espessura do revestimento. Com o estudo apresentado por Vitanov *et al.* (2000), percebeu-se que os efeitos dos parâmetros de entrada foi bem sucedido no que diz respeito à resposta da morfologia do revestimento, entretanto, para a variável força de adesão não se obteve o mesmo êxito.

Tokisue *et al.* (2006) realizaram um estudo sobre o FSS usando ligas dissimilares de alumínio (5052-P34 como substrato e 2017 BE-T4 como haste consumível). Foram realizados experimentos com revestimentos convencionais ou de apenas uma camada e multicamadas, onde a primeira camada de revestimento foi sobreposta por completo ou parcialmente por outra subsequente. As distâncias da primeira para a segunda camada (Figuras 2.32 e 2.33) foram 0; 5; 10; e 15 mm a partir do centro da haste consumível. Para o depósito da segunda camada foram consideradas as direções de avanço e de recuo da haste consumível.

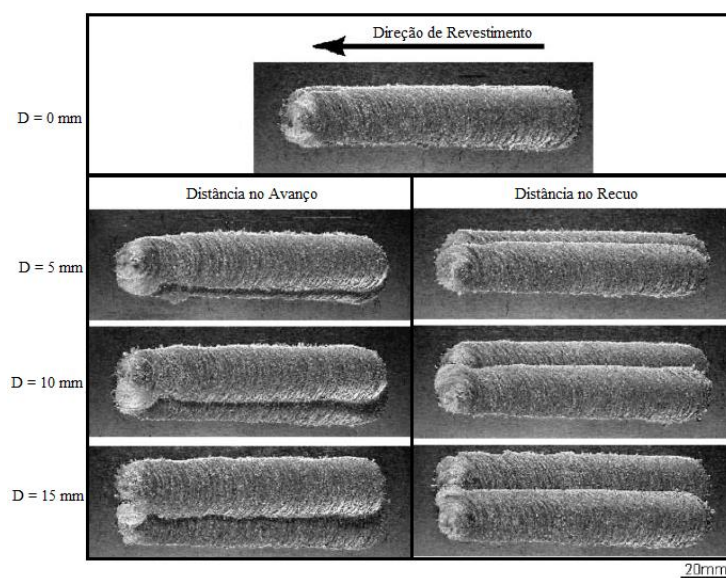


Figura 2.32 – Macrografias (vista de topo) de revestimentos multicamadas por FSS.
Fonte: adaptado de Tokisue et al. (2006, p.876).

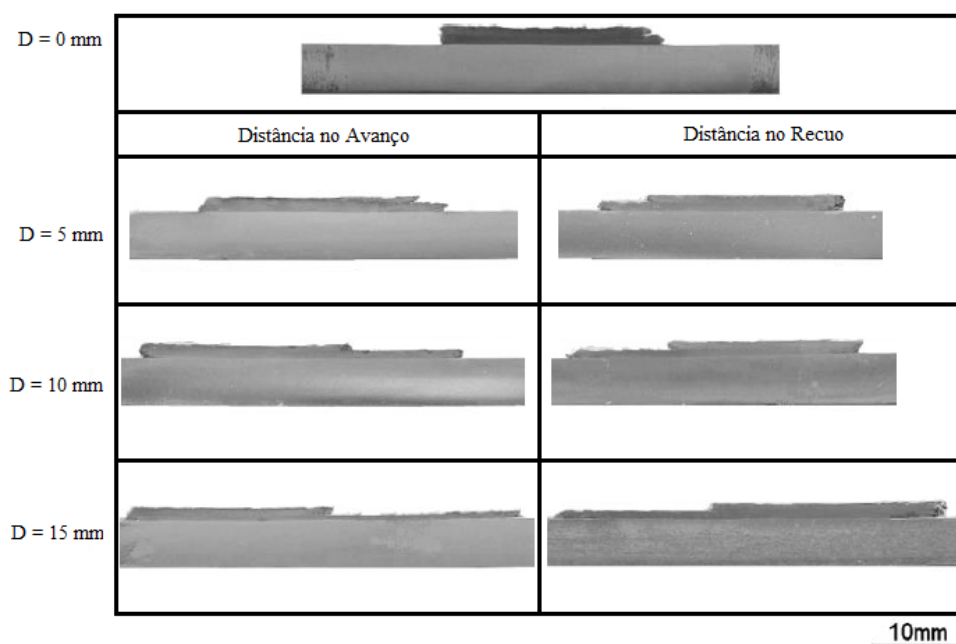


Figura 2.33 – Macrografias (seção transversal) de revestimentos multicadas por FSS.
 Fonte: adaptado de Tokisue et al. (2006, p. 879).

Tokisue *et al.* (2006) observaram a existência de um padrão circular na superfície dos depósitos em função da rotação da haste consumível, cujo intervalo tornou-se mais estreito com o aumento da rotação. Assim como outros autores (Vitanov e Voutchkov 2005, Gandra *et al.* 2014) Tokisue *et al.* (2006) observaram a presença de uma região onde não há completa adesão do revestimento monocamada ao substrato, localizada na borda do revestimento conhecido como zona de solda fria. Essa região é considerada um defeito inerente ao processo FSS e pode ser verificado à esquerda da Figura 2.34(a). À direita da Figura 2.34(b) verifica-se a região ao centro do revestimento onde não há a presença da solda fria, apresentando uma adesão sem defeitos aparentes. Tokisue et al. (2006) sugerem que a realização do revestimento em multicamadas melhora consideravelmente a adesão do revestimento da camada anterior, inclusive nas bordas, tendendo a eliminar a região de solda fria.

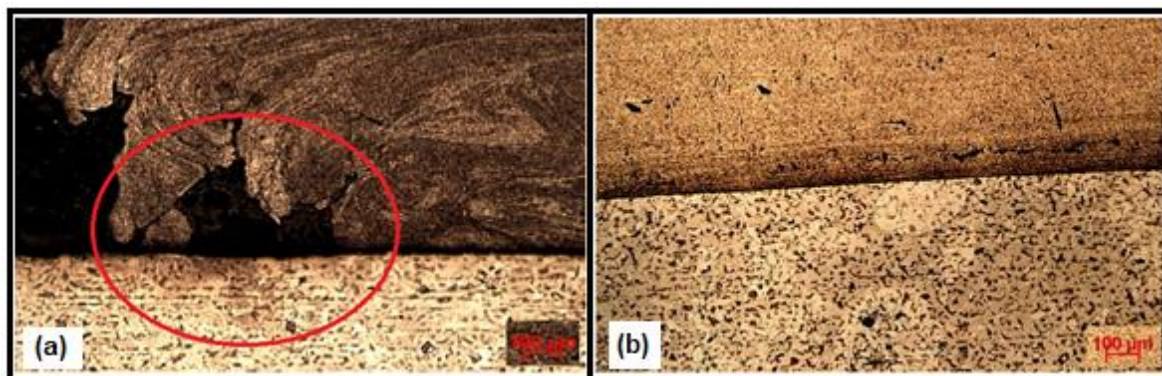


Figura 2.34 - Revestimento de alumínio em aço carbono: (a) região próxima à borda do revestimento evidenciando a solda fria; (b) região próxima ao centro do revestimento.
Fonte: elaborado pelo autor.

2.4 Considerações parciais

O revestimento por atrito (*friction stir surfacing* – FSS) é um processo versátil, que ocorre no estado sólido e com isso pode ser aplicado a uma vasta gama de materiais similares e dissimilares. Por esse motivo o FSS supera vários outros processos de deposição com os quais seria impossível revestir certos tipos de materiais. Entretanto, a aplicação do processo FSS é limitada a pequenos reparos e a recobrimentos em baixa escala, não sendo um processo indicado para revestir grandes áreas, devido à necessidade de se interromper o processo periodicamente para a substituição da haste consumível.

Em sua maioria, os processos de revestimento ocorrem a partir da fusão dos materiais envolvidos, o que pode alterar as propriedades mecânicas do composto. Dentre as técnicas de revestimento, a tecnologia de revestimento por atrito apresenta algumas vantagens:

- o processo é realizado no estado sólido;
- pode ser aplicado a um amplo espectro de materiais, sendo possível realizar o revestimento em pares de materiais similares e dissimilares;
- por ação de uma combinação de parâmetros de deposição, entre os quais: carga axial, rotação da haste consumível, velocidade de deposição, obtém-se uma microestrutura de revestimento refinada com boas propriedades mecânicas;
- defeitos comuns a processos de revestimento por fusão (tais como segregação, porosidades, escória vítrea, adsorção de hidrogênio) não ocorrem, uma vez que o processo por atrito acontece no estado sólido;

- é considerado um processo versátil para recuperações pontuais;
- é considerado um processo limpo e seguro, uma vez que não há emissões de gases tóxicos ou fumos metálicos;
- é energeticamente eficiente uma vez que o calor é gerado de maneira pontual;
- há menor influência da temperatura, formando uma estreita camada afetada termicamente, quando comparado a processos de revestimento por fusão;
- o processo pode ser realizado em máquinas ferramentas, tais como fresadoras ou centro de usinagem, o que torna o processo mais barato e acessível;
- o processo apresenta uma boa repetitividade.

Embora o processo possua uma série de vantagens, sua aplicação industrial encontra grandes desafios, os quais contribuem para uma aplicação limitada. Estas limitações podem ser consideradas desvantagens, dentre as quais podem ser citadas:

- o comprimento de deposição é limitado pelo curso de máquina e ferramental utilizados;
- o tempo de preparo de máquina é longo;
- presença de uma pequena região nas bordas do revestimento sem a completa adesão ao substrato;
- o controle e ajuste de parâmetros de revestimento deve ser realizado a cada novo par de materiais selecionado;

De maneira geral, é um processo indicado para se trabalhar em manutenções pontuais ou quando não é possível utilizar uma técnica de revestimento por fusão como, por exemplo, união de alumínio com aço carbono.

Outro ponto a ser observado é a definição de parâmetros de deposição e sua influência. Sabe-se que a velocidade de rotação da haste consumível, velocidade de deposição, força axial e diâmetro da haste consumível são parâmetros de controle que irão definir a qualidade da deposição. Vários estudos

demonstram a influência desses parâmetros sobre as dimensões (largura e espessura) do revestimento, adesão entre o revestimento e substrato, formação de *flash*, eficiência de deposição e danos térmicos.

A Tabela 2.1 resume os efeitos dos parâmetros de entrada (força axial, velocidade de rotação, velocidade de deposição e diâmetro da haste consumível) sobre as principais respostas (espessura, largura, adesão, ZTA, formação do *flash* e eficiência) e que podem ser consideradas consolidadas ao se analisar os resultados das principais pesquisas atreladas ao processo de FSS. Ao analisar a Tabela 2.1 verifica-se, por exemplo, que com o aumento da força axial tem-se um ganho na largura do revestimento e na adesão do conjugado. Entretanto, nota-se um aumento da ZTA e da formação do *flash* além de uma redução da espessura do revestimento e uma perda na eficiência do processo.

TABELA 2.1
Resumo das influências dos parâmetros de entrada nas repostas no processo FSS

Respostas	Força axial ↑	Rotação da haste consumível ↑	Velocidade de deposição ↑	Diâmetro da haste consumível ↑
Espessura	↓	Pouca influência ↘	↓	Pouca influência ↗
Largura	↑	↓	Pouca influência ↘	↑
Adesão	↑	↑	↓	—
ZTA	↑	↓	↓	↑
Flash	↑	↑	↓	—
Rendimento	↓	↓	↑	—

Fonte: elaborada pelo autor

Todavia, sabe-se que os valores dos parâmetros de entrada devem ser avaliados e selecionados para cada par tribológico (material da haste consumível e substrato) de maneira particular e de forma empírica.

De fato, pode-se afirmar que o processo FSS traz um ganho de propriedades mecânicas e metalúrgicas ao conjugado. Além do refino de grão na região de interface do revestimento/substrato, em alguns materiais, por exemplo, os aços, ocorrem mudanças de fase em função da alta taxa de resfriamento aliada à alta temperatura alcançada durante o processo o que eleva a dureza, resistência ao desgaste, resistência à tração. Estas propriedades elevam a aplicabilidade do revestimento, o que aumenta o interesse das comunidades acadêmicas e industrial em desenvolver este processo.

Verificou-se ainda a ausência de trabalhos referente ao tema principal dessa tese, a influência da rugosidade do substrato sobre o processo de revestimento por atrito, e inconclusões de resultados a respeito da tensão residual imposta no processo FSS indicando uma necessidade de pesquisas voltadas para estes fins. Sendo, portanto, justificado o empenho para o desenvolvimento deste trabalho, visando contribuir de maneira inovadora para o meio científico e acadêmico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

A preparação dos corpos de prova, a deposição dos revestimentos e parte dos experimentos foram realizados nos laboratórios de engenharia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), campi Coração Eucarístico e Contagem, à exceção das análises químicas e análises das tensões residuais que foram realizadas no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN) e na Fiat Chrysler Automobiles (FCA), além dos ensaios de dobramento que foram realizados no laboratório de materiais de construção mecânica e metrologia no Centro Universitário Newton Paiva, campus Buritis e os ensaios de pino sobre disco (PSD) realizados no laboratório de tribologia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Encontra-se na Figura 3.1 um fluxograma com a apresentação da estrutura organizacional dos procedimentos experimentais realizados no presente trabalho. Nas próximas páginas será detalhada cada etapa apresentada no fluxograma.

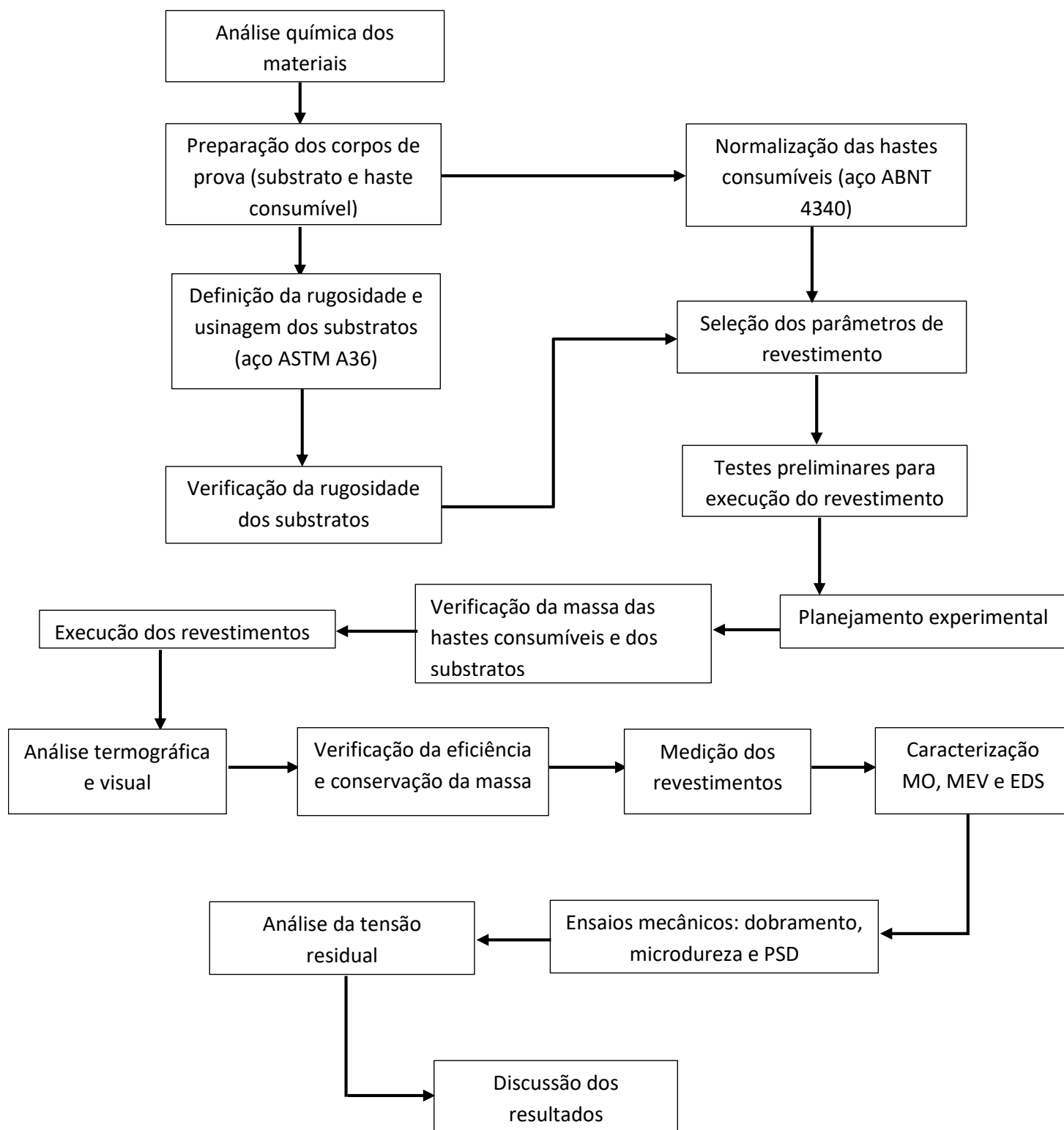


Figura 3.1 – Fluxograma dos procedimentos experimentais
 Fonte: dados do autor

3.1 Definição e seleção dos materiais

Os materiais selecionados para o presente estudo foram os aços ASTM A36 e ABNT 4340 para substrato e haste consumível, respectivamente. A seleção dos referidos materiais se deu em função de suas propriedades mecânicas e aplicação industrial. A Tabela 3.1 apresenta as principais propriedades mecânicas dos aços em questão.

TABELA 3.1
Propriedades mecânicas típicas dos aços ASTM A36 e ABNT 4340

Material	Temperatura austenitização (°C)	Tensão máxima (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza máxima (HB)
ASTM A36 (normalizado)	870	550	250	23	150
ABNT 4340 (normalizado)	870	1280	860	12,2	363

Fonte: adaptado de Gerdau (2016)

3.2 Análises químicas dos materiais

As análises de composição química dos materiais ASTM A36 e ABNT 4340 foram obtidas por meio da técnica de espectrometria de emissão ótica no equipamento SpectromaXX – Ametek.

3.3 Preparações dos substratos e hastes consumíveis

Os corpos de prova para a realização dos revestimentos foram preparados nas dimensões indicadas na Figura 3.2.

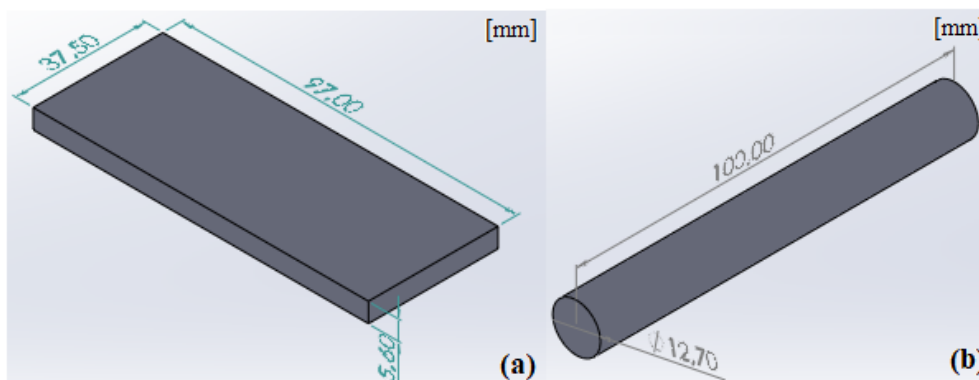


Figura 3.2 (a) Substrato de aço ASTM A36 antes do processo de deposição; (b) haste consumível de aço ABNT 4340 antes do processo de deposição

Fonte: dados do autor

Inicialmente foram cortados corpos de prova de uma barra chata de aço ASTM A 36 com 37,50 mm de largura e 5,60 mm de espessura e comprimento de aproximadamente 97,00 mm para a preparação dos substratos. As amostras não sofreram qualquer tratamento térmico e foram submetidas à usinagem com ferramenta e parâmetros de corte controlados para garantir uma faixa de rugosidade nas superfícies onde seriam depositados os revestimentos. Foram definidos três níveis de rugosidades diferentes, separados em grupos e sendo escolhido o desvio médio quadrático (R_q) como parâmetro de controle. Os valores médios de R_q previamente definidos foram: 0,43 μm , 1,75 μm e 2,54 μm para os grupos A, B e C, respectivamente. Foram realizadas vinte e sete deposições cumprindo o planejamento fatorial completo 3^3 , sendo nove deposições para cada grupo de rugosidade do substrato.

A operação de fresamento frontal, realizada para garantir os valores de rugosidade, foi executada com uma fresa Kyocera KB-MOF 45063R-05-5T-M (ϕ 63 mm e 5 dentes) com insertos de metal duro revestido com nitreto de titânio alumínio Kyocera código OFMT050405ER-SH aplicados as classes ISO P10-P30 e M10-M30. Os parâmetros de corte utilizados para o fresamento dos substratos podem ser vistos na Tabela 3.2. A penetração de trabalho foi mantida constante e igual a largura das amostras (37,5 mm).

TABELA 3.2
Parâmetros de corte utilizado na preparação dos substratos

Grupo de rugosidade R_q (μm)	Velocidade de corte - v_c (m/min)	Avanço por dente - f_z (mm/rev)	Profundidade de usinagem - a_p (mm)
A (0,43)	594	0,013	0,1
B (1,75)	238	0,042	0,1
C (2,54)	178	0,078	0,1

Fonte: dados do autor

Os valores das rugosidades dos substratos foram verificados utilizando um rugosímetro Taylor Hobson Surtronic S128, com interface para o *software Mountains Technology*. Os valores de comprimento de amostragem seguiram a norma ISO 4288 (1996) conforme Tabela 3.3. Realizou-se o cálculo do erro sistemático do rugosímetro a partir da diferença entre a média de seis medições de um padrão de rugosidade e o seu valor verdadeiro convencional ($R_a = 6,00 \mu\text{m}$).

TABELA 3.3
Comprimentos de amostragem e de avaliação conforme o recomendado pela norma ISO 4288 (2008)

Faixa de R_a (μm)	Comprimento de amostragem – l_r (mm)	Comprimento de avaliação – l_n (mm)
Até 0,02	0,08	0,4
De 0,02 a 0,1	0,25	1,25
De 0,1 a 2	0,8	4
De 2 a 10	2,5	12,5
De 10 a 80	8	40

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015, p. 313)

As hastes consumíveis foram cortadas de uma barra de aço ABNT 4340 com 12,7 mm de diâmetro e 100,00 mm de comprimento. Após alguns testes preliminares de revestir o substrato, notou-se que as barras no estado como recebido não apresentavam um bom comportamento durante o processo.

Realizou-se o tratamento térmico de normalização em todas as hastes cortadas (austenitização a 870° C por uma hora e resfriamento ao ar). Após o tratamento térmico foi necessário retirar a camada de óxido em toda a extensão da haste por meio do uso de uma escova de aço rotativa.

Na região da face das hastes consumíveis, local de contato entre a haste e o substrato, realizou-se uma operação de faceamento, para garantir a completa retirada da camada de óxido proveniente do tratamento térmico e a perpendicularidade com o eixo de rotação da máquina.

3.4 Seleção dos parâmetros de revestimento

A seleção dos parâmetros de revestimentos foi realizada a partir dos trabalhos de Vitanov *et al.* (2010) e Troysi *et al.* (2016), que executaram testes utilizando um centro de usinagem como máquina ferramenta, tal como no presente trabalho. Entretanto, testes preliminares demonstraram que alguns desses parâmetros inicialmente testados não foram adequados.

Os valores selecionados a partir de testes preliminares e utilizados no atual trabalho são: rugosidade média quadrática (Rq) do substrato de 0,43, 1,75 e 2,54 μm , velocidade de rotação da haste consumível (n) de 1500, 2250 e 3000 rpm; e velocidade de deposição (Vd) de 190, 285 e 380 mm/min. A velocidade de avanço do eixo z (Vz) foi mantida constante em 0,3 mm/min (a Figura 2.1 apresenta as direções dos eixos). Os valores selecionados para a rugosidade dos substratos foram definidos por estarem inseridos a uma faixa de rugosidade normalmente obtidas em superfícies obtidas por usinagem. Os parâmetros n e Vd foram determinados de forma empírica em testes preliminares para garantir que a deposição apresentasse aspectos morfológicos sem falhas e que o revestimento não deslocasse do substrato sem que houvesse qualquer tipo de solitação. O valor do parâmetro Vz foi selecionado de forma que garantisse à haste consumível tempo suficiente para que fosse gerado a camada viscoplástica entre a haste consumível e o substrato para todas as amostras.

3.5 Planejamento fatorial

Um planejamento fatorial foi realizado por meio do *software* Minitab 17, no qual foram definidos os fatores e respectivos níveis de relevância. (Tabela 3.4) Cada teste foi repetido uma vez, totalizando 54 testes realizados aleatoriamente. A planilha com o *Desing of experiments* (DOE) pode ser vista no apêndice deste trabalho indicando todas as combinações de parâmetros para deposição utilizadas. Os

níveis mais baixos de cada parâmetro de entrada são referidos como A, enquanto os níveis intermediários e mais altos são referidos respectivamente como B e C conforme pode ser notado na Tabela 3.4.

TABELA 3.4
Resumo do planejamento fatorial

Fator	Número de níveis	Níveis
Substrato	1	ASTM A36
Haste consumível	1	ABNT 4340
Diâmetro da haste (mm)	1	12,7
Rugosidade – Rq (µm)	3	0,43 (A)
		1,75 (B)
		2,54 (C)
Rotação da haste – n (rpm)	3	1500 (A)
		2250 (B)
		3000 (C)
Velocidade de deposição – Vd (mm/min)	3	190 (A)
		285 (B)
		380 (C)
Velocidade de avanço na direção z – Vz (mm/min)	1	0,3
Conjunto de parâmetros	27	-
Número de réplicas	1	-
Total de revestimentos	54	-

Fonte: dados do autor

3.6 Verificação da eficiência do processo

A eficiência foi determinada pela razão entre a massa depositada (medida experimentalmente após a deposição do revestimento) e a massa consumida, calculada multiplicando o volume consumido (produto da profundidade de imersão – 25,00 mm e a área da seção transversal da haste consumível – 126,70 mm²) pela densidade do aço (7,86 g/cm³).

As medições das massas foram realizadas em uma balança de precisão Ohaus Corporation AR2140 com resolução de 0,0001 g e capacidade de 210 g.

Foi determinado o erro sistemático da balança utilizando uma massa padrão Toledo de 50,00 g classe E2. O erro sistemático foi obtido a partir da diferença entre média de seis medições da massa padrão e o valor verdadeiro convencional da mesma. Verificou-se um erro sistemático de - 0,01582 g.

3.7 Execução dos revestimentos

O processo de revestimento foi realizado em um centro de usinagem ROMI modelo Discovery 560 com controle numérico Siemens, potência de 11 kW e rotação máxima de 10000 rpm.

O procedimento para a deposição consiste em aplicar uma carga axial contra o substrato por meio da haste consumível em movimento de rotação, até que haja uma elevação da temperatura proveniente do atrito e surja uma camada viscoplástica na interface. Após o surgimento dessa camada viscoplástica determina-se o movimento de avanço relativo entre a haste consumível e o substrato para se obter a camada revestida. Entretanto, para se efetuar o revestimento a partir do centro de usinagem, divide-se o processo em dois momentos (Figura 3.3): no primeiro momento define-se, em vez de uma carga axial (F_z), uma velocidade de avanço controlada da haste consumível na direção normal ao substrato (V_z), garantindo dessa forma o coalescimento da interface haste/substrato em função atrito e do tempo de contato desses elementos, iniciando a deposição da haste consumível (Figura 3.3-a). Ao término do deslocamento da haste na direção z , já com a presença da camada viscoplástica na interface, inicia-se o a segunda etapa do processo, no qual o movimento simultâneo nas direções axial e longitudinal resulta em uma trajetória em rampa que irá promover a transferência do material da haste para o substrato (Figura 3.3-b).

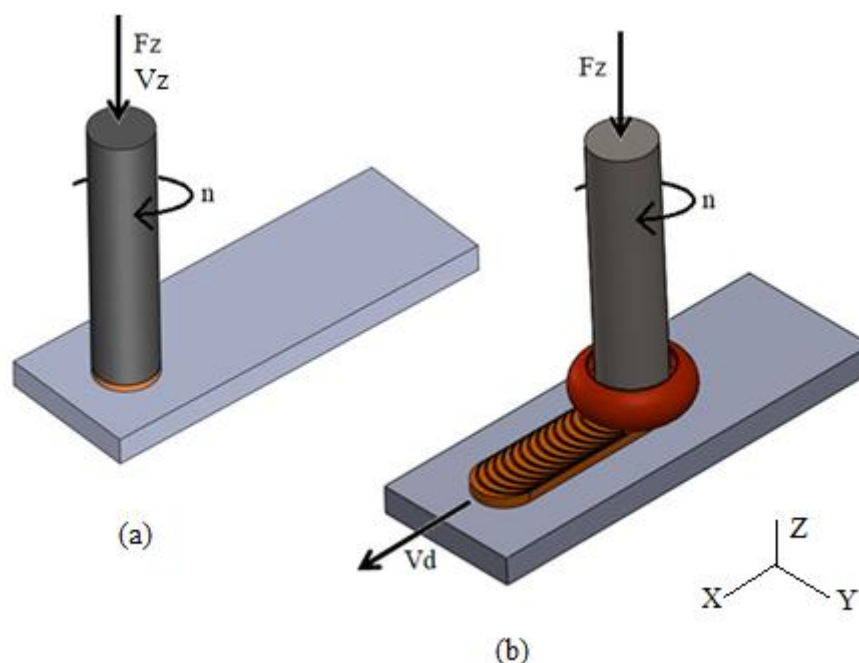


Figura 3.3 – Esquema para o processo FSS
Fonte: dados do autor

O procedimento descrito para se obter o revestimento foi realizado de maneira prévia para alguns parâmetros e rugosidades do substrato diferentes para se definir quais seriam selecionados para o presente trabalho. Os parâmetros do processo e as rugosidades selecionadas se deram a partir do comportamento dos conjugados como: aspecto visual homogêneo do revestimento e aparência de adesão entre revestimento e substrato.

3.8 Análise termográfica e visual do processo e dos conjugados

Realizou-se a mensuração da temperatura do processo de deposição por meio da técnica de termografia por infravermelho. Utilizou-se uma câmera termográfica FLIR, T400 com faixa nominal de trabalho de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ com sensibilidade de imagem térmica de $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Foi observado o posicionamento da câmera a uma distância de $0,80\text{ m}$ do procedimento de deposição e índice de emissividade indicado pelo fabricante da máquina do aço carbono de $0,80$. O aparato para aquisição da temperatura no processo de deposição e exemplos de imagens gerada pela câmera pode ser observado nas Figuras 3.4 e 3.5 respectivamente.



Figura 3.4 – Aparato experimental para medição das temperaturas do processo de deposição
Fonte: dados do autor

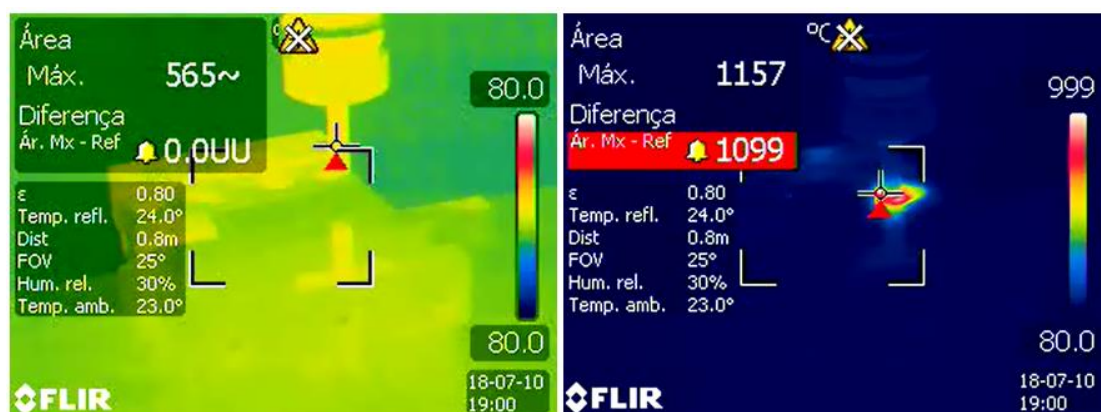


Figura 3.5 – Exemplos de imagens obtidas nas medições das temperaturas dos processos de deposição
Fonte: dados do autor

Após a deposição dos revestimentos foram feitas análises visuais quanto ao aspecto morfológico dos revestimentos, verificando se havia a presença de falhas e ou imperfeições. Para os registros das imagens das amostras revestidas foi utilizada uma câmera fotográfica digital Sony Cyber-shot AVCHD.

De posse dos dados da temperatura de deposição obtidas por meio da técnica de termografia foram elaboradas curvas da evolução da temperatura x tempo de processo para todos os conjugados, indicando a temperatura no momento da aproximação da haste consumível ao substrato, seguido pelo contato haste/substrato para o coalescimento da haste, realização da deposição e recuo da haste ao

término da deposição. Após a obtenção das curvas de temperatura x tempo de processo realizou-se a derivação da mesma a partir do momento do recuo da haste para se obter o comportamento da taxa de resfriamento dos conjugados em função da temperatura.

