

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Gabriel Amaral Ferreira

**REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS
TERMICAMENTE: EFEITO DO TIPO E INTENSIDADE DA
CORRENTE SOBRE A MICROESTRUTURA E MICRODUREZA**

Santa Maria, RS
2020

Gabriel Amaral Ferreira

**REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS
TERMICAMENTE: EFEITO DO TIPO E INTENSIDADE DA CORRENTE SOBRE A
MICROESTRUTURA E MICRODUREZA**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Cristiano José Scheuer, Dr. Eng.

Santa Maria, RS
2020

Gabriel Amaral Ferreira

**REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS
TERMICAMENTE: EFEITO DO TIPO E INTENSIDADE DA CORRENTE SOBRE A
MICROESTRUTURA E MICRODUREZA**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Aprovado em 16 de janeiro de 2020:

Prof. Cristiano José Scheuer, Dr. Eng. (DEM/UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Inácio da Fontoura Limberger, Dr. Eng. (DEM/UFSM)

Prof. Natália de Freitas Daudt, Dr. Eng. (DEM/UFSM)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Aos professores do curso de engenharia mecânica da UFSM pelos conhecimentos compartilhados ao longo da graduação. Em especial ao professor Cristiano pela orientação no TCC, e aos professores Inácio e Natália pela contribuição para a melhoria deste.

Ao professor Ramon Paredes da UFPR pela disponibilização dos equipamentos necessários à confecção e preparo das amostras, e deposição dos revestimentos aspergidos termicamente. Agradeço especialmente ao Dr. Gustavo Sucharski e ao Me. Igor Zanella pela execução do preparo das amostras e deposição dos revestimentos.

Ao professor Irineu Mazzaro da UFPR pela disponibilização do equipamento empregado na caracterização das amostras através da técnica de difração de raios X. Agradeço especialmente ao Me. Igor Zanella pela realização desta caracterização.

Ao colega Gabriel Quinhones pelo auxílio no preparo das amostras e caracterização destas através da técnica de microscopia óptica e medições de microdureza na escala Vickers.

RESUMO

REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE: EFEITO DO TIPO E INTENSIDADE DA CORRENTE SOBRE A MICROESTRUTURA E MICRODUREZA

AUTOR: Gabriel Amaral Ferreira
ORIENTADOR: Cristiano José Scheuer

A aplicação de revestimentos a base de Fe-Cr-Ni é usada com o objetivo de melhorar o desempenho à corrosão de componentes fabricados a partir de aço baixo carbono. Neste contexto, os processos de aspersão térmica são amplamente utilizados em meio industrial para deposição de revestimentos, em decorrência do seu baixo custo e facilidade de execução. No entanto, a elevada oxidação, porosidade e baixa aderência/ coesão dos revestimentos tem sido um limite à sua aplicação em determinadas condições. Com o objetivo de contornar essa limitação, inúmeros estudos têm sido realizados com o propósito de reduzir a porosidade e aumentar a adesão/coesão dos revestimentos aspergidos termicamente, submetendo-os aos tratamentos de refusão. Dentre as técnicas disponíveis, o emprego do arco elétrico de soldagem demonstrou bons resultados em aplicações práticas, possibilitando a melhora do desempenho nos revestimentos. Assim, esse trabalho teve como objetivo, avaliar o efeito do tipo e intensidade da corrente de refusão através do processo TIG, sobre a microestrutura e microdureza de revestimentos de liga a base de Fe-Cr-Ni depositados por aspersão térmica a arco elétrico sobre substrato de baixo carbono. Para tanto, foi avaliado o efeito do emprego de intensidades de corrente no intervalo entre 90 e 150 A nos regimes contínuo e pulsado. As amostras como aspergida e refundidas foram caracterizadas através de microscopia óptica, difração de raios X e medidas de microdureza Vickers. Os resultados obtidos evidenciam que o tipo e intensidade de corrente de refusão exerce efeito sobre a microestrutura e microdureza do revestimento refundido. Os revestimentos refundidos apresentam microestrutura dendrítica, sendo constituídos pelas fases Fe- γ , Fe- α , Fe₃O₄ e Cr₂₃C₆. A completa refusão e diluição do revestimento aspergido no metal de base ocorre para valores de corrente de 90 A no regime pulsado, e 110 A no regime contínuo. O aumento da intensidade de corrente nos regimes contínuo e pulsado promove um acréscimo na diluição do revestimento ao metal de base, evidenciado pelo aumento da profundidade de endurecimento; e um aumento do tamanho de grão do metal de base. Também foi observado que para uma mesma intensidade de corrente, o regime pulsado promove uma menor diluição quando comparado ao regime contínuo. Por fim, é possível concluir que o processo TIG pode ser empregado com sucesso na refusão de revestimentos aspergidos termicamente, promovendo a obtenção de um revestimento refundido isento de porosidade e oxidação interna.

Palavras-chave: Aspersão Térmica. Refusão a Arco Elétrico. Revestimento base de Fe-Cr-Ni.

ABSTRACT

THERMALLY SPRAYED COATINGS REMELTING BY ELECTRIC ARC: EFFECT OF TYPE AND INTENSITY OF THE CURRENT ON MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS

AUTHOR: Gabriel Amaral Ferreira

ADVISOR: Cristiano José Scheuer

The application of Fe-Cr-Ni based coatings is used to improve the corrosion performance of components made from plain carbon steels. In this context, thermal spraying processes are widely used in industrial environments for coating deposition, due to their low cost and ease of execution. However, the high oxidation, porosity and low adhesion/cohesion of coatings has been a limit to their application under certain conditions. In order to circumvent this limitation, numerous studies have been conducted with the purpose of reducing porosity and increasing adhesion/cohesion of thermally sprayed coatings by subjecting them to remelting treatments. Among the available techniques, the use of electric arc welding has shown good results in practical applications, enabling the improvement of coatings performance. Thus, this work aimed to evaluate the effect of the type and intensity of the remelting current through the TIG process on the microstructure and microhardness of Fe-Cr-Ni alloy coatings deposited by electric arc thermal spray on plain carbon steel substrate. Therefore, the effect of current intensities in the range between 90 and 150 A in continuous and pulsed regimes was evaluated. The samples as deposited and remelted were characterized by optical microscopy, X-ray diffraction and Vickers microhardness measurements. The results show that the type and intensity of remelting current has an effect on the microstructure and microhardness of the remelted coating. The remelted coatings have dendritic microstructure, composed of the Fe- γ , Fe- α , Fe₃O₄ e Cr₂₃C₆ phases. Complete remelting and dilution of the thermal sprayed coating on base metal occurs at current values of 90 A for pulsed regime and 110 A for continuous. The increase of the current intensity in the continuous and pulsed regimes promotes an increase in the remelted coatings dilution, evidenced by the increase of the hardening depth; and an increase in the base metal grains size. It was also observed that for the same current intensity, the pulsed regime promotes a lower dilution when compared to the continuous regime. Finally, it can be concluded that the TIG process can be successfully employed in the remelting of thermally sprayed coatings, promoting the obtainment of a remolded coating free of porosity and internal oxidation.

Keywords: Thermal Spray. Electric Arc Remelting. Fe-Cr-Ni Based Coatings.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Esquema ilustrando o processo de aspersão térmica.	12
Figura 2. (a) Modelo sugerido na literatura para a formação de um revestimento aspergido termicamente, (b) Micrografia de revestimento de aço carbono depositado por processo a arco elétrico.	13
Figura 3. Fotografia ilustrando o deslocamento do revestimento aspergido em relação ao substrato, após ensaio de ciclagem térmica.	14
Figura 4. Esquema ilustrando a sequência de eventos que ocorrem durante o processo de aspersão térmica.	18
Figura 5. Esquema usual de classificação das técnicas de aspersão térmica.	19
Figura 6. (a) Ilustração indicando as características de uma pistola de aspersão térmica por arco elétrico; (b) Esquema indicando como ocorre a fusão dos arames no bico da pistola aspersora.	21
Figura 7. Modelo esquemático de solidificação de lamelas e formação do revestimento aspergido termicamente.	22
Figura 8. Esquema evidenciando a morfologia típica de um revestimento aspergido termicamente.	23
Figura 9. Representação esquemática do processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa.	27
Figura 10. Representação esquemática dos elementos que constituem um equipamento para soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa.	28
Figura 11. Influência da corrente de soldagem sobre a geometria dos cordões de solda.	29
Figura 12. Influência da corrente de soldagem no perfil de temperatura do arco elétrico no processo TIG.	29
Figura 13. Esquema do comportamento dinâmico dos sinais que caracterizam os tipos de corrente utilizados na soldagem TIG.	30
Figura 14. Soldagem TIG com corrente contínua polaridade direta (a) e indireta (b) e corrente alternada (c).	30
Figura 15. Fluxograma indicando as etapas de realização deste trabalho.	32
Figura 16. (a) Equipamento, e (b) pistola de aspersão térmica a arco elétrico empregados na deposição dos revestimentos.	34
Figura 17. Equipamentos empregados para realizar a refusão dos revestimentos aspergidos termicamente.	35
Figura 18. (a) Trajetória de refusão adotada, e (b) indicação da sobreposição entre os cordões.	36
Figura 19. Indicação dos cortes realizados nas amostras refundidas para obter os corpos de provas para as caracterizações metalográficas, de microdureza e de DRX.	37
Figura 20. Microestrutura da seção transversal (a) e longitudinal (b) do revestimento aspergido termicamente na condição como depositados.	39
Figura 21. Perfil de microdureza na seção transversal e longitudinal dos revestimentos aspergidos termicamente na condição como depositados.	41

- Figura 22. Padrão de difração de raios X do revestimento aspergidos termicamente na condição como depositado. 42
- Figura 23. Microestrutura da seção transversal dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CC; mostrando as regiões (a) refundida, (b) de transição, (c) zona afetada pelo calor, e (d) metal de base. Aplicação de 400 ×. 44
- Figura 24. Microestrutura da seção longitudinal dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CC; mostrando as regiões (a) refundida, (b) de transição, (c) zona afetada pelo calor, e (d) metal de base. Aplicação de 400 ×. 45
- Figura 25. Perfil de microdureza nas seções transversal (a) e longitudinal (b) dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CC. 46
- Figura 26. Padrão de difração de raios X dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CC. 47
- Figura 27. Microestrutura da seção transversal dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CP; mostrando as regiões (a) refundida, (b) de transição, (c) zona afetada pelo calor, e (d) metal de base. Aplicação de 400 ×. 48
- Figura 28. Microestrutura da seção longitudinal dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CP; mostrando as regiões (a) refundida, (b) de transição, (c) zona afetada pelo calor, e (d) metal de base. Aplicação de 400 ×. 49
- Figura 29. Perfil de microdureza nas seções transversal (a) e longitudinal (b) dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CP. 50
- Figura 30. Padrão de difração de raios X dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CP. 51
- Figura 31. Diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni para 70% Fe (indicada em vermelho a composição química do consumível adotado neste trabalho). 56
- Figura 32. Diagrama de Schaeffler (indicada em vermelho os teores de Ni e Cr equivalente do consumível adotado neste trabalho). 56

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Processos de aspersão térmica, suas siglas e nomes.	20
Tabela 2. Composição química dos metais de base e adição usados neste trabalho.	32
Tabela 3. Parâmetros adotados no jateamento dos corpos de prova à serem revestidos.	33
Tabela 4. Parâmetros utilizados na deposição dos revestimentos.	33
Tabela 5. Parâmetros utilizados na refusão dos revestimentos em cada estudo realizado.	36

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (instituto americano de ferro e aço)
ASP	<i>Arc Spray Process</i> (Aspersão térmica a arco elétrico, ou arco arame)
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> (Soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa)
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DDP	Diferença de Potencial
LABATS	Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais
LASOMET	Laboratório de Soldagem e Materiais
LORXI	Laboratório de Ótica de Raios-X e Instrumentação
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i> (Soldagem por arco plasma)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> (Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio)
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	APRESENTAÇÃO	12
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	Objetivo geral	16
1.3.2	Objetivos específicos	16
1.4	ESTRUTURA DO TCC	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	ASPERSÃO TÉRMICA	18
2.1.1	Aspersão térmica a arco elétrico	20
2.1.2	Formação dos revestimentos aspergidos termicamente	21
2.1.3	Microestrutura dos revestimentos aspergidos termicamente	22
2.1.4	Efeito da microestrutura sobre as propriedades e desempenho do revestimento	25
2.2	REFUSÃO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE	26
2.2.1	Refusão de revestimentos empregando arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa	27
2.2.2	Efeito da intensidade e tipo de corrente de refusão	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E DEPOSIÇÕES DOS REVESTIMENTOS	32
3.2	REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS	34
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PROCESSADO	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE	39
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS REFUNDIDOS UTILIZANDO CORRENTE CONTÍNUA	43
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS REFUNDIDOS UTILIZANDO CORRENTE PULSADA	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
5.1	CONCLUSÕES	52
5.2	SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS	54
	ANEXO A – DADOS COMPLEMENTARES	56

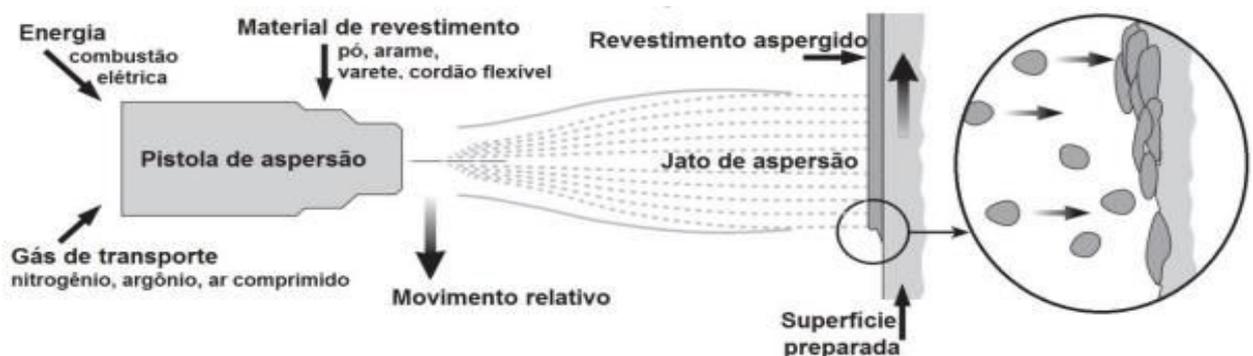
1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Em meio ao atual cenário de contínua inovação tecnológica, a oferta de novos materiais estendeu o campo de emprego de metais e ligas metálicas para aplicações em ambientes de extrema severidade. Neste sentido, atualmente, um dos maiores desafios dos projetistas é a seleção de uma determinada liga metálica com propriedades adequadas ao tipo de solicitação estabelecida no ambiente de aplicação do material, atendendo aos requisitos de custo, segurança, manufaturabilidade, etc.

Embora a rota tradicional de fabricação busque o desenvolvimento de novos metais e novas ligas, atualmente uma atenção maior tem sido remetida aos processos de otimização de propriedades através de técnicas de engenharia de superfície. Através destes tratamentos é possível estender a vida útil de componentes sujeitos a solicitações severas de desgaste, corrosão, fadiga mecânica e térmica, etc.; através da modificação da microestrutura e/ou composição química da superfície do componente. Uma das técnicas de engenharia de superfície que tem sido satisfatoriamente aplicada com esta finalidade corresponde a Aspersão Térmica. Este método consiste em aspergir uma camada de material fundido sobre um substrato previamente preparado, empregando uma pistola que fornece o calor necessário à fusão do material de adição (através da queima de um combustível gasoso, arco elétrico ou empregando dinâmica de gases), o qual é projetado sobre a superfície do substrato na forma de pequenas partículas com o uso de um gás inerte ou ar comprimido (Figura 1). O fornecimento do material de adição pode se dar no estado de pó, vareta, arame ou bastão.

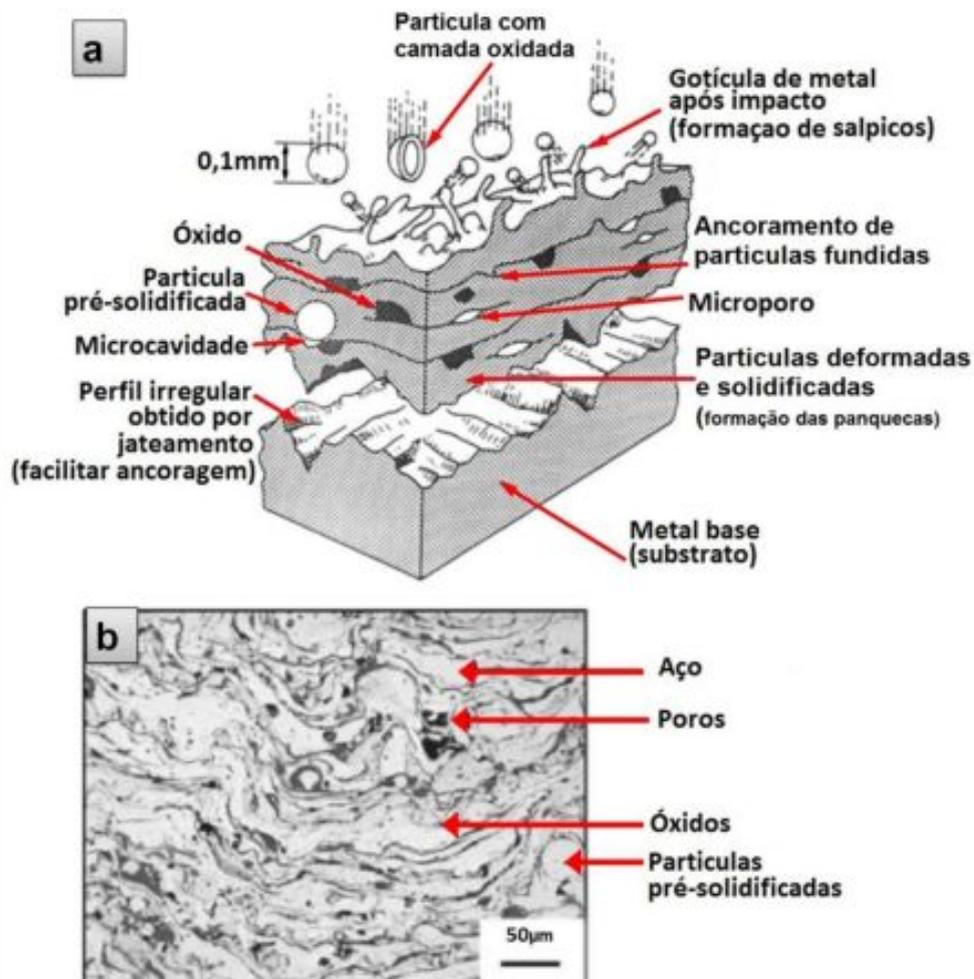
Figura 1. Esquema ilustrando o processo de aspersão térmica.



