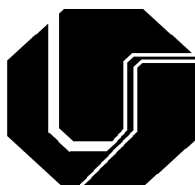


THONSON FERREIRA COSTA

**APLICAÇÃO DE PROCESSOS MAG CURTO-
CIRCUITO CONVENCIONAL E CONTROLADO NA
SOLDAGEM DE DUTOS DE AÇO CARBONO**



UFU

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2011

THONSON FERREIRA COSTA

**APLICAÇÃO DE PROCESSOS MAG CURTO-CIRCUITO
CONVENCIONAL E CONTROLADO NA SOLDAGEM DE DUTOS DE
AÇO CARBONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

FICHA CATALOGRÁFICA
(A SER PREENCHIDA)

Aos meus pais, Antonio e Graça.

À minha irmã, Thyana.

À minha namorada, Sabrine.

AGRADECIMENTOS

A Deus;

Ao meu orientador, Louriel Vilarinho, pela orientação, ensinamento, amizade e paciência;

À minha família, o alicerce da minha vida, pelo apoio incondicional, paciência e incentivo;

À minha namorada, Sabrine de Souza, por esta ao meu lado durante todo esse período, pelo apoio, compreensão, paciência, pelas contribuições e auxílio na execução deste trabalho;

Ao programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU pela oportunidade;

À CAPES pelo suporte financeiro;

Ao Laprosolda/UFU pelo apoio técnico e laboratorial;

Aos Prof(s). Valtair Ferraresi e Américo Scotti pelos ensinamentos, apoio e amizade;

Ao Marcelo, Daniel, Helio, José Enrique, Diandro e Edmundo pela contribuição direta na realização deste trabalho;

Aos amigos e amigas do Laprosolda, em especial ao Hernan, Marcelo, Helio, Daniel, Regina, Daiana, Ribeiro, André, Lindbergh e José Enrique;

Ao Eduardo Takahashi pela amizade e apoio na transição da física para a engenharia;

Ao Edmar, técnico da oficina da física, pelo apoio na confecção de equipamentos;

Aos técnicos da oficina, Lazinho, Passarinho e Reginaldo.

COSTA, T. F. **Aplicação de Processos MAG Curto-circuito Convencional e Controlado na Soldagem de Dutos de Aço Carbono**. 2011. 197 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

RESUMO

A procura por processos de soldagem versáteis e de alta-produtividade é uma necessidade contínua, em especial na união de dutos que representam o cerne do escoamento dos mais diferentes fluidos. Assim, a pesquisa na soldagem de tubulações utilizando processos MIG/MAG com transferência por curto-circuito controlada tem-se tornado uma tendência na busca de soldas de alta qualidade, visto que, o controle da corrente permite melhorar a transferência metálica, proporcionando estabilidade ao processo de soldagem e a poça de fusão. Neste contexto, este trabalho propõe estabelecer vantagens e limites operacionais dos processos MIG/MAG com transferência por curto-circuito convencional e controlado (STT, RMD e CMT), visando a união de dutos de pequeno diâmetro e parede fina com passe único, nas progressões ascendente e descendente, levando em consideração os critérios de aceitabilidade e a geometria dos cordões. Para tanto, optou-se por variar os parâmetros de regulagem de cada processo e a velocidade de alimentação do arame, além das técnicas de soldagem, como o ângulo de ataque e oscilação da tocha, procurando manter a mesma quantidade de material depositado por comprimento de solda. As soldas foram realizadas em dutos de aço carbono ABNT 1020 com 2½" de diâmetro nominal (63,0 mm de diâmetro interno) e espessura de 5,5 mm preparados com chanfro de acordo com as recomendações da norma AWS D10.12. Utilizou-se ainda arame eletrodo ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro protegido com Ar+25%CO₂. De forma geral, os resultados mostraram que a progressão ascendente possui maior capacidade de penetração, enquanto que a descendente é mais apropriada para maiores velocidades de soldagem. Observou-se também que o curto-circuito convencional apresentou resultados razoáveis para a progressão ascendente e para a descendente, resultando num envelope operacional constante. Ao passo que, o STT e o RMD apresentaram um maior envelope operacional na progressão descendente. Porém, o STT apresentou um envelope mais robusto, com uma faixa trabalho maior de tensão para todos os níveis de velocidade de alimentação. Por outro lado, o CMT, com envelope operacional mais robusto na ascendente, trabalha com valores de tensão de soldagem muito mais baixos, o que justifica o baixo aporte térmico do processo.

Palavras-Chave: Soldagem de dutos; Transferência Metálica Controlada; STT; RMD; CMT; Progressão ascendente e descendente.

COSTA, T. F. **Application of MAG Processes with Short-circuit Transfer in Conventional and Controlled Modes for Carbon-Steel Pipe Welding.** 2011. 197 f. MSc. Thesis, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil.

ABSTRACT

The demand for versatile and high-productivity welding processes is a continuing need, especially for pipelines, which represent the basis for different fluid flows. Thus, research in pipe welding, using MAG process with controlled short-circuit transfer, has become a trend in the search for high quality welds, since the current control improves metal transfer, providing stability to the welding process and weld pool. In this context, this paper aims to establish operational limits and advantages of MAG processes with short-circuit transfer for conventional and controlled (STT, RMD and CMT) modes, during single-pass welding of small-diameter pipes with thin wall and using both ascending and descending progression and taking into account the criteria of acceptability and weld-bead geometry. Therefore, a set of parameters from each process, the wire-feed speed and welding techniques (such as, the attack angle and torch oscillation) were varied following different operational designs, trying to keep the same amount of material deposited per length of weld. The welds were carried out in carbon steel pipes ABNT 1020 with 2½" nominal diameter and 5.5-mm thickness, grooved in accordance with the recommendations of AWS D10.12 (V joint with 75° include angle). Also, ER 70S-6 wire with 1.2-mm diameter was used with Ar+25%CO₂, as shielding gas. The results showed that the upward progression has greater penetration, while descending is more suitable for higher travel speeds. It was also observed that the conventional short-circuit mode presented reasonable results for both upward and downward progression, resulting in a uniform operational envelope, whereas STT and RMD processes have larger operational envelope in downward progression. On the other hand, STT process presented a more robust operational envelope with larger working-range for voltage setup for all levels of wire-feed speed. Finally, CMT process presents a more robust operational envelope for upward progression with considerable lower voltage values, which explains the overall lower heat input.

Keywords: Pipe Welding; Controlled Metal Transfer; STT; RMD; CMT; Upward and Downward Progression.

Lista de Símbolos

	Força de Lorentz
	Força eletromagnética
	Campo magnético
	Densidade de corrente
Δm	Variação da massa
ANOVA	Análise de variância
CC	Corrente constante
CMT	Cold Metal Transfer
DBCP	Distância bico de contato peça
DESVPD	Desvio padrão
ER	Eletrodo revestido
F_a	Força de arraste
F_g	Força gravitacional
F_v	Força de vaporização
F_γ	Força da tensão superficial
GMAW	Gas Metal Arc Welding
I_M	Corrente média
Laprosolda	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem
LF	Largura da face
m_f	Massa final
m_i	Massa inicial
MIG/MAG	Metal Inert Gas / Metal Active Gas
P	Posição plana
P	Nível de significância
PCC	Planejamento Composto Central
RF	Reforço da face
RMD	Regulated Metal Deposition
RR	Reforço da raiz
SC	Posição sobrecabeça
STT	Surface Tension Transfer
T_{Arco}	Tempo de arco aberto
T_d	Taxa de deposição
T_{DC}	Taxa de deposição por unidade de comprimento

ix

U_M	Tensão média
V	Posição vertical
V_A	Velocidade de alimentação do arame
$V_{A \text{ Média}}$	Velocidade de alimentação do arame média
V_S	Velocidade de soldagem
$V_{S \text{ Média}}$	Velocidade de soldagem média
Y	Frequência

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Balanço entre o efeito <i>Pinch</i> e tensão superficial	4
2.2 Processo de soldagem MIG/MAG	7
2.3 Transferência metálica por curto-circuito convencional	8
2.3.1 Parâmetros de regulação	10
2.4 Transferência por curto-circuito controlado	12
2.4.1 Processo de soldagem STT	13
2.4.2 Processo de soldagem RMD	17
2.4.3 Processo de soldagem CMT	20
2.5 Progressão de soldagem ascendente e descendente	25
METODOLOGIA EXPERIMENTAL	29
3.1 Bancada experimental	30
3.1.1 Fonte e sistema de alimentação para os processos MAG curto-circuito convencional e STT	31
3.1.2 Fonte e sistema de alimentação para o processo RMD	32
3.1.3 Fonte e sistema de alimentação para o processo CMT	33
3.1.4 Tocha e sistema de refrigeração	34
3.1.2 Robô	35
3.1.3 Suporte de fixação dos tubos de teste	36
3.1.4 Sistema de aquisição	37
3.2 Materiais	39
3.1.1 Metal de adição	39
3.1.2 Material de base	39
3.1.3 Gás de proteção	41
3.3 Planejamento experimental	41
3.4 Critérios de aceitabilidade	44
3.5 Análise geométrica do cordão	45
3.5.1 Característica geométrica	45
3.5.2 Efeito dos fatores sobre a geometria do cordão	46
TESTES PRELIMINARES	47
4.1 Determinação dos níveis para os fatores no processo MAG Curto-Circuito Convencional	48
4.1.1 Velocidade de alimentação	49
4.1.2 Tensão de soldagem	49
4.1.3 Velocidade de soldagem	50
4.1.4 Oscilação da tocha	51
4.2 Determinação dos níveis para os fatores do processo STT	52
4.2.1 Corrente de pico	53
4.2.2 Corrente de base	53
4.2.3 Tail out	54
4.2.4 Verificação da quantidade de material depositado	54
4.3 Determinação dos níveis para os fatores do processo RMD	54
4.3.1 Ajuste do arco / Trim	55
4.3.2 Arc control	55
4.3.3 Verificação da quantidade de material depositado	55

4.4 Determinação dos níveis para os fatores variados no processo CMT	56
4.4.1 Comprimento de arco.....	56
4.4.2 Controle dinâmico	57
4.4.3 Verificação da quantidade de material depositado.....	58
RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1. Processo MAG por Curto-Circuito Convencional	61
5.1.1. Critérios de aceitabilidade.....	63
5.1.2 Análise geométrica dos cordões	68
5.2. Processo STT.....	80
5.2.1. Critérios de aceitabilidade.....	82
5.2.2 Análise geométrica do cordão	85
5.3 Processo RMD	97
5.3.1 Critério de aceitabilidade	99
5.3.2 Análise geométrica dos cordões.....	104
5.4 Processo CMT.....	116
5.4.1 Critérios de aceitabilidade.....	117
5.4.2 Análise geométrica dos cordões.....	122
5.4.3 Verificação de novo conjunto operacional	128
5.5 Envelopes operacionais finais.....	130
CONCLUSÕES.....	133
TRABALHOS FUTUROS.....	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
OSCILOGRAMAS: COMPORTAMENTO DINÂMICO DA FONTE.....	146
9.1 Soldagens realizadas com o processo MAG curto-circuito convencional	146
9.2 Soldagens Realizadas com o Processo STT	157
9.3 Soldagens realizadas com o processo RMD.....	169
9.4 Soldagens realizadas com o processo CMT	179

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O setor de soldagem é constante alvo de investimentos tecnológicos, voltados para a segurança, o meio ambiente e para a redução dos custos, com a obtenção de ganho em produtividade e qualidade. Daí a necessidade de buscar novas tecnologias de soldagem, tais como novos processos, materiais e fabricação, o que demanda maior conhecimento profissional. Segundo Romero (2009), o principal desafio que o setor de solda enfrenta é a qualificação de pessoal (soldadores, operários, inspetores, entre outros), de forma a tornar o setor apto a absorver, com rapidez, estas novas tecnologias. Tecnologias estas que estão relacionadas principalmente ao desenvolvimento de novas fontes de soldagem com controle eletrônico do processo.

Estas novas fontes, embora adotem a ideia do sinergismo, ou seja, procuram a autoregulação a partir de um conjunto de parâmetros, elas ainda requerem o ajuste de parâmetros, que anteriormente não existiam. Assim, o conhecimento da influência destes parâmetros sobre a qualidade da união soldada é fundamental. Além disto, deve-se adotar pelo conhecimento real e não comercial das vantagens e limitações de cada abordagem adotada pelos fabricantes para a linha de desenvolvimento tecnológico (controle do formato de onda e/ou alteração da dinâmica de alimentação do arame).

Em específico, dentro do universo de novas tecnologias de fontes, os processos que trabalham em modo de transferência por curto-circuito destacam-se por serem amplamente utilizados e possibilitarem a soldagem fora de posição. Especificamente ainda, a soldagem MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) destaca-se pelo seu largo uso industrial. Para esta combinação MIG/MAG curto-circuito, as tecnologias têm caminhado para o uso de processos derivativos, proporcionando o controle da transferência metálica, onde o processo passa a ser denominado de curto-circuito controlado.

Neste contexto, como opções comerciais existem, além do processo curto-circuito convencional, os processos curto-circuito controlado como o CCC® (Curto-circuito controlado da empresa IMC), CMT® (Cold Metal Transfer da empresa Fronius), Fast Root® (da empresa Kemppi), RMD® (Regulated Metal Deposition da empresa Miller) e STT®

(Surface Tension Transfer da empresa Lincoln), dentre outros. Como discutido, é importante, neste universo, estabelecer cientificamente vantagens e limitações, mas sem a visão comparativa, pois esta depende de outros fatores importantes como custos de implantação e produção, logística, manutenção, assistência técnica, etc., que são individuais a cada planta fabril.

Deve-se ressaltar que se trata de processos que utilizam sistemas de controle eletrônicos e/ou mecânicos para monitorar e controlar a intensidade da corrente durante a transferência metálica, modificando o formato de onda da corrente de acordo com as imposições do arco. Desta forma, acredita-se que eles possibilitem a redução da formação de respingos e fumos, aumentando a produtividade, além de melhorar a estabilidade da transferência e proporcionar cordões de alta qualidade.

O levantamento destas vantagens e limitações operacionais dos processos MAG que trabalham com transferência por curto-circuito, quer seja convencional ou controlado, deve ser baseado em uma condição particular. Assim, dada a grande importância de dutos para o escoamento dos mais diversos fluidos e a grande aplicabilidade da soldagem para a união destes dutos, é importante realizar este levantamento de vantagens e limitações operacionais para a soldagem de dutos com processo MAG curto-circuito, focando-se em dutos em aço carbono soldados com gases oxidantes, por ser um material largamente utilizado.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo geral estabelecer vantagens e limites operacionais dos processos MAG curto-circuito convencional e derivativos para a soldagem de dutos. Os processos MAG curto-circuito derivativos disponíveis no Laprosolda (Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem) são o STT, RMD e CMT. Esta ordem foi adotada, pois os experimentos foram assim conduzidos cronologicamente. Como objetivos específicos, destaca-se:

- Realizar soldagem em dutos na posição 5G em meia cana nas progressões ascendente e descendente, com os processos MAG por transferência por curto-circuito convencional e controlado (STT, RMD e CMT), a partir de diferentes parâmetros de regulagem de cada processo e técnicas de soldagem, como ângulo de ataque e oscilação da tocha, baseando-se em diferentes planejamentos experimentais;
- Executar testes preliminares para determinação dos níveis dos fatores para cada processo de soldagem investigado;
- Avaliar a qualidade dos cordões através de análise visual para detectar a presença de defeitos na superfície dos mesmos;

- Realizar ensaios macrográficos nos cordões selecionados na etapa anterior, para verificar a presença de descontinuidades interna, a partir de seções transversais selecionadas em três regiões distintas, posição plana, vertical e sobrecabeça;
- Determinação das características geométricas do cordão de solda nas três posições avaliadas no item anterior;
- Realizar análises estatísticas para avaliar o efeito dos fatores na geometria do cordão;
- A partir de todo este conjunto de análises realizadas, levantar os envelopes operacionais para cada processo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Balanço entre o efeito *Pinch* e tensão superficial

Nos processos de soldagem a arco elétrico com eletrodo consumível, o metal fundido é transferido continuamente do arame-eletrodo, por meio de gotas metálicas (metal líquido), para a poça de fusão (NORRISH; RICHARDSON, 1988). A gota metálica desde sua formação é submetida a uma série de forças que podem atuar favorecendo ou não ao seu destacamento (POSSEBON, 2008). Considerando-se uma situação hipotética estática (conhecida como Teoria do Balanço Estático de Forças), as principais forças que agem sobre a gota são a força gravitacional " F_g ", a força da tensão superficial " F_γ ", a força eletromagnética " F_{em} ", a força de arraste " F_a " e a força de vaporização " F_v ", como mostrado na Fig. 2.1. A transferência da gota, assim com as forças que agem no seu destacamento, é responsável por caracterizar o modo de transferência metálica destes processos.

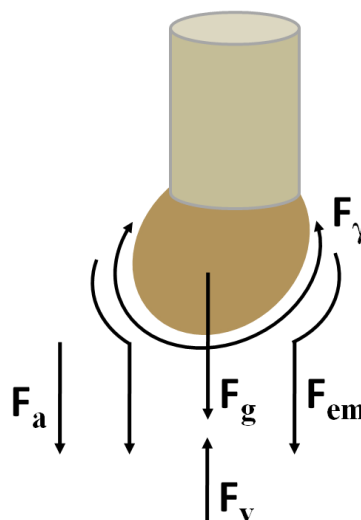


Figura 2.1 – Forças governantes da transferência metálica no processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo consumível (Adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008).

No modo de transferência metálica por curto-circuito a transferência metálica ocorre quando a gota metálica (metal líquido) em crescimento atinge a poça de fusão. Neste caso, a principal força que atua na transferência é força devido à tensão superficial. Mas a força eletromagnética também exerce um papel importante, auxiliando na separação da gota do arame eletrodo. O balanceamento de tais forças tem influência significativa na estabilidade do processo, na quantidade de respingo gerado e nas características da solda.

Durante a transferência, a força devido à tensão superficial pode atuar contra ou a favor do destacamento da gota. No interior desta gota metálica, a resultante da força sobre cada átomo ou moléculas é muito pequena (ou nula). Por outro lado, na superfície, esta resultante é direcionada para o interior (LANCASTER, 1983). Em adição a esta observação, o aumento da gota na ponta do eletrodo, aumenta a área superficial, o que demanda um aumento da energia livre de superfície (numericamente igual à tensão superficial), ou seja, aumenta a energia necessária para criar uma nova área (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Neste sentido, inicialmente a força devido à tensão superficial age restando a gota na ponta do arame eletrodo, favorecendo o seu aumento e agindo contrariamente a seu destacamento (Fig. 2.2(a)). Esta força aumenta diretamente proporcional ao seu diâmetro. Porém, com o contato da mesma com a poça de fusão, a tensão superficial passa a agir favorecendo sua transferência (Fig. 2.2(b)). A menor energia superficial da gota com relação à poça de fusão, ou seja, a menor área de superfície livre por volume, com o contato da gota com a poça faz com que a força da tensão superficial puxe-a para dentro da poça (LANCASTER, 1983).

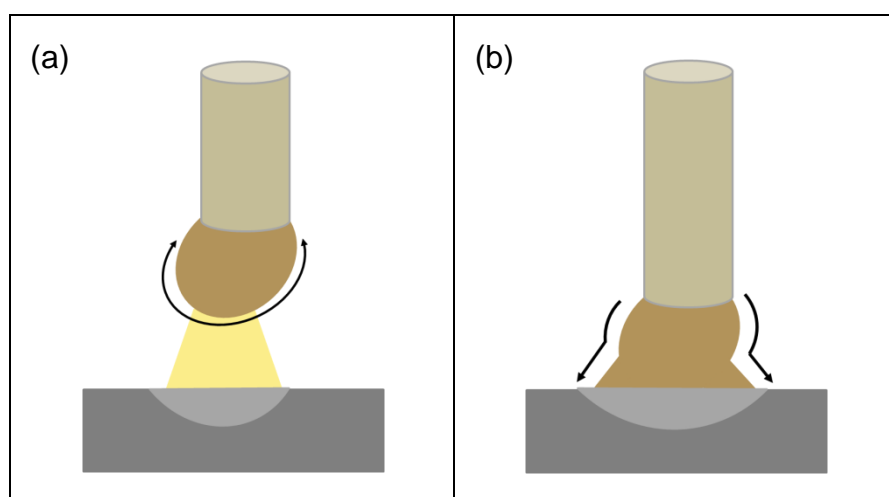


Figura 2.2 – Esquema da alteração na progressão da tensão superficial: (a) contrariando o destacamento da gota e (b) favorecendo o destacamento da gota (Adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008).

Assim como a tensão superficial, a força eletromagnética sobre a gota metálica pode atuar contra ou a favor do destacamento da gota metálica (KIM; EAGAR, 1993). Um arame-eletrodo, por conduzir corrente elétrica está submetido à ação de uma força eletromagnética, induzida pelo campo elétrico formado ao seu redor, denominada como força de Lorentz, dada pela Eq. (2.1), onde, J é a densidade de corrente que atravessa a seção transversal do arame e B é o campo magnético induzido pela corrente.

$$(2.1)$$

Na parte sólida do arame, a influência desta força pode ser desprezada. Porém, na gota (porção líquida), pode sofrer atuação desta força, estando sujeita a deformações. Variações na seção circular da gota, nas regiões de acoplamento com o arame e com o arco, alteram sua densidade de corrente (SILVA, 2005), o que resulta numa componente axial (WASZINK; GRAAT, 1983). Esta componente atua sempre na progressão em que ocorre o aumento da área do condutor.

Para níveis mais baixos de corrente, no caso do modo da transferência por curto-circuito, inicialmente, a menor área do condutor encontra-se na interface da gota com o arco, quando comparado com o acoplamento com o arame ($R_1 > R_2$), como mostra o esquema na Fig.2.3(a). Neste caso, fazendo com que o efeito da força eletromagnética atue contra o destacamento da gota, empurrando o seu volume contra o arame, devido a maior densidade de corrente (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

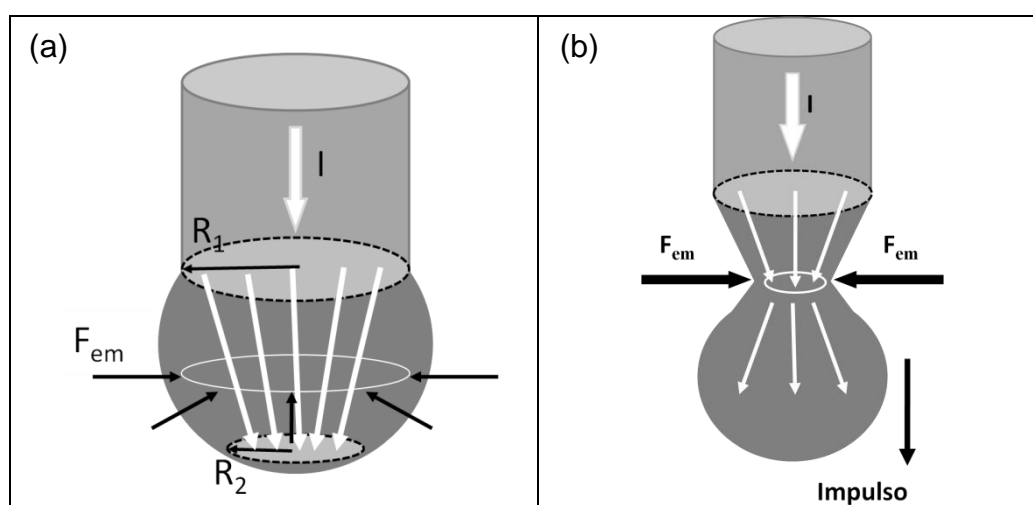


Figura 2.3 – Ilustração do efeito da força eletromagnética no destacamento da gota (a) com a gota se formando na ponta do eletrodo e (b) no estrangulamento na região gota-eletrodo (Adaptado de Scotti e Ponomarev, 2008).

Ainda segundo Scotti e Ponomarev (2008), à medida que a gota aumenta seu volume e com a ação de outras forças envolvidas (tais como a força gravitacional e força devido à tensão superficial), na região de acoplamento com o arame forma-se um “empescoçamento”. No qual, há uma redução da seção transversal e um aumento da densidade de corrente, o que aumenta a pressão nesta área, devido ao aumento da força eletromagnética (componente radial), até o seu rompimento. Como resultante, uma componente axial impulsiona a gota em progressão da poça de fusão, este efeito é denominado como efeito *Pinch*, mostrado na Fig.2.3(b).

Scotti e Ponomarev (2008) destacam também que este rompimento pode ocorrer de forma mais ou menos violenta, sendo fator governante para a produção de respingos. A geração de respingos durante a soldagem é considerada um grande inconveniente, por ser um fator influente na qualidade quanto na produtividade final da solda (DANTAS; COSTA, 2004). Além de representar desperdício de material, o custo com mão de obra, tempo gasto para a remoção dos mesmos, tempo esse que o soldador poderia converter em tempo de soldagem (FERNANDES; VILARINHO, 2010).

Desta forma, é objetivo constante do profissional de soldagem trabalhar para a redução deste nível de respingos, observando as restrições de cada processo de soldagem. Neste trabalho, o foco está direcionado à soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) com transferência por curto-circuito, onde processos derivativos, denominados como curto-circuito controlado, vêm sendo desenvolvidos com o intuito de reduzir a quantidade destes respingos gerados durante a soldagem e estabilizar o processo, melhorando a regularidade da transferência metálica, além de maior controle do aporte térmico. Para isto, são utilizados sistemas de controle eletrônicos e/ou mecânicos, para monitorar e controlar a intensidade do efeito *Pinch* (com maior foco na corrente de curto-circuito) durante a transferência metálica, permitindo maior atuação da tensão superficial.

2.2 Processo de soldagem MIG/MAG

O processo MIG/MAG, também conhecido como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), é um processo de soldagem a arco que utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame-eletrodo consumível e o metal de base, cuja proteção é feita por uma atmosfera gasosa, com um gás, ou mistura de gases, inertes (comumente, Ar e He) ou ativos (usualmente CO₂). Pode ser operado de forma automática e semiautomática, sendo capaz de soldar diferentes tipos de metais em todas as posições de soldagem.

O processo MIG/MAG utiliza normalmente fonte de tensão constante (15 a 32 V), capaz de trabalhar com uma elevada intensidade de corrente (50 a 600 A), normalmente contínua. De modo geral trabalha com o eletrodo em polaridade inversa (positivo), permitindo maior controle do arco (BALLESTEROS, 2009), já que na polaridade direta (eletrodo negativo) o arco não se forma apenas sobre a gota, envolvendo a superfície lateral do arame, tornando o arco mais longo e instável (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Como descrito anteriormente, a transferência metálica é a maneira pela qual o metal é transferido do arame para a poça de fusão. Ela é governada pelas forças atuantes descritas, sendo determinada pela corrente de soldagem, o diâmetro do arame, o comprimento do arco (tensão), as características da fonte, o gás de proteção, dentre outros. Para o processo MIG/MAG, existem classificações detalhadas dos modos como esta transferência ocorre (Modos Naturais e Controlados de Transferência Metálica - VILARINHO, 2007), sendo que neste trabalho, o foco é a transferência por curto-circuito, ou seja, aquela que ocorre quando há o contato da ponta do arame com a poça de fusão, estabelecendo um curto-circuito elétrico, caracterizando-se pela baixa tensão de soldagem.

2.3 Transferência metálica por curto-circuito convencional

Na transferência metálica por curto-circuito o metal é transferido através do curto-circuito elétrico, quando há o contato da gota, formada na ponta do arame-eletrodo, com a poça de fusão. A gota é transferida por tensão superficial e ocorre com um arco curto com tensão de soldagem de 13 a 23 V e uma corrente de baixa a moderada (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). A frequência de transferência das gotas pode ser de 20 a 200 vezes por segundo. Usualmente são utilizados arames na faixa de 0,8 mm a 1,2 mm de diâmetro. De acordo com Machado (1996), este modo de transferência produz uma poça de fusão relativamente pequena de rápida solidificação, ideal para aplicações que necessite de baixa energia de soldagem.

A Fig.2.4 apresenta um esquema do comportamento dos sinais de corrente e tensão durante a transferência por curto-circuito, onde a seguir é descrito o mecanismo de transferência por curto-circuito.

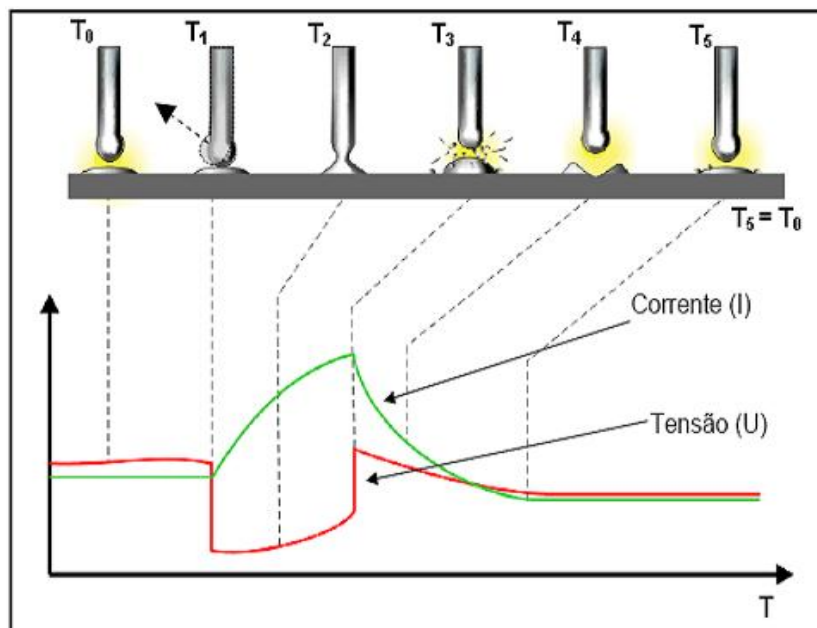


Figura 2.4 – Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem para a transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota (Silva, 2005).

Na fase inicial da transferência (T_0) a gota metálica é formada na ponta do arame-eletrodo. No início do curto-circuito (T_1), momento que a gota toca a poça de fusão, há o apagamento momentâneo do arco, onde é possível observar uma queda brusca da tensão, enquanto a corrente começa a aumentar. Durante a fase de curto-circuito (T_2), a tensão permanece baixa e a corrente de soldagem continua a aumentar, favorecendo a formação do empescoçamento entre a gota e a ponta do eletrodo, auxiliando no destacamento da gota. A alta densidade de corrente nesta região aumenta a ação do efeito Pinch, resultando no destacamento da gota. Já no fim do curto-circuito (T_3), com o destacamento da gota metálica ocorre a reabertura do arco e a subida rápida da tensão. Em seguida, nas fases T_4 e T_5 , a corrente decai restabelecendo o equilíbrio entre a taxa de fusão e a velocidade de soldagem, dando início a formação de uma nova gota.

Para melhor compreensão da relação entre a força eletromagnética e o efeito *Pinch* no destacamento da gota para a transferência por curto-circuito convencional, apresenta-se a Fig. 2.5. Nesta figura, observa-se que com o contato da gota com a poça de fusão, a corrente de curto-circuito aumenta, o que promove um aumento da componente radial da força eletromagnética na região de empescoçamento no acoplamento gota-eletrodo, devido à maior densidade de corrente. Isto favorece a ação do efeito *Pinch*, auxiliando no rompimento da ponte metálica e impulsionando a gota em progressão da poça de fusão. O alto valor de corrente nesta região provoca o aquecimento súbito (SCOTTI; PONOMAREV, 2008), proporcionando uma explosão elétrica que promove a evaporação e a explosão do metal fundido em forma de respingos (CHEN ET AL, 1996).

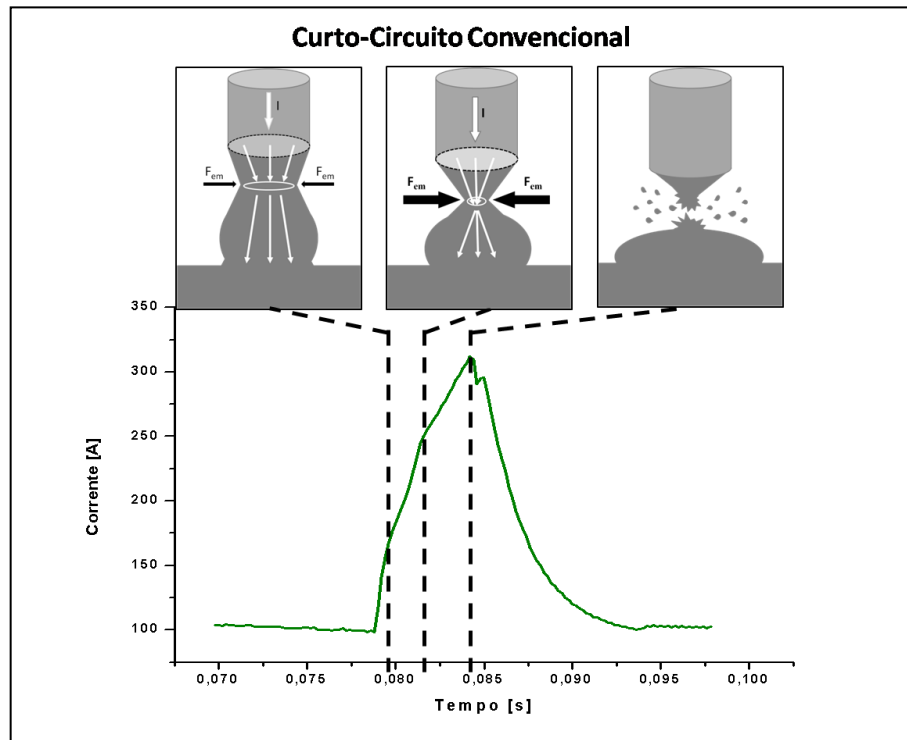


Figura 2.5 – Oscilograma de corrente durante a transferência em função do comportamento da gota para o processo MIG/MAG convencional.

Devido aos baixos valores de corrente durante a fase de arco aberto e aos baixos valores de tensão, assim como o fato de que durante parte do processo o arco tende a se apagar, o calor transferido para a peça é reduzido. O que faz este modo de transferência ser indicado para a soldagem de chapas finas e passe de raiz em juntas com abertura. Gomes (2006) destaca também que, como as gotas são transferidas pelo contato com a poça de fusão, através da tensão superficial é ideal para a soldagem fora de posição em peças de pequena espessura. Além disto, este modo de transferência é empregado quando se tem como requisito uma distorção mínima da peça e na soldagem de juntas tubulares (LYTTLE; 1983; SILVA, 2006).

No entanto, o baixo aporte térmico da transferência pode favorecer a formação de discontinuidades, tal como falta de fusão lateral, de penetração e mordeduras quando se soldam peças mais espessas que 6,0 mm (FORTES, 2004). Finalmente, Essers e Van Gompel (1984) destacam a grande geração de respingos e fumos.

2.3.1 Parâmetros de regulação

Os parâmetros de regulação do processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito podem influenciar no desempenho do processo e nas características geométricas do cordão de solda. Desta maneira, é de fundamental importância o conhecimento da influência destes parâmetros no comportamento do processo, onde, em seguida, são descritas as influências dos parâmetros que serão avaliados neste trabalho. Ressalta-se que outros parâmetros, como comprimento energizado do eletrodo, indutância, gás de proteção, diâmetro/material do eletrodo, dentre outros, também possuem destacada influência sobre o processo, mas não são objetos de avaliação neste trabalho.

a) Velocidade de alimentação

No processo MIG/MAG operando com fonte de tensão constante, a velocidade de alimentação do arame está diretamente relacionada com a corrente de soldagem e com a taxa de deposição. Com o aumento da velocidade de alimentação, a corrente aumenta também para ocorrer o aumento da taxa de fusão. Quanto à influência na geometria do cordão, de acordo com (JÚNIOR, 2003), o aumento da velocidade de alimentação implica em maior penetração e maior área fundida.

b) Indutância

Na soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito, a regulação da indutância, ou a taxa de variação da corrente, tem influência direta no efeito *Pinch*, assim como na formação de respingos. A regulação da indutância baixa determina uma elevada subida de corrente de curto-circuito, o que resulta no destacamento de gota de forma violenta e com aumento na formação de respingos, devido a maior ação do efeito *Pinch*. Por outro lado, a indutância alta reduz a subida da corrente de curto-circuito, suavizando o destacamento da gota. Porém, a indutância muito baixa pode elevar o tempo de destacamento da gota, neste caso, a ponta do arame pode acabar mergulhando na poça de fusão, levando à extinção do arco.

c) Tensão de soldagem

O ajuste da tensão de soldagem é responsável por controlar o comprimento do arco, de forma que o aumento da tensão implica em um arco mais longo. Na soldagem por curto-circuito requer níveis mais baixos de tensão, pois, utiliza-se arco mais curto. Quanto à formação do cordão de solda, a regulação da tensão de soldagem pode afetar a aparência, penetração e as propriedades do cordão de solda (GOMES, 2006). De acordo com Santos

(2009), menores valores de tensão tendem a formar cordões mais estreitos e vice-versa. Além disto, o comprimento do arco (regulado pela tensão) pode influenciar na geração de respingos.

d) Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem representa a taxa de deslocamento do arco ao longo da junta, sendo regulada de acordo com o volume desejado do cordão de solda. Desta forma, com a redução da velocidade de soldagem, aumenta a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda. De acordo com Júnior (2003), o controle da velocidade de soldagem também pode controlar a penetração do cordão de solda. O aumento da velocidade de soldagem favorece um menor calor imposto e consequentemente em um cordão com menor penetração. Porém, o ajuste da velocidade de soldagem em níveis muito baixos pode resultar na redução da penetração. Neste caso, a velocidade de soldagem muito baixa aumenta o volume da poça de fusão, passando então o calor do arco a atuar sobrepondo o cordão não diretamente na poça de fusão, desse modo reduzindo a penetração (GIMENES, 2005).

2.4 Transferência por curto-circuito controlado

Os processos de soldagem que fazem uso da transferência por curto-circuito controlado são na verdade processos derivativos do processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito convencional, nos quais utilizam métodos de controle externo para melhoria da transferência metálica. O desenvolvimento destes processos tem como objetivo aproveitar as vantagens da transferência metálica por curto-circuito, tais como menor aporte térmico e a capacidade de realizar soldas em todas as posições, eliminando ou reduzindo os inconvenientes do processo convencional, como a alta geração de respingos e fumos, além da irregularidade na transferência metálica (KVASOV, 2000; LINCOLN, 2010). Deste modo, os fabricantes de fontes de soldagem buscam desenvolver equipamentos eletrônicos que permitam controlar parâmetros do processo, permitindo o controle da transferência metálica durante o curto-circuito (BALLESTEROS, 2009). Assim, permite-se o ajuste da corrente durante a operação, respondendo às oscilações impostas pelas condições de soldagem (SILVA, 2005), visto que, o processo MIG/MAG convencional não é capaz de responder a estas oscilações (pois não possui retroalimentação), o que pode resultar em instabilidade do processo.

Atualmente no mercado existem diferentes processos com transferência por curto-circuito controlado, como o Surface Tension Transfer (STT®), o Regulated Metal Deposition (RMD®), o Cold Metal Transfer (CMT®) e o Curto-circuito Controlado (CCC®), dentre outros. Geralmente estes processos possuem aplicação em operações que requerem características presentes no processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito convencional, em concorrência direta com os processos TIG e Eletrodo Revestido. O passe de raiz na união de topo de dutos de parede espessa e grande abertura de raiz consiste em uma das aplicações.

2.4.1 Processo de soldagem STT

O processo *SurfaceTensionTransfer*®, conhecido como STT, foi o primeiro processo derivado do processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito realizado através do controle da corrente de soldagem. O processo STT, patenteado pela empresa *Lincoln Electric Company* em 1994 (DERUNTZ, 2003), é um processo de soldagem onde a transferência do metal é realizada por tensão superficial, tendo como base uma fonte de energia eletrônica com corrente constante (CC), que modifica o formato de onda da corrente de soldagem até cem vezes por segundo para cada gota transferida (DERUNTZ, 2003). Seu circuito eletrônico, baseado num microprocessador, monitora o comportamento da tensão do arco e ajusta automaticamente o formato de onda da corrente. Desta forma, acredita-se que este ajuste do formato de onda melhora a estabilidade da transferência e reduz a perda de material por respingos e a quantidade gerada de fumos.

O ciclo de transferência para o processo STT, mostrado na Fig.2.6, é iniciado com a gota formada na ponta do arame-eletrodo, a qual é mantida por um valor baixo de corrente (corrente de base). Após o curto-circuito, a corrente é reduzida imediatamente e mantida até que ocorra o contato da gota com a poça. Desta forma, é possível fazer com que a transferência metálica inicie de forma suave, reduzindo o risco de repulsão da gota e respingos (Hashimoto e Morimoto, 2006). Em seguida, é aplicada uma corrente de *Pinch*, cuidadosamente monitorada, para acelerar a transferência. O aumento considerável da força eletromagnética ao redor do arame (componente radial) resulta no empescoçamento na região gota-arame. Segundo Scotti e Ponomarev (2008), a redução da seção transversal do empescoçamento aumenta a resistência elétrica nesta região, a qual é medida pela variação de tensão por unidade de tempo (dU/dt). Esta corrente é reduzida pouco antes da separação, de modo que o destacamento da gota ocorra sob um nível baixo de corrente, o que impede a geração de respingos de grande tamanho, como ilustrado na Fig. 2.7. Para reestabelecer o arco, é aplicada uma corrente de pico, também responsável pelo

comprimento do arco e pela fusão do arame, iniciando a formação da gota. Durante a formação da gota, a corrente é reduzida de forma gradual (*Tail-out*) até a corrente de base, iniciando novamente o ciclo de transferência do processo. Sendo equivalente a uma regulagem de indutância, influenciando na frequência de curto-circuito e, conseqüentemente, no volume e conteúdo calorífico das gotas (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

A transferência por curto-circuito com controle da corrente de soldagem proporciona ao processo STT uma série de benefícios, vantagens e limitações relacionadas à qualidade da solda, econômicos e condições de operação, quando comparado ao processo MAG convencional.

Entre os benefícios, Stava (2001) destaca a redução de perda de material por respingos e na geração de fumos, o que favorece maior produtividade do processo e a maior transferência de calor para a poça de fusão. Assim como a capacidade de produzir soldas de qualidade e como baixa geração de respingos utilizando 100% CO₂ como gás de proteção.

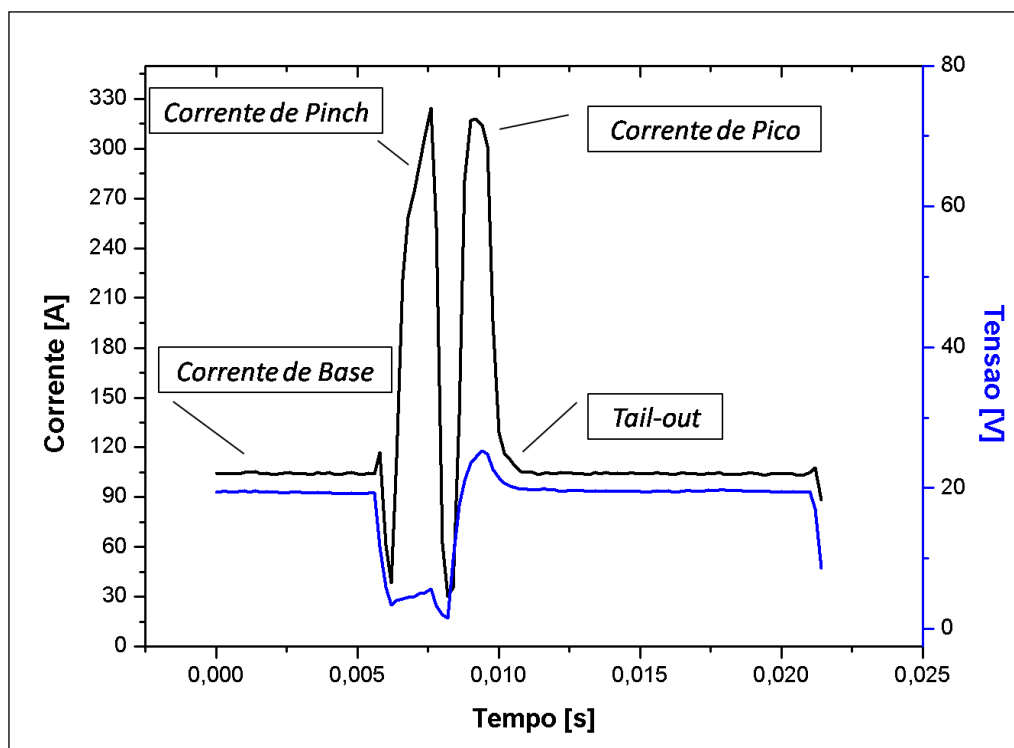


Figura 2.6 – Oscilograma de tensão e corrente de soldagem para o processo STT (*Surface Tension Transfer*).

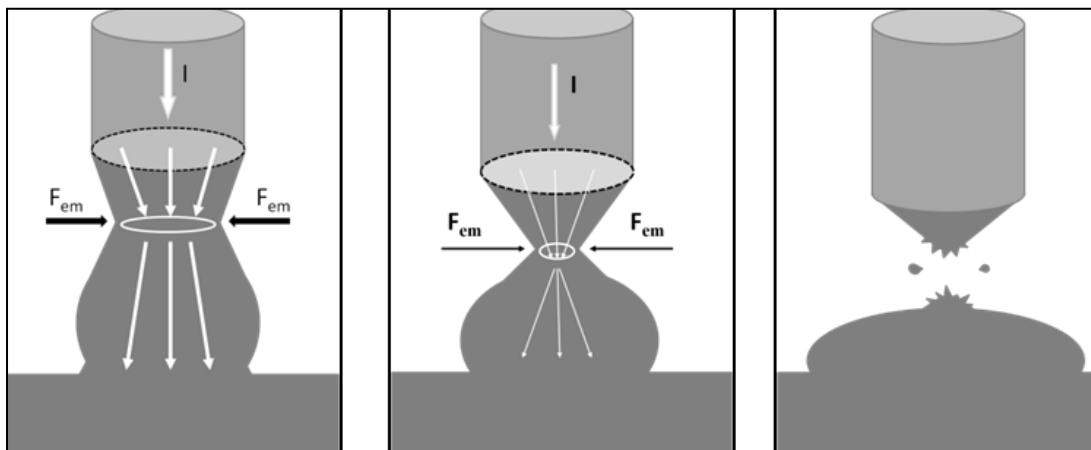


Figura 2.7 – Efeito da força eletromagnética e o efeito *Pinch* no destacamento da gota para o processo STT.

O processo STT também permite controlar o aporte térmico durante a soldagem, com a menor entrada de calor, reduz as distorções de material e a perfuração da raiz, fornecendo apenas a quantidade necessária de calor para produzir a solda, mesmo em materiais sensíveis como aço inoxidável (STAVA, 1993; DERUNTZ, 2003). Além de produzir cordões estreitos, uniformes, de boa penetração e permitir soldar em todas as posições graças a sua versatilidade. Para a soldagem de tubulação, o processo também torna mais fácil executar soldagem de passe de raiz, como melhor perfil da raiz do cordão e fusão das bordas (LINCOLN, 2010).

Rosado (2008), ao comparar as características das soldas realizadas pelo processo MAG curto-circuito com suas variantes por transferência controlada (STT, CMT e *FastROOT*), apresenta resultados que corroboram com os autores citados anteriormente. Através de soldas sobre chapa e mantendo a mesma corrente de soldagem, os cordões soldados com o processo STT apresentaram um perfil mais estreito, com penetração similar ao MAG, porém mais uniforme, tornando-o indicados para aplicações onde a qualidade da penetração seja um fator importante, tal como passe de raiz.

Por outro lado, segundo DeRuntz (2003), uma das principais desvantagens é que a fonte de energia STT é inicialmente mais cara do que uma fonte convencional, devido ao uso de uma tecnologia protegida por patente. Além disto, requer operadores qualificados, devido à necessidade de seleção de um maior número de parâmetros.

2.4.1.1 Parâmetros de regulação

No processo STT, além dos parâmetros já mencionados no processo MIG/MAG convencional, possui outros parâmetros que podem influenciar no seu desempenho, cuja

função será descrita a seguir. De forma análoga ao descrito no curto-circuito convencional, nem todos os parâmetros que podem influenciar o processo estão listados abaixo, mas sim aqueles que são alvos de investigação deste trabalho.

a) Corrente de base

A corrente de base é responsável pelo aquecimento do eletrodo e do metal de base, garantindo a formação e manutenção da gota formada na ponta do eletrodo e pela fluidez da poça de fusão. Além disto, a corrente de base é responsável pelo controle da transferência de energia para a poça de fusão, funcionando com “ajuste fino” (LINCOLN, 2010; STAVA, 1993; STAVA, 2001).

O nível da corrente de base é função do tipo do gás de proteção, da velocidade de alimentação, do material e do diâmetro do eletrodo, sendo que para gás de proteção com maior teor de CO_2 , este nível deve ser ajustado em menor patamar. Segundo Stava (1993), no caso do uso de $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ a faixa de operacional da corrente de base esta entre 50 e 100A, já utilizando 100% de CO_2 o nível da corrente é cerca de 50% menor. Scotti e Ponomarev (2008) completam dizendo que o valor da corrente de base não deve exceder 70 A, pois níveis mais altos aumentam significativamente a produção de respingos. Por outro lado, o aumento da corrente de base pode ser usado para ajudar no controle da penetração (aumento da penetração). Já uma regulagem de corrente excessivamente baixa pode causar solidificação das partes fundidas e instabilidade na operação (SILVA ET AL, 2008).

b) Corrente de pico

A corrente de pico, caracterizada por um breve pulso de corrente, é designada para a reabertura do arco e pela fusão do eletrodo formando uma nova gota. A energia deste pulso deve ser o suficiente para que se forme uma gota de mesmo tamanho que as anteriores (SILVA ET AL, 2008). Esta corrente também controla o comprimento do arco elétrico (STAVA, 1993), evitando contato prematuro desta com a gota em formação (MARUYAMA, 1995). De acordo Scotti e Ponomarev (2008), as forças do jato do arco, que atuam em progressão da poça de fusão, comprimem a sua superfície, aumentando o comprimento do arco. Além disto, a corrente de pico é responsável pelo pré-aquecimento e pré-fusão do metal de base, auxiliando no controle do aporte térmico e facilitando o trabalho da corrente de base (STAVA, 1993; STAVA, 2001).

c) *Tail-out*

O *tail-out* (ou rampa de descida) atua sobre a maneira como a corrente decresce, semelhante ao efeito da indutância no curto-circuito convencional, como mostrado na Fig.2.8. Este parâmetro reduz a agitação da poça de fusão provocada pela reabertura do arco (durante a corrente de pico), exerce influência na frequência de curto-circuito e, conseqüentemente, no volume e conteúdo calorífico das gotas, ou seja, é responsável pelo “controle grosseiro” do aporte térmico e fluidez do material fundido (KVASOV, 2000; LINCOLN, 2010).

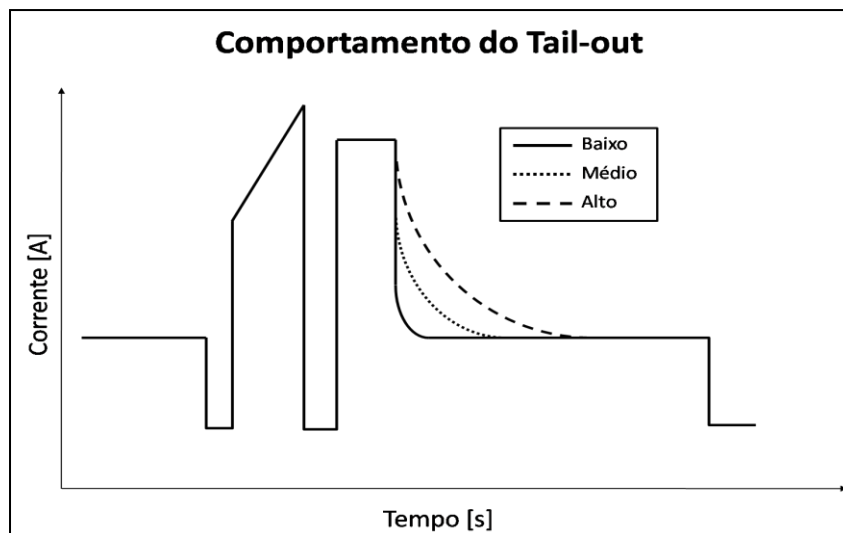


Figura 2.8 – Esquema do comportamento do *Tail-out*.

2.4.2 Processo de soldagem RMD

Outro processo derivativo que emprega o princípio de curto-circuito controlado é denominado de RMD (*Regulated Metal Deposition*) e foi desenvolvido pela empresa *Miller Electric* e patentado em 2004 (MILLER, 2004). Neste processo, a corrente de soldagem é monitorada e controlada eletronicamente durante todas as fases da transferência metálica (MACHADO, 2010). Segundo o fabricante (MILLER, 2010), seu formato de onda da corrente de soldagem é dividido em sete fases como ilustrado na Fig. 2.9.

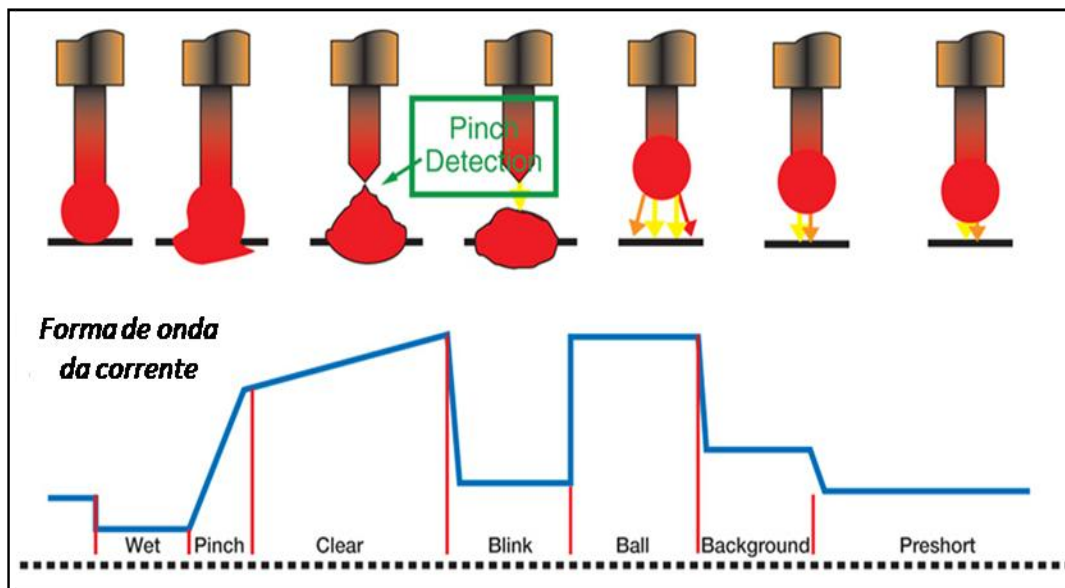


Figura 2.9 – Oscilograma de tensão e corrente de soldagem para o processo RMD (*Regulated Metal Deposition*) (Modificado de Miller, 2010).

Na fase inicial do ciclo de transferência (*Preshort*), a gota metálica é formada na ponta do arame-eletrodo e na fase (*Wet*) reduz-se a corrente em um nível mais baixo até o momento que ocorre o curto-circuito. Durante o curto-circuito, o formato de onda da corrente se divide em duas fases. Na primeira fase, denominada de fase *Pinch*, após a gota tocar a poça de fusão, a corrente é elevada rapidamente, aumentando a intensidade da força eletromagnética para facilitar o destacamento da gota. Na segunda fase, denominada de *Clear*, a corrente continua crescendo, porém, à taxa mais moderada, até o momento que o fim do curto-circuito é detectado pelo controle da fonte, ou seja, momento em que ocorre a formação do estrangulamento (ou empescoçamento) na interface da gota com o eletrodo. Assim a gota é impulsiona em progressão à poça de fusão devido à ação do efeito *Pinch*, porém, a subida de forma moderada da corrente de curto-circuito nesta fase, favorece que o rompimento da ponte metálica seja mais suave, reduzindo a geração de respingos (como mostrado na Fig. 2.10). Após o destacamento da gota, a corrente é novamente reduzida por um curto período (fase *Blink*), a fim de que a reignição do arco elétrico também ocorra de forma suave para evitar a formação de respingos. Segundo Hashimoto e Morimoto (2006), durante a reignição do arco também é gerado uma grande quantidade de respingos de dimensões medianas, o que para Kang (2003), pode ser reduzido com um arco estável. Em seguida, a corrente é novamente elevada (fase *Ball*), proporcionando a formação de uma nova gota metálica na ponta do arame-eletrodo. Nas fases *Background* e *Preshort*, a corrente é reduzida gradualmente, em forma de degraus, para permitir o contato da nova gota com a poça de fusão, o que também garante maior estabilidade a poça de fusão.

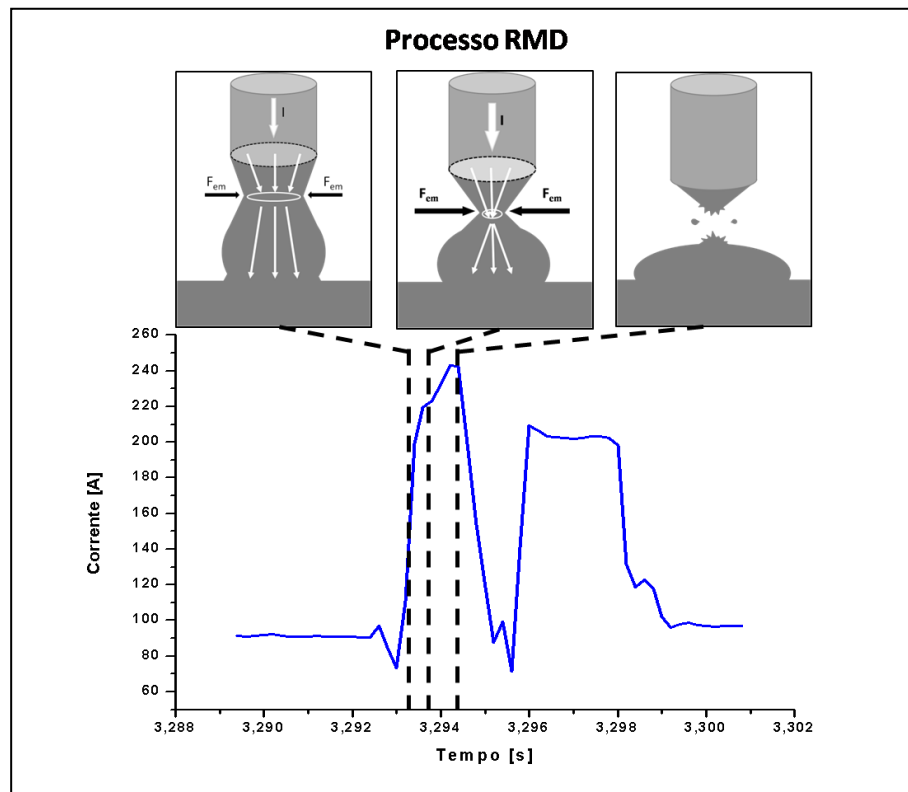


Figura 2.10 – Oscilograma de corrente durante a transferência em função do comportamento da gota para o processo RMD.

O controle da corrente durante a transferência metálica proporciona ao processo RMD uma redução de 5 a 20 % no aporte térmico comparado com a transferência por curto-circuito convencional e também minimiza a geração de respingos (MACHADO, 2010), além de permitir o uso de maiores diâmetro de arame na soldagem de chapas finas. Porém, ao soldar chapas mais espessas com o processo RMD, seu menor aporte térmico por favorecer a presença de defeitos com falta de fusão (POSSEBON, 2009).

Segundo Possebon (2009), a estabilidade da poça de fusão é uma das vantagens do processo RMD, característica responsável por promover uma fusão mais uniforme do metal base. Este autor destaca também a sua capacidade de manter o comprimento do arco elétrico constante independente de bruscas variações da DBCP.

No que se refere à soldagem de dutos e tubulações, resultados de testes realizados pelo próprio fabricante, mostram que o processo RMD permite realizar passe de raiz na progressão de soldagem descendente com maior tolerância de abertura de raiz, entre 3,2 e 5 mm (MILLER, 2009).

2.4.2.1 Parâmetros de regulação

O processo RMD tem como parâmetros de regulação o *Trim* e *Arc Control*, além dos parâmetros já descritos no Item 2.4.1. Tais parâmetros (*Trim* e *Arc Control*) podem influenciar tanto no desempenho do processo, quanto nas características geométricas do cordão de solda. A seguir é feita uma breve descrição destes parâmetros.

a) Ajuste do arco / *Trim*

O ajuste do arco ou *Trim* exerce uma função semelhante à tensão de soldagem, sendo responsável pelo ajuste do comprimento do arco, onde o aumento do *Trim* implica num aumento do comprimento do arco, o que também pode influenciar na geometria do cordão e na estabilidade da transferência. Assim, menores valores de *Trim* tendem a formar cordões mais estreitos e com uma transferência mais instável, o que favorece a maior geração de respingos.

b) *Arc Control*

O ajuste do *Arc Control* é responsável pelo aquecimento do metal de base, garantindo ao processo um maior controle sobre a poça de fusão. Neste caso, o aumento do *Arc Control* aumenta a quantidade de calor transferida para o metal, proporcionando maior molhabilidade do metal, o que pode resultar em cordões mais largos.

2.4.3 Processo de soldagem CMT

O processo CMT (*Cold Metal Transfer*), desenvolvido pela empresa *Fronius* e patente solicitado em 2005 (SCHORGHUBER, 2009), é um processo de curto-circuito controlado caracterizado pela solução adotada para destacar a gota, que em vez de usar um impulso de corrente, utiliza um sistema para o movimento de recuo do eletrodo, associado à modificação do formato de onda da corrente de soldagem, ajustada a partir do controle eletrônico da fonte. O sistema reverso do arame-eletrodo (para frente e para trás), durante cada curto-circuito, após a fonte interromper o fornecimento de energia (corrente de curto-circuito), recua o arame-eletrodo separando a gota metálica na ponta do arame da poça de fusão, reduzindo a ação do efeito *Pinch* e garante uma transferência de forma suave. Este processo utiliza um arco curto com a corrente de curto-circuito limitada a um nível muito baixo, o que implica em aporte térmico muito baixo.

A Fig. 2.11 apresenta o ciclo de transferência do processo CMT. Estando a gota já formada na ponta do eletrodo, a corrente é mantida a um nível baixo até o início da fase de curto-circuito (corrente de base), evitando que a gota cresça demasiadamente e/ou

rapidamente. Neste caso, a gota metálica apresenta um diâmetro próximo ao do arame-eletrodo, visto que, com o avanço contínuo do arame, o menor valor de corrente representa uma redução da taxa de fusão, ou seja, a menor fusão do eletrodo. Iniciado o contato da gota com a poça de fusão (fase de curto-circuito), o controle eletrônico da fonte reconhece o curto-circuito, dando uma pausa na corrente em um breve intervalo a um nível mais baixo quando comparado com o curto-circuito convencional. Segundo Pickun e Young (2006), este baixo valor de corrente de curto-circuito reduz significativamente o aporte térmico. Em seguida, é dado início ao movimento de retração do arame, para que ocorra o destacamento da gota, com a mínima formação de respingos. Após o destacamento da gota, já com o arame avançando, é dado um alto pulso de corrente (corrente de pico), responsável pela ignição do arco elétrico e para que o arame-eletrodo funda-se novamente, dando início a formação de uma nova gota metálica.

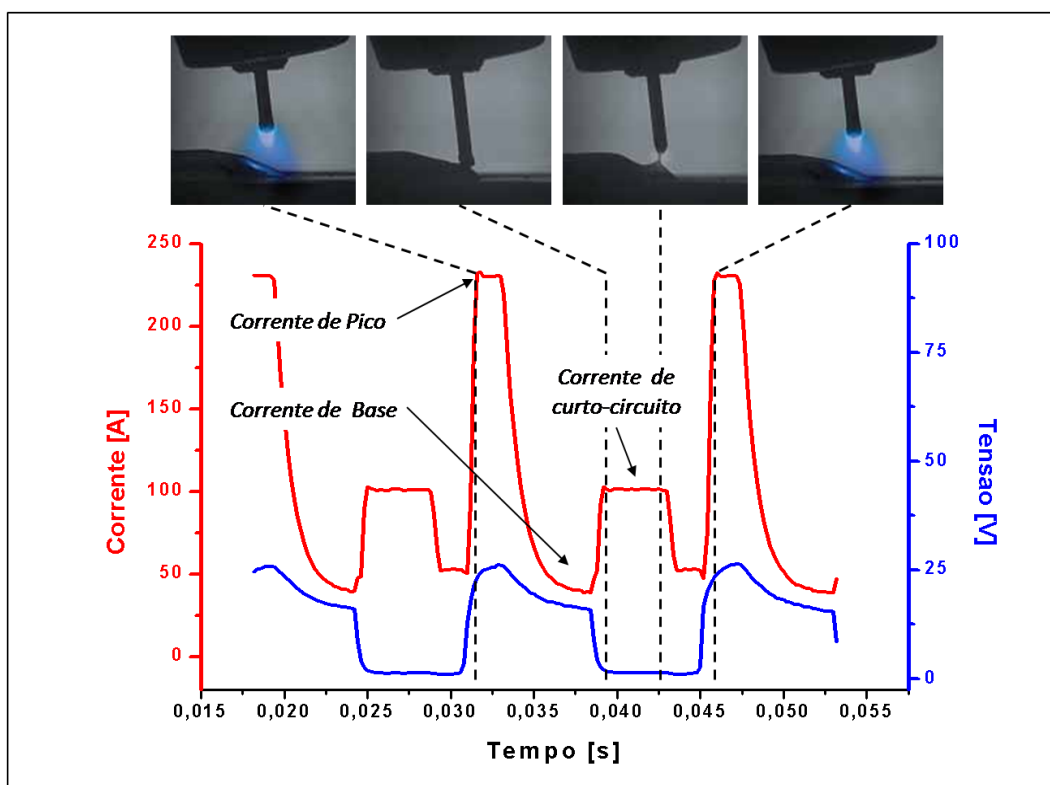


Figura 2.11 – Oscilograma de tensão e corrente de soldagem em função do ciclo de transferência da gota para o processo CMT (*Cold Metal Transfer*) (Modificado de Fronius, 2007).

No esquema da Fig. 2.12 é possível compreender melhor como funciona o controle eletrônico da fonte e como o sistema de recuo do arame auxilia para na redução do efeito *Pinch*. Observa-se que, quando o controle eletrônico da fonte interrompe a subida da corrente, também reduz a intensidade da força eletromagnética. O curto intervalo de tempo

que esta corrente é mantida constante favorece a formação do empescoçamento na região gota-eletrodo, devido o aumento da ação da tensão superficial. A descida da corrente pouco antes do recuo do arame anula a ação do efeito *Pinch*, o que proporciona um rompimento da ponte metálica de forma extremamente suave e com pouco respingo.

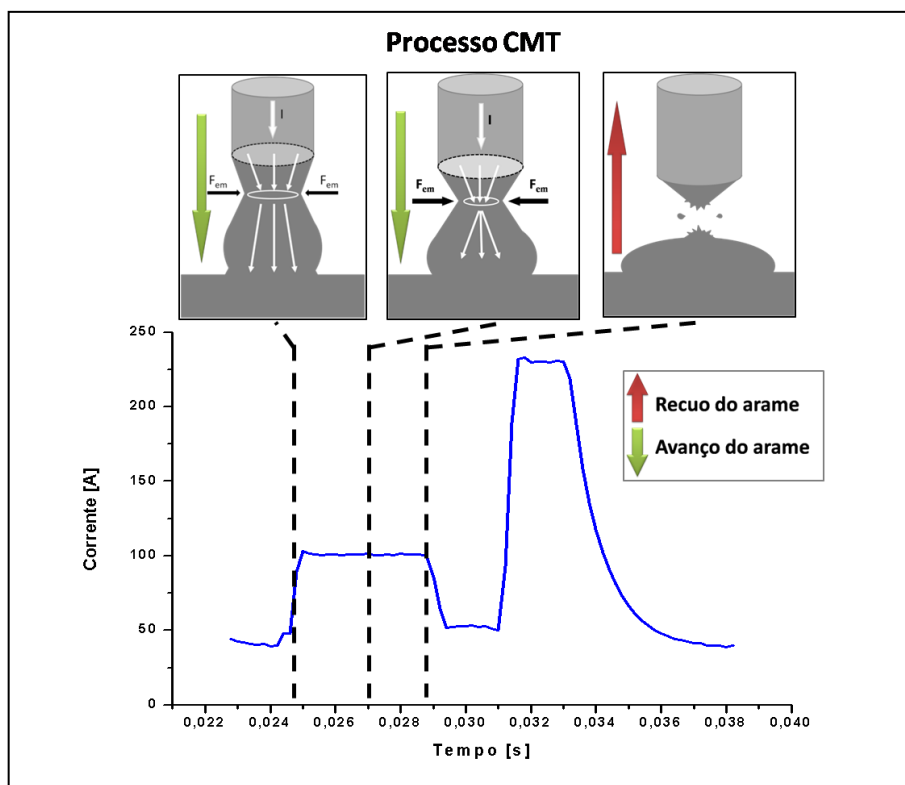


Figura 2.12 – Oscilograma de corrente durante a transferência em função do comportamento da gota para o processo CMT.

O princípio de funcionamento do mecanismo para reverter o movimento do arame é composto por dois alimentadores de arame controlados digitalmente. Um alimentador convencional que empurra o arame (para frente) e outro acoplado a tocha que movimenta o arame “para frente e para trás” controlado por um servo-motor de corrente alternada, mostrado na Fig. 2.13(a). De acordo com Markus (2010), este movimento de recuo é realizado com uma frequência de até 70 Hz. Para impedir tensões sobre o arame quando no seu movimento para trás, já que o arame continua sendo impulsionado para frente, o cabo da tocha possui um “compensador de arame” ou “pulmão” que absorve o arame no movimento para trás (Fig. 2.13(b)).

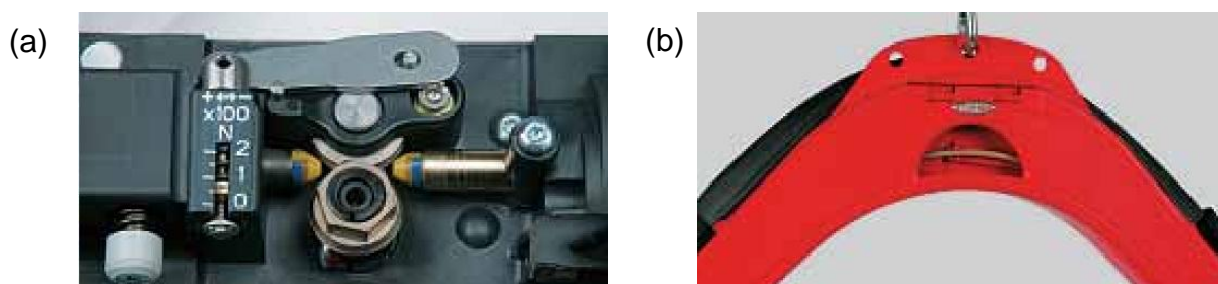


Figura 2.13 – (a) Alimentador de arame acoplado à tocha; (b) “Compensador de arame” ou “Pulmão” (Fronius, 2007).

Este sistema inovador de inversão do movimento do arame possibilita ao processo CMT uma transferência de material isenta de respingos, assim como a redução na emissão de fumos, já que os respingos gerados durante a soldagem têm uma grande influência na formação dos fumos (ROSADO, 2008). Segundo análises realizadas pelo próprio fabricante (FRONIUS, 2007), os resultados mostraram que a concentração de poluentes durante as soldas realizadas com o processo CMT é menor se comparado com o processo MAG curto-circuito, onde reduz quase 90% de resíduos de cobre e uma redução até 63% de zinco.

