



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**Estudo Comparativo de Desempenho do Processo
FCAW Utilizando como Gases de Proteção
100%CO₂, Ar + 25% CO₂ e Ar + 40% CO₂ Eletrodo
Tubular E71T-1 como Consumível**

Por,
**Lucas de Souza Alves
Pedro Henrique Barros Bueno**

Brasília, 22 de junho de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Estudo Comparativo de Desempenho do Processo FCAW Utilizando como Gases de Proteção 100%CO₂, Ar + 25% CO₂ e Ar + 40% CO₂ Eletrodo Tubular E71T-1 como Consumível.

POR,

Lucas de Souza Alves
Pedro Henrique Barros Bueno

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. GUILHERME CARIBE DE CARVALHO

, UnB/ENM (Orientador)

Prof., SADEK CRISOSTOMO ABSI ALFARO

UnB/ ENM (Coorientador)

Prof. MILTON LUIZ SIQUEIRA

, UnB/ ENM

Brasília, 22 de junho de 2016

Dedicatória

Dedico este aqui aos meus pais e avós que apesar de já terem desistido de acreditar nunca deixaram de crer.

Pedro Bueno

Dedico este trabalho à toda minha família, que sempre me apoiou de maneira fundamental em todas as etapas da minha vida. Dedico também à equipe de SAE Baja Piratas do Cerrado, na qual eu vivi experiências inesquecíveis.

Lucas Alves

Agradecimentos

Agradeço a toda minha família que sempre foi a base de tudo na minha vida, me apoiando em todos os momentos. Agradeço aos meus professores, que me guiaram com extrema perícia e responsabilidade ao longo de todo meu aprendizado como futuro engenheiro. Finalmente, agradeço a todos os amigos que sempre demonstraram o verdadeiro sentimento de companheirismo, os que me acompanham desde antes do ingresso na Universidade e os que eu tive a oportunidade de conhecer durante a minha trajetória no curso de engenharia mecânica e que certamente serão amigos para o resto da vida.

Lucas Alves

Agradeço a todos aqueles que foram parte da minha jornada nesses anos tão intensos de universidade. Agradeço aos meus pais e avós por todo o apoio e compreensão e por não desacreditarem nunca de mim. Agradeço a todos os meus amigos que de uma maneira ou de outra contribuíram para que eu chegasse até onde cheguei. Agradeço às equipes Draco Volans e Piratas do Cerrado por terem me ensinado tudo o que sei de útil e fazerem de mim uma pessoa muito mais incrível do que imaginei que seria. Agradeço ao amigo Lucas Alves por me aceitar neste barco tão melhor de conduzir. Agradeço ao irmão Gino Colherinhas por fazer parte da minha vida. Agradeço ainda aos colegas Eduardo Alves por sua companhia sempre tão sincera e ajuda nas longas horas, ao colega Lucas Inácio por suas ótimas ideias e grande eficiência, ao colega Jorge Alziro por sua disposição em ajudar mesmo nas condições mais adversas e ao colega Ciro Alegretti pelo ukulele. Por fim, agradeço à minha procuradora legal Maryana Ananias pelo sorriso mais bonito da engenharia mecânica. Ultra!

Pedro Bueno

Diante das diferenças operacionais existentes no processo FCAW utilizando diferentes gases de proteção, existem características dos processos de soldagem que os tornam competitivos em termos de qualidade e produtividade. Com isso surge a necessidade de quantificar e salientar as principais características de cada um, visando fornecer ao usuário informações mais seguras que permitam a opção pelo melhor processo de acordo com sua aplicação: uma comparação de valor prático entre esses processos deve ser feita compensando as suas diferenças operacionais. Neste trabalho foi proposta a realização da comparação do processo FCAW com três gases distintos de forma a ter resultados mais aplicáveis. Para isto, procura-se avaliar os respectivos gases de proteção de grande aplicação para o processo FCAW sob mesmos níveis de corrente cobrindo uma faixa típica de uso, com uma mesma taxa de alimentação por unidade de comprimento e principalmente, respeitando os demais parâmetros de soldagem típicos. Soldagens foram realizadas utilizando-se o eletrodo E71T-1 sob as proteções gasosas 100%CO₂, Ar+25%CO₂ e Ar+40%CO₂. Procurou-se distinguir e avaliar características do processo com cada tipo de gás ou mistura que pudessem influenciar diretamente na sua operacionalidade, tais como: estabilidade do processo, emissão de fumos, aspecto superficial dos cordões, nível de escória, quantidade de respingos, taxa de deposição via comparação de massa de eletrodo fundida e massa efetivamente depositada na forma de cordão, características geométricas dos cordões, molhabilidade e custo de fabricação por unidade de tempo.

ABSTRACT

In face of the operational differences in the Flux Cored process (FCAW) using different protection gases, there are certain characteristics in the welding processes that make them competitive in terms of quality and productivity. With that in mind, it is necessary to quantify and emphasize each of the main characteristics of the processes, targeting the better information transmission to the final user, allowing the best process to be chosen in accordance to the application: a comparison of practical value between those processes must be done compensating the operational differences. Therefore, this work suggests the comparison of the FCAW process with three different gases in a manner such that the results might become more accessible. With that goal, the most common protection gases for the FCAW process will be evaluated for equal levels of electric current, covering a typical operational spectrum, with an equal feed ratio per length unit and, specially, following the remaining typical welding parameters for each process. Welds will be made using the E71T-1 electrode, with the protection gases 100%CO₂, Ar+25%CO₂ and Ar+40%CO₂. The characteristics that might directly influence the operation ability were singled out and evaluated, such as: process stability, fume emission, superficial aspect of the seams, slag levels, droplet ejection, deposition rate through the comparison between the molten electrode mass and the mass effectively deposited in the seam, seam geometrical characteristics, dewetting and fabrication cost per time unit.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PROPOSTA DE ESTUDO E SUA IMPORTÂNCIA	1
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	FUNDAMENTOS DO PROCESSO ELETRODO TUBULAR	4
2.2	TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO ELETRODO TUBULAR	7
2.3	PROTEÇÃO GASOSA	10
2.4	VARIÁVEIS DO PROCESSO ELETRODO TUBULAR	12
2.5	GERAÇÃO DE FUMOS	14
2.6	GERAÇÃO DE RESPINGOS	16
3	METODOLOGIA DO ENSAIO	19
3.1	INTRODUÇÃO	19
3.2	METODOLOGIA	19
3.3	BANCADA EXPERIMENTAL	22
3.3.1	BANCADA FISÍCA	22
3.3.2	CONSUMÍVEIS	25
4	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	26
4.1	PLANEJAMENTO FATORIAL DOS EXPERIMENTOS	26
4.2	ESTUDO DOS ERROS	27
4.3	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	28
4.4	DEFINIÇÃO DA FAIXA OPERACIONAL – ENVELOPE DE PARÂMETROS	29
5	DISCUSSÃO	38
5.1	CÁLCULO DAS CORRENTES E TENSÕES	38
5.2	ESTABILIDADE DO PROCESSO	39
5.3	EMIÇÃO DE FUMOS	39
5.4	ASPECTO SUPERFICIAL	40
5.5	NÍVEL DE ESCÓRIA	40
5.6	RESPINGOS	41
5.7	TAXA DE DEPOSIÇÃO	42
5.8	GEOMETRIA DO CORDÃO E MOLHABILIDADE	42
5.9	CUSTOS	45
6	CONCLUSÃO	46
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
8	APÊNDICES	49

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 O PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODOS TUBULARES COM GÁS DE PROTEÇÃO (FORTES, 2004)	4
FIGURA 2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE ELETRODOS (FORTES, 2004).	5
FIGURA 2.3 PARÂMETROS OPERACIONAIS PARA ANÁLISE DAS TRANSFERÊNCIAS METÁLICAS PARA DIFERENTES ELETRODOS TUBULARES SOBRE DUAS PROTEÇÕES GASOSAS, ONDE FORAM REALIZADOS TESTES INICIAIS E DEPOIS REPETIDOS COM FILMAGENS PARA ALGUNS TESTES ONDE: W- VELOCIDADE DE FUSÃO; I- CORRENTE; S- COMPRIMENTO ENERGIZADO DO ELETRODO; LA- COMPRIMENTO DE ARCO (STARLING, ET AL., 2005).....	9
FIGURA 2.4 QUADROS DE FILMAGENS PARA ELETRODO RUTÍLICO COM PROTEÇÃO GASOSA Ar+25% CO ₂ PARA DIFERENTES CORRENTES (STARLING, ET AL., 2005).....	9
FIGURA 2.5 QUADROS DE FILMAGENS PARA ELETRODO RUTÍLICO COM PROTEÇÃO GASOSA 100% CO ₂ PARA DIFERENTES CORRENTES (STARLING, ET AL., 2005).....	10
FIGURA 2.6 EFEITO DO GÁS DE PROTEÇÃO NO PERFIL DO CORDÃO EM CCPR (BRACARENSE, 2000).	11
FIGURA 2.7 TAXA DE DEPOSIÇÃO PARA ELETRODOS TUBULARES E ELETRODOS SÓLIDOS EM FUNÇÃO DO AUMENTO DA CORRENTE ADAPTADO (WIDGERY, 1994).	13
FIGURA 2.8 MECANISMOS DE FORMAÇÃO FUMOS ONDE, 1- EVAPORAÇÃO DE FUMOS DA PONTA DO ELETRODO (GOTA), 2- EVAPORAÇÃO DE FUMOS DO ELETRODO NA CONEXÃO CATÓDICA OU ANÓDICA; 3- EVAPORAÇÃO DE FUMOS DURANTE O DESTACAMENTO DA GOTA; 4- EVAPORAÇÃO DE FUMOS DE PEQUENAS GOTAS QUE SÃO REPELIDAS, 5- EVAPORAÇÃO DE FUMOS DOS RESPINGOS, 6- EVAPORAÇÃO DE FUMOS DA POÇA DE FUSÃO E 7- EVAPORAÇÃO DE FUMOS DO CORDÃO DE SOLDA (HEWITT, ET AL., 1991).	15
FIGURA 2.9 CONDIÇÕES DE CORRENTE E TENSÃO PARA DIFERENTES MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA, PARA ELETRODO MACIÇO COM PROTEÇÃO GASOSA 100%CO ₂ (HASHIMOTO, ET AL., 2007).	18
FIGURA 3.1 MESA DE AVANÇO LINEAR - GRACO.....	23
FIGURA 3.2 CARACTERÍSTICAS DO ELETRODO TUBULAR.....	25
FIGURA 4.1 CORPO DE PROVA Nº 1 - 200x50,8x6,35MM.....	29
FIGURA 4.2 MONTAGEM DO CORPO DE PROVA NA BANCADA.	33
FIGURA 4.3 DEMONSTRAÇÃO DA MONTAGEM DA BANCADA COM A ESTRUTURA DE PAPEL.....	33
FIGURA 4.4 CAPTURA DE IMAGEM DO VÍDEO DO EXPERIMENTO 3-2.	35
FIGURA 4.5 CORPOS DE PROVA COM RESPINGOS RECOLHIDOS.	35
FIGURA 4.6 CORPO DE PROVA 28 COM A ESCÓRIA AINDA NÃO DESTACADA.	36
FIGURA 4.7 CORPO DE PROVA 28 COM A ESCÓRIA DESTACADA.	36
FIGURA 4.8 CORPO DE PROVA 28 APÓS A LIMPEZA.....	37
FIGURA 4.9 SEÇÃO DO CORPO DE PROVA 22 ANTES DO POLIMENTO.....	37
FIGURA 4.10 SEÇÃO DO CORPO DE PROVA 22 APÓS O POLIMENTO.	37
FIGURA 4.11 SEÇÃO DO CORPO DE PROVA 22 APÓS O ATAQUE QUÍMICO.	37

