

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DHONATAN JUNIOR DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM REVESTIMENTO DE
AÇO INOXIDÁVEL SUPERMARTENSÍTICO MODIFICADO COM 1% DE
BORO PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR CHAMA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

DHONATAN JUNIOR DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM REVESTIMENTO
DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERMARTENSÍTICO MODIFICADO COM
1% DE BORO PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR
CHAMA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Bellini
Medeiros

PATO BRANCO

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERMARTENSÍTICO MODIFICADO COM 1% DE BORO PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR CHAMA

Dhonatan Junior de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 07/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR)

Profa. Dra. Maria Nalu Verona Gomes
(UTFPR)

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

DEDICATÓRIA

A minha família, meus pais Ari e Clair; e minha irmã Ingrid.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente minha família por todo incentivo e conselhos dados a mim, sempre me encorajando a evoluir.

Agradeço especialmente ao meu orientador, professor Bruno, pelo conhecimento compartilhado e dedicação em me guiar na elaboração deste trabalho.

Agradeço também, ao Flávio da empresa Patocorte de Pato Branco – PR, pela doação dos substratos para execução deste trabalho.

Agradeço a todos os professores que já tive pelo conhecimento partilhado.

Agradeço aos estagiários dos laboratórios dos cursos de Engenharia Mecânica e Química pela ajuda e fornecimento de material.

Agradeço a meus amigos pelos bons momentos e apoio.

Ademais, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para minha formação.

EPÍGRAFE

Knowing where you came from is no less important than knowing where you are going (Neil deGrasse Tyson)

RESUMO

DE OLIVEIRA, Dhonatan Junior. Desenvolvimento e caracterização de revestimento de aço inoxidável supermartensítico modificado com boro a 1% pelo processo de aspersão térmica por chama. 2017. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Ambientes de grande severidade usualmente necessitam o emprego de ligas especiais capazes de suportar as condições rigorosas a que são expostas. A liga de aço inoxidável supermartensítico modificada com boro foi desenvolvida com o intuito de suportar exigências de corrosão e desgaste, aos quais tubulações utilizadas na exploração de petróleo estão expostas, a fim de, se tornar uma opção tecnicamente e economicamente viável a atual classe de materiais utilizadas nessa finalidade. A obtenção de revestimentos que possam ser aplicados de forma simples, barata, que apresentem boa eficiência e que possam ser reaplicados se necessário, mostram-se essenciais, especialmente em situações com solicitações de desgaste e corrosão. Assim, este trabalho, visa o estudo da viabilidade da obtenção do revestimento da liga de aço inoxidável supermartensítico modificado com boro a 1% pelo processo de aspersão térmica por chama. Além disso, examinou-se qual o impacto causado pela técnica de refusão por soldagem TIG nos depósitos. Estes foram caracterizados pelas técnicas de difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica por varredura (MEV), além de ensaios mecânicos como teste de dureza, ensaio de tração e de dobramento. Os resultados das análises de DRX indicaram a predominância da fase martensítica nas amostras de pó e revestimentos, com uma pequena presença de austenita e boretos. Já a análise das amostras refundidas, sugere um aumento da quantidade de martensita, assim como, presença de ferrita delta (δ), além de uma diminuição na quantidade de austenita e boretos. A técnica de MEV identificou a presença de partículas não fundidas no depósito sem refusão, assim como, uma presença considerável de óxidos, os quais diminuíram nas amostras com refusão. Além disso, foi possível observar a segregação de boretos nos contornos de grão da matriz. O teste de adesão não apresentou qualquer dano a superfície do revestimento. No teste de microdureza Vickers, obteve-se bons valores para a condição sem refusão, obtendo média de 594,8 HV (10 gf), sendo que esta dureza diminuiu na amostra refundida, atingindo média de 296 HV (10 gf). Já no teste de resistência a tração da amostra sem refusão, a média alcançada foi de 8,211 Mpa, sendo que a refusão beneficiou a aderência dos depósitos, obtendo média de 12,447 MPa.

Palavras-chave: Aspersão térmica por chama. Aço inoxidável supermartensítico. Boro. Refusão TIG.

ABSTRACT

DE OLIVEIRA, Dhonatan Junior. Development and characterization of 1% boron-modified supermartensitic stainless steel coating by flame spray technic. 2017. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

High severity environments usually require the use of special alloys capable of withstanding the stringent conditions to which they are exposed. The boron modified supermartensitic stainless steel alloy has been developed to withstand corrosion and wear requirements to which pipelines used in oil exploration are exposed in order to become a technically and economically feasible option to the current class of materials used for this purpose. Obtaining coatings that can be applied simply, inexpensively, having good efficiency and that can be re-applied if necessary, are essential, especially in situations of wear and corrosion. Thus, this work aims to study the feasibility of obtaining coatings of the supermartensitic stainless steel alloy modified with 1% boron by flame spray process. In addition, it was examined the impact caused by the technique of TIG welding in the deposits. These were characterized by X-ray diffraction (XRD) technique, scanning electron microscopy (SEM), and mechanical tests such as hardness test, tensile test and folding test. The results of the XRD analyzes indicated the predominance of the martensitic phase in the powder and coating samples, with a small presence of austenite and borides. The analysis of the remelted samples suggests an increase in the amount of martensite, as well as the presence of delta ferrite (δ), in addition to a decrease in the amount of austenite and borides. The SEM technique identified the presence of unmelted particles in the non-remelted sample, as well as a considerable presence of oxides, which decreased in the remelted samples. In addition, it was possible to observe the segregation of borides in the grain boundaries of the matrix. The adhesion test did not exhibit any damage to the surface of the coating. In the Vickers microhardness test, good values were obtained for the condition without remelting, obtaining an average of 594.8 HV (10 gf), and this hardness decreases in the remelted sample, reaching an average of 296 HV (10 gf). In the test of tensile strength of the sample without remelting, an average of 8,211 MPa was reached, and the remelting benefited the adhesion of the deposits, obtaining an average of 12,447 MPa.

Keywords: Flame Spray. Supermartensitic stainless steel. Boron. TIG remelting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplificação genérica do processo de aspersão térmica.....	13
Figura 2 - Evolução do processo de aspersão térmica, do processo intermitente (A) ao semi-contínuo e contínuo (B) e (C), respectivamente.	15
Figura 3 - Ancoragem mecânica das partículas nas irregularidades do substrato.....	17
Figura 4 - Esquema do equipamento utilizado no método de aspersão por chama utilizando pó como material de alimentação.	19
Figura 5 – Fluxograma das etapas.....	25
Figura 6 – Medidor de rugosidade, TIME TR 220.....	28
Figura 7 – Pistola de aplicação RotoTec 1A.....	28
Figura 8 – Microdurômetro modelo TH710 marca TIME.....	31
Figura 9 – Máquina de ensaios universal utilizada para realizar o ensaio de dobramento.....	33
Figura 10 – Condições de revestimento após teste de dobramento. Em (a) tem se um revestimento ideal. Em (b) e (c), revestimento marginal sujeito a teste com lâmina para aprovação e revestimento rejeitado, respectivamente.	34
Figura 11 – Equipamento de soldagem TIG utilizado para refusão. Marca ESAB, modelo Origo TA33	36
Figura 12 - Teste da faca. Em a) e b) está representada a tentativa de destacamento no revestimento das amostras A6 e A9, respectivamente.....	39
Figura 13 - Substrato utilizado em ensaio de dobramento.....	40
Figura 14 – Representação das amostras A7 e A10, com revestimento refundido utilizando TIG a 30 A e 40 A, respectivamente.	41
Figura 15 – Padrões de difração de raios-x relativos as amostras de pó, revestimento e revestimento refundidos com correntes de 30 A e 40 A.....	42
Figura 16 – Imagens de MEV para diferentes aumentos da amostra A4 (sem refusão): a) e b) 500x; c) 1000x; d) 4000x.....	44
Figura 17 – AISM com 1% de boro.	45
Figura 18 – Imagens de MEV para diferentes aumentos do revestimento refundido a 30 A: a) 500x; b) 1500x.....	46
Figura 19 – Imagens de MEV para diferentes aumentos do revestimento refundido a 40 A: a) 1500x; b) 6000x.....	46
Figura 20 – Mecanismos de falha no ensaio de adesão. T1) e T5) falhas adesiva do revestimento e adesiva do adesivo. T2) e T3) falha adesiva do revestimento. T4) falha adesiva do adesivo.	49
Figura 21 – Mecanismos de falha das amostras com refusão a 60 A. Falha predominante ocorreu na interface adesivo revestimento.	50
Figura 22 – Resultados das amostras com revestimento refundido e posterior geração de rugosidade. Combinação de falhas na interface revestimento/adesivo e dentro do adesivo.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processos de aspersão térmica e suas características.	16
Tabela 2 - Fontes de calor na aspersão por chama e sua respectiva temperatura durante a queima.	19
Tabela 3 - Composição química típica dos aços inoxidáveis supermartensíticos.	22
Tabela 4 – Composição química do depósito do AISM modificado com boro a 1%.	26
Tabela 5 - Valores de rugosidade Ra e Ry e respectivos desvios padrão.	37
Tabela 6 - Valores obtidos das médias das espessuras das chapas sem e com revestimento, seus respectivos desvios padrão e a espessura do revestimento.	38
Tabela 7 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para as amostras sem refusão (D1 e D2) e a amostra com refusão a 30 A (D3) utilizando TIG.	47
Tabela 8 – Resultados do ensaio de adesão das amostras sem refusão.	48
Tabela 9 – Resultados do ensaio de adesão das amostras com refusão a 60 A.	49
Tabela 10 – Resultado do ensaio de adesão das amostras com refusão a 60 A após geração de rugosidade.	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	ASPERSÃO TÉRMICA	13
2.1.1	Caracterizando os processos de aspersão térmica	15
2.1.2	Aspersão térmica por chama	18
2.2	AÇOS INOXIDÁVEIS	20
2.2.1	Aços inoxidáveis supermartensíticos	20
2.2.2	Aços inoxidáveis supermartensíticos modificados com boro	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	LIGA PARA ASPERSÃO	25
3.2	SUBSTRATO	27
3.3	APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO	28
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO	29
3.4.1	Metalografia	29
3.4.2	Ensaio de Dureza	30
3.4.3	Ensaio de Tração	31
3.4.4	Ensaio de Dobramento	32
3.4.5	Aferição da Espessura	34
3.4.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	34
3.4.7	Difração de Raios-X (DRX)	35
3.4.8	Refusão por Soldagem TIG	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	RUGOSIDADE E ESPESSURA DO REVESTIMENTO	37
4.2	ENSAIO DE DOBRAMENTO	40
4.3	REFUSÃO POR SOLDAGEM TIG	40

4.4	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX).....	42
4.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV).....	43
4.6	ENSAIO DE DUREZA	47
4.7	ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO.....	47
4.8	SINTESE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5	CONCLUSÕES	53
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Apesar do crescente desenvolvimento de fontes de energias renováveis, a dependência mundial dos recursos provenientes do petróleo é ainda muito grande. Entretanto, através do esgotamento dos poços de petróleo “superficiais”, faz-se necessária a exploração de poços cada vez mais profundos. A obtenção de materiais capazes de resistirem ao severo ambiente a que são expostos os equipamentos utilizados na exploração de petróleo se faz de grande importância, uma vez que falhas nesses equipamentos pode acarretar em paradas de produção, que são associadas a grandes perdas econômicas, e além disso, são passíveis de gerar desastres ambientais (ZEPON, 2013).

Em diversas situações, um material pode apresentar algumas propriedades necessárias a determinada aplicação, contudo, pode não possuir outras tão imprescindíveis quanto, para a aplicação referida. Desta forma, há a necessidade da modificação do material, buscando incorporar ou melhorar as características desejadas. Uma técnica para efetuar esta modificação, a fim de melhorar algum atributo de um material, é chamada de aspensão térmica ou metalização. Este método caracteriza-se pela aplicação de um revestimento sobre um substrato. A principal vantagem do processo de aspensão térmica, é a grande quantidade de materiais que podem ser utilizados para produzir revestimentos, uma vez que qualquer material que funda sem se decompor, pode ser usado. Outras grandes vantagens se dão pela capacidade de se obter revestimentos, sem grande adição de calor, evitando-se assim, possíveis empenamentos no substrato e a viabilidade de se retirar revestimento desgastados ou danificados, para um novo recobrimento, sem mudar dimensões ou propriedades do substrato (ASM, 2004).

Quanto aos materiais empregados em ambientes de grande austeridade, os aços inoxidáveis são geralmente utilizados. Isto se dá, devido ao fato de possuírem um conjunto de propriedades interessantes para esta aplicação, como: apresentar excelente resistência a corrosão e serem altamente ligáveis, de modo que, possam ser combinados a diferentes elementos químicos, a fim de obter as características desejadas, como, resistência mecânica, tenacidade, soldabilidade, ductilidade e resistência ao desgaste.

A modificação de ligas metálicas a fim de melhorar características de resistência ao desgaste, pode ser conseguida através da adição de Boro (B) na

composição química de uma liga, ou, por meio, de processos que inserem átomos de Boro em camadas superficiais de um componente. Quando boro é adicionado em concentrações adequadas a ligas metálicas, como as ligas Fe-B, Cr-B e Mo-B, ocorre a formação de boretos nos contornos de grão. Estes boretos formam uma rede tridimensional contínua, tendo como principais características sua alta dureza e estabilidade térmica (LIU et al., 2009).

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo analisar a aplicabilidade e o desempenho do revestimento de uma liga de aço inoxidável supermartensítico modificada com um teor de boro de 1% fornecida em forma de pó, quando obtido pelo processo de aspersão térmica por chama com ou sem refusão dos revestimentos por soldagem TIG.

