

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS MOURA SPEZIALI

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO, GÁS DE
PROTEÇÃO E TECIMENTO NA DILUIÇÃO E DUREZA DE
REVESTIMENTO DE INCONEL 625 AO SUBSTRATO DE AÇO
CARBONO POR PROCESSO MIG/MAG**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GOIÂNIA

2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

Nome completo do autor: Lucas Moura Speziali

Título do trabalho: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO, GÁS DE PROTEÇÃO E TECIMENTO NA DILUIÇÃO E DUREZA DE REVESTIMENTO DE INCONEL 625 AO SUBSTRATO DE AÇO CARBONO POR PROCESSO MIG/MAG

2. Informações de acesso ao documento:

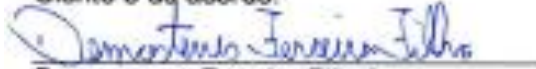
Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.


Lucas Moura Speziali²

Autor

Ciente e de acordo:


Demostenes Ferreira Filho²

Orientador

Data: 10 / 12 / 2018

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² As assinaturas devem ser originais sendo assinadas no próprio documento, imagens coladas não serão aceitas.

LUCAS MOURA SPEZIALI

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO, GÁS DE PROTEÇÃO E TECIMENTO NA DILUIÇÃO E DUREZA DE REVESTIMENTO DE INCONEL 625 AO SUBSTRATO DE AÇO CARBONO POR PROCESSO MIG/MAG

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao programa de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho

GOIÂNIA

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Moura Speziali, Lucas

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO, GÁS DE PROTEÇÃO E TECIMENTO NA DILUIÇÃO E DUREZA DE REVESTIMENTO DE INCONEL 625 AO SUBSTRATO DE AÇO CARBONO POR PROCESSO MIG/MAG [manuscrito] / Lucas Moura Speziali. - 2018.

LXVI, 66 f.

Orientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2018.

Bibliografia. Anexos.

Inclui gráfico, tabelas.

1. SOLDAGEM. 2. MIG/MAG. 3. INCONEL 625. 4. REVESTIMENTO. 5. DILUIÇÃO. I. Ferreira Filho, Demostenes , orient. II. Título.

CDU 621

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da monografia

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO, GÁS DE PROTEÇÃO
E TECIMENTO NA DILUIÇÃO E DUREZA DE REVESTIMENTO DE INCONEL
625 AO SUBSTRATO DE AÇO CARBONO POR PROCESSO MIG/MAG**

Por

Lucas Moura Speziali

Esta monografia foi apresentada às 14 horas do dia 10 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA, programa de graduação da Universidade Federal de Goiás. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.



Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho



Prof. Dr. Kleber Mendes de Figueiredo



Prof. Dr. José Lúcio Gonçalves Júnior

GOIÂNIA

2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pois sem ele nada seria possível, pelo sustento, força de vontade e resiliência que me proporcionou na caminhada até aqui;

Aos meus pais, Helcio e Lúcia, por terem me proporcionado acesso à educação para trilhar o caminho em que sigo e pelos exemplos de vida, retidão, caráter, honra e trabalho que tento seguir em minha vida;

À minha namorada Letícia, por ter me apoiado na maior parte desta jornada na faculdade, sempre me ajudando a superar os desafios;

Aos amigos que fiz na faculdade para levar para a vida, Henrique, Ygor, Pablo, Yuri e Daniel, e a todos os outros alunos da iniciação científica que tanto auxiliaram no desenvolvimento dos experimentos e análises, sem eles não teria sido possível a realização deste trabalho;

Ao meu orientador, Professor Demostenes, primeiramente pela oportunidade dada de poder aprender mais e aplicar os conhecimentos adquiridos na prática, pelo suporte desde a Iniciação Científica e em todas as dificuldades pelo caminho;

Aos técnicos da Engenharia Mecânica da UFG, Fleide e João pela amizade, ensinamentos e apoio na fabricação de tudo que foi necessário ao trabalho e André pela amizade, no auxílio em todos os equipamentos queimados, que não foram poucos, e suporte na parte elétrica do trabalho.

À CAPES e ao CNPQ pelo apoio e subsídio financeiro ao trabalho.

RESUMO

O revestimento por soldagem é um método cada vez mais empregado para fabricação de peças resistentes ao desgaste e à corrosão, uma vez que permite a fabricação de peças com materiais de menor custo, aplicando-se materiais mais nobres na superfície para se alcançar as propriedades desejadas. O presente trabalho aborda a influência da variação de três parâmetros no revestimento de uma liga de Níquel (Inconel 625) por soldagem MIG/MAG em um substrato de aço-carbono, variando-se o gás de proteção e a temperatura de pré-aquecimento, com o intuito de se determinar o parâmetro mais adequado para se realizar o processo de revestimento em função de não haver alta diluição do cordão de solda no substrato, concorrendo em perdas significativas na dureza do material de revestimento. Aborda-se ainda a soldagem com a técnica de tecimento, para avaliar se é ou não vantajoso para o processo a utilização de tecimento. Os principais resultados obtidos foram aumento da diluição para uso do tecimento, aumento da temperatura de pré-aquecimento, e maiores quantidades de gás ativo no gás de proteção. Para a soldagem com Ar+25%He houve também aumento da diluição para maiores temperaturas de pré-aquecimento. Com o aumento da diluição, para maiores temperaturas e gás ativo houve redução na dureza. O tecimento não teve comportamento claro em relação à dureza do revestimento.

Palavras chave: SOLDAGEM, MIG/MAG, INCONEL 625, REVESTIMENTO, DILUIÇÃO.

ABSTRACT

Welding coating is an increasingly used method for the manufacture of wear and corrosion resistant parts, since it allows the manufacture of parts with lower cost materials, applying more noble materials to the surface to achieve the desired properties. The present work deals with the influence of the variation of three parameters on the coating of a Nickel alloy (Inconel 625) by MIG / MAG welding on a carbon steel substrate, varying the protection gas and the preheating temperature, with the purpose of determining the most suitable parameter to perform the coating process in function of not having high dilution of the weld bead in the substrate, concurring in significant losses in the hardness of the coating material. Welding is also contemplated with the weaving technique, in order to assess whether or not the use of weaving is advantageous for the process. The main results were increased dilution for use of the fabric, increase of the preheating temperature, and larger amounts of active gas in the protection gas. For welding with Ar + 25% He also increased the dilution for higher preheating temperatures. With increasing dilution, for higher temperatures and active gas there was reduction in hardness. The weave had no clear behavior with respect to the hardness of the coating.

Keywords: Welding, MIG/MAG, INCONEL 625, Coating, Dilution.

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 | Contextualização..... | 9 |
| 1.2 | Objetivos..... | 10 |
| 1.3 | Estrutura..... | 10 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 11 |
| 2.1 | INCONEL 625..... | 11 |
| 2.2 | Revestimento | 12 |
| 2.2.1 | Revestimento de peças por soldagem..... | 13 |
| 2.3 | Revestimento de Peças com Ligas de Níquel..... | 16 |
| 2.4 | Estado da Arte..... | 17 |
| 3 | MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 21 |
| 3.1 | Materiais e Equipamentos..... | 21 |
| 3.1.1 | Consumíveis..... | 21 |
| 3.1.2 | Equipamentos..... | 22 |
| 3.2 | Procedimento Experimental..... | 29 |
| 3.2.1 | Confecção das placas de teste | 29 |
| 3.2.2 | Adaptações do Manipulador Robótico para Soldagem | 30 |
| 3.2.3 | Programação do braço robótico..... | 31 |
| 3.2.4 | Procedimento de pré-aquecimento das placas de teste | 32 |
| 3.2.5 | Revestimento das placas de teste..... | 33 |
| 3.2.6 | Confecção dos Corpos de Prova..... | 34 |
| 3.2.7 | Análise das amostras | 35 |
| 4 | RESULTADOS..... | 39 |
| 4.1 | Análise de Diluição..... | 39 |
| 4.1.1 | Influência do uso do tecimento na diluição..... | 39 |
| 4.1.2 | Influência do pré-aquecimento na diluição | 41 |
| 4.1.3 | Influência do gás de proteção na diluição | 44 |
| 4.2 | Análise de Dureza..... | 47 |
| 4.3 | Análise do Perfil do Cordão de Solda..... | 51 |
| 4.4 | Aplicabilidade do revestimento por soldagem..... | 54 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 55 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 56 |
| 7 | REFERÊNCIAS | 57 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As descobertas e intensificação de exploração do petróleo no pré-sal demanda por equipamentos que suportem o ambiente extremamente agressivo a que serão submetidos para esta exploração de modo que tenham também vida útil maior possível, para que não haja necessidade de interferências no bom funcionamento.

Na literatura encontra-se problemas em indústrias petrolíferas e químicas pelo desgaste corrosivo na superfície de equipamentos e tubulações, já nas indústrias alimentícias o desgaste abrasivo afeta significativamente equipamentos de moagem e transporte e a soldagem é largamente utilizada para recuperação de peças desgastadas e vêm se tornando mais comum o revestimento de peças que sofrerão desgaste uma vez que a fabricação exclusivamente com um material mais resistente acaba por dificultar ou tornar impraticável a viabilidade da fabricação devido ao custo

Neste cenário, vem tornando-se comum a prática de revestimento de peças e tubulações com materiais mais nobres, mantendo o corpo da peça em material de custo inferior e proporcionando superfícies com propriedades desejadas à custo mais acessível. Assim, o revestimento por soldagem se destaca neste tipo de aplicação.

Segundo Gittos e Gooch (1996) a aplicação de soldagem de revestimento de metais de adição de níquel sobre esses equipamentos tem aumentado significativamente as vidas úteis dos mesmos, que são projetados para uma vida de aproximadamente 20 anos.

Segundo Gomes (2010), a soldagem de revestimento de peças de aços carbono com outras ligas “tem ganhado destaque no meio industrial nos últimos anos por permitir que superfícies com propriedades anticorrosivas sejam obtidas a partir de materiais de baixo custo, como os aços carbono ou aços de baixa liga. No entanto, visando garantir a qualidade final dos revestimentos, é importante que o procedimento de soldagem empregado seja bem ajustado”.

Para Magalhães (2008), “O processo de soldagem MIG/MAG é largamente utilizado na fabricação de componentes revestidos em função da boa produtividade,

flexibilidade e custo relativamente barato. A qualidade das soldas realizadas com este processo é muito dependente do controle adequado da transferência metálica.”

Magalhães (2008) reitera a necessidade de mais estudos na área que permitam aprofundamento do conhecimento para esta área da soldagem, com resultados sólidos para a soldagem de revestimentos de ligas de níquel.

1.2 Objetivos

Portanto, este trabalho tem por objetivo, determinar a influência do aumento de gases ativos no gás de proteção da soldagem de revestimento do Inconel 625, o pré-aquecimento do substrato para o revestimento e o uso do tecimento, avaliando como isto altera a diluição, a dureza e o perfil do cordão de solda com o intuito de tornar mais acessível a boa aplicação deste processo na indústria.

1.3 Estrutura

Neste tópico é apresentado como se deu a estruturação do trabalho pelas divisões feitas de modo a facilitar a compreensão.

- O Capítulo II contém a revisão bibliográfica. Ele consiste de todo o suporte teórico e técnico que foi utilizado em algum momento deste trabalho.
- O Capítulo III apresenta os materiais utilizados e o procedimento experimental.
- O Capítulo IV apresenta os resultados obtidos da análise das amostras realizadas
- O Capítulo V apresenta as conclusões que foram absorvidas do experimento.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as referências utilizadas e fornece o subsídio para as discussões do trabalho.

2.1 INCONEL 625

O Inconel 625 é uma superliga a base de níquel endurecida por solução sólida, ou seja, alojamento de átomos de elementos em menor quantidade na liga (soluto) ocupando espaços na rede cristalina do material mais abundante (solvente) e precipitação de carbonetos (Tavares, 2016).

As superligas são divididas em três grandes grupos, de Níquel, de Ferro e de Cobalto, levando em conta o elemento dominante na composição e foram desenvolvidas para aplicações em temperaturas elevadas. “Os principais mecanismos responsáveis pelas notáveis propriedades das superligas são endurecimento por precipitação e endurecimento por solução sólida”. (Costa e Mei, 1988).

O Inconel 625 possui grande resistência à corrosão devido às grandes quantidades de Cr e Mo presentes. A matriz de níquel tem grande diferença no comportamento do material pois “A propriedade mais importante do níquel é a sua capacidade de dissolver e manter em solução quantidades significativas dos principais elementos de liga utilizados para criar outras ligas. São ligas complexas e possuem uma variedade de elementos como cromo, nióbio, molibdênio, ferro, tungstênio, titânio, entre outros elementos.” (Tavares, 2016).

No universo das superligas de Níquel o Inconel 625 vem ganhando destaque no uso em revestimento interno de dutos rígidos, (Lemos, 2016), exploração de petróleo em ambientes hostis (Zilio et all, 2014) e unidades de produção e refino (Pessoa, 2009).

Sua composição química é apresentada na Tabela 2.1.

TABELA 2.1: Composição química em porcentagem por elemento do Inconel625.

| | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------|---------------------|
| Níquel | 58.0 mínimo | Silício | 0.5 máximo |
| Cromo | 20.0 – 23.0 | Fósforo | 0.015 máximo |
| Ferro | 5.0 máximo | Enxofre | 0.015 máximo |
| Molibdênio | 9.0 – 10.0 | Alumínio | 0.40 máximo |
| Nióbio | 3.15 – 4.15 | Titânio | 0.40 máximo |
| Carbono | 0.1 máximo | Cobalto | 1.0 máximo |
| Manganês | 0.5 máximo | | |

Fonte: Adaptado de Special Metals (2017)

De acordo com (Callister, 2007), “o níquel é frequentemente usado como revestimento, sendo depositado sobre alguns metais susceptíveis à corrosão, como medida de proteção”. O Níquel e suas ligas são aplicados como revestimento sobre aços carbono e outros materiais (Magalhães, 2008).

2.2 Revestimento

Ligas na forma de revestimento são muito utilizadas com o intuito de redução de custos. Nessa condição é possível proporcionar ao equipamento a resistência à corrosão desejada, aliada a manutenção das demais características pré-existentes do substrato. (Zilio et al, 2014).

Ribeiro (2017), cita os processos de revestimento por co-extrusão, quando se extruda simultaneamente chapas de dois ou mais materiais distintos de forma que fiquem sobrepostas e o revestimento por explosão, utilizado para unir materiais dissimilares que suportem a explosão sem se romper, tendo por vantagem para os dois processos a união de grandes áreas simultaneamente e alta produtividade.

O processo de manufatura do revestimento pode ser realizado de diversas maneiras. Laminação a quente, soldagem por explosão, aspersão térmica, recobrimento com solda (overlay) e recobrimento com chapa (lining) são métodos de

produzir materiais revestidos. Em geral, este recobrimento é feito por processos comuns de soldagem como MIG/MAG, arame tubular, arco submerso e plasma. (Magalhães, 2008).

Para o revestimento em grandes áreas superficiais a soldagem MIG tem sido uma das mais utilizadas pela sua elevada produtividade, facilidade de operação, mecanização e acessibilidade (Mota, 2016).

2.2.1 Revestimento de peças por soldagem

Processos de soldagem ou processos afins são também utilizados na recuperação de peças desgastadas, para a aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas e para corte. O sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua relativa simplicidade operacional (Modenesi, 2012).

Devido à esta simplicidade relatada por Modenesi (2012), o processo de soldagem é largamente utilizado no dia-a-dia de indústrias, oficinas, serralherias, torneadoras, etc, para a fabricação de novos componentes e estruturas, reparo e manutenção necessários em peças e estruturas com desgaste ou que já sofreram falhas e ainda para o revestimento de peças que serão utilizadas em ambiente agressivo como tubulações petrolíferas, transportadores helicoidais que sofrem intenso desgaste por atrito, rolos de moinhos, entre outros.

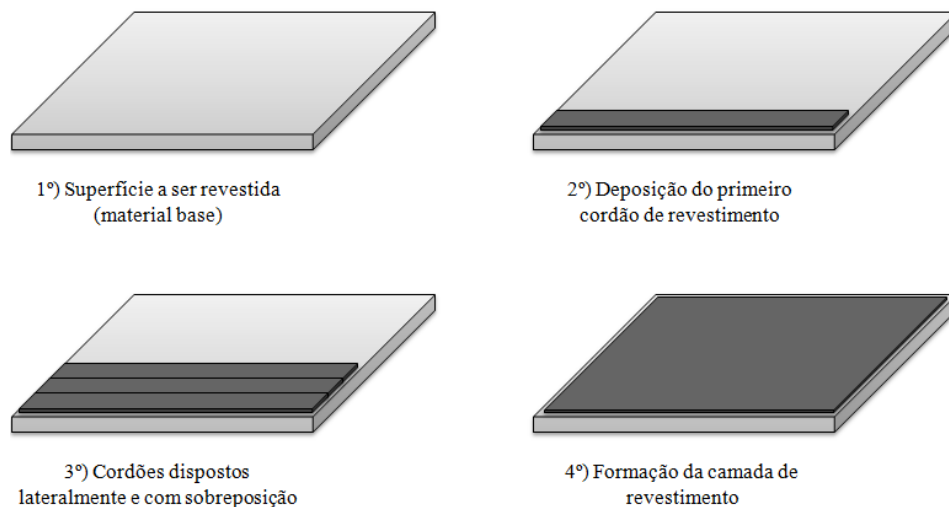
A maioria dos revestimentos metálicos são compostos de metais como aços inoxidáveis, ligas de níquel e ligas de cobre soldados sobre aços carbono e aços baixa liga. A espessura do revestimento geralmente varia entre 5 e 20% da espessura do substrato. A vantagem do revestimento é promover, a partir de um baixo custo relativo, os benefícios de materiais mais caros, que possuem características de resistência à corrosão, resistência à abrasão e outras (Magalhães, 2008).

De acordo com Gomes (2010), a soldagem de revestimento de peças de aços carbono com outras ligas tem ganhado destaque no meio industrial nos últimos anos por permitir a fabricação de superfícies com propriedades anticorrosivas tendo como substrato materiais de baixo custo, como os aços carbono ou aços de baixa liga. No entanto, para garantir a qualidade final dos revestimentos é necessário que os parâmetros estejam bem ajustados.

O processo visa alcançar peças com superfícies de materiais com as características necessárias, como dureza ou resistência à corrosão, sem que a peça seja toda fabricada no material da superfície, o que poderia resultar em inviabilidade da construção devido ao custo destes materiais mais nobres. Sendo assim utiliza-se um substrato de material com custo menor, como aços carbono até 0,4%, e aplica-se uma camada do material de revestimento na superfície, para que apenas a superfície possua o material resistente, reduzindo assim o custo de fabricação da peça. Este processo é largamente aplicado em indústrias alimentícias, sucroalcooleiras e petrolíferas, em trituradores que necessitam de grande dureza para não se desgastar e ferramentas de escavação de poços que são submetidos à um ambiente extremamente corrosivo. Além da fabricação de peças por revestimento, o processo pode ser usado também para reparar peças revestidas que já sofreram desgaste.