FIGURA 5.1 TAXA DE DILUIÇÃO.....	43
FIGURA 5.2 ANGULO DE MOLHAMENTO.....	43
FIGURA 8.1 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 1-1.....	49
FIGURA 8.2 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 1-2.....	49
FIGURA 8.3 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 1-3.....	50
FIGURA 8.4 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 2-1.....	50
FIGURA 8.5 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 2-2.....	51
FIGURA 8.6 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 2-3.....	51
FIGURA 8.7 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 3-1.....	52
FIGURA 8.8 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 3-2.....	52
FIGURA 8.9 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 3-3.....	53
FIGURA 8.10 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 4-1.....	53
FIGURA 8.11 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 4-2.....	54
FIGURA 8.12 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 4-3.....	54
FIGURA 8.13 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 5-1.....	55
FIGURA 8.14 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 5-2.....	55
FIGURA 8.15 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 5-3.....	56
FIGURA 8.16 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 6-1.....	56
FIGURA 8.17 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 6-2.....	57
FIGURA 8.18 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 6-3.....	57
FIGURA 8.19 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 7-1.....	58
FIGURA 8.20 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 7-2.....	58
FIGURA 8.21 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 7-3.....	59
FIGURA 8.22 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 8-1.....	59
FIGURA 8.23 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 8-2.....	60
FIGURA 8.24 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 8-3.....	60
FIGURA 8.25 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 9-1.....	61
FIGURA 8.26 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 9-2.....	61
FIGURA 8.27 OSCIOGRAMAS EXPERIMENTO 9-3.....	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 ATORES PRIMÁRIOS PARA GERAÇÃO DE RESPINGO COM GÁS DE PROTEÇÃO 100% CO₂ ((HASHIMOTO, ET AL., 2007).	17
TABELA 3.1 CARACTERÍSTICAS DA FONTE DE SOLDAGEM – IMC SOLDAGENS.....	22
TABELA 3.2 CONFIGURAÇÕES DA PLACA DE AQUISIÇÃO UTILIZADA.	23
TABELA 4.1 REGRAS DE PROPAGAÇÃO DE ERROS.	28
TABELA 4.2 INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.	28
TABELA 4.3 EXPERIMENTOS PARA A DEFINIÇÃO DA FAIXA OPERACIONAL.....	30
TABELA 4.4 VALORES DE CORRENTE PARA V _A =5,5 M/MIN.....	31
TABELA 4.5 VALORES DE CORRENTE PARA V _A =7,5 M/MIN.....	31
TABELA 4.6 VALORES DE CORRENTE PARA V _A =9,5 M/MIN.....	31
TABELA 4.7 VALORES DE TENSÃO SELECIONADOS POR GÁS E VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO.	32
TABELA 4.8 PARÂMETROS GERAIS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS.....	34
TABELA 4.9 QUANTIDADES DE ARAME.	34
TABELA 5.1 RESULTADOS FINAIS.....	38
TABELA 5.2 COMPARAÇÃO DOS DESVIOS MEDIDOS NA CORRENTE (σI) E NA TENSÃO (σV).....	39
TABELA 5.3 MASSAS DE ARAME.....	39
TABELA 5.4 COMPARAÇÃO DAS QUANTIDADES DE FUMOS DESPRENDIDOS PARA CADA GÁS.....	40
TABELA 5.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS MASSAS DE ESCÓRIA.	41
TABELA 5.6 COMPARAÇÃO DA MASSA DOS RESPINGOS.....	41
TABELA 5.7 COMPARAÇÃO FINAL DOS RESULTADOS DE TAXAS DE FUSÃO, DEPOSIÇÃO E EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO.....	42
TABELA 5.8 VALORES DA TAXA DE DILUIÇÃO - RESULTADOS.	43
TABELA 5.9 ANÁLISE DO MOLHAMENTO.	44
TABELA 5.10 ANÁLISE DE CUSTOS POR HORA DE TRABALHO - RESULTADO.	45
TABELA 6.1 PONTUAÇÃO DOS TESTES.	46
TABELA 8.1 MASSA DOS CORPOS DE PROVA ANTES DA SOLDAGEM.....	63
TABELA 8.2 MASSA DOS CORPOS DE PROVA APÓS A SOLDAGEM COM A ESCÓRIA.	64
TABELA 8.3 DIFERENÇA DE MASSA DOS CORPOS DE PROVA ANTES E DEPOIS DA SOLDAGEM, COM ESCÓRIA.....	65
TABELA 8.4 FACILIDADE DE DESTACAMENTO E MASSA DA ESCÓRIA DESTACADA.	66
TABELA 8.5 MASSA DOS CPS APÓS A SOLDAGEM SEM ESCÓRIA.....	67
TABELA 8.6 DIFERENÇA DE MASSA DOS CORPOS DE PROVA ANTES E DEPOIS DA SOLDAGEM, SEM ESCÓRIA.	68
TABELA 8.7 MASSA DE ESCÓRIA ADERIDA AOS CPS.	69

TABELA 8.8 MASSA DOS RESPINGOS RECOLHIDOS.....	70
TABELA 8.9 PESAGEM DO ARAME.	70
TABELA 8.10 MATRIZ DE PLANEJAMENTO FATORIAL DOS EXPERIMENTOS.	71
TABELA 8.11 CORRENTES, TENSÕES E POTÊNCIAS.....	72
TABELA 8.12 MASSA DOS FUMOS PARA CADA EXPERIMENTO.....	73
TABELA 8.13 COMPARAÇÃO EXPERIMENTO A EXPERIMENTO DAS TAXAS DE FUSÃO, DEPOSIÇÃO E EFICIÊNCIA.	74
TABELA 8.14 VALORES DA TAXA DE DILUIÇÃO.....	74
TABELA 8.15 ANÁLISE DE CUSTOS POR HORA DE TRABALHO.....	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	[m ²]
d	Diâmetro do eletrodo	[mm]
I	Corrente	[A]
U	Tensão	[volts]
T	Temperatura	[°C]

Símbolos Gregos

α	Difusividade térmica	[m ² /s]
Δ	Variação de uma grandeza	
η_d	Eficiência de deposição	
ρ	Densidade do eletrodo	[kg/m ³]

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AL	Alcances do coletor
Ar	Argônio
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CEL	Custo de Eletricidade
CEQ	Custo de Equipamento
CM	Custo de Material
CO ₂	Dióxido de carbono
CT	Custo de Trabalho
CTS	Custo Total de Soldagem

d_g	Diâmetro da Gota
DBCP	Distância do Bico de Contato MIG/MAG à Peça
DPA	Distribuição percentual de massa de respingo por alcance
DPT	Distribuição de respingo por tamanho
FCC	Frequência de Curto Circuito
GDL	Grau de Liberdade
MAG	Metal Active Gas
M_c	Massa por unidade de comprimento de solda
M_i	Massa Inicial
MIG	Metal Inert Gas
M_f	Massa final
M_{Fumos}	Massa de Fumos
P_c	Preço por unidade de comprimento
P_k	Preço por quilograma
T_{ab}	Tempo de arco aberto
tcc	Tempo de Curto Circuito
T_d	Taxa de Deposição
T_D	Taxa de Deposição por unidade de Comprimento;
TGF	Taxa de Geração de Fumos
U_{REG}	Tensão de Regulagem
V_{al}	Velocidade de alimentação
V_{sol}	Velocidade de Soldagem
\emptyset_{gota}	Diâmetro de gota

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROPOSTA DE ESTUDO E SUA IMPORTÂNCIA

As exigências por qualidade e produtividade a baixo custo são fatores primordiais para assegurar a competitividade dentro do ambiente industrial no atual panorama global na economia mundial, assim o desenvolvimento de tecnologias de soldagem e o aprimoramento de técnicas conexas a este segmento, diversificando os processos a arco voltaico que garantam esses requisitos são necessários. A soldagem com o processo eletrodo tubular, muito empregada nos EUA, Japão e Europa, é uma das técnicas mais recentes sendo ainda pouco explorada e divulgada industrialmente, principalmente no Brasil. Isto ocorre devido à existência de fatores que dificultam a sua divulgação e utilização tais como a escassez de literatura específica, as dificuldades operacionais para a sua fabricação, custo mais elevado, a incerteza pelos resultados da substituição dos métodos e processos tradicionais, entre outros. Porém sua popularidade tem crescido, devido ao grande número de vantagens que o processo oferece como, por exemplo, alta qualidade do metal de solda depositado, excelente aparência do cordão de solda, boas características de arco, além de diminuir o número de respingos, possibilidade de solda em todas as posições, preferência dos soldadores.

A soldagem a arco com eletrodo tubular (FCAW - Flux-cored Arc Welding) é um processo que reúne as principais vantagens da soldagem com eletrodo maciço e proteção gasosa (GMAW- Gás Metal Arc Welding) tais como o alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, alto rendimento, resultando em alta produtividade e qualidade da solda aliados com as vantagens da soldagem manual com eletrodos revestidos (SMAW - Shielded Metal Arc Welding) como a grande versatilidade, possibilidades de ajustes da composição química do cordão de solda, e facilidade de operação em campo.

O Processo Eletrodo Tubular utiliza como eletrodo uma fita metálica na forma tubular envolvendo um fluxo, mas operando da mesma forma do MIG/MAG (MIG – Metal Inert Gás e MAG – Metal Active Gás). Busca, assim, garantir, ou até aumentar, a alta eficiência de produção desse último, com alta versatilidade das características operacionais proporcionadas pelo fluxo (melhorias das características metalúrgicas e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas). A composição química do fluxo pode ser facilmente alterada, em função do requerimento do material a ser soldado. Sua maior restrição reside no maior custo do consumível, mantendo-se de forma similar a complexidade de correlação entre as variáveis que governam processo.