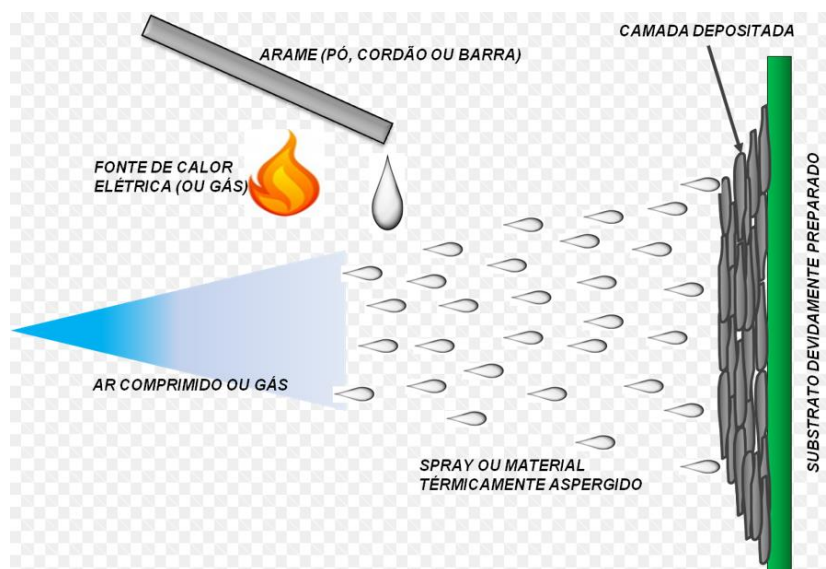
Como objetivos específicos, através de ensaios mecânicos e análise microestrutural, tem-se a verificação da rugosidade obtida nos substratos, da resistência adesiva, dureza, espessura, averiguação das fases, porosidades e óxidos presentes no revestimento, além de avaliar qual a influência causada pela refusão TIG nos parâmetros supracitados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPERSÃO TÉRMICA

Aspersão térmica, também conhecido como metalização, consiste em um conjunto de processos para obtenção de revestimentos, no qual partículas metálicas ou não metálicas, são impulsionadas na forma fundida ou semifundida, contra um substrato (figura 1). O material para aspersão pode ser fornecido na forma de pó, arames, vareta ou cordão. A fusão do material pode ser feita de três formas básicas, utilizando a combustão de gases, empregando um arco elétrico ou ainda, através de um gás na forma de plasma (AWS, 1985).

Figura 1 - Exemplificação genérica do processo de aspersão térmica.



Fonte: Adaptado de metalização (20--)

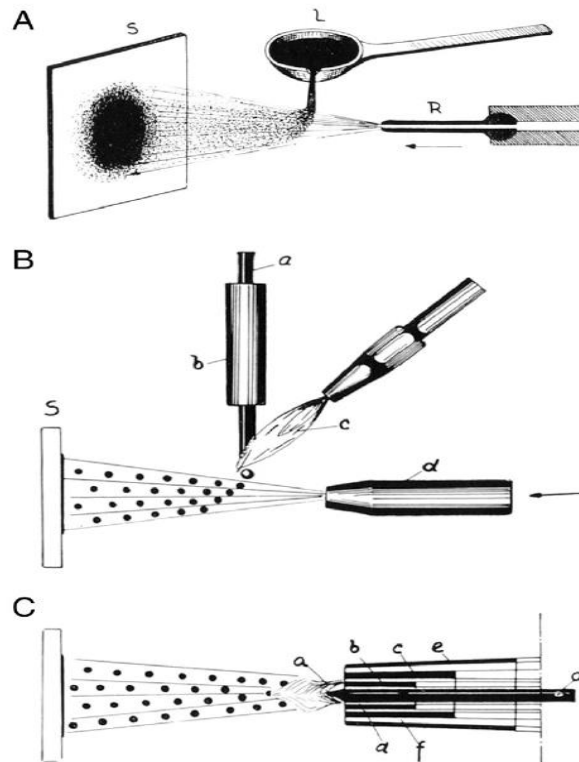
Estes revestimentos podem ser empregados a uma grande variedade de aplicações, seja para fabricação de componentes que necessitem resistir a uma condição específica, ou mesmo, na manutenção de equipamentos (HERMAN; SAMPATH; MCCUNE, 2000). Há diversos trabalhos realizados com relação a investigação da aplicabilidade dos revestimentos, e estudos clássicos variam desde aplicações para resistência a desgaste (MATIKAINEN et al., 2014), para aumento de tenacidade (ALVARES et al., 2008), para barreiras térmicas (CHEN et al., 2015),

para formar superfícies adequadas para adesão de tecido ósseo (WANG et al., 2016) e para melhorar a resistência a corrosão (PAREDES, 1998).

A primeira patente de um processo de aspersão térmica, foi aplicada em 1909 na Alemanha, por Max Ulrich Schoop, um inventor suíço, que a partir da observação de que esferas de chumbo impulsionadas por uma arma de pressão, aderiam a uma parede, achatando-se e formando placas de certa forma conectadas, assim, assemelhando-se a uma espécie de revestimento, percebeu que tal revestimento poderia ser aperfeiçoado se empregada uma metodologia adequada, da qual ele empregou grande esforço nos anos seguintes para desenvolvê-la (SIEGMANN; ABERT, 2013).

A evolução do desenvolvimento da técnica, pode ser visualizada na figura 2, partindo do princípio básico visto na figura 2-a, onde o metal em forma de pó era derramado com uma concha sob uma chama, produzida por um maçarico, sendo assim, um processo oneroso, pouco eficiente, além de ser intermitente. Uma evolução deste método, visto na figura 2-b, consiste em usar uma chama para fundir uma vareta, e usar um segundo maçarico ejetando um gás, para propelir as partículas fundidas em direção ao substrato. Este método, apesar de mais eficiente, continua muito trabalhoso, uma vez que exigiria mais de uma pessoa para realizá-lo. A evolução final da técnica, observada na figura 2-c, utilizada até hoje, consiste em agregar no mesmo equipamento, o material que será aspergido, o gás de combustão, e se for o caso, também o gás de propulsão. Dessa forma, a obtenção de um equipamento compacto, muito contribuiu na realização da aspersão, tornando-o um processo contínuo e de fácil aplicação.

Figura 2 - Evolução do processo de aspersão térmica, do processo intermitente (A) ao semi-contínuo e contínuo (B) e (C), respectivamente.



Fonte: Siegmann e Abert (2013).

2.1.1 Caracterizando os processos de aspersão térmica

Analisando os processos de aspersão térmica pela ótica da fonte de calor usada para fundir o material a ser aspergido, dois grupos básicos podem ser identificados, os que utilizam combustão de gases, e os que utilizam energia elétrica. Ambas categorias possuem subgrupos, que apresentam diferentes características, das quais podem ser visualizadas na tabela 1.

Tabela 1 - Processos de aspersão térmica e suas características.

Processos		Característica									
		Vazão de gases (m ³ /h)	Temperatura média (°C)	Atmosfera em torno da gotícula	Velocidade de impacto (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão interlamelar	Teor de óxidos (%)	Custo relativo (1 a 10)	Taxa de deposição máxima (kg/h)	
Fontes de Calor	Combustão	Chama (Pó)	11	2200	CO, CO ₂ , H ₂ O	30	3	Baixa	6	3	7
		Chama (Arame)	71	2800	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	180	4	Média	4	3	9
		Detonação	11	3800	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	910	8	Muito Alta	0,1	10	1
		HVOF	28-57	3100	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	610-1080	8	Muito Alta	0,2	5	14
	Energia Elétrica	Arco (Arame)	71	5500	N ₂ , O ₂	240	6	Alta	0,5-3	1	16
		Plasma	4,2	5500	N ₂ , Ar, H ₂ , O ₂	240	6	Alta	0,5-1	5	5
		Plasma de alta energia	17-28	8300	N ₂ , Ar, H ₂ , O ₂	240-1220	8	Muito Alta	0,1	4	23
		Plasma a vácuo	8,4	8300	Ar, He	240-610	9	Muito Alta	ppm	10	10
		Valores Máximos			Valores Mínimos						

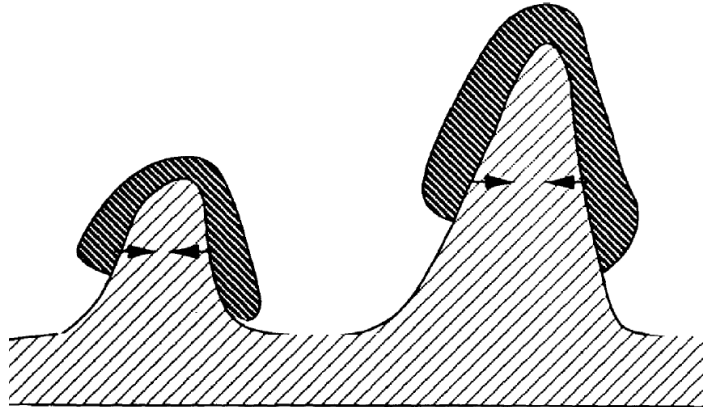
Fonte: Antunes (2013).

Baixas temperaturas de deposição, usualmente resultam em relativa alta porosidade, assim como, baixa adesão. Entretanto, parte dos problemas ocasionados quando se trabalha nestas temperaturas inferiores, podem ser facilmente contornados aumentando-se a velocidade de impacto. Isto se dá, devido ao fato de uma maior velocidade conseguir conformar as partículas, achatando-as, o que por consequência, eleva a coesão lamelar. Entretanto, o problema do revestimento apresentar partículas não fundidas quando se trabalha a baixas temperaturas ainda existe, e neste caso, a única maneira de corrigir isto, é aumentando a temperatura do processo. Já quando se trabalha em altas temperatura, há uma forte tendência a gerar tensões residuais no substrato, tendo assim, um efeito degradante no resultado final esperado, uma vez que estas tensões, podem ocasionar o descolamento do revestimento (PAWLOWSKI, 2008).

A espessura do revestimento aumenta rapidamente conforme o processo ocorre, de modo gradativo, as partículas vão se acumulando e solidificando a altas taxas. A densidade do depósito, varia de acordo com a temperatura da fonte de calor, velocidade de impacto das partículas e da composição dos gases usados para propelir as gotículas. Se este gás for oxigênio ou ar, ocorre a formação de óxidos, e estes, acabam por se tornar parte do revestimento, dessa forma, influenciando em sua densidade. A adesão do revestimento depende de alguns fatores críticos, como a limpeza da superfície, afinidade com o material do substrato, a rugosidade do mesmo, temperatura da superfície durante os estágios da aspersão (antes, durante e após), e a velocidade de impacto, sendo que, a adesão pode ser de forma

mecânica ou metalúrgica, entretanto, a ancoragem mecânica (figura 3) das gotículas achatadas nas irregularidades da superfície é o modo mais comum, facilitada pela contração da transição líquido-sólido durante a solidificação (AWS, 1985).

Figura 3 - Ancoragem mecânica das partículas nas irregularidades do substrato.



Fonte: Pawlowski (2008).

Todo processo de aspersão necessita que o substrato passe por um pré-tratamento. Como primeira etapa, geralmente se faz necessário fazer uma limpeza, ou mais especificamente um desgorduramento, a fim de se remover resíduos de óleo, graxa, ou qualquer outra substância indesejada. Isto pode ser realizado com a utilização de solventes orgânicos, como acetona ou álcool metílico – geralmente utilizado para peças de pequeno porte - ou até mesmo usando água quente ou vapor de água sob alta pressão – comumente usados para peças de grande porte. Na segunda etapa, rotineiramente se realiza uma ativação superficial, nominalmente, geração de rugosidade. Benefícios secundários da ativação superficial, consistem na remoção de incrustações e de óxidos. O método de ativação superficial mais empregado é o jateamento com granalha, porém, outras técnicas vêm sendo utilizadas com grande eficácia, como tratamento com jato de água, ablação a laser e ataque químico. Uma das principais desvantagens do jateamento com granalha, refere-se à geração de poeira e contaminação da superfície, provenientes do desgaste natural da granalha. Em situações onde contaminação deve ser evitada, como equipamentos cirúrgicos, deve ser empregado os métodos de jateamento com água ou ablação a laser, dois métodos livres de contaminação. O tamanho dos grãos usados no jateamento deve ser

cuidadosamente escolhido de acordo com as características desejadas, uma vez que grãos mais grossos resultam em uma superfície mais grosseira, assim como, peças de pequena espessura necessitam de grãos de tamanho menor, para evitar empenamentos e deformações excessivas (PAWLOWSKI, 2008).