SUCHARSKI, 2016.

As partículas fundidas de material de adição ao colidirem com superfície do substrato sobre a qual são projetadas, deformam-se aumentando a sua área de contato, ancorando-se mecanicamente às suas asperezas durante o resfriamento, formando uma microestrutura lamelar (Figura 2). Além disso, no momento do contato das partículas pulverizadas com o substrato, uma elevada quantidade de energia cinética e térmica é transferida daquelas para este, gerando as condições necessárias para que ocorra a difusão de alguns microconstituintes do material aspergido para o interior do substrato, ou a ocorrência de ponto de microsoldagem entre estes (SUCHARSKI, 2016). Dessa maneira, a ligação entre o revestimento e o material de base pode ser mecânica, química, física ou uma combinação dessas (AWS, 1985).

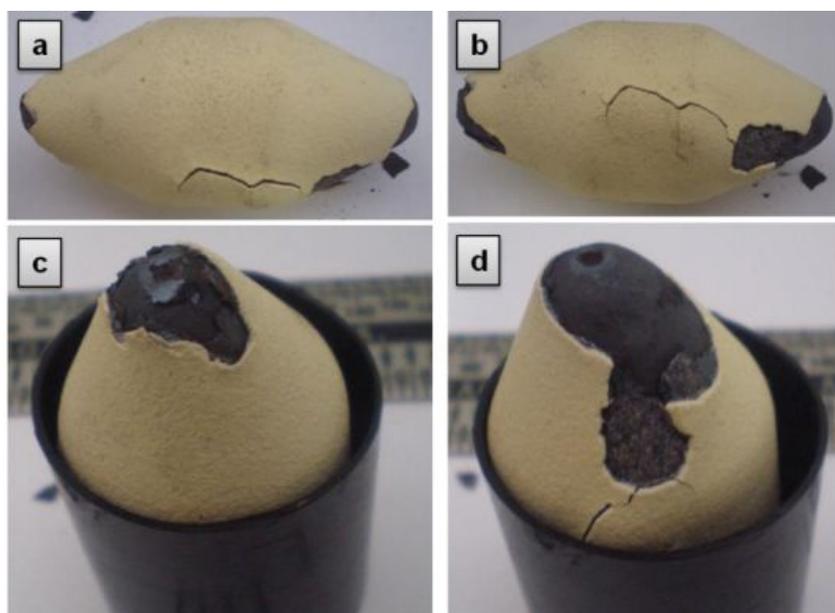
Figura 2. (a) Modelo sugerido na literatura para a formação de um revestimento aspergido termicamente, (b) Micrografia de revestimento de aço carbono depositado por processo a arco elétrico.



Fonte: SUCHARSKI, 2016.

Conforme mencionado anteriormente, o custo é um fator determinante e limitante nos projetos de engenharia, logo a aspersão térmica possibilita o uso de substratos mais econômicos (materiais menos ‘nobres’), aplicando uma camada de revestimento a partir de um material de adição de maior custo (mais ‘nobre’). Neste sentido, a aplicação de revestimentos a base de ligas de Fe-Cr-Ni (aços inoxidáveis austeníticos) é usada muitas vezes com o objetivo de melhorar o desempenho à corrosão em componentes fabricados a partir de aço baixo carbono. Esse procedimento permite uma grande redução nos custos de produção de componentes, mesmo embutindo uma nova operação de fabricação no seu ciclo de produção. A aspersão térmica difere dos demais tratamentos de superfície em virtude de promover a obtenção de camadas mais espessas de revestimento, possibilitando corrigir irregularidades ou variações na superfície do substrato devido ao seu desgaste, fratura ou corrosão; constituindo uma alternativa para recuperação de componentes danificados (LIMA; TREVISAN, 2007). No entanto, uma limitante à aplicação desta técnica tem sido a elevada porosidade e oxidação dos revestimentos obtidos, resultando em uma baixa aderência/coesão do depósito, reduzindo a sua vida útil. O baixo grau de adesão entre a camada aspergida e o substrato, e coesão entre as partículas lamelares que constituem o revestimento, possibilita o fácil deslocamento das lamelas danificando o depósito (Figura 3).

Figura 3. Fotografia ilustrando o deslocamento do revestimento aspergido em relação ao substrato, após ensaio de ciclagem térmica.



Fonte: SUCHARSKI, 2016.

Face a isso, atualmente diversos autores tem buscado por alternativas que permitam aumentar a adesão/coesão do revestimento, através da diminuição da sua porosidade e oxidação. Dentre as técnicas que tem sido empregados com este propósito, o processo de refusão com o uso de arco elétrico tem apresentado bons resultados em aplicações práticas. Esse procedimento permite a obtenção de revestimentos refundidos com microestrutura e propriedades similares aqueles alcançados por técnicas de cladeamento (HENKE, 2013). Essa alternativa é atrativa tanto do ponto de vista econômico, pois não encarece sobremaneira o custo do componente; quanto do ponto de vista técnico, pois é de fácil realização e pode ser efetuada utilizando a mesma fonte empregada na realização do depósito. Porém, em virtude do grande número de parâmetros elétricos para o controle do arco, a seleção adequada destes, com o intuito de otimizar as propriedades finais do revestimento, constitui uma tarefa complexa e trabalhosa.

Neste sentido, buscar-se-á através da realização deste trabalho contribuir com a solução deste problema. Empregando o processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gás*), será avaliado o efeito do tipo e intensidade da corrente elétrica aplicada, sobre a microestrutura e microdureza dos depósitos refundidos de aço AISI 308LSi sobre um substrato aço ABNT 1020.

1.2 JUSTIFICATIVA

A técnica de aspersão térmica é amplamente empregada na indústria metal mecânica em função do seu baixo custo e facilidade de operação. Entretanto, a elevada porosidade e oxidação do revestimento aspergido e, em consequência, a sua baixa aderência/coesão reduz a sua vida útil limitando a sua aplicação. Diante disso, diversas técnicas de refusão têm sido usadas com o objetivo de promover a densificação dos depósitos, aumentando a sua união ao substrato. No entanto, considerando as singularidades de cada processo de refusão, e as condições de execução da operação, diferentes características microestruturais e propriedades mecânicas são obtidas para cada conjunto revestimento/substrato. Face ao grande número de parâmetros de processo envolvidos e a complexidade de seleção destes, é fundamental a otimização destas variáveis de modo a estabelecer as condições adequadas para a execução da

operação de refusão, considerando as características demandas para a superfície refundida. Essa demanda justifica a realização do presente trabalho.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 **Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é estudar o efeito do tipo e da intensidade da corrente de refusão superficial durante o processo TIG, sobre as características microestruturais e microdureza de revestimentos de **aço AISI 308LSi** aplicado sobre aço ABNT 1020 por aspersão térmica a arco elétrico.

1.3.2 **Objetivos específicos**

De forma específica, para que o objetivo geral deste trabalho seja atingido, é necessário que sejam realizados:

1. A preparação superficial das amostras através de jateamento abrasivo, e realizar a deposição do revestimento sobre a superfície previamente jateada;
2. A refusão superficial empregando-se distintos valores de intensidade e tipos de corrente de soldagem (corrente contínua e corrente pulsada) através da técnica TIG;
3. Caracterização microestruturalmente e mecanicamente (microdureza) dos revestimentos como aspergidos, e refundidos superficialmente;
4. Correlação entre o efeito da intensidade e do tipo de corrente sobre o ciclo térmico do processo e, conseqüentemente, sobre a microestrutura e dureza do revestimento refundido.

1.4 ESTRUTURA DO TCC

Esta monografia encontra-se estruturada em cinco capítulos, a saber:

- Capítulo 1: apresenta a temática do trabalho, assim como a justificativa para a sua realização, como também os objetivos a serem alcançados;
- Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica acerca dos assuntos relacionados ao tema abordado. Neste sentido, é feito um apanhado da literatura sobre os temas aspersão térmica e refusão de revestimentos aspergidos termicamente.
- Capítulo 3: retrata a abordagem metodológica utilizada para a realização do trabalho, apresentando uma descrição sumária dos materiais, processos e procedimentos adotados.
- Capítulo 4: destina-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos; e,
- Capítulo 5: trata das considerações finais do trabalho, onde são relatadas as conclusões do estudo experimental e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, ao final do documento são listadas as referências bibliográficas que forneceram subsídios para elaboração da revisão da literatura, estabelecimento da abordagem metodológica, e discussão dos resultados obtidos. Igualmente, em apêndice são apresentados dados complementares que contribuem para um melhor entendimento sobre o desenvolvimento do presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPERSÃO TÉRMICA

A aspersão térmica consiste em um grupo de processos por meio dos quais se deposita, sobre uma superfície previamente preparada, camadas de materiais metálicos ou não-metálicos. As camadas de material de adição são aspergidas sobre o substrato na forma de elementos finamente divididos, no estado fundido ou semi-fundido. A fusão do material de adição ocorre empregando-se energia termoquímica (queima de uma mistura de gases combustível e comburente) ou termoeletrica (arco elétrico ou indução elétrica). A atomização do material de adição sobre o substrato é feita utilizando-se um fluxo de gás (ar comprimido, gases ativos ou inertes) como propulsor, formando um revestimento composto por uma estrutura de partículas lamelares, as quais ancoram-se mecanicamente à superfície irregular do substrato durante o seu resfriamento (LIMA; TREVISAN, 2007) (Figura 4).

Figura 4. Esquema ilustrando a sequência de eventos que ocorrem durante o processo de aspersão térmica.



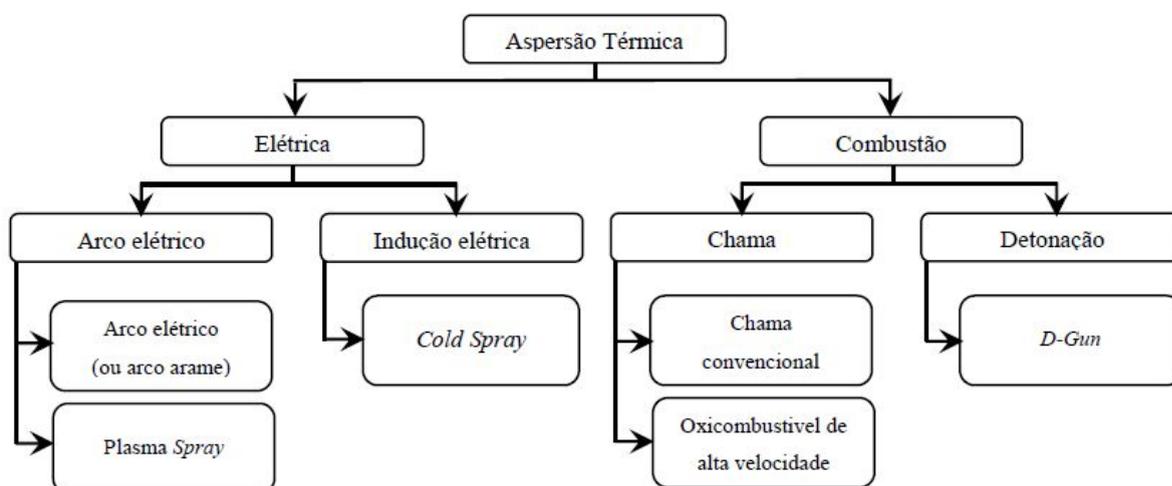
Fonte: LIMA; TREVISAN, 2007.

O processo de aspersão térmica apresenta como principal vantagem a gama de materiais possíveis de serem depositados. Como exemplo podem ser citados: a maioria dos metais e suas ligas, materiais cerâmicos (óxidos, carbonetos, borretos, nitretos, etc.), materiais compostos e hidretos (ASM, 1985). Em contrapartida, a grande limitação da aspersão térmica

consiste na dificuldade de deposição de revestimentos sobre componentes com geometrias complexas, uma vez que, a superfície a ser revestida deve ser completamente visível pela tocha ou pistola de aspersão (ALMEIDA, 2005).

De forma geral, o critério comum de classificação das diversas técnicas de aspersão térmica consiste no método de geração de calor empregado para aquecimento/fusão do material de adição (Figura 5). Neste sentido, conforme mencionado anteriormente, as técnicas de aspersão térmicas subdividem-se em elétricas e a combustão (Figura 5). As técnicas que empregam energia elétrica são subdivididas nos grupos que empregam arco e indução elétrica para a fusão e aquecimento, respectivamente, do material de adição; as técnicas a combustão, por outro lado, são subdivididas em chama e detonação, sendo a maior distinção entre estas correspondente à cinética do processo de queima dos gases, sendo no primeiro empregado a queima contínua da mistura, e no segundo, a queima cíclica (LIMA; TREVISAN, 2007). As demais subdivisões levam em conta as características, ou forma da matéria-prima empregada, específicas de cada uma das técnicas.

Figura 5. Esquema usual de classificação das técnicas de aspersão térmica.



Fonte: Adaptado de LIMA; TREVISAN, 2007.

Os nomes das diversas técnicas de aspersão térmica não apresentam tradução consagrada para a língua portuguesa, havendo incongruência entre àqueles empregados por diferentes autores. No entanto, é comum utilizar as siglas das nomeações em inglês para

identificar cada operação. Neste contexto, na Tabela 1 é apresentado às nomeações em inglês, siglas e denominação em português das principais técnicas de aspersão térmica.

Tabela 1. Processos de aspersão térmica, suas siglas e nomes.

Fonte de Aquecimento	Forma de Aquecimento	Sigla	Nome em Inglês	Nome Usual em Português
Elétrica	Arco Elétrico	ASP	Arc Spray Process	Arco Elétrico
		APS	Air Plasma Spraying	Plasma por Arco não Transferido
		PTA	Plasma Transferred Arc	Plasma por Arco Transferido
	Indução Elétrica	CS ou CGSM	Cold Spray ou Cold-Gas Spraying Method	Aspersão a Frio
Combustão	Chama	FS (-po/-arame)	Flame Spray	Chama Oxiacetilênica (pó ou arame)
		HVOF	High Velocity Oxy-Fuel	Chama de Alta Velocidade ou Ultrassônico
		HVCW	High Velocity Combustion Wire	Chama de Alta Velocidade com Arame
	Detonação	D-Gun™ ou DS	Detonation Thermal Spraying Process	Detonação

Fonte: Adaptado de SUCHARSKI, 2016.

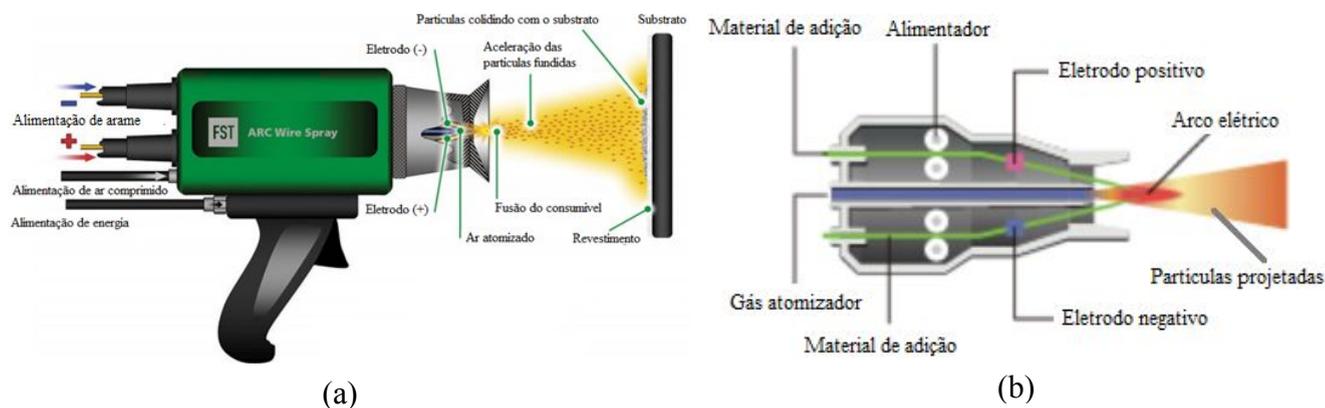
Tendo em vista o escopo deste TCC, não será feito aqui uma descrição sobre todas as técnicas de aspersão térmica que compõem cada grupo e subgrupo ilustrado na Figura 5; sendo descrito somente o processo a arco elétrico (ou arco arame), o qual foi empregado na deposição dos revestimentos aqui processados. Se for de interesse do leitor obter um maior detalhamento sobre as demais técnicas de aspersão térmica, indica-se a leitura da bibliografia citada.

2.1.1 Aspersão térmica a arco elétrico

Na técnica de aspersão térmica a arco elétrico (*Arc Spray Process* – ASP), dois arames são alimentados continuamente à um mesmo ponto focal pela pistola aspersora, sendo aplicado entre eles uma diferença de potencial elétrico (DDP) da ordem de 18 a 40 V. Essa DDP é suficiente para gerar um arco elétrico entre as extremidades dos arames a medida em que estes se aproximam do ponto de convergência, promovendo a sua fusão. O material fundido é impulsionado para fora da pistola, a velocidades de aproximadamente 150 m/s, com o auxílio de gases atomizantes (em geral ar comprimido para reduzir o custo da operação;

podendo também ser empregados gases inertes ou ativos para reduzir a oxidação do revestimento), sendo projetados sobre a superfície do substrato. Na Figura 6 é ilustrada uma pistola de aspersão térmica ASP, bem como, a forma como os materiais de adição são fundidos e propelidos sobre a superfície do substrato.

Figura 6. (a) Ilustração indicando as características de uma pistola de aspersão térmica por arco elétrico; (b) Esquema indicando como ocorre a fusão dos arames no bico da pistola aspersora.