Nesse contexto, torna-se importante o entendimento das características operacionais do processo Eletrodo Tubular com o intuito de proporcionar a correta utilização do processo em função de sua aplicação. Mas existe uma escassez de informação na literatura corrente que permita uma apuração eficiente e global do processo Eletrodo Tubular. Os poucos trabalhos parecem dar ênfase apenas a um

ou outro aspecto operacional, o que nem sempre corresponde com a melhor condição operacional para o processo. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de uma metodologia própria capaz de sistematizar a análise do processo Eletrodo Tubular utilizando diferentes gases como proteção gasosa, com cada processo trabalhando com parâmetros adequados para sua operacionalidade e usando um número maior de características para uma análise mais global. Assim, neste trabalho pretende-se, avaliar soldagens feitas com eletrodo tubular, de grande aplicação no mercado, sob a proteção de misturas gasosas de grande utilização para entender aspectos operacionais característicos do processo com cada gás, possibilitando uma comparação entre eles.

Para tal, os gases devem ser analisados em condições paramétricas diferenciadas e apropriados a cada um, uma vez que os estes apresentam diferenças significativas no desempenho operacional. Além disto, busca-se analisar características de ordem prática tais como a capacidade de produção (taxa de fusão e deposição), a tolerância de regulagem dos parâmetros (facilidade de operar), a geração de respingos (não no sentido do rendimento de deposição, mas sim no que tange a outros aspectos operacionais) e a geração de fumos (sob o ponto de vista de saúde ocupacional).

Entretanto, não se pretende cobrir todas as variáveis envolvidas nos processos, limitando-se a avaliar um tipo e bitola de eletrodo sob três tipos de gases de proteção, apenas na posição plana, para um tipo de corpo de prova e a poucas correntes nominais. Também não será avaliado o efeito da regulagem da indutância sobre os processos de soldagem. Assim, deixa-se claro que, do ponto de vista técnico, não se pode estar falando de comparação absoluta entre os processos, mas acredita-se que a metodologia a ser proposta contribua para fazer comparações mais seguras e fornecer ao usuário um número maior de informações mais precisas, facilitando sua atividade profissional.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é a concepção de uma avaliação comparativa do processo de soldagem FCAW utilizando a proteção gasosa de três gases distintos, 100%CO₂, Ar+25%CO₂ e Ar+40%CO₂, sob mesmos níveis de corrente, cobrindo uma faixa típica de uso e principalmente, respeitando os demais parâmetros de soldagem que são típicos de cada um dos gases usados no processo. Soldagens serão realizadas utilizando-se o eletrodo E71T-1 sob as proteções gasosas 100%CO₂, Ar+25%CO₂ e Ar+40%CO₂ em diferentes níveis de corrente. Procurou-se distinguir e avaliar características de cada processo que pudessem influenciar diretamente na sua operacionalidade, tais como:

- Estabilidade do processo via monitoramento de parâmetros elétricos;
- Emissão de fumos;
- Nível de escória;
- Ejeção de gotículas durante o processo - respingos;

- Taxa de deposição via comparação da massa de eletrodo fundida e da massa efetivamente depositada na forma de cordão;
- Características geométricas dos cordões;
- Aspecto superficial dos cordões;
- Molhabilidade;
- Custo de fabricação por unidade de tempo;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTOS DO PROCESSO ELETRODO TUBULAR

O processo de soldagem por eletrodo tubular um processo de soldagem por fusão, onde o calor necessário à ligação das partes é fornecido por um arco elétrico estabelecido entre a peça e um eletrodo alimentado continuamente. A proteção do arco e do cordão ocorre tanto por ação do fluxo existente no interior do eletrodo, como também pode ser acrescida pela ação de um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa. Este fluxo é composto por materiais inorgânicos e metálicos que possuem várias funções, dentre as quais se destacam a melhoria das características do arco elétrico e da transferência do metal de solda, a proteção da poça de fusão e, em alguns casos, a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória (FORTES, 2004) (BRACARENSE, 2000).

Existem duas variações para o processo eletrodo tubular. Na primeira, eletrodo com proteção gasosa, as funções de proteção do arco e ionização da atmosfera são feitas por um gás (inerte, ativo ou mistura destes) introduzido à parte. A segunda variação, eletrodo auto protegido, não exige proteção gasosa externa; os gases gerados pela decomposição do fluxo interno do eletrodo formam a atmosfera protetora para o arco e metal fundido. (FORTES, 2004). A Figura 2.1 apresenta uma visão geral da soldagem com eletrodo tubular com proteção gasosa introduzida pela tocha.

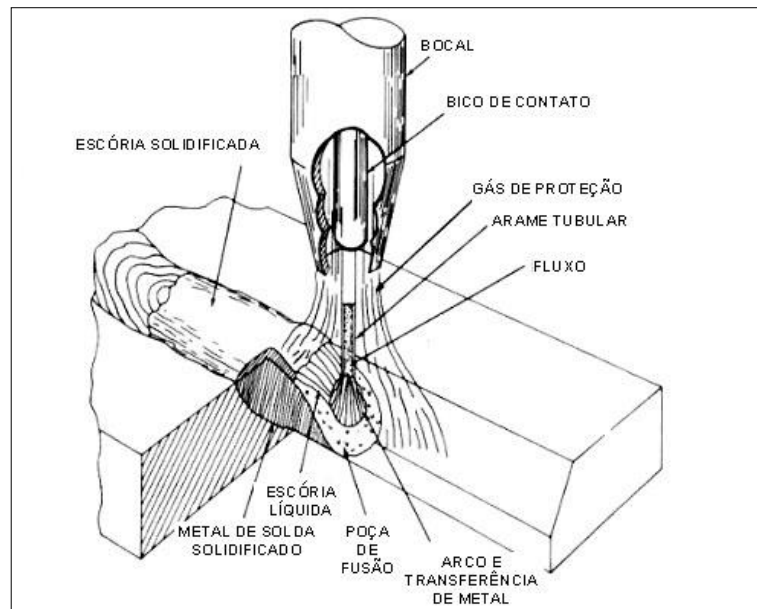


Figura 2.1 O processo de soldagem com eletrodos tubulares com gás de proteção (FORTES, 2004)

O processo FCAW é um processo semiautomático que permite a automatização total. Do ponto de vista metalúrgico, a ação do fluxo confere a este processo propriedades semelhantes ao eletrodo revestido.

Na década de 80, o processo Eletrodo Tubular surge no Japão, EUA e Europa como uma alternativa capaz de melhorar a produtividade sem prejudicar a qualidade do metal e se destaca por apresentar metal depositado de alta qualidade, cordão de solda com bom aspecto visual, facilidade operacional de manuseio do processo, além de soldar vários tipos de ligas de aço em grandes faixas de espessuras, apresentando alta tolerância com relação a contaminantes que podem originar trincas e também podendo apresentar altas taxas de deposição dependendo da combinação eletrodo-gás escolhida.

A matéria prima empregada para a fabricação dos eletrodos tubulares constitui-se de uma fita metálica enrolada na forma de uma bobina e de um pó com formulações específicas, denominado fluxo. A fita metálica é alimentada continuamente, sendo deformada por roletes, fazendo com que sua seção reta tome o formato de uma canaleta ("U") para receber a adição do fluxo através de um silo de alimentação. Após a adição do fluxo, a fita passa pelos roletes de fechamento, onde a seção reta toma o formato de um tubo, com o fluxo em seu interior (veja Figura 2.2).

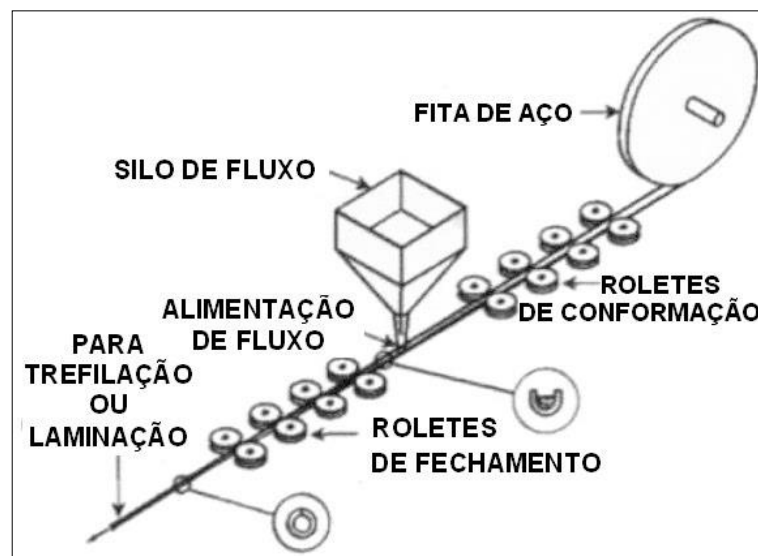


Figura 2.2 Processo de fabricação de eletrodos (FORTES, 2004).

O material da fita não precisa reproduzir exatamente a composição requerida para o metal de solda, já que os elementos de liga podem ser adicionados ao fluxo do eletrodo tubular conforme a conveniência. Quando o teor total de elementos de liga for alto, entretanto, restrições de espaço no tubo podem obrigar ao uso de uma fita ligada (FORTES, 2004). O fluxo dos eletrodos tubulares pode ser constituído por uma diversidade de elementos podendo ser metálicos ou não metálicos, os quais, conferem a este eletrodo, a possibilidade de adequação conforme a aplicação. Durante o processo de soldagem, o arco possibilita complexas reações químicas com os elementos do fluxo onde cada elemento contribui para

o comportamento geral do fluxo no que tange ao desempenho do eletrodo, por exemplo, a estabilidade da transferência do metal, a viscosidade e destacabilidade da escória, as propriedades mecânicas finais da soldagem. Portanto, cada composição de fluxo, vai gerar um resultado final diferente. Podem ser citadas como funções básicas do fluxo, (FORTES, 2004):

- Desoxidantes e desnitrificantes - são adicionados desoxidantes como o manganês e o silício e formadores de nitretos como o alumínio para auxiliar na purificação do metal de solda;
- Formadores de escória - compostos formadores de escória como óxidos de cálcio, potássio, silício, ou sódio, são adicionados para proteger a poça de fusão da atmosfera. A escória ajuda a melhorar o perfil do cordão de solda, e escórias de rápida solidificação ajudam a suportar a poça de fusão na soldagem fora de posição. A escória também reduz a taxa de resfriamento, ação especialmente importante quando se soldam aços de baixa liga;
- Estabilizadores do arco - o potássio e o sódio são os elementos que auxiliam na obtenção de um arco suave e reduzem a quantidade de respingos;
- Elementos de liga - para aumentar a resistência, a ductilidade, a dureza e a tenacidade são empregados elementos de liga como o molibdênio, cromo, carbono, manganês, níquel e vanádio;
- Geradores de gases.