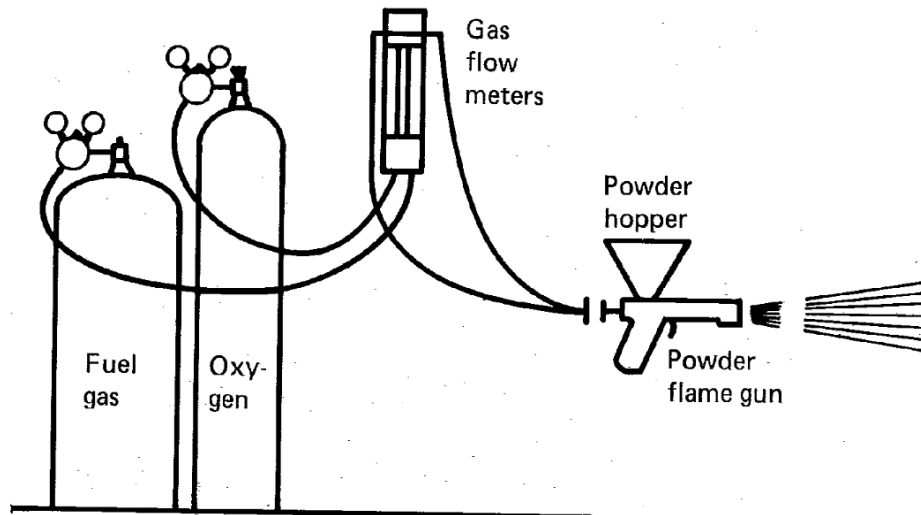
Outra etapa a ser realizada antes da metalização, diz respeito a um pré-aquecimento do substrato. Para obter melhores resultados, é recomendado que o pré-aquecimento seja realizado imediatamente antes da aspersão. Aquecer o substrato antes da aspersão aumenta as chances de fusão microscópica ou difusão, assim, aumentando a interação partícula-substrato. Outros benefícios do pré-aquecimento referem-se a eliminar humidade presente na superfície e reduzir stress residual, expandindo o substrato, assim, a contração ocorre junto com o revestimento. Além disso, partículas fundidas ou semifundidas fluem e aderem melhor quando estão atingindo um substrato quente e seco, do que se estivessem atingindo um substrato frio. É indicado que o substrato atinja uma temperatura na faixa de 100 a 150 °C por um período de aproximadamente 60 segundos, assim, removendo todo resíduo de humidade (BERNDT et al., 2004).

2.1.2 Aspersão térmica por chama

É um método relativamente simples e de baixo custo, onde o equipamento de aplicação é leve e compacto, exemplificado na figura 4. Tanques de armazenamento, fornecem um gás combustível e um comburente. Estes gases passam por válvulas reguladoras de pressão e vazão, e são direcionados para a pistola de aplicação. No bocal da pistola e com o auxílio de um ignitor, os gases entram em combustão. A vazão dos gases pode ser regulada de acordo com o necessário, podendo obter uma atmosfera carburante ou oxidante, fornecendo mais combustível ou mais comburente, respectivamente. Se o material de alimentação for no formato de arame, ele será fornecido por um alimentador externo, e entrará pela parte de trás da pistola. Já quando se utiliza pó, há um pequeno compartimento na parte de cima da pistola para seu armazenamento, e este poderá descer por gravidade para o interior da pistola, ou, uma pequena quantidade de gás pode ser divergida para carregar o pó em direção ao fluxo principal, onde quando em contato

com o gás em combustão será propulso na forma fundida ou semifundida em direção ao substrato (AWS, 1985).

Figura 4 - Esquema do equipamento utilizado no método de aspersão por chama utilizando pó como material de alimentação.



Fonte: AWS Handbook (1985).

Diversos gases podem ser utilizados no processo de aspersão por chama, como: propano, gás natural, hidrogênio e acetileno (tabela 2). Entretanto, o acetileno é frequentemente mais empregado devido a sua maior temperatura de chama, mais recomendada para se tentar evitar ou diminuir a quantidade de partículas não fundidas presentes no revestimento.

Tabela 2 - Fontes de calor na aspersão por chama e sua respectiva temperatura durante a queima.

Fonte	Temperatura °C
Propano + oxigênio	2640
Gás natural + oxigênio	2735
Hidrogênio + oxigênio	2690
Acetileno + oxigênio	3100

Fonte: Adaptado de infosolda (20--)

Aspersão por chama é frequentemente empregada com ligas auto-fluxantes, que são ligas capazes de passar por um processo de refusão. Estas ligas são caracterizadas por possuírem elementos como Ni e B, elementos desoxidantes, assim, durante a refusão, os óxidos se difundem no revestimento podendo ser removidos mecanicamente. Revestimentos obtidos com estas ligas, geralmente são

bastante densos, com baixa porosidade e boa adesão, graças a difusão da interface substrato-revestimento (FAUCHAIS; VARDELLE, 2012).

2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS

Aços inoxidáveis são ligas metálicas a base de Fe (ferro) em que os principais elementos de liga são Ni (níquel), Mo (molibdênio) e predominantemente o Cr (cromo). A fim de serem considerados inoxidáveis, uma porcentagem em peso da ordem de 11% de Cr é necessária na liga (CALLISTER, 2000).

A resistência a corrosão dos aços inoxidáveis se dá por um efeito chamado de passivação, onde uma liga a base de ferro quando ligada a certos elementos como o Cr ou Ni e exposta a um ambiente oxidante, é capaz de formar uma camada contínua, fina e não-porosa de óxidos de cromo e/ou níquel, mediante um processo de oxirredução, devido à grande afinidade química entre estes elementos e o oxigênio. Uma vez formados, a taxa de crescimento destes óxidos decresce drasticamente, devido a própria isolação provocada pelo filme entre a superfície e ambiente, atuando como uma barreira para a troca de elétrons, evitando que o processo corrosivo danifique o metal, deste modo, tornando o filme extremamente estável e inerte (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

Baseando-se na composição química e processos de fabricação, os aços inoxidáveis podem apresentar diferentes microestruturas, os quais levam a uma classificação em quatro principais classes: aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos, martensíticos e ferrítico-austeníticos (OLSSON; LANDOLT, 2003).

Dentre os aços inoxidáveis martensíticos, há uma subcategoria chamada de aço inoxidável supermartensítico, da qual a liga do presente trabalho faz parte.

2.2.1 Aços inoxidáveis supermartensíticos (AISM)

Aços inoxidáveis supermartensíticos (AISM) são uma subclasse dos aços inoxidáveis martensíticos, que tem atraído grande interesse da área de exploração de petróleo e gás natural, por suas desejadas características aliadas ao relativo baixo custo de produção.

Há uma série de vantagens dos aços inoxidáveis supermartensíticos quando comparados com os inoxidáveis martensíticos convencionais, exibindo atributos superiores como boa soldabilidade, alta tenacidade, alta resistência mecânica e excelente resistência a corrosão (DIAS, 2009). Estes atributos, fazem-se de extrema importância em aplicações industriais em geral, mas em especial as petroquímicas, em virtude da dificuldade de se realizar manutenção em plataformas off-shore de águas profundas, uma vez que assim, a vida útil dos equipamentos é beneficiada, aumentando os intervalos de manutenção que por consequência reduzem os custos operacionais.

A melhoria das propriedades dos aços inoxidáveis supermartensíticos, obtém-se reduzindo o teor de carbono para que se tenha um aumento no conteúdo de cromo efetivo, presente em solução sólida na microestrutura da matriz. Além disso, adiciona-se níquel para se eliminar ou pelo menos diminuir a presença de ferrita- δ , assim como, acrescenta-se molibdênio a fim de melhorar as propriedades de corrosão da liga (ZEPON, 2013).

Além das características já mencionadas, os aços inoxidáveis supermartensíticos apresentam custo de produção significativamente menor que aços inoxidáveis com altos teores de Ni e Cr, como os inoxidáveis duplex e superduplex (MESQUITA et al., 2014).

Para ambientes corrosivos, os aços inoxidáveis austeníticos são comumente mais empregados, entretanto, em situações onde há contato deslizante em ambiente corrosivo, ocorre uma combinação de processos mecânicos (desgaste) e químicos (corrosão), conhecido como processos desgaste/corrosão, tendo um efeito muito mais danoso, do que cada processo ocorrendo individualmente (PETROVA; SUWATTANANONT, 2005). É no contexto deste tipo de aplicação que os aços inoxidáveis martensíticos, e especialmente os supermartensíticos se aplicam, como é fato consumado, a grande dureza da matriz martensítica proporciona boa resistência ao desgaste, e como já mencionado acima, sendo os AISM uma classe melhorada dos aços inoxidáveis martensíticos, com resistência a corrosão superior, eles se fazem ideais para aplicações sujeitas a processos desgaste/corrosão.

Os Aços inoxidáveis supermartensíticos podem ser classificados em 3 grupos de acordo com sua composição química, sendo eles baixa, média e alta liga, conforme tabela 3.

Tabela 3 - Composição química típica dos aços inoxidáveis supermartensíticos.

% p.	Baixa liga	Média Liga	Alta Liga
	11Cr-2Ni	13Cr-4,5Ni-1,5Mo	13Cr-6Ni-2,5Mo
C (% máx)	0,015	0,015	0,015
Mn (% máx)	2,0	2,0	2,0
P (% máx)	0,030	0,030	0,030
S (% máx)	0,002	0,002	0,002
Si (% máx)	0,4	0,4	0,4
Cu (% máx)	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6
Ni	1,5-2,5	4,0-5,0	6,0-7,0
Cr	10,5-11,5	11,0-13,0	11,0-13,0
Mo	0,1	1,0-2,0	2,0-3,0
N (% máx)	0,012	0,012	0,012
Fe	Balanço	Balanço	Balanço

Fonte: Zepon (2013).

2.2.2 Aços inoxidáveis supermartensíticos modificados com boro

A modificação superficial de materiais a fim de melhorar alguma propriedade vem sendo empregada por décadas. Processos como aspersão térmica, galvanização, deposição química de vapor (CVD), deposição física de vapor (FVD), cromagem, cementação, nitretação, todos visam alterar a superfície do material a que são empregados, e por consequência, aumentar a vida útil do mesmo. Também há a técnica de implantação de íons a uma profundidade na faixa dos micrômetros, tendo a capacidade de aumentar a dureza e melhorar a resistência a corrosão da área próxima à superfície (LEE et al., 1996). Esta técnica de implantação de íons já foi usada para implantar íons de boro em aço inoxidável austenítico 304, provocando um aumento da resistência ao desgaste deste material, entretanto, esse aumento não é creditado a formação de boretos, e sim, pela formação de martensita α' e eventualmente a interação dos átomos de boro dispersos com discordâncias. (RAUD et al., 1989).

Ligas que apresentam boro em sua composição, possuem a característica de ter grande resistência ao desgaste, isto se dá pelo fato, de o boro segregar nos contornos de grão, produzindo uma rede contínua tridimensional de boretos,

usualmente do tipo M_2B (sendo $M = Ni, Cr, Mo, Fe$), que têm elevada microdureza (ZEPON, 2013). Além disso, os boretos apresentam uma dureza superior à dos carbetos, quando estes forem ligados ao mesmo elemento (LIU et al., 2009).

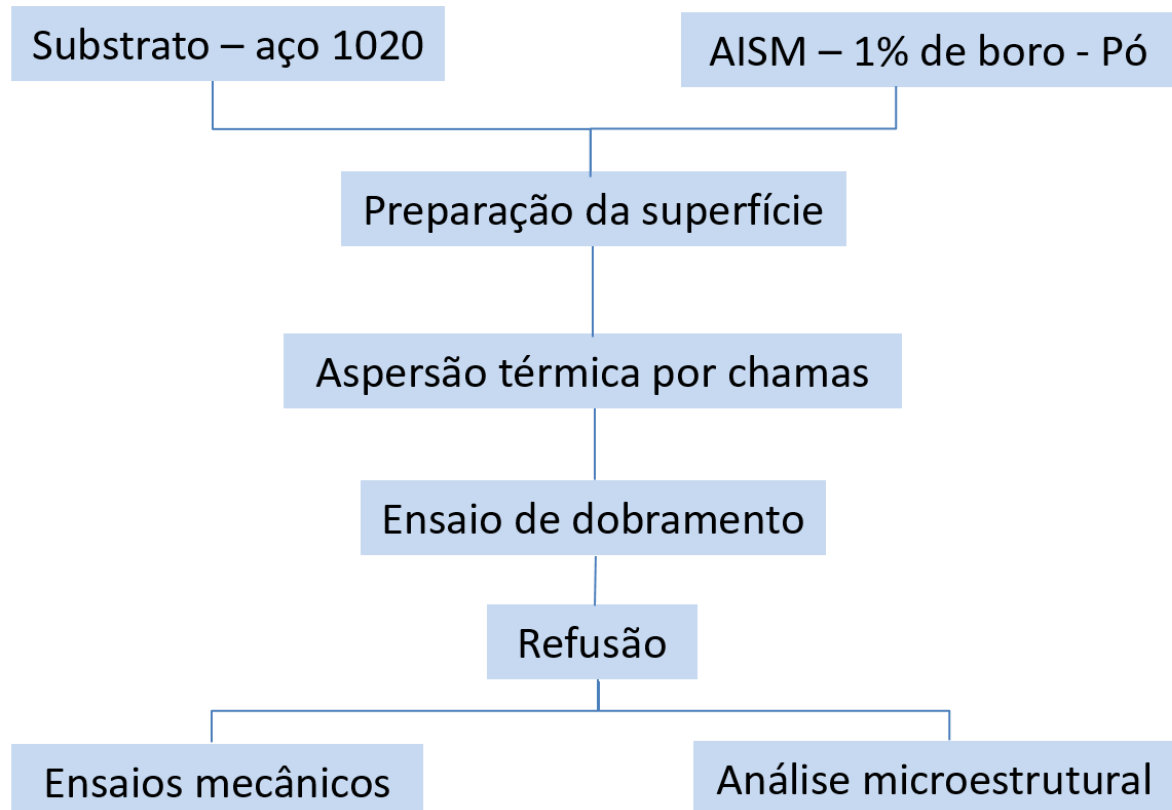
A solubilidade do boro em ligas ferrosas é extremamente baixa, sendo da ordem de 0,0005 a 0,008% em peso, sendo que valores acima desta faixa aumentam significativamente a chance da formação de boretos (GUO; KELLY, 2003). Além disso, segundo (TAYLOR; HANSEN, 1990) um conteúdo de boro na faixa de 10 a 20 ppm levou a um significativo aumento na dureza de uma liga de aço 0,2C – 0,6Mn – 0,5Mo que foi laminada a quente com subsequente têmpera e revenimento. Isto ocorreu pelo boro ter segregado nos contornos de grão da austenita, durante a têmpera, assim, suprimindo a nucleação da ferrita, inibindo o processo de difusão e obtendo uma estrutura final martensítica. Esta mesma liga, quando livre de boro e submetida aos mesmo processos, apresentou uma microestrutura final primordialmente bainítica, com dureza inferior. Também se obteve dureza inferior nos testes com conteúdo de boro entre 50 a 100 ppm, pois ocorreu precipitação de carbetos de boro nos contornos de grão da austenita, e estes, por sua vez, servem de sítios de nucleação para ferrita.