3.9 Análise dimensional dos revestimentos

A avaliação dimensional dos revestimentos foi realizada a partir de medições das larguras, espessuras e comprimentos utilizando uma máquina de medição por coordenadas (MMC) Mitutoyo BR-M443. Foram realizadas três medições do comprimento, três medições da largura e três medições da espessura estas últimas nas regiões de início, meio e fim da camada depositada. Na Figura 3.6 pode ser verificada a montagem para o procedimento de medição e controle das dimensões dos revestimentos. O erro sistemático da máquina de medição por coordenadas foi obtido a partir da diferença entre média de seis medições de uma esfera padrão e do seu valor verdadeiro convencional (19,9834 mm).



Figura 3.6 – Montagem da MMC para medição das dimensões dos revestimentos
Fonte: dados do autor

3.10 Caracterização Metalúrgica

Foram avaliadas as micrografias dos conjugados via microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) além de verificar os elementos químicos presentes nas regiões de revestimento, interface revestimento/substrato e no substrato para evidenciar a presença da mistura mecânica. Ademais, foram avaliadas as tensões residuais dos conjugados obtidos com os fatores rotação e velocidade de deposição em seus níveis mínimos ($n=1500$ rpm e $V_d=190$ mm/min) e máximos ($n=3000$ rpm e $V_d=380$ mm/min).

3.10.1 Análise Microscópica

A análise microscópica foi dividida em três etapas: microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para análise das microestruturas, além de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para se avaliar a possível diluição do material da haste consumível e sua transferência para a região do material do substrato.

A microscopia ótica foi realizada em um microscópio Carl Zeiss AXIO Scope A1 com ampliações entre 50 e 1000 vezes. Foram realizadas micrografias dos materiais antes e após o processo de deposição para fins de comparação das microestruturas. As amostras foram lixadas, polidas e atacadas quimicamente para revelação de fases e constituintes utilizando o reagente Nital 2%. As regiões de análise das amostras após a deposição foram verificadas utilizando o diagrama esquemático da Figura 3.7 que também será referência para as análises das microestruturas realizada no MEV.

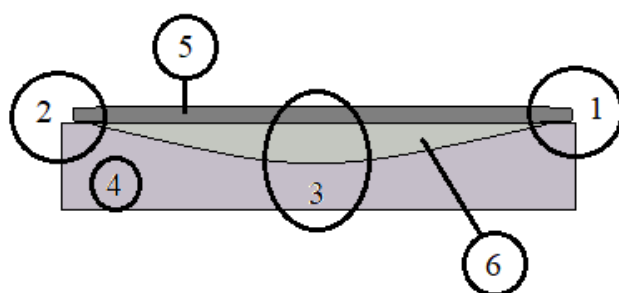


Figura 3.7 – Diagrama para análise das micrografias via MO e MEV.
Fonte: dados do autor

As regiões 1 e 2 da Figura 3.7 são referentes às regiões de solda fria nas extremidades dos revestimentos, a região 3 refere-se às todas regiões da seção transversal do conjugado, abrangendo o revestimento, zona afetada termicamente (ZTA) e substrato; na região 4 tem-se o substrato, na região 5 o revestimento e na região 6 a ZTA.

As análises no MEV foram realizadas em um equipamento JEOL JSM IT 300 com filamento de tungstênio. A microscopia eletrônica de varredura foi usada para análise de imagens das microestruturas para evidenciar detalhes inicialmente observados por meio da MO. Por fim, foram realizadas análises de EDS utilizando um detector Oxford Xmax acoplado ao MEV.

3.10.2 Análise da Austenita Prévia – *Prior Austenite Grain Boundaries*

A Análise da Austenita Prévia – *Prior Austenite Grain Boundaries* (PAGB) é uma técnica metalográfica utilizada para análise da morfologia e dos tamanhos dos grãos de austenita antes da sua transformação em outras fases por meio de tratamento térmico.

Neste trabalho realizou-se a análise por PAGB em três regiões distintas: interface do revestimento com o ambiente, região central do revestimento propriamente dito e interface do revestimento com o substrato, com a intenção de auxiliar nas análises dos resultados de microdureza dos conjugados obtidos por parâmetros de deposição mais brandos e mais severos, BAA ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$; $n = 1500$ rpm; $V_d = 190 \text{ mm/min}$) e ACC ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$; $n = 3000$ rpm; $V_d = 380 \text{ mm/min}$) respectivamente.

Para evidenciar os grãos PAGB as amostras passaram por preparação metalográfica convencional: lixamento e polimento e ataque químico utilizando o reagente de solução de ácido pícrico, 75,00 ml de água destilada, 55,00 ml de teepol (detergente industrial) e 3,00 g de ácido pícrico por um tempo de aproximadamente 20 minutos.

Obteve-se as imagens para a medição do tamanho médio de grão

Para a medição do tamanho médio de grão da austenita utilizou-se a regra dos interceptos baseado na norma ASTM E112. Foi selecionado a região central do revestimento por ser a região que demonstrou o aspecto dos contornos de grão mais uniforme. Utilizando uma ampliação de 100 vezes realizou-se a medição da área analisada em $1056 \times 778 \mu\text{m}^2$, selecionou-se cinco imagens dos conjugados padronizados sob condições mais brandas e mais severas dos parâmetros de rotação e velocidade de deposição (BAA e ACC) e em cada imagem foram traçadas 4 linhas paralelas à superfície dos corpos de provas. Com as linhas traçadas em todas as imagens foram contados a quantidade de grãos interceptados por essa linha e calculou-se o tamanho médio do grão pela razão entre comprimento da linha ($1056 \mu\text{m}$) e a quantidade média de grãos interceptados.

3.10.3 Análise de tensões residuais

A análise de tensões residuais foi efetuada por meio da técnica de difração de raios X em um difratômetro GNR Stress-X operando com radiação Cr K α pelo método $\sin^2\psi$ (modo ω mega). O ângulo de inclinação foi variado entre -45 e +45° e a reflexão selecionada para análise foi a dos planos (211) da ferrita. Com radiação Cr K α , a reflexão 211 ocorre com o ângulo de difração de aproximadamente 156°. Nessas condições, a profundidade de penetração da radiação é estimada em 26,5 μm .

Foram realizadas as análises nos conjugados de n e Vd mínimos e máximos para todos os grupos de rugosidade (AAA, BAA, CAA, ACC, BCC e CCC) em três pontos distintos da seção transversal do conjugado na região central do revestimento: o ponto 1 se refere à direção de recuo de deposição do material depositado, o ponto 2 à região central de deposição e o ponto 3 à direção de avanço de deposição, conforme pode ser observado na Figura 3.8.



Figura 3.8 – Diagrama para análise das tensões residuais
Fonte: dados do autor

3.11 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos buscam caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais, permitindo a obtenção de informações rotineiras do produto e o desenvolvimento de novas informações sobre os materiais. Foram realizados ensaios de dobramento, microdureza e pino sobre disco.

3.11.1 Ensaio de dobramento

Após a execução da deposição do revestimento, as amostras foram submetidas ao ensaio de dobramento. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaio Time Group WDW-

100E com os seguintes parâmetros: deslocamento do cutelo de 20 mm, taxa de incremento de 4 mm/min, duração do ensaio de 5 minutos e carga aplicada de 50 kN. Foi realizado o ensaio guiado em três pontos conforme mostra a Figura 3.9.

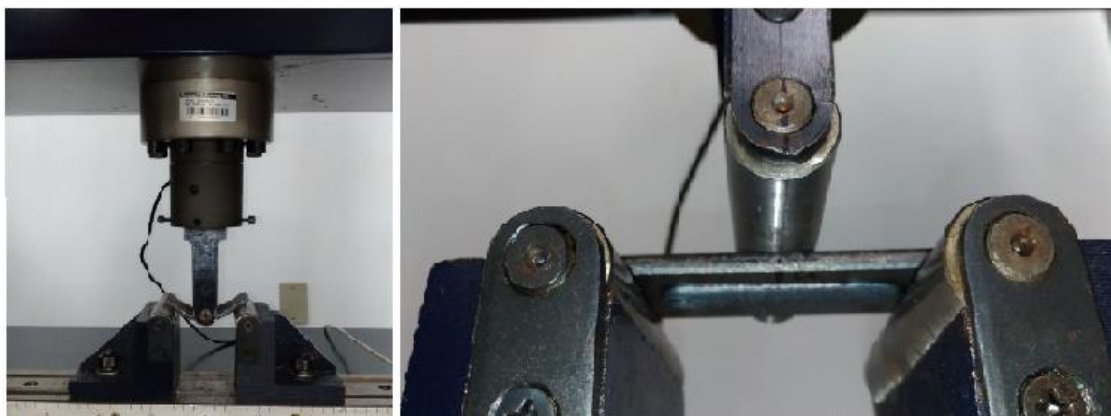


Figura 3.9 – Ensaio de dobramento em três pontos
Fonte: dados do autor

3.11.2 Ensaio de microdureza

As amostras para realização dos ensaios de microdureza Vickers foram extraídas dos corpos de prova que passaram pelo ensaio de dobramento e avaliadas na seção transversal, porém de uma região não afetada pelo teste. Após serem preparadas metalograficamente, as amostras foram ensaiadas em um microdurômetro Shimadzu HMV-2T, utilizando carga de 245,2 mN com tempo de permanência em indentação de 20 segundos.

Os perfis de microdureza foram avaliados com indentações espaçadas de 300 μm e 500 μm perpendicularmente e paralelamente (0,1 mm abaixo da interface revestimento/substrato) à deposição do revestimento respectivamente. Verifica-se no diagrama esquemático da Figura 3.10 as disposições das endentações realizadas.

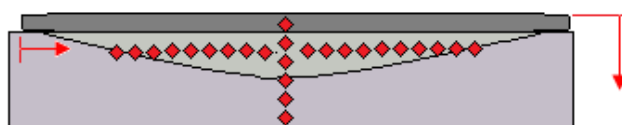


Figura 3.10 – Diagrama de medição de microdureza.
Fonte: dados do autor

Foi determinado o erro sistemático do microdurômetro utilizando uma amostra padrão de 700 HV. O erro sistemático foi obtido a partir da diferença entre a média de seis medições do padrão e o seu valor verdadeiro convencional.

As amostras utilizadas para a avaliação de microdureza também foram utilizadas para análise da microestrutura por meio das técnicas de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, bem como as análises por espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

3.11.3 Ensaio de pino sobre disco

Os ensaios de pino sobre disco (PSD) foram realizados em um tribômetro Microtest MT com a finalidade de determinar o coeficiente de atrito entre o substrato de aço ASTM A36 com diferentes condições de rugosidades e a haste de aço ABNT 4340 sob diferentes velocidades tangenciais. Foram preparados três corpos de prova de aço ASTM A36 com dimensões de 100 x 100 mm para atuarem como disco com valores médios de R_q de 0,44 μm , 1,74 μm e 2,53 μm e nove pinos de aço ABNT 4340 conforme a norma ASTM G99, sendo um para cada combinação de parâmetros de rugosidade ($R_q = 0,44 \mu\text{m}$, $R_q = 1,74 \mu\text{m}$ e $R_q = 2,53 \mu\text{m}$) versus rotação ($n = 1500 \text{ rpm}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $n = 3000 \text{ rpm}$).

As deposições dos revestimentos foram realizadas a partir de hastes consumíveis de $\phi 12,70 \text{ mm}$ e rotações de 1500, 2250 e 3000 rpm, as quais estabeleceram velocidades tangenciais de aproximadamente 60 m/min, 90 m/min e 120 m/min, respectivamente. Em função do limite de rotação do tribômetro (500 rpm), para que os mesmos valores das velocidades tangenciais das deposições fossem atingidos, calculou-se os diâmetros das pistas (disco) para a execução dos ensaios: 38 mm, 57 mm e 76 mm. A carga aplicada foi de 1N. Os ensaios foram programados para um deslocamento de 500m, durante os quais as amostras referentes às rotações 1500, 2250 e 3000 rpm deveriam percorrer tal distância em aproximadamente 8min, 6min e 4min respectivamente. O ensaio foi realizado a seco e sem controle da atmosfera.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos ao longo do presente trabalho. De modo a facilitar a apresentação e discussão dos resultados, foi adotada a nomenclatura mostrada na Tabela 4.1 para as combinações de parâmetros, sempre levando em consideração a seguinte ordem: rugosidade, rotação da haste consumível e velocidade de deposição.

TABELA 4.1
Nomenclatura apresentada para discussão dos resultados

Rugosidade – Rq (μm)	Nomenclatura	Rotação – n (rpm)	Nomenclatura	Velocidade de deposição – Vd (mm/min)	Nomenclatura
0,43	A	1500	A	190	A
1,75	B	2250	B	285	B
2,54	C	3000	C	380	C

Fonte: dados do autor

A Tabela 4.2 mostra todas as condições de deposição empregadas no presente trabalho e sua nomenclatura. Por exemplo, o teste 10 representa uma amostra que foi revestida segundo os parâmetros de rugosidade de 1,75 μm , rotação de 1500 rpm e velocidade de deposição de 190 mm/min (nomenclatura BAA).

Os resultados serão discutidos segundo a ordem dos ensaios representados pelo fluxograma da Figura 3.1.

TABELA 4.2
Nomenclatura proposta de acordo com as condições de deposição

Teste	Rugosidade - Rq (μm)	Rotação - n (rpm)	Velocidade de deposição - Vd (mm/min)	Amostra
1	0,43	1500	190	AAA
2	0,43	1500	285	AAB
3	0,43	1500	380	AAC
4	0,43	2250	190	ABA
5	0,43	2250	285	ABB
6	0,43	2250	380	ABC
7	0,43	3000	190	ACA
8	0,43	3000	285	ACB
9	0,43	3000	380	ACC
10	1,75	1500	190	BAA
11	1,75	1500	285	BAB
12	1,75	1500	380	BAC
13	1,75	2250	190	BBA
14	1,75	2250	285	BBB
15	1,75	2250	380	BBC
16	1,75	3000	190	BCA
17	1,75	3000	285	BCB
18	1,75	3000	380	BCC
19	2,54	1500	190	CAA
20	2,54	1500	285	CAB
21	2,54	1500	380	CAC
22	2,54	2250	190	CBA
23	2,54	2250	285	CBB
24	2,54	2250	380	CBC
25	2,54	3000	190	CCA
26	2,54	3000	285	CCB
27	2,54	3000	380	CCC

Fonte: dados do autor

4.1 Análise química

Os resultados da análise química são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3, juntamente com as faixas de composições químicas previstas para os aços ASTM A36 (substrato) e ABNT 4340 (haste consumível). Verifica-se que as composições químicas dos materiais utilizados no presente trabalho apresentam-se dentro dos limites indicados por ASM Metals Handbook (1993/2005).

TABELA 4.3
Composição química do aço A36

ASTM A36	C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Mo	Fe
Faixa nominal*	0,04 a 0,21	0,20 a 1,50	≤ 0,5	≤ 0,04	≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 0,05	balanço
Amostra 1	0,06	0,67	0,2	0,02	0,02	0,013	0,005	-
Amostra 2	0,06	0,66	0,2	0,01	0,02	0,014	0,005	-

Fonte: dados do autor

* ASM Handbook, (1993 / 2005)

TABELA 4.4
Composição química do aço ABNT 4340

ABNT 4340	C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Mo	Fe	S	Nb	Cu	Al
Faixa nominal*	0,38 a 0,43	0,60 a 0,80	0,15 a 0,35	Max. 0,035	0,70 a 0,90	1,65 a 2,00	0,20 a 0,30	balanço	Máx. 0,040	-	-	-
Amostra 1	0,383	0,704	0,213	0,003	0,779	1,731	0,203	95,9	0,000	< 0,002	0,036	0,018
Amostra 2	0,387	0,716	0,224	0,004	0,797	1,752	0,213	95,82	0,000	< 0,002	0,039	0,02

Fonte: dados do autor

* ASM Handbook, (1993 / 2005)

4.2 Rugosidade do substrato

Foram verificadas as rugosidades dos substratos antes de se iniciar as deposições e separadas em três grupos para valores médios de Rq (0,43 µm, 1,75 µm e 2,54 µm). Verificou-se que o rugosímetro

apresenta um erro sistemático de $-0,2 \mu\text{m}$. Para o grupo A com R_q médio de $0,43 \mu\text{m}$, utilizou-se um comprimento amostral (l_r) de $0,8 \text{ mm}$ e os menores e maiores valores encontrados foram respectivamente $R_q = 0,21 \mu\text{m}$ e $R_q = 0,65 \mu\text{m}$ (amostras ABA e ACA), conforme pode ser verificado no Gráfico 4.1. Para esse grupo verificou-se um desvio padrão de $0,15 \mu\text{m}$.

As maiores variações para os valores das rugosidades dos substratos ocorrem no grupo A com $R_q = 0,43 \mu\text{m}$. Uma possível explicação para tal fenômeno é dificuldade em se obter repetibilidade dos resultados de baixa rugosidade por meio da operação de fresamento quando durante tal processo há vibrações da peça e da ferramenta, que podem gerar variações no acabamento da peça. O baixo valor do avanço por dente, conforme descrito na Tabela 3.2, é um dos fatores influentes para ocorrência de vibração.

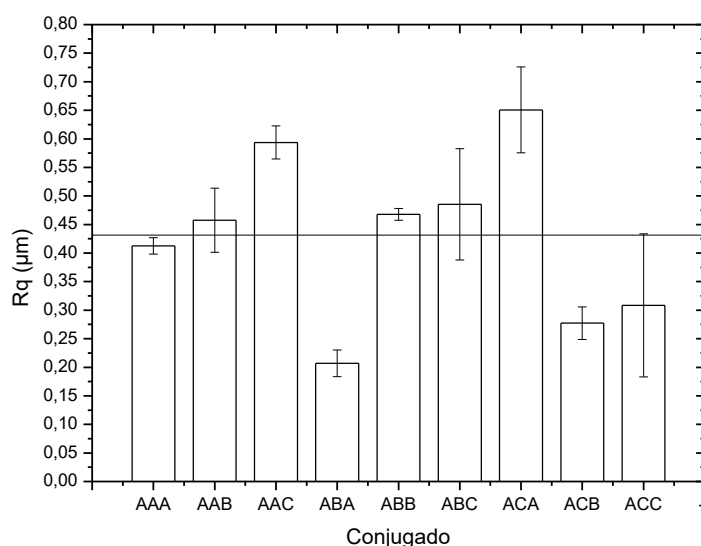


Gráfico 4.1 – Rugosidade dos substratos do grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$)
Fonte: dados do autor

Para o grupo B (R_q médio de $1,75 \mu\text{m}$) utilizou-se comprimentos amostrais de $0,8$ e $2,5 \text{ mm}$ conforme a norma ISO 4288, (1996) demonstrado na Tabela 3.3. Nota-se no Gráfico 4.2, levando em consideração o desvio padrão, que apenas os substratos BAC e BCC encontram-se ligeiramente acima da média. Os menores e maiores valores encontrados foram respectivamente $R_q = 1,32 \mu\text{m}$ e $R_q = 2,19 \mu\text{m}$ (amostras BAB e BCC). Verificou-se um desvio padrão de $0,26 \mu\text{m}$ para esse grupo.

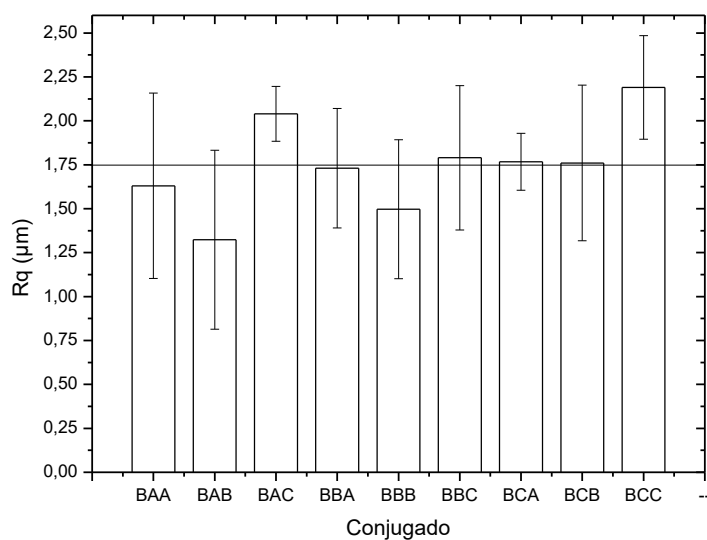


Gráfico 4.2 – Rugosidade dos substratos do grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$)

Fonte: dados do autor

No grupo C (R_q médio de $2,54 \mu\text{m}$) utilizou-se um comprimento amostral de $2,5 \text{ mm}$ e os menores e maiores valores encontrados foram respectivamente $R_q = 2,45 \mu\text{m}$ e $R_q = 2,67 \mu\text{m}$ (amostras CBB e CAC), conforme pode ser observado no Gráfico 4.3. Entretanto, levando em consideração o desvio padrão das amostras, apenas o conjugado CAC (valor de médio de R_q de $2,67 \mu\text{m}$ e desvio padrão de $0,07 \mu\text{m}$) apresentou-se divergente das demais amostras.

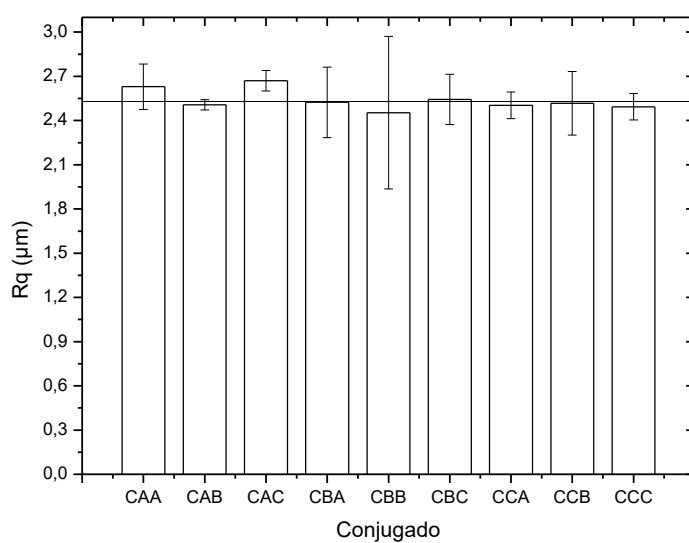


Gráfico 4.3 – Rugosidade dos substratos do grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$)

Fonte: dados do autor

4.3 Verificação da eficiência do processo

A eficiência do processo de deposição foi determinada pela razão entre a massa depositada (medida experimentalmente após a deposição do revestimento) e a massa consumida (calculada pelo produto do volume consumido pela densidade do aço, como pode ser observado nos Gráficos 4.7, 4.8 e 4.9.

No Gráfico 4.4 pode ser observada a maior eficiência (61%) para o conjugado AAA obtido pelos parâmetros nos níveis mínimos de deposição ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$) a menor eficiência (24%) foi notada no conjugado produzido empregando os níveis máximos dos parâmetros de deposição (ACC: $R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$).

Outro ponto a ser destacado seria a maior influência da rotação (n) a velocidade de deposição (V_d) nos resultados de eficiência. Isso é claramente notado ao comparar a eficiência das amostras ABA (40%) e AAB (58%) contra a amostra AAA (61%).

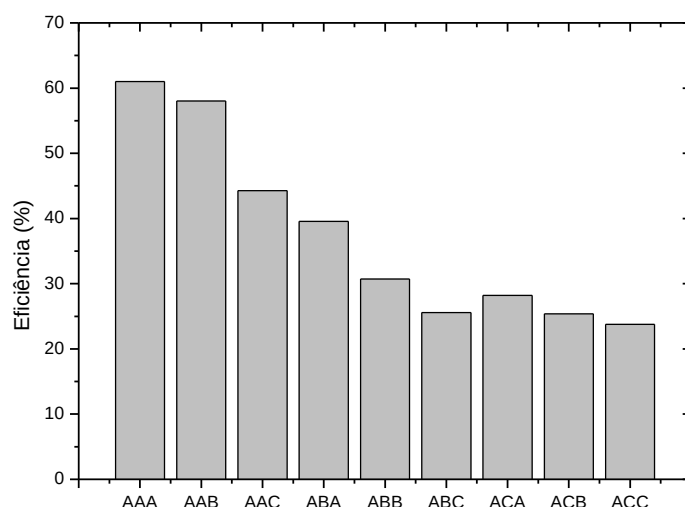


Gráfico 4.4 – Eficiência de processo no Grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$)
Fonte: dados do autor

Nota-se no Gráfico 4.5 um comportamento semelhante ao Gráfico 4.4, indicando que quanto maior os parâmetros rotação (n) e velocidade de deposição (V_d) menor a eficiência do processo. Além disso, mais uma vez pode-se notar que o maior valor de eficiência refere-se ao conjugado obtido com os parâmetros de deposição nos níveis mínimos BAA (63%) e o conjugado com menor eficiência (23%)

refere-se aquele obtido por meio da deposição utilizando os níveis máximos dos parâmetros rotação (n) e velocidade de deposição (Vd) - BCC.

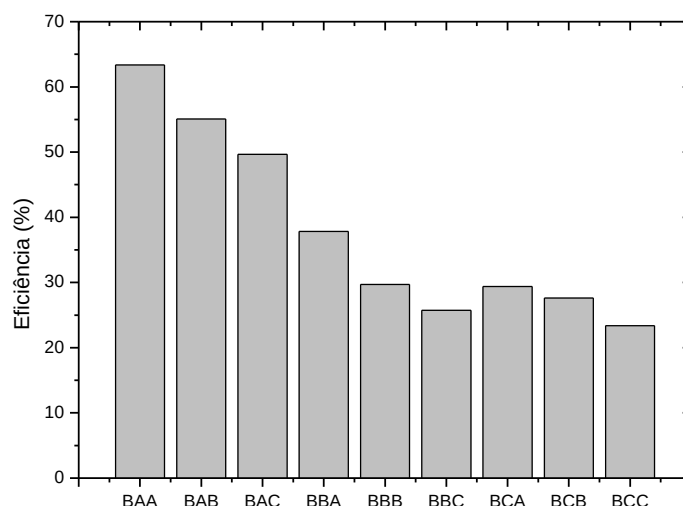


Gráfico 4.5 – Eficiência de processo no Grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$)

Fonte: dados do autor

No Gráfico 4.6 pode ser vista a mesma tendência dos Gráficos 4.7 e 4.8. O conjugado CAA apresentou a maior eficiência de deposição do grupo (63%) enquanto a amostra CCC apresentou a eficiência de 24 %. Entretanto para o grupo de rugosidade C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$) o menor valor de eficiência (23 %) refere-se ao conjugado CCB ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$). A variação entre os conjugados CCB e CCC é baixa o suficiente para que tenha sido gerada por erro sistemático.

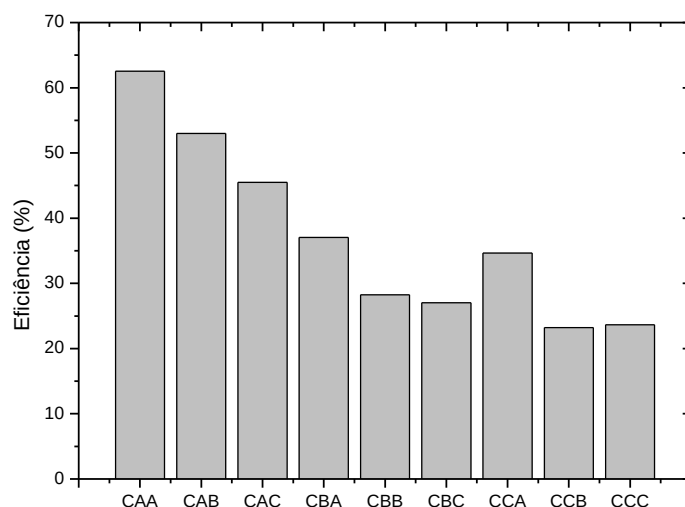


Gráfico 4.6 – Eficiência de processo no Grupo C ($R_q = 2,54 \mu m$)

Fonte: dados do autor

Ao comparar os Gráficos 4.7, 4.8 e 4.8 é possível notar que a rotação (n) da haste consumível e a velocidade de deposição (V_d) têm maiores influências na eficiência do processo em comparação com a rugosidade inicial do substrato, sendo, a rotação mais preponderante.

Aumentar a rotação e/ou a velocidade de deposição do nível mínimo (A: 1500 rpm ou 190 mm/min) para o nível máximo (C: 3000 rpm ou 380 mm/min) levou a uma diminuição na eficiência em função de um menor volume de material transferido da haste consumível para o conjugado. Em se tratando do aumento da rotação notou-se uma maior formação do flash reduzindo o contato da haste consumível com o substrato e, portanto, reduzindo a eficiência de deposição. Ao aumentar a velocidade de deposição por sua vez, tem-se um deslocamento mais rápido da haste consumível no momento da deposição reduzindo a transferência de material da haste consumível para o conjugado, o que também reduz a eficiência do processo FSS.

Os valores mais altos de eficiência de deposição encontrados no presente trabalho (aproximadamente 60%) são comparáveis aos valores obtidos por Gandra *et al.* (2012) sobre aço de baixo carbono e levemente mais altos que os diferentes revestimentos de liga de alumínio verificado por Silvério *et al.* (2018) e Galvis *et al.* (2018).

4.4 Análise visual dos revestimentos

Após a deposição dos revestimentos, os conjugados foram avaliados visualmente. Verificou-se que as amostras revestidas apresentaram aspecto morfológico satisfatório, isto é, uma deposição homogênea, contínua, livre de imperfeições e falhas e com boa repetitividade entre as amostras e suas réplicas. Todas as amostras apresentaram, visualmente, boa adesão, sem evidência de deslocamentos e/ou preenchimento incompleto.

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 podem ser vistas as amostras após o processo de deposição, indicando que todos os parâmetros propostos foram eficazes e os revestimentos realizados com sucesso. Percebe-se uma variação da largura e espessura do revestimento quando variados os parâmetros de deposição rotação (n) e velocidade de deposição (V_d), respectivamente, como por exemplo a amostra AAB (Figura 4.1b) apresenta maior largura que a amostra ABB (Figura 4.1e) que por sua vez possui maior largura que a amostra ACB (Figura 4.1h). Quanto à espessura pode-se perceber que ao reduzir V_d obtém-se espessuras maiores. Como exemplo pode-se notar que a amostra BBA (Figura 4.2d) apresenta maior espessura que a amostra BBB (Figura 4.2e) e esta, por sua vez, apresenta espessura superior à amostra BBC (Figura 4.2f). Entretanto, verifica-se que o parâmetro rugosidade não apresenta influência significativa sobre a largura e espessura dos revestimentos. Quando fixados os parâmetros n e V_d foi possível verificar um comportamento semelhante em todos os conjugados obtidos.

Nota-se que os aspectos das superfícies dos revestimentos bem como as regiões influenciadas pelo calor (ZTA) sofrem influências tanto da alteração dos parâmetros de deposição quanto da variação da rugosidade dos substratos. De fato, ao se aumentar a rotação, por exemplo, tem-se a formação de *flash* com maiores diâmetros, reduzindo assim a região de contato com o substrato e a formação de revestimentos mais estreitos e com melhor acabamento. Isso pode ser observado quando comparadas por exemplo as amostras do grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$) AAA (Figura 4.1a), ABA (Figura 4.1d) e ACA (Figura 4.1g) ou nas amostras do grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$) BAB (Figura 4.2b), BBB (Figura 4.2e) e BCB (Figura 4.2h) bem como nas amostras do grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$) CAC (Figura 4.3c), CBC (Figura 4.3f) e CCC (Figura 4.3i). Resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho foram observados por Rafi (2010).

Em relação às regiões afetadas pelo calor nota-se que tanto a variação da velocidade de deposição como da rugosidade do substrato são fatores influentes. Para os valores mais baixos de velocidade de

deposição, a região afetada pelo calor é maior em função do tempo de contato e do atrito entre a haste consumível e o substrato, conforme sugerem, por exemplo, as marcas nos substratos dos conjugados BAA (Figura 4.2a), BAB (Figura 4.2b) e BAC (Figura 4.2c) bem como os substratos dos conjugados AAA (Figura 4.1a), em comparação ao AAB (Figura 4.1b) e AAC (Figura 4.1c). Esse comportamento pode ser verificado em todas as condições na qual há o aumento da V_d com os demais parâmetros constantes. Van Kalken (2001) também obteve resultados semelhantes onde notou-se que a diminuição da V_d gera um aumento da região afetada pelo calor. Em se tratando da variação da rugosidade do substrato, nota-se que quanto maior o valor da rugosidade maior será a região afetada pelo calor como pode ser observado pelas marcas dos substratos dos conjugados AAB (Figura 4.1b), BAB (Figura 4.2b) e CAB (Figura 4.3b). Sugere-se que tal influência seja em função do grupo C de rugosidade apresentar mecanismos de adesão tanto por ligações químicas quanto por ancoramento mecânico.