De acordo com o tipo de fluxo os eletrodos tubulares podem ser classificados em rutilicos, básicos e metal cored. Os rutilicos apresentam fluxos não metálicos com componentes predominantemente ácidos e produzem escória do tipo ácida, apresentam boa soldabilidade, permitem a realização de soldas em todas as posições, devido à escória e ao controle da poça de fusão. Os eletrodos básicos apresentam soldas com boa ductilidade e tenacidade porém não apresentam boa soldabilidade como os rutilicos, não sendo indicados para soldagem fora de posição pois o tipo de transferência metálica predominante é o globular. Quando o fluxo é metálico (*metal cored*) (BAUNÉ, et al., 2000), seus elementos têm a função de unir o metal de solda com os elementos de liga contidos no revestimento metálico do eletrodo, para aumentar a resistência do material depositado e também para desoxidá-lo.

Cada fluxo específico (rutilico, básico e metálico) do eletrodo tubular produz resultados diferentes no processo com proteção gasosa.

Como qualquer outro processo de soldagem, o processo de soldagem por Eletrodo Tubular apresenta vantagens e limitações, cabendo ao usuário a seleção adequada de parâmetros de soldagem, que forneçam as melhores condições do processo. Dentre as principais vantagens do processo pode-se citar:

- Alta qualidade do metal depositado;
- Ótima aparência da solda (solda uniforme);
- Excelente contorno em soldas de ângulo;
- Solda vários tipos de aços e em grandes faixas de espessuras;
- Fácil operação devido à alta facilidade de mecanização;
- Alta taxa de deposição devido à alta densidade de corrente;
- Relativamente alta eficiência de deposição;

- Requer menos limpeza antes da soldagem que o MIG/MAG;
- Uso de eletrodos auto protegidos elimina a necessidade do uso de aparelhos de gás além de ser mais tolerante para condições ao ar livre;
- Alta tolerância com relação a contaminantes que podem originar trincas;
- Alta produtividade.

Como principais limitações do processo Eletrodo Tubular podem-se citar:

- Limitado a soldagem de metais ferrosos e liga a base de níquel;
- Necessidade de remoção de escória;
- O eletrodo tubular é mais caro do que o eletrodo maciço;
- Ruim para passe de raiz;
- Restrições para soldagem ao ar livre (somente para soldagem com gás de proteção);
- São gerados mais fumos do que os processos GMAW e SAW;
- Necessidade de utilização de roldanas especiais recartilhadas com baixa pressão no alimentador.

2.2 TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO ELETRODO TUBULAR

O modo de transferência metálica influencia diretamente nas características operacionais e na eficiência do processo pois afeta diretamente as possibilidades de posições de soldagem, a penetração, a estabilidade da poça de fusão e a quantidade de respingos (SUBRAMANIAN, et al., 1998).

Para diferenciar as definições dos modos de transferência metálica relaciona-se os ajustes das variáveis operacionais, tais como: corrente, tensão, polaridade, diâmetro e composição do eletrodo, gás de proteção e o modo como as forças atuantes no processo interagem. A deposição do metal de solda é realizada pela transferência de gotas de metal através da coluna do arco, sendo que o tamanho, forma e frequência dessa caracterizam um determinado tipo de transferência metálica. No processo, Eletrodo Tubular, a forma de transferência metálica depende principalmente das características de cada tipo de fluxo do eletrodo (FORTES, 2004). Para este processo basicamente são classificados três tipos diferentes de transferência metálica: globular, goticular (*spray*), e curto-circuito. A transferência globular se caracteriza por ocorrer geralmente em tensões não muito baixas e correntes moderadas, porém com a utilização de CO₂ como gás de proteção essa transferência pode acontecer com maiores valores de corrente. Neste modo de transferência a gota é formada e permanece aderida à ponta do eletrodo por tensão superficial até o momento em que a gota atinja um grande volume (maior que o diâmetro do eletrodo) e destaque-se por ação da força gravitacional. Este tipo de transferência é limitada à soldagem a posição plana.

A transferência goticular (*spray*) apresenta como principal característica uma grande quantidade de pequenas gotas (menor que o diâmetro do eletrodo tubular) a alta frequência. Estas gotas são depositadas

com alta energia (altas correntes e tensões) e fazem com que a poça de fusão seja bastante fluida, limitando o processo para a posição plana ou horizontal.

A transferência por curto-circuito para o processo Eletrodo Tubular é caracterizada por utilizar tensões baixas e correntes não muito elevadas, ocorrendo o toque periódico da gota (de pequeno tamanho próximo ao diâmetro do eletrodo) na poça de fusão no momento de sua transferência. A cada toque ocorre a extinção do arco, e o metal é transferido em cada curto.

De acordo com (NORRISH, 1992) os eletrodos tubulares básicos normalmente realizam transferência globular para elevadas correntes e transferência por curto-circuito para baixas correntes. Assim sendo, o fluxo que não funde forma uma coluna em direção ao arco. Também para este autor, eletrodos tubulares rútilicos em altas correntes realizam transferência metálica do tipo goticular (*spray*) onde parte do fluxo forma uma camada de escória na superfície da gota, outra parte do fluxo se decompõe formando gases de proteção e o restante do fluxo é transferido à poça de fusão formando uma camada de escória protetora. Ainda segundo este autor, a transferência metálica para eletrodos com núcleo de pó metálico (*metal cored*) é muito similar à transferência para o eletrodo maciço.

A avaliação da transferência metálica para eletrodos tubulares do tipo rútilico com proteção gasosa de Ar+25%CO₂ e 100% CO₂ sob as condições operacionais apresentadas na Figura 2.2 resultou nas seguintes observações para as transferências metálicas para cada tipo de eletrodo (STARLING, et al., 2005):

- Para eletrodos rútilicos com proteção gasosa Ar+ 25% CO₂ por meio da Figura 2.3, é possível verificar diferentes comportamentos em função do aumento da corrente, para correntes mais baixas observa-se uma transferência do tipo globular com presença de alguns curtos-circuitos. Nota-se que a gota e o fluxo são transferidos independentemente para a poça de fusão, com o fluxo formando uma coluna em direção a poça de fusão. Esta coluna parece retardar a transferência da gota para a poça e, em alguns momentos, parece tocar a poça. Na Figura 2.3-a observa-se que, à medida que a corrente aumenta, não há mais a presença de curtos, e a transferência continua globular e o fluxo tocando a poça, como na Figura 2.3-b. Na Figura 2.3-c, ainda existe a coluna de fluxo que não toca mais a poça, formando uma gota que também se transfere para a poça, a transferência continua globular com diâmetro da gota maior que o diâmetro do eletrodo. Enfim, na Figura 2.3-d o diâmetro da gota está próximo ao diâmetro do eletrodo, porém com uma frequência de transferência das gotas maior e ainda globular.

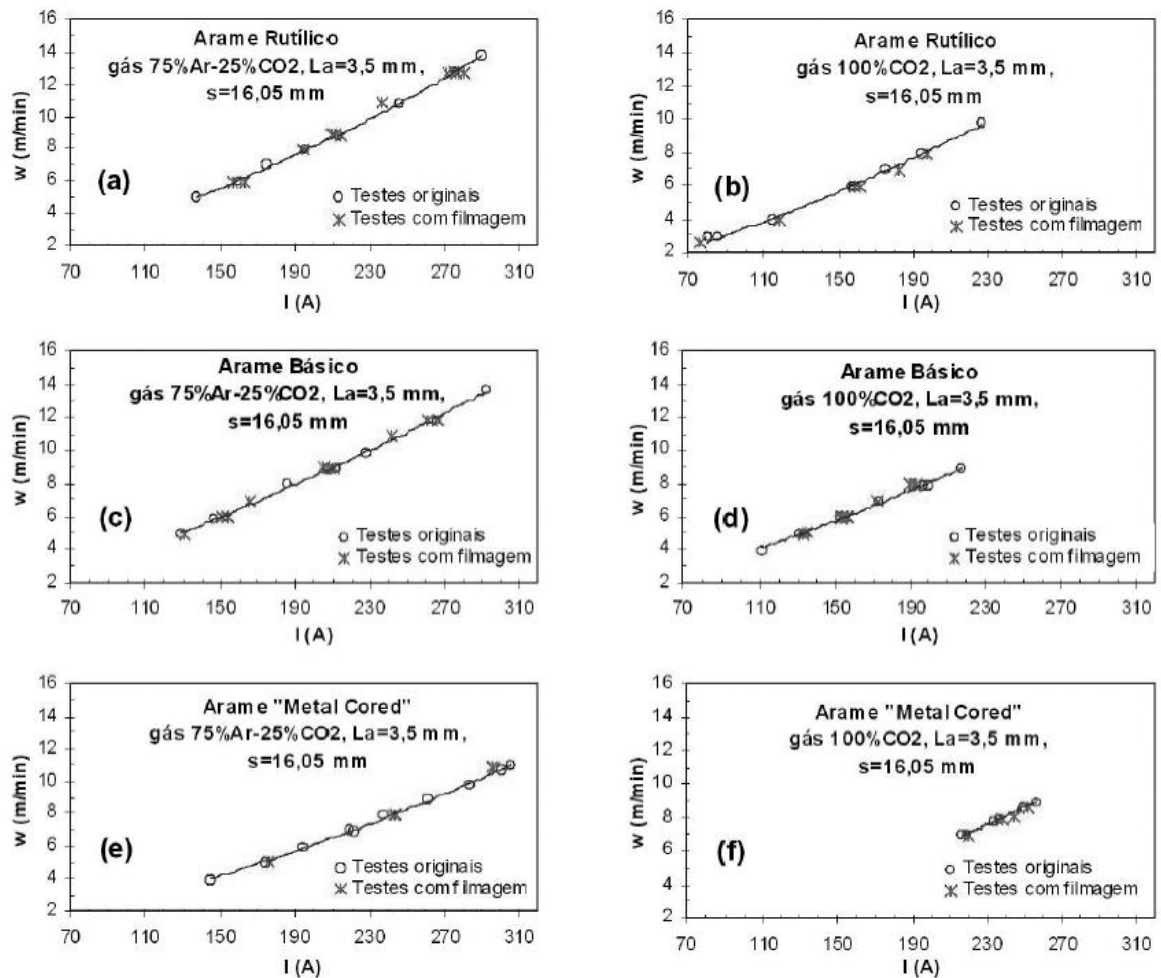


Figura 2.3 Parâmetros operacionais para análise das transferências metálicas para diferentes eletrodos tubulares sobre duas proteções gasosas, onde foram realizados testes iniciais e depois repetidos com filmagens para alguns testes onde: w - velocidade de fusão; I - corrente; s - comprimento energizado do eletrodo; L_a - comprimento de arco (STARLING, et al., 2005).