Fato é, que os aços inoxidáveis são usualmente solicitados para uso em ambientes corrosivos, entretanto, muitos destes ambientes também são sujeitos ao desgaste. Na modificação do aço inoxidável supermartensítico, (ZEPON, 2013) a adição do boro visa obter uma rede de boretos dispersos por toda a matriz martensítica, a fim de melhorar a resistência ao desgaste do AISM.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A figura 5 apresenta o fluxograma das etapas realizadas no transcorrer deste trabalho.

Figura 5 – Fluxograma das etapas.



Fonte: Autoria própria (2017).

3.1 LIGA PARA ASPERSÃO

O material usado neste processo de aspersão será fornecido na forma de pó com faixa granulométrica entre $\pm 53 \mu\text{m}$ a $\pm 75 \mu\text{m}$ e foi obtido por meio da dissertação de Guilherme Zepon utilizando o processo de conformação por spray. Zepon (2013) desenvolveu esta liga, aço inoxidável supermartensítico (AISM) modificada com boro, a fim de obter um revestimento pelo processo de conformação por spray, para avaliar qual seria a sua resistência ao desgaste. É relatado em sua dissertação que os revestimentos tiveram um rendimento aproximado de 60%, ou

seja, da massa fundida inicial apenas 60% é encontrada na massa do revestimento, e aproximadamente 40% formou pó, denominado de *overspray*, o qual será utilizado no presente trabalho.

Zepon (2013) identificou a seguinte composição química no depósito do AISM modificado com boro a 1%, a qual é apresentada na tabela 4.

Tabela 4 – Composição química do depósito do AISM modificado com boro a 1%.

Elementos (%p.)	AISM 1%B
C	0,067
Cr	10,99
Ni	4,95
Mo	0,96
B	0,68
N	0,017
Mn	0,41
Si	0,10
S	0,013
Cu	0,20
Nb	< 0,01
P	0,022
W	0,01
V	0,02
Ti	< 0,01
Fe	Balanço

Fonte: Zepon (2013).

Zepon (2013) observa que o teor de carbono encontrado é superior ao dos aços inoxidáveis supermartensíticos convencionais (< 0,03 %p.), e estima que isto se deve a possíveis contaminações ocorridas durante os processos de fundição e conformação por spray e/ou contaminação do cromo comercialmente puro. Já os teores de cromo, níquel e molibdênio estão dentro da faixa de composição para esta classe de aços. Verifica-se também que houve uma perda de boro na liga, isto ocorre

devido ao boro possuir elevada pressão de vapor em altas temperaturas, fazendo com que evapore antes mesmo de entrar em contato com o metal líquido.

3.2 SUBSTRATO

O substrato utilizado é de aço ABNT 1020 convencional, empregado na forma de chapa com as seguintes dimensões 75 mm x 50 mm x 1,2 mm (comp. x larg. x alt.).

Neste trabalho a limpeza do substrato foi efetuada utilizando-se ácido fosfórico (H_3PO_4) na concentração de 40% em peso. Este ácido é comumente empregado como removedor de ferrugem (óxido de ferro), uma vez que ele converte este óxido em um composto de fosfato que é solúvel em água. Todos os substratos foram submersos no ácido fosfórico, por um tempo de aproximadamente 30 a 40 segundos, sendo posteriormente lavados com álcool etílico 96%, e então secados com ar quente.

Além disso, o substrato deve possuir uma rugosidade adequada para proporcionar ancoramento mecânico ao depósito, que segundo a norma N-2568 da PETROBRAS, (2011), deve estar entre 75 e 120 μm de rugosidade R_y (distância pico-vale), enquanto a rugosidade R_a (rugosidade média) deve estar na faixa de 2,5 a 13 μm (LIMA; TREVISAN, 2007).

A rugosidade foi obtida através de esmerilhamento e avaliada usando o rugosímetro TR 220 da marca TIME, fornecido pelo laboratório de metrologia da UTFPR – campus Pato Branco, apresentado na figura 6. Deste equipamento foi obtido os valores de rugosidade máxima (R_y) e rugosidade média (R_a). Os parâmetros para efetuar a medição são cut-off de 2,5 mm, com número de cut-off igual a 5 e faixa de tolerância de $\pm 80 \mu m$.

Figura 6 – Medidor de rugosidade, TIME TR 220.



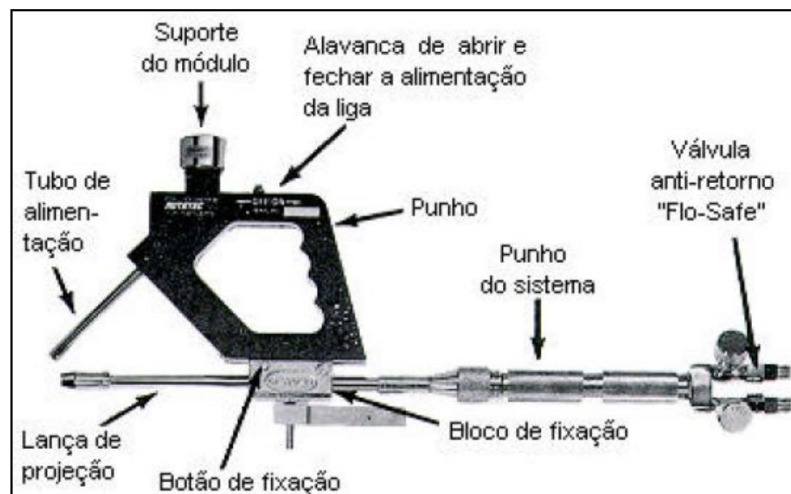
Fonte: TIME GROUP INC. (20--).

3.3 APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO

O processo utilizado para a obtenção do revestimento é a Aspersão Térmica por Chama, onde os gases utilizados foram o acetileno e o oxigênio, e foi aplicada no laboratório de soldagem da UTFPR – Câmpus Pato Branco.

O equipamento usado na aplicação consiste em uma pistola de aspersão térmica RotoTec 1A, fabricado pela Eutectic Castolin, que pode ser vista na figura 7 com suas respectivas partes retratadas.

Figura 7 – Pistola de aplicação RotoTec 1A.



Fonte: *Eutectic Castolin* (19--).

Seguindo as recomendações do manual de utilização da pistola RotoTec 1A, a pressão do acetileno foi regulada em 0,55 bar, enquanto a pressão de oxigênio foi regulada em 1,4 bar. E segundo a norma N – 2568 da Petrobrás (2011) a distância do bico da pistola ao substrato deve estar na faixa de 130 mm a 180 mm para o processo a chama.

Além disso, antes da aplicação do revestimento, realizou-se um pré-aquecimento do substrato, transladando, por algumas vezes, a tocha sobre a superfície do mesmo, durante um tempo de aproximadamente 10 a 15 segundos.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO

3.4.1 Metalografia

A metalografia seguiu os critérios da norma ASTM E1920-03 reprovada em 2008. Entretanto, haverá algumas discrepâncias com as recomendações da norma devido a indisponibilidade de equipamentos na instituição. A exemplo disto, é a recomendação que para metalografia de revestimentos por aspensão térmica, os processos de lixamento e polimento manuais não são recomendados devido a inconsistência e sensibilidade das amostras as técnicas de preparação. Além disso, para a realização do corte das amostras de revestimentos por aspensão térmica, recomenda-se a utilização de laminas de óxido de alumínio de aproximadamente 0,76 mm ou laminas de diamante com no máximo 0,63 mm de espessura.

Devido à dificuldade em encontrar as lâminas de corte adequadas, utilizou-se a lamina da marca Dewalt 8067 AR com dimensões 9" x 5/64" x 7/8" (230 mm x 2 mm x 22,23 mm) presente no laboratório h005. As amostras foram retiradas da região central da chapa, sendo subsequentemente embutidas a quente usando baquelite no equipamento da Arotec, modelo PRE-30S e lixadas empregando lixas com granas 120, 220, 320, 420, 600 e 1200, e polimento com alumina de 1 µm de granulometria.

3.4.2 Ensaio de Dureza

A dureza foi medida através do ensaio de micro dureza Vickers, utilizando um indentador piramidal de diamante. O equipamento utilizado é um microdurômetro TH710 da marca TIME, representado na figura 8, que se encontra no laboratório de ensaios (H005) da UTFPR – Campus Pato Branco. O teste de microdureza Vickers foi realizada em duas amostras sem refusão, ambas retiradas da chapa A4, e que para o ensaio de dureza serão chamadas de amostras D1 e D2. Também foi realizado ensaio de dureza em uma amostra com refusão com corrente de 30 amperes retirados da chapa A7, que para o teste de dureza será denominada amostra D3. Em cada amostra realizou-se 5 medições, sendo que a carga utilizada na realização do teste é de 50 gf, aplicada por um tempo de 15 segundos. Cada medição respeitou uma distância mínima de 3 a 4 diagonais entre cada indentação. Todos os parâmetros estão de acordo com a norma ABNT NBR NM ISO 6507-1 (2008).

Figura 8 – Microdurômetro modelo TH710 marca TIME.



Fonte: Autoria própria (2017).

3.4.3 Ensaio de Tração

Também foi realizado o teste de resistência adesiva por tração seguindo os critérios da norma (ASTM-C633-01, 2001). De acordo com o *Handbook of Thermal Spraying Technology (2004)* e a norma referida acima, aplica-se o revestimento em corpos de prova cilíndricos de 1 polegada (25,4 mm) de diâmetro, feitos de aços SAE 1018 ou SAE 1020, e na extremidade destes corpos de prova, um adesivo viscoso, comumente a base de epóxi, faz a ligação de ambos através da superfície do revestimento. Desta forma, através de um suporte com alinhamento correto, os corpos de prova são tracionados até a ruptura do adesivo e/ou revestimento. A força de ruptura é anotada e a partir da área da seção transversal dos corpos de prova, a tensão de ruptura pode ser calculada. Ainda segundo a ASTM, a espessura do revestimento deve ser de no mínimo 0,38 mm e a carga deve ser aplicada a uma velocidade constante ficando na faixa de 0,013 mm/s a 0,021 mm/s. Os tipos de falha que podem ocorrer neste ensaio segundo o *Handbook of*

Thermal Spraying Technology (2004) são: falha coesiva do revestimento (ocorre dentro do revestimento), falha adesiva do revestimento (ocorre na interface revestimento/substrato), falha coesiva do adesivo (ocorre dentro do adesivo), falha adesiva do adesivo (ocorre na interface adesivo/revestimento) e ainda pode ocorrer uma combinação de mais de um modo.

Neste trabalho, cada corpo de prova teve seu diâmetro avaliado com um paquímetro, marca Mitutoyo. O adesivo utilizado é um epóxi super-rápido da marca WURTH ESR-12, com data de validade 09/2017. Além disso, a velocidade de tracionamento dos corpos de prova foi de 1 mm/min (0,017 mm/s).

3.4.4 Ensaio de Dobramento

Outro teste a ser realizado a fim de avaliar a adesividade e coesividade do revestimento é o ensaio de dobramento. O ensaio é realizado seguindo as recomendações da norma N – 2568 da Petrobrás. O equipamento utilizado para realização deste teste é a máquina de ensaios universal, representado na figura 9, onde um mandril de 20 mm de diâmetro é pressionado contra a face oposta ao revestimento, dobrando o corpo de provas até atingir 180°. A face revestida, é posicionada sobre dois apoios inferiores separados por uma distância de 50 mm.

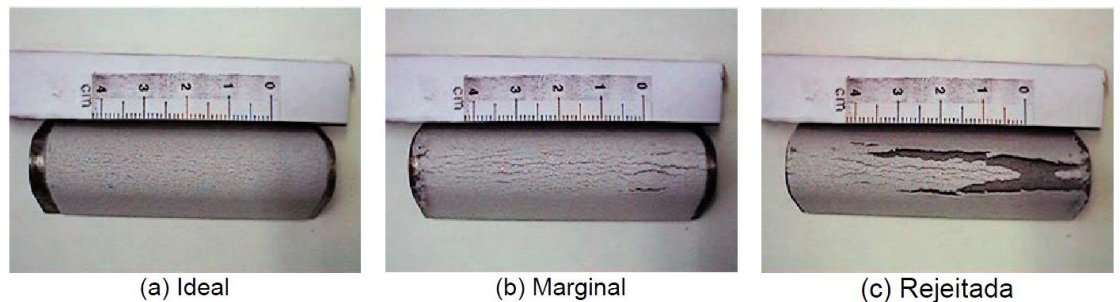
Figura 9 – Máquina de ensaios universal utilizada para realizar o ensaio de dobramento.



Fonte: Autoria própria (2017).

Ainda segundo a norma da Petrobrás, para o revestimento ser considerado ideal ele deve apresentar no máximo trincas superficiais finas e curtas, como pode ser visto na figura 10 (a). Um revestimento considerado marginal, figura 10 (b), é aquele em que com o auxílio de uma lâmina colocada entre as trincas, seria possível arrancar o revestimento. E um revestimento considerado rejeitado de imediato, pode ser visto na figura 10 (c), apresentando trincas de grande porte, com desgarramento e deslocamento do depósito.