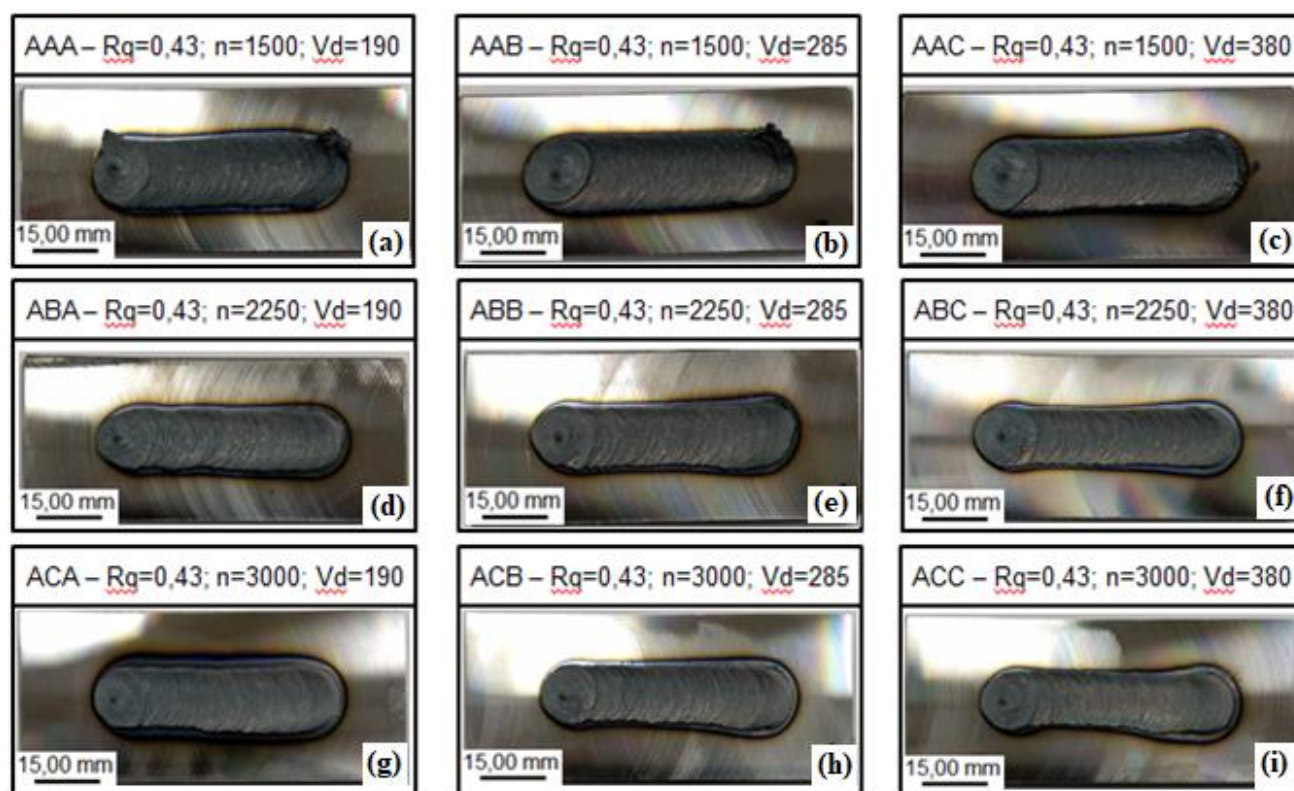


Figura 4.1 – Vista de topo das amostras principais após a deposição dos revestimentos do Grupo A (0,43 μm)
 Fonte: dados do autor

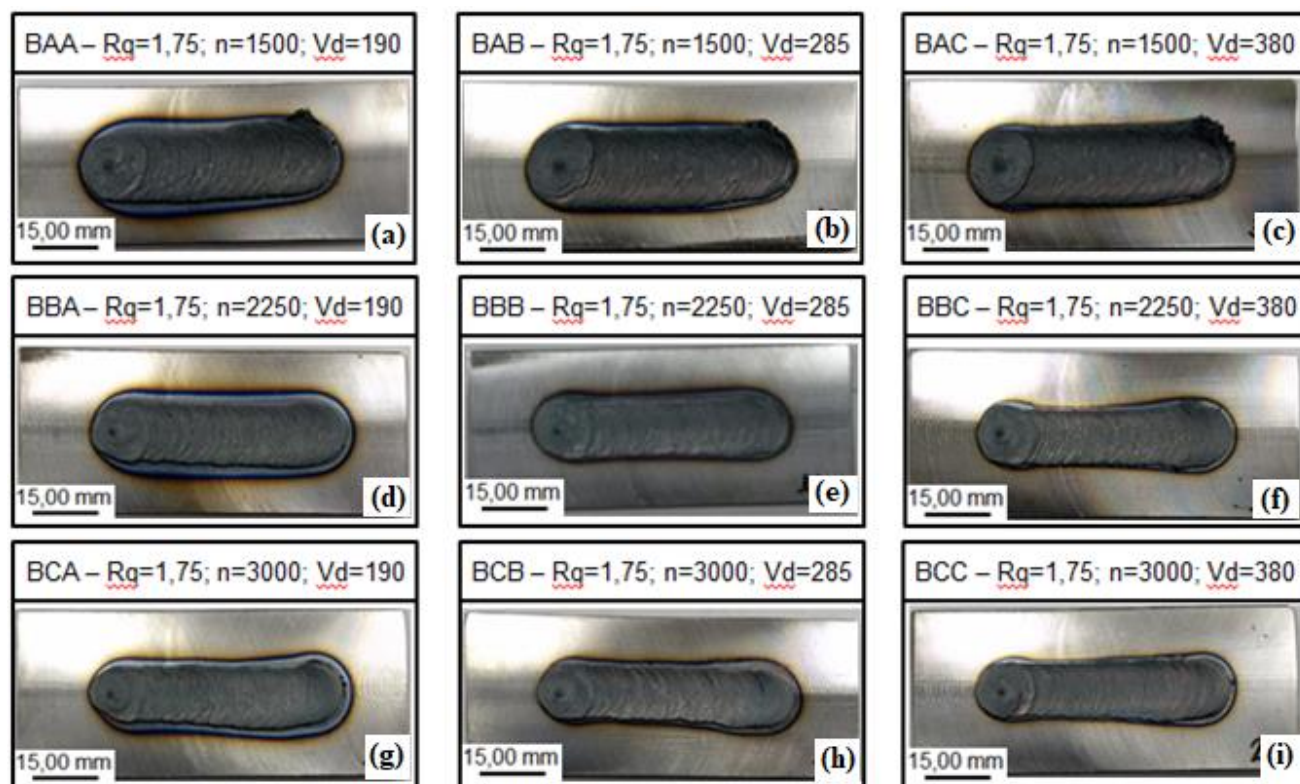


Figura 4.2 – Vista de topo das amostras após a deposição dos revestimentos do Grupo B (1,75 μm)

Fonte: dados do autor

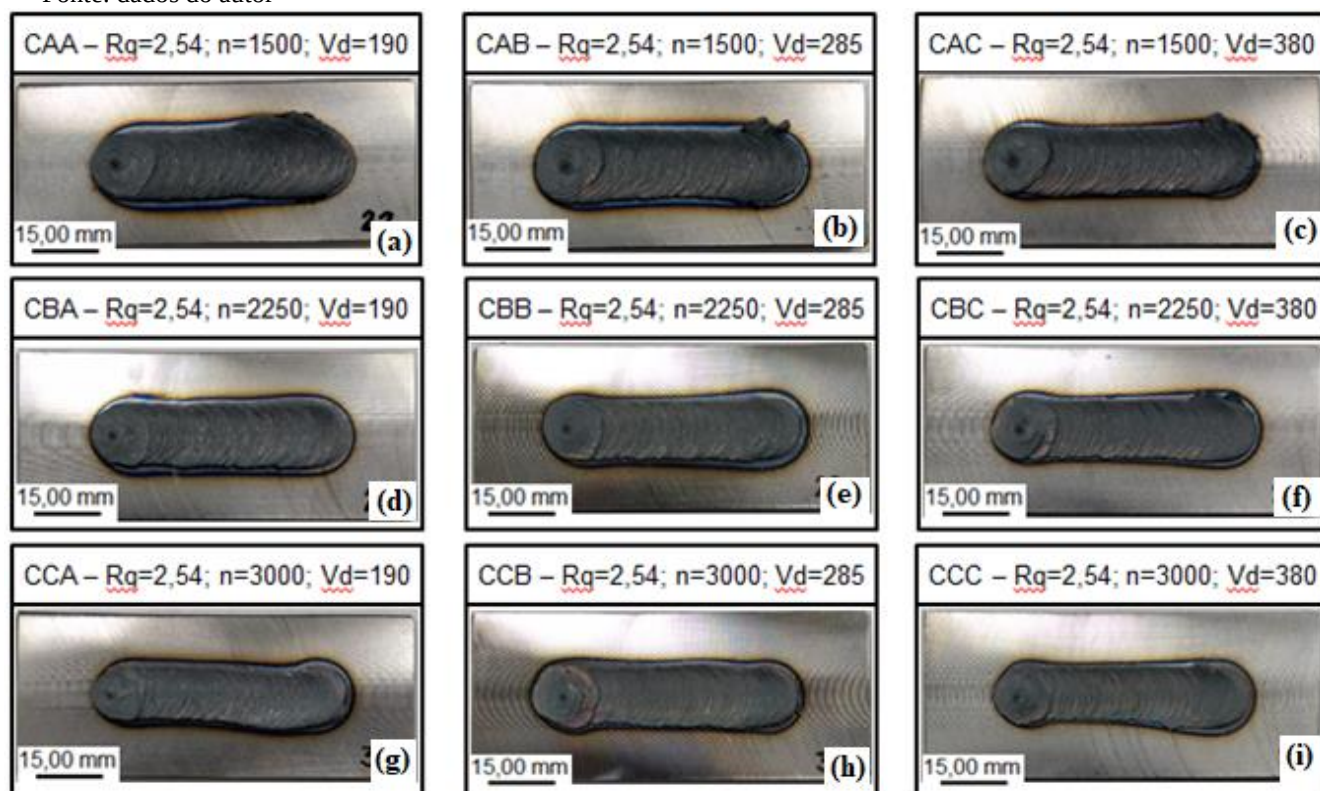


Figura 4.3 – Vista de topo das amostras após a deposição dos revestimentos do Grupo C (2,54 μm)

Fonte: dados do autor

Além da influência dos parâmetros de deposição sobre as alterações nos revestimentos quanto às dimensões (largura e espessura), acabamento superficial, bem como marcas de oxidação nos substratos, é possível perceber alterações nas hastes consumíveis, como variação da morfologia e do comprimento do *flash*. Na Figura 4.4 podem ser observadas amostras do grupo A de rugosidade ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$) obtidas por meio de deposição realizadas com os parâmetros nos níveis mínimos (conjugado AAA: $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$), vide Figura 4.4a, e máximos (conjugado ACC: $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$), vide Figura 4.4 b. Nota-se que ao aumentar os parâmetros de deposição se tem um *flash* com maior diâmetro em função da formação de um plano no contato entre a haste consumível e o substrato no momento da deposição (plano de contato rotacional).

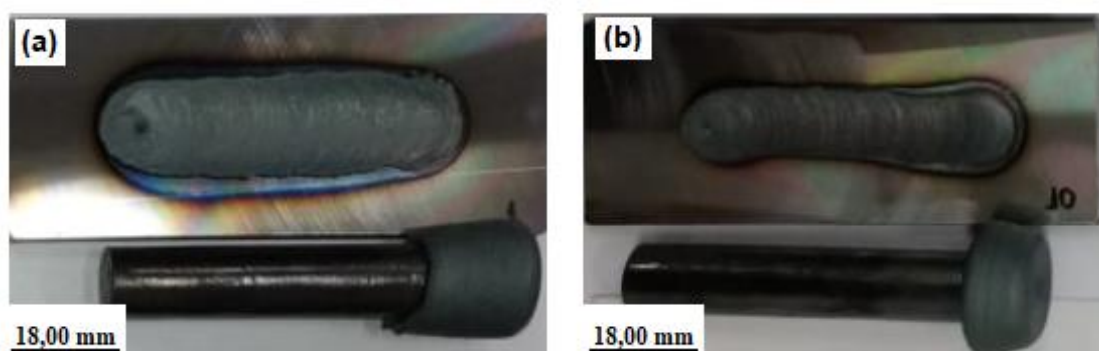


Figura 4.4 – Conjugados e haste consumível após a deposição dos revestimentos: (a) AAA e (b) ACC.
Fonte: dados do autor

4.5 Análise térmica

Os resultados da análise da temperatura podem ser observados nos Gráficos 4.10, 4.11 e 4.12 referentes aos grupos de rugosidade A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$), B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$) e C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$), respectivamente.

Pode-se notar em todos os perfis a evolução térmica de deposição do processo FSS com o início da aquisição de temperatura a partir de 80°C , formado por quatro etapas: aproximação da haste consumível do substrato seguido pelo aquecimento da haste consumível até atingir a temperatura de coalescimento em função do atrito, período de deposição e por fim resfriamento do conjugado. Tal comportamento corrobora o que foi observado por Hanke (2017).

Pode-se perceber no Gráfico 4.7 (grupo de rugosidade A) um comportamento semelhante entre as amostras. Inicialmente a haste consumível é rotacionada e aproximada do substrato no local onde se deseja iniciar o revestimento e logo que as superfícies entrem em contato inicia-se o processo. Em um segundo momento há o contato da haste consumível com o substrato e em função do atrito nota-se um aumento considerável na temperatura de 80 °C até um valor médio próximo de 1050 °C em um curto intervalo de tempo (aproximadamente 5 segundos). Nesse estágio, na interface de deposição a haste consumível deforma plasticamente formando uma camada viscoplástica que tende a aderir à superfície do substrato. Após a formação da camada viscoplástica, atribui-se ou a haste consumível ou ao substrato, um deslocamento no sentido longitudinal e ao longo desse percurso uma porção do material da haste consumível é depositada no substrato, enquanto parte do material é recalçada, fluindo radialmente da haste consumível – *flash*. É a partir desse estágio que se nota as diferenças entre os perfis de deposição. Por meio de programação da máquina operatriz foi estabelecido o comprimento de deposição da haste consumível de 25,00 mm e como o parâmetro Vd foi 190, 285 e 380 mm/min, tem-se que o tempo de deposição propriamente dito varia de acordo com esses valores. Pode-se perceber que as amostras com as mesmas velocidades de deposição apresentam um estágio 3 praticamente sobrepostos como as amostras AAA ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$), ABA ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$) e ACA ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$). Por fim, nota-se o resfriamento do conjugado em função da perda do contato entre a haste consumível e o substrato. A diferença no resfriamento entre as amostras nesse estágio se dá pela diferença de aporte térmico durante o processo, seja pela variação da rotação (n) ou da velocidade de deposição (V_d).

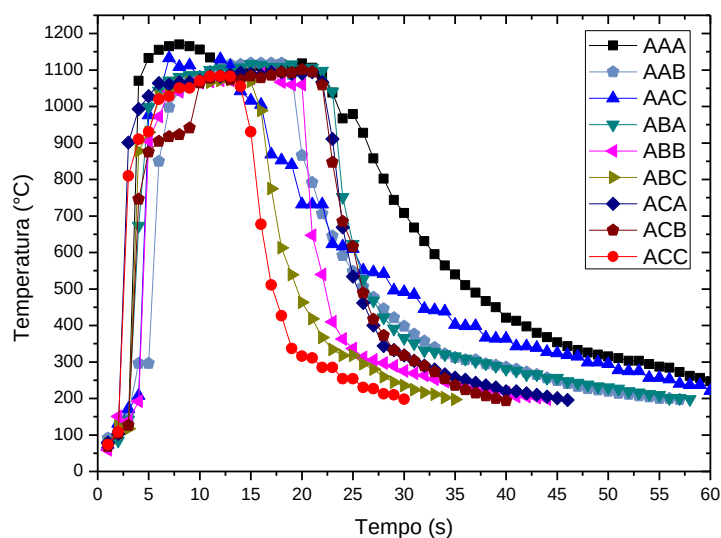


Gráfico 4.7 – Perfil térmico do proceso FSS para as amostras do grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$)
Fonte: dados do autor

No Gráfico 4.8 podem ser vistos os perfis das evoluções térmicas das deposições realizadas em substratos com rugosidade $R_q = 1,75 \mu\text{m}$ (grupo B). Nota-se um comportamento semelhante ao que foi percebido no Gráfico 4.7 entretanto, as amostras do grupo B apresentaram menores tempo de resfriamento para os mesmos valores de n e V_d .

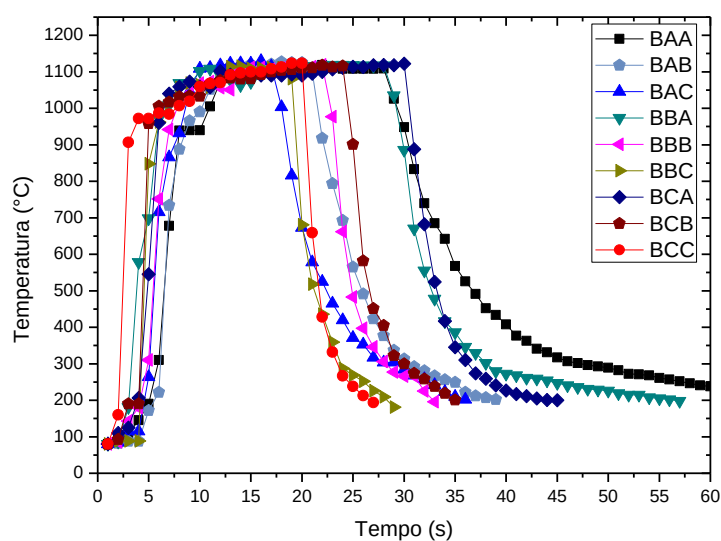


Gráfico 4.8 – Perfil térmico do proceso FSS para as amostras do grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$)
Fonte: dados do autor

Assim como os Gráficos 4.7 e 4.8 o Gráfico 4.9 apresenta perfis das evoluções térmicas das deposições, entretanto realizadas nos substratos com rugosidade $R_q = 2,54 \mu\text{m}$ (grupo C). Pode ser notado que há realmente uma tendência de redução do tempo de resfriamento das amostras com n e V_d quando comparado aos Gráficos 4.7 e 4.8, indicando que a rugosidade pode influenciar na taxa de resfriamento no processo FSS.

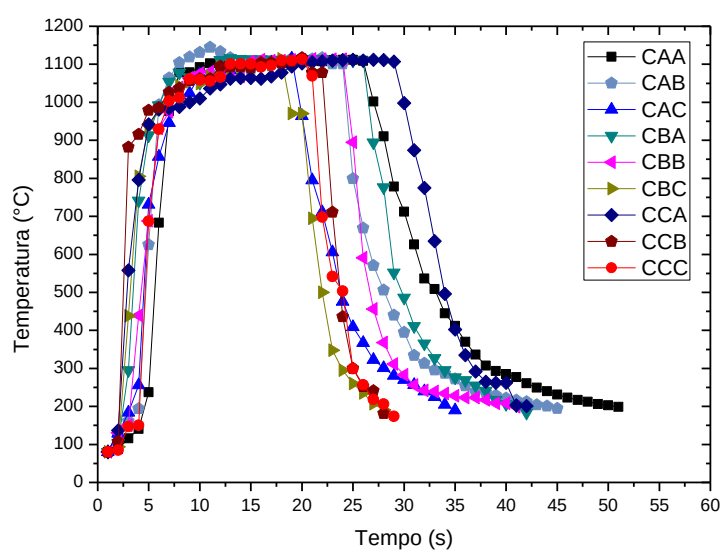


Gráfico 4.9 – Perfil térmico do processo FSS para as amostras do grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$)

Fonte: dados do autor

Ao confrontar as análises termográficas realizadas e apresentadas nos gráficos 4.7, 4.8 e 4.9 referentes às amostras dos grupos A, B e C de rugosidade respectivamente nota-se que a evolução da temperatura é caracterizada por um aumento acentuado que corresponde ao contato inicial entre a haste e o substrato consumíveis, seguido pelo estágio de deposição em que a temperatura atinge valores próximos a 1100°C . Assim, em todos os casos, as temperaturas de deposição permaneceram dentro do campo de austenita para o aço consumível da barra. As principais variações observadas estão relacionadas ao tempo de deposição, que é influenciado pelos diferentes valores da velocidade de deposição ($V_d = 190, 285$ e 380 mm/min). As amostras, no entanto, exibem diferenças mais significativas em relação às taxas de resfriamento, comparadas nos Gráficos 4.10, 4.11 e 4.12.

Nos Gráficos 4.10, 4.11 e 4.12 pode ser avaliado o comportamento dos conjugados quanto às taxas de resfriamento em função da temperatura para os grupos de rugosidade A, B e C, respectivamente.

Verifica-se no Gráfico 4.10 a taxa de resfriamento em função da temperatura das amostras do grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$). Nota-se que os conjugados obtidos por meio de parâmetros de rotação (n) e

velocidade de deposição (V_d) nos níveis mais baixos apresentaram as menores taxas de resfriamento. Entretanto, pode nota-se que a rotação é mais influente como pode ser verificado nas amostras AAA ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$), AAB ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$) e AAC ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$). Observa-se ainda que ao aumentar os parâmetros rotação e velocidade de deposição tem-se um aumento da taxa de resfriamento dos conjugados. Sabe-se que com o aumento da rotação há um incremento no calor gerado pelo atrito da haste consumível e o substrato, entretanto, o calor para de aumentar na medida em que o coeficiente de atrito vai reduzindo e dessa forma pode-se perceber que a rotação não é o único parâmetro para o aporte de calor nos conjugados.

A velocidade de deposição por sua vez é inversamente proporcional ao tempo de contato entre a haste consumível e o substrato, gerando menores valores de espessura dos revestimentos e consequentemente um menor volume de deposição quando usado os níveis mais altos de velocidade de deposição. Dessa forma, sugere-se que sob tempos de contato mais curtos e espessuras do revestimento mais finas obtenham-se taxas de resfriamento dos conjugados mais elevadas.

Entretanto, como pode ser notado no Gráfico 4.10 quando combinados os níveis máximos de rotação (n) e de velocidade de deposição (V_d) se obtém taxas de resfriamento mais elevadas, observadas nos conjugados ABC ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$), ACB ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$) e ACC ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$).

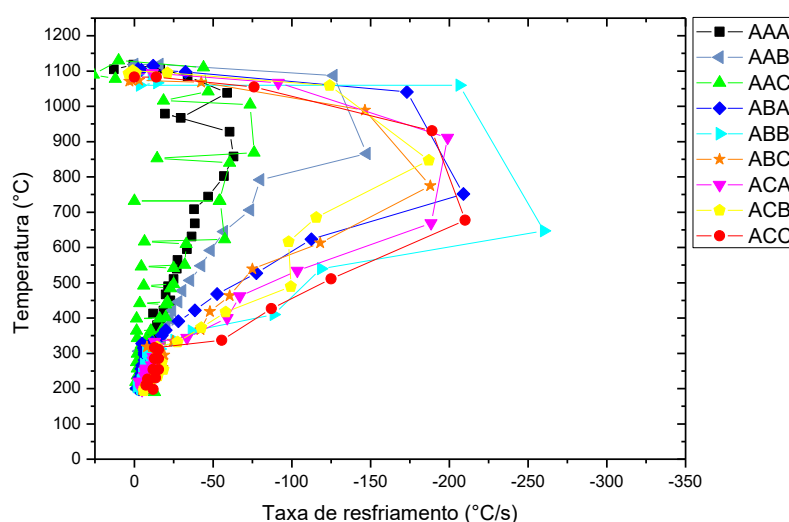


Gráfico 4.10 –Taxa de resfriamento em função da temperatura para o grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$)

Fonte: dados de Pesquisa

Um comportamento semelhante ao percebido no Gráfico 4.10 pode ser observado no Gráfico 4.11 onde é apresentada a taxa de resfriamento em função da temperatura das amostras do grupo B de rugosidade. Nota-se mais uma vez que os parâmetros rotação (n) e velocidade de deposição (V_d) combinados são os responsáveis pelas menores (BAA) e maiores (BCC) taxas de resfriamento do conjugado. Os conjugados BAA ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$), BAB ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$) e BAC ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$) apresentaram taxas de resfriamento mais baixas, enquanto os conjugados BBC ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$), BCB ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$) e BCC ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$) apresentaram taxa de resfriamento mais elevadas.

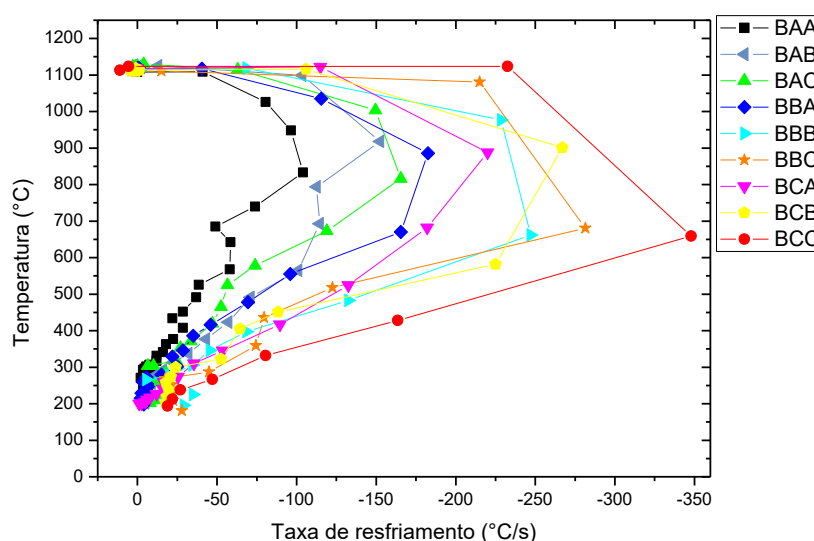


Gráfico 4.11 –Taxa de resfriamento em função da temperatura para o grupo B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$)

Fonte: dados de Pesquisa

A mesma análise para os Gráficos 4.10 e 4.11 pode ser aplicada ao Gráfico 4.12 onde é apresentada a taxa de resfriamento em função da temperatura das amostras do grupo C de rugosidade.

Entretanto, alguns pontos mensurados durante a deposição dos conjugados CAB ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$) e CBB ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 2850 \text{ mm/min}$). podem ter levado a uma variação no comportamento das curvas dessas amostras. Todavia, de forma geral nota-se as taxas de resfriamento mais baixas para os conjugados CAA ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$) e CAC ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$) e as taxas de

resfriamento mais altas para os conjugados CCB ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$) e CCC ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$).

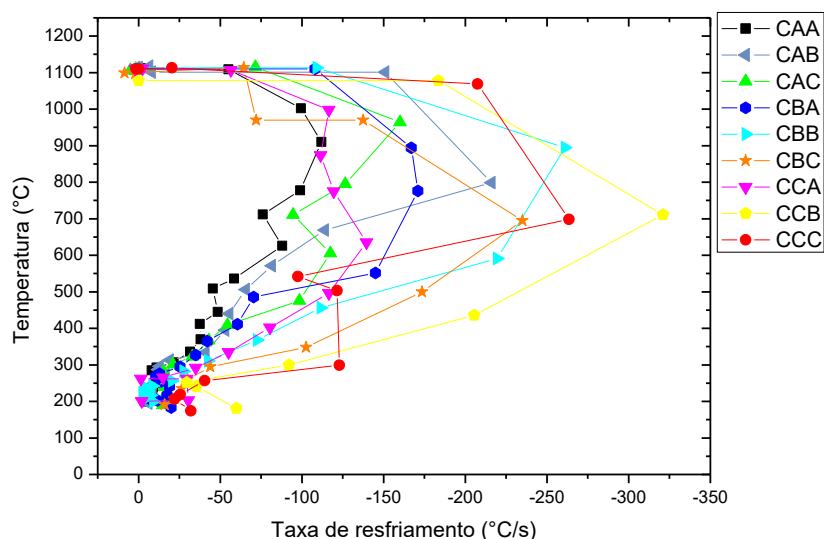


Gráfico 4.12 –Taxa de resfriamento em função da temperatura para o grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$)
Fonte: dados de Pesquisa

Ao se comparar os Gráficos 4.10, 4.11 e 4.12 nota-se, de forma geral, que ao aumentar simultaneamente a rotação e a velocidade de deposição, a taxa de resfriamento atinge valores significativamente mais elevadas em comparação com as amostras de baixa rotação e velocidade de deposição (entre 200 e 350 °C/s para os conjugados obtidos com parâmetros nos níveis máximos e entre 60 e 110 °C/s para os conjugados obtidos com os parâmetros nos níveis mínimos). Este comportamento pode estar relacionado às diferenças na geometria do revestimento, uma vez que as amostras obtidas com os parâmetros mínimos exibiram maior largura e espessura em comparação com as amostras obtidas com os parâmetros de deposição máximos, e, portanto, foram necessários tempos mais longos para esfriar após a deposição.

Vale ressaltar, no entanto, que mesmo as taxas mais baixas de resfriamento registradas são comparáveis às taxas de resfriamento observadas durante a têmpera do aço ABNT 4340. Portanto, é possível esperar que em todos os casos os revestimentos exibam uma microestrutura predominantemente martensítica. As elevadas taxas de resfriamento observadas no processo FSS são devido ao volume relativamente pequeno dos revestimentos em comparação ao substrato e, consequentemente, às altas taxas de transferência de calor por condução.

4.6 Avaliação dimensional dos revestimentos

Os valores médios bem como os respectivos desvios padrões (DP) das dimensões das larguras e espessuras dos revestimentos são apresentados na Tabela 4.5. Os valores das dimensões dos comprimentos não são levados em consideração, uma vez que este é definido pela programação da máquina ferramenta. Verificou-se um erro sistemático da máquina de medição por coordenadas (MMC) de 0,0057 mm. Obtidos os valores médios de larguras e espessuras, realizou-se a compilação desses resultados nos Gráficos 4.16 e 4.17 onde nota-se uma pequena variação nos resultados das larguras e espessuras quando variado apenas os valores das rugosidades dos substratos.

Observa-se, entretanto, uma tendência nas variações do comportamento da largura e espessura em função dos parâmetros de entrada. Verifica-se os maiores valores de largura para os conjugados BAB, AAB e BAA com valores respectivos de 17,66 mm, 17,48 mm e 17,21 mm todos referente à menor rotação ($n = 1500$ rpm). Os menores valores de largura foram observados nos conjugados ACC, BCC e BCB com os valores 12,37 mm, 12,72 mm e 12,92 mm todos para o valor de rotação mais alto ($n = 3000$ rpm).

Em relação à espessura, notam-se os maiores valores de 2,22 mm 2,09 mm e 2,08 mm referente aos conjugados AAA, CAA e BAA respectivamente todos depositados utilizando a menor velocidade de deposição ($V_d = 190$ mm/min). As espessuras de menores valores foram obtidas respectivamente nos conjugados ACC (1,11 mm), ABC e CCC (ambos 1,17 mm).