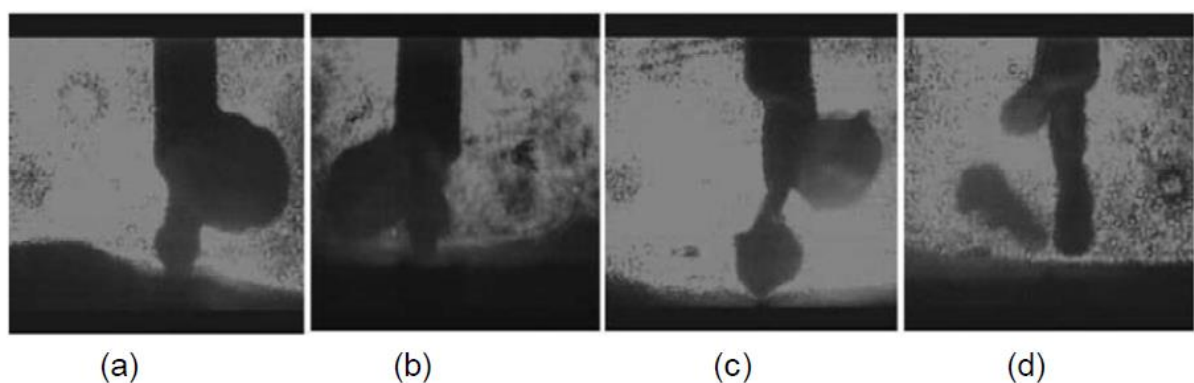


Figura 2.4 Quadros de filmagens para eletrodo rutílico com proteção gasosa Ar+25% CO₂ para diferentes correntes (STARLING, et al., 2005).

Na transferência metálica para eletrodos rútilicos com proteção gasosa 100% CO₂ verifica-se o mesmo comportamento da proteção gasosa Ar+ 25% CO₂: com o aumento progressivo da corrente ocorre transferência do tipo globular, porém a coluna de fluxo formada não toca a poça de fusão Figura

2.4-a e b. Para os níveis mais altos de corrente há uma diminuição do diâmetro da gota, mas ainda sim esta é maior que o diâmetro do eletrodo, Figura 2.4-c e d.

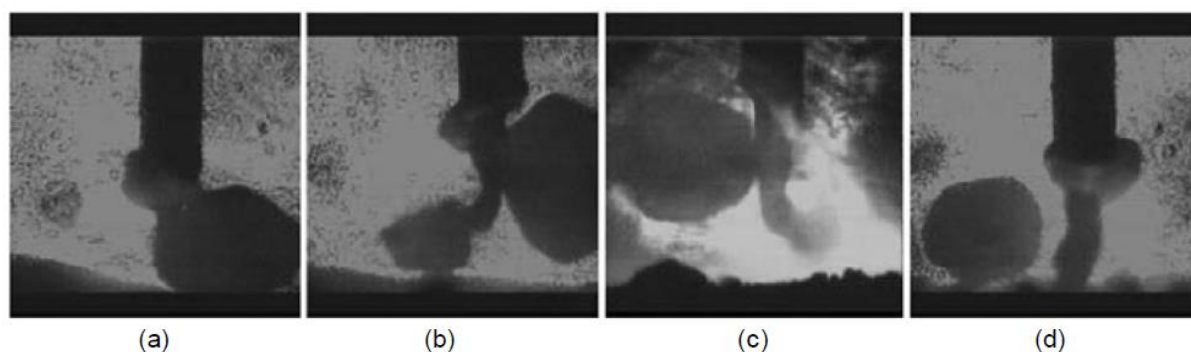


Figura 2.5 Quadros de filmagens para eletrodo rutilico com proteção gasosa 100% CO₂ para diferentes correntes (STARLING, et al., 2005).

2.3 PROTEÇÃO GASOSA

O gás de proteção tem uma influência muito significativa em todo o desempenho da soldagem no processo eletrodo tubular. Sua função principal é proteger o metal fundido da oxidação, quando este é transferido do eletrodo para o metal base durante a soldagem. O gás promove também a estabilidade do arco e a uniformidade da transferência metálica além de minimizar a apresentação de porosidade no cordão de solda, controlando o modo de transferência em conjunto com outros parâmetros. Tanto a abertura como a estabilidade do arco são influenciadas pelo potencial de ionização dos gases de proteção usados no processo de soldagem. Ele afeta a eficiência, a qualidade, as propriedades da solda e a geometria do cordão de solda. O gás de proteção interage com o eletrodo na soldagem melhorando a resistência mecânica, a dureza e a resistência à corrosão no metal depositado (LYTTLE, et al., 1990).

Controlando a transferência eficiente dos componentes do eletrodo tubular, o gás de proteção pode alterar a microestrutura e as propriedades inerentes da solda. O gás de proteção pode também afetar o conteúdo residual de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio dissolvido no metal de solda.

O dióxido de carbono (CO₂) é muito usado para proteção durante a soldagem com eletrodos tubulares. Duas vantagens deste gás são o baixo custo e a alta penetração. A elevada condutividade térmica do CO₂ faz com que o núcleo de condução do arco tenha pequeno diâmetro, tornando o arco mais constrito, o que provoca uma maior pressão do arco sobre a poça de fusão, promovendo uma influência marcante na geometria do cordão, aumentando não somente a penetração, mas também o reforço e diminuindo a largura do cordão. Por outro lado, a ocorrência de um núcleo de condução do arco de pequeno diâmetro aumenta a perturbação da superfície da poça metálica fundida prejudicando a estabilidade do arco e gerando a formação excessiva de respingos (DILLENBECK, et al., 1987).

Apesar do processo de soldagem com eletrodos sólidos permitir o alcance da transferência por spray utilizando-se o CO₂ puro somente em corrente muito altas de cerca de 1000A, um aspecto

interessante a ser observado em soldagens com eletrodo tubular é que neste processo tais transferências podem ser alcançadas em níveis de corrente mais razoáveis. Já o comportamento do eletrodo maciço sob altas densidades de corrente (típico da transferência no modo spray) está associado a alguns problemas, tais como o excesso de perdas por respingos, o aumento da suscetibilidade do processo a porosidades além de provocar a deterioração da morfologia do cordão de solda e não permitir soldagem fora de posição.

O dióxido de carbono é relativamente inativo na temperatura ambiente. Quando ele é aquecido a altas temperaturas pelo arco elétrico, dissocia formando o monóxido de carbono (CO) e o oxigênio. O oxigênio proveniente desta dissociação irá reagir com os elementos do metal fundido oxidando-os. Assim, materiais desoxidantes são adicionados ao fluxo do eletrodo para compensar os efeitos oxidantes do CO₂ (BRACARENSE, 2000).

O uso da mistura de gases na soldagem com eletrodos tubulares pode combinar as vantagens separadas de dois ou mais gases cita (BRACARENSE, 2000). O aumento de gás inerte aumenta a eficiência de transferência dos desoxidantes que estão no fluxo do eletrodo. Por outro lado, a fusão será reduzida. O Argônio é capaz de proteger a poça de fusão em todas as temperaturas de soldagem. Sua presença em quantidade suficiente resulta na diminuição da oxidação comparativamente a proteção com 100% CO₂ (BRACARENSE, 2000).

A Figura 2.6 apresenta um comparativo do efeito do gás de proteção no perfil do cordão de solda em soldagem com o processo Eletrodo Tubular.

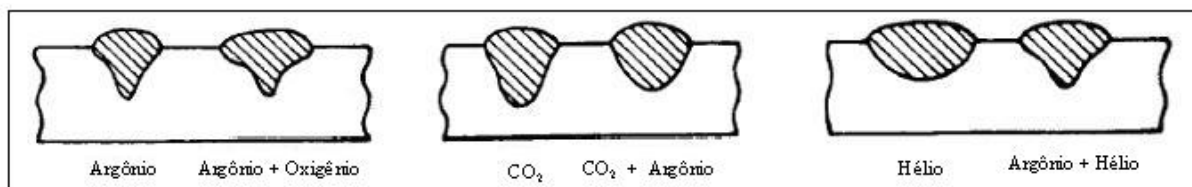


Figura 2.6 Efeito do gás de proteção no perfil do cordão em CCPR (BRACARENSE, 2000).

Alguns resultados da influência benéfica da mudança do gás CO₂ para uma mistura de Argônio e CO₂ são verificadas através da obtenção de melhor acabamento e perfil do cordão de solda superior, minimização dos respingos e maiores velocidades de soldagem (FORTES, 2004) (BRACARENSE, 2000). Atualmente, diversos tipos de mistura de gases estão disponíveis no mercado. A mistura de gases mais usada em soldagem com o processo Eletrodo Tubular é 75% de Argônio e 25% de CO₂. O metal de solda depositado com esta mistura tem alto limite de escoamento e resistência à tração, comparado com o metal depositado com 100% de proteção com CO₂ (BRACARENSE, 2000).

O gás de proteção promove a estabilidade do arco e a uniformidade da transferência metálica enquanto controla o modo de transferência de metal em conjunto com vários outros parâmetros. A abertura e a estabilidade do arco são grandemente influenciadas pelo potencial de ionização dos gases de proteção no modo de transferência por curto circuito. O uso da mistura gasosa 75% Ar e 25% CO₂,

considerada com alto nível de CO₂, (maior que 20%), no modo de transferência por curto circuito aumenta o aquecimento do arco e melhora formação da gota e a fluidez da poça de soldagem, o que diminui sistematicamente o aparecimento de respingos em relação ao gás 100% CO₂ (LYTTLE, et al., 1990).

Apesar da transferência de metal ser um pouco diferente daquela para eletrodo maciço e variar conforme o tipo de eletrodo tubular, o gás CO₂ como proteção para o FCAW reage de maneira semelhante para eletrodo maciço; o dióxido de carbono dá boa cobertura e proteção, porém aumenta os respingos e exige tensões mais altas que para a mistura gasosa Ar – CO₂; para correntes de soldagem até 200 (A) a transferência de metal obtida com 100% CO₂ é a curto circuito.

2.4 VARIÁVEIS DO PROCESSO ELETRODO TUBULAR

O processo Eletrodo Tubular pode ter seu desempenho influenciado por variáveis diversas. Dessa forma um melhor entendimento da influência destas variáveis no comportamento do processo, em muito auxilia numa melhor utilização do mesmo. Dentre as principais variáveis pode-se citar:

- Corrente;
- Tensão;
- DBCP (distância do bico de contato a peça) e comprimento livre de eletrodo;
- Velocidade de Soldagem.

A seguir as variáveis mais importantes bem como suas influências serão descritas.

a) Corrente

A corrente de soldagem tem grande efeito no processo Eletrodo Tubular sendo que a taxa de deposição e a penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem conforme (SALES, 2001). À medida que se trabalha com uma corrente de soldagem maior, em equipamentos com fonte convencional de energia, as taxas de deposição com eletrodos tubulares, incluindo o “metal cored”, aumentam, conforme mostra a Figura 2.7 (WIDGERY, 1994).

