

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

Ricardo Zimpel

**REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DE REVESTIMENTO ASPERGIDO  
TERMICAMENTE: EFEITO DAS VARIÁVEIS DA CORRENTE EM  
REGIME PULSADO SOBRE A MICROESTRUTURA E MICRODUREZA**

Santa Maria, RS  
2020

**Ricardo Zimpel**

**REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DE REVESTIMENTO ASPERGIDO  
TERMICAMENTE: EFEITO DAS VARIÁVEIS DA CORRENTE EM REGIME  
PULSADO 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

**Ricardo Zimpel**

**REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DE REVESTIMENTO ASPERGIDO  
TERMICAMENTE: EFEITO DAS VARIÁVEIS DA CORRENTE EM REGIME  
PULSADO 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 09 de julho de 2020:**

---

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

---

**Prof. Gustavo B. Sucharski, Dr. Eng. (LACTEC/Sistemas Mecânicos)**

---

**Prof. Leandro João Silva, Dr. Eng. (FEMEC/UFU)**

Santa Maria, RS  
2020

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do curso de engenharia mecânica da UFSM pelos conhecimentos compartilhados ao longo da graduação. Agradeço em especial ao prof. Cristiano José Scheuer, meu orientador, por todo empenho em ensinar e direcionar quanto às tarefas que deveriam ser realizadas, e auxiliar também nas atividades práticas do presente Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço ao prof. Ramón Sigifredo Cortés Paredes da UFPR pela disponibilização dos equipamentos necessários à confecção e preparo das amostras, e deposição dos revestimentos aspergidos termicamente. Agradeço especialmente ao prof. Gustavo Bavaresco Sucharski e ao doutorando Igor Giacomelli Zanella pela execução do preparo das amostras e deposição dos revestimentos.

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

Agradeço também aos colegas Lucas Bassaco Nogueira, Gabriel Ximendes Quinhones e Otavio Henrique Andrade Disconzi, e ao prof. Inácio da Fontoura Limberger pelo auxílio no preparo das amostras e caracterização destas através da técnica de microscopia óptica e medições de microdureza.

## RESUMO

### REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE: EFEITO DAS VARIÁVEIS DA CORRENTE EM REGIME PULSADO SOBRE A MICROESTRUTURA E MICRODUREZA

AUTOR: Ricardo Zimpel

ORIENTADOR: Cristiano José Scheuer

A aspersão térmica constitui uma técnica de engenharia de superfície que permite obter revestimentos com características distintas, expandindo o campo de aplicação de muitos materiais de engenharia. Isso se dá, pois esse processo permite o emprego de matérias-primas com propriedades específicas, e a obtenção de revestimentos com gradientes funcionais, ao mesmo tempo que, afeta minimamente as propriedades originais dos componentes revestidos. Este método é conhecido pela facilidade de operação e do seu baixo custo, o que faz com que a aplicação destes revestimentos seja largamente explorada no meio industrial. Em algumas aplicações, todavia, a elevada porosidade e a oxidação do revestimento fazem com que se apliquem métodos de refusão de modo a promover a sua densificação, e assim melhorar a adesão deste ao substrato e a sua coesão. Assim, levando em consideração as diferentes técnicas de refusão utilizadas para promover tal densificação e considerando as peculiaridades destas, faz-se necessário um estudo para a otimização deste processo, visando definir as condições mais adequadas e que permitem atingir os melhores resultados. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito dos parâmetros da corrente de refusão em regime pulsado empregando o processo TIG, sobre a microestrutura e dureza de revestimentos de liga a base de Fe-Cr-Ni depositados por aspersão térmica a arco elétrico (ASP) sobre substrato de aço carbono. Neste sentido, foi avaliada a influência da relação entre as intensidades de corrente pico –  $I_p$  e base –  $I_b$  ( $I_b$  de 50, 70 e 90% da  $I_p$ ), tempos de pulso (20, 50 e 80 %), e frequência de pulsos (1, 5 e 10 pulsos/s). As amostras como-aspersida e refundidas foram caracterizadas através das técnicas de microscopia óptica, difração de raios X e medidas de microdureza Vickers. Os resultados obtidos evidenciam que os parâmetros da corrente pulsada exercem efeito sobre a microestrutura e microdureza dos revestimentos refundidos. Estes apresentam microestrutura dendrítica, sendo constituídos pelas fases Fe- $\gamma$ , Fe- $\alpha$ , Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> e Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Todas as condições empregadas promoveram a completa refusão e diluição do revestimento ao substrato. A largura da zona fundida diminui com o aumento da frequência entre pulsos, e aumenta com o acréscimo de  $I_b$  e  $t_p$ ; a dureza do platô superficial, por sua vez, aumenta com o acréscimo na frequência de pulso e com redução de  $I_b$  e  $t_p$ , ao passo que, a profundidade de endurecimento aumenta com a redução na frequência de pulso e aumento da de  $I_b$  e  $t_p$ . Por fim, é possível concluir que o processo TIG pode ser utilizado com sucesso na refusão de revestimentos aspergidos termicamente, promovendo uma maior ligação do revestimento ao substrato e reduzindo a sua porosidade e oxidação interna.

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

**ABSTRACT****THERMALLY SPRAYED COATINGS REFUSION BY ELECTRIC ARC: EFFECT OF PULSE CURRENT VARIABLES ON MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS**

AUTHOR: Ricardo Zimpel

ADVISOR: Cristiano José Scheuer

Thermal spraying is a surface engineering technique that allows to obtain coatings with optimized characteristics, expanding the application field of many engineering materials. This is due thermal spray process allows the use of raw materials with specific properties, and the obtaining of functional gradients coatings, while at the same time, minimally affects the coated components original properties. This method is known for its ease operation and low cost, which makes the thermally sprayed coatings application widely explored in the industrial environment. In some applications, however, the coating high porosity and oxidation make that remelting methods are applied in order to promote the coating densification, and thus improve its adhesion to the substrate and cohesion. Thus, taking into account the different remelting techniques used and considering their peculiarities, a study is necessary to optimize these process, aiming to defining the most appropriate conditions that allow to achieve the best results. Thus, this work aims to evaluate the effect of the TIG electric arc remelting parameters operating in pulsed regime, on the microstructure and microhardness of Fe-Cr-Ni based alloy coatings deposited by electric arc thermal spray technique on plain carbon steel substrate. In this sense, the effect of relationship among peak current intensities –  $I_p$  and base –  $I_b$  ( $I_b$  of 50, 70 and 90% of  $I_p$ ), pulse times (20, 50 and 80 s), and pulse frequency (1, 5 and 10 pulses/s) were evaluated. As-sprayed and remelted coatings were characterized using optical microscopy, X-ray diffraction and Vickers microhardness measurements. The obtained results show that the pulsed current parameters have an effect on remelted coatings microstructure and microhardness. Remelting coating present a dendritic microstructure, being constituted by the phases Fe- $\gamma$ , Fe- $\alpha$ , Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. All employed conditions promoted the complete remelting and dilution of the coating to the substrate. The fused zone width decreases with increasing on pulse frequency, and increases with the  $I_b$  and  $t_p$  increasing, the superficial plateau hardness, in turn, increases with the increase in the pulse frequency and with a the  $I_b$  and  $t_p$  reduction, while the hardening depth increases with pulse frequency decrease and an increase in the  $I_b$  and  $t_p$ . Finally, it is possible to conclude that the TIG process can be successfully used to thermally sprayed coatings remelting, promoting a greater bond of the coating to the substrate and reducing its porosity and internal oxidation.

**Keywords:** Thermal Spray; Electric Arc Remelting; Fe-Cr-Ni coating.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Esquema simplificado do processo de aspersão térmica.....	15
Figura 2. Esquema simplificado do processo de aspersão térmica a arco elétrico.....	16
Figura 3. Esquema indicando a sequência de formação dos revestimentos aspergidos termicamente. ....	18
Figura 4. Morfologia usual dos revestimentos aspergidos termicamente. ....	18
Figura 5. Esquema representativo da refusão de um revestimento aspergido termicamente pelo processo TIG. ....	24
Figura 6. Representação esquemática dos elementos que constituem um equipamento TIG. .	25
Figura 7. Tocha para a refusão TIG montada, à esquerda e desmontada, à direita. ....	25
Figura 8. Parâmetros da corrente contínua pulsada ao longo do tempo. ....	26
Figura 9. Fluxograma indicando as etapas de realização deste trabalho. ....	28
Figura 10. (a) Equipamento de aspersão térmica a arco elétrico; (b) Pistola de aspersão térmica a arco elétrico.....	30
Figura 11. Equipamentos empregados para realizar a refusão dos revestimentos aspergidos termicamente. ....	31
Figura 11. (a) Trajetória de refusão adotada, e (b) indicação da sobreposição entre os cordões. ....	33
Figura 13. Indicação dos cortes realizados nas amostras refundidas para obter os corpos de provas para as caracterizações metalográficas, de microdureza e de DRX.....	34
Figura 14. Microestrutura da seção transversal (a) e longitudinal (b) do revestimento aspergido termicamente na condição como depositados. ....	35
Figura 15. Padrão de difração de raios X do revestimento aspergidos termicamente na condição como depositado.....	37
Figura 16. Diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni para 70% Fe (indicada em vermelho a composição química do consumível adotado neste trabalho).....	37
Figura 17. Diagrama de Schaeffler (indicada em vermelho os teores de Ni e Cr equivalente do consumível adotado neste trabalho). ....	38
Figura 18. Perfil de dureza na seção transversal e longitudinal dos revestimentos aspergidos termicamente na condição como depositados. ....	39
Figura 19. Aspecto visual dos revestimentos no estado (a) como depositado, e refundidos empregando-se corrente pulsada com frequências entre pulsos de (b) 1 pulso/s, (c) 5 pulsos/s e (d) 10 pulsos/s.....	40
Figura 20. Microestrutura da seção transversal dos revestimentos refundidos empregando-se corrente pulsada com frequências entre pulsos de (a) 1 pulso/s, (b) 5 pulsos/s e (c) 10 pulsos/s, mostrando as regiões (i) refundida, (ii) de transição, (iii) zona afetada pelo calor, e (iv) metal de base. ....	41

Figura 21. Padrão de difração de raios X dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação da frequência entre pulsos. ....	43
Figura 22. Perfil de microdureza na seção transversal dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação da frequência entre pulsos. ....	45
Figura 23. Aspecto visual dos revestimentos no estado (a) como depositado, e refundidos empregando-se corrente pulsada com intensidade de corrente de base de (b) 50%, (c) 70% e (d) 90% da corrente de pico. ....	47
Figura 24. Microestrutura da seção transversal dos revestimentos refundidos empregando-se corrente pulsada com intensidade de corrente de base de (a) 50%, (b) 70% e (c) 90% da corrente de pico, mostrando as regiões (i) refundida, (ii) de transição, (iii) zona afetada pelo calor, e (iv) metal de base. ....	47
Figura 25. Padrão de difração de raios X dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação da intensidade da corrente de base. ....	49
Figura 26. Perfil de microdureza na seção transversal dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação da intensidade da corrente de base. ....	49
Figura 27. Aspecto visual dos revestimentos no estado (a) como depositado, e refundidos empregando-se corrente pulsada com tempo de pulso (tp) de (b) 20%, (c) 50% e (d) 80% do tempo total do ciclo. ....	50
Figura 28. Microestrutura da seção transversal dos revestimentos refundidos empregando-se corrente pulsada com tempo de pulso de (a) 20%, (b) 50% e (c) 80% do tempo total do ciclo, mostrando as regiões (i) refundida, (ii) de transição, (iii) zona afetada pelo calor, e (iv) metal de base. ....	51
Figura 29. Padrão de difração de raios X dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação do tempo de pulsos. ....	52
Figura 30. Perfil de microdureza na seção transversal dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação do tempo de pulsos. ....	53

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do metal de base e do metal de adição empregados na deposição dos revestimentos. ....	29
Tabela 2. Parâmetros adotados no jateamento dos corpos de prova à serem revestidos. ....	29
Tabela 3. Parâmetros utilizados na deposição dos revestimentos. ....	29
Tabela 4. Parâmetros utilizados nos três estudos realizados. ....	32

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASP	<i>Arc Spray Process</i> (Aspersão Térmica a Arco Elétrico)
AWS	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Soldagem)
DDP	Diferença de potencial
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DRX	Difração de raios X
FS	<i>Flame Spray</i> (Aspersão Térmica a Chama)
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> (Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio)
HVOF	<i>High Velocity Oxy-Fuel</i> Aspersão Térmica a Alta Velocidade
LABATS	Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais
LASOMET	Laboratório de Soldagem e Materiais
LORXI	Laboratório de Ótica de Raios-X e Instrumentação
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> (Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo consumível)
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i> (Soldagem a arco com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio em bocal constricto)
TBC	<i>Thermal Barrier Coatings</i> (Revestimento de Barreira Térmica)
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
ZF	Zona Fundida

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	9
1.1	APRESENTAÇÃO.....	9
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
1.3	OBJETIVOS.....	11
1.3.1	Objetivo geral.....	11
1.3.2	Objetivos específicos.....	11
1.4	ESTRUTURA DO TCC.....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
2.1	ASPERSÃO TÉRMICA.....	14
2.1.1	Aspersão térmica a arco elétrico.....	15
2.1.2	Formação dos revestimentos aspergidos termicamente.....	16
2.1.3	Morfologia dos revestimentos aspergidos termicamente.....	18
2.1.4	Defeitos dos revestimentos aspergidos termicamente.....	20
2.1.5	Efeito da morfologia sobre as propriedades e desempenho do revestimento.....	21
2.2	REFUSÃO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE.....	23
2.2.1	Refusão de revestimentos empregando arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (TIG).....	24
2.2.2	Características do arco elétrico operando em regime de corrente pulsada.....	26
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	28
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E DEPOSIÇÕES DOS REVESTIMENTOS.....	28
3.2	REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS.....	30
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PROCESSADO.....	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	35
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE.....	35
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS REFUNDIDOS VARIANDO-SE A FREQUÊNCIA DE PULSO – ESTUDO 1.....	39
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS REFUNDIDOS VARIANDO-SE A INTENSIDADE DA CORRENTE DE BASE – ESTUDO 2.....	46
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS REFUNDIDOS VARIANDO-SE O TEMPO DE PULSO– ESTUDO 3.....	50
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	54
5.1	CONCLUSÕES.....	54
5.2	SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS.....	55
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	56

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

Os custos que uma determinada empresa possui é um dos principais fatores que influenciam no seu sucesso ou fracasso. Assim, uma indústria deve ser criteriosa quanto aos materiais utilizados em seus produtos, visto que, uma falha prematura dos mesmos pode representar um prejuízo indesejado. Na engenharia, falhas em componentes mecânicos são muito comuns e as suas causas são diversas: especificação incorreta dos materiais, projeto e fabricação mal executados, inadequadas condições de uso, etc.; todas estas levando aos principais modos de degradação: corrosão e desgaste.

Ao levar em consideração que aproximadamente 30% da produção mundial de aço é destinada para repor peças de equipamentos e instalações deterioradas através da corrosão (NUNES; LOBO, 1990), ao longo dos últimos anos, foram desenvolvidas diversas formas de melhorar a resistência desses materiais contra esse modo de degradação. Desse modo, surgiu a engenharia de superfície, à qual corresponde à uma especialidade dentro da área de engenharia de materiais e metalúrgica. Esta é composta por técnicas que possibilitam melhorar as características de superfície dos componentes, ao passo que não comprometem as propriedades do seu núcleo (BELL, 1990).

Nesse contexto, segundo Lima e Trevisan (2007), uma das técnicas que tem se destacado por apresentar resultados satisfatórios em aplicações práticas, ao mesmo tempo que permite que o processo – deposição do material – seja feita em campo, é a aspersão térmica. Esta constitui um conjunto de técnicas que permitem a deposição de revestimentos a partir de materiais metálicos, não metálicos e combinações entre eles. Essa deposição, em uma superfície previamente preparada, acontece a partir da pulverização dos mesmos no estado semifundido através de uma pistola de aspersão.

É possível citar duas variantes utilizadas, a aspersão térmica a arco elétrico, que utiliza energia elétrica para fundir o material, e a aspersão térmica a chama, que utiliza a combustão de um gás. Após a obtenção do estado desejado do material, o mesmo é projetado por meio de ar comprimido ou gases inertes, em direção a superfície do componente a ser revestido, e após a colisão do material na superfície, as partículas se deformam aumentando assim a área de contato e ancorando-se às suas asperezas durante o seu resfriamento. Quando em contato, uma elevada quantidade de energia cinética e térmica é transferida das partículas pulverizadas para o substrato (componente a ser revestido) e nesse instante, são satisfeitas as condições para que

ocorra a difusão de alguns microconstituintes do material aspergido para o substrato, ou a ocorrência de pontos de microsoldagem nessas regiões (SUCHARSKI, 2016). Como resultado, a ligação entre o componente e o material aspergido pode se apresentar de diferentes formas, como a mecânica, química, física ou uma combinação entre elas (AWS, 1985).

A microestrutura do revestimento depositado pela técnica de aspersão térmica é diferente daquela observada quando o material é obtido por outras técnicas de fabricação. Esta é composta por partículas lamelares, respingos, óxidos e poros (SUCHARSKI, 2016). As propriedades gerais e o desempenho dos revestimentos aspergidos são dependentes do percentual de porosidade e inclusão de óxidos presentes, havendo uma relação inversa entre estes. Assim sendo, de modo a aumentar a vida útil de componentes revestidos por aspersão térmica frente à corrosão e ao desgaste, passou-se a realizar operações de pós-processamento através de técnicas de refusão superficial. Esse procedimento promove o aumento da adesão do revestimento ao substrato, a partir da união química gerada pela refusão (TAKEMOTO; LONGA; UENO, 1994).

Neste sentido, diferentes técnicas são empregadas para promover essa otimização, dentre as quais merecem menção a: refusão em forno, a chama, a laser, por indução, a arco elétrico, etc. No caso da refusão a arco, os processos empregados constituem o arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa – TIG (*Tungsten Inert Gas*, também designado na literatura internacional por GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*) e o arco plasma – PAW (*Plasma Arc Welding*). O processo TIG é tido como uma opção econômica e tecnicamente interessante devido a sua versatilidade e simplicidade quando comparado ao processo PAW, e aos demais citados. A partir da seleção e controle adequado dos parâmetros deste processo e das demais variáveis de influência, é possível obter um revestimento com microestrutura e propriedades similares aqueles obtidos por técnicas de cladeamento (HENKE, 2013). Dentre os principais fatores de influência sobre o desempenho dos revestimentos refundidos está a microestrutura resultante da refusão, a qual está diretamente relacionada ao aporte térmico empregado durante a operação e, conseqüentemente, aos parâmetros elétricos aplicados.

Frente ao exposto, o tema deste trabalho de conclusão de curso (TCC) corresponde a análise do efeito da frequência de pulso, intensidade da corrente e tempo de pulso (de pico e base) sobre a microestrutura e microdureza de revestimentos aspergidos termicamente refundidos por arco elétrico empregando processo TIG operando em regime de corrente pulsada (CP).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O processo de aspersão térmica abrange uma grande área de aplicação e representa uma solução menos convencional, que permite obter revestimentos com características técnicas distintas, ampliando o campo de aplicação de muitos materiais de engenharia. Isso se dá, pois essa técnica possibilita o emprego de matéria-prima com propriedades específicas, e a obtenção de revestimentos com gradientes funcionais, ao mesmo tempo que, afeta minimamente as propriedades originais dos componentes revestidos (SUCHARSKI, 2016).