Figura 10 – Condições de revestimento após teste de dobramento. Em (a) tem se um revestimento ideal. Em (b) e (c), revestimento marginal sujeito a teste com lâmina para aprovação e revestimento rejeitado, respectivamente.



Fonte1: PETROBRAS (2011).

3.4.5 Avaliação da Espessura

As espessuras dos depósitos foram medidas com o uso de um micrômetro da marca Insize, modelo IP54, disponível no laboratório de usinagem da UTFPR – Campus Pato Branco. A espessura de um revestimento é essencial para o correto desempenho de sua finalidade, e segundo a norma N – 2568 Petrobrás, a espessura ideal deve estar na faixa de 225 μm a 400 μm . Caso a espessura obtida esteja na faixa de 400 μm a 500 μm , o revestimento deve passar pelo teste da faca, que consiste em riscar o revestimento em um comprimento de aproximadamente 40 mm com o auxílio de um gancho ou navalha, até atingir o substrato, sendo que posteriormente, deve-se tentar destacar o revestimento utilizando uma navalha afiada ou estilete. Caso não ocorra o deslocamento do revestimento, este é considerado aprovado. Além disso, quando porventura, a espessura do revestimento for menor que 225 μm ou maior que 500 μm o revestimento é considerado reprovado pelo critério de avaliação da espessura.

3.4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Antes de realizar as análises com o MEV, as amostras com revestimento sem refusão, com revestimento refundido a 30 amperes e com revestimento refundido a 40 amperes foram atacadas com água régia (ácido nítrico e ácido clorídrico na proporção de 1 para 3, respectivamente), onde somente metade da seção embutida foi atacada, mergulhando metade da seção transversal das amostras embutidas na solução. As análises de MEV foram realizadas com um

equipamento da marca Hitachi, modelo TM-3000 sendo que tensão de aceleração utilizada foi de 15 kV. Equipamento disponível na Central de análises – Politec – UTFPR – Câmpus Pato Branco.

3.4.7 Difração de Raios-X (DRX)

As amostras de raio-x foram caracterizadas com o equipamento Rigaku, modelo Miniflex 600. Os parâmetros empregados foram passo de 2º/min, no intervalo de 5-90º. Equipamento disponível na Central de análises – Politec – UTFPR – Câmpus Pato Branco.

3.4.8 Refusão por Soldagem TIG

Tratamentos térmicos posteriores ao processo de metalização, como o processo de refusão, visam aumentar a densidade do revestimento, eliminando porosidades, e além disso, proporcionar uma maior homogeneidade ao mesmo (LEE; MIN, 2000).

Neste trabalho é realizada refusão com o auxílio de um equipamento de soldagem TIG (*tungsten inert gas*) marca ESAB, modelo Origo TA33, o qual pode ser visto na figura 11. Os parâmetros usados no processo de refusão para os substratos em formato de chapa são correntes de 30 A (CC-) e 40 A (CC-), com pressão de argônio a 1 bar. Já para os substratos cilíndricos utilizados no ensaio de tração, devido a sua maior espessura/altura (em torno de 38 mm), não foi possível criar a poça de fusão utilizando correntes nos valores acima citados, portanto, para os substratos cilíndricos a corrente empregada foi de 60 A (CC-). O eletrodo é de tungstênio com tório de 2,4 mm de diâmetro, possuindo em volta de 2% de tório segundo a Tecbrás.

Figura 11 – Equipamento de soldagem TIG utilizado para refusão. Marca ESAB, modelo Origo TA33



Fonte: Autoria própria (2017).

Para medida de comparação, NOVICKI et al. (2008) relatam o uso de refusão de revestimentos obtidos por aspersão térmica, empregando a técnica de refusão TIG em chapas de aço 1020 com 3,2 mm de espessura utilizando valores de corrente contínua (CC+) na faixa de 88 a 92 A.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RUGOSIDADE E ESPESSURA DO REVESTIMENTO

Para obter a rugosidade adequada a aplicação do revestimento, os substratos foram submetidos a uma etapa de esmerilhamento. Apesar de ser um processo manual e de relativo difícil controle, comparando com processos automatizados de obtenção de rugosidade, como, jateamento abrasivo, o processo mostrou-se eficiente, uma vez que os valores de rugosidade obtidos, encontram-se dentro, ou pelo menos, próximos as faixas de rugosidade Ra e Ry recomendadas.

Foi aferido a rugosidade de 10 substratos, onde em cada substrato realizou-se 5 medições de rugosidade. Destas 5 medições, obteve-se os valores das rugosidades Ra e Ry médios o quais são apresentados na tabela 5, com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 5 - Valores de rugosidade Ra e Ry e respectivos desvios padrão.

Amostra	Média Ra (μm)	Desvio padrão Ra (\pm)	Média Ry (μm)	Desvio padrão Ry (\pm)
A1	7,759	0,945	68,608	6,191
A2	7,694	1,741	71,910	2,235
A3	6,551	1,104	68,784	8,904
A4	7,179	1,157	75,190	5,560
A5	8,748	0,945	71,536	5,683
A6	11,474	0,529	92,208	6,560
A7	10,733	0,770	98,498	7,855
A8	10,377	1,360	85,582	8,276
A9	9,296	2,023	85,052	11,161
A10	9,700	1,154	86,704	5,762

Fonte: Autoria própria (2017).

Os valores da rugosidade Ra, que levam em conta a média aritmética das variações superficiais (saliências e reentrâncias) ficaram todos na faixa recomendada de 2,5 a 13 μm , além disso, a rugosidade Ra das 10 amostras apresenta uma média de 8,951 $\mu\text{m} \pm 1,640$. Já a rugosidade Ry, que representa o

maior pico das rugosidades parciais encontradas no percurso de medição, apresentou alguns valores fora da faixa recomendada, que é de 75 a 120 μm . As amostras A1, A3 e A5 apresentaram valores de rugosidade R_y abaixo do mínimo recomendado. Entretanto, a rugosidade R_y das 10 amostras exibe uma média de $80,407 \mu\text{m} \pm 10,578$, portanto, ficando dentro da faixa.

A espessura do revestimento foi avaliada com o uso de um micrômetro, onde realizou-se medição de espessura em 10 substratos. Em cada substrato realizou-se 5 medidas imediatamente antes e depois da aspersão. Das medições realizadas, 4 delas foram feitas nas proximidades dos vértices e 1 medição no centro geométrico. A partir das medições, calcularam-se as médias antes e depois da aspersão, sendo que, a espessura do revestimento consiste na diferença das médias. Na tabela 6 são apresentados os valores calculados das medias, desvio padrão e espessura do revestimento.

Tabela 6 - Valores obtidos das médias das espessuras das chapas sem e com revestimento, seus respectivos desvios padrão e a espessura do revestimento.

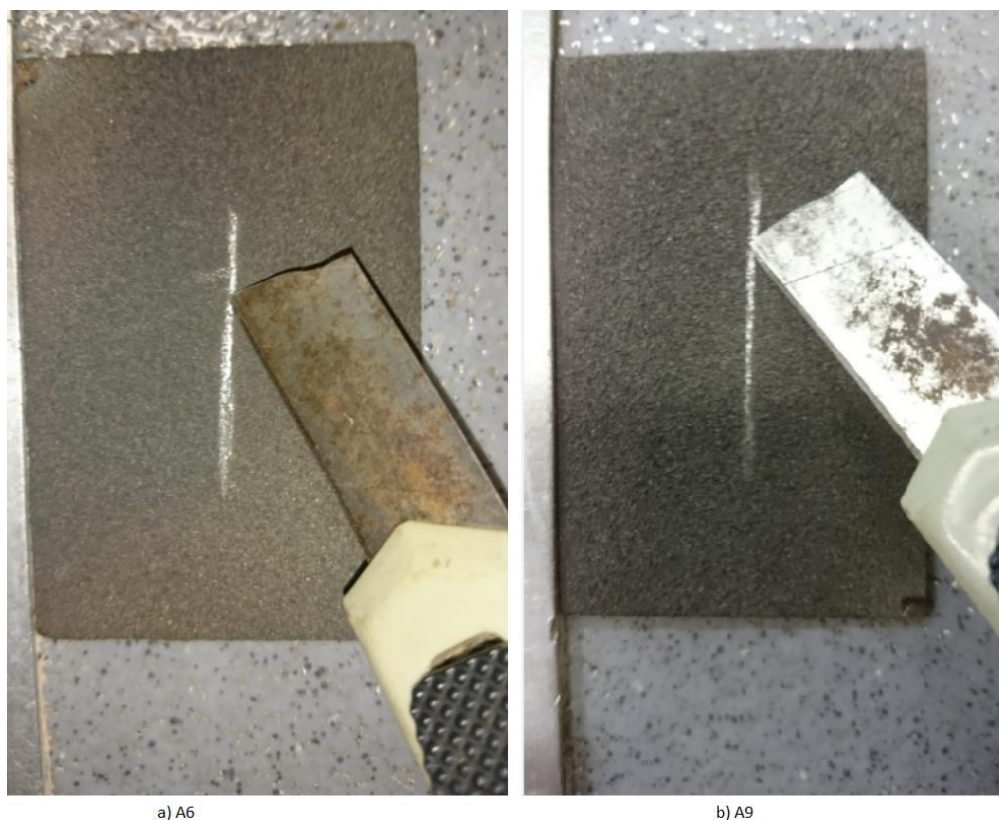
Amostra	Espessura chapa (mm)	Desvio padrão (\pm)	Espessura chapa/revestimento (mm)	Desvio padrão (\pm)	Espessura revestimento (mm)
A1	1,193	0,0101	1,424	0,0975	0,231
A2	1,187	0,0181	1,391	0,0361	0,204
A3	1,208	0,0477	1,401	0,0312	0,193
A4	1,185	0,0129	1,411	0,0392	0,226
A5	1,200	0,0101	1,405	0,0290	0,205
A6	1,200	0,0156	1,612	0,0475	0,412
A7	1,216	0,0125	1,549	0,1024	0,333
A8	1,214	0,0154	1,496	0,0548	0,282
A9	1,222	0,0115	1,673	0,0450	0,451
A10	1,211	0,0112	1,556	0,0468	0,345

Fonte: Autoria própria (2017).

Devido ao fato da aplicação do revestimento ser um processo manual, diversos fatores influenciam no controle do processo, como: a fluidez do pó, a força usada na agitação da pistola, o tempo total de aplicação e a prática do operador. Todos estes parâmetros acabam por influenciar na espessura final do revestimento, que como pode ser visto, apresentou variação nos resultados. Dos 10 substratos aspergidos, as amostras A2, A3 e A5 não atingiram a espessura mínima (225 μm)

recomendada na norma N-2568-b. Entretanto, as amostras A1, A4, A7, A8 e A10 ficaram dentro da faixa recomendada de 225 a 400 μm . Já as amostras A6 e A9, receberam uma espessura média acima de 400 μm , sendo necessário o teste da faca para sua aprovação. Utilizando-se uma faca com lâmina temperada, realizou-se um risco no revestimento, até atingir a superfície do substrato, e com a ajuda de um estilete, houve a tentativa de destacar o revestimento, como pode ser visto na figura 12.

Figura 12 - Teste da faca. Em a) e b) está representada a tentativa de destacamento no revestimento das amostras A6 e A9, respectivamente.



Fonte: Autoria própria (2017).

Em ambos os testes (A6 e A9) não houve qualquer indício de destacamento do revestimento, assim, ambos estão aprovados pelo critério de avaliação da espessura.

4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento foi realizado com o auxílio da máquina universal de ensaios. Onde o substrato é apoiado em dois suportes afastados a uma distância de 50 mm entre eles. A face em que foi aplicado o revestimento deve estar virada para baixo, e na parte de cima, um mandril de 20 mm de diâmetro é pressionado contra o substrato até que o mesmo seja dobrado em 180°. O avanço utilizado foi de 1 mm/s e o resultado pode ser visualizado na figura 13.

Figura 13 - Substrato utilizado em ensaio de dobramento.



Fonte: Autoria própria (2017).