TABELA 4.5
Largura e espessura dos revestimentos

Conjugado	Largura*	DP	Espessura*	DP
AAA	15,67	0,13	2,22	0,33
AAB	17,48	0,62	1,92	0,43
AAC	15,10	0,88	1,80	0,26
ABA	13,85	0,15	1,95	0,27
ABB	13,60	0,75	1,61	0,37
ABC	12,84	0,33	1,17	0,18
ACA	13,67	0,62	1,18	0,11
ACB	13,16	0,61	1,19	0,20
ACC	12,37	0,45	1,11	0,29
BAA	17,21	0,69	2,08	0,09
BAB	17,66	0,53	1,51	0,33
BAC	17,06	0,21	1,52	0,30
BBA	14,34	0,38	1,68	0,15
BBB	13,58	0,84	1,48	0,25
BBC	12,95	0,86	1,39	0,28
BCA	13,07	0,58	1,38	0,13
BCB	12,92	0,52	1,40	0,20
BCC	12,73	0,80	1,21	0,30
CAA	16,12	0,44	2,09	0,03
CAB	15,82	0,32	1,82	0,30
CAC	15,08	0,32	1,82	0,30
CBA	13,76	0,29	1,60	0,22
CBB	13,49	0,64	1,38	0,15
CBC	13,47	0,84	1,22	0,20
CCA	12,98	0,05	1,88	0,11
CCB	13,61	0,53	1,18	0,24
CCC	12,98	0,89	1,17	0,16

* Unidade de medida (mm)

Fonte: dados do autor

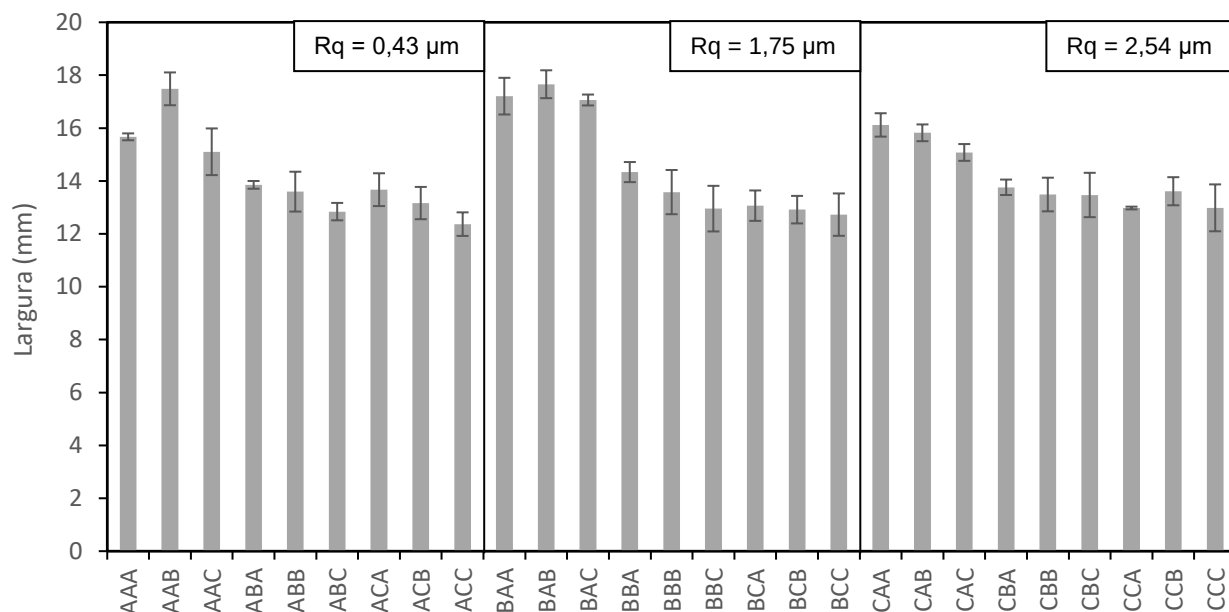


Gráfico 4.13 – Influência dos parâmetros de deposição sobre a largura dos revestimentos

Fonte: dados do autor

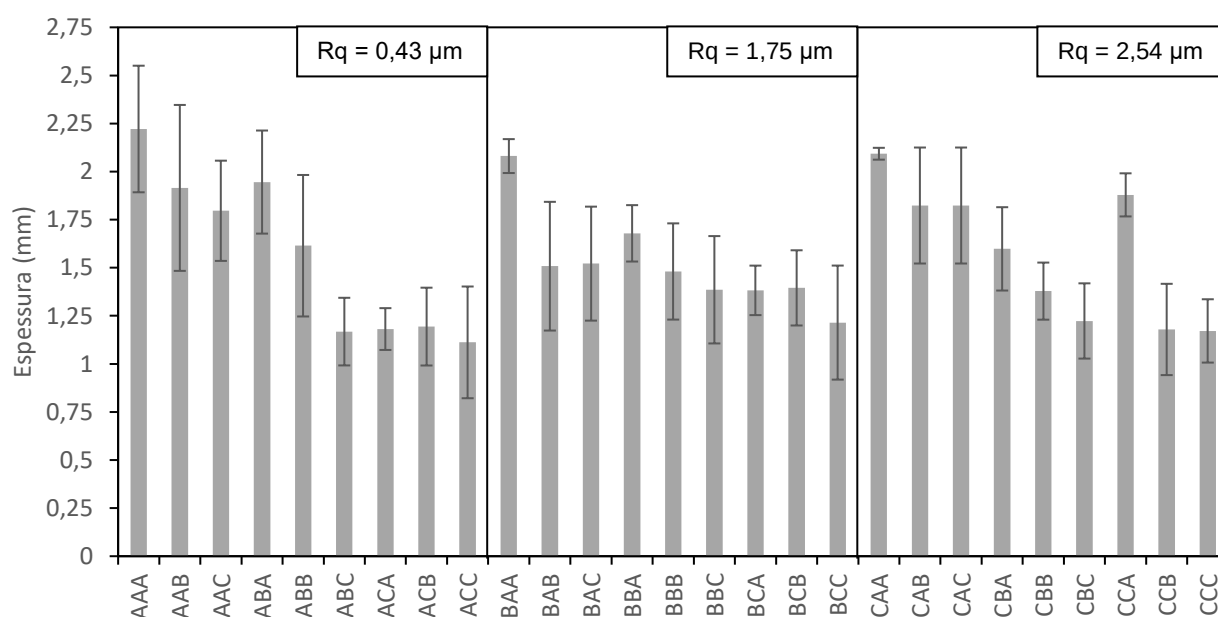


Gráfico 4.14 – Influência dos parâmetros de deposição sobre a espessura dos revestimentos

Fonte: dados do autor

Os Gráficos 4.13 e 4.14, sugerem que, em geral, tanto a rotação da haste consumível como a velocidade de deposição apresentam influência sobre a largura e espessura do revestimento, sendo a rotação mais influente nas variações da largura ao passo que a velocidade de deposição tem maior influência sobre a espessura.

Com o aumento da rotação nota-se uma redução da largura bem como da espessura. Esse comportamento pode ser explicado pela presença de um plano rotacional real de contato que reduz a região de contato entre a haste consumível e o substrato com o aumento da rotação diminuindo a transferência de material. Resultados semelhantes foram obtidos por Rafi *et al.* (2010), Macedo (2011), Gandra *et al.* (2014), Perez (2016), Troysi (2016).

Com o aumento da velocidade de deposição percebe-se que também há uma diminuição da largura do revestimento, entretanto, a variação da espessura ocorre de maneira mais acentuada. Tal fenômeno pode ser explicado em função de um menor tempo de contato entre a haste consumível e o substrato, diminuindo a energia de entrada para o processo. Tal afirmação corrobora os trabalhos realizados por Gandra *et al.* (2012), Kumar *et al.* (2015), Perez (2016), Rafi *et al.* (2010).

Percebe-se, entretanto, que as alterações da rugosidade não causaram uma variação significativa nos resultados dos dimensionais de largura e espessura.

4.7 Análise das microestruturas após o processo de FSS

Para discussão dos resultados obtidos pelas análises de microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram selecionadas as amostras depositadas com rotação e velocidade de deposição nos níveis mínimos e máximos para cada grupo de rugosidade: AAA ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$), ACC ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$), BAA ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$), BCC ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$), CAA ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$) e CCC ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$). Ademais, no conjugado CAC ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$) foi realizada análise da região de interface revestimento e substrato por meio da técnica de EDS para evidenciar o fenômeno da mistura mecânica.

A seleção das amostras foi feita levando em consideração os grupos de rugosidade e os parâmetros mais brandos e severos de rotação e velocidade de deposição com o intuito de realçar possíveis variações nos mecanismos de adesão e nas microestruturas.

Nas Figuras 4.5 e 4.6 podem ser observadas as micrografias do substrato e da haste consumível, respectivamente, antes do processo de deposição. Percebe-se na Figura 4.5 uma microestrutura típica do aço ASTM A36 composta por ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras) em volume condizente com o percentual de carbono do material.

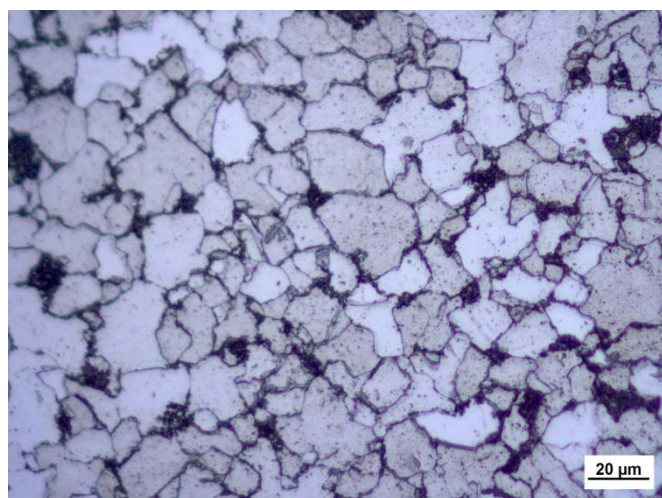


Figura 4.5 – Micrografia do substrato de aço ASTM A36
Fonte: dados do autor

A Figura 4.6 mostra a microestrutura do aço ABNT 4340 normalizado. Observa-se a provável presença de ferrita, perlita fina e bainita. Como o teor de carbono é superior ao do substrato, nota-se maiores áreas de colônias de perlita. A presença de carbonetos que poderiam precipitar a partir dos elementos de liga Cr e Mo não foi notada.

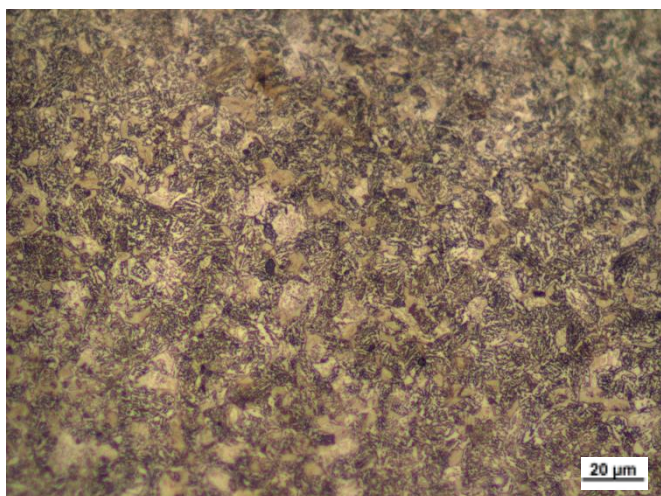


Figura 4.6 – Micrografia da haste consumível de aço ABNT 4340 no estado normalizado
Fonte: dados do autor

A Figura 4.7 apresenta a microestrutura do conjugado AAA, obtida após a deposição do revestimento com os parâmetros $R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$. A Figura 4.7(a), região do revestimento, sugere a presença martensita em forma de lâminas de forma maciça e bainita. Na Figura 4.7(b), região de ZTA abaixo da interface, uma possível microestrutura formada por ferrita (acicular e Widmanstätten), que pode ser esperada em aços de baixo carbono sujeitos a resfriamento rápido, além de colônias de perlitas finas. Percebe-se na Figura 4.7(c) uma região de transição parcialmente transformada entre a ZTA e o substrato formada por perlita degenerada (esboroadas) e ferrita pró-eutetóide e por fim, na Figura 4.7(d) verifica-se o substrato sem alterações metalúrgicas formado por ferrita e perlita.

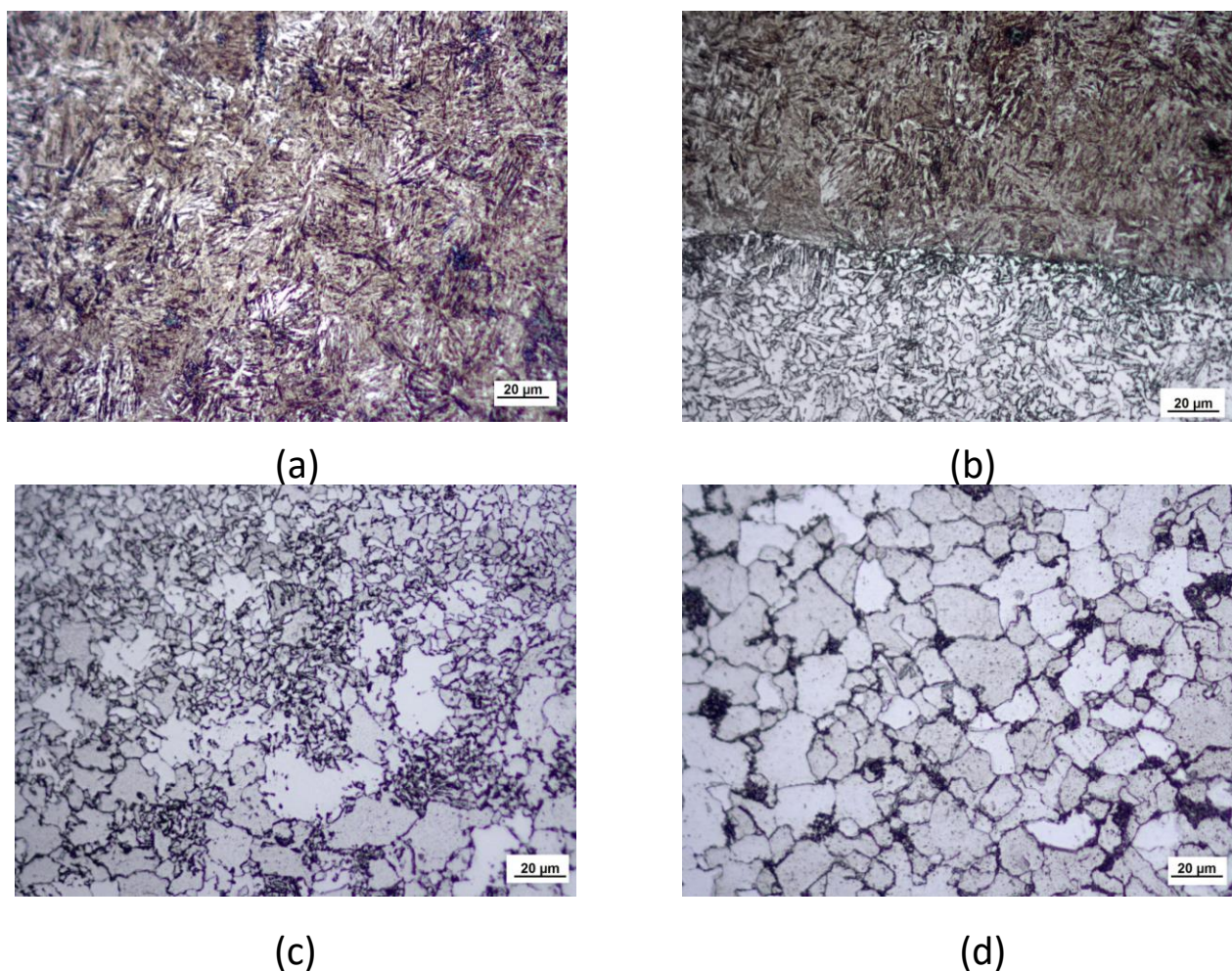
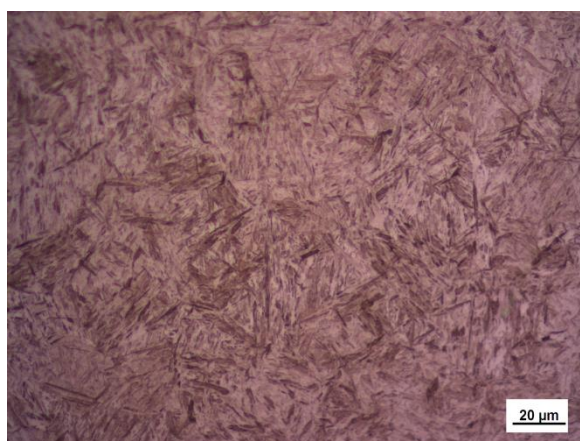
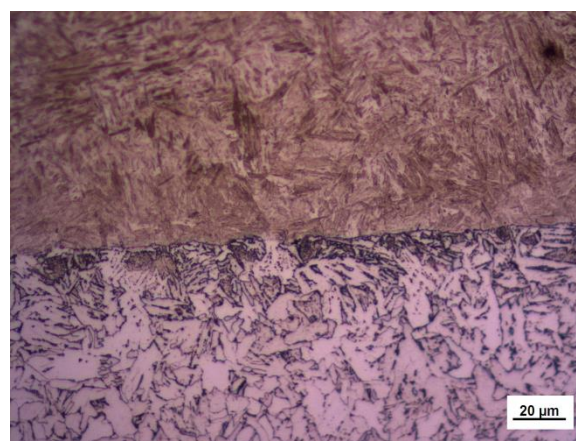


Figura 4.7 – Micrografia do conjugado AAA ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$): (a) revestimento, (b) ZTA, (c) transição entre ZTA e substrato e (d) substrato
 Fonte: dados do autor

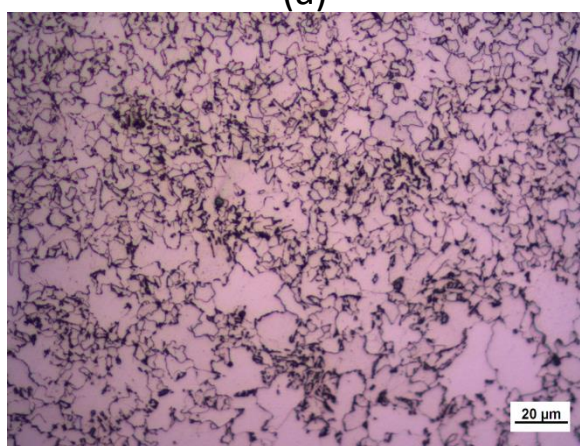
Em se tratando dos mesmos materiais do substrato (aço ASTM A36) e haste consumível (aço ABNT 4340), dos mesmos parâmetros de entrada (rotação de 1500 rpm e velocidade de deposição de 190 mm/min), apesar da variação da rugosidade do substrato nota-se uma grande semelhança nas microestruturas dos conjugados AAA, BAA e CAA conforme pode ser verificado nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, respectivamente. Como na amostra AAA, sugere-se a presença de martensita no revestimento das Figuras 4.8(a) e 4.9(a). Nas Figuras 4.8 (b) e 4.9(b), região de ZTA, observa-se uma microestrutura com a provável presença de ferrita (acicular e Widmanstatten) e perlita fina. Nas Figuras 4.8(c) e 4.9(c) pode ser vista a região de transição entre a ZTA e o substrato formado por ferrita pró-eutetóide e perlita esboroada e nas Figuras 4.8(d) e 4.9(d) verifica-se o substrato com o aspecto como recebido, formado por ferrita e perlita.



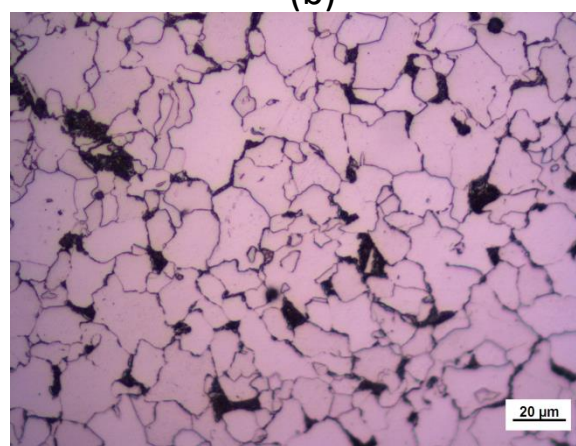
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.8 – Micrografia do conjugado BAA ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$): (a) revestimento, (b) ZTA, (c) transição entre ZTA e substrato e (d) substrato.
Fonte: dados do autor

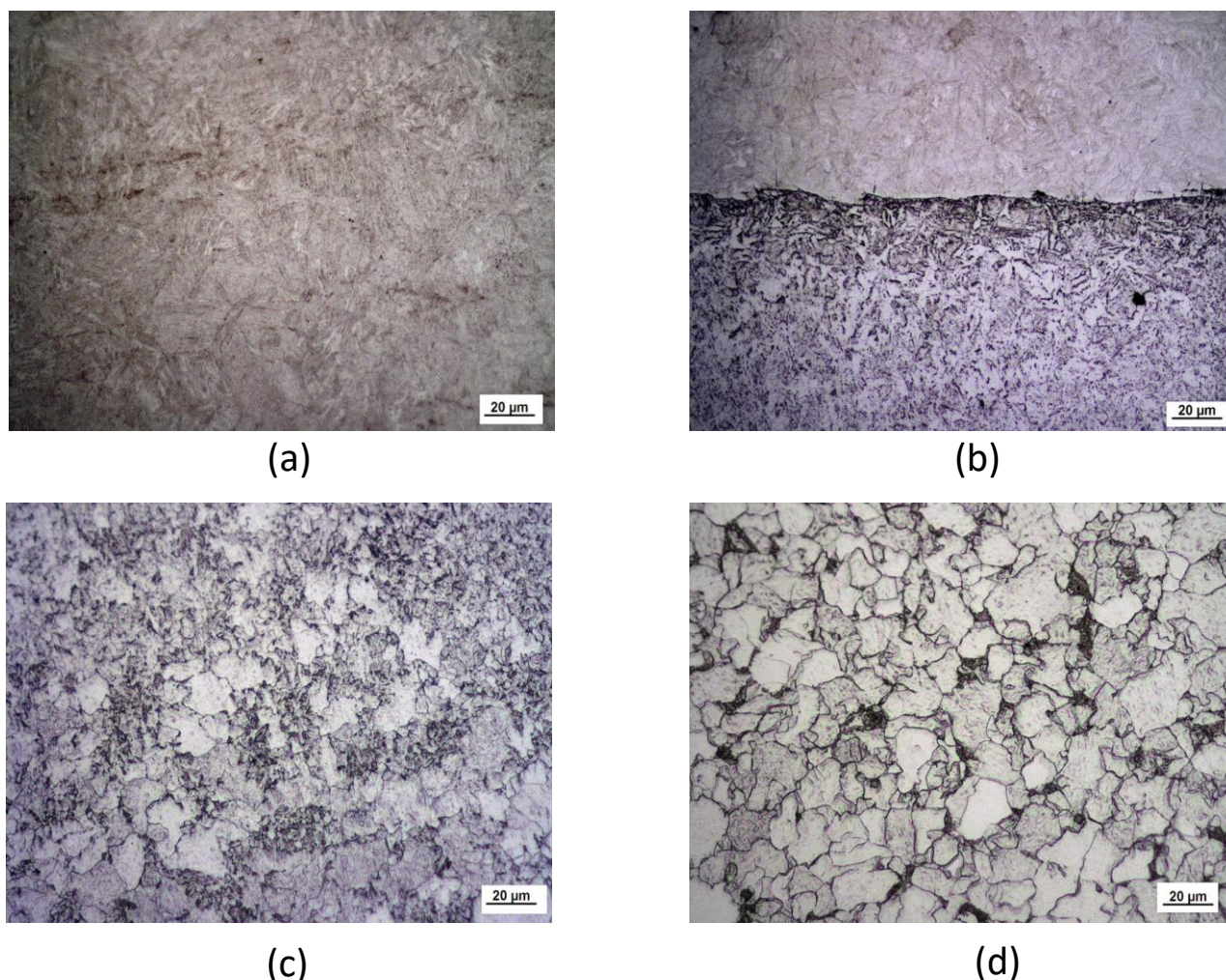


Figura 4.9 – Micrografia do conjugado CAA ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$): (a) revestimento, (b) ZTA, (c) transição entre ZTA e substrato e (d) substrato.

Fonte: dados do autor

Verifica-se nas Figuras 4.7(b), 4.8(b) e 4.9(b) as regiões de interface entre os revestimentos e substratos das deposições realizadas com rugosidades R_q de $0,43 \mu\text{m}$, $1,75 \mu\text{m}$ e $2,54 \mu\text{m}$, respectivamente, e parâmetros de rotação e velocidade de deposição constantes (1500 rpm e 190 mm/min). Apesar das semelhanças nas microestruturas, pode ser percebida uma variação dos aspectos das interfaces em função da variação da rugosidade, onde na Figura 4.7(b), referente à amostra AAA, tem-se uma interface relativamente lisa sem a presença das ondulações que podem ser notadas na Figura 4.8(b), referente à amostra BAA, além de serem identificadas reentrâncias na interface da amostra, CAA conforme nota-se na Figura 4.9b.

Sugere-se que os valores das rugosidades nas interfaces sejam relevantes para se avaliar os mecanismos de adesão dos revestimentos nos substratos o que é corroborado pelas Figuras 4.7 a 4.9

dos conjugados AAA, BAA e CAA. É provável que nas amostras com o menor valor de rugosidade (grupo A – Figura 4.7) a junção ocorra por meio do mecanismo de adesão por ligações químicas enquanto nas amostras com maiores valores de rugosidade (grupo C – Figura 4.9), pressupõe-se que haja o mecanismo de ligação química aliado ao mecanismo de ancoragem mecânica nas regiões de maiores protuberâncias dos picos do substrato. As amostras do grupo B (Figura 4.8) por sua vez apresentam ondulações com menores picos de asperezas sendo, portanto, mais comum a adesão por ligações químicas.

Notou-se ainda um comportamento semelhante nas amostras que foram depositadas utilizando rotação e velocidade de deposição mais elevadas (3000 rpm e 380 mm/min respectivamente). Na Figura 4.10a verifica-se a interface livre de ondulações e reentrâncias (amostra ACC), seguida pela amostra BCC (Figura 4.10b), com a interface apresentando um aspecto com ondulações e a amostra CCC, (Figura 4.10c), onde pode ser notada uma interface com a presença de reentrâncias entre substrato e o revestimento.

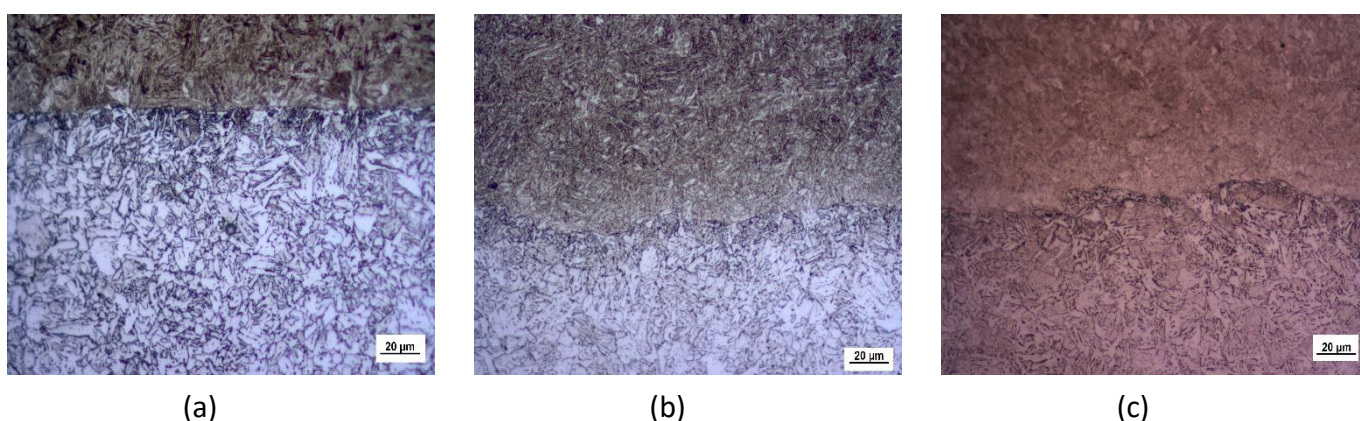


Figura 4.10 – Micrografias das interfaces dos conjugados: (a) amostra ACC, (b) amostra BCC e (c) amostra CCC.
Fonte: dados do autor

Ainda com relação às microestruturas dos conjugados e conforme observado por Vitanov e Voutchkov (2005), Tokisue (2006) e Gandra (2014), há a presença de uma região onde se percebe uma falha por falta adesão do revestimento ao substrato, localizada nas bordas do revestimentos e conhecida como zona de solda fria. Esse fenômeno foi observado em todas as condições de deposição e é realçado na Figura 4.11 para o conjugado CAA.

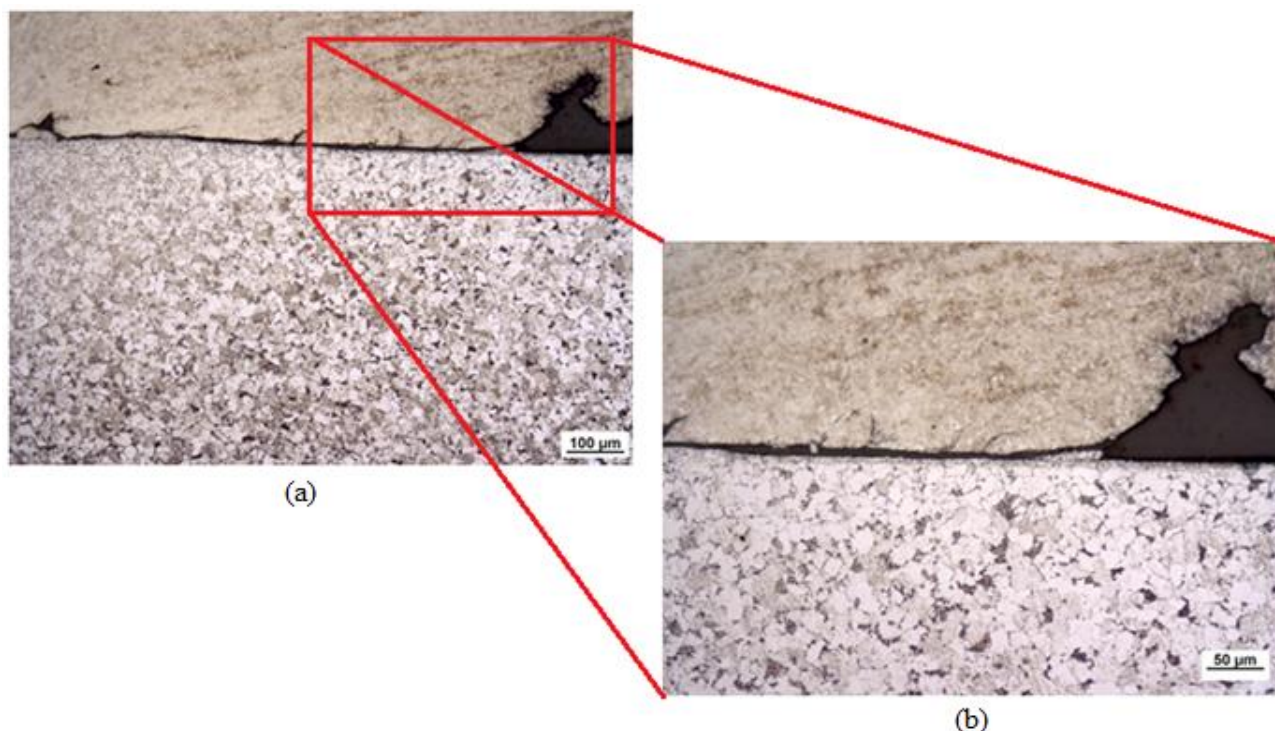


Figura 4.11 – (a) Micrografia do conjugado CAA ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$) evidenciando a região de solda fria. (b) detalhe da região de solda fria
Fonte: dados do autor

Esse defeito, conforme descrito no item 2.2, é causado pela redução do contato da haste consumível com o substrato, de forma que parte do material da haste é recalcada e flui radialmente, o que gera uma região de rebarba na ponta da haste, conhecida como *flash*. Este fenômeno prejudica a adesão das laterais do revestimento, confirmando o que foi proposto por Nicholas (1993).

Ainda para a amostra CAA, uma região com redução do tamanho dos grãos pode ser notada na Figura 4.12 no substrato próxima à interface. Isto pode ser atribuído à deformação plástica e à alta temperatura na interface, seguidos do fenômeno da recristalização da austenita, o que pode ter favorecido a nucleação de novos grãos de ferrita e perlita durante o resfriamento.

Segundo Mazzaferro (2008), quando um material é solicitado ocorre inicialmente a deformação plástica e o aumento da densidade de discordâncias nas fronteiras entre os grãos, o que provoca o fenômeno do encruamento. Se esta deformação atingir um nível crítico de energia a uma determinada faixa de temperatura ocorrerá a recristalização dinâmica, ou seja, um rearranjo do sistema para minimizar a quantidade de energia interna, formando novos grãos e obtendo, desta forma, uma microestrutura mais refinada. Sugere-se que a recristalização dinâmica possa ser considerada como

uma resposta intrínseca ao processo de revestimento por atrito em função da carga axial aplicada somada à temperatura de deposição proveniente do atrito entre haste consumível e substrato.