Pode-se destacar outro ponto importante é a redução significativa da geração de calor na execução da solda, devido à transferência com baixa corrente de curto-circuito. Observa-se na Fig.2.14, que a faixa operacional do processo CMT permite trabalhar com menores valores de energia, o que favorece a utilização deste processo na união de chapas finas, tanto por soldagem quanto por brasagem (ROSADO, 2008; SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

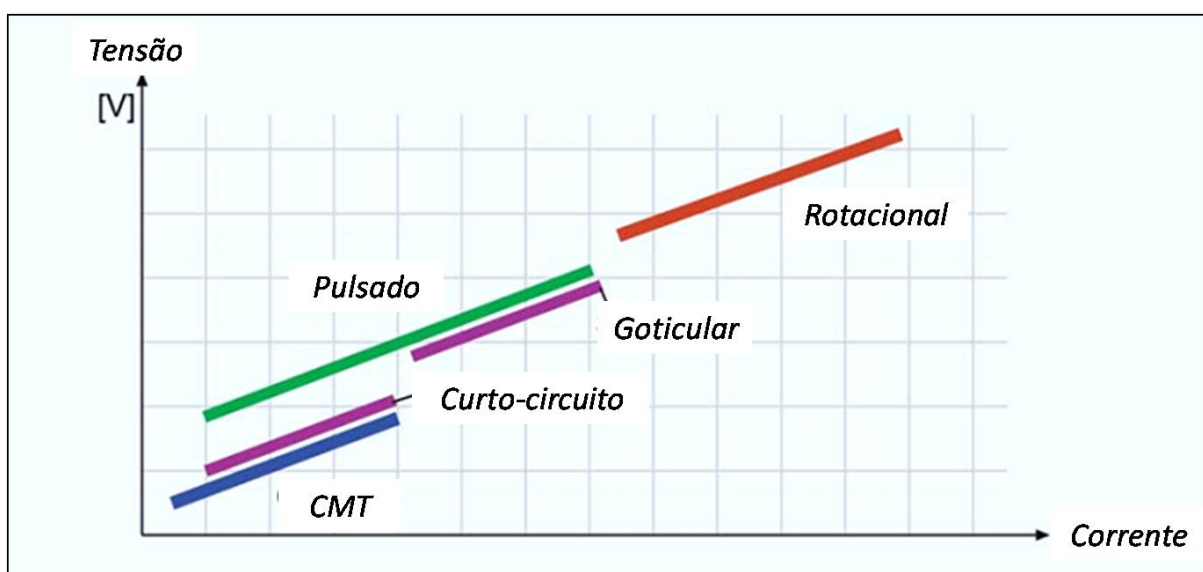


Figura 2.14 – Esquema da corrente de transição para as transferências por curto-circuito convencional, curto-circuito controlado (CMT), pulsado, goticular (spray) e rotacional (Himmelbauer, 2005).

Segundo Chu (2007), a principal aplicação deste processo é a união de aço e alumínio por brasagem (Fig. 2.15(a)), podendo ser aplicado em operações que requer brasagem isenta de respingos e com deformação extremamente baixa de chapas galvanizadas, utilizando arame de solda de cobre-silício, além de soldagem de chapas finas (0,3 – 0,8 mm) de alumínio, inoxidáveis e magnésio. Neste caso o baixo aporte de calor do processo permite dispersar o uso de cobre-junta (Fig. 2.15(b)).

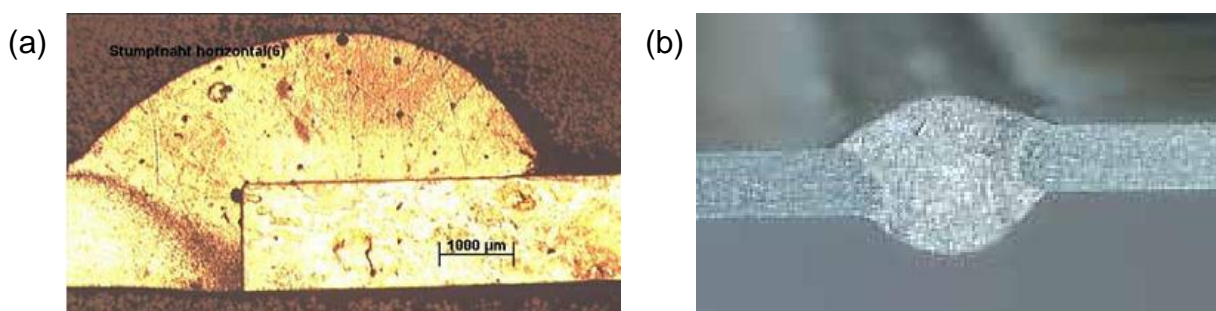


Figura 2.15 – Soldagem com processo CMT (a) em junta de topo em chapas de alumínio de 0,8 mm, e (b) união de aço galvanizado com alumínio (ambós 1 mm de espessura), com velocidade de soldagem de 70 cm/min (Himmelbauer, 2005).

De acordo com Himmelbauer (2005), a menor transferência de calor também contribui para a soldagem de chapas sobrepostas com maior tolerância de abertura, diferença essa que pode ser superada devido a menor fundição das chapas, ou seja, permite maior controle da poça de fusão, como mostrado na Fig.2.16. Por outro lado, o baixo aporte térmico do processo CMT também traz algumas desvantagens, com possíveis problemas de falta de fusão e falta de penetração na soldagem de chapas mais espessas. Outra limitação deste processo é o alto custo dos seus equipamentos (tocha e fonte de energia).

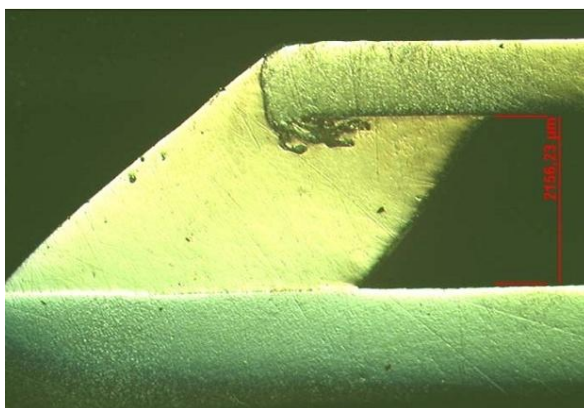


Figura 2.16 –Brasagem de chapa galvanizada de 1,5 mm de espessura e junta sobreposta com abertura de 2,0 mm (Himmelbauer, 2005).

2.4.3.1 Parâmetros de regulação

Entre as variáveis que influenciam no desempenho do processo CMT estão os parâmetros de regulação do processo, que neste trabalho serão denominadas com *Comprimento de Arco* e *Controle Dinâmico*:

a) *Comprimento de arco*

O parâmetro *Comprimento de Arco* está diretamente relacionado com a regulação da tensão de soldagem, sendo responsável, como o próprio nome diz, pelo ajuste do comprimento do arco voltaico. A fonte permite regulação de -30 a 30, sendo que para valores negativos resulta em um comprimento de arco mais curto.

b) *Controle dinâmico*

O *Controle Dinâmico* segundo o fabricante tem a função de influenciar na dinâmica do curto-circuito no momento de destacamento da gota, e é aplicado quando se utiliza arame-eletrodo de aço carbono ER70S-6/G3Si com diâmetro de 1,0 e 1,2 mm. O fabricante ressalta ainda que o controle dinâmico pode exercer diferentes funções e o seu ajuste é realizado conforme o material de adição e o diâmetro do arame-eletrodo utilizado.

2.5 Progressão de soldagem ascendente e descendente

Um ponto final importante a ser destacado na soldagem de tubos refere-se à progressão de soldagem. A soldagem de tubulações normalmente é feita com os tubos posicionados na horizontal (5G ou PF), que permanece parado, enquanto a solda é feita sob a junta posicionada na vertical. No caso da soldagem MIG/MAG, a solda é feita em duas partes de 180° (meia cana), com um cordão em uma metade do tubo, seguida de um cordão do lado contrário para finalização da solda, pode ser realizada tanto na progressão de soldagem ascendente quanto na descendente.

Segundo Rampaul (2003), de forma geral o método de soldagem ascendente é recomendado para soldagem de tubulações de alta liga e em outros casos em que apenas juntas soldadas com altíssima qualidade serão aceitas, podendo ser utilizado em tubos de grande e pequeno diâmetro. Por outro lado, o autor destaca que o método de soldagem descendente é recomendado para tubulações de parede fina (1/8" até 5/16"), por ser mais rápido e econômico.

No caso da norma AWS D10.12, para a soldagem de tubulações de aço carbono, com paredes com espessura até 12,7 mm, recomenda-se utilizar processo MIG/MAG para a

realização do cordão de passe de raiz na progressão descendente. Já os cordões subsequentes devem ser realizados na progressão ascendente.

A realização da soldagem de tubulações nesta posição (posição 5G ou PF) apresenta um grau elevado de dificuldade, o que exige do soldador habilidade em realizar soldas em todas as posições, plana, vertical ascendente ou descendente e sobre cabeça. Entre estas, encontra-se a dificuldade de manter o perfil correto do cordão de solda, o que acarreta em falta de fusão e de penetração (PEREIRA, 1995).

Na posição plana, a de maior empregabilidade, permite maior controle da poça de fusão, o que oferece para o soldador a execução de cordões mais estáveis. Enquanto as outras posições, vertical e sobre cabeça, tem como principal inconveniente a dificuldade de conter o material fundido no local de soldagem (OLIVEIRA, 2002). A fluidez do metal adicionado leva ao escorrimento e a queda do mesmo, o que provoca a deformação do cordão de solda, mordeduras, falta de penetração, falta de fusão, etc. (PEREIRA, 1995).

Este escorrimento pode ser justificado pelo efeito da força da gravidade sob o metal transferido e na poça de fusão, favorecendo ou não a transferência da gota e/ou a fixação da poça de fusão na junta.

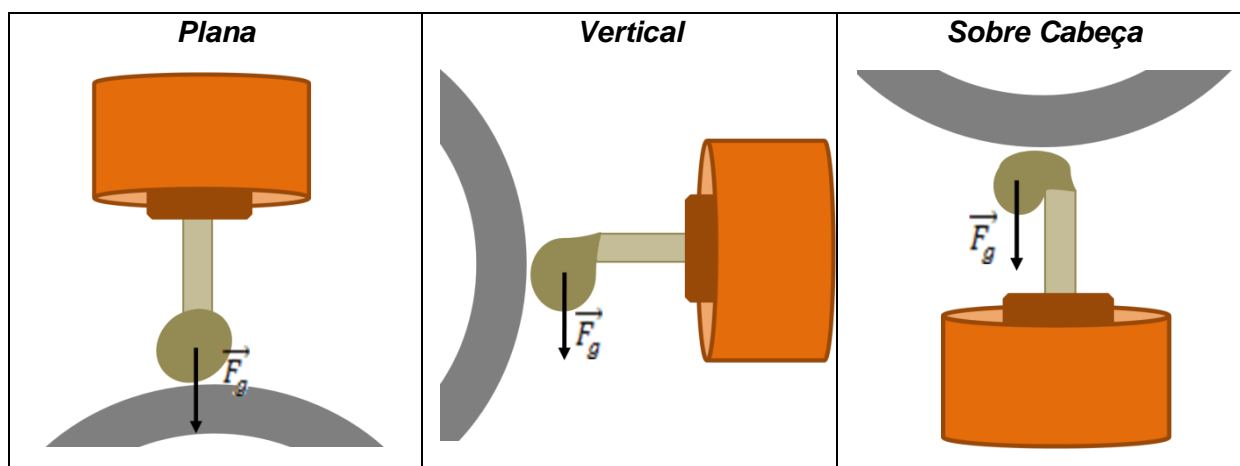


Figura 2.17 – Ilustração da força gravitacional e sua atuação na gota, em cada posição de soldagem.

Como pode ser observado na Fig.2.17, no caso em que a solda é realizada na posição plana, a força gravitacional estará sempre agindo no sentido de destacar a gota e manter o metal fundido dentro da junta. No caso da posição vertical, a força gravitacional atua perpendicularmente a transferência da gota e na poça de fusão, o que proporciona o escorrimento do metal fundido. Na posição sobre cabeça a gravidade age no sentido de dificultar o destacamento da gota e de fazer a queda do metal fundido.

Segundo Possebon (2009), o efeito da força da gravidade no escoamento do metal fundido na posição vertical, é mais evidente na progressão de soldagem descendente. Na progressão descendente, metal fundido tende a escorrer em progressão do arco elétrico, provavelmente devido à instabilidade da poça de fusão. Já na progressão ascendente, o cordão de solda já solidificado serve de base (“apoio”) para a poça de fusão, resultando em uma poça mais estável.

A partir de soldas realizadas pelo processo MIG/MAG com curto-circuito controlado, este mesmo autor (Possebon, 2009) afirma que a progressão ascendente é a melhor opção para a soldagem de juntas sobrepostas, sendo menos suscetível à falha de fusão e capaz de atingir maiores penetrações quando comparadas à progressão descendente. Por outro lado, ressalta-se que quando utilizar a soldagem ascendente, a maior penetração associada a esta progressão pode apresentar defeitos como perfuração da raiz, falta de material para enchimento e mordeduras.

Para o controle da penetração, a utilização de algumas técnicas de soldagem, como o ângulo de ataque e a oscilação da tocha, pode minimizar ou solucionar estes tipos de defeitos, tanto na progressão ascendente quanto na descendente. A Fig.2.18 apresenta um esquema dos diferentes ângulos de ataque na posição vertical na soldagem de duto, no qual representa o ângulo que a tocha faz com o cordão de solda num plano perpendicular à superfície da peça.

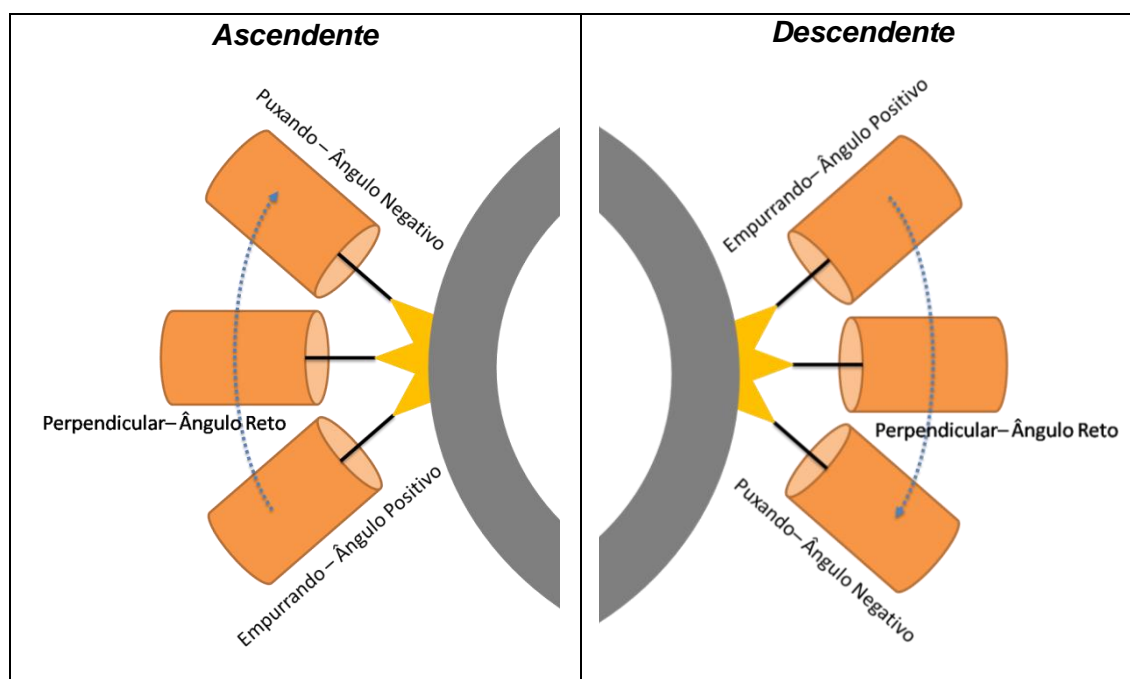


Figura 2.18 – Esquema do ângulo de ataque na soldagem de duto na progressão ascendente e descendente.

Para a tocha com ângulo positivo (empurrando), o arco empurra a poça de fusão para frente, proporcionando o pré-aquecimento à sua frente, aumentando a molhabilidade, o que implica em um cordão com maior largura e menor penetração. Por outro lado, a tocha o arco puxando (tocha com ângulo negativo), empurrar a poça para trás, chegando ao fundo da poça de fusão, com isto, tende aumentar a penetração e reduzir a largura do cordão.

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), a oscilação da tocha é outra técnica muito importante para o controle da geometria do cordão. Ao oscilar a tocha, aquece mais a lateral da junta, aumentando a capacidade de molhamento da poça. O que resulta na redução de defeitos como falta de fusão lateral e cordões com maior largura, além de aumentar o controle da penetração (reduzir).

Desta forma, o controle da penetração dos cordões soldados na progressão ascendente, sugere-se o uso da tocha com ângulo positivo (empurrando) e/ou a oscilação da mesma. Na soldagem descendente, para reduzir o escorrimento da poça de fusão na posição vertical, pode-se utilizar a tocha com ângulo de ataque negativo (puxando), na medida em que promove o aumento da penetração.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este trabalho tem como objetivo estabelecer vantagens e limites operacionais dos processos MAG curto-circuito convencional e controlados: STT (*Surface Tension Transfer*), RMD (*Regulated Metal Deposition*) e CMT (*Cold Metal Transfer*) visando a união de dutos de pequeno diâmetro e parede fina com passe único.

Deste modo, foram planejados experimentos que permitissem levantar a melhor condição de soldagem em face à velocidade de alimentação (três níveis) e dos parâmetros operacionais de cada processo de soldagem utilizado, mantendo-se a mesma quantidade de material depositado. Além disto, este trabalho procura avaliar a condição dos diferentes processos em realizar cordões nas progressões ascendentes e descendentes, assim como a utilização dos diferentes ângulos de ataque e a oscilação da tocha.

Para tal, será feita uma correlação dos parâmetros de soldagem de cada processo utilizado e a geometria do cordão de solda, fundamentada nos critérios de aceitabilidade e as características geométricas (reforço da face, reforço da raiz e largura da face).

Neste contexto, a condução experimental do presente trabalho foi fundamentada nas seguintes etapas:

- Realização de testes preliminares para determinar os parâmetros fixos e os níveis de parâmetros para cada processo;
- Análise visual para avaliar a qualidade superficial dos cordões;
- Ensaio metalográfico (macrografia) para verificar e avaliar possíveis discontinuidades internas dos cordões selecionados na etapa anterior;
- Determinação das características geométricas dos cordões de solda;
- Análise estatística para definição do efeito dos fatores na geometria dos cordões.

3.1 Bancada experimental

A bancada experimental foi montada como mostrado na Fig. 3.1 e identificados os principais equipamentos e acessórios. Em seguida, são listados os equipamentos por meio dos respectivos números.

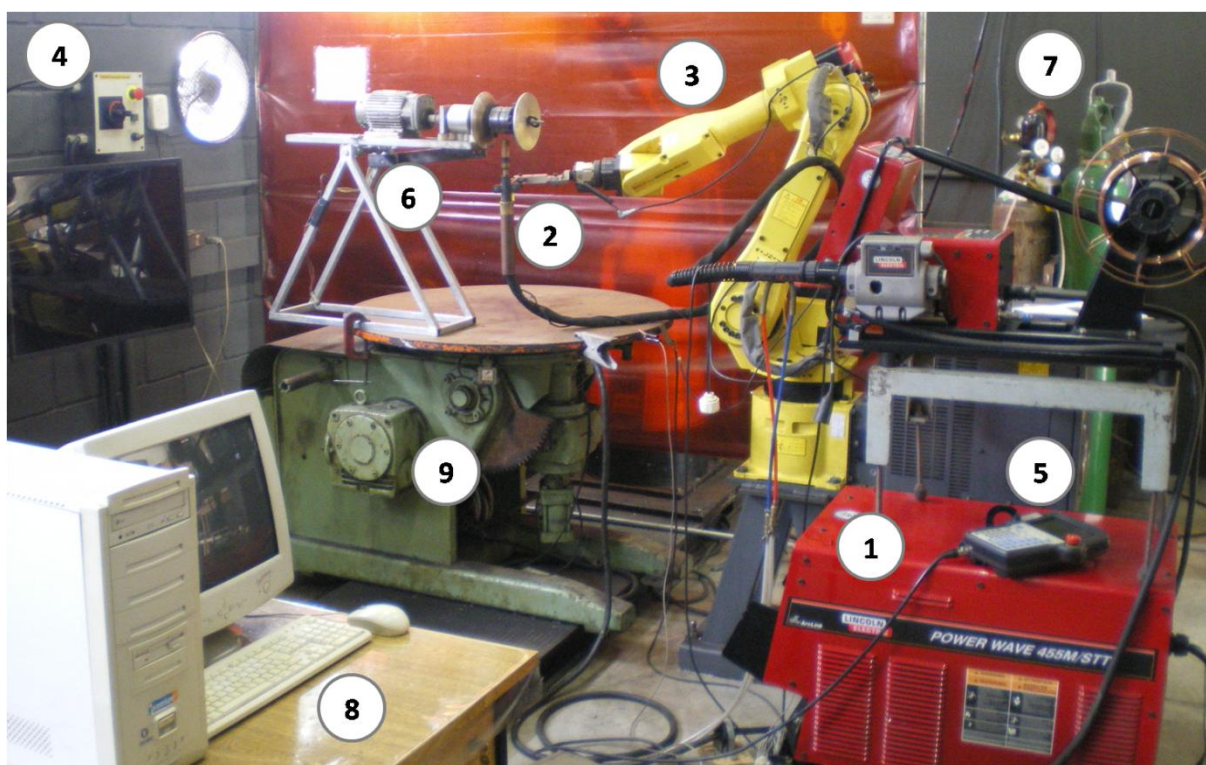


Figura 3.1 – Bancada experimental utilizada.

1. Fonte de soldagem e alimentador de arame;
2. Tocha;
3. Robô;
4. Painel de controle do robô;
5. Controle remoto do robô;
6. Suporte de fixação dos dutos;
7. Cilindros de gás (gás de proteção);
8. Sistema de aquisição de sinais elétricos;
9. Mesa.

3.1.1 Fonte e sistema de alimentação para os processos MAG curto-circuito convencional e STT

Para a realização das soldas com o processo MAG curto-circuito convencional e o processo STT, utilizou-se uma fonte eletrônica inversora, multiprocessos, modelo *Power Wave 450/STT* (Fig. 3.2) e um alimentador de arame *Power Feed 10M* da empresa *Lincoln Electric*. Segundo Lincoln (2010), a fonte utilizada possui uma faixa de corrente de 5 a 570 A e tensão de trabalho de 10 a 43 V com fator de trabalho de 60% e corrente máxima de 450 A e tensão máxima de 38 V, com fator de trabalho de 100%. O painel de controle da fonte disponibiliza os programas a serem utilizados, pelo tipo de arame-eletrodo, processo, diâmetro do arame e o tipo de gás de proteção. Para a realização dos testes com o processo MIG/MAG, foi selecionado o programa número 21, para “GMAW” (*Gas Metal ArcWelding*) protegido com misturas de Ar e arame 1,2 mm de aço carbono. Neste programa ajusta-se a velocidade de alimentação, tensão de referência e a indutância do equipamento, neste caso foi mantido no modo “off”, ou seja, sem autocontrole. Para o processo STT, foi selecionado o programa 25, onde são ajustadas a velocidade de alimentação, a corrente de base, a corrente de pico e o *Tail-out*.



Figura 3.2 – Fonte de energia *Power Wave 450/STT* e alimentador de arame *Power Feed 10M* da empresa *Lincoln Electric*, utilizada para soldagem MAG curto-circuito convencional e STT

3.1.2 Fonte e sistema de alimentação para o processo RMD

Para a execução das soldas com o processo RMD, utilizou-se uma fonte de energia *PipePro 450 RFC* em conjunto com alimentador de arame *PipePro Dual DX* com dois cabeçotes (Fig. 3.3). Trata-se de uma fonte multiprocessos. Segundo Miller (2009), a fonte utilizada possui saída nominal de soldagem de 450 A e 44 V com fator de trabalho de 100%, uma faixa de corrente 10 a 160 A e tensão entre 10 e 44 V, com tensão em vazio de 80 V.

A regulagem e o ajuste da fonte são feitos tanto no painel de controle da própria fonte, quanto no painel do alimentador de arame. A fonte permite criar oito programas, quatro para cada cabeçote alimentador, com processos e variáveis distintas. Neste caso, foi criado um programa onde foi selecionado o processo “RMD pro”, tipo de arame-eletrodo “Steel” da série “E70” (aço carbono da série E70), com diâmetro “0.045 in” (1,2 mm) e o gás de proteção “C25” (75% Ar + 25% CO₂).



Figura 3.3 – Fonte de energia *PipePro 450 RFC* e alimentador de arame *PipePro Dual DX*, utilizada para soldagem RMD.

3.1.3 Fonte e sistema de alimentação para o processo CMT

Para o processo CMT, utilizou-se uma fonte de energia TPS 3200 / 4000 / 5000 CMT fabricado pela empresa *Fronius* (Fig. 3.4). Segundo Fronius (2006), trata-se de uma fonte de soldagem inversora com comando microprocessado e regulado digitalmente, com pacote de funções para o processo CMT. O alimentador de arame utilizado foi VR 7000 CMT, regulado digitalmente para todas as bobinas de arame usuais.

A regulagem e o ajuste dos parâmetros são feitos no painel de controle da fonte, são selecionados o tipo de processo (curto-circuito convencional ou pulsado ou CMT) e o tipo de arame, para o processo CMT, também é regulado o comprimento de arco. Já a regulagem da velocidade de alimentação é realizada na tocha.



Figura 3.4 – Fonte de energia TPS 3200 / 4000 / 5000 CMT, utilizada na soldagem do processo CMT.

3.1.4 Tocha e sistema de refrigeração

Para a realização das soldas com os processos MAG curto-circuito convencional, STT e RMD, foi utilizada uma tocha automática do modelo *Aut 511*, com refrigeração a água, fabricada pela empresa TBi. Na Fig. 3.5, é apresentada a montagem e conexão da tocha ao robô.

Para a realização das soldas com o processo CMT, utilizou-se uma tocha semiautomática *PullMig CMT* (empresa *Fronius*) refrigerada a água (Fig. 3.6). A tocha possui um servo-motor CA, com comando digital altamente dinâmico, responsável por movimentar o arame para frente e para trás até 90 vezes por segundo. No cabo da tocha, entre os dois motores, é instalado um “pulmão” (*buffer*) de forma a desacoplar um motor do outro, e criar assim uma folga para o arame, o que permite ao arame um movimento livre de forças (FRONIUS, 2007).



Figura 3.5 – Fixação da tocha (TBi) utilizada na soldagem com os processos MAG, STT e RMD.



Figura 3.6 – Fixação da tocha (*Fronius*) utilizada na soldagem com processo CMT.

Para a refrigeração da primeira tocha foi utilizado uma bomba de refrigeração externa. A utilização do sistema de refrigeração tem a finalidade de reduzir o desgaste dos componentes da tocha e permitir que o processo opere em uma condição favorável (REZENDE, 2009).

3.1.2 Robô

Para a movimentação da tocha no desenvolvimento do presente trabalho, foi utilizado um robô, modelo *Arcmate* 100 iB, com 6 graus de liberdade e capacidade máxima de carga na flange de 6kg, fabricado pela empresa *FANUC*.

A utilização de robôs em processos de soldagem a arco apresenta muitas vantagens. Rezende (2009) destaca a facilidade de operação, maior confiabilidade nos parâmetros de deslocamento do robô (velocidade de soldagem), facilidade na marcação de pontos e definição de trajetórias. Na Fig 3.7 é mostrado o sistema de controle do robô.

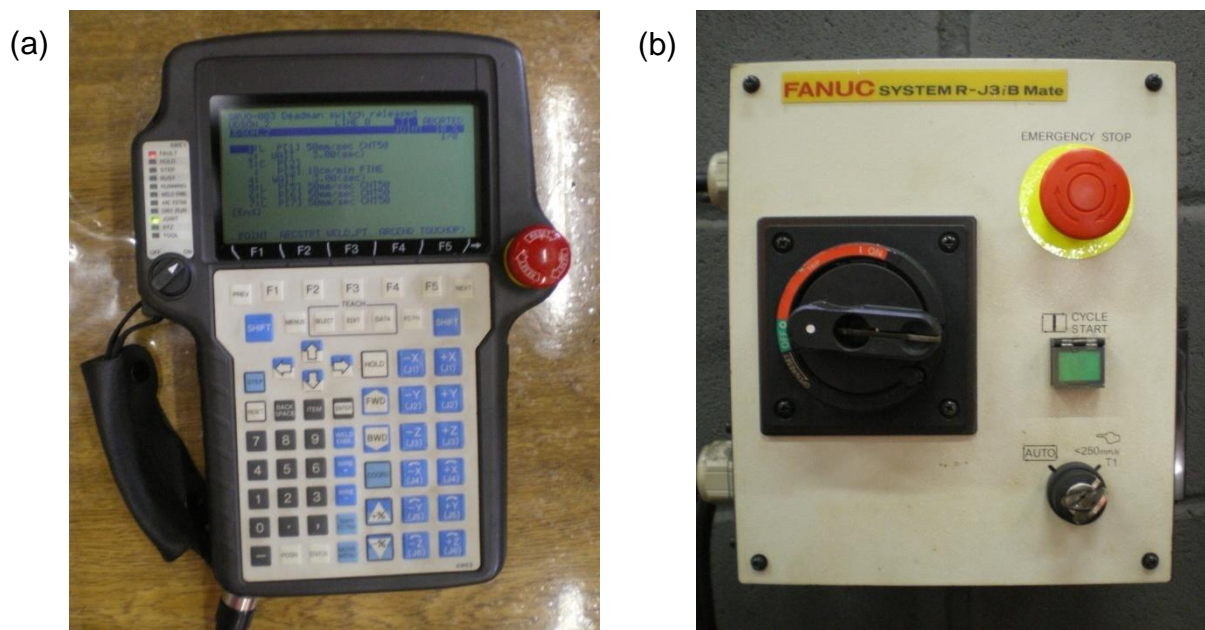


Figura 3.7 – (a) Controle remoto do robô; (b) Pannel de controle do robô.

3.1.3 Suporte de fixação dos tubos de teste

Na Fig. 3.8 mostra o suporte de fixação utilizado nos testes, para garantir uma fixação rígida dos tubos evitando a variação dos parâmetros durante a soldagem. O suporte foi desenvolvido de forma que os tubos de teste possam ficar parados ou girando e alterar o ângulo, o que possibilita a realização de solda em tubos em diferentes posições.

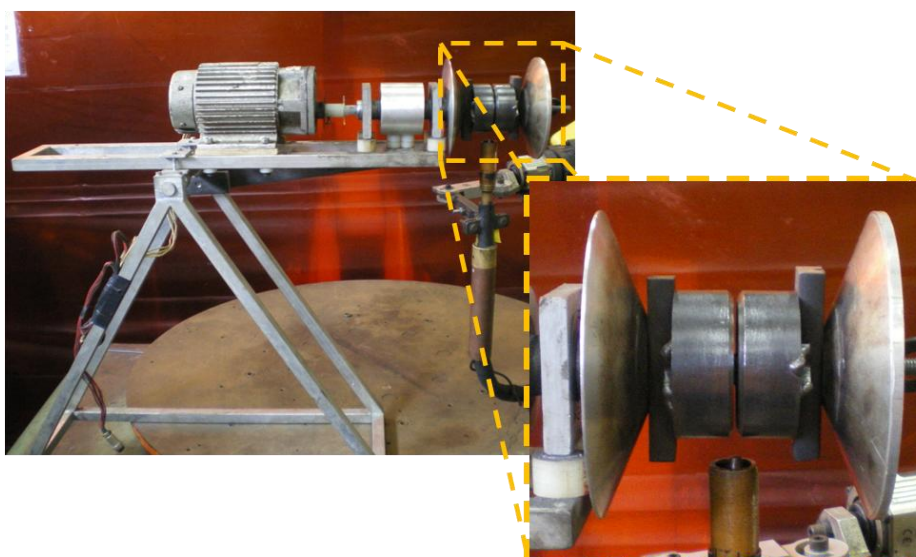


Figura 3.8 – Suporte de fixação dos dutos.

3.1.4 Sistema de aquisição

Para o monitoramento dos parâmetros regulados, durante a execução dos ensaios foi utilizado um sistema de aquisição dos sinais elétricos, corrente e tensão de soldagem e a velocidade de alimentação.

Para tanto, foi utilizada uma placa *National Instruments* modelo NI USB-6009 (Fig. 3.10) e programa desenvolvido em linguagem *LabView*[®], que captura os dados durante a soldagem, que são apresentados em forma de gráficos ao término da aquisição. A Fig. 3.11 apresenta a interface do programa, em destaque o ajuste dos valores de taxa e tempo de amostragem, onde foi utilizada uma taxa de amostragem de 5 kHz.



Figura 3.10 – Placa de aquisição modelo NI USB-6009 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

Além disto, foi utilizado para aquisição do sinal da corrente de soldagem um sensor *Hall*, como transdutor de sinal, da marca LEM *Transducers* modelo HT 50-S8D com faixa de medição de ± 500 A (Fig. 3.12(a)). Para o monitoramento da tensão foi utilizado um divisor de tensão (DTS), com uma faixa de medição de ± 100 V. Para aquisição da velocidade de alimentação foi utilizado um tacômetro, fabricado pela IMC Soldagens, com resolução de 50 pulsos por volta (Fig. 3.12(b)).

O tratamento dos dados foi realizado no software *OriginPro* 8.0 que permite abrir, manipular, sincronizar e tratar os dados gravados pelo programa de aquisição.

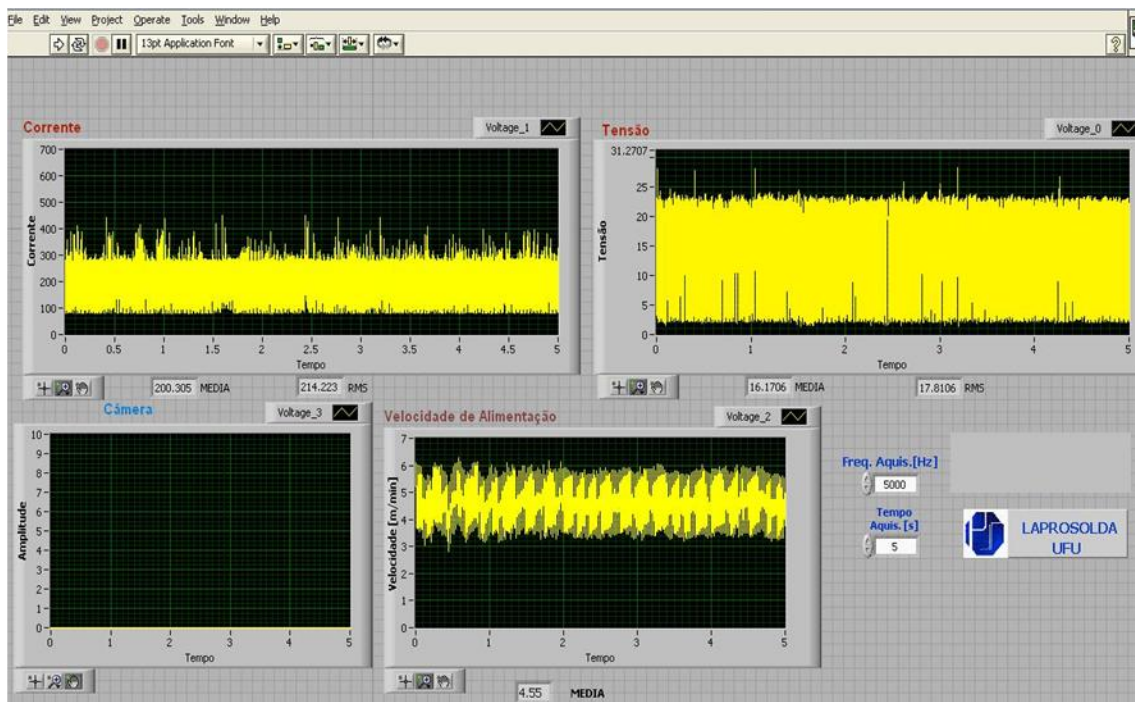


Figura 3.11 – Programa desenvolvido em linguagem *LabView*® para captura de sinais elétricos.

(a)



(b)



Figura 3.12 – (a) Transdutor para medição de corrente sensor *Hall*; (b) Encoder utilizado nos experimentos montado com arame.

3.2 Materiais

3.1.1 Metal de adição

Como metal de adição foi utilizado o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro. A escolha do tipo e do diâmetro do arame-eletrodo está relacionada com a necessidade de realizar a união dos tubos em passe único, maior volume de material depositado, além de ser comercialmente mais utilizado. A composição química e propriedades mecânicas do arame-eletrodo, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, estão apresentadas na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química e propriedades mecânicas nominais do arame utilizado (AWS ER70S-6).

ARAME-ELETRODO AWS ER70S-6				
Composição Química %				
C – 0,03	Si – 0,55	Mn – 1,45	P – 0,013	S – 0,01
Propriedades Mecânicas				
L. R. (N/mm ²)	L. E. (N/mm ²)	Alongamento [%]	Charpy-V/[J] 18°C	
580	525	29	104/72	

3.1.2 Material de base

Para a confecção dos tubos de teste, foi utilizado como metal de base aço ao carbono ABNT 1020, com 5,5 mm de espessura e diâmetro interno de 63 mm (Fig. 3.13). Os tubos foram chanfrados, de acordo com as recomendações da norma AWS D10.12, cuja a geometria do chanfro é mostrada na Fig. 3.14. A preparação dos tubos de teste foi realizada em torno mecânico.

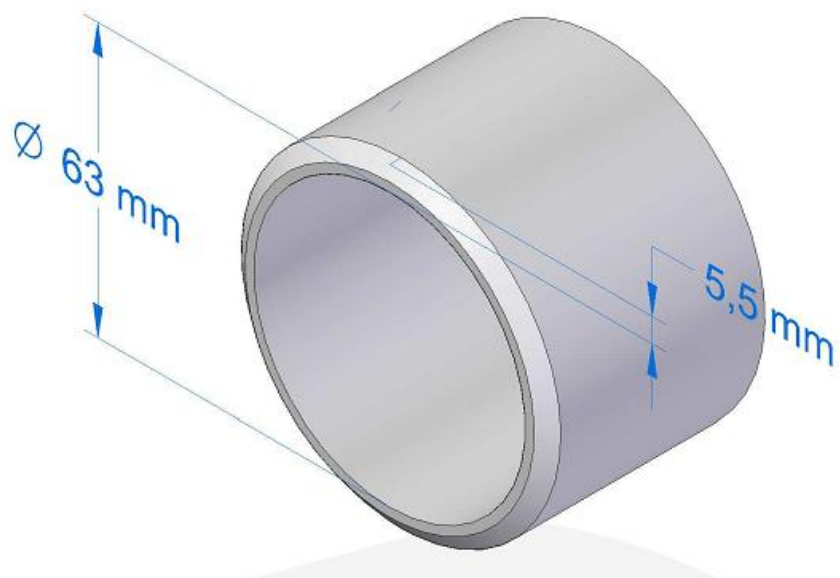


Figura 3.13 – Dimensões do duto utilizado para soldagem.

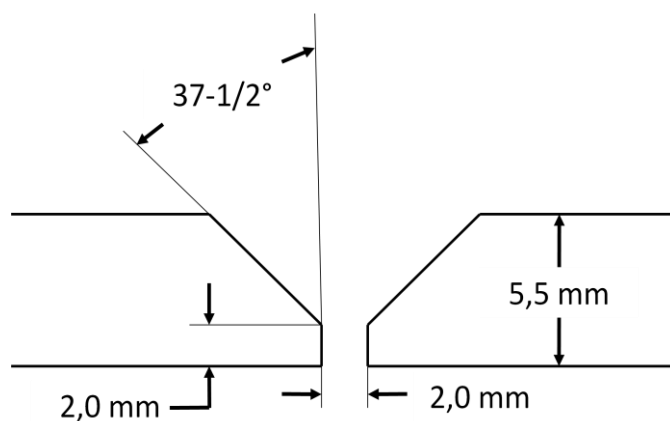


Figura 3.14 – Geometria do chanfro proposta pela AWS D10.12

Para manter a abertura da raiz constante, os tubos foram preparados fixando dois “cachorros” na parte interna. Estes cachorros são cantoneiras de $5/8"$, onde foram feitos canais na região da raiz para evitar interferência no perfil do cordão (Fig. 3.15).

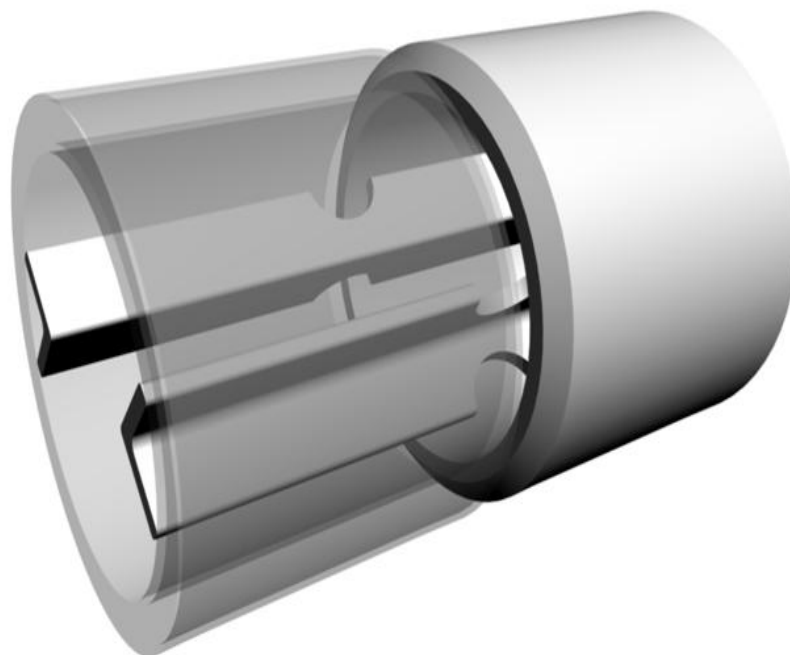


Figura 3.15 – Fixação dos dutos com “cachorros” para manter a abertura da raiz.

3.1.3 Gás de proteção

Para este trabalho foi utilizada uma mistura gasosa $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, por ser comumente utilizada na transferência por curto-circuito, sendo adotada uma vazão de 15l/min.

3.3 Planejamento experimental

Para os processos MAG curto-circuito convencional e RMD foram realizados planejamentos com 16 ensaios para ambas as progressões de soldagem, através de um Planejamento Composto Central (PCC) de face cúbica, três fatores e dois blocos, como mostrado nas Tab. 3.2 e 3.4. O planejamento experimental para execução dos ensaios utilizando o processo STT foi feito também via PCC de face cúbica, mas com quatro fatores e dois blocos, totalizando 18 ensaios para ambas as progressões de soldagem (Tab. 3.3). Já para a realização dos ensaios com o processo CMT, foi realizado um fatorial completo com dois fatores e dois blocos, num total de 9 ensaios para cada progressão de soldagem (Tab. 3.4).

A escolha dos fatores foi baseada nos parâmetros de regulação da fonte e algumas técnicas de soldagem (ângulo de ataque e oscilação da tocha), buscando aproximar das condições usadas na prática. Para o processo MAG curto-circuito convencional, foram variados a velocidade de alimentação (V_A), a tensão de soldagem (U), além das técnicas de

soldagem, oscilação (com e sem) e o ângulo de ataque da tocha (empurrando, reto e puxando). No processo STT, além da velocidade de alimentação, foram escolhidos a corrente de base (I_{Base}), a corrente de pico (I_{Pico}), o *Tail-out*. Para o processo RMD, foram variados a velocidade de alimentação, o *Trim* e o *Arco Control*. Nos dois últimos processos, foi variado apenas a oscilação da tocha, como forma de restringir o número de ensaios. Já para o processo CMT, além de variar o comprimento do arco e controle dinâmico, todos os ensaios foram realizados com a tocha oscilando. Os níveis para cada fator foram determinados através de vários testes preliminares descritos a seguir no Capítulo IV. Ressalta-se que para se manter o mesmo volume depositado, a velocidade de soldagem (V_s) variou proporcionalmente à velocidade de alimentação em valor suficiente para o preenchimento da junta. Assim, os valores de V_A selecionados foram 15, 18 e 21 cm/min para as velocidades de alimentação 2,3; 2,8 e 3,3; respectivamente.

Tabela 3.2 – Planejamento experimental dos ensaios para o processo MAG curto-circuito convencional.

Ensaio	Progressão de Soldagem	Oscilação da Tocha	V_A [m/min]	U [V]	Ângulo de Ataque [°]
1	Ascendente/Descendente	Não	2,3	18	-10
2			2,3	18	10
3			2,3	20	-10
4			2,3	20	10
5			3,3	18	-10
6			3,3	18	10
7			3,3	20	-10
8			3,3	20	10
9			2,8	19	0
10		Sim	2,3	19	0
11			3,3	19	0
12			2,8	18	0
13			2,8	20	0
14			2,8	19	-10
15			2,8	19	10
16			2,8	19	0

Tabela 3.3 – Planejamento experimental dos ensaios para o processo STT.

Ensaio	Progressão de Soldagem	Oscilação da Tocha	V_A [m/min]	I_{Base} [A]	I_{Pico} [A]	Tail-out
1	Ascendente/Descendente	Não	3,3	100	320	0
2			3,3	100	280	0
3			3,3	60	320	10
4			2,3	100	280	10
5			3,3	60	280	10
6			2,3	60	320	0
7			2,3	100	320	10
8			2,3	60	280	0
9			2,8	80	300	5
10		Sim	2,3	80	300	5
11			3,3	80	300	5
12			2,8	60	300	5
13			2,8	100	300	5
14			2,8	80	280	5
15			2,8	80	320	5
16			2,8	80	300	0
17			2,8	80	300	10
18			2,8	80	300	5

Tabela 3.4 – Planejamento experimental dos ensaios para o processo RMD.

Ensaio	Progressão de Soldagem	Oscilação da Tocha	V_A [m/min]	Trim	Arc Control
1	Ascendente/Descendente	Não	2,3	50	0
2			2,3	50	50
3			2,3	80	0
4			2,3	80	50
5			3,3	50	0
6			3,3	50	50
7			3,3	80	0
8			3,3	80	50
9			2,8	65	25
10		Sim	2,3	65	25
11			3,3	65	25
12			2,8	50	25
13			2,8	80	25
14			2,8	65	0
15			2,8	65	50
16			2,8	65	25

Tabela 3.5 – Planejamento experimental dos ensaios para o processo CMT.

Ensaio	Progressão de Soldagem	V_A [m/min]	Comprimento de Arco
1	Ascendente/Descendente	3,2	-20
2		3,2	-5
3		3,2	10
4		4,2	-20
5		4,2	-5
6		4,2	10
7		5,2	-20
8		5,2	-5
9		5,2	10

3.4 Critérios de aceitabilidade

Os critérios de aceitabilidade dos cordões de soldas foram baseados na norma ANSI/AWS D1.1 (visto que, a norma ANSI/AWS D10.12 não discorre sobre tais critérios) e realizados em duas etapas, em conformidade com a Tab. 3.6. Na primeira, avaliou-se a qualidade dos cordões através de análise visual para detectar a presença de defeitos na superfície dos mesmos. Na segunda etapa, foi verificada a possível presença de descontinuidades internas através de análise macrográfica dos cordões selecionados na etapa anterior, realizadas na seção transversal selecionadas em três regiões diferentes, posição plana, vertical e sobrecabeça. As seções transversais foram preparadas com reagente Nital 5%, digitalizadas por uma máquina fotográfica com resolução de 10 MP e analisadas no programa de tratamento de imagem (*ImageJ*).

Tabela 3.6 – Critérios visuais e dimensionais recomendados pela ANSI/AWS D1.1.

Categoria das Descontinuidades e Critérios de Inspeção X = aplicável para o tipo de conexão; Sombreado = não aplicável	Conexões não tubulares carregadas estaticamente	Conexões não tubulares carregadas ciclicamente	Conexões tubulares qualquer carregamento
1) Trincas: as soldas não podem apresentar trincas	X	X	X
2) Falta de fusão: Deve existir fusão total entre as camadas adjacentes do metal de solda e entre o metal de solda e o metal de base	X	X	X
3) Crateras: todas as crateras devem ser preenchidas para completar a seção transversal do cordão, exceto aquelas ao final de filetes intermitentes e além do comprimento efetivo do cordão	X	X	X
7) Mordedura: (A) para materiais com menos de 25,4 mm de espessura, mordeduras não devem exceder a 1 mm de profundidade. Um máximo de 1,6 mm é permitido em um comprimento acumulado de 50 mm em qualquer 305 mm. Para materiais igual ou mais espesso do que 25,4 mm, mordedura não pode exceder a 1,6 mm para qualquer comprimento de solda.	X		
(B) em membros primários, mordedura não deve ser maior do que 0,25 mm de profundidade quando a solda é transversal à tensão de tração sob qualquer condição de carregamento de projeto. Mordedura não deve ser mais profunda do que 1 mm para todos os outros casos		X	X
8) Porosidade: (A) soldas de topo com penetração completa transversais à direção de tração calculada não deve ter porosidade alongada (vermiforme) visível. Para outras soldas de chanfro e para soldas e filete, a soma das porosidades alongadas visíveis de 1 mm ou mais de diâmetro não deve exceder a 10 mm em qualquer 25 mm lineares de solda e não deve exceder a 19 mm em qualquer 305 mm de comprimento de solda.	X		
(B) a frequência de porosidade alongada em soldas de filete não deve exceder a 1 em cada 100 mm de comprimento de solda e o diâmetro máximo não deve exceder a 2 mm. Exceções: soldas de filete ligando nervuras à almas de vigas, a soma dos diâmetros das porosidades alongadas não deve exceder a 10 mm em qualquer 25 mm linear de solda e não deve exceder a 19 mm em qualquer 305 mm de solda.		X	X
(C) soldas de topo com penetração completa transversais à direção de tração calculada não deve ter porosidade alongada. Para outras soldas de chanfro, a frequência das porosidades alongadas não deve exceder a 1 mm em 100 mm de comprimento e o diâmetro máximo não deve exceder a 2 mm.		X	X

3.5 Análise geométrica do cordão

3.5.1 Característica geométrica

Para a determinação das características geométricas dos cordões, as medidas foram realizadas pelo programa *ImageJ*[®] e com base nas imagens digitalizadas dos ensaios macrográficos descritos no item anterior, cujos cortes transversais foram realizados em três regiões distintas, posição plana, vertical e sobre cabeça. As características geométricas medidas foram o reforço da face, a largura da face e o reforço da raiz, conforme a Fig. 3.16.

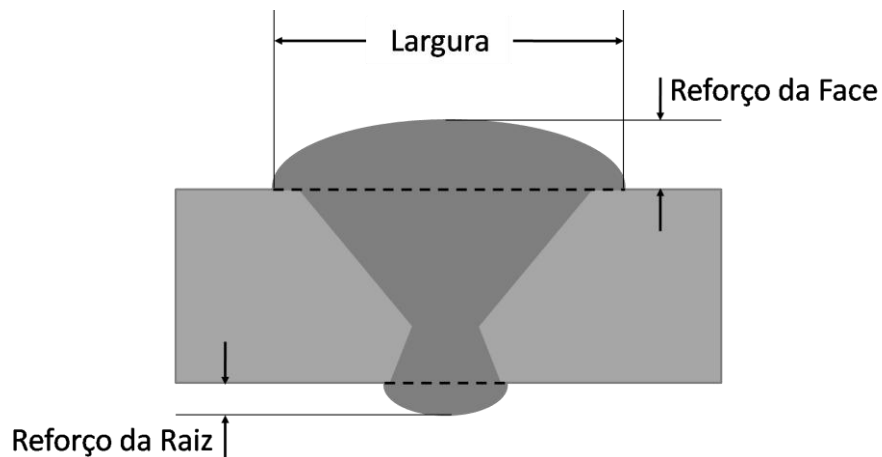


Figura 3.16 – Características geométricas do cordão.

3.5.2 Efeito dos fatores sobre a geometria do cordão

As análises do efeito dos fatores sobre a geometria dos cordões foram realizadas via análise de variância (ANOVA), com base no PCC proposto para cada processo (descritos no Item 3.3) e nas características geométricas medidas. Deve-se ressaltar que para os casos onde não foi possível a execução completa do cordão atribuiu-se os valores de -2,75 mm para reforço da face (RF), de 4,0 mm para o reforço da raiz (RR) e de 3 mm para largura da face (LF). Estes valores foram escolhidos para representar valores totalmente indesejáveis para o caso de perfuração do cordão.

CAPÍTULO IV

TESTES PRELIMINARES

Neste capítulo é apresentada a determinação dos níveis dos fatores para cada processo de soldagem investigado. Como parâmetros gerais a serem mantidos fixos durante a execução das soldas, utilizou-se gás de proteção $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ com vazão de 15 l/min, distância bico contato peça (DBCP) de 12 mm e eletrodo ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro.

Inicialmente, partiu-se de parâmetros sugeridos pelos fabricantes dos equipamentos, realizando ensaios de simples deposição sobre dutos e/ou sobre chapas de aço carbono ABNT 1020 de dimensões como mostradas nas Fig. 4.1 e 4.2. O objetivo destes ensaios preliminares, utilizando-se simples deposição, foi, além de procurar condições paramétricas iniciais, verificar o funcionamento das fontes e do sistema de aquisição. Um ponto importante foi a verificação da relação entre a velocidade de alimentação ajustada e a realmente medida, como forma garantir a constância do volume depositado, independente o processo utilizado.

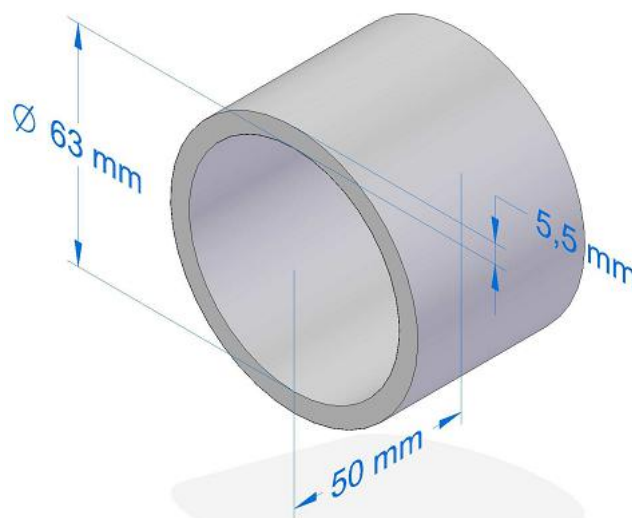


Figura 4.1 – Esquema do duto para testes de simples deposição.

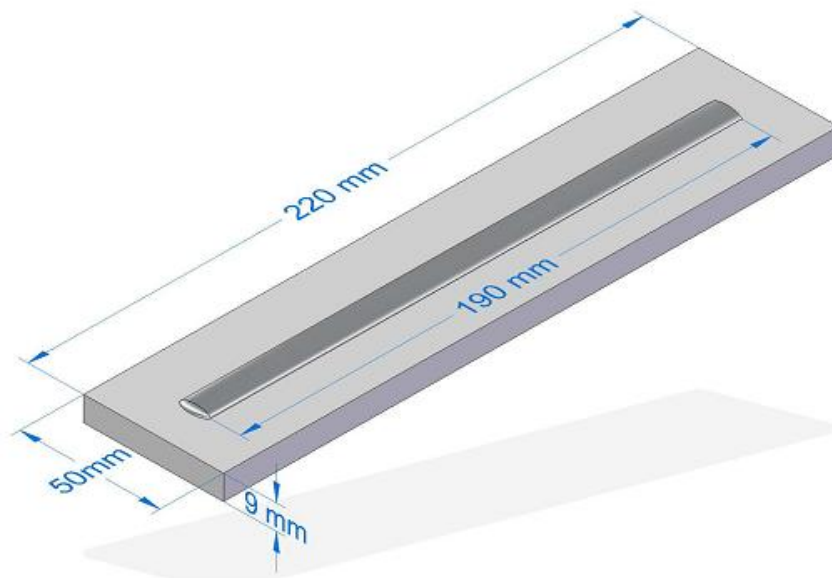


Figura 4.2. – Esquema da chapa para testes de simples deposição.

Já os testes de deposição em juntas foram executados em dutos preparados com junta de acordo com as recomendações da norma AWS D10.12, descrito no Item 3.2.2, com ângulo de 75°, face da raiz de 2 mm e abertura de raiz de 2 mm (Fig. 3.14).

4.1 Determinação dos níveis para os fatores no processo MAG Curto-Circuito Convencional

Como destacado no Capítulo 2, no processo MAG curto-circuito convencional, a velocidade de alimentação do arame, a tensão de soldagem, a indutância, dentre outras, são variáveis influentes na transferência por curto-circuito. Neste sentido, foram executados testes para determinar três níveis de velocidade de alimentação (e consequentemente três níveis de velocidade de soldagem proporcionais para manter o volume depositado) e três níveis de tensão de ajuste, utilizando a fonte da Lincoln. No caso da indutância, optou-se por trabalhar no modo “off”. No trabalho de Souza (2009), ao avaliar a influência da indutância, verificou-se que o efeito indutivo apresenta pouca influência na frequência de curto-circuito, na tensão e corrente médias, desde que já se esteja trabalhando em um envelope operacional estreito.

4.1.1 Velocidade de alimentação

O fator limitante para determinar os níveis de velocidade de alimentação do arame foi a faixa de trabalho para a corrente de soldagem adotada (entre 100 e 160 A), o que segundo Hashimoto e Morimoto (2006), está dentro da faixa de corrente de trabalho para transferência por curto-circuito (de até 200 A). A partir disto, realizou-se testes sobre dutos variando o valor de velocidade de alimentação para determinar quais os valores que correspondem a esta faixa de corrente. Como parâmetro de partida, utilizou-se a velocidade de alimentação de 2,3 m/min, velocidade de soldagem de 15 cm/min e a tensão de 18 V. Na Tab. 4.1 são mostrados os valores de velocidade de alimentação selecionados e os respectivos valores de corrente média (I_M). Além deste valor de velocidade de alimentação, dois outros níveis (2,8 e 3,3 m/min) foram considerados apropriados. Deve-se lembrar que a velocidade de soldagem variou proporcionalmente de forma a manter o mesmo volume depositado para preencher a junta proposta, como será mostrado a seguir.

Tabela 4.1 – Relação dos níveis de velocidade de alimentação e os valores monitorados de corrente média (I_M).

V_A [m/min]	I_M [A]
2,3	116,7
2,8	137,0
3,3	154,8

4.1.2 Tensão de soldagem

Para a determinação dos níveis de tensão de soldagem, adotou-se como referência a faixa de trabalho da tensão para a soldagem de passe de raiz em juntas tubulares com processo MIG/MAG, de 18 a 21 V (EMMERSON, 2000). Neste sentido, inicialmente procurou-se verificar o comportamento dos cordões para esta faixa de tensão. Em seguida, estabelecer três níveis da tensão desejável para a proposta do trabalho, ou seja, que se adapta ao tipo de junta adotado. Para isto, foi variada a tensão de soldagem, de 17 V a 22 V. As demais variáveis do processo foram mantidas fixas (velocidade de alimentação de 2,8 m/min e a velocidade de soldagem de 15 cm/min).

Em geral, observou-se que para os menores valores de tensão de soldagem o cordão tende a apresentar cordões mais estreitos. Este comportamento pode ser observado no teste com tensão de 17 V, onde o cordão apresentou um perfil mais estreito, devido ao menor comprimento de arco, o que aumenta a instabilidade da transferência metálica. Ao

passo que, o teste com tensão de 22 V, o cordão apresentou um cordão mais largo, favorecido pelo maior comprimento de arco, o qual esta sujeito ao escorrimento do metal fundido, principalmente na posição sobrecabeça. Para os valores e tensão de 18 a 21 V, os resultados foram satisfatórios, com bom perfil de cordão e na estabilidade da transferência metálica, o que corrobora com a faixa operacional de tensão recomendada pela literatura. Para tal, optou-se por selecionar os valores de tensão de 18, 19 e 20 V, pois apresentaram perfil de cordão que se acredita, adaptar maior ao tipo de junta.

4.1.3 Velocidade de soldagem

Na determinação da velocidade de soldagem, procurou-se encontrar a melhor razão entre a velocidade de alimentação e a velocidade de soldagem (V_A/V_S), para manter aproximadamente a mesma quantidade de material depositado por comprimento de solda. Para tal, foram realizados teste em dutos chanfrados, fazendo uma varredura dos valores de velocidade de soldagem em intervalos de 1 em 1 cm/min, para uma velocidade de alimentação de 2,8 m/min e um valor de tensão de 18 V. Desta forma procurou-se avaliar a capacidade dos cordões em preencher toda a junta. A Tab. 4.2 apresenta a razão entre velocidade de alimentação e a velocidade de soldagem (V_A/V_S) para os cordões de solda.

Tabela 4.2 – Valores monitorados da razão entre velocidade de alimentação e a velocidade de soldagem (V_A/V_S)

V_S [cm/min]	V_A [m/min]	V_A/V_S
13	2,8	0,0215
14		0,0200
15		0,0187
16		0,0175
17		0,0165

Observou-se que o cordão com velocidade de soldagem de 15 cm/min apresentou o melhor volume de material para preencher a junta para as posições plana, vertical e sobrecabeça, quando comparado aos outros cordões. Sendo definida a razão V_A/V_S igual a 0,0187 para determinar as velocidades de soldagem. Desta forma, em função da velocidade de alimentação adotada, foi mantida por esta razão, os valores de velocidade de soldagem

determinados foram 12,3; 15 e 17,7 cm/min. Como o controle de velocidade do robô permite apenas valores exatos, os valores foram ajustados para 12, 15 e 18 cm/min.

Em seguida, foram realizados testes para averiguar a quantidade de material depositado em cada nível de velocidade de soldagem. Segundo Santos (2009), esta averiguação pode ser realizada pelo cálculo da taxa de deposição por unidade de comprimento (T_{DC}), como mostrado na Eq. 4.1.

$$T_{DC} = \frac{m_f - m_i / T_{Arco}}{V_s} = \frac{T_d}{V_s} [g / cm] \quad (4.1)$$

Onde, m_i é massa inicial, m_f é a massa final, T_{Arco} é o tempo de arco aberto e T_d é a taxa de deposição.

Para tal, os cordões foram executados sobre chapa. Na Tab. 4.3 são mostrados os resultados obtidos com as soldagens realizadas, na qual é possível observar que a relação V_A/V_s para os níveis de velocidade de soldagem definidos resultaram na T_{DC} próxima à estipulada (de 1,6 g/cm).

Tabela 4.3 – Cálculo da taxa de deposição por unidade de comprimento (T_{DC}) para os valores selecionados de V_A/V_s para o processo MAG (m_i é massa inicial, m_f é a massa final, T_{Arco} é o tempo de arco aberto e T_d é a taxa de deposição).

Parâmetros Regulados			Parâmetros Monitorados							
Teste		V _A [m/min]	V _S [cm/min]	V _A Média [m/min]	m _i [g]	m _f [g]	Δ m [g]	T _{Arco} [s]	T _d [g/s]	T _{DC} [g/cm]
1	A	2,3	12	2,36	811,21	842,92	31,71	97,63	0,325	1,624
	B			2,36	842,92	875,16	32,24	98,32	0,328	1,640
2	A	2,8	15	2,90	817,50	848,45	30,95	78,03	0,397	1,587
	B			2,89	848,45	879,65	31,20	78,52	0,397	1,589
3	A	3,3	18	3,38	814,42	844,29	29,87	64,75	0,461	1,538
	B			3,37	844,29	874,55	30,26	65,64	0,461	1,537

4.1.4 Oscilação da tocha

Ainda procurou-se estipular os parâmetros para a oscilação da tocha (para todos os processos utilizados no trabalho). Desta forma, optou-se por utilizar, parâmetros recomendados pela norma AWS D10.12 para a soldagem com processo eletrodo revestido

(ER), pois a mesma não discorre sobre tais critérios para o processo MIG/MAG. Neste processo a tocha movimenta-se com oscilação pendular e com comprimento de onda (λ) de 1,6 mm, como mostrados na Fig. 4.3. Além disto, regulou-se a amplitude (A) em 1,5 mm, de forma que o arame-eletrodo permanecesse dentro da junta. Na Tab. 4.4 são apresentados os níveis de velocidade de soldagem (V_s) escolhidos no item anterior e os respectivos valores de frequência (ν).

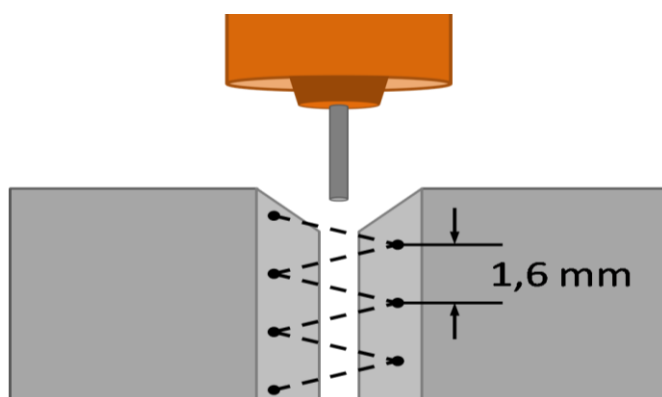


Figura 4.4 – Esquema da oscilação da tocha de acordo com a norma AWS D10.12 para o processo eletrodo revestido (ER).

Tabela 4.4 – Cálculo da frequência da oscilação para cada nível de velocidade de soldagem (A – Amplitude; λ – Comprimento de onda; ν – Frequência).

V_s [cm/min]	A [mm]	λ [mm]	ν [Hz]
12	1,5	1,6	1,3
15			1,6
18			1,9

4.2 Determinação dos níveis para os fatores do processo STT

No processo STT, além das variáveis já determinadas no processo MAG curto-circuito convencional, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, tem como parâmetro de regulação a corrente de pico (I_{Pico}), a corrente de base (I_{Base}) e o *tail-out*. Para determinar os níveis de corrente de pico e base, os testes exploratórios foram executados utilizando o programa 26, com ajuste sinérgico do *tail-out*. Para tal, procurou-se realizar uma varredura em intervalos de 10 em 10 A para a corrente de pico e para a corrente de base,

para mais e para menos com base no parâmetro de partida (velocidade de alimentação de 2,8 m/min e velocidade de soldagem de 15 cm/min, corrente de pico de 300 A e corrente de base de 100 A), considerando o perfil dos cordões. Além disto, procurou realizar teste para averiguar a quantidade de material depositado para a relação V_A/V_S .

4.2.1 Corrente de pico

Para determinar os três níveis de corrente de pico, primeiramente procurou-se estipular uma faixa operacional dentro da faixa de regulação da fonte (de 0 a 550 A). De acordo com os testes realizados, a faixa operacional ficou definida de 280 a 320 A. Para o valor de corrente de pico de 270, observou-se que para uma redução no comprimento do arco (menor tensão média), o que resultou em cordões muito estreitos. Por outro lado, para a corrente de pico acima de 330 A, apresentou um cordão mais largo devido ao maior comprimento de arco, com uma tendência ao escorrimento do metal fundido nas posições vertical e sobrecabeça. Desta forma os três níveis para a corrente de pico ficaram estabelecidos em 280, 300 e 320 A.

4.2.2 Corrente de base

Nesta etapa, buscou-se determinar os três níveis de corrente de base dentro da faixa 50 a 100 A. De acordo com Stava (1993), esta é a faixa de trabalho recomendada para o tipo de gás de proteção utilizado ($Ar+25\%CO_2$).

Os resultados encontrados mostraram que para os menores valores de corrente de base proporciona a formação de cordões mais estreitos e com maior estabilidade na transferência. O que foi observado no teste com a I_{Base} de 50 A. Neste caso, a menor corrente de base reduz a corrente de arco aberto, reduzindo a molhabilidade no metal base (menor calor imposto), ou seja, menor largura do cordão. À medida que aumenta o valor de corrente de base aumenta a largura do cordão, porém, acima de 100 A (teste com I_{Base} de 110 A) apresentou um cordão mais largo, um aumento na instabilidade da transferência e na geração de respingos.

Desta forma, os níveis de corrente de base que apresentaram um cordão com perfil adequado para tipo de junta adotado foram de 60, 80 e 100 A.

4.2.3 Tail out

Na determinação dos três níveis de *Tail-out*, considerando a curta faixa de regulagem (de 0 a 10), optou-se pelo 0 como menor nível, 5 com nível médio e o 10 como maior nível. Desta forma, acredita-se que é possível maior compreensão da influência do *Tail-out* na geometria dos cordões.

4.2.4 Verificação da quantidade de material depositado

Na averiguação da quantidade de material depositado para o processo, observa-se na Tab. 4.5, que a relação V_A/V_S para os níveis de velocidade de soldagem resultaram na taxa de deposição por unidade de comprimento semelhante à estipulada no processo MAG com transferência por curto-circuito convencional.

Tabela 4.5 – Calculo da taxa de deposição por unidade de comprimento (T_{DC}) para os valores selecionados de V_A/V_S para o processo STT (m_i é massa inicial, m_f é a massa final, T_{Arco} é o tempo de arco aberto e T_d é a taxa de deposição).

Parâmetros Regulados				Parâmetros Monitorados						
Teste		V_A [m/min]	V_S [cm/min]	V_A Média [m/min]	m_i [g]	m_f [g]	Δm [g]	T_{Arco} [s]	T_d [g/s]	T_{DC} [g/cm]
1	A	2,3	12	2,33	813,81	845,58	31,77	97,31	0,326	1,632
	B			2,35	845,58	877,69	32,10	98,76	0,325	1,626
2	A	2,8	15	2,88	816,85	848,61	31,76	78,64	0,404	1,615
	B			2,87	848,61	880,11	31,50	77,70	0,405	1,622
3	A	3,3	18	3,33	814,36	845,10	30,74	65,09	0,472	1,574
	B			3,33	845,10	875,92	30,82	65,18	0,473	1,576

4.3 Determinação dos níveis para os fatores do processo RMD

O processo RMD tem como parâmetros de regulagem da fonte, o ajuste do arco ou *Trim* e o *Arc Control*. Assim como no processo STT, tanto a velocidade de alimentação quanto a velocidade de soldagem foram mantidos os mesmos níveis utilizados no processo MAG, como critério de comparação dos processos. Para determinar dos níveis (de *Trim* e de *Arc Control*), foi adotado como parâmetros fixos a velocidade de alimentação de 2,8 cm/min e a velocidade de soldagem de 15 m/min, levando em consideração o perfil superficial do cordão.

4.3.1 Ajuste do arco / Trim

Nesta etapa, inicialmente procurou-se determinar a faixa operacional de *Trim* que apresenta o perfil de cordão que melhor adapta-se ao tipo de junta utilizada no trabalho. Para tal, realizou uma varredura por todo ajuste disponível na fonte, de 0 a 100, em intervalos de 10 em 10. Sendo mantido fixo o *Arc Control* de 25, com base na recomendação do fabricante.

De acordo com os resultados obtidos, a faixa operacional de *Trim* ficou definida de 50 a 80. Observou-se que para valores de *Trim* abaixo de 50 os cordões tendem a apresentar um perfil mais estreito e convexo, em consequência à redução do comprimento do arco. Enquanto que para valores acima de 80, com o aumento no comprimento do arco favoreceu a formação de cordões mais largos e com maior escorrimento do metal líquido nas posições vertical e sobrecabeça. Deste modo os níveis para o *Trim* ficaram estabelecidos em 50, 65 e 80.

4.3.2 Arc control

Nesta etapa, assim como na etapa anterior, primeiramente procurou-se determinar uma faixa operacional de *Arc Control*, levando em consideração o perfil superficial do cordão. Para isto, variou-se o *Arc Control* dentro da faixa de ajuste da fonte (de 0 a 50) em intervalos de 5 em 5, sendo mantido o *Trim* em 50.

Porém, apenas os testes com valores de *Arc Control* de 0 e 50 foi possível observar efeitos significativos no perfil dos cordões, onde a largura do cordão aumenta com o *Arc Control*. Deste modo, optou-se por determinar os níveis 0 e 50, com nível intermediário o 25, pois acredita-se que assim é possível compreender maior o comportamento do *Arc Control* na geometria dos cordões.

4.3.3 Verificação da quantidade de material depositado

Na averiguação da quantidade de material depositado para o processo RMD, como pode ser observado na Tab. 4.6, a T_{DC} para cada nível de velocidade de soldagem manteve-se muito próxima a apresentada nos processos MAG e STT.

Tabela 4.6 – Cálculo da taxa de deposição por unidade de comprimento (T_{DC}) para os valores selecionados de V_A/V_S para o processo RMD (m_i é massa inicial, m_f é a massa final, T_{Arco} é o tempo de arco aberto e T_d é a taxa de deposição).

Parâmetros Regulados				Parâmetros Monitorados						
Teste		V_A [m/min]	V_S [cm/min]	V_A Média [m/min]	m_i [g]	m_f [g]	Δm [g]	T_{Arco} [s]	T_d [g/s]	T_{DC} [g/cm]
1	A	2,3	12	2,39	815,28	847,16	31,88	95,50	0,334	1,669
	B			2,41	847,16	879,86	32,70	96,77	0,338	1,690
2	A	2,8	15	2,92	817,96	849,21	31,25	75,82	0,412	1,649
	B			2,84	849,21	879,60	30,39	77,03	0,395	1,578
3	A	3,3	18	3,41	813,67	844,57	30,90	62,18	0,497	1,656
	B			3,32	844,57	874,86	30,29	65,49	0,463	1,542

4.4 Determinação dos níveis para os fatores variados no processo CMT

Nesta etapa foram determinados os níveis para os parâmetros de regulação do processo CMT, o comprimento do arco e o controle dinâmico, assim como averiguar a taxa de deposição por comprimento de solda para os valores de velocidade de alimentação e velocidade de soldagem.