Fonte: (a) FST, 2019; (b) TOLACO, 2019.

No processo ASP, o mecanismo de formação das gotículas de metal fundido é distinto em cada um dos eletrodos. No polo positivo, quando a resultante das forças eletromagnética, de araste e gravitacional; for superior à força devido à tensão superficial, a gota se desprende da extremidade do arame. No polo negativo, o desprendimento da gota ocorre pela ação combinada do calor (que reduz a coesão do material na extremidade do eletrodo), e do fluxo de gás de atomização (que deforma e arrasta a extremidade aquecida do eletrodo em direção ao substrato) (KELKAR; HIBERLEIN, 2002). É importante destacar que as dimensões das partículas projetadas reduzem com a diminuição da corrente elétrica e diâmetro do arame; e aumenta com o acréscimo da DDP e pressão do gás de atomização (CRAWMER, 2004). Segundo os referidos autores, o tamanho das gotículas projetadas é de grande importância para a morfologia final do revestimento aspergido.

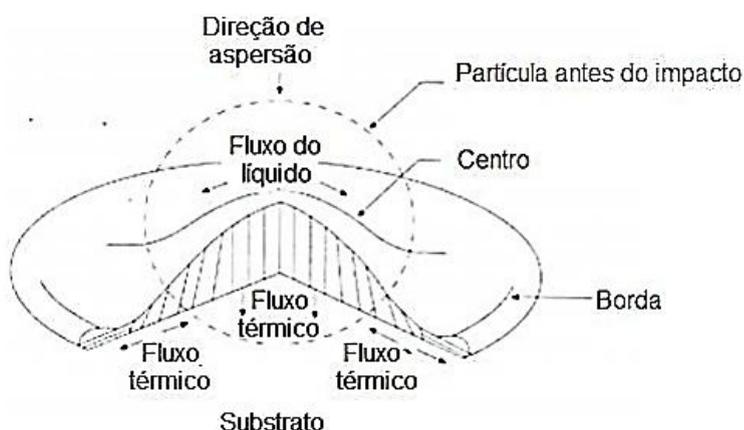
O processo ASP destaca-se em relação às demais técnicas de aspersão térmica, em virtude de apresentar uma maior taxa de deposição; mais fácil operação (menor número de parâmetros de processo); custo reduzido dos consumíveis (utilizam-se os mesmos consumíveis usados nos processos de soldagem), e menor transferência de calor para o substrato (WANG *et al.*, 1999; CRAWMER, 2004). Como principal limitante da técnica ASP

tem-se a necessidade do material de adição ser condutor elétrico para possibilitar a formação do arco (SAMPATH; HERMAN, 1996).

2.1.2 Formação dos revestimentos aspergidos termicamente

De forma simplificada, nos processos de aspersão térmica em geral, a gota do metal líquido com geometria aproximada à esférica, se projeta a partir da pistola aspersora sobre a superfície previamente preparada do substrato. Ao atingir o substrato a gotícula se espalha formando um disco¹, deformando-se nas extremidades mais que no centro, adquirindo um perfil lamelar. O espalhamento da gotícula incidente aumenta a área de troca de calor desta com o substrato, promovendo a sua rápida solidificação e, conseqüente, contração. Ao contrair-se, a lamela adere mecanicamente à superfície rugosa do substrato. A subsequente projeção de novas gotículas sobre as lamelas já depositadas, promoverá a repetição do fenômeno descrito, promovendo o acréscimo da espessura do revestimento (Figura 7) (SAMPATH; HERMAN, 1996).

Figura 7. Modelo esquemático de solidificação de lamelas e formação do revestimento aspergido termicamente.



Fonte: SAMPATH; HERMAN, 1996.

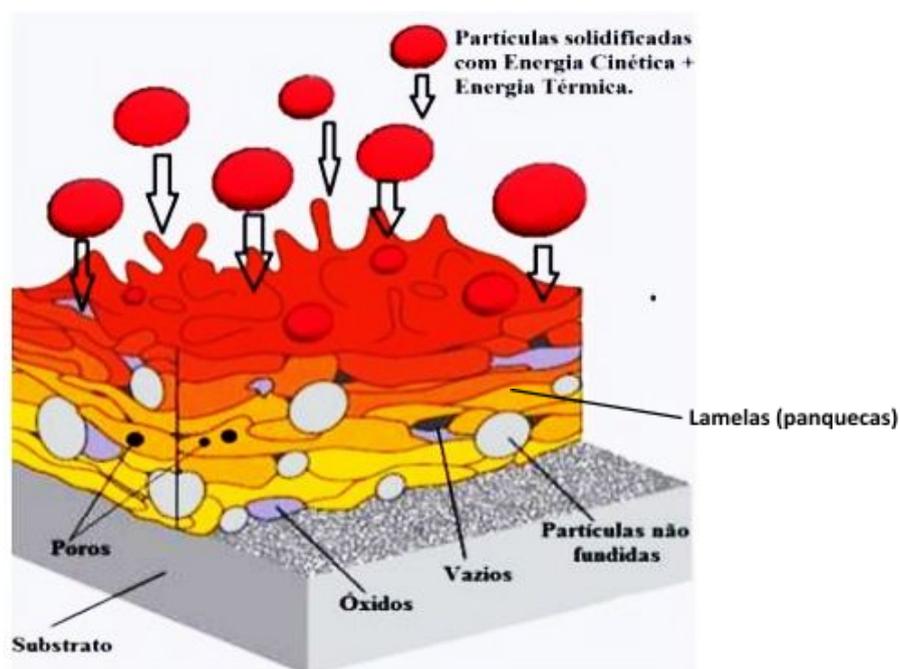
Os revestimentos obtidos pelas técnicas de aspersão térmica apresentam espessuras da ordem de 1 a 2 mm. Valores superiores à 2 mm promovem o deslocamento dos mesmos em função do momento fletor gerado pelo seu próprio peso (LIMA; TREVISAN, 2007).

¹ Este formato varia com os parâmetros de deposição, de preparação da superfície e de pré-aquecimento do substrato, além da composição química da liga que está sendo depositada e com suas propriedades físicas (LIMA; TREVISAN, 2007).

2.1.3 Microestrutura dos revestimentos aspergidos termicamente

A microestrutura e composição química dos revestimentos aspergidos termicamente são diferentes daquelas verificadas quando o mesmo material é processado pelas demais técnicas de fabricação. De forma geral, independente da matéria-prima, técnica de deposição e parâmetros de processo empregados; a microestrutura do revestimento é composta pelas lamelas, salpicos (partículas não fundidas), óxidos, microtrincas, poros e vazios (Figura 8). (LIMA; TREVISAN, 2007).

Figura 8. Esquema evidenciando a morfologia típica de um revestimento aspergido termicamente.



Fonte: LIMA; TREVISAN, 2007.

É importante destacar que a estrutura “como aspergida” dos revestimentos será similar na natureza lamelar, mas apresentará propriedades (mecânicas, tribológicas, eletroquímicas, de biocompatibilidade, etc.) diferentes em função do percentual variável de porosidade e inclusão de óxidos. Estas por sua vez, são dependentes do processo de aspersão térmica empregado, e das diferentes regulagens dos parâmetros de processo e procedimento de deposição adotados (SUCHARSKI, 2016).

2.1.3.1 Lamelas

O componente dos revestimentos aspergidos termicamente denominado por lamela, é formado, conforme explicado anteriormente, pela deformação plástica e resfriamento ocorridos em virtude do impacto das gotículas fundidas, ou semifundidas, projetadas sobre o substrato. Estas lamelas mantêm-se aderidas ao substrato, e coesas entre si, principalmente por ação de forças de origem mecânica (ancoramento mecânico), e em menor escala, por forças de natureza química (em postos localizados onde ocorre a fusão do substrato, e a sua diluição com a lamela) e física (forças de coulomb) (LIMA; TREVISAN, 2007).

2.1.3.2 Óxidos

O componente dos revestimentos aspergidos termicamente denominado por óxido, é formado pela reação do material de adição (o qual encontra-se a alta temperatura e, em função disso, extremamente reativo), com o oxigênio do ambiente circundante e/ou com oxigênio contidos nos gases de combustão e/ou araste. Essa reação ocorre durante a fusão do material, e no trajeto entre a pistola de aspersão térmica e o substrato (LIMA; TREVISAN, 2007).

2.1.3.3 Salpicos

O componente dos revestimentos aspergidos termicamente denominado por salpico, corresponde às partículas não fundidas. Estas são formados quando gotículas solidificadas durante a atomização, ou mesmo partículas não fundidas (em virtude da adoção de parâmetros de deposição inadequados), chocam-se contra o substrato. Essas partículas, quando não expulsas, ficam aderidas entre as camadas de lamelas que a circundam (LIMA; TREVISAN, 2007).

2.1.3.4 Microtrincas.

O componente dos revestimentos aspergidos termicamente denominado por microtrinca corresponde à um tipo de descontinuidade formada durante a solidificação das lamelas. O resfriamento rápido induz a formação de tensões residuais trativas no parâmetro de

rede da estrutura cristalina da lamela, as quais são relaxadas por meio da formação de fissuras (trincas a quente). Outrossim, as trincas podem ser geradas por fissuração promovida por hidrogênio (trincas a frio). A ocorrência deste último mecanismo, menos recorrente no caso dos revestimentos aspergidos termicamente, pode ser justificado em virtude da alta solubilidade do hidrogênio nos materiais fundidos, e à sua alta difusividade através da estrutura dos sólidos (em virtude do seu reduzido tamanho atômico). A acumulação de hidrogênio nos sítios da rede cristalina do metal, pode enfraquecer as ligações metálicas entre seus átomos, nucleando uma trinca a qual, sob condições apropriadas, irá se propagar. É importante destacar que a presença de trincas em revestimentos aspergidos termicamente é tolerada somente em revestimentos cerâmicos (LIMA; TREVISAN, 2007).

2.1.3.5 Poros e vazios

Os componentes dos revestimentos aspergidos termicamente denominado por poros e vazios correspondem à falta de preenchimento no volume do material do revestimento. Os poros são formados em virtude do aprisionamento de gases no interior da gotícula fundida durante a sua solidificação (a solubilidade dos gases no metal fundido reduz à, praticamente, zero durante a sua solidificação). Os vazios correspondem às cavidades formadas entre lamelas não aderidas (LIMA; TREVISAN, 2007).

2.1.4 Efeito da microestrutura sobre as propriedades e desempenho do revestimento

As propriedades e desempenho de um revestimento aspergido termicamente dependem de um grande número de variáveis, tais como: materiais empregados (material de adição e substrato – rugosidade do substrato), processo de aspersão térmica utilizado, e parâmetros de processo adotados (distância entre a pistola e substrato; ângulo de aspersão; tipo, vazão e pressão dos gases empregados no processo, etc.); uma vez que, estes fatores influenciam diretamente sobre a microestrutura do revestimento (LIMA; TREVISAN, 2007).

De um modo geral, os metais aspergidos termicamente apresentam dureza superior aos metais que os originam. Esse comportamento deve-se à formação de inclusões de óxidos durante o processo de aspersão térmica, ocorrido devido a interação entre o metal fundido

pulverizado e o oxigênio contido no gás de atomização e/ou atmosfera circundante. Por outro lado, os óxidos formados promovem a redução da ductilidade e tenacidade dos revestimentos. Igualmente, tanto os óxidos quanto os poros e vazios, promovem uma redução da condutividade térmica e elétrica do revestimento. Ainda, a porosidade interligada pode promover a estagnação de fluídos e aeração diferencial, causando a corrosão acelerada do revestimento. Dessa forma, as propriedades física, químicas e mecânicas do revestimento dependem da aderência entre as lamelas e o substrato, da resistência coesiva entre as lamelas, do tamanho e morfologia dos poros e vazios, e do nível de oxidação (MENEZES, 2007, TAKEMOTO *et al.*, 1994).

Assim, quando maior for a adesão das lamelas ao substrato e coesão entre as lamelas, e quanto menor for a oxidação e porosidade do revestimento; maior será a densificação do mesmo, e melhores serão as suas propriedades e, conseqüentemente, melhor será o seu desempenho. Dessa forma, a redução do percentual de oxidação, vazios e poros, tem um efeito positivo sobre as características funcionais dos revestimentos aspergidos. O aumento da densidade do revestimento pode ser promovido através da sua refusão, operação esta que é de fácil execução (podendo utilizar a mesma fonte empregada na sua deposição) e de baixo custo, não aumentando sobremaneira o custo global do revestimento.

2.2 REFUSÃO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE

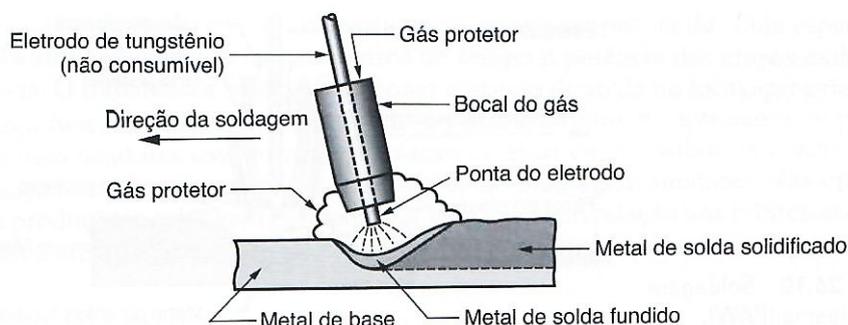
De acordo com Lima e Trevisan (2007), os revestimentos aspergidos termicamente pelo processo ASP apresentam densidade da ordem de 85 a 95%, ou seja, entre 5 a 15% de descontinuidades (porosidades, vazios e oxidação). Conforme relatado anteriormente, estas descontinuidades apresentam efeito deletério sobre as propriedades (físicas, eletroquímicas e mecânicas) e desempenho (em fadiga, corrosão e desgaste) do componente revestido. De modo a reduzir o percentual destas descontinuidades, podem empregar-se operações de pós-tratamentos, como operações mecânicas (deformação por laminação, prensagem, *shot peening*, etc.), de selagem e impregnação (preenchimento da porosidade interligada utilizando metais de baixo ponto de fusão e lubrificantes, nesta ordem), ou térmicas (refusão superficial). Esta última operação corresponde à mais atrativa dentre as citadas, uma vez que, além de promover a redução da porosidade, permite também obter uma ligação química entre o revestimento e o substrato. Da mesma forma, a adição de agentes fluxantes sobre o

revestimento antes da operação de refusão, permite a redução da sua oxidação através da escorificação dos óxidos (PUKASIEWICZ *et al.*, 2012). Existem diversas técnicas disponíveis para realização do pós-tratamento de refusão dos revestimentos aspergidos: refusão por indução, refusão a chama, refusão em forno (resistivo e por indução), refusão por processos de alta intensidade de energia (laser e feixe de elétrons), e refusão por meio de arco elétrico (empregando os processos TIG e Plasma – PAW, do inglês *Plasma Arc Welding*). Dentre os processos listados, a refusão a arco apresenta maior atratividade, em virtude de possibilitar o emprego do mesmo equipamento usado na deposição do revestimento (a fonte de energia, no caso dos revestimentos depositados por processos de aspensão térmica a arco elétrico), e por razões econômicas. Com base no exposto, na seção seguinte é feita uma descrição sumária sobre o processo de refusão a arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (TIG), o qual será empregado neste estudo.

2.2.1 Refusão de revestimentos empregando arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa

A soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (GTAW, do inglês *Gas Tungsten Arc Welding*) é um processo que utiliza como fonte de calor um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a soldar. O gás empregado na geração da descarga elétrica, e para proteger o arco e a poça de fusão, corresponde a um gás inerte (argônio e hélio, ou uma mistura destes). O termo TIG (abreviado do inglês *Tungsten Inert Gas*) é aplicado frequentemente para designar esta técnica de soldagem (GROOVER, 2013). A configuração básica de uma tocha TIG é ilustrada na Figura 9.

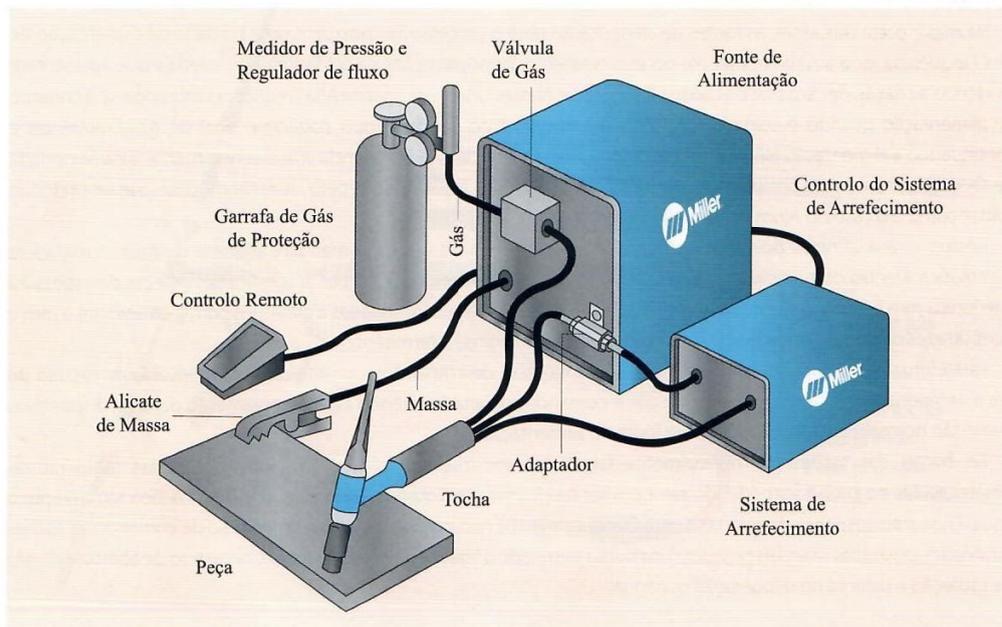
Figura 9. Representação esquemática do processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa.



Fonte: GROOVER, 2013.