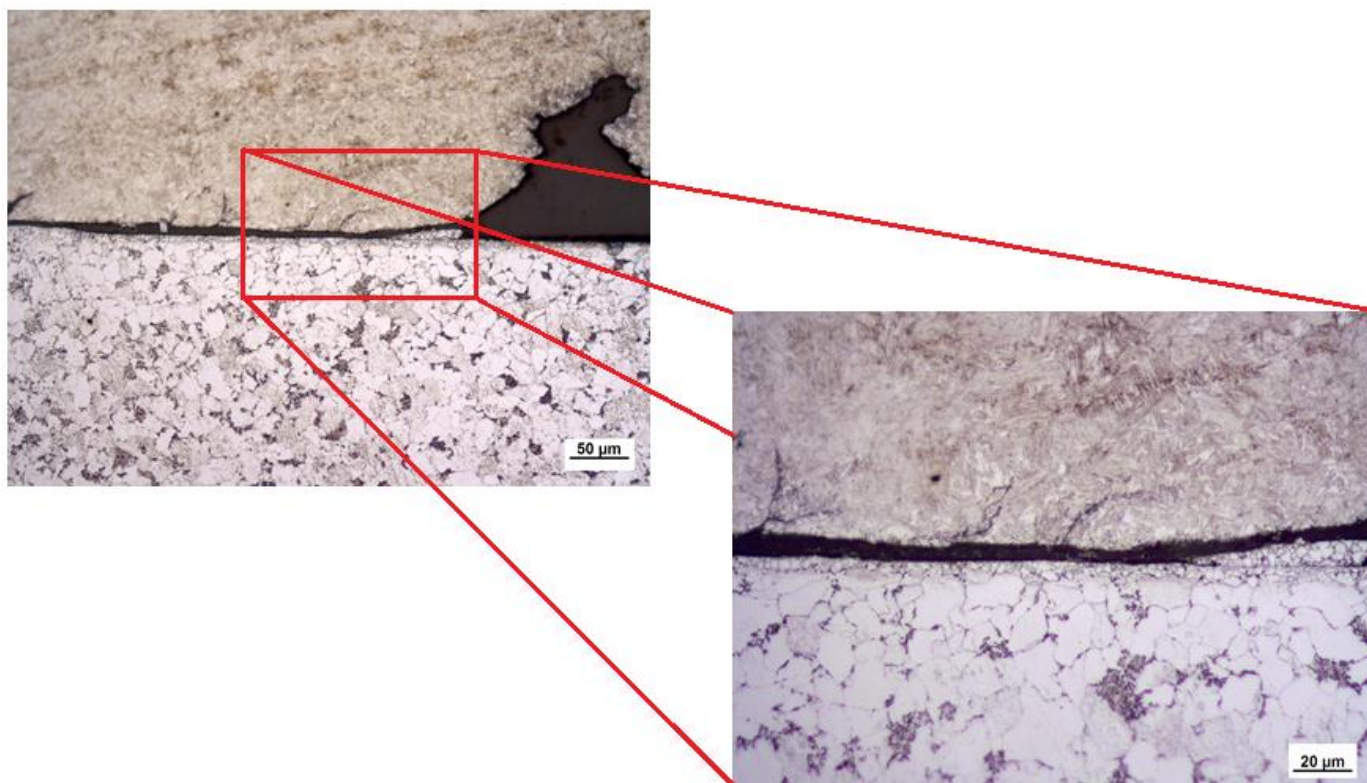


Figura 4.12 – Micrografia do conjugado CAA evidenciando em detalhe a região de refino de grão.

Fonte: dados do autor

Para identificar a ocorrência da mistura mecânica foi selecionada de maneira aleatória a amostra CAC ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$) e buscou-se analisar os elementos químicos presentes nos revestimento, substrato e região de interface com o intuito de avaliar o efeito da mistura mecânica e/ou difusão de átomos do revestimento para o substrato ou do substrato para o revestimento utilizando a técnica de EDS (espectroscopia de energia dispersiva).

Pode-se notar nas Figuras 4.13 e 4.14 a presença da mistura mecânica na interface de deposição da amostra CAC em regiões diferentes. Ambas as figuras foram obtidas utilizando o detector de elétron secundário para garantir a melhor resolução de imagem.

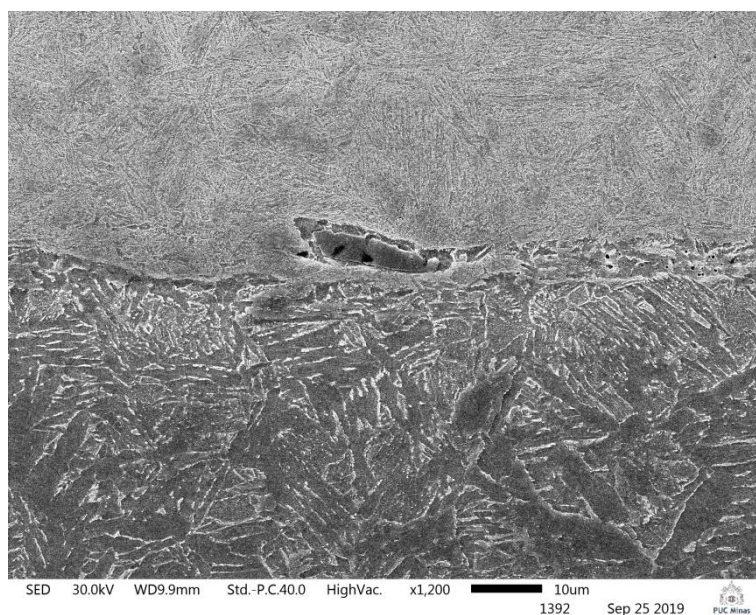


Figura 4.13 – Micrografia do conjugado CAC ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$) evidenciando a região de mistura mecânica.

Fonte: dados do autor

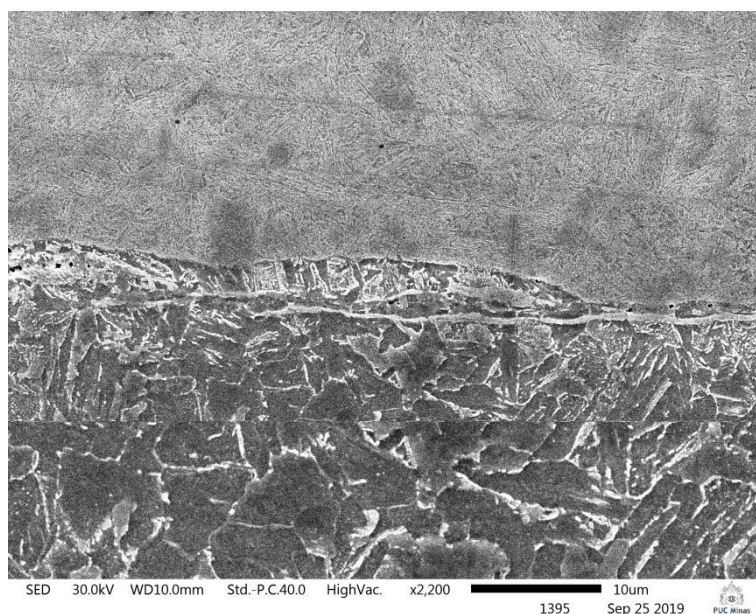


Figura 4.14 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica.

Fonte: dados do autor

Utilizaram diferentes métodos de EDS para análise dos elementos presentes no revestimento, interface e substrato das distintas regiões avaliadas da amostra CAC de maneira a facilitar a visualização da evolução dos elementos presentes em cada região. Referente à Figura 4.13, foi

empregado o método de análise por ponto e o mapeamento de elementos para melhor visualização da região da mistura. Tais resultados podem ser vistos nas Figuras 4.15 a 4.18.

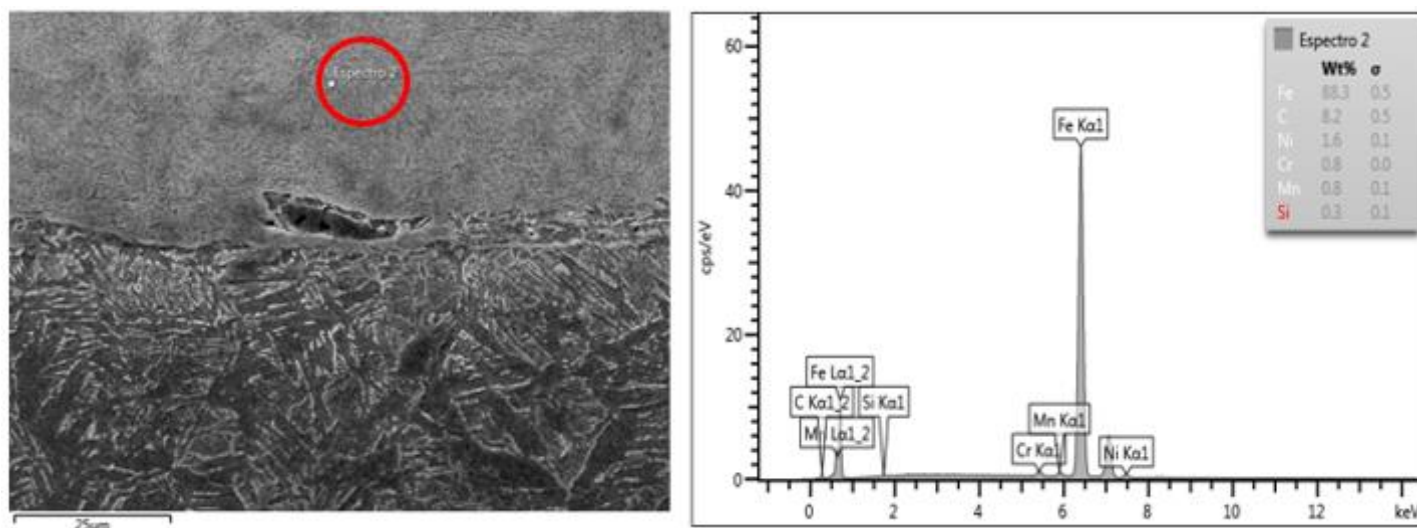


Figura 4.15 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região de revestimento.

Fonte: dados do autor

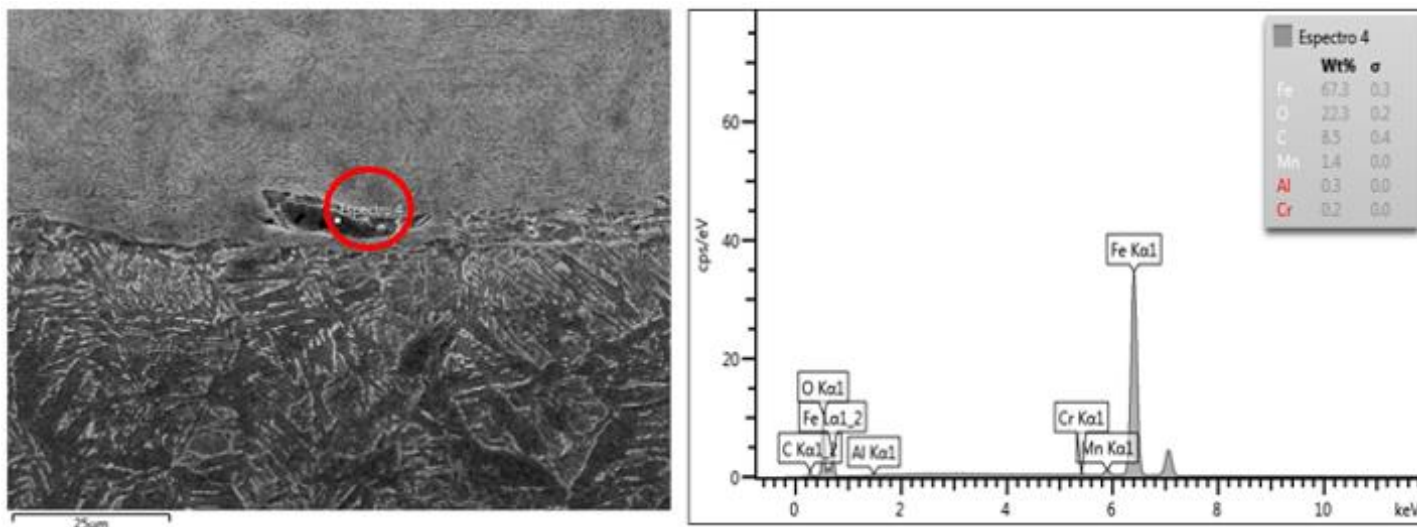


Figura 4.16 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região de mistura.

Fonte: dados do autor

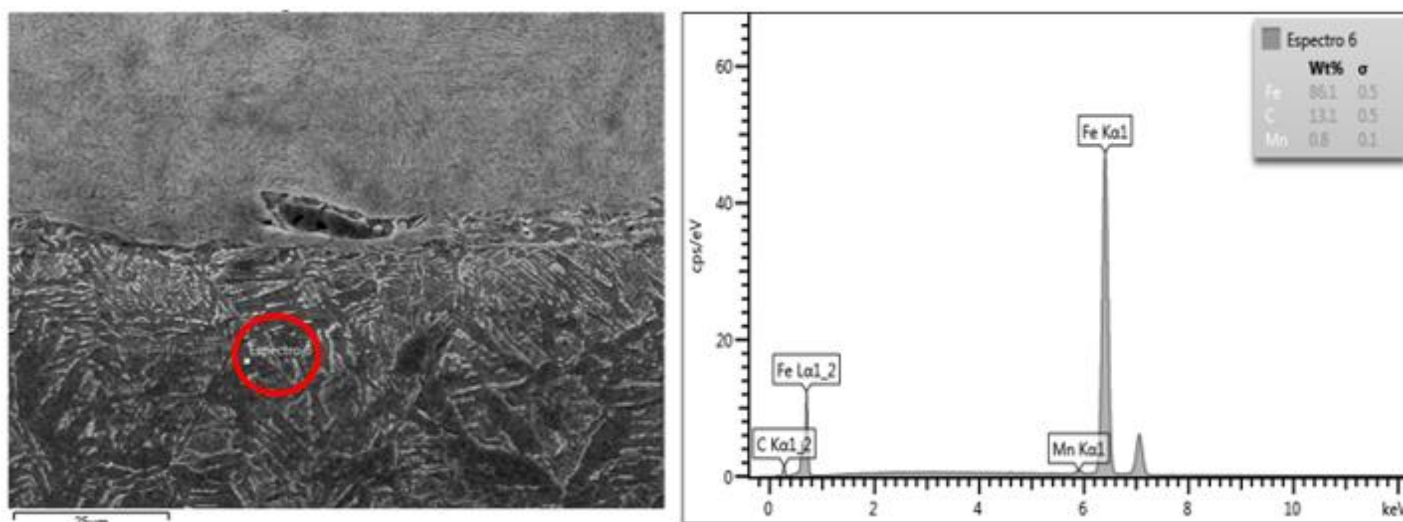


Figura 4.17 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região do substrato.

Fonte: dados do autor

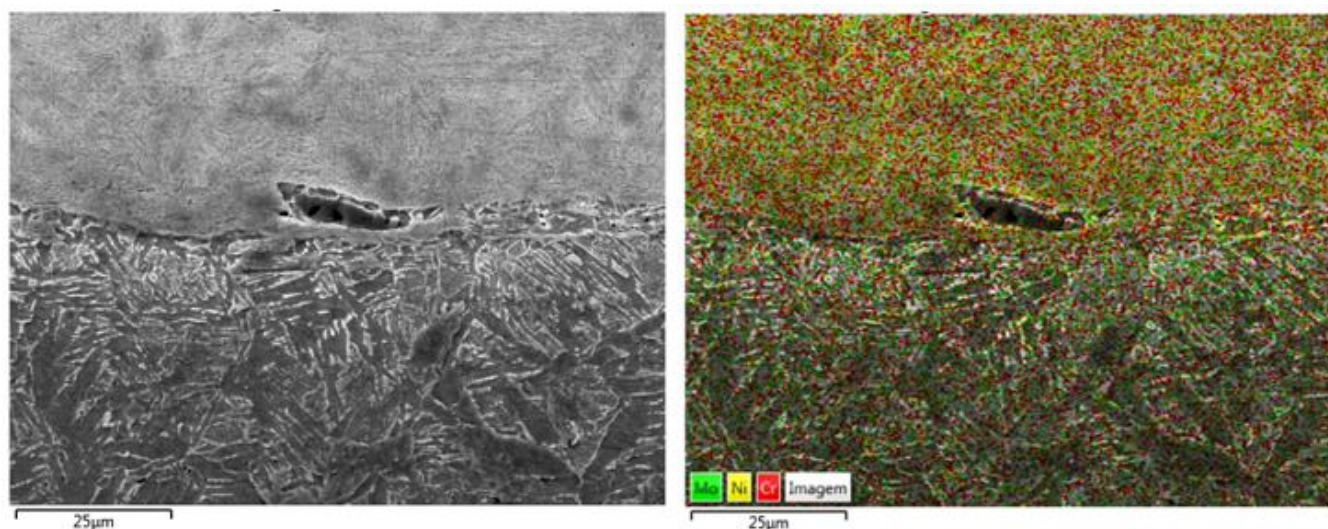


Figura 4.18 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e mapa de EDS.

Fonte: dados do autor

Verifica-se na Figura 4.15, região de revestimento, a presença de elementos tais como Ferro (Fe), Carbono (C), Cromo (Cr), Níquel (Ni) além de Manganês (Mn) e Silício (Si) em baixa percentual, isto é, em conformidade com a composição química do aço ABNT 4340 (material da haste consumível). Na Figura 4.17, região do substrato, verifica-se a presença de Fe, C e Mn, elementos característicos do aço ASTM A36. Na Figura 4.16, região de provável mistura mecânica, o ponto analisado encontra-se na região de revestimento, entretanto nota-se um valor muito baixo de Cr (baixa confiabilidade) e a ausência do elemento Ni. Tal situação permite apontar essa região como de mistura mecânica onde se pode dizer que o material do substrato migrou para a região do revestimento. A

Figura 4.18 confirma a presença da mistura mecânica, uma vez que nota-se no mapeamento de EDS uma alta densidade dos elementos Cr e Ni nas cores vermelho e amarelo, respectivamente, na região de revestimento o que não pode ser notado na região do substrato, indicando que o aço ASTM A36 não possui ou possui tais elementos em baixo percentual. Entretanto, pode-se perceber uma região do revestimento que acusa a falta da coloração vermelha e amarela referente aos elementos Cr e Ni, o que sugere que material do substrato migrou para a região do revestimento, configurando a mistura mecânica.

Com relação à Figura 4.14, foi realizado a análise de EDS por ponto e por linha de elementos para melhor visualização da região da mistura. Tais resultados podem ser vistos nas Figuras 4.19 a 4.22.

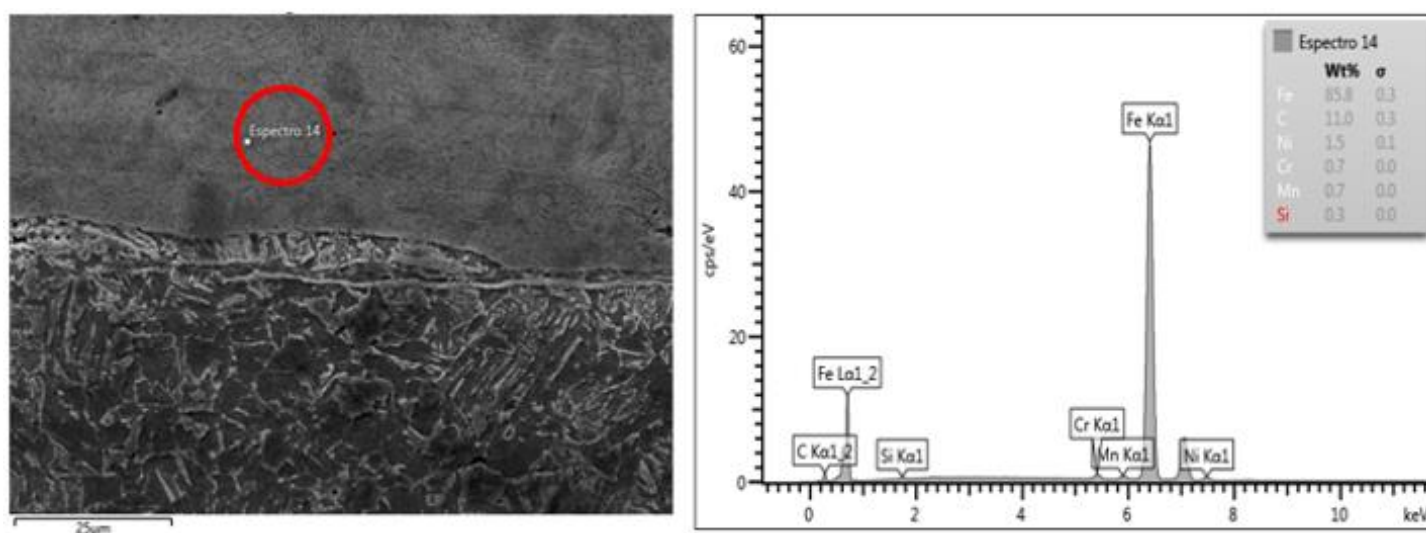


Figura 4.19 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região de revestimento.

Fonte: dados do autor

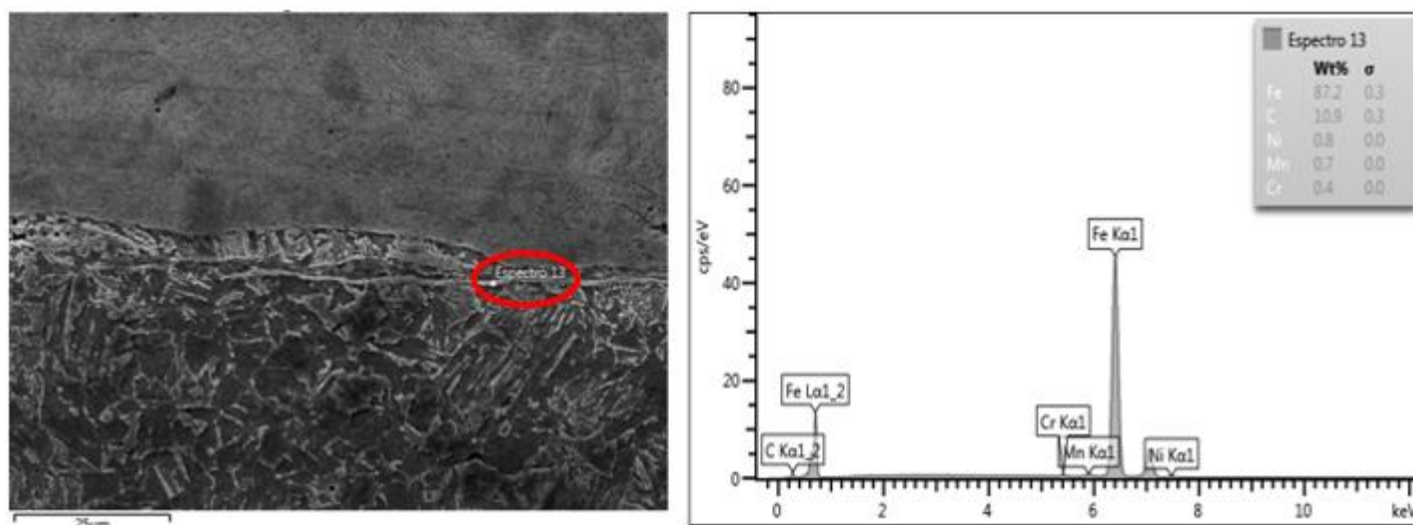


Figura 4.20 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região de mistura.

Fonte: dados do autor

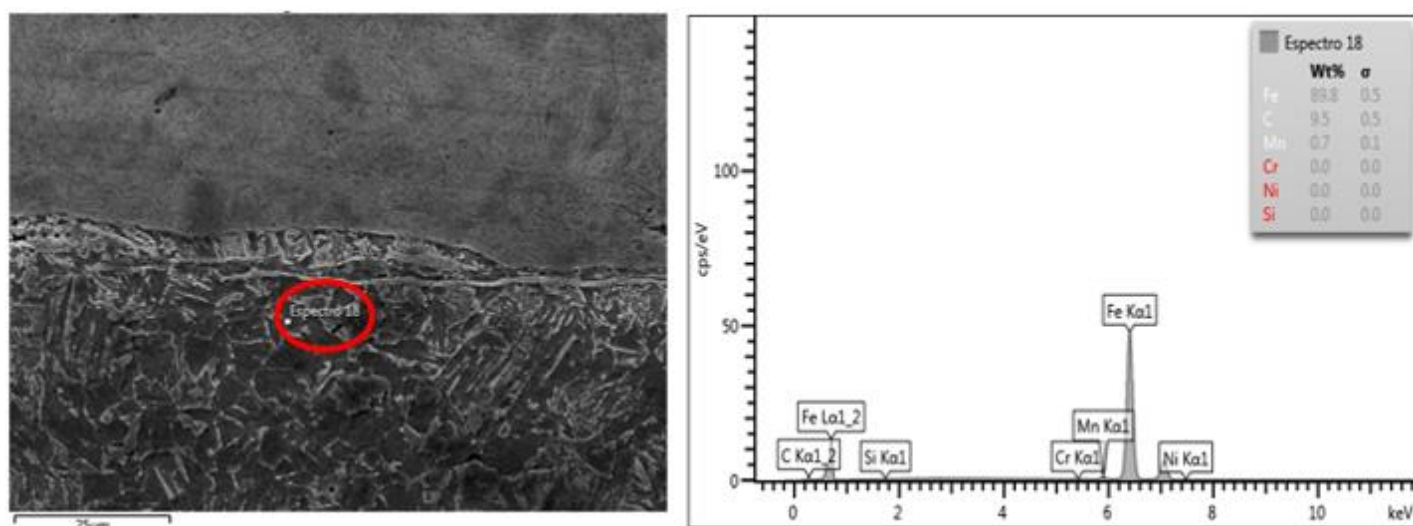


Figura 4.21 – Micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e espectro de EDS da região do substrato.

Fonte: dados do autor

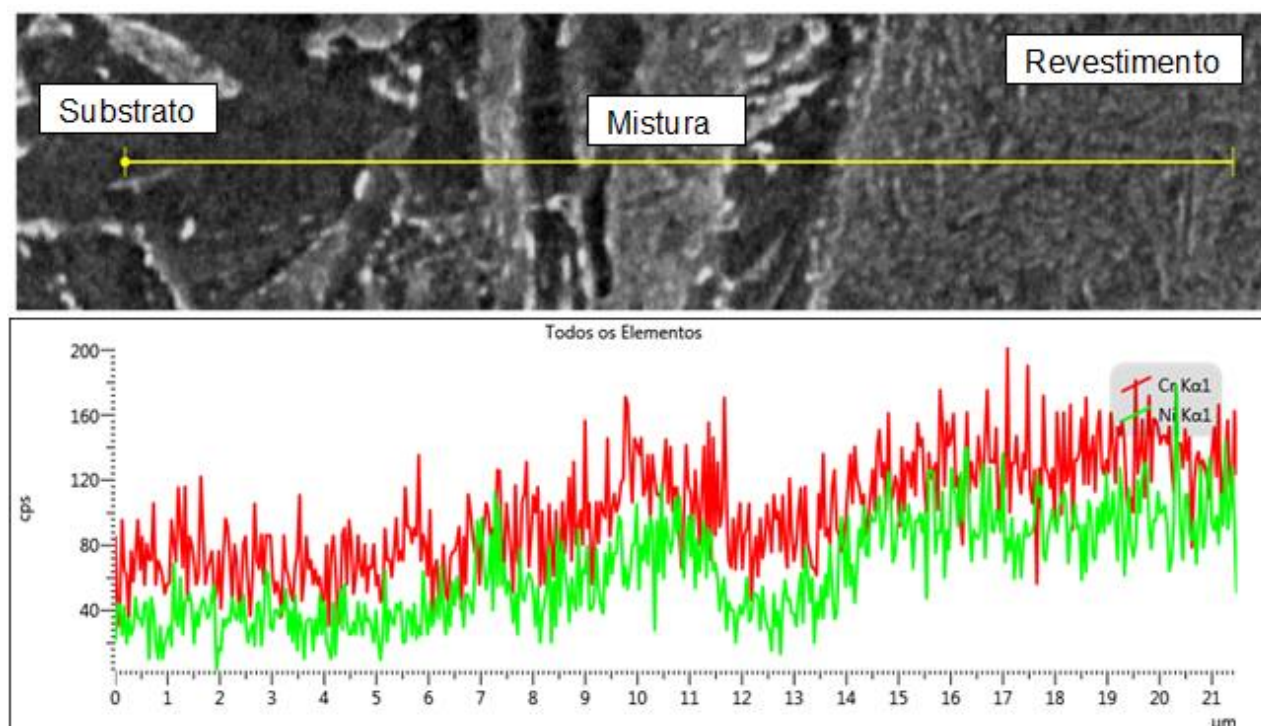


Figura 4.22 – Detalhe da micrografia do conjugado CAC evidenciando a região de mistura mecânica e linha de EDS.
Fonte: dados do autor

Verifica-se na Figura 4.19 um comportamento semelhante ao que foi verificado na Figura 4.15, uma vez que são análises da mesma amostra (CAC) em regiões distintas. Notou-se na região de revestimento a presença dos elementos Fe, C, Cr, Ni, Mn e Si em baixa concentração, resultado em conformidade com a composição do aço ABNT 4340.

Na Figura 4.20 pode ser notada a presença de elementos do revestimento Cr e Ni em uma região predominantemente de substrato. Tal situação comprova que houve a mistura mecânica com materiais do revestimento migrando para a região do substrato. A Figura 4.22 indica em detalhe uma região da interface de deposição onde foi realizada a análise de EDS por linha. Pode-se observar com a evolução da análise da esquerda para a direita inicialmente uma baixa contagem dos elementos Cr e Ni de 0 a aproximadamente 8 μm referente à região do substrato, seguido de um acréscimo destes elementos no intervalo de 8 μm a 12 μm , o que indica a presença da mistura mecânica, uma vez que a contagem dos elementos volta a cair no intervalo de 12 μm a 14 μm . A partir dos 14 μm tem-se novamente um acréscimo na contagem dos elementos, o que indica que a análise está sendo realizada no revestimento.

Na Figura 4.21, região do substrato, verifica-se a presença de Fe, C e Mn, elementos característicos do aço ASTM A36.

4.8 Ensaio de dobramento

A Figura 4.23 mostra o substrato (aço ASTM A36) após o ensaio de dobramento. Realizou-se o ensaio no substrato para se ter base de comparação entre o mesmo e os conjugados obtidos pelo processo de FSS. Nota-se que não há falhas por fratura uma vez que o aço ASTM A36 possui composição química e microestrutura que confere ao material propriedades mecânicas tais como boa ductilidade (20% de alongamento) e tenacidade que favorece a deformação plástica.

Nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 podem ser observados os conjugados após os ensaios de dobramento dos grupos com rugosidade A, B e C, respectivamente. Todas as amostras tiveram o revestimento fraturado em algum momento. Em função dos materiais selecionados (aço ASTM A36 para substrato e aço ABNT 4340 para haste consumível), o conjugado tenderia a aumentar a resistência mecânica e, por conseguinte, teria um prejuízo na ductilidade. Desta forma, em função da maior fragilidade, o revestimento tenderia a formar trincas quando submetido a uma determinada solicitação e estas trincas se propagariam de maneira rápida em um regime instável até atingir a região de substrato, que por ser um material de ductilidade superior tenderia a mudar o estado de propagação da trinca para um regime estável. Esse fenômeno pode ser observado na grande maioria das amostras em função da continuidade metalúrgica (aumento da resistência mecânica no substrato) proveniente da união dos materiais em questão, onde o substrato na região de interface tem um comportamento frágil até atingir uma determinada profundidade onde não há mais influência do material e consequentemente das propriedades do revestimento.

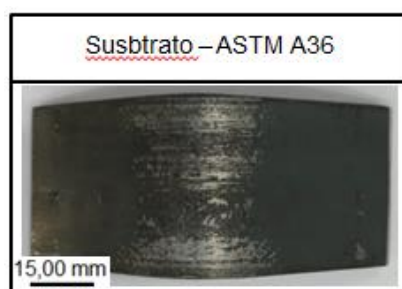


Figura 4.23 – Imagem do substrato de aço ASTM A36 sem revestimento após ensaio de dobramento.
Fonte: dados do autor



Figura 4.24 – Imagens das amostras do grupo A ($R_q = 0,43 \mu m$) após ensaio de dobramento.

Fonte: dados do autor

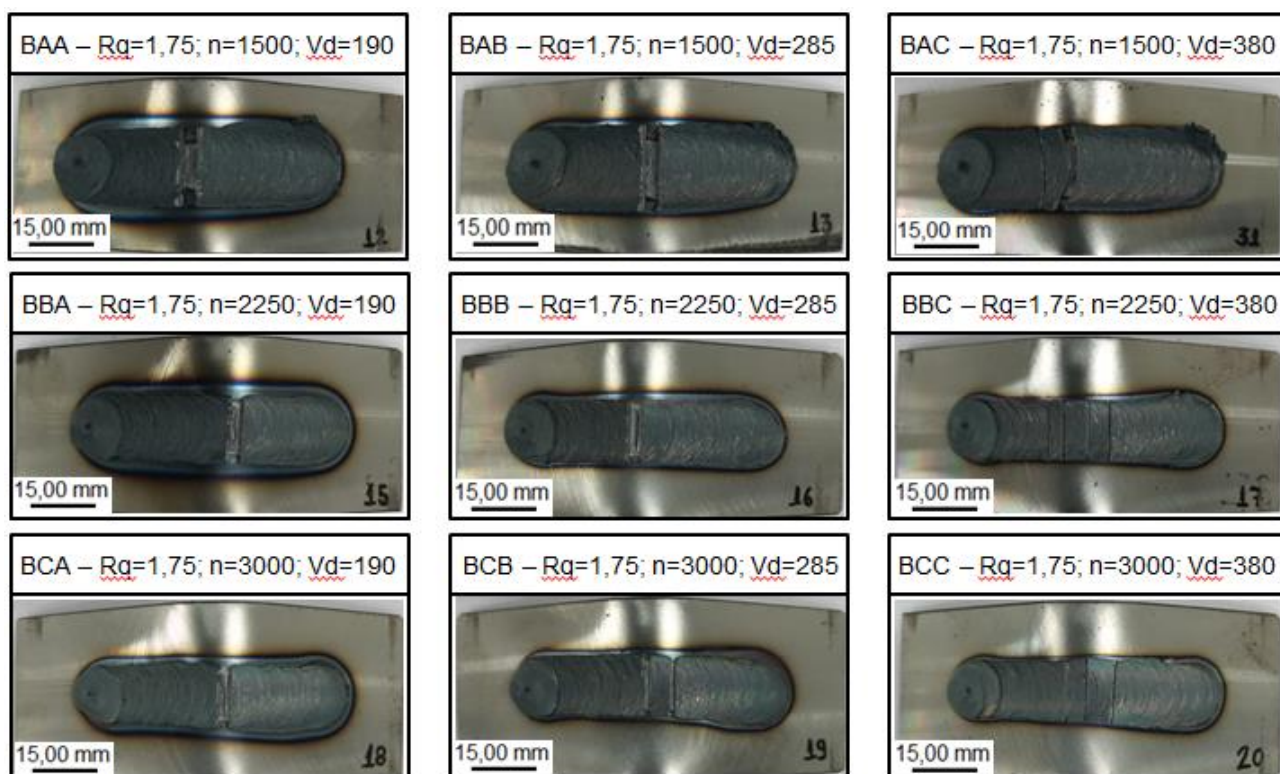


Figura 4.25 – Imagens das amostras do grupo B ($R_q = 1,75 \mu m$) após ensaio de dobramento.