4.4.1 Comprimento de arco

Para a determinação dos níveis de comprimento de arco, inicialmente procurou-se verificar sua influência no comportamento da geometria dos cordões. A partir daí, estabelecer três níveis de comprimento de arco que se adapta ao tipo de junta adotado. Desta forma, foi realizada uma varredura em toda faixa de regulação da fonte, de -30 a 30, em intervalos de 10 em 10, mantendo o controle dinâmico neutro (zero).

Em geral, observou-se que para os menores valores de comprimento de arco apresentaram cordões mais estreitos, como se esperava, além da maior estabilidade na transferência metálica. Por outro lado, o aumento do comprimento do arco, além de proporcionar cordões mais largos, observou um aumento na geração de respingos e de fumos. Para os níveis de comprimento de arco de -20 a 10, os resultados foram satisfatórios para o perfil de cordão e para a estabilidade na transferência metálica. Desta forma, foram selecionados os níveis de -20, -5 e 10, pois apresentaram perfil de cordão que se acredita, adaptar maior ao tipo de junta.

4.4.2 Controle dinâmico

Para determinar os níveis de controle dinâmico, primeiramente procurou conhecer o efeito deste parâmetro no perfil do cordão dentro da faixa de ajuste da fonte (de -5 a 5). Para tanto, foram realizados testes exploratórios para os níveis de controle dinâmico de -5, 0 e 5, sendo mantido fixo o comprimento de arco em 0.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que não houve influencia significativa do controle dinâmico no perfil dos cordões, como pode ser observado nas Figs. 4.5, 4,6 e 4,7. Desta forma, optou-se por trabalhar com o controle dinâmico no nível 0 (neutro).

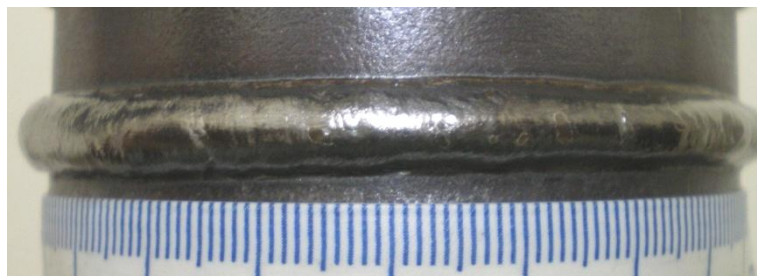


Figura 4.5 – Ensaio com controle dinâmico de -5.



Figura 4.6 – Ensaio com controle dinâmico de 0.



Figura 4.7 – Ensaio com controle dinâmico de 5.

4.4.3 Verificação da quantidade de material depositado

Durante a determinação dos níveis a serem variados no processo CMT (para o comprimento do arco e controle dinâmico), foi possível observar que os cordões apresentavam menor quantidade de material depositado. Como pode ser observado na Tab. 4.7, a T_{DC} manteve-se muito abaixo da apresentada nos demais processos. Ainda na Tab. 4.7 verifica-se que o processo CMT apresentou uma V_A Média da ordem de 20% abaixo do regulado.

Tabela 4.7 – Cálculo da taxa de deposição por unidade de comprimento (T_{DC}) para os valores selecionados de V_A/V_S para o processo CMT (m_i é massa inicial, m_f é a massa final, T_{Arco} é o tempo de arco aberto e T_d é a taxa de deposição).

Parâmetros Regulados				Parâmetros Monitorados						
Teste		V_A [m/min]	V_S [cm/min]	V_A Média [m/min]	m_i [g]	m_f [g]	Δm [g]	T_{Arco} [s]	T_d [g/s]	T_{DC} [g/cm]
1	A	2,3	12	1,86	814,87	840,24	25,37	95,85	0,265	1,323
	B			1,92	840,24	866,75	26,51	96,63	0,274	1,372
2	A	2,8	15	2,20	816,80	840,91	24,11	76,88	0,314	1,254
	B			2,32	840,91	867,00	26,09	78,78	0,331	1,325
3	A	3,3	18	2,56	815,59	839,12	23,53	64,92	0,362	1,208
	B			2,66	839,12	864,09	24,97	65,56	0,381	1,270

A partir daí, realizou-se novos testes com velocidade de alimentação do arame de 3,2; 4,2 e 5,2 m/min para os mesmos valores de V_S , buscando atingir os valores de velocidade de alimentação média (V_A Média) que se aproxima dos valores utilizados nos processos anteriores. Na Tab. 4.8, os resultados encontrados com os novos valores de V_A apresentaram um valor de velocidade de alimentação média próximos aos encontrados nos demais processos. Desta forma, também foi possível obter uma T_{DC} próxima da estipulada de 1,6 g/cm.

Tabela 4.8 – Cálculo da taxa de deposição por unidade de comprimento (T_{DC}) para os novos valores de V_A/V_S para o processo CMT (m_i é massa inicial, m_f é a massa final, T_{Arco} é o tempo de arco aberto e T_d é a taxa de deposição).

Parâmetros Regulados				Parâmetros Monitorados						
Teste		V_A [m/min]	V_S [cm/min]	V_A Média [m/min]	m_i [g]	m_f [g]	Δm [g]	T_{Arco} [s]	T_d [g/s]	T_{DC} [g/cm]
4	A	3,2	12	2,20	813,88	844,90	31,02	97,16	0,319	1,596
	B			2,39	844,00	878,00	33,10	97,41	0,340	1,699
5	A	4,2	15	3,00	818,84	852,95	34,11	78,36	0,435	1,741
	B			2,92	852,95	885,75	32,80	78,96	0,415	1,662
6	A	5,2	18	3,48	801,90	834,02	32,12	65,53	0,490	1,634
	B			3,39	834,02	865,22	31,20	64,72	0,482	1,607

A seguir, foram realizados testes em dutos chanfrados para averiguar a capacidade destes parâmetros para preenchimento da junta. Na Fig. 4.6 são mostrados os cordões soldados na progressão ascendente e descendente, com V_A de 3,2 m/min e V_S de 12 cm/min sem oscilação da tocha. Nota-se que em ambos os testes apresentaram desalinhamento do cordão. No caso da solda realizada na ascendente (Fig. 4.8), observou-se o desalinhamento por toda extensão do cordão, resultando na falta de fusão das bordas da junta. Já na solda realizada na descendente observou o desalinhamento apenas na posição sobrecaabeça, o que provocou falta de fusão nas bordas da junta e falta de penetração do cordão (Fig. 4.9).



Figura 4.6 – Ensaios com desvio do cordão soldado na ascendente.

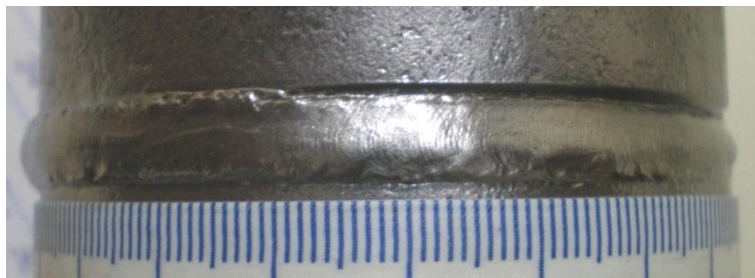


Figura 4.6 – Ensaio com desvio do cordão soldado na descendente.

Este comportamento parece ser devido ao menor aporte térmico do processo CMT, que não consegue aquecer as paredes da junta de forma uniforme. Baseando-se no trabalho de Pereira e Ferraresi (2001), se propõe a Fig. 4.7 para explicar tal comportamento, onde à medida que uma das paredes da junta aquece mais do que a outra, o arco tende a desviar transferindo a gota para esta parede, resultando no desvio do cordão.

Desta forma, optou-se por executar as soldas com o processo CMT apenas com oscilação da tocha, pois permite uma transferência de calor mais uniforme.

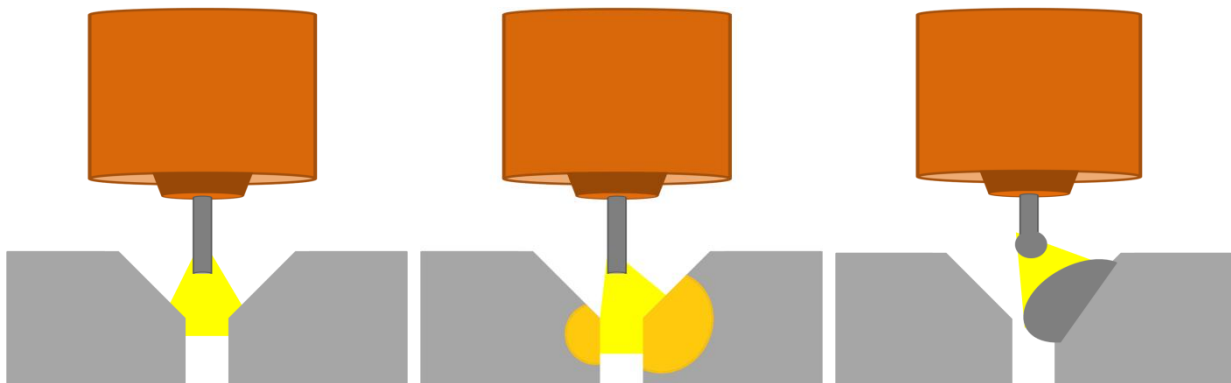


Figura 4.7 – Esquema para do desvio do cordão.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Processo MAG por Curto-Circuito Convencional

A Tab. 5.1 apresenta os parâmetros específicos utilizados para a soldagem dos ensaios com o processo MAG por curto-circuito convencional, onde variou-se em três níveis a velocidade de alimentação e a tensão de referência, mantendo constante a distância bico de contato pela (DBCP) de 12 mm. A regulação da velocidade de soldagem foi realizada e manteve constante a relação V_A/V_S , com aproximadamente a mesma quantidade de material depositado por comprimento de solda. Além disto, foram variados o ângulo de ataque da tocha (empurrado, reto e puxado) e a oscilação da tocha (com e sem oscilação).

Os planejamentos experimentais para realização das soldas na progressão ascendente e descendente estão apresentados nas Tabs. 5.2 e 5.3, respectivamente, assim como os valores de regulação e os valores medidos de corrente média (I_M), tensão média (U_M) e energia de soldagem (E_S). Deve-se ressaltar que os ensaios realizados foram denominados como “A” para aqueles realizados na progressão ascendente e “D” para a progressão descendente, seguidos do número do ensaio.

Tabela 5.1 – Níveis operacionais para realização dos testes em MAG curto-circuito convencional.

V_A [m/min]	V_S [cm/min]	U [V]	Ângulo da tocha	Oscilação da tocha
2,3	12	18	-10°	Sim Não
2,8	15	19	0°	
3,3	18	20	10°	

Tabela 5.2 – Valores medidos para corrente e tensão no processo MAG curto-circuito convencional na progressão ascendente.

Ensaio	Valores de Regulagem				Valores monitorados		
	Oscil.	V_A [m/min]	U [V]	Âng. tocha [°]	I_M [A]	U_M [V]	E_s [J/cm]
A1	Não	2,3	18	-10	109,8	16,5	150,98
A2		2,3	18	10	112,1	16,5	154,14
A3		2,3	20	-10	113,0	18,2	171,38
A4		2,3	20	10	112,9	18,4	173,11
A5		3,3	18	-10	140,4	16,4	127,92
A6		3,3	18	10	142,2	16,9	133,51
A7		3,3	20	-10	145,6	18,0	145,60
A8		3,3	20	10	154,3	18,4	157,73
A9		2,8	19	0	134,6	17,3	155,24
A10	Sim	2,3	19	0	112,4	17,3	162,04
A11		3,3	19	0	146,2	17,2	139,70
A12		2,8	18	0	129,3	16,4	141,37
A13		2,8	20	0	133,9	18,6	166,04
A14		2,8	19	-10	132,6	17,3	152,93
A15		2,8	19	10	131,1	17,3	151,20
A16		2,8	19	0	135,8	17,1	154,81

Tabela 5.3 – Valores medidos para corrente e tensão no processo MAG curto-circuito convencional na progressão descendente.

Ensaio	Valores de Regulagem				Valores monitorados		
	Oscil.	V_A [m/min]	U [V]	Âng. Tocha [°]	I_M [A]	U_M [V]	E_s [J/cm]
D1	Não	2,3	18	-10	119,6	16,5	164,45
D2		2,3	18	10	121,7	16,4	166,32
D3		2,3	20	-10	122,2	18,1	184,32
D4		2,3	20	10	118,1	18,2	179,12
D5		3,3	18	-10	156,6	16,3	141,81
D6		3,3	18	10	162,3	16,2	146,07
D7		3,3	20	-10	161,6	18,0	161,60
D8		3,3	20	10	160,1	18,1	160,99
D9		2,8	19	0	141,4	17,3	163,08
D10	Sim	2,3	19	0	118,5	17,3	170,84
D11		3,3	19	0	155,5	17,1	147,73
D12		2,8	18	0	139,6	16,4	152,63
D13		2,8	20	0	147,7	18,1	178,22
D14		2,8	19	-10	145,7	17,3	168,04
D15		2,8	19	10	142,2	17,3	164,00
D16		2,8	19	0	147,4	17,2	169,02

5.1.1. Critérios de aceitabilidade

5.1.1.1 Análise visual

Inicialmente avaliou-se a qualidade superficial dos cordões para detectar e analisar visualmente a possível presença de descontinuidades. A seguir, foram selecionados os cordões considerados aceitáveis à primeira vista.

De forma geral, as soldas realizadas na progressão ascendente apresentaram maior penetração do que aquelas obtidas na progressão descendente. Além disso, os cordões feitos na ascendente tendem a apresentar defeitos como mordedura e perfuração da junta. Por outro lado, na progressão de soldagem descendente as soldas estão mais suscetíveis a defeitos como falta de penetração, decorrente a maior tendência ao escorrimento do metal fundido, principalmente na posição vertical.

a) Conjunto operacional descartado

Primeiramente se deve ressaltar que para a progressão de soldagem ascendente não foi possível completar a execução do cordão para todo o conjunto de parâmetros propostos na Tab. 5.2, pois ocorria perfuração da raiz, interrompendo a soldagem. É o caso dos ensaios A3, A4, A7, A8, A9 e A13, com tensão de referência de 20 V, apresentaram problemas para abertura e em manter o arco aberto, devido ao escorrimento da poça de fusão e/ou perfuração da raiz, não sendo possível a conclusão da solda (Fig. 5.1(a)).

No ensaio A14 (Fig. 5.1(b)), assim como A5 e A6, a perfuração da raiz ocorreu na região de transição das posições vertical para a plana. Considera-se que a penetração aumenta à medida que se aproxima da posição plana devido ao balanço de forças na poça de fusão, associado, neste caso, ao ângulo da tocha negativo (puxando), a maior intensidade da corrente (regulada pela velocidade de alimentação) e ao menor comprimento de arco (menores valores de tensão média), favorecem a concentração do arco e o aumento da penetração até a perfuração da junta.

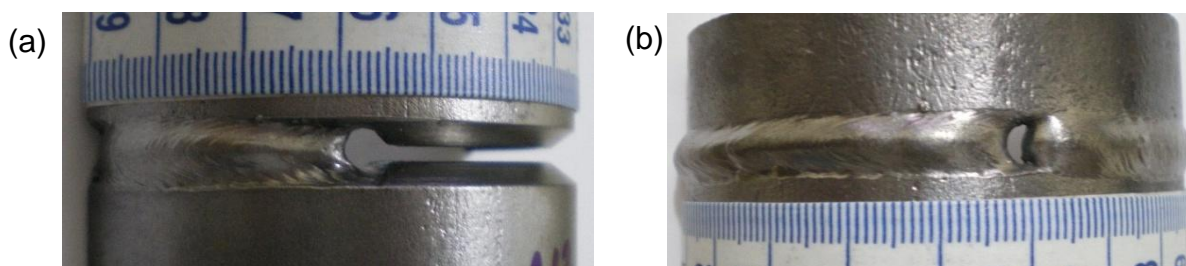


Figura 5.1 – (a) Ensaio A13 e (b) ensaio A14

A Fig. 5.2(a) mostra a face do cordão A12 (e A11), onde pode ser observado desalinhamento do cordão. Por consequência, defeitos como falta de penetração e falta de fusão na borda da junta. Observou-se que este fato é decorrente da curvatura do arame (Fig. 5.2(b)), o que foi minimizado com a troca do bico de contato e o posicionamento da tocha para evitar curvas do cabo.

Deve-se ressaltar que, na soldagem automatizada, problemas como esses são de difícil correção, pois os movimentos do robô durante a soldagem são pré-definidos. O que é diferente da soldagem manual, onde o soldador tem a capacidade de ajustar o posicionamento do arame para corrigir tais irregularidades. Por isso e por outros motivos, a automatização completa na soldagem de dutos exige formas adicionais de controle.

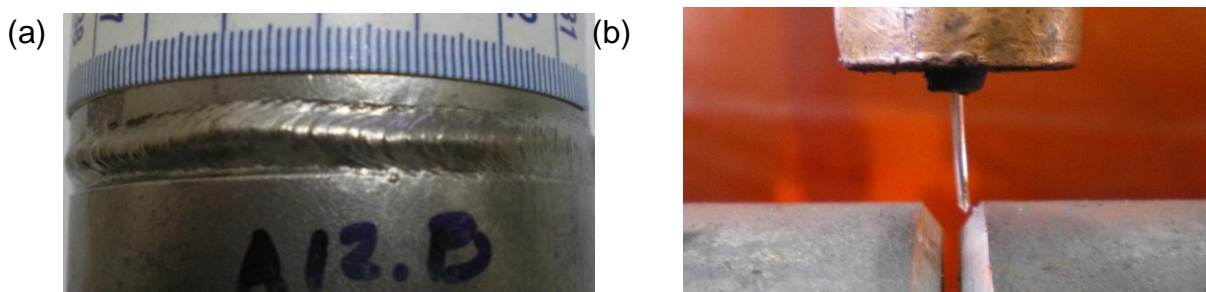


Figura 5.2 – (a) Face superior do Ensaio A12; (b) Curvatura do arame de adição

Nas soldas realizadas na progressão descendente foi possível concluir a execução dos cordões para todo o conjunto de parâmetros da Tab. 5.3. Os cordões realizados nesta progressão apresentaram maior escorrimento do metal fundido na progressão vertical do que aqueles cordões realizados na progressão ascendente.

Nos ensaios D2, D4, D6 e D8, com a tocha empurrando (o ângulo da tocha positivo), observaram-se o aumento do escorrimento do metal fundido, principalmente na transição da posição vertical para a sobre cabeça. Neste caso, o ângulo da tocha (positivo) favoreceu o aumento do aquecimento da junta a frente do cordão, ou seja, proporcionou o aumento da largura do cordão reduzindo o reforço da raiz, o que originou defeitos como falta de penetração nestas posições (vertical e sobre cabeça), como pode ser verificado na Fig. 5.3.

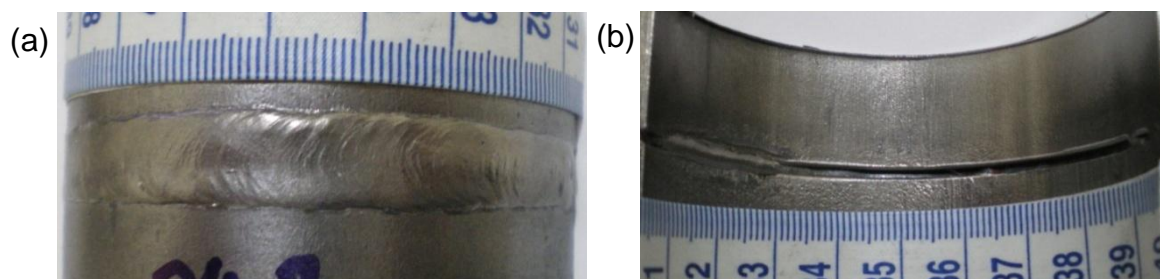


Figura 5.3 – Ensaio D4 (a) Reforço da face; (b) Reforço da raiz.

Nos ensaios D1, D10, D13, D14 e D16, a tocha puxando (com ângulo negativo) e/ou oscilando, favoreceu o aumento do reforço da raiz e reduziu o escoamento do cordão. Ainda assim, como pode ser verificado no exemplo mostrado na Fig. 5.4 estes ensaios apresentaram falta de penetração em decorrência dos baixos valores de velocidade de alimentação e consequentemente menor corrente de soldagem.

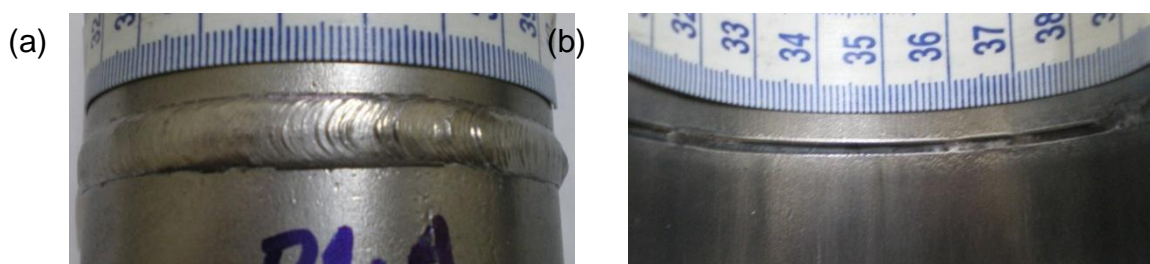
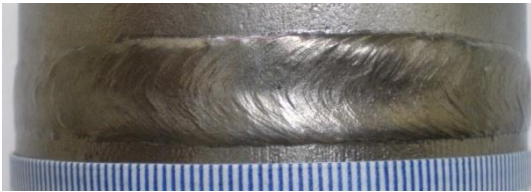

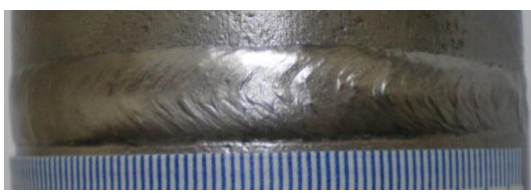



Figura 5.4 – Ensaio D1 (a) Reforço da face; (b) Reforço da raiz.

Durante a realização dos ensaios, verificou-se dificuldades de repetitividade dos cordões durante a execução da segunda metade do duto (ou seja, soldou-se em meia cana). No caso dos ensaios na progressão ascendente, o segundo cordão, aumentou-se a penetração, em alguns casos a ponto de perfurar a junta. Nos ensaios na progressão descendente, todos os segundos cordões apresentaram aumento do escoamento do metal fundido, o qual aumenta defeitos como à falta de material para enchimento da junta e a falta de penetração.

Atribuiu-se esta característica ao efeito da temperatura em que o duto estava a priori da soldagem. Assim, para verificar a influência deste efeito da temperatura de pré-aquecimento no formato dos cordões, durante os ensaios D13 e D14 a temperatura do duto foi monitorada antes da soldagem, com o auxílio de pirômetro óptico, obtendo-se os resultados mostrados na Tab. 5.4.

Tabela 5.1 – Temperatura de pré-aquecimento e a imagem dos respectivos cordões.

Ensaio	Cordão	Temperatura Inicial	Imagem da Face
D13	A	30°C	
	B	104°C	
D14	A	31°C	
	B	33,5°C	

No ensaio D13, é possível observar que a maior temperatura inicial do cordão B, afetou significativamente o aumento do escorrimento do metal fundido e da concavidade do reforço da face, quando comparado com o cordão A. Enquanto no ensaio D14, o cordão B com temperatura inicial próxima ao cordão A, visualmente apresentaram cordões mais similares. Ressalta-se que a norma utilizada (AWS D10.12) não apresenta critérios para pré-aquecimento, porém a temperatura passou a ser regulada.

b) Conjunto operacional sugerido

A partir da análise visual dos cordões, foram selecionados para análises os seguintes ensaios A1, A2, A10, A15 e A16 para a progressão de soldagem ascendente e já para a descendente foram selecionados os ensaios D3, D5, D7, D11 e D12.

5.1.1.2 Análise macrográfica dos cordões

Nesta etapa, os cordões selecionados na análise visual, foram submetidos a ensaios macrográfico para verificar e avaliar possíveis descontinuidades internas. Nas Figs. 5.5 e 5.6 são apresentadas as macrografias dos ensaios soldados na progressão ascendente e descendente, respectivamente, nas posições plana, vertical e sobre cabeça. Ao se observar tais figuras, pode-se afirmar que a posição sobrecabeça apresentou maior reforço da face, enquanto que maiores reforço da raiz foram obtidas na posição plana. Além disto, não foram verificadas descontinuidades internas.

Observa-se ainda que mesmo com desalinhamento da junta de até 1,0 mm na ascendente (ensaio A16) e de 0,86 mm na descendente (ensaio D5), devido à irregularidade da espessura e a preparação da junta, o único indicador de descontinuidade encontrado foram mordeduras nos cordões soldados na ascendente com profundidade máxima de 0,42 mm (ensaio A1). Ressalta-se que o alinhamento da junta é crucial, pois mesmo um desalinhamento mínimo pode causar falta de fusão e ou penetração das soldas, o que é comum na soldagem de dutos.

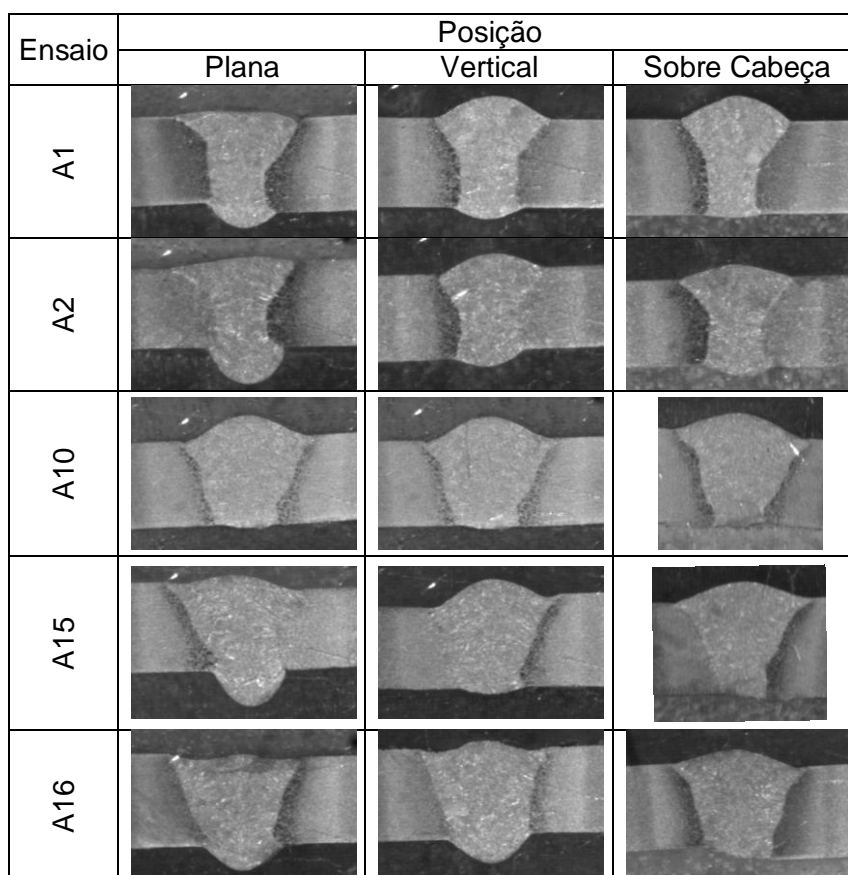


Figura 5.5 – Macrografia dos ensaios soldados na progressão de soldagem ascendente com MAG curto-circuito convencional (como escala adotar espessura de 5,5 mm).

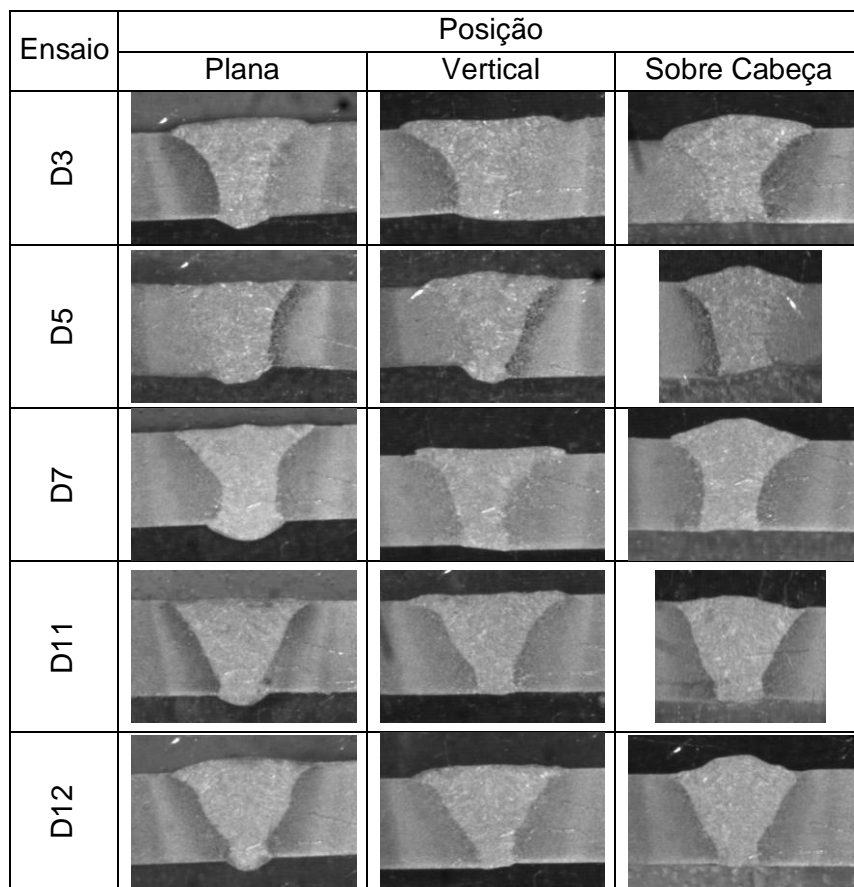


Figura 5.6 – Macrografia dos ensaios soldados na progressão de soldagem descendente com MAG curto-circuito convencional (como escala adotar espessura de 5,5 mm)

5.1.2 Análise geométrica dos cordões

5.1.2.1 Características geométricas

As Tabs. 5.5 e 5.6 trazem as medidas realizadas da geometria dos cordões soldados na progressão ascendente e descendente selecionados nas etapas anteriores, bem como o seu desvio padrão (DESVPD). Em seguida, foi feita uma análise parcial da geometria dos cordões, em relação sua uniformidade, baseada no desvio padrão das características geométricas.

Tabela 5.5 – Característica geométrica e o desvio padrão (DESVPD) dos cordões soldados na progressão ascendente (reforço da face “RF”, reforço da raiz “RR” e largura da face “LF”) nas distintas posições (plana “P”, vertical “V” e sobrecabeça “SC”) com MAG curto-circuito convencional.

ENSAIO	POSIÇÃO	P [mm]	V [mm]	SC [mm]	DESVPD [mm]
A1	RF	0,40	1,25	0,69	0,43
	RR	1,26	0,69	0,19	0,54
	LF	7,00	6,78	6,21	0,41
A2	RF	0,47	1,08	0,77	0,31
	RR	2,03	0,71	0,48	0,84
	LF	7,22	6,17	6,58	0,53
A10	RF	1,26	1,29	1,16	0,07
	RR	0,27	0,21	0,15	0,06
	LF	7,95	8,08	7,15	0,50
A15	RF	0,60	1,34	1,00	0,37
	RR	2,06	0,40	0,00	1,09
	LF	9,06	7,87	8,00	0,65
A16	RF	0,05	0,38	0,98	0,47
	RR	1,43	1,50	0,33	0,66
	LF	7,49	8,39	7,73	0,47

Tabela 5.6 – Característica geométrica e o desvio padrão (DESVPD) dos cordões soldados na progressão descendente (reforço da face “RF”, reforço da raiz “RR” e largura da face “LF”) nas distintas posições (plana “P”, vertical “V” e sobrecabeça “SC”) com MAG curto-circuito convencional.

ENSAIO	POSIÇÃO	P [mm]	V [mm]	SC [mm]	DESVPD [mm]
D3	RF	0,60	0,42	1,13	0,37
	RR	0,70	0,18	0,00	0,36
	LF	8,17	9,83	8,90	0,83
D5	RF	0,10	0,71	1,00	0,46
	RR	0,70	0,50	0,09	0,31
	LF	7,52	8,05	6,68	0,69
D7	RF	0,39	0,50	1,29	0,49
	RR	1,00	0,09	0,12	0,52
	LF	8,12	8,60	7,97	0,33
D11	RF	0,23	0,29	0,49	0,14
	RR	0,74	0,21	0,23	0,30
	LF	8,36	9,62	7,88	0,90
D12	RF	0,64	0,50	0,98	0,25
	RR	0,70	0,17	0,12	0,32
	LF	8,52	8,90	7,90	0,50

Na Tab. 5.5 verifica-se que os cordões soldados na progressão ascendente, em consequência da maior capacidade de penetração, geralmente apresentam maior reforço da raiz e menor reforço da face, quando comparado à progressão descendente (Tab. 5.6). Sendo que o reforço da raiz aumenta à medida que se aproxima da posição plana devido à maior penetração nesta posição, o que justifica a maior irregularidade do perfil da raiz.

Deste modo, a utilização de parâmetros que permitam o aumento da largura do cordão, apresentou influência significativa para o controle da penetração (redução) na progressão ascendente. É o caso da oscilação da tocha que, segundo Scotti e Ponomarev (2008), proporciona maior aquecimento das laterais da junta, o que aumenta a capacidade de molhamento da poça no metal de base. Além deste fator, destaca-se o uso de menor valor de velocidade de alimentação (menor corrente de soldagem). Como pode ser observado na Fig. 5.7, o ensaio A10 com a tocha oscilando apresentou maior uniformidade do reforço da face. Ou seja, verifica-se na Fig. 5.8 que houve um controle da penetração (redução) na posição plana. No entanto na Fig. 5.9, pode observar que os ensaios sem a oscilação da tocha (A1 e A2), apresentaram cordões mais estreitos e com largura da face mais uniformes.

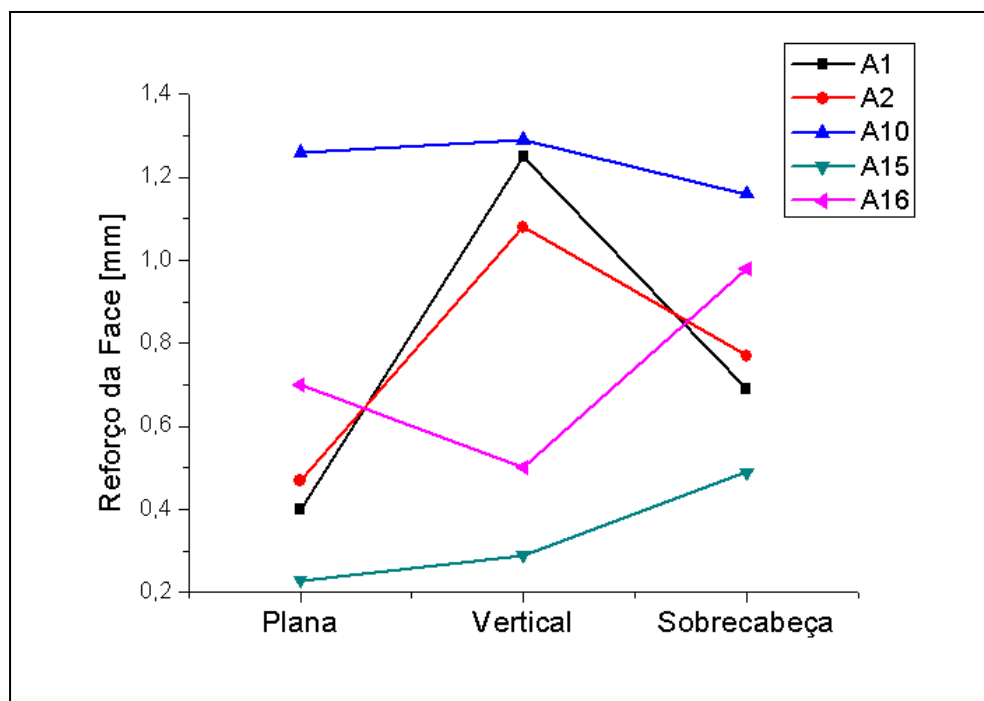


Figura 5.7 – Comparação do reforço da face em cada região (sobre cabeça, vertical e plana), dos ensaios soldados na progressão ascendente com MAG curto-circuito convencional.

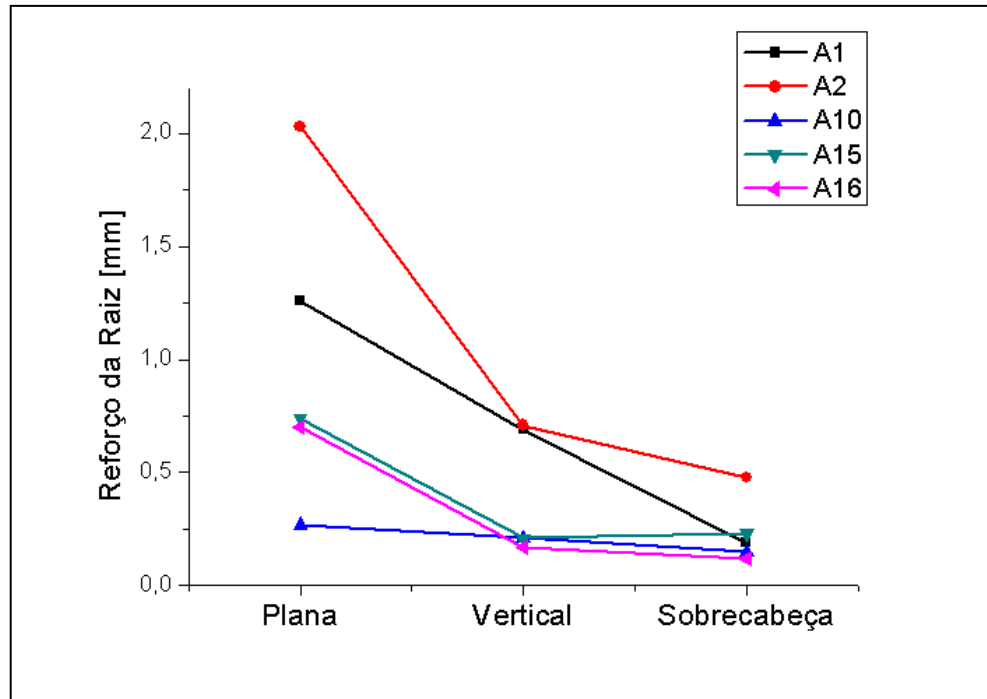


Figura 5.8 – Comparação do reforço da raiz em cada região (plana, vertical e sobre cabeça), dos ensaios soldados na progressão ascendente com MAG curto-circuito convencional.

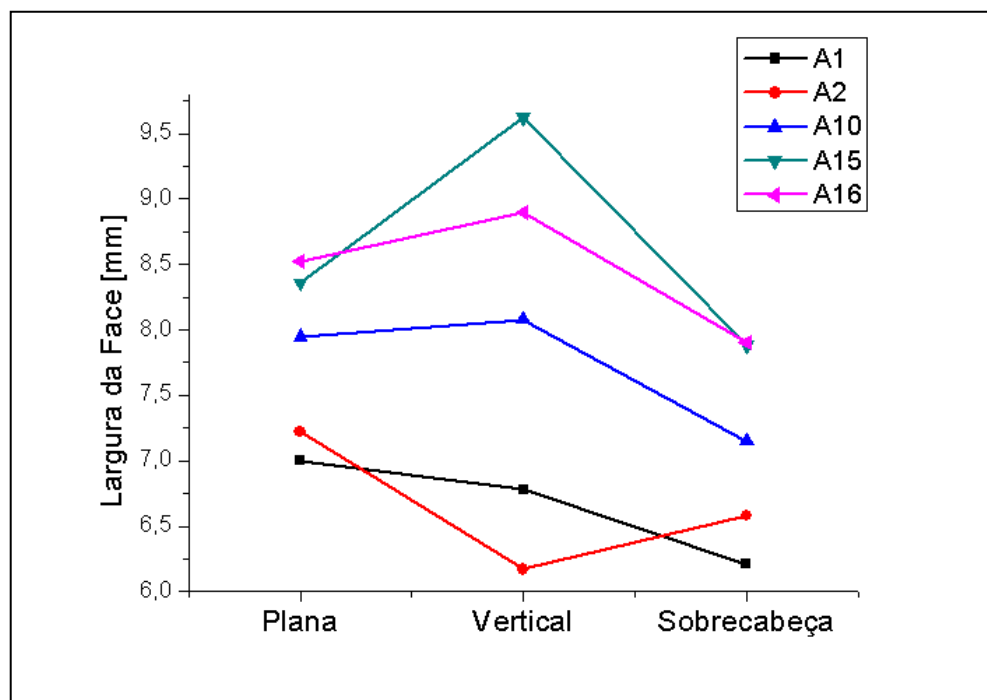


Figura 5.9 – comparação da largura da face em cada região (plana, vertical e sobre cabeça), dos ensaios soldados na progressão ascendente com MAG curto-circuito convencional.

Na Tab. 5.6, observa-se que diferente da progressão ascendente, os cordões soldados na progressão descendente tendem a apresentar cordões com menor penetração,

em decorrência do maior escorrimento do metal fundido, principalmente nas posições vertical e sobrecabeça. Em geral este comportamento pode ser observado na maioria dos cordões soldados na ascendente, como é mostrado nas Figs. 5.10, 5.11 e 5.12. Nas posições vertical e sobrecabeça os cordões tendem a apresentar menor reforço da raiz e menor reforço da face, em consequência da maior largura da face. Enquanto, como era esperado, na posição plana apresentam uma maior penetração, ou seja, maior reforço da raiz.

No ensaio D11, observa-se na Tab. 5.6 e nas Figs. 5.10 e 5.11 que a oscilação da tocha associada ao maior valor de velocidade de alimentação do arame (3,3 m/min) possibilitou um aumento da penetração na posição sobrecabeça, deixando o perfil da raiz mais uniforme (menor desvio padrão do reforço da raiz). Além disto, influenciou na redução do reforço da face nesta posição, o que também favoreceu a maior uniformidade do reforço da face.

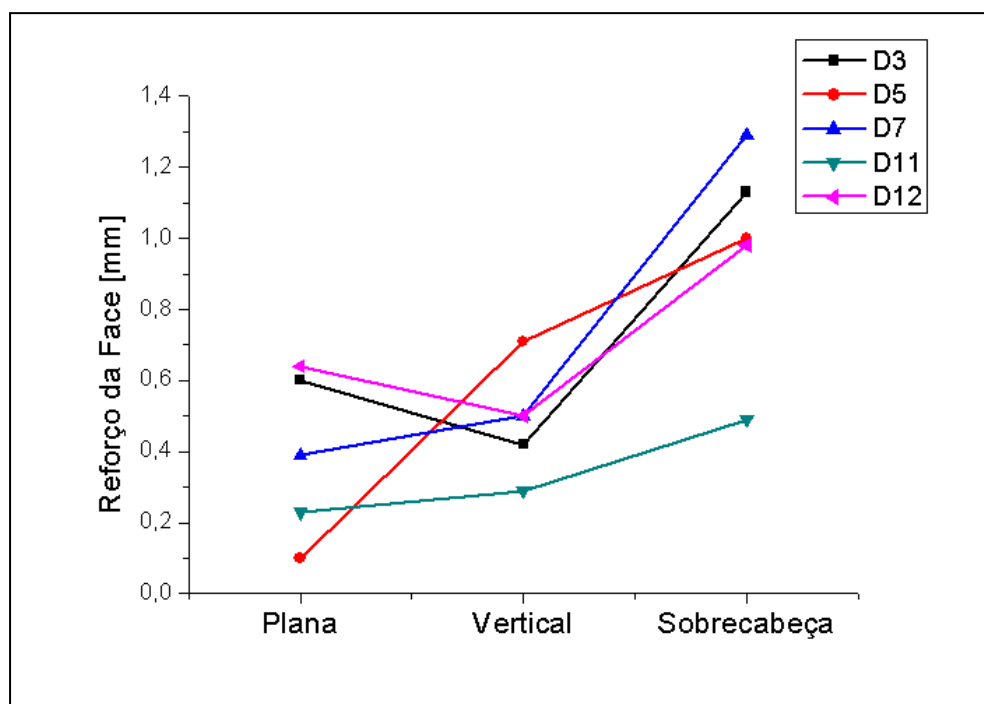


Figura 5.10 – Comparação do reforço da face em cada região (plana, vertical e sobre cabeça), dos ensaios soldados na progressão descendente com MAG curto-circuito convencional.

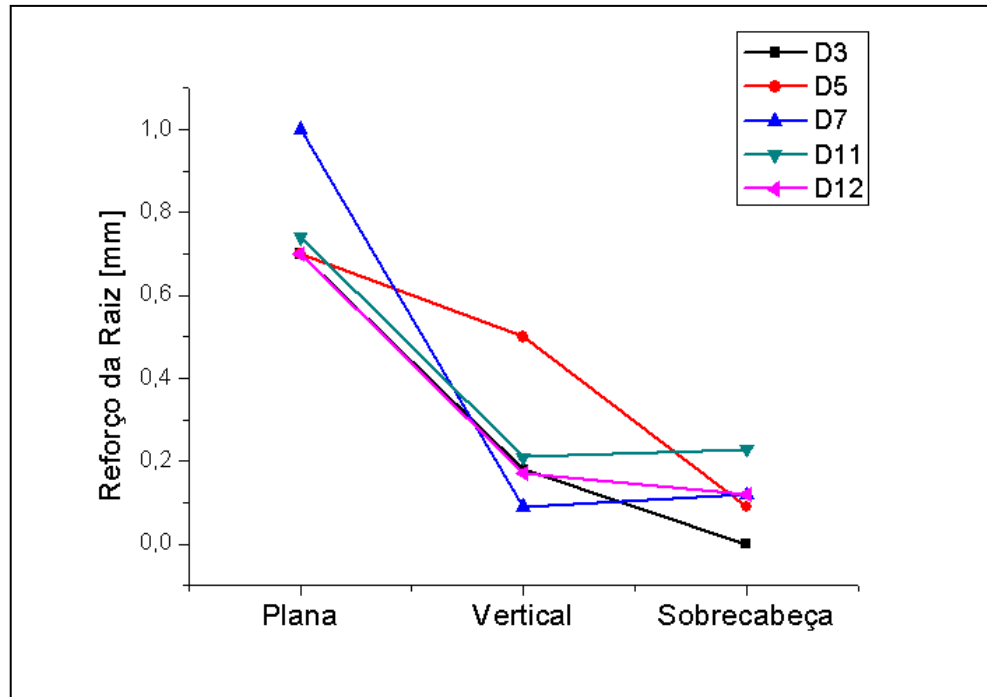


Figura 5.11 – Comparação do reforço da raiz em cada região (plana, vertical e sobre cabeça), dos ensaios soldados na progressão descendente com MAG curto-circuito convencional.

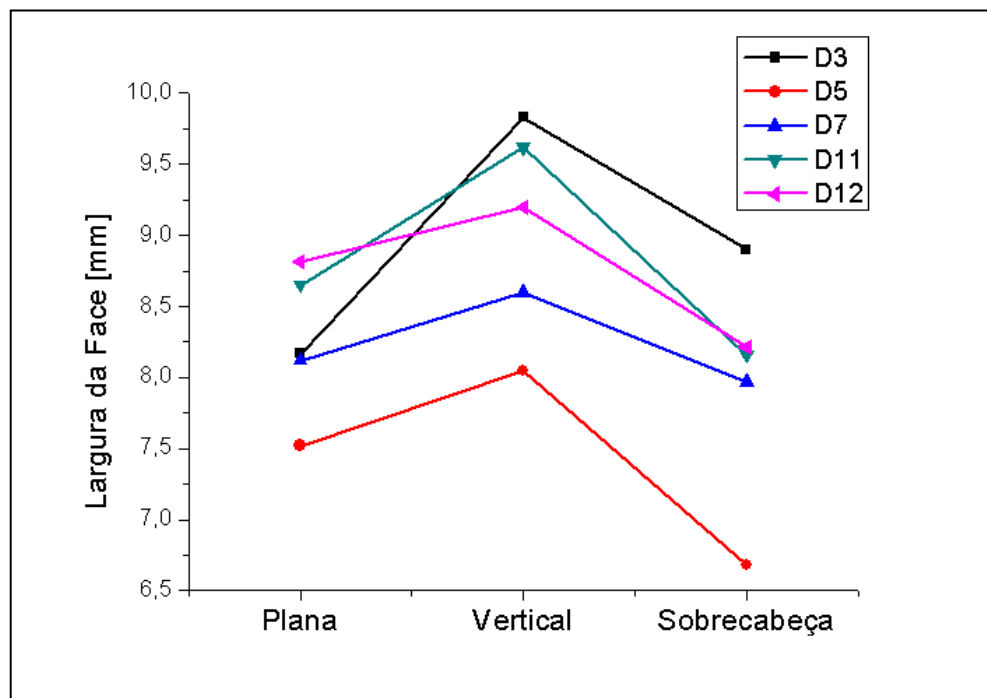


Figura 5.12 – Comparação da largura da face em cada região (plana, vertical e sobre cabeça), dos ensaios soldados na progressão descendente com MAG curto-circuito convencional.

5.1.2.2 Efeito dos fatores na geometria do cordão

Na Tab. 5.7 são mostrados os níveis de significância (p) obtidos pela análise de variância global dos fatores para as soldas realizadas da progressão ascendente. Observa-se que a oscilação de tocha influenciou significativamente todo o perfil do cordão nesta progressão, como pode ser observado na Fig. 5.13. Estes resultados corroboram o que foi avaliado durante a seleção visual dos melhores cordões obtidos, ou seja, a oscilação da tocha favoreceu o maior controle da penetração. Ainda na Tab. 5.7 observa-se que a velocidade de alimentação afetou de forma significativa no reforço da face e da raiz dos cordões.

A tensão de soldagem também influenciou significativamente no aumento do reforço da raiz dos cordões. A tensão promoveu o aumento do reforço da raiz e a redução do reforço e da largura da face, onde o maior nível (20 V) proporcionou a perfuração do cordão (reforço da face negativo, alto reforço da raiz e baixa largura da face), como mostrado na Fig. 5.15.

Na Fig. 5.16 observa-se que o ângulo da tocha positivo (empurrando) apresentou um comportamento semelhante ao ângulo negativo (puxando), onde o reforço da raiz tende a aumentar e reduz o reforço da face (aumenta a penetração).

Tabela 5.7 – Níveis de significância "p" para cada resposta (reforço da face (RF), reforço da raiz (RR) e largura da face (LF)) soldados na progressão ascendente com processo MAG curto-circuito convencional.

Fatores	Respostas		
	RF	RR	LF
Mean/Interc.	0,005546	0,000005	0,000005
Osc (1)	0,000638	0,000443	0,001074
(1)Valim (L)	-	0,038431	-
Valim (Q)	0,003368	0,003299	0,078690
(2)U (L)	0,000006	0,000017	0,000916
U (Q)	0,175751	0,115316	0,041518
(3)Ang (L)	-	-	-
Ang (Q)	-	-	0,165217
1Lby 2L	-	0,064425	-
1Lby 3L	-	-	-
2Lby 3L	-	-	-

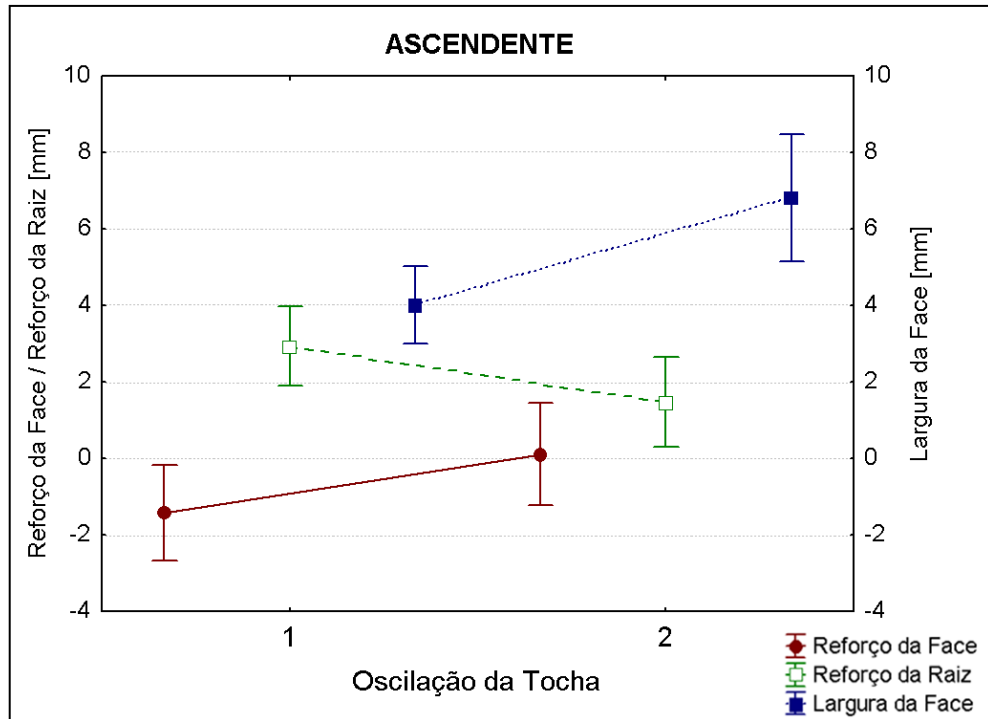


Figura 5.13 – Efeito da oscilação da tocha na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para MAG curto-circuito convencional, onde: “1” sem oscilação; e “2” com oscilação.

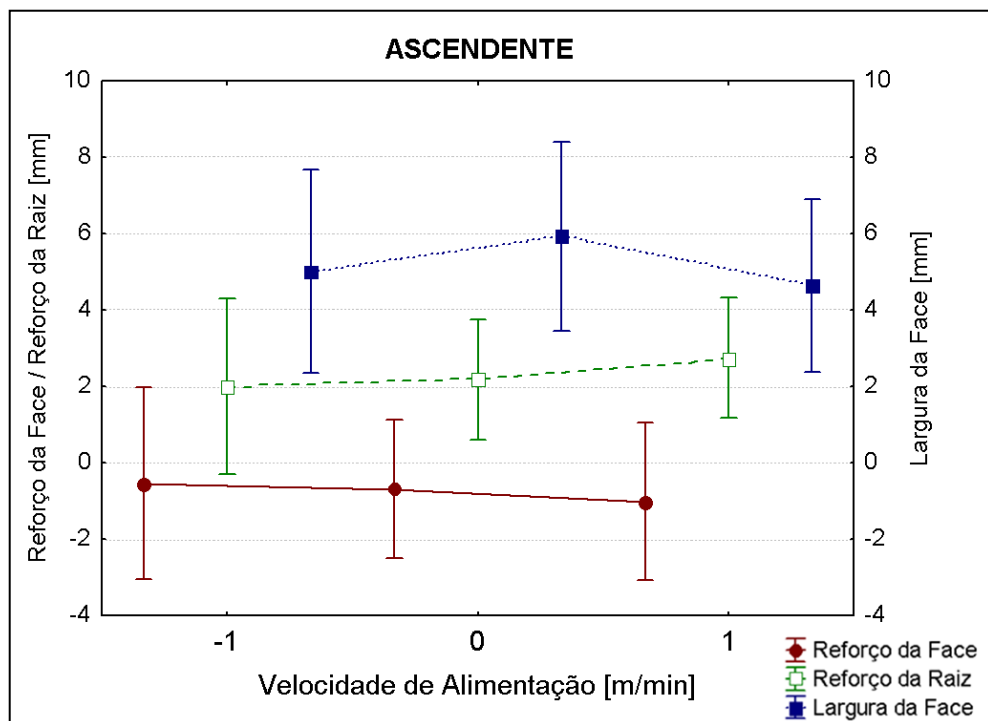


Figura 5.14 – Efeito da velocidade de alimentação na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para MAG curto-circuito convencional, onde: “-1” é 2,3 m/min; “0” é 2,8 m/min; e “1” é 3,3 m/min.

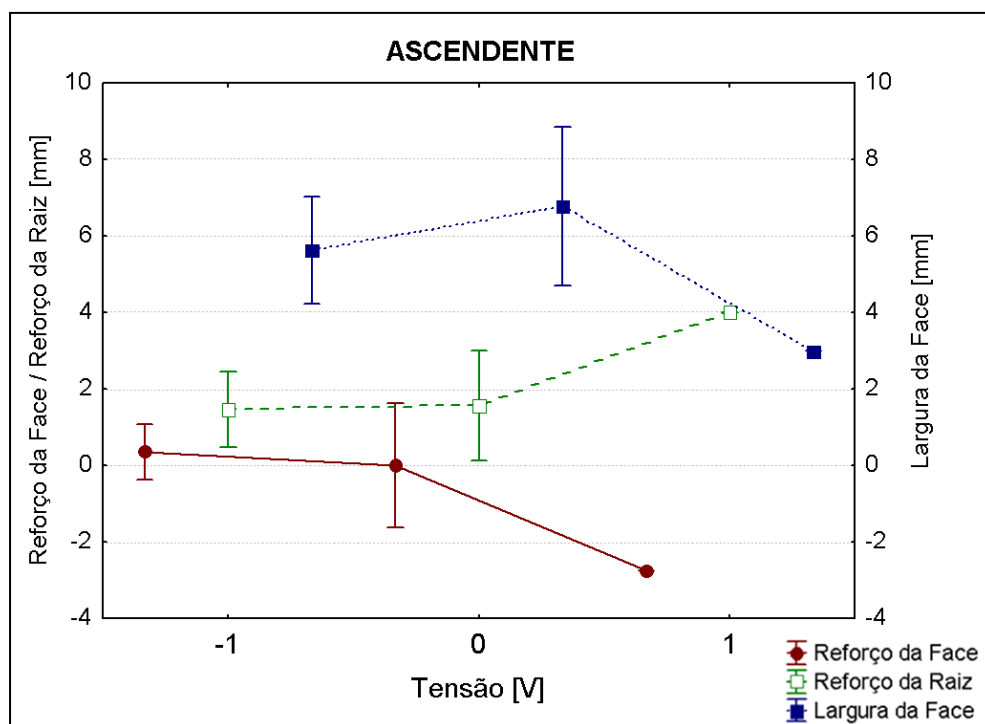


Figura 5.15 – Efeito da tensão na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para MAG curto-circuito convencional, onde: “-1” é 18 V; “0” é 19 V; e “1” é 20 V.

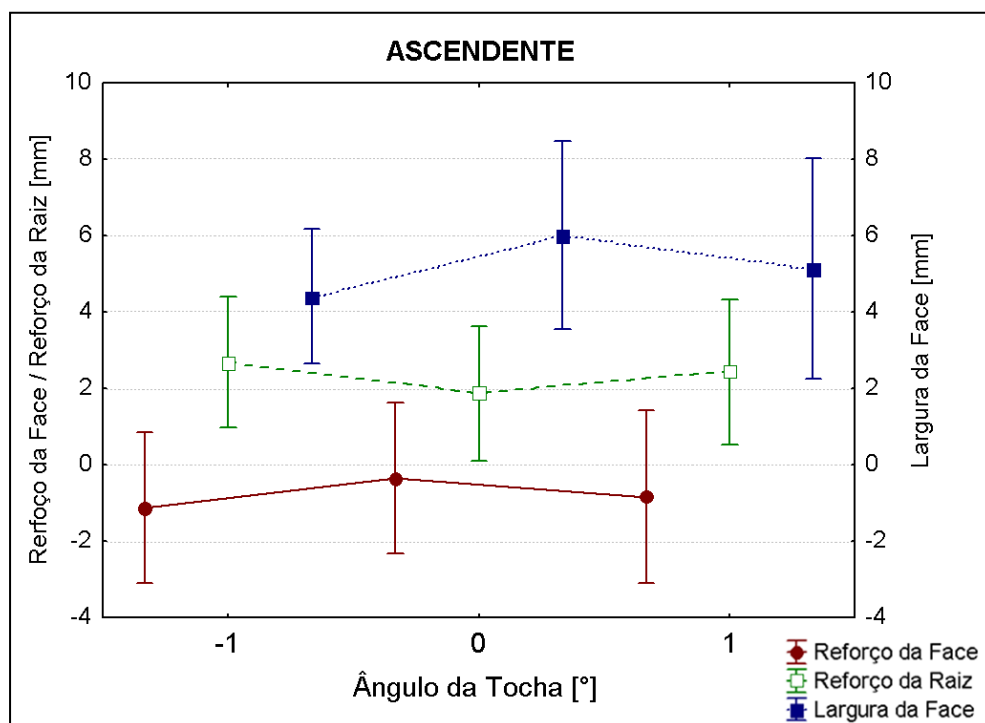


Figura 5.16 – Efeito do ângulo da tocha na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para MAG curto-circuito convencional, onde: “-1” é -10°; “0” é 0°; e “1” é 10°.

Na Tab. 5.8 são apresentados os níveis de significância (p) obtidos pela análise de variância global dos fatores para as soldas realizadas da progressão de soldagem descendente. Observa-se que o efeito da oscilação da tocha na descendente não foi significativo, porém na Fig. 5.17, nota-se uma tendência em reduzir a penetração dos cordões, evidenciada pelo menor reforço da raiz.

Observa-se na Tab. 5.8 que a velocidade de alimentação do arame influenciou no reforço da raiz e na largura da face, onde o reforço da raiz aumenta com a velocidade de alimentação, enquanto a largura do cordão é maior para velocidade de alimentação de 2,8 m/min, como é mostrado na Fig. 5.18. Observa-se também que a tensão de soldagem afetou apenas a largura do cordão. Na Fig. 5.19 nota-se que a largura aumentou com a tensão.

Diferente do observado na ascendente, na progressão de soldagem descendente a tocha com ângulo positivo (empurrando) apresentou uma tendência a reduzir a penetração do cordão, aumentou o reforço da face e reduziu o reforço da raiz, enquanto o ângulo negativo (puxando) promove o aumento da penetração, com a redução do reforço da face e o aumento do reforço da raiz (Fig. 5.20).

Tabela 5.8 – Níveis de significância "p" para cada resposta (reforço da face (RF), reforço da raiz (RR) e largura da face (LF)) soldados na progressão descendente com processo MAG curto-circuito convencional.

Fatores	Respostas		
	RF	RR	LF
Mean/Interc.	0,000023	0,806459	0,000000
Osc (1)	0,341248	0,413347	0,922688
(1)Valim (L)	-	0,013378	-
Valim (Q)	-	0,217369	0,021745
(2)U (L)	-	-	0,001448
U (Q)	-	0,261520	0,147227
(3)Ang (L)	0,190736	0,052755	0,018532
Ang (Q)	-	-	-
1Lby 2L	0,064894	-	0,116573
1Lby 3L	0,024500	-	0,115471
2Lby 3L	-	-	-

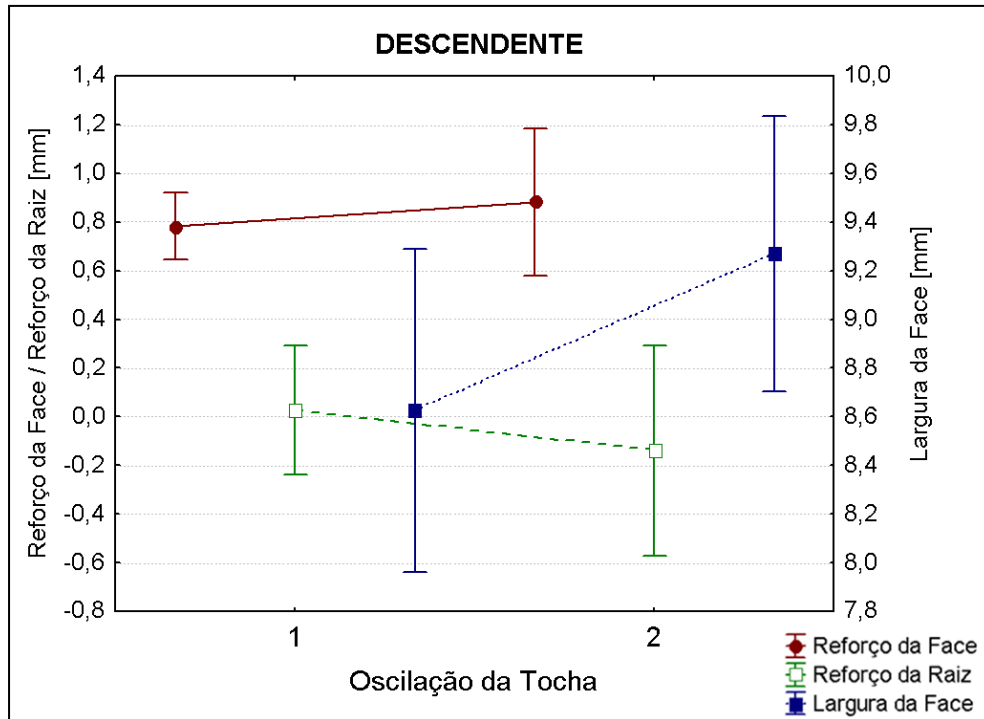


Figura 5.17 – Efeito da oscilação da tocha na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para MAG curto-circuito convencional, onde: “1” sem oscilação; e “2” com oscilação.

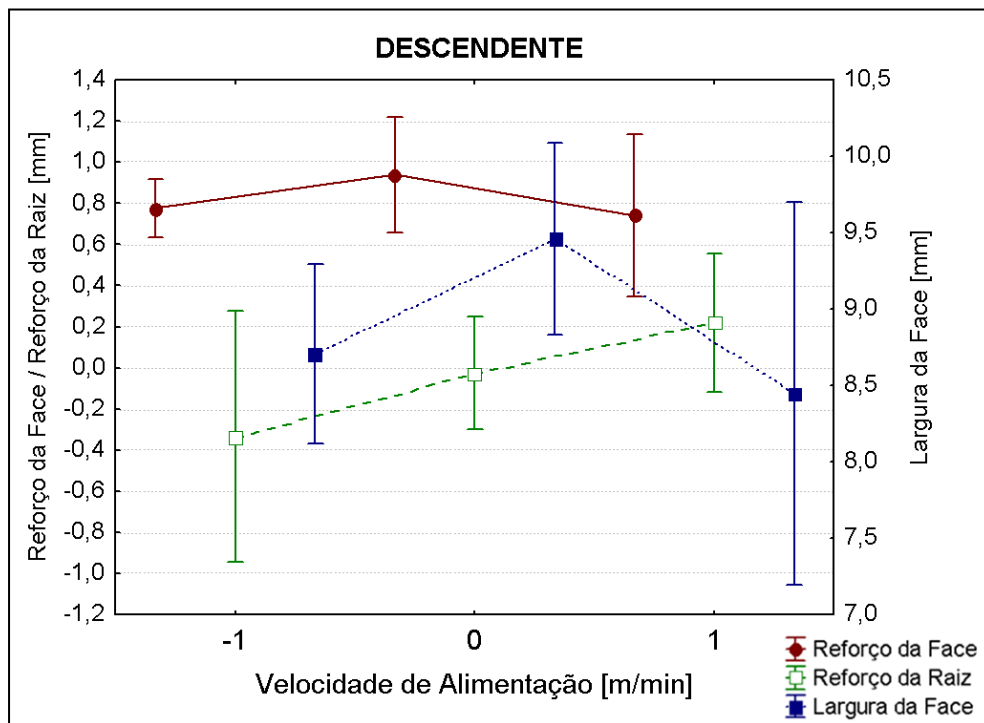


Figura 5.18 – Efeito da velocidade de alimentação na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para MAG curto-circuito convencional, onde: “-1” é 2,3 m/min; “0” é 2,8 m/min; e “1” é 3,3 m/min.

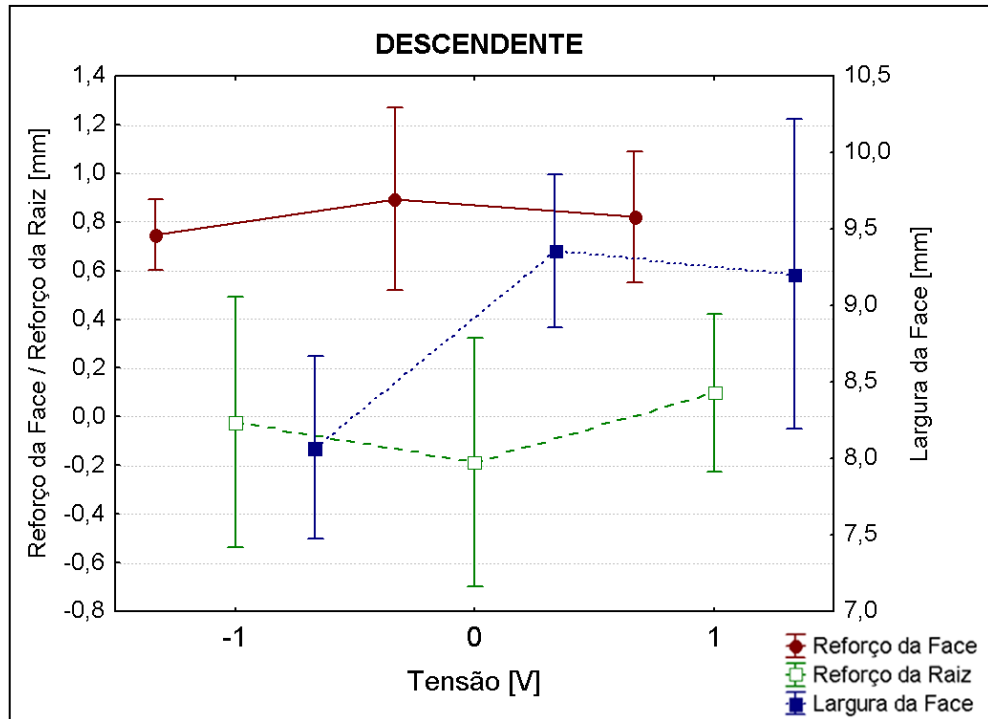


Figura 5.19 – Efeito da tensão na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para MAG curto-circuito convencional, onde: “-1” é 18 V; “0” é 19 V; e “1” é 20 V.

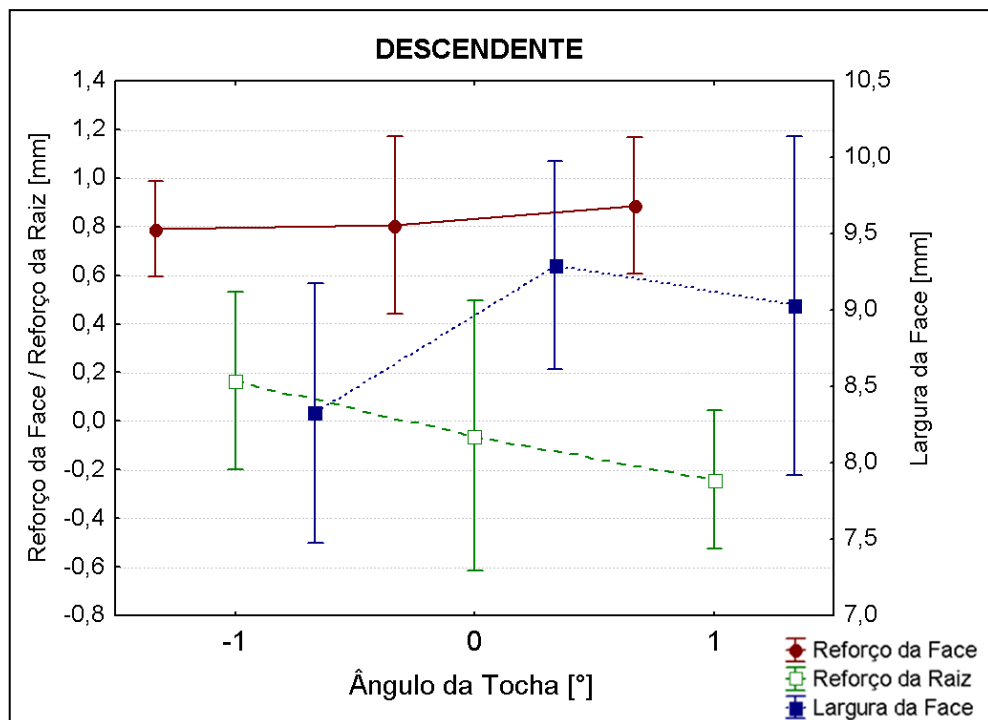


Figura 5.20 – Efeito do ângulo da tocha na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para MAG curto-circuito convencional, onde: “-1” é -10°; “0” é 0°; e “1” é 10°.