Desse modo, além dos benefícios já citados, o método é conhecido pela facilidade de operação e do seu baixo custo, o que faz a aplicação desses revestimentos ser explorada no meio industrial. Em algumas aplicações, porém, a elevada porosidade e a oxidação do revestimento fazem com que se apliquem métodos de refusão de modo a promover a densificação dos revestimentos, e assim aprimorar a adesão/coesão deste ao substrato. Assim, levando em consideração as diferentes técnicas de refusão utilizadas para promover tal densificação e considerando as peculiaridades delas, faz-se necessário um estudo para a otimização desse processo, visando definir as condições mais adequadas e que permitem atingir os melhores resultados. Essa necessidade justifica o desenvolvimento da pesquisa proposta através deste TCC.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Dada a carência de estudos abordando a influência dos parâmetros elétricos empregados na refusão a arco sobre as características microestruturais e propriedades mecânicas de revestimentos aspergidos termicamente, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo geral quantificar o efeito das variáveis da corrente em regime pulsado sobre a microestrutura e microdureza de revestimentos de aço AISI 308L aplicado sobre o aço baixo carbono por aspersão térmica a arco elétrico, refundidos empregando o processo TIG.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral do trabalho seja atingido, os seguintes objetivos específicos deverão ser considerados:

- Efetuar a preparação superficial das amostras através de jateamento abrasivo e realizar a deposição do revestimento sobre a superfície previamente jateada;
- Realizar a refusão dos revestimentos através da técnica TIG utilizando diferentes configurações de onda de corrente pulsada (variando a intensidade e tempo das correntes de pico e de bases, e a frequência de pulso);
- Caracterizar microestruturalmente e mecanicamente (microdureza) os revestimentos como aspergidos e refundidos superficialmente sob as condições avaliadas;
- Correlacionar o efeito das variáveis da corrente em regime pulsado sobre a microestrutura e dureza do revestimento refundido.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TCC

Este estudo encontra-se estruturado 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: o processo de aspersão térmica, descrevendo o seu princípio, a forma como o revestimento é produzido, as características morfológicas e defeitos dos revestimentos produzidos, e o efeito da morfologia e defeitos sobre as propriedades dos revestimentos; a refusão de revestimentos aspergidos termicamente, descrevendo as características e equipamentos do processo de refusão a arco elétrico empregando proteção gasosa e eletrodo de tungstênio, e as características do arco elétrico operando em regime de corrente pulsada.
- Capítulo 3: Retrata a abordagem metodológica utilizada para a realização do trabalho, apresentando uma descrição sumária de cada etapa a ser efetuada para o atendimento dos requisitos: Nesse ponto, é explicado as diversas etapas de execução, iniciando com a descrição da preparação das amostras (corte e jateamento) e deposição dos revestimentos (procedimento e parâmetros adotados); posteriormente descrevendo o equipamento e sequência de operação para realizar a refusão dos revestimentos; e, por fim, as técnicas de caracterização microestrutural e mecânicas empregadas para

caracterizar o revestimento refundido (medições de rugosidade, caracterização metalográfica, por difração de raios-x, e medição de microdureza);

- Capítulo 4: Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação do procedimento metodológico detalhado no Capítulo 3.
- 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

Max Schoop, um engenheiro suíço do início do século XX, buscando por uma técnica de aplicação de revestimentos que não utilizasse imersão ou adesivo, desenvolveu um processo onde partículas de metal fundido eram projetadas através de jatos de vapor ou ar comprimido sobre a superfície à ser revestida. Em 1909, Schoop obteve uma patente cobrindo o uso de um processo de combustão (empregando uma mistura de gases combustível e comburente) para fundir um arame e projetar as gotículas formadas sobre um substrato. Anos depois, em 1911, Schoop protocolou outra patente em que incorporava um arco elétrico como fonte de calor para fusão do arame e ar comprimido para projeção das gotículas sobre o substrato. Assim, a partir dos estudos realizadas por Schoop e sua equipe surgiu o processo de aspersão térmica, cuja aplicação principal consistia produzir revestimentos para proteção contra a corrosão. Atualmente, além da proteção contra a corrosão, a aplicação de revestimentos aspergidos termicamente tem outros objetivos como a redução do desgaste de determinado material e produção de isolamento térmico (revestimentos de barreira térmica – TBC: *Thermal Barrier Coatings*) e/ou elétrico em peças e ferramentas (LIMA, TREVISAN, 2007).

O processo de aspersão térmica compõe uma série de técnicas que permitem depositar revestimentos metálicos, não metálicos e compósitos, sob a forma de camadas lamelares, sobre substratos previamente preparados. Estes revestimentos alteram as características superficiais do substrato (sem promover a modificação das características do seu núcleo) otimizando as suas propriedades de superfície, através da aplicação de revestimentos a partir de materiais resistentes ao modo de degradação ao qual o componente estará exposto (PAREDES, 1998).

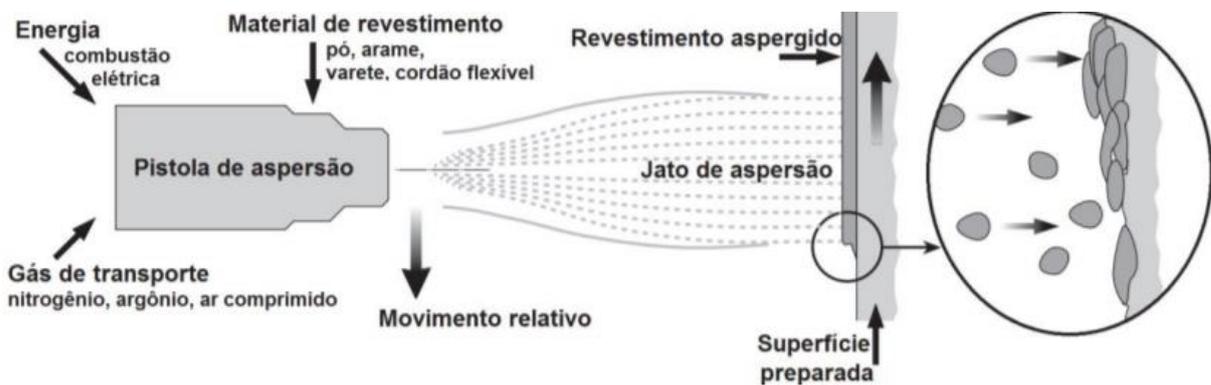
De modo geral, os processos de aspersão térmica consistem na utilização de um material de revestimento alimentado na forma de pó, arame, vareta ou bastão flexível; a tocha de aspersão que possui fontes diversas de calor, sendo elas a combustão (chama convencional ou supersônica) ou elétrica (descarga elétrica e indução) (SUCHARSKI, 2016).

O material a ser depositado precisa estar no estado fundido e/ou apresentar elevada plasticidade. Para tanto, este é aquecido a altas temperaturas (por chama, arco elétrico ou indução) e, posteriormente, pulverizado na forma de minúsculas gotículas sobre o substrato. A aceleração das partículas do material fundido sobre o substrato é efetuada através dos gases de

plasma ou de combustão, e do gás de transporte (ar comprimido ou gás inerte), que se expandem devido às altas temperaturas atingidas (SUCHARSKI, 2016).

Estas partículas, com grande energia térmica e cinética, colidem sucessivamente sobre o substrato transferindo sua energia à este, e, conseqüentemente, gerando uma transferência de calor que pode ser benéfica para a difusão de microconstituintes do material aspergido ao substrato. As partículas se deformam, solidificam e finalmente se ancoram mecanicamente sobre a superfície rugosa do material base, formando uma estrutura lamelar (SULZER, 2012; PUKASIEWICZ, 2008; TAKIMI, 2004). Na Figura 1 é apresentada uma representação simplificada do processo de aspersão térmica.

Figura 1. Esquema simplificado do processo de aspersão térmica.



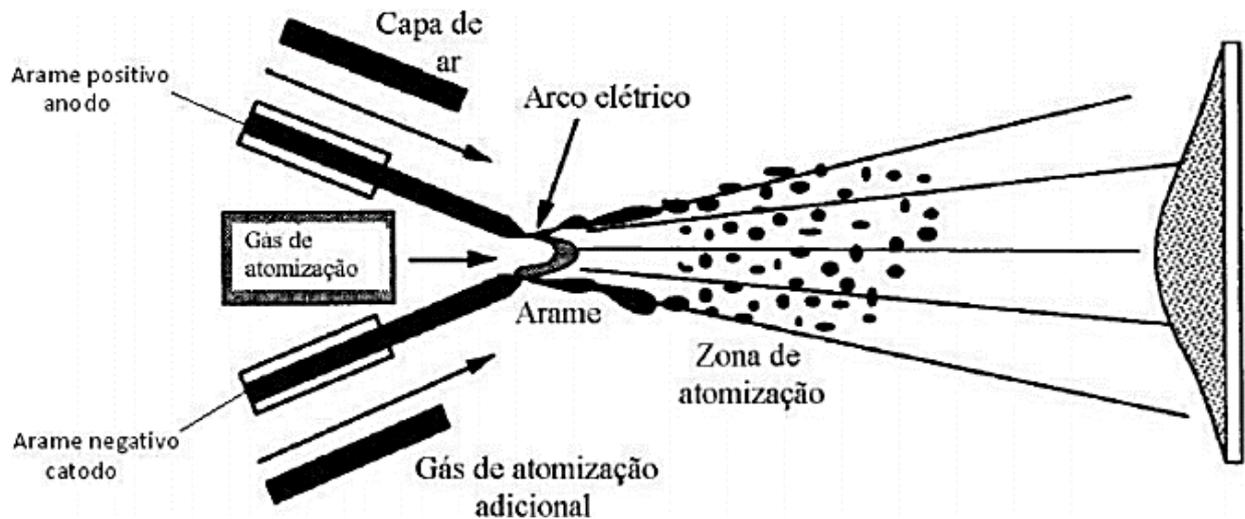
Fonte: SUCHARSKI, 2016.

### 2.1.1 Aspersão térmica a arco elétrico

O processo de aspersão térmica a arco elétrico, também conhecido como ASP (*Arc Spray Process*), emprega uma descarga elétrica em regime de arco, estabelecida entre a extremidade de dois arames (matéria-prima do revestimento) alimentados à um mesmo ponto focal no bico da pistola aspersora; como fonte de calor para fundir a ponta destes. O arco elétrico é gerado através da aplicação de uma diferença de potencial (DDP), da ordem de 18 a 40 V, entre os dois arames. O material fundido é propelido contra o substrato, através do fluxo de um gás de atomização (inerte – hélio, argônio ou uma mistura destes; ou não inerte – ar comprimido, mistura Ar-CO<sub>2</sub> ou Ar-O<sub>2</sub>) alimentados sob alta pressão sobre o ponto focal (VÁZ, 2013; LIMA; TREVISAN, 2007). A associação entre a fusão na extremidade e a alimentação contínua do arame, com o fluxo de gás de atomização, promove a formação do

revestimento aspergido (PAREDES, 2012). A Figura 2 ilustra de modo simplificado o processo de aspersão térmica a arco elétrico.

Figura 2. Esquema simplificado do processo de aspersão térmica a arco elétrico.



Fonte: PAREDES, 2012.

Alguns pontos a serem destacados sobre o processo ASP de modo a apontar as suas vantagens, é que este tem uma taxa de deposição de material maior que os outros processos de aspersão térmica; é de fácil operação; o custo para a confecção dos arames consumíveis para a deposição é considerado baixo; e, por exemplo, o nível de aderência do material é melhor que no processo a chama (*Flame Spray – FS*). Por fim, há alguns fatores limitantes nesse processo: o material a ser usado deve ser condutor elétrico, o que inviabiliza a utilização de materiais cerâmicos, visto que, poucos cerâmicos são condutores e há uma dificuldade na fabricação de arames destes, devido a sua fragilidade (LIMA; TREVISAN, 2002; SAMPATH; HERMAN, 1996).

### 2.1.2 Formação dos revestimentos aspergidos termicamente

De modo simplificado, um modelo de Kelkar e Hiberlein (2002), fala sobre a formação das gotículas de material fundido. Ele explica que no arame negativamente polarizado (cátodo), a resultante das forças atuantes sobre a gota tende a manter a mesma

fundida e aderida ao arame, até que ocorra o efeito Pinch<sup>1</sup> e, conseqüentemente, o desprendimento da gotícula. O mesmo efeito é visto no processo de soldagem MIG (*Metal Inert Gas*). Ainda sobre este modelo, a formação das gotículas no arame polarizado positivamente é ligada à deformação impressa sobre a extremidade do arame em virtude da pressão do gás de atomização, e a sua pulverização na forma de pequenas gotas. O tamanho das partículas projetadas pelo jato de gás de atomização, fator de influência sobre a morfologia do revestimento aspergido, é influenciado pela diferença de potência aplicada entre a extremidade dos dois arames e, conseqüentemente, sobre a corrente elétrica resultante. Neste sentido, segundo Crawmer (2004), o tamanho da gota diminui com a redução da corrente, aumento da pressão do ar ou a redução do diâmetro dos arames.

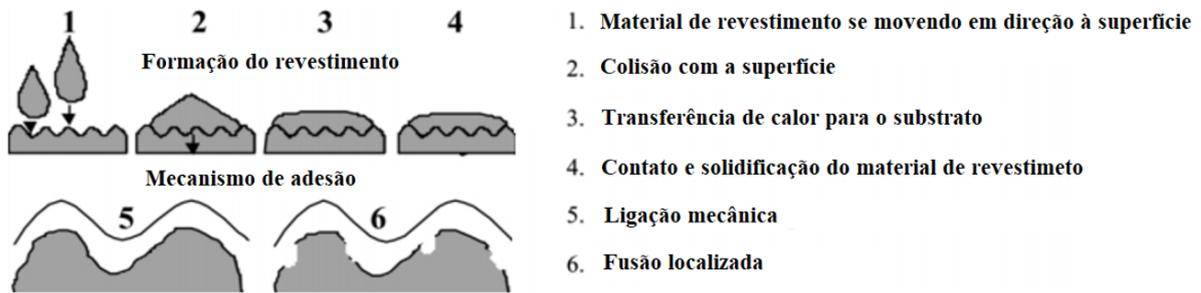
A formação do revestimento aspergido termicamente é ilustrada de forma esquemática na Figura 3. As gotículas atomizadas de material fundido (1) ao colidirem com a superfície previamente preparada<sup>2</sup> do material a ser revestido (2), espalham-se sobre está adquirindo um perfil lamelar (3) popularmente nomeado de ‘panqueca’. O seu espalhamento promove a obtenção de uma grande área de troca de calor com o substrato, a qual promove o rápido resfriamento da lamela promovendo a sua contração. Ao contrair-se, a lamelas ancora-se mecanicamente sobre as asperezas da superfície do substrato (4) aderindo-se sobre este. A projeção de novas gotículas sobre as lamelas já aderidas irão promover a repetição sucessiva destes fenômenos, e o aumento da espessura do revestimento (revestimentos com espessura da ordem de 1 a 2 mm são aplicados por esta técnica). Valores superiores a 2 mm causam o deslocamento do mesmo devido a tensão residual, gerada pela sucessão de solidificações das gotas. Em virtude das características do processo, a união do revestimento ao substrato, e entre as várias camadas do revestimento, dá-se principalmente por união mecânica – adesão e coesão (5), e por ligações físicas. Porém, em determinadas regiões onde o calor transferido for suficiente para fundir localizadamente a superfície do substrato, ocorrerá a formação de união química – microsoldas e difusão (6).

---

<sup>1</sup> O efeito Pinch corresponde à estrição da extremidade do arame (a qual está altamente plástica devido ao aquecimento promovido pelo acoplamento com o arco elétrico) promovida pela força eletromagnética atuante sobre este. Para maiores detalhes sobre este fenômeno, indica-se a leitura da referência Scotti e Ponomarev (2008).

<sup>2</sup> A preparação prévia do substrato consiste na remoção de contaminantes (óxidos, poeira, lubrificante, etc.) e aumento da sua rugosidade. Essa operação é geralmente realizada através de usinagem por jateamento abrasivo (LIMA; TREVISAN, 2002).

Figura 3. Esquema indicando a sequência de formação dos revestimentos aspergidos termicamente.

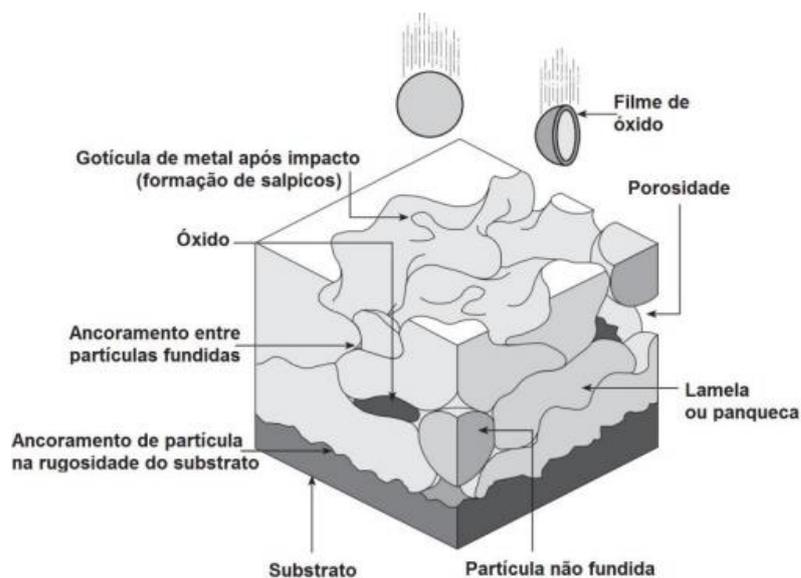


Fonte: KAHRAMAN; GULENÇ, 2002.

### 2.1.3 Morfologia dos revestimentos aspergidos termicamente

Os revestimentos aspergidos termicamente são formados pelos seguintes componentes: poros ou vazios; salpicos ou inclusões; lamelas e óxidos. A morfologia destes, bem como a sua proporção, variam de acordo com o processo de aspersão térmica utilizado, e dos parâmetros de deposição adotados. Uma representação simplificada da morfologia dos revestimentos aspergidos termicamente é ilustrada na Figura 4.

Figura 4. Morfologia usual dos revestimentos aspergidos termicamente.



Fonte: SUCHARSKI, 2016.

É interessante citar que, uma maior densificação do revestimento, promove uma redução do percentual de poros, aumentando a resistência mecânica deste (TUCKER, 1994).

Segundo Newbery e Grant (2006), algumas das falhas mostradas Figura 4 (poros e trincas), são resultado da diferença entre os valores de dilatação térmica, entre o material do revestimento e do substrato.