Fonte: dados do autor

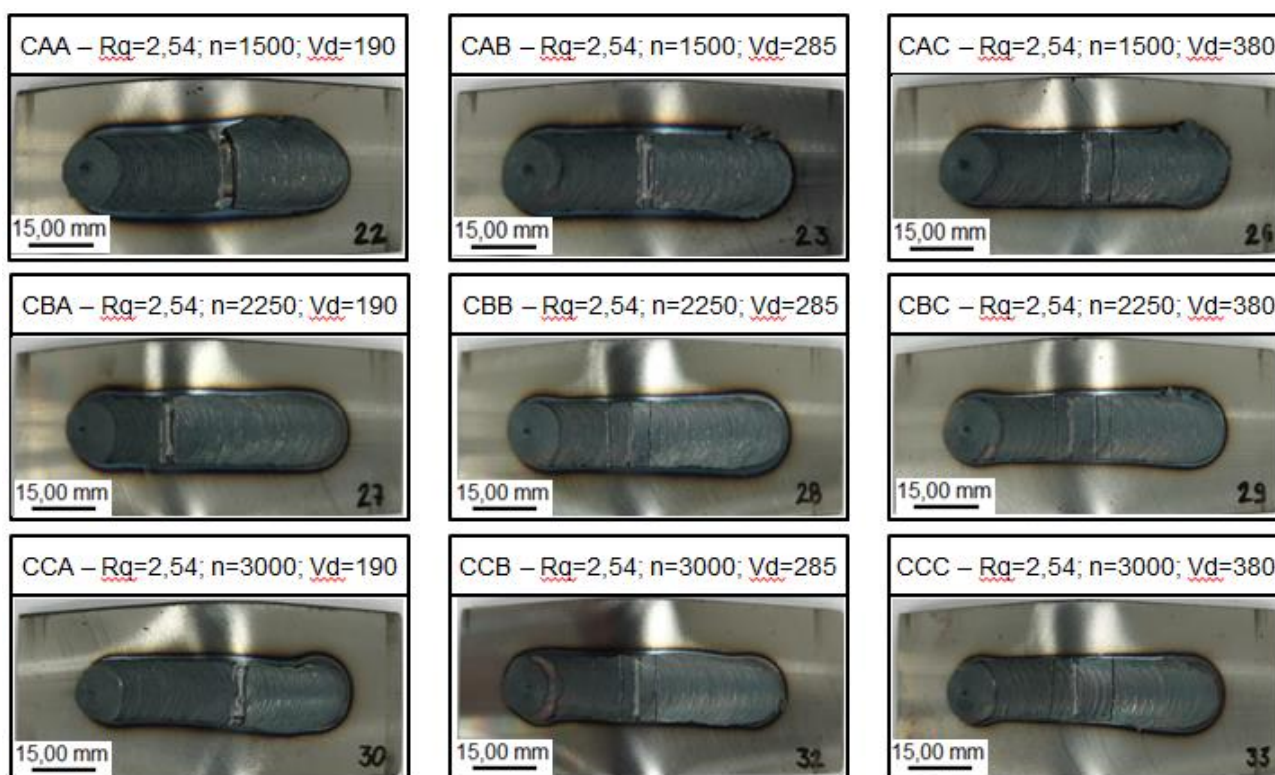


Figura 4.26 – Imagens das amostras do grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$) após ensaio de dobramento.
Fonte: dados do autor

Pode-se notar em algumas amostras que após a ocorrência da fratura do revestimento houve o início de deslocamento do revestimento do substrato. Tais eventos foram percebidos nos conjugados que foram depositados utilizando menores valores de rotação e de velocidade de deposição: AAA, BAA, CAA principalmente, além dos conjugados AAB e BAB. No outro extremo, os conjugados obtidos utilizando maiores valores de rotação e de velocidade de deposição (ACC, BCC e CCC) quando solicitados apresentaram trincas paralelas entre si, porém, não apresentaram falhas de deslocamentos, indicando um comportamento de adesão superior às amostras depositadas com os parâmetros nos níveis mais baixos. Ao confrontar as Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 nota-se um comportamento semelhante entre os conjugados obtidos com os mesmos parâmetros de rotação e velocidade de deposição, independentemente do valor da rugosidade do substrato, sugerindo que a rugosidade não é um fator influente nos aspectos morfológicos dos conjugados quando solicitados por dobramento.

Verifica-se ainda que todos os conjugados quando submetidos ao dobramento apresentaram maiores valores de força para um mesmo deslocamento ao serem comparados com o substrato, indicando que

a deposição do revestimento aumenta a resistência mecânica do conjugado. Entretanto, conforme discutido há a perda de ductilidade dos conjugados evidenciada pelas fraturas ou trincas na região de tração dos revestimentos quando solicitados por meio do ensaio de dobramento. Estas falhas não são percebidas no substrato quando solicitada pelo mesmo esforço de dobramento (Figura 4.23). Tal afirmação pode ser ratificada nos Gráficos 4.15 a 4.17 referentes aos ensaios de dobramento dos conjugados dos grupos A, B e C, respectivamente, e comparados com o substrato.

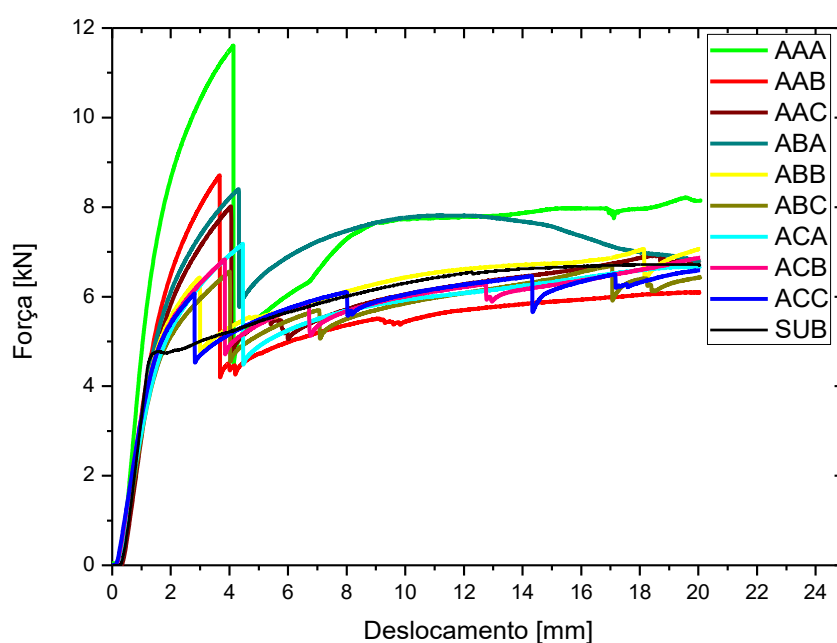


Gráfico 4.15 – Força de dobramento versus deslocamento. Grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$).
Fonte: dados do autor

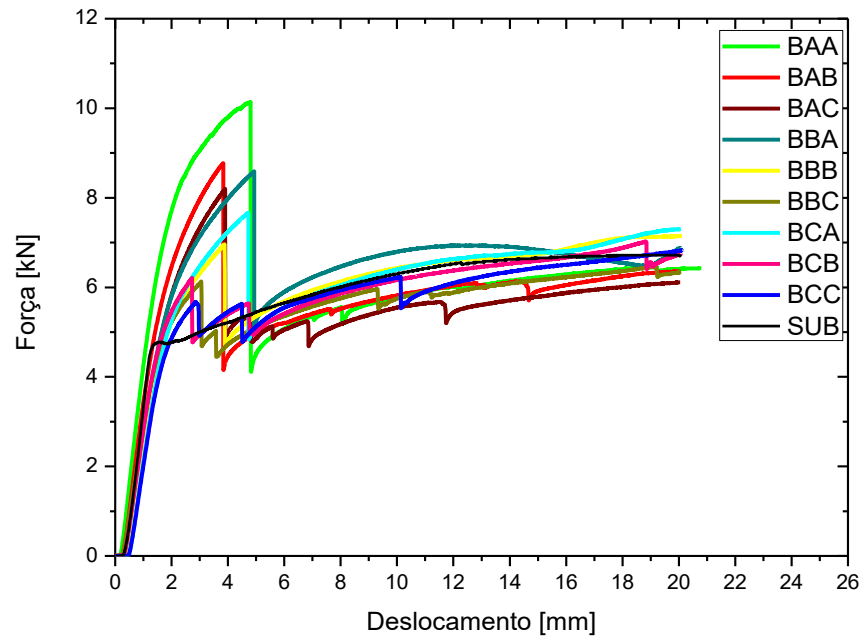


Gráfico 4.16 – Força de dobramento versus deslocamento. Grupo B ($R_q = 1,75 \mu m$)

Fonte: dados do autor

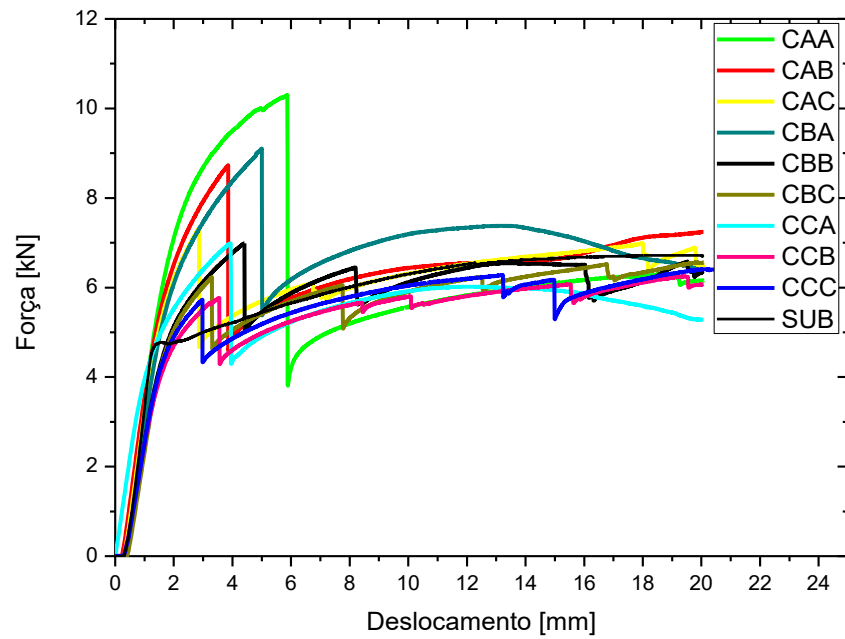


Gráfico 4.17 – Força de dobramento versus deslocamento. Grupo C ($R_q = 2,54 \mu m$)

Fonte: dados do autor

Ao analisar os gráficos de força de dobramento versus deslocamento, nota-se um comportamento semelhante entre todas as amostras, com uma elevação da força até que haja a ocorrência da primeira falha e, conseqüentemente, uma queda brusca no valor da força. Após essa queda observa-se uma nova elevação da força até o surgimento de outra falha, repetindo o comportamento do primeiro momento até que hipoteticamente seja atingido o substrato e altere o comportamento mecânico em função da diferença de ductilidade com o material de revestimento. Ao atingir o substrato nota-se um comportamento dúctil onde se tem um baixo valor de força e um deslocamento considerável.

Esse comportamento pode ser observado mais claramente quando comparados os conjugados depositados empregando-se os níveis mínimos e máximos de rotação e velocidade de deposição. Uma vez que os conjugados AAA, BAA e CAA têm a tendência de deslocamento após a primeira falha, nota-se apenas uma queda brusca do valor da força de dobramento seguido de um comportamento semelhante ao substrato, enquanto as amostras ACC, BCC e CCC, por apresentarem melhores respostas à adesão, apresentam vários ciclos de queda de força indicando uma maior quantidade de falhas no revestimento antes de se atingir o substrato. Tais comportamentos podem ser observados nos Gráficos 4.18, 4.19 e 4.20, onde são apresentados os desempenhos dos conjugados ao dobramento dos grupos de rugosidade A, B e C, respectivamente.

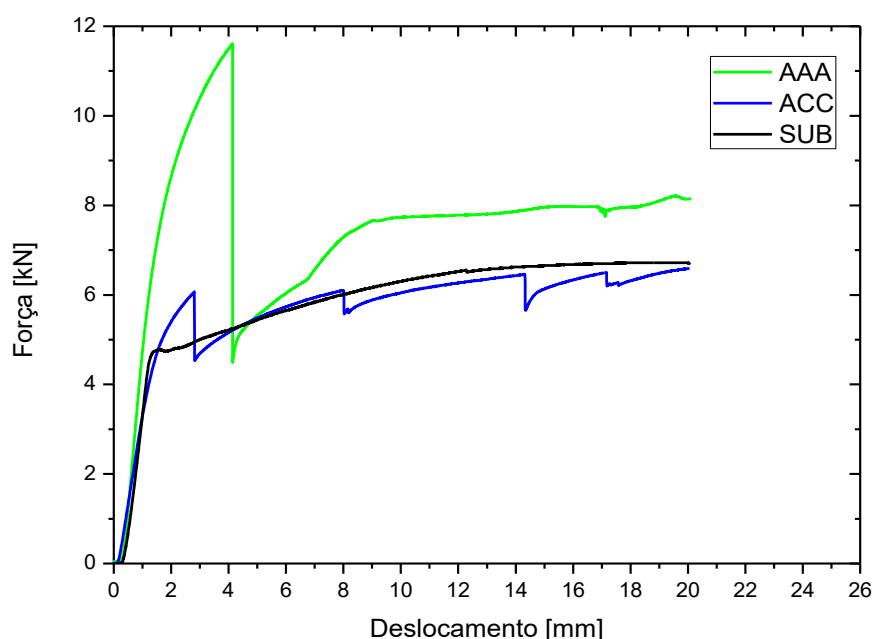


Gráfico 4.18 – Força de dobramento versus deslocamento para os conjugados AAA, ACC e substrato (SUB).
Fonte: dados do autor

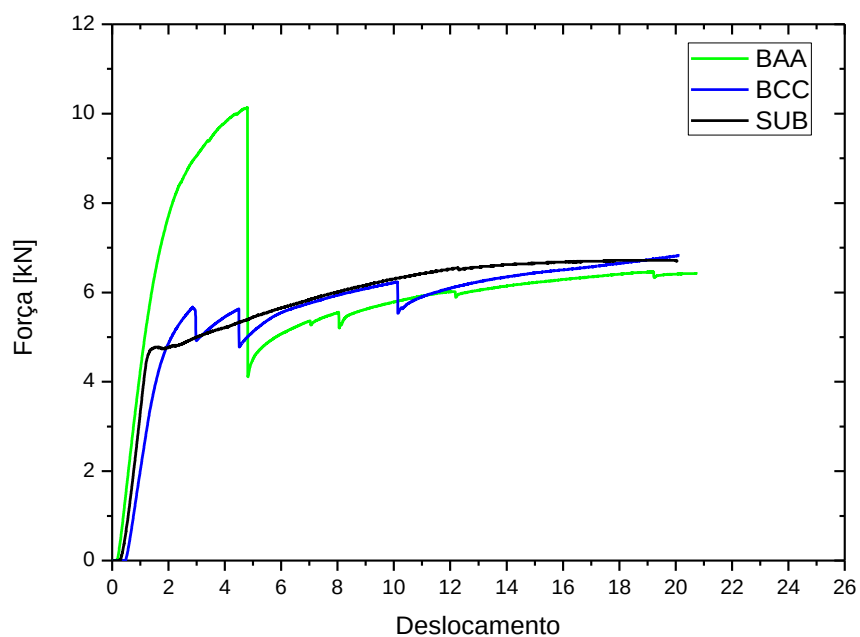


Gráfico 4.19 – Força de dobramento versus deslocamento para os conjugados BAA, BCC e substrato (SUB).
Fonte: dados do autor

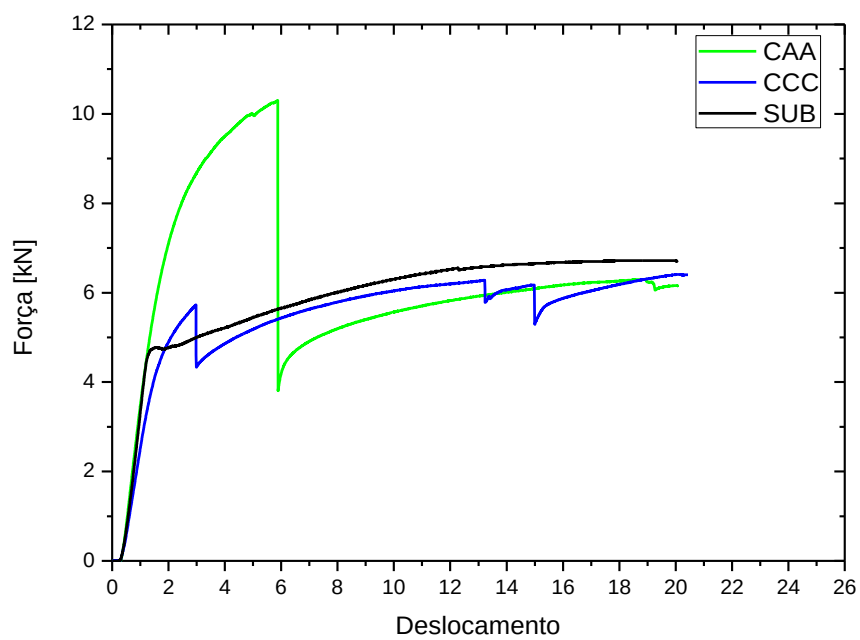


Gráfico 4.20 – Força de dobramento versus deslocamento para os conjugados CAA, CCC e substrato (SUB).
Fonte: dados do autor

Observa-se ainda que as amostras AAA, BAA e CAA apresentaram melhores respostas ao ensaio de dobramento quando levado em consideração o nível de força suportada antes de ocorrer a primeira falha. Porém, quanto à adesão não se pode dizer o mesmo, uma vez que tais amostras apresentam início de deslocamento dos revestimentos. Sugere-se como uma possível explicação para tal fenômeno as maiores espessura e largura do revestimento, uma vez que o revestimento aumenta a resistência mecânica do conjugado e com maiores larguras e espessuras seria necessário maiores esforços para que a trinca percorresse por toda a área da seção do revestimento até atingir o substrato. De maneira análoga, nota-se menores valores de força suportada antes de ocorrer a primeira falha nos conjugados ACC, BCC e CCC. Entretanto, estes conjugados apresentaram um melhor comportamento quanto à adesão sem um deslocamento visível do revestimento ao substrato.

De maneira geral, verifica-se que a força máxima suportada no ensaio de dobramento é inversamente proporcional à rotação da haste consumível e à velocidade de deposição do revestimento, fato que pode ser justificado por tempos mais longos de contato da haste consumível com o substrato (menores velocidades de deposição e menores rotações) levarem a melhores respostas quanto à resistência, conforme observado por Galvis *et al.* (2017). Entretanto, a adesão do revestimento ao substrato foi melhor sucedida quando empregados valores mais baixos para rotação e velocidade de deposição, uma vez que espessuras mais finas dos revestimentos garantiriam maiores valores de força normal na interface, tornando o contato do material do revestimento com o substrato mais íntimo e dessa forma aumentando a interação metalúrgica.

Nota-se ainda que a rugosidade do substrato pode interferir diretamente no mecanismo de adesão, isto é, a união dos revestimentos com os substratos com maiores valores de rugosidades ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$) têm uma tendência de se unirem por meio de ancoramento mecânico enquanto a união dos revestimentos com os substratos de rugosidades mais baixas ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$) têm tendência de se unirem por ligações metálicas e a união dos revestimentos com os substratos com rugosidade intermediária ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$) pode acontecer tanto pelo mecanismo de ancoramento mecânico como por ligações metálicas. Quanto à força suportada durante o esforço de dobramento, os substratos com rugosidade $R_q = 0,43 \mu\text{m}$ apresentam melhores respostas o que pode sugerir que a adesão pelo mecanismo de ligação metálica tenha um comportamento mais efetivo ao mecanismo de ancoramento mecânico.

4.9 Ensaio de microdureza

Com intuito de verificar a influência dos parâmetros de entrada do processo FSS sobre os perfis de microdureza, foram realizadas inicialmente análises nas amostras dos aços ABNT 4340 (haste consumível) e ASTM A36 (substrato) antes da deposição do revestimento. Notou-se um valor médio de dureza de 331 HV para a haste consumível e 197 HV para o substrato. Verificou-se um erro sistemático do microdurômetro de 7 HV a partir do padrão de dureza.

Como se busca investigar o comportamento do conjugado em regiões específicas (revestimento, substrato e interface) conforme verifica-se no mapa da Figura 3.7, as amostras (AAB, BAB e BAC) que apresentaram deslocamento na interface por meio do ensaio de dobramento não tiveram a microdureza avaliadas. Entretanto, os conjugados obtidos utilizando rotação e velocidade de deposição mínimos (1500 rpm e 190 mm/min) e máximos (3000 rpm e 380 mm/min) foram avaliados independentemente dos resultados de dobramento.

Os resultados de microdureza das seções transversais dos conjugados são apresentados segundo as direções perpendicular à superfície da amostra (Gráficos 4.21, 4.22 e 4.23) e paralela à superfície (Gráficos 4.24, 4.25 e 4.26), para os grupos A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$), B ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$) e C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$), respectivamente.

No Gráfico 4.21 pode ser percebido a evolução do perfil de microdureza na direção perpendicular à superfície da amostra do grupo A. No eixo das abscissas nota-se a interface da amostra na referência de profundidade igual a zero (os valores positivos referem-se à dureza do revestimento enquanto os valores negativos tem como referência as durezas da ZTA e do substrato). Verifica-se um comportamento semelhante nos resultados das durezas dos revestimentos até a interface entre todos os conjugados. Em relação à dureza do revestimento, percebe-se uma maior variação para o conjugado AAA ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$), que apresenta o valor máximo de 718 HV. Levando em consideração o conjugado obtido com rotação e velocidade de deposição nos níveis máximos, ACC ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$) verifica-se o valor máximo de dureza de 566 HV.

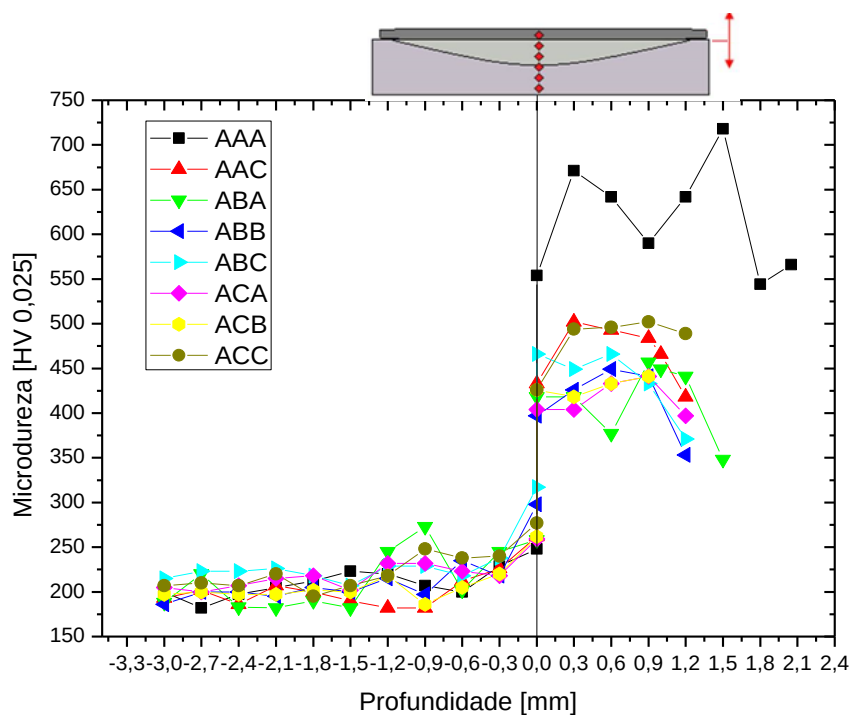


Gráfico 4.21 – Perfil de microdureza direção perpendicular à superfície no entro da amostra. Grupo A ($R_q=0,43\ \mu\text{m}$).
Fonte: dados do autor

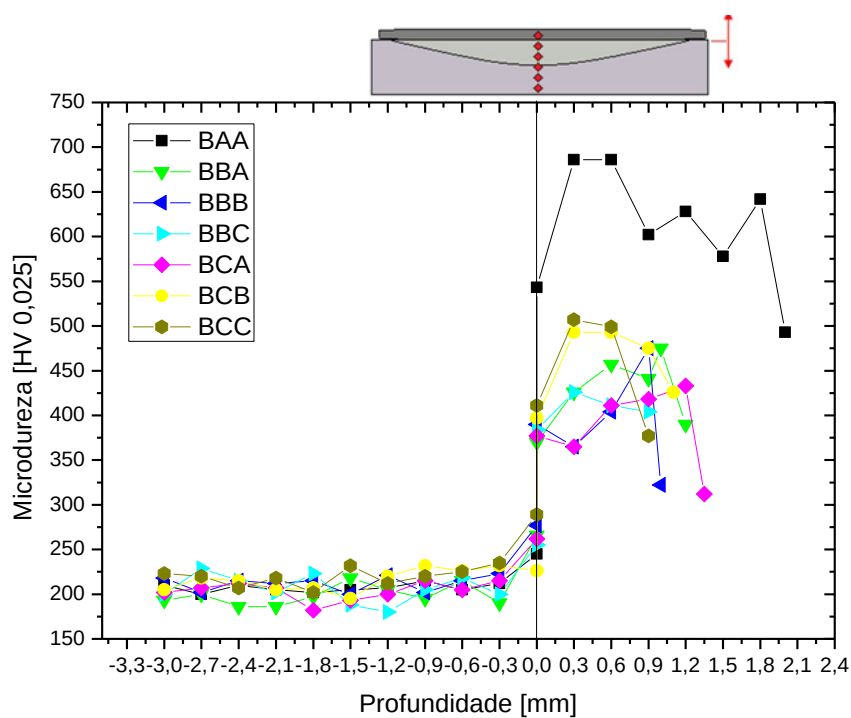


Gráfico 4.22 – Perfil de microdureza direção perpendicular à superfície no entro da amostra. Grupo B. ($R_q=1,75\ \mu\text{m}$).
Fonte: dados do autor

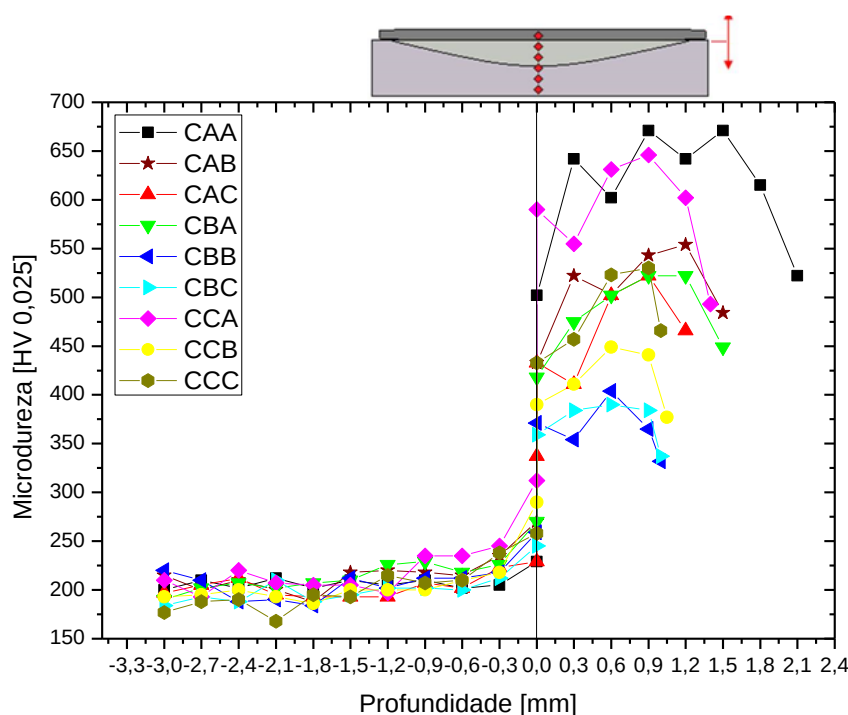


Gráfico 4.23 – Perfil de microdureza direção perpendicular à superfície no entro da amostra. Grupo C. ($R_q=2,54 \mu\text{m}$).
Fonte: dados do autor

De forma semelhante ao analisado Gráfico 4.21 pode ser notada nos Gráficos 4.22 e 4.23 a evolução do perfil de microdureza na direção perpendicular à superfície da amostra dos grupos B e C, respectivamente. Conforme observado no grupo A, os maiores valores de microdureza para os grupos B (686 HV) e C (671 HV) foram obtidos com rotação e velocidade de deposição mínimos BAA e CAA. Para os conjugados obtidos com rotação e velocidade de deposição máximos BCC e CCC os valores de microdureza encontrados são respectivamente 507 HV e 615 HV.

Ao confrontar os gráficos 4.21, 4.22 e 4.23 pode-se notar que as amostras sujeitas à taxa de resfriamento mais elevadas (conjugados ACC, BCC e CCC) exibiram valores de dureza mais baixos quando comparados com as amostras sujeitas à taxa de resfriamento mais lenta (conjugados AAA, BAA e CAA) o que é inesperado. Entretanto, nota-se nos revestimentos destes conjugados altos valores de dureza (acima de 500 HV). Ao analisar a curva de resfriamento contínuo (TRC) do aço ABNT 4340, material do revestimento, verifica-se que a taxa de resfriamento crítica ($8,3^\circ\text{C/s}$) é superada por todas as taxas de resfriamento obtidas no presente trabalho para o processo de FSS. Isso

implica que em todos os conjugados, os revestimentos seriam formados por martensita, o que é condizente com os valores de dureza encontrados.

Os resultados apresentados nos Gráficos 4.24, 4.25 e 4.26 são referentes às durezas na região de ZTA medidas paralelamente à superfície para os grupos de rugosidade A, B e C respectivamente. O comportamento das amostras é semelhante, independentemente dos parâmetros de entrada, e indicam que a região de ZTA apresenta maiores valores de dureza (quando comparada com o substrato), influenciada pela condução de calor para o interior da amostra a partir da interface haste consumível/substrato. Notou-se ainda que nessa região pode ocorrer o fenômeno da mistura mecânica o que também pode justificar o aumento da dureza. A maior influência da temperatura e, conseqüentemente, os maiores valores de dureza são encontrados nos centros dos revestimentos onde existe o maior contato entre a haste consumível e o substrato, região, livre da solda fria e de maior transferência de energia. Tal observação confirma o que foi discutido por Nicholas *et al.* (1993).