5.2. Processo STT

Os parâmetros específicos, fatores de regulação e respectivos níveis para cada ensaio são mostrados na Tab. 5.9. Foram variados em três níveis os parâmetros operacionais do processo STT: corrente de base (I_{Base}), corrente de pico (I_{Pico}) e *tail-out*, assim como a velocidade de alimentação do arame (V_A) e a oscilação da tocha (com e sem oscilação). Deve-se ressaltar que a regulação da velocidade de soldagem foi realizada e manteve constante a relação V_A/V_S , com aproximadamente a mesma quantidade de material depositado por comprimento de solda.

As Tabs. 5.10 e 5.11 apresentam os planejamentos experimentais para execução dos ensaios na progressão ascendente e descendente, assim como os parâmetros de regulação e os valores medidos de corrente média (I_M), tensão média (U_M) e energia de soldagem (E_S). Para tal, foram denominados como “SA” os ensaios realizados na progressão ascendente e “SD” na progressão descendente, seguidos do número do ensaio.

Tabela 5.9 – Níveis operacionais para realização dos testes no processo STT.

V_A [m/min]	V_S [cm/min]	I_{Base} [A]	I_{Pico} [A]	<i>Tail-out</i>	Oscilação da tocha
2,3	12	60	280	0	Sim Não
2,8	15	80	300	5	
3,3	18	100	320	10	

Tabela 5.10 – Valores medidos para corrente e tensão no processo STT na ascendente.

Ensaio	Valores de Regulagem					Valores monitorados		
	Oscil.	V_A [m/min]	I_{Base} [A]	I_{Pico} [A]	Tail-out	I_M [A]	U_M [V]	E_s [J/cm]
SA1	Não	3,3	100	320	0	141,0	16,3	127,68
SA2		3,3	100	280	0	141,0	15,6	122,20
SA3		3,3	60	320	10	128,9	16,4	117,44
SA4		2,3	100	280	10	108,9	19,5	176,96
SA5		3,3	60	280	10	139,9	15,3	118,92
SA6		2,3	60	320	0	101,6	15,1	127,85
SA7		2,3	100	320	10	100,4	19,2	160,64
SA8		2,3	60	280	0	107,4	14,4	128,88
SA9		2,8	80	300	5	129,2	15,6	134,37
SA10	Sim	2,3	80	300	5	109,8	17,3	158,30
SA11		3,3	80	300	5	140,0	15,6	121,33
SA12		2,8	60	300	5	124,1	14,9	123,27
SA13		2,8	100	300	5	120,8	17,8	143,35
SA14		2,8	80	280	5	124,2	15,8	130,82
SA15		2,8	80	320	5	122,3	16,6	135,35
SA16		2,8	80	300	0	122,8	15,5	126,89
SA17		2,8	80	300	10	124,3	17,2	142,53
SA18		2,8	80	300	5	124,3	16,1	133,42

Tabela 5.11 – Valores medidos para corrente e tensão no processo STT na descendente.

Ensaio	Valores de Regulagem					Valores monitorados		
	Oscil.	V_A [m/min]	I_{Base} [A]	I_{Pico} [A]	Tail-out	I_M [A]	U_M [V]	E_s [J/cm]
SD1	Não	3,3	100	320	0	153,6	16,1	137,39
SD2		3,3	100	280	0	155,6	14,8	127,94
SD3		3,3	60	320	10	151,7	16,6	139,90
SD4		2,3	100	280	10	112,5	20,3	190,31
SD5		3,3	60	280	10	148,1	15,5	127,53
SD6		2,3	60	320	0	108,5	15,5	140,15
SD7		2,3	100	320	10	120,7	19,6	197,14
SD8		2,3	60	280	0	108,3	15,0	135,38
SD9		2,8	80	300	5	133,7	16,1	143,50
SD10	Sim	2,3	80	300	5	120,4	17,2	172,57
SD11		3,3	80	300	5	146,8	15,4	125,60
SD12		2,8	60	300	5	130,4	15,4	133,88
SD13		2,8	100	300	5	144,9	18,0	173,88
SD14		2,8	80	280	5	132,8	16,3	144,31
SD15		2,8	80	320	5	136,1	17,0	154,25
SD16		2,8	80	300	0	135,2	15,2	137,00
SD17		2,8	80	300	10	138,2	17,6	162,15
SD18		2,8	80	300	5	133,7	15,2	135,48

5.2.1. Critérios de aceitabilidade

5.2.1.1 Análise visual

Num primeiro momento, foram obtidos resultados próximos ao encontrados na etapa anterior, quando foi utilizado processo MAG com transferência por curto-circuito convencional. Onde as soldas realizadas na progressão ascendente apresentam maior penetração quando comparadas com as soldas realizadas na descendente. Por outro lado, os cordões soldados na progressão descendente, utilizando o processo STT, apresentaram maior controle da penetração, minimizando o escorrimento do metal fundido e a falta de penetração nas posições vertical e sobrecabeça. Visto que, estes defeitos foram observados repetidamente nas soldas realizadas com MAG com transferência por curto-circuito convencional nesta progressão.

a) Conjunto operacional descartado

Nas soldas realizadas na progressão ascendente, o motivo principal para o descarte dos cordões foi à perfuração da raiz, decorrente da maior penetração (reforço da raiz) na progressão ascendente, que aumenta à medida que se aproxima da posição plana devido ao balanço de forças na poça de fusão. No ensaio SA1 mostrado na Fig. 5.21(a), tal como nos ensaios SA2, SA3, SA4, SA7 e SA13, a perfuração da raiz ocorreu na região vertical. Já o ensaio SA15, mostrado na Fig. 5.21(b), mesmo não perfurando a raiz, o excesso de penetração resultou na falta de material para preenchimento da junta na região vertical.

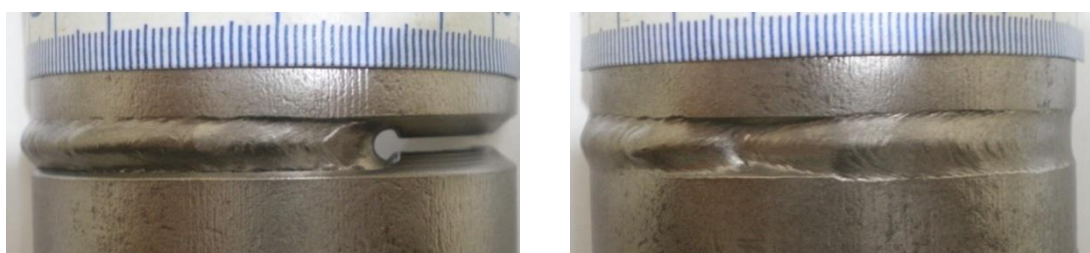


Figura 5.21 – (a) Ensaio SA1; e (b) Ensaio SA15.

Na Fig. 5.22 observa-se que o ensaio SA5, assim como os ensaios SA6 e SA8, os menores valores de corrente de base e corrente de pico (60 e 280 A respectivamente) resultaram em um arco mais curto e concentrado. O que proporcionou cordões mais estreitos e com falta de fusão nas bordas da junta.

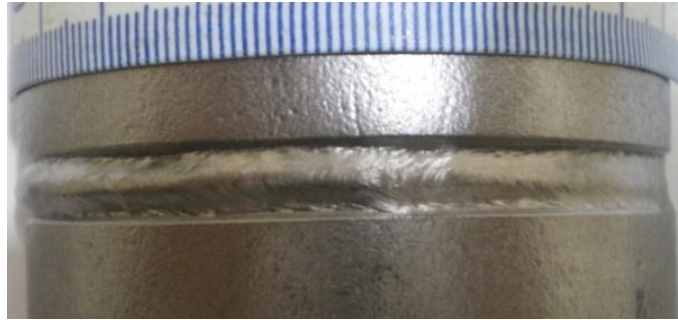


Figura 5.22 – Ensaio SA15 com falta de fusão na borda da junta.

Na progressão descendente primeiramente foram descartados apenas dois ensaios, SD4 e SD7. Nestes casos, os cordões apresentaram maior escorrimento do metal fundido na posição vertical e na sobrecabeça. Na Fig. 5.23 observa-se que no ensaio SD4 o escorrimento nas posições vertical e sobrecabeça resultaram no aumento da largura dos cordões e na falta de penetração (reforço da raiz negativo). Já no ensaio SD7, mostrado na Fig. 5.24, mesmo com o escorrimento do metal fundido na posição vertical houve penetração total, porém, observou-se uma grande concavidade no reforço da face. Enquanto que na posição sobrecabeça, além da falta de penetração, o escorrimento do metal fundido implicou na extinção do arco, não sendo possível a conclusão total da solda.

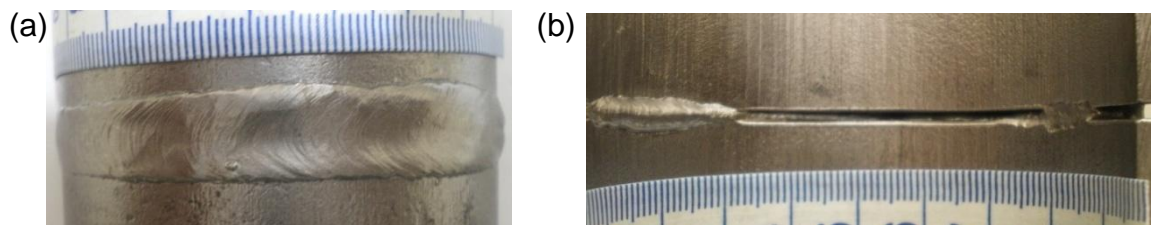


Figura 5.23 – Ensaios SD4.

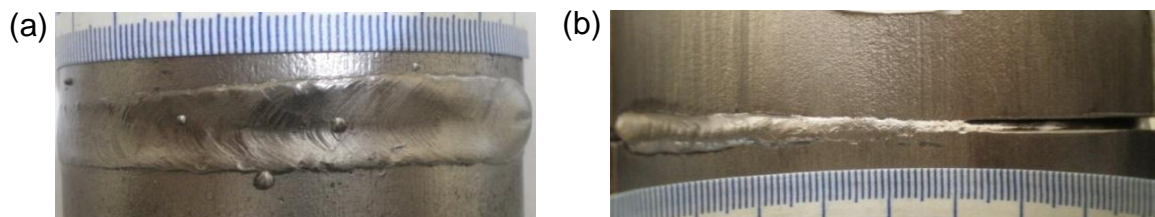


Figura 5.24 – Ensaios SD7.

b) Conjunto operacional sugerido

A partir da análise visual dos cordões, foram selecionados para o ensaio macrográfico os ensaios SA9, SA10, SA11, SA12, SA14, SA16, SA17 e SA18 para a progressão de soldagem ascendente, e já para a descendente foram selecionados os ensaios SD1, SD2, SD3, SD5, SD6, SD8, SD9, SD10, SD11, SD12, SD13, SD14, SD15, SD16, SD17 e SD18, como aqueles com melhor aspecto visual.

5.2.1.2 Análise macrográfica dos cordões

Nesta etapa, os cordões selecionados na análise visual foram submetidos a ensaios macrográfico para verificar e avaliar possíveis descontinuidades internas. Nas soldas realizadas na progressão ascendente, não foram encontrados indicadores de descontinuidade internas.

Durante a análise das macrografias, também foram realizadas avaliações de descontinuidades externas encontradas (mordeduras e falta de enchimento do chanfro) durante a análise anterior (análise visual). Para tal, inicialmente outros ensaios foram descartados, pois apresentaram falta de enchimento do chanfro. Na progressão ascendente, foram descartados os ensaios SA9 e SA17. Já na descendente, foi descartado o ensaio SD2. Em todas as situações, os defeitos foram observados na posição plana, região de maior penetração. O que aumenta o reforço da raiz e reduz reforço da face, resultando na falta de material para o enchimento do chanfro.

Na análise das mordeduras, onde todos os ensaios realizados na ascendente apresentaram mordeduras nas posições verticais e sobre cabeça, são com profundidade máxima de 0,54 mm (Fig. 5.25). Já nos ensaios na progressão descendente, apenas nos cordões SD6 e SD8 foram encontradas mordeduras. Como pode ser observado na Fig. 5.26, as mordeduras apresentaram profundidade de 0,61 mm e 0,39 mm, respectivamente, apenas na posição sobre cabeça.

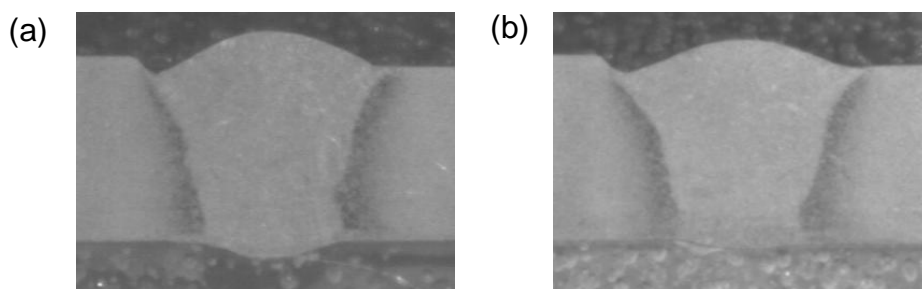


Figura 5.25 – Ensaio (a) SA11 e (b) SA12 na posição sobre cabeça com mordedura com profundidade de 0,54 mm (espessura da chapa: 5,5 mm).

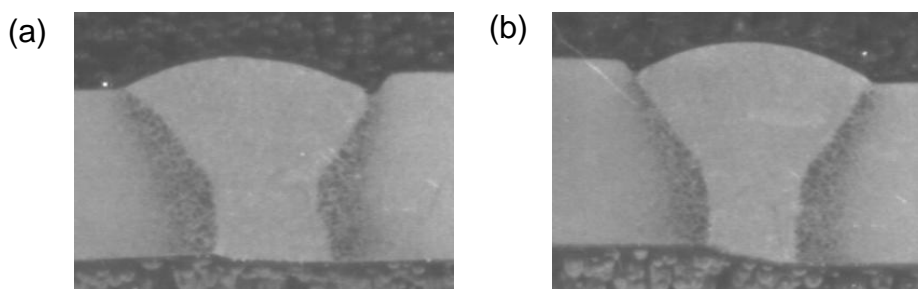


Figura 5.26 – Ensaio (a) SD6 e (b) SD8 com mordeduras (espessura da chapa: 5,5 mm).

Em ambas as progressões, todas as descontinuidades analisadas, estão dentro das recomendações da norma AWS D1.1, onde a conexão tubular não deve possuir mordeduras com profundidade maior do que 1 mm.

Os resultados apresentados até agora (maior número de cordões aprovados na análise visual e a menor presença de defeitos nos cordões soldados na progressão descendente) corroboram com a recomendação do fabricante (LINCOLN, 2003), ou seja, as soldas utilizando o processo STT devem ser realizadas na progressão descendente.

5.2.2 Análise geométrica do cordão

5.2.2.1 Característica geométrica do cordão

Nesta etapa foi feita uma análise parcial do perfil dos cordões, em relação sua uniformidade, baseada no desvio padrão (DESVPD) das características geométricas. Nas Tabs. 5.12 e 5.13 são apresentas as medidas realizadas da geometria dos cordões de soldados nas progressões ascendente e descendente, bem como o desvio padrão.

Em virtude do grande número de ensaios selecionados na etapa anterior, as análises do comportamento do cordão (Figs. 5.27 e 5.28) para a progressão ascendente e para a descendente (Figs. 5.29, 5.30 e 5.31) foram realizadas baseando-se apenas nos ensaios que apresentaram o menor desvio padrão em cada característica geométrica (reforço da face, reforço da raiz e largura da face).

Na Tab. 5.12, observa-se que os cordões soldados na progressão ascendente em geral apresentam maior reforço da raiz e maior irregularidade (menor desvio padrão), comparado à progressão descendente (Tab. 5.13), como já era esperado, devido à maior penetração nesta progressão. O que também favorece a redução do reforço da face, bem como cordões mais estreitos (menor largura da face). Porém, observa-se na Tab. 5.12 que os ensaios SA12 e SA16, mostrados nas Figs. 5.27 e 5.28, apresentaram maior controle da penetração, como um reforço da raiz mais uniforme, assim como o reforço da face.

Na Tab. 5.13 pode observar que os ensaios realizados na progressão descendente apresentaram cordões com maior largura, sendo mais evidente na posição vertical, ou seja, maior irregularidade da largura da face. Este aumento da largura é justificado pelo maior escorrimento do metal fundido nesta progressão, o qual favorece a redução do reforço da face e reduz o reforço da raiz principalmente na posição plana, posição de maior penetração. Além disto, proporcionou aos cordões soldados na progressão descendente com o processo STT maior controle da penetração e perfil da raiz mais uniforme, também quando comparado com outros processos de soldagem. Este comportamento pode ser facilmente observado nos ensaios SD14 e SD18 com reforço da face e da raiz com menor desvio padrão, em que apresentaram a largura da face mais irregular, mostrados nas Figs. 5.29 e 5.30. Por outro lado, no ensaio SD8 com menor desvio padrão na largura da face, nota-se na Fig. 5.31 uma maior irregularidade tanto no reforço da face quanto no reforço da raiz.

Tabela 5.12 – Característica geométrica e o desvio padrão (DESVPD) dos cordões soldados na progressão ascendente (reforço da face “RF”, reforço da raiz “RR” e largura da face “LF”) nas distintas posições (plana “P”, vertical “V” e sobrecabeça “SC”) para o processo STT.

ENSAIO	POSICÃO	P [mm]	V [mm]	SC [mm]	DESVPD [mm]
SA10	RF	0,29	1,33	0,98	0,53
	RR	2,83	0,82	0,35	1,32
	LF	9,34	8,89	9,34	0,26
SA11	RF	0,13	0,98	0,95	0,48
	RR	2,47	2,03	0,54	1,01
	LF	7,89	8,27	7,32	0,48
SA12	RF	0,67	0,89	0,63	0,14
	RR	1,39	1,20	0,23	0,62
	LF	8,07	7,91	7,59	0,24
SA14	RF	0,00	0,57	1,08	0,54
	RR	2,20	1,14	0,35	0,93
	LF	8,50	8,27	7,50	0,52
SA16	RF	0,92	1,11	1,08	0,10
	RR	1,06	0,98	0,35	0,39
	LF	9,00	8,04	7,50	0,76
SA18	RF	0,48	0,76	0,99	0,26
	RR	2,72	0,95	0,13	1,32
	LF	9,09	8,80	8,03	0,55

Tabela 5.13 – Característica geométrica e o desvio padrão (DESVPD) dos cordões soldados na progressão descendente (reforço da face “RF”, reforço da raiz “RR” e largura da face “LF”) nas distintas posições (plana “P”, vertical “V” e sobrecabeça “SC”).

ENSAIO	POSIÇÃO	P [mm]	V [mm]	SC [mm]	DESVPD [mm]
SD1	RF	0,63	0,51	0,95	0,23
	RR	1,36	0,35	0,13	0,66
	LF	7,28	9,46	7,60	1,18
SD3	RF	1,30	0,51	0,79	0,40
	RR	0,85	0,25	0,00	0,44
	LF	8,14	9,18	8,36	0,55
SD5	RF	0,19	0,48	0,63	0,22
	RR	1,66	0,32	0,35	0,77
	LF	6,98	8,17	7,22	0,63
SD6	RF	0,96	0,57	0,79	0,20
	RR	0,75	0,19	0,20	0,32
	LF	7,83	8,07	7,23	0,43
SD8	RF	0,54	0,51	0,99	0,27
	RR	1,11	0,19	0,13	0,55
	LF	7,57	7,67	7,00	0,36
SD9	RF	0,85	0,51	0,98	0,24
	RR	0,96	0,19	0,00	0,51
	LF	7,75	9,30	8,39	0,78
SD10	RF	0,35	0,54	0,92	0,29
	RR	1,00	0,19	0,00	0,53
	LF	9,79	10,76	9,88	0,54
SD11	RF	0,70	0,54	0,79	0,13
	RR	0,93	0,41	0,22	0,37
	LF	8,51	9,15	8,20	0,48
SD12	RF	0,55	0,73	0,80	0,13
	RR	1,07	0,00	0,00	0,62
	LF	8,16	9,53	7,32	1,12
SD13	RF	0,00	0,41	1,30	0,66
	RR	0,85	0,32	0,21	0,34
	LF	9,31	11,78	10,54	1,24
SD14	RF	0,38	0,54	0,95	0,29
	RR	0,50	0,00	0,26	0,25
	LF	8,30	11,00	9,18	1,38
SD15	RF	0,00	0,47	0,98	0,49
	RR	0,99	0,38	0,00	0,50
	LF	8,61	11,20	9,18	1,36
SD16	RF	0,35	0,41	0,95	0,33
	RR	0,76	0,85	0,00	0,47
	LF	9,47	9,24	8,61	0,45
SD18	RF	0,57	0,66	0,73	0,08
	RR	0,93	0,00	0,00	0,54
	LF	8,40	9,40	8,39	0,58

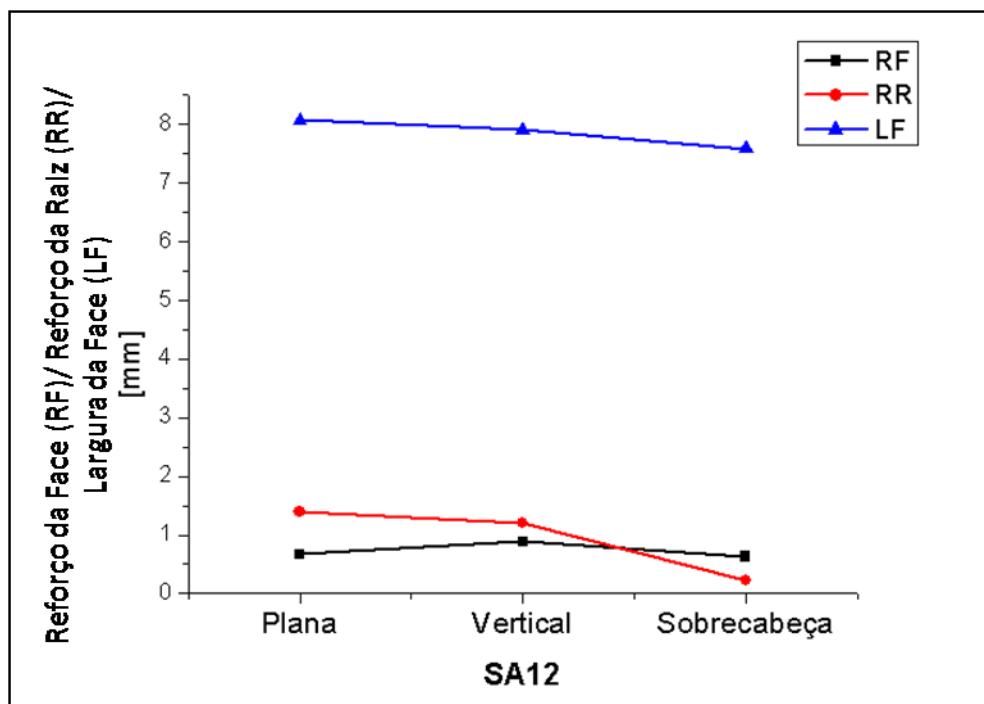


Figura 5.27 – Comportamento da geometria do ensaio SA12 para cada posição (plana, vertical e sobrecabeça) para o processo STT.

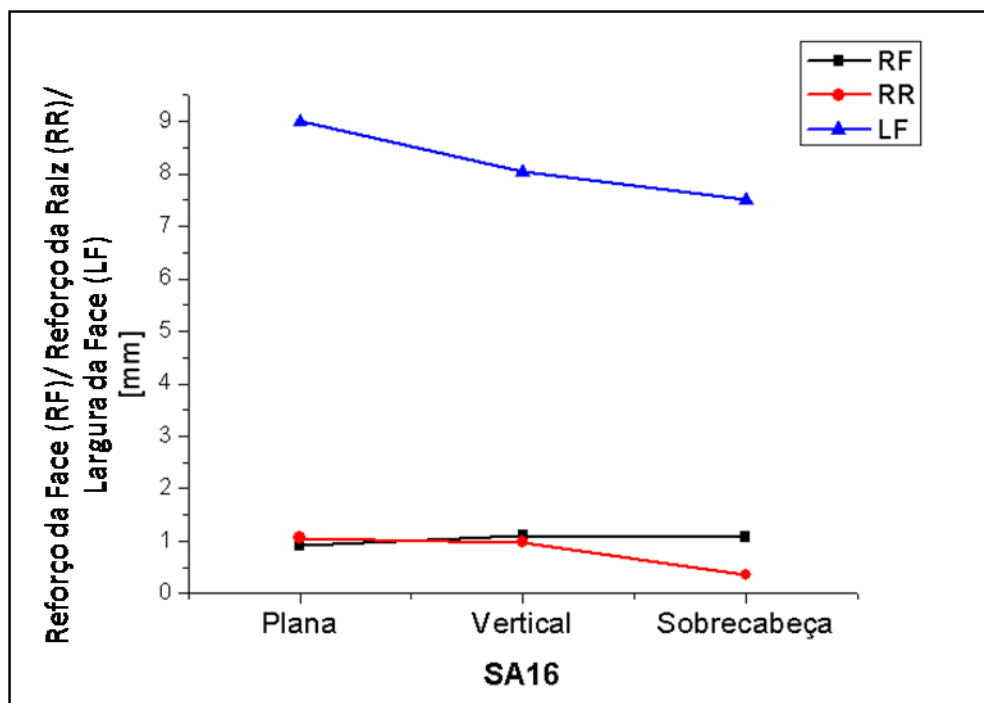


Figura 5.28 – Comportamento da geometria do ensaio SA16 para cada posição (plana, vertical e sobrecabeça) para o processo STT.

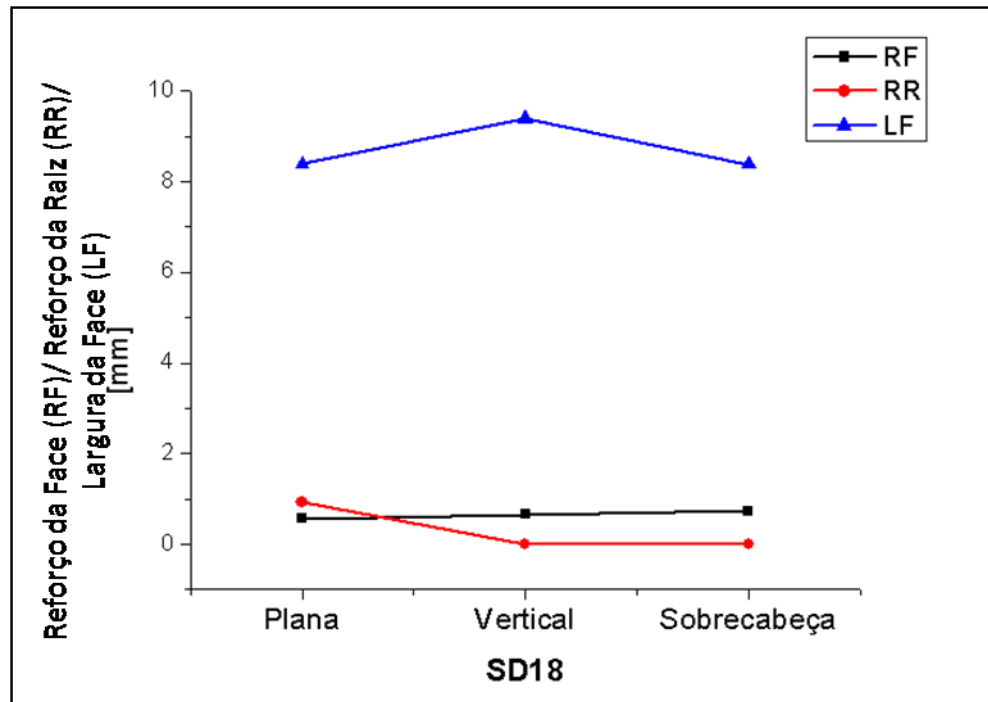


Figura 5.29 – Comportamento da geometria do ensaio SD18 para cada posição (plana, vertical e sobrecabeça) para o processo STT.

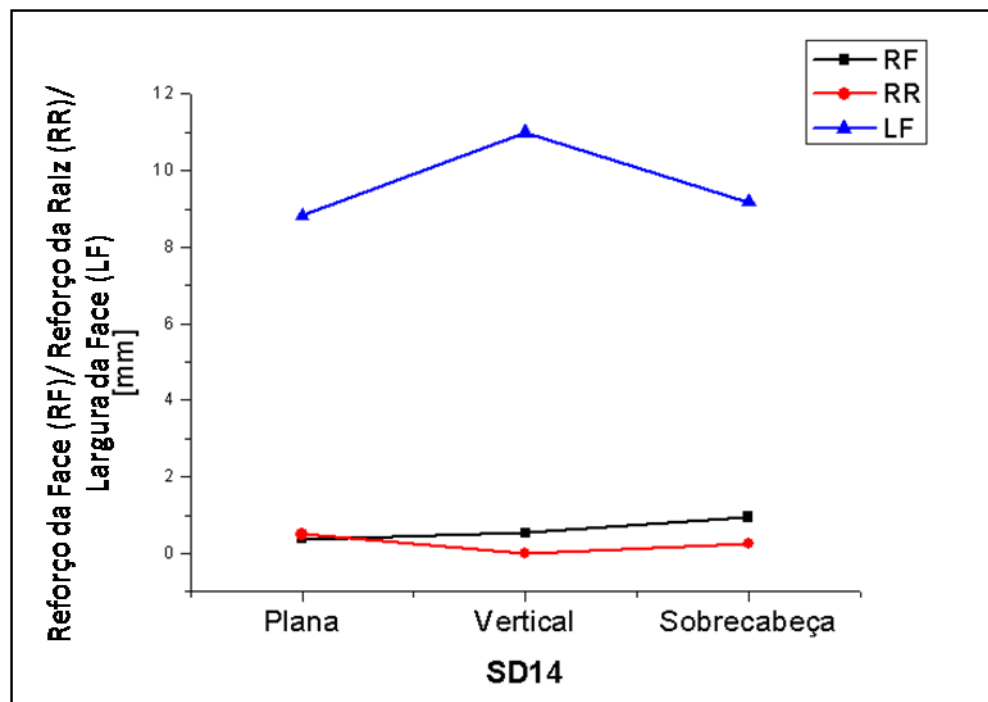


Figura 5.30 – Comportamento da geometria do ensaio SD14 para cada posição (plana, vertical e sobrecabeça) para o processo STT.

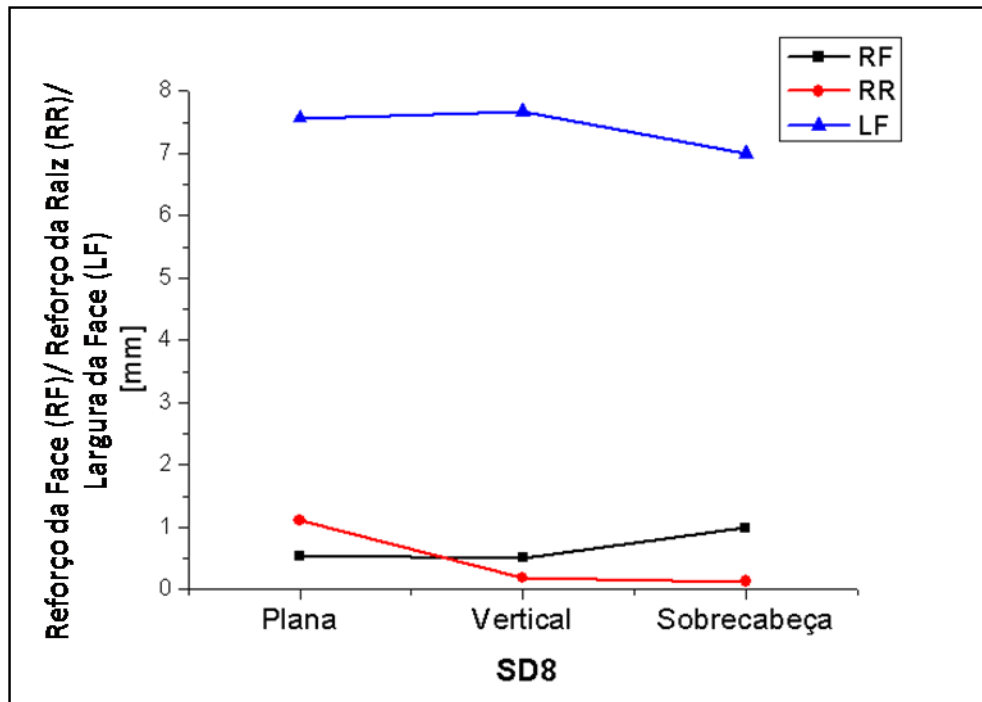


Figura 5.31 – Comportamento da geometria do ensaio SD8 para cada posição (plana, vertical e sobrecabeça) para o processo STT.

5.2.2.2 Efeito dos fatores na geometria do cordão

A Tab. 5.14 apresenta os níveis de significância (p) obtidos pela análise de variância global dos fatores para as soldas realizadas da progressão ascendente. Observa-se que a oscilação da tocha assim como no curto-circuito convencional, afetou significativamente a geometria dos cordões, como mostrados na Fig. 5.32. Neste caso, favoreceu o maior controle da penetração (reduz a penetração) com a redução do reforço da raiz e aumento do reforço da face e da largura do cordão. Com isto, reduz defeito como falta de material para enchimento do chanfro e perfuração da raiz (reforço da face negativo), aumentando o reforço da face.

Nas Figs. 5.33, 5.35 e 5.36, são apresentados o efeito da velocidade de alimentação, corrente de pico e *tail-out* na geometria dos cordões. Observa-se que as curvas apresentaram comportamentos semelhantes, onde há uma tendência dos níveis intermediários ($V_A = 2,8$ m/min; $I_P = 300$ A; e *Tail-out* = 5) em reduzir a penetração do cordão.

A Fig. 5.34 apresenta o efeito da corrente de base sobre a geometria dos cordões. Nota-se que o maior nível de corrente (100 A), o efeito é mais significativo, favorecendo o aumento da penetração, estando diretamente relacionado com a perfuração da raiz. Onde os valores das características geométricas (para este nível de corrente de base) são iguais aos valores escolhidos para representar para os cordões que apresentaram perfuração da raiz. A explicação para este comportamento pode esta na função da corrente de base, a qual é responsável pelo controle do calor imposto, sendo que, quanto maior a corrente de base, maior é o calor entregue a junta, favorecendo a perfuração da raiz.

Tabela 5.142: Níveis de significância "p" para cada resposta (reforço da face (RF), reforço da raiz (RR) e largura da face (LF)) soldados na progressão ascendente com processo STT.

Fatores	Resposta		
	RF	RR	LF
Mean/Interc.	0,004331	0,000000	0,000000
Osc (1)	0,033330	0,000138	0,020005
(1)Valim (L)	-	0,071150	0,015453
Valim (Q)	0,096192	-	-
(2)lbase (L)	0,000144	0,000006	0,000098
lbase (Q)	0,000144	0,000023	0,000023
(3)lpico (L)	0,000807	0,001305	0,017706
lpico (Q)	0,004314	-	0,029199
(4)tail-out (L)	0,073297	0,000036	-
tail-out (Q)	0,040688	0,116775	-
1Lby 2L	0,026334	-	0,048623
1Lby 3L	0,001803	0,024942	0,026063
1Lby 4L	0,012438	0,000375	0,003372
2Lby 3L	0,001140	0,002826	0,056678
2Lby 4L	0,000701	0,017508	-
3Lby 4L	0,001803	0,024942	0,026063

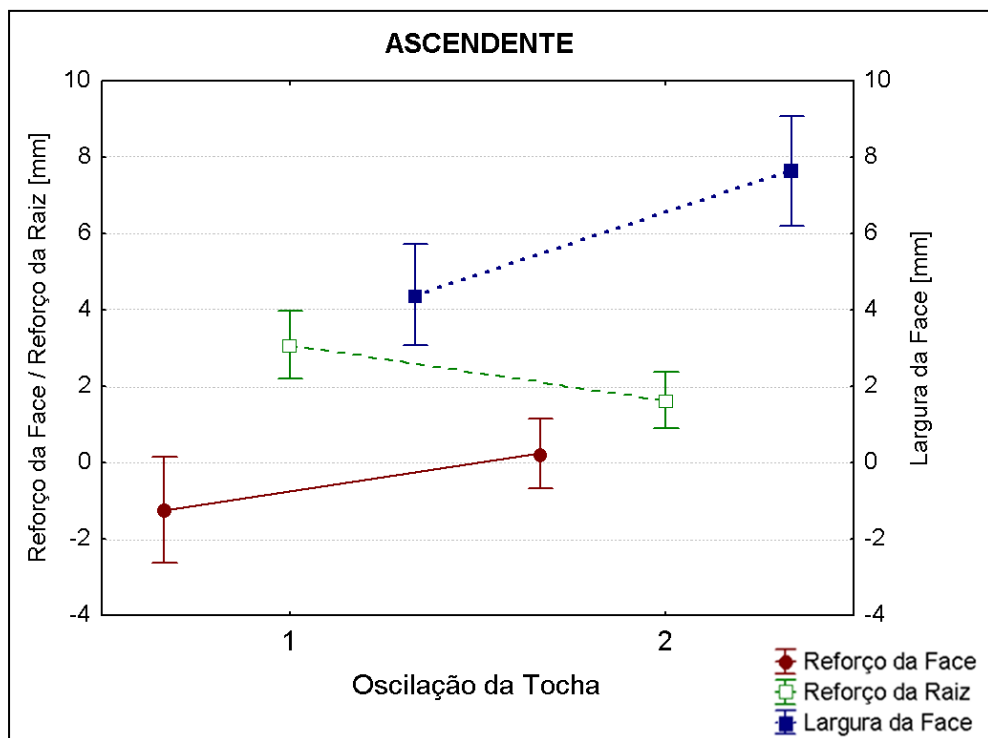


Figura 5.32 – Efeito da oscilação da tocha na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para o processo STT, onde: “1” é sem oscilação; e “2” é com oscilação.

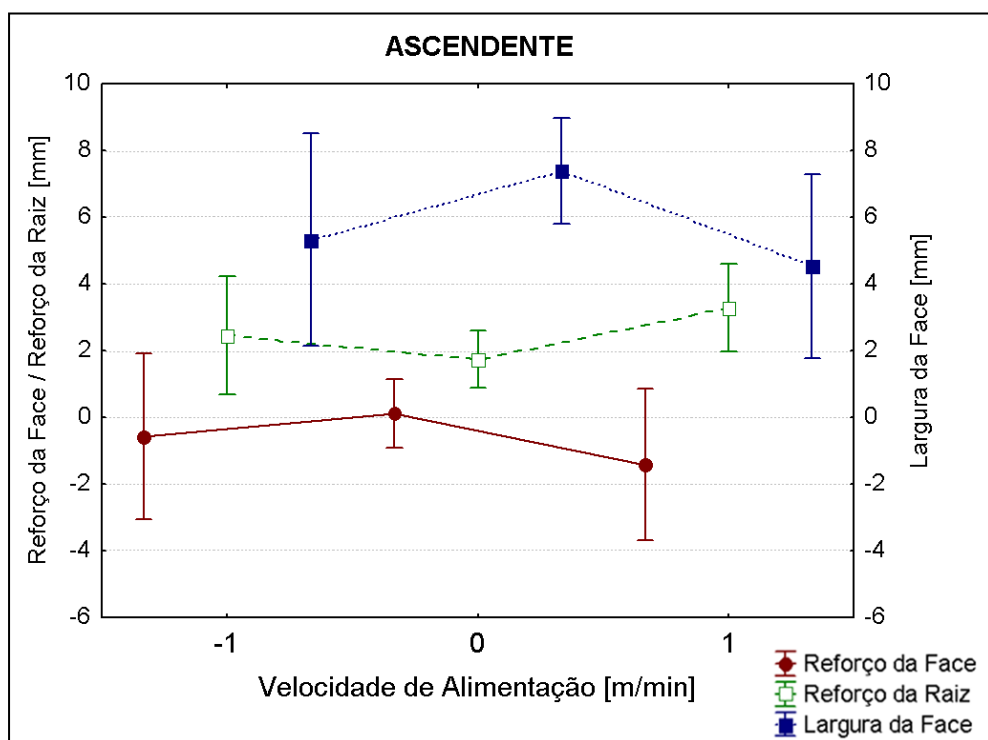


Figura 5.33 – Efeito da velocidade de alimentação na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para o processo STT, onde: “-1” é 2,3 m/min; “0” é 2,8 m/min; e “1” é 3,3 m/min.

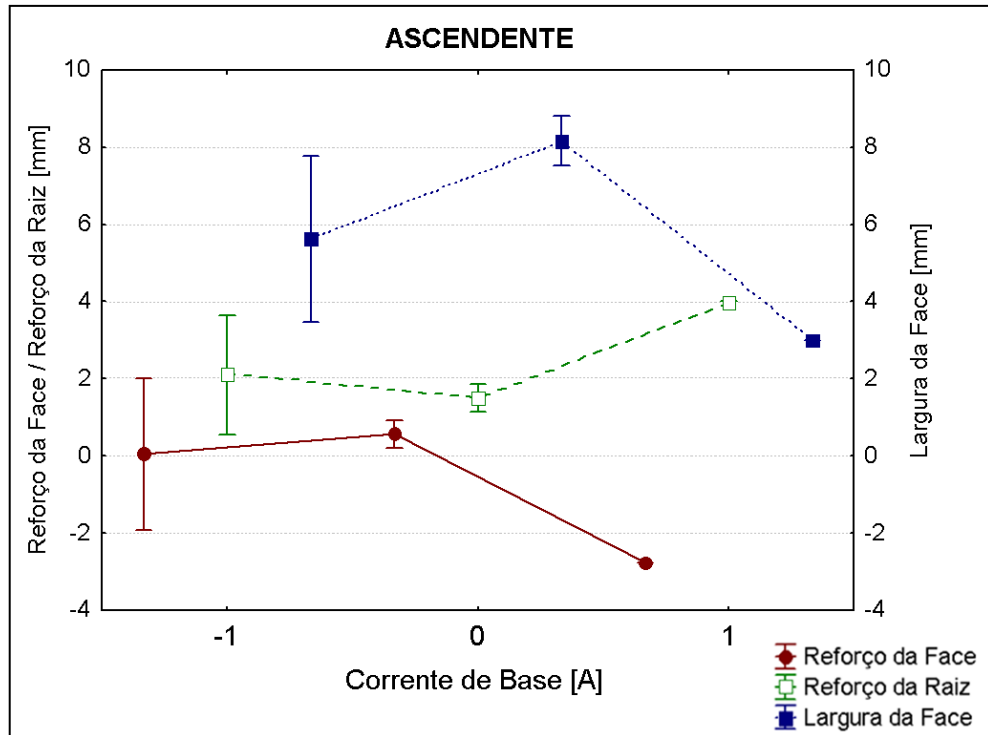


Figura 5.34 – Efeito da corrente de base na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para o processo STT, onde: “-1” é 65 A; “0” é 80 A; e “1” é 100 A.

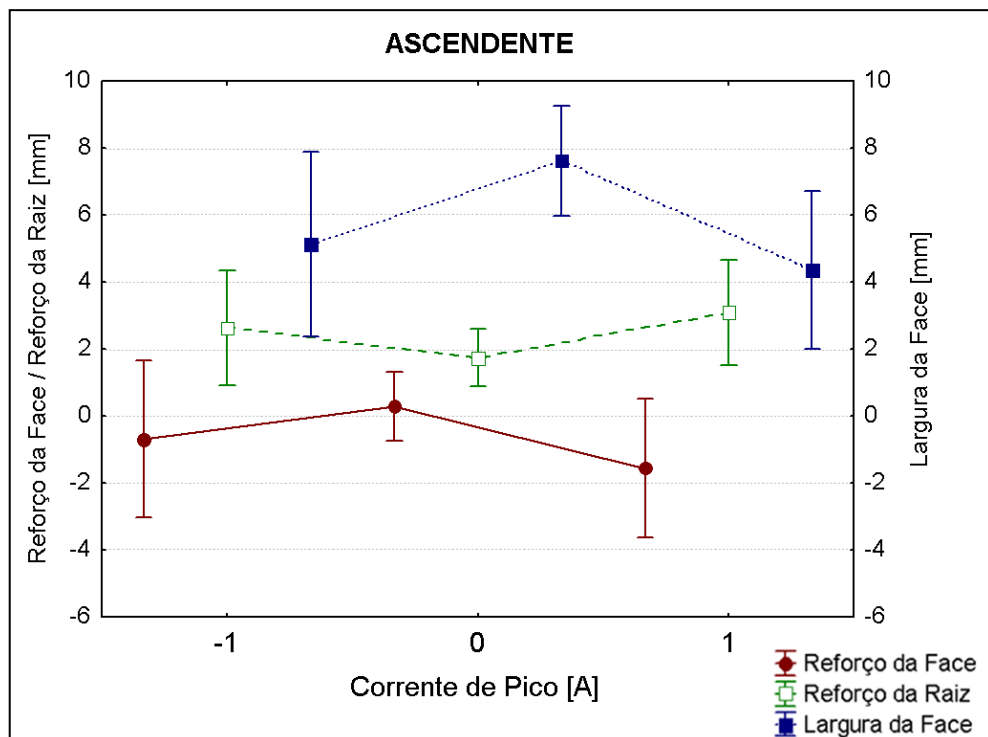


Figura 5.35 – Efeito da corrente de pico na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para o processo STT, onde: “-1” é 280 A; “0” é 300 A; e “1” é 320 A.

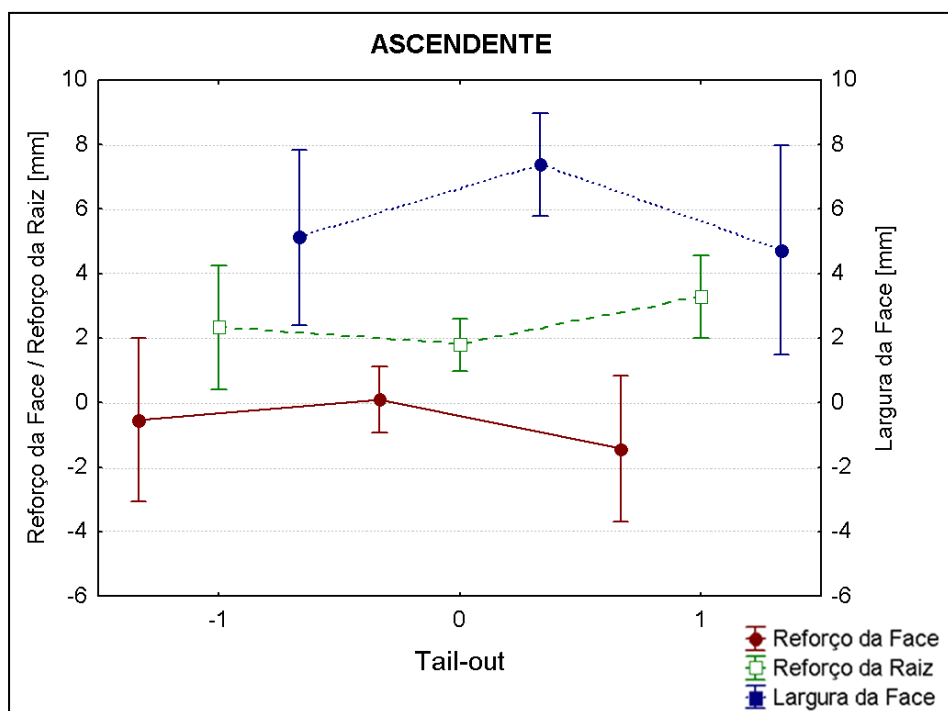


Figura 5.36 – Efeito do *tail-out* na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para o processo STT, onde: “-1” é 0; “0” é 5; e “1” é 10.

Na Tab. 5.16 são apresentados os níveis de significância (p) obtidos pela análise global de variância para as soldas realizadas na descendente. Como pode ser observado na Fig. 5.37, a oscilação da tocha apresenta um comportamento oposto ao da progressão ascendente. Com a tocha oscilando, observou-se uma redução do reforço da face e o aumento do reforço da raiz. Neste caso, a oscilação contribui para a distribuição do calor nas laterais da junta, favorecendo o aumento da penetração, principalmente nas posições vertical e sobrecabeça susceptíveis a menor penetração.

Na Fig. 5.38, como era aguardado, nota-se que, na descendente, a penetração tende a aumentar com a velocidade de alimentação, em consequência da maior corrente de soldagem, resultando no aumento do reforço da raiz e diminuindo o reforço e a largura da face do cordão. Já o aumento da corrente de base, assim como o *tail-out*, (mostrados nas Figs. 5.39 e 5.41, respectivamente) tende a reduzir a penetração do cordão. Em ambos os casos, são responsáveis pelo controle do calor entregue à peça, o que favorece o aumento da molhabilidade da junta, aumentando a largura da face e diminuindo o reforço da raiz. Por outro lado, esperava-se que a corrente de pico tivesse um comportamento semelhante (reduzir a penetração). Tendo em vista que a corrente de pico aumenta o comprimento do arco (maior tensão), aumentando a largura do arco com a peça e proporcionando um cordão mais largo (maior largura), como mostrado na Fig. 5.40, porém o reforço da raiz tende a se manter-se aproximadamente constante.

Tabela 5.16 – Níveis de significância "p" para cada resposta (reforço da face (RF), reforço da raiz (RR) e largura da face (LF)) na descendente com processo STT.

Fatores	Respostas		
	RF	RR	LF
Mean/Interc.	0,000000	0,000000	0,000000
Osc (1)	0,019504	0,022444	0,003375
(1)Valim (L)	-	-	0,000004
Valim (Q)	-	-	-
(2)lbase (L)	-	-	0,000002
lbase (Q)	-	-	-
(3)lpico (L)	0,034141	-	0,013337
lpico (Q)	-	-	-
(4)tail-out (L)	0,006077	0,048901	0,025211
tail-out (Q)	-	-	0,108234
1Lby 2L	-	0,029526	0,042505
1Lby 3L	0,028833	0,002218	-
1Lby 4L	0,166771	0,000043	-
2Lby 3L	-	0,028698	-
2Lby 4L	0,001425	0,000001	-
3Lby 4L	-	0,093458	-

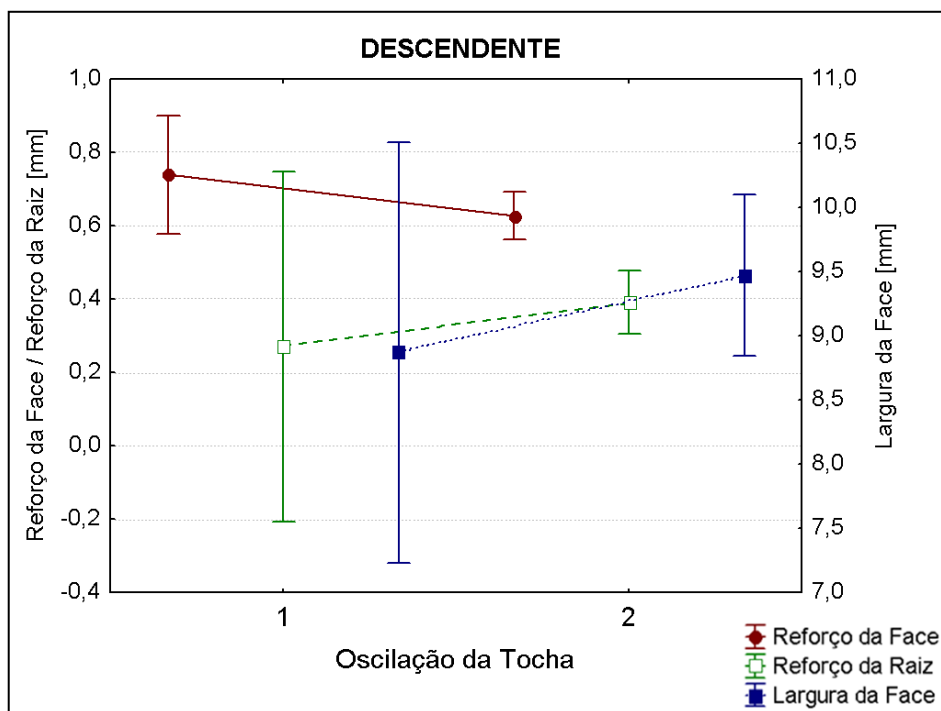


Figura 5.37 – Efeito da oscilação da tocha na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para o STT, onde: “1” é sem oscilação; e “2” é com oscilação.

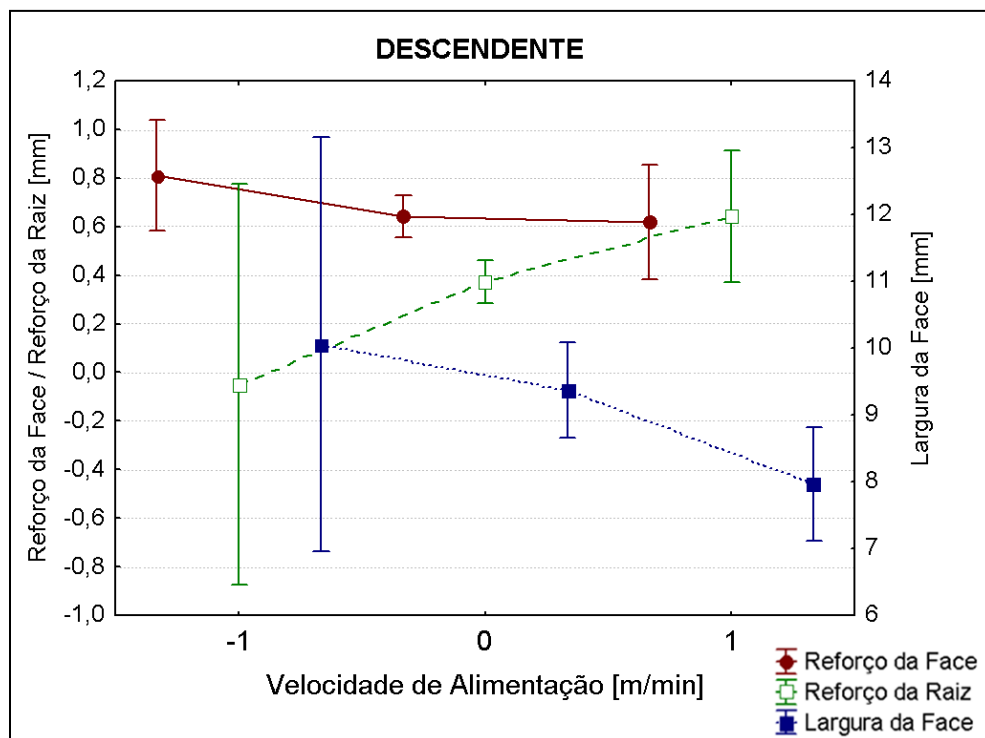


Figura 5.38 – Efeito da velocidade de alimentação na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para o processo STT, onde: “-1” é 2,3 m/min; “0” é 2,8 m/min; e “1” é 3,3 m/min.

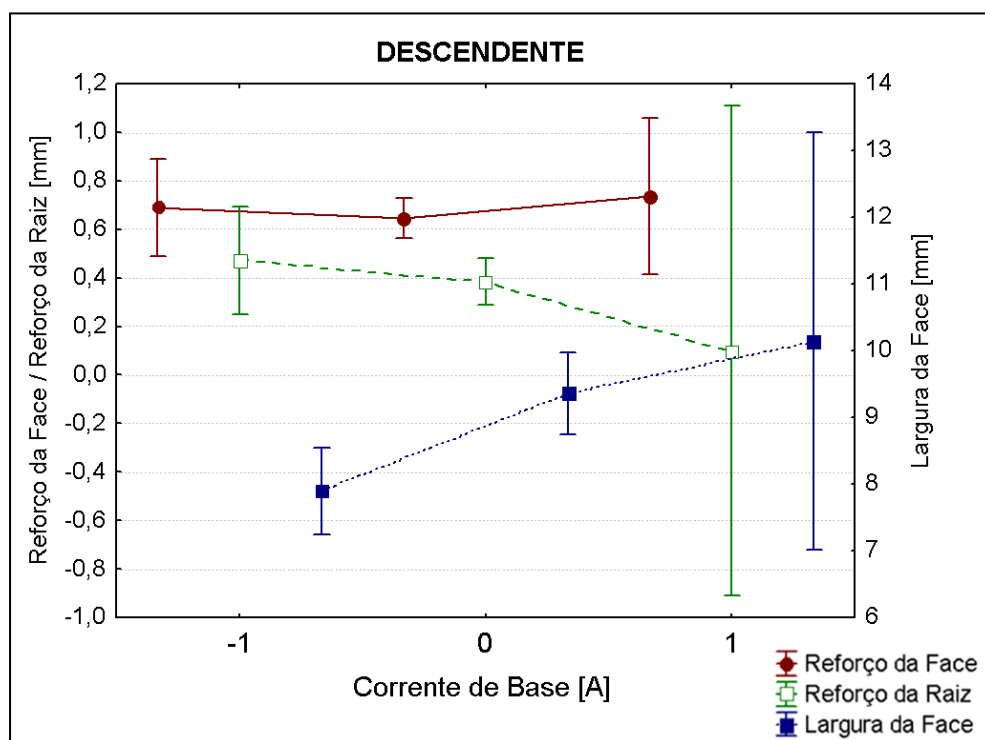


Figura 5.39 – Efeito da corrente de base na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para o processo STT, onde: “-1” é 65 A; “0” é 80 A; e “1” é 100 A.

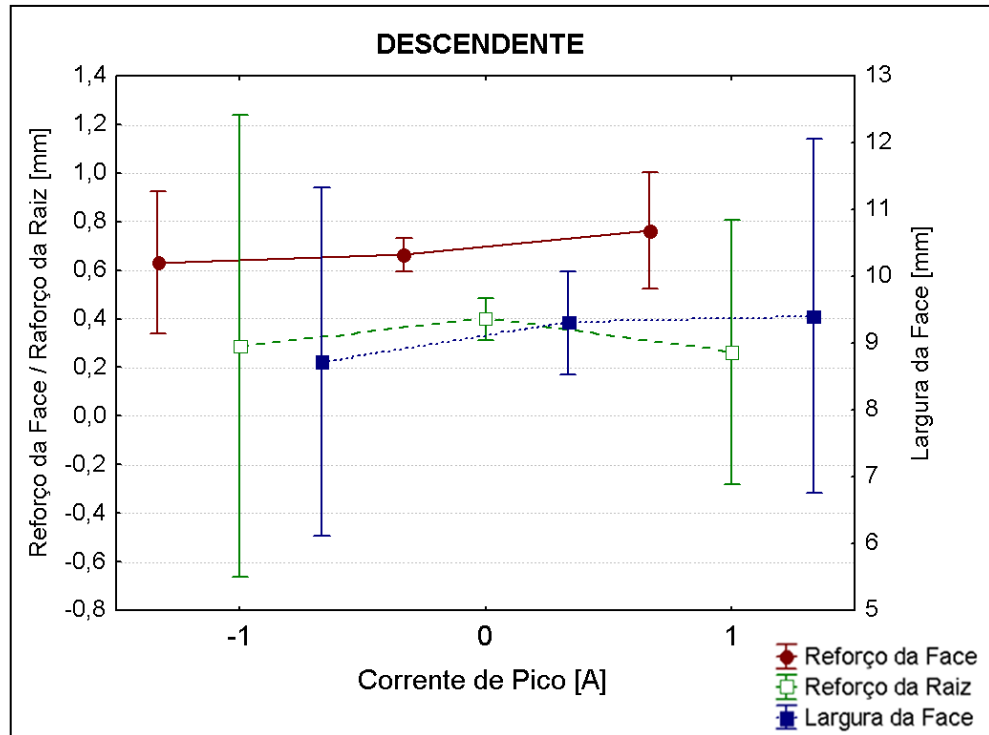


Figura 5.40 – Efeito da corrente de pico na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para o processo STT, onde: “-1” é 280 A; “0” é 300 A; e “1” é 320 A.

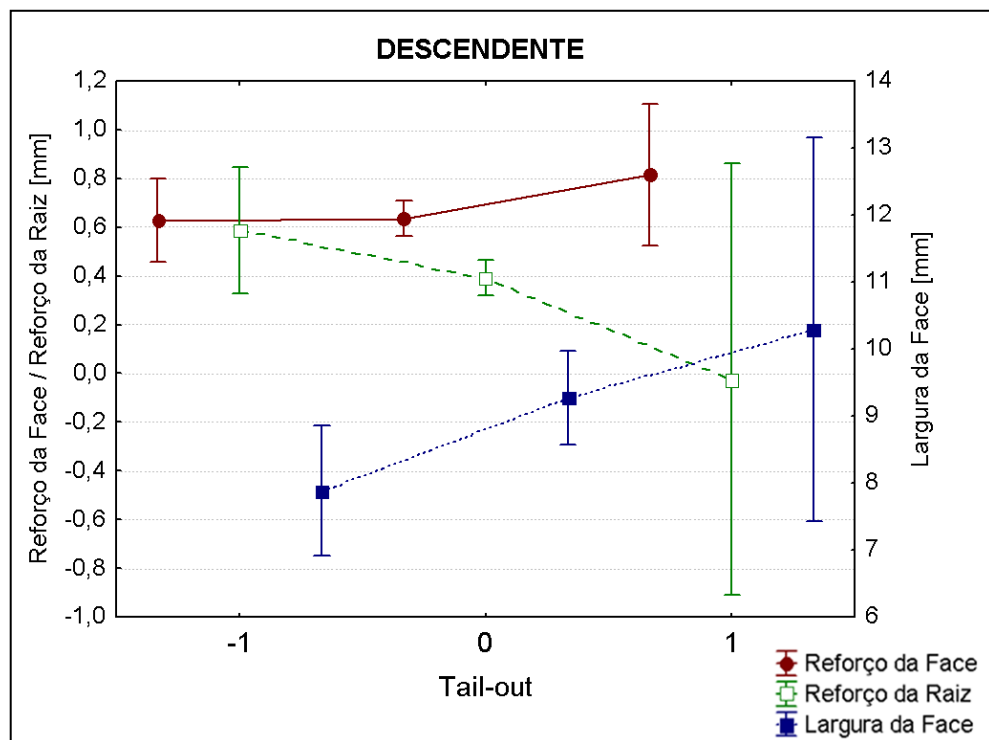


Figura 5.41 – Efeito do *tail-out* na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para o processo STT, onde: “-1” é 0; “0” é 5; e “1” é 10.

5.3 Processo RMD

Para a execução dos ensaios como parâmetros específicos, optou-se por variar em três níveis seus parâmetros de regulagem, o *Trim* e o *Arc Control*, mostrados na Tab. 5.17. Assim como a velocidade de alimentação do arame e os respectivos níveis de velocidade de soldagem, mantendo aproximadamente a mesma quantidade de material depositado por comprimento de solda (mantendo constante V_A/V_S). Além disto, também foi variada a oscilação da tocha (com e sem oscilação).

Nas Tabs. 5.18 e 5.19 são apresentados os planejamentos experimentais para execução dos ensaios na progressão ascendente e descendente, assim como os valores de regulagem e os valores medidos de corrente média (I_M), tensão média (U_M) e energia de soldagem (E_S). Os ensaios foram denominados como “RA” para os ensaios realizados na progressão ascendente e “RD” para a progressão descendente, seguidos do número do ensaio.

Tabela 5.17 – Níveis operacionais para realização dos testes no processo RMD.

V_A (m/min)	V_S (cm/min)	<i>Trim</i>	<i>Arc Control</i>	Oscilação da tocha
2,3	12	50	0	Sim Não
2,8	15	65	25	
3,3	18	80	50	

Tabela 5.18 – Valores medidos para corrente e tensão no RMD e na ascendente.

Ensaio	Oscil.	Valores de Regulagem			Valores monitorados		
		V_A [m/min]	<i>Trim</i>	<i>Arc Control</i>	I_M [A]	U_M [V]	E_S [J/cm]
RA1	Não	2,3	50	0	126,8	13,8	145,82
RA2		2,3	50	50	123,8	13,9	143,40
RA3		2,3	80	0	124,8	16,1	167,44
RA4		2,3	80	50	123,1	16,2	166,19
RA5		3,3	50	0	162,0	13,8	124,20
RA6		3,3	50	50	153,3	14,3	121,79
RA7		3,3	80	0	151,8	16,5	139,15
RA8		3,3	80	50	152,3	16,5	139,61
RA9		2,8	65	25	164,7	15,6	171,29
RA10	Sim	2,3	65	25	115,4	15,5	149,06
RA11		3,3	65	25	146,8	15,6	127,23
RA12		2,8	50	25	139,0	14,4	133,44
RA13		2,8	80	25	144,1	16,0	153,71
RA14		2,8	65	0	141,6	15,1	142,54
RA15		2,8	65	50	135,1	15,6	140,50
RA16		2,8	65	25	134,9	15,5	139,40

Tabela 35.19 – Valores medidos para corrente e tensão no processo RMD na progressão descendente.

Ensaio	Valores de Regulagem				Valores monitorados		
	Oscil.	V_A [m/min]	<i>Trim</i>	<i>Arc Control</i>	I_M [A]	U_M [V]	E_s [J/cm]
RD1	Não	2,3	50	0	122,1	14,3	145,50
RD2		2,3	50	50	125,1	14,4	150,12
RD3		2,3	80	0	127,8	16,0	170,40
RD4		2,3	80	50	129,3	16,0	172,40
RD5		3,3	50	0	174,6	12,9	125,13
RD6		3,3	50	50	176,8	13,3	130,64
RD7		3,3	80	0	169,8	15,9	149,99
RD8		3,3	80	50	172,7	15,3	146,80
RD9		2,8	65	25	168,4	15,8	177,38
RD10	Sim	2,3	65	25	117,4	15,7	153,60
RD11		3,3	65	25	173,2	14,8	142,41
RD12		2,8	50	25	147,2	14,1	138,37
RD13		2,8	80	25	148,2	16,1	159,07
RD14		2,8	65	0	139,5	15,6	145,08
RD15		2,8	65	50	142,5	15,5	147,25
RD16		2,8	65	25	143,9	15,3	146,78

5.3.1 Critério de aceitabilidade

5.3.1.1 Análise visual

Os resultados obtidos na análise visual estão de acordo à recomendação do fabricante (MILLER, 2009), onde as soldas com o processo RMD devem ser realizadas na progressão descendente, pois as soldas realizadas nesta progressão alcançaram maior controle da penetração e cordões com perfil mais uniformes. Por outro lado, na progressão de soldagem ascendente, as soldas obtiveram maior penetração, o que pode resultar em defeitos tal como a perfuração da raiz.

a) Conjunto Operacional Descartado

Assim como nos processos anteriores (MAG com curto-circuito convencional e STT), no processo RMD as soldas realizadas na progressão ascendente têm a maior parte dos cordões descartados em função da perfuração da raiz em consequência da maior capacidade de penetração nesta progressão.

Nos ensaios com o processo RMD, a ocorrência deste tipo de defeito torna-se mais freqüente em cordões soldados sem oscilação da tocha, considerando que, este é um fator favorável ao aumento da penetração (reforço da raiz). Desta forma, assim como o ensaio RA6 mostrado na Fig. 5.42(a), foram descartados os ensaios RA3; RA4, RA5; RA6; RA7; RA8 e RA9. Enquanto com a oscilação da tocha, foi descartado apenas o ensaio RA14 (Fig. 5.42(b)). A justificativa para tal comportamento está na melhor distribuição de calor nas bordas das juntas, o que permitiu o maior controle da poça de fusão, aumentou a largura do cordão e evitou perfuração da raiz.

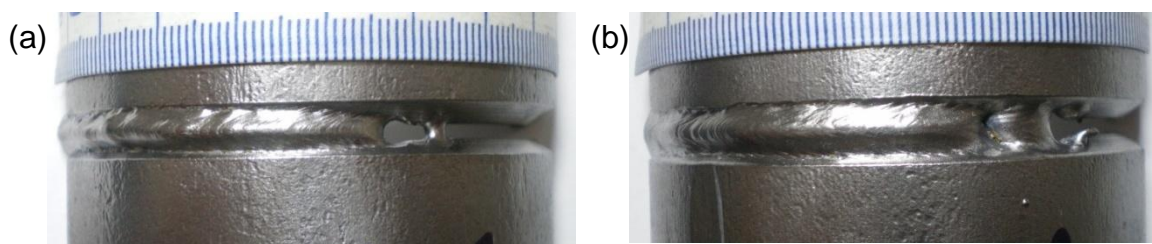


Figura 5.42 – Perfuração da raiz: (a) ensaio RA6 sem oscilação da tocha; e (b) ensaio RA14 com oscilação da tocha.

Por outro lado, mesmo a oscilação da tocha reduzindo o reforço da raiz, os ensaios RA13 e RA16 apresentaram falta de material para enchimento da junta na posição plana, devido à maior penetração nesta região (Fig. 5.43(a)). Além disto, a oscilação e a execução da solda em passe único, proporcionou a formação de grande mordeduras nas laterais dos cordões com profundidade de 1,2 mm, como pode ser observado na Fig. 5.43(b).

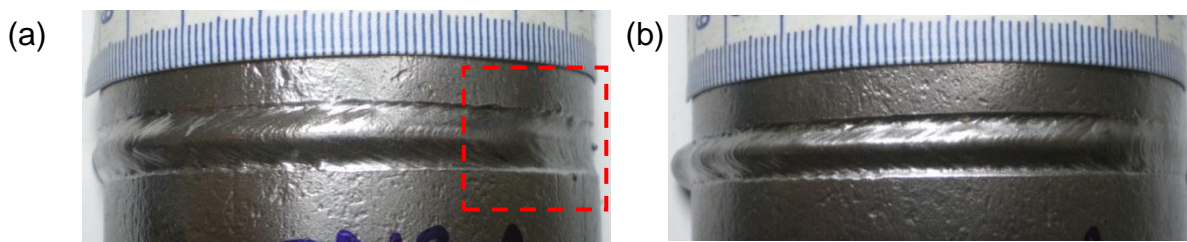


Figura 5.43 – (a) Ensaio RA13 com falta de material para enchimento da junta; e (b) ensaio RA12 com mordedura.

Nos ensaios RA1 e RA2, verificou-se falta de fusão nas bordas devido aos cordões mais estreito (Fig. 5.44). Este comportamento pode ser devido ao baixo valor do *Trim* (50), o qual é responsável pelo ajuste do comprimento do arco. Deste modo, o arco mais curto favoreceu a redução da largura do cordão.

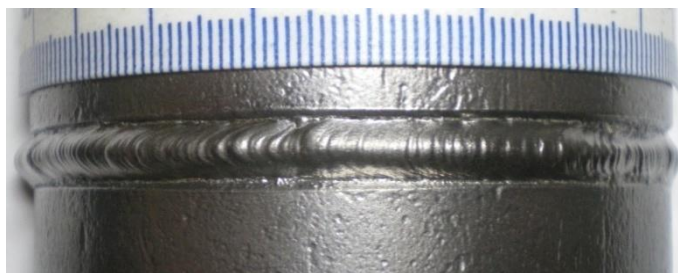


Figura 5.44 – Ensaio RA2, com falta de fusão das bordas da junta.

Como já esperado, os cordões soldados na progressão de soldagem descendente apresentaram uma tendência maior ao escorrimento do metal fundido, o que contribuiu para o controle da penetração nesta progressão, aumentou a largura do cordão e reduziu o reforço da raiz. Porém, o escorrimento da poça também proporcionou a ocorrência de descontinuidades, tal como observada no ensaio RD10 mostrado na Fig. 5.45(a), com falta de penetração por toda extensão da junta. Ou ainda, como no ensaio RD16, mostrado na Fig. 5.45(b), e nos ensaios RD1, RD2, RD12, RD13 e RD15, em que apresentaram pontos com falta de fusão na raiz. Estas descontinuidades são agravadas com o uso de baixa intensidade de corrente e/ou com o uso da oscilação da tocha, pois favorece a redução da penetração. No último caso, o desalinhamento da junta também pode ser um fator agravante, dada a mínima penetração obtida.

Nos ensaios RD5 e RD6, a maior intensidade de corrente (ajustada pela velocidade de alimentação de 3,3 m/min) e o arco mais curto (*Trim* de 50), proporcionaram cordões mais estreitos e com maior penetração, o que resultou na falta de fusão nas bordas da junta (Fig. 5.46).

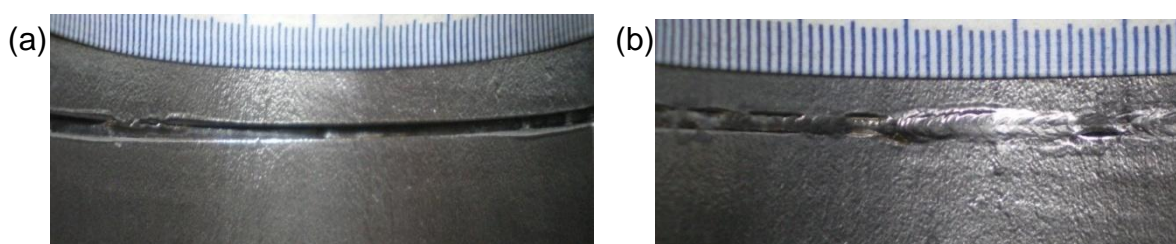


Figura 5.45 – (a) Ensaios RD10, com falta de penetração; e (b) ensaio RD16, falta de fusão da raiz.