### 2.1.3.1 Lamelas

As lamelas, de acordo com Paredes *et al.* (2006), surgem da deformação plástica e do resfriamento quando no impacto das gotículas fundidas ou semifundidas sobre o substrato. Na aspersão térmica, de modo geral, a gota do metal se projeta como uma esfera e se espalha na superfície do substrato sob forma de disco, deformando-se mais nas suas extremidades do que no centro. Porém, é sabido que muitos fatores podem influenciar nesse formato, como a preparação da superfície, o ponto de fusão e a composição química da liga (SAFARI; HERMAN, 1977).

A união entre o revestimento e o substrato, conforme dito anteriormente, dá-se através de ligação mecânica, física ou química. Para as interações do tipo físicas, pode ocorrer a ação das forças de Van der Waals. Para isso, a distância entre os materiais em contato deve ser de ordem atômica (aproximadamente de 5 nm), porém, essas forças são relativamente fracas e esse tipo de união torna esse processo de aspersão inviável, dado que qualquer impureza na superfície anularia essa atração (VÁZ, 2013).

A união química ocorre por meio de ligações do tipo metálica, caracterizadas por apresentarem grande força de ligação. Estas ligações resultam da difusão de átomos entre as estruturas cristalinas do revestimento e do substrato, devido à alta temperatura desenvolvida durante o processo. Para que estas ligações ocorram, é necessário que a superfície do substrato e da partícula apresentem baixo percentual de oxidação, pois os óxidos agem como barreiras dificultando a difusão atômica (ARAI, 1994).

Por fim, a união das lamelas ocorre principalmente por ancoramento mecânico sobre as asperidades da superfície do substrato, durante a contração sofrida em virtude do seu acelerado resfriamento. Em virtude da união dos revestimentos aspergidos termicamente ser quase que exclusivamente por adesão ao substrato e coesão entre suas lamelas, uma das principais limitações ao emprego constitui a sua grande tendência ao deslocamento em condições de contato a alta pressão com elemento sólido ou gasoso (LIMA; TREVISAN, 2002)

### 2.1.3.2 Óxidos

As inclusões de óxidos são oriundas da reação do material usado para síntese do revestimento (o qual encontra-se a alta temperatura e, em função disso, extremamente reativo), com o oxigênio do ambiente circundante. Esse contato ocorre durante a fusão do material, e no trajeto entre a pistola de aspersão térmica e o substrato. A exposição do material fundido ao excesso de comburente ou gases oxidantes, presentes nos processos FS, HVOF e ASP; acaba favorecendo a formação desses óxidos (NEWBERY; GRANT, 2006; FAUCHAIS *et al.*, 2001). Ainda, conforme Deshpande, Sampath e Zhang (2006), Sobolev e Guilemany (1998) e Rodriguez *et al.* (2007), as partículas oxidadas e os óxidos formados merecem atenção especial, visto que influenciam muito na qualidade do revestimento depositado e, conseqüentemente, sobre o seu desempenho.

Os efeitos dos óxidos nos componentes são diversos e, quando em excesso, vão desde a redução da resistência ao desgaste e da dureza do revestimento, até a fragilização e comprometimento do ancoramento do material ou coesão entre as lamelas (DAVIS, 2004; DESHPANDE; SAMPATH; ZHANG, 2006). Uma forma de reduzir a formação dos óxidos, de acordo com Newbery e Grant (2006) é o uso de gás de atomização inerte, como o argônio e o hélio, ou do uso de gases redutores, como é o caso do nitrogênio e oxigênio.

### 2.1.3.3 Salpicos

Os salpicos são formados devido a falta de molhabilidade das gotas sobre o substrato. Essas partículas, quando não expulsas, ficam aderidas entre as camadas de lamelas que a circundam. Uma forma de minimizar os salpicos é a utilização dos processos e parâmetros corretos de aspersão térmica de acordo com o material de deposição e o substrato. Gedzevicius e Valiulis (2006) diz que é desejável a redução dos salpicos pois as propriedades e o desempenho do revestimento são influenciados pelos mesmos.

## 2.1.4 Defeitos dos revestimentos aspergidos termicamente

### 2.1.4.1 Microtrincas

As microtrincas são oriundas das tensões residuais trativas produzidas pela restrição à contração térmica das lamelas, promovida pelo material adjacente a estas, no resfriamento durante a sua solidificação. Elas são muito comuns em revestimentos aspergidos, porém, só

são aceitáveis em cerâmicos, em virtude da sua fragilidade e baixo nível de contração (Streeter; Sampson, 2000). Nos metais e compósitos, a deformação térmica é acomodada pelo escoamento plástico do material do revestimento (Lima; Trevisan, 2007). Estes últimos autores afirmam que, microtrincas e um certo grau de porosidade inibem o crescimento de trincas maiores no revestimento, sendo assim considerados benéficos. No entanto, os referidos autores não apresentam resultados que possam comprovar a sua afirmação.

#### 2.1.4.2 Poros

A presença de poros é outra característica das superfícies aspergidas, e sua formação é muito influenciada pelo processo utilizado e também pelos parâmetros adotados durante a deposição. De acordo com Lima e Trevisan (2007), os revestimentos aspergidos termicamente apresentam porosidade máxima de 20%. Algumas técnicas de aspersão térmica permitem o alcance de porosidades de até 2%. A porosidade varia conforme o nível de contaminação do substrato e material de adição; e os parâmetros aplicados durante a deposição (gás de atomização, pressão do gás de atomização, etc.). De acordo com a referência supracitada, existem três tipos de poros: os grosseiros, os finos e os extremamente finos.

Os poros grosseiros, mais recorrentes, são geralmente advindos do preenchimento incompleto dos interstícios entre as lamelas previamente depositadas. Enquanto que, os poros finos, tem a sua formação geralmente ligada ao emprego de partículas porosas de pós como matéria-prima para confecção do revestimento. Os poros extremamente finos, são formados em virtude do contato incompleto entre as lamelas durante a formação do revestimento (LIMA; TREVISAN, 2007).

A formação dos poros reduz a área transversal do revestimento, causando redução das suas propriedades. Como resultado, tem-se uma redução considerável da sua condutividade térmica e elétrica, resistência ao desgaste e à corrosão, e do módulo de elasticidade do revestimento (LIMA; TREVISAN, 2007). Por outro lado, a presença dos poros é benéfica para o incremento do isolamento térmico entre camadas de revestimentos de barreira térmica (*Thermal Barrier Coatings* – TBC), empregados em componentes que operam em altas temperaturas (AYGUN, 2008).

#### 2.1.5 Efeito da morfologia sobre as propriedades e desempenho do revestimento

### 2.1.5.1 Adesão/Coessão

As propriedades físicas e o comportamento mecânico de um revestimento aspergido termicamente dependem de diversos fatores, sendo eles: a aderência entre as lamelas e o substrato; a resistência coesiva entre as lamelas; e a microestrutura das lamelas (BOLLES, 1995). Desse modo, é possível dizer que a aderência entre o revestimento e o substrato e a coessão entre suas lamelas é um fator fundamental sobre as propriedades e desempenho do revestimento aplicado por aspersão térmica.

Lima e Trevisan (2007) explicam que as lamelas ancoram-se mecanicamente à rugosidade do substrato a partir das forças resultantes da contração do material fundido quando o mesmo se solidifica. Assim, em virtude da existência de óxidos e impurezas na superfície do substrato, as lamelas não conseguem formar um contato perfeito sobre a superfície do substrato e do revestimento depositado. De acordo com os referidos autores, a interação física vem das já citadas forças de Van der Waals, que são ligações muito fracas e só ocorrem quando o contato for constante e da ordem de aproximadamente 0,5 nm (condição esta, difícil de alcançar devido à contaminação e oxidação superficial). Ainda segundo os autores citados, as zonas ativas, também conhecidas como regiões de microsoldagem, contém uma área de contato máximo em uma mesma lamela correspondente à cerca de 25% da sua área total. Esta última depende dos materiais utilizados e da transferência de calor provocada pelas gotículas no substrato, e ocorrem sob duas formas distintas: difusão e a reação química entre lamelas, ou entre lamela e substrato.

A difusão ocorre por transferência atômica e formação de soluções sólidas substitucionais entre os átomos das lamelas e substrato. Neste caso, é necessária a existência de lacunas na superfície de ambos. As lacunas na superfície do substrato são geradas pelo efeito de encruamento gerado durante a etapa de preparo da superfície por jateamento abrasivo. Já a formação de tais defeitos pontuais nas lamelas ocorre como resultado da rápida solidificação imposta à estas. A reação química se processa através da formação de compostos intermetálicos e partículas de segunda fase entre os constituintes do revestimento e substrato (LIMA; TREVISAN, 2007).

Não obstante à formação de tais ligações, a resistência mecânica de um revestimento aspergido termicamente é baixa quando compara àquela obtida por outras técnicas de deposição, como é o caso da deposição química e física em fase de vapor e por processos de revestimento soldado (*hardfacing*). O aumento da sua resistência mecânica, com consequências positivas sobre o desempenho em desgaste e corrosão, é alcançado através da

redução do percentual de porosidade e oxidação, que produzirá o aumento da sua adesão/coesão (TAKEMOTO *et al.*, 1994). Isso poderá ser alcançado através da refusão do revestimento aspergido termicamente, processo este de fácil execução (podendo utilizar o mesmo equipamento empregado na sua deposição) e de baixo custo, não onerando o custo global do revestimento.

## 2.2 REFUSÃO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE

Conforme visto acima, o revestimento feito por aspersão térmica pode apresentar uma série de defeitos indesejados como a baixa adesão ao substrato, a formação de poros e a baixa coesão entre as lamelas. Assim, como forma de otimizar o revestimento, melhorando a proteção contra a corrosão e reduzindo o desgaste, sugere-se a prática da refusão. A refusão dos revestimentos tem como objetivo reduzir o percentual de porosidade interna e oxidação dos mesmos, aumentando a sua adesão ao substrato e melhorando as suas propriedades e desempenho. Desse modo, o tratamento de refusão promove a transformação da microestrutura do revestimento, promovendo a união química entre este e o substrato. Do mesmo modo, a rápida solidificação promovida pelo efeito de autoresfriamento promove o refino de grão, e os ciclos térmicos induzidos podem promover a transformação de fases e precipitação de partículas de segunda fase e compostos intermetálicos (PUKASIEWICZ *et al.* 2012).

Apesar dos benefícios, podem surgir alguns problemas provenientes da refusão. A evaporação é um inconveniente que ocorre quando a superfície do líquido formado passa a ter uma temperatura maior que a de evaporação do metal, gerando gás ou vapor, e produzindo poros e respingos. A oxidação é outro problema indesejado, que ocorre nas superfícies e contornos de grãos, é oriundo do emprego de uma vazão inadequada de gás de proteção, e pode comprometer as propriedades do material e acabamento da superfície. Igualmente, as condições de troca térmica impostas podem causar a formação de trincas a quente (trincas de solidificação) (WILL, 2008).

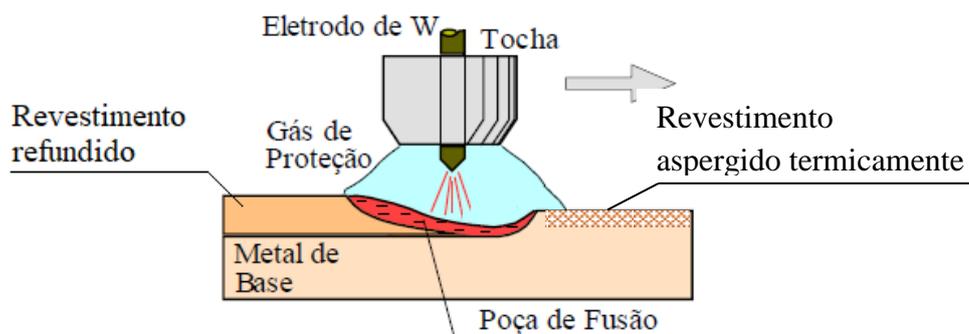
Dentre as diferentes formas de promover a refusão dos revestimentos, pode-se destacar o uso do arco elétrico. Desde que efetuada empregando-se uma atmosfera inerte, e por meio do controle adequado dos parâmetros empregados durante a operação, é possível obter um revestimento com microestrutura e propriedades similares aqueles obtidos por técnicas de cladeamento, PVD e CVD. Neste sentido, o emprego do arco elétrico gerado pelos processos de soldagem a plasma (PAW) e com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa –

TIG (GTAW), constitui uma alternativa interessante. Devido às suas características intrínsecas, estes processos possibilitam a refusão eficiente do revestimento, oportunizando a melhoria das suas propriedades mecânicas e desempenho.

### 2.2.1 Refusão de revestimentos empregando arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (TIG)

A refusão de revestimentos aspergidos termicamente pelo processo TIG é realizada a partir do aquecimento e posterior fusão dos metais envolvidos, ou seja, metal de base (substrato) e metal de adição (revestimento). O aquecimento necessário para realizar esse processo advém da formação de um arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo de tungstênio e a superfície revestida. Nesta técnica, a proteção contra contaminações do eletrodo e da poça de fusão é feita por um gás inerte, normalmente o argônio, ou uma mistura de gases inertes, argônio + hélio. A Figura 5 mostra um esquema ilustrando a operação de refusão de um revestimento aspergido termicamente através do processo TIG.

Figura 5. Esquema representativo da refusão de um revestimento aspergido termicamente pelo processo TIG.



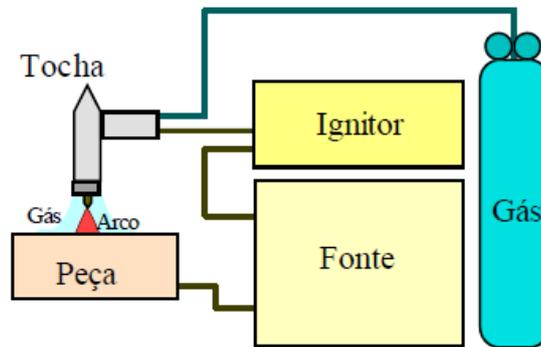
Fonte: Adaptado de MARQUES et al., 2011.

Nesse método de refusão o eletrodo não é consumível e o processo é realizado sem adição de material. Em virtude disso, o este processo permite um maior controle da energia transferida para a peça, fazendo com que a transferência de calor seja constante ao longo de toda superfície à refundir. Outra característica importante é a boa aparência e acabamento dos cordões gerados, o que está diretamente relacionado ao arco elétrico formado, que é estável e suave, exigindo o mínimo de limpeza após a operação (MARQUES et al., 2011).

Para a realização do processo de refusão pela técnica TIG, o equipamento básico consiste de uma fonte de energia elétrica, uma tocha de soldagem própria para o processo

TIG, uma fonte de gás de proteção e um dispositivo para abrir o arco elétrico sem necessitar tocar a peça (ignitor de alta frequência). A Figura 6 mostra um esquema dos elementos básicos que compõem um equipamento TIG.

Figura 6. Representação esquemática dos elementos que constituem um equipamento TIG.

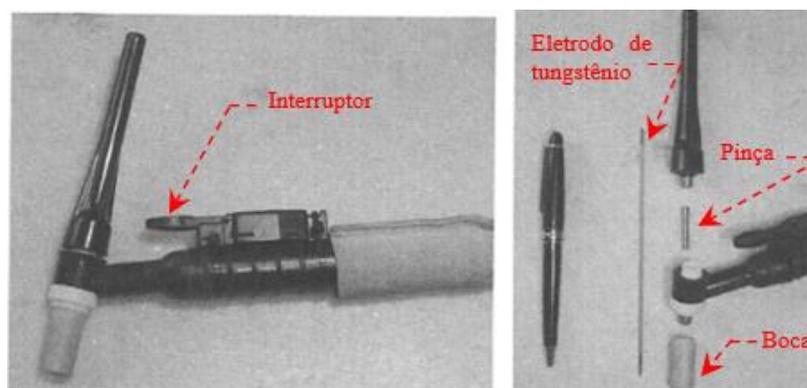


Fonte: MARQUES et al., 2011.

A tocha de soldagem TIG tem como tarefa suportar o eletrodo de tungstênio e alimentar o gás de proteção à poça de fusão. Além do eletrodo de tungstênio, a tocha TIG é composta também por uma pinça, a qual é responsável pela fixação do eletrodo e gerar o contato elétrico; bocal, geralmente cerâmico, para o direcionamento do fluxo de gás; e interruptor para acionar o ignitor de alta frequência e a fonte de soldagem. 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 (MARQUES et al., 2011).

Na Figura 7 é mostrada uma tocha TIG montada e desmontada, com seus componentes interiores previamente descritos.

Figura 7. Tocha para a refusão TIG montada, à esquerda e desmontada, à direita.



Fonte: MARQUES et al., 2011.

As fontes de energia para o processo TIG são transformadora/retificadora ou eletrônicas, do tipo corrente constante<sup>3</sup>, com saída ajustável, que pode operar sob corrente contínua com polaridade direta e indireta (CC<sup>-</sup> e CC<sup>+</sup>, respectivamente), alternada (CA) ou pulsada (CP), selecionadas de acordo com a aplicação desejada (MARQUES et al., 2011).

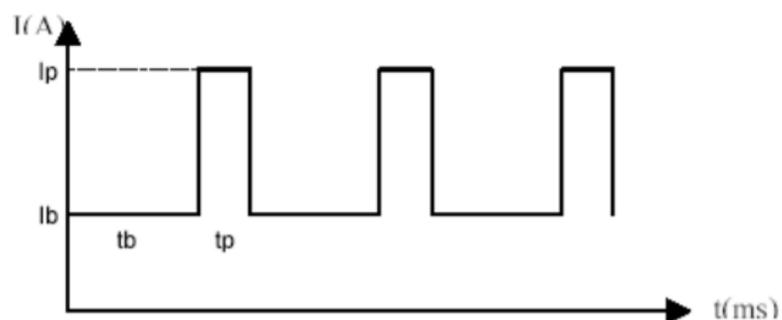
O ignitor de alta frequência é um dispositivo utilizado com a função de gerar um sinal de alta frequência e tensão; com a função de promover a ionização da coluna de gás alimentada entre o eletrodo e a peça. A ionização do gás gera a abertura do arco elétrico, o que ocorre quando o campo elétrico rompe a constante dielétrica do gás (MARQUES et al., 2011).

### 2.2.2 Características do arco elétrico operando em regime de corrente pulsada

A corrente contínua pulsada tem como característica a variação da amplitude da corrente, entre a corrente de base –  $I_b$  (valor mínimo) e a corrente de pulso –  $I_p$  (valor máximo). Há entre essa alternância o tempo de pulso ( $t_p$ ) e o tempo de base ( $t_b$ ) (Figura 8). Os valores de  $I_b$ ,  $I_p$ ,  $t_p$  e  $t_b$  irão determinar a corrente média ( $I_m$ ) calculada através da eq. (1) (WAINER et al., 2013).

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

Figura 8. Parâmetros da corrente contínua pulsada ao longo do tempo.



Fonte: HENKE, 2013.

<sup>3</sup> Caracterizada por apresentar uma tensão em vazio elevada, e uma corrente de curto-circuito baixa. Estas caracterizam-se por apresentar uma pequena variação da corrente com a alteração da distância entre o eletrodo e a peça, garantindo a manutenção de um mesmo aporte térmico.