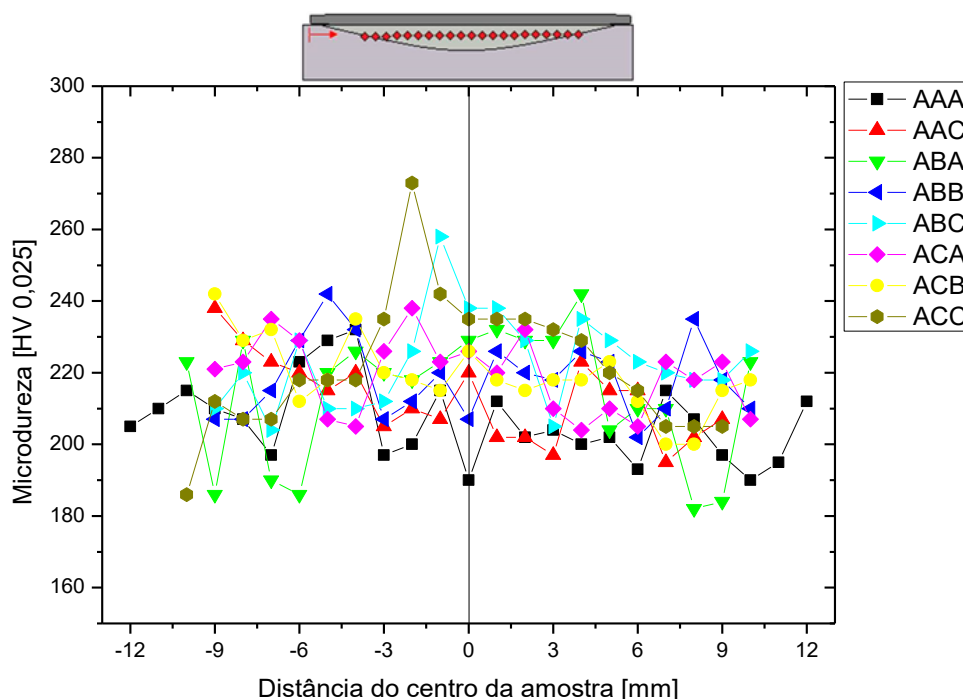


Gráfico 4.24 – Perfil de microdureza na direção paralela à superfície na região de ZTA. Grupo A. ($R_q=0,43 \mu\text{m}$).
Fonte: dados do autor

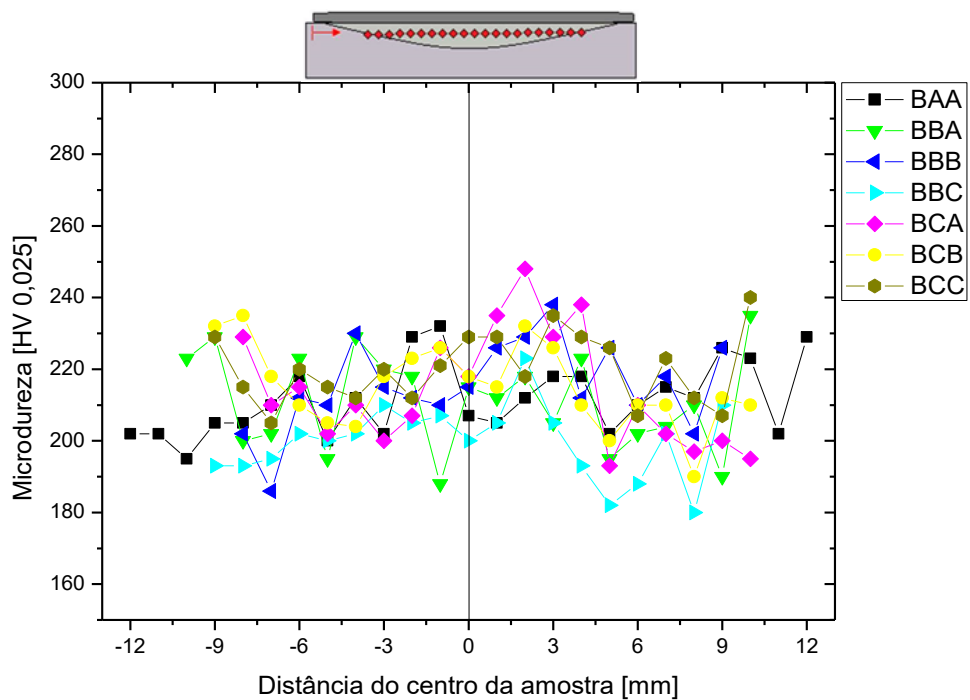


Gráfico 4.25 – Perfil de microdureza na direção paralela à superfície na região de ZTA. Grupo B. ($R_q=1,75 \mu\text{m}$).
Fonte: dados do autor

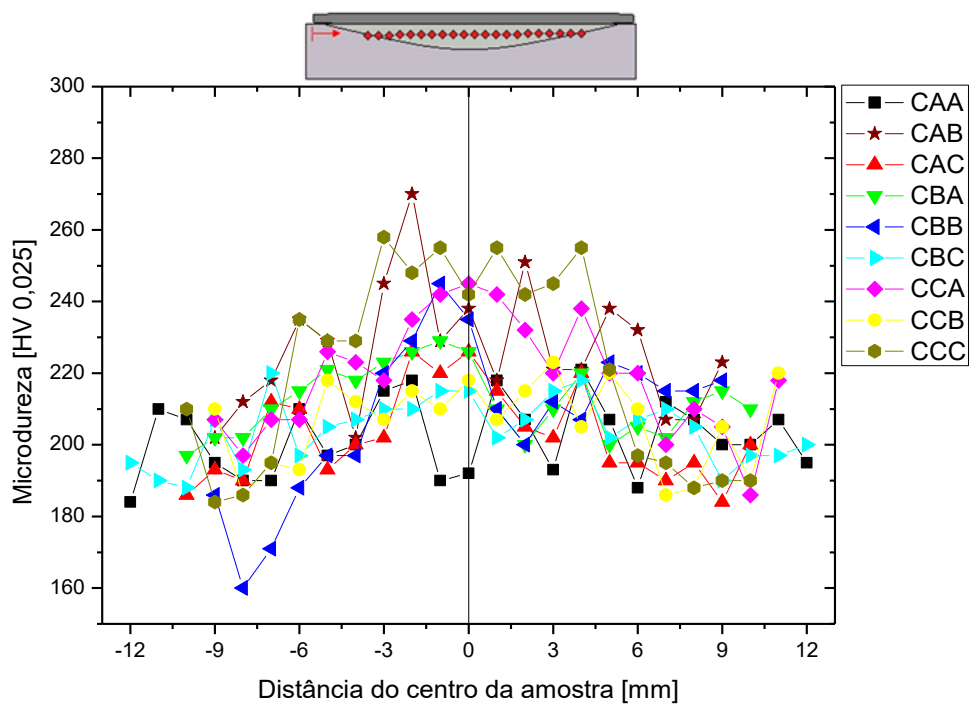


Gráfico 4.26 – Perfil de microdureza na direção paralela à superfície na região de ZTA. Grupo C. ($R_q=2,54 \mu\text{m}$).
Fonte: dados do autor

Com o intuito de compreender a variação dos resultados de microdureza, foram selecionadas amostras BAA e ACC depositadas com menores e maiores rotação e velocidade de deposição para análise do tamanho de grão da austenita prévia – *Prior Austenite Grain Boundaries (PAGB)*, antes da transformação em martensita.

Sabe-se que maiores tamanhos de grãos de austenita dificultam a formação de ferrita e perlita em função de menor quantidade de sítios de nucleação, favorecendo a formação de martensita e consequentemente garantindo dureza mais elevada. Foram realizadas imagens das amostras nas regiões central do revestimento, interface revestimento/ambiente e interface revestimento/substrato, sendo que na primeira foi realizada também a medição do tamanho de grão pela regra do intercepto segundo norma ASTM E112 (2013).

Nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29 podem ser observadas imagens da interface do revestimento com o ambiente, do revestimento propriamente dito (região central) e da interface do revestimento com o substrato, respectivamente, das amostras BAA e ACC.

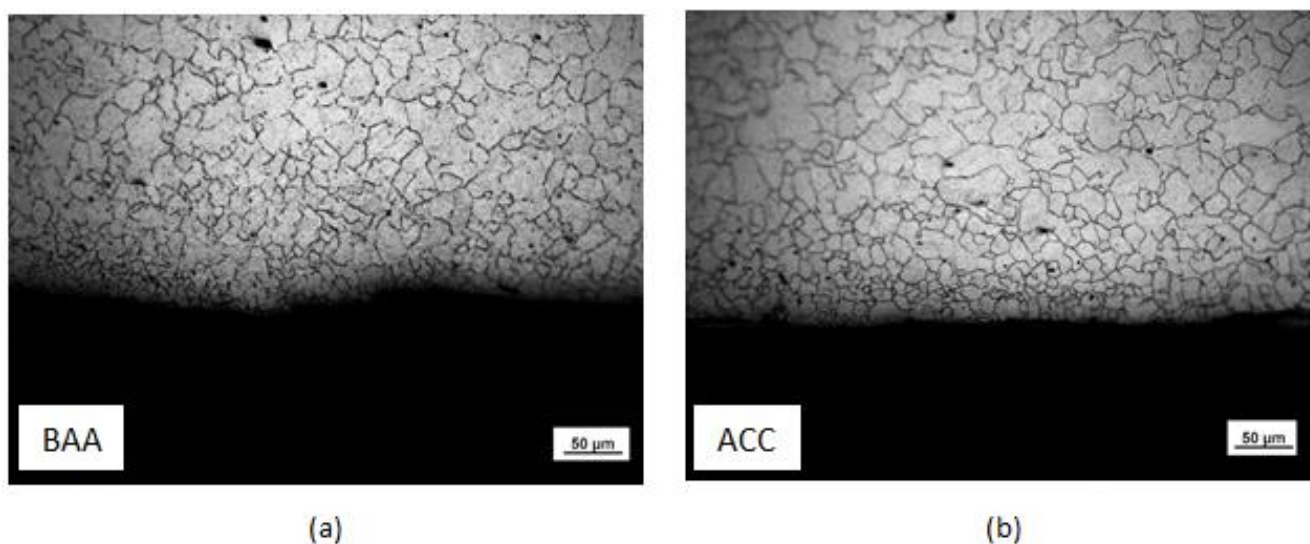


Figura 4.27 – Tamanho do grão da austenita prévia – interface revestimento/ambiente: (a) conjugado BAA e (b) conjugado (CAA)

Fonte: dados do autor

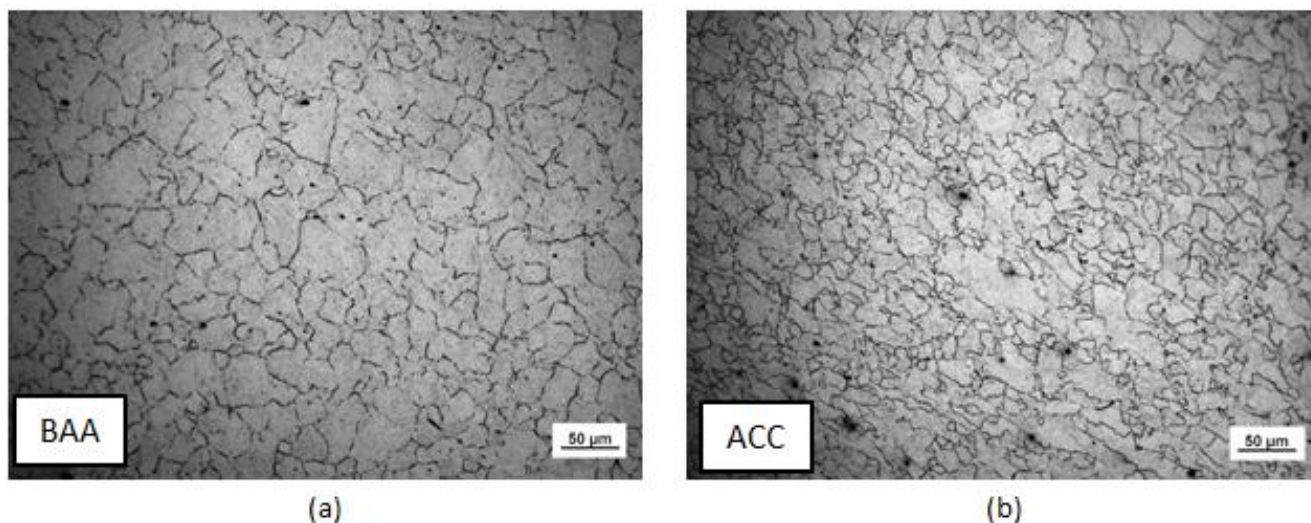


Figura 4.28 – Tamanho do grão da austenita prévia – região central do revestimento: (a) conjugado BAA e (b) conjugado (CAA)
 Fonte: dados do autor

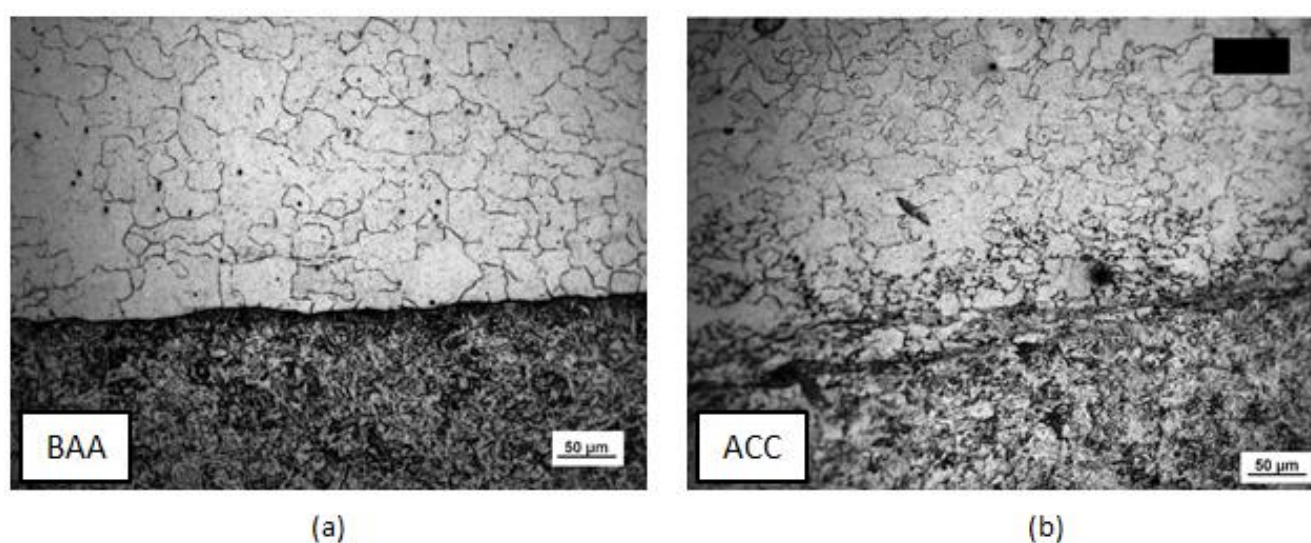


Figura 4.29 – Tamanho do grão da austenita prévia – Interface revestimento/substrato: (a) conjugado BAA e (b) conjugado (CAA)
 Fonte: dados do autor

Comparando as Figuras 4.27, 4.28 e 4.29, nota-se nas micrografias da amostra ACC (Figuras 4.27b, 4.28b e 4.29b) maiores quantidades de contornos de grão e, conseqüentemente, menores tamanhos, quando comparado com a amostra BAA (Figuras 4.27a, 4.28a e 4.29a). Esse resultado corrobora o que foi relatado por Gandra, Miranda e Vilaça (2012), que perceberam que velocidades de deposição mais elevadas geram espessuras de revestimento mais finas e, conseqüentemente, velocidades de resfriamento mais elevadas o que por sua vez levaria a menores tamanhos dos grãos de austenita.

Outro ponto que merece atenção os tamanhos de grãos menores nas interfaces com o ambiente e com o substrato em comparação ao centro do revestimento. Essa análise confirma os resultados de microdureza, uma vez que se pode notar um comportamento de concavidade negativa dos resultados (Gráficos 4.21, 4.22 e 4.23), sendo obtidos menores valores de dureza na interface substrato/revestimento, seguidos de valores mais elevados no centro do revestimento e uma nova queda no valor da dureza na interface revestimento/ambiente.

Para a região central do revestimento foi realizado a medição do tamanho de grão conforme norma ASTM E112 (2013) utilizando a regra do intercepto.

Verificou-se o número de grãos interceptados em uma área de aproximadamente $1056 \times 788 \mu\text{m}^2$ e obteve-se 652 grãos interceptados e uma média de 32,6 grãos/ linha para o conjugado BAA, o que gerou um tamanho médio de grão de $32,39 \mu\text{m}$. Para a mesma área analisada, foram interceptados 912 grãos, com um valor médio de 45,6 grãos/linha no conjugado ACC, gerando um tamanho de médio de grão de $23,16 \mu\text{m}$. Tais resultados confirmam o que pode ser visto na Figura 4.30 onde nota-se uma diferença substancial no tamanho do grão e justificam os resultados de microdureza dos conjugados ACC e BAA mostrados nos Gráficos 4.21 e 4.22, respectivamente.

A causa do refinamento de grãos de austenita pode estar ligada a processos de recristalização dinâmica durante a deposição do revestimento. De acordo com Puli *et al.* (2012), que investigaram o comportamento da recristalização dinâmica no processo de FSS de aços inoxidáveis austeníticos, a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ (s^{-1}) no processo FSS é dada pela equação (1):

$$\dot{\epsilon} = \frac{R_m 2\pi r_e}{L_e} \quad (1)$$

onde R_m é a metade da rotação da haste consumível (rps), r_e é metade da largura do revestimento e L_e é a espessura do revestimento.

Os valores de taxa de deformação obtidos para as amostras BAA (25 rps, 17,21 mm de largura e 2,08 mm de espessura) e ACC (50 rps, 12,37 mm de largura e 1,11 mm de espessura) foram, respectivamente, 324,92 e 875,26 s^{-1} .

A taxa de deformação pode então ser usada para determinar o parâmetro Zener-Hollomon (Z) aplicando a equação (2):

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (2)$$

onde R é a constante universal de gás ($8,314 \text{ J J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T é a temperatura absoluta e Q é a energia de ativação de materiais para deformação a quente.

Medina e Hernandez (1996), desenvolveram uma expressão (equação 3) para determinar a energia de ativação da expressão de Zener-Hollomon em função da composição química de aços de baixa liga:

$$Q = 267000 - 2535.52(C) + 1010(Mn) + 33620.76(Si) + 35651.28(Mo) + 93680.52(Ti)^{0.5919} + 31673.46(V) + 70729.85(Nb)^{0.5649} \quad (3)$$

A aplicação dos valores da composição química apresentados na Tabela 4.4 à equação (3) produz $Q = 281,28 \text{ kJ/mol}$. Tomando as temperaturas médias de deposição para as amostras BAA (1330 K) e ACC (1281 K), é possível obter os valores correspondentes para os parâmetros de Zener-Hollomon quais sejam, respectivamente, $3,62 \times 10^{13}$ e $2,58 \times 10^{14}$.

O tamanho médio de grão recristalizado (d_{rec}) pode ser calculado com base na equação (4), proposta por Quan *et al.* (2013), que investigaram a recristalização dinâmica de aço 42CrMo extrudado.

$$d_{rec} = 319.81 - 13.61 \ln(Z) + 0.1532 \ln(Z)^2 \quad (4)$$

A aplicação dos valores de Z obtidos na equação (4) permite estimar os tamanhos de grãos recristalizados para as amostras BAA e ACC (44,22 e 36,87 μm respectivamente). Os valores diferem dos observados experimentalmente (32 e 23 μm , respectivamente) e devem ser considerados criticamente, uma vez que as constantes da equação (4) foram obtidas para um processo de fabricação diferente. As análises mostram, no entanto, que o aumento da taxa de deformação observado pelo aumento da rotação e da velocidade de deposição é consistente com a redução no tamanho do grão durante a deformação a alta temperatura, o que foi observado no presente caso.

De acordo com Prawoto *et al.* (2012), a dureza do martensita depende do tamanho do grão de austenita: com o aumento do tamanho do grão de austenita, o tamanho dos pacotes de martensita também aumenta. Como tal, é possível que, variando as condições de processamento (e consequentemente as taxas de deformação e o tamanho dos grãos de austenita), a dureza final da martensita seja alterada.

4.10 Ensaio de pino sobre disco

Buscou-se com a realização dos ensaios de pino sobre disco investigar o comportamento do coeficiente de atrito ao variar a rugosidade do substrato e a rotação da haste consumível, simulando o estágio 1 do processo de deposição do revestimento, conforme descrito na seção 3.7 e esquematizado na Figura 3.3 desse trabalho.

Rabinowicz (1995) sugere, de forma simplificada, que a força de atrito é independente da rugosidade das superfícies em contatos deslizantes. Entretanto, o próprio autor investigou o comportamento de deslizamento de cobre/cobre em ambiente não lubrificado, com velocidade de deslizamento de 0,01mm/s e carga normal de 9,8N e demonstrou que há influência no coeficiente de atrito ao se variar a rugosidade do par em contato.

Os resultados obtidos no presente trabalho são apresentados nos Gráficos 4.27, 4.28 e 4.29 referentes aos grupos de rugosidade $R_q = 0,43 \mu\text{m}$ (grupo A), $R_q = 1,75 \mu\text{m}$ (grupo B) e $R_q = 2,54 \mu\text{m}$ (grupo C), respectivamente.

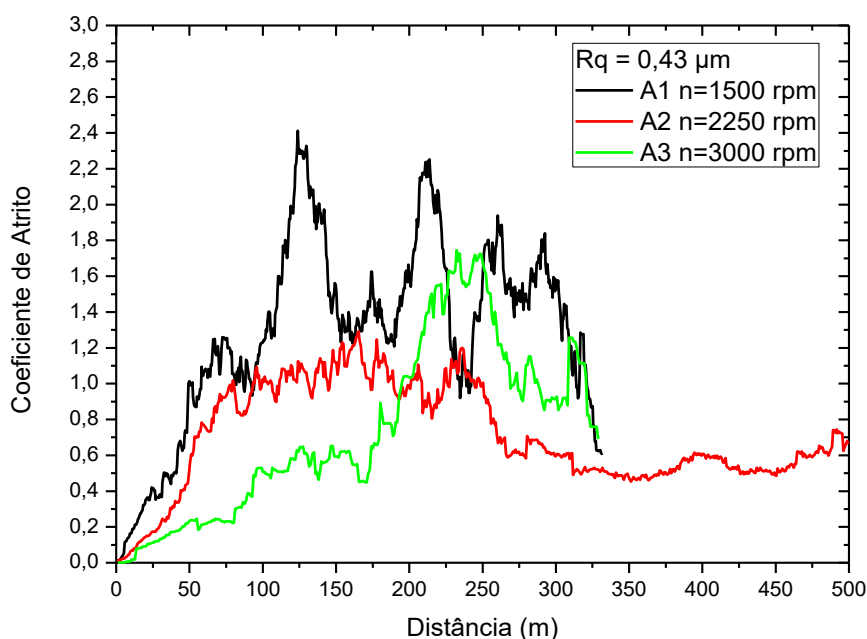


Gráfico 4.27 – Coeficiente de atrito versus distância percorrida referente ao grupo A ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$) e rotações de 1500, 2250 e 3000 rpm.

Fonte: dados do autor

Nota-se no Gráfico 4.27 que os ensaios sob $n = 1500$ rpm e $n = 3000$ rpm foram finalizados antes de atingir a distância pré-estabelecida, uma vez que o equipamento interrompe o ensaio para eventuais picos de coeficiente de atrito acima de 3,0. Conforme proposto por Rabinowics (1995), o baixo valor da rugosidade para este grupo facilita a ligação química entre pino e disco (ou haste e substrato) em função de uma maior área real de contato. Tais ligações exigem um certo esforço para sua quebra, elevando dessa forma a força de atrito e consequentemente o coeficiente de atrito do sistema, uma vez que a carga normal é constante. Esse fenômeno também seria observado para o ensaio sob $n = 2250$ rpm uma vez que o disco utilizado para o ensaio é o mesmo e, portanto, com o mesmo valor de rugosidade. Entretanto, para este ensaio o valor máximo do coeficiente de atrito atingido foi de aproximadamente 1,3. Uma possível justificativa seria o cisalhamento do material em uma camada acima da interface de ligação (zona de fluxo) em uma analogia ao mecanismo de formação de cavaco onde na interface cavaco e ferramenta há a presença de uma camada aderida do cavaco sobre a ferramenta (zona de aderência) em função de um contato absoluto entre estes dois materiais. Dessa forma em função da ligação metálica que ocorre na interface ser muito forte, o cisalhamento ocorre em uma camada logo acima da interface de ligação onde a resistência ao cisalhamento é menor.

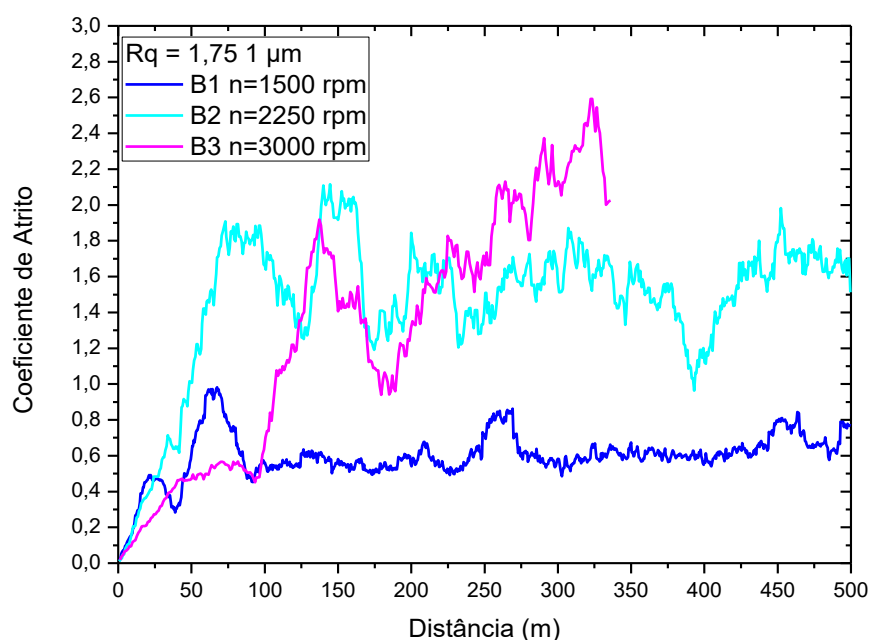


Gráfico 4.28 – Coeficiente de atrito versus distância percorrida referente ao grupo B ($R_q = 1,75 \mu m$) e rotações de 1500, 2250 e 3000 rpm.

Fonte: dados do autor

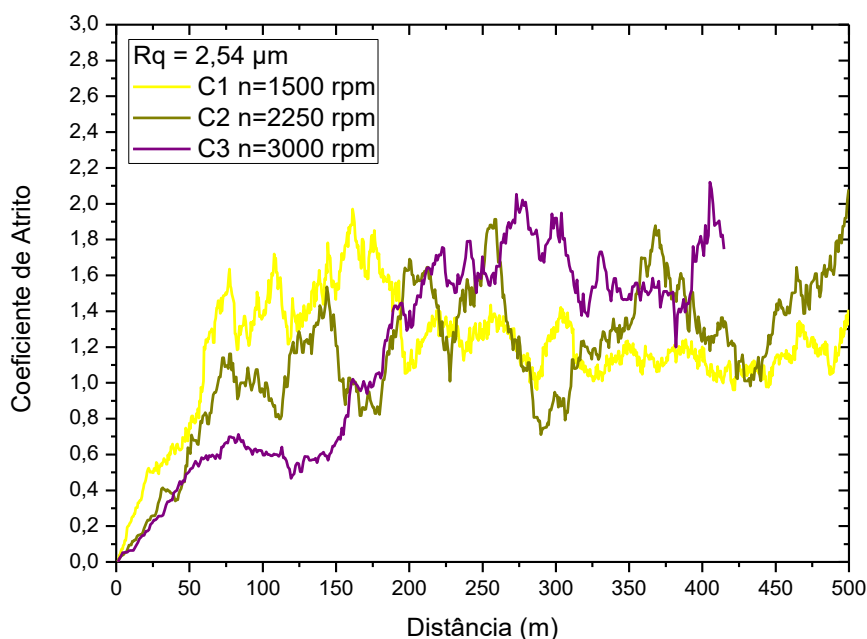


Gráfico 4.29 – Coeficiente de atrito versus distância percorrida referente ao grupo C ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$) e rotações de 1500, 2250 e 3000 rpm.

Fonte: dados do autor

Nos Gráficos 4.28 e 4.29 observa-se um comportamento semelhante ao discutido para o Gráfico 4.27, entretanto, apenas os ensaios referentes ao valor de rotação mais elevado (3000 rpm), não foram finalizados. Uma possível explicação se dá pelo aumento de temperatura causada pelo atrito em função de uma maior rotação o que pode ter favorecido a adesão do pino no disco seguido por um possível arrancamento, que pode ter elevado o valor do coeficiente de atrito acima de 3,0 e causando a interrupção do ensaio.

Entretanto, ao se confrontar os resultados dos coeficientes de atrito dos Gráficos 4.27, 4.28 e 4.29 com os perfis térmicos de deposição e com os conjugados obtidos verifica-se que as variações encontradas nos coeficientes de atrito não foram significativas para influenciar o estágio 1 de deposição. Uma possível justificativa seria a quebra dos picos de asperezas dos dois componentes no primeiro contato entre as superfícies da haste consumível e do substrato e com isso a relação de área real de contato seria praticamente a mesma em todas as condições.

4.11 Ensaio de tensão residual

Realizou-se a medição de tensão residual com o intuito de verificar a influência dos parâmetros de entrada do processo de FSS quanto ao tipo de tensão que permanece no conjugado após a deposição. Foram avaliados três pontos em três regiões distintas de cada conjugado ensaiado: direção de recuo de deposição (1), direção central de deposição (2) e direção de avanço de deposição (3), conforme pode ser observado na Figura 3.8 deste trabalho. Foram analisados os conjugados utilizando níveis mínimos e máximos de rotação e velocidade de deposição para todos os grupos de rugosidade. Os resultados são apresentados no Gráfico 4.30. Os valores médios de tensão residual são representados na Tabela 4.6.

Pode-se notar que a rugosidade não apresenta influência significativa sobre os resultados, principalmente quanto à natureza das tensões. Entretanto, nota-se que ao variar a rotação e velocidade de deposição, o comportamento da tensão residual muda, isto é, conjugados obtidos utilizando os parâmetros mínimos AAA, BAA e CAA apresentam tensão residual de tração e conjugados obtidos por deposição utilizando os parâmetros máximos ACC, BCC e CCC apresentam tensão residual de compressão.

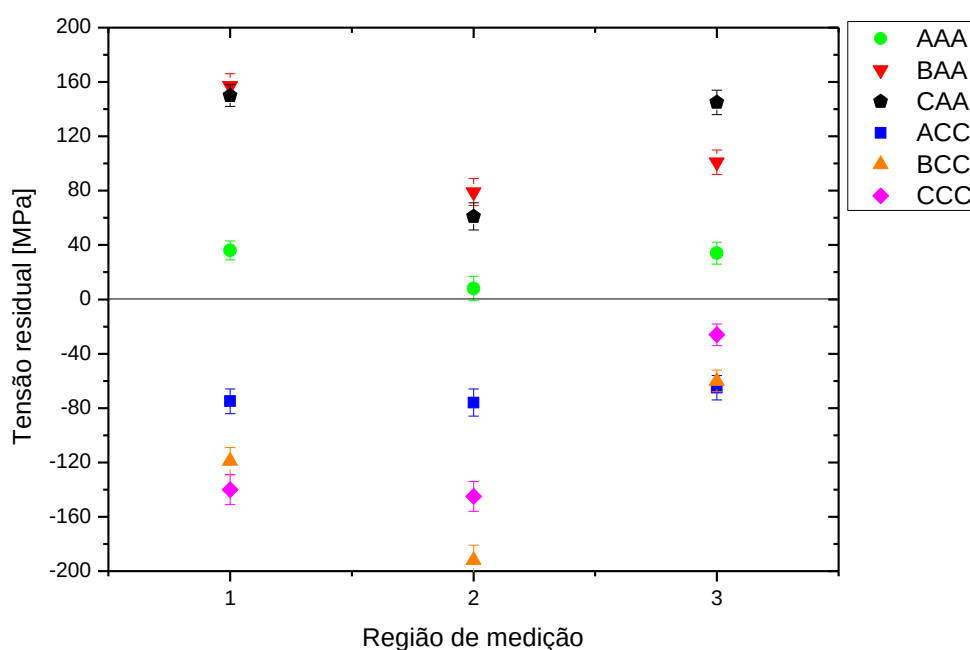


Gráfico 4.30 – Tensão residual em diferentes regiões dos conjugados.
Fonte: dados do autor

TABELA 4.6
Resultados dos ensaios de tensão residual

Região	Tensão residual (MPa)					
	AAA	BAA	CAA	ACC	BCC	CCC
1	36	157	150	-75	-119	-140
2	8	79	61	-76	-192	-145
3	34	101	145	-65	-60	-26

Fonte: dados do autor

Todas as deposições foram realizadas utilizando a mesma carga normal imposta pelo movimento do eixo Z do centro de usinagem. Dessa forma, uma possível justificativa para os resultados tensão residual é a variação da taxa de resfriamento dos conjugados. Nota-se que os conjugados obtidos utilizando os maiores parâmetros de rotação e velocidade de deposição (ACC, BCC e CCC) apresentaram maiores taxas de resfriamento o que gerou um gradiente de temperatura entre a superfície do revestimento e a interface revestimento/substrato induzindo tensão de compressão na superfície para garantir o equilíbrio mecânico no conjugado.