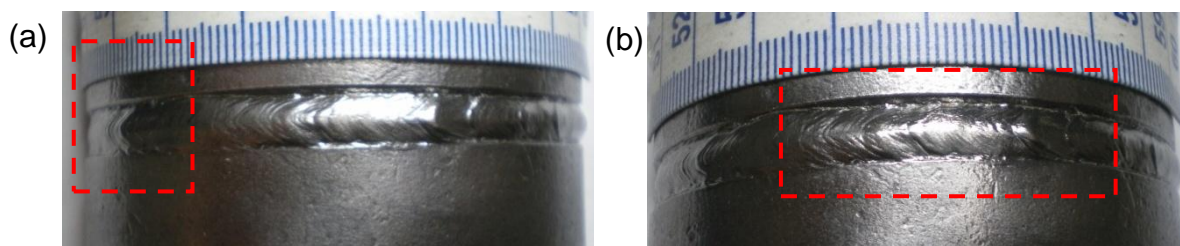


Figura 5.46 – Ensaio RD6, (a) falta de material para enchimento da junta, e (b) falta de fusão na borda da junta.

b) Conjunto Operacional Sugerido

Desta forma, para as etapas seguintes foram selecionados os ensaios RA11 e RA15, realizados na progressão de soldagem ascendente. Para os ensaios na descendente foram selecionados os ensaios RD4, RD7, RD8, RD9, RD11, RD13 e RD14. Mais uma vez, ressalta a concordância dos resultados com a especificação do fabricante (MILLER, 2009) em se utilizar o processo RMD na progressão descendente.

5.3.1.2 Análise macrográfica dos cordões

A partir do ensaio macrográfico realizado nos cordões soldados na progressão de soldagem ascendente e descendente, mostradas nas Figs. 5.47 e 5.48, não foram encontrados indicadores de descontinuidades internas.

Ensaio	Posição		
	Plana	Vertical	Sobre Cabeça
RA11			
RA15			

Figura 5.47 – Macrografia dos ensaios soldados na progressão de soldagem ascendente para o processo RMD (como escala adotar espessura da chapa 5,5 mm).

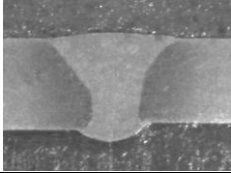
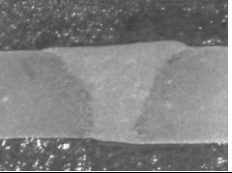
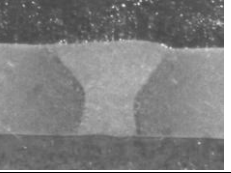
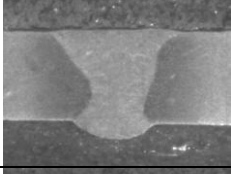
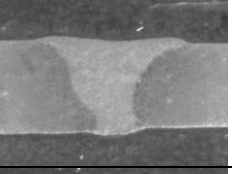

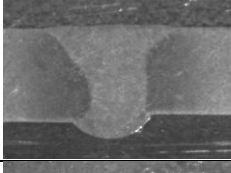
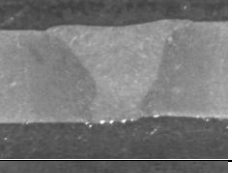
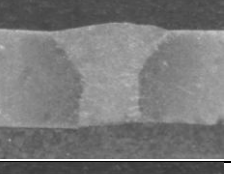
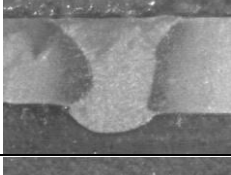
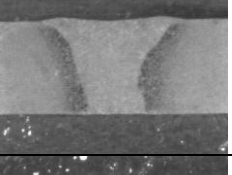
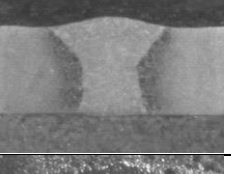
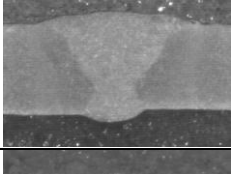
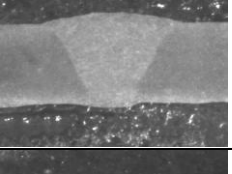
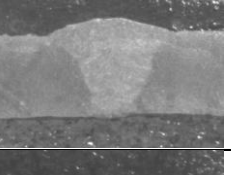
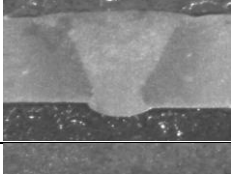
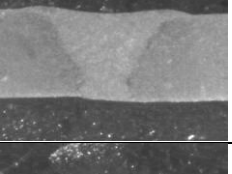
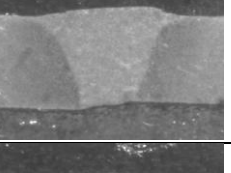
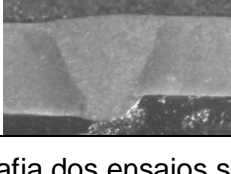

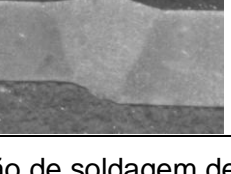
Ensaio	Posição		
	Plana	Vertical	Sobre Cabeça
RD4			
RD7			
RD8			
RD9			
RD11			
RD13			
RD14			

Figura 5.48 – Macrografia dos ensaios soldados na progressão de soldagem descendente para o processo RMD (como escala adotar espessura da chapa 5,5 mm).

5.3.2 Análise geométrica dos cordões

5.3.2.1 Características geométricas dos cordões

Nas Tabs. 5.20 e 5.21 são mostradas as medidas encontradas para a geometria dos cordões selecionados nas etapas anteriores para ambas as progressões. Em seguida, foi feita uma análise parcial desta geometria, em relação à uniformidade, baseada no desvio padrão (DESVPD) das características geométricas.

Inicialmente deve-se destacar que na progressão ascendente apenas dois cordões foram selecionados, o que limitou a análise dos resultados. Nas Figs. 5.49, 5.50 e 5.51, que ilustram os dados da Tab. 5.20, observa-se que o ensaio RA15 apresentou menor penetração, quando comparado ao ensaio RA11. Neste caso, a menor corrente de soldagem do ensaio RA15 (menor valor de velocidade de alimentação), associada ao nível mais alto de *Arc Control*, proporcionou o maior controle da penetração na progressão ascendente.

Tabela 5.20 – Característica geométrica e o desvio padrão (DESVPD) dos cordões soldados na ascendente (reforço da face “RF”, reforço da raiz “RR” e largura da face “LF”) nas distintas posições (plana “P”, vertical “V” e sobrecabeça “SC”) para o RMD.

ENSAIO	POSIÇÃO	P [mm]	V [mm]	SC [mm]	DESVPD [mm]
RA11	RF	1,32	1,11	0,76	0,28
	RR	1,60	0,80	0,35	0,63
	LF	12,40	10,87	10,32	1,08
RA15	RF	1,46	0,90	0,59	0,44
	RR	0,80	0,90	0,34	0,30
	LF	11,91	10,35	10,84	0,80

Tabela 5.21 – Característica geométrica e o desvio padrão (DESVPD) dos cordões soldados na descendente (reforço da face “RF”, reforço da raiz “RR” e largura da face “LF”) nas distintas posições (plana “P”, vertical “V” e sobrecabeça “SC”) para o RMD.

ENSAIO	POSIÇÃO	P [mm]	V [mm]	SC [mm]	DESVPD [mm]
RD4	RF	0,59	0,56	0,52	0,04
	RR	1,30	0,14	0,11	0,68
	LF	11,77	12,37	10,70	0,85
RD7	RF	0,35	0,42	1,25	0,50
	RR	1,39	0,49	0,14	0,64
	LF	11,11	12,81	11,79	0,86
RD8	RF	0,35	0,39	0,73	0,21
	RR	1,72	0,29	0,00	0,92
	LF	11,25	12,14	10,17	0,99
RD9	RF	0,21	0,35	0,94	0,39
	RR	2,06	0,00	0,25	1,12
	LF	11,42	12,26	10,17	1,05
RD11	RF	1,08	0,90	1,36	0,23
	RR	0,84	0,38	0,24	0,31
	LF	13,72	11,53	10,46	1,66
RD13	RF	0,38	0,38	0,80	0,24
	RR	0,95	0,14	0,00	0,51
	LF	13,68	14,52	12,74	0,89
RD14	RF	0,39	0,91	1,02	0,34
	RR	1,23	0,11	0,00	0,68
	LF	11,69	12,61	10,51	1,05

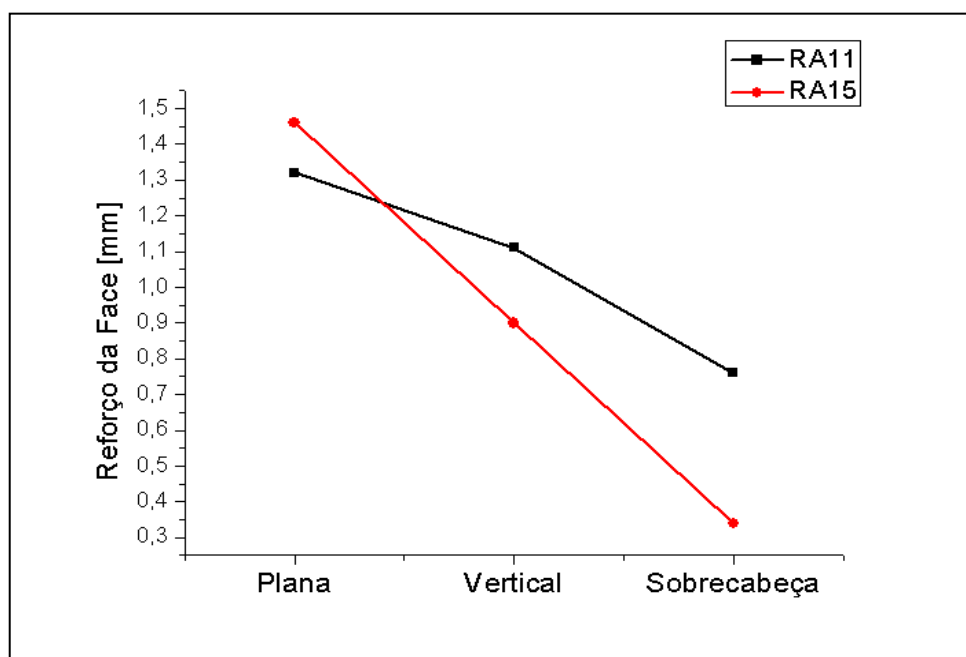


Figura 5.49 – Reforço da face dos cordões soldados na progressão ascendente em cada posição para o processo RMD.

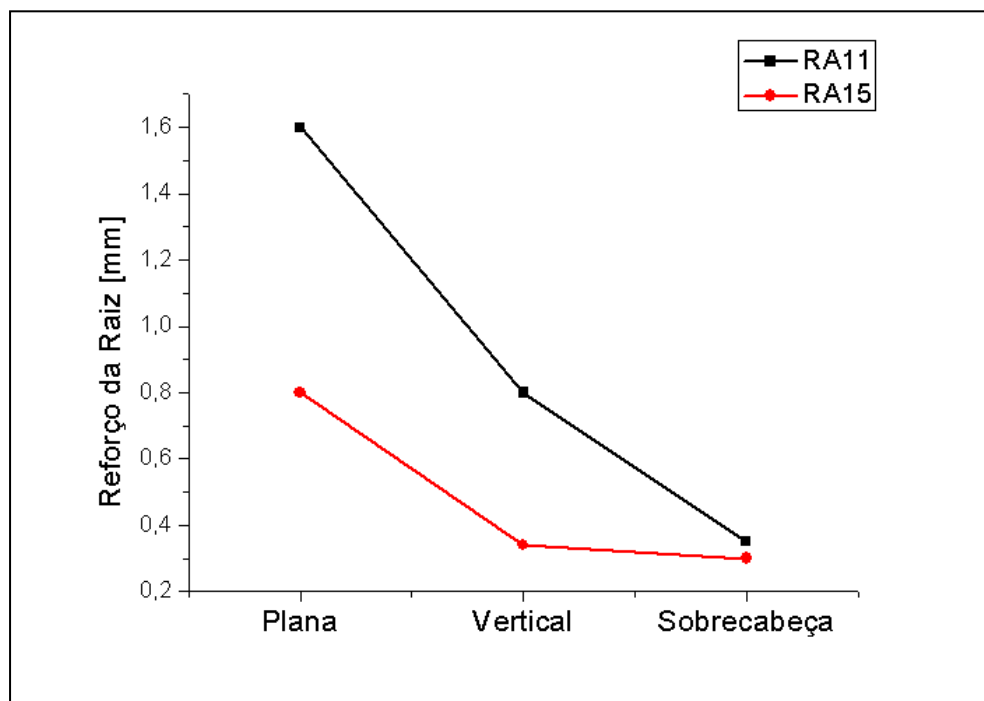


Figura 5.50 – Reforço da raiz dos ensaios soldados na progressão ascendente em cada posição para o processo RMD.

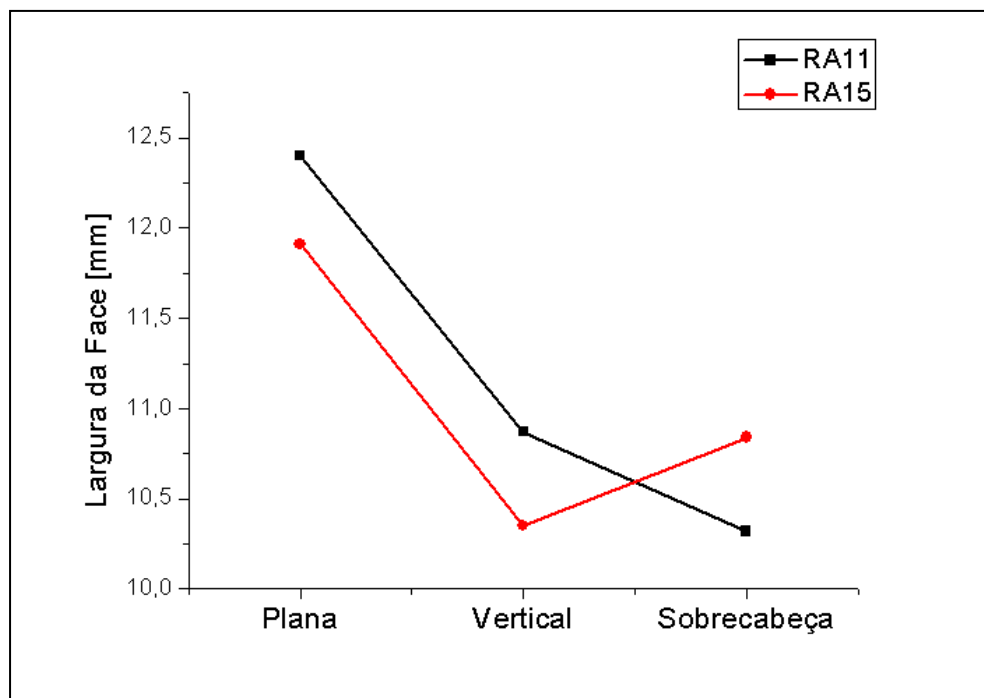


Figura 5.51 – Largura da face dos cordões soldados na progressão ascendente em cada posição para o processo RMD.

Nas Figs. 5.52, 5.53 e 5.54, observa-se que a maioria dos ensaios realizados na descendente segue o mesmo comportamento. A penetração é maior na posição plana e reduz nas posições sobrecabeça e vertical. Assim, na posição plana os cordões tendem a apresentar maior reforço da raiz e uma redução no reforço e na largura da face, enquanto que nas posições vertical e sobrecabeça, o reforço da raiz é menor (menor penetração), mas mantém-se aproximadamente constante, influenciado pelo maior escorrimento do metal fundido. Neste caso, na posição vertical, o metal fundido tende a escorrer para frente da poça, o que aumenta a molhabilidade da junta, favorece o aumento da largura e a redução do reforço da face. Já na posição sobrecabeça, o metal tende a escorrer radialmente para fora da poça, deixando o cordão mais estreito (menor largura) e com reforço da face mais convexo.

Por outro lado, nota-se que alguns ensaios fogem deste comportamento discutido. Na Tab. 5.21 observa-se que o ensaio RD4 apresentou o reforço da face mais uniforme, com o menor desvio padrão. Na Fig. 5.52, observa-se que o ensaio RD4 o reforço da face na posição sobrecabeça se manteve constante, enquanto a maioria tende a aumentar. Este comportamento pode ser justificado pela redução do escorrimento do metal fundido, devido ao menor valor de velocidade de alimentação (menor corrente média), que reduz o tempo de resfriamento da poça de fusão aumentando a estabilidade da poça. Ainda na Fig. 5.52, observa-se que o ensaio RD14 apresentou um aumento na convexidade do cordão na posição vertical, maior reforço da face, próximo ao reforço na posição sobrecabeça. Já o ensaio RD11 apresentou perfil da raiz mais uniforme. Observa-se na Fig. 5.53 que, apesar do maior reforço da raiz nas posições vertical e sobrecabeça, houve um controle maior da penetração na posição plana (menor reforço da raiz), proporcionado pelo aumento da largura do cordão, mostrados nas Fig. 5.54.

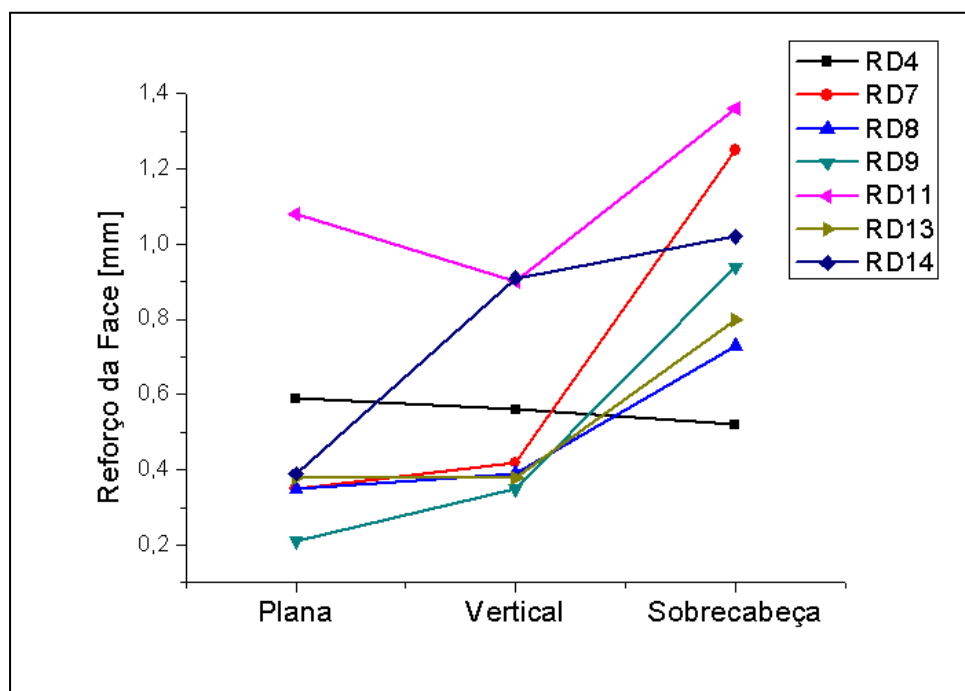


Figura 5.52 – Reforço da face dos cordões soldados na progressão descendente em cada posição para o processo RMD.

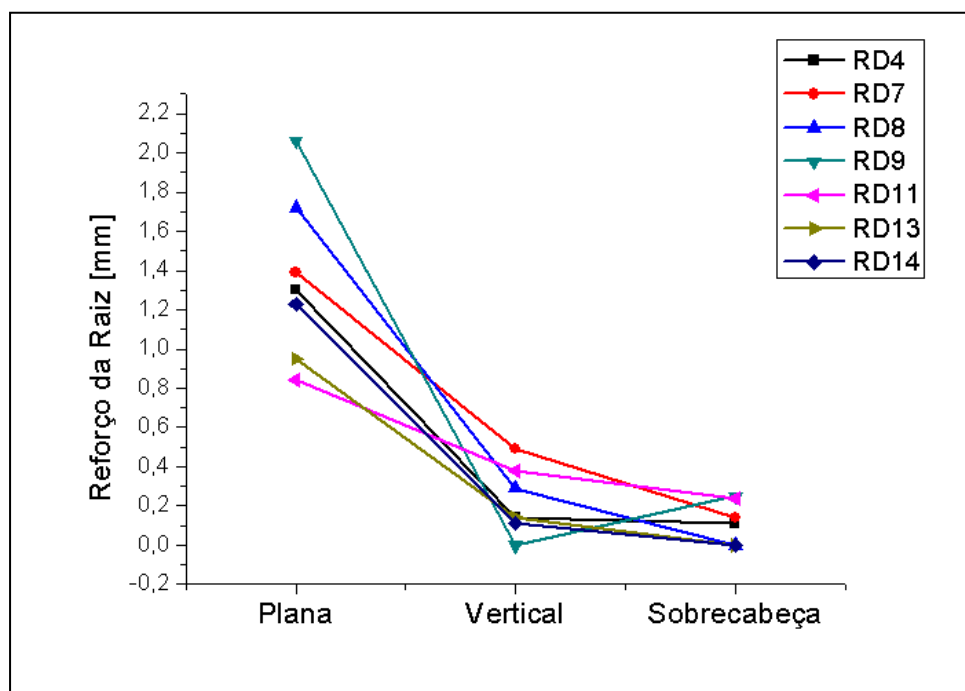


Figura 5.53 – Reforço da raiz dos cordões soldados na progressão descendente em cada posição para o processo RMD.

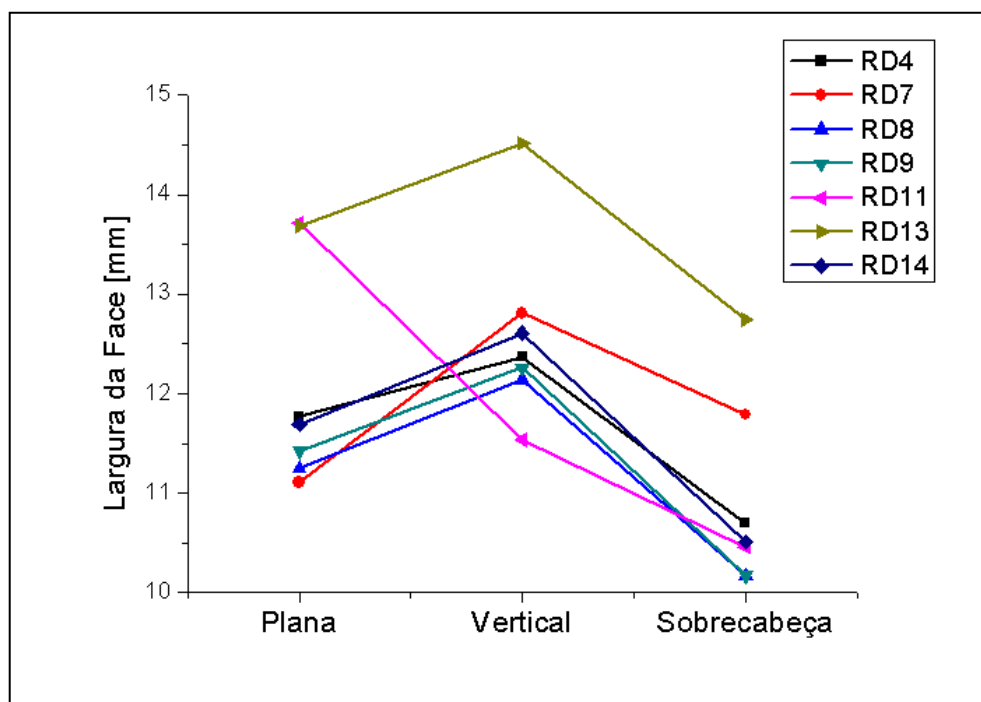


Figura 5.54 – Largura da face dos cordões soldados na progressão descendente em cada posição para o processo RMD.

5.3.2.2 Efeito dos fatores na geometria do cordão

Para analisar o efeito dos fatores na geometria dos cordões, foi realizada análise estatística com base no planejamento experimental proposto para o RMD. Para os casos onde fora observado perfuração da raiz, não sendo possível a execução completa do cordão, atribuiu-se os valores de -2,75 mm para reforço da face (RF), de 4,0 mm para o reforço da raiz (RR) e de 3 mm para largura da face (LF). Nesta premissa de atribuição de valores, ressalta-se que como vários cordões apresentaram defeitos marcantes a análise dos resultados ficou limitada.

A Tab. 5.22 traz os níveis de significância (p) obtidos pela análise de variância global dos fatores para as soldas realizadas da progressão ascendente. Observa-se que a oscilação de tocha afetou significativamente o perfil dos cordões soldados na progressão ascendente, como mostra a Fig. 5.55. Como era esperado, nota-se nesta figura que a oscilação da tocha proporcionou a redução da penetração, onde o aumento da largura do cordão favoreceu a reduziu o reforço da raiz.

Na Tab. 5.22 observa que a velocidade de alimentação apresentou um efeito significativo no reforço da face e da raiz dos cordões, como pode ser observado na Fig. 5.56, onde a velocidade de alimentação favoreceu o aumento da penetração (aumentou o reforço da raiz e reduziu o reforço da face).

Sobre os demais fatores, o *Trim* mostrou afetar significativamente o reforço da face ao interagir com a velocidade de alimentação, como mostrado na Tab. 5.22. Na Fig. 5.57 também nota-se que o nível intermediário do *Trim* (65) apresentou uma tendência em aumentar a largura do cordão. Quanto ao *Arc Control*, não apresentou influência significativa na geometria dos cordões. Contudo, vê-se na Fig. 5.58, que seu nível intermediário (*Arc Control* de 25) apresenta uma redução suave do reforço da raiz e um aumento do reforço e da largura da face.

Tabela 5.22 – Níveis de significância "p" para cada resposta (reforço da face (RF), reforço da raiz (RR) e largura da face (LF)) na ascendente com processo RMD.

Fatores	Respostas		
	RF	RR	LF
Mean/Interc.	0,010051	0,000036	0,000013
Osc (1)	0,050217	0,022830	0,006956
(1)Valim (L)	0,000209	0,007141	-
Valim (Q)	0,049003	0,234156	0,255447
(2)TRIM (L)	0,100175	-	-
TRIM (Q)	-	-	-
(3)ArcCont (L)	-	-	0,182607
ArcCont (Q)	-	-	
1Lby 2L	0,017878	-	-
1Lby 3L	-	-	-
2Lby 3L	-	-	-

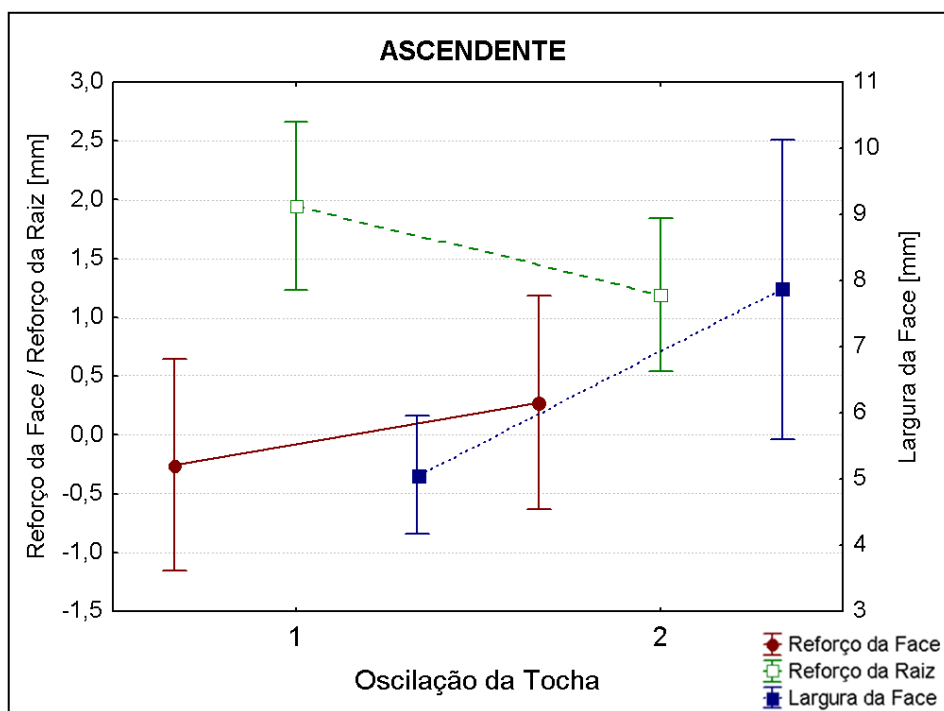


Figura 5.55 – Efeito da oscilação da tocha na geometria dos cordões soldados na ascendente para o processo RMD, onde: “1” é sem oscilação; e “2” é com oscilação.

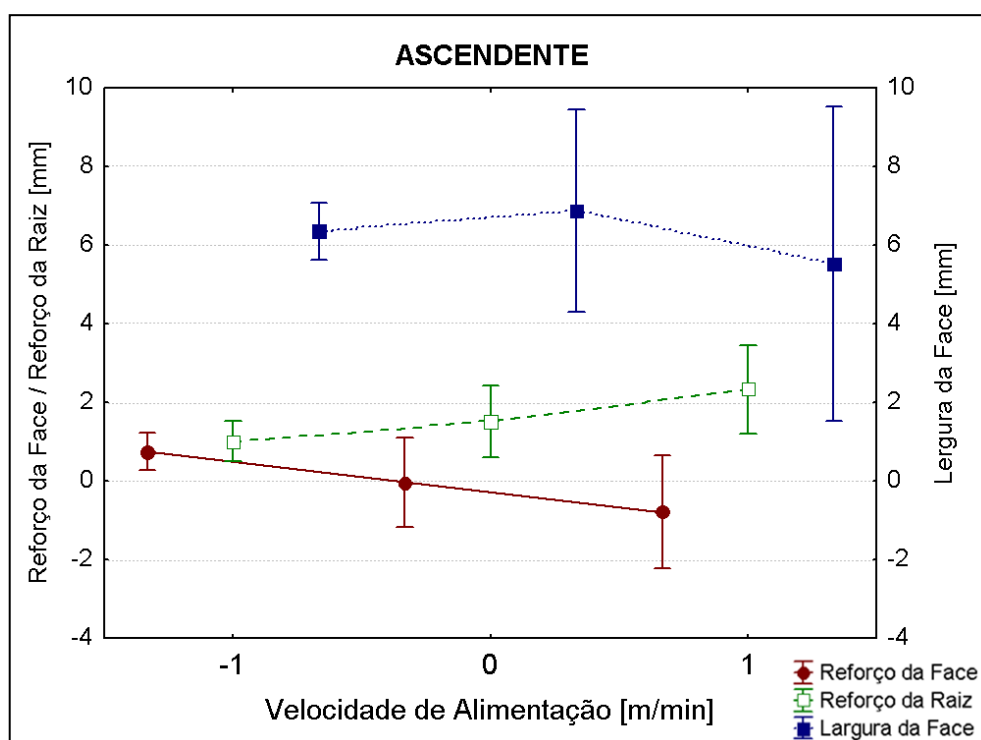


Figura 5.56 – Efeito da velocidade de alimentação na geometria dos cordões soldados na ascendente para o RMD, onde: “-1” é 2,3 m/min; “0” é 2,8 m/min; e “1” é 3,3 m/min.

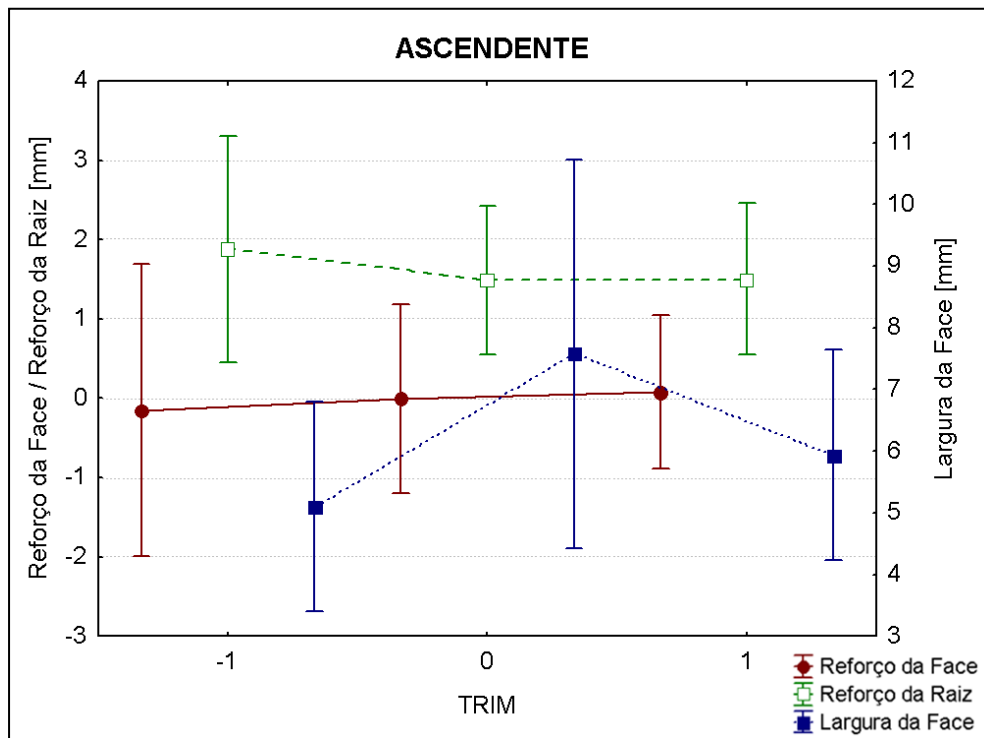


Figura 5.57 – Efeito do *Trim* na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para o processo RMD, onde: “-1” é 50; “0” é 65; e “1” é 80.

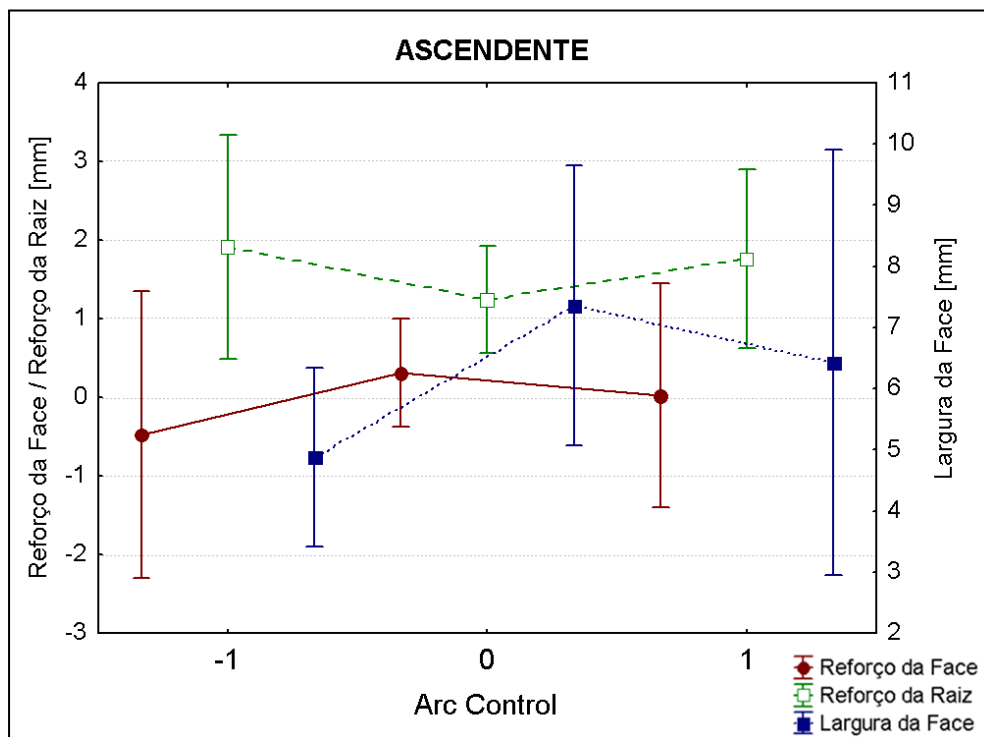


Figura 5.58 – Efeito do *Arc Control* na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente para o processo RMD, onde: “-1” é 0; “0” é 25; e “1” é 50.

Já para as soldas realizadas da progressão descendente, a Tab. 5.23 traz os níveis de significância (p) obtidos pela análise de variância global. Observa-se que tal como na progressão ascendente, a oscilação de tocha apresentou influenciar significativamente na redução da penetração do cordão. Na Fig. 5.59 observa-se que com a tocha oscilando houve uma redução do reforço da raiz e um aumento no reforço e na largura da face.

A velocidade de alimentação apresentou apenas influência no reforço da raiz, como pode ser observado na Tab. 5.23, ou seja, favoreceu o aumento do reforço da raiz, como ilustrado na Fig. 5.60. Ainda assim, observa-se na figura que tanto o reforço quanto a largura da face tendem a aumentar suavemente com o aumento da velocidade de alimentação. Ainda na Tab. 5.23, verifica-se que também houve uma interação entre a velocidade de alimentação e o *Trim* sobre o reforço da raiz. Além disso, o *Trim* altera significativamente a largura da face/cordão, uma vez que ele está relacionado diretamente ao comprimento do arco, onde se observa na Fig. 5.61, que a largura do cordão aumenta com o *Trim*.

Na Fig. 5.62 vê-se que o *Arc Control* influenciou na redução do reforço da face. Além disso, há uma tendência do nível "0" (*Arc Control* de 25) em reduzir a penetração, menor reforço da raiz e maior largura da face do cordão.

Tabela 5.23 – Níveis de significância "p" para cada resposta (reforço da face (RF), reforço da raiz (RR) e largura da face (LF)) soldados na progressão descendente com o processo RMD.

Fatores	Respostas		
	RF	RR	LF
Mean/Interc.	0,000006	0,005379	0,000000
Osc (1)	0,002860	0,002762	0,166590
(1)Valim (L)	0,112348	0,000151	0,231058
Valim (Q)	0,008290	0,017701	-
(2)TRIM (L)	-	-	0,000459
TRIM (Q)	-	-	-
(3)ArcCont (L)	0,026396	-	-
ArcCont (Q)	-	-	-
1Lby 2L	-	0,017716	-
1Lby 3L	-	-	0,188479
2Lby 3L	-	-	-

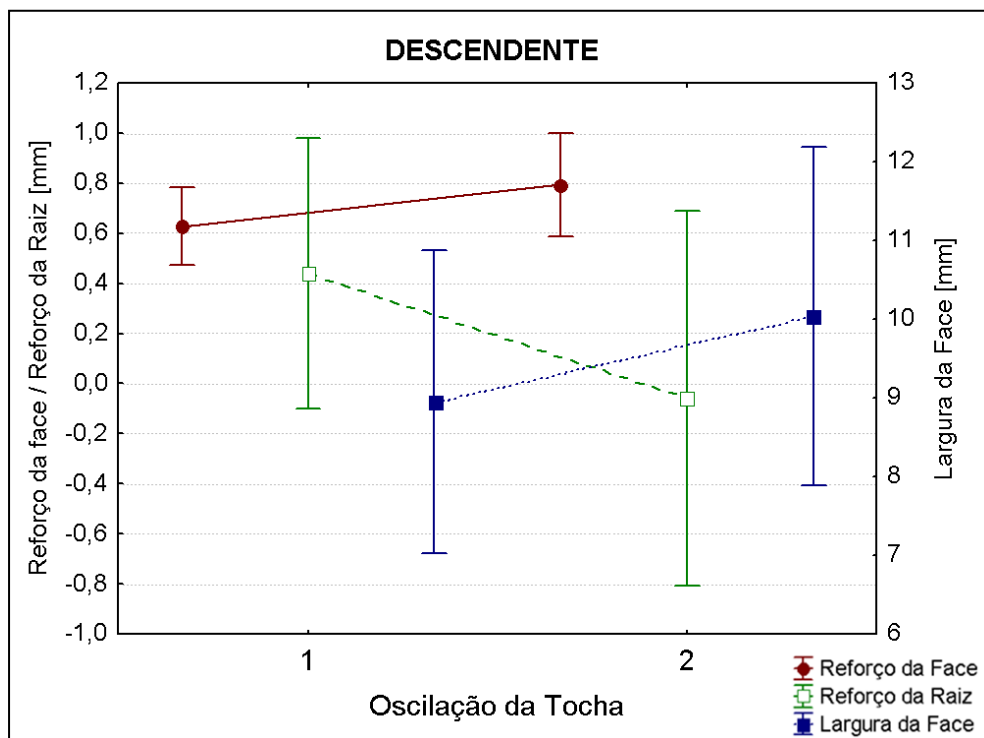


Figura 5.59 – Efeito da oscilação da tocha na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para o processo RMD, onde: “1” é sem oscilação; e “2” é com oscilação.

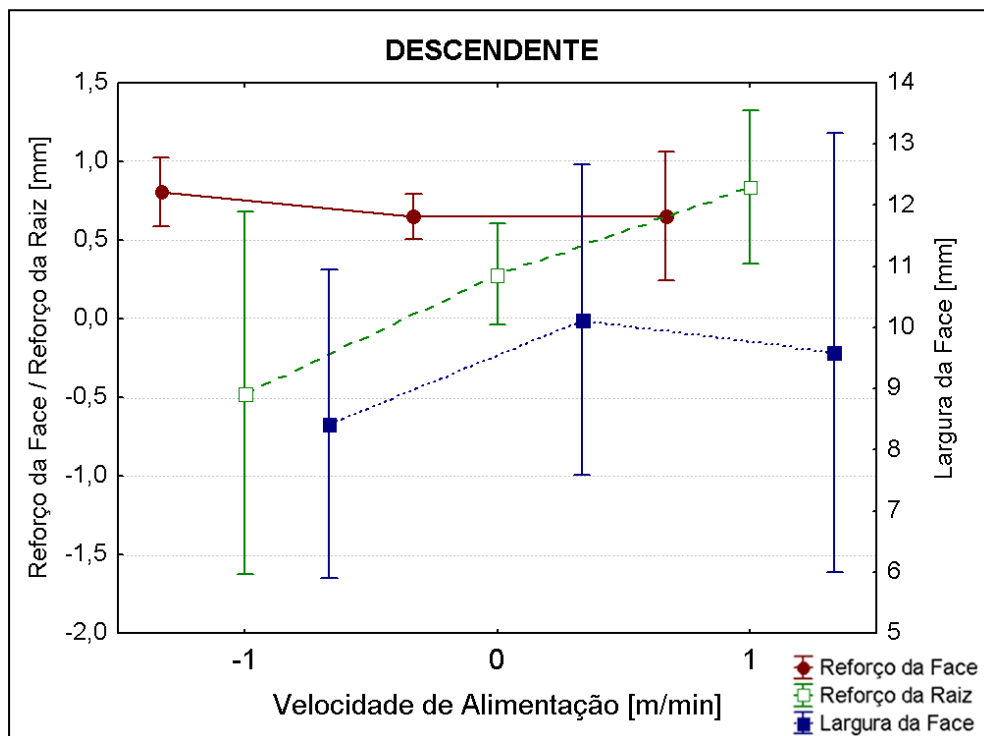


Figura 5.60 – Efeito da velocidade de alimentação na geometria dos cordões soldados na descendente para o RMD, onde: “1” é sem oscilação; e “2” é com oscilação.

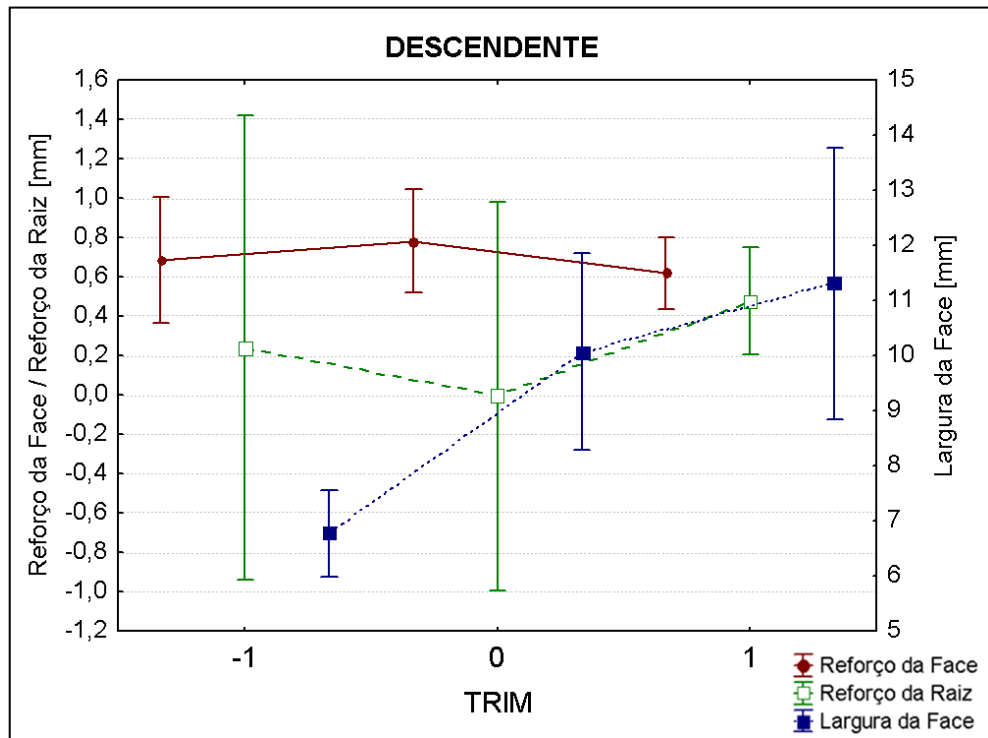


Figura 5.61 – Efeito do *Trim* na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para o processo RMD, onde: “-1” é 50; “0” é 65; e “1” é 80.

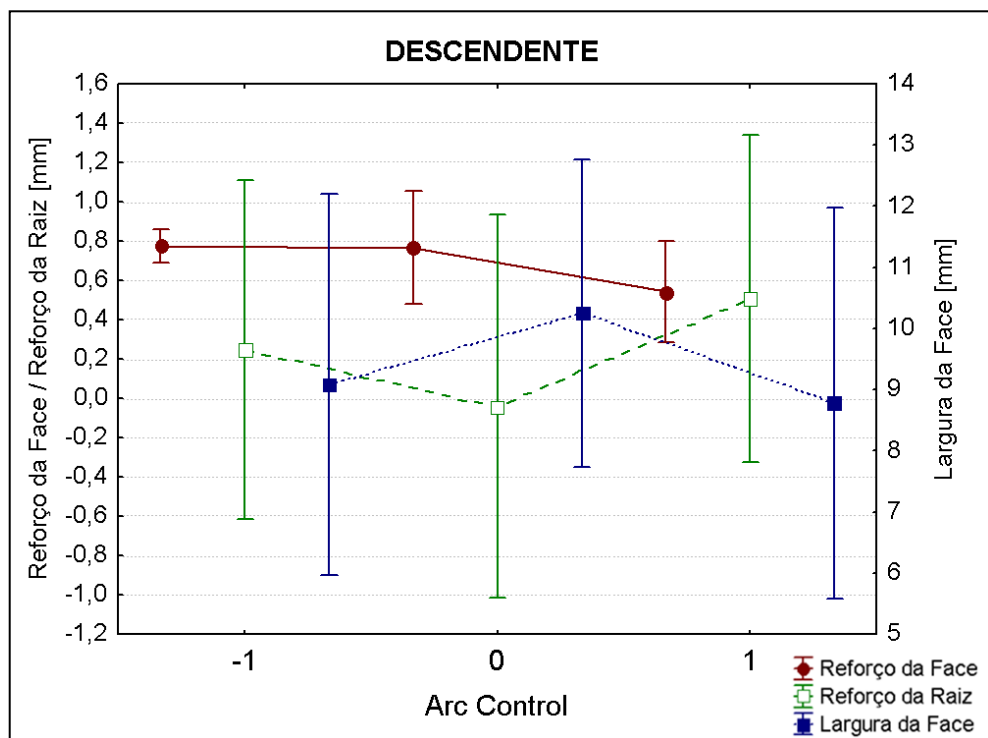


Figura 5.62 – Efeito do *Arc Control* na geometria dos cordões soldados na progressão descendente para o processo RMD, onde: “-1” é 0; “0” é 25; e “1” é 50.

5.4 Processo CMT

Para a execução das soldas com o processo CMT, utilizou-se como parâmetros específicos três níveis de comprimento do arco e de velocidade de alimentação do arame-eletrodo (Tab. 5.24). Para a velocidade de alimentação, como descrito no Capítulo 4, os níveis foram redefinidos para manter a mesma taxa de deposição por comprimento de solda (T_{DC}) para os valores de velocidade de soldagem (12, 15 e 18 cm/min), utilizada nos processos MAG, STT e RMD. Além disto, deve-se ressaltar que todas as soldas foram realizadas com oscilação da tocha. Tendo em vista que a baixa qualidade da solda realizada sem a oscilação da tocha, devido à baixa energia de soldagem do processo CMT.

Os planejamentos experimentais para execução dos ensaios são apresentados nas Tabs. 5.25 e 5.26, para as progressões de soldagem ascendente e descendente, assim como os valores de regulagem e os valores medidos de corrente média (I_M), tensão média (U_M) e energia de soldagem (E_S). Os ensaios foram denominados de “CA” para os ensaios realizados na progressão ascendente e “CD” para a progressão descendente, seguidos do número do ensaio.

Tabela 5.24 – Níveis operacionais para realização dos testes para o processo CMT.

V_A [m/min]	V_S [cm/min]	Comprimento do Arco
3,2	12	-20
4,2	15	-5
5,2	18	10

Tabela 5.25 – Valores medidos para corrente e tensão no processo CMT na progressão ascendente.

Ensaio	Valores de Regulagem		Valores monitorados		
	V_A [m/min]	Comprimento do Arco	I_M [A]	U_M [V]	E_S [J/cm]
CA1	3,2	-20	120,5	10,5	105,44
CA2	3,2	-5	125,0	11,2	116,67
CA3	3,2	10	122,8	11,7	119,73
CA4	4,2	-20	140,1	11,0	102,74
CA5	4,2	-5	144,2	11,6	111,51
CA6	4,2	10	145,5	12,3	119,31
CA7	5,2	-20	161,2	11,5	102,99
CA8	5,2	-5	163,8	12,1	110,11
CA9	5,2	10	168,2	12,8	119,61

Tabela 5.26 – Valores medidos para corrente e tensão no processo CMT na progressão descendente.

Ensaio	Valores de Regulagem		Valores monitorados		
	V_A [m/min]	Comprimento do Arco	I_M [A]	U_M [V]	E_s [J/cm]
CD1	3,2	-20	117,5	10,8	105,75
CD2	3,2	-5	126,8	11,4	120,46
CD3	3,2	10	125,8	11,9	124,75
CD4	4,2	-20	133,6	11,7	104,21
CD5	4,2	-5	146,0	11,8	114,85
CD6	4,2	10	152,2	12,7	128,86
CD7	5,2	-20	161,9	11,7	105,24
CD8	5,2	-5	170,6	12,6	119,42
CD9	5,2	10	177,0	13,2	129,80

5.4.1 Critérios de aceitabilidade

5.4.1.1 Análise visual

Diferentemente dos resultados obtidos nos processos anteriores, no processo CMT os ensaios na progressão ascendente apresentaram resultados melhores, onde a maior capacidade de penetração dos cordões soldados nesta progressão suprimiu o baixo aporte térmico do processo CMT. Pois proporcionou cordões com penetração total e com perfil mais uniformes. Ao passo que, na progressão descendente, mesmo com maior controle do escoamento do metal fundido, verificou-se um grande número de ensaios com presença de descontinuidades.

a) Conjunto Operacional Descartado

As soldas realizadas na progressão ascendente apresentaram resultados satisfatórios, com maior controle da penetração da solda, comparado com a progressão descendente quando aos demais processos analisados (MAG, STT e RMD), sendo descartados apenas os ensaios CA6 e CA7. No caso do ensaio CA6 o cordão apresentou falta de material para enchimento da junta na posição plana, resultado da maior penetração nesta posição (Fig. 5.63). No ensaio CA7, nota-se na Fig. 5.64 que apesar das mordeduras na superfície do

cordão, as quais estão dentro das recomendações da norma adotada, o motivo pelo descarte foi à presença de falta de fusão da raiz na posição vertical, o que pode ser justificado pelo baixo aporte térmico do processo.

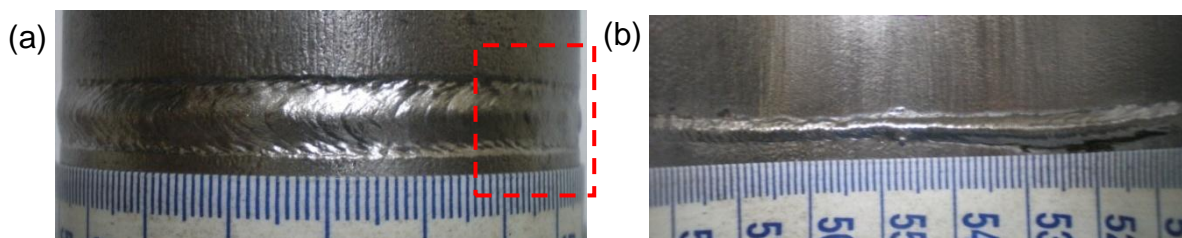


Figura 5.63 – Ensaio CA6: (a) Falta de material de enchimento da junta; e (b) imagem da raiz do cordão, com maior reforço na posição plana.

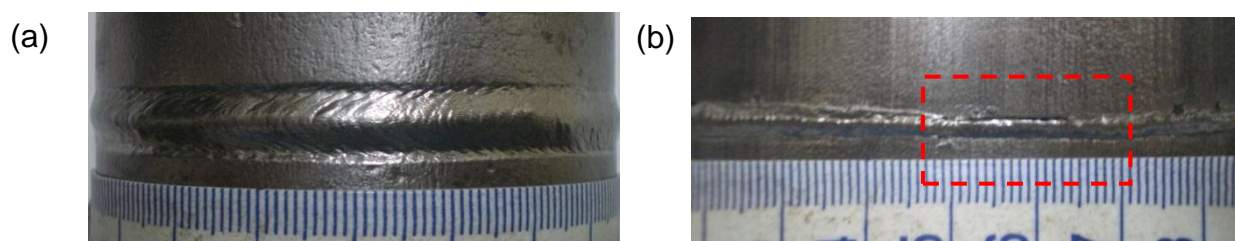






Figura 5.64 – Ensaio CA7: (a) Mordeduras na face; e (b) falta de fusão da raiz.

Para as soldas realizadas na progressão de soldagem descendente, o baixo aporte térmico do processo CMT, proporcionou o maior controle da poça de fusão, reduzindo o escoamento do metal fundido. O que resultou em cordões com perfil da face mais uniforme. Porém, favoreceu a presença de defeitos na raiz dos cordões como falta de penetração na maioria dos ensaios (CD1, CD2, CD3, CD4, CD5 e CD8), como pode ser observado na Fig. 5.65.

	FACE	RAIZ
CD1		
CD2		

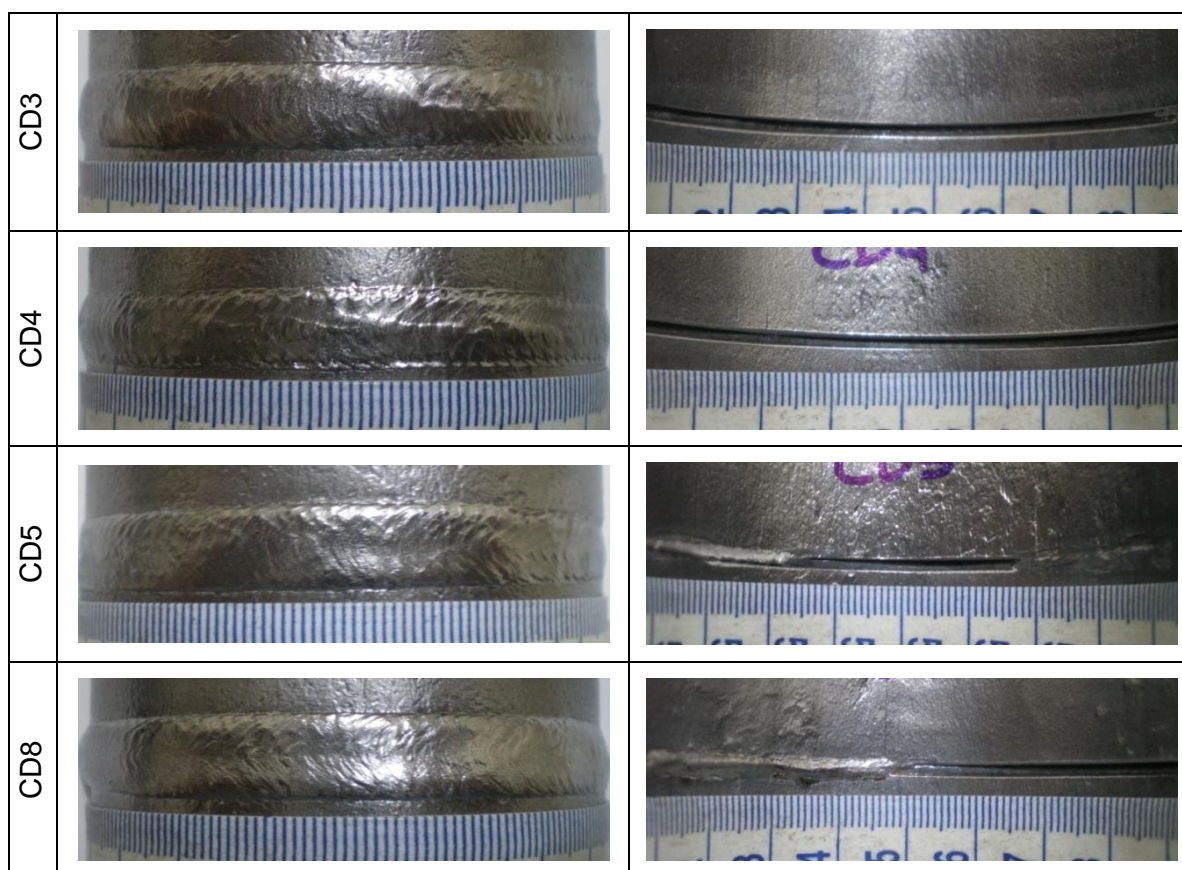


Figura 5.65 – Imagens dos ensaios soldados na progressão descendente descartados por apresentar falta de penetração no processo CMT.

Na Fig. 5.66 observa-se que o ensaio CD6, assim como os ensaios CD7 mostrado na Fig. 5.67, apresentaram cordões com maior penetração, no entanto verificou-se a presença de falta de fusão da raiz.

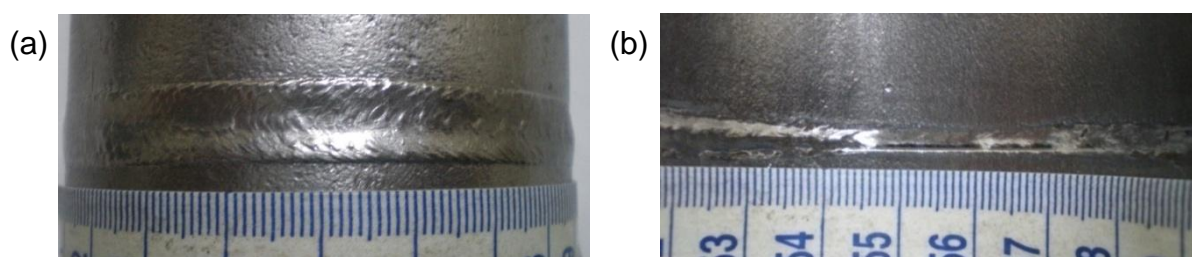


Figura 5.66 – Ensaio CD6: (a) Imagem da face; e (b) falta de fusão da raiz.

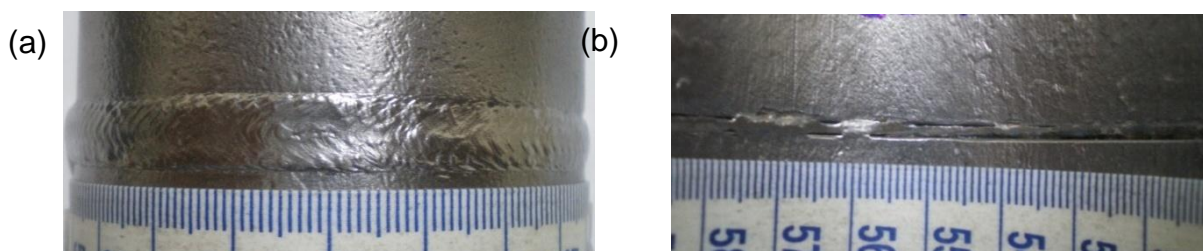


Figura 5.67 – Ensaio CD7: (a) Imagem da face; e (b) falta de fusão da raiz.

b) Conjunto Operacional Sugerido

Para as etapas seguintes foram selecionados os ensaios CA1, CA2, CA3, CA4, CA5, CA8 e CA9, realizados na progressão de soldagem ascendente. Para os ensaios na descendente foi selecionado apenas o ensaio CD9.

5.4.1.2 Análise macrográfica dos cordões

As Figs. 5.68 e 5.69 apresentam as macrografias dos cordões soldados na progressão ascendente e descendente, selecionados na etapa anterior. Em ambas as progressões não foram encontrados indicadores de descontinuidades internas.

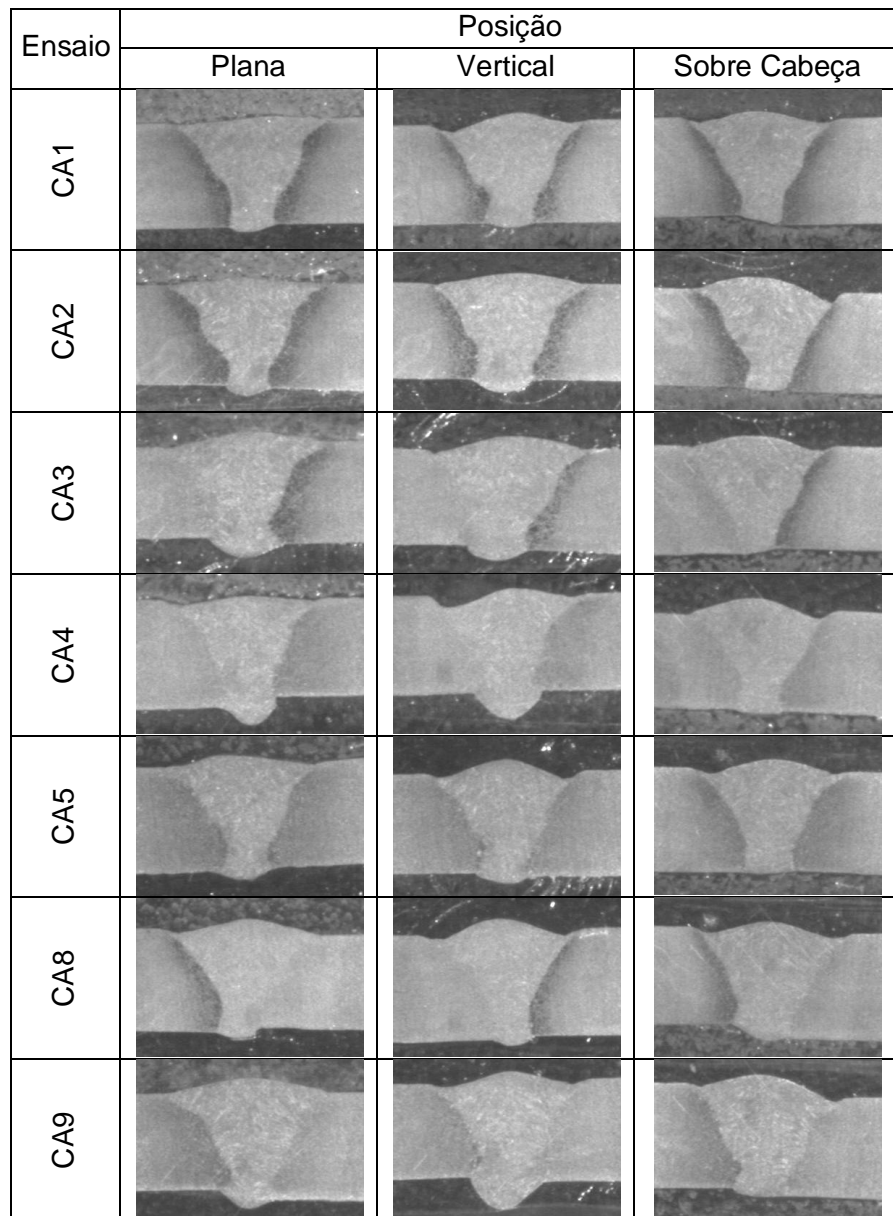


Figura 5.68 – Macrografia dos ensaios soldados na progressão de soldagem descendente (como escala adotar espessura da chapa 5,5 mm).

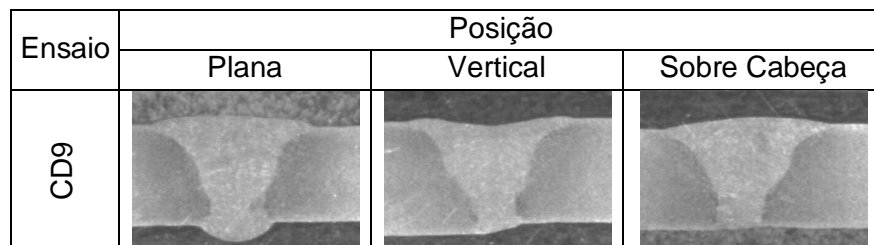


Figura 5.69 – Macrografia dos ensaios soldados na progressão de soldagem ascendente (como escala adotar espessura da chapa 5,5 mm).

5.4.2 Análise geométrica dos cordões

5.4.2.1 Características geométricas dos cordões

Nas Tabs. 5.27 e 5.28 são mostradas as medidas realizadas das características geométricas e o desvio padrão (DESVPD) dos cordões soldados na progressão ascendente e descendente, selecionados a partir dos critérios de aceitabilidade. Em seguida, foi realizada uma análise parcial da geometria dos cordões, em relação sua uniformidade, baseada no desvio padrão das características geométricas.

Tabela 5.27 – Característica geométrica e o desvio padrão (DESVPD) dos cordões soldados na progressão ascendente para o processo CMT (reforço da face “RF”, reforço da raiz “RR” e largura da face “LF”) nas distintas posições (plana “P”, vertical “V” e sobrecabeça “SC”).

ENSAIO	POSIÇÃO	P [mm]	V [mm]	SC [mm]	DESVPD [mm]
CA1	RF	0,25	0,50	0,35	0,13
	RR	0,32	0,30	0,00	0,18
	LF	7,78	7,51	7,08	0,35
CA2	RF	0,32	0,60	0,70	0,20
	RR	0,50	0,70	0,14	0,28
	LF	8,17	7,54	7,00	0,59
CA3	RF	0,60	0,60	0,50	0,06
	RR	0,80	0,60	0,10	0,36
	LF	8,20	7,60	6,60	0,81
CA4	RF	0,18	0,35	0,74	0,29
	RR	1,15	1,35	0,18	0,63
	LF	7,60	7,42	6,50	0,59
CA5	RF	0,70	0,60	0,49	0,10
	RR	0,50	0,35	0,15	0,18
	LF	7,70	6,90	7,40	0,40
CA8	RF	0,65	0,80	0,40	0,20
	RR	0,40	0,40	0,30	0,06
	LF	7,90	7,90	7,30	0,35
CA9	RF	0,80	0,60	0,75	0,10
	RR	0,80	1,50	0,40	0,56
	LF	8,50	8,10	7,60	0,45

Tabela 5.28 – Característica geométrica e o desvio padrão (DESVPD) dos cordões soldados na progressão descendente para processo CMT (reforço da face “RF”, reforço da raiz “RR” e largura da face “LF”) nas distintas posições (plana “P”, vertical “V” e sobrecabeça “SC”).

ENSAIO	POSIÇÃO	P [mm]	V [mm]	SC [mm]	DESVPD [mm]
CD9	RF	0,50	0,20	0,50	0,17
	RR	0,90	0,10	0,00	0,49
	LF	8,40	8,20	8,80	0,31

Inicialmente deve-se ressaltar a análise da uniformidade do cordão foi realizada apenas com os ensaios na progressão de soldagem ascendente, visto que, na progressão descendente foi selecionado apenas um ensaio.

Nas Figs. 5.70, 5.71 e 5.72 são representados o comportamento dos ensaios realizados na progressão ascendente, cujos dados são apresentados na Tab. 5.28. Na Fig. 5.70, observa-se que os cordões apresentaram um perfil do reforço da face muito irregular. No ensaio CA3, o menor valor de velocidade de alimentação (4,2 m/min), associada ao maior comprimento de arco (10) proporcionou um perfil da face mais uniforme (menor desvio padrão).

Por outro lado, nas Figs. 5.71 e 5.72 observa-se que os ensaios apresentaram um comportamento mais constante no reforço da raiz e largura da face. Nota-se que o ensaio CA8 apresentou maior uniformidade tanto no reforço da raiz quanto na largura do cordão, apesar da maior intensidade de corrente (maior valor de velocidade de alimentação). Esta maior necessidade de corrente corrobora para a afirmação de que o processo CMT possui um aporte térmico menor do que os processos investigados neste trabalho. Ainda na Fig. 5.72 vê-se que o ensaio CA1 com menor valor de velocidade de alimentação e de comprimento de arco também apresentou uma largura de cordão mais uniforme.

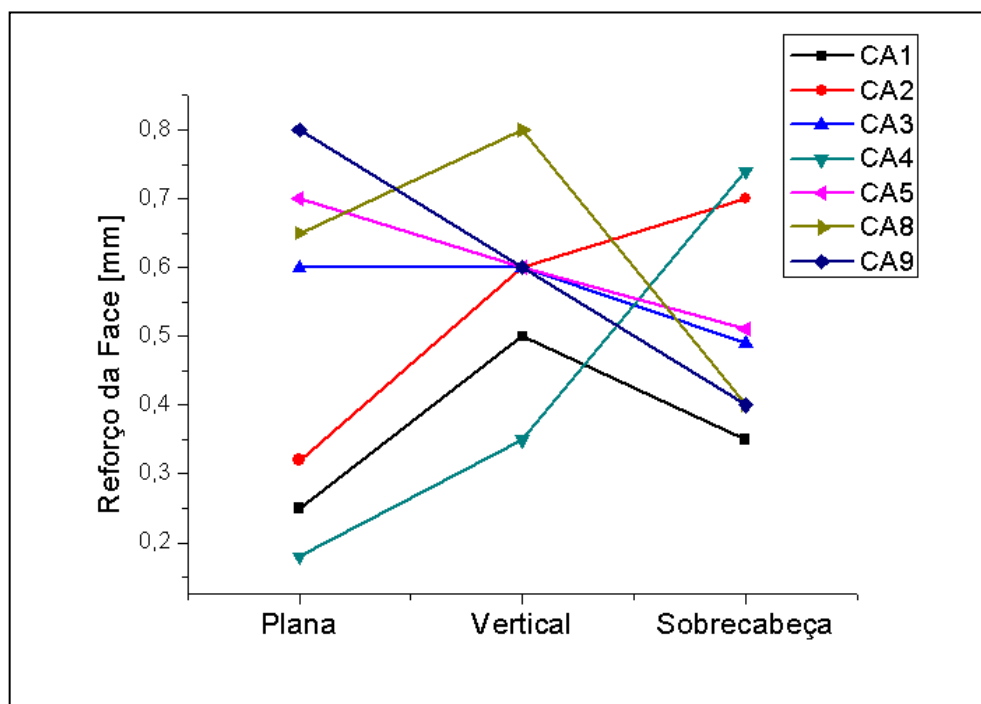


Figura 5.70 – Reforço da face dos cordões soldados na progressão ascendente em cada posição (plana, vertical e sobrecabeça) para o processo CMT.