Nesse tipo de modulação de corrente, a corrente média é constante e durante os pulsos ocorre um maior aquecimento da poça de fusão. Já, durante as bases, ocorre um resfriamento da mesma. Assim, o cordão refundido apresenta um aspecto superficial contínuo, com estrias finas e regularmente espaçadas. Um fator interessante é que na maioria dos casos, a macroestrutura de solidificação se torna mais fina (promove refino de grãos da zona fundida), com frentes periódicas de solidificação, o que reduz a porosidade e a possibilidade de formação de trincas de solidificação (REIS; SCOTTI, 2007).

A utilização de frequências de pulsação baixas (da ordem de 1 a 5 Hz) proporciona um melhor controle da geometria do cordão refundido e atuação metalúrgica na formação e crescimento de grãos da zona fundida. Para frequências elevadas, da ordem de 1 kHz ou maiores, há a possibilidade de melhorar a “rigidez” e a concentração de energia do arco elétrico (HENKE, 2013).

Outros dois fenômenos merecem atenção: o grau de agitação da poça de fusão e o calor aportado. No caso da agitação da poça, a mesma irá realizar a fragmentação das dendritas e o destacamento dos grãos na zona parcialmente fundida. Referente ao fornecimento de calor, há uma redução do calor aportado e o crescimento da taxa de resfriamento. Assim, há uma influência direta no gradiente térmico e na taxa de solidificação gerando uma tendência a um refinamento dos espaçamentos entre os ramos dendríticos (HENKE, 2013).

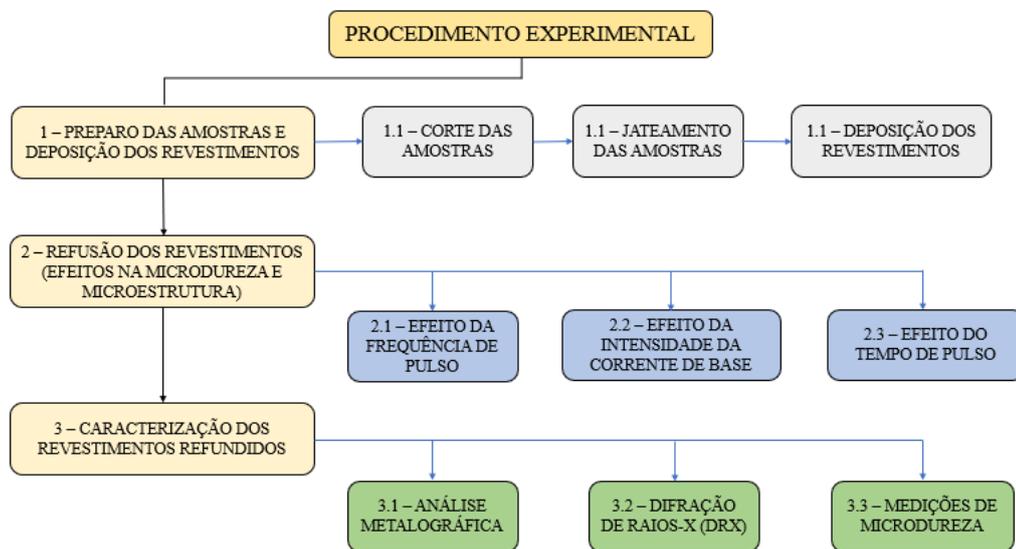
Por fim, segundo Roy (2006) a duração do tempo de pulso tem influência direta na temperatura máxima alcançada sobre a poça fundida, ao mesmo tempo que a frequência do pulso atua na taxa de resfriamento, e desse modo, alterando a temperatura de pré-aquecimento dos passes de refusão subsequentes.

Com base no exposto, é possível concluir sobre o papel da correta seleção dos parâmetros de controle da corrente pulsada para alcançar o melhor desempenho para a superfície refundida.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 9 é apresentado um fluxograma mostrando os procedimentos adotados para realização o TCC. O procedimento experimental do trabalho é segmentado em três fases: (1) preparação das amostras e deposição dos revestimentos; (2) Refusão dos revestimentos aspergidos termicamente; e (3) Caracterização dos revestimentos refundidos. Com base nisso, os tópicos deste capítulo foram divididos nestas três atividades, e são descritos de forma breve na sequência.

Figura 9. Fluxograma indicando as etapas de realização deste trabalho.



Fonte: O AUTOR.

#### 3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E DEPOSIÇÕES DOS REVESTIMENTOS

A matéria-prima empregada para a realização deste trabalho consistiu em barras de aço ABNT 1020 (substrato) e arame de soldagem AWS ER 308L (revestimento), cujas composições químicas são descritas na Tabela 1. Amostras nas dimensões de 10×50×100 mm (espessura × largura × comprimento) foram confeccionadas a partir das barras de aço ABNT 1020. Após corte, as amostras foram submetidas à operação de jateamento abrasivo com o intuito de obter-se nestas a rugosidade necessária ao ancoramento dos revestimentos aspergido termicamente. Para realização do jateamento abrasivo, foi utilizada uma cabine de jateamento da marca CMV modelo 65 9075, adotando-se os parâmetros apresentados na Tabela 2, os quais foram determinados com base naqueles adotados por Pukasiewicz *et al.* (2012).

Tabela 1. Composição química (nominal) do metal de base e do metal de adição empregados na deposição dos revestimentos.

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.

Tabela 2. Parâmetros adotados no jateamento dos corpos de prova a 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) <sup>4</sup>	7,6/9,38
Ângulo de jateamento	90°
Tempo de jateamento	2 min

Fonte: O AUTOR.

Os revestimentos foram aplicados imediatamente após as amostras terem sido jateadas. Para a deposição dos revestimentos, empregou-se uma fonte elétrica marca Eutronic modelo Eutronic Arc Spray 4, e uma pistola de aspersão a arco elétrico da mesma marca (Figura 10).

Os parâmetros que foram empregados durante as deposições são apresentados na Tabela 3. Estes parâmetros foram determinados através de ensaios preliminares. As deposições dos revestimentos foram realizadas pela equipe do Laboratório de Aspersão Térmica e de Soldagens Especiais (LABATS) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Tabela 3. 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)

Fonte: O AUTOR.

<sup>4</sup> 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.

Figura 10. (a) Equipamento de aspersão térmica a arco elétrico; (b) Pistola de aspersão térmica a arco elétrico.



Fonte: O AUTOR.

### 3.2 REFUSÃO A ARCO ELÉTRICO DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS

Os revestimentos depositados foram refundidos utilizando arco elétrico gerado através do processo de soldagem TIG, empregando o aparato mostrado na Figura 11. Estes equipamentos compõem a infraestrutura do Laboratório de Soldagem e Materiais (LASOMET) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da UFSM.

O aparato experimental é constituído por:

- i. Uma fonte de soldagem multiprocesso da marca Lincoln Eletronic, modelo IM467-B dotada de sistema de ignição por alta frequência;
- ii. Um sistema mecanizado de movimentação de tocha de soldagem (tipo tartilope), com três graus de liberdade da marca White Martins, modelo MC 46;

- iii. Uma tocha de soldagem TIG refrigerada a água de ignição por interruptor da marca Vonder; e
- iv. Uma bancada de trabalho com dimensões aproximadas de  $1,2 \times 1,0 \times 1,8$  m (altura  $\times$  largura  $\times$  comprimento).

Figura 11. Equipamentos empregados para realizar a refusão dos revestimentos aspergidos termicamente.



Fonte: O AUTOR.

O trabalho desenvolvido foi dividido em três estudos distintos, visando estudar o efeito: (1) a frequência de pulso; (2) a intensidade da corrente de pico ( $I_p$ ) em relação a corrente de base ( $I_b$ ); e (3) o efeito do tempo da corrente pulso  $I_p$  em relação a corrente de

base  $I_b$ <sup>5</sup>. Os parâmetros adotados em cada um estudo são descritos na Tabela 4. A velocidade de refusão manteve-se fixa em 100 mm/min. Empregou-se um eletrodo de tungstênio com adição 2% de óxido de tório (EWTh-2), com diâmetro de 1,6 mm e ângulo de afiação de 30°. A extensão livre de eletrodo utilizada foi de 3 mm, e a distância entre o eletrodo e a peça usada foi de 3 mm. Por fim, o gás utilizado foi o argônio, alimentado a uma vazão de 10 L/min.

Tabela 4. Parâmetros utilizados nos três estudos realizados.

Estudo 1					
Etapa	Corrente média (A)	Corrente de pico (A)	Corrente de base (%)	Tempo de pulso (%)	Pulsos por segundo
1	110 <sup>6</sup>	147	50	50	1
2	110	147	50	50	5
3	110	147	50	50	10
Estudo 2					
Etapa	Corrente média (A)	Corrente de pico (A)	Corrente de base (%)	Tempo de pulso (%)	Pulsos por segundo
1	110	147	50	50	10
2	110	130	70	50	10
3	110	116	90	50	10
Estudo 3					
Etapa	Corrente média (A)	Corrente de pico (A)	Corrente de base (%)	Tempo de pulso (%)	Pulsos por segundo
1	110	183	50	20	10
2	110	147	50	50	10
3	110	122	50	80	10

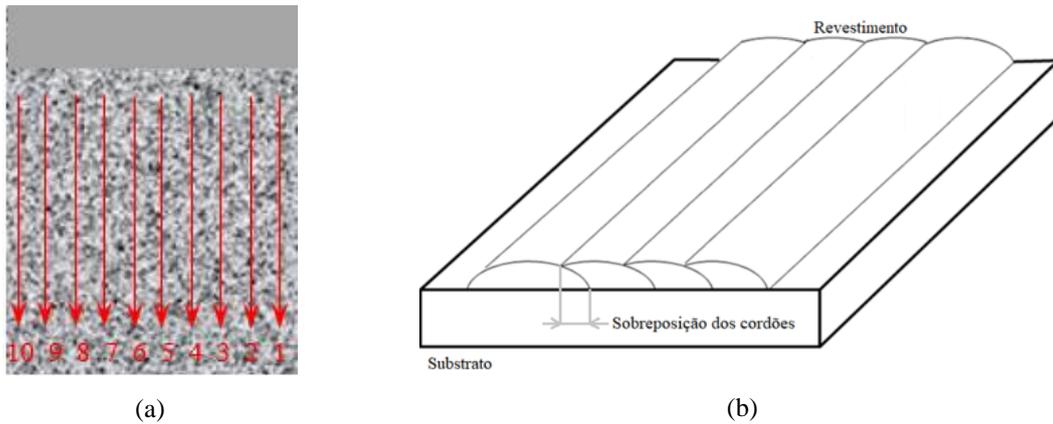
Fonte: O AUTOR.

As refusões foram realizadas no sentido longitudinal das amostras. Ao todo, foram realizados 10 passes, com o primeiro sendo efetuado próximo a extremidade direita da amostra, e o último, junto à extremidade esquerda. Adotou-se sobreposição de 50% entre refusões adjacentes (sempre alinhando o eletrodo junto a margem do cordão previamente refundido) (Figura 12).

<sup>5</sup> Na fonte de soldagem utilizada, a intensidade de  $I_b$  é determinada em termos do percentual da  $I_p$ , o tempo de pulso é determinada em termos do percentual de  $I_p$ , e a frequência de pulso é determinada pelo número de pulsos por segundo.

<sup>6</sup> A corrente média utilizada em todos os ensaios foi de 110 A. Este valor foi definido a partir de ensaios realizados previamente que demonstraram que este valor permite a completa refusão do revestimento e um baixo percentual de diluição deste com o substrato.

Figura 12. (a) Trajetória de refusão adotada, e (b) indicação da sobreposição entre os cordões.



Fonte: O AUTOR.

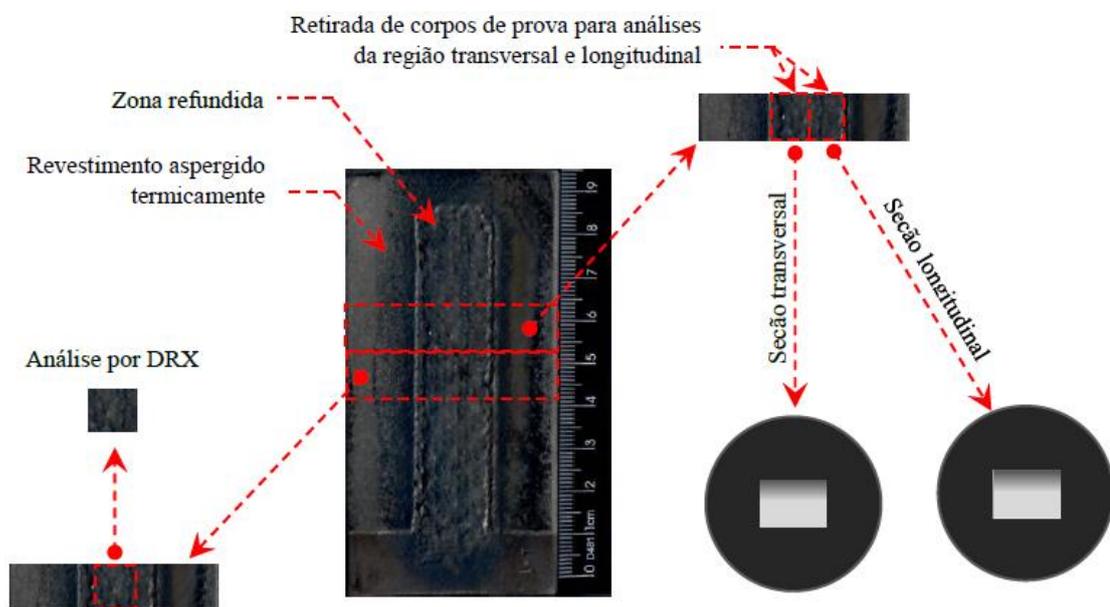
### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PROCESSADO

Após a operação de refusão, foram preparados corpos de prova a partir das amostras refundidas para realização das caracterizações metalográficas, de microdureza e de difração de raios X (Figura 13). As amostras refundidas foram seccionadas na sua região mediana utilizando uma cortadeira metalografica marca Struers-Panambra modelo Mesoton, obtendo-se dois corpos de prova, conforme indicação da Figura 13. Estes corpos de prova foram cortados através de uma cortadeira de precisão da marca Buehler modelo Isomet 1000, de modo a obter-se corpos de provas de menor tamanho (vide Figura 13). Dois destes corpos de prova foram embutidos, empregando resina de embutimento a quente tipo Baquelite, em uma prensa embutidora metalográfica de amostras da marca Risitec modelo RS-30; sendo um destes embutido para análise da seção transversal e outra da seção longitudinal. Estas análises consistiram na avaliação metalográfica do material refundido, com o objetivo de avaliar as suas características microestruturais; e na avaliação da microdureza Vickers. Para efetuar a primeira caracterização, utilizou-se um microscópio ótico da marca Olympus modelo BX60M; e para a segunda, um microdurômetro da marca Shimadzu modelo HMU-2, empregando-se uma carga de 300 gf, com tempo de aplicação de carga de 15 s. Antes de efetuar estas caracterizações, após o embutimento das amostras, estas foram preparadas por meio de operações de lixamento (utilizando-se lixas de carboneto de silício de 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh) e polimento (utilizando-se um disco de feltro e suspensão abrasiva de alumina com partículas de 1  $\mu\text{m}$ ), ambas as operações realizadas utilizando-se uma lixadeira politriz da marca Struers-Panambra modelo DP-10. Para revelação da microestrutura,

empregou-se o reativo Nital 5% (5ml de ácido nítrico + 95ml de Álcool Etilico). Todas estas etapas de corte e preparo metalográfico dos corpos de prova foram realizadas utilizando a infraestrutura do LASOMET e do Laboratório de Metalurgia Física do DEM da UFSM.

O outro corpo de prova foi destinado à caracterização das fases metalúrgicas presentes na superfície refundida, a qual foi realizada usando um difratômetro marca Shimadzu modelo XRD 7000, pertencente ao Laboratório de Ótica de Raios-X e Instrumentação (LORXI) do Departamento de Física da Universidade Federal do Paraná.

Figura 13. 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.

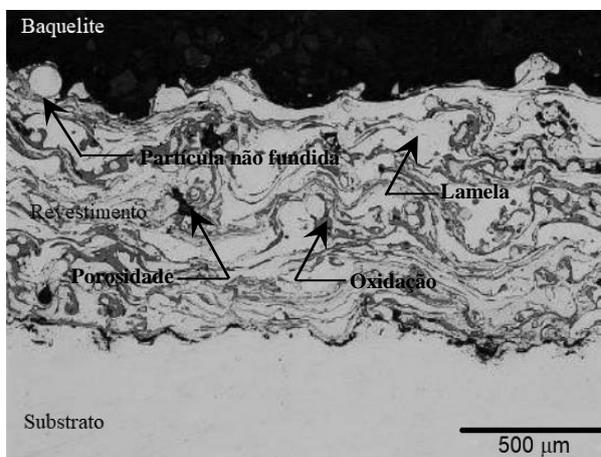
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS TERMICAMENTE

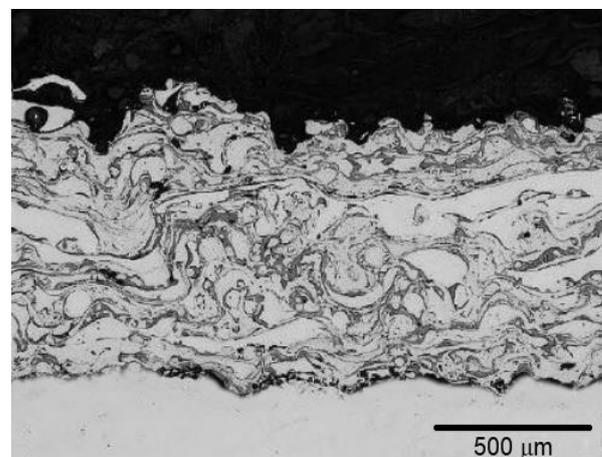
A morfologia da seção transversal e longitudinal do revestimento no estado como depositado, é mostrada nas Figura 14a e Figura 14b, respetivamente. É importante salientar que não foi empregado qualquer tipo de reagente químico metalográfico para revelação das microestruturas ilustradas na Figura 14, sendo esta típica dos revestimentos depositados por aspersão térmica, conforme ilustrado e discutido anteriormente no tópico 2.1.3. Analisando a Figura 14 observa-se que o revestimento aspergido apresenta as mesmas características tanto na seção transversal quanto na longitudinal, sendo constituído por lamelas (panquecas), óxidos, poros e partículas não fundidas (salpicos). Estes microconstituintes são identificados na Figura 14 da seguinte forma:

- Lamelas: partículas alongadas de coloração mais clara, paralelas à superfície do substrato;
- Óxidos: contornos interlamelares (ao entorno das lamelas) que apresentam coloração acinzentada;
- Poros: pontos com coloração preta, localizados entre as lamelas e filmes de óxidos, e na interface entre o substrato e o revestimento;
- Partículas não fundidas: partículas de simetria próxima à esférica, apresentando a mesma coloração das lamelas.

Figura 14. Microestrutura da seção transversal (a) e longitudinal (b) do revestimento aspergido termicamente na condição como depositados.