O equipamento empregado na soldagem TIG é constituído basicamente por uma fonte de energia elétrica, um ignitor de alta frequência, uma fonte de gás de proteção e uma tocha de soldagem (Figura 10). A tocha de soldagem é o dispositivo que fixa o eletrodo de tungstênio, conduz a corrente elétrica e proporciona a proteção gasosa necessária a região circundante do arco elétrico e à poça de fusão. Tochas refrigeradas por ar são empregadas até valores de corrente da ordem de 150 A; acima deste valor, empregam-se tochas refrigeradas a água, as quais recirculam este fluido através de um circuito fechado de refrigeração. O ignitor de alta frequência é um dispositivo utilizado com a função de gerar um sinal de alta frequência e tensão; com a função de promover a ionização da coluna de gás alimentada entre o eletrodo e a peça. A ionização do gás gera a abertura do arco elétrico, o que ocorre quando o campo elétrico rompe a constante dielétrica do gás utilizado. Para operações de soldagem TIG nos modos corrente contínua (CC) e corrente contínua pulsada (CP), o ignitor de alta frequência é mantido desligado após a abertura do arco. Para o caso da soldagem TIG no modo corrente alternada (CA), o ignitor de alta frequência é mantido ligado durante toda a operação. As fontes de energia empregadas são do tipo transformadora/retificadora e eletrônicas, tendo como característica estática uma curva do tipo corrente constante, fornecendo corrente no modo contínuo com polaridade direta e indireta (CC^- e CC^+ , respectivamente), alternado ou pulsado, de acordo com a aplicação desejada. Além destes, também constituem o equipamento de soldagem os sistemas de acionamento do ignitor de alta frequência e fonte de energia (podendo estes ser do tipo interruptor no corpo da tocha, ou sistemas por controle remoto acionados por pedais ou interruptor de disparo) e de alimentação e controle do gás (WAINER *et al.*, 2013).

Figura 10. Representação esquemática dos elementos que constituem um equipamento para soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa.



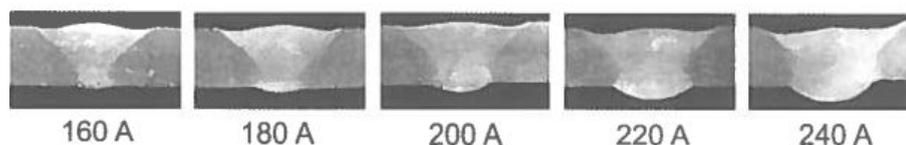
Fonte: SILVA, 2014.

Como principais parâmetros do processo de soldagem TIG, podem ser citados: tensão elétrica, corrente elétrica, velocidade de avanço e gás de proteção. A corrente elétrica corresponde à principal variável que controla o aporte térmico aplicado sobre a peça e, em virtude do seu papel sobre a eficiência do processo, será brevemente detalhada na seção seguinte (WAINER *et al.*, 2013).

2.2.2 Efeito da intensidade e tipo de corrente de refusão

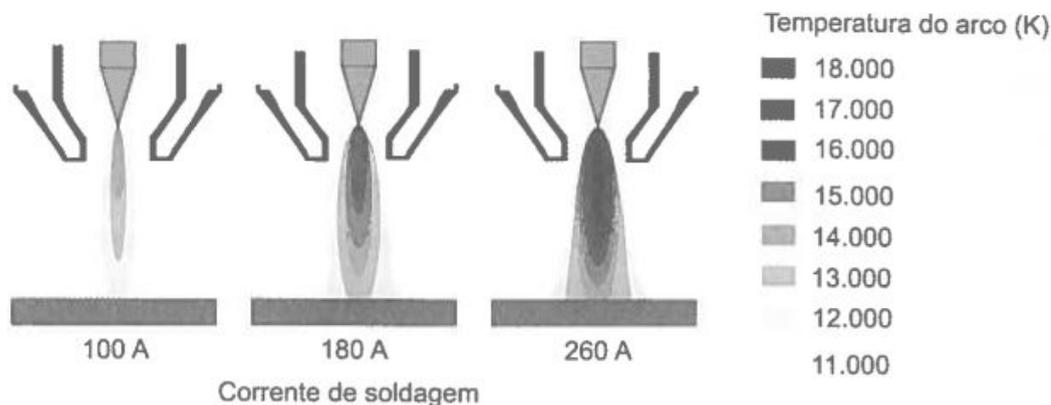
De uma forma geral, quanto maior for a intensidade da corrente, maior é o volume (largura e penetração) e reforço na raiz (projeção no reverso) do cordão de solda (Figura 11). A razão para o efeito da corrente pode estar na alteração do perfil térmico do arco (alongamento das isoterma), fazendo com que as regiões do arco elétrico com maiores temperaturas alcancem a peça e, conseqüentemente, para um mesmo meio, transferindo mais calor para a mesma (Figura 12) (REIS; SCOTTI, 2007).

Figura 11. Influência da corrente de soldagem sobre a geometria dos cordões de solda.



Fonte: REIS; SCOTTI, 2007.

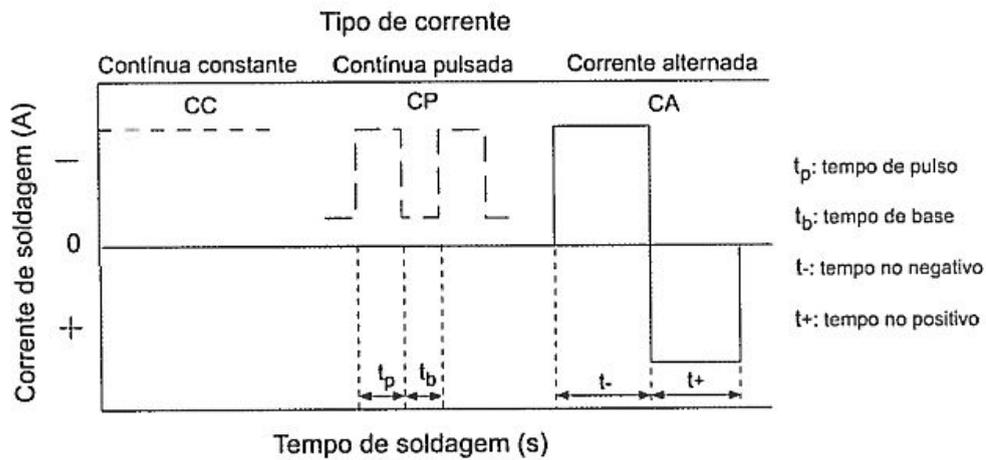
Figura 12. Influência da corrente de soldagem no perfil de temperatura do arco elétrico no processo TIG.



Fonte: REIS; SCOTTI, 2007.

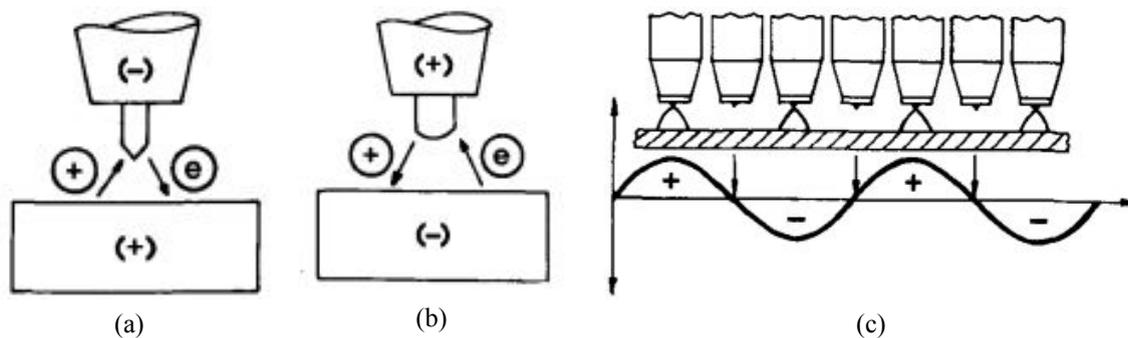
Conforme mencionado anteriormente, a soldagem TIG pode ser realizada empregando-se três tipos de corrente: CC, CP e CA (Figura 13). No caso da corrente contínua (também nomeada corrente constante), empregam-se as configurações corrente contínua com polaridade direta (CC^-) e indireta (CC^+). No caso da CC^- o eletrodo de tungstênio está polarizado negativamente, havendo um fluxo de elétrons deste em direção à peça; e de íons positivos na direção do eletrodo (Figura 14a). Como os elétrons incidem sobre a peça, esta torna-se mais aquecida que o eletrodo gerando poças de fusão estreitas e de grande penetração. No caso da CC^+ o eletrodo de tungstênio está polarizado positivamente, o fluxo de elétrons dá-se na direção do eletrodo; ao passo que o fluxo de íons positivos ocorre na direção da peça (Figura 14b). Neste caso, os elétrons incidentes sobre o eletrodo promovem o seu aquecimento e, conseqüentemente, a sua fusão; reduzindo a sua vida útil. A poça de fusão neste caso tem perfil largo e raso. A soldagem em CA caracteriza-se por uma alternância na intensidade da corrente, passando o eletrodo positivo para o negativo, voltando na sequência ao positivo, e assim por diante. Nesta troca de polaridade, o valor da corrente cai ao zero antes da alternância, extinguindo momentaneamente o arco (Figura 14c). Neste caso, a geometria do cordão é intermediária entre àquelas obtidas nos modos CC^- e CC^+ (WAINER *et al.*, 2013).

Figura 13. Esquema do comportamento dinâmico dos sinais que caracterizam os tipos de corrente utilizados na soldagem TIG.



Fonte: REIS; SCOTTI, 2007.

Figura 14. Soldagem TIG com corrente contínua polaridade direta (a) e indireta (b) e corrente alternada (c).



Fonte: WAINER *et al.*, 2013.

Nos modos CC^- e CA (quando a corrente está no polo negativo) a emissão de elétrons (necessárias à manutenção do arco) se dá a partir do eletrodo, por meio de um fenômeno denominado emissão termiônica². Já nos modos CC^+ e CA (quando a corrente está no polo positivo) a emissão de elétrons se dá a partir da peça, por meio de um fenômeno denominado emissão por campo. Como a emissão por campo promove a 'limpeza' dos óxidos da superfície da peça, esta promove o efeito de limpeza catódica. Entretanto, os modos de corrente que levam à ocorrência deste fenômeno promovem um aquecimento demasiado do eletrodo, inviabilizando o seu emprego para o processamento da maioria dos materiais (com exceção dos metais que formam óxidos de alto ponto de fusão, como é o caso do alumínio) (REIS; SCOTTI, 2007).

O modo CP caracteriza-se por uma variação da intensidade de corrente entre uma corrente de pico (I_p) e de base (I_b) (Figura 13), estabelecendo-se os tempos de corrente de pico (t_p) e base (t_b), e a frequência de pulsação. Neste caso, os valores de I_p , I_b , t_p e t_b irão determinar a corrente média (I_m) calculada através da eq. (1) (WAINER *et al.*, 2013).

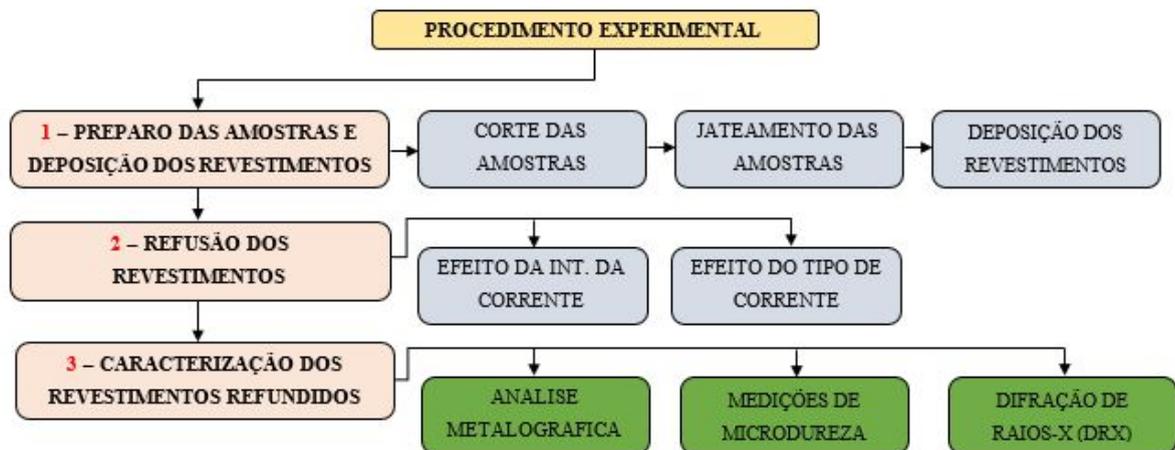
$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{t_p + t_b} \quad \text{eq. (1)}$$

Para o modo CP, considerando-se uma mesma I_m que a empregada no modo CC, durante a I_p ocorre um maior aquecimento da poça de fusão, ao passo que, durante a I_b ocorre o resfriamento da mesma, aumentando a sua viscosidade facilitando a sua solidificação. Em virtude dessa característica, o cordão solidificado assume um bom aspecto, apresentando linhas de solidificação finas e regularmente espaçadas. A macroestrutura de solidificação se torna mais fina e, principalmente, com frentes periódicas de solidificação, o que diminui a susceptibilidade do cordão à formação de trincas de solidificação e poros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 15 é apresentado um fluxograma evidenciando os procedimentos adotados para a execução das atividades demandadas para a realização deste TCC. Verifica-se que o procedimento experimental é dividido em três etapas: (1) preparação das amostras e deposição dos revestimentos; (2) Refusão dos revestimentos aspergidos termicamente; e (3) Caracterização dos revestimentos refundidos. Em virtude disso, os tópicos deste capítulo foram divididos nestas três atividades, e são descritos de forma breve na sequência.

Figura 15. Fluxograma indicando as etapas de realização deste trabalho.



Fonte: O AUTOR.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS

Os materiais usados neste TCC foram barras de aço carbono ABNT 1020 como metal de base, e arame de soldagem de aço inoxidável classe AWS ER 308LSi como metal de adição (as composições químicas destes materiais são apresentadas na Tabela 2).

Tabela 2. Composição química dos metais de base e adição usados neste trabalho.

Materiais	Elementos químicos (wt%)*							
	Fe	C	Cr	Ni	Mn	Si	S	P
ABNT 1020	Bal.	0,2	-	-	0,4	-	0,04	0,03
AWS ER 308LSi	Bal.	0,023	20,0	10,1	1,55	0,75	-	-

* Dados fornecidos pelo fornecedor dos materiais.

Fonte: O AUTOR.

As barras de aço ABNT 1020 foram cortadas em amostras com dimensões de 10×50×100 mm (espessura × largura × comprimento). Estas amostras foram jateadas com abrasivo de óxido de alumínio (tamanho #36 mesh) utilizando uma cabine de jateamento abrasivo da marca CMV modelo 65 9075, adotando parâmetros baseados no trabalho de Pukasiewicz *et al.* (2012) e apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros adotados no jateamento dos corpos de prova à serem revestidos.

Parâmetro	Valores empregados
Abrasivo	Óxido de alumínio branco (#36 mesh)
Pressão de jateamento	55-60 psi
Distância de jateamento	100 mm
Rugosidade – Ra (mínima/máxima) ³	7,6/9,38
Ângulo de jateamento	90°
Tempo de jateamento	2 min

Fonte: O AUTOR.

Logo na sequência ao jateamento abrasivo, realizou-se a deposição dos revestimentos. Para isso, foi utilizado uma fonte elétrica da marca Eutronic modelo Arc Spray 4 e, acoplada a esta, uma pistola de aspersão térmica a arco elétrico da mesma fabricante (Figura 16). Os parâmetros usados na execução das deposições são apresentados na Tabela 4. Os valores destes parâmetros foram determinados por meio de ensaios preliminares.

Este trabalho inicial (corte e jateamento das amostras, assim como a deposição dos revestimentos aspergidos termicamente) foi realizado no Laboratório de Aspersão Térmica e de Soldagens Especiais (LABATS) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Tabela 4. Parâmetros utilizados na deposição dos revestimentos.

Parâmetro	Valores empregados
Corrente	135 A
Tensão	30 V
Gás de transporte	Ar comprimido
Pressão do gás de transporte	60 psi
Distância pistola-peça	200 mm
Temperatura de pré-aquecimento	150 °C
Espessura do revestimento	800 ± 100 mm
Metal de adição	AISI 308LSi (Ø: 1.0 mm)

³ As medições de rugosidade foram realizadas utilizando um rugosímetro portátil com apalpador de contato mecânico, marca Mitutoyo modelo SJ201, com capacidade de medição de rugosidade (Ra) entre 0,05 e 15 mm.

Fonte: O AUTOR.

Figura 16. (a) Equipamento, e (b) pistola de aspersão térmica a arco elétrico empregados na deposição dos revestimentos.



Fonte: O AUTOR.

3.2 REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS

Os revestimentos aspergidos termicamente foram refundidos utilizando o processo de soldagem TIG, empregando o aparato experimental ilustrado na Figura 17. Este é composto por: (1) uma fonte de soldagem da marca Lincoln Eletronic, modelo IM467-B, a qual é constituída por um sistema de ignição por alta frequência⁴; (2) um sistema mecanizado de

⁴ Neste caso, a ignição do arco é feita sem a necessidade de tocar o eletrodo na peça, evitando assim a transferência de tungstênio para a peça, e o desgaste do eletrodo. Neste sistema, a abertura é feita por meio de um dispositivo que gera um sinal de alta tensão e alta frequência, que promove a ionização da coluna de gás, alimentada pelo bocal da tocha de soldagem, entre o eletrodo e a peça induzindo a abertura do arco elétrico.

movimentação de tocha de soldagem do tipo tartilope da marca White Martins, modelo MC 46; (3) uma tocha para soldagem TIG da marca Vonder, com sistema de refrigeração por circulação de água; e (4) uma bancada de trabalho sobre a qual foi montado o porta amostra e o tartilope (Figura 17).

Figura 17. Equipamentos empregados para realizar a refusão dos revestimentos aspergidos termicamente.



Fonte: O AUTOR.