O princípio da soldagem de revestimento é mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Processo de revestimento por soldagem



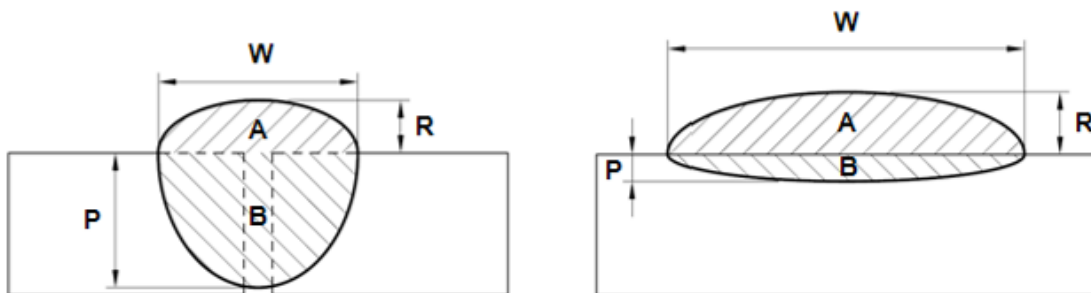
Fonte: Gomes (2010)

Entretanto, o processo de revestimento por soldagem ainda necessita de grande estudo, uma vez que difere muito do processo de soldagem convencional. Segundo Gomes (2010), a principal diferença da soldagem de revestimento se comparado em às aplicações convencionais é relacionada à geometria do cordão. Nas aplicações convencionais é desejável alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada, já na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado é

definido por grandes larguras do cordão (W), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D).

A obtenção do perfil conforme descrito por Gomes é um ponto-chave do processo de revestimento por soldagem, pois com um cordão assim recobre uma maior área com menos passes, economizando a quantidade de material necessária para recobrir uma superfície e otimizando significativamente o tempo. Portanto, é de suma importância ter os parâmetros de soldagem definidos e ajustados para obtenção de cordões com o perfil e geometria citado. Os parâmetros mencionados na citação de Gomes (2010) são mostrados na Figura 2.2.

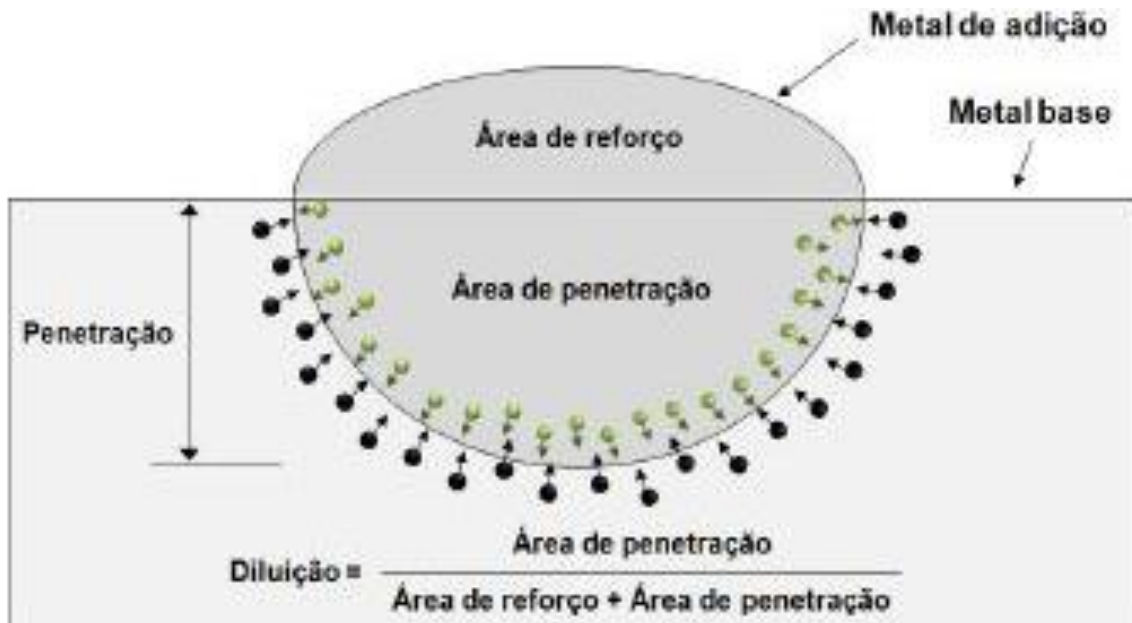
Figura 2.2: Parâmetros de medida do cordão de solda



Fonte: Gomes (2010)

É de grande importância que se tenha cautela quanto à diluição (Figura 2.3) do cordão de solda no substrato, uma vez que se esta não for baixa (menor que 20% de acordo com Magalhães 2008), como em juntas soldadas comuns, ocorrerá difusão de átomos dos materiais do metal de adição para o substrato e vice-versa, concorrendo em perda das propriedades do metal de adição. A norma ISO 10423 estabelece que para um revestimento de Inconel 625, a condição ótima de diluição química de Ferro no revestimento é menor que 5%. O Ferro presente no revestimento deve ser oriundo da própria composição química do mesmo, devendo-se evitar ao máximo a difusão do metal de base. Quanto menor a diluição do revestimento, menor é a difusão.

Figura 2.3: Diluição de um cordão de solda



Fonte: Gomes (2010)

As superligas de níquel têm sido usadas com frequência no revestimento de superfícies para a proteção de substratos estruturais edificados, por exemplo, em aço carbono, com vistas a aumentar a vida útil do equipamento, reduzir custos e minimizar intervenções em manutenção não programada. Além disso, a sua excelente soldabilidade potencializa a deposição de soldas robustas e livres de defeitos, os quais, se presentes, podem causar danos, a ruptura ou até o colapso da estrutura com risco de acidentes catastróficos por explosões e/ou vazamento de produtos tóxicos armazenados ou transportados (Mota, 2016).

2.3 Revestimento de Peças com Ligas de Níquel

Atualmente, uma gama de ligas a base de níquel tem sido desenvolvida e amplia seu espaço de aplicação nas indústrias petroquímica, nuclear e aeroespacial, devido à possibilidade de operarem em condições severas de temperatura e pressão, mantendo adequada resistência à corrosão e ao desgaste. A aplicação de forma apropriada desses materiais, de custo intrinsecamente elevado, pode permitir uma melhor relação custo benefício, quando se considera a vida útil sob determinada condição de operação (Magalhães, 2008).

Segundo (DEACON, 2007; Apud Tavares, 2016), as superligas à base de níquel combinam elevada resistência mecânica a alta temperatura com uma ótima resistência à corrosão, o que as tornaram especialmente destinadas a aplicações em

alta temperatura. Sua elevada resistência à corrosão em diversos meios as tornou aplicáveis em vários outros setores industriais.

O Inconel pode ser depositado por diferentes processos de soldagem e para cada processo utilizado, os parâmetros de soldagem e/ou gás de proteção utilizados influenciam diretamente na qualidade do material depositado, alterando também a dureza do revestimento.

2.4 Estado da Arte

Segundo a especificação 6A do Instituto Americano de Petróleo durante a deposição por soldagem do revestimento resistente à corrosão é necessário depositar uma camada mínima de 3 mm de metal de adição de maneira que na sua superfície do cordão seja mínimo os sinais de diluição. O revestimento deve ser tal que se possa garantir a composição química do metal depositado sem nenhuma ou pouca alteração na sua composição química em sua superfície, de modo a garantir a resistência à corrosão do substrato (API, 2004)

A norma N-1707 da Petrobras, recomenda que revestimentos resistentes à corrosão tenham espessura de reforço mínima de 3 mm.

Baixo e Dutra (2009) analisaram os efeitos do gás de proteção (Ar, Ar/CO₂, Ar/O₂ e Ar/He/O₂) com metal de adição Inconel 625 para produzir revestimento sobre chapa de aço carbono ABNT 1020. Observaram que a atmosfera composta por Argônio puro apresenta boa molhabilidade. A adição de 25% de Oxigênio ao Argônio torna a mistura eficaz no aumento da molhabilidade dos depósitos, mas resulta em transferência metálica mais instável. Adições de 5 e de 15% de CO₂ ao Argônio, apesar de não produzirem alteração na estabilidade do arco, também não modificaram a geometria da solda, que manteve o perfil de baixa molhabilidade. A utilização de atmosferas de proteção com 20% Hélio produziram depósitos de baixa molhabilidade. Os melhores resultados foram obtidos com adições de 25% de CO₂.

Silva et al. (2014) ao comparar a influência dos gases de proteção na formação de defeitos na soldagem de revestimento de Inconel 625, percebeu que o uso da mistura de Ar+He foi benéfica ao processo, pois o gás de proteção confere mais calor ao arco, proporcionando maior quantidade de metal fundido, mas também um metal líquido mais quente e mais fluido, resultando em melhor acabamento superficial do revestimento. Mas os autores também concluíram que o uso de Ar+He, para certas

condições, resultou em eliminação dos defeitos mas resultou em alto nível de diluição, o que não é indicado para a soldagem de revestimentos resistentes à corrosão.

Ribeiro et al. (2017) estudou o revestimento de Inconel 625 ao substrato de aço carbono por explosão e um dos efeitos que investigou foi a dureza do revestimento, tendo encontrado uma dureza média de 339 Hv (kgf/mm²) na interface e 330 Hv (kgf/mm²) na parte de Inconel, afastando-se da interface.

Tavares (2016), estudou a influência do aumento de CO₂ na mistura do gás de proteção e percebeu que a presença de CO₂ na mistura reduz a ocorrência de defeitos da soldagem e altera a geometria do cordão, reduzindo o reforço e aumentando a largura, mas concorre em aumento da diluição do metal de base no metal de adição e reduz a dureza do revestimento. Além disto, a presença de altos níveis de CO₂ torna a soldagem fora de norma para resistência à corrosão de acordo com a ISO 10423, que estabelece como condição excelente para revestimentos de Inconel 625, no máximo 5% de Ferro diluído em peso no material de revestimento. Somente a soldagem com Ar puro resultou em menor diluição em peso do Ferro do substrato para o Inconel, em teor de 1,68% para a 2ª camada. Para o revestimento com camada única, situação deste trabalho, o Ar puro também apresentou o melhor resultado, 10,80% contra 26,71% para a mistura com 8%CO₂ e 30,60% para a mistura com 25%CO₂. O uso de CO₂ na mistura gerou ainda precipitados maiores que resultaram em queda da dureza do revestimento. Os valores de dureza Vickers encontrados por Tavares (2016) para cada gás de proteção são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Dureza Vickers das amostras em função do gás de proteção

| Amostras | 1ª Medição | 2ª Medição | 3ª Medição | Média | Desvio Padrão |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------------------|
| 100% Ar | 264,8 | 254,4 | 262,4 | 260,5 | 5,4 |
| Ar+8% CO2 | 260,5 | 258,5 | 258,2 | 259,1 | 1,3 |
| Ar+25% CO2 | 211,8 | 208,2 | 210,7 | 210,2 | 1,8 |

Fonte: Tavares (2016)

Vidal (2014) concluiu que maior energia de soldagem resulta em maior fusão do metal, que possibilitou a difusão de maiores quantidades de ferro do metal base para o revestimento, também comprovado por Mota (2016), que estudou o revestimento de Inconel 625 por soldagem MIG com Ar puro, e com o aumento da

energia de soldagem, teve por resultado o aumento da diluição e uma dureza média do revestimento de 239,1Hv.

Zílio et al.(2014) buscaram determinar a influência do gás de proteção (Ar puro, CO₂ puro, Ar+25%CO₂, Ar+8%CO₂, Ar+2%O₂ e Ar+25%He) e concluiu que a adição de CO₂ melhora a molhabilidade do revestimento, mas somente para altas porcentagens, tendo o gás com 8%CO₂ apresentado resultado inferior em comparação com 25%CO₂ na melhora da molhabilidade, mas resulta em aumento da diluição do cordão. Perceberam ainda que a menor diluição ocorreu com a mistura de 25%He e as maiores ocorreram com as maiores quantidades de CO₂. Além disto, concluíram que o uso do tecimento resultou em maior diluição, provavelmente por uma melhor distribuição do calor que aumentou a fusão e que o pré-aquecimento para temperaturas de até 150° C não introduziram mudanças significativas nos resultados.

Pessoa et al. (2010) percebeu que a soldagem com gás de proteção contendo 30% He resultou em maior molhabilidade do cordão, maior largura e menor reforço, frente à soldagem com Ar puro e também que o tecimento, independentemente do tipo, proporciona menor relação entre reforço e largura, pois com o tecimento há mais aquecimento nas laterais da poça de fusão, possibilitando melhor distribuição do material de adição, mas percebeu também que a soldagem com Ar puro resulta em menor diluição se comparada à soldagem com Hélio devido ao maior potencial de ionização.

Tomando como base o trabalho de Silva et. al. (2014) que investigou os efeitos do tecimento no revestimento de superfícies, como resultado notou-se que o mesmo tem direta influência sobre a qualidade superficial e a diluição do cordão de solda. A aplicação do tecimento resultou em aumento da largura do cordão e redução da penetração, incorrendo em redução dos defeitos de soldagem, mas grande aumento da diluição. Segundo Larquer (2015) e Passos (2016) que investigaram os efeitos do tecimento através da oscilação magnética dentro de processo de soldagem, notou-se como um dos resultados o refino de grão da junta soldada o que confere melhores propriedades mecânicas a união.

Segundo Miranda (2015) a baixa diluição é necessária para evitar a redução das propriedades de resistência à corrosão dos revestimentos e o tecimento é benéfico ao processo de revestimento, uma vez que o uso do tecimento reduz a penetração, e também reduziu o nível de diluição.

O argônio, além de inerte, é inodoro, incolor e atóxico. Possui baixo potencial de ionização (consequentemente permite abertura de arcos com mais facilidade e estabilidade), mais denso que o ar (proteção eficiente na posição plana), é extraído do gás atmosférico, o que lhe garante um custo relativamente baixo e, por tanto, é o gás de proteção mais utilizado no processo MIG. O Ar comercialmente puro, com baixíssimas quantidades de impurezas possui potencial de oxidação praticamente zero, sendo utilizado somente para soldar materiais não ferrosos e reativos tais como ligas de alumínio, de cobre, de níquel, de magnésio e de titânio (SCOTTI e PANOMAREV, 2008).

Devido ao alto potencial de ionização, o hélio requer mais tensão para ionizar, com isso, produz um arco mais quente e temperaturas mais altas. Quanto a baixa densidade, o hélio requer uma vazão maior do que a do argônio para proteger adequadamente a região do arco. Caracteristicamente o hélio transfere mais calor para a peça de trabalho do que o argônio, resultando em penetrações maiores, com um perfil arredondado de penetração, ou seja, cordão mais largo e mais plano. (FIGUEIREDO, 2000)

Capítulo III

MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste projeto, dividiram-se as atividades para se ter uma programação cronológica adequada e se ter noção do desenvolvimento do projeto. Os materiais e equipamentos são apresentados no item 3.1 e a metodologia utilizada no item 3.2.

3.1 Materiais e Equipamentos

Neste tópico foram abordados todos os materiais utilizados para a soldagem dos cordões para os parâmetros testados.

3.1.1 Consumíveis

Utilizou-se como substrato de chapa em aço carbono ASTM A-36 com 10 mm de espessura. A escolha do substrato se deu principalmente pelo menor custo e maior facilidade para aquisição pelo Laboratório de Materiais e Fabricação (LAMAF-UFG). O metal de adição utilizado foi o arame/eletrodo ERNiCrMo-3 (Inconel 625) com 1,2 mm de diâmetro, este material foi selecionado devido à sua grande aplicação na indústria de petróleo, como revestimento para tubulações de exploração em águas profundas, onde o ambiente altamente agressivo demanda por materiais mais resistentes. A composição química do material do substrato e do metal de adição é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Composição química do metal e de base ASTM A-36 e do metal de adição ERNiCrMo-3 (% Peso)

| Elemento | Ni | Cr | Mn | Si | Al | Ti | Fe | C | Mo | Nb |
|------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ERNiCrMo-3 | Bal. | 22,46 | - | - | 0,26 | 0,26 | 0,14 | 0,02 | 8,84 | 3,46 |
| ASTM A-36 | 0,02 | 0,02 | 0,67 | 0,09 | 0,03 | - | Bal. | 0,23 | - | - |

Fonte: Adaptado de Tavares (2016)

Para a deposição do revestimento selecionaram-se os cinco gases de proteção comerciais argônio puro, Ar+2%O₂, Ar+8%CO₂, Ar+25%CO₂ e Ar+25%He, para avaliar como a presença de diferentes porcentagens de gás ativo e do Hélio alterariam as propriedades do cordão de solda, em função da alteração de estabilidade e calor gerado no arco pela mudança do gás de proteção.

3.1.2 Equipamentos

Para a confecção das placas de teste utilizou-se a tocha fixada ao braço robótico Yaskawa® HP20, mostrado na Figura 3.1 e a fonte de corte a plasma Powermax® 105, mostrada na Figura 3.2.

Figura 3.1: Tocha de corte a plasma fixada no braço robótico Yaskawa®



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.2: Fonte de Corte a Plasma



Fonte: Próprio autor.

Lixadeira para limpeza da superfície da placa de teste com disco de desbaste, pois as placas vendidas comercialmente possuem uma camada de óxido na superfície, remanescente do processo de laminação, que pode influenciar na qualidade do revestimento, mostrada na Figura 3.3.

Figura 3.3: Lixadeira e disco abrasivo utilizados



Fonte: Próprio autor.

A soldagem foi realizada por processo MIG/MAG, com fonte Digiplus A7, conforme mostrado na Figura 3.4. Esta fonte foi utilizada, pois dentre as disponíveis no laboratório, possuía maior facilidade de automação e interação com o braço robótico para a automatização do processo.

Figura 3.4: Fonte de Soldagem Digiplus A7, utilizada para o experimento



Fonte: Próprio autor.

A tocha foi fixada ao braço robótico Yaskawa® HP20, similar ao que foi mostrado na Figura 3.1 para a tocha de corte a plasma. A tocha de soldagem foi utilizada por ser mais adequada ao processo automático de soldagem, corpo reto, com maior facilidade de montagem e movimentação do braço robótico e já estava disponível no laboratório. A tocha fixada no braço robótico é mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5: Tocha de soldagem fixada no braço robótico



Fonte: Próprio autor.

Também foi utilizado um forno de tratamento térmico, já disponível no laboratório e capaz de aquecer a temperaturas em torno de 1000°C se necessário, para aquecer a chapa de modo que a chapa estivesse na temperatura de pré-aquecimento desejada antes de se iniciar a soldagem, mostrado na Figura 3.6 e para controlar a temperatura das placas de teste utilizou-se termopar e termômetro laser, mostrados na Figura 3.7.

Figura 3.6: Forno de tratamento térmico utilizado para pré-aquecimento das placas de teste



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.7 Termopar e termômetro laser utilizados



Fonte: Próprio autor

Após a soldagem foi realizada a fase análise. Inicialmente utilizou-se uma serra fita, mostrada na Figura 3.8 para cortar as placas de teste, de modo que os pares de cordões de mesmo parâmetro, com diferença do uso ou não de tecimento entre os cordões, ficassem juntos para melhor observação e comparação dos efeitos do tecimento no cordão e também para que os cordões de parâmetros iguais ficassem

próximos para efeito de controle dos cordões específicos de gases e temperaturas semelhantes.

Figura 3.8: Serra fita utilizada



Fonte: Próprio autor.

Após isto, as amostras de cada cordão foram cortadas com o auxílio de uma cortadora de amostras CF III Fortel®, pois a mesma possui sistema de fixação das amostras para que o corte seja perpendicular, ou o mais perpendicular possível, possui sistema de refrigeração para que o calor gerado no corte não influencie nas propriedades da amostra cortada e possui tampa de segurança para proteger o operador em caso de quebra do disco ou de uma amostra se soltar do suporte de fixação, sendo assim a melhor escolha dentre os equipamentos disponíveis no laboratório. A cortadora é mostrada na Figura 3.9.

Figura 3.9: Cortadora de amostras Fortel utilizada



Fonte: Próprio autor

As amostras cortadas foram embutidas com uma embutidora Fortel® EFD30, mostrada na Figura 3.10, e baquelite em pó e tiveram códigos gravados por meio de uma caneta gravadora vibratória de modo a se identificar quais os parâmetros utilizados para a soldagem daquela amostra. A embutidora foi utilizada pois era o único sistema de embutimento disponível que permitia produtividade maior e garantia paralelismo entre as faces da amostra embutida, visto que o outro método disponível era de embutimento a frio por resina, o que é necessário para a análise posterior de dureza e de geometria do cordão à qual as amostras seriam submetidas

Figura 3.10: Embutidora de amostras Fortel EFD30



Fonte: Próprio autor

As amostras já embutidas foram atacadas com Nital 5% para análise posterior. Além do Nital, utilizou-se álcool 70% para neutralizar a ação do Nital e um soprador térmico para secar as amostras.