(a)

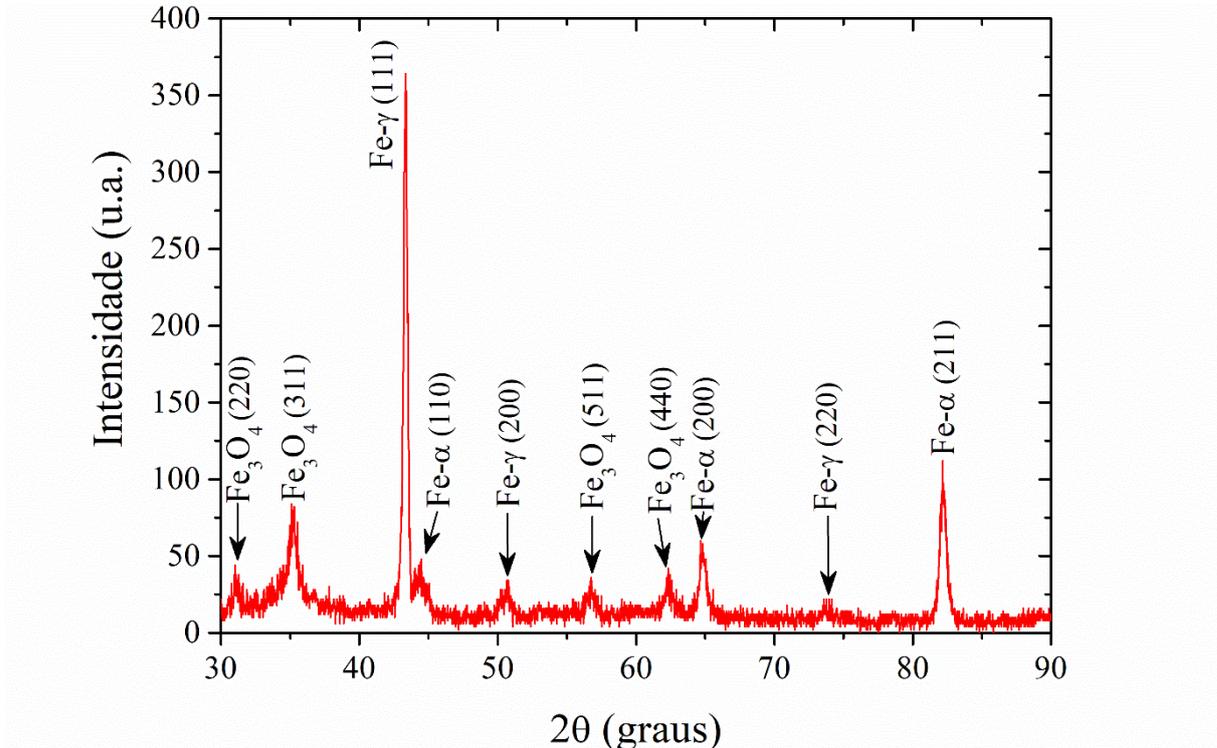


(b)

Fonte: O AUTOR.

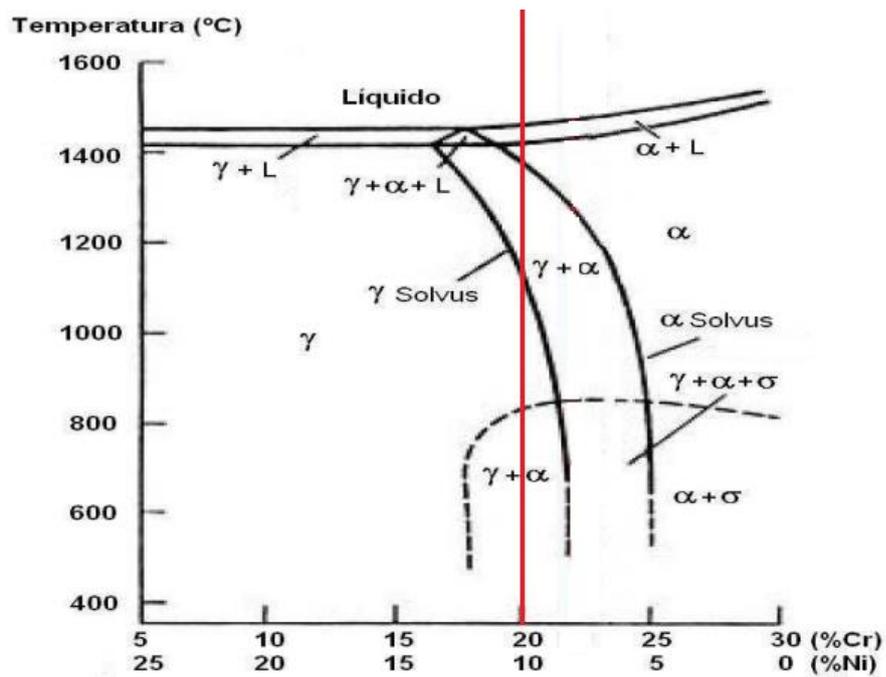
O padrão de difração de raios X do revestimento aspergido termicamente no estado como depositado é apresentado na Figura 15. Esta caracterização foi realizada sobre a superfície do revestimento. Com base no espectro de DRX obtido, pode-se afirmar que o revestimento como depositado é constituído pelas fases metálicas ferrita (ferro  $\alpha$ ) e austenita (ferro  $\gamma$ ), e pela fase cerâmica de óxido de ferro tipo magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). A fase  $\gamma$  é esperada, pois o arame de soldagem empregado na deposição do revestimento (AWS ER 308LSi) corresponde à um aço inoxidável de estrutura austenítica. No que se refere à fase  $\alpha$ , por outro lado, embora sua ocorrência não seja esperada, esta já foi relatada anteriormente por outros autores em revestimentos de aço inoxidável austenítico (AISI 316 L) depositados pelos processos de aspersão térmica a frio (processo *Cold Spray*) e oxicombustível de alta velocidade (HVOF) sobre substrato de aço carbono (ADACHI; UEDA, 2018 e KUTSCHMANN *et al.*, 2019, respectivamente). Embora estes autores não tenham justificado a ocorrência da fase  $\alpha$  nos seus resultados, supõe-se aqui que sua formação está relacionada ao fato da estrutura no estado como depositada ser equivalente à estrutura “bruta de fusão”. Neste sentido, analisando o diagrama pseudo-binário do sistema Fe-Cr-Ni (Figura 18), para uma liga com teores de 10% de níquel e 20% de cromo (composição química do consumível adotado – Tabela 1) é esperada a formação de uma estrutura bifásica composta por  $\gamma$  e  $\alpha$  durante a sua solidificação (vide linha vertical vermelha). Segundo Folkhard (1988) a transformação do ferro  $\alpha$  em  $\gamma$  ocorre somente caso a liga seja mantida por tempo suficiente na faixa de temperaturas nas quais a cinética de transformação é mais alta. Este não constitui o caso dos revestimentos aspergidos termicamente, pois devido às características inerentes ao processo de aspersão, o resfriamento do revestimento ocorre sob uma elevada taxa e, assim, resulta na retenção de  $\alpha$  em temperatura ambiente. Analisando o diagrama de Schaeffler para a composição química de 10% de Ni e 20% de Cr (vide Figura 17), verifica-se que a microestrutura de solidificação para esta composição é composta por cerca de 15% de ferrita e 85% de austenita, justificando a ocorrência dos picos no espectro de DRX. A ocorrência dos picos referentes a fase  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , por sua vez, justifica-se em função deste formar-se devido à reação da gotícula metálica com o gás atomizador (ar comprimido) durante a sua projeção em direção ao substrato. Tendo em vista que o ar apresenta um percentual médio de oxigênio de 21% e de 78% de nitrogênio, seria esperada a formação de fases de nitreto de ferro na reação supracitada. Porém, isso não ocorre em decorrência da maior entalpia para formação da fase  $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$  (+12,6 kJ/mol) quando comparada à de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (-744,8 kJ/mol) (ELDER *et al.*, 1993).

Figura 15. Padrão de difração de raios X do revestimento aspergidos termicamente na condição como depositado.



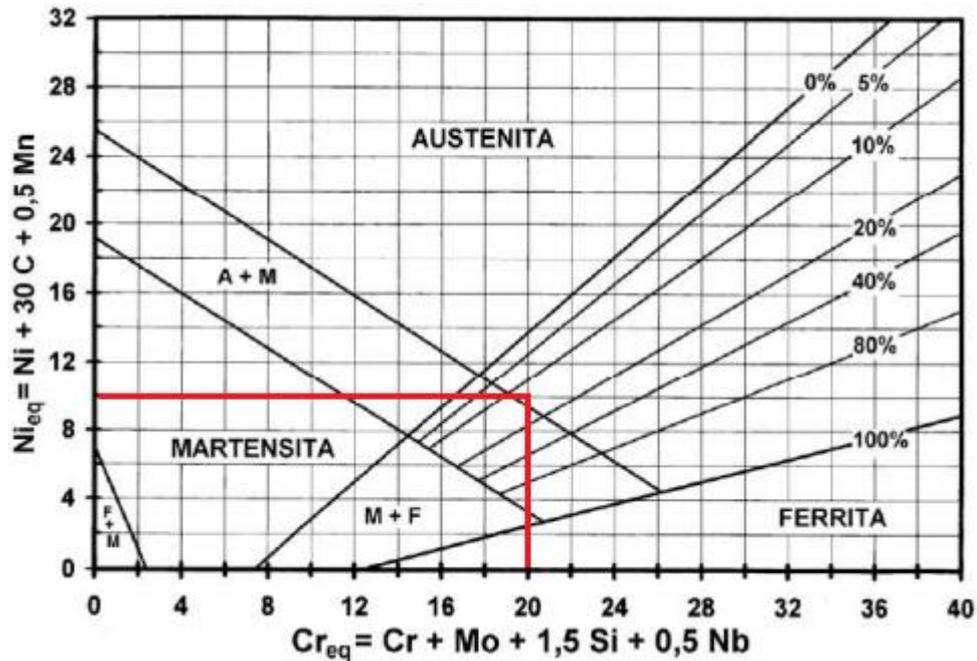
Fonte: O AUTOR.

Figura 16. 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 17. Diagrama de Schaeffler (indicada em vermelho os teores de Ni e Cr equivalente do consumível adotado neste trabalho).



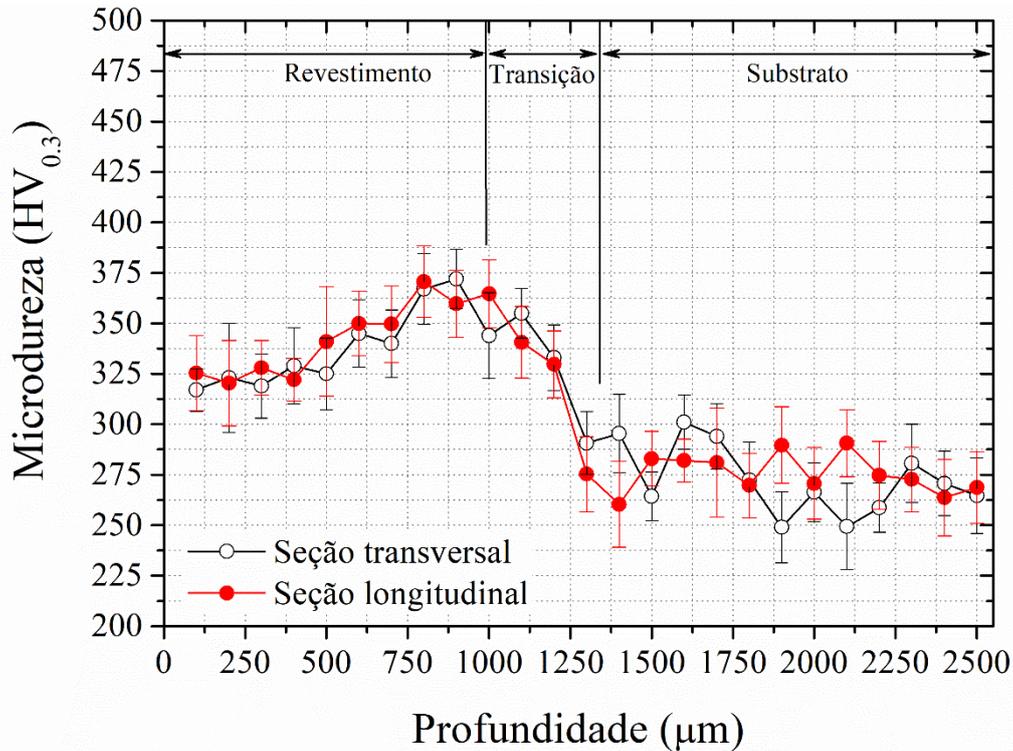
Fonte: Adaptado de FOLKHARD (1988).

A dureza medida na seção transversal e longitudinal do revestimento no estado como depositado é ilustrada na Figura 18. A análise desta permite observar que os valores de dureza ao longo da seção transversal dos revestimentos são similares em ambas as seções de leitura. Nota-se, também, que os valores de dureza crescem da região mais externa do revestimento em direção à região de ligação ao substrato. Segundo Lima e Trevisan (2007), esse comportamento é creditado à maior adesão das lamelas ao substrato (maior dureza próxima a zona de transição), e menor coesão entre as lamelas quanto mais distante estas estiverem do substrato (menor dureza junto a superfície do revestimento). 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).

A formação da região de transição, segundo Paredes *et al.* (2019), deve-se à formação de uma faixa de diluição/difusão entre o material do revestimento (de adição) e o do substrato (de base). Lima e Trevisan (2007), ressalta que o efeito da ondulação da superfície do substrato, resultante da etapa de jateamento abrasivo realizada pré-deposição, pode influir sobre a dimensão da região de transição. Como pode ser observado na escala de distância no

eixo 'x' da Figura 18, a extensão da região de transição é da ordem de 250  $\mu\text{m}$ , ao passo que, a espessura do revestimento é de aproximadamente 1000  $\mu\text{m}$ .

Figura 18. Perfil de dureza na seção transversal e longitudinal dos revestimentos aspergidos termicamente na condição como depositados.



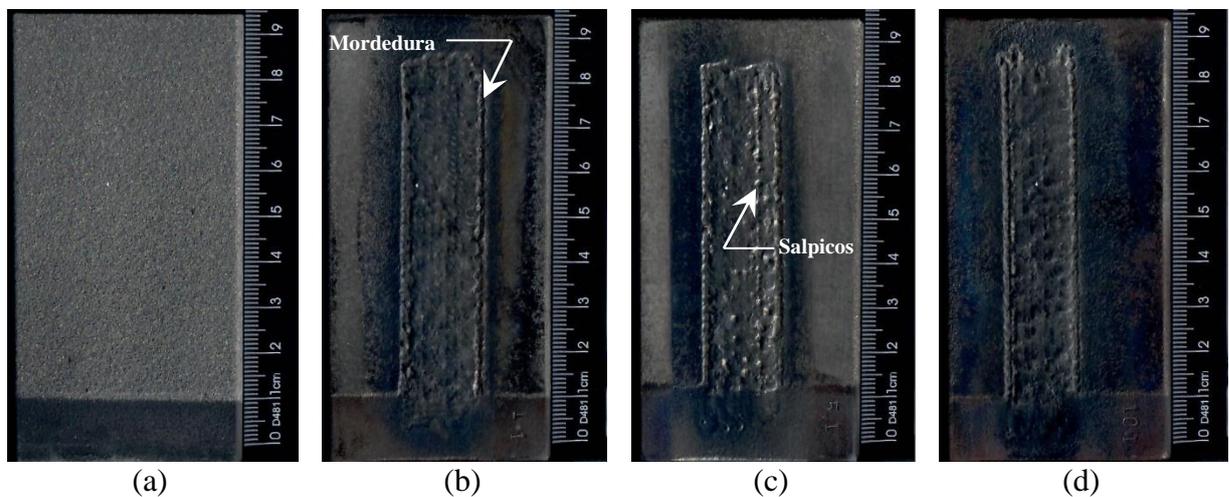
Fonte: O AUTOR.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS REFUNDIDOS VARIANDO-SE A FREQUÊNCIA DE PULSO – Estudo 1

A Figura 19 ilustra o aspecto visual dos revestimentos (a) como aspergido e refundidos empregando-se corrente pulsada com frequência entre pulsos de (b) 1 pulso/s, (c) 5 pulsos/s e (d) 10 pulsos/s. A partir da Figura 19a é possível verificar a uniformidade do revestimento aspergido termicamente ao longo de toda a superfície da amostra, não sendo identificada a ocorrência de fissuras. Das Figura 19b-d nota-se que a largura da zona refundida diminui com o aumento da frequência entre pulsos, mantendo-se contínuos o número de passes (10 passes) e o percentual de sobreposição de (50%). Utilizando um paquímetro digital Mitutoyo Absolute (com resolução de 0,01 mm) foram medidas as dimensões de 17.7, 16.3 e 15.1 mm nos cordões refundidos empregando-se frequência entre

pulsos de 1, 5 e 10 pulsos/s, respectivamente. Esse comportamento pode ser justificado pela menor energia transferida à poça de fusão com o aumento do número de pulsos por ciclo. Também, nota-se um aspecto azulado ao entorno do revestimento refundido, resultante da oxidação sofrida pelo material durante o seu resfriamento a partir da temperatura de refusão. Conforme reportado na literatura (SILVA; MEI, 2010), esse aspecto azulado ocorre nos aços carbono durante o seu revenimento em temperaturas da ordem de 300 °C. Dessa forma, acredita-se que, em virtude dos passes de refusão serem feitos um na sequência do outro, o corpo de prova tenha se mantido aquecido em temperaturas da ordem de 300 °C, o que causou o aspecto azulado mencionado. Por fim, é possível identificar também a ocorrência de defeitos intrínsecos do tipo “mordedura” e salpicos. Segundo Silva (2014), a ocorrência da “mordedura” é justificada pelo calor excessivo da junta, e os salpicos pela contaminação do consumível (oxidação, umidade, resíduos, etc., presentes no interior do próprio revestimento aspergido).