Conforme indicado na Figura 15, e estabelecido na descrição dos objetivos deste trabalho, os parâmetros do processo de refusão aqui estudados foram a intensidade (estudo 1) e o modo (estudo 2) da corrente de refusão. Os parâmetros adotados em cada um destes estudos são apresentados na Tabela 5. Para realizar as refusões foi utilizado um eletrodo de

tungstênio classe EWTh-2 (com adição 2% de óxido de tório) de 1,6 mm de diâmetro e ângulo de afiação de 30° (o ângulo de afiação foi verificado após cada refusão, sendo o eletrodo re-afiado quando verificado o seu desgaste). O gás utilizado foi o argônio.

Tabela 5. Parâmetros utilizados na refusão dos revestimentos em cada estudo realizado.

Tipo de corrente	Corrente (A)	Corrente média (A)	T_p/T_b^a (s)	DEP ^b (mm)	DBP ^c (mm)	V_{PRO}^d (l/min)	V_{ref}^e (mm/min)
CC	150	-	-	3,0	6,0	10,0	100,0
CC	130	-	-	3,0	6,0	10,0	100,0
CC	110	-	-	3,0	6,0	10,0	100,0
CC	90	-	-	3,0	6,0	10,0	100,0
CP	220-80	150	0,5/0,5	3,0	6,0	10,0	100,0
CP	180-80	130	0,5/0,5	3,0	6,0	10,0	100,0
CP	140-80	110	0,5/0,5	3,0	6,0	10,0	100,0
CP	100-80	90	0,5/0,5	3,0	6,0	10,0	100,0

^a T_p tempo de corrente de pico/ T_b tempo de corrente de base

^c Distância bocal-pela

^e Velocidade de refusão

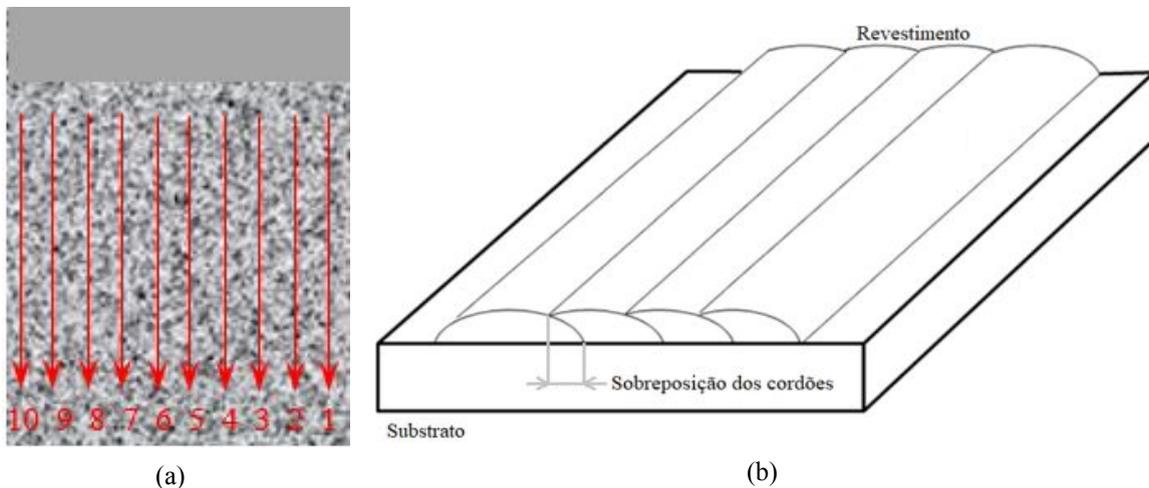
^b Distância eletrodo-peça

^d Vazão de gás de processo

Fonte: O AUTOR.

As refusões foram realizadas no sentido longitudinal das amostras revestidas, sendo realizados dez passes da direita para a esquerda (conforme indicado na Figura 18a). Adotou-se uma diluição de 50% entre passes adjacentes (vide Figura 18b), sempre alinhando o eletrodo junto a margem do cordão previamente refundido.

Figura 18. (a) Trajetória de refusão adotada, e (b) indicação da sobreposição entre os cordões.



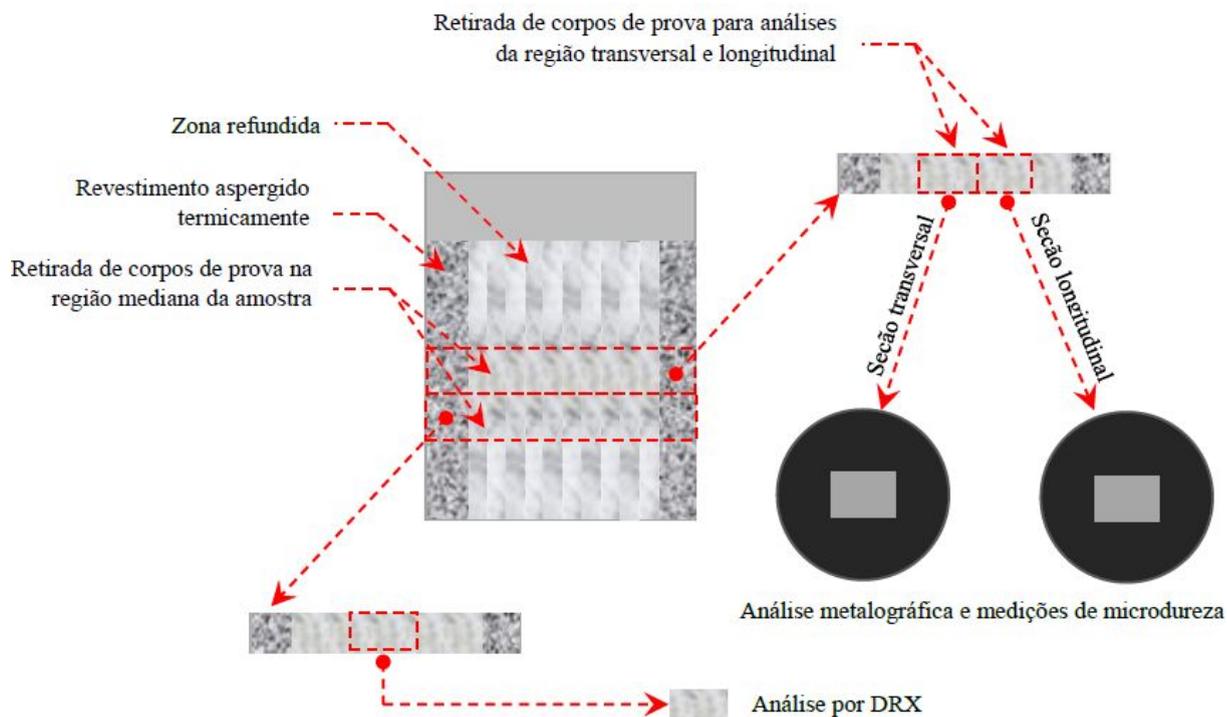
Fonte: O AUTOR.

Para a realização das operações de refusão foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Soldagem e Materiais (LASOMET) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da UFSM.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PROCESSADO

As amostras refundidas foram caracterizadas quanto a microestrutura (através de ensaio metalográfico e difração de raios X – DRX) e propriedades mecânicas (através de medidas de microdureza Vickers). Para possibilitar a realização destas caracterizações, as amostras foram cortadas em corpos de prova com dimensões inferiores. Neste sentido, foram extraídos dois corpos de prova na região mediana das amostras, através da realização de três cortes na seção transversal das mesmas (Figura 19). Para a execução destes cortes, utilizou-se uma cortadeira metalográfica da marca Struers-Panambra modelo Mesoton. Na sequência, estes corpos de prova foram novamente seccionados, agora na seção longitudinal, com o intuito de obter corpos de prova de dimensões menores para viabilizar as operações posteriores (vide detalhe da Figura 19). Estes cortes foram realizados em uma cortadeira de precisão da marca Buehler modelo Isomet 1000, utilizando disco diamantado.

Figura 19. Indicação dos cortes realizados nas amostras refundidas para obter os corpos de provas para as caracterizações metalográficas, de microdureza e de DRX.



Fonte: O AUTOR.

Dois destes corpos de prova foram moldados, um na seção transversal e outro na seção longitudinal, utilizando uma prensa embutidora metalográfica da marca Risitec modelo RS-30 e resina de embutimento a quente. Posteriormente, estes foram preparados por meio de operações de lixamento e polimento, empregando-se uma lixadeira politriz da marca Struers-Panambra modelo DP-10. Após preparo, a grafia microestrutural destes corpos de prova foi revelada através de ataque químico com o reativo Nital 5% (5ml de ácido nítrico + 95ml de Álcool Etílico). A análise da microestrutura dos revestimentos refundidos foi realizada por meio de microscopia ótica, usando um microscópio ótico da marca Olympus modelo BX60M. As medições da microdureza ao longo da seção transversal do revestimento refundido foram realizadas utilizando um microdurômetro da marca Shimadzu modelo HMU-2, aplicando-se uma carga de 300 gf por 15 s.

Todas estas etapas de corte e preparo metalográfico dos corpos de prova foram realizadas utilizando os equipamentos presentes no LASOMET e no Laboratório de Metalurgia Física do DEM da UFSM.

Por fim, o outro corpo de prova foi destinado à caracterização das fases metalúrgicas presentes na superfície refundida, sendo esta realizada através da técnica de DRX. Para realização desta caracterização foi utilizando um difratômetro de raios X da marca Shimadzu

modelo XRD 7000. O equipamento utilizado pertence ao Laboratório de Ótica de Raios-X e Instrumentação (LORXI) do Departamento de Física da UFPR. É importante destacar que as amostras submetidas à caracterização por DRX foram somente limpas em banho de ultrassom utilizando álcool etílico, não sendo submetidas à qualquer operação de remoção dos óxidos superficiais formados durante a refusão.

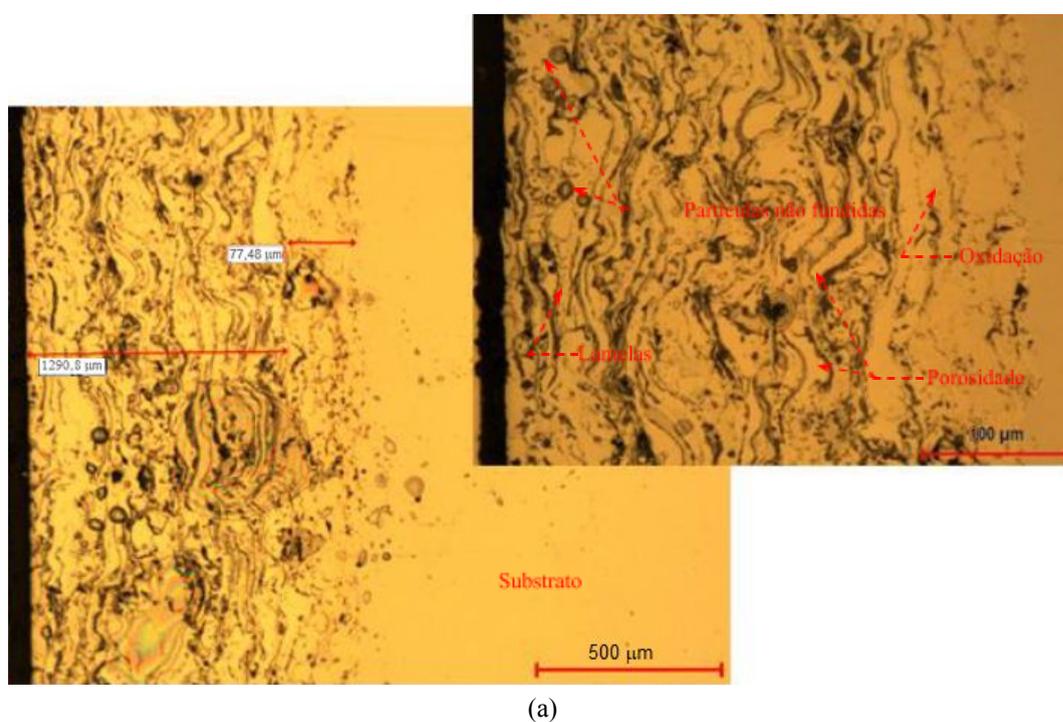
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

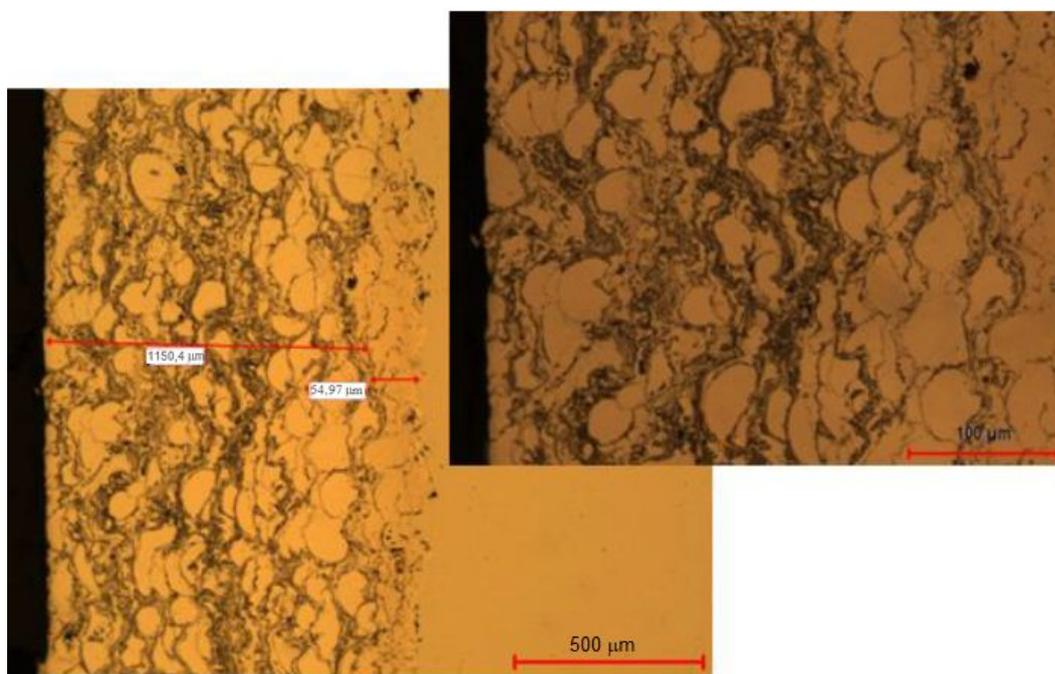
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE

Na Figura 20(a) e (b) é apresentada, nesta ordem, a morfologia das seções transversal e longitudinal dos revestimentos aspergidos termicamente na condição como depositado (não refundido). Pode ser observado a partir destas, que o revestimento aspergido termicamente é constituído pelos seguintes microconstituintes:

- Lamelas: correspondem às partículas aspergidas, as quais na Figura 20, apresentam geometria alongada paralela à superfície do substrato;
- Filmes de óxidos: localizados nos contornos das lamelas (interlamelares), os quais na Figura 20, apresentam uma tonalidade acinzentada.
- Porosidade: microporos localizados entre as lamelas e filmes de óxidos, os quais na Figura 20, apresentam uma tonalidade preta;
- Partículas não fundidas (salpicos): distribuídas aleatoriamente ao longo do revestimento aspergido termicamente, as quais na Figura 20, são correspondem às pequenas partículas esféricas.

Figura 20. Microestrutura da seção transversal (a) e longitudinal (b) do revestimento aspergido termicamente na condição como depositados.





(b)

Fonte: O AUTOR.

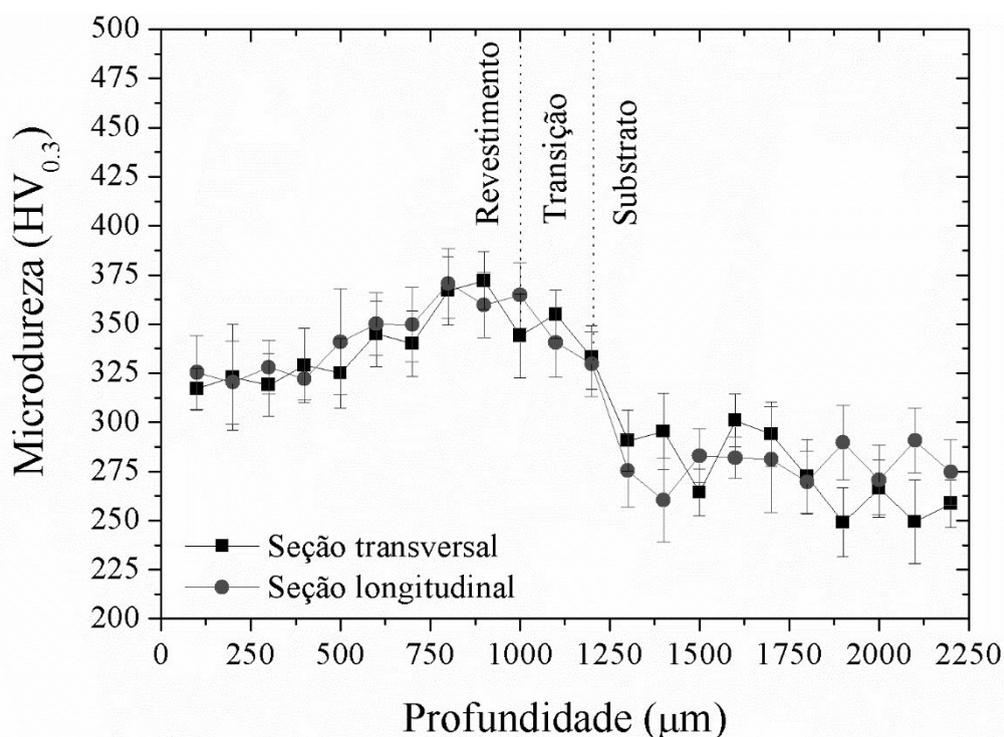
É importante mencionar que a morfologia dos revestimentos indicada na Figura 20 foi obtida sem a aplicação de qualquer reagente químico para revelação da grafia microestrutural, e corresponde a microestrutura típica de um revestimento obtido por aspersão térmica, conforme previamente apresentado e discutido no tópico 2.1.3. Igualmente, a espessura dos revestimentos na região transversal e longitudinal é

Na Figura 21 é apresentado o perfil de microdureza medidos nas seções transversal e longitudinal dos revestimentos aspergidos termicamente. É possível observar que não há variação nos valores de dureza medidos na seção transversal com aqueles da seção longitudinal. Verifica-se também que, para ambas as seções de medição, os valores de dureza aumentam a partir da superfície da amostra até a região de ligação com o substrato. Esse resultado, segundo Lima e Trevisan (2007), deve-se à maior adesão das lamelas ao substrato, e à menor coesão entre as lamelas à medida em que estas estão mais distantes deste. Da mesma forma, é possível notar a partir da Figura 21, que há uma região de transição entre os valores de dureza máximos do revestimento e os valores correspondentes aos do substrato. Segundo Paredes *et al.* (2019), essa região de transição corresponde às regiões onde o material do revestimento dilui-se ao metal de base, ou difunde-se neste. Lima e Trevisan (2007) destacam que a ondulação da superfície do substrato pode influenciar

sobre a extensão da região de transição. Conforme indicado previamente na Figura 20, a extensão da região de transição é da ordem de 50 a 100 μm .