Para análise dos parâmetros desejados, foi utilizado um stereo microscópio Zeiss Stereo Discovery V8, mostrado na Figura 3.11, utilizando-se o software AxiVision e também um durômetro Mitutoyo HV-100 para medição de dureza Vickers, mostrado na Figura 3.12.

Figura 3.11: Stereo Microscópio Zeiss



Fonte: Próprio autor

Figura 3.12: Durômetro Mitutoyo utilizado



Fonte: Próprio autor.

3.2 Procedimento Experimental

3.2.1 Confeção das placas de teste

As placas de teste com dimensões de 150 x 250 mm foram confeccionadas a partir de uma chapa de aço ao carbono ASTM A-36 com as medidas de 2 x 3,5 m, utilizando-se o equipamento de corte a plasma apresentado no Item 3.1.1.

Utilizaram-se como parâmetros de corte os indicados pelo manual do fabricante da fonte HYPER THERM Powermax® 105 para a chapa (de aço carbono com 10 mm de espessura), conforme é apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros utilizados para o corte a plasma

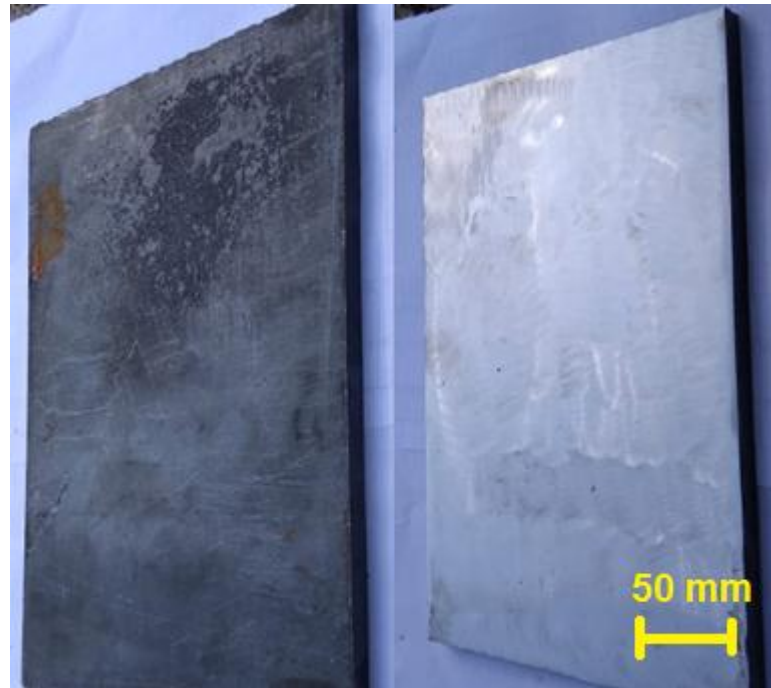
| Corrente | DBCP | Velocidade de corte | Gás utilizado |
|----------|--------|---------------------|---------------|
| 65 A | 1,5 mm | 1100 mm/min | Ar comprimido |

Fonte: Próprio autor.

Após o corte, a superfície das chapas eram lixadas com a esmerilhadeira apresentada no Item 3.1.1 até se obter uma superfície espelhada, conforme Figura

3.13, antes da soldagem para remover o óxido para não haver interferência nos resultados.

Figura 3.13: Placa de teste antes e depois de ser lixada



Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Adaptações do Manipulador Robótico para Soldagem

Para a utilização do braço manipulador YASKAWA HP20 necessitou-se a fabricação de um suporte. Foi fabricada uma peça em alumínio para se fixar a tocha de soldagem à ponta do manipulador, conforme é apresentado na Figura 3.14.

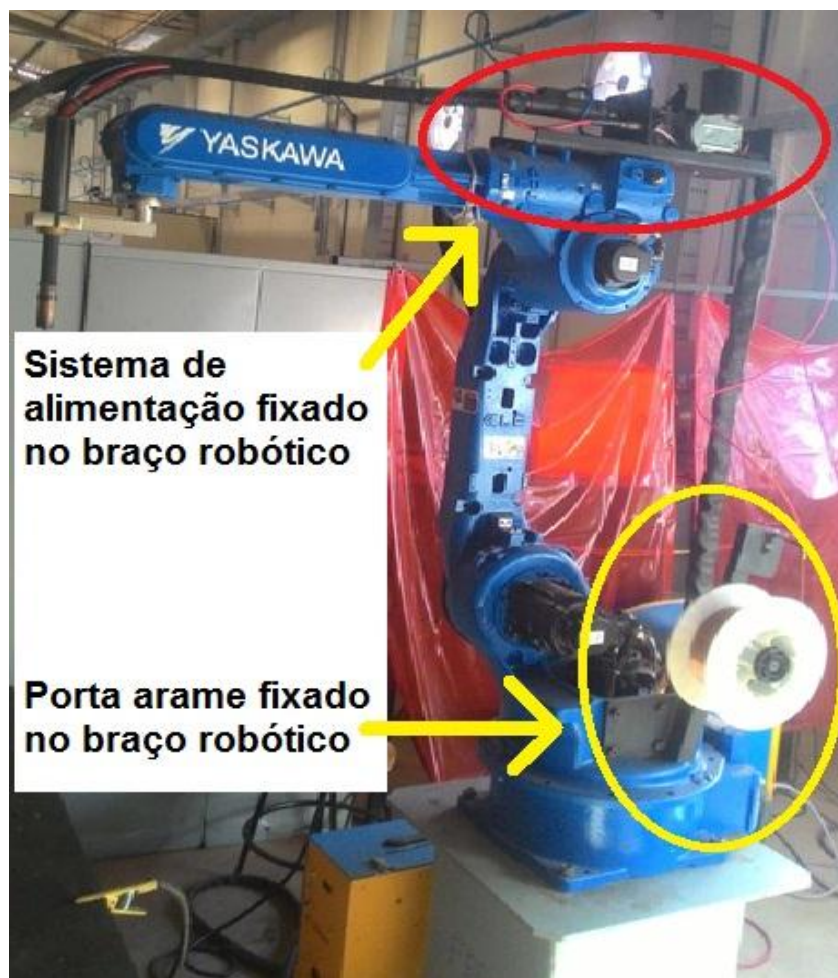
Figura 3.14: Peça fabricada para fixação das tochas no braço robótico



Fonte: Próprio autor.

O sistema de alimentação de arame foi refeito, de forma que foi desmontado de sua forma original e seus componentes foram remontados em um suporte fixado diretamente ao braço robótico, de forma que a tocha de soldagem fosse melhor utilizada por não apresentar curvatura, que dificultasse a passagem do arame, conforme mostrado na Figura 3.15. O porta arame foi também fixado diretamente ao braço robótico em um suporte confeccionado para este fim com o intuito de diminuir a distância entre o rolo de arame e a entrada do alimentador fixado acima do manipulador robótico.

Figura 3.15: Sistema de alimentação de arame montado no braço robótico



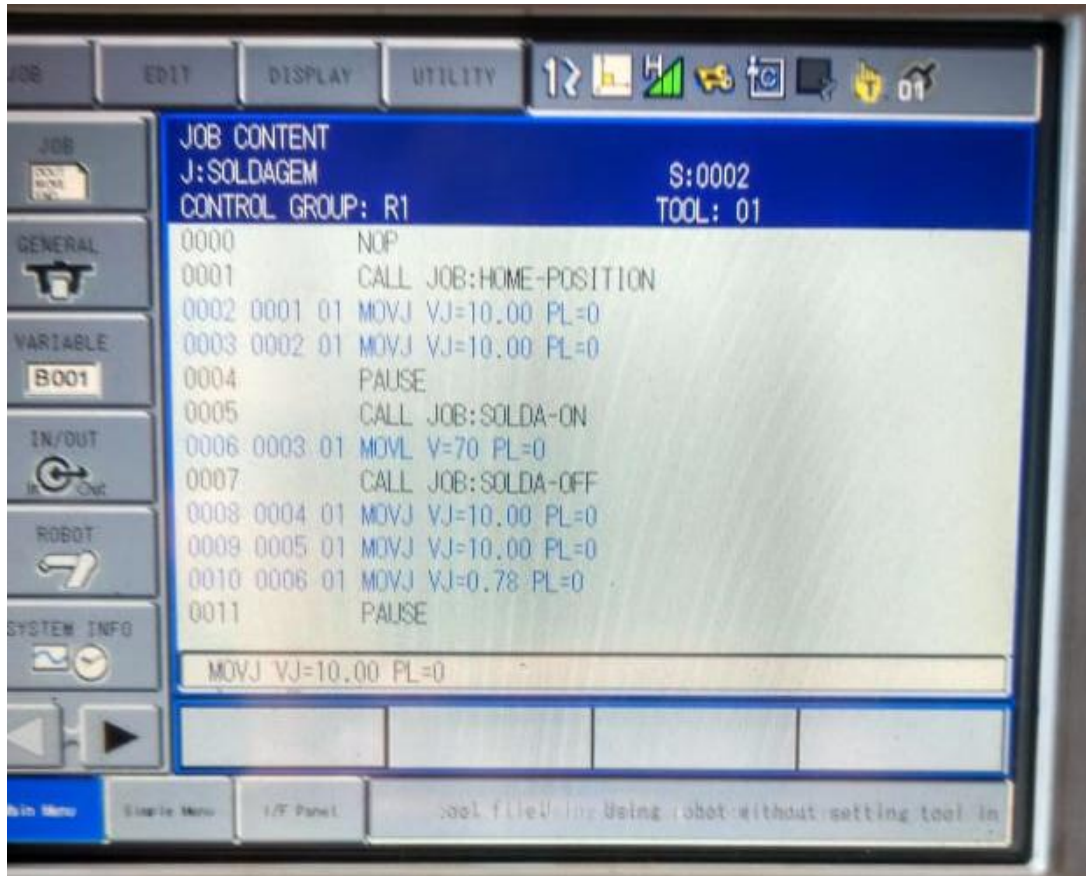
Fonte: Próprio autor.

3.2.3 Programação do braço robótico

Na Figura 3.16 é apresentada a programação utilizada para a soldagem com manipulador robótico. Na linha 1, o braço sai da posição de início e se movimenta até a posição da linha 3 e para, quando era realizado o monitoramento da temperatura da chapa. Assim que a placa alcançava a temperatura desejada, o movimento do braço

era reiniciado, ligava-se a fonte de solda pelo comando da linha 5 e ele se movia até a posição definida na linha 6 e a fonte era desativada pelo comando da linha 7. Então o braço se movimentava para a posição de início do outro cordão para repetir o procedimento para a nova temperatura desejada.

Figura 3.16: Programação implementada no braço robótico para soldagem



Fonte: Próprio autor.

3.2.4 Procedimento de pré-aquecimento das placas de teste

Definiram-se a utilização das temperaturas de pré-aquecimento os valores de 300, 250, 200 e 25°C para com o intuito de se comparar o efeito do pré-aquecimento nos revestimentos das ligas de níquel no substrato de aço carbono. A placa era colocada em um forno de tratamento térmico para que no momento da soldagem a chapa estivesse na temperatura de pré-aquecimento a ser estudada.

Assim que a chapa era retirada do forno a temperatura já começava a cair devido à perda de calor para o ambiente. Então era sempre necessário trabalhar com temperaturas mais altas de aquecimento no forno, em torno de 800 à 850° C (a depender das condições climáticas do dia de ensaio), de modo que quando a chapa fosse colocada na posição de soldagem houvesse tempo hábil de providenciar o que

fosse necessário antes desta alcançar a temperatura de pré-aquecimento desejada. As placas eram colocadas dentro do forno ainda frio, de forma que elas fossem aquecidas juntamente com o forno e deixadas dentro do forno por 30 minutos após o mesmo atingir a temperatura estabelecida a fim de garantir que a chapa realmente estivesse na temperatura de aquecimento desejada para garantir uniformidade.

A chapa pré-aquecida era colocada sobre a mesa de soldagem e utilizando um termômetro laser e um termopar, era feito o monitoramento da temperatura da chapa, para que quando ela estivesse à temperatura desejada, fosse iniciado o processo de soldagem. O braço robótico era previamente programado, e assim que a temperatura chegava ao valor desejado o robô era acionado.

3.2.5 Revestimento das placas de teste

A soldagem foi realizada com uma fonte de soldagem Digiplus A7. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 3.3, e foram extraídos e adaptados de Tavares (2010), que estudou também o revestimento Inconel 625 ao substrato de aço, pois os parâmetros encontrados naquele trabalho mostraram-se satisfatórios. Uma vez que o arame-eletrodo utilizado por Tavares era de diâmetro diferente, mudou-se a velocidade de alimentação para que a taxa de deposição se mantivesse no mesmo valor do trabalho referência.

TABELA 3.3: Parâmetros de Soldagem.

| | |
|------------------------------------|----------|
| Distância Bico de Contato-Peça | 17 mm |
| Velocidade de Soldagem | 25 m/min |
| Velocidade de alimentação do arame | 10 m/min |
| Vazão do gás de proteção | 16 l/min |
| Tensão média de soldagem | 25 V |

Fonte: Próprio autor.

E para os cordões com tecimento, estabeleceu-se amplitude de tecimento de 6 mm e frequência de 3 Hz

Foram necessárias duas chapas para cada gás de proteção estudado, uma vez que pela programação implementada no braço robótico, soldou-se alternadamente um cordão para um mesmo gás de proteção e temperatura, primeiro sem tecimento e após com tecimento, conforme mostrado na Figura 3.17.

Geralmente não era necessário reaquecer a placa de testes para a soldagem com tecimento para uma mesma temperatura, uma vez que a soldagem do cordão sem tecimento elevava a temperatura da placa, era necessário apenas aguardar a mesma retornar à temperatura desejada para soldar o próximo cordão, então a soldagem foi feita da maior para a menor temperatura, de modo a evitar o retorno da placa de testes ao forno.

Figura 3.17: Placa de teste com cordões de solda



Fonte: Próprio autor.

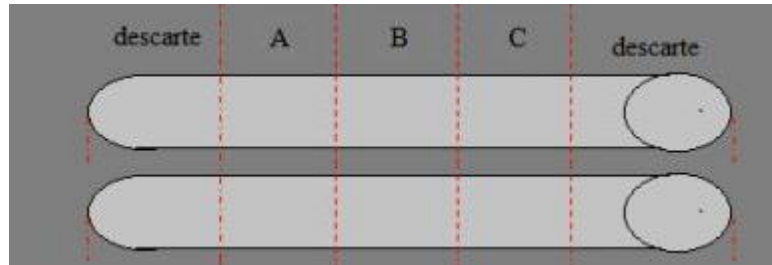
Na placa de teste mostrada na Figura 3.17, as marcações feitas com punção foram destacadas e é possível identificar que o par de cordões da parte de cima da placa foram soldados utilizando Argônio 100% como gás de proteção com temperatura de pré-aquecimento de 200° C, sendo o cordão de cima sem tecimento, identificado pela letra “S” marcada ao lado direito do cordão e o segundo cordão com tecimento, identificado pela letra “C” marcada ao lado direito do cordão. Os dois cordões de baixo apresentam o mesmo padrão, mas tiveram como temperatura de pré-aquecimento 250° C.

3.2.6 Confecção dos Corpos de Prova

Após a soldagem, realizou-se o corte das placas para separar os cordões relativos a cada parâmetro e foram retiradas 3 amostras, não consecutivas e desprezando-se as extremidades dos cordões, devido as instabilidades no início e

término dos processos de soldagem, visando o posterior embutimento das amostras para análise. O método de seleção das amostras é mostrado na Figura 3.18:

Figura 3.18: Método de seleção das amostras de cada cordão



Fonte: Adaptado de Mota (2016)

A embutidora utilizada é constituída por um macaco hidráulico com um pistão acoplado na ponta, uma resistência para aquecimento e uma serpentina para resfriamento ao redor da camisa do pistão. O processo de embutimento consiste de se colocar a amostra e pó de baquelite sobre o pistão, aquecer e elevar a pressão e após o tempo definido, uma válvula é acionada e permite a passagem de água pela serpentina para resfriar a camisa do pistão e a amostra para consolidar o corpo de baquelite ao redor da amostra.

Na embutidora em questão, a água utilizada para resfriamento era oriunda da rede de alimentação de água do prédio e não havia reaproveitamento, sendo necessários aproximadamente 40 litros de água para cada amostra embutida que eram descartados. Após algumas análises do sistema de resfriamento por água e com o monitoramento da temperatura da água eliminada durante o processo de resfriamento da amostra embutida, decidiu-se que poderia ser feito um sistema de recirculação de água, para evitar o desperdício de aproximadamente 5.280 litros de água, uma vez que foram embutidas 132 amostras para este projeto. Optou-se então pela implementação de um reservatório de água com uma bomba de aquário interligada ao sistema de resfriamento da amostra, para que quando a válvula que permite a passagem da água de resfriamento fosse acionada, a bomba fosse acionada simultaneamente, alimentando assim o sistema de resfriamento.

Com a embutidora adaptada para não haver desperdício de água, procedeu-se o embutimento de todas as amostras.

3.2.7 Análise das amostras

As amostras embutidas foram levadas ao Laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Goiás, para teste de dureza Vickers e análise do perfil do

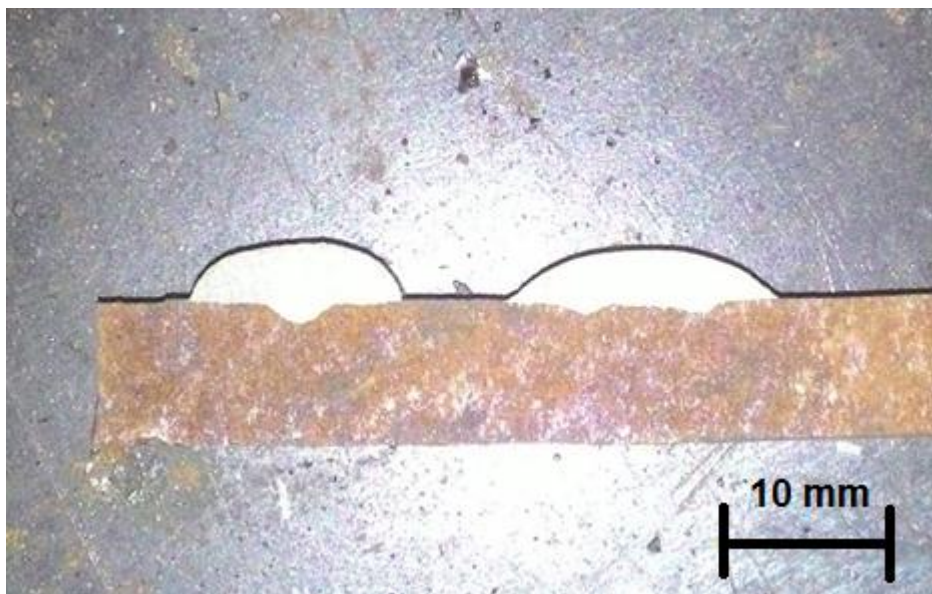
cordão com auxílio de um Stereo Microscópio. Os procedimentos são explicados nos tópicos 3.2.7.1 e 3.2.7.2.

3.2.7.1 Análise de perfil do cordão

Através do Stereo Microscópio Zeiss e do software interligado AxiVisio, foi possível realizar a análise do perfil dos cordões obtidos, realizar a medida de cada parâmetro necessário para efeito de comparação.