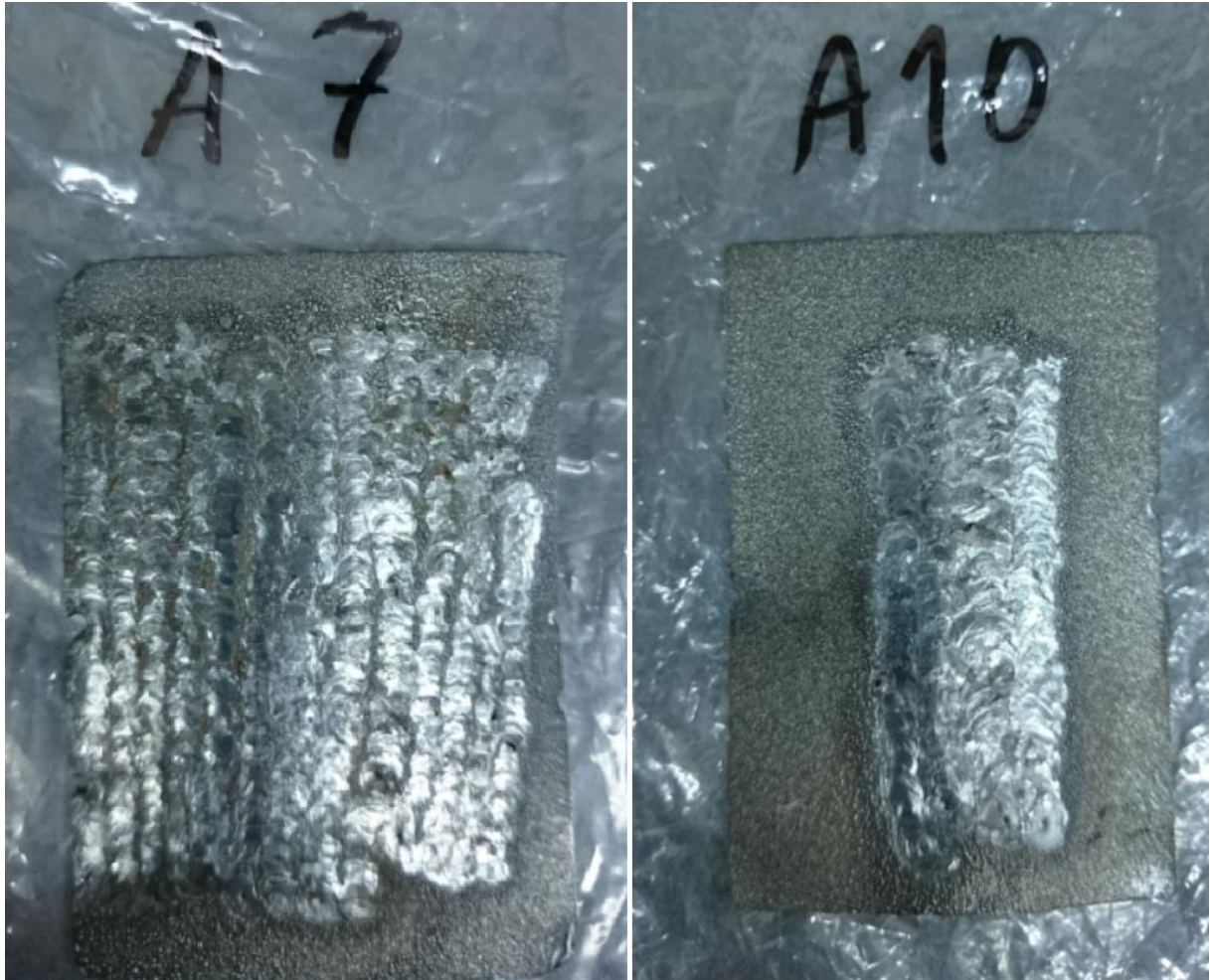
Como pode-se observar, o resultado do ensaio de dobramento classifica o revestimento como sendo ideal, uma vez que este não apresenta qualquer tipo de deslocamento, desgarramento ou mesmo microtrincas.

4.3 REFUSÃO POR SOLDAGEM TIG

O processo de refusão proporcionou boa homogeneidade dos cordões através de seu comprimento. Comparando ambas as amostras de refusão, representadas na figura 14, aquela onde se utilizou 30 A apresentou maior deformação que aquela feita com 40 A. Isso se dá devido ao fato de o tempo para se estabelecer uma poça de fusão consistente ser maior, assim, a velocidade de translação é menor, ocasionando um maior tempo de exposição a fonte de calor.

Além disso, verifica-se que a amostra com refusão a 40 amperes apresenta um cordão mais largo.

Figura 14 – Representação das amostras A7 e A10, com revestimento refundido utilizando TIG a 30 A e 40 A, respectivamente.



Fonte: Autoria própria (2017).

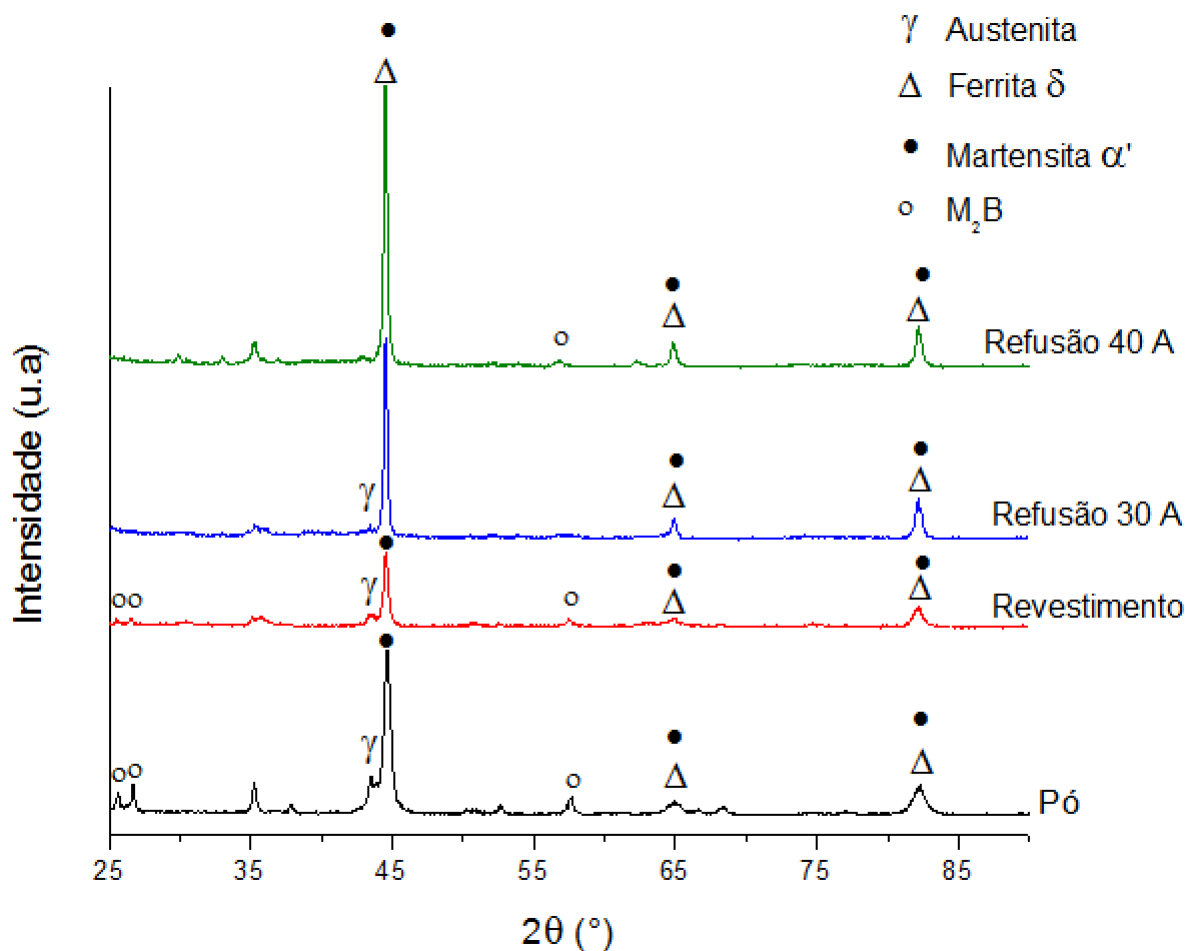
Durante a refusão, vale ressaltar a ocorrência de uma quantidade significativa de respingos, quando comparado ao processo de soldagem TIG. Estes respingos tendiam a grudar no eletrodo de tungstênio, fazendo com que o arco elétrico perdesse estabilidade após um único passe. Acredita-se que isso se deve ao fato das partículas mais externas do revestimento, estarem fracamente aderidas, provavelmente não completamente fundidas, fazendo com que as mesmas se desprendessem durante a fusão pela ação da pressão do arco elétrico. Entretanto, como os revestimentos por aspersão térmica geralmente passam por um processo

de acabamento, como usinagem, o processo de refusão poderia ser realizado depois do processo de acabamento, assim, mitigando este problema.

4.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX)

Na figura 15 são apresentados os difratogramas de raios-x do pó de aço inoxidável supermartensítico, do revestimento, e dos revestimentos refundidos por TIG utilizando corrente de 30 A e 40 A.

Figura 15 – Padrões de difração de raios-x relativos as amostras de pó, revestimento e revestimento refundidos com correntes de 30 A e 40 A.



Fonte: Autoria própria (2017).

Foram identificadas as fases cristalinas correspondentes a ferrita delta (δ), martensita (α'), austenita (γ) e boretos de Cr, Ni e Fe (M_2B). É possível identificar nos difratogramas das amostras de pó e revestimento que o pico de maior

intensidade revela que a fase martensítica é predominante, e os picos de menor intensidade revelam que há uma pequena presença de austenita e boretos. Nas amostras submetidas ao processo de refusão TIG (30A e 40A), a intensidade do pico principal é maior do que nas amostras supracitadas, sugerindo uma maior quantidade de martensita e a presença da ferrita delta (δ) (ver a seção 4.5). Como os picos da martensita e da ferrita delta se sobrepõem é difícil concluir qual a fase predominante.

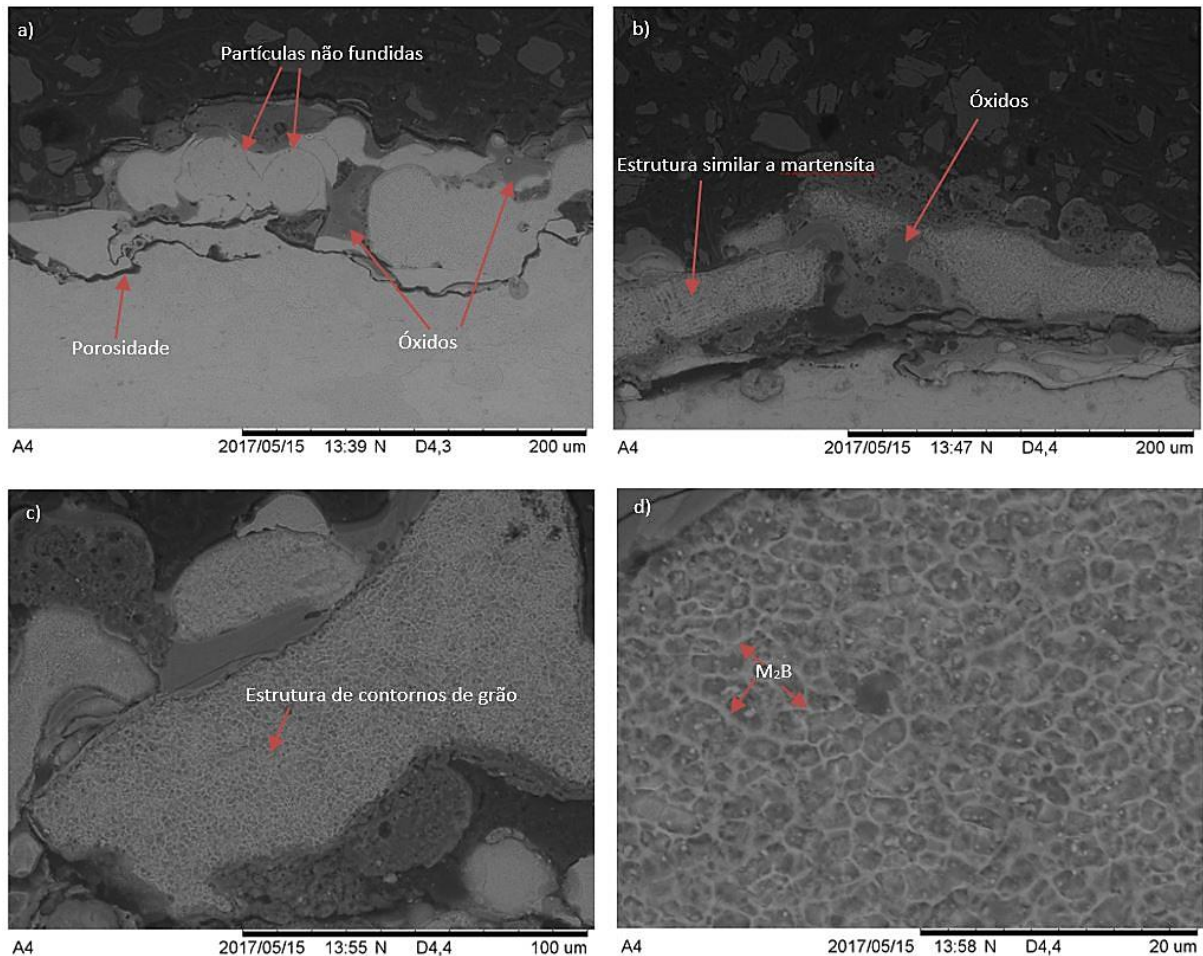
Garcia et al. (2015) ao estudar a influência da microestrutura na permeabilidade do hidrogênio em aços inoxidáveis martensítico-ferríticos, relata que os seus resultados de DRX indicam a presença da microestrutura martensita e ferrita delta (δ), sendo que estes picos estão se sobrepondo, não sendo possível diferenciá-los no intervalo 30-90° para os planos (110), (200) e (211). Além disso, também é citado que a tetragonalidade da martensita com baixo teor de carbono é menor, fazendo com que os parâmetros de rede da martensita (TCC) e da ferrita (CCC) sejam semelhantes. Levando-se em consideração somente os resultados de DRX, o autor pode concluir que a microestrutura era composta de 100% da fase ferrita, entretanto, com o auxílio de um analisador de imagens, verificou-se a quantidade de 78% da fase martensita e 22% da fase ferrita.

A difração de raios-x revela ainda que nas amostras refundidas a fase austenita (γ) diminui de quantidade na amostra refundida a 30 A e deixa de existir na amostra de 40 A. Ainda com relação a essas amostras percebe-se que alguns picos referentes aos boretos deixam de existir, sugerindo que a refusão provocou uma dissolução dos mesmos, sendo difícil no contexto desse trabalho analisar mais profundamente o mecanismo de dissolução dos boretos.