É importante destacar que a baixa coesão entre as lamelas na região mais externa do revestimento, também promove uma menor resistência do revestimento ao desgaste por abrasão e erosão (PUKASIEWICZ *et al.*, 2012).

Figura 21. Perfil de microdureza na seção transversal e longitudinal dos revestimentos aspergidos termicamente na condição como depositados.



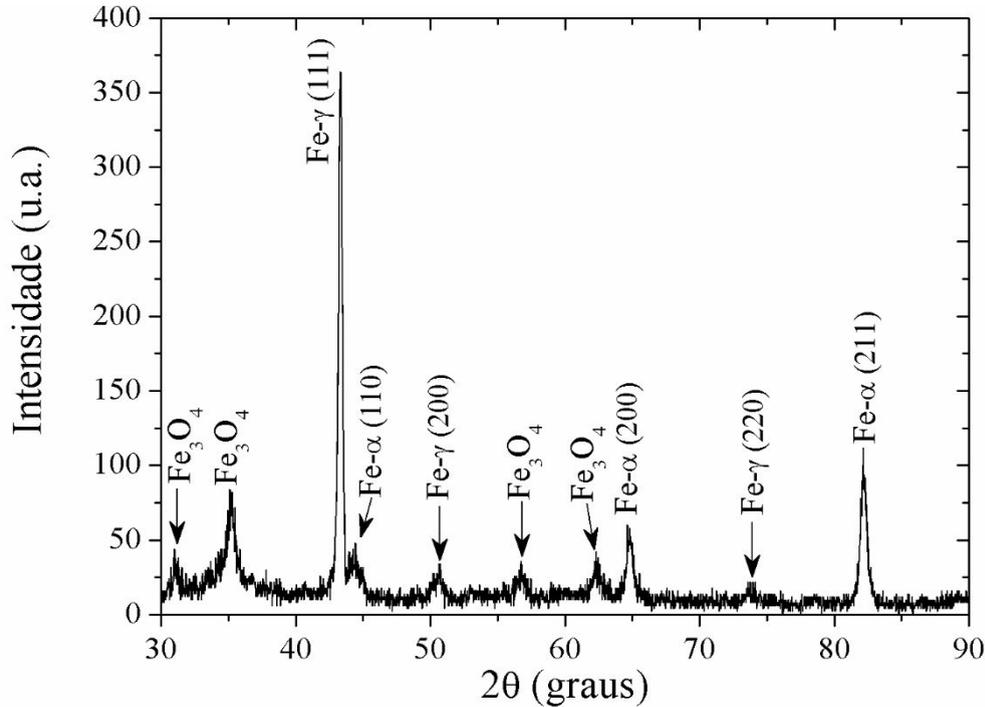
Fonte: O AUTOR.

Na Figura 22 é apresentado o padrão de difração de raios X do revestimento aspergido termicamente na condição como depositado. Verifica-se que o espectro de DRX é constituído basicamente por picos das fases austenita (γ), ferrita (α) e óxido de ferro (Fe_3O_4). A presença de picos da fase α , embora não esperada, também foi verificada por Adachi e Ueda (2018) e Kutschmann *et al.* (2019) em revestimentos de aço inoxidável austenítico AISI 316 L depositados pelos processos de aspersão térmica a frio (*Cold Spray*) e HVOF, respectivamente, sobre aço carbono. Embora os autores citados não tenham discutido a ocorrência desta fase, acredita-se que esta ocorra em função da estrutura como aspergida ser equivalente à “bruta de solidificação”. Conforme pode ser verificado pela análise do diagrama

pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni (Figura 31 – Anexo A), para teores de Ni de 10% e Cr de 20% (composição do consumível adotado neste trabalho), durante a solidificação ocorre a formação de uma estrutura bifásica composta por austenita e ferrita delta. A transformação da ferrita delta em austenita é completada somente se o aço permanecer por um tempo suficientemente longo na faixa de temperaturas na qual a cinética de transformação é mais rápida (FOLKHARD, 1988). Este não é o caso de revestimentos aspergidos termicamente, onde o resfriamento rápido causa a retenção de ferrita delta até a temperatura ambiente. A análise do diagrama de Schaeffler para a composição química do consumível utilizado (em vermelho na Figura 32Figura 31 – Anexo A) evidencia que a microestrutura de solidificação deste é constituída por cerca de 10% de ferrita delta, o que justifica a ocorrência dos picos no espectro de DRX.

A ocorrência dos picos da fase Fe_3O_4 , por sua vez, é justificada em virtude deste óxido ser sintetizado por reação da gotícula metálica com o gás de atomização (ar comprimido), durante a sua projeção a partir do bico aspersor em direção à superfície do substrato. A formação de uma fase de óxido em oposição a um nitreto (dada o maior percentual de nitrogênio no ar quando confrontado ao teor de oxigênio – 78 e 21%, respectivamente) deve-se a maior entalpia de formação dos nitretos de ferro (+12.6 kJ/mol) quando comparada à de Fe_3O_4 (-744,8 kJ/mol) (ELDER *et al.*, 1993).

Figura 22. Padrão de difração de raios X do revestimento aspergidos termicamente na condição como depositado.



Fonte: O AUTOR.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS REFUNDIDOS UTILIZANDO CORRENTE CONTÍNUA

Na Figura 23 é apresentada a micrografia da seção transversal dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo contínuo. Observa-se que para a intensidade de corrente de 90 A (Figura 23a) não ocorreu diluição do revestimento sobre o metal de base, ao passo que, para todos os demais valores de corrente contínua de soldagem empregados, ocorre diluição. Esse resultado demonstra que a intensidade de corrente de 90 A não gera aporte térmico suficiente para promover a fusão total do revestimento, fundido somente uma parcela inferior a sua espessura, conforme pode ser visualizado no canto superior direito da Figura 23a para este valor de corrente (a parte escura nesta figura corresponde à região do revestimento que efetivamente foi refundida. Pode-se notar que entre esta região e o metal de base existe uma faixa de revestimento que não fundiu).

Observa-se que existe uma camada de óxidos entre o revestimento refundido e a resina utilizada na moldagem da amostra. Essa camada ocorre em virtude da flotação dos óxidos durante a refusão. Conforme reportado na literatura (PUKASIEWICZ *et al.*, 2012), em virtude da flotação dos óxidos, as espessuras dos revestimentos refundidos apresentam valores de 20

a 30% inferiores ao do revestimento como depositado. Segundo os autores citados, este percentual corresponde à área somada de poros e óxidos existentes nos revestimentos como depositados.

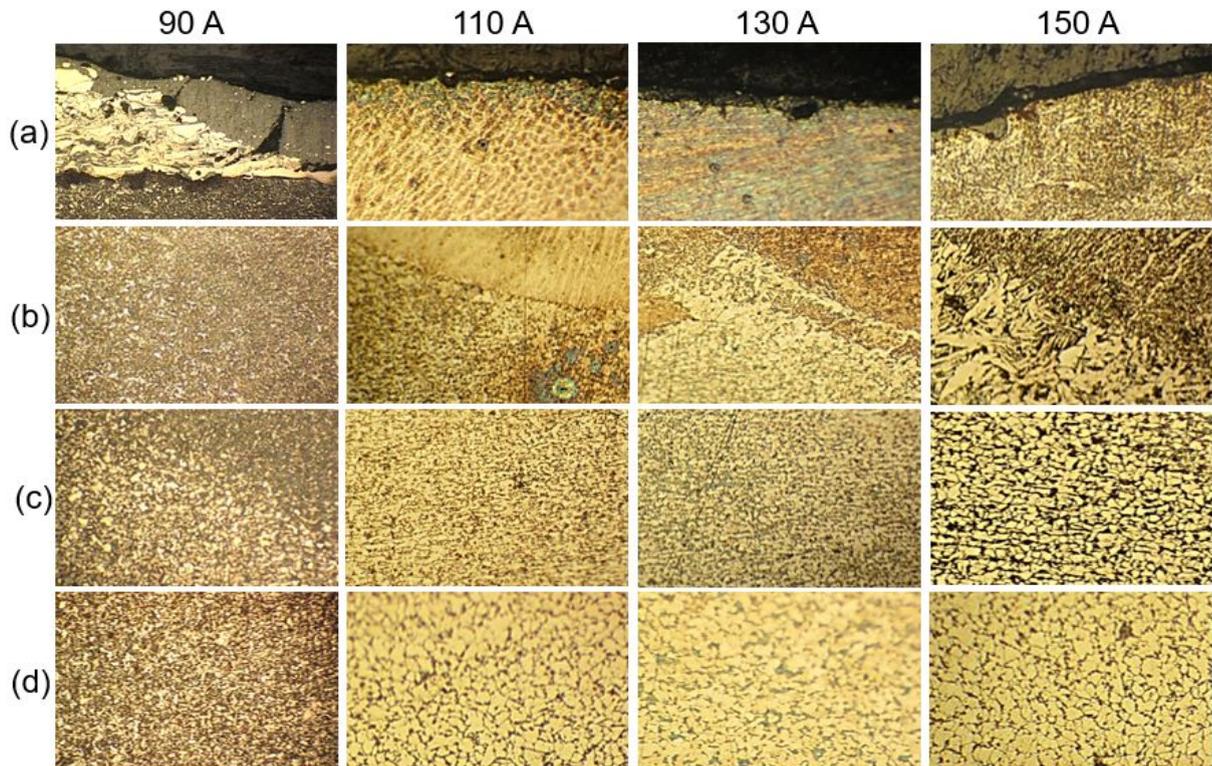
Através da Figura 23a também é possível identificar que a microestrutura do revestimento refundida é do tipo dendrítica. Embora não seja visível nas imagens apresentadas na Figura 23a, a orientação de crescimento da estrutura dendrítica ocorre no sentido de deslocamento da tocha.

Na Figura 23b, para as correntes contínuas com intensidades de 110 a 150 A, é possível identificar que a formação das dendritas se processa seguindo a mesma orientação dos grãos do metal de base (crescimento epitaxial). Conforme relatado por Wainer *et al.* (2013), para a ocorrência do crescimento epitaxial é necessário promover um pequeno super-resfriamento do sistema ($\approx 1\text{ }^{\circ}\text{C}$), o qual, possivelmente, é gerado pelo efeito de resfriamento promovido pelo porta-amostra que apresenta grande volume.

Comparando-se as Figura 23c e d é possível identificar a ocorrência de uma zona termicamente afetada (ZTA) (Figura 23c) para as intensidades de CC de 110 a 150 A, a qual apresenta tamanho de grão inferior ao do metal de base (MB) (Figura 23d). Observa-se também que o tamanho de grão na região da ZTA é tanto maior quanto maior for o valor da corrente de refusão empregada. Esses resultados refletem o efeito do ciclo térmico de soldagem sobre a microestrutura da região adjacente à refundida, demonstrando que os valores de temperatura atingida nesta são superiores ao valor da temperatura crítica do material do substrato, promovendo a recristalização. As maiores intensidades de corrente geram um maior aporte térmico, o qual diminui a taxa de resfriamento do sistema promovendo o crescimento dos grãos nesta região.

Também é possível identificar através das Figura 23c e d que os microconstituintes da microestrutura granular da ZTA e do MB é composta por grãos de Ferrita proeutetóide (fase clara) e grãos de Perlita (fase escura). Essa corresponde à microestrutura típica do metal de base aqui empregado.

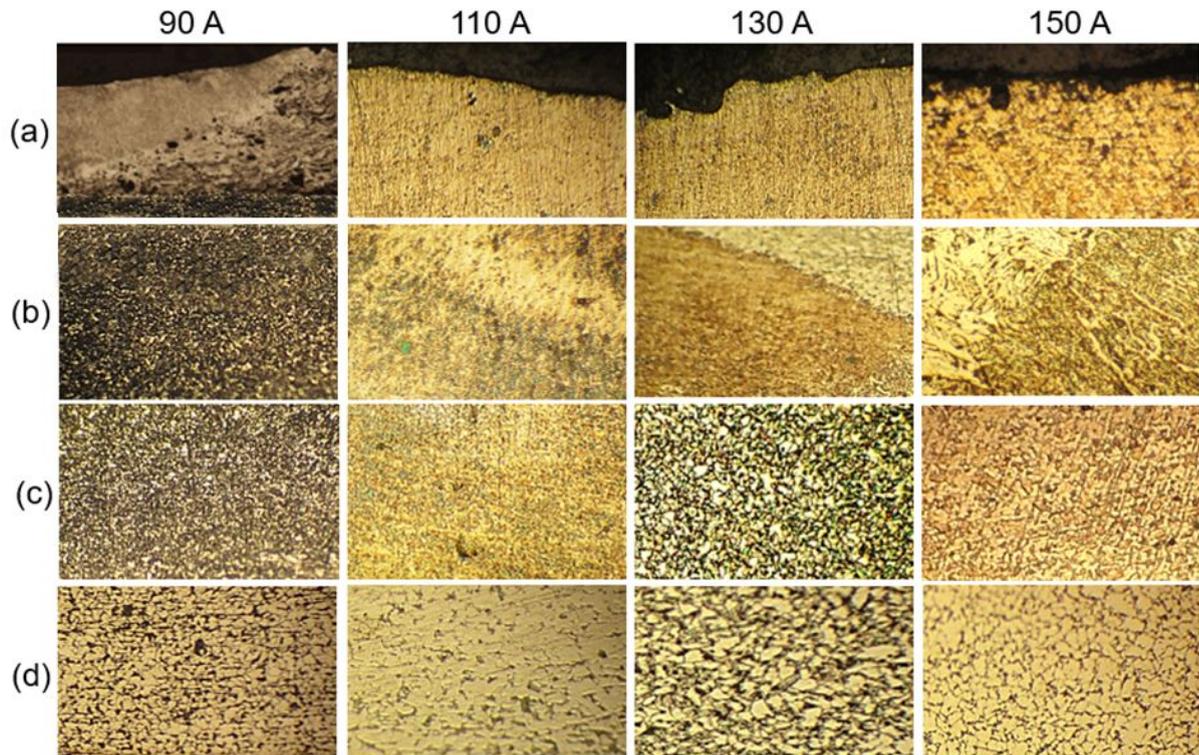
Figura 23. Microestrutura da seção transversal dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CC; mostrando as regiões (a) refundida, (b) de transição, (c) zona afetada pelo calor, e (d) metal de base. Aplicação de 400 \times .



Fonte: O AUTOR.

Na Figura 24 é mostrada a micrografia da seção longitudinal dos revestimentos refundidos utilizando-se diferentes intensidades de corrente contínua. Comparando-se as Figura 23 e Figura 24 é possível concluir que não há grandes variações microestruturais entre a seção transversal e longitudinal do sistema revestimento refundido/metal de base.

Figura 24. Microestrutura da seção longitudinal dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CC; mostrando as regiões (a) refundida, (b) de transição, (c) zona afetada pelo calor, e (d) metal de base. Aplicação de 400 ×.

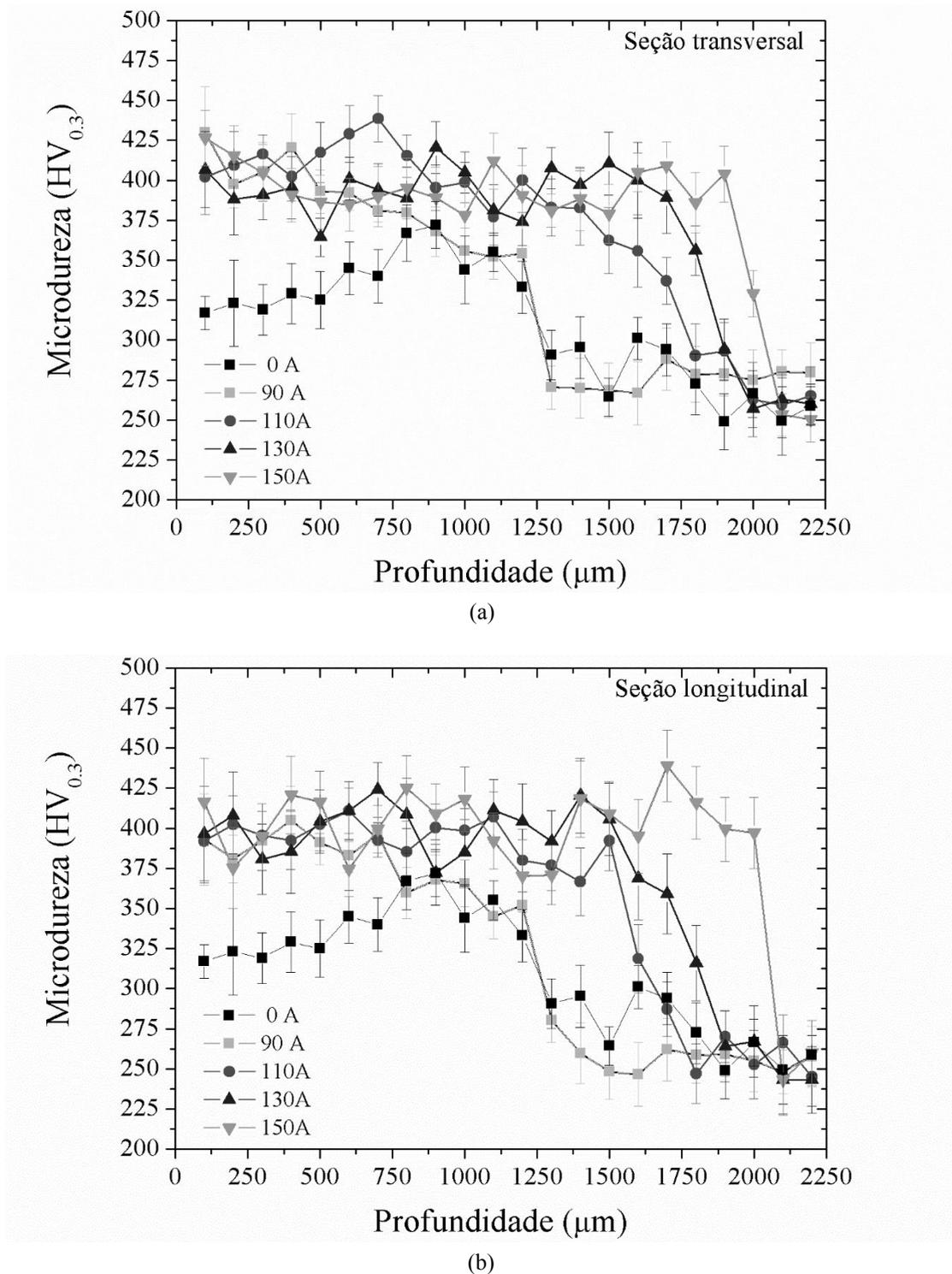


Fonte: O AUTOR.