Para realizar esta análise, inicialmente foi feito o ataque químico com Nital 5% nas amostras, pois o Nital reage com o carbono do aço, mas não reage com o Inconel 625, então era possível ter uma perfeita distinção do que era substrato e o que era metal de adição, conforme percebe-se na Figura 3.19.

Figura 3.19: Amostra de ilustração da distinção entre o substrato e o metal de adição

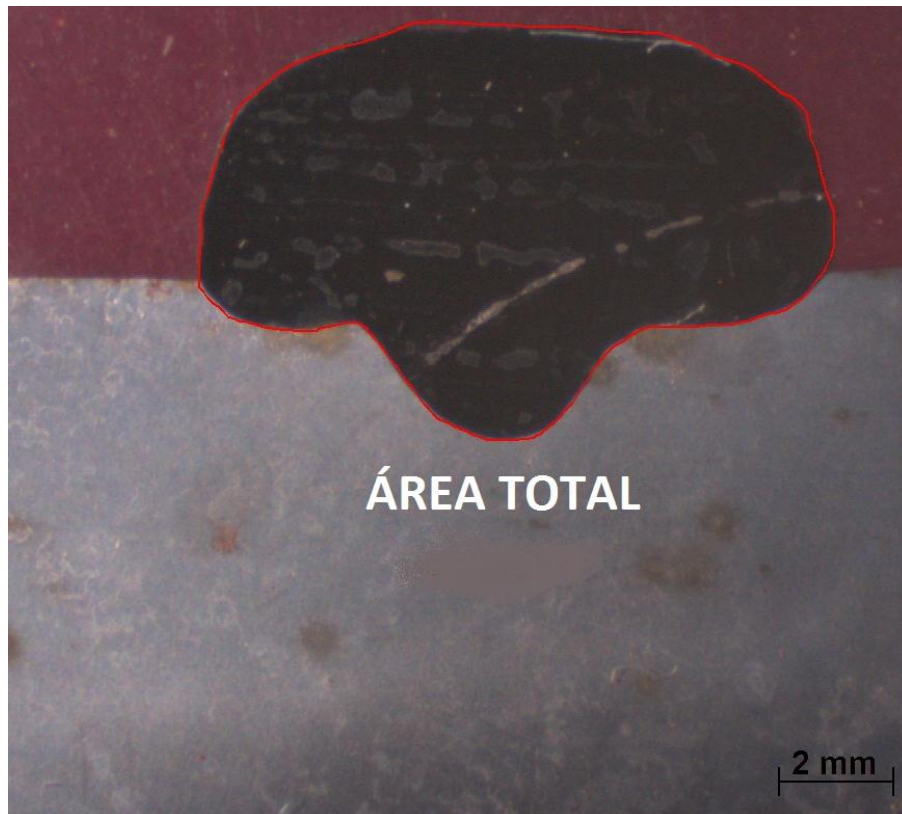


Fonte: Próprio autor

Percebe-se claramente na Figura 3.19, mesmo a olho nu a distinção entre a fase composta por aço, que está oxidada, e a fase de Inconel 625, que não sofreu alteração. À esquerda o cordão feito sem uso de tecimento e à direita o cordão com tecimento, de modo que a análise de perfil do cordão foi realizada justamente para se identificar estas diferenças.

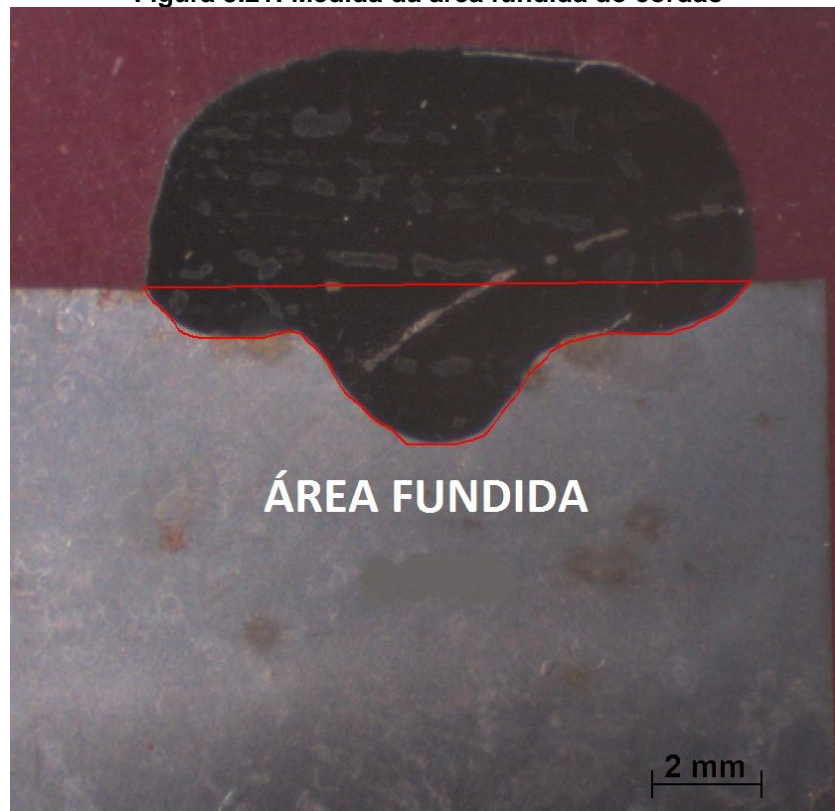
Realizou-se a medida da área total do cordão, área penetrada, prolongando a superfície do substrato entre as extremidades do cordão e aferindo a área abaixo desta linha, e da penetração, largura e reforço do cordão, conforme as Figuras 3.20, 3.21 e 3.22, respectivamente.

Figura 3.20: Medida da área total do cordão



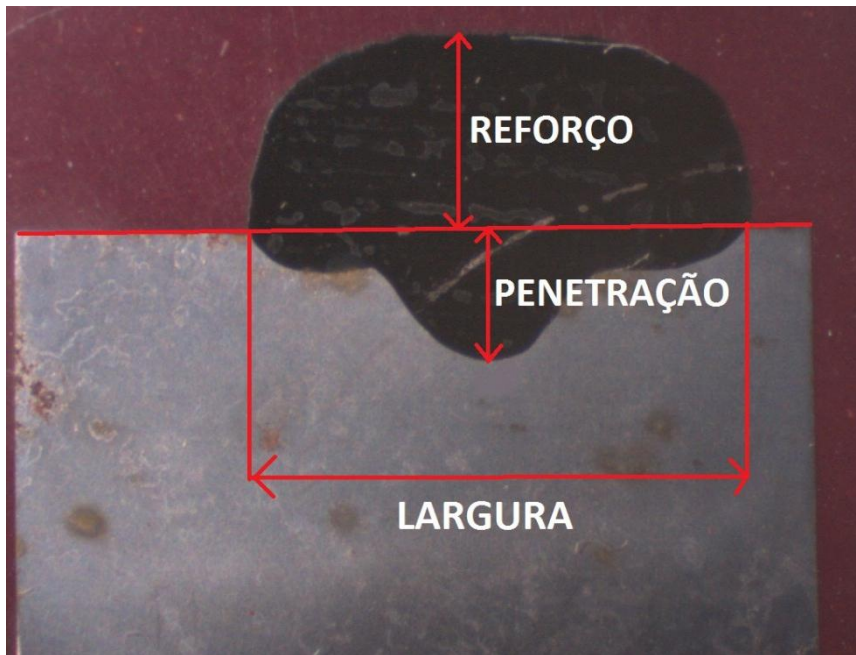
Fonte: Próprio autor

Figura 3.21: Medida da área fundida do cordão



Fonte: Próprio autor

Figura 3.22: Medidas de largura, penetração e reforço do cordão



Fonte: Próprio autor.

Com os dados obtidos de todas as amostras, foi possível desenvolver uma planilha para comparar o efeito da mudança de parâmetros sobre o cordão de solda.

3.2.7.2 Análise da dureza do cordão de solda

As medições das durezas Vickers (kgf/mm^2) dos revestimentos foram realizadas utilizando-se o durômetro Mitutoyo HV-100. Realizaram-se cinco medições na zona fundida em cada condição estudada, com o intuito de se determinar a influência dos parâmetros variados na dureza do revestimento.

Capítulo IV

RESULTADOS

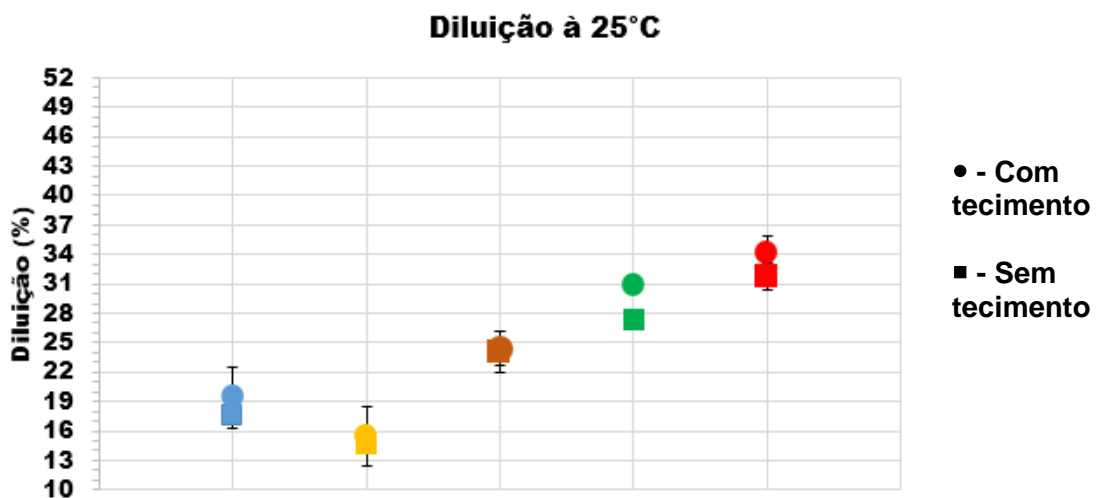
Nos itens 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados obtidos para análise do perfil do cordão de solda e dureza, respectivamente. As tabelas com os dados adquiridos são apresentadas nos Anexos A e B.

4.1 Análise de Diluição

4.1.1 Influência do uso do tecimento na diluição

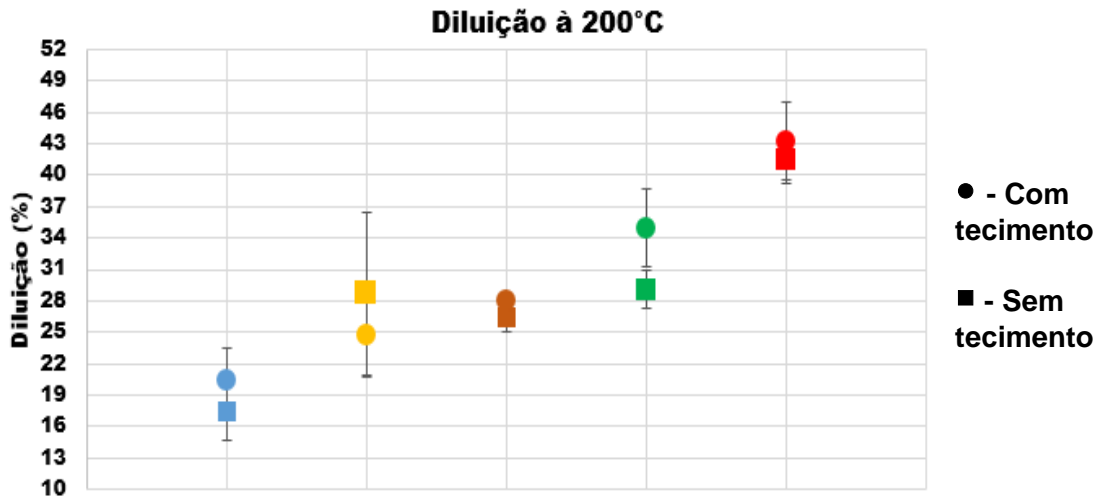
As Figuras 4.1 à 4.4 apresentam o resultado das medidas de diluição do cordão de solda para o uso do tecimento na soldagem e para a soldagem sem tecimento para as temperaturas de soldagem utilizadas.

Figura 4.1: Gráfico de Diluição para a soldagem à 25°C



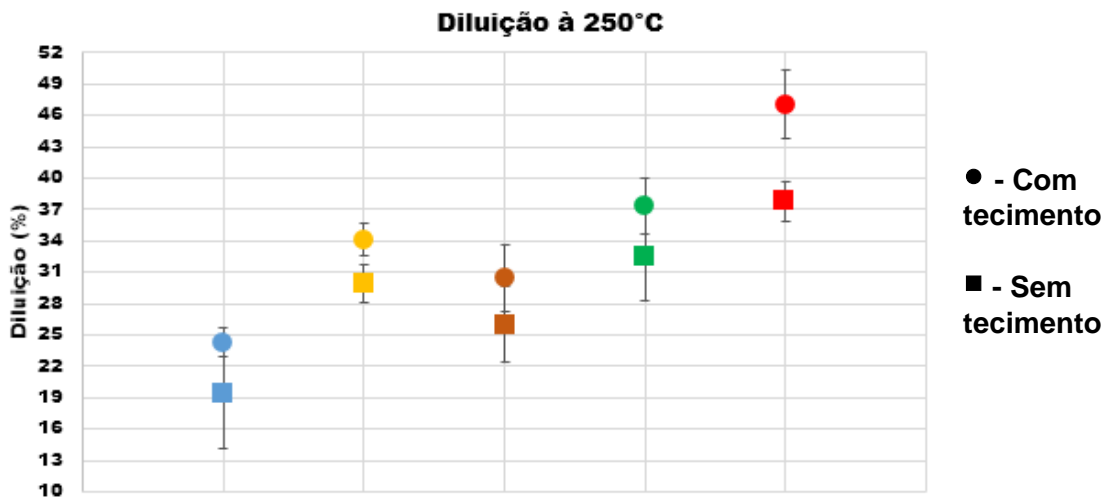
Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Figura 4.2: Gráfico de Diluição para a soldagem à 200°C



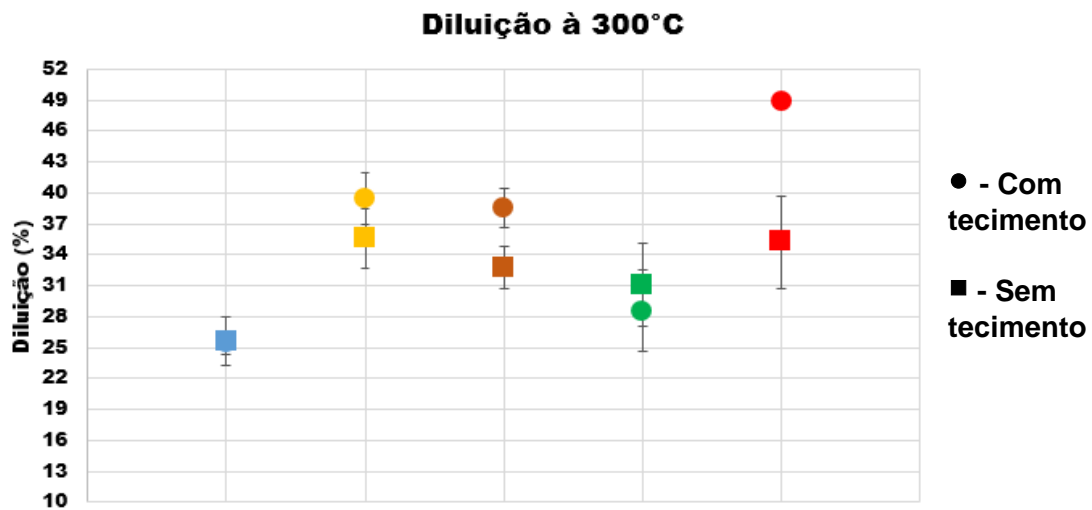
Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Figura 4.3: Gráfico de Diluição para a soldagem à 250°C



Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Figura 4.4: Gráfico de Diluição para a soldagem à 300°C



Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

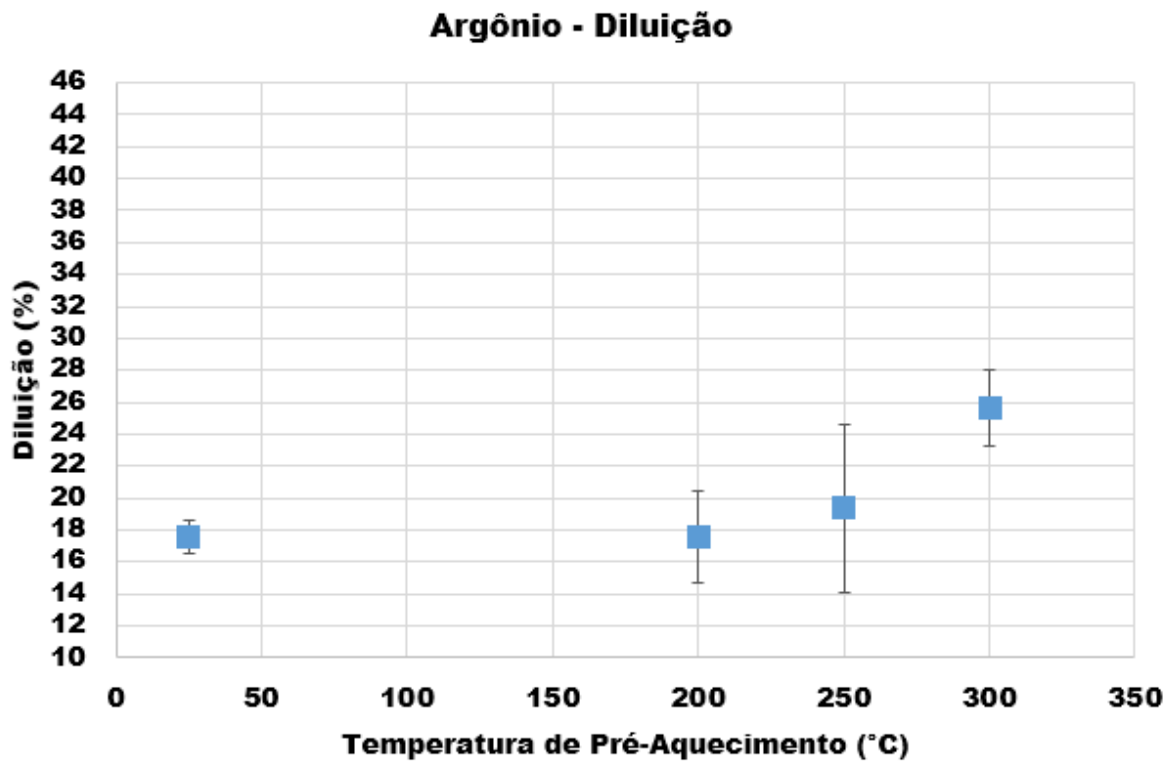
Percebe-se que há a tendência de aumento da diluição para a soldagem com tecimento, de modo que o uso de tecimento tende a deslocar a curva de diluição para cima, independentemente do gás de proteção utilizado. Nota-se também que a influência do tecimento torna-se maior conforme a temperatura de pré-aquecimento aumenta. Para a soldagem à 25° C ocorre variação mínima de 2,06% na diluição para os cordões cujo gás de proteção continha 2% O₂, para uma variação máxima de 11,79% para os cordões com e sem tecimento com o gás que contém 8% CO₂. Esta variação chega a 27,98% para a soldagem com 25% CO₂ a 300° C.

Em geral o uso do tecimento resultou em maior diluição, independentemente do gás de proteção e da temperatura de pré-aquecimento, similar ao que foi observado pela literatura Silva et al. (2014), Zílio et al. (2014), provavelmente por uma melhor distribuição de calor.