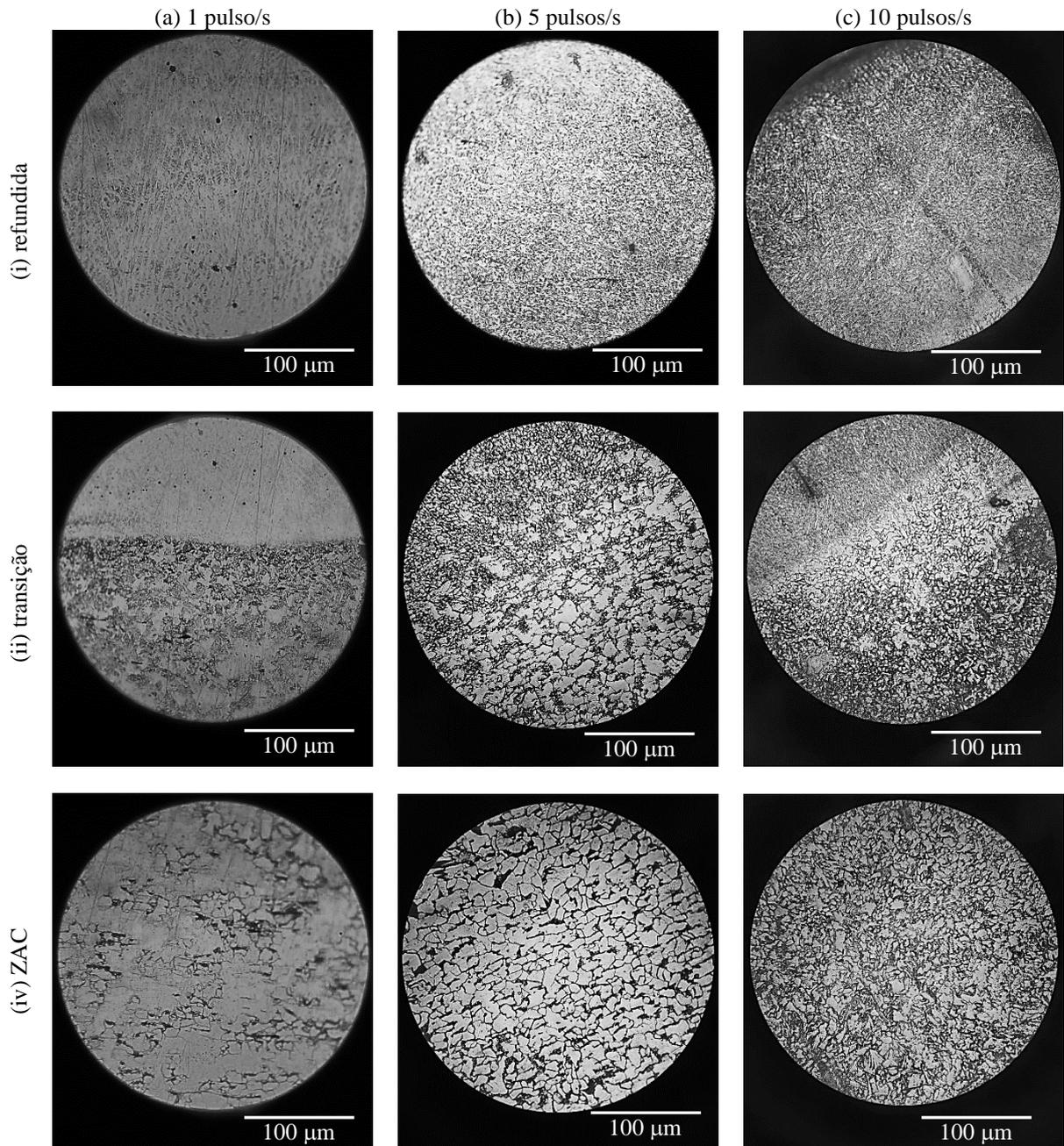
Figura 19. Aspecto visual dos revestimentos no estado (a) como depositado, e refundidos empregando-se corrente pulsada com frequências entre pulsos de (b) 1 pulso/s, (c) 5 pulsos/s e (d) 10 pulsos/s



Fonte: O AUTOR.

Na Figura 20 é apresentada a micrografia da seção transversal dos revestimentos refundidos empregando-se corrente pulsada com frequências entre pulsos de (a) 1 pulso/s, (b) 5 pulsos/s e (c) 10 pulsos/s, mostrando as regiões (i) refundida, (ii) de transição, e (iii) zona afetada pelo calor (ZAC).

Figura 20. Microestrutura da seção transversal dos revestimentos refundidos empregando-se corrente pulsada com frequências entre pulsos de (a) 1 pulso/s, (b) 5 pulsos/s e (c) 10 pulsos/s, mostrando as regiões (i) refundida, (ii) de transição, (iii) zona afetada pelo calor, e (iv) metal de base.



Fonte: O AUTOR.

Através da mesma é possível identificar que a microestrutura do revestimento refundido (zona fundida – ZF) é do tipo dendrítica. Embora não seja visível nas imagens apresentadas na Figura 20, a orientação de crescimento da estrutura dendrítica ocorre no sentido de deslocamento da tocha. Na linha denominada “(ii) transição” da Figura 20, 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 conjunto da amostra e porta-amostra (este último apresentando grande volume conforme visto anteriormente na Figura 11).

Na terceira linha da Figura 20 é possível identificar a ocorrência de uma zona afetada pelo calor. Observa-se que tanto a microestrutura do revestimento quanto da ZAC apresenta tamanho de grão decrescente com o acréscimo da frequência de pulsos dentro do intervalo avaliado. Esse resultado reflete o efeito do ciclo térmico de soldagem sobre a microestrutura da região refundida e da região adjacente à esta, demonstrando que os valores de temperatura atingida nas adjacências da linha de fusão são superiores ao valor da temperatura crítica do material do substrato, promovendo a sua recristalização. As maiores frequências de pulsação geram um maior aporte de calor, o qual diminui a taxa de resfriamento do sistema promovendo o crescimento dos grãos na ZAC.

Também é possível identificar através da Figura 20 que os microconstituintes da microestrutura granular da ZAC correspondem aos grãos de Ferrita proeutetóide (fase clara) e grãos de Perlita (fase escura). Essa corresponde à microestrutura típica do metal de base empregado.

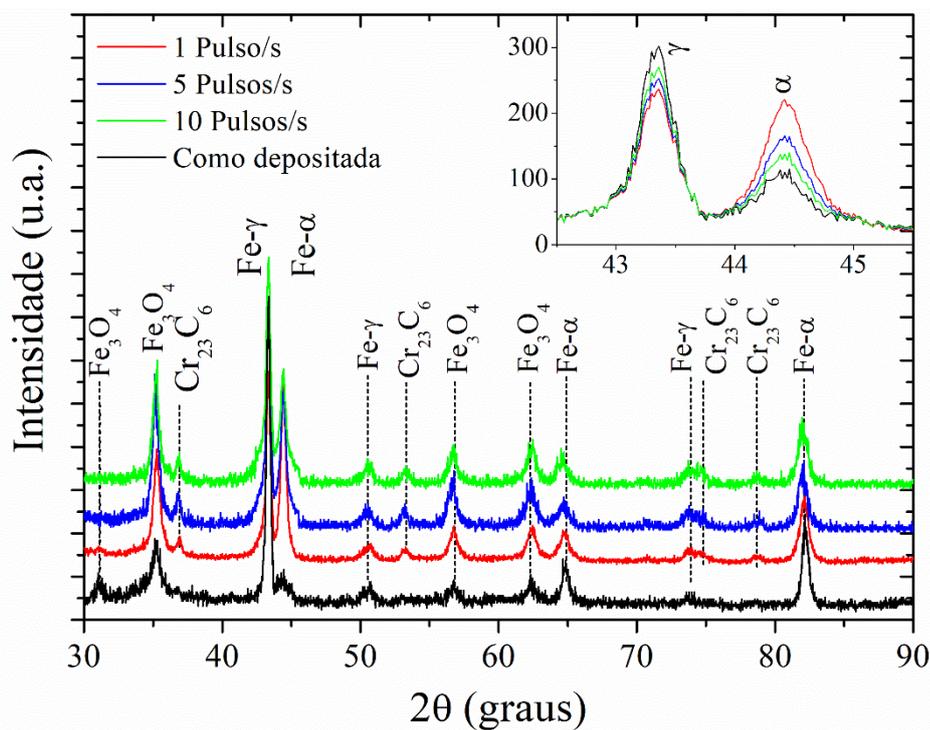
Embora não seja possível identificar nas micrografias apresentadas na Figura 20 a existência de uma camada de óxidos sobre a superfície dos revestimentos refundidos, esta é evidenciada pelos dados de DRX apresentados na sequência. Essa camada ocorre em virtude da flotação dos óxidos durante a refusão. Conforme reportado por 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.

Tendo em vista que não foram observadas variações microestruturais entre as seções transversal e longitudinal dos cordões fundidos, estes últimos não serão aqui apresentados no intuito de encurtar o tamanho do documento.

O padrão de DRX dos revestimentos refundidos empregando-se corrente pulsada com variação da frequência entre pulsos é apresentado na Figura 21. A título de comparação, o padrão de DRX do revestimento aspergido termicamente na condição como depositado (previamente apresentado na Figura 15) também foi introduzido na Figura 21. Comparando-se os espectros da condição como depositado com aqueles das amostras refundidas, é possível

identificar a ocorrência adicional de picos referentes à fase carboneto de cromo tipo  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , além dos picos das fases  $\text{Fe-}\alpha$ ,  $\text{Fe-}\gamma$  e  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . A formação da fase  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  ocorre, segundo Lippold e Damian (2005), durante o processamento dos aços inoxidáveis em temperaturas da ordem ou superiores a  $500\text{ }^\circ\text{C}$ . Os autores citados também afirmam que esta fase apresenta cerca de 95% de cromo em peso (wt.), e que sua formação pode causar prejuízo à resistência à corrosão da superfície refundida. Conforme sabido, para o aço manter a sua inoxidabilidade, é necessário a presença de 11% wt. de cromo em solução sólida. Como a precipitação de carbonetos de cromo consome parte do conteúdo de cromo em solução sólida no aço, a intensa formação destes compostos pode consumir demasiado conteúdo deste elemento; permanecendo teores em solução abaixo do mínimo, o que causa prejuízo à sua resistência à corrosão.

Figura 21. Padrão de difração de raios X dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação da frequência entre pulsos.



Fonte: O AUTOR.

A análise da Figura 21 também permite observar que ocorre uma redução do pico de maior intensidade da fase  $\text{Fe-}\gamma$ , e aumento do pico de maior intensidade da fase  $\text{Fe-}\alpha$  com a redução na frequência entre pulsos. As diferenças de intensidade entre picos de DRX para materiais multifásicos estão relacionadas com a quantidade presente de cada uma destas fases

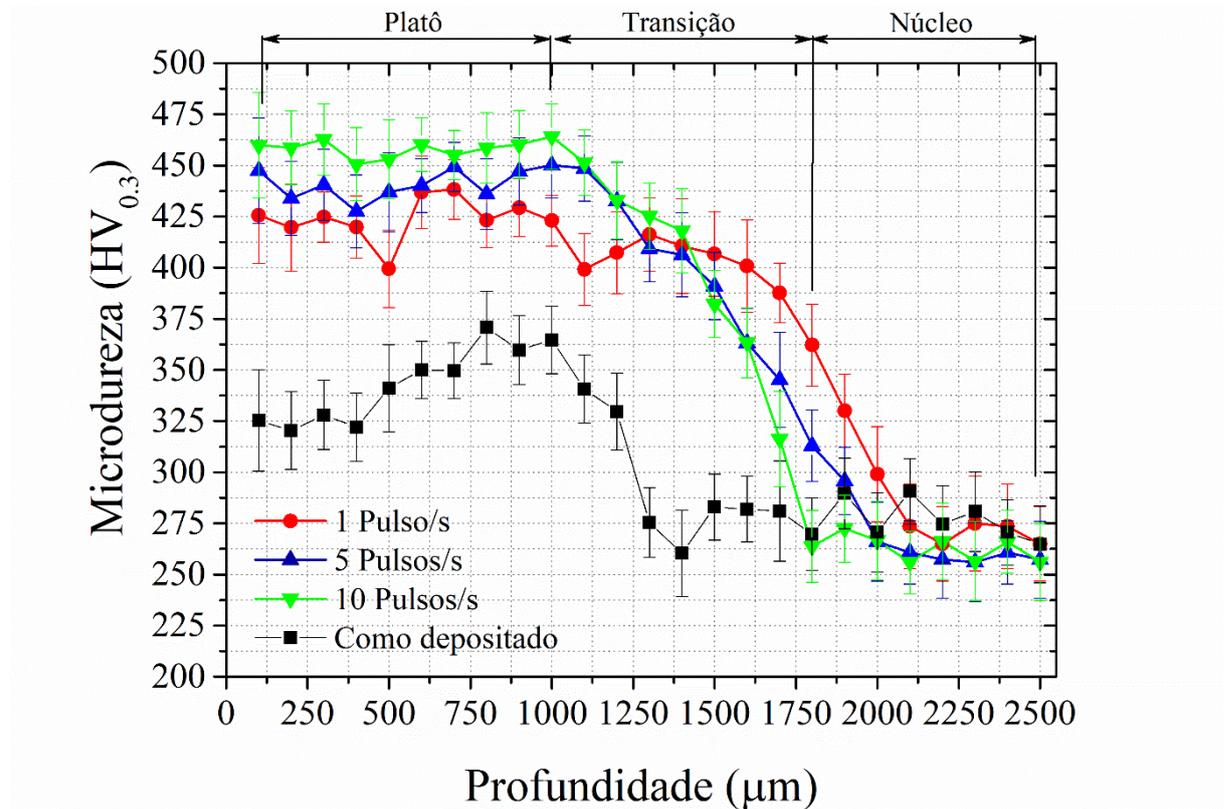
na amostra (GUINIER, 1952). Assim, o padrão indicado é justificado pelo provável aumento da diluição do revestimento (majoritariamente constituído pela fase  $\gamma$ ) ao substrato (majoritariamente constituído por  $\alpha$ ), a qual é tanto maior quanto menor o número de pulsos.

De acordo com argumentação apresentada anteriormente, o emprego de uma baixa frequência entre pulsos promove a transferência de uma maior quantidade de calor à poça de fusão, o que causa o acréscimo na diluição. Por fim, a manutenção dos picos da fase  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  é justificada em função destes óxidos sofrerem flotação durante a refusão, e formarem uma camada contínua sobre a superfície refundida. Conforme discutido na seção 2.1.3, o revestimento como aspergido apresenta óxidos interlamelares. Durante a refusão, em virtude da sua menor densidade, estes óxidos sobrenadam ao banho de metal fundido, formando um filme superficial contínuo durante a solidificação. É importante esclarecer que as análises de DRX foram realizadas sobre a superfície como refundida, sem realização de qualquer operação de decapagem.

Os perfis de dureza Vickers medidos na seção transversal dos revestimentos refundidos empregando-se corrente pulsada com variação da frequência entre pulsos é apresentado na Figura 22. A título de comparação, os perfis de dureza do revestimento aspergido termicamente na condição como depositado (previamente apresentado na Figura 18) também é apresentado. A análise dos perfis de dureza dos revestimentos refundidos permite observar a ocorrência de um platô de dureza superficial, com posterior transição suave dos valores medidos a partir deste em direção ao substrato, até atingir a dureza média do núcleo (vide indicação destas partes – platô, transição e núcleo – feita exclusivamente para a condição 10 pulsos/s de modo a não poluir visualmente a imagem). A comparação entre os perfis de dureza do revestimento como depositado com aqueles refundidos mostra que estes apresentam uma maior dureza superficial e maior profundidade de endurecimento. A maior dureza superficial possivelmente está relacionada à dois fatores: efeito de super-resfriamento da poça de fusão e tensões residuais geradas durante o seu resfriamento. Segundo Garcia (2001) o super-resfriamento promove uma intensificação da taxa de nucleação e do crescimento dos cristais durante a solidificação, promovendo a formação de uma microestrutura de solidificação com maior grau de refinamento (neste trabalho, acredita-se que as condições de super-resfriamento tenham sido estabelecidas pelo calor dissipado através substrato e porta-amostra). Por outro lado, conforme discutido por Marques *et al.* (2011), tensões residuais trativas são geradas durante a solidificação da poça de fusão em decorrência das restrições mecânicas impostas pela região não fundida sobre a região fundida. Estas

tensões residuais dificultam a movimentação das discordâncias, aumentando a resistência mecânica do material.

Figura 22. Perfil de microdureza na seção transversal dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação da frequência entre pulsos.



Fonte: O AUTOR.

Também, nota-se que a partir da Figura 22 que a profundidade de endurecimento decresce com o aumento da frequência de pulso, confirmando a menor diluição entre revestimento e substrato, conforme previamente discutido. Profundidades de diluição da ordem de 800, 700 e 500 μm podem ser estimadas a partir dos perfis de dureza das amostras refundidas utilizando a frequência de 1, 5 e 10 pulsos/s, respectivamente. Além disso, pode-se verificar uma queda suave dos valores de dureza a partir do platô superficial em direção ao substrato. Esse formato de perfil de dureza garante a manutenção de um comportamento em deformação, sob solicitação mecânica/térmica, similar entre o revestimento e o substrato; evitando o deslocamento do revestimento (PINEDO; MAGNABOSCO, 2015).

Ainda é possível identificar através da análise da Figura 22, que a dureza do platô superficial do revestimento refundido, em média, é maior quando utilizadas maiores frequências de pulso. Supõe-se que esse resultado se deve ao refinamento de grão promovido

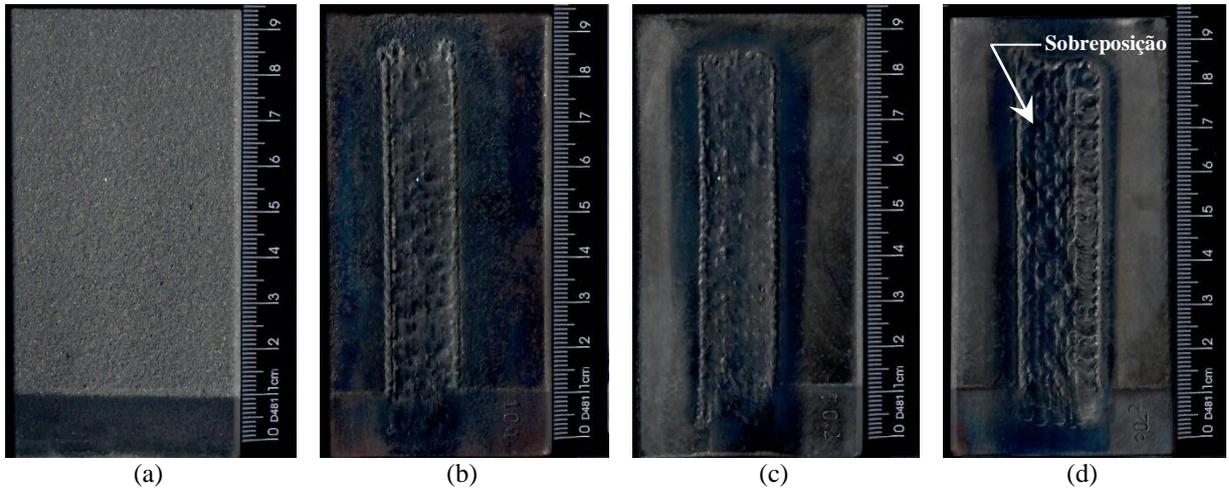
tanto pelo efeito do super-refriamento ocorrido durante o período de corrente de base, quanto à agitação da poça de fusão promovida pela pulsação da corrente, a qual promove o refino da microestrutura de solidificação (REIS; SCOTTI, 2007).