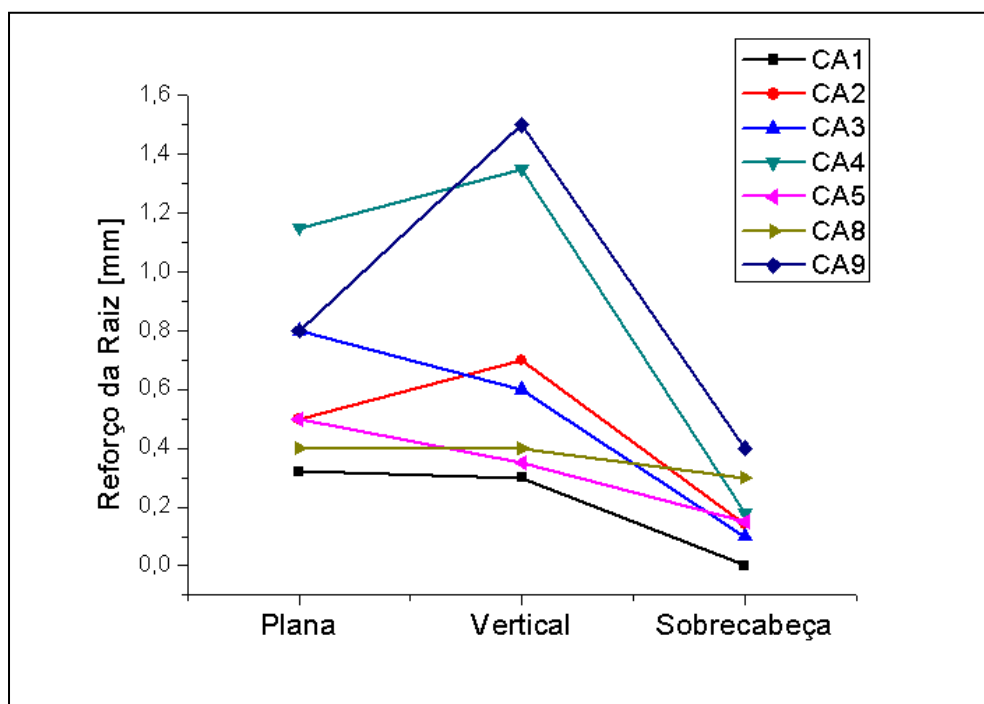


Figura 5.71 – Reforço da raiz dos ensaios soldados na progressão ascendente em cada posição (plana, vertical e sobrecabeça) para o processo CMT.

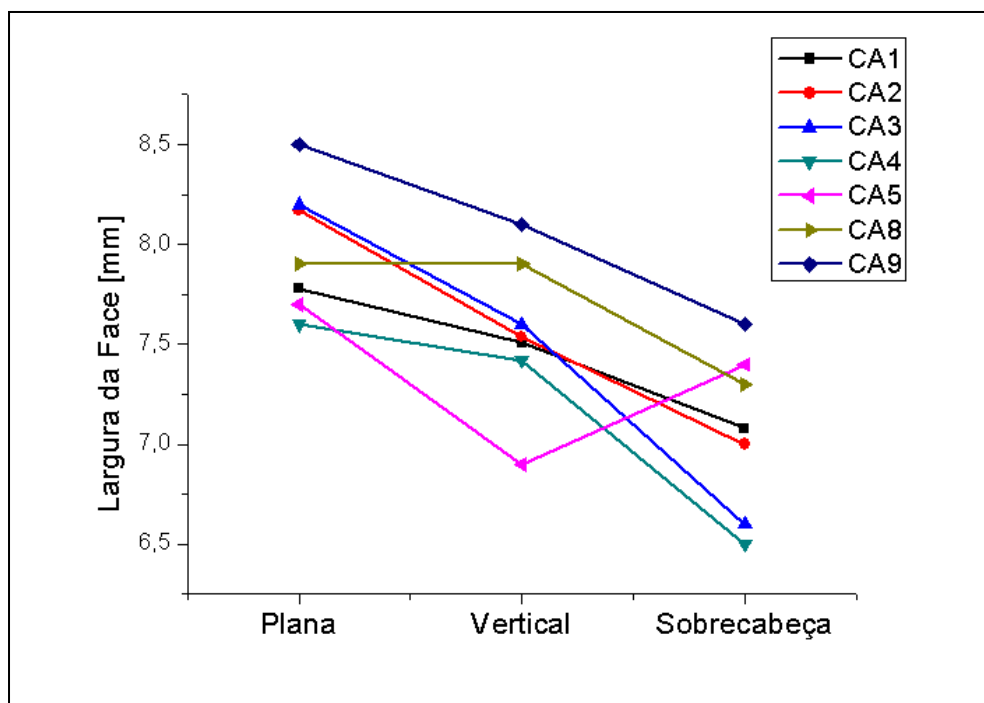


Figura 5.72 – Largura da face dos cordões soldados na progressão ascendente em cada posição (plana, vertical e sobrecabeça) para o processo CMT.

5.4.2.2 Efeito dos fatores na geometria do cordão

As Tabs. 5.29 e 5.30 trazem os níveis de significância (p) obtidos pela análise de variância global dos fatores para as soldas realizadas da progressão ascendente e na descendente, respectivamente.

Observa-se na Tab. 5.29 que para a progressão ascendente não houve influência significativa dos fatores (velocidade de alimentação e comprimento do arco) na geometria do cordão. Porém, observa-se uma tendência da velocidade de alimentação em aumentar a penetração do cordão, ou seja, a penetração aumenta do nível -1 (3,2 m/min) para o nível 0 (4,2 m/min) e em seguida se mantém constante, como mostrado na Fig. 5.75. Quanto ao comprimento do arco, vê-se na Fig. 5.74, que seu nível intermediário (comprimento do arco de -5) apresentou uma redução do reforço da raiz, enquanto que a largura do cordão tende a aumentar com o comprimento do arco.

Tabela 5.29 – Níveis de significância "p" para cada resposta (reforço da face (RF), reforço da raiz (RR) e largura da face (LF)) soldados na progressão ascendente com processo CMT.

Fatores	Respostas		
	RF	RR	LF
Mean/Interc.	0,000019	0,000229	0,000000
(1)Valim (L)	0,111914	0,214446	0,226796
Valim (Q)	0,112200	-	-
(2)C.Arco (L)	-	-	0,058519
C.Arco (Q)	-	0,145150	-

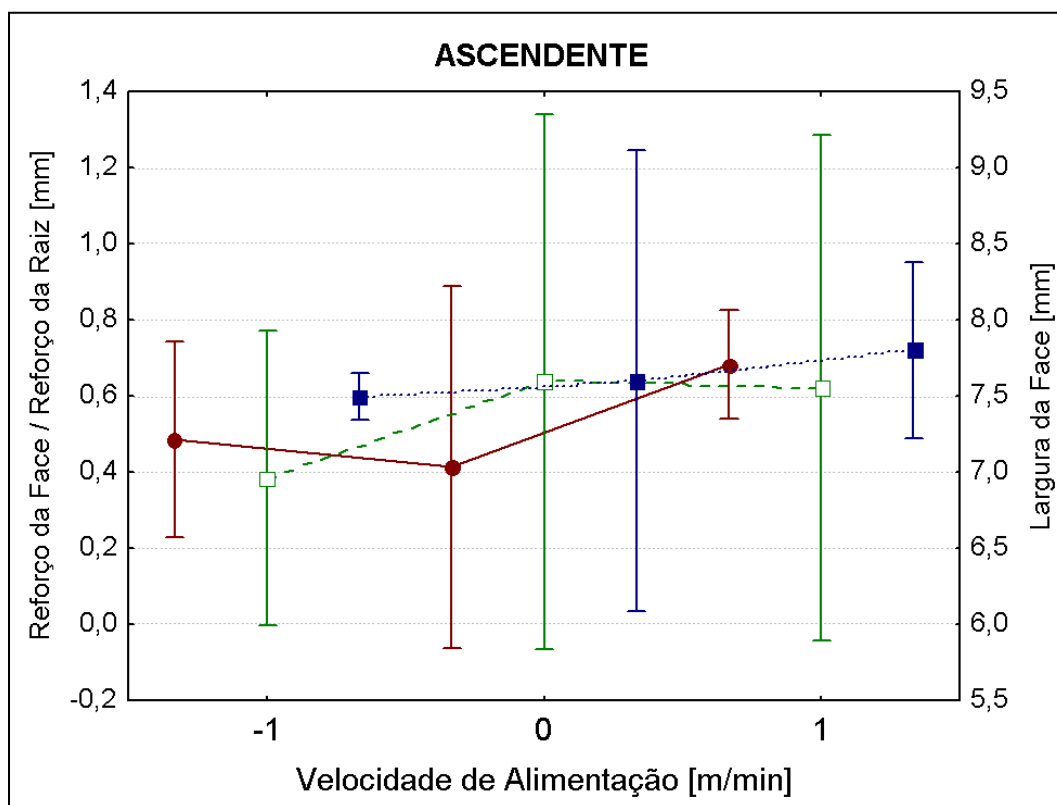


Figura 5.73 – Efeito da velocidade de alimentação na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente pelo CMT, onde: “-1” é 3,2 m/min; “0” é 4,2 m/min; e “1” é 5,2 m/min.

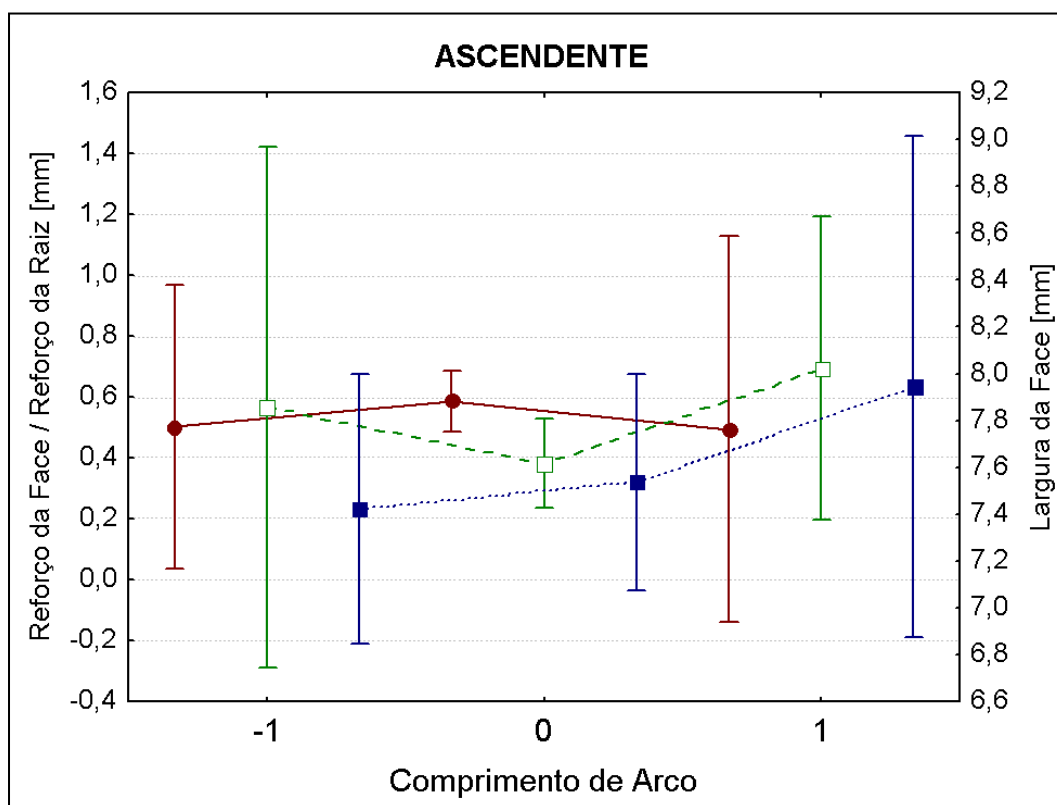


Figura 5.74 – Efeito do comprimento de arco na geometria dos cordões soldados na progressão ascendente pelo CMT, onde: “-1” é -20; “0” é -5; e “1” é 10.

Para as soldas realizadas na descendente (Tab. 5.30), verifica-se nas Fig. 5.75, que o reforço da raiz apresentou uma tendência em aumentar tanto com a velocidade de alimentação, quanto com o comprimento do arco. Por outro lado, o reforço da face se manteve aproximadamente constante para ambos os fatores. Este resultado corrobora com o que foi avaliado durante a análise visual, cordões com perfil da face mais uniforme. Na Tab. 5.30 observa-se que a largura do cordão é afetada significativamente pelo comprimento do arco. Como pode ser verificado na Fig 5.76, a largura da face aumenta com o comprimento do arco.

Tabela 5.30 – Níveis de significância "p" para cada resposta (reforço da face (RF), reforço da raiz (RR) e largura da face (LF)) soldados na progressão descendente com o processo CMT.

Fatores	Respostas		
	RF	RR	LF
Mean/Interc.	0,000199	0,022663	0,000000
(1)Valim (L)	0,482147	0,228213	-
Valim (Q)	-	-	0,180062
(2)C.Arco (L)	0,448384	0,220842	0,020103
C.Arco (Q)	-	-	-

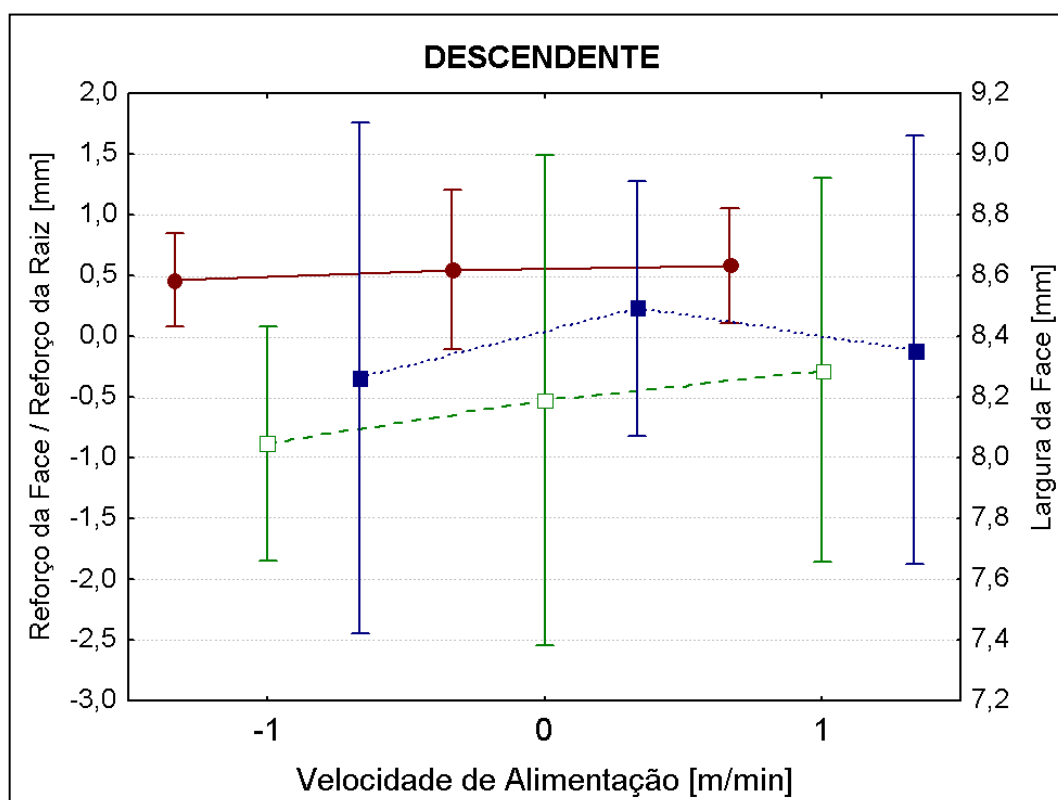


Figura 5.75 – Efeito da velocidade de alimentação na geometria dos cordões soldados na progressão descendente pelo CMT, onde: “-1” é 3,2 m/min; “0” é 4,2 m/min; e “1” é 5,2 m/min.

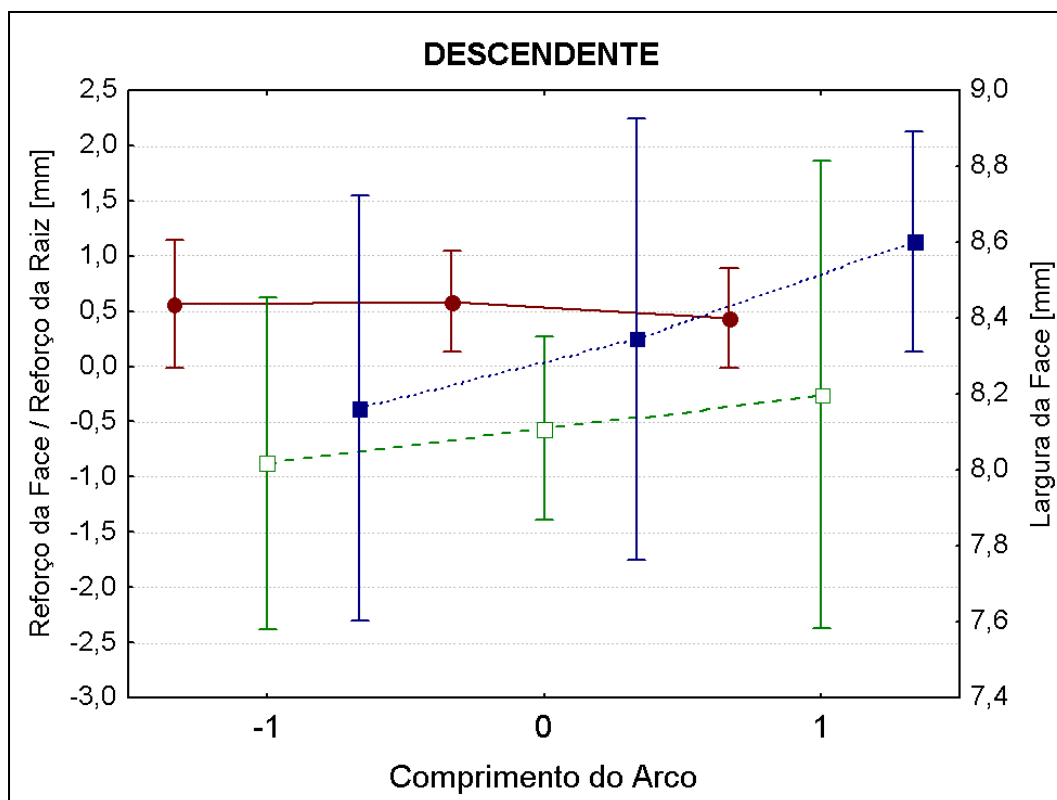


Figura 5.76 – Efeito do comprimento do arco na geometria dos cordões soldados na progressão descendente pelo CMT, onde: “-1” é -20; “0” é -5; e “1” é 10.

5.4.3 Verificação de novo conjunto operacional

Uma vez que o processo CMT se destacou pelo baixo aporte térmico proporcionado com um menor envelope operacional sugerido, especialmente para a progressão descendente, foi proposto e executado um novo planejamento experimental. O objetivo deste novo planejamento foi trabalhar com maiores velocidades de alimentação, com a expectativa de se alcançar maiores valores de penetração na descendente, dado o bom controle desta penetração no CMT. Assim, a partir de ensaios preliminares, foram adotados novos valores de velocidade de alimentação como mostrado na Tab. 5.31. Deve-se ressaltar que, diferentemente do adotado em todo trabalho, a proporção entre velocidade de alimentação e de soldagem foi alterada, de forma a se aumentar o volume de material depositado. Esta abordagem foi escolhida como uma tentativa de se aumentar a quantidade de material disponível para reforço de raiz, sem que houvesse falta de enchimento na face.

Tabela 5.31 – Planejamento experimental dos ensaios para o processo CMT para valores maiores de velocidade de alimentação.

Ensaio	Progressão de Soldagem	V_A [m/min]	Comprimento de Arco
10	Ascendente/Descendente	4,2	-20
11		4,2	-5
12		4,2	10
13		5,2	-20
14		5,2	-5
15		5,2	10
16		6,2	-20
17		6,2	-5
18		6,2	10

De forma geral, os resultados obtidos com os novos valores de velocidade de alimentação apresentaram um aumento da penetração dos cordões na progressão ascendente quanto na descendente, como era esperado, uma vez que também houve aumento da corrente de soldagem.

Contudo, para a progressão ascendente o aumento da penetração resultou na ocorrência da perfuração da raiz, defeito este que não foi observado no planejamento experimental analisado anteriormente. É o caso dos ensaios CA15, CA17 e CA18 mostrados nas Figs. 5.77, 5.78 e 5.79, onde se observa que não foi possível completar a execução do cordão. Além disto, o ensaio CA16 também foi descartado, pois apresentou falta de material para enchimento da junta e falta de fusão da raiz.

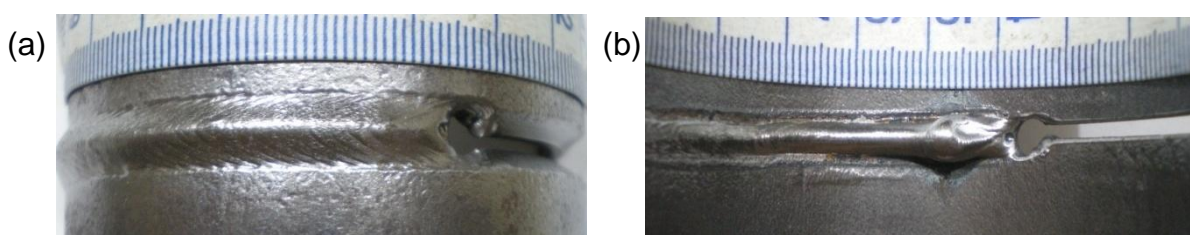


Figura 5.77 – Ensaio CA15.

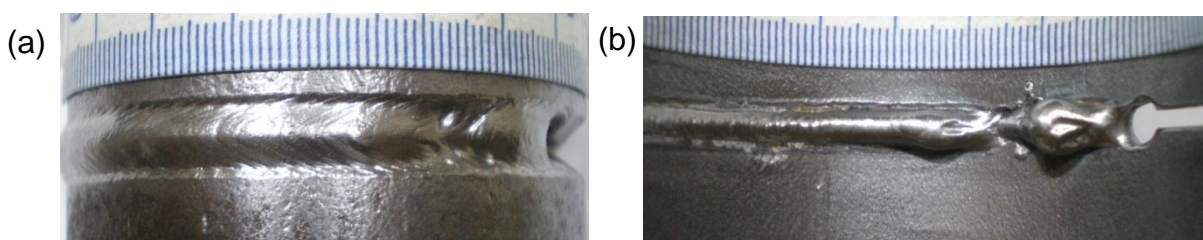


Figura 5.78 – Ensaio CA17.

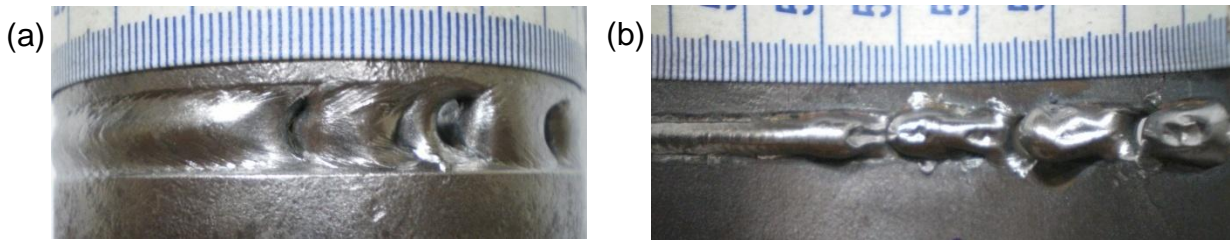


Figura 5.79 – Ensaio CA18.

Na progressão descendente o aumento da penetração não foi suficiente para evitar defeitos observados no planejamento anterior, tais como a falta de fusão da raiz e a falta penetração do cordão, como pode ser verificado na Fig. 5.80.

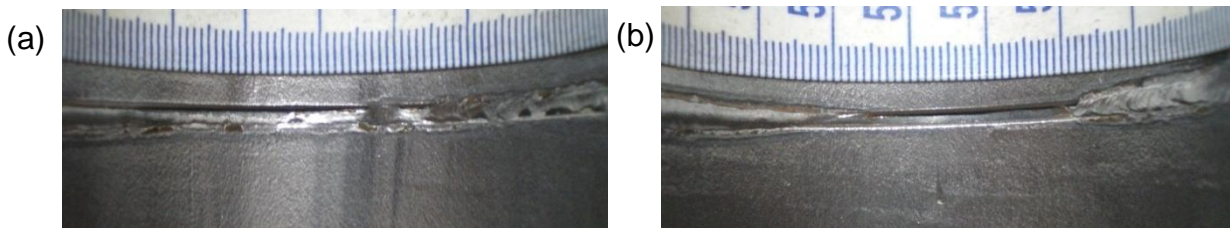


Figura 5.80 – (a) Ensaio CD14; e (b) ensaio CD17.

Neste contexto, pela análise visual o número de ensaios selecionados na progressão ascendente foi inferior ao planejamento anterior, sendo selecionados os ensaios CA10, CA11, CA12, CA13 e CA14. Para os ensaios na descendente foram selecionados os ensaios CD15 e CD18, ainda assim, manteve-se um grande número de ensaios descartados.

Conclui-se desta tentativa de se aumentar o envelope de trabalho para a progressão descendente, que os resultados não foram muito satisfatórios em termos de expansão deste envelope. Assim, irá se adotar, para a análise final do próximo item, o envelope de trabalho do CMT anteriormente discutido.

5.5 Envelopes operacionais finais

As Figs. 5.81 e 5.82 apresentam os envelopes operacionais encontrados para cada processo utilizado para a soldagem nas progressões ascendente e descendente, a partir da relação de tensão de soldagem e os valores reais de velocidade de alimentação do arame (na união de dutos em passe único).

Inicialmente pode ser feita uma análise quanto ao número de ensaios que compõe o envelope operacional de cada processo, na progressão ascendente e descendente. Verifica-se nas figuras que, para o MAG curto-circuito convencional, manteve-se um envelope operacional constante para ambas as progressões, com 5 ensaios.

Para o processo STT, verifica-se na Fig. 5.82 que este apresentou o envelope operacional mais robusto na progressão descendente, com 13 ensaios. Já para a ascendente foi possível estabelecer o envelope operacional com 5 ensaios.

Quanto ao processo RMD, este apresentou o menor envelope operacional na ascendente com apenas 2 ensaios, ao passo que na descendente este número sobe para 8 ensaios. Isto é uma comprovação direta das recomendações do fabricante, que indica seu uso para a progressão descendente.

Por outro lado, o processo CMT apresentou um envelope mais robusto para a progressão ascendente, com 7 ensaios, enquanto que na descendente apenas 1 ensaio proporcionou um bom cordão.

Analisando a relação entre a faixa trabalho da tensão e os níveis de velocidade de alimentação (nível mais alto ao nível mais baixo), verifica-se nas Figs. 5.81 e 5.82 que o curto-circuito convencional trabalha em média num valor mais alto de tensão de soldagem quando comparado com outros processos. Quanto à velocidade de alimentação, na progressão ascendente utiliza-se menores níveis, o que favorece o melhor controle da penetração, já que nesta progressão tem maior capacidade de penetração do cordão. Por outro lado, na descendente, onde a penetração do cordão tende a ser menor, utiliza-se níveis mais elevados de velocidade de alimentação.

Observa-se que o processo STT possui uma faixa trabalho maior de tensão de soldagem. Neste caso, esta faixa de trabalho é maior na progressão descendente, ou seja, a utilização do processo STT na descendente possibilita a realização de soldas com penetração total com diferentes níveis de tensão e de velocidade de alimentação. A faixa de trabalho da tensão é maior para a velocidade de alimentação de 2,8 m/min.

Já o processo RMD, na progressão ascendente mostrou-se bastante limitado, com um valor constante de tensão, para níveis mais altos de velocidade de alimentação. Porém, observa-se na Fig. 5.84 que na descendente a faixa de trabalho da tensão tende a aumentar com a velocidade de alimentação.

Quanto ao processo CMT, observa-se que os valores de tensão de soldagem são muito mais baixos, o que é um indicativo do baixo aporte térmico do processo. Por outro lado, é possível realizar soldas na progressão ascendente com maior controle da penetração e com perfil da raiz mais uniforme, para todos os níveis de velocidade de

alimentação. Ao passo que, na descendente a realização de cordões de qualidade mostrou-se bastante limitado, apenas com tensão 13 V e de velocidade de alimentação de 3,3 m/min.

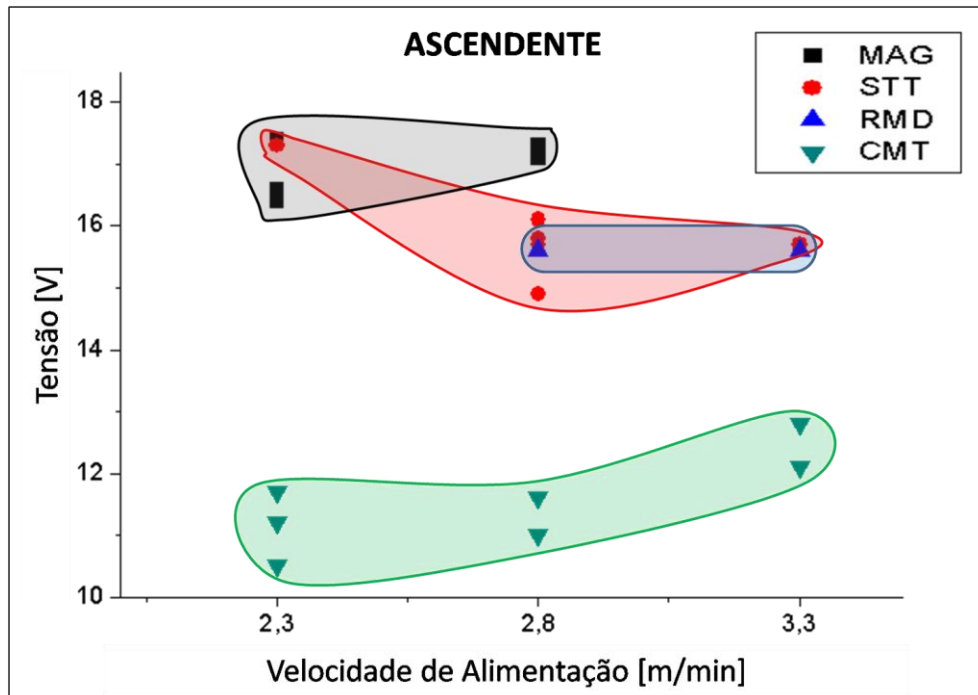


Figura 5.81 – Envelope operacional dos processos utilizados (MAG, STT, RMD e CMT) na progressão de soldagem ascendente.

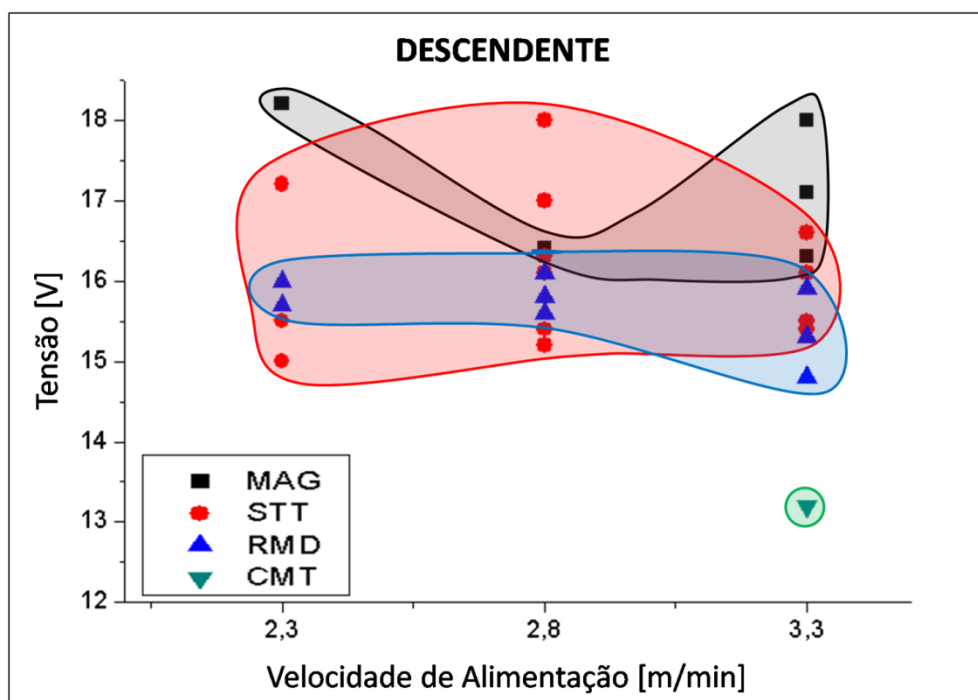


Figura 5.82 – Envelope operacional dos processos utilizados (MAG, STT, RMD e CMT) na progressão de soldagem descendente.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

A partir do objetivo proposto de estabelecer vantagens e limites operacionais dos processos MAG curto-circuito convencional e controlados (STT, RMD e CMT), visando a união de dutos de pequeno diâmetro e parede fina com passe único, é possível concluir que:

a) Relacionado aos critérios de aceitabilidade dos cordões soldados na progressão de soldagem ascendente:

- Os cordões feitos nesta progressão apresentam maior capacidade de penetração, embora sujeitos a defeitos como falta de material para enchimento, mordeduras e perfuração da raiz (para o processo MAG, STT, RMD e CMT);
- Para o controle da penetração dos cordões nos processos curto-circuito convencional, STT e RMD, deve-se selecionar menores níveis de velocidade de alimentação e/ou utilizar oscilação da tocha;
- Para o processo RMD, o menor nível do parâmetro *Trim* proporcionou um arco mais curto, o que resultou em cordões mais estreitos e com falta de fusão nas bordas da junta;
- Para o processo CMT, os cordões apresentaram maior controle da penetração resultando em perfil da raiz mais uniforme, quando comparado com os demais processos analisados;
- Durante o ensaio macrográfico dos cordões selecionados visualmente, não foram encontradas descontinuidades internas (porosidade, inclusões, falta de fusão e trincas).

b) Relacionado aos critérios de aceitabilidade dos cordões soldados na progressão de soldagem descendente:

- Os resultados obtidos estão de acordo com a recomendação do fabricante, onde as soldas com os processos STT e RMD devem ser realizadas na progressão descendente;
- Os cordões em geral apresentaram uma tendência maior ao escorrimento do metal fundido, o que contribuiu para o controle da penetração nesta progressão, aumentando a largura do cordão e reduzindo o reforço da raiz;
- No processo MAG convencional, para o controle da poça de fusão (reduzir o escorrimento da poça de fusão) deve-se utilizar maiores níveis de velocidade de soldagem, pode-se utilizar também a tocha com ângulo de ataque negativo (puxando), na medida em que promove o aumento da penetração;
- Para o processo STT, os cordões apresentaram maior capacidade de penetração e com menor ocorrência de defeitos. Porém a utilização de maior nível de corrente de base e *tail-out* possibilita o aumento do escorrimento da poça de fusão na posição vertical e sobrecabeça, levando à falta de penetração;
- Para o CMT, a maioria dos ensaios apresentaram cordões com falta de penetração e/ou falta de fusão da raiz, devido ao baixo aporte térmico do processo;
- Durante o ensaio macrográfico dos cordões selecionados visualmente, não foram encontradas descontinuidades internas (porosidade, inclusões, falta de fusão e trincas).

c) Relacionado à geometria dos cordões soldados na progressão de soldagem ascendente:

i) Processo MAG curto-circuito convencional:

- A oscilação da tocha afetou o perfil do cordão reduzindo a penetração dos mesmos;
- A velocidade de alimentação afetou de forma significativa favorecendo o aumento da penetração dos cordões;
- A tensão de soldagem também influenciou no aumento da penetração dos cordões, onde o maior valor resultou na perfuração do cordão;
- O ângulo da tocha positivo (empurrando) quanto o ângulo negativo (puxando) proporcionaram o aumento da penetração.

ii) Processo STT:

- A oscilação da tocha favoreceu a redução da penetração dos cordões.
- A velocidade de alimentação, o corrente de pico e o *tail-out* apresentaram uma tendência dos níveis intermediários em reduzir a penetração do cordão;
- O maior valor de corrente de base aumentou a penetração dos cordões, estando diretamente relacionado com a perfuração da raiz.

iii) Processo RMD:

- A oscilação da tocha apresentou influência significativa para a redução da penetração do cordão, onde o aumento da largura do cordão favoreceu e reduziu o reforço da raiz;
- A velocidade de alimentação favoreceu o aumento da penetração, aumentou o reforço da raiz e reduziu o reforço da face.
- O *Trim* apresentou apenas uma leve tendência em aumentar a largura do cordão, o que permitiu a redução do reforço da face;
- O nível intermediário do *Arc Control* mostrou uma suave redução do reforço da raiz e um aumento do reforço e da largura da face.

iv) Processo CMT:

- Os fatores analisados (comprimento do arco e velocidade de alimentação – para um mesmo volume depositado) não tiveram efeitos significativos na geometria do cordão;
- Embora não haja significância estatística, foi possível observar que a penetração do cordão tende a aumentar com a velocidade de alimentação, onde o nível intermediário de comprimento do arco (de -5) apresentou uma tendência em reduzir a penetração do cordão. Além disto, também foi possível observar que a largura da face tende a aumentar com o comprimento do arco.

d) Relacionado à geometria dos cordões soldados na progressão de soldagem descendente:

i) Processo MAG curto-circuito convencional:

- A oscilação apresentou uma tendência (menos significativa) a aumentar a penetração dos cordões;

- A velocidade de alimentação do arame influenciou apenas o reforço da raiz e a largura da face, onde o reforço da raiz aumenta com a velocidade de alimentação, enquanto a largura aumenta na posição vertical e reduz na posição sobrecabeça;
- A tensão de soldagem afetou apenas a largura do cordão, onde, como esperado, a largura aumenta com a tensão;
- A tocha com ângulo positivo (empurrando) proporcionou a redução da penetração, enquanto o ângulo negativo (puxando) resultou em cordões com maior penetração.

ii) Processo STT:

- Os cordões soldados nesta progressão apresentaram um perfil mais uniforme, com menor desvio padrão no reforço da face e principalmente da raiz, mas apresentam maior irregularidade na largura quando comparados com os cordões feitos na ascendente;
- A oscilação da tocha favoreceu o aumento da penetração, principalmente nas posições vertical e sobrecabeça susceptíveis a menor penetração.
- A velocidade de alimentação do arame permitiu o aumento da penetração, em consequência da maior corrente de soldagem;
- Com o aumento da corrente de base, assim como o tail-out, tendem a reduzir a penetração do cordão;
- O aumento da corrente de pico proporciona o aumento da penetração nesta progressão.

iii) Processo RMD:

- A maioria dos ensaios realizados na progressão de soldagem descendente apresentaram o mesmo comportamento na geometria do cordão, com maior largura do cordão um perfil da raiz mais uniforme, principalmente nas posições vertical e sobrecabeça;
- A oscilação da tocha teve um efeito significativo no controle da penetração, houve uma redução do reforço da raiz e um aumento no reforço e na largura da face;
- O aumento da velocidade de alimentação aumenta a penetração do cordão, maior reforço da raiz;
- O aumento do *Trim* apresentou um aumento da largura do cordão, devido ao aumento do comprimento do arco.

iv) Processo CMT:

- O reforço da raiz tende a aumentar tanto com a velocidade de alimentação quanto com o comprimento do arco;
- O cordão tende a apresentar um perfil da face uniforme (reforço da face constante) para a velocidade de alimentação e para o comprimento do arco;
- A largura do cordão aumenta à medida que aumenta o comprimento do arco.

e) Relacionado aos envelopes operacionais dos processos:

- O MAG curto-circuito convencional trabalha em média num valor mais alto de tensão de soldagem. Quanto à velocidade de alimentação, na progressão ascendente requer menores níveis, o que favorece o melhor controle da penetração, ao passo que, na descendente utiliza-se níveis mais elevados de velocidade de alimentação;
- Em geral, o STT e RMD apresentaram maiores envelopes operacionais para a progressão descendente, quando comparado com a ascendente;
- O STT apresentou o envelope mais robusto para a progressão descendente, com uma faixa trabalho maior de tensão para todos os níveis de velocidade de alimentação;
- O CMT trabalha com valores de tensão de soldagem muito mais baixos, o que justifica o baixo aporte térmico do processo. Além disto, apresentou um envelope mais robusto para a progressão ascendente, com melhor controle da penetração e com perfil da raiz mais uniforme.

CAPÍTULO VII

TRABALHOS FUTUROS

Como forma de sedimentar e expandir os conhecimentos obtidos durante o desenvolvimento desta dissertação e contribuir para o aumento da aplicação de processos MAG curto-circuito convencional e derivativos na união de dutos, sugere-se como possibilidade para trabalhos futuros:

- Avaliar e estabelecer vantagens e limites operacionais dos processos MIG/MAG por transferência por curto-circuito convencional e controlado (STT, RMD e CMT) na união de dutos de aços inoxidáveis, em especial duplex pela crescente utilização na indústria do petróleo;
- Realizar um comparativo da geração de respingos e fumos para os processos MIG/MAG por transferência por curto-circuito convencional e controlado (STT, RMD e CMT);
- Utilizar ferramentas estatísticas para otimização de parâmetros dos processos (STT, RMD e CMT), na união de dutos nas progressões ascendente e descendente;
- Realizar ensaios destrutivos e não-destrutivos para a qualificação de cordões realizados com os processos STT, RMD e CMT, na união de dutos nas progressões ascendente e descendente;
- Realizar ensaios para avaliação das propriedades mecânicas dos cordões soldados com os processos STT, RMD e CMT na união de dutos nas progressões ascendente e descendente;
- Expandir os parâmetros e técnicas de soldagem avaliados para a disponibilização de um maior banco de dados acerca dos processos avaliados;
- Realizar um estudo acerca do rendimento térmico dos processos MIG/MAG por transferência por curto-circuito convencional e controlados, utilizando técnicas calorimétricas;

- Avaliar o efeito de diferentes misturas de gás de proteção sobre as características geométricas dos cordões para os processos MIG/MAG curto-circuito convencional e controlado.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/AWS D10.12-89 An American National Standard; Recommended Practices and Procedures for Welding Low Carbon Steel Pipe.

AWS D1.1/D1.1M:2006 An American National Standard; Structural Welding Code – Steel.

BALLESTEROS, A. F.: **Avaliação da Resistência de Juntas Soldadas Circunferências de Aço API 5L X-80 à Corrosão Sob Tensão na Presença de Sulfetos e Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio**, 2009. 282 p. Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BARBOSA, L. C. A. **Modos de Transferências Semi-Automáticas para Soldagem de Passe de Raiz**. Disponível em <www.infosolda.com.br/new_site/getFile.php?t=p&i=119>. Acesso em: 24 maio. 2010.

CHEN, J.H.; SUN, Z.C.; FAN, D. Study on the Mechanism of spatter produced by basicwelding electrodes. **Welding Journal**. Vol 75, p.312-316, 1996.

CHU, K. P.: **Welding of Sheef Metal Using Modified Short Arc MIG/MAG Welding Process**, 2007. 82 p. Lappeenranta University of Technology – Lappeenranta.

DANTAS, M. S.; COSTA, S. C. Uma Contribuição ao Estudo da Influência dos Parâmetros de Pulso na Qualidade da Solda em um Processo MIG/MAG Pulsado através da Técnica DOE, XXIV Enegep, 2004.

DERUNTZ, B. D. Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry, **Journal of Industrial Technology**, vol. 19, p 1 – 8, abr. 2003.

EMMERSON, J. **Considering GMAW/FCAW for Orbital Applications Tips for the Prospective First-Time User.** Março-Abril, 2000. Disponível em: <www.magnatecheurope.com> . Acesso em: Agosto de 2009.

ESSERS, W.G. & VAN GOMPEL, R.M. Arc control with pulsed GMAW welding. **Welding Journal**, p 26 – 32, June, 1984.

FERNANDES, D. B.; JÚNIOR, L. C. M.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Ensaio para Medição de Nível e Alcance de Respingos em Soldagem MIG/MAG. **Soldagem Imp.** São Paulo, vol. 15, nº 150 – 155, Abr/Jun 2010.

FORTES, C. **Arames Tubulares.** Apostila ESAB S/A, Contagem, p. 2 – f 40, 2004.

FRONIUS. **CMT: Cold Metal Transfer.** 2007. Disponível em <www.fronius.com>. Acesso em: 03 set. 2010.

FRONIUS. **TransSynergic 4000/5000 – TransPuls Synergic 2700 – TransPuls Synergic 3200/4000/5000 – TIME 5000 Digital.** Manual de Instruções. 2006.

GIMENES, J. L.; RAMALHO J. P. **Conceitos de Soldagem MIG/MAG.** Infosolda.

GOMES, E. B.: **Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito Aplicado ao Processo Eletrodo Tubular Através da Metodologia Taguchi.** 2006. 119 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

HASHIMOTO, T.; MORIMOTO, T. Reduction of Spatter Generation on Gas Shielded Arc Welding from the Viewpoint of Welding Material. **Welding International.** vol 5, p. 331 – 336, 2007.

HIMMERLBAUER, K. The CMT-Process – A Revolution in Welding Techonology. **Fronius Internatinal.** Disponível em <www.fronius.com>. Acesso em: 21/06/2009.

JÚNIOR, L. P. N.: **Otimização de um Processo de Solda MIG/MAG para Aplicação na Indústria Automobilística Através da utilização da Técnica do Projeto e Análise de Experimentos,** 2003. 111 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

KANG, S.K.; NA S.J. A Mechanism of Spatter Production From The Viewpoint Of Integral Of Specific Current Action. **Welding Journal.** p. 188-196, December, 2005.

KIM, Y-S.; EAGAR T. W. Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**. Welding Research Supplement, Vol. 72, nº 6, p. 269-278, Apr 1993.

KVASOV, F. V. Special Features of Mechanized Welding with Controlled Electrode Metal Transfer. **Welding International**. v. 14, n. 2, p. 158-161. 2000.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. São Paulo, 2 ed., Pergamon Press, 1983.

LINCOLN. **Technology gets to the root of pipe welding**. Disponível em <www.lincolnelectric.com>. Acesso em: 20 abril, 2010.

LYTTLE, K.A. GMAW – A Versatile Process on the Move. **Welding Journal**, p 15 – 23, Março, 1983.

MACHADO, D. M.. **Processo GMAW**. Apostila UNILESTE, Cel. Fabriciano. p. 2 – 40. Abril, 2010

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477 p.

MARKUS, M. **CMT: The New Revolution in Digital GMA Welding**. Disponível em <www.fronius.com>. Acesso em: 28 jul. 2010.

MARUYAMA, T. et AL. Current Waveform Control in Gas Shielded Arc Welding for Robotic Systems. **Kobelco Technology Review**. Nº 18, p. 10 – 14, Apr. 1995.

MILLER. Miller's New, Software-Driven RMD™ Process Overcomes Short Circuit MIG Limitations. March 5, 2004. Disponível em <http://www.millerwelds.com/about/news_releases/2004_archive/articles82.html>. Acesso em: 17 Jan. 2011.

MILLER. **Mapa Guia de Variáveis Operacionais para Utilização do Processo RMD – Passe de Raiz – Versão A**. 2009.

MILLER. **PipePro 450 RFC**. Manual do Usuário. Novembro, 2008.

MILLER. **PipePro Welding System – Root-Fill-Cap Welding**. Miller Welds Specification Sheets. Disponível em <http://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/PWS1-0.pdf>. Acesso em: 03/11/10.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Data Sheet NI USB-6008, NI USB-6009**. Disponível em <www.ni.com/pdf/products/us/20043762301101dlr.pdf>. Acesso em: 27 dez 2009.

NICHOLSON, P.; STAVA, E. K. **Method of Pipe Welding**. United States Patent. 20 de março, 2001.

NORRISH, J.; RICHARDSON, I. F. Metal Transfer Mechanisms. **Welding & Metal Fabrication**. p. 17 – 22. January/February 1988

OLIVEIRA, M. E. J.: **Estudo dos Parâmetros para Soldagem Fora de Posição com Arame Tubular**, 2002. 101 P. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PEREIRA, W. A.: **Comparação de Características Operacionais Entre os Processos MIG Pulsado e MAG Curto-Circuito**, 1995. 142 P. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PEREIRA, W. A.; FERRARESI, V. A.. Comportamento do Cordão na Soldagem GMAW Pulsada em Chanfro Estreitos. In: 1. COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2001, Curitiba - PR. 1.o COBEF - em CD.

PICKIN, C.G.; YOUNG, K.. Cold Metal Transfer Process for Welding Aluminium Alloy, **Science and Technology of Welding and Joining**. Vol 11, nº 5, p 583 – 585, março de 2006.

POSSEBON, S.: **Utilização de MIG/MAG com Curto-Circuito Controlado na Soldagem em Operação**, 2009, 132 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RAMPAUL, H. **Pipe Welding Procedures**. New York, Industrial Press, 248 p., 2003.

REZENDE, A. A.: **Uma Contribuição à Análise dos Parâmetros de Soldagem do Processo Plasma-MIG com Eletrodos Concêntricos**, 2009. 175 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ROMERO, M. F.. A Solda da Tecnologia. **TN Petróleo**. Nº 66, p. 54 – 60, 2009.

ROSADO, T. M. V. B.: **Inovação do Processo MIG/MAG – Análise de Produtividade e Emissão de Fumos**, 2008. 81 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

SANTOS, R. P. G.: **Uma Avaliação Comparativa dos Processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular em Termos de Capacidade Produtiva, Geração de Fumos e de Respingos**,

Usando Consumível para Aço Estrutural. 2010. 129 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SCOTTI, A. & PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo, Artliber Editora, 284 p., 2008.

SCOTTI, A. **Engenharia de Soldagem – Descontinuidade e Defeitos.** Nota de aula. 2008.

SILVA, E. M.: **Comparação de Características Operacionais no Processo com Eletrodo Tubular Utilizando as Transferências por Curto-Circuito e Pulsado na Posição Vertical Descendente,** 2006. 90 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

SILVA, R. H. G.: **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz,** 2005. 128 p. Dissertação de Mestrado – UFSC, Santa Catarina.

SILVA, R. H. G.; DUTRA, J. C.; JÚNIOR, R. G. Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípio dos Sistema MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente. **Soldagem Insp.** São Paulo. Vol. 13, nº 1, p. 70 – 81, Jan./Mar., 2008.

SOUZA, D.: **Levantamento de Mapas Operacionais de Transferência Metálica para Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono na Posição Plana,** 2010. 304 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SCHORGHUBER, M. **Cold-Metal-Transfer Welding Process and Welding Installation.** US Patent. US 2009/0026188 A1, 2009.

STAVA, E. K. The Surface-Tension-Transfer power source: A New Low-Spatter Arc Welding Machine. **Welding Journal**, vol. 72, nº. 1, p 25 – 29, 1993.

STAVA, E. K. Waveform Control Speeds Root Pass. **Welding Design & Fabrication**, vol. 74, nº 2, p. 39 – 40, 2001.

STAVA, E. K.; NICHOLSON, P. **New Technology Speeds Oil Sands Pipe Welding.** Pipeline & Gas Journal. Disponível em <www.pipelinaandgasjournalonline.com>. Acesso em: 20/04/2010.

VILARINHO, L. O.. Modos Fundamentais de Transferência Metálica: Naturais e Controlados. **Revista da Soldagem**, p. 14 - 19, 10 maio 2007.

WASZINK, J. H.; GRAAT, L. H. J. Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal. **Welding Research Supplement**. p. 108 – 116. April, 1983

ANEXO I

OSCILOGRAMAS: COMPORTAMENTO DINÂMICO DA FONTE

9.1 Soldagens realizadas com o processo MAG curto-circuito convencional

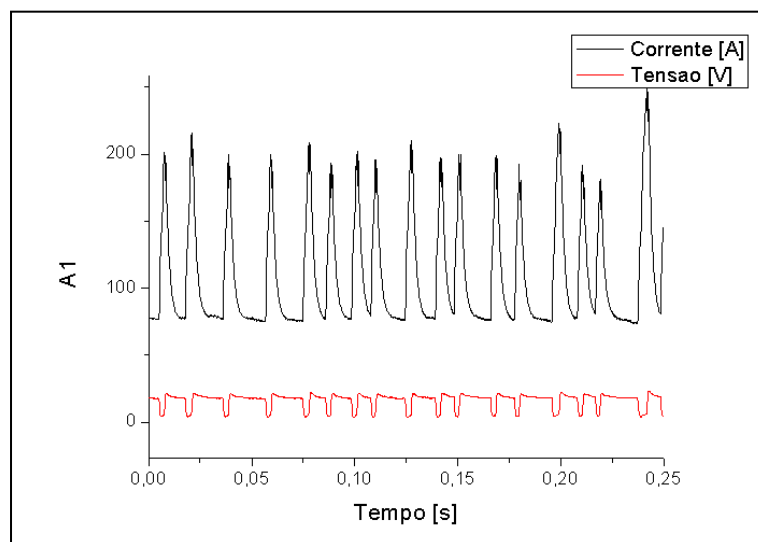


Figura 9.1 – Comportamento dinâmico do ensaio A1.

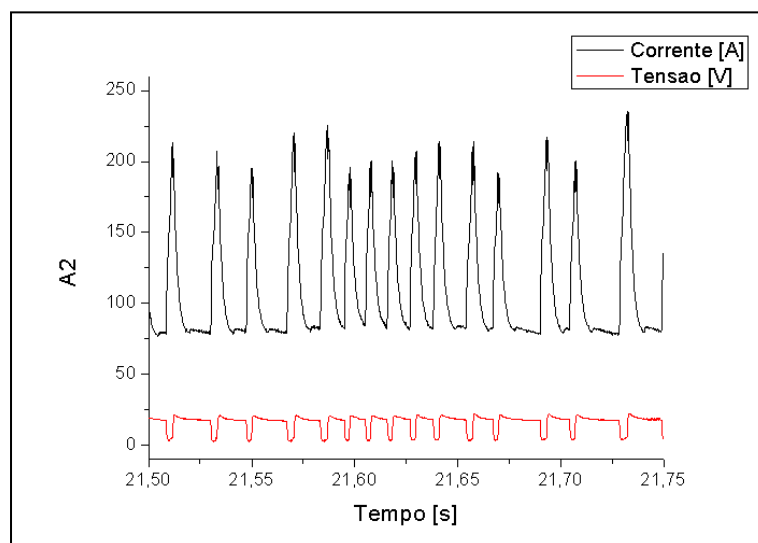


Figura 9.2 – Comportamento dinâmico do ensaio A2.

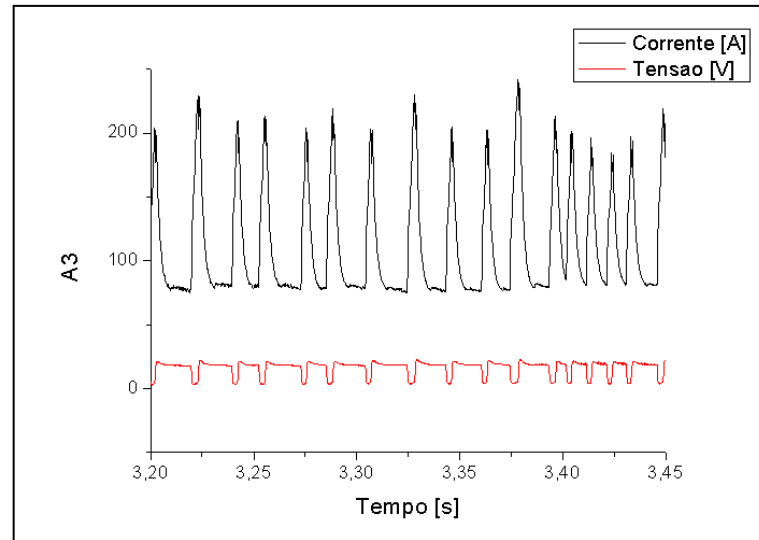


Figura 9.3 – Comportamento dinâmico do ensaio A3.

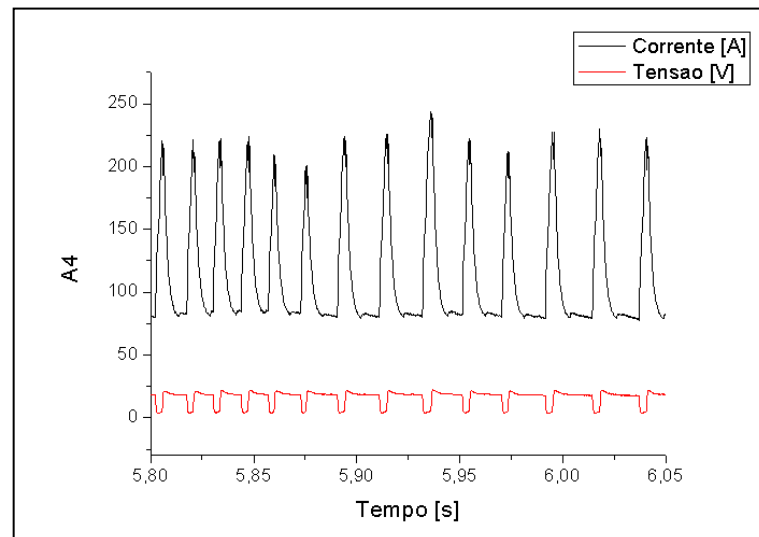


Figura 9.4 – Comportamento dinâmico do ensaio A4.

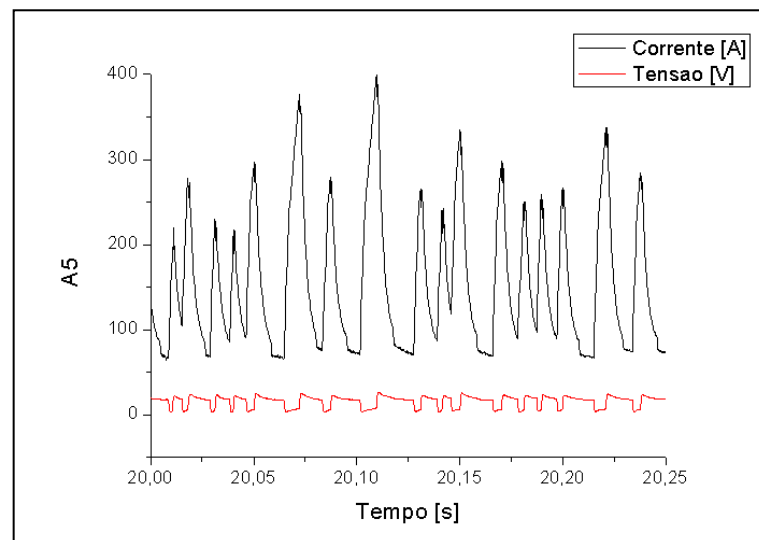


Figura 9.5 – Comportamento dinâmico do ensaio A5.

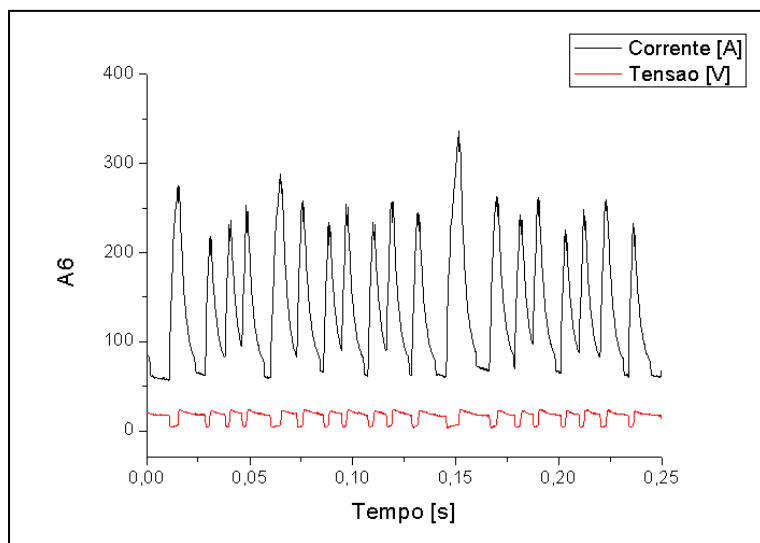


Figura 9.6 – Comportamento dinâmico do ensaio A6.

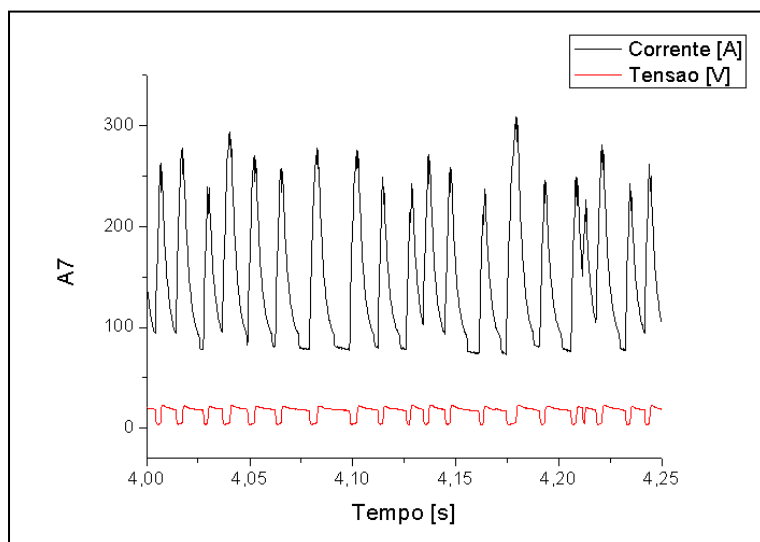


Figura 9.7 – Comportamento dinâmico do ensaio A7.

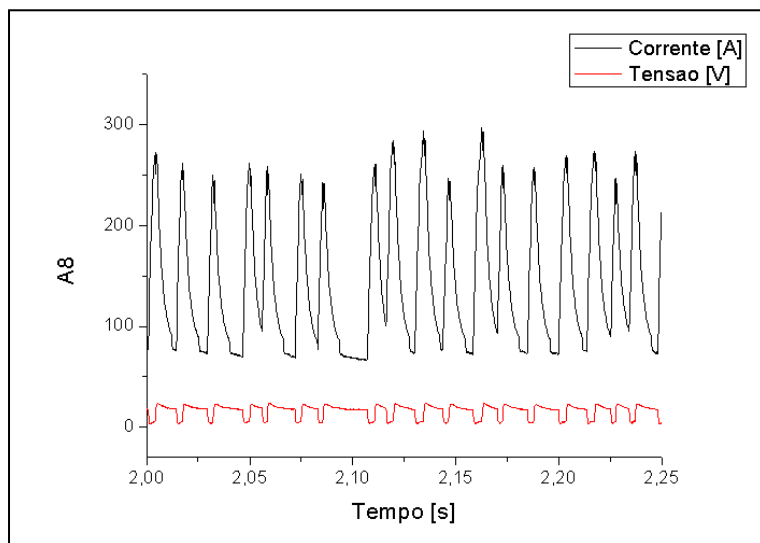


Figura 9.8 – Comportamento dinâmico do ensaio A8.

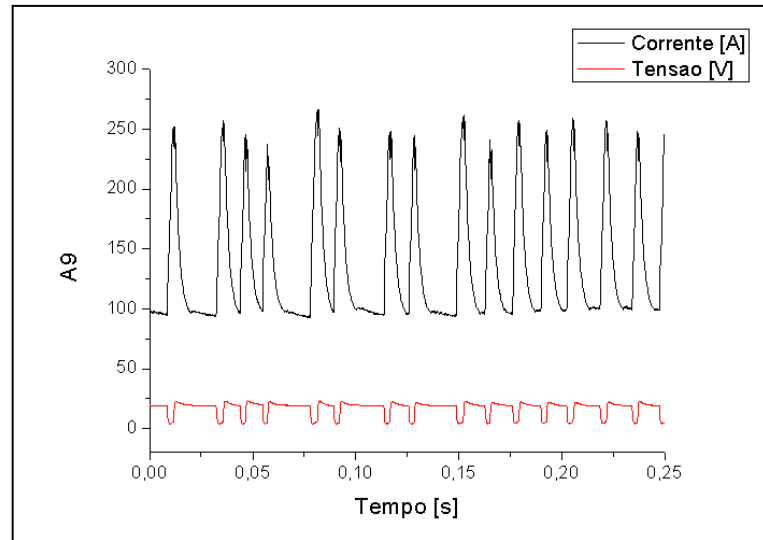


Figura 9.9 – Comportamento dinâmico do ensaio A9.

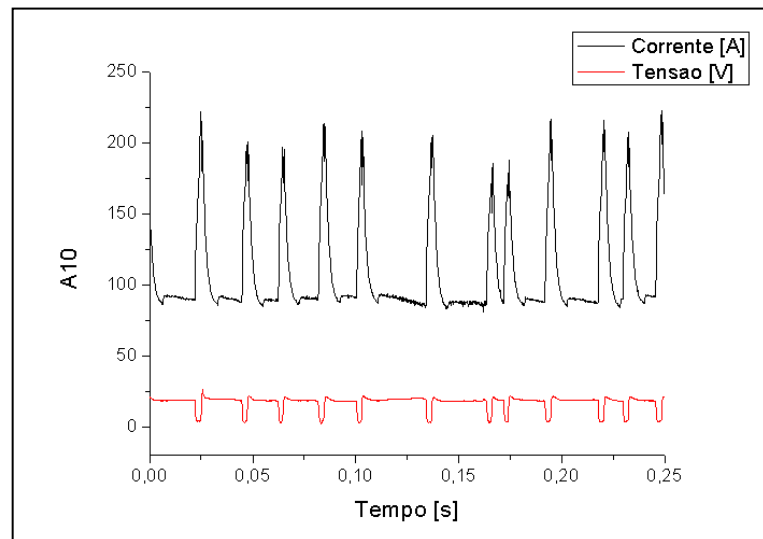


Figura 9.10 – Comportamento dinâmico do ensaio A10.

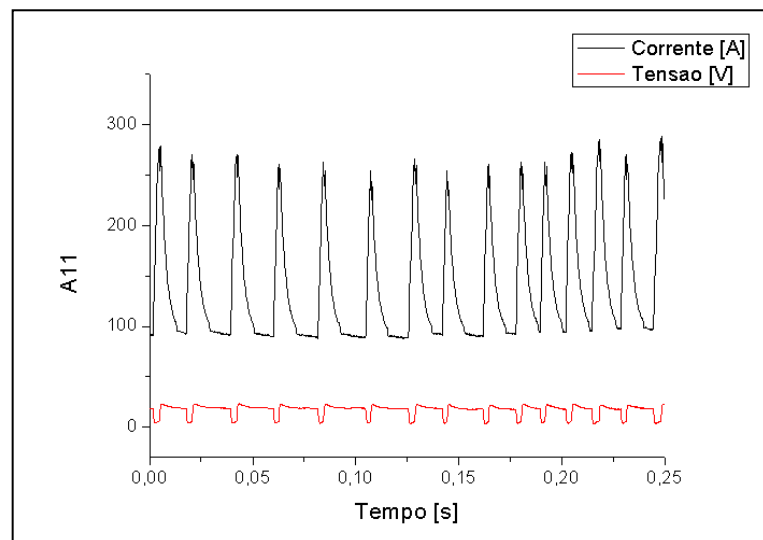


Figura 9.11 – Comportamento dinâmico do ensaio A11.

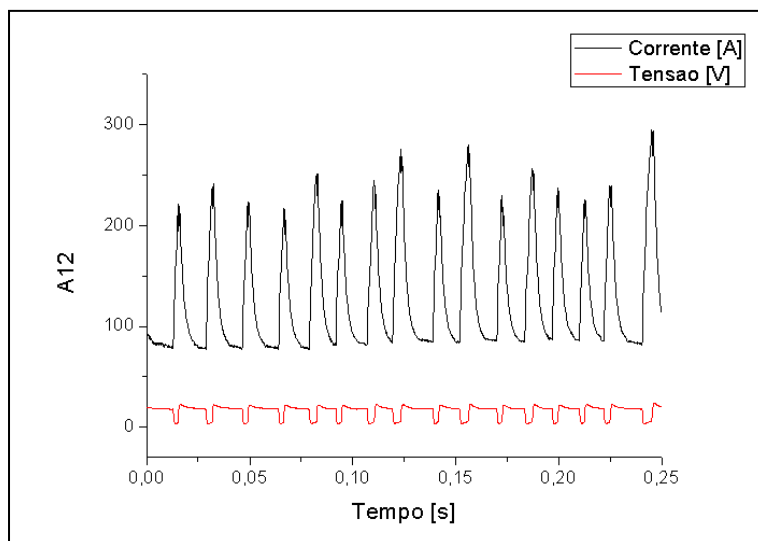


Figura 9.12 – Comportamento dinâmico do ensaio A12.

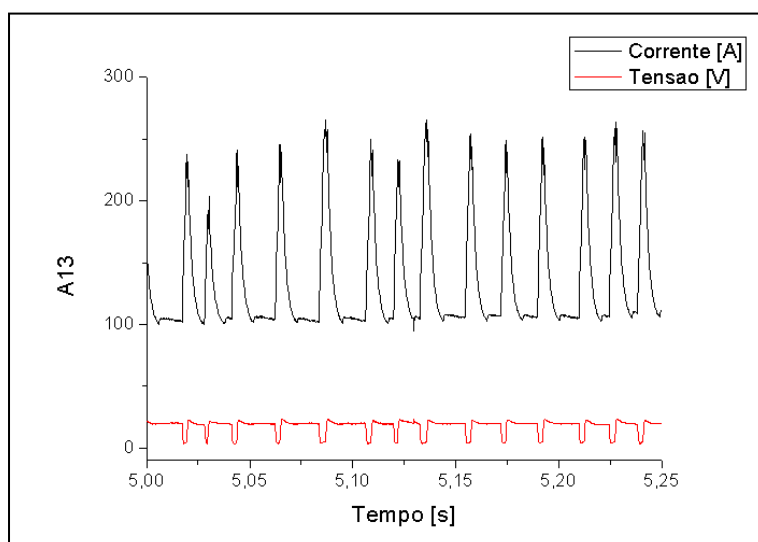


Figura 9.13 – Comportamento dinâmico do ensaio A13.

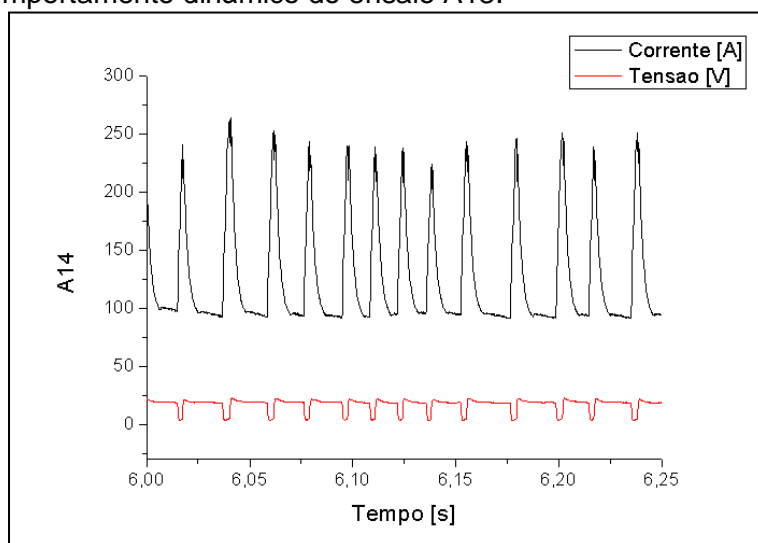


Figura 9.14 – Comportamento dinâmico do ensaio A14.

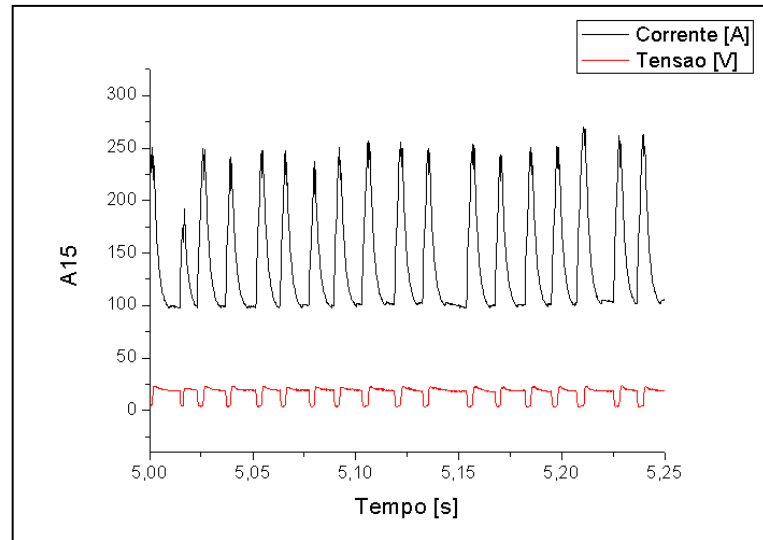


Figura 9.15 – Comportamento dinâmico do ensaio A15.