Ao analisar tensões residuais em revestimentos de aço, é importante considerar a expansão de volume associada à formação de martensita a partir de austenita, que ocorre a aproximadamente 300 °C para o aço AISI 4340. Como visto na Figura 4.30, quando a temperatura do revestimento é próxima a 300 °C, o substrato atinge aproximadamente 150 °C e não sofre nenhuma transformação de fase, mas simplesmente contração térmica devido à redução da temperatura. Assim, a expansão do volume do revestimento é restrita com a geração de tensões de compressão no mesmo, como visto no Gráfico 4.30 para os conjugados ACC, BCC e CCC. No entanto, quando a espessura do revestimento aumenta, a influência da incompatibilidade volumétrica na interface do substrato no estado de tensão residual na superfície do revestimento é diminuída, o que resulta em tensões de tração, como mostrado no Gráfico 4.30 para os conjugados AAA, BAA e CAA.

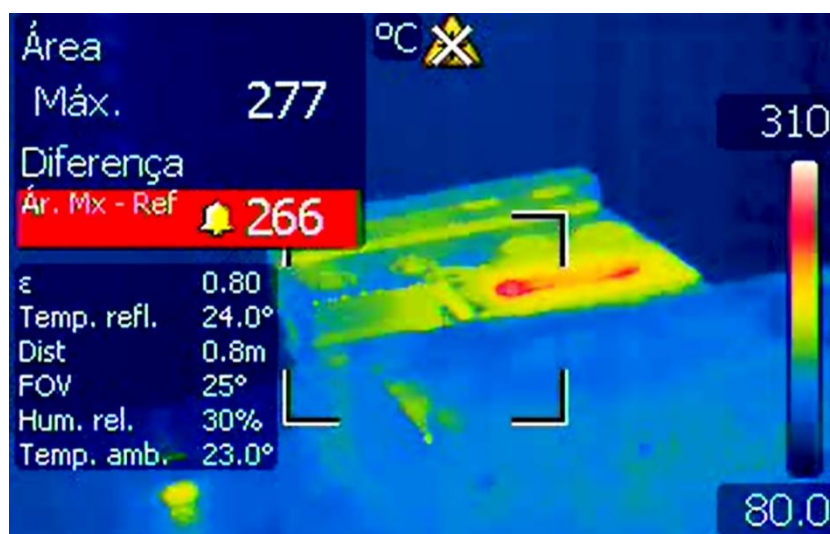


Figura 4.30 – Imagem termográfica do resfriamento do conjugado CCC
Fonte: dados do autor

Os conjugados AAA, BAA e CAA que apresentaram resultados de tensão residual de tração (Gráfico 4.30) combinadas à microestrutura martensítica relativamente mais dura (Gráficos 4.21, 4.22 e 4.23) e maiores larguras (Gráfico 4.13) e espessura (Gráfico 4.14) dos revestimentos, apresentaram resultados insatisfatórios nos ensaios de dobramento, gerando o início de deslocamento do revestimento do substrato, conforme pode ser visto nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26. Por outro lado, os conjugados ACC, BCC e CCC que apresentaram resultados de tensão residual de compressão (Gráfico 4.30), quando solicitados por dobramento não apresentaram deslocamento do revestimento do substrato (Figuras 4.24, 4.25 e 4.26) garantindo uma adesão com sucesso o que indica de que o estado de tensão residual obtido após o processo FSS influencia a integridade mecânica dos materiais revestidos.

Parte dos resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho foram publicados no X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e no periódico *Surface & Coatings Technology* com os respectivos títulos: “Influência da rugosidade do substrato na morfologia e dimensionamento de revestimentos realizados por friction stir surfacing” e “The behaviour of AISI 4340 steel coatings on low carbon steel substrate produced by friction surfacing” e podem ser vistos no apêndice deste trabalho.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho realizou-se a deposição do aço ABNT 4340 sobre o aço ASTM A36 por meio da técnica de revestimento por atrito com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas e metalúrgicas do conjugado. Utilizou-se três níveis para os fatores rugosidade do substrato (aço ASTM A36), rotação da haste consumível (aço ABNT 4340) e velocidade de deposição do revestimento. Baseadas nos resultados, são apresentadas as seguintes conclusões.

Eficiência do processo

- Verificou-se eficiência mais elevada do processo FSS (média de 62%) quando realizada a deposição utilizando rotação e velocidade de deposição nos níveis mais baixos ($n = 1500$ rpm e $V_d = 190$ mm/min) contra média de 23% para deposições realizadas utilizando rotação e velocidade de deposição nos níveis mais altos ($n = 3000$ rpm e $V_d = 380$ mm/min). Parâmetros mais brandos permitem maior transferência de material da haste consumível para o substrato o que garante maior eficiência do processo.

Análise visual

- Os revestimentos se mostraram com aspectos morfológicos uniformes para todos os parâmetros de entrada selecionados, sem a presença de falhas e deslocamentos após a deposição.

Análise térmica

- Verifica-se que a rugosidade possui baixa influência no aporte térmico para o conjugado, sendo a rotação e velocidade de deposição os parâmetros mais relevantes.
- O aumento da rotação e velocidade de deposição provoca um aumento na taxa de resfriamento dos conjugados.
- O processo FSS está associado a taxas de resfriamento elevadas, que levam à formação de martensita nos revestimentos de aço 4340.

Dimensões dos revestimentos

- Os parâmetros rotação da haste consumível e velocidade de deposição influenciam diretamente os valores de largura e espessura dos revestimentos.
- Verifica-se que a rotação da haste consumível é mais influente sobre a largura do revestimento em função da formação de um plano rotacional de contato que reduz a transferência de material da haste consumível para o substrato quando a rotação é aumentada e, consequentemente, reduz a largura do revestimento
- A velocidade de deposição, por sua vez, possui maior influência sobre a espessura do revestimento. Para valores mais baixos de velocidade de deposição a haste consumível permanece períodos de tempo mais longos em contato com o substrato, introduzindo maior quantidade de energia no processo, o que tende a aumentar o valor da espessura dos revestimentos.
- A rugosidade dos substratos não influencia de forma significativa as variações dimensionais dos revestimentos.

Análise microestrutural e de espectroscopia de energia dispersiva

- Nota-se uma grande similaridade entre os conjugados em termos de fases, microconstituintes e morfologia destes presentes nas regiões de revestimento, interface revestimento/substrato e substrato.
- Observa-se a presença predominante de martensita nos revestimentos, que pode ser explicado pela alta taxa de resfriamento comum ao processo FSS e do material da haste consumível (aço ABNT 4340).
- Na região de ZTA próxima à interface revestimento/substrato, nota-se uma microestrutura composta por ferrita (acicular e windmanstatten) e perlita. A partir de uma determinada profundidade nota-se uma região de transição entre a ZTA e o substrato, onde se observa a presença de ferrita pró-eutetóide e colônias perlitas degeneradas (esboroadas) até atingir o substrato com o aspecto da microestrutura peculiar do aço ABNT 1020 composta por ferrita e perlita.

- Percebe-se em todos os conjugados uma região próxima à interface revestimento/substrato formada por grãos refinados provenientes do fenômeno da recristalização dinâmica por efeito da alta taxa de deformação e alta temperatura atingida no processo.
- Apesar das semelhanças nas microestruturas, pode ser percebida uma variação dos aspectos das interfaces em função da variação da rugosidade. Nos conjugados do grupo A ($R_q = 0,43\mu\text{m}$), tem-se uma interface relativamente lisa sem a presença de ondulações notada nas interfaces dos conjugados do grupo B ($R_q = 1,75\mu\text{m}$) e ainda a presença de reentrâncias presentes nas interfaces do grupo C ($R_q = 2,54\mu\text{m}$).
- A rugosidade do substrato tem papel importante nos mecanismos de adesão dos revestimentos aos substratos. As amostras com o menor valor de rugosidade (grupo A) tem a junção formada principalmente por adesão por ligações químicas enquanto as amostras com maiores valores de rugosidade (grupo C) sugerem que há ligação química aliada ao mecanismo de ancoragem mecânica nas regiões de maiores protuberâncias dos picos do substrato.
- O processo FSS produz uma região onde se percebe uma falha por falta adesão do revestimento no substrato, localizado nas bordas dos revestimentos e conhecida como zona de solda fria. Esse fenômeno foi observado em todas as condições de deposição de forma similar à encontrada por Gandra, 2014.
- Por meio de análise de espectroscopia de energia dispersiva dos conjugados nota-se o fenômeno da mistura mecânica na análise do conjugado CAC ($R_q = 2,54\mu\text{m}$; $n = 1500\text{ rpm}$; $V_d = 380\text{ mm/min}$), evidenciada pela presença de elementos tais como Ni e Cr, advindos do aço ABNT 4340 (revestimento) na região do substrato e a ausência desses elementos em determinada região do revestimento. Sugere-se que fenômeno da mistura mecânica seja favorecido pelo mecanismo de ancoramento mecânico.
- Ao variar os parâmetros do processo (rotação da haste consumível e velocidade de deposição) e a taxa de deformação durante a deposição, foi possível notar diferenças no tamanho anterior do grão de austenita, possivelmente associado a variações na recristalização dinâmica durante a deposição;
- O conjugado BAA ($R_q = 1,75\mu\text{m}$; $n = 1500\text{ rpm}$; $V_d = 190\text{ mm/min}$) possui maiores tamanhos de grão de austenita ($32,39\mu\text{m}$ contra $23,26\mu\text{m}$), quando comparado ao conjugado ACC (R_q

= 0,43 μm ; $n = 3000 \text{ rpm}$; $V_d = 380 \text{ mm/min}$) o que auxilia na compreensão dos resultados de microdureza.

Ensaio de dobramento

- Ao comparar os valores de força de dobramento dos conjugados com o do substrato, verifica-se que há um aumento da resistência mecânica das amostras revestidas, entretanto, com um prejuízo para ductilidade.
- Quanto aos parâmetros de entrada, rotação da haste consumível e velocidade de deposição mais elevados causam uma redução na força suportada durante a solicitação ao dobramento. Tal fenômeno pode ser explicado pela redução da largura e espessura do revestimento, que por sua vez tende a aumentar a resistência mecânica do conjugado.
- Apesar de apresentarem maiores valores de resistência quando solicitados por dobramento, os conjugados obtidos por parâmetros de entrada (rotação da haste consumível e velocidade de deposição) nos níveis mínimos tiveram o pior comportamento quanto à adesão, apresentando indício de deslocamento do revestimento.
- A rugosidade do substrato pode influenciar no mecanismo de adesão do revestimento, sendo que para baixos valores de rugosidade a adesão tende a acontecer por ligações metalúrgicas, enquanto que para valores mais elevados de rugosidade o mecanismo de adesão por ancoramento mecânico também ocorre.
- O conjugado AAA ($R_q = 2,79 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$) apresenta-se com a maior resistência ao dobramento (11,61 kN), entretanto, com indício de deslocamento do revestimento, enquanto o conjugado BCC apresentou o menor valor de resistência (5,67 kN), mas sem qualquer indício de deslocamento.
- Os conjugados que apresentaram melhores respostas quanto à adesão apresentaram trincas paralelas nos revestimentos, entretanto, sem propagação para o substrato.

Ensaio de microdureza

- Os resultados de microdureza indicam os valores mais elevados (718HV, 686 HV, 671 HV) para os revestimentos dos conjugados AAA, BAA e CAA, respectivamente. Este fato associa os valores de dureza mais altos com os valores mais baixos de rotação da haste consumível e de velocidade de deposição, uma vez que para tais condições os conjugados estão expostos por tempo mais longo ao calor, resultando em maiores tamanhos de grão da austenita prévia, o que favorece dureza mais alta.
- Maiores tamanhos de grãos austeníticos favorecem valores de dureza mais elevados, uma vez que tais grãos possuem menos sítios de formação de ferrita e perlita, além de apresentarem maiores densidades de discordâncias na martensita
- Nota-se que a dureza na região da ZTA (0,1 mm abaixo da interface revestimento/substrato) apresenta um comportamento semelhante para todos os grupos de rugosidade, com valor médio de 220HV. Verifica-se ainda que as durezas mais alta se encontram na região central de deposição para todos os conjugados, onde não há falhas por solda fria. Dessa forma tem-se maior área de contato entre haste consumível e substrato gerando maior exposição ao calor que afeta termicamente uma maior profundidade do substrato.

Ensaio de pino sobre disco

- Apesar da variação da rugosidade, o comportamento do coeficiente de atrito tende a ser semelhante. Sugere-se que para valores de rugosidade baixos (grupo A $R_q = 0,43 \mu\text{m}$) ou relativamente altos (grupo C $R_q = 2,54 \mu\text{m}$), o coeficiente de atrito tende a aumentar por motivos diferentes: baixos valores de rugosidade facilitam a ligação química entre pino e disco (ou haste e substrato) em função de uma maior área real de contato, enquanto que para altos valores de rugosidade o coeficiente de atrito aumenta devido à necessidade de garantir o movimento de uma superfície em relação à outra com maiores asperezas.
- Os ensaios realizados com parâmetros simulando rotação mais alta ($n=3000 \text{ rpm}$) apresentaram elevados coeficientes de atrito. Uma possível explicação se deve ao aumento de temperatura causado pelo atrito que favorece a adesão do pino no disco, seguido de um desprendimento (arrancamento) que eleva a força de atrito.

- Sugere-se que o alto valor do coeficiente de atrito seja benéfico para o estágio 1 (contato entre haste consumível e substrato visando atingir na interface haste/substrato a temperatura para a formação da camada viscoplástica) do processo FSS, uma vez que tende a elevar a temperatura e favorecer a deposição da haste consumível no substrato.

Análise de tensão residual

- A rugosidade do substrato não apresentou influência significativa sobre os resultados de tensão residual, principalmente quanto à sua natureza.
- As distribuições de tensões residuais foram afetadas pelos parâmetros do processo. Rotação da haste consumível e velocidade de deposição mais elevada são associadas a tensões residuais de compressão e rotação e velocidade de deposição mais baixas são associadas a tensões residuais de tração.
- Os revestimentos com tensões residuais de tração exibiram sinais de adesão mais fraca ao substrato em comparação com os revestimentos com tensões residuais compressivas.

Considerações finais

- Não foi encontrada influência significativa da rugosidade inicial do substrato na evolução da temperatura durante o processo, na geometria do revestimento, na microestrutura ou na tensão residual;
- Os parâmetros de entrada: rotação e velocidade de deposição são mais influentes que a rugosidade no comportamento geral dos conjugados obtidos pelo processo FSS.
- Além de influenciarem de maneira significativa o aspecto morfológico e dimensional do revestimento, rotação da haste consumível e velocidade de deposição influenciam na quantidade de energia que entra no processo e, conseqüentemente, na taxa de resfriamento dos conjugados.
- O aporte energético e a taxa de resfriamento, por sua vez, tem influência direta sobre o tamanho de grão da austenita, as fases e os constituintes formados, além de determinarem o comportamento da tensão residual de cada conjugado.

- As microestruturas formadas e o tamanho de grão da austenita, por sua vez, influenciam no comportamento da microdureza, enquanto a tensão residual interfere na adesão dos conjugados quando solicitados por dobramento.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar revestimentos em sobrecamadas visando minimizar a região de solda fria (região com ausência de adesão em função da formação do *flash*) e verificar as principais respostas tais como tensão residual e propriedades mecânicas (dureza, ductilidade, resistência ao dobramento e mecanismos de adesão).
- Avaliar a rugosidade na interface dos conjugados após a deposição por meio de análise de imagens para verificar se a carga imposta pela haste consumível é suficiente para suprimir os picos de aspereza do substrato no processo FSS.
- Levantar um perfil de tensão residual na seção transversal da camada depositada por meio da técnica de furo cego para verificar se há variações do comportamento da tensão com a variação da espessura do revestimento.
- Realizar ensaios de fadiga para verificar a influência da variação da tensão residual em função dos parâmetros de entrada do processo FSS.

ABSTRACT

Tribology is the segment of engineering that studies the phenomena that occur on the surfaces of materials when placed in contact with each other. One of the pillars of tribology is the study of wear and its mechanisms. It is known that one of the ways to delay or even avoid the wear of materials would be the deposition of a coating with more resistant materials for a given application. Among the coating techniques, one can highlight friction stir surfacing (FSS), which has attracted the interest of the academic and industrial communities as it is applicable to a wide variety of similar and dissimilar materials. This work aims to evaluate the influence of changes in the input parameters, namely, mean square roughness (R_q) of the substrate (0.43, 1.75 and 2.54 μm), rotation of the consumable rod (1500, 2250 and 3000 rpm) and deposition speed (190, 285 and 380 mm / min) on the efficiency and thermal control of the process, morphology and dimensions of the coated layer in addition to the metallurgical (microstructure and residual stress) and mechanical properties (microhardness and resistance to bending) of the conjugates. ASTM A36 steel was used as substrate and ABNT 4340 steel as consumable rod and the deposition of the coatings was carried out in a machining center. The deposition input parameters were selected according to a full factorial design with three levels. The best efficiencies were noted for the conjugates obtained with the lowest input parameters. However, for all deposition conditions, conjugates with uniform morphological aspects were obtained, with no apparent flaws. It was found that the substrate roughness influences the coating adhesion mechanism, however it has no significant influence on the temperature evolution during the process, on the coating geometry, on the microstructure, on the residual stress or on the mechanical properties (microhardness and resistance to bending). Rotation of the consumable rod and speed of deposition, significantly influence the morphological and dimensional aspect of the coating, the amount of energy that enters the process and, consequently, the cooling rate of the conjugates, causing variations in the mechanical properties and in the metallurgical behavior (microstructures generated and induced residual stresses).

Keywords: friction stir surfacing; ABNT 4340 steel, ASTM A36 steel; roughness; adhesion; microhardness; microstructure.

REFERÊNCIAS

ABNT ISSO 4288:2008 Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade, 2008.
<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=9732>

AMOS, D.R., Method of forming a trailing edge on a steam turbine blade and the blade made thereby, **US Patent No. 5,183,390 A**. 1993.

ASM International Handbook, volume 1, **properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys**. 10th edition, p. 1618. 1993 / 2005.

ASTM E112-13, **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. www.astm.org

BATCHELOR, A. W. et al., The Effect of Metal Type and Multi-Layering on friction Surfacing. **Journal of Materials Processing Technology**. 57, p. 172-181, 1996.

BEDFORD, G. M. et al., On the Thermo-Mechanical Events During Friction Surfacing of high speed steels. **Surface and Coatings Technology** 141, p.34-39, 2001.

BEDFORD, G. M. et al., Friction Surfacing for wear applications. **Metals and Materials**, p.702-705, 1990.

BEDFORD, G. M. e RICHARDS, P. J.: **Surface Engineering**. Conf. 85, London, UK, June 1985, TWI, 279, Paper 50.

BISHOP, E., Friction welding in the Soviet Union. **Welding and Metal Fabrication** 28 (10), 408–410, 1960.

BUCKLEY, DONALD H. Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication - Tribology series; 5, Elsevier scientific publishing company, 1981.

CHANDRASEKARAN, M. et al., Friction surfacing of metal coatings on steel and aluminum substrate. **Journal of Materials Processing Technology** 72, p.446 – 452, 1997.

DOUGHTY, R.W., SHAW, D.J., GIBSON, D.E. Friction stir surfacing process and device for treating rails, **Patent No. WO 2009030960 A1**. 2009.

DUNKERTON, S.B., THOMAS, W.M. **Repair by Friction Welding**. Repair and Reclamation, London. 1984

FUKAKUSA, K., On the Characteristics of the Rotational Contact Plane –A Fundamental Study of Friction Surfacing, vol. 10/7. **Welding International**. p. 524–529. 1996.

GALVIS, J.C., OLIVEIRA, P.H.F., HUPALO, M.F., MARTINS, J.P., CARVALHO, A.L.M. Influence of friction surfacing process parameters to deposit AA6351-T6 over AA5052-H32 using conventional milling machine. **Journal of Materials Processing Technology** 245. 91–105. 2017.

GALVIS, J.C, OLIVEIRA, P.H.F., MARTINS, J.P, A.L.M. CARVALHO, A.L.M., **Assessment of process parameters by friction surfacing on the double layer deposition**, Materials Research **21**. (2018).

GANDRA, J., KROHN, H., MIRANDA, R. M., VILAÇA, P., QUINTINO, L., SANTOS, J. F. Friction surfacing – A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, p. 1062-1093. 2014.

GANDRA, J., MIRANDA, R.M., VILAÇA, P. Performance analysis of friction surfacing. **Journal of Materials Processing Technology** 212. p. 1676 – 1686. 2012

GANDRA, J., VIGARINHO, P., PEREIRA, D., MIRANDA, R.M., VELHINHO, A., VILAÇA,P. Wear characterization of functionally graded Al–SiC composite coatings produced by Friction Surfacing. **Materials and Design** 52. p. 373 – 383. 2013.

GERDAU, Manual de aços. Edição atualizada. 2003.

GOVARDHAN, D. et al., Characterization of Austenitic Stainless Steel Friction Surfaced Deposite over Low Carbon Steel. **Materials and Design** 36, p.206-214, 2012.

GOVARDHAN, D., SAMMAIAH, K., MURTI, K.G.K., REDDY, M.G. Evaluation of bond quality for stainless steel-Carbon steel friction surfaced deposits. **Materials Today: Proceedings** 2, 3511 – 3519. 2015.

HANKE, S., BEYER, M., SANTOS, J.F., FISCHER, A. Friction surfacing of a cold work tool steel – Microstructure and sliding wear behavior. **Wear** 308, p. 180 – 185. 2013.

HANKE, S., SANTOS, J.F. Comparative study of severe plastic deformation at elevated temperatures of two aluminium alloys during friction surfacing. **Journal of Materials Processing Tech.** 247. 257–267. 2017.

HUANG, C., LI, W., ZHANG, Z., FU, M., PLANCHE, M., LIAO, H., MONTAVON, G. A. Modification of a cold sprayed SiCp/Al5056 composite coating by friction stir processing. **Surface & Coatings Technology** 296, 69–75. 2016.

HUTCHINGS, I.M., Tribology: friction and wear of engineering materials. **Ed. Edward Arnold**, 1992.

KLOPSTOCK, H., NEELANDS, A.R. An improved Method of Joining or Welding Metals. **Patent GB00572789**, 17.10.1941

KLOPSTOCK, H., NEELANDS, A.R. An improved method of joining or welding metals, UK **Patent No. GB572789**. 1941.

KUMAR, B. V., REDDY, G. M., MOHANDAS, T. Influence of process parameters on physical dimensions of AA6063 aluminium alloy coating on mild steel in friction surfacing. **Defence Technology** 11. p. 275e281. 2015.

KUMAR, M. V., SATISH, S.V. Dr., Friction Stir Surfacing of Cooper. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, p. 1414-1418, 2012.

LEBEDEV, V.K. and CHERNENKO, I.A. **Friction Welding**, Sob. Tech. Rev. C. Weld. Surf. vol.4, p. 59-168. 1992.

LI, J. Q. e SHINODA, T. Underwater friction surfacing. **Surface Engineering**, 16:1, p.31 – 35, 2000.

LIU, X. M. et al., Transferring mechanism of the coating rod in friction surfacing. **Surface and Coatings Technology** 202, p.1889–1894, 2008.

LIU, X. et al. Finite difference modeling on the temperature field of consumable rod in friction surfacing. **Journal of Materials Processing Technology** 209, p.1392–1399, 2009.

MACEDO, M.L.K. Caracterização de depósitos realizados pelo processo de deposição por fricção em chapas de alto carbono, tese de doutorado PPG3M, UFRGS, 2011.

MACHADO, A.R., ABRÃO, A.M, COELHO, R.T., SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3.ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MAREK STANISŁAW WĘGŁOWSKI. Friction stir processing – State of the art (Review). **Archives of civil and mechanical engineering** 18. p.114 – 129. 2018.

MAZZAFERRO, C.C.P. Soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica de um aço trip 800: processo, microestrutura e propriedades, tese de doutorado, PPGE3M, UFRGS, 2008.

MEDINA, S.F., HERNANDEZ, C.A. General expression of the Zener-Hollomon parameter as a function of the chemical composition of low alloy and microalloyed steels, **Acta Materialia** 44, 137–148. 1996. [https://doi.org/10.1016/1359-6454\(95\)00151-0](https://doi.org/10.1016/1359-6454(95)00151-0).

MODENESI, P.J., MARQUES, P.V. e SANTOS, D. B. Introdução à metalurgia da soldagem. Apostila UFMG.

MORISADA, Y., FUJII, H., MIZUNO, T., ABE, G., NAGAOKA, T., FUKUSUMI, M. Modification of nitride layer on cold-work tool steel by laser melting and friction stir processing. **Surface & Coatings Technology** 204. 386–390. 2009.

NICHOLAS, E.D. Friction surfacing. In: Olson, D., Siewert, T., Liu, S., Edwards, G. (Eds.), ASM Handbook - **Welding Brazing and Soldering**. ASM International, Ohio, United States of America, pp. 321–323, 1993.

NICHOLAS, E.D., Friction processing technologies. **Welding in the World** 47, 2–9, 2003.

OHRING, MILTON. **The materials science of thin films**. Academic Press, 1992.

OLSHANSKY, N. e NIKOLAEV, G. **Advanced welding processes**. Mir publishers moscow, 1977.

PEREIRA, D., GANDRA, J., TEIXEIRA, P. J., MIRANDA, R.M., VILAÇA, P. Wear behavior of steel coating produced by friction surfacing. **Journal of Materials Processing Technology**, p.2858 – 2868, 2014.

PEREZ, J.C.G. Avaliação do processo de deposição superficial por atrito em liga de alumínio AA6351-T6 sobre substrato de liga de alumínio AA5052-H32, dissertação de mestrado, UEPG, 2016.

PRAWOTO, Y., JASMAWATI, N., SUMERU, K. Effect of Prior Austenite Grain Size on the Morphology and Mechanical Properties of Martensite in Medium Carbon Steel, **Journal of Materials Science & Technology**, 28 - 461–466.2012

PULI, R., RAM, J.G.D. Dynamic recrystallization in friction surfaced austenitic stainless steel coatings, **Materials Characterization**. 74, 49–54. 2012.

QUAN, G.Z., WANG, Y., LIU, Y.Y., ZHOU, J. Effect of temperatures and strain rates on the average size of grains refined by dynamic recrystallization for as-extruded 42CrMo steel, **Materials Research**. 16, 1092–1105. 2013.

RABINOWICS, E. **Friction and wear of materials**. 2 ed. USA: John Wiley & Sons, 1995. 315 p.

RAFI, H.K., BALASUBRAMANIAM, K., PHANIKUMAR, G., RAO, K.P. Thermal profiling using infrared thermography in friction surfacing. **Metallurgical and Materials Transactions A** 42, 3425–3429. 2011a.

RAFI, H.K., PHANIKUMAR, G., PRASAD RAO, K. Material flow visualization during friction surfacing. **Metallurgical and Materials Transactions A** 42, 937–939. 2011b.

RAFI, H.K., RAM, J.G.D., PHANIKUMAR, G., RAO, P. K. Microstructural evolution during friction surfacing of tool steel H13. **Materials and Design** 32. 82–87. 2011.

RAFI, K. H., JANAKI RAM, G. D., PHANIKUMAR, G., RAO, P.K. Friction surfaced tool steel (H13) coatings on low carbon steel: A study on the effects of process parameters on coating characteristics and integrity, **Surface & Coatings Technology** 205, p. 232-242, 2010.

RAO, P. K., DAMODARAM, R., RAFI, K. H., RAM, G.D. J., REDDY, M. G., NAGALAKSHMI, R. Friction surfaced Stellite6 coatings. **Materials Characterization** 70. p. 111-116. 2012a.

RAO, P.K., SREENU, V. A., RAFI. K.H., LIBIN, M.N., BALASUBRAMANIAM, K. Tool steel and copper coatings by friction surfacing – A thermography study. **Journal of Materials Processing Technology** 212. p. 402-407. 2012b.

- RAO, P. K., SANKAR, A., RAFI, K.H., JANAKI RAM, G.D., REDDY. M.G. Friction surfacing on nonferrous substrates: a feasibility study. **Int J Adv Manufacture Technology** 65. p. 755-762. 2013.
- RAVISEKHAR, S., CHITTARANJAN, V., GOVARDHAN, D. Friction Surfaced Deposits for Industrial Applications. **Materials Today: Proceedings** 4, 3796 – 3801. 2017.
- SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2. ed. Nova York (EUA): Oxford University Press, 2005.
- SHARMA, V., PRAKASH, U., KUMAR, B.V., Surface composites by friction stir processing: A review. **Journal of Materials Processing Technology** 224, 117–134. 2015.
- SHINODA, T. et al., Effect of Process Parameters During Friction Coating on Properties of Non – Dilution Coating Layers. **Surface Engineering** vol.14, Nº 3, p. 211-216, 1998.
- SILVERIO, S., KROHN, H., FITSEVA, V., ALCÂNTRA, N.G., SANTOS, J.F., Deposition of AA5083-H112 Over AA2024-T3 by friction surfacing. **Soldagem e Inspeção** 23 (2018) 225–234.
- SUGANDI, V., RAVISHANKAR, V. Optimization of friction surfacing process parameters for AA1100 aluminum alloy coating with mild steel substrate using response surface methodology (RSM) technique, **Modern Applied Science** 6 p. 69-80, 2012.
- THOMAS, W. M. An Introduction to Friction Surfacing. **Surface Engineering Conference**, vol. 3, paper 49, pp261-277, 1985.
- THOMAS, W. M., NICHOLAS, E. D., Friction Surfacing and New Methods of Friction Cladding (review). **Paton Welding Journal**, 6(3), pp 179-185. 1994.
- THOMAS, W.M. Solid phase cladding by friction surfacing. In: **TWI International Symposium, Cambridge**, p. 18. 1988.
- TOKISUE, H., KATOH, K., ASAHINA, T., USIYAMA, T. Mechanical properties of 5052/2017 dissimilar aluminum alloys deposit by friction surfacing. **Metallurgical and Materials Transactions** 47, 874–882. 2006.
- TROYSI, F. C. T, D., BRITO, P. P., SANTOS, I. B., SILVA, K.H. S., Análise do processo de revestimento por fricção de aço inoxidável austenítico sobre aço-carbono em centro de usinagem com

comando numérico, **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM** – Fortaleza – CE, 2016.

TYAYAR, K.H.A. Friction welding in the reconditioning of worn components. **Svarochnoe Proizvodstvo** 1, 3–24. 1959.

TYAYAR, K.A., Friction welding in the reconditioning of worn components. **Svarochnoe Proizvodstvo** 1/10, 71–76. 1959.

VAN KALKEN, A., Friction Surfacing of Stainless Steel on Mild Steel With a Robot. **Dissertação de mestrado**. Delft University of Technology, 2001.

VITANOV, V. I., JAVAID, N., STEPHENSON, D. J. Application of response surface methodology for the optimization of micro friction surfacing process, **Surface & Coatings Technology** 204 p. 3501-3508, 2010.

VITANOV, V.I. e VOUTCHKOV, I. I. Process parameters selection for friction surfacing applications using intelligent decision support. **Journal of Materials Processing Technology** 159, 27–32, 2005b.

VITANOV, V.I., VOUTCHKOV, I.I., BEDFORD, G.M. Neurofuzzy Approach to Process Parameter Selection for Friction Surfacing Applications. **Surface and Coatings Technology** 140, p.256-262, 2001.

VITANOV, V.I., VOUTCHKOV, I. I., BEDFORD, G. M. Decision Support System to Optimize the FRITEC (Friction Surfacing) Process. **Journal of Materials Processing Technology**, 107, p. 236-242, 2000.

WEISS, H. Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment, **Surface and Coatings Technology** 71. p. 201-207, 1995.

APÊNDICE

Nomenclatura utilizada neste trabalho para os conjugados obtidos por FSS:

AAA – Parâmetro de deposição ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$)
 AAB – Parâmetro de deposição ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$)
 AAC – Parâmetro de deposição ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$)
 ABA – Parâmetro de deposição ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 225 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$)
 ABB – Parâmetro de deposição ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$)
 ABC – Parâmetro de deposição ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$)
 ACA – Parâmetro de deposição ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$)
 ACB – Parâmetro de deposição ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$)
 ACC – Parâmetro de deposição ($R_q = 0,43 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$)
 BAA – Parâmetro de deposição ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$)
 BAB – Parâmetro de deposição ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$)
 BAC – Parâmetro de deposição ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$)
 BBA – Parâmetro de deposição ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$)
 BBB – Parâmetro de deposição ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$)
 BBC – Parâmetro de deposição ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$)
 BCA – Parâmetro de deposição ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$)
 BCB – Parâmetro de deposição ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$)
 BCC – Parâmetro de deposição ($R_q = 1,75 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$)
 CAA – Parâmetro de deposição ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$)
 CAB – Parâmetro de deposição ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$)
 CAC – Parâmetro de deposição ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 1500 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$)
 CBA – Parâmetro de deposição ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$)
 CBB – Parâmetro de deposição ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$)
 CBC – Parâmetro de deposição ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 2250 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$)
 CCA – Parâmetro de deposição ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 190 \text{ mm/min}$)
 CCB – Parâmetro de deposição ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 285 \text{ mm/min}$)
 CCC – Parâmetro de deposição ($R_q = 2,54 \mu\text{m}$, $n = 3000 \text{ rpm}$ e $V_d = 380 \text{ mm/min}$)