4.1.2 Influência do pré-aquecimento na diluição

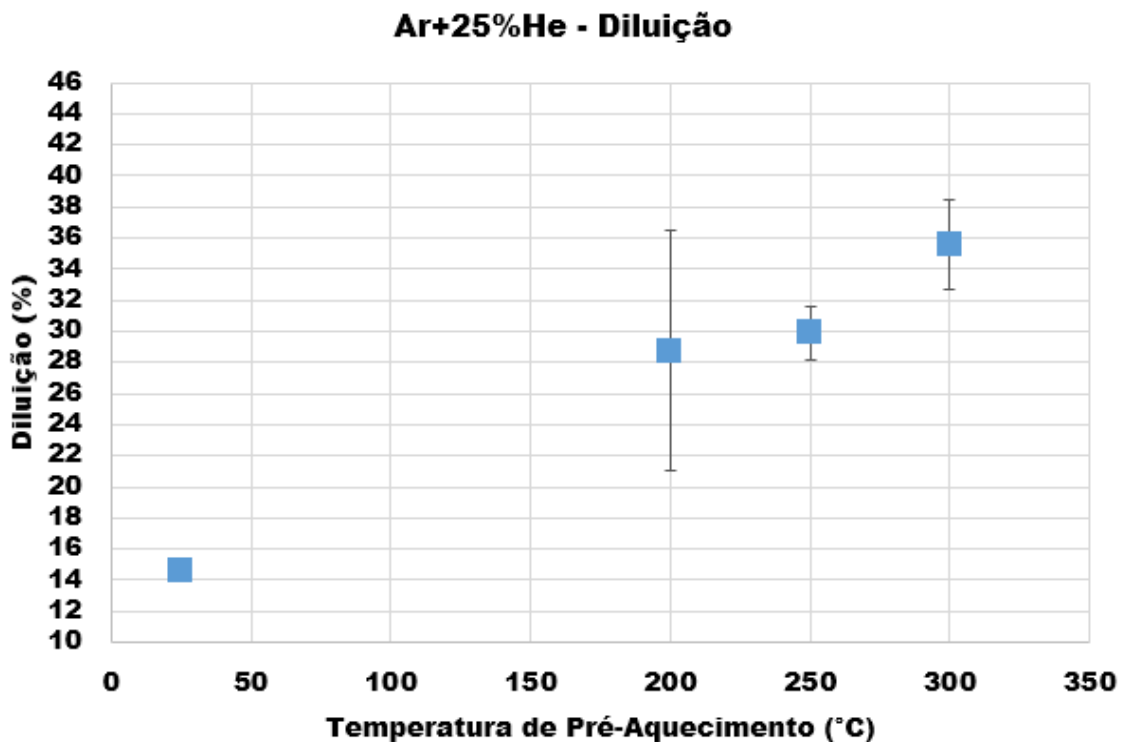
As Figuras 4.5 à 4.9 apresentam a variação da diluição em função da temperatura de pré-aquecimento e gás de proteção para corpos de prova soldados respectivamente sem e com tecimento.

Figura 4.5: Gráfico da diluição x temperatura para soldagem Ar puro sem tecimento

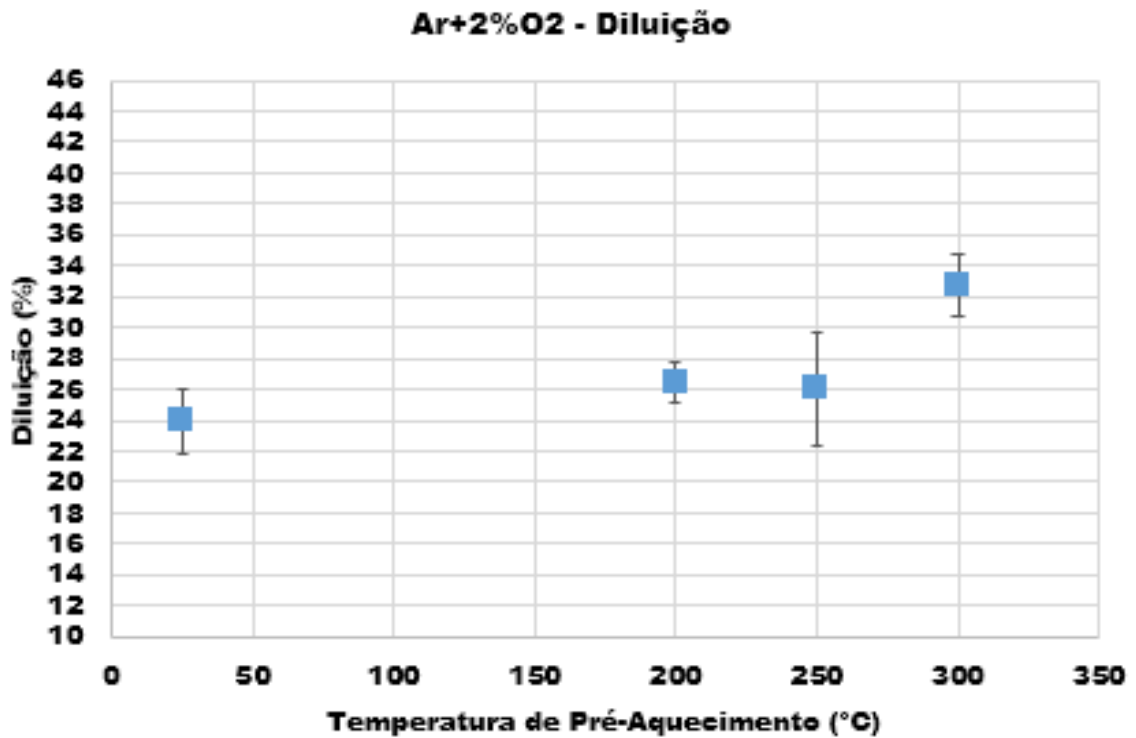


Fonte: Próprio autor

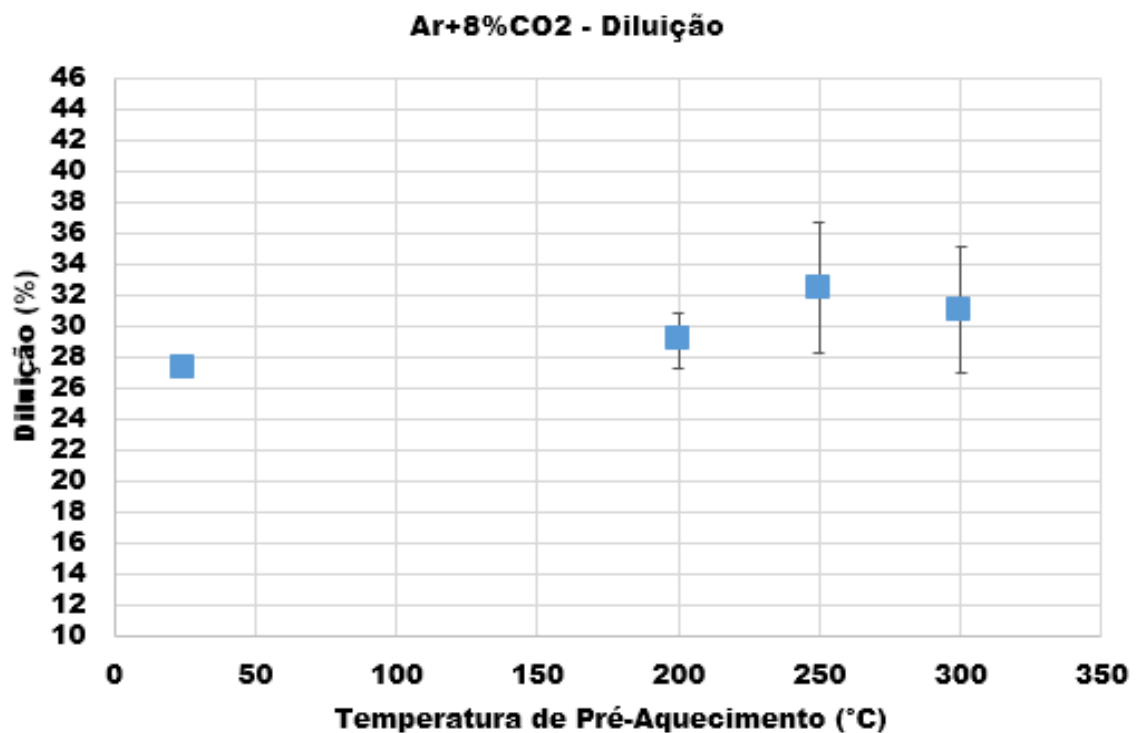
Figura 4.6: Gráfico da diluição x temperatura para soldagem com Ar+25%He sem tecimento



Fonte: Próprio autor.

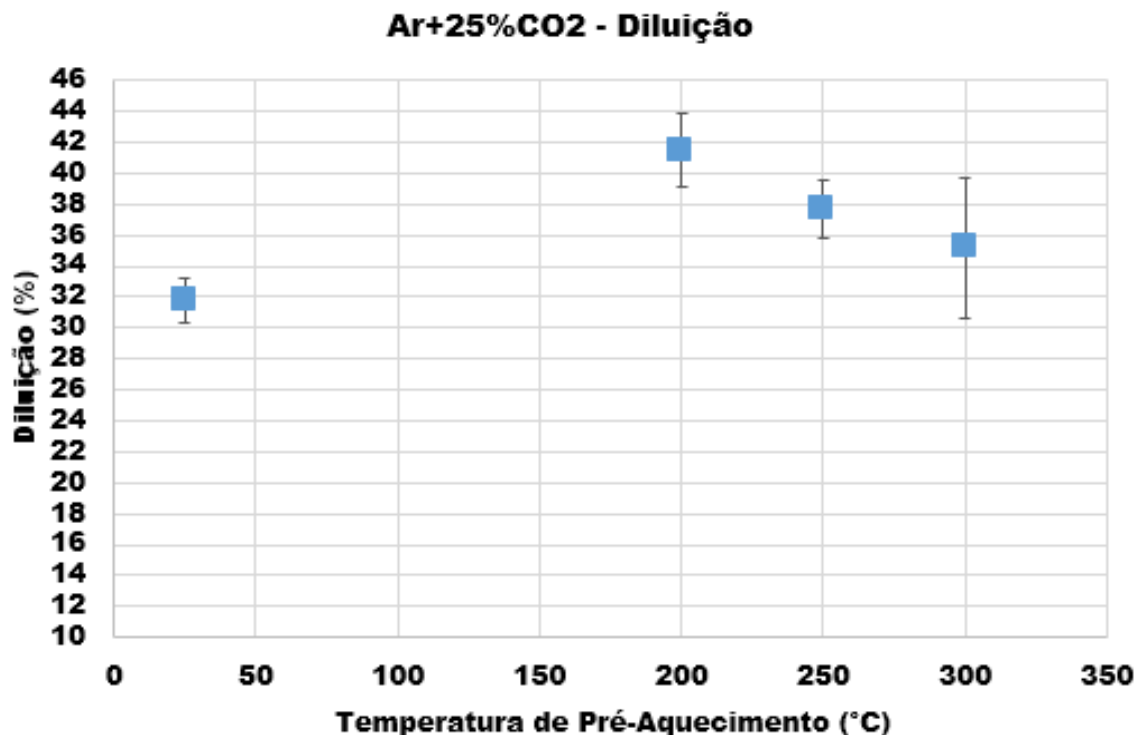
Figura 4.7: Gráfico da diluição x temperatura para soldagem com Ar+2%O₂ sem tecimento

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.8: Gráfico da diluição x temperatura para soldagem com 8% CO₂ sem tecimento

Fonte: Próprio autor

Figura 4.9: Gráfico da diluição x temperatura para soldagem com 25%CO₂ sem tecimento



Fonte: Próprio autor

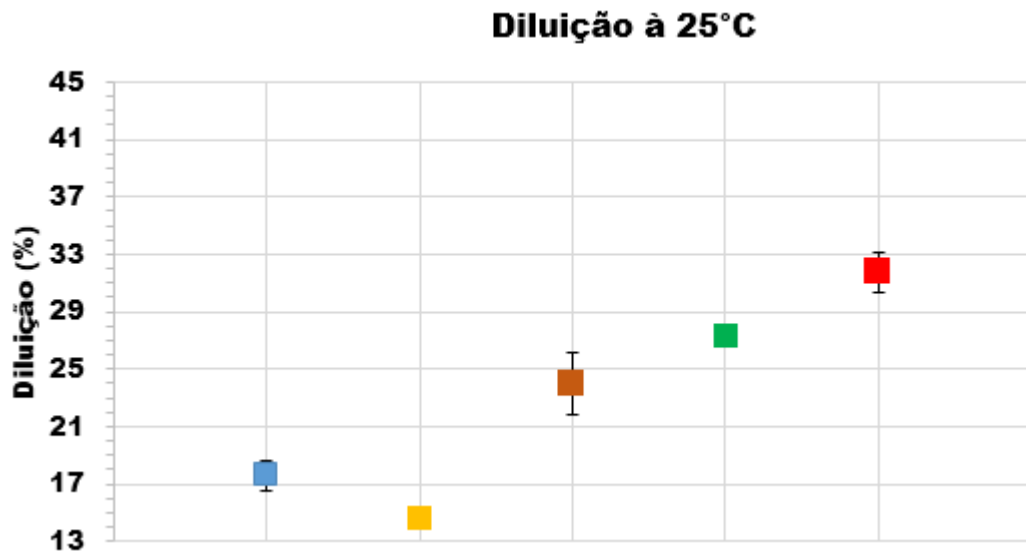
Nota-se através da análise dos gráficos a tendência de aumento da diluição para temperaturas mais altas, 250 e 300°C, de pré-aquecimento das placas, comprovando o encontrado por Zilio et al. (2014) que usou pré-aquecimento de até 150° C e notou pouca influência do pré-aquecimento para temperaturas menores nos resultados.

Excetuando-se a soldagem com 25%CO₂, o aumento da temperatura de pré-aquecimento implicou em aumento da diluição, com aumento de 31,25% para a soldagem com Ar, 26,77% de aumento para a soldagem com 2%O₂, 16,04% de aumento para 8%CO₂. Entretanto para a soldagem à 25%CO₂, a diluição teve um ponto máximo à 200°C com 23,37% de aumento, e tendeu à redução para temperaturas maiores, entretanto a dispersão dos resultados também foi maior.

4.1.3 Influência do gás de proteção na diluição

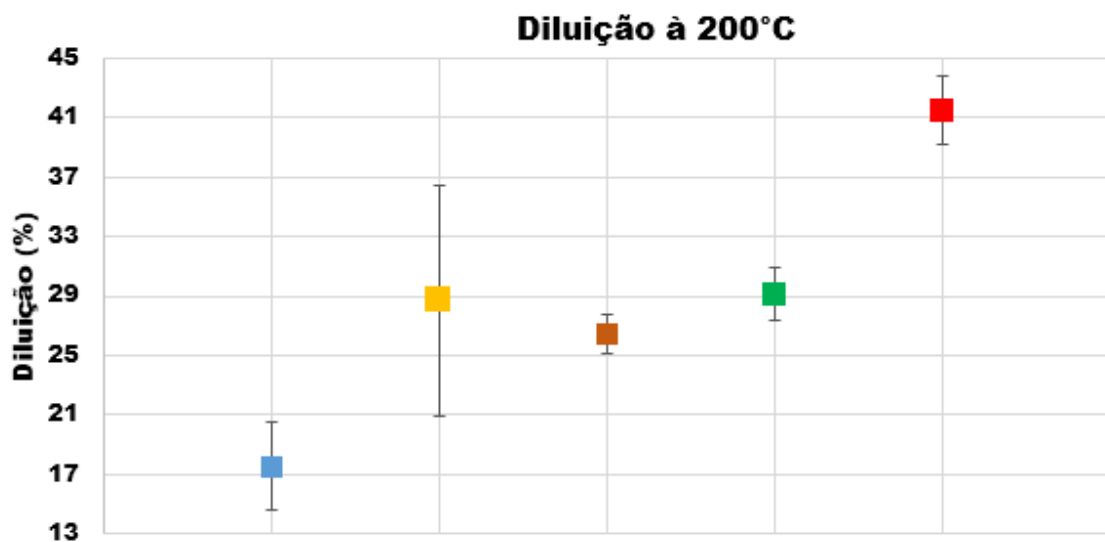
As Figuras 4.10 à 4.13 apresentam os resultados encontrados para diluição em função da temperatura de pré-aquecimento.

Figura 4.10: Gráfico da diluição x temperatura para soldagem à 25° C sem tecimento



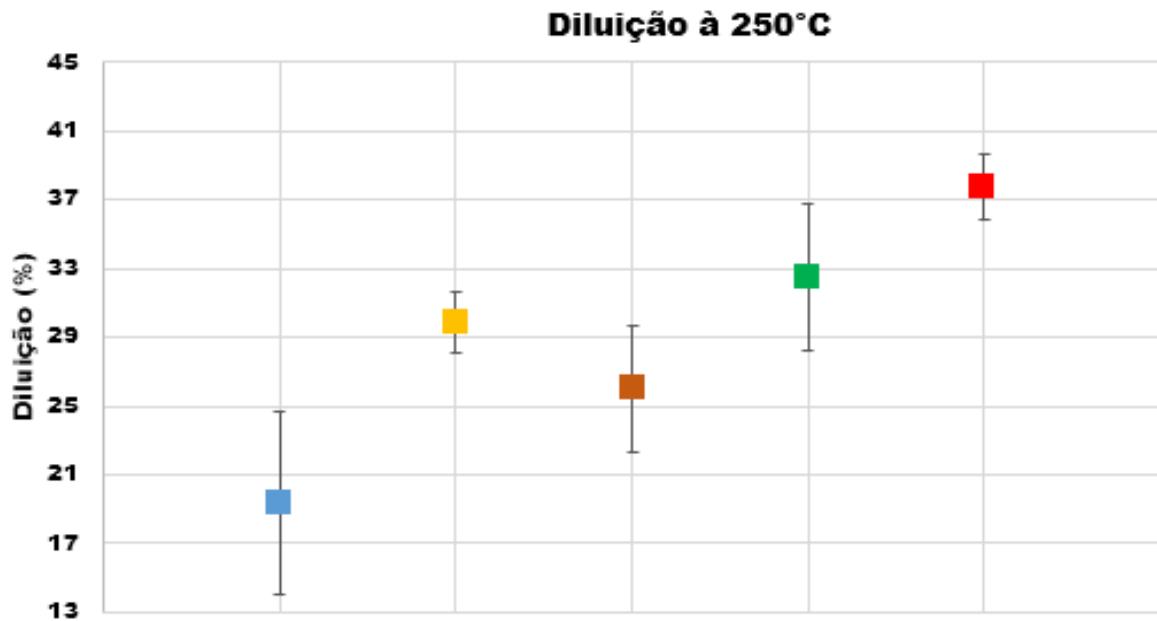
Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Figura 4.11: Gráfico da diluição x temperatura para soldagem à 200° C sem tecimento



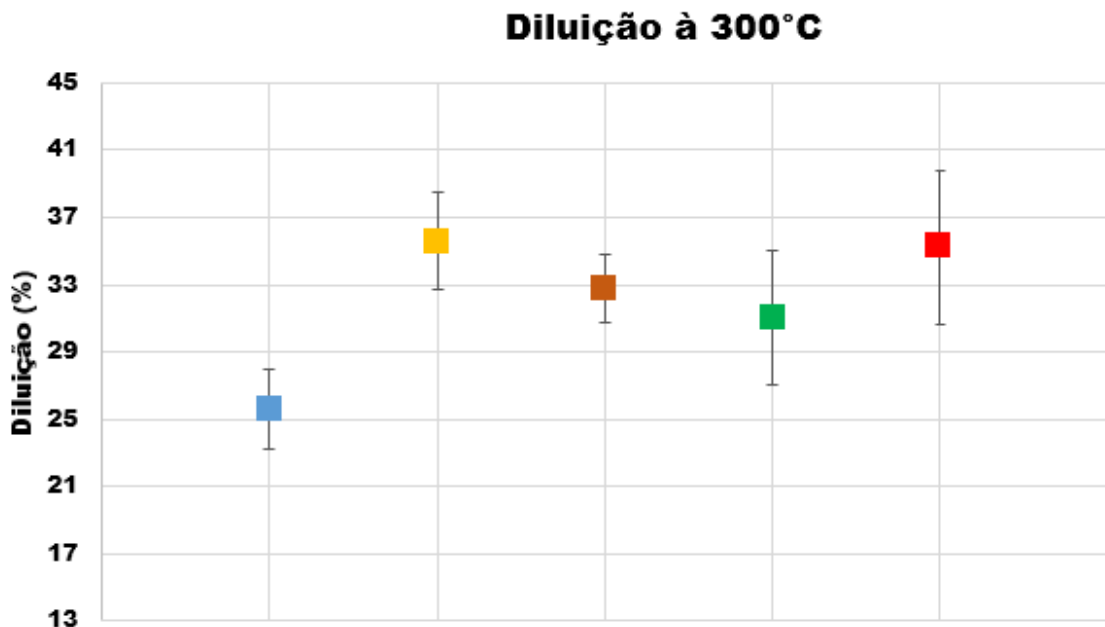
Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Figura 4.12: Gráfico da diluição x temperatura para soldagem à 250° C sem tecimento



Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Figura 4.13: Gráfico da diluição x temperatura para soldagem à 300° C sem tecimento



Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Percebe-se claramente que quando se aumentou a quantidade de gás ativo à mistura do gás de proteção, ocorre um acréscimo na diluição do material depositado,

o que provavelmente está relacionado ao aumento da molhabilidade do metal depositado ao se utilizar estes tipos de gases de proteção. Estes resultados são similares aos obtidos por outros autores, Zílio et al. (2014), Pessoa (2010), Tavares (2016) e Baixo e Dutra (2010) que também observaram que o Argônio e baixas porcentagens de gases ativos geram perfis de baixa molhabilidade mas que com a adição de 25% de CO₂ houve melhora significativa na molhabilidade, entretanto esta adição resulta em maior diluição em geral (Zílio et al. 2014).