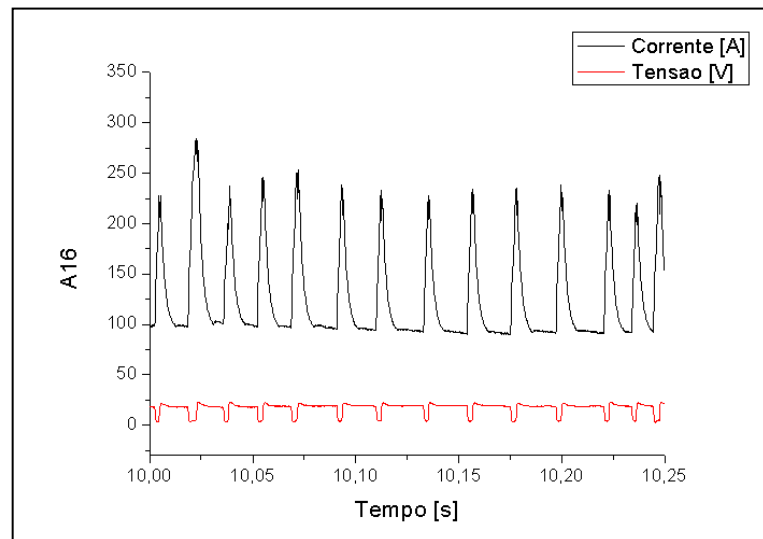


Figura 9.16 – Comportamento dinâmico do ensaio A16.

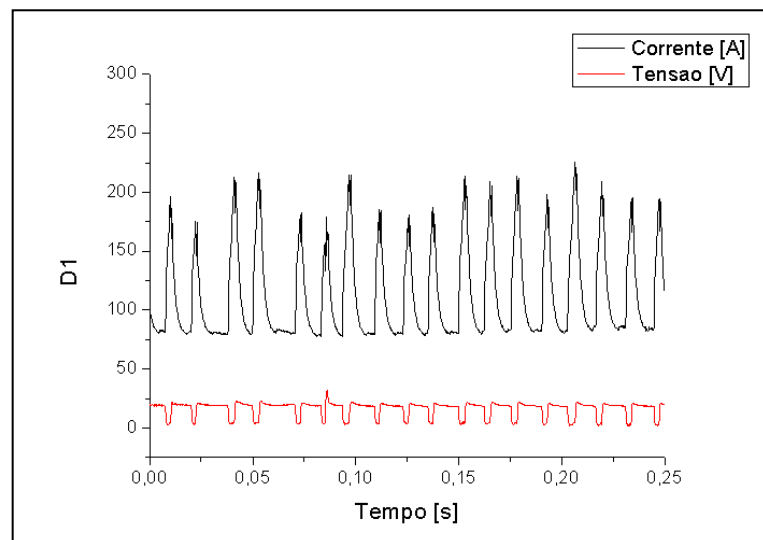


Figura 9.17 – Comportamento dinâmico do ensaio D1.

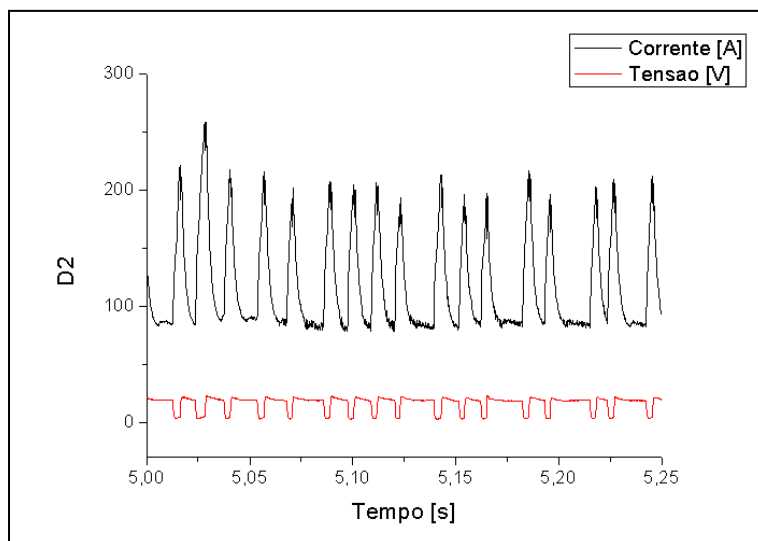


Figura 9.18 – Comportamento dinâmico do ensaio D2.

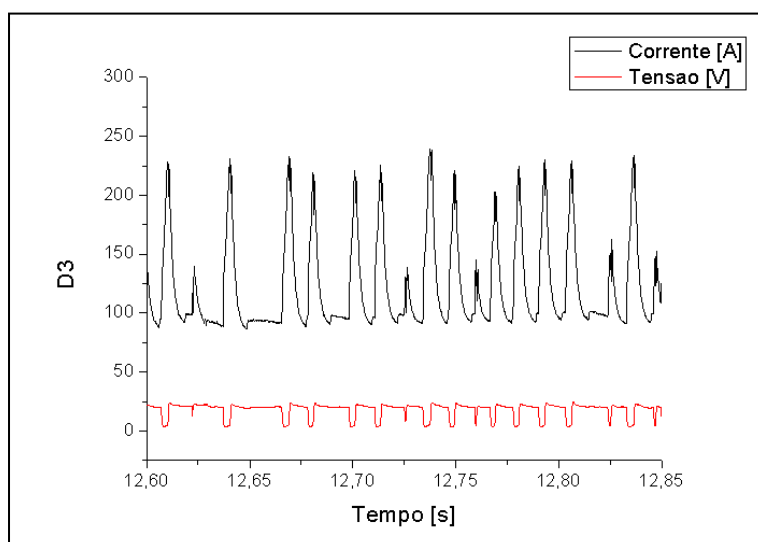


Figura 9.19 – Comportamento dinâmico do ensaio D3.

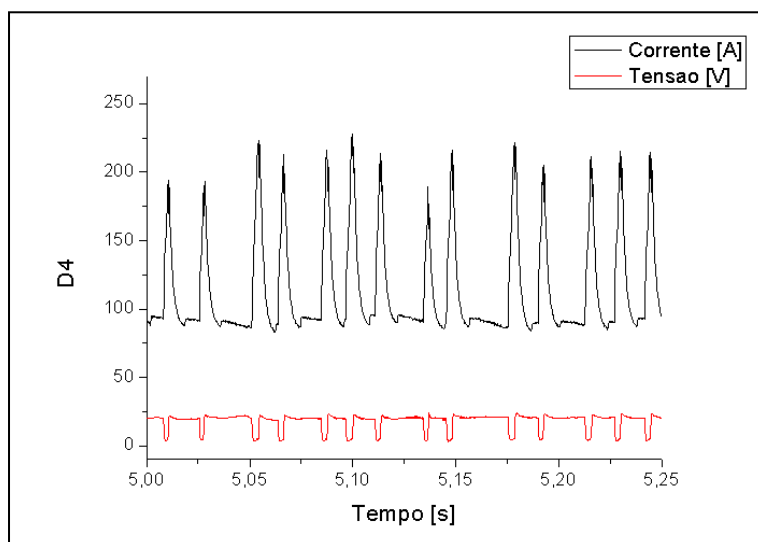


Figura 9.20 – Comportamento dinâmico do ensaio D4.

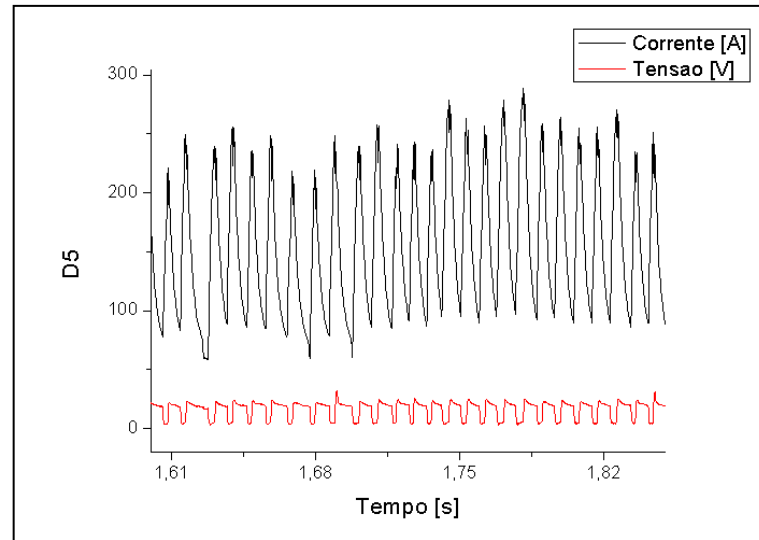


Figura 9.21 – Comportamento dinâmico do ensaio D5.

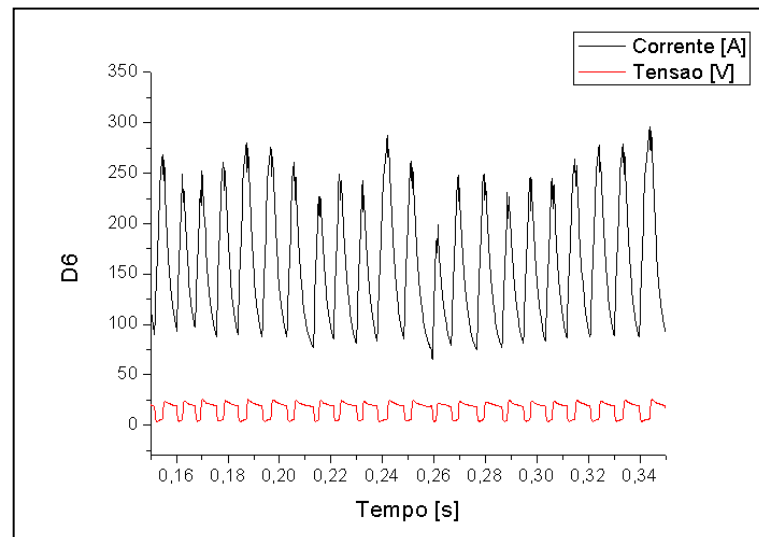


Figura 9.22 – Comportamento dinâmico do ensaio D6.

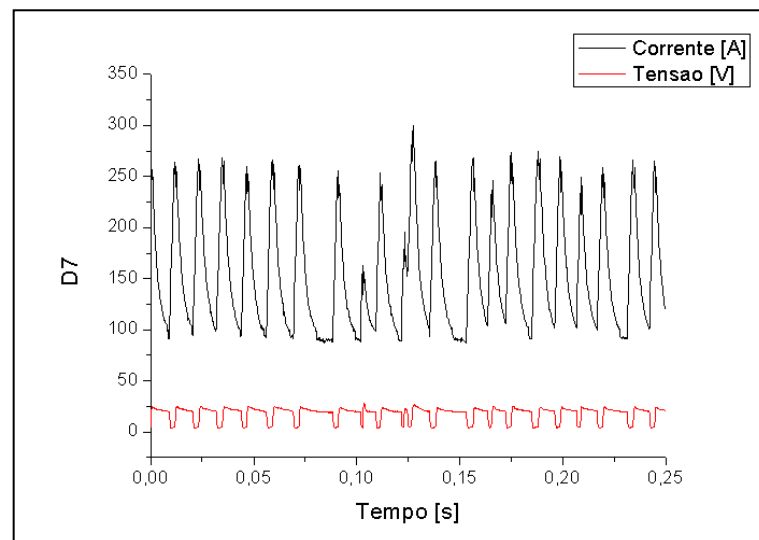


Figura 9.23 – Comportamento dinâmico do ensaio D7.

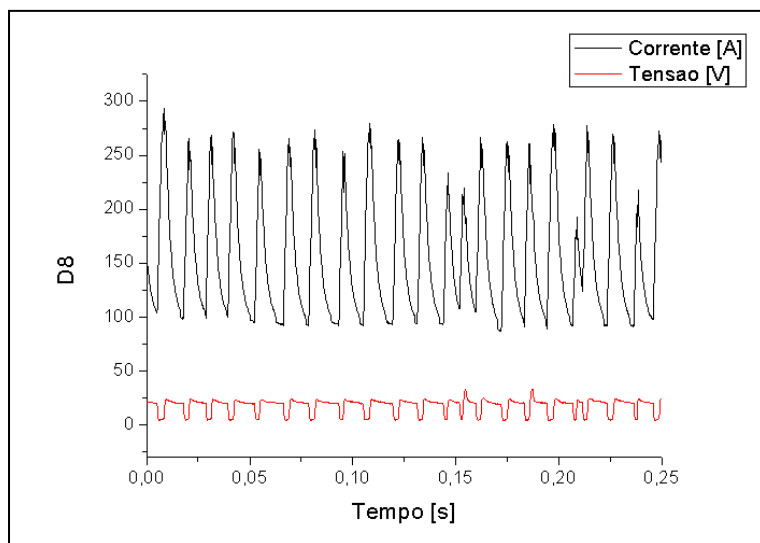


Figura 9.24 – Comportamento dinâmico do ensaio D8.

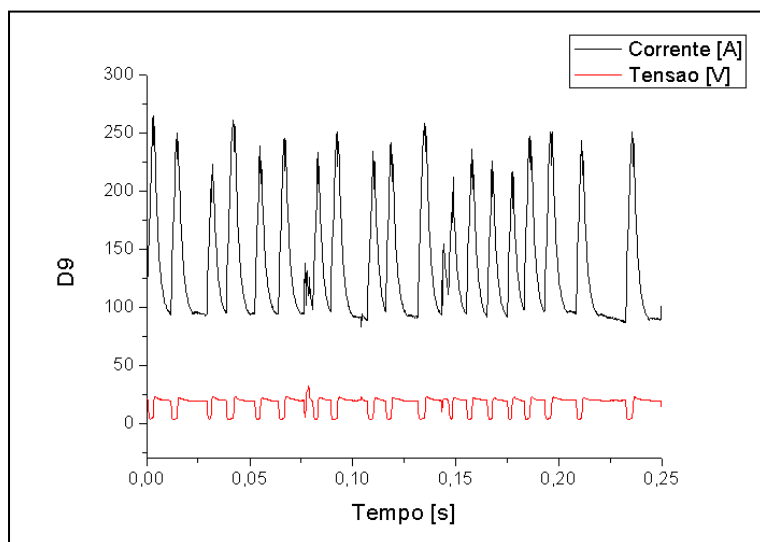


Figura 9.25 – Comportamento dinâmico do ensaio D9.

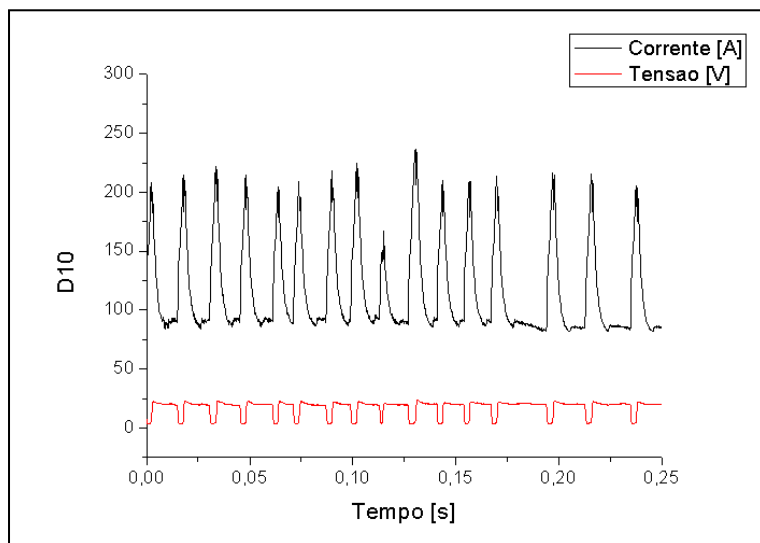


Figura 9.26 – Comportamento dinâmico do ensaio D10.

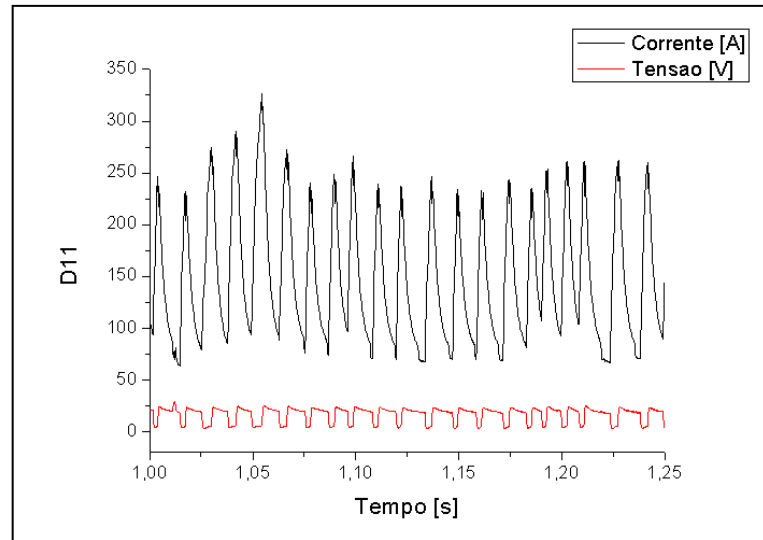


Figura 9.27 – Comportamento dinâmico do ensaio D11.

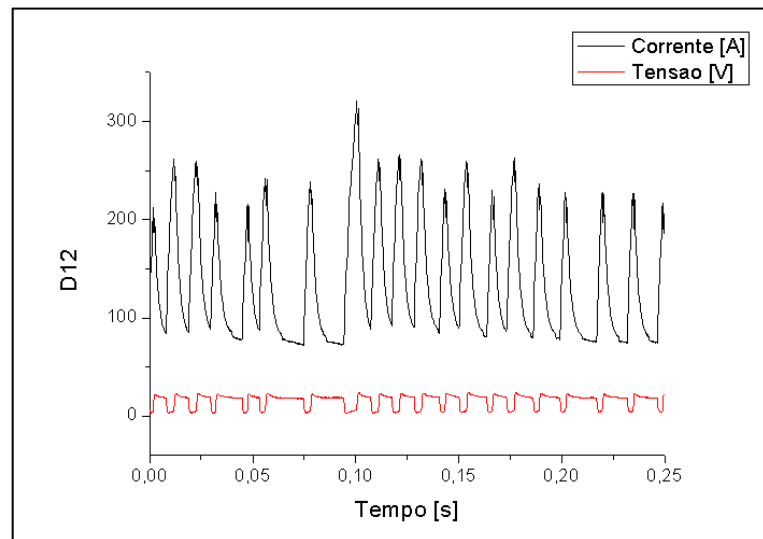


Figura 9.28 – Comportamento dinâmico do ensaio D12.

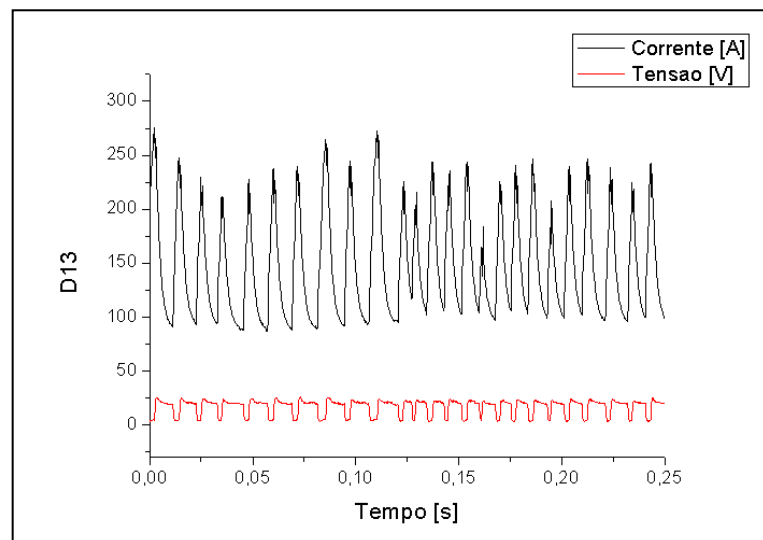


Figura 9.29 – Comportamento dinâmico do ensaio D13.

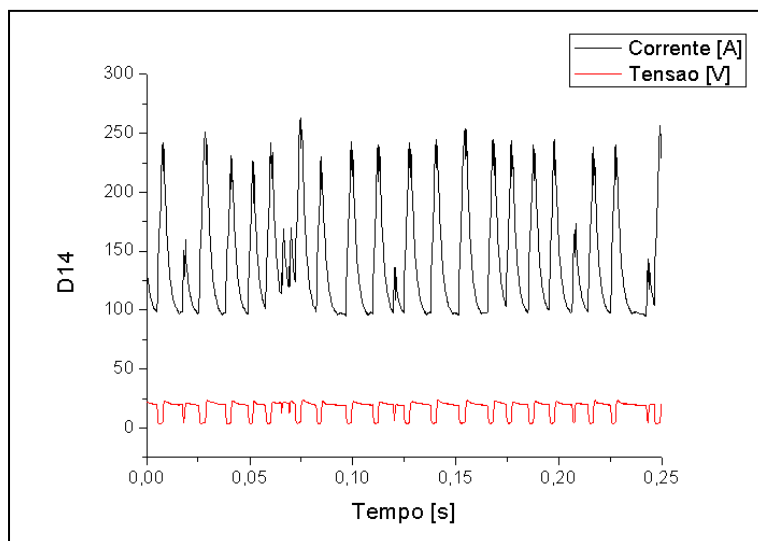


Figura 9.30 – Comportamento dinâmico do ensaio D14.

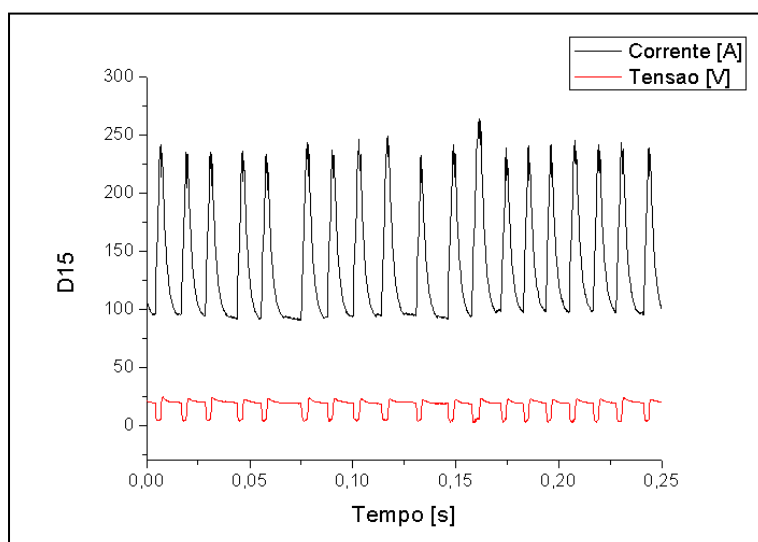


Figura 9.31 – Comportamento dinâmico do ensaio D15.

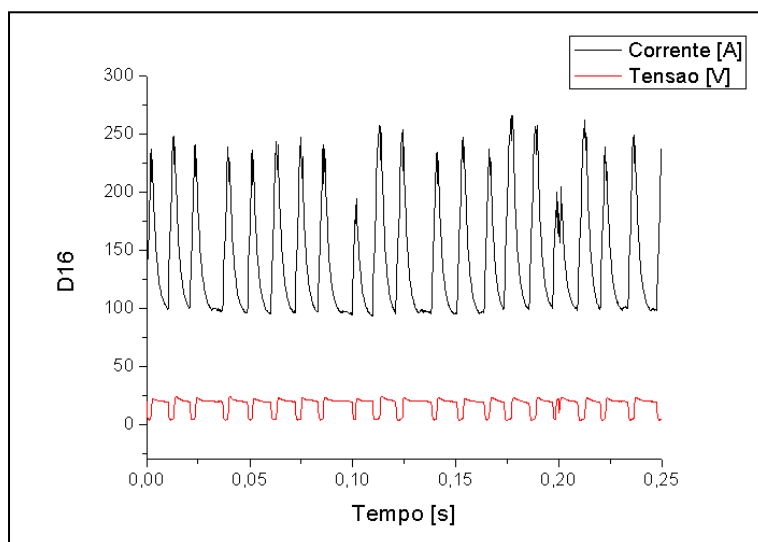


Figura 9.32 – Comportamento dinâmico do ensaio D16.

9.2 Soldagens Realizadas com o Processo STT

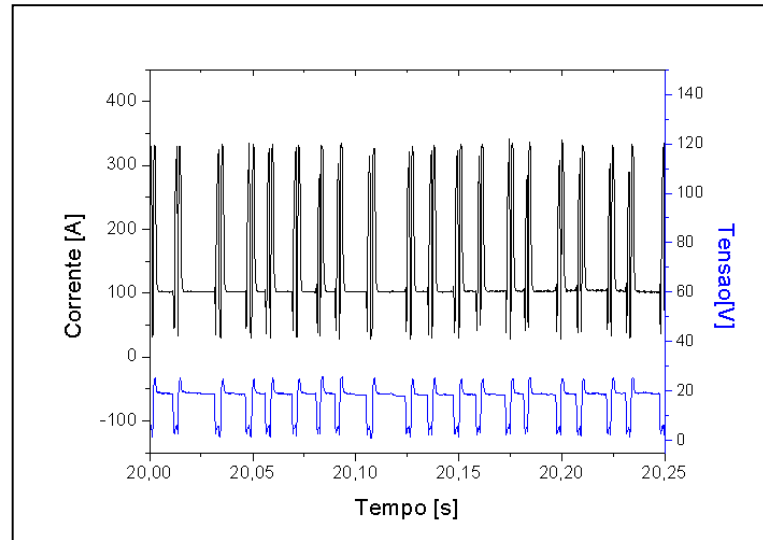


Figura 9.33 – Comportamento dinâmico do ensaio SA1.

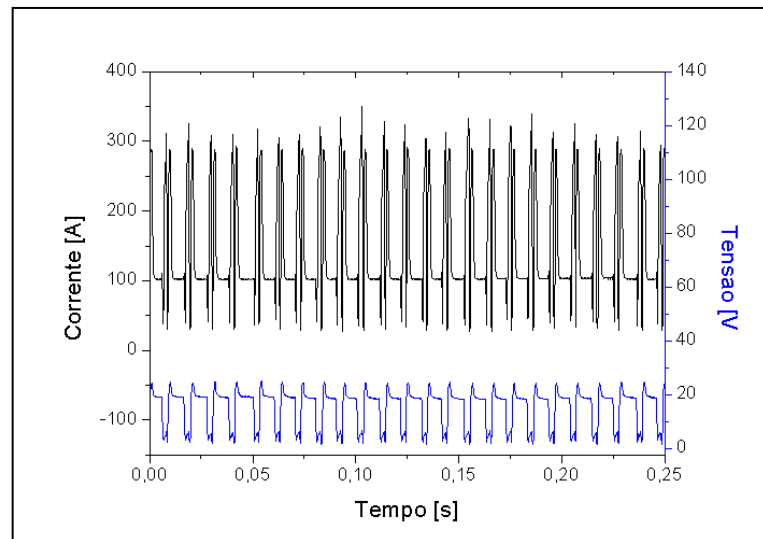


Figura 9.34 – Comportamento dinâmico do ensaio SA2.

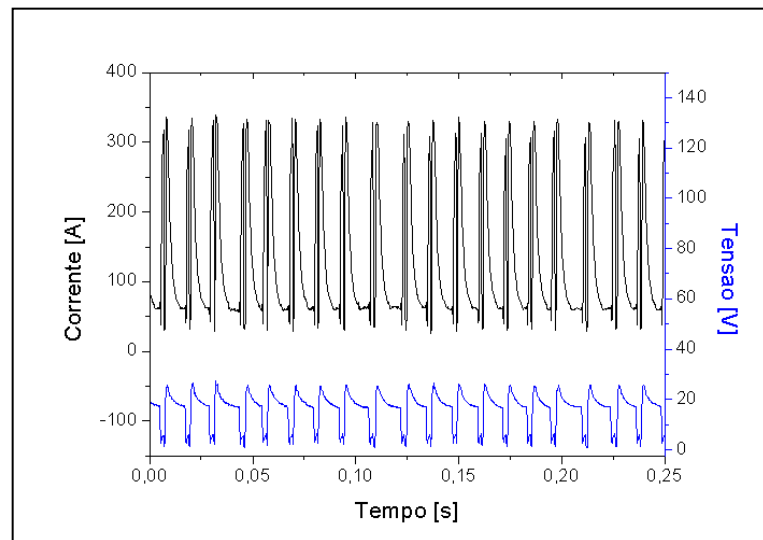


Figura 9.35 – Comportamento dinâmico do ensaio SA3.

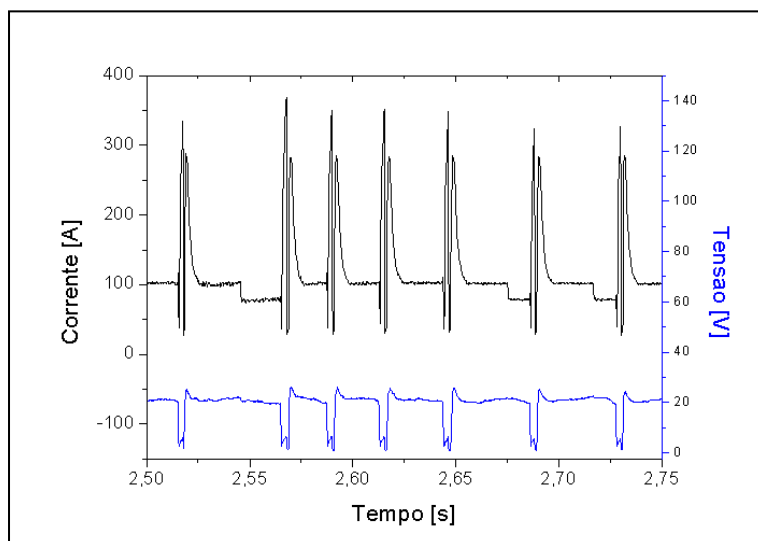


Figura 9.36 – Comportamento dinâmico do ensaio SA4.

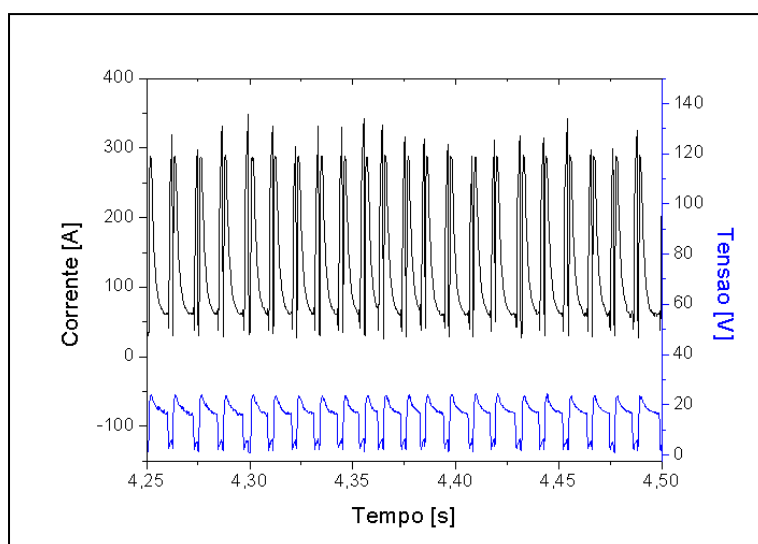


Figura 9.37 – Comportamento dinâmico do ensaio SA5.

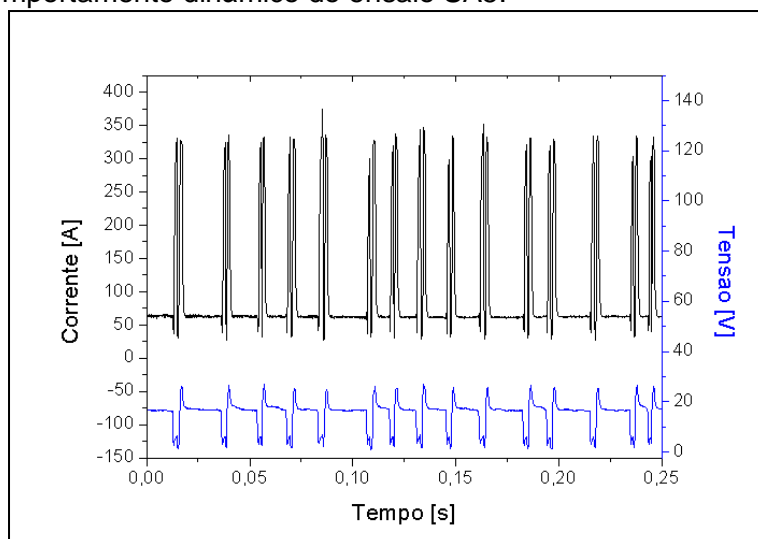


Figura 9.38 – Comportamento dinâmico do ensaio SA6.

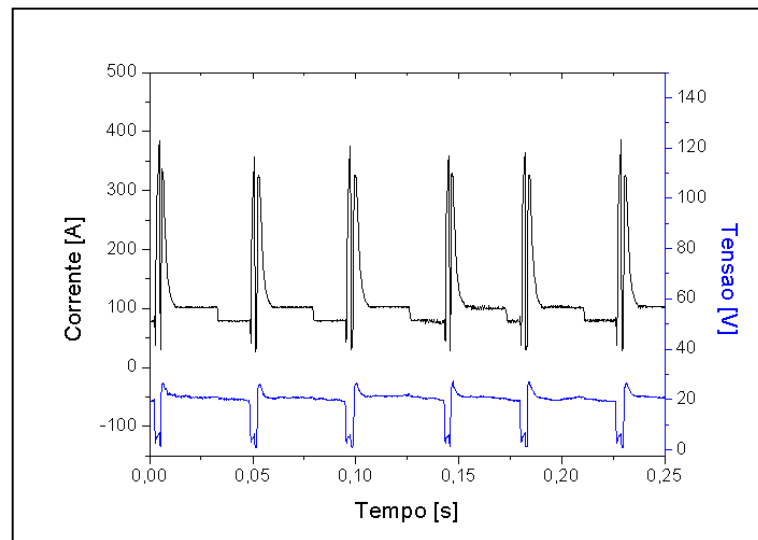


Figura 9.39 – Comportamento dinâmico do ensaio SA7.

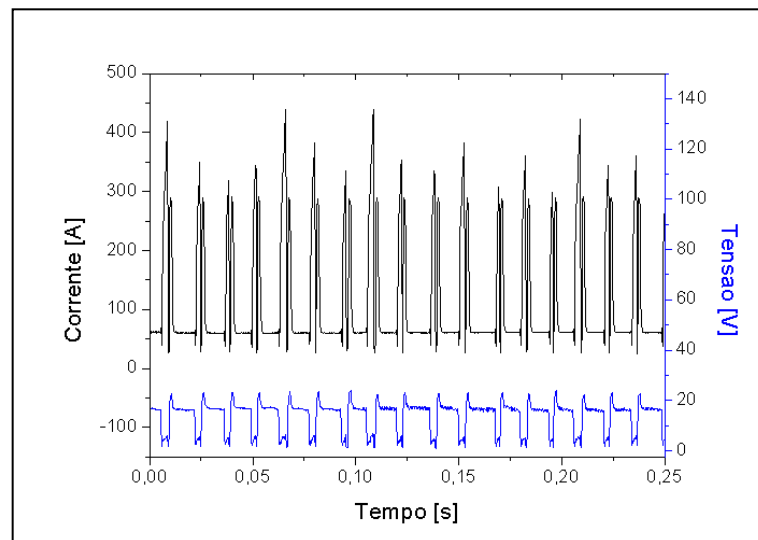


Figura 9.40 – Comportamento dinâmico do ensaio SA8.

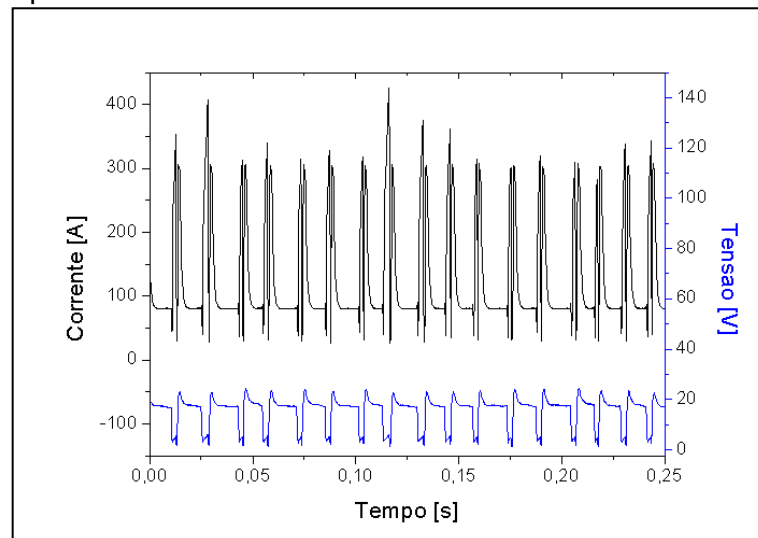


Figura 9.41 – Comportamento dinâmico do ensaio SA9.

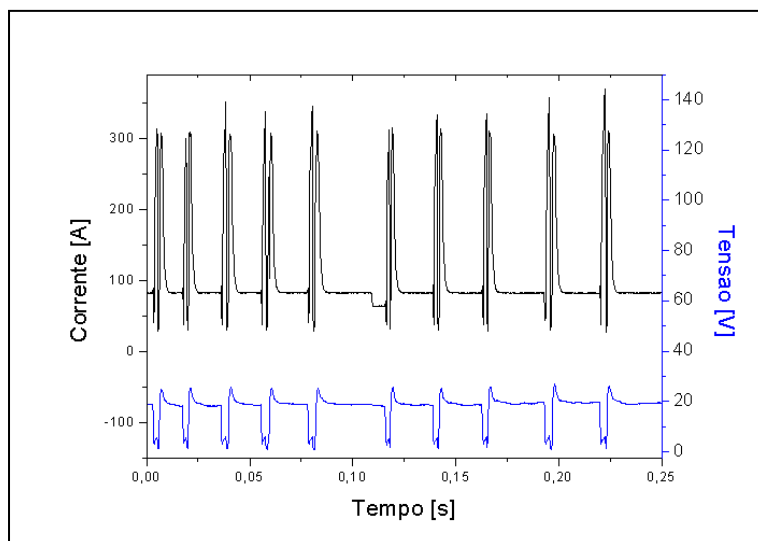


Figura 9.42 – Comportamento dinâmico do ensaio SA10.

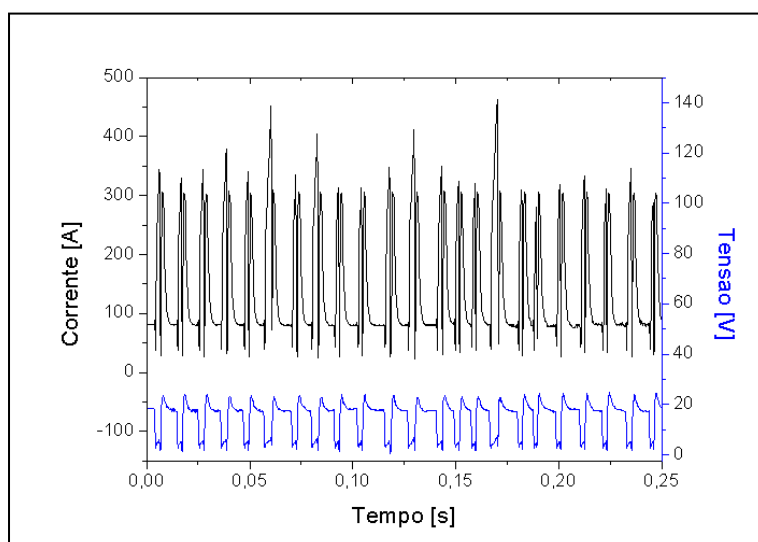


Figura 9.43 – Comportamento dinâmico do ensaio SA11.

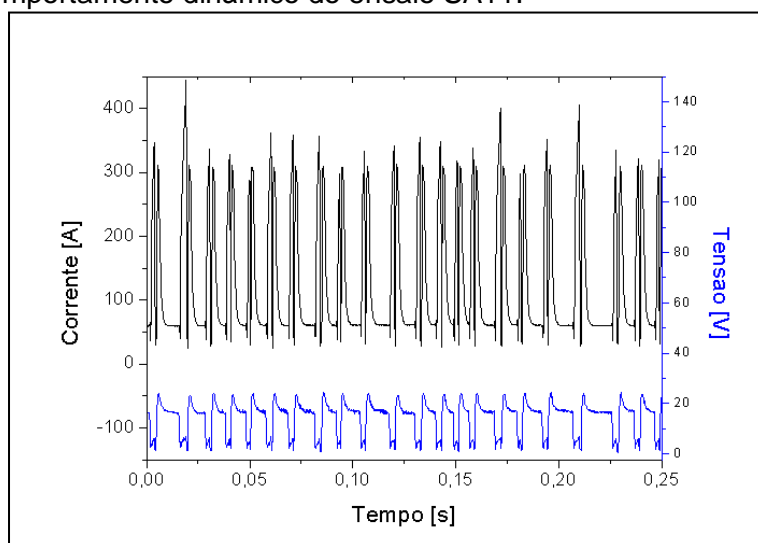


Figura 9.44 – Comportamento dinâmico do ensaio SA12.

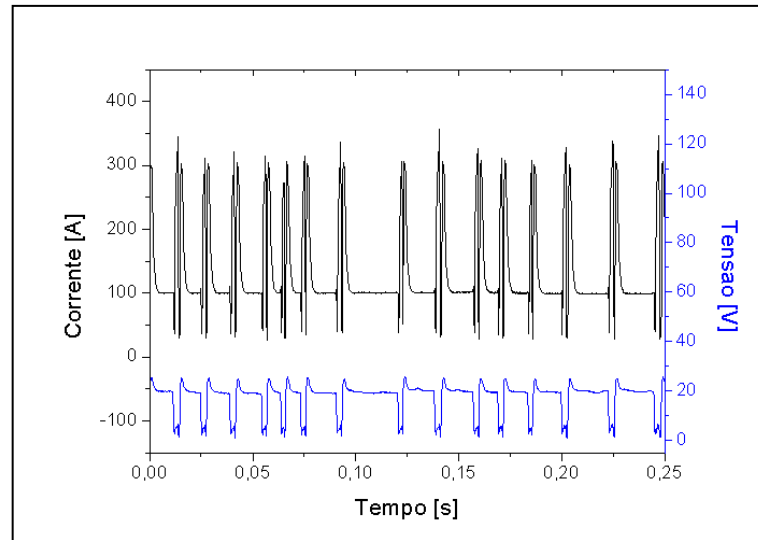


Figura 9.45 – Comportamento dinâmico do ensaio SA13.

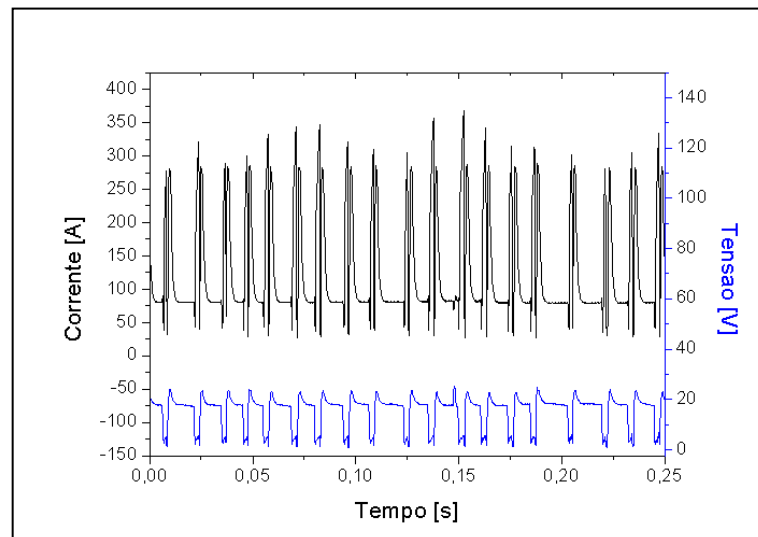


Figura 9.46 – Comportamento dinâmico do ensaio SA14.

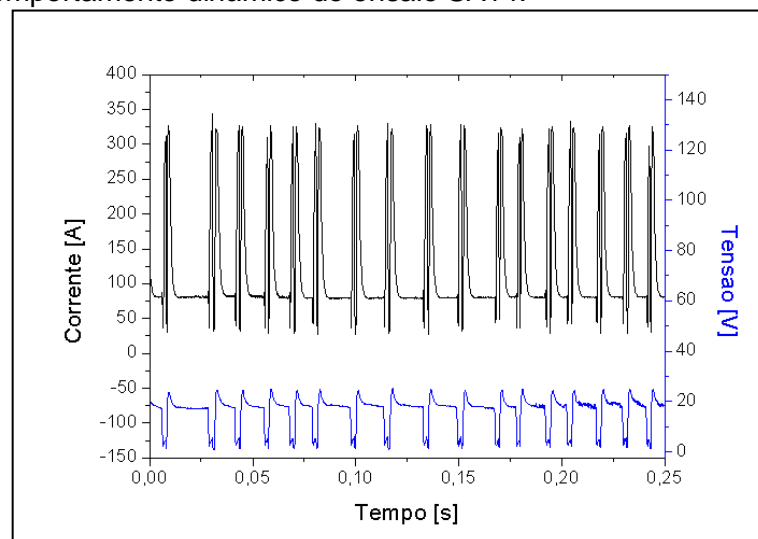


Figura 9.47 – Comportamento dinâmico do ensaio SA15.

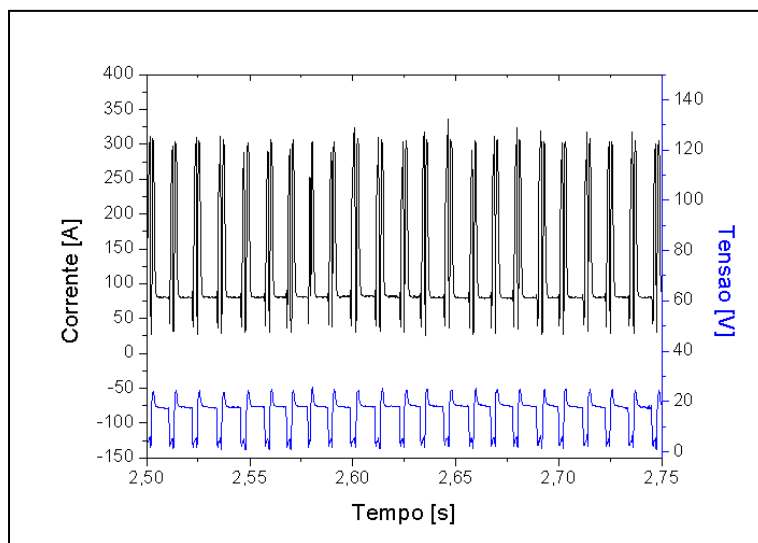


Figura 9.48 – Comportamento dinâmico do ensaio SA16.

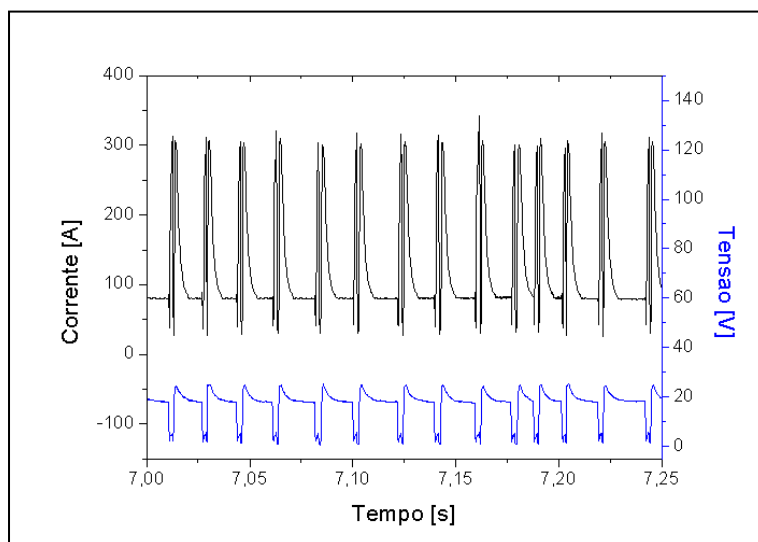


Figura 9.49 – Comportamento dinâmico do ensaio SA17.

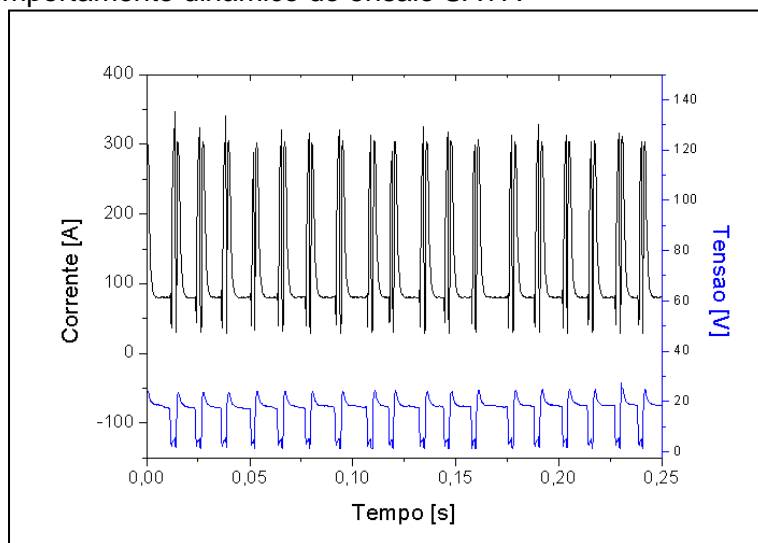


Figura 9.50 – Comportamento dinâmico do ensaio SA18.

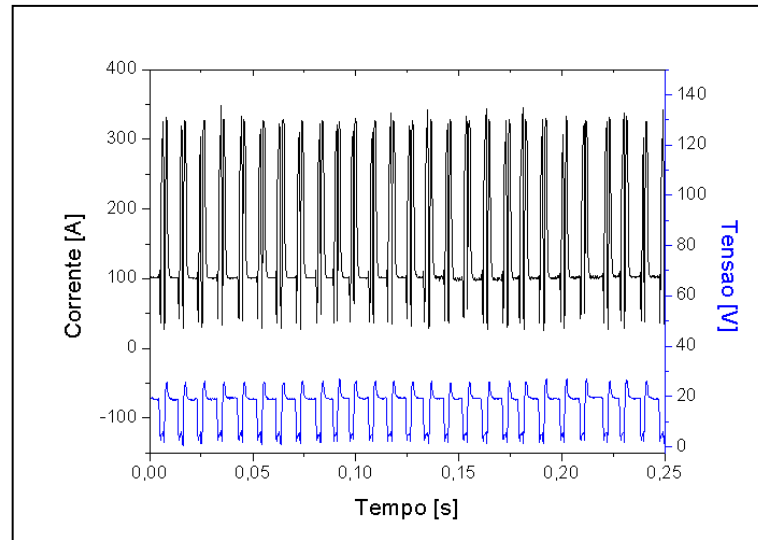


Figura 9.51 – Comportamento dinâmico do ensaio SD1.

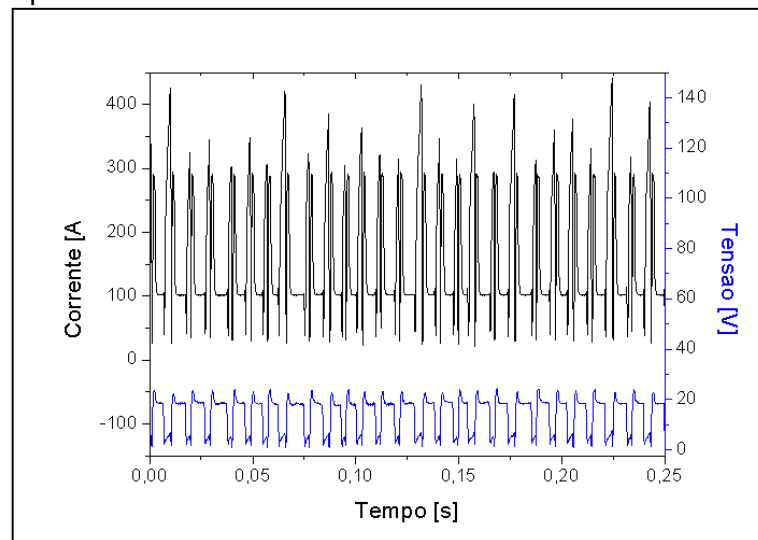


Figura 9.52 – Comportamento dinâmico do ensaio SD2.

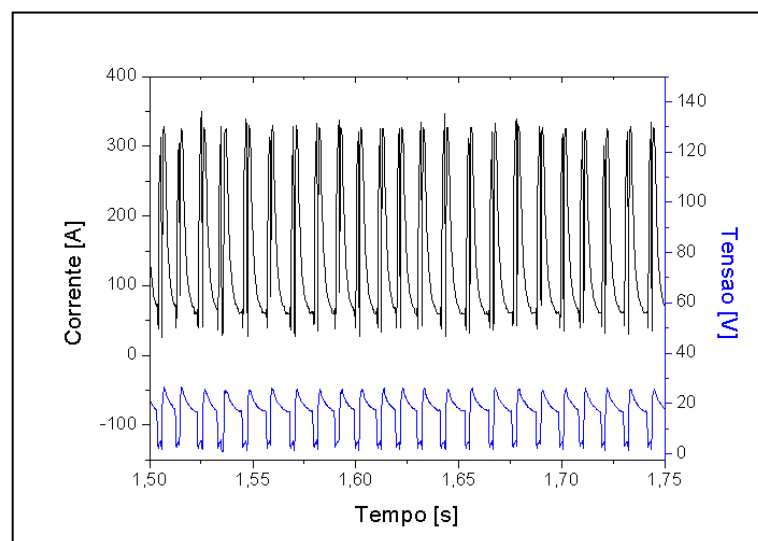


Figura 9.53 – Comportamento dinâmico do ensaio SD3.

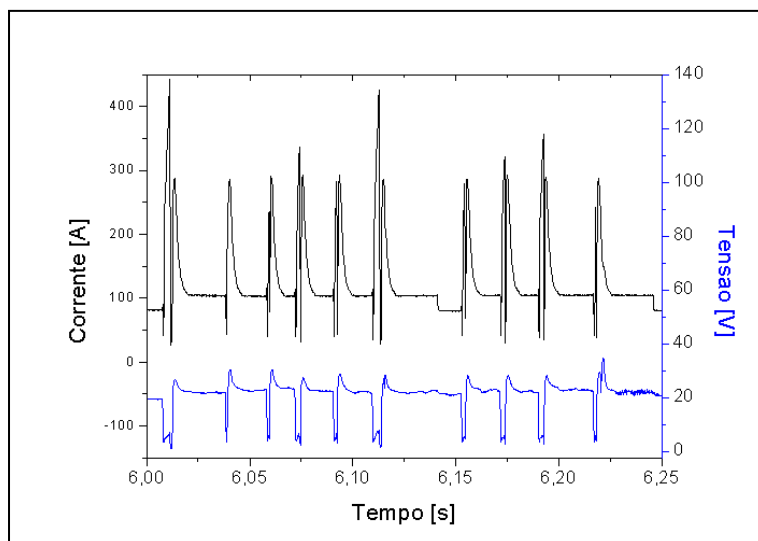


Figura 9.54 – Comportamento dinâmico do ensaio SD4.

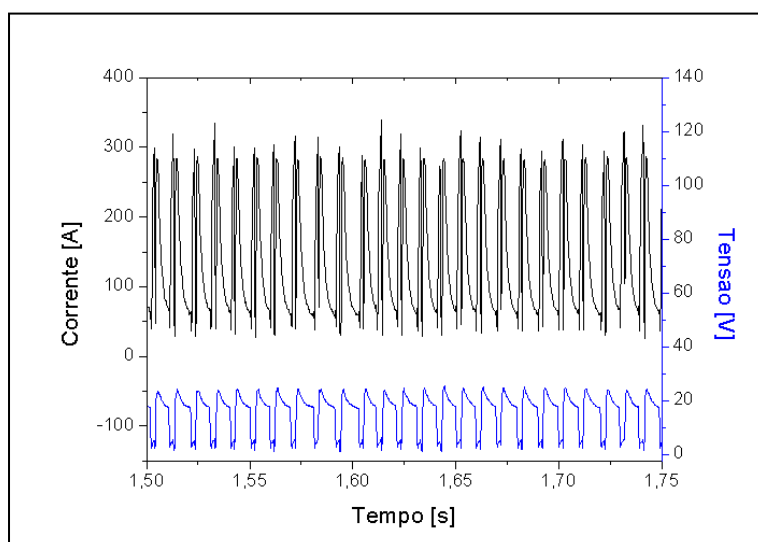


Figura 9.55 – Comportamento dinâmico do ensaio SD5.

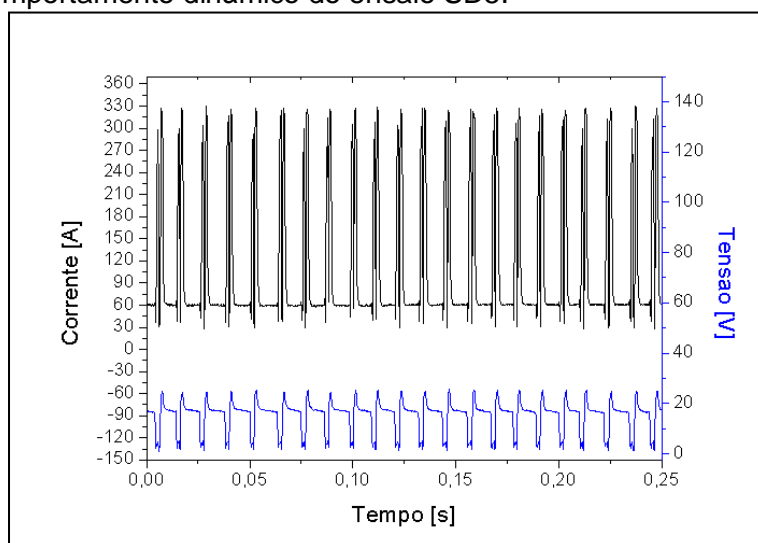


Figura 9.56 – Comportamento dinâmico do ensaio SD6.

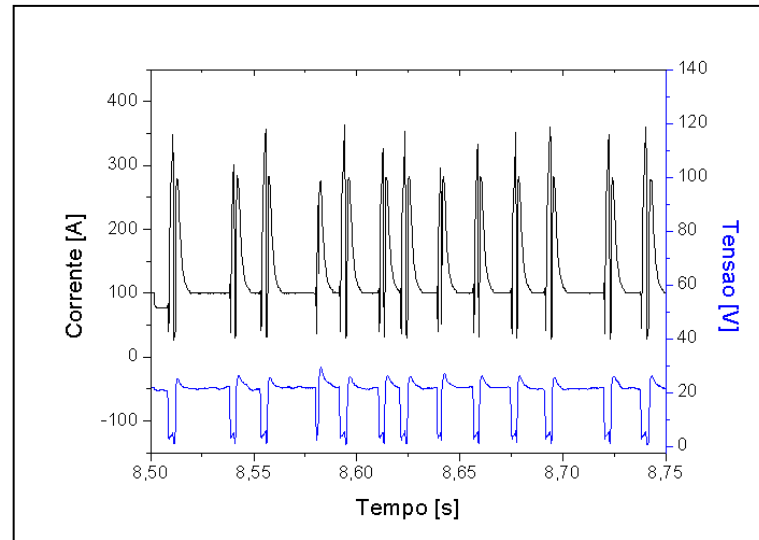


Figura 9.57 – Comportamento dinâmico do ensaio SD7.

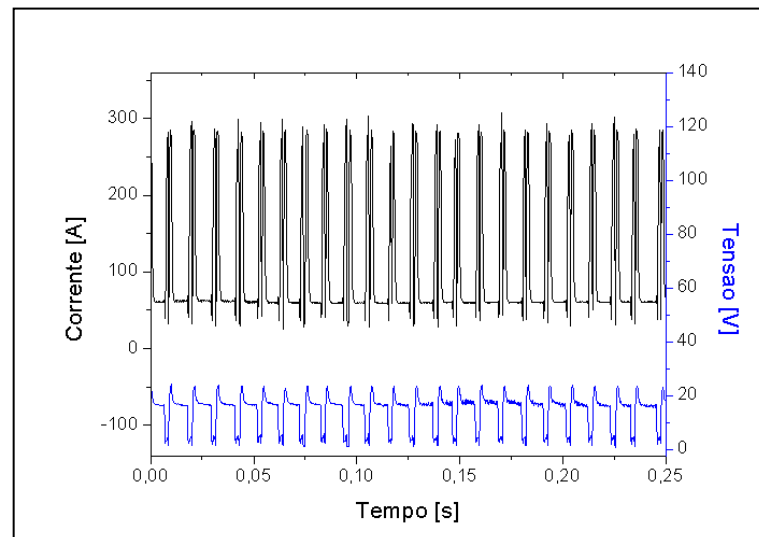


Figura 9.58 – Comportamento dinâmico do ensaio SD8.

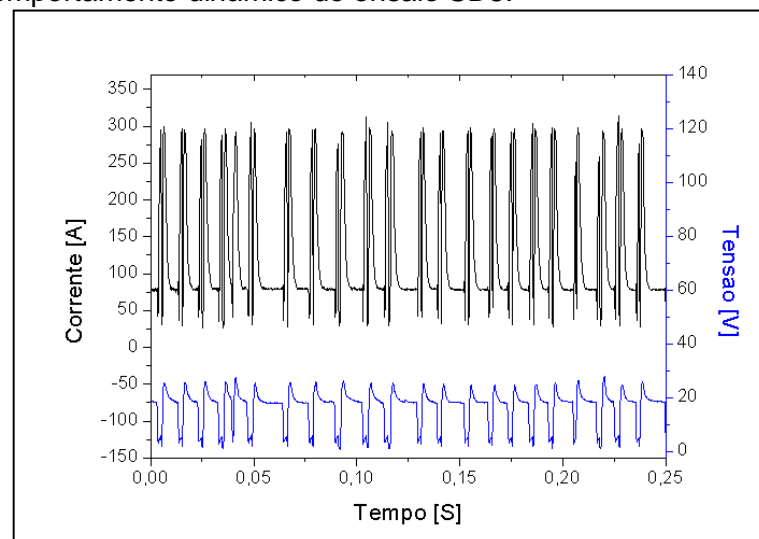


Figura 9.59 – Comportamento dinâmico do ensaio SD9.

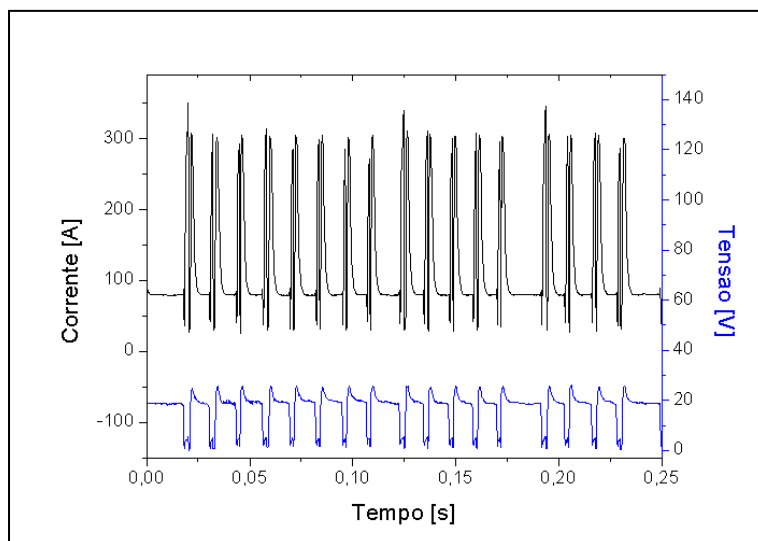


Figura 9.60 – Comportamento dinâmico do ensaio SD10.

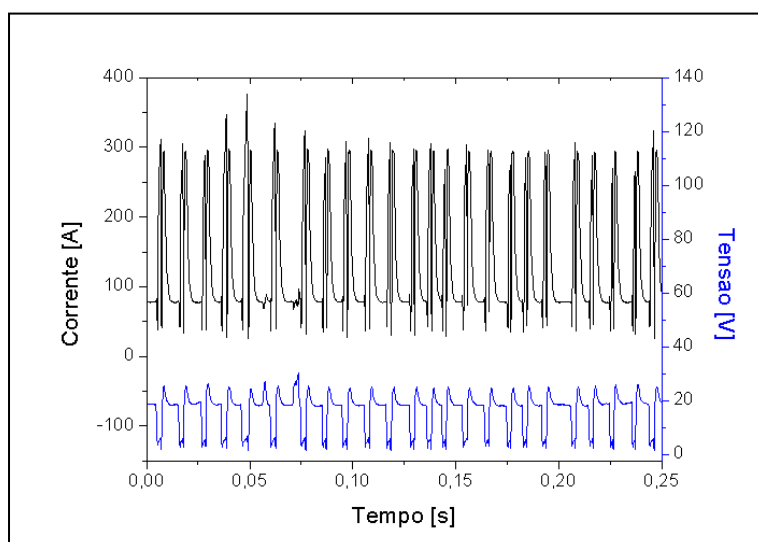


Figura 9.61 – Comportamento dinâmico do ensaio SD11.

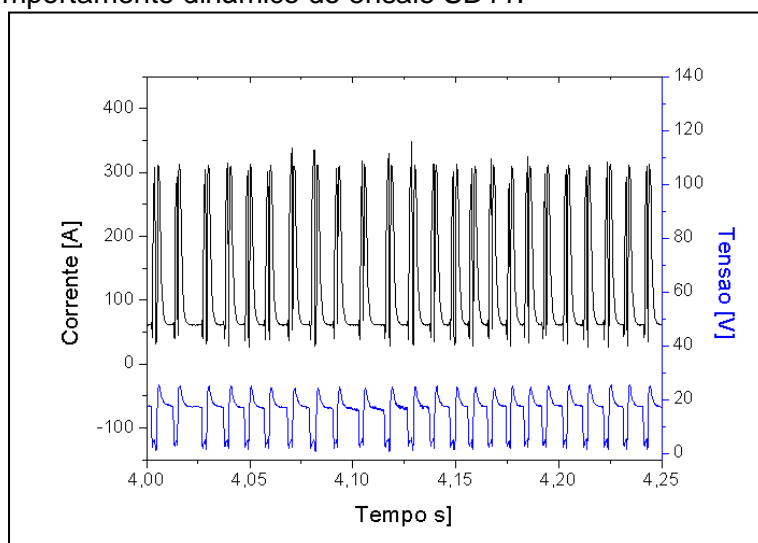


Figura 9.62 – Comportamento dinâmico do ensaio SD12.

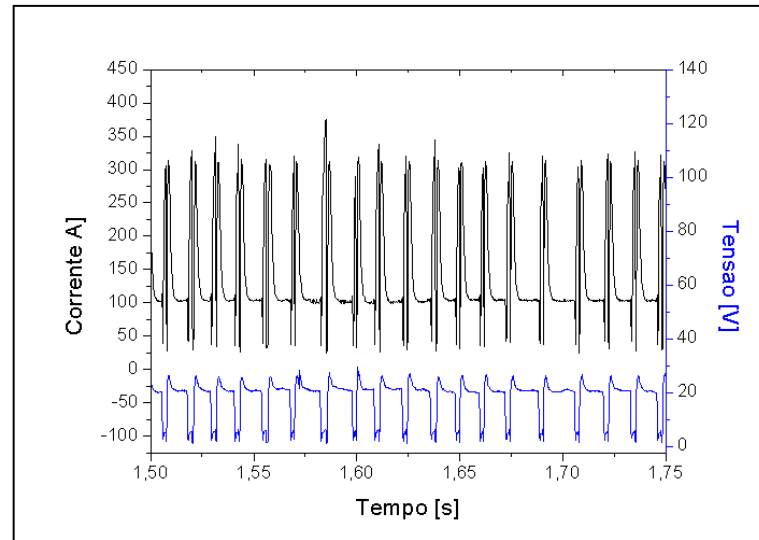


Figura 9.63 – Comportamento dinâmico do ensaio SD13.

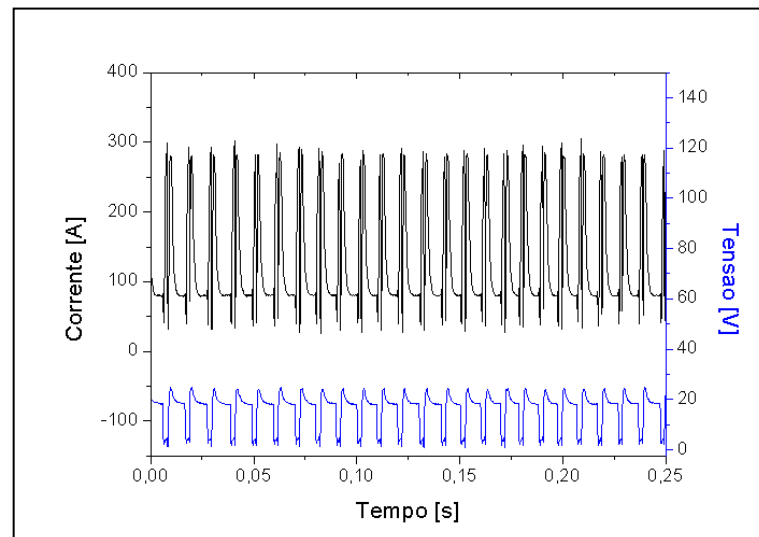


Figura 9.64 – Comportamento dinâmico do ensaio SD14.

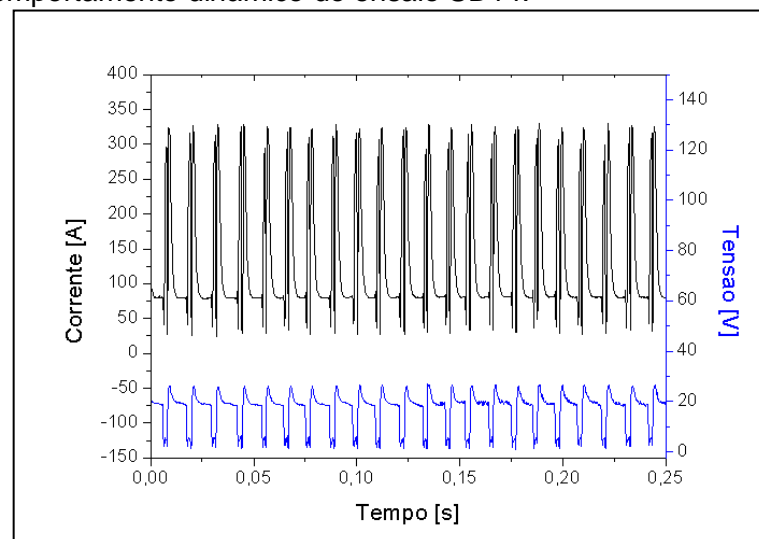


Figura 9.65 – Comportamento dinâmico do ensaio SD15.

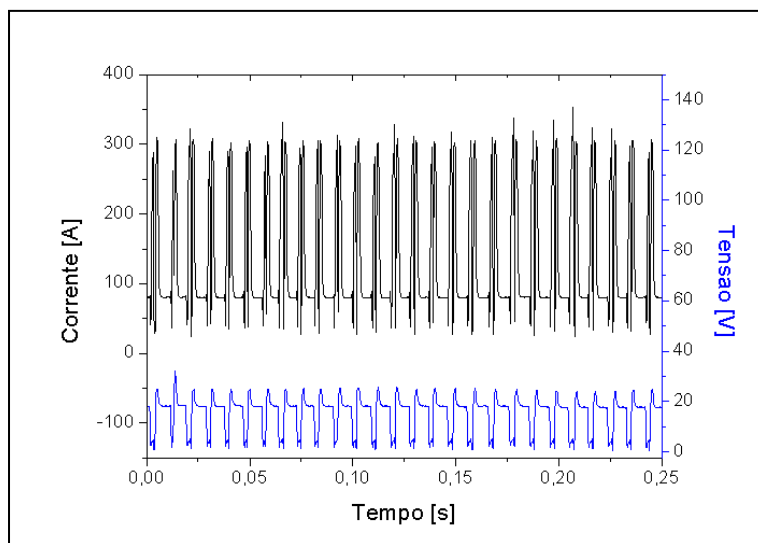


Figura 9.66 – Comportamento dinâmico do ensaio SD16.

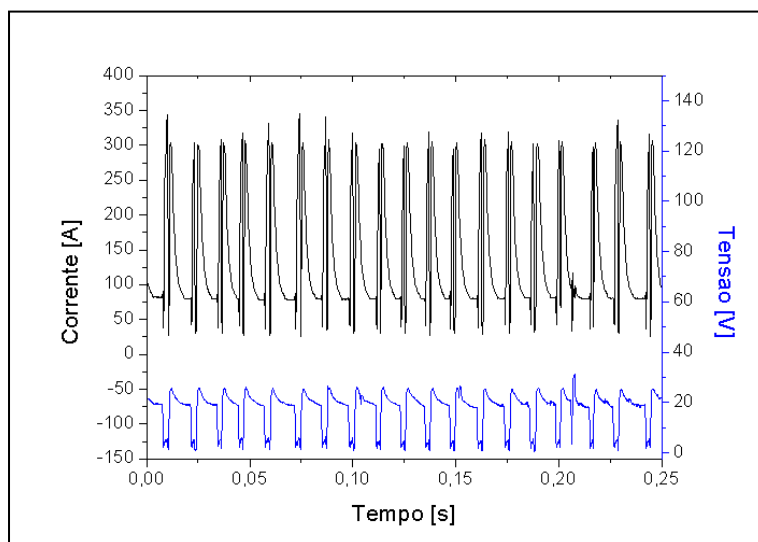


Figura 9.67 – Comportamento dinâmico do ensaio SD17.