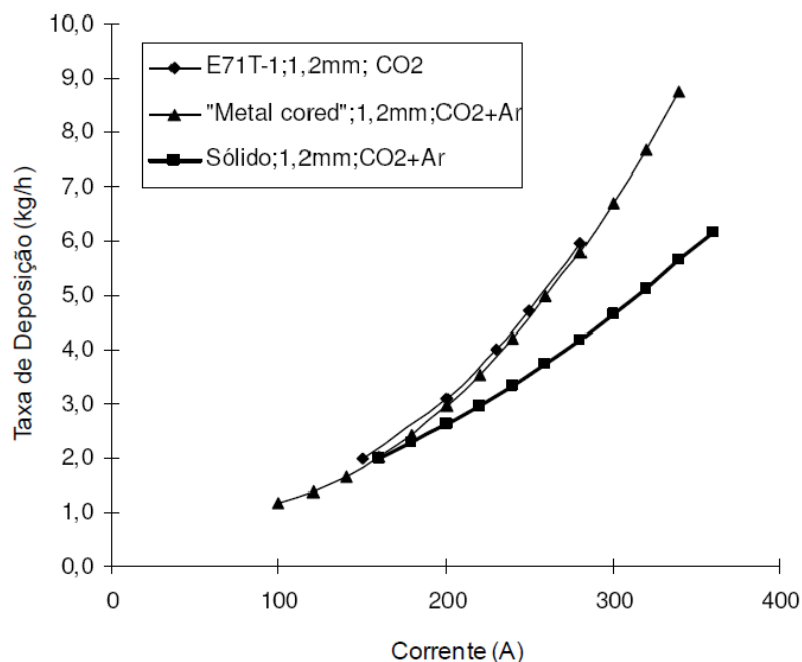


Figura 2.7 Taxa de Deposição para eletrodos tubulares e eletrodos sólidos em função do aumento da corrente adaptado (WIDGERY, 1994).

Na soldagem com eletrodo sólido, toda a seção transversal do eletrodo conduz corrente, mas para o eletrodo tubular a corrente é conduzida pela fita metálica que envolve o fluxo resultando então numa maior densidade de corrente e numa maior ação do efeito Joule sobre a taxa de fusão, (FORTES, 2004). Além disso, o aumento da corrente de soldagem causa também, uma diminuição na quantidade de respingos, porosidades, e diâmetro da gota, bem como, na formação excessiva de nitretos e má aparência do cordão (WIDGERY, 1994).

b) Tensão

A tensão do arco pode afetar características do cordão de solda, como o perfil do arco, a largura e as propriedades do cordão. Tensões maiores podem resultar num maior número de respingos e uma maior irregularidade do cordão. Para tensões menores ocorre um efeito menor da tensão superficial sobre a poça de fusão, pois a área de contato entre o arco e o metal de base é menor, resultando numa menor quantidade de calor irradiado do arco, originando então um cordão convexo de baixa penetração com superfície estreita (WIDGERY, 1994).

c) DBCP e Comprimento livre de eletrodo

Um aumento no comprimento do eletrodo tende a aumentar a temperatura do eletrodo devido ao efeito Joule (aumento da resistência elétrica). O aumento da DBCP pode provocar um aumento

significativo do reforço do cordão de solda e diminuir a largura do cordão. Isto ocorre mais significativamente para soldagem com o CO₂ puro. Fixando-se a velocidade de alimentação do eletrodo, qualquer aumento na distância bico de contato peça (DBCP) e conseqüentemente do comprimento livre do eletrodo, tem o efeito de reduzir a corrente (SALES, 2001).

d) Velocidade de Soldagem

Observa-se que a velocidade de soldagem para o eletrodo tubular apresenta o mesmo comportamento que para o eletrodo maciço influenciando na penetração de forma descontínua, ou seja, primeiro aumenta a penetração com o aumento da velocidade de soldagem e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo máxima para velocidades intermediárias (GOMES, 2006).

2.5 GERAÇÃO DE FUMOS

O estudo e a análise da geração de fumos possuem um papel importante no que se refere à soldagem, uma vez que normas rígidas de Segurança do Trabalho determinam o tempo e o limite de exposição do soldador aos fumos. Desse modo, minimizar a taxa de geração de fumos e dos riscos à saúde do trabalhador é sempre uma preocupação, uma vez que este elemento é o responsável pelo alto índice de doenças respiratórias e doenças que afetam o pulmão entre os soldadores. É possível minimizar a quantidade de fumos gerados, aos quais os soldadores estão expostos, avaliando-se uma série de fatores operacionais, tais como seleção adequada de parâmetros de soldagem, eficiência do processo de soldagem de acordo com sua aplicação, utilização da ventilação mais adequada para o ambiente de soldagem, utilização do material de adição adequado e os gases de proteção (CASTNER, 1995). Entretanto, a procura por otimização dos processos de soldagem no ambiente industrial, tem tido como objetivo principal elevar os índices de produtividade, aliados à redução de custos.

Fumos são aerodispersóides gerados termicamente, constituídos por partículas sólidas formadas por condensação de vapores, geralmente após volatilização de substância sólida fundida. No caso de fumos metálicos, frequentemente o seu processo de geração é acompanhado de reação de oxidação do metal, de modo que as partículas presentes são de óxido do metal, os quais são mais solúveis nos fluidos corpóreos que o metal. A formação de fumos pode ser originada por sete diferentes mecanismos tais como, evaporação de fumos da ponta do eletrodo (gota); evaporação de fumos do eletrodo no cátodo ou no ânodo; evaporação de fumos durante o destacamento da gota; evaporação de fumos de pequenas gotas que são repelidas, dos respingos, evaporação de fumos da poça de fusão e do cordão de solda ainda fundido conforme Figura 2.8.

No processo Eletrodo Tubular o fluxo exerce grande influência sobre o princípio de formação dos fumos, assim os mecanismos de formação dos fumos para este processo consiste nas seguintes etapas: vaporização do fluxo seguida de condensação e resultando na oxidação dos componentes do fluxo,

oxidação aumenta a vaporização, outro fator que contribui para a formação dos fumos é ejeção de micropartículas por meio da explosão de bolhas formadas no fluxo e também os respingos formados (HEWITT, et al., 1991). A poça de fusão para o eletrodo tubular não apresenta uma contribuição significativa na formação dos fumos devido à escória que se forma sobre a poça contribuindo para a formação do cordão.

Dentre as variáveis que influenciam diretamente a taxa de geração de fumos pode se citar a corrente, a tensão, o tipo de gás de proteção e o modo de transferência metálica.

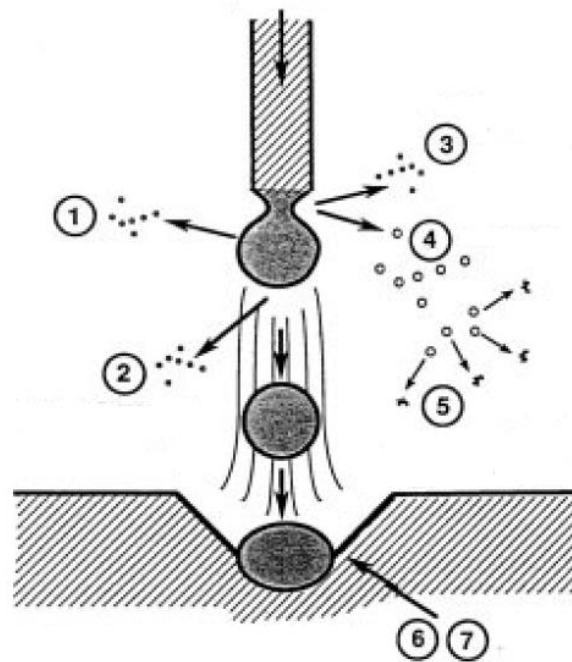


Figura 2.8 Mecanismos de formação fumos onde, 1- Evaporação de fumos da ponta do eletrodo (gota), 2- Evaporação de fumos do eletrodo na conexão catódica ou anódica; 3- Evaporação de fumos durante o destacamento da gota; 4- Evaporação de fumos de pequenas gotas que são repelidas, 5- Evaporação de fumos dos respingos, 6-Evaporação de fumos da poça de fusão e 7- Evaporação de fumos do cordão de solda (HEWITT, et al., 1991).

Um aumento da corrente atua diretamente na elevação da taxa de geração de fumos isso, como consequência de um aumento da temperatura do arco, uma vez que proporciona uma maior vaporização de metais presentes no arco, outro fator apontado pelos autores para uma maior geração de fumos é que o aumento da corrente promove um aumento da taxa de fusão do eletrodo por unidade de tempo (resultando numa quantidade maior de gotas que contribuem para uma maior evaporação) (CASTNER, 1995). É importante frisar que para outros pesquisadores, o aumento da corrente não aumenta a temperatura do arco, ficando a segunda explicação mais plausível. O aumento progressivo da corrente conseqüentemente causa variações no modo de transferência metálica que é outro fator que influi significativamente na elevação da taxa de geração de fumos.

A tensão é outro parâmetro capaz de alterar a taxa de fumos, o aumento da tensão aumenta a taxa de fumos, pois ocorre uma maior liberação de vapores a altas temperaturas do arco para atmosfera, pois

com o aumento da tensão há um aumento da velocidade do fluxo de plasma causando maiores turbulências e conseqüentemente uma maior geração de fumos (CASTNER, 1995).

As transferências por curto-circuito e spray produzem menores níveis de fumos do que a transferência globular, em função das gotas menores (curto-circuito e spray) possuírem uma menor área superficial e, portanto, absorverem uma menor quantidade de calor do que gotas grandes (globular).

Para os valores de baixa tensão (12-22 V) ocorrem o curto-circuito no qual os valores de tensão acontecem de forma intermitente com picos de baixa tensão onde há uma baixa geração de fumos e de respingos, e picos de altas-tensões onde ocorre um aumento na taxa de fumos e dos respingos. O aumento na taxa de geração de fumos com o aumento da tensão é atribuído ao aumento na taxa de respingos gerados. O ponto máximo para geração de fumos para o modo de transferência globular é em torno da tensão de 30 V, a formação de gotas grandes contribuem para uma maior formação de fumos.

Com o eletrodo tubular e proteção gasosa de 100%CO₂ a taxa de geração de fumos aumenta com a elevação da corrente e da tensão e diminui com a utilização de gás de proteção a base de misturas de argônio (KOBAYASHI, et al., (1985)).

O que se observa é que a geração de fumos é influenciada por uma série de fatores que atuam simultaneamente na formação de fumos e que em determinadas situações o efeito de uma variável se sobrepõe sobre a ação das outras variáveis, tornando se então a responsável pela geração de fumos. Pode-se supor que, de certa forma, todos os parâmetros que são capazes de alterar a taxa de fumos influenciam diretamente na fusão do eletrodo, ou no modo de transferência metálica.