Na Figura 25 são apresentados os perfis de microdureza Vickers medidos nas seções transversal (*a*) e longitudinal (*b*) dos revestimentos refundidos utilizando-se corrente no modo contínuo. A título de comparação, foram introduzidos também os valores da condição de referência (como aspergido – 0 A). A análise da curva referente a condição de refusão empregando corrente contínua com intensidade de 90 A na Figura 25a exibe valores de dureza superiores à condição de 0 A até uma profundidade de 750 μm , apresentando valores similares para profundidades superiores a este valor, indicando que a profundidade de refusão do revestimento para esta condição é desta ordem de grandeza. Para todos os demais valores de intensidade de corrente contínua adotados, é possível verificar que o acréscimo de dureza se dá para profundidades superiores àquela observada na 0 A, confirmando a completa diluição do revestimento no metal de base promovida pela refusão. Esse acréscimo de dureza é creditado às tensões residuais compressivas geradas na região refundida. Segundo MARQUES *et al.* (2017), estas tensões residuais compressivas são geradas em decorrência das transformações de fases ocorridas, e pelas restrições mecânicas impostas pela região não fundida sobre a região fundida. Verifica-se também que quanto maior a intensidade da corrente contínua de soldagem adotada, maior é a profundidade de endurecimento observada,

e maior é o efeito do ciclo térmico sobre a redução de dureza na ZTA, em virtude do crescimento de grãos. A análise da Figura 25b permite inferir que os resultados das medidas de microdureza realizados na seção longitudinal concordam com aqueles da transversal.

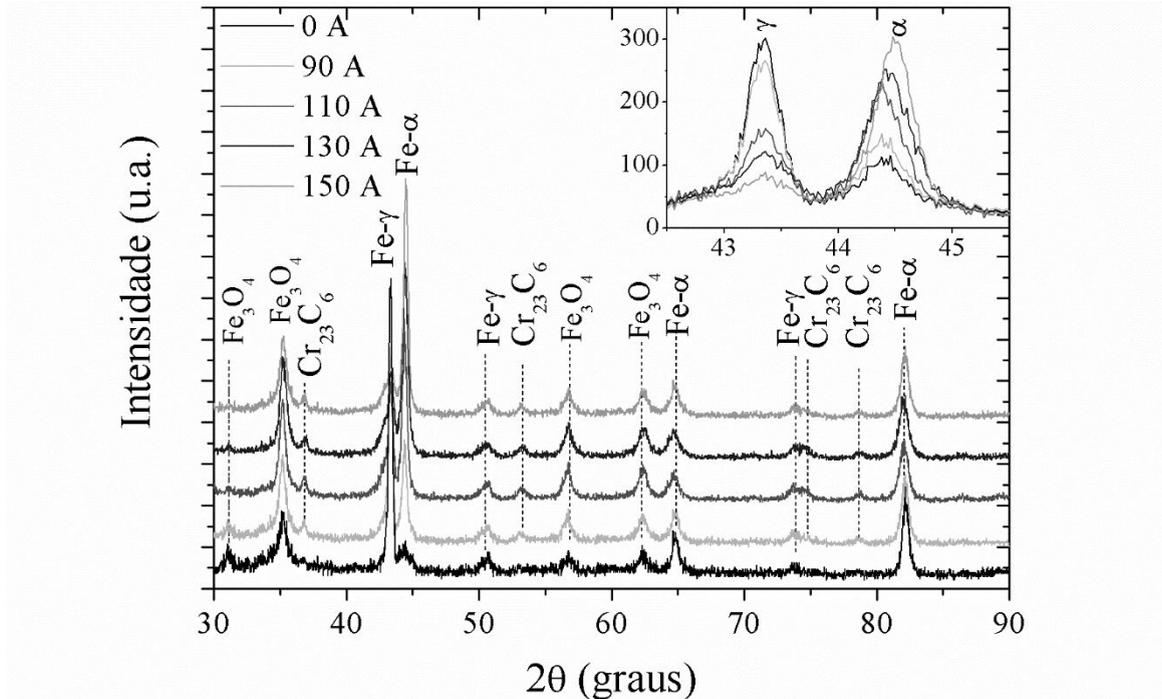
Figura 25. Perfil de microdureza nas seções transversal (a) e longitudinal (b) dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CC.



Fonte: O AUTOR.

Na Figura 26 é apresentado o padrão de difração de raios X dos revestimentos nas condições como depositado e refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo contínuo. Confrontando-se os espectros da condição de referência com aqueles obtidos a partir das amostras refundidas, é possível identificar a ocorrência adicional de picos referentes a fase carboneto de cromo (Cr_{23}C_6) nas amostras refundidas. Segundo Lippold e Damian (2005), o processamento dos aços inoxidáveis em temperaturas superiores a $500\text{ }^\circ\text{C}$ promove a precipitação deste tipo de composto químico. Ainda segundo os autores citados, o Cr_{23}C_6 apresenta cerca de 95% de cromo em peso. Dessa forma, a formação desta fase pode causar prejuízo à resistência à corrosão da superfície refundida. A análise da Figura 26 também permite afirmar que há uma redução do pico de maior intensidade da fase Fe- γ , e um aumento do pico de maior intensidade da fase Fe- α . Observa-se que essa alteração na intensidade dos picos referentes as fases γ e α é tanto maior quanto maior o valor de CC adotado. Esse comportamento possivelmente está vinculado à maior diluição do revestimento sobre o substrato com o aumento da intensidade de CC adotada, em virtude do aporte térmico superior. Por fim, a manutenção da ocorrência dos picos referentes à fase Fe_3O_4 é justificada em função da flotação dos óxidos durante a refusão e formação de uma camada destes na superfície refundida.

Figura 26. Padrão de difração de raios X dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CC.

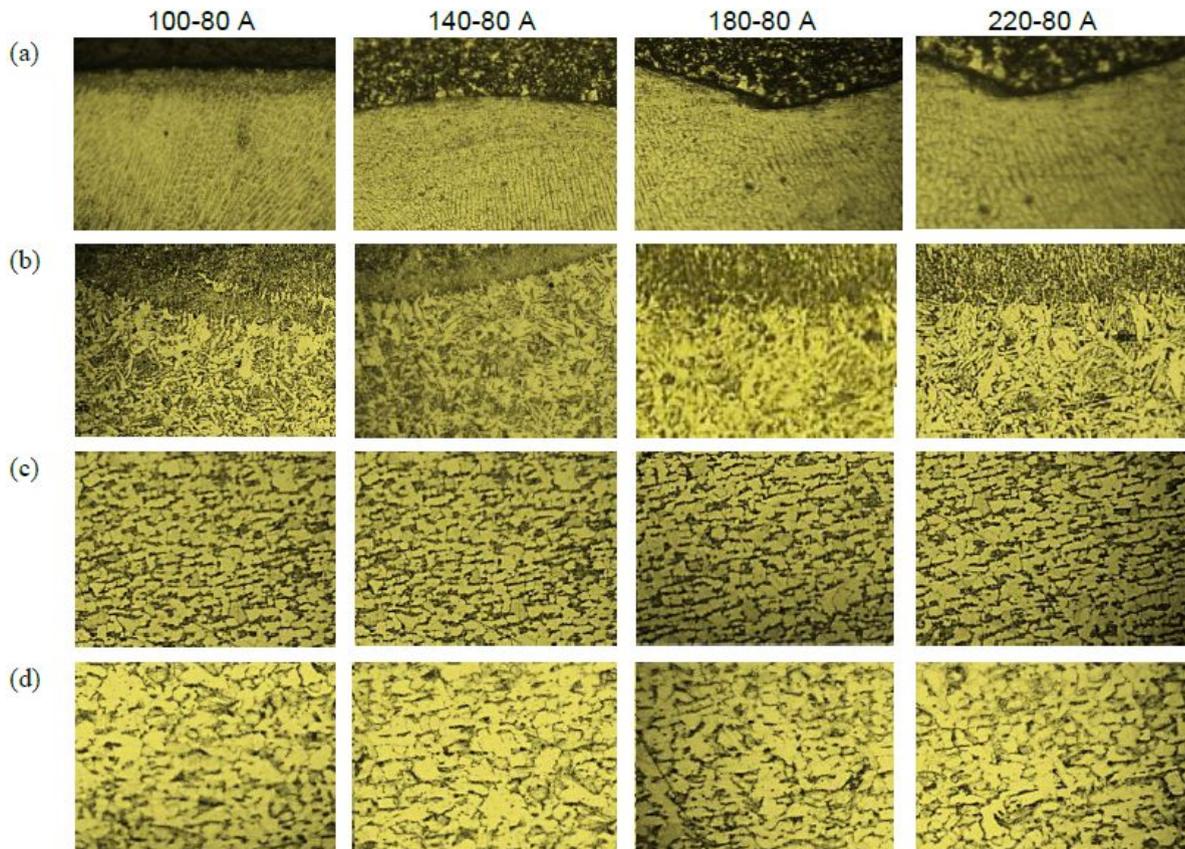


Fonte: O AUTOR.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS REFUNDIDOS UTILIZANDO CORRENTE PULSADA

Na Figura 27 é apresentada a micrografia da seção transversal dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente pulsada. Verifica-se que houve diluição do revestimento no substrato para todas as intensidades de CP usadas. Para um mesmo valor de corrente média (I_m) contínua, e adotando-se uma corrente de pico com intensidade ligeiramente superior ao valor de I_m , o emprego do modo CP promove um maior aquecimento da poça de fusão, promovendo a fusão do revestimento mesmo para uma I_m de 90 A. A orientação na formação da estrutura dendrítica também foi alterada com o emprego do modo CP. A maior agitação da poça de fusão gerada pelos pulsos de corrente promove a quebra do crescimento das dendritas durante o pulso de base causando a alteração no sentido de crescimento destas. Por fim, a estrutura granular da ZTA e do MB apresentam as mesmas características e comportamento daquelas apresentadas na Figura 23 para o modo CC.

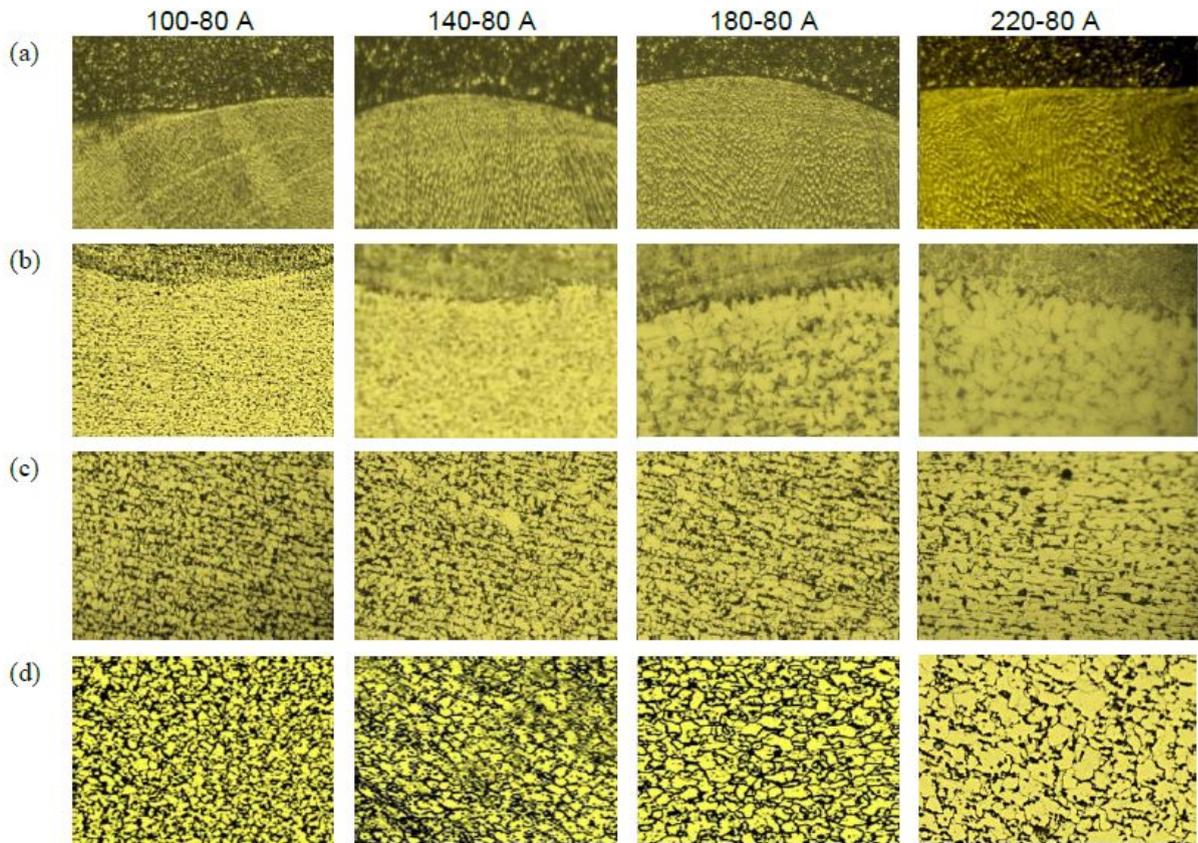
Figura 27. Microestrutura da seção transversal dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CP; mostrando as regiões (a) refundida, (b) de transição, (c) zona afetada pelo calor, e (d) metal de base. Aplicação de 400 \times .



Fonte: O AUTOR.

Na Figura 28 é mostrada a micrografia da seção longitudinal dos revestimentos refundidos utilizando-se diferentes intensidades de corrente pulsada. Comparando-se as Figura 27 e Figura 28 é possível concluir que não há grandes variações microestruturais entre a seção transversal e longitudinal do sistema revestimento refundido/metal de base.

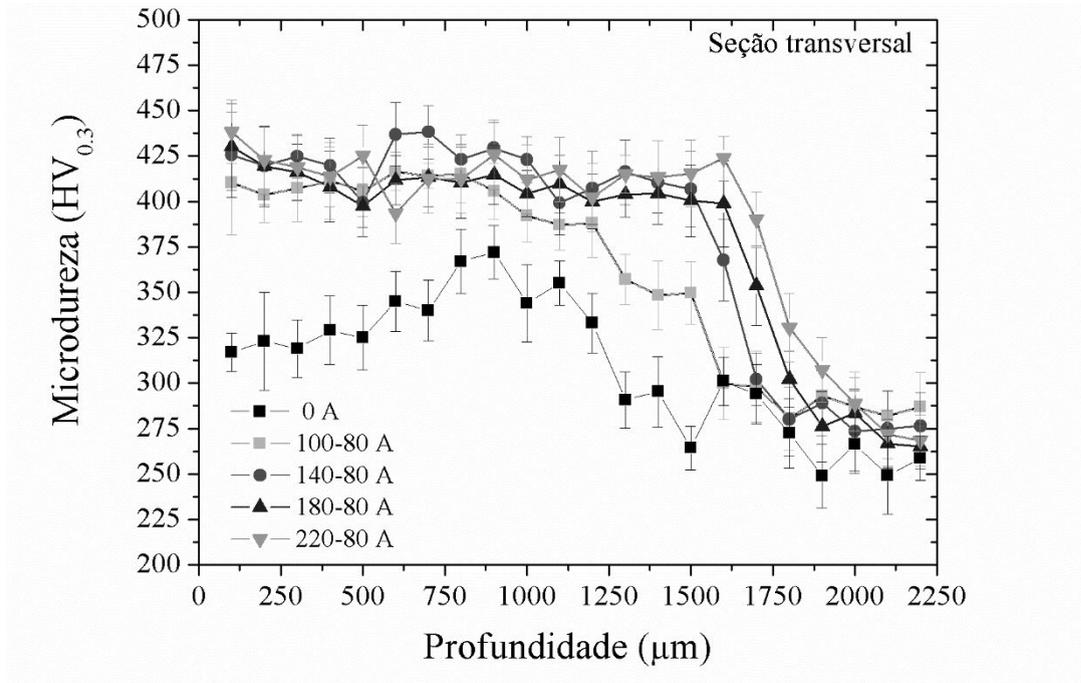
Figura 28. Microestrutura da seção longitudinal dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CP; mostrando as regiões (a) refundida, (b) de transição, (c) zona afetada pelo calor, e (d) metal de base. Aplicação de 400 ×.