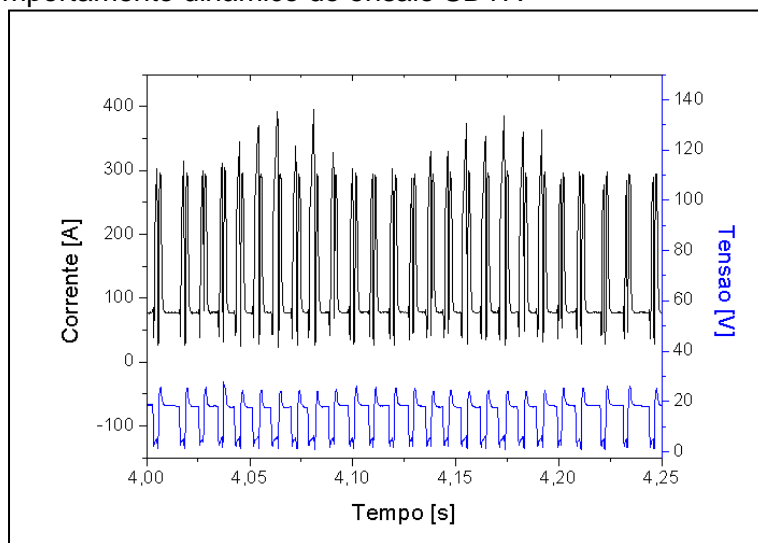


Figura 9.68 – Comportamento dinâmico do ensaio SD18.

9.3 Soldagens realizadas com o processo RMD

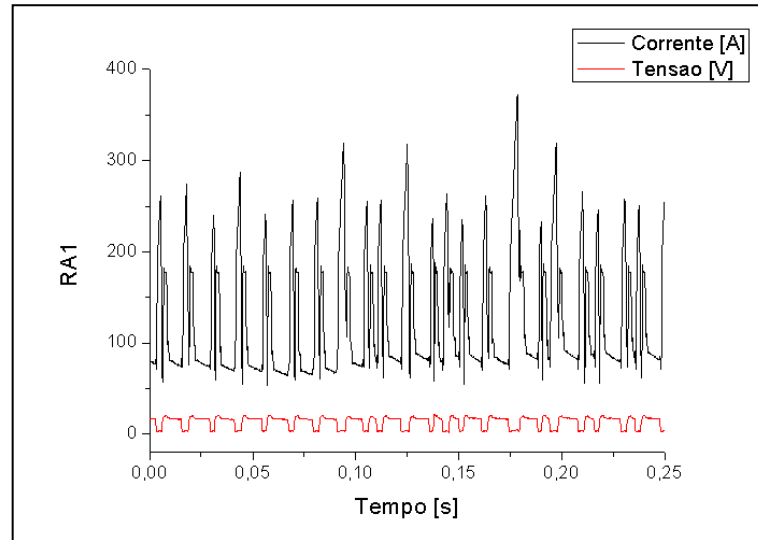


Figura 9.69 – Comportamento dinâmico do ensaio RA1.

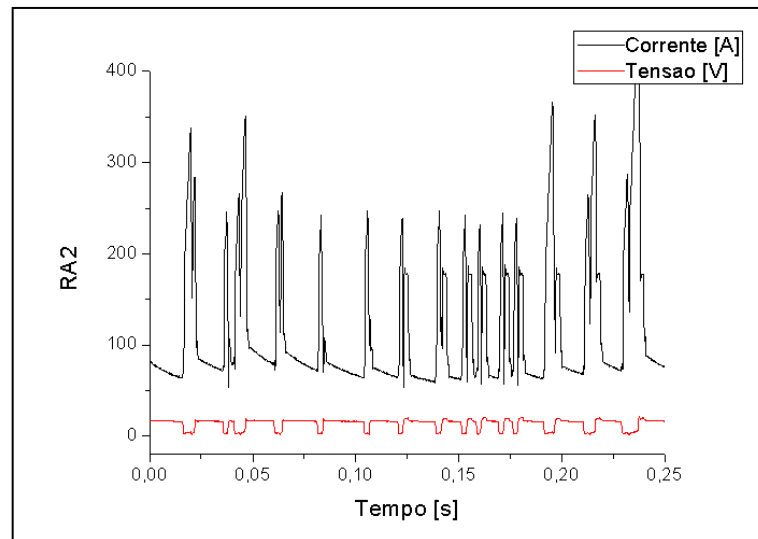


Figura 9.70 – Comportamento dinâmico do ensaio RA2.

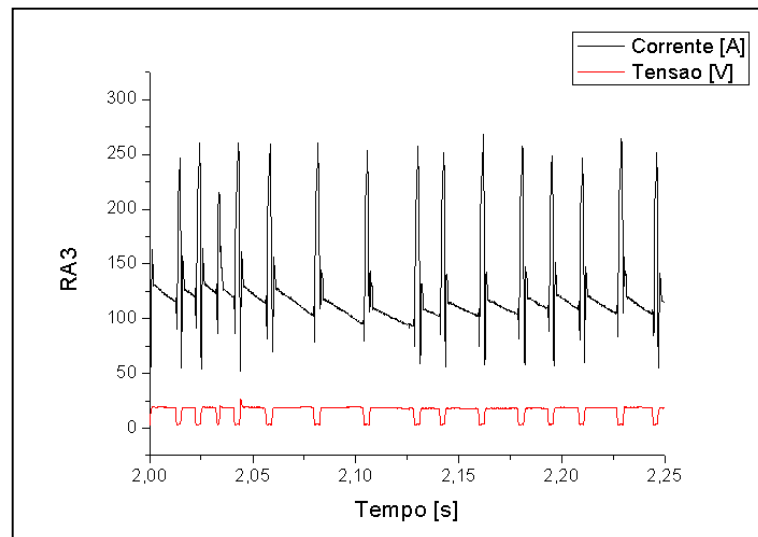


Figura 9.71 – Comportamento dinâmico do ensaio RA3.

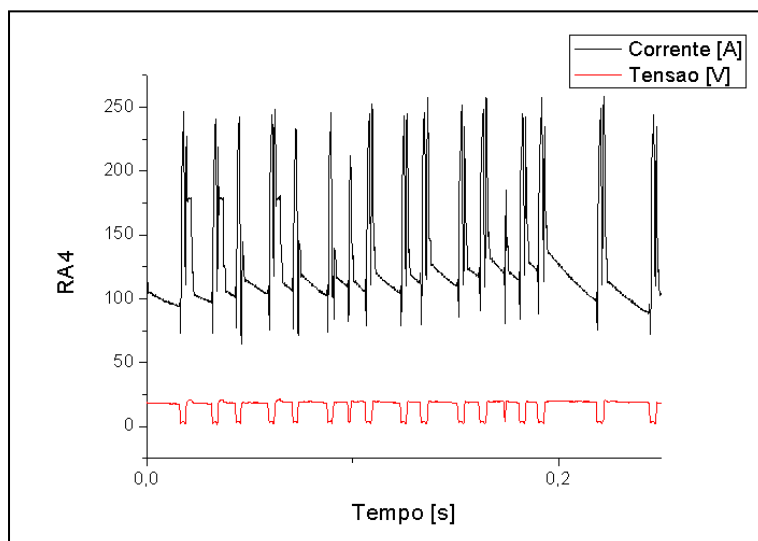


Figura 9.72 – Comportamento dinâmico do ensaio RA4.

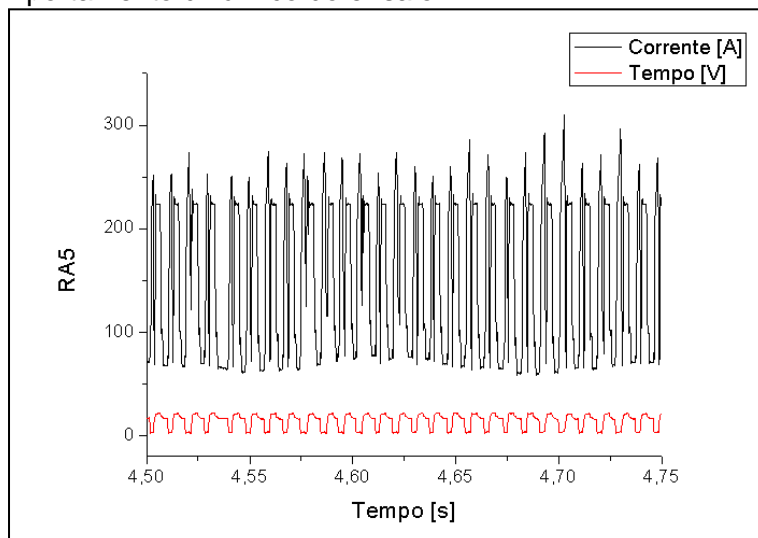


Figura 9.73 – Comportamento dinâmico do ensaio RA5.

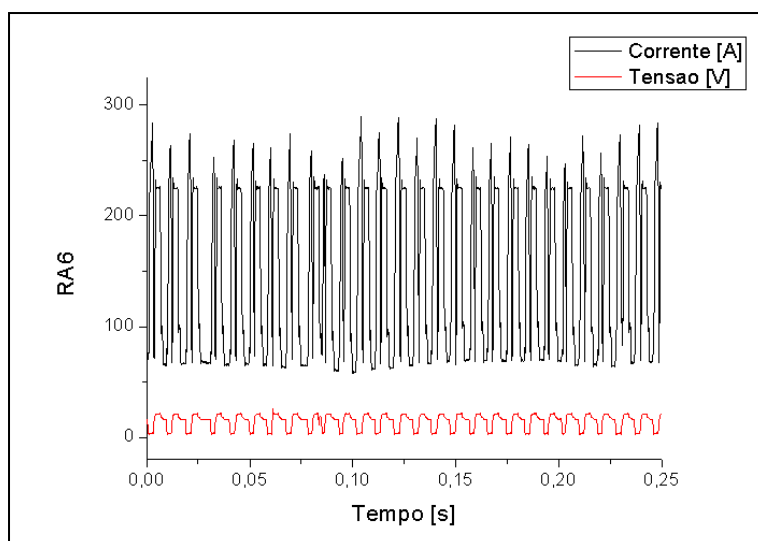


Figura 9.74 – Comportamento dinâmico do ensaio RA6.

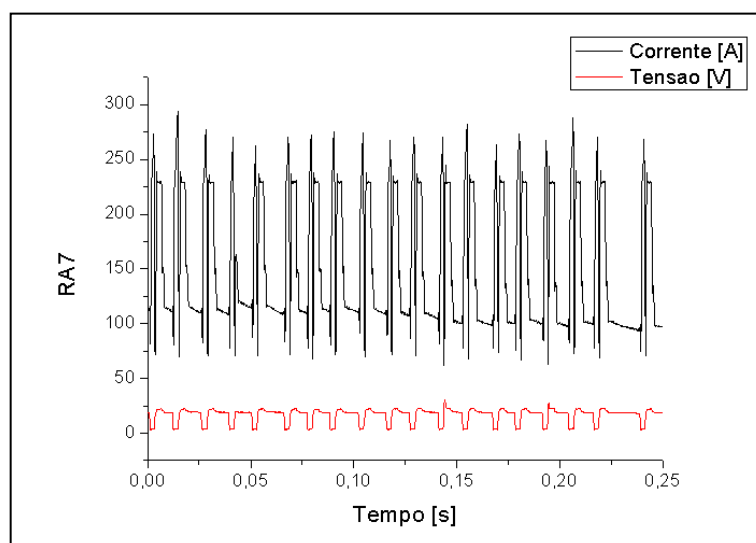


Figura 9.75 – Comportamento dinâmico do ensaio RA7.

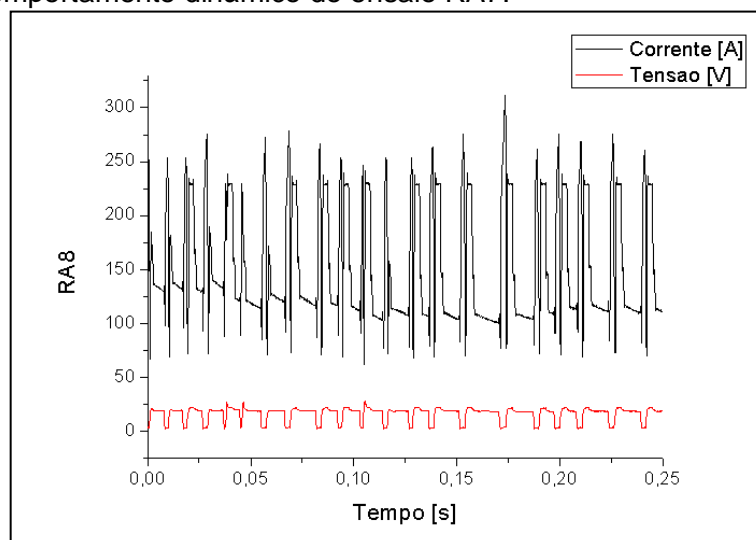


Figura 9.76 – Comportamento dinâmico do ensaio RA8.

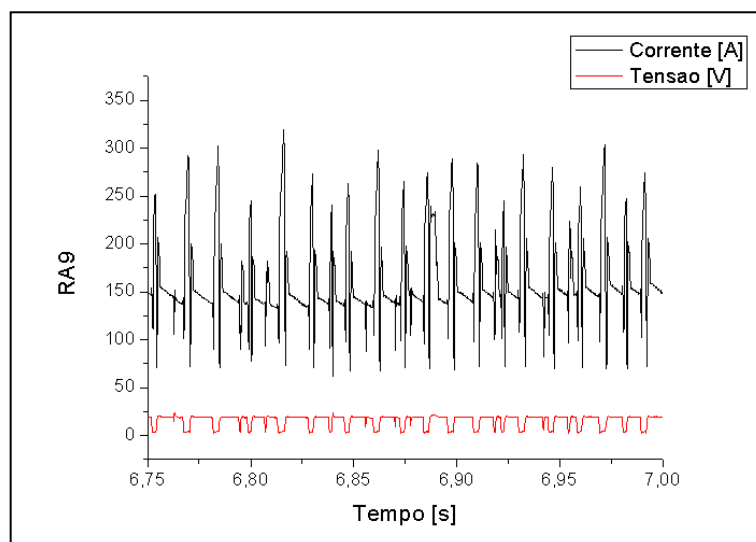


Figura 9.77 – Comportamento dinâmico do ensaio RA9.

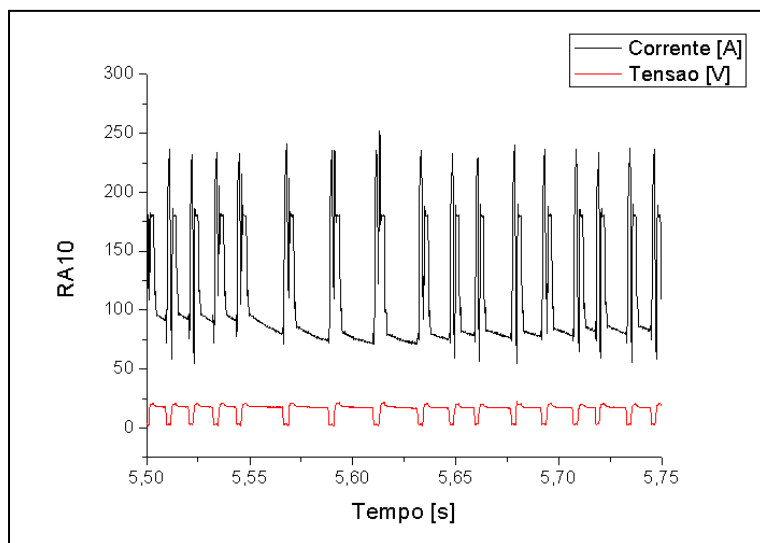


Figura 9.78 – Comportamento dinâmico do ensaio RA10.

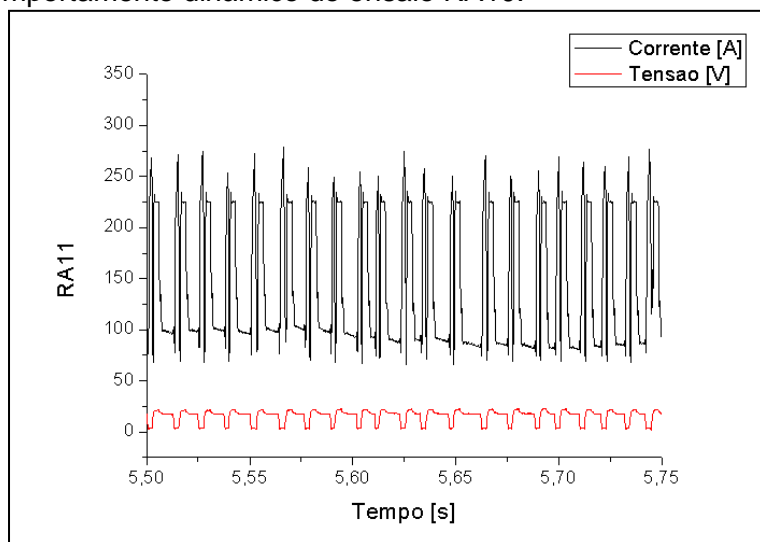


Figura 9.79 – Comportamento dinâmico do ensaio RA11.

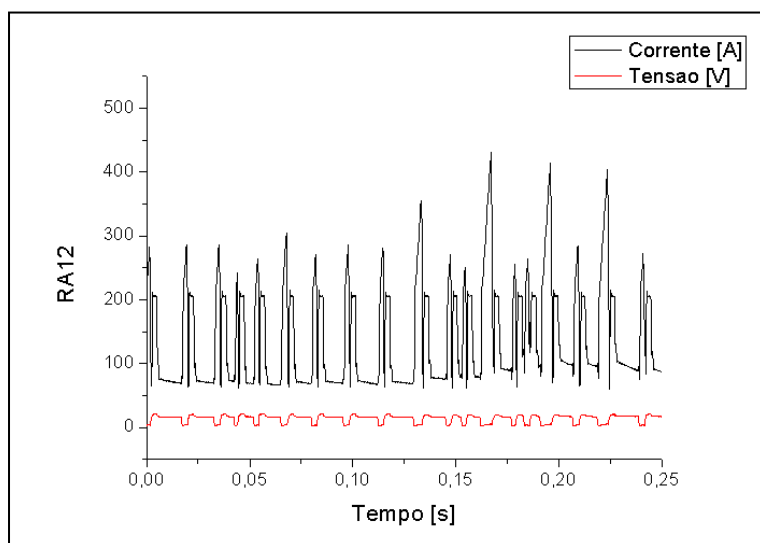


Figura 9.80 – Comportamento dinâmico do ensaio RA12.

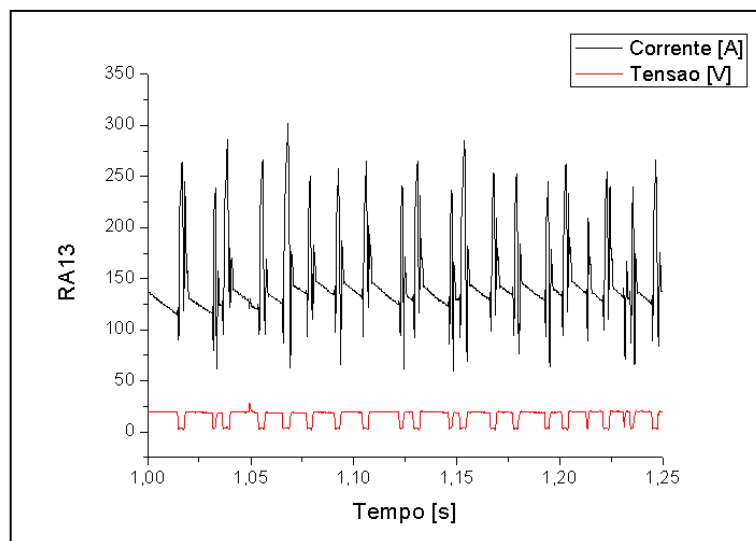


Figura 9.81 – Comportamento dinâmico do ensaio RA13.

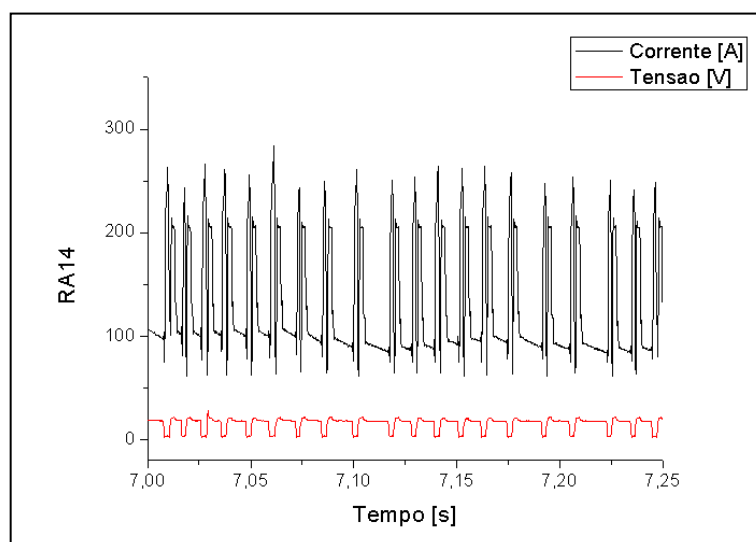


Figura 9.82 – Comportamento dinâmico do ensaio RA14.

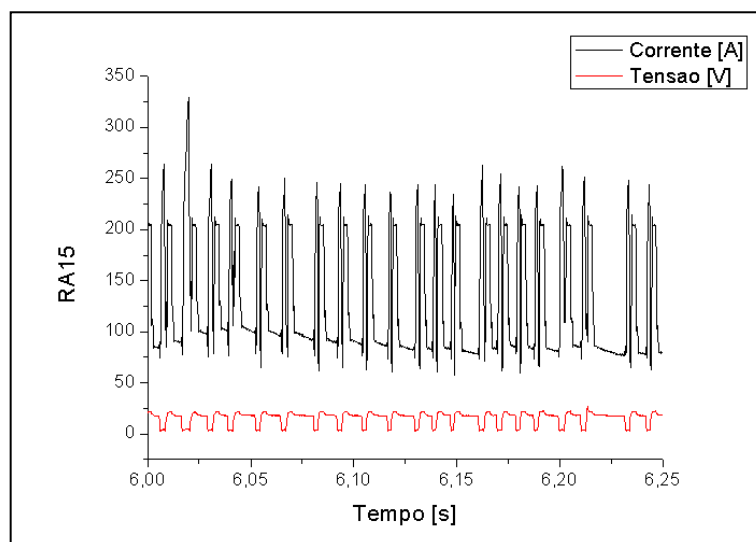


Figura 9.83 – Comportamento dinâmico do ensaio RA15.

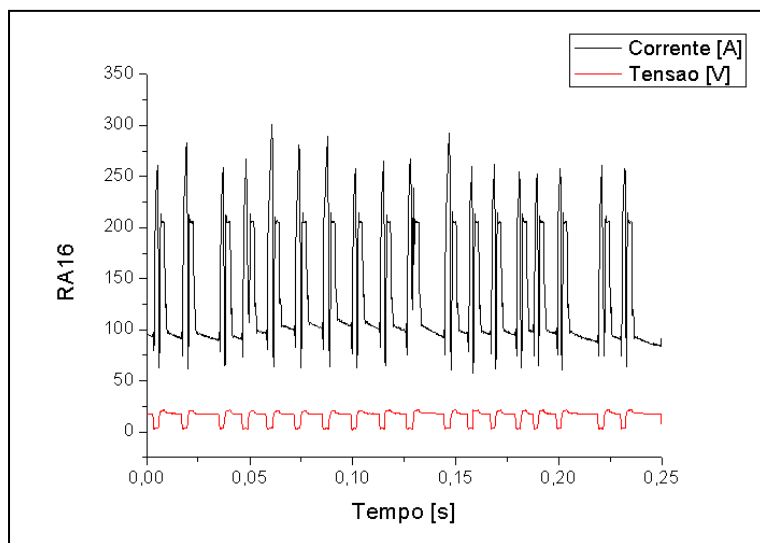


Figura 9.84 – Comportamento dinâmico do ensaio RA16.

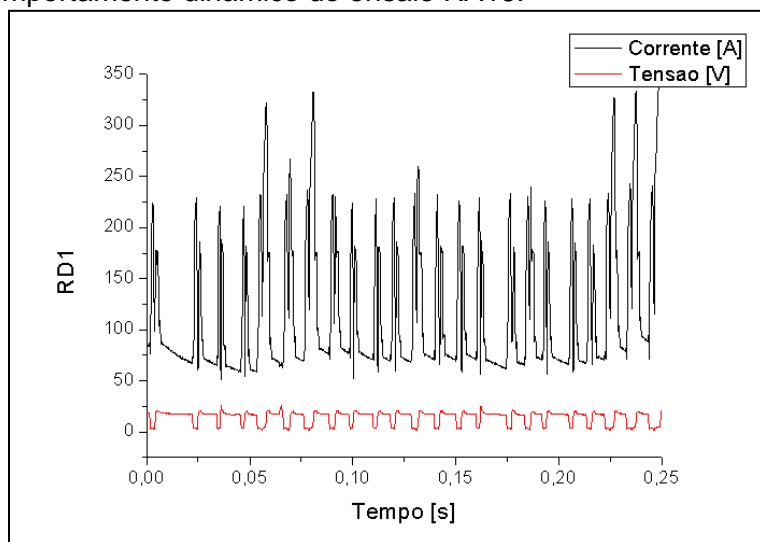


Figura 9.85 – Comportamento dinâmico do ensaio RD1.

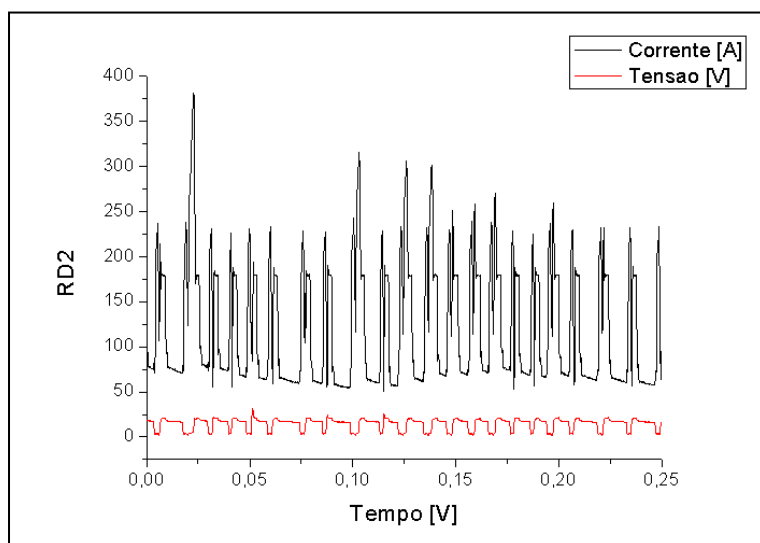


Figura 9.86 – Comportamento dinâmico do ensaio RD2.

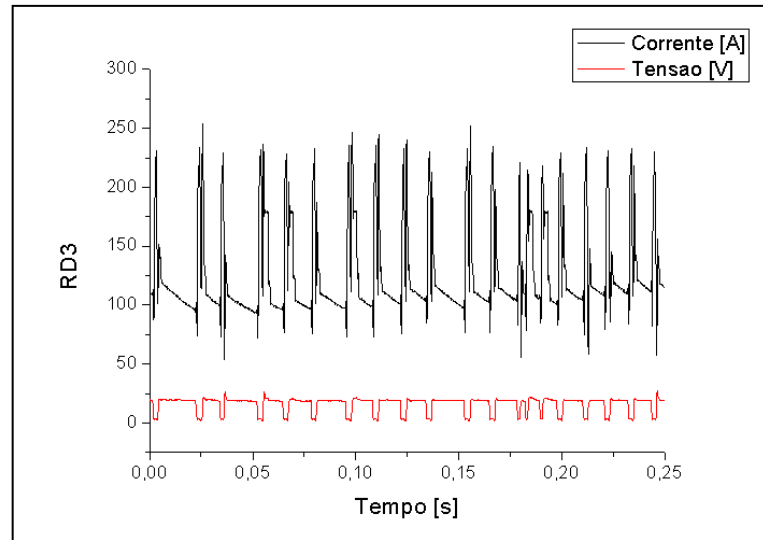


Figura 9.87 – Comportamento dinâmico do ensaio RD3.

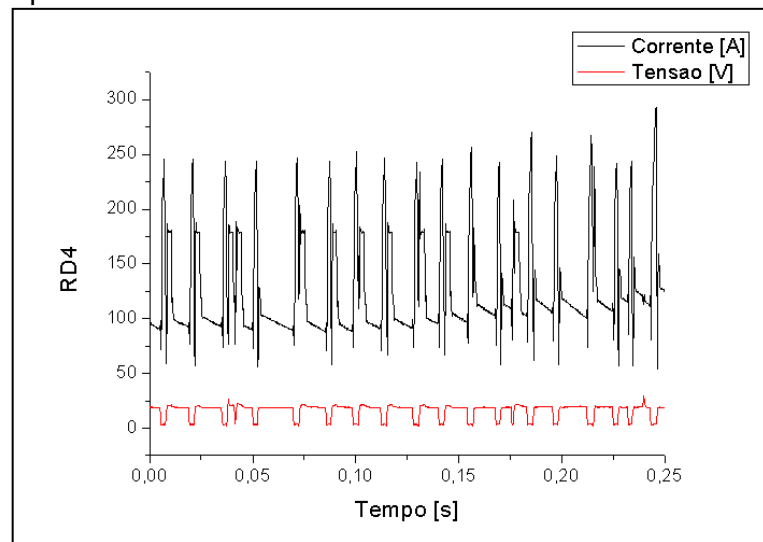


Figura 9.88 – Comportamento dinâmico do ensaio RD4.

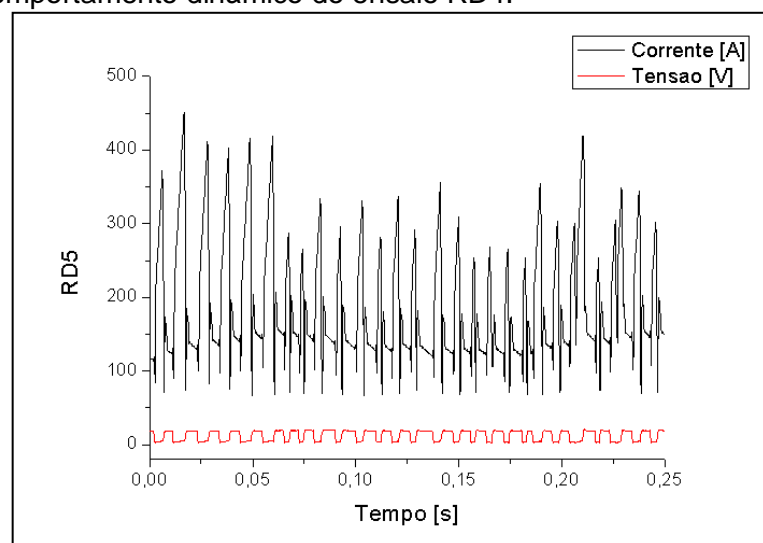


Figura 9.89 – Comportamento dinâmico do ensaio RD5.

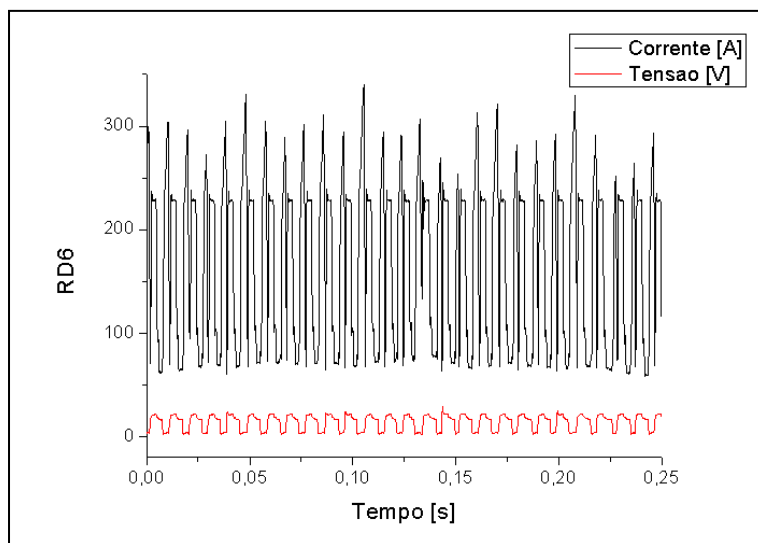


Figura 9.90 – Comportamento dinâmico do ensaio RD6.

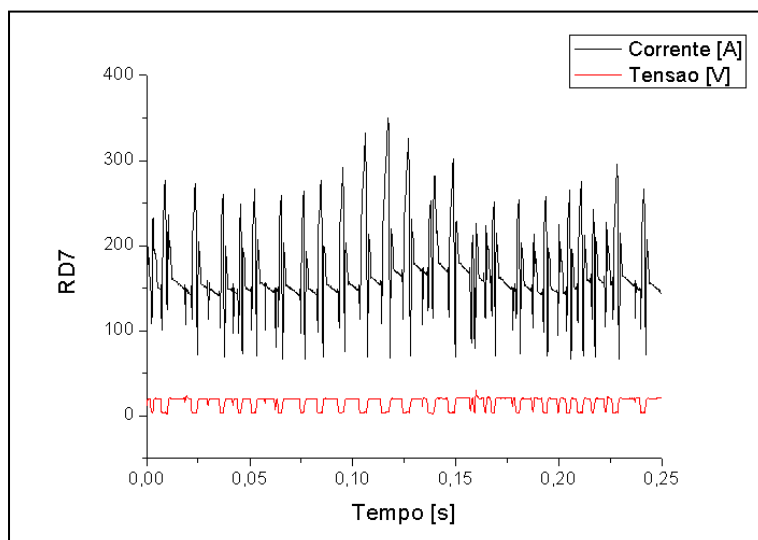


Figura 9.91 – Comportamento dinâmico do ensaio RD7.

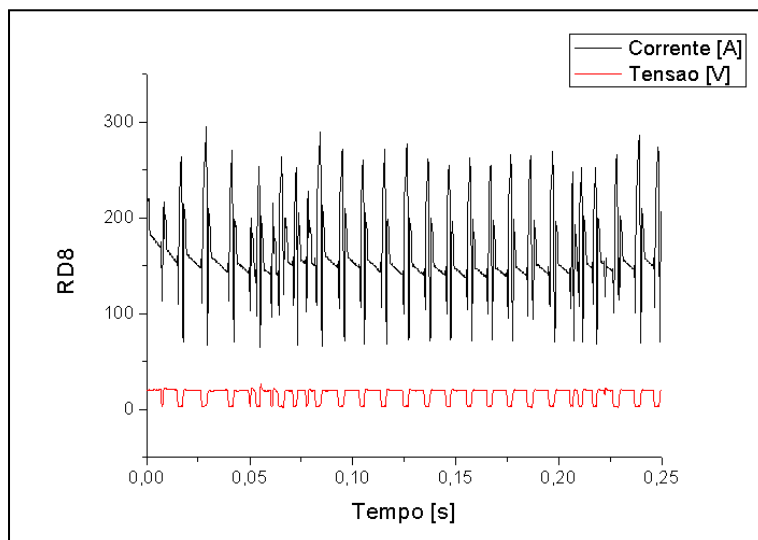


Figura 9.92 – Comportamento dinâmico do ensaio RD8.

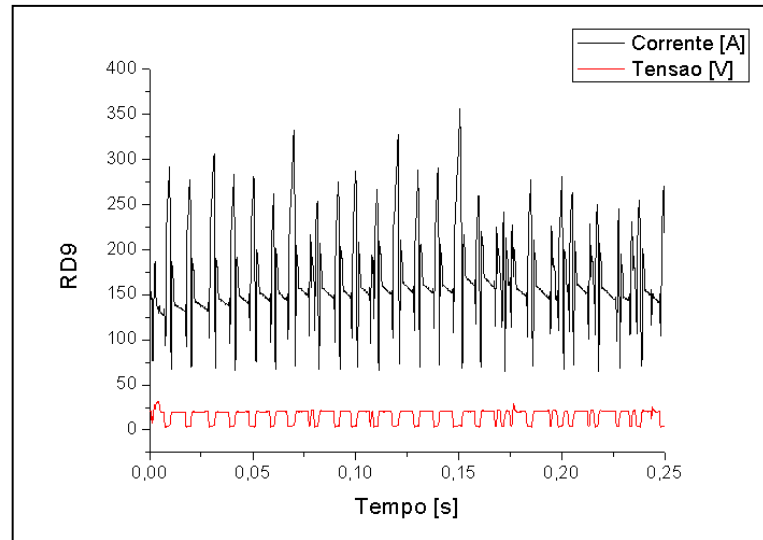


Figura 9.93 – Comportamento dinâmico do ensaio RD9.

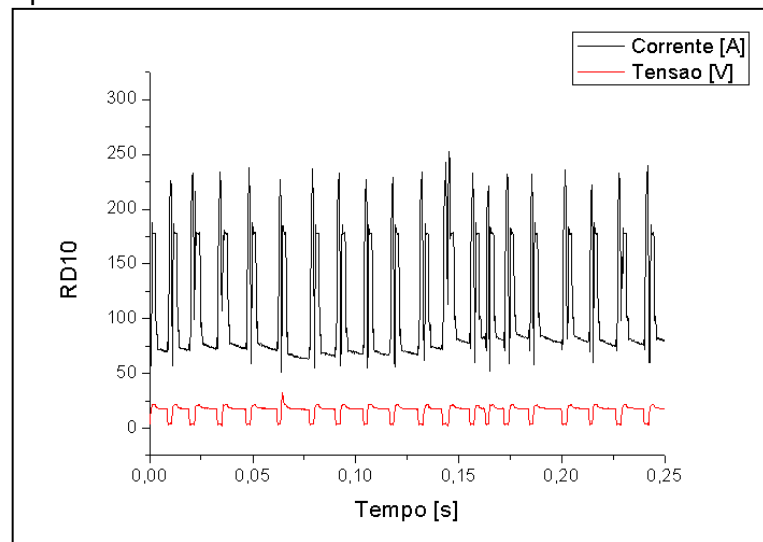


Figura 9.94 – Comportamento dinâmico do ensaio RD10.

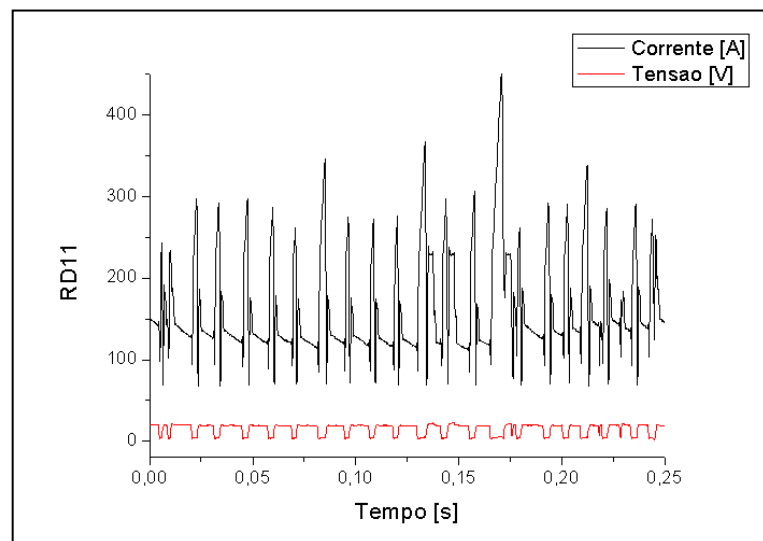


Figura 9.95 – Comportamento dinâmico do ensaio RD11.

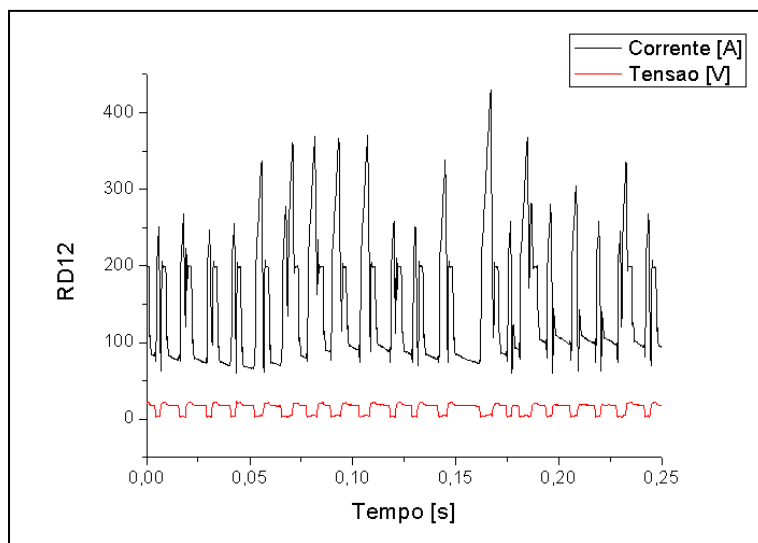


Figura 9.96 – Comportamento dinâmico do ensaio RD12.

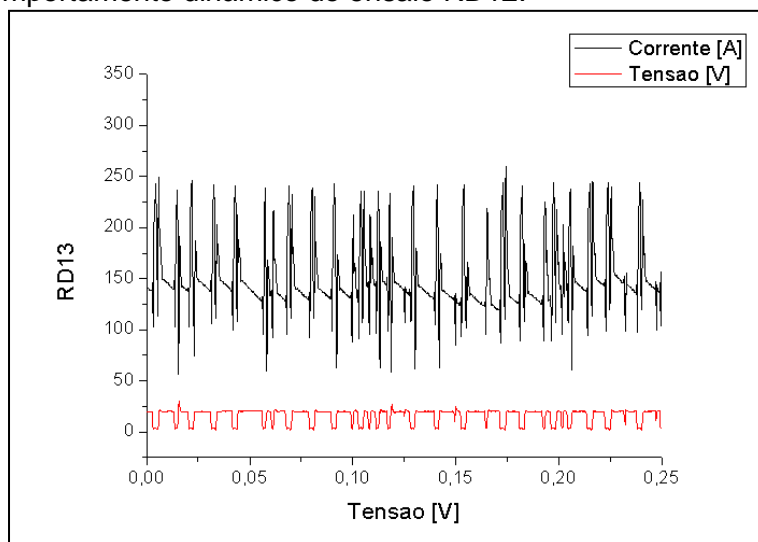


Figura 9.97 – Comportamento dinâmico do ensaio RD13.

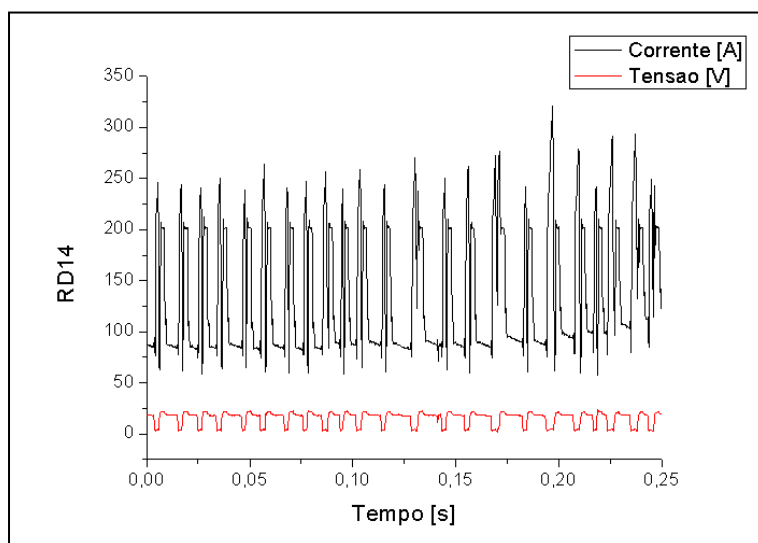


Figura 9.98 – Comportamento dinâmico do ensaio RD14.

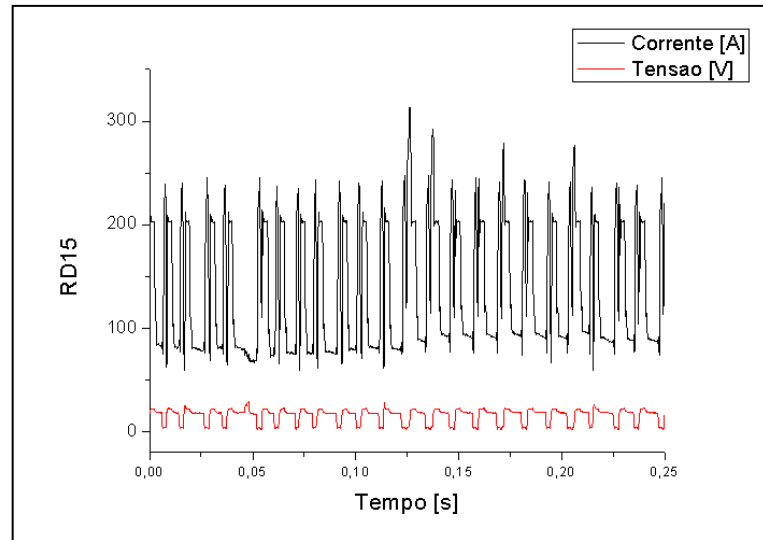


Figura 9.99 – Comportamento dinâmico do ensaio RD15.

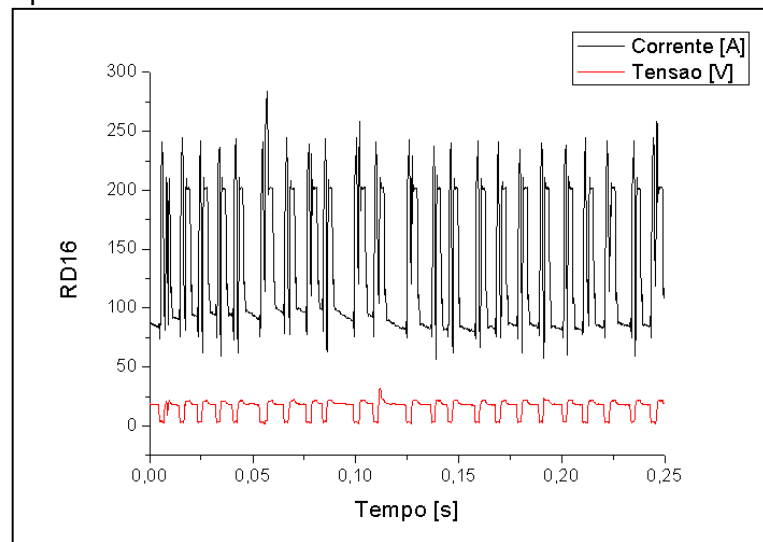


Figura 9.100 – Comportamento dinâmico do ensaio RD16.

9.4 Soldagens realizadas com o processo CMT

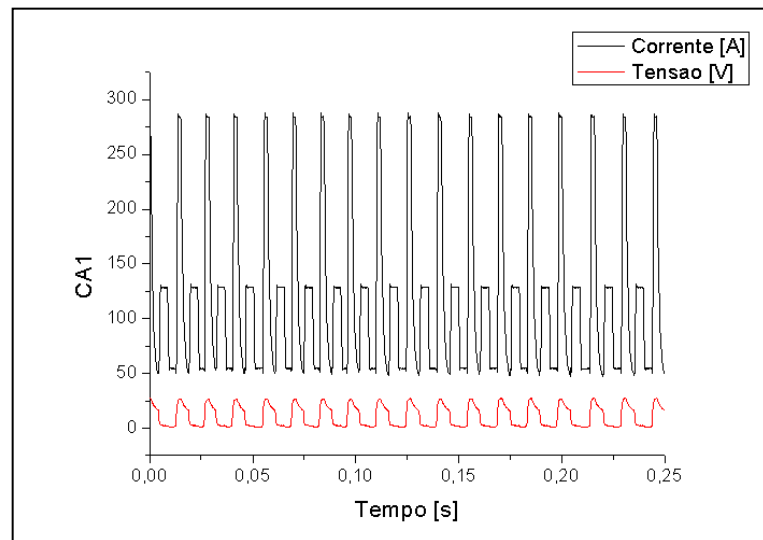


Figura 9.101 – Comportamento dinâmico do ensaio CA1.

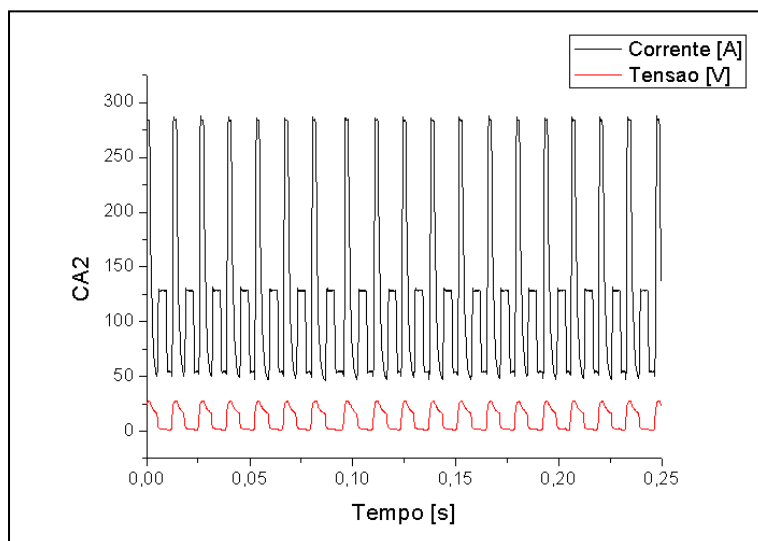


Figura 9.102 – Comportamento dinâmico do ensaio CA2.

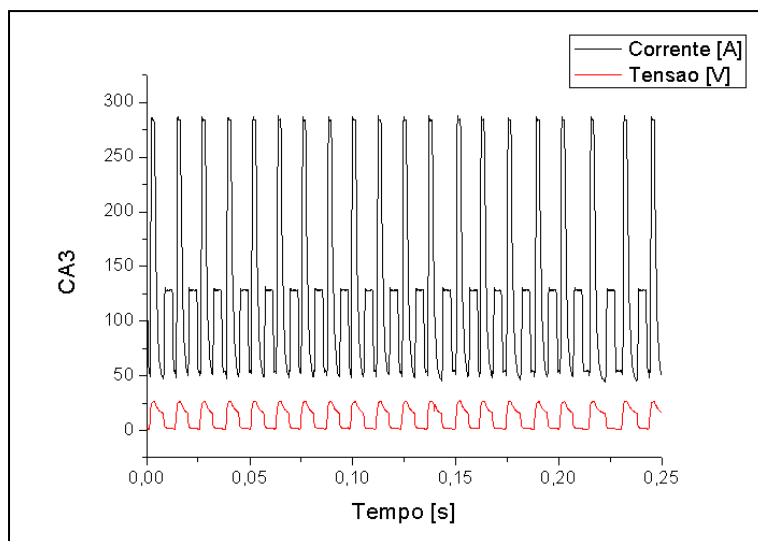


Figura 9.103 – Comportamento dinâmico do ensaio CA3.

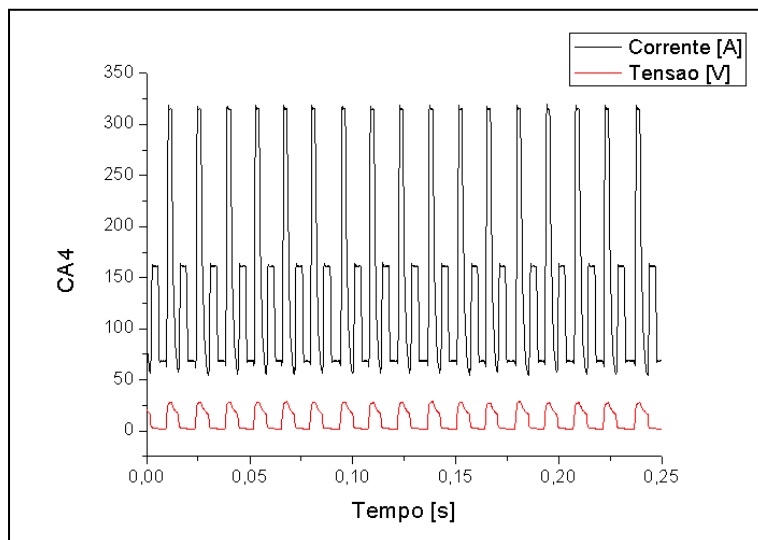


Figura 9.104 – Comportamento dinâmico do ensaio CA4.

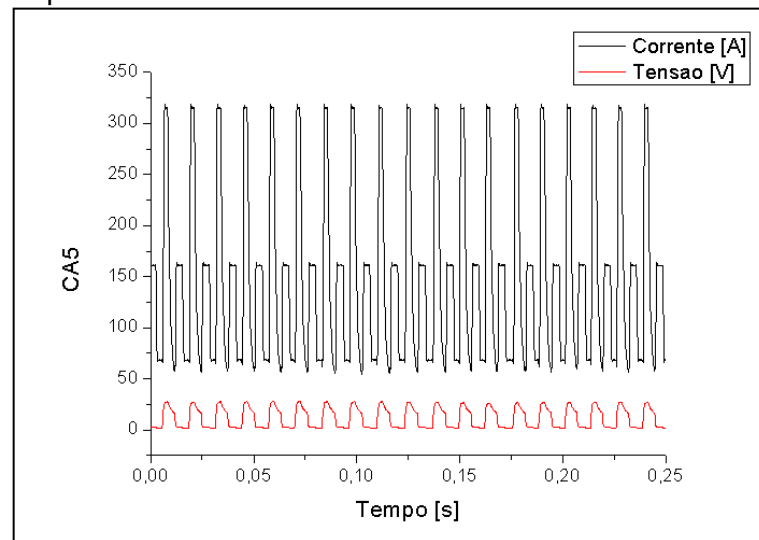


Figura 9.105 – Comportamento dinâmico do ensaio CA5.

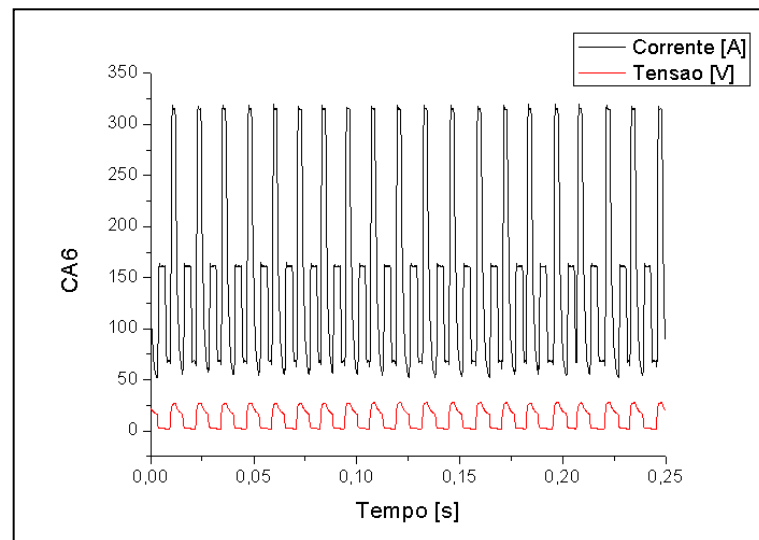


Figura 9.105 – Comportamento dinâmico do ensaio CA6.

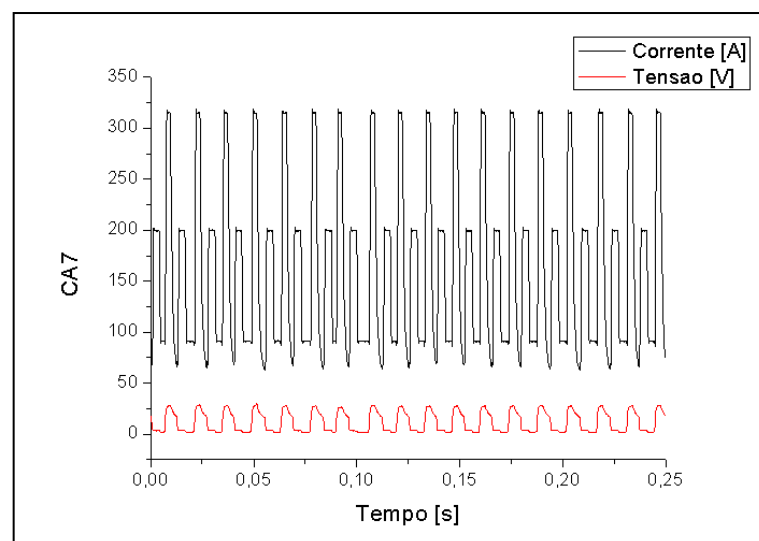


Figura 9.106 – Comportamento dinâmico do ensaio CA7.

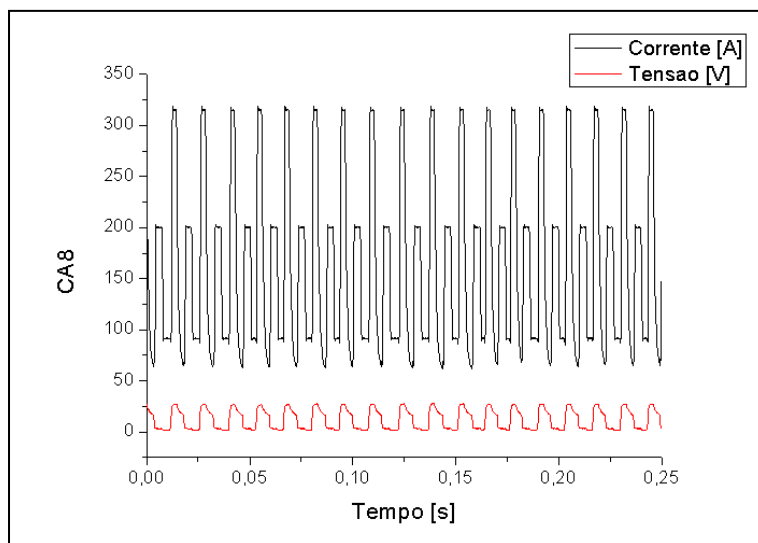


Figura 9.107 – Comportamento dinâmico do ensaio CA8.

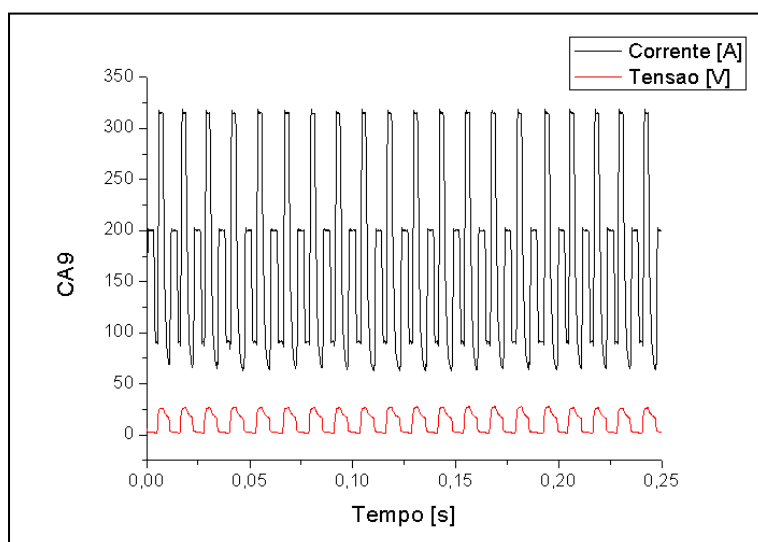


Figura 9.108 – Comportamento dinâmico do ensaio CA9.

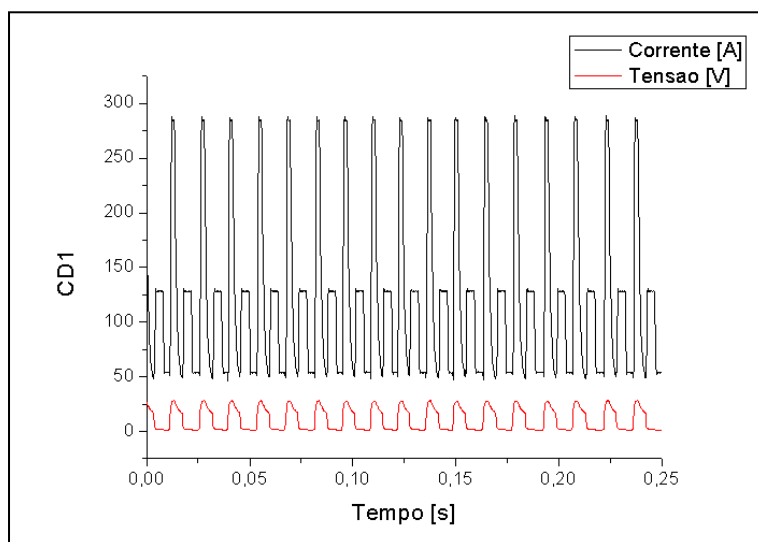


Figura 9.109 – Comportamento dinâmico do ensaio CD1.

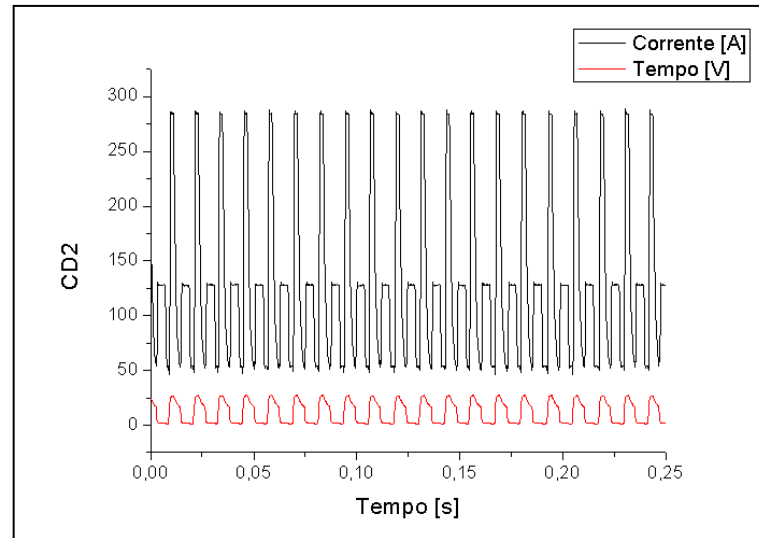


Figura 9.110 – Comportamento dinâmico do ensaio CD2.

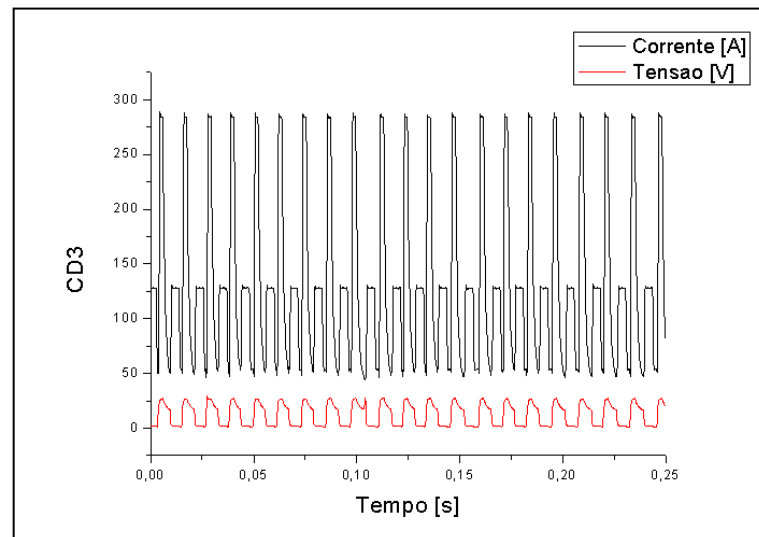


Figura 9.111 – Comportamento dinâmico do ensaio CD3.

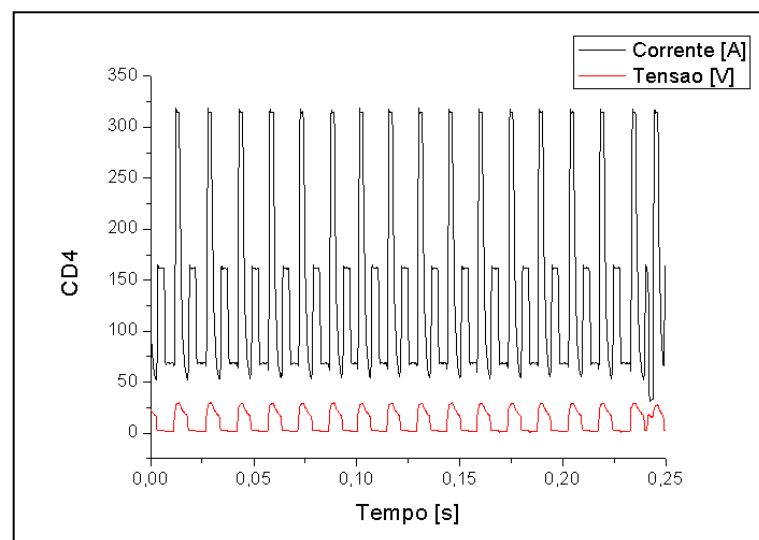


Figura 9.112 – Comportamento dinâmico do ensaio CD4.

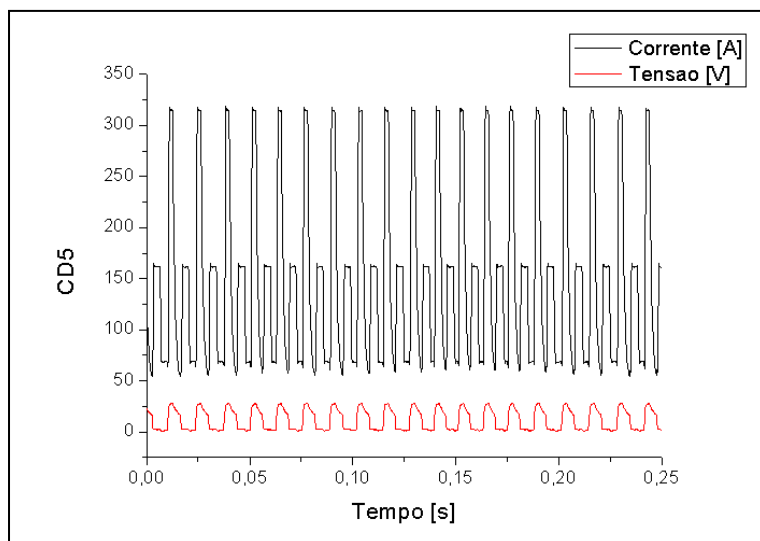


Figura 9.113 – Comportamento dinâmico do ensaio CD5.

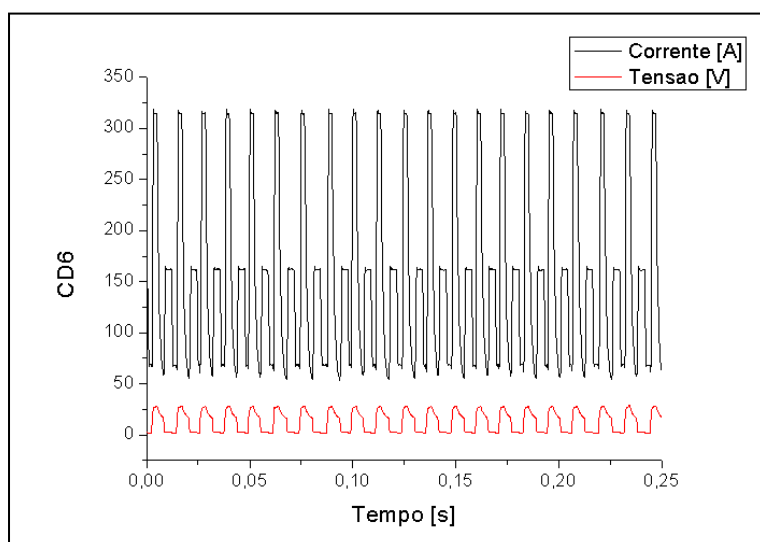


Figura 9.114 – Comportamento dinâmico do ensaio CD6.

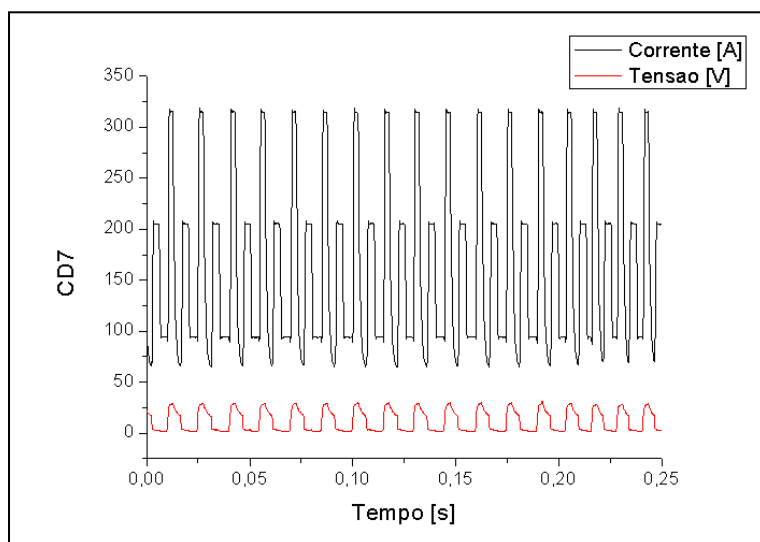


Figura 9.115 – Comportamento dinâmico do ensaio CD7.

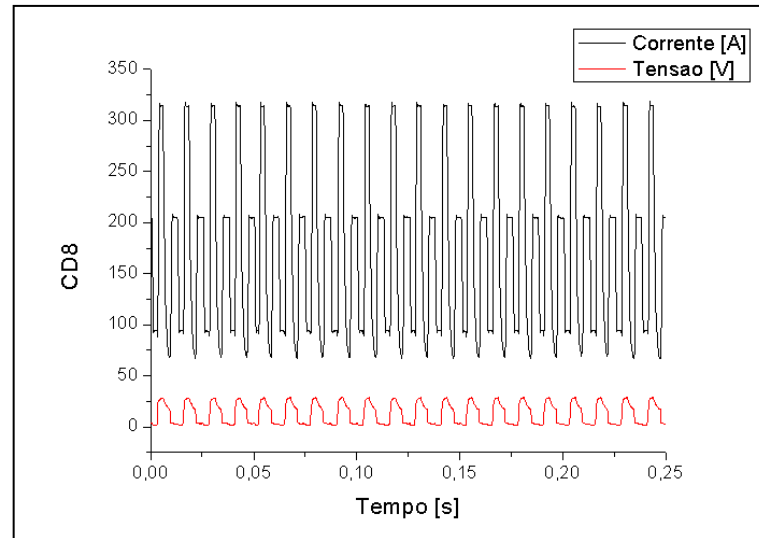


Figura 9.116 – Comportamento dinâmico do ensaio CD8.

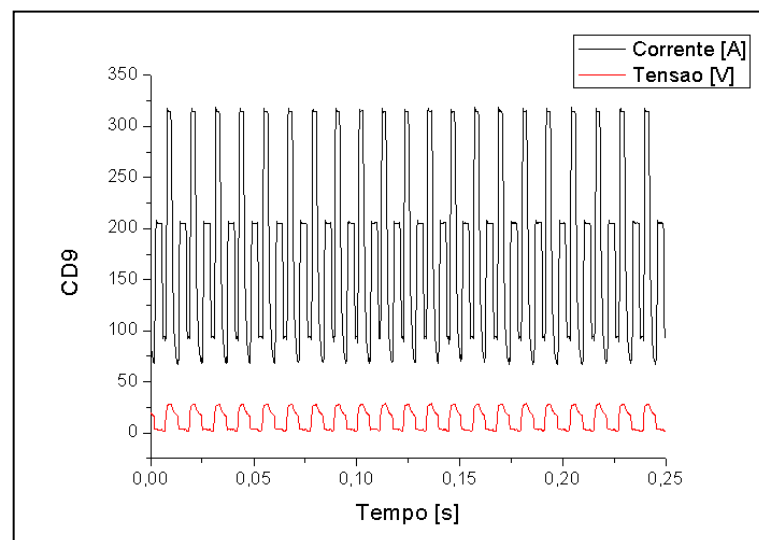


Figura 9.117 – Comportamento dinâmico do ensaio CD9.