4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)

A figura 16 mostra a microestrutura da amostra sem refusão (A4) para diferentes valores de magnificação obtidos através da técnica MEV com detector de elétrons retroespalhados, onde é possível identificar algumas partículas não fundidas, estrutura característica de martensita, contornos de grão, precipitações de boretos, porosidades e óxidos.

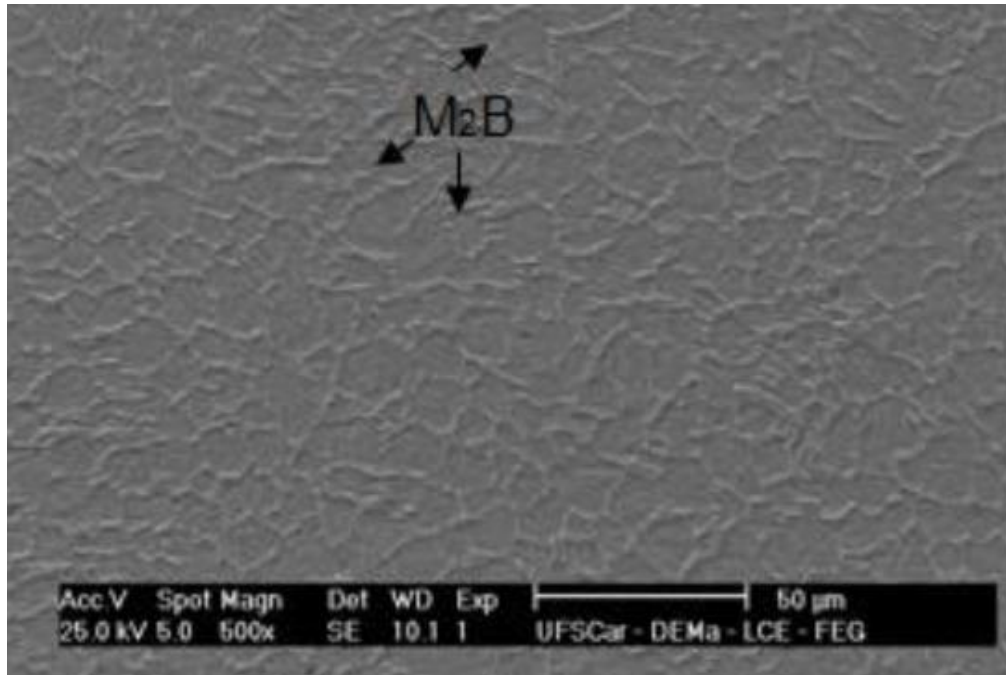
Figura 16 – Imagens de MEV para diferentes aumentos da amostra A4 (sem refusão): a) e b) 500x; c) 1000x; d) 4000x.



Fonte: Autoria própria (2017).

A presença de partículas não fundidas em (a) indica que a temperatura atingida no processo de aspersão por chama não é suficiente para fundir todo o pó que é aspergido. Em b) é possível observar uma microestrutura em formato de ripas, característica de matrizes martensíticas. Em c) e d) observa-se a estrutura de contorno de grãos, sendo que em d) percebe-se com mais clareza que a fase mais clara provavelmente trata-se da segregação de intermetálicos do tipo M_2B nos contornos de grão. Imagem esta semelhante a aquela relatada por Zepon (2013) em sua dissertação, a qual pode ser vista na figura 17.

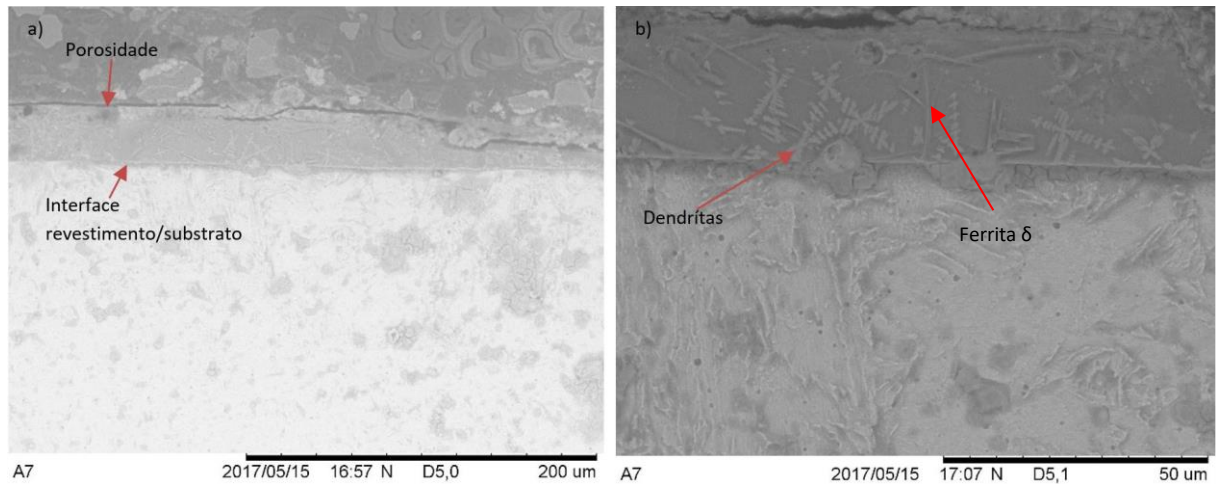
Figura 17 – AISM com 1% de boro.



Fonte: Zepon (2013).

A Figura 18 exibe a amostra A7 a qual passou por refusão a 30 A. Observa-se que houve uma redução nos níveis de porosidade do revestimento. Nota-se também a formação de estruturas dendríticas independentes ocorrendo em direções diversas, o que pode indicar que a nucleação não possui uma direção preferencial. Acredita-se que a matriz dessa amostra seja predominantemente de fase martensítica, apesar de não se poder aferir essa característica através das imagens de MEV devido a limitações técnicas do laboratório/equipamento. Partículas alongadas entre as dendritas revelam a presença de ferrita delta.

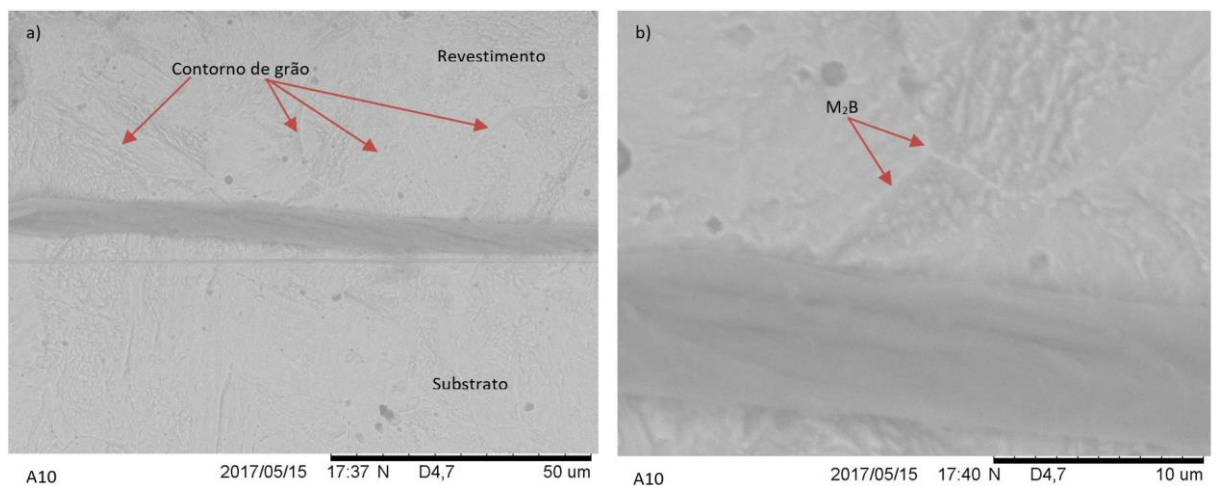
Figura 18 – Imagens de MEV para diferentes aumentos do revestimento refundido a 30 A: a) 500x; b) 1500x.



Fonte: Autoria própria (2017)

Pode-se observar na figura 19 que a porosidade do revestimento refundido a 40 amperes é ainda menor que o anterior e significativamente menor que o revestimento obtido sem refusão.

Figura 19 – Imagens de MEV para diferentes aumentos do revestimento refundido a 40 A: a) 1500x; b) 6000x.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na figura 19-a) é possível identificar os contornos de grãos do revestimento, sendo que em 19-b) através de uma maior magnificação observa-se segregação de boretos nos contornos de grãos, que é claramente menor que aquela observada na figura 17-d) para a amostra de revestimento sem refusão. Ainda se

sugere que a microestrutura da matriz é martensítica, apesar da qualidade da imagem prejudicar a visualização.

4.6 ENSAIO DE DUREZA

Na tabela 7 estão apresentados os resultados do ensaio de dureza.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de microdureza Vickers para as amostras sem refusão (D1 e D2) e a amostra com refusão a 30 A (D3) utilizando TIG.

Amostra	HV média (10 gf)	Desvio padrão (\pm)
D1	613,1	80,97
D2	576,5	22,75
D3	296,0	76,45

Fonte: Autoria própria (2017).

Observa-se que a microdureza Vickers da amostra com refusão, 296,0 HV (10 gf), é menor que as obtidas para as amostras sem refusão, média de 594,8 HV (10 gf). Este resultado está de acordo com aqueles obtidos nas análises de raios-X e das imagens de MEV, uma vez que, verificou-se uma redução na quantidade de boretos segregados nos contornos de grão, indicando que a refusão pode ter contribuído para dissolução dos boretos. Além disso, houve a tentativa de medir a microdureza em uma amostra que passou por refusão com corrente de 40 amperes, entretanto, mesmo reduzindo a carga de indentação ao mínimo do equipamento (10 gf), não foi possível realizar a medida, devido ao fato de que a camada de revestimento visível no microscópio ser extremamente fina.

Comparativamente, Zepon (2013) relata que revestimentos obtidos por conformação por spray da liga AISM comercial apresentaram microdureza de 337,3 HV \pm 12,6 (1 kgf), enquanto revestimentos de AISM com 1% de boro exibiram microdureza de 455,5 HV \pm 17,1 (1 kgf).

4.7 ENSAIO DE ADESÃO

Na tabela 8 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência a tração.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de adesão das amostras sem refusão.

Amostra	Força (kN)	Diâmetro (mm)	Tensão (MPa)
T1	4,100	25,40	8,091
T2	2,368	23,55	5,436
T3	3,946	23,55	9,059
T4	5,008	25,20	10,041
T5	4,219	25,25	8,426
T0 (Só com adesivo) 1º	6,863	23,50	15,823
T0 (Só com adesivo) 2º	9,304	23,50	21,451

Fonte: Autoria própria (2017).

As amostras com revestimento sem refusão apresentaram uma tensão média de ruptura de 8,211 MPa \pm 1,719 MPa. Enquanto a média da tensão das amostras somente com adesivo foi de 18,637 MPa \pm 3,979 MPa. Observa-se que a tensão obtida na amostra somente com o adesivo é maior do que as obtidas para as amostras com revestimento. Assim, pode-se inferir que as tensões obtidas das amostras com revestimento, equivalem exatamente a resistência adesiva/coesiva que estes revestimentos apresentam quando em contato com o adesivo epóxi.

Como medida de comparação, a norma N-2568 (2011) cita que o valor mínimo individual de aceitação para o teste de adesão de revestimentos de aço inoxidável aspergidos por chama é de 10 MPa. Dessa forma somente uma das amostras teria atingido o valor mínimo indicado pela N-2568.

Além disso, por meio de uma análise qualitativa das amostras após o teste de tração, pode-se verificar qual o mecanismo de falha que ocorreu, os quais podem ser vistos na figura 20. As amostras T1 e T5 apresentaram uma combinação de falhas, sendo elas na interface revestimento/substrato (falha adesiva do revestimento) e na interface adesivo/revestimento (falha adesiva do adesivo). As amostras T2 e T3 exibiram falha na interface revestimento/substrato. Já na amostra T4 a falha ocorreu na interface adesivo/revestimento.

Figura 20 – Mecanismos de falha no ensaio de adesão. T1) e T5) falhas adesiva do revestimento e adesiva do adesivo. T2) e T3) falha adesiva do revestimento. T4) falha adesiva do adesivo.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na tabela 9 são apresentados os resultados do ensaio de tração para as amostras com revestimento refundido a 60 A.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de adesão das amostras com refusão a 60 A.

Amostra	Força (kN)	Diâmetro (mm)	Tensão (MPa)
T1	2,480	25,40	4,894
T2	3,555	23,55	8,161
T3	2,428	23,55	5,574
T4	2,815	25,20	5,644
T5	3,477	25,25	6,944

Fonte: Autoria própria (2017).

As amostras com revestimento refundido a 60 A exibiram uma tensão média de ruptura de $6,244 \text{ MPa} \pm 1,304 \text{ MPa}$. Nota-se que esta tensão é menor que aquela obtida no ensaio com amostras sem refusão por uma margem de aproximadamente 23,9%. Entretanto, por meio de análise qualitativa das amostras, representada na figura 21, observa-se que em nenhuma delas houve qualquer deslocamento do revestimento, sendo que a ruptura sempre ocorreu na interface adesivo/revestimento (na maior parte da área transversal das amostras) com pequenos pontos onde ocorreu a falha dentro do adesivo.

Figura 21 – Mecanismos de falha das amostras com refusão a 60 A. Falha predominante ocorreu na interface adesivo revestimento.



Fonte: Autoria própria (2017).