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS REFUNDIDOS VARIANDO-SE A INTENSIDADE DA CORRENTE DE BASE – Estudo 2

A Figura 23 ilustra o aspecto visual dos revestimentos (a) como aspergido e refundidos empregando-se corrente pulsada com intensidade de corrente de base ( $I_b$ ) de (b) 50%, (c) 70% e (d) 90% da corrente de pico ( $I_p$ ). A comparação entre as Figura 23b-d mostra que a largura da zona fundida aumenta com o acréscimo da intensidade de  $I_b$ . Valores da ordem de 151, 163 e 179 mm são obtidos empregando-se os percentuais de  $I_b$  equivalentes a 50, 70 e 90% de  $I_p$ . Tendo em vista que no regime de corrente pulsada, durante o período de  $I_p$  ocorre maior aquecimento da poça de fusão, e durante os períodos de  $I_b$  supostamente seu resfriamento; o acréscimo no valor de  $I_b$  promove a manutenção de temperaturas mais elevadas na poça de fusão, favorecendo a formação de cordões refundidos de maior largura. Ademais, verifica-se a ocorrência da oxidação azul, fenômeno já observado nos resultados apresentados na Figura 19, sendo a sua formação creditada aos mesmos fatores anteriormente relatados. Adicionalmente, verifica-se igualmente a ocorrência de defeitos intrínsecos do tipo “mordedura” e salpicos (também observados na Figura 19), e do defeito geométrico do tipo sobreposição identificado na Figura 23d (marcas no sentido longitudinal dos cordões refundidos, ao entorno das margens de cada passe realizado). De acordo com Silva (2014), como uma das razões para a ocorrência da sobreposição, constitui o emprego de correntes demasiadamente elevadas. Dessa forma, a ocorrência deste defeito para a condição de refusão empregando um valor de  $I_b$  equivalente a 90% de  $I_p$ , deve-se ao elevado aporte térmico fornecido para a amostra nesta condição.

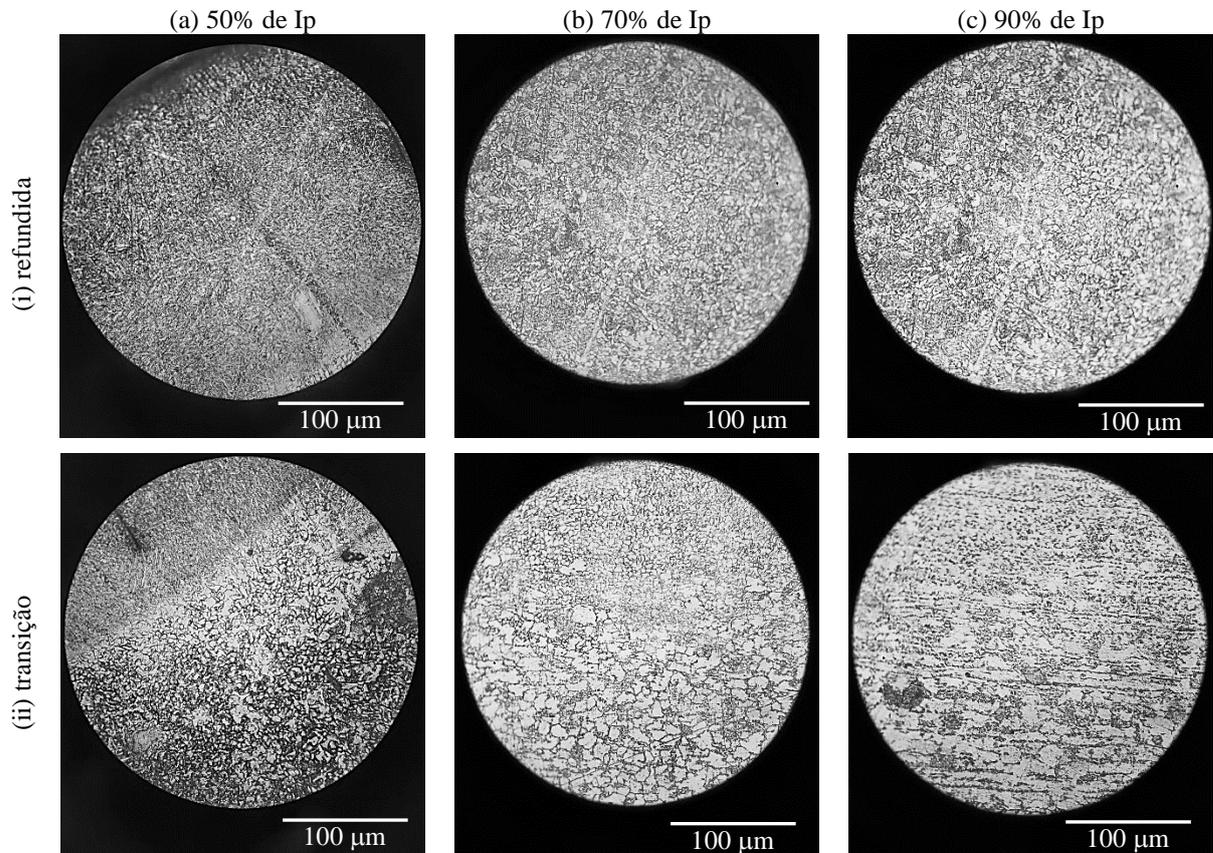
Na Figura 24 é apresentada a micrografia da seção transversal dos revestimentos refundidos usando-se corrente pulsada com  $I_b$  de (a) 50, (b) 70 e (c) 90% da  $I_p$ , mostrando as regiões (i) ZF, (ii) de transição e (iii) ZAC. Mantendo o padrão apresentado na Figura 20, a microestrutura da ZF é constituída por dendritas formadas por crescimento epitaxial a partir da estrutura granular do substrato; e a ZAC apresenta microestrutura perlítica do tipo pró-eutetóide. Pela análise da Figura 24 é possível observar também que a estrutura granular da ZF e ZAC cresce com o incremento de  $I_b$ , o que se dá em virtude do maior aporte de calor causado.

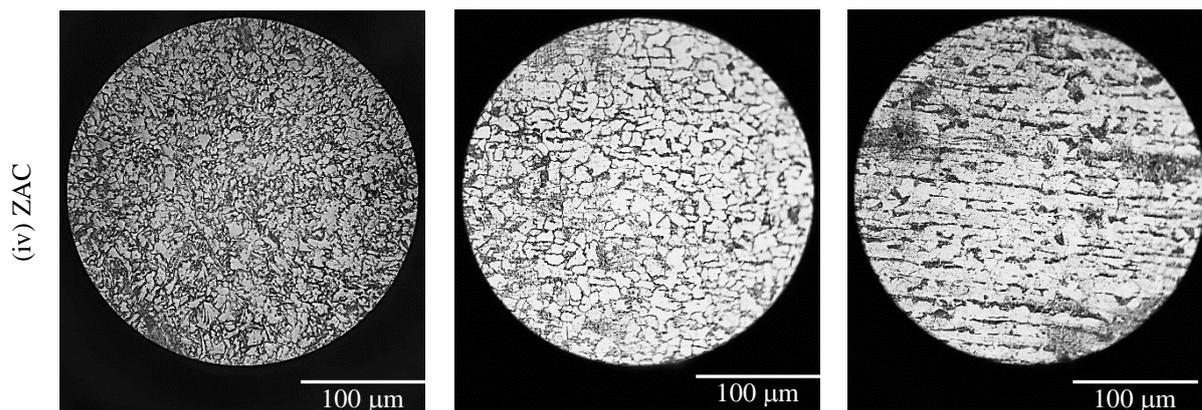
Figura 23. Aspecto visual dos revestimentos no estado (a) como depositado, e refundidos empregando-se corrente pulsada com intensidade de corrente de base de (b) 50%, (c) 70% e (d) 90% da corrente de pico.



Fonte: O AUTOR.

Figura 24. Microestrutura da seção transversal dos revestimentos refundidos empregando-se corrente pulsada com intensidade de corrente de base de (a) 50%, (b) 70% e (c) 90% da corrente de pico, mostrando as regiões (i) refundida, (ii) de transição, (iii) zona afetada pelo calor, e (iv) metal de base.





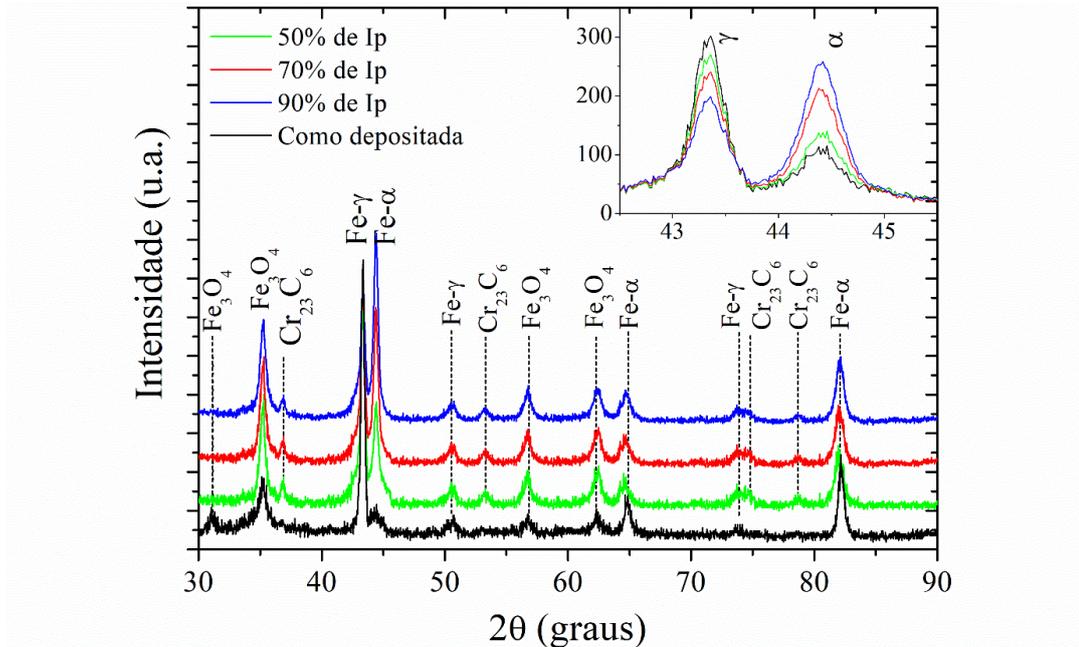
Fonte: O AUTOR.

Na Figura 25 é apresentado o padrão de DRX dos revestimentos como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com valores de intensidade de  $I_b$  de 50%, 70% e 90% de  $I_p$ . Assim como mostrado anteriormente na Figura 21, os espectros de DRX mostram a ocorrência das fases metálicas de ferro  $Fe-\alpha$  e  $Fe-\gamma$  e cerâmicas  $Fe_3O_4$  e  $Cr_{23}C_6$ , sendo a sua ocorrência creditada aos mesmos fatores previamente discutidos. Igualmente, pode-se observar que a intensidade do pico  $\alpha$  cresce com o aumento do valor de  $I_b$ , ao passo que, a intensidade de  $\gamma$  decresce. Esse comportamento novamente é justificado pelo efeito dos parâmetros de refusão empregados sobre o aporte térmico à poça de fusão. O acréscimo de  $I_b$  promove a transferência de maior energia à poça de fusão, causando uma maior profundidade de refusão e levando à uma maior diluição entre o revestimento e o substrato.

Na Figura 26 são apresentados os perfis de microdureza Vickers medidos na seção transversal dos revestimentos refundidos empregando-se corrente pulsada com valores de intensidade de  $I_b$  de 50%, 70% e 90% do valor de  $I_p$ . Nota-se que a dureza do platô superficial é maior quanto menor o valor de  $I_b$  adotado, e a profundidade de endurecimento cresce com o aumento de  $I_b$ , confirmando a ocorrência de uma maior diluição. Profundidades de diluição da ordem de 500, 600 e 900  $\mu m$  podem ser estimadas, respectivamente, para as condições 50, 70 e 90 % de  $I_p$ . A maior dureza superficial para as condições de menor de  $I_b$  deve-se ao efeito de resfriamento da poça de fusão durante este período do ciclo, promovendo a formação de uma microestrutura de grão com maior refinamento. Também, a estrutura de solidificação obtida para menores valores de  $I_p$ , possivelmente, possui uma maior quantidade de defeitos cristalinos, os quais aumentam o grau de tensão residual aumentando a dureza (ou, de forma mais precisa, aumentando a resistência à deformação plástica pelo impedimento a movimentação de discordâncias). Para o maior valor da profundidade de endurecimento

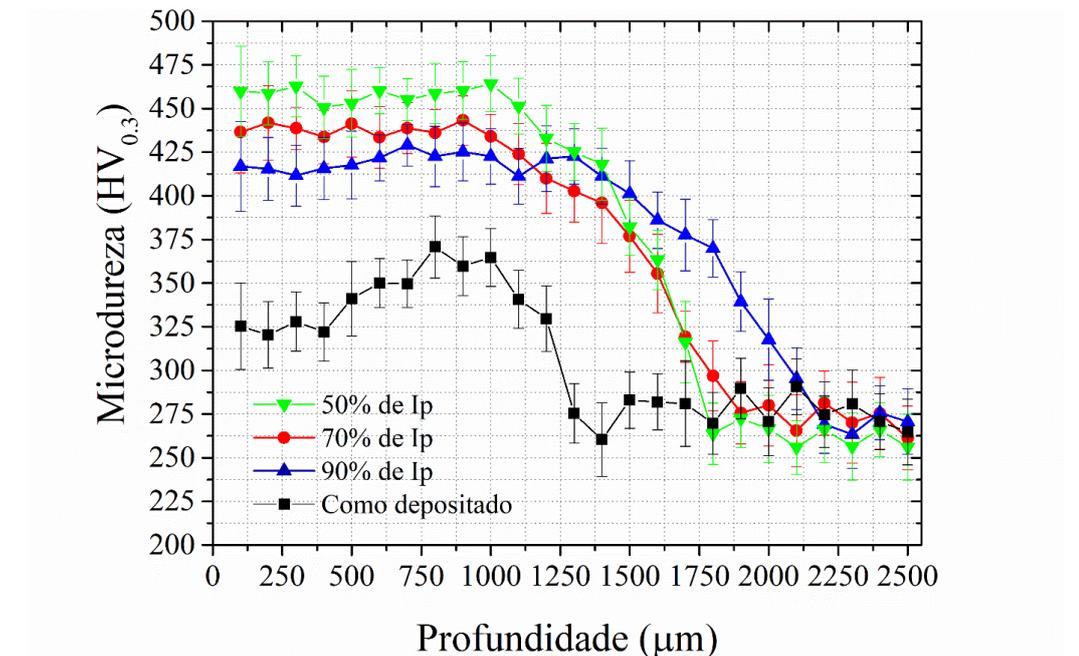
encontrado, acredita-se que, é devido ao maior aporte térmico causar uma maior diluição entre o revestimento e o substrato.

Figura 25. Padrão de difração de raios X dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação da intensidade da corrente de base.



Fonte: O AUTOR.

Figura 26. Perfil de microdureza na seção transversal dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação da intensidade da corrente de base.

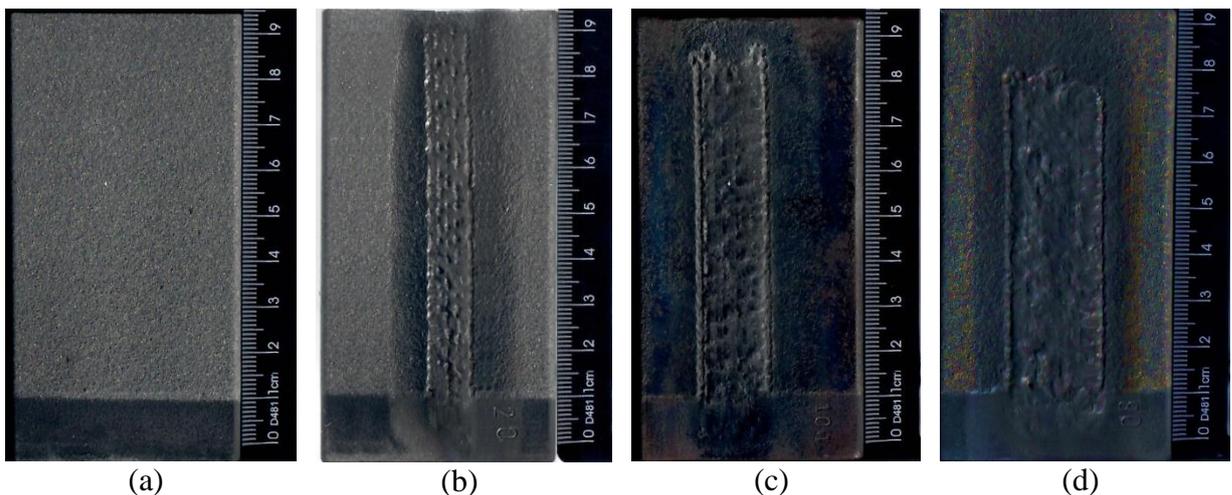


Fonte: O AUTOR.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS REFUNDIDOS VARIANDO-SE O TEMPO DE PULSO– Estudo 3

A Figura 27 mostra o aspecto visual dos revestimentos (a) como aspergido e refundidos empregando-se corrente pulsada com tempo de pulso (tp) de (b) 20%, (c) 50% e (d) 80% do tempo de ciclo. Além da ocorrência dos defeitos intrínsecos e geométrico previamente observados nas Figura 19 e Figura 23 (“mordeduras”, salpicos e sobreposição), também é possível identificar através da análise da Figura 27 que a largura da zona fundida aumenta com o acréscimo do percentual de tp. Foram medidos valores de 9.7, 15.1 e 20.1 mm para as refusões realizadas empregando-se tp de 20, 50 e 80% do tempo total do ciclo. O aumento do tp faz com que a Ip atue sobre o corpo de prova durante um período maior à qual o Ib atua. Dessa forma, o tempo em que a poça de fusão é aquecida é superior àquele em que ela é resfriada. Conseqüentemente, o maior calor transferido ao corpo de prova gera cordões refundidos com maior espessura. A partir da observação da Figura 27 também verifica-se que a oxidação azul não ocorre para a amostra refundida utilizando tp de 20%, o que se deve ao menor aporte térmico gerado empregando-se um maior tempo de ciclo resfriando a poça de fusão do que aquecendo-a.

Figura 27. Aspecto visual dos revestimentos no estado (a) como depositado, e refundidos empregando-se corrente pulsada com tempo de pulso (tp) de (b) 20%, (c) 50% e (d) 80% do tempo total do ciclo.