2.6 GERAÇÃO DE RESPINGOS

A geração de respingos é considerada um fator influente tanto na qualidade quanto na produtividade final da solda. A geração de respingos apresenta como inconvenientes, além do desperdício de material fundido que não vira solda, o custo com mão-de-obra para a remoção dos mesmos, quando permanecem aderidos à peça soldada, e também a dificuldade operacional pela adesão dos respingos à parede do bocal, o que dificulta a passagem do gás de proteção comprometendo a qualidade do cordão. Desse modo, a geração de respingos torna-se um componente do indicador de produtividade para cada processo. Por isso a importância em realizar uma análise comparativa para os processos na geração de respingos buscando quantificar o nível de respingos gerados pelo processo de soldagem. Desse modo os respingos podem ser caracterizados como material fundido que não compõem o cordão de solda devido a instabilidades do processo, sendo uma variável dependente de uma série de fatores que governam o processo.

A geração de respingos é influenciada por vários parâmetros que compõem o processo, dentro os quais se pode citar a composição do gás de proteção, as características do metal de adição e de base, bem como o tipo de transferência metálica. O modo de transferência metálica atua significativamente no modo de formação do respingo, sendo que no modo de curto-circuito ocorre a formação do respingo logo após o destacamento da gota. Sabemos que a quantidade do respingo gerado pode ser minimizada

pela composição do gás de proteção, sendo que 100% CO₂ tende de gerar uma quantidade maior do que misturas de Ar-CO₂.



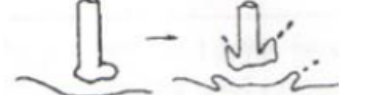
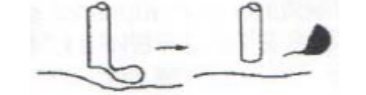
Existe o destaque a quatro pontos que resumem o mecanismo de formação dos respingos:

- Explosão elétrica devido à força pinch que reduz a seção transversal da gota durante o pico de corrente do curto circuito aumentando a densidade de corrente e promovendo a evaporação e explosão do metal fundido;
- Explosões devido ao gás de proteção, no qual o carbono do metal fundido reage com o oxigênio em altas temperaturas resultando em explosões do gás monóxido de carbono;
- O impacto do gás de proteção superaquecido na poça de metal fundido devido a reignição do arco após o curto-circuito;
- E formação de respingos no momento do curto circuito onde a gota se transfere para a poça de fusão.

Os mecanismos para formação dos respingos estão representados na Tabela 2.1. A formação do respingo ocorre também por quatro formas sendo, que o Tipo I ocorre durante a reignição do arco gerando uma grande quantidade de respingos de dimensões medianas, já o Tipo II ocorre devido à emissão de gases oriundos da gota e da poça de fusão resultando em finas partículas de respingo. O Tipo III é formado durante o curto circuito pelo contato do eletrodo com a poça de fusão, e o respingo tipo IV é gerado pela ação de forças eletromagnéticas sobre a transferência da gota.

Ainda referente à Tabela 2.1 o autor define que o princípio de geração de respingo para a transferência por curto circuito é definido pelo tipo I, e para a transferência globular é do tipo IV.

**Tabela 2.1 Atores primários para geração de respingo com gás de proteção 100%CO₂(
(HASHIMOTO, et al., 2007).**

Tipo	Modo de Geração do Respingo	Fator primário da geração de respingos
I		Reignição do Arco
II		Emissão do gás de proteção
III		Durante o curto circuito
IV		Forças Eletromagnéticas

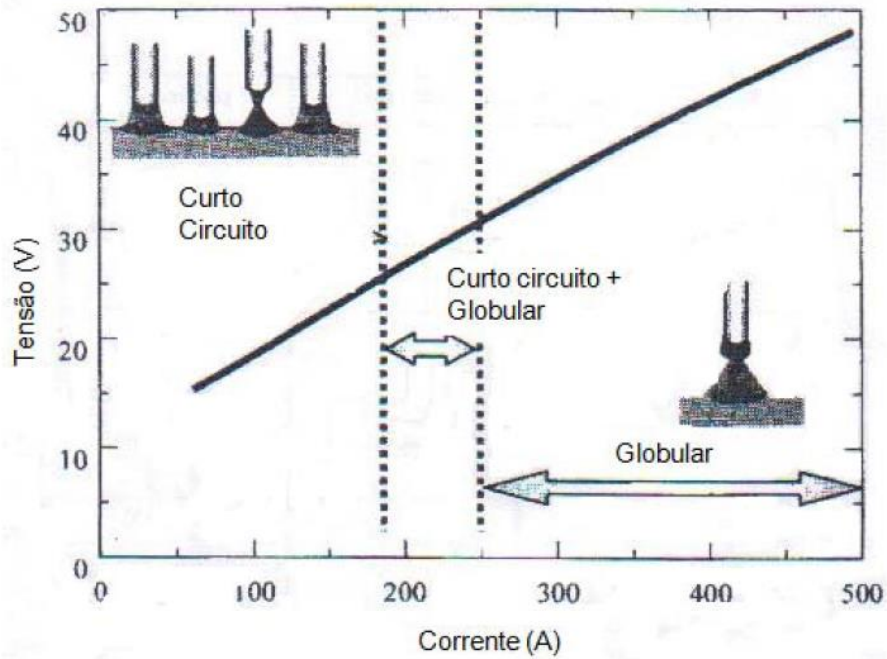


Figura 2.9 Condições de corrente e tensão para diferentes modos de transferência metálica, para eletrodo maciço com proteção gasosa 100%CO₂(HASHIMOTO, et al., 2007).

Desse modo a estabilidade do arco e da transferência metálica influencia diretamente na geração de respingos. As três causas para a instabilidade do arco:

- Curto-circuito com variações abruptas de corrente gerando contato do eletrodo com a poça de fusão em um período muito curto de tempo e sem nenhuma transferência de metal (curto-circuito incidental);
- Falha na reignição de arco;
- Variações na taxa de alimentação.

Dessa forma parâmetros como corrente e tensão que influenciam diretamente no modo de transferência metálica também influenciam na geração de respingos. Desse modo existem pontos ótimos de corrente e tensão para geração de níveis mais baixos de respingos. Para maiores teores de CO₂ no gás de proteção resultam numa maior concentração de respingos devido as características do arco formado, ou seja, um arco de pequeno diâmetro que aumenta a perturbação na superfície da poça metálica, prejudicando a estabilidade do arco e gerando a formação excessiva de respingos. Por outro lado, misturas com maiores teores de argônio contribuem para uma menor geração de respingos.

3 METODOLOGIA DO ENSAIO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as metodologias para a realização dos ensaios propostos, bem como para a seleção de parâmetros visando resultados quantificáveis e comparáveis. Também são descritos os equipamentos, os acessórios e os materiais de consumo empregados com as respectivas especificações, bem como a montagem geral das bancadas experimentais para a realização de todos os ensaios.

3.2 METODOLOGIA

Este trabalho propõe uma metodologia para a comparação do processo Eletrodo Tubular com três tipos de misturas gasosas distintas como proteção gasosa, 100% CO₂, Ar+25% CO₂ e Ar+40% CO₂.

Assim, o desenvolvimento de uma metodologia diferenciada capaz de sistematizar a análise comparativa entre diferentes aplicações do processo Eletrodo Tubular se fez necessária para a obtenção de parâmetros que permitam uma comparação significativa. Para tal, o processo com cada tipo de gás (ou produto) sob comparação deve trabalhar em condições diferenciadas e preferencialmente otimizadas para reproduzir as características nas quais eles são individualmente usados na prática, atendendo às especificações e recomendações do fabricante em relação às suas variáveis - tensão, corrente, DBCP, gás de proteção. Além disso, para realizar uma análise comparativa das vantagens e limitações da utilização do processo Eletrodo Tubular comparando cada tipo de proteção gasosa, a metodologia deve ter uma maior abrangência em relação aos aspectos práticos, tais como, a capacidade de fusão e deposição, a geração de respingos (no que tange a tamanho e distribuição por alcance), geração de fumos, fator econômico e facilidade operacional. Comparar sob a óptica de apenas um ou outro aspecto operacional não levaria ao alcance pleno da proposta, pois poderia deixar a comparação tendenciosa.

Para os experimentos, a comparação do desempenho entre o processo com cada tipo de gás foi fundamentada por algumas premissas:

- a) As comparações do processo com cada tipo de gás devem ser feitas nos mesmos níveis de corrente, varrendo uma ampla faixa de trabalho que atenda o recomendado para o eletrodo;
- b) O volume de cordão para cada corrente de comparação deve ser o mesmo, independente do parâmetro (mesmo volume de cordão por unidade de comprimento) para a mesma faixa de operação.

Como a taxa de deposição de cada processo para cada combinação eletrodo-gás de proteção é diferente, a adoção dessas premissas pode resultar em energias de soldagem dispare, já que a correção para se obter um mesmo volume de material depositado por unidade de comprimento para diferentes taxas de deposição, numa mesma corrente, é realizada pela velocidade de soldagem. Por outro lado, a

comparação adquire características mais práticas, pois numa fabricação soldada o que se quer é o preenchimento da junta, desde que a energia imposta atenda aos requisitos metalúrgicos do material e que se atinjam as características operacionais referentes à geometria do cordão.

Mas a varredura em si da corrente satisfaz de forma interpolativa uma análise do efeito de energia de soldagem. Ainda assim, mantendo-se constante a corrente e a velocidade de soldagem para as diferentes combinações eletrodo-gás de proteção, a tensão para cada caso seria diferente, impossibilitando obter a mesma energia de soldagem.

Objetivou-se atingir uma transferência metálica do tipo curto-circuito, e posteriormente analisou-se os oscilogramas captados durante as soldagens, verificando qual tipo de transferência ocorria em cada soldagem.

Para a definição das condições operacionais de soldagem para cada combinação eletrodo-gás de proteção foi adotada a seguinte metodologia:

a) Em sequência, procurou-se definir as velocidades de alimentação que resultassem nas correntes desejadas. Para isso, adotou-se inicialmente valores de referência conforme literatura. Realiza-se soldagens com estes parâmetros para averiguação da correspondência entre as velocidades de alimentação com as correntes buscando assim um processo estável.

b) Buscou-se definir a faixa operacional de corrente (neste caso foram estabelecidos três pontos de trabalho), a DBCP, a vazão de gás a ser trabalhada atendendo à recomendação dos fabricantes para cada conjunto eletrodo-gás de proteção; Caso a velocidade de alimentação não correspondesse à corrente desejada, uma varredura de regulagem da velocidade de alimentação era realizada até se obter o valor correspondente à corrente desejada.

c) Realizou-se uma varredura nos valores de tensão para cada valor de corrente, afim de se determinar uma faixa de tensão de regulagem adequada para cada conjunto eletrodo-gás de proteção;

d) Para a definição do volume de cordão adequado para cada corrente, definiu-se arbitrariamente (mas resguardando condições vistas na prática) um cordão padrão, ou seja, um volume de cordão adequado para preencher uma junta.

e) Uma vez fixado o volume de cordão, calculou-se a velocidade de soldagem que resultasse em tal volume;

f) Por fim, determinou-se o conjunto de parâmetros adequados para se fazer comparações entre cada combinação.