Principalmente para a soldagem com adição de Hélio, provavelmente devido ao arco mais quente descrito por Figueiredo (2000) e Pessoa (2010), ocorre aumento significativo da diluição em relação ao cordão soldado à 25° C, com diferença na ordem de 58,8% para a soldagem à 300° C.

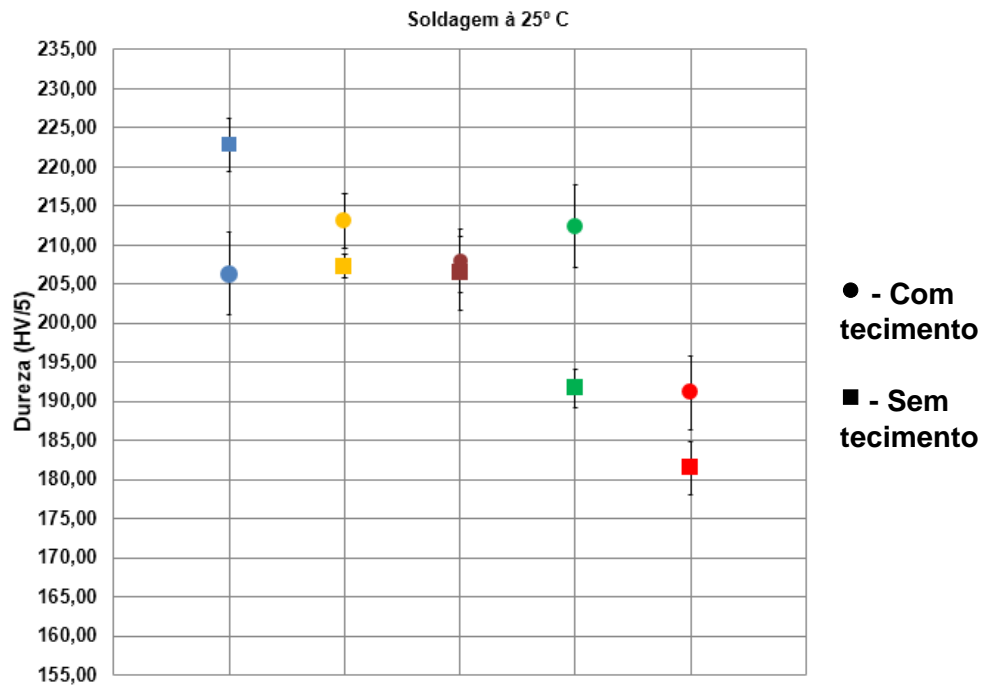
No geral, a tendência comum foi de menor diluição para soldagem com Ar puro e aumento da diluição para maiores porcentagens de gás ativo na mistura, em ordem crescente da menor porcentagem para a maior porcentagem.

4.2 Análise de Dureza

Este tópico aborda os resultados observados sobre a influência da adição de gases ativos ao gás de proteção, do uso ou não de tecimento e do pré-aquecimento da placa de testes sobre a dureza do revestimento.

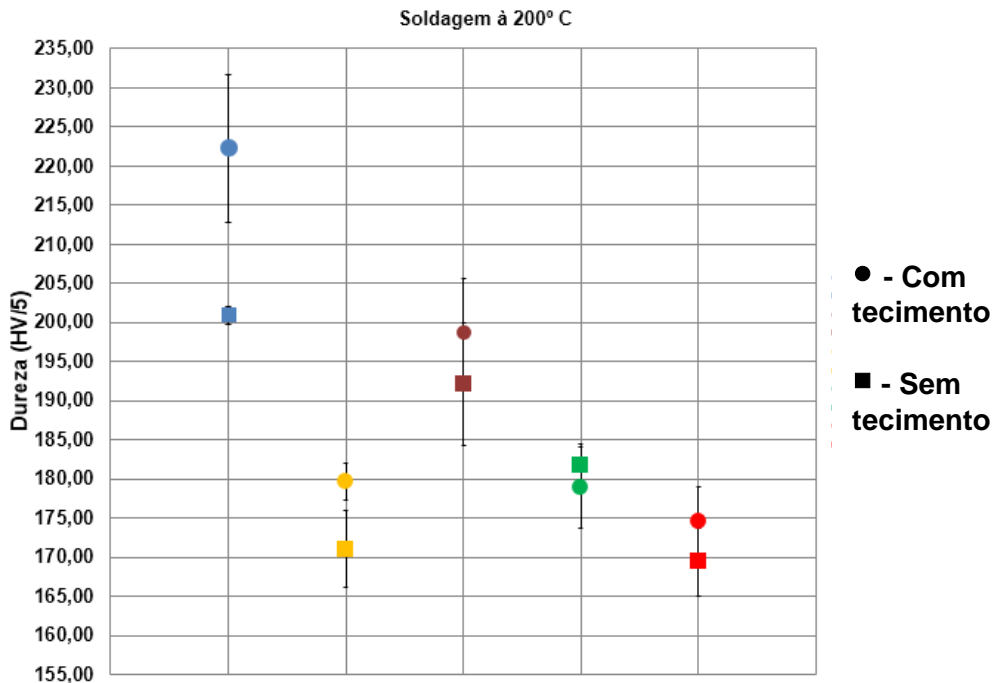
Os resultados são apresentados nas Figuras 4.14 à 4.17.

Figura 4.14: Gráfico da dureza (kgf/mm^2) para soldagem à 25°C



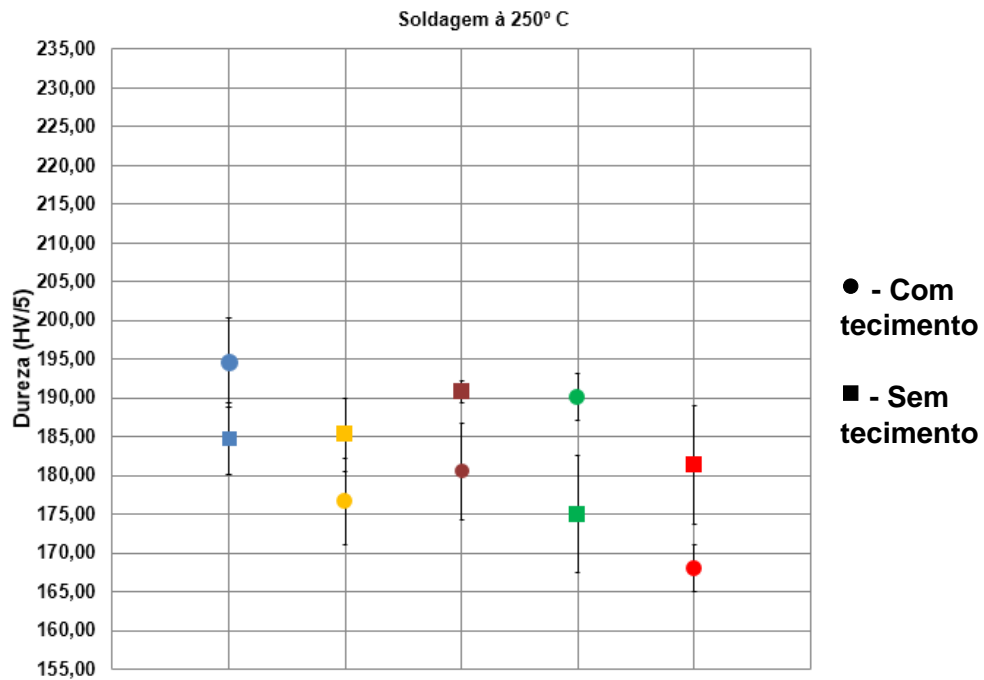
Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Figura 4.15: Gráfico da dureza (kgf/mm^2) para soldagem à 200°C



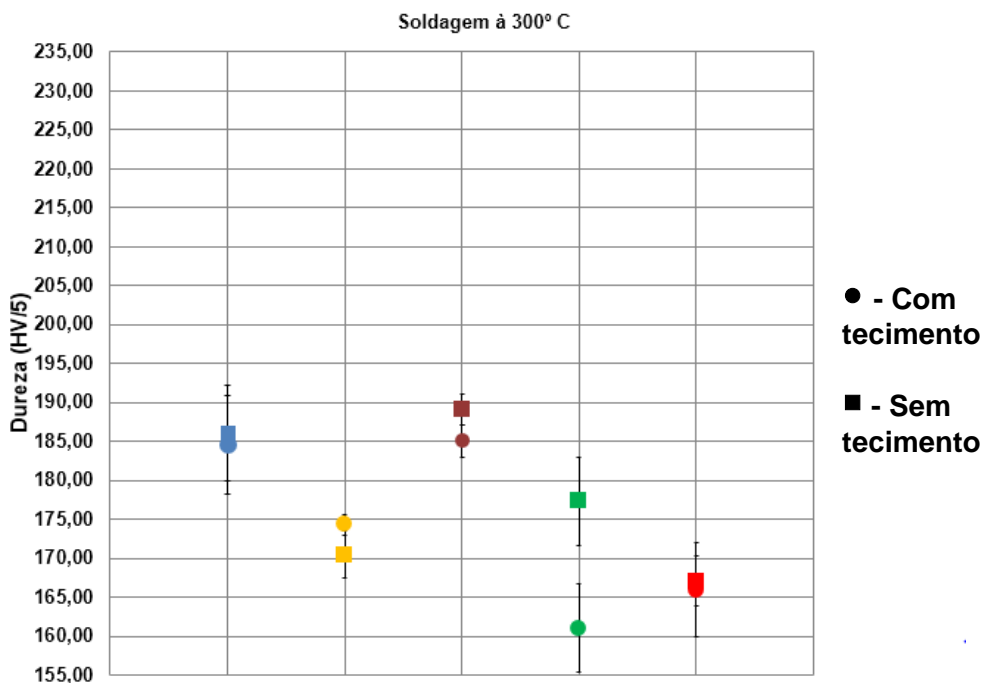
Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Figura 4.16: Gráfico da dureza (kgf/mm²) para soldagem à 250° C



Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Figura 4.17: Gráfico da dureza (kgf/mm²) para soldagem à 300° C



Legenda dos Gases de Proteção (Azul – Ar, Amarelo – Ar+25%He, Marrom – Ar+2%O₂, Verde – Ar+8%CO₂, Vermelho – Ar+25%CO₂). Fonte: Próprio autor.

Percebe-se que, à exceção da soldagem com uso do Hélio, quanto maior a porcentagem de gás ativo ocorre uma tendência de redução na dureza do cordão,

independentemente da temperatura de pré-aquecimento. Provavelmente isto está ligado ao aumento da diluição discutido no item 4.1 para o aumento de gás ativo, uma vez que nota-se um comportamento inverso de aumento da diluição e redução da dureza para aumento da porcentagem de gás ativo à mistura, o que é coerente, pois para maiores diluições, ocorre difusão do Ferro presente no substrato para o revestimento e acaba por degenerar as propriedades do Inconel e resulta em redução na dureza. (Vidal, 2014 e Tavares, 2016).

Através das Figuras 4.14 à 4.17 também é possível notar que em geral, exceto para a soldagem à 300° C, o uso do Argônio como gás de proteção resultou em maior dureza do cordão de solda, e o uso de 25% CO₂ tende sempre resultar em menor dureza, provavelmente devido à geração de precipitados maiores que resultaram em queda da dureza do revestimento (Tavares, 2016).

Percebe-se que independentemente do uso ou não de tecimento e do gás de proteção utilizado, a tendência geral é de redução na dureza do cordão de solda para maiores temperaturas de pré-aquecimento, variando da faixa de 220 kgf/mm² para soldagem à 25° C com Argônio e chegando à faixa de 160 kgf/mm² para soldagem com 8% CO₂ à 300° C.

Ao se comparar as figuras apresentadas, percebe-se que para maiores temperaturas de pré-aquecimento houve clara redução da dureza encontrada. Para a soldagem à 25° C, excetuando-se a soldagem sem tecimento com 8%CO₂ e 25% de CO₂, todas as medidas de dureza estão acima de 200 kgf/mm², com média de 204,5 e máximo de 222,83 kgf/mm² para a soldagem com Ar. Para a soldagem à 200° C, à exceção do uso de Ar e 2%O₂ com tecimento, todos os resultados estão abaixo de 200 kgf/mm², tendo por máximo nesta faixa a soldagem sem tecimento com 2%O₂, 192,07 kgf/mm². Para as soldagens à 250 e 300° C os valores estão todos abaixo de 200 e 195 kgf/mm² respectivamente. Este fenômeno provavelmente também está ligado ao aumento de diluição com o aumento da temperatura de pré-aquecimento tratado no Tópico 4.1 ou ainda à alteração na taxa de resfriamento, que pode alterar a microestrutura resultante, que pode possuir menores valores de dureza.

Os valores encontrados para a dureza neste trabalho são inferiores aos descritos por Ribeiro (2017), entretanto este afirmou que os valores por ele encontrado eram maiores, possivelmente devido à formação de estruturas diferentes, entretanto Mota (2016) encontrou dureza média de 239,1 kgf/mm² para soldagem com Ar puro, próximo ao maior valor para soldagem com Ar puro descrito neste trabalho (222,83

kgf/mm², sem tecimento à 25° C), e são inferiores aos encontrados por Tavares (2016) mas coerentes, com menores durezas para 8%CO₂ e 25%CO₂ respectivamente.

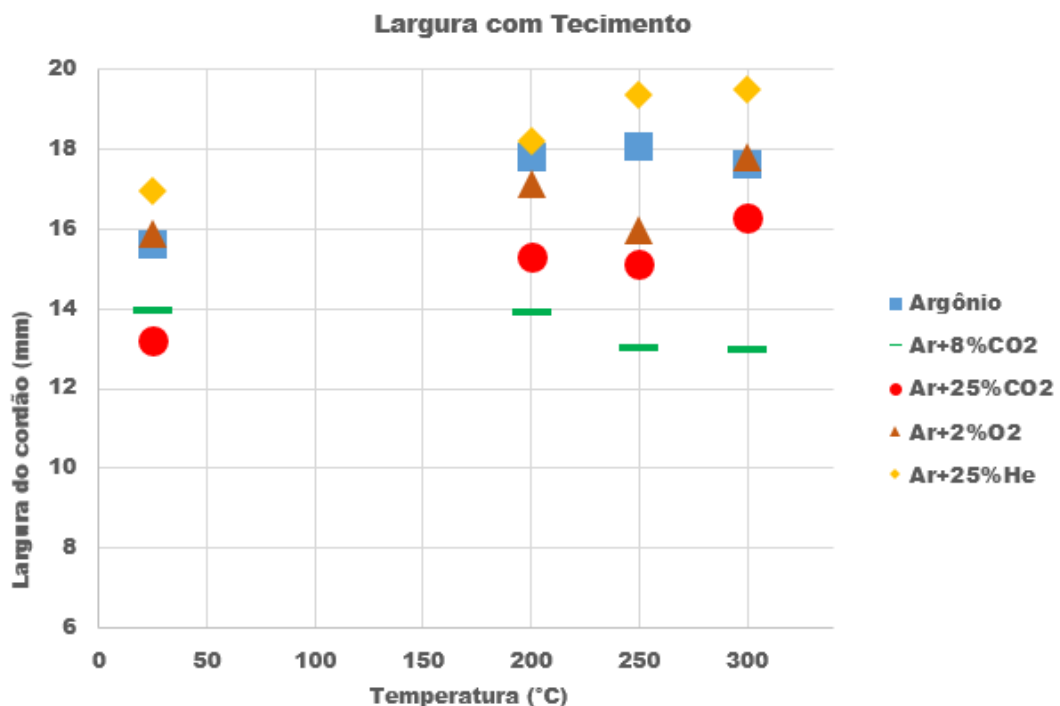
Quanto ao uso de tecimento não é possível descrever um comportamento claro em relação a dureza, ficando com valores próximos e inclusive alternando entre maior e menor com a variação da temperatura de pré-aquecimento.

4.3 Análise do Perfil do Cordão de Solda

Analisou-se o perfil das amostras cortadas dos cordões de solda e realizou-se a medida de largura, penetração e reforço, conforme descrito no Item 3.2.7. Neste tópico os gráficos apresentam apenas a média dos resultados, uma vez que a inserção da barra de desvio padrão dificultaria o bom entendimento dos resultados.

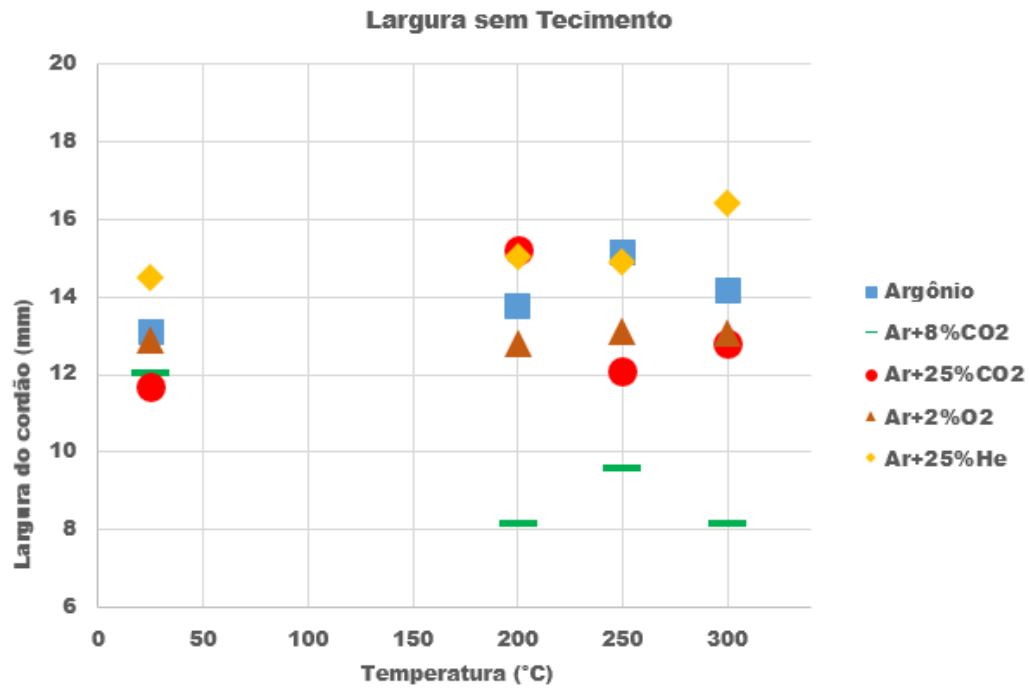
Os resultados obtidos para largura são apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19, com e sem o uso de tecimento, respectivamente.