A redução no valor da tensão média de ruptura pode ser explicada considerando que o processo de refusão ocasionou uma diminuição na rugosidade e/ou porosidade superficial do revestimento, fazendo com que a aderência entre revestimento refundido e o adesivo fosse prejudicada. Dessa forma, optou-se por realizar uma nova tentativa de ensaio com os substratos com revestimento refundido, mas dessa vez, antes da aplicação do adesivo, utilizou-se o esmeril para produzir certo nível de rugosidade na superfície do revestimento refundido. A tabela 10 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 10 – Resultado do ensaio de adesão das amostras com refusão a 60 A após geração de rugosidade.

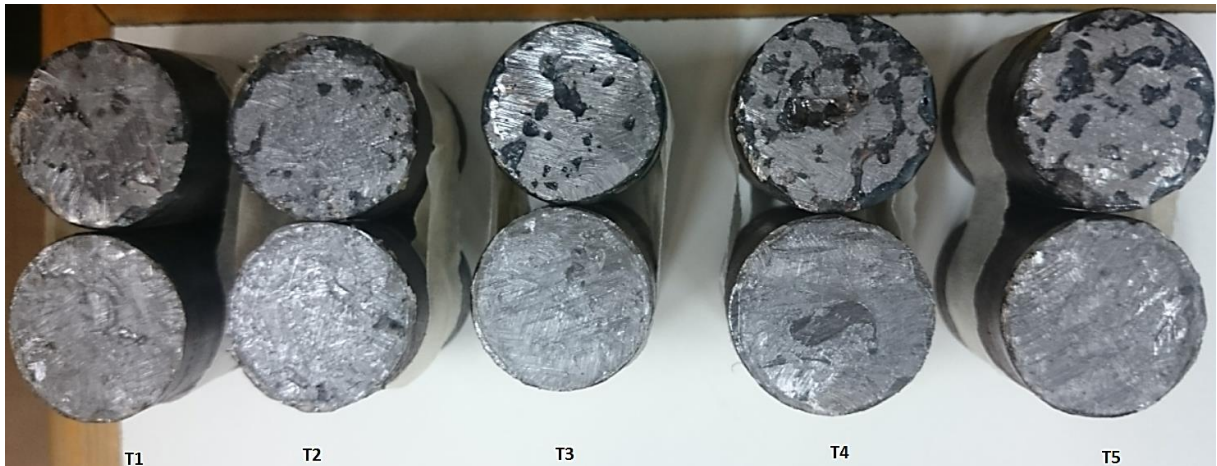
Amostra	Força (kN)	Diâmetro (mm)	Tensão (MPa)
T1	5,550	25,40	10,953
T2	4,620	23,55	10,606
T3	6,272	23,55	14,399
T4	4,910	25,20	9,844
T5	8,227	25,25	16,430

Fonte: Autoria própria (2017).

Verifica-se que as tensões de ruptura aumentaram apresentando um valor médio de 12,447 MPa \pm 2,831 MPa. Isto representa um aumento de 99,3% com relação ao ensaio com revestimento refundido, mas sem a geração da rugosidade com o esmeril, e um aumento de 51,6% com relação ao revestimento sem refusão.

Além disso, através de uma análise visual da superfície das amostras, representadas na figura 22, verifica-se que o mecanismo de falha principal, consiste numa combinação de falha na interface revestimento/adesivo e falha dentro do adesivo.

Figura 22 – Resultados das amostras com revestimento refundido e posterior geração de rugosidade. Combinação de falhas na interface revestimento/adesivo e dentro do adesivo.



Fonte: Autoria própria (2017).

Desta forma conclui-se que gerar rugosidade sob o revestimento se mostrou eficiente a fim de verificar com mais cautela a resistência do mesmo. Ainda, ressaltasse que em nenhuma amostra houve deslocamento do revestimento, sendo que todas as rupturas ocorrem na interface adesivo/revestimento ou internamente no adesivo.

4.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

A difratometria de raios-x identificou picos referentes a fase martensita em todas as amostras sendo que o pico principal apresentou maior intensidade nas amostras com revestimento refundido, considerando ainda a presença de ferrita delta. As amostras de pó e revestimento sem refusão, também apresentaram picos referentes a fase martensítica, o qual apresentou intensidade significativamente menor e a presença da fase austenita. Além disso, verificou-se a presença de

boretos em todas as amostras, os quais foram mais visíveis nas amostras de pó e revestimento sem refusão.

A microscopia eletrônica por varredura evidenciou a presença de uma quantidade de porosidades e óxidos significativamente maior na amostra sem refusão do que aquelas exibidas nas amostras refundidas. Ademais, a amostra sem refusão também expôs que partículas não fundidas ou semifundidas também fazem parte do revestimento. Estas características são comuns a revestimento obtidos pelo processo de aspersão térmica por chama, devido as baixas temperaturas e velocidades que as partículas são impulsionadas, inerentes a esta técnica.

O ensaio de dobramento resultou em uma amostra sem qualquer avaria no revestimento, assim, confirmando que a rugosidade obtida proporcionou ancoramento mecânico. Entretanto, os menores valores de resistência a adesão nas amostras com revestimento somente aspergidos, levaram a se optar pela alternativa da refusão por soldagem TIG.

No ensaio de dureza, verificamos que o revestimento com refusão TIG apresentou dureza de 296,0 HV (10 gf), inferior ao valor obtido no revestimento sem refusão, onde a média das duas amostras é de 594,8 HV (10 gf). Associando este resultado a aqueles obtidos através das análises de raios-X, acredita-se que esta redução na dureza esteja ligada ao fato de haver uma redução do teor de boretos segregados na amostra refundida.

O ensaio de adesão da amostra sem refusão, resultou numa ampla faixa de valores. Apesar do valor médio obtido de 8,211 MPa estar abaixo do valor recomendado (10MPa) pela norma N-2568 (2011) da Petrobras, no geral obteve-se valores próximos tendo um valor acima de 10 MPa, demonstrando, portanto, que é possível obter valores condizentes com a recomendação. Já o teste com as amostras refundidas a 60 A, necessitou que se desenvolvesse uma determinada rugosidade superficial no revestimento refundido, afim de que os valores do teste não fossem prejudicados pela falta adesão do próprio adesivo em relação a superfície do depósito refundido. Por fim esse ensaio demonstrou que o processo de refusão TIG é eficaz no sentido de aumentar a resistência a adesão dos revestimentos, uma vez que praticamente todos os testes obtiveram valores acima da recomendação, obtendo uma média de 12,447 MPa, e em nenhum momento houve qualquer descolamento do revestimento.

5 CONCLUSÕES

Os ensaios mecânicos iniciais (dobramento) mostraram que a técnica de aspersão térmica por chama mostrou-se adequada para obtenção de revestimentos da liga de aço inoxidável supermartensítico modificado com boro, entretanto os revestimentos obtidos apresentaram resistência a adesão relativamente baixa.

As amostras em que os revestimentos foram submetidos ao processo de refusão tiveram uma redução significativa da porosidade e um aumento na resistência a adesão. Os ensaios de microdureza revelaram que a dureza do revestimento refundido foi menor que a do revestimento sem refusão, consonante com a menor presença de precipitados M_2B nos revestimentos refundidos, a qual foi confirmada pela análise das imagens de microscopia eletrônica de varredura e dos difratogramas de raios-x.

O efeito da mudança microestrutural nas amostras refundidas, pode prejudicar a resistência ao desgaste assim como a baixa adesão das amostras somente aspergidas, sem refusão, pode prejudicar a resistência mecânica dos revestimentos. Estudos complementares devem ser realizados para uma melhor compreensão e para se sugerir melhorias.

A utilização do processo de aspersão térmica para obtenção de revestimentos da liga de aço inoxidável supermartensítico modificado com boro, assim como o processo de refusão por soldagem TIG do revestimento depois de aspergido se mostraram bons candidatos para desenvolvimentos futuros nessa linha de pesquisa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar qual a influência da variação dos parâmetros utilizados durante o processo de aspersão térmica por chama, como a distância entre substrato e bico de aspersão, rugosidade obtida por jateamento de granalha, esfriar o substrato aspergido utilizando água ou óleo a fim de tentar obter estrutura martensítica;
- Estudar a relação entre acabamento do substrato e superfície não revestida com a resistência a tração do adesivo.
- Estudar a influência da velocidade de soldagem e do fluxo de calor no processo de refusão TIG
- Avaliar o comportamento dos revestimentos obtidos da liga de aço inoxidável supermartensítico modificados com boro pela técnica de aspersão térmica por chama quando submetidos a ensaios de desgaste;
- Obter revestimentos desta liga através de outras técnicas como: HVFO e aspersão a arco elétrico;
- Estudar os revestimentos obtidos por aspersão térmica por chama desta liga através de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) a fim de identificar a composição química dos revestimentos, quando se provoca uma variação dos parâmetros do processo.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR NM ISO 6507-1 - Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers. , 2008.

ALVARES, C. et al. Microstructure and Mechanical Properties of Thermal Sprayed Nanostructured Cr₃C₂-Ni₂₀Cr Coatings 2 . *Materials and Methods*. v. 11, n. 2, p. 137–143, 2008.

ASTM-C633-01. **Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings**, 2001.

ASTM E1920. **Standard Guide for Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings**, 2003.

AWS. **Thermal Spraying : practice, theory, and application**. Miami, Fla.: American Welding Society, 1985.

BERNDT, C. C. et al. **Handbook of Thermal Spray Technology**. [s.l.] ASM International, 2004.

CALLISTER, J. W. D. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**. 5 ed ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

CHEN, S. et al. Microstructures and properties of double-ceramic-layer thermal barrier coatings of La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O_{7/8}YSZ made by atmospheric plasma spraying. **Applied Surface Science**, v. 340, p. 173–181, jun. 2015.

DAVIS, J. R. **Introduction to Thermal Spray Processing Handbook of Thermal Spray Technology**, 2004.

DIAS, G. P. **Avaliação da tenacidade à fratura de um aço inoxidável supermartensítico submetido à proteção catódica em água do mar**. [s.l.] UFRGS, 2009.

EUTECTIC CASTOLIN. **Manual de utilização do Processo : RotoTec 1A**, [s.d.].

FAUCHAIS, P.; VARDELLE, A. Thermal Sprayed Coatings Used Against Corrosion and Corrosive Wear. **Advanced Spray Applications**, p. 3–39, 2012.

GARCIA, D. C. S. et al. Influence of microstructure in the hydrogen permeation in martensitic-ferritic stainless steel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 47, p. 17102–17109, 2015.

GUO, C.; KELLY, P. . Boron solubility in Fe–Cr–B cast irons. **Materials Science and Engineering: A**, v. 352, n. 1–2, p. 40–45, jul. 2003.

HERMAN, H.; SAMPATH, S.; MCCUNE, R. Thermal spray: current status and future trends. **MRS bulletin**, v. 25, n. 7, p. 17–25, 2000.

LEE, C. H.; MIN, K. O. Effects of heat treatment on the microstructure and properties of HVOF-sprayed Ni–Cr–W–Mo–B alloy coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 132, n. 1, p. 49–57, 2000.

LEE, D. H. et al. Enhanced surface hardness by boron implantation in Nitinol alloy. **Journal of endodontics**, v. 22, n. 10, p. 543–6, out. 1996.

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

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. [s.l.] Wiley-Interscience, 2005.

LIU, Z. et al. High Boron Iron-Based Alloy and Its Modification. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v. 16, n. 3, p. 37–54, maio 2009.

MATIKAINEN, V. et al. Abrasion, Erosion and Cavitation Erosion Wear Properties of Thermally Sprayed Alumina Based Coatings. **Coatings**, v. 4, n. 1, p. 18–36, 2014.

MESQUITA, T. J. et al. Corrosion and metallurgical investigation of two supermartensitic stainless steels for oil and gas environments. **Corrosion Science**, v. 81, p. 152–161, abr. 2014.

NOVICKI, N.; PAREDES, R. C.; BUSCHINELLI, A. J. A. Aplicaçõa da aspersão térmica na recuperação de espessura na soldagem em operação do aço carbono 1020 e aço inoxidável AISI 304. 2008.

OLSSON, C.-O. .; LANDOLT, D. Passive films on stainless steels—chemistry, structure and growth. **Electrochimica Acta**, v. 48, n. 9, p. 1093–1104, abr. 2003.

PAREDES, R. S. C. **Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três**

processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marítima. [s.l.] UFSC, 1998.

PAWLOWSKI, L. **The science and engineering of thermal spray coatings.** [s.l.] John Wiley & Sons, 2008.

PETROBRAS. **N-2568: Revestimentos Metálicos por Aspersão Térmica,** 2011.

PETROVA, R. S.; SUWATTANANONT, N. Surface modification of ferrous alloys with boron. **Journal of Electronic Materials**, v. 34, n. 5, p. 575–582, 2005.

RAUD, S. et al. Wear resistance improvement and structural modifications of B+ implanted austenitic stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 115, p. 245–251, ago. 1989.

SIEGMANN, S.; ABERT, C. 100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop. **Surface and Coatings Technology**, v. 220, p. 3–13, 2013.

TAYLOR, K. A.; HANSEN, S. S. The boron hardenability effect in thermomechanically processed, direct-quenched 0.2 Pct C steels. **Metallurgical Transactions A**, v. 21, n. 6, p. 1697–1708, 1990.

WANG, Y. et al. Hydroxyapatite coating with strong (002) crystallographic texture deposited by micro-plasma spraying. **Materials Letters**, v. 185, p. 484–487, dez. 2016.

ZEPON, G. **Desenvolvimento do aço inoxidável supermartensítico resistente ao desgaste por conformação por spray para aplicação em “risers”.** [s.l.] UFSCar, 2013.