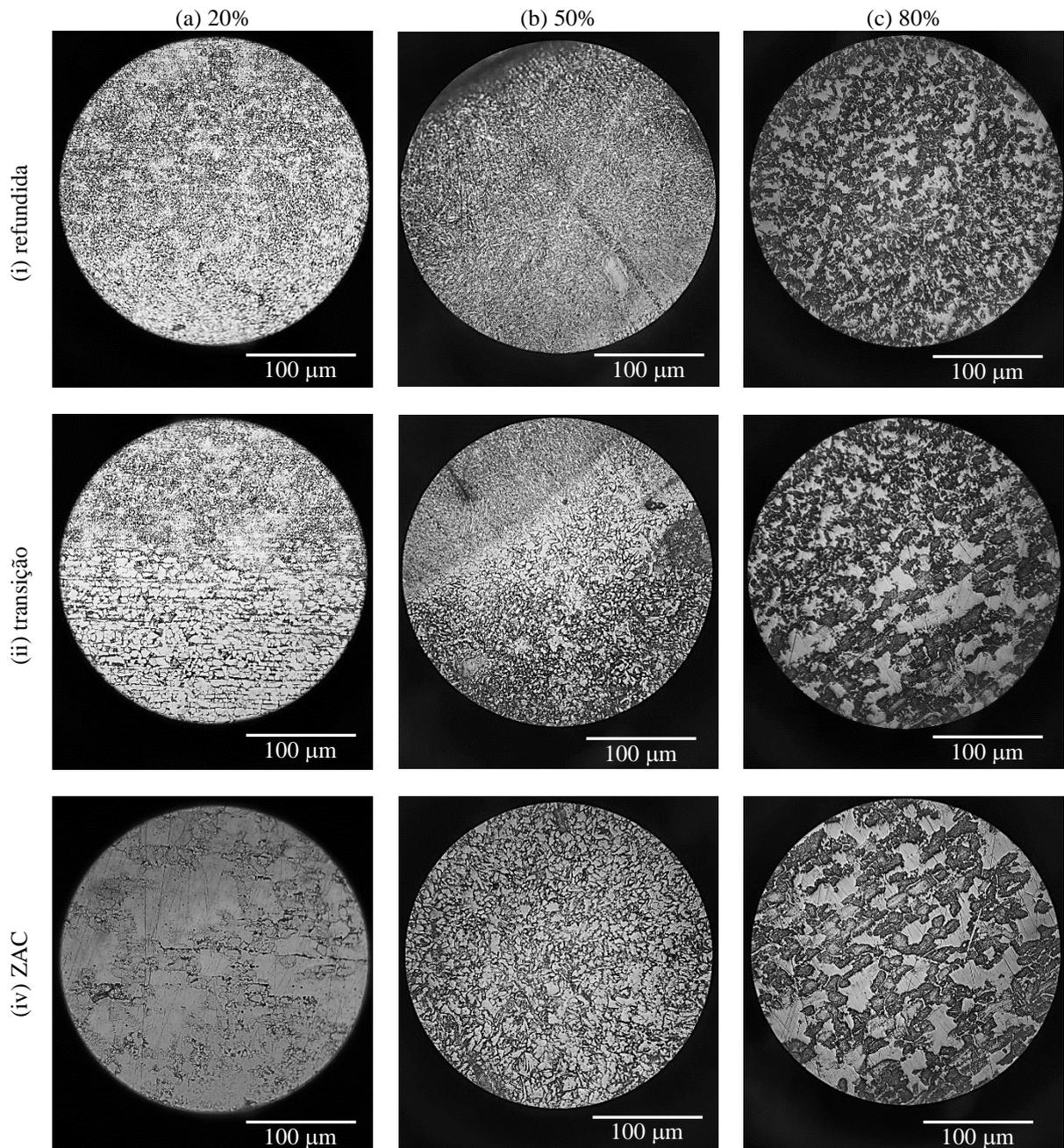


Fonte: O AUTOR.

Na Figura 28 é apresentada a micrografia da seção transversal dos revestimentos refundidos usando-se corrente pulsada com tempo de pulso de (a) 20%, (b) 50% e (c) 80% do tempo total do ciclo, mostrando as regiões (i) ZF, (ii) de transição e (iii)

ZAC. Da mesma forma como observando anteriormente nas Figura 20 e Figura 24, observa-se que uma microestrutura dendrítica na ZF e perlítica na ZAC. Na zona de transição é possível identificar o crescimento epitaxial da estrutura da ZF a partir da ZAC. Outrossim, verifica-se que os grãos crescem com o aumento do tempo de pulso tanto na ZF quanto na ZAC, confirmando o efeito do ciclo térmico evidenciados e discutidos a partir dos resultados da Figura 27.

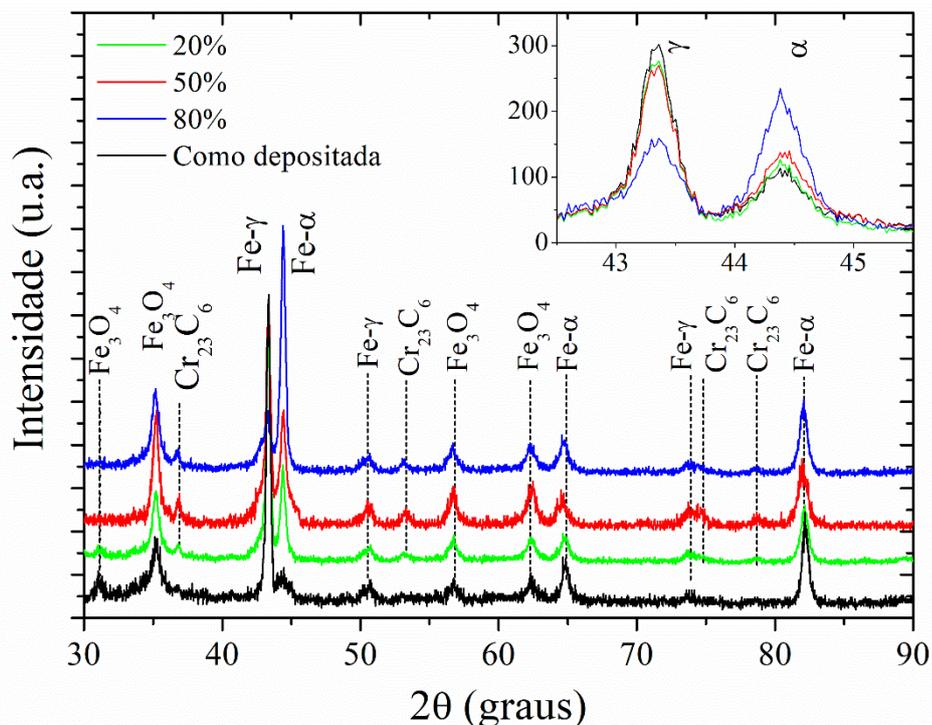
Figura 28. Microestrutura da seção transversal dos revestimentos refundidos empregando-se corrente pulsada com tempo de pulso de (a) 20%, (b) 50% e (c) 80% do tempo total do ciclo, mostrando as regiões (i) refundida, (ii) de transição, (iii) zona afetada pelo calor, e (iv) metal de base.



Fonte: O AUTOR.

Os padrões de DRX dos revestimentos como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com  $t_p$  de 20%, 50% e 80% do tempo total do ciclo são mostrados na Figura 29. Verifica-se a manutenção do mesmo padrão ilustrado e discutido previamente para as Figura 21 e Figura 25: a ocorrência de picos referentes as fases Fe- $\alpha$ , Fe- $\gamma$ , Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> e Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Observa-se também que as alturas dos picos de maior intensidade das fases  $\alpha$  e  $\gamma$  crescem e decrescem, respectivamente, com o aumento de  $t_p$ , confirmando uma crescente diluição do revestimento ao substrato com o aumento no seu valor.

Figura 29. Padrão de difração de raios X dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação do tempo de pulsos.

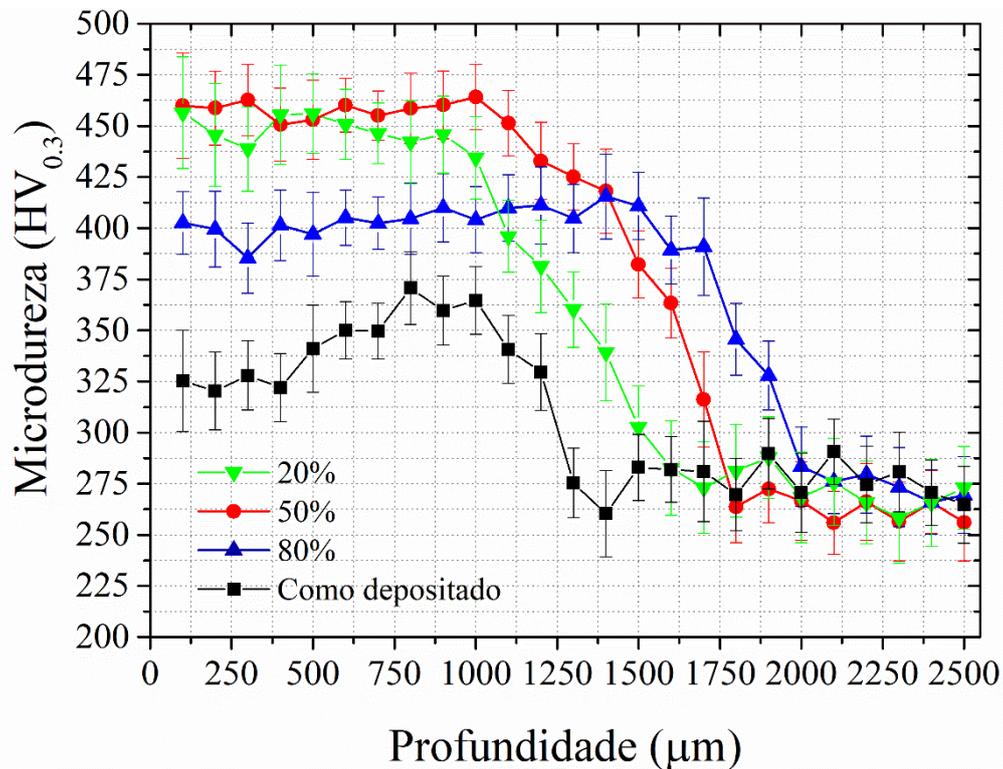


Fonte: O AUTOR.

Por fim, na Figura 30 é mostrado os perfis de microdureza Vickers medidos na seção transversal dos revestimentos como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com valores de  $t_p$  de 20%, 50% e 80% do tempo total do ciclo. A partir da análise da Figura 30 observa-se que o platô de dureza dos revestimentos refundidos apresenta valores superiores, e em média iguais, para as condições de  $t_p$  de 20 e 50%. Por outro lado, a condição de  $t_p$  de 80% apresenta maior profundidade de endurecimento. A adoção de menores valores de  $t_p$  acarreta um acréscimo no tempo de resfriamento da poça de fusão, causando o seu super-resfriamento e a obtenção de uma microestrutura de grãos mais refinada. Em contrapartida, o emprego do maior valor de  $t_p$  reduz à 1/5 o tempo do ciclo de

resfriamento, produzindo um maior aquecimento da poça de fusão durante o ciclo de aquecimento, resultando em uma maior diluição revestimento-substrato. Profundidades de diluição da ordem de 300, 500, e 700  $\mu\text{m}$  podem ser estimadas a partir dos dados da Figura 30 para das condição de refusão usando  $t_p$  de 20%, 50% e 80% do tempo total do ciclo, respectivamente.

Figura 30. Perfil de microdureza na seção transversal dos revestimentos aspergidos termicamente nas condições como depositado e refundidos empregando-se corrente pulsada com variação do tempo de pulsos.



Fonte: O AUTOR.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Uma série de testes foram realizados com o objetivo de avaliar o efeito dos parâmetros da corrente de refusão a arco em regime pulsado sobre a microestrutura e microdureza de revestimentos de liga a base de Fe-Cr-Ni aspergidos termicamente. Com base na discussão dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A aplicação do processo TIG para a refusão superficial de revestimentos aspergidos termicamente permite obter um revestimento refundido com menor incidência de porosidade e oxidação interna;
- Os parâmetros da corrente de refusão em regime pulsado exercem efeito sobre a microestrutura e microdureza dos revestimentos refundidos;
- Todos os parâmetros de refusão estudados levaram à completa refusão do revestimento e a sua diluição ao substrato;
- A largura da zona refundida diminui com o aumento da frequência entre pulsos, e aumenta com o acréscimo da intensidade da corrente de base e tempo de pulso;
- A dureza do platô superficial aumenta com o acréscimo na frequência de pulso e com redução da intensidade da corrente de base e tempo de pulso;
- A profundidade de endurecimento aumenta com a redução na frequência de pulso e aumento da intensidade da corrente de base e do tempo de pulso;
- 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;
- Os padrões de difração de raios X sugerem a presença das fases austenita ( $\gamma$ ), ferrita ( $\alpha$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) no revestimento como aspergido. Nos revestimentos refundidos, além destas fases foi identificada também a ocorrência de carboneto de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ); e,
- Por fim, com base nos resultados obtidos, pode-se apontar como parâmetros ótimos a frequência de pulso de 10 pulsos/s,  $I_b$  de 50% de  $I_p$ , e  $t_p$  de 20% do tempo de ciclo, uma vez que, levam à uma menor diluição e maior dureza superficial.

## 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 das condições de solidificação realizando a refusão com a amostra fixa sobre coquilha refrigerada e sobre mesa vibratória (estímulo por vibração mecânica); 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.
- AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). **Thermal Spray: practice, theory, and application**. United States of America, Florida, 1985.
- ARAI, T. **Thermoreactive Deposition/Diffusion Process for Surface Hardening of Steels**. ASM Handbook vol. 4, 1994.
- AYGUN, A. **Novel thermal Barrier Coatings That are Resistant to High Temperature Attack by CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Glassy Deposits**. 2008. Tese – Materials Science and Engineering Graduate Program. Ohio State University. Columbus, 2008.
- BELL, T. Surface engineering: past, present and future. **Surface Engineering**, v. 6, n.1, p. 31–40, 1990.
- BOLLES, C. D. HVOF **Thermal spraying, an alternative to hard chrome plating**. Welding Journal, p. 30-34, 1995.
- COUTO, L. C. de O. **Aspersão térmica na construção metálica – ciência e arte**. Congresso Latino Americano da Construção Metálica. São Paulo. 2006.
- CRAWMER, D. E. **Thermal Spray Process**. Handbook of Thermal Spray Technology. ASM, 2004.
- DAVIS, J. R. **Introduction to Thermal Spray Processing**. Handbook of Thermal Spray Technology. ASM, 2004
- DESHPANDE, S.; SAMPATH, S.; ZHANG, H. **Mechanisms of Oxidation and its Role in Microstructural Evolution on Metallic Thermal Spray Coatings – Case Study for Ni-Al**. Surface & Coatings Technology, v. 200, p. 5395-5406, 2006.
- ELDER, S.H.; DISALVO, F.J.; TOPOR, L.; NAVROTSKY, A. Thermodynamics of Ternary Nitride Formation by Ammonolysis: Application to LiMoN<sub>2</sub>, Na<sub>3</sub>WN<sub>3</sub> and Na<sub>3</sub>WO<sub>3</sub>N. **Chemistry of Materials**, v. 5(10), p. 1-41, 1993.
- FAUCHAIS, P.; VARDELLE, A.; DUSSOUBS, B. **Quo Vadis Thermal Spraying**. Journal of Thermal Spray Technology, v. 10, p. 44-66, 2001.
- FOLKHARD, E. **Welding Metallurgy of Stainless Steels**. Springer-Verlag, New York-Wien, 1988.
- GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Editora Unicamp, 2001.
- GEDZEVICIUS, I.; VALILIUS, A. V. **Analysis of Wire Arc Spraying Process Variables on Coatings Properties**. Journal of Materials Processing Technology, v. 175, p. 206-211, 2006.
- GUINIER, A. **X-ray crystallographic technology**. London: Hilger and Watts LTD, 1952.
- HENKE, S. L. **Efeito da refusão por tocha plasma na resistência à fadiga de um aço inoxidável martensítico macio**. 2013. Monografia (Especialização em Engenharia da Soldagem)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013.

- KAHRAMAN, N.; GULENÇ, B. **Abrasive wear behavior of powder flame sprayed coatings on steel substrates**. *Materials and Design* 23 (2002) 721–725
- KELKHAR, 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**. 3. ed. Belo Horizonte, 2011.
- NEWBERY, A. P.; GRANT, P. S. **Oxidation During Electric Arc Spray Forming of Steel**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 178, p. 259-269, 2006.
- NUNES, L. P.; LOBO, A. C. O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1990.
- PAREDES, R. S. C. **Aspersão térmica: apostila**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, laboratório de aspersão térmica e soldagem especiais, 2012. 102 p.
- PAREDES, R. S. C.; AMICO, S. C.; d'OLIVEIRA, A. S. C. M. **The Effect of Roughness and Pre-Heating of the Substrate on the Morphology of Aluminium Coatings Deposited by Thermal Spraying**. *Surface & Coatings Technology*, v. 200, p. 3049-3055, 2006.
- PINEDO, C. E.; MAGNABOSCO R. Mecanismos de nitretação sob plasma do aço inoxidável martensítico AISI 420 nitretado a alta e baixa temperatura. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 12, p. 257–64, 2015.
- PUKASIEWICZ. A. G. M. **Desenvolvimento de Revestimentos Fe-Mn-Cr-Si-Ni Resistentes à Cavitação Depositados por Aspersão ASP**. Tese – Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.
- 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, R. P.; SCOTTI, A. **Fundamentos e Prática da Soldagem a Plasma**. 1. ed. São Paulo SP, 2007.
- RODRIGUEZ, R. M. H. P.; PAREDES, R. S. C.; WIDO, S. H.; CALIXTO, A. **Comparison of Aluminum Coatings Deposited by Flame Spray and Electric Arc Spray**. *Surface & Coatings Technology*, v. 202, p. 172-179, 2007.
- ROY G.G., ELMER J.W., DEBROY T., **Mathematical modeling of heat transfer, fluid flow, and solidification during linear welding with a pulsed laser beam**. *Journal of applied Physics* 100, 2006.

- SAFARI, S.; HERMAN, H. **Microstructure Investigation of Plasma Sprayed Al Coatings**. Thin Solid Film, v. 45, p. 295-307, 1977.
- SAMPATH, S.; HERMAN, H. **Rapid solidification and microstructure development during plasma spray deposition**. Journal of thermal spray technology, vol. 5, n° 4, p. 445-456, 1996.
- SCOTTI, A, PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 1ª ed. São Paulo: Artliber, 2008. Pág. 130.
- SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3.ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- SILVA, F. J. G. **Tecnologia da Soldadura: uma abordagem técnico-didática**. Porto: Publindustria. 2014.
- SOBOLEV, V. V.; GUILLEMANY, J. M. **Oxidation of Coatings in Thermal Spraying**. Materials Letters, v. 37, p. 231-235, 1998.
- STREETER, J.; SAMPSON, E. R. **Hard Chrome Replacement and Other Thermal Spray Applications in the Chilean Navy**. Thermal Spray, Surface Engineering: Applied Research, Proceedings ITSCS-2000, Montreal, p. 1145, ISBN: 0-87170-680-6, 2000.
- 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**. 2016. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2016.
- SULZER. **An Introduction to Thermal Spray**. Sulzer Metco, v. 4, n. 4, Suíça, 2012.
- 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.
- TAKIMI, A. S., **Obtenção de Superligas de NiCrAlY Nanoestruturadas por Moagem de Alta Energia e sua Aplicação por Aspersão Térmica Hipersônica (HVOF)**. 2004, 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.
- TUCKER Jr, R. C. **Advanced Thermal Spray Techniques**. In: Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Technologies and applications. 2 ed. Los Angeles: Noyes, 1994.
- VÁZ, R. F. **Estudo de partículas metálicas aspergidas pelo processo de aspersão térmica por arco elétrico**. 2013. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013.
- WAINER E, BRANDI SD, MELLO FDH. **Soldagem: processos e metalurgia**. 9ª reimpressão. São Paulo: Blucher, 2013.
- WILL, C. R. **Ligas Inoxidáveis Resistentes à Cavitação Depositadas por Plasma – PTA – Arame**. 2008. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2008.