Figura 4.18: Gráfico da Largura do cordão de solda com tecimento



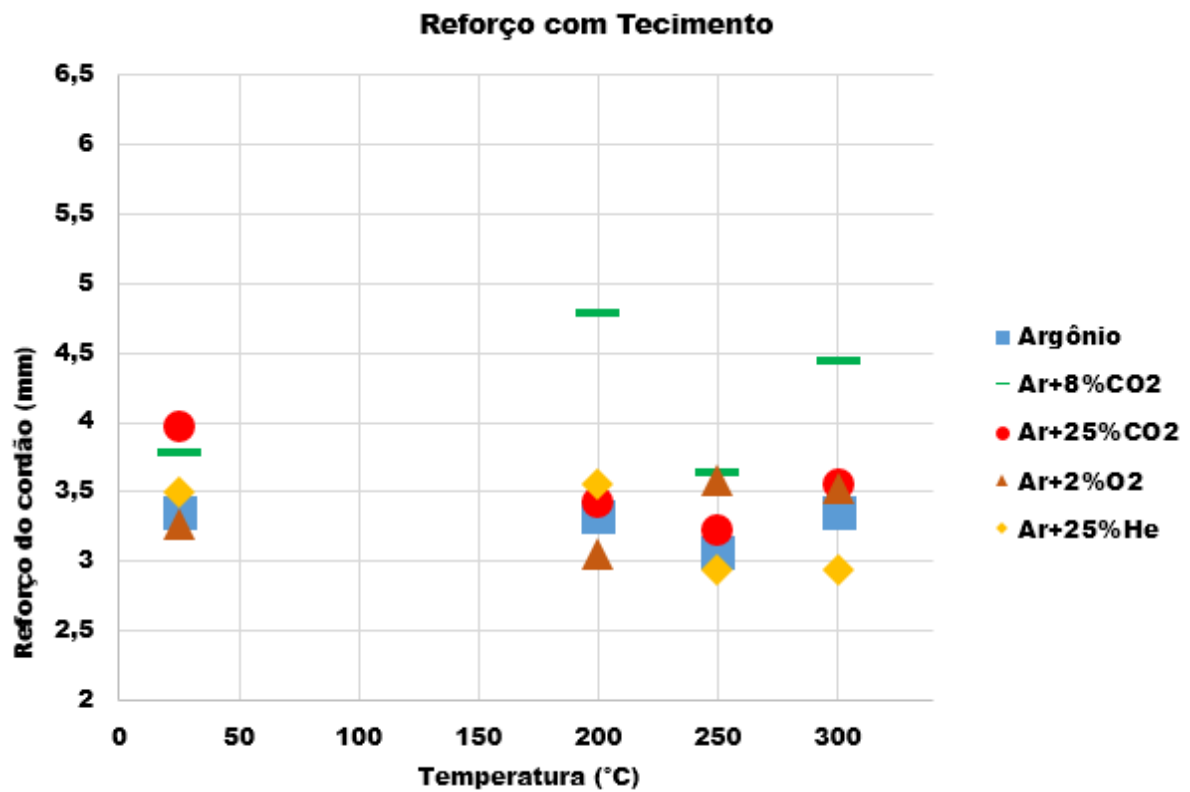
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.19: Gráfico da Largura do cordão de solda sem tecimento



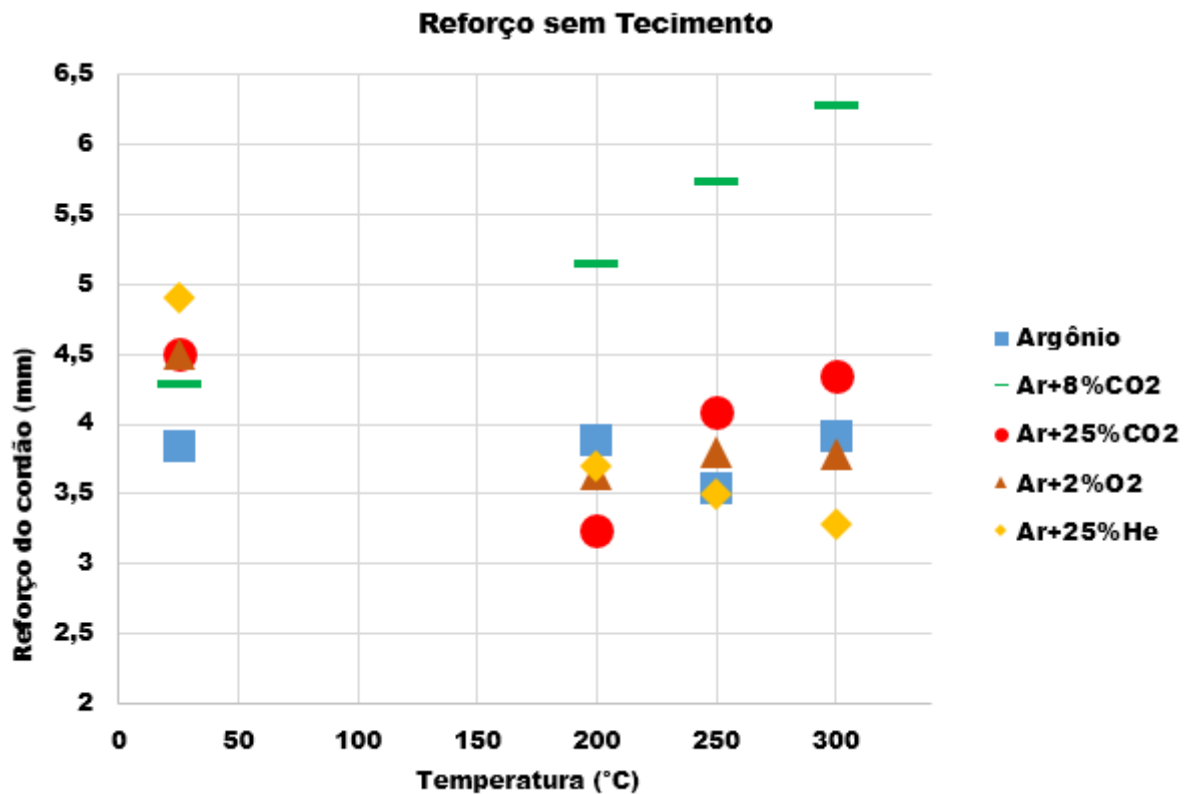
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.20: Reforço do cordão de solda com tecimento



Fonte: Próprio autor

Figura 4.21: Reforço do cordão de solda sem tecimento



Fonte: Próprio autor

Percebe-se que a tendência de maior largura é para a soldagem realizada com menores quantidades de gás ativo e que em geral a soldagem com Hélio resulta em maior largura e menor reforço, Pessoa et al. (2014).

O uso de tecimento resultou em aumento significativo da largura dos cordões, também encontrado por Silva et al. (2014), possivelmente devido ao maior aquecimento nas laterais da poça de fusão, possibilitando melhor distribuição do material de adição, Pessoa et al. (2014).

A soldagem com 8% CO₂ resultou em aspectos fora de padrão, com largura significativamente menor e reforço geralmente maior. Em geral a adição de gás ativo resultou em menor largura, frente à soldagem com gases inertes, e maior reforço, tendendo a pior molhabilidade do cordão, conforme afirmado por Baixo e Dutra (2009).

Em geral o aumento da temperatura de pré-aquecimento tende a resultar em maior largura e em menor reforço (maior molhabilidade), exceto para a soldagem com

8%CO₂, mas o padrão de comportamento varia para cada gás de proteção, não havendo um padrão definido.

4.4 Aplicabilidade do revestimento por soldagem

Analisando os gráficos apresentados no Item 4.3, é possível de se determinar a tendência de aplicabilidade da soldagem para os parâmetros estudados para revestimentos de placas de aço ASTM A-36.

De acordo com a Norma N-1707 da Petrobras, todos os cordões depositados sem o uso de tecimento possuem reforço maior que 3 mm, sendo portanto adequados para o revestimento por soldagem. Excetuando-se a soldagem com 25%He à 250 e 300° C, todos os cordões soldados com tecimento também se adequam ao valor mínimo estabelecido pela Petrobras para revestimento com materiais resistentes à corrosão.

Portanto o uso do tecimento torna-se atrativo, uma vez que, em geral, resultou em maior largura e menor reforço, mas ainda assim acima do requisitado pela norma, os cordões depositados terão melhor molhabilidade e será necessário menos cordões para recobrir uma mesma área, resultando em economia de material e tempo de aplicação, incorrendo em menores custos para a aplicação da técnica.

No quesito diluição, os gás de proteção com gás inerte demonstrou melhores resultados, comprovado por Tavares (2016) e Pessoa et al. (2014), sendo que o Argônio foi o único gás que proporcionou diluição menor que 20% (Magalhães, 2008), para soldagens até 250 ° C e reforço acima do requisitado pela norma N-1707 da Petrobras, e a mistura com Hélio obteve o melhor resultado, 14,65% de diluição geométrica para soldagem à 25° C, conforme afirmado por Zilio et.al (2014).

Capítulo V

CONCLUSÃO

Para os materiais e métodos utilizados, com os resultados apresentados no Capítulo 4, pode-se concluir:

- Para soldagem à 25° C, o Ar puro e a mistura com 25%He resultaram em diluições menores que 20%, podendo ser viável a utilização destes gases para o revestimento por soldagem MIG/MAG;
- O aumento na quantidade de gás ativo gera um aumento na diluição geométrica do cordão de solda;
- Para o aumento da temperatura de pré-aquecimento há uma tendência de aumento da diluição, aumento da largura e redução do reforço do cordão de solda;
- O tecimento gerou uma tendência de aumento da diluição, aumento da largura e redução do reforço;
- A dureza da zona fundida para as condições estudadas ficaram entre 160 e 220 kgf/mm²;
- O aumento da temperatura de pré-aquecimento gerou uma diminuição no valor da dureza para todas as condições estudadas.
- A utilização ou não do tecimento não apresentou uma tendência de variação dos valores de dureza;
- Houve uma tendência de diminuição do valor de dureza com o aumento do teor de gás ativo no gás de proteção.

Capítulo VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar melhor o comportamento da soldagem com 8%CO₂, devido ao comportamento fora de padrão;
- Investigar a influência de temperaturas intermediárias, principalmente próximo aos 200° C, pois este ponto apresentou desvios de tendência;
- Investigar se para os depósitos realizados com reforço acima de 3 mm, conforme exigido pela Petrobras N-1707, a diluição de Ferro em peso está dentro da faixa aceitável de 5% estabelecido pela ISO 10423 para revestimentos resistentes à corrosão;
- Para os parâmetros que resultaram em parâmetros aceitáveis, Item 4.4, realizar o recobrimento de uma superfície e determinar a qualidade e real aplicabilidade do revestimento para os parâmetros aqui encontrados;
- Realização de ensaios de corrosão para os cordões com parâmetros aceitáveis;

REFERÊNCIAS

BAIXO, Carlos Eduardo Iconomos; DUTRA, Jair Carlos. **Efeito do gás de proteção e do modo de transferência na aplicação da liga 625 em aço carbono**. Soldag. insp. (Impr.), São Paulo, v. 14, n. 4, p. 313-319, 2009;

BRACARENSE, Alexandre Queiroz; MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani. **Soldagem. Fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 3ª edição, 2009. ISBN-13: 978-8570417480;

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2007. ISBN 978-85-216-1595-8.

equipment - Well head and Christmas tree equipment. 3rd International Standard. 2003.

FIGUEIREDO, Kléber Mendes de. **Mapeamento dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem MIG de alumínio**, Uberlândia, Minas Gerais, 18 de fev. 2000.

GITTOS, M.F; GOOCH T.G. **Effect of iron dilution on corrosion resistance of NCr-Mo alloy cladding**. British Corrosion Journal, Vol. 31, nº4, p. 309-314, 1996.

GOMES, J .H. F.; **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 utilização de arame tubular inoxidável austenítico**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

ISO, 10423. 2003. **Petroleum and natural gas industries - Drilling and production**

LARQUER T.R. **Sincronização de oscilação magnética com processos de soldagem a arco**. Uberlândia. 2015.

MACHADO I.G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre.2007

MAGALHÃES, Sitonio Gomes de. **AVALIAÇÃO DO REVESTIMENTO A BASE DE LIGA DE NÍQUEL EM AÇO ESTRUTURAL, EMPREGANDO O METAL DE ADIÇÃO**

ERNiCrMo-3 ATRAVÉS DA SOLDAGEM MIG/MAG, Ceará, 2008. Disponível em <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/16195>. Acessado em julho de 2017.

MIRANDA, E.C., SILVA, C.C., MIRANDA, H.C., MOTTA, M.F., FARIAS, J.P., 2010, “**Influência do tecimento no nível de diluição e na geometria do cordão de solda utilizando o processo de soldagem TIG com alimentação automática de arame frio**”. Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Soldagem, Recife, Brasil;

MODENESI, Paulo J. et al. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte, 2012;

MOTA, Carlos Alberto Mendes da et al. **Revestimento de Níquel Depositado pela Soldagem MIG e MIG com Arame Frio**. Soldag. insp., São Paulo, v. 21, n. 4, p. 483-496, 2016 .

N-1707. 2010. **Projeto de vaso de pressão com revestimento metálico**. PETROBRAS. 2010.

PASSOS T.A. **Efeito da oscilação magnética do arco na microestrutura e na geometria do cordão de revestimento de aço inoxidável depositados por soldagem TIG**. Rio Grande do Sul. 2016

PESSOA, Antonio Rodolfo Paulino et al. **Seleção de parâmetros através do método Taguchi para soldagem de revestimento com ligas de níquel pelo processo MIG/MAG**. Soldag. Insp., São Paulo, v.15, n. 4, p. 317-324, 2010;

RIBEIRO, Rodrigo Andrade; GONCALVES, Renata Barbosa; PARANHOS, Ronaldo Pinheiro da Rocha. **Caracterização de Uma Junta Dissimilar entre Aço Carbono e Inconel 625 Obtida por Soldagem por Explosão**. Soldag. insp., São Paulo , v. 22, n. 1, p. 2-13, 2017;

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG**. Uberlândia, MG, Ed. Artliber, 2008. ISBN-13:978-8588098428;

SILVA, André Luis da Costa e, MEI, Paulo, **Aços e Ligas Especiais**, 2ª ed., Sumaré, SP, 1988;

SILVA, Cleiton Carvalho et al. **Minimização de defeitos em revestimentos de superligas de níquel depositada pelo processo TIG com alimentação de arame frio**. Soldag. insp., São Paulo, v. 19, n. 4, p. 323-332, 2014;

SPECIAL METALS, disponível em <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>; acessado em 02/08/2017.

TAVARES, Amanda Figueira. **Influência da adição de CO no gás de proteção de uma liga Inconel 625 depositado por soldagem MIG/MAG**, Rio Grande, 2016.

VIDAL, F.A., **Análise composicional em revestimentos de INCONEL 625 depositados por PTA-P em aço ASTM A36**. Vitória, 2014;

ZÍLIO, Gabriel Botelho, et al. **Influência do gás de proteção e condições de soldagem na diluição e molhabilidade de cordões de solda de aço inoxidável e liga de níquel depositados pelo processo MIG/MAG**. VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia. 2014;

ANEXO A –Tabela de análise do Perfil dos Cordões para cada parâmetro

| TECIMENTO | GÁS | ÁREA DO CORDÃO (mm²) | ÁREA PENETRADA (mm²) | Diluição (%) | Temperatura (°C) | Média Diluição | LARGURA DO CORDÃO (mm) | Média Largura (mm) | PENETRAÇÃO (mm) | Média Penetração (mm) | REFORÇO (mm) | Média Reforço (mm) |
|---------------|---------|----------------------|----------------------|--------------|------------------|----------------|------------------------|--------------------|-----------------|-----------------------|--------------|--------------------|
| SEM TECIMENTO | ARGÔNIO | 45,520 | 8,540 | 18,761 | 25 | 17,604 | 13,230 | 13,110 | 1,630 | 1,677 | 3,740 | 3,850 |
| | | 45,940 | 7,950 | 17,305 | | | 12,920 | | 1,560 | | 3,930 | |
| | | 48,430 | 8,110 | 16,746 | | | 13,180 | | 1,840 | | 3,880 | |
| | | 49,920 | 9,230 | 18,490 | 200 | 17,568 | 13,660 | 13,743 | 1,880 | 1,847 | 3,880 | 3,890 |
| | | 52,260 | 10,400 | 19,900 | | | 13,840 | | 1,970 | | 3,950 | |
| | | 49,110 | 7,030 | 14,315 | | | 13,730 | | 1,690 | | 3,840 | |
| | | 52,400 | 11,780 | 22,481 | 250 | 19,361 | 15,140 | 15,137 | 2,560 | 2,447 | 3,400 | 3,540 |
| | | 49,530 | 6,570 | 13,265 | | | 14,930 | | 2,000 | | 3,490 | |
| | | 61,060 | 13,640 | 22,339 | | | 15,340 | | 2,780 | | 3,730 | |
| | | 59,700 | 13,810 | 23,132 | 300 | 25,596 | 14,540 | 14,143 | 2,640 | 2,907 | 3,810 | 3,917 |
| | | 59,220 | 15,250 | 25,751 | | | 14,170 | | 3,100 | | 3,770 | |
| | | 59,240 | 16,530 | 27,903 | | | 13,720 | | 2,980 | | 4,170 | |
| COM TECIMENTO | ARGÔNIO | 48,130 | 9,340 | 19,406 | 25 | 19,413 | 15,480 | 15,623 | 1,250 | 1,200 | 3,170 | 3,360 |
| | | 48,470 | 7,890 | 16,278 | | | 16,230 | | 1,190 | | 3,400 | |
| | | 47,040 | 10,610 | 22,555 | | | 15,160 | | 1,160 | | 3,510 | |
| | | 48,520 | 9,150 | 18,858 | 200 | 20,400 | 17,690 | 17,803 | 1,090 | 1,123 | 3,130 | 3,327 |
| | | 48,930 | 11,740 | 23,993 | | | 17,690 | | 1,150 | | 3,370 | |
| | | 53,140 | 9,750 | 18,348 | | | 18,030 | | 1,130 | | 3,480 | |
| | | 55,960 | 13,270 | 23,713 | 250 | 24,269 | 18,120 | 18,057 | 1,610 | 1,560 | 3,020 | 3,073 |
| | | 54,800 | 12,720 | 23,212 | | | 17,870 | | 1,300 | | 3,140 | |
| | | 60,700 | 15,710 | 25,881 | | | 18,180 | | 1,770 | | 3,060 | |
| | | 62,930 | 15,430 | 24,519 | 300 | 25,412 | 17,210 | 17,630 | 1,800 | 1,797 | 3,330 | 3,357 |
| | | 61,680 | 15,470 | 25,081 | | | 18,180 | | 1,660 | | 3,330 | |
| | | 63,600 | 16,940 | 26,635 | | | 17,500 | | 1,930 | | 3,410 | |
| SEM TECIMENTO | 8% CO2 | 57,470 | 15,810 | 27,510 | 25 | 27,277 | 11,170 | 12,060 | 2,970 | 2,830 | 4,230 | 4,293 |
| | | 55,570 | 14,830 | 26,687 | | | 11,730 | | 2,680 | | 4,350 | |
| | | 61,300 | 16,940 | 27,635 | | | 13,280 | | 2,840 | | 4,300 | |
| | | 67,580 | 21,070 | 31,178 | 200 | 29,102 | 8,300 | 8,183 | 4,440 | 3,827 | 4,890 | 5,150 |
| | | 66,290 | 18,660 | 28,149 | | | 7,650 | | 4,020 | | 5,670 | |
| | | 52,540 | 14,700 | 27,979 | | | 8,600 | | 3,020 | | 4,890 | |
| | | 66,620 | 19,520 | 29,301 | 250 | 32,488 | 9,160 | 9,613 | 3,260 | 3,467 | 5,890 | 5,727 |
| | | 74,080 | 22,870 | 30,872 | | | 10,400 | | 3,560 | | 6,310 | |
| | | 50,520 | 18,840 | 37,292 | | | 9,280 | | 3,580 | | 4,980 | |
| | | 62,180 | 22,000 | 35,381 | 300 | 31,053 | 8,420 | 8,173 | 4,260 | 4,280 | 5,630 | 6,277 |
| | | 79,060 | 21,700 | 27,448 | | | 8,310 | | 4,210 | | 7,100 | |