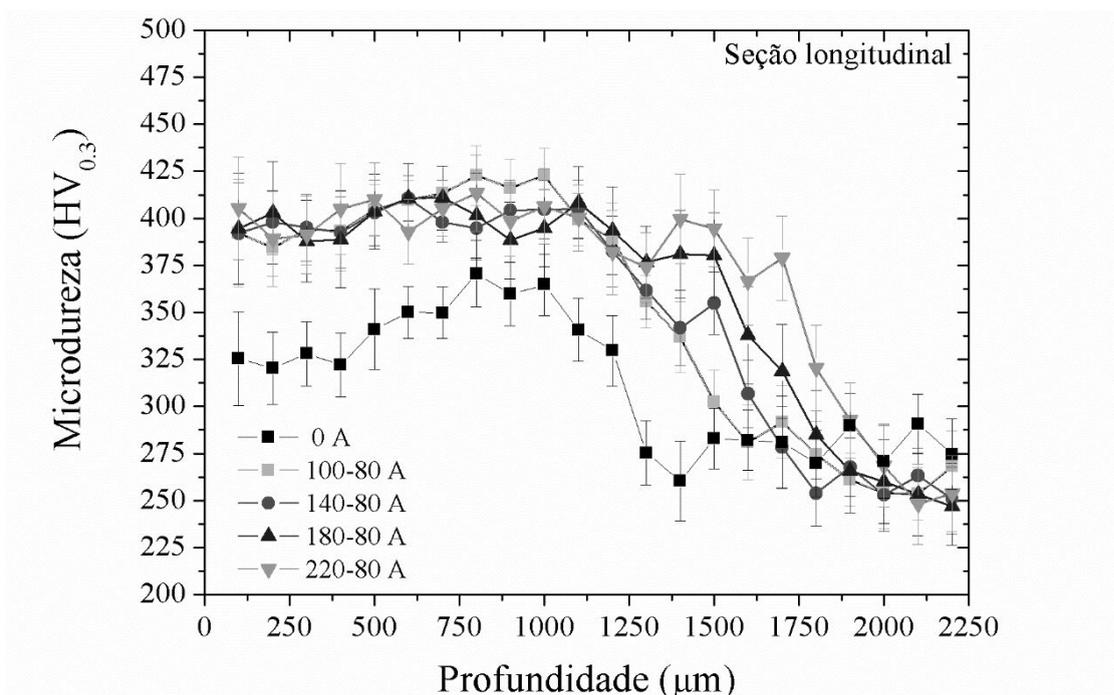
Fonte: O AUTOR.

Na Figura 29 são apresentados os perfis de microdureza medidos nas seções transversal (a) e longitudinal (b) dos revestimentos refundidos empregando-se corrente no modo pulsado (o perfil de dureza da condição de referência é colocado a título de comparação). Diferentemente do observado na Figura 25, a análise da curva referente a condição de refusão empregando corrente pulsada com intensidade média de 90 A exibe valores de dureza superiores à condição de referência para uma profundidade da ordem de 1500 μm , confirmando a completa refusão do revestimento aspergido ao metal de base. Confrontando-se os perfis das Figura 29 com a Figura 25, observa-se que a profundidade de endurecimento é menor quando empregado o modo de corrente CP, sugerindo uma menor extensão da ZTA. Esse resultado possivelmente deve-se ao efeito do resfriamento sofrido pela poça de fusão durante a corrente de base do ciclo.

Figura 29. Perfil de microdureza nas seções transversal (a) e longitudinal (b) dos revestimentos refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CP.



(a)



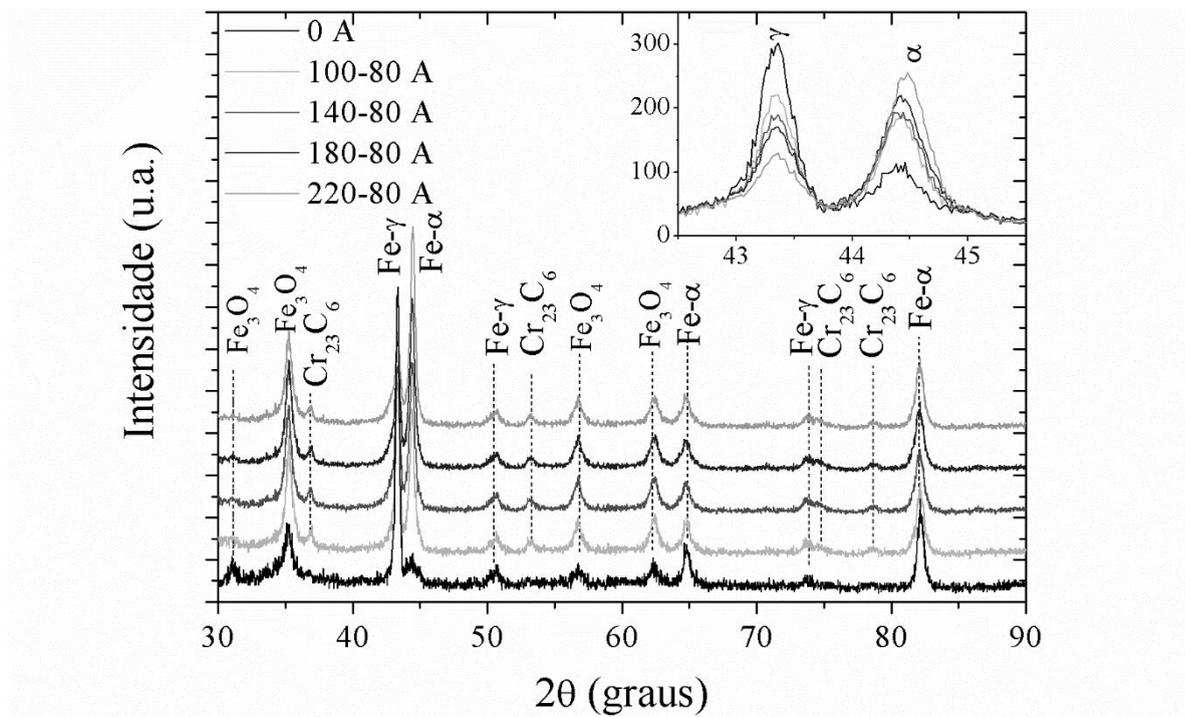
(b)

Fonte: O AUTOR.

Na Figura 30 é apresentado o padrão de difração de raios X dos revestimentos nas condições como depositado e refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo pulsado. É possível identificar a ocorrência dos mesmos resultados observados para as amostras refundidas empregando corrente contínua: ocorrência de picos referentes à fase

Cr_{23}C_6 , manutenção dos picos referentes à fase Fe_3O_4 , e redução do pico de maior intensidade da fase $\text{Fe-}\gamma$ e aumento do pico de maior intensidade da fase $\text{Fe-}\alpha$. Confrontando-se os detalhes da Figura 30 e Figura 26, é possível verificar que o aumento da intensidade do pico referente a fase $\text{Fe-}\alpha$ é menor nas amostras refundidas empregando CP. Esse resultado possivelmente deve-se à menor interdifusão entre o revestimento e substrato, em virtude do resfriamento da poça de fusão durante o ciclo de base da CP.

Figura 30. Padrão de difração de raios X dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos variando-se a intensidade de corrente no modo CP.



Fonte: O AUTOR.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Para as condições experimentais adotadas neste trabalho, com base na discussão dos resultados obtidos, é possível concluir que:

- A aplicação do processo TIG para a refusão superficial de revestimentos aspergidos termicamente permite obter um revestimento refundido isento de porosidade;
- A adoção de intensidades de corrente contínua da ordem de 110 A, promove a completa refusão do revestimento e a sua diluição no metal de base. Para a corrente pulsada, a completa fusão ocorre para uma intensidade de corrente média de 90 A;
- O acréscimo na intensidade tanto da corrente contínua quanto da corrente pulsada promove um aumento no tamanho de grão na região da zona termicamente afetada e no metal de base;
- O acréscimo na intensidade tanto da corrente contínua quanto da corrente pulsada promove um aumento na profundidade de endurecimento, sugerindo um crescente percentual de diluição do revestimento no metal de base;
- Para o mesmo valor de intensidade de corrente, o emprego do regime pulsado promove uma menor profundidade de endurecimento quando comparado ao regime contínuo, sugerindo uma menor diluição do revestimento ao substrato;
- O revestimento refundido apresenta microestrutura dendrítica, ao passo que, a zona termicamente afetada e o metal de base são compostos pelos microconstituintes ferrita proeutetóide e perlita; e,
- Os padrões de difração de raios X sugerem a presença das fases austenita (γ), ferrita (α) e óxido de ferro (Fe_3O_4) no revestimento como aspergido. Nos revestimentos refundidos, além destas fases foi identificada também a ocorrência de carboneto de cromo (Cr_{23}C_6).

5.2 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho abriu algumas possibilidades dentro do tema abordado, as quais poderão ser seguidas a fim de ampliar o entendimento sobre o assunto, sendo estas:

- Avaliar a resistência à corrosão e ao desgaste dos revestimentos refundidos e confrontá-los com o do revestimento como aspergido;
- Avaliar o efeito da utilização de fluxos desoxidantes durante a refusão sobre a formação e facilidade de remoção de óxidos superficiais;
- Avaliar o efeito da adição de pequenas parcelas de gases redutores sobre a remoção dos óxidos durante a operação de refusão;
- Avaliar o efeito dos parâmetros da corrente pulsada (intensidade e tempo das correntes de pico e de base, e a frequência de pulso) sobre a microestrutura e microdureza dos revestimentos refundidos; e,
- Determinar o efeito do tipo e intensidade de corrente sobre o percentual de diluição do revestimento sobre o substrato, através da análise do teor de Fe do metal de adição, metal de base, e no revestimento refundido.

REFERÊNCIAS

ADACHI S.; UEDA, N. Wear and Corrosion Properties of Cold-Sprayed AISI 316L Coatings Treated by Combined Plasma Carburizing and Nitriding at Low Temperature. *Coatings*, v. 8(12), p. 456, 2018.

ALMEIDA, D. S. Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe de elétrons para aplicação como barreira térmica. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). *Thermal Spray: practice, theory, and application*. Estados Unidos, Florida, 1985.

CRAWMER, D. E. Thermal Spray Process. In: *Handbook of Thermal Spray Technology*. Materials Park: ASM, 2004.

ELDER, S.H.; DISALVO, F.J.; TOPOR, L.; NAVROTSKY, A. Thermodynamics of Ternary Nitride Formation by Ammonolysis: Application to LiMoN₂, Na₃WN₃ and Na₃WO₃N. *Chemistry of Materials*, v. 5(10), p. 1-41, 1993.

FLAME SPRAY TECHNOLOGY (FTS). Arc Wire Spray Process. Disponível em: <<https://www.fst.nl/systems/arc-wire-spray/>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

FOLKHARD, E. *Welding Metallurgy of Stainless Steels*. Springer-Verlag, New York-Wien, 1988.

GROOVER, M.P. *Fundamentos da moderna manufatura*. 5ª ed. Vol. 2, São Paulo: Editora LTC, 2013.

HENKE, S.L. Efeito da refusão por tocha plasma na resistência à fadiga de um aço inoxidável martensítico macio. 48 f. Monografia (Especialização em Engenharia da Soldagem) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

KELKAR, M.; HIBERLEIN, J. Wire-Arc Spray Modeling. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, v. 22, p. 1-25, 2002.

KUTSCHMANN, P.; LINDNER, T.; BÖRNER, K.; REESE U.; LAMPKE, T. Effect of Adjusted Gas Nitriding Parameters on Microstructure and Wear Resistance of HVOF-Sprayed AISI 316L Coatings. *Materials*, v. 12(11), p. 1760, 2019.

LIMA, C.C.; TREVISAN, R. *Aspersão térmica: fundamentos e aplicações*. 2ª ed. São Paulo: Editora Artliber, 2007.

LIPPOLD C. J.; DAMIAN K. J.; Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Canada. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. 2005.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE A.Q. Soldagem: Fundamentos e tecnologia. 4ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2017.

MENEZES, D.D. Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos de alumínio aplicados pela técnica de arco elétrico e chama convencional, em meio cloreto. 2007. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

PAREDES, R.S.C., NIKKEL, W., SUCHARSKI, G.B.; COSTA P.P.B. Optimization of arc-sprayed iron-based tungsten carbide hard coatings on harvester blades. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v 41, p. 217, 2019.

PUKASIEWICZ, A.G.M.; OLIVEIRA, F.R.O.; CAPRA, A.R.; PAREDES, R.S.C. Influência da refusão por plasma na microestrutura de um revestimento Fe-Mn-Cr-Si depositado por aspersão térmica arco elétrico sobre aço inoxidável ASTM A743-CA6NM. Soldagem & Inspeção, v. 17 (1), p. 65-75, 2012.

REIS RP, SCOTTI A. Fundamentos e prática da soldagem a plasma. 1ª ed. São Paulo: Artliber, 2007.

SAMPATH, S.; HERMAN, H. Rapid Solidification and Microstructure Development During Plasma Spray Deposition. Journal of Thermal Spray Technology, v. 5(4), p. 445-456, 1996.

SILVA FJG. Tecnologia da Soldadura: uma abordagem técnico-didática. Porto: Publindustria. 2014.

SUCHARSKI, G. B.; Estudo da erosão por cavitação sobre diferentes morfologias de revestimentos de FeMnCrSiB aplicados por aspersão térmica chama FS e HVOF com tratamento de *shot peening*. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

TAKEMOTO, M.; LONGA, Y.; UENO, G. Metallurgical properties and corrosion resistance of SUS 316L coatings deposited on the carbon steel by a portable atmosphere-controlled thermal spraying system. Journal Corrosion Control, v. 10, p 351-357, 1994.

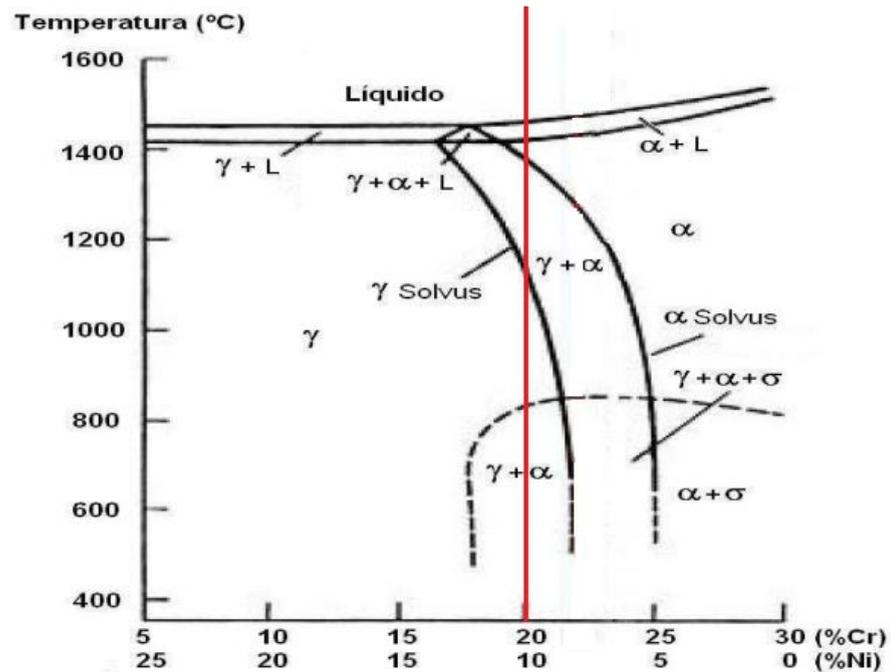
TOLACO. Comprehensive Manufacturer of Advanced Coating. Electric Arc Spraying Process. Disponível em: < <https://www.tocalo.co.jp/english/technical/arc.html>>. Acesso em 20 de outubro de 2019.

WAINER E, BRANDI SD, MELLO FDH. Soldagem: processos e metalurgia. 9ª reimpressão. São Paulo: Blucher, 2013.

WANG, X.; HEBERLEIN, J.; PFENDER, E.; GERBERICH, W. Effect Nozzle Configuration, Gas Pressure, and Type on Coating Properties in Wire Arc Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, v. 8, p. 565-575, 1999.

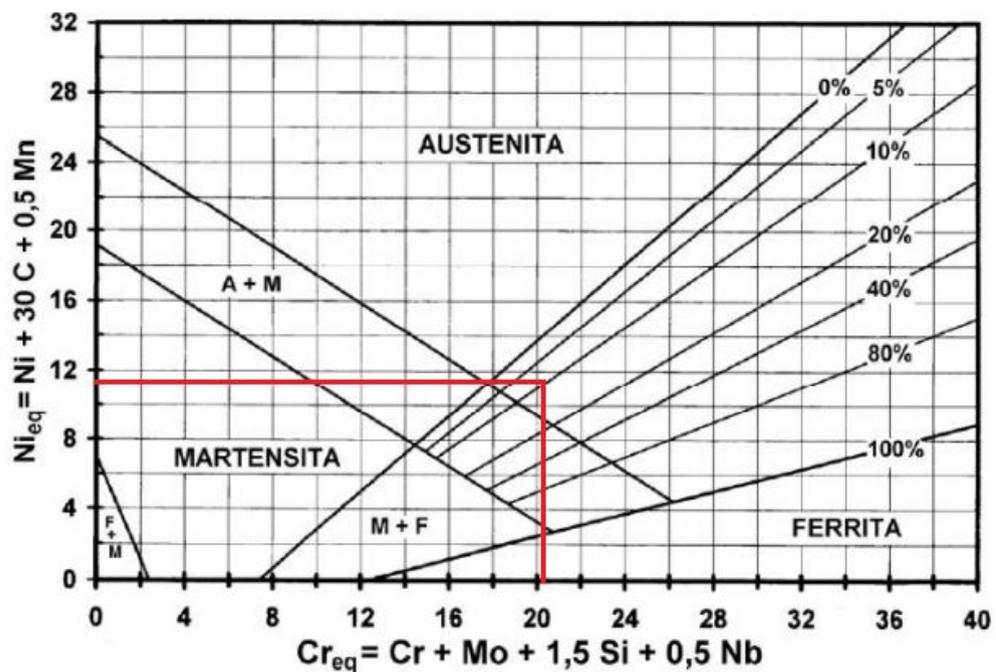
ANEXO A – DADOS COMPLEMENTARES

Figura 31. Diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni para 70% Fe (indicada em vermelho a composição química do consumível adotado neste trabalho).



Fonte: Adaptado de FOLKHARD (1988).

Figura 32. Diagrama de Schaeffler (indicada em vermelho os teores de Ni e Cr equivalente do consumível adotado neste trabalho).



Fonte: Adaptado de FOLKHARD (1988).