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | 70,620 | 21,420 | 30,331 | | | 7,790 | | 4,370 | | 6,100 | |
| COM TECIMENT O | 8% CO2 | 56,280 | 17,350 | 30,828 | 25 | 30,923 | 13,560 | 13,970 | 1,950 | 1,830 | 3,960 | 3,793 |
| | | 54,760 | 16,840 | 30,752 | | | 14,420 | | 1,790 | | 3,880 | |
| | | 53,320 | 16,630 | 31,189 | | | 13,930 | | 1,750 | | 3,540 | |
| | | 48,850 | 18,760 | 38,403 | 200 | 34,952 | 12,520 | 13,913 | 1,790 | 2,213 | 3,960 | 4,793 |
| | | 98,230 | 30,440 | 30,988 | | | 16,800 | | 2,430 | | 6,390 | |
| | | 58,960 | 20,910 | 35,465 | | | 12,420 | | 2,420 | | 4,030 | |
| | | 61,950 | 21,770 | 35,141 | 250,000 | 37,305 | 12,950 | 13,007 | 2,420 | 2,333 | 4,050 | 3,647 |
| | | 52,600 | 21,150 | 40,209 | | | 13,050 | | 2,260 | | 3,400 | |
| | | 54,970 | 20,100 | 36,565 | | | 13,020 | | 2,320 | | 3,490 | |
| | | 58,520 | 19,140 | 32,707 | 300 | 28,570 | 12,820 | 12,963 | 2,000 | 1,897 | 4,060 | 4,443 |
| | | 66,580 | 18,800 | 28,237 | | | 12,950 | | 1,780 | | 4,720 | |
| | | 65,530 | 16,230 | 24,767 | | | 13,120 | | 1,910 | | 4,550 | |
| SEM TECIMENT O | 25% CO2 | 61,150 | 19,580 | 32,020 | 25 | 31,779 | 11,580 | 11,677 | 3,320 | 3,123 | 4,860 | 4,500 |
| | | 54,130 | 16,400 | 30,297 | | | 11,420 | | 3,020 | | 4,320 | |
| | | 53,000 | 17,500 | 33,019 | | | 12,030 | | 3,030 | | 4,320 | |
| | | 63,540 | 28,020 | 44,098 | 200 | 41,468 | 14,900 | 15,223 | 4,330 | 3,940 | 3,230 | 3,237 |
| | | 65,000 | 25,800 | 39,692 | | | 15,190 | | 3,460 | | 3,250 | |
| | | 70,000 | 28,430 | 40,614 | | | 15,580 | | 4,030 | | 3,230 | |
| | | 59,930 | 22,910 | 38,228 | 250 | 37,712 | 10,730 | 12,083 | 4,030 | 3,990 | 4,420 | 4,090 |
| | | 68,730 | 24,480 | 35,618 | | | 15,030 | | 3,510 | | 3,810 | |
| | | 58,260 | 22,890 | 39,289 | | | 10,490 | | 4,430 | | 4,040 | |
| | | 64,400 | 25,380 | 39,410 | 300 | 35,205 | 11,370 | 12,793 | 4,280 | 3,843 | 4,470 | 4,343 |
| | | 70,820 | 21,540 | 30,415 | | | 15,240 | | 3,160 | | 3,950 | |
| | | 68,760 | 24,610 | 35,791 | | | 11,770 | | 4,090 | | 4,610 | |
| COM TECIMENT O | 25% CO2 | 56,010 | 20,150 | 35,976 | 25 | 34,046 | 12,910 | 13,213 | 2,140 | 2,133 | 3,750 | 3,970 |
| | | 58,190 | 18,870 | 32,428 | | | 13,230 | | 1,930 | | 3,950 | |
| | | 65,570 | 22,120 | 33,735 | | | 13,500 | | 2,330 | | 4,210 | |
| | | 68,360 | 31,890 | 46,650 | 200 | 43,233 | 15,230 | 15,310 | 2,890 | 2,757 | 3,490 | 3,427 |
| | | 68,200 | 29,850 | 43,768 | | | 15,260 | | 2,680 | | 3,540 | |
| | | 65,810 | 25,850 | 39,280 | | | 15,440 | | 2,700 | | 3,250 | |
| | | 67,200 | 31,230 | 46,473 | 250 | 47,003 | 15,140 | 15,110 | 2,980 | 2,903 | 3,610 | 3,233 |
| | | 67,400 | 29,670 | 44,021 | | | 15,300 | | 2,630 | | 3,350 | |
| | | 65,170 | 32,920 | 50,514 | | | 14,890 | | 3,100 | | 2,740 | |
| | | 73,280 | 35,850 | 48,922 | 300 | 48,881 | 15,890 | 16,290 | 3,000 | 3,083 | 3,100 | 3,553 |
| | | 79,270 | 39,270 | 49,540 | | | 16,840 | | 3,370 | | 3,880 | |
| | | 71,770 | 34,580 | 48,182 | | | 16,140 | | 2,880 | | 3,680 | |
| | 2% O2 | 53,730 | 13,000 | 24,195 | 25 | 23,981 | 11,790 | 12,887 | 2,280 | 2,537 | 4,160 | 4,500 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--------|---------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| SEM TECIMENT O | | 51,590 | 13,400 | 25,974 | | | 11,820 | | 2,420 | | 4,000 | |
| | | 82,710 | 18,010 | 21,775 | | | 15,050 | | 2,910 | | 5,340 | |
| | | 56,660 | 15,850 | 27,974 | 200 | 26,456 | 12,950 | 12,807 | 2,840 | 2,520 | 3,770 | 3,643 |
| | | 50,890 | 13,190 | 25,919 | | | 12,790 | | 2,440 | | 3,510 | |
| | | 50,440 | 12,850 | 25,476 | | | 12,680 | | 2,280 | | 3,650 | |
| | | 61,780 | 13,560 | 21,949 | 250 | 26,022 | 12,810 | 13,103 | 2,180 | 2,243 | 3,950 | 3,800 |
| | | 55,550 | 15,060 | 27,111 | | | 13,550 | | 2,390 | | 3,770 | |
| | | 52,400 | 15,200 | 29,008 | | | 12,950 | | 2,160 | | 3,680 | |
| | | 60,670 | 19,740 | 32,537 | 300 | 32,755 | 13,210 | 13,067 | 3,090 | 3,030 | 3,680 | 3,787 |
| | | 57,670 | 17,770 | 30,813 | | | 12,750 | | 2,670 | | 3,930 | |
| 61,750 | 21,560 | 34,915 | 13,240 | 3,330 | | | 3,750 | | | | | |
| COM TECIMENT O | 2% O2 | 52,300 | 11,770 | 22,505 | 25 | 24,486 | 15,790 | 15,890 | 1,380 | 1,467 | 3,220 | 3,273 |
| | | 55,900 | 14,160 | 25,331 | | | 16,230 | | 1,550 | | 3,500 | |
| | | 50,700 | 12,990 | 25,621 | | | 15,650 | | 1,470 | | 3,100 | |
| | | 54,510 | 15,490 | 28,417 | 200 | 28,057 | 16,720 | 17,133 | 1,420 | 1,493 | 3,000 | 3,057 |
| | | 56,300 | 16,010 | 28,437 | | | 16,940 | | 1,580 | | 3,000 | |
| | | 59,670 | 16,300 | 27,317 | | | 17,740 | | 1,480 | | 3,170 | |
| | | 59,820 | 16,110 | 26,931 | 250 | 30,404 | 15,790 | 15,973 | 1,700 | 1,720 | 3,470 | 3,590 |
| | | 61,090 | 19,070 | 31,216 | | | 16,240 | | 1,650 | | 3,630 | |
| | | 62,330 | 20,610 | 33,066 | | | 15,890 | | 1,810 | | 3,670 | |
| | | 101,430 | 40,550 | 39,978 | 300 | 38,524 | 21,000 | 17,777 | 3,050 | 2,480 | 3,820 | 3,533 |
| 63,230 | 22,970 | 36,328 | 15,950 | 2,110 | | | 3,630 | | | | | |
| 65,300 | 25,640 | 39,265 | 16,380 | 2,280 | | | 3,150 | | | | | |
| SEM TECIMENT O | 25% He | 76,470 | 10,770 | 14,084 | 25 | 14,651 | 15,430 | 14,487 | 1,860 | 1,897 | 5,390 | 4,897 |
| | | 45,310 | 7,040 | 15,537 | | | 12,390 | | 1,670 | | 3,960 | |
| | | 76,890 | 11,020 | 14,332 | | | 15,640 | | 2,160 | | 5,340 | |
| | | 61,870 | 18,480 | 29,869 | 200 | 28,725 | 14,780 | 15,027 | 2,880 | 2,940 | 3,640 | 3,700 |
| | | 66,900 | 13,700 | 20,478 | | | 15,040 | | 2,570 | | 3,990 | |
| | | 63,860 | 22,880 | 35,828 | | | 15,260 | | 3,370 | | 3,470 | |
| | | 66,390 | 20,530 | 30,923 | 250 | 29,884 | 15,450 | 14,907 | 3,060 | 2,847 | 3,550 | 3,497 |
| | | 60,110 | 18,550 | 30,860 | | | 14,480 | | 2,800 | | 3,480 | |
| | | 57,340 | 15,980 | 27,869 | | | 14,790 | | 2,680 | | 3,460 | |
| | | 66,180 | 24,630 | 37,217 | 300 | 35,578 | 16,230 | 16,393 | 3,190 | 3,170 | 3,440 | 3,287 |
| 67,360 | 25,130 | 37,307 | 17,040 | 3,480 | | | 3,210 | | | | | |
| 62,090 | 20,000 | 32,211 | 15,910 | 2,840 | | | 3,210 | | | | | |
| COM TECIMENT O | 25% He | 47,590 | 5,860 | 12,314 | 25 | 15,373 | 16,580 | 16,930 | 0,630 | 0,893 | 3,530 | 3,493 |
| | | 48,430 | 8,880 | 18,336 | | | 16,610 | | 1,070 | | 3,330 | |
| | | 49,970 | 7,730 | 15,469 | | | 17,600 | | 0,980 | | 3,620 | |

| | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|------------|-----|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 60,980 | 12,970 | 21,26 9 | | | 18,250 | | 1,370 | | 3,440 | |
| | 60,570 | 17,610 | 29,07 4 | 200 | 24,724 | 18,330 | 18,187 | 1,650 | 1,620 | 3,460 | 3,557 |
| | 65,680 | 15,650 | 23,82 8 | | | 17,980 | | 1,840 | | 3,770 | |
| | 75,850 | 26,250 | 34,60 8 | | | 19,910 | | 2,370 | | 2,970 | |
| | 72,310 | 23,390 | 32,34 7 | 250 | 34,081 | 18,510 | 19,363 | 2,840 | 2,520 | 2,950 | 2,940 |
| | 74,130 | 26,160 | 35,28 9 | | | 19,670 | | 2,350 | | 2,900 | |
| | 75,110 | 28,610 | 38,09 1 | | | 19,450 | | 2,550 | | 3,080 | |
| | 74,490 | 28,190 | 37,84 4 | 300 | 39,413 | 18,940 | 19,500 | 2,460 | 2,527 | 2,900 | 2,940 |
| | 80,440 | 34,030 | 42,30 5 | | | 20,110 | | 2,570 | | 2,840 | |

Anexo B – Tabela de Dureza (Hv) para os cordões de solda

| Tecimento | Dureza (HV) | Carga (kgf) | Média | Des. Padrão | Gás | Temperatura de Pré - aquecimento (°C) |
|---------------|-------------|-------------|--------|-------------|---------|---------------------------------------|
| Com Tecimento | 200,4 | 5 | 206,33 | 5,28 | Argônio | 25 |
| | 208,1 | | | | | |
| | 210,5 | | | | | |
| Com Tecimento | 212,5 | 5 | 222,23 | 9,46 | Argônio | 200 |
| | 222,8 | | | | | |
| | 231,4 | | | | | |
| Com Tecimento | 200,0 | 5 | 194,53 | 5,77 | Argônio | 250 |
| | 195,1 | | | | | |
| | 188,5 | | | | | |
| Com Tecimento | 182,1 | 5 | 184,57 | 6,27 | Argônio | 300 |
| | 179,9 | | | | | |
| | 191,7 | | | | | |
| Sem Tecimento | 220,9 | 5 | 222,83 | 3,35 | Argônio | 25 |
| | 220,9 | | | | | |
| | 226,7 | | | | | |
| Sem Tecimento | 199,6 | 5 | 200,90 | 1,18 | Argônio | 200 |
| | 201,2 | | | | | |
| | 201,9 | | | | | |
| Sem Tecimento | 189,9 | 5 | 184,73 | 4,62 | Argônio | 250 |
| | 181,0 | | | | | |
| | 183,3 | | | | | |
| Sem Tecimento | 186,1 | 5 | 186,10 | 6,20 | Argônio | 300 |
| | 192,3 | | | | | |
| | 179,9 | | | | | |
| Com Tecimento | 209,9 | 5 | 208,00 | 4,10 | 2% O2 | 25 |
| | 203,3 | | | | | |
| | 210,8 | | | | | |
| Com Tecimento | 202,9 | 5 | 198,63 | 7,05 | 2% O2 | 200 |
| | 202,5 | | | | | |
| | 190,5 | | | | | |
| Com Tecimento | 177,2 | 5 | 180,53 | 6,30 | 2% O2 | 250 |
| | 187,8 | | | | | |
| | 176,6 | | | | | |
| Com Tecimento | 186,5 | 5 | 185,07 | 2,15 | 2% O2 | 300 |
| | 182,6 | | | | | |
| | 186,1 | | | | | |
| Sem Tecimento | 209,0 | 5 | 206,43 | 4,71 | 2% O2 | 25 |
| | 209,3 | | | | | |

| | | | | | | |
|--------------------------|-------|---|--------|------|--------|-----|
| | 201,0 | | | | | |
| Sem Tecimento | 192,5 | 5 | 192,07 | 7,86 | 2% O2 | 200 |
| | 184,0 | | | | | |
| | 199,7 | | | | | |
| Sem Tecimento | 191,3 | 5 | 190,83 | 1,46 | 2% O2 | 250 |
| | 189,2 | | | | | |
| | 192 | | | | | |
| Sem Tecimento | 187,5 | 5 | 189,03 | 2,00 | 2% O2 | 300 |
| | 188,3 | | | | | |
| | 191,3 | | | | | |
| Com Tecimento | 213,8 | 5 | 213,00 | 3,47 | 25% He | 25 |
| | 216,0 | | | | | |
| | 209,2 | | | | | |
| Com Tecimento | 180,6 | 5 | 179,70 | 2,38 | 25% He | 200 |
| | 177,0 | | | | | |
| | 181,5 | | | | | |
| Com Tecimento | 174,6 | 5 | 176,60 | 5,58 | 25% He | 250 |
| | 172,3 | | | | | |
| | 182,9 | | | | | |
| Com Tecimento | 173,5 | 5 | 174,33 | 1,36 | 25% He | 300 |
| | 173,6 | | | | | |
| | 175,9 | | | | | |
| Sem Tecimento | 207,7 | 5 | 207,30 | 1,44 | 25% He | 25 |
| | 208,5 | | | | | |
| | 205,7 | | | | | |
| Sem Tecimento | 176,4 | 5 | 171,07 | 4,89 | 25% He | 200 |
| | 170,0 | | | | | |
| | 166,8 | | | | | |
| Sem Tecimento | 183,9 | 5 | 185,23 | 4,74 | 25% He | 250 |
| | 190,5 | | | | | |
| | 181,3 | | | | | |
| Sem Tecimento | 172,7 | 5 | 170,50 | 2,99 | 25% He | 300 |
| | 171,7 | | | | | |
| | 167,1 | | | | | |
| Com Tecimento | 214,8 | 5 | 212,37 | 5,29 | 8% CO2 | 25 |
| | 206,3 | | | | | |
| | 216,0 | | | | | |
| Com Tecimento | 181,0 | 5 | 178,87 | 5,24 | 8% CO2 | 200 |
| | 172,9 | | | | | |
| | 182,7 | | | | | |
| Com Tecimento | 190,0 | 5 | 190,10 | 3,05 | 8% CO2 | 250 |
| | 193,2 | | | | | |
| | 187,1 | | | | | |

| | | | | | | |
|--------------------------|-------|----------|---------------|-------------|----------------|------------|
| Com Tecimento | 154,5 | 5 | 161,07 | 5,72 | 8% CO2 | 300 |
| | 163,7 | | | | | |
| | 165,0 | | | | | |
| Sem Tecimento | 193,3 | 5 | 191,67 | 2,49 | 8% CO2 | 25 |
| | 188,8 | | | | | |
| | 192,9 | | | | | |
| Sem Tecimento | 182,3 | 5 | 181,70 | 2,85 | 8% CO2 | 200 |
| | 184,2 | | | | | |
| | 178,6 | | | | | |
| Sem Tecimento | 183,6 | 5 | 175,00 | 7,51 | 8% CO2 | 250 |
| | 171,7 | | | | | |
| | 169,7 | | | | | |
| Sem Tecimento | 173,9 | 5 | 177,33 | 5,69 | 8% CO2 | 300 |
| | 174,2 | | | | | |
| | 183,9 | | | | | |
| Com Tecimento | 189,2 | 5 | 191,10 | 4,65 | 25% CO2 | 25 |
| | 196,4 | | | | | |
| | 187,7 | | | | | |
| Com Tecimento | 179,8 | 5 | 174,50 | 4,60 | 25% CO2 | 200 |
| | 171,6 | | | | | |
| | 172,1 | | | | | |
| Com Tecimento | 171,5 | 5 | 168,00 | 3,05 | 25% CO2 | 250 |
| | 166,6 | | | | | |
| | 165,9 | | | | | |
| Com Tecimento | 162,5 | 5 | 165,97 | 6,00 | 25% CO2 | 300 |
| | 162,5 | | | | | |
| | 172,9 | | | | | |
| Sem Tecimento | 183,1 | 5 | 181,50 | 3,40 | 25% CO2 | 25 |
| | 177,6 | | | | | |
| | 183,8 | | | | | |
| Sem Tecimento | 173,2 | 5 | 169,40 | 4,32 | 25% CO2 | 200 |
| | 164,7 | | | | | |
| | 170,3 | | | | | |
| Sem Tecimento | 185,6 | 5 | 181,30 | 7,62 | 25% CO2 | 250 |
| | 172,5 | | | | | |
| | 185,8 | | | | | |
| Sem Tecimento | 168,5 | 5 | 167,10 | 3,24 | 25% CO2 | 300 |
| | 163,4 | | | | | |
| | 169,4 | | | | | |