Uma vez determinados os parâmetros de soldagem para cada condição eletrodo-gás proteção, o passo seguinte é a determinação das respostas que serão usadas como meio de comparação entre os processos. Para tal buscou-se as seguintes respostas:

- Taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento de deposição;
- Ejeção de gotículas durante o processo;
- Geração de fumos;
- Custo por unidade de comprimento de solda;
- Nível de escória;
- Características geométricas dos cordões;

Com a taxa de fusão e a taxa de deposição pode ser realizada uma análise operacional do consumo e da eficiência de deposição. Desse modo é possível avaliar a quantidade de material fundido em função do tempo de soldagem, bem como analisar a capacidade de deposição do material fundido. Para a definição da taxa de fusão é necessário conhecer o valor da densidade (ρ) do eletrodo, a fim de obter-se um valor mais próximo possível do real. Para tal, foi cortado um metro de eletrodo e, na sequência, com o auxílio de uma balança de precisão, com resolução de 0,1g, foi determinada sua massa. Com a massa e o comprimento é possível calcular a densidade linear do eletrodo.

Como o respingo tem além do caráter econômico (perda de massa), o caráter operacional (trabalho para remoção dos respingos), torna-se interessante comparar os processos quanto à massa de respingo gerado.

O ensaio para análise de fumos permite a quantificação dos fumos gerados. Para realizarmos a quantificação um fundo branco foi posicionado em um dos lados da tocha e do outro lado posicionou-se uma câmera que realizou a gravação da geração dos fumos.

O nível de escoria foi analisado do ponto de vista de quantidade de escoria produzida para cada processo e facilidade de destacamento. Para a quantificação da escoria produzida em cada processo foi realizada uma pesagem do corpo de prova numa balança de precisão, com resolução de 0,1g, antes da retirada da escoria e posteriormente a retirada da escoria.

Na análise da geometria do cordão foi utilizado o seguinte método, após a soldagem e a retirada da escoria, realizou-se cortes no corpo de prova a fim de desprezar os primeiros 25 mm e os últimos 25 mm do cordão onde foi realizada a análise da face do cordão produzida pelo corte; desprezou-se o início e o final do cordão pois buscava-se uma análise em pontos onde o cordão foi realizado com processo estável durante a soldagem. Um terceiro corte foi feito no meio do corpo de prova e foi feita a análise em uma das faces gerada pelo corte.

Não foi avaliada o efeito da indutância, sobre o desempenho das combinações eletrodo-gás de proteção que poderia otimizar algumas condições de soldagem. Esses fatores devem ser levados em consideração na aplicação da metodologia proposta de forma mais completa.

3.3 BANCADA EXPERIMENTAL

3.3.1 BANCADA FÍSICA

Os testes se utilizaram da bancada montada no laboratório de soldagem do GRACO (Grupo de Automação e Controle) da Universidade de Brasília. Esta bancada tem dois simples objetivos: automatizar a realização dos cordões e coletar dados relativos à corrente e à tensão nas soldagens nela realizadas.

Vários estudos foram realizados com o objetivo de agregar elementos para monitorar e ou controlar os processos de soldagem. Alguns deles utilizam os parâmetros entregues pela própria fonte de soldagem, outros empregaram câmeras.

A fonte multiprocesso de soldagem usada foi a IMC DIGIPlus A7. A máquina suporta diversos processos de soldagem como MIG convencional, pulsado com comando de corrente, TIG e plasma, e eletrodo revestido, porém só trabalhamos com o processo de solda convencional com capacidade de operação em corrente máxima de 450 A. A Tabela 3.1 lista as principais características da fonte de soldagem.

Tabela 3.1 Características da fonte de soldagem – IMC Soldagens

Características Elétricas:			
Características	Capacidade de Corrente		
	450	600	800
Tensão de alimentação trifásica	220/380/440	220/380/440	220/380/440
Tensão em vazio (configurável de fábrica)	50/68/85 V	50/68/85 V	50/68/85 V
Corrente a 100 % de fator de carga	280 A	350 A	500 A
Potência nominal	10 kVA	12 kVA	16 kVA
Faixa de corrente	5- 450 A	5- 600 A	10 - 800 A
Corrente de entrada nominal por fase (220/380/440)	26/15/13 A	32/18/16 A	42/25/21 A
Ripple de corrente	8 A	10 A	20 A
Fator de Potência	0.94	0.94	0.94

Como o trabalho é com uma fonte de soldagem com painel digital controlamos alguns parâmetros pela própria fonte tais como: velocidade de alimentação e vazão de gás.

Tabela 3.2 Configurações da placa de aquisição utilizada.

CARACTERÍSTICA	
Número de Canais Analógicos de entrada	16
Número de Canais Analógicos de Saída	2
Resolução A/D (bits) 400 KHz	14
Resolução D/A (bits) 100 KHz	14
Capacidade de gerar ondas D/A	Sim
Número de linhas I/O digitais (TTL)	8

A interface de aquisição e controle foi desenvolvida em projetos anteriores no ambiente de programação LabVIEW, da NationalInstruments.

Como o processo requer repetibilidade de alguns parâmetros utilizou-se uma mesa linear, que apresenta um movimento com apenas um grau de liberdade. O eixo é acoplado a um motor de passo. A mesa utilizada em conjunto ao motor é exibida na Figura 3.1.

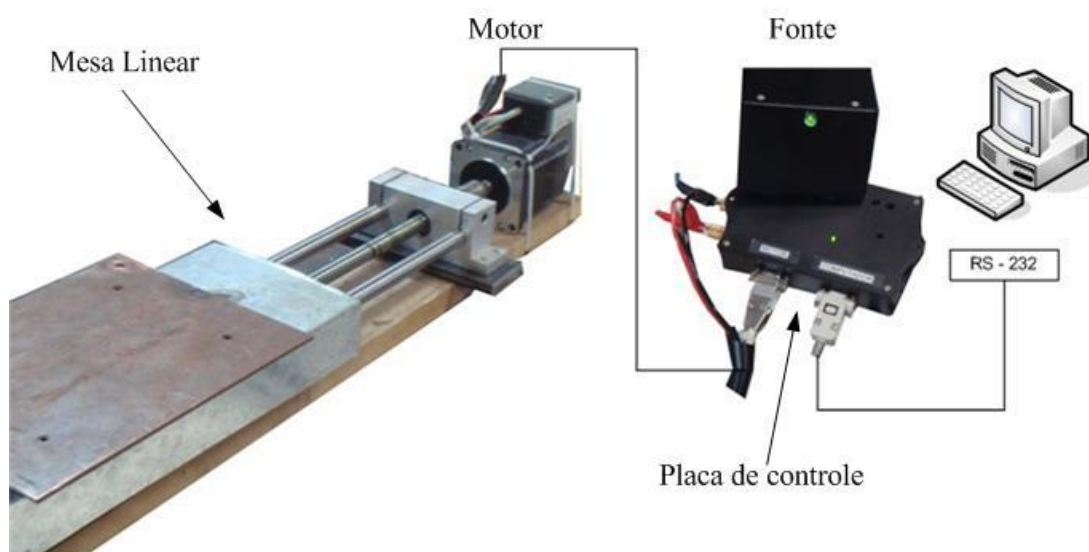


Figura 3.1 Mesa de avanço linear - Graco

O motor de passo usado na mesa é do fabricante BERGER LAHR, modelo ICIA IDS91. Para seu controle, são necessários apenas dois sinais. Um sinal tipo onda quadrada, cuja frequência regula a velocidade do motor, e outro que controla a direção do motor (giro para esquerda ou direita). Para controlar a velocidade, sentido do giro do motor e tempo do processo, foi usado um micro controlador (PIC16C63A).

Para medir a tensão do processo de soldagem FCAW propôs-se utilizar um conjunto de placas de aquisição desenvolvida no GRACO. A primeira placa é composta por um redutor de tensão na escala 10 para 1 e um filtro passa-baixa de segunda ordem para reduzir a alta frequência produzida por algumas máquinas de soldagem para manter o arco em corrente contínua. A segunda parte da placa de aquisição de tensão possui um sistema de isolamento com o objetivo de desacoplar o circuito de soldagem do sistema de aquisição utilizando uma série de amplificadores operacionais e um amplificador isolador (ISO122).

Note que existem somente reguladores de tensão modelo LM7808 e o simétrico LM7908 para limitar a tensão de saída do sistema a ± 8 V. Isso significa que utilizando o sistema de redução 10 V para 1 V (presente no sistema de medição original) a tensão máxima de soldagem medida pelo sistema é de ± 80 V.

Já para adquirir a corrente durante o processo de soldagem utilizou-se um grampo de corrente de referência *i1010* (FLUKE, 2008). Este dispositivo mede a corrente que circula por um cabo por meio de um sensor de efeito Hall. A saída do sensor apresenta uma sensibilidade de 1mV/A. Este sinal é ligado diretamente na placa de aquisição.

Os programas utilizados na bancada foram concebidos na plataforma LabView, um para a coleta e divulgação dos dados e outro para a automatização do processo de soldagem.

O programa destinado a coletar e divulgar os dados tem acionamento manual, passando a coletar dados a partir do momento em que é ativado. Assim, na realização dos testes, para a coleta de todos os dados durante o processo de soldagem, ele é acionado antes da abertura do arco e desligado após seu fechamento. Os dados “0”, referentes à coleta de dados sem soldagem são posteriormente descartados na rotina MatLab que analisa os resultados da coleta. Este programa tem resolução de leitura variável, tendo sido utilizada para a coleta de dados a resolução padrão de 1500 Hz. Sua leitura é divulgada na tela do programa, e salva em um arquivo de extensão “.lvm” na forma de uma coluna com os dados. A principal dificuldade da análise destes dados é a sua divulgação, sendo os dados “0” divulgados em escala de A e V e sinal negativo, enquanto os dados coletados com o arco aberto são divulgados em μA e μV . Isso exigiu um tratamento de dados anterior à utilização da rotina de forma a padronizar as unidades dos dados. Assim os dados maiores do que zero devem ser divididos por 10^6 enquanto os dados menores do que zero devem ser mantidos.

O programa destinado à automatização do movimento da mesa foi originalmente desenvolvido para a automatização conjunta da soldagem com uma fonte Fronius, sendo definíveis simultaneamente os parâmetros relativos ao movimento da mesa e da soldagem, V_{mesa} em cm/min , $t_{soldagem}$ em segundos, V_{arame} em m/min e $U_{soldagem}$ em Volts. O programa então calcula e divulga em sua interface o comprimento total de solda. Por fim, também é definível a direção do movimento da mesa, para frente ou para trás. Como a fonte Fronius não foi utilizada, os dados de tensão e avanço do eletrodo foram indiferentemente definidos como “0”.

3.3.2 CONSUMÍVEIS

3.3.2.1 Eletrodo

Como consumível do tipo eletrodo utilizou-se o eletrodo tubular AWS E71T-1, sendo este um eletrodo tubular rutílico utilizado para soldagem em um único passe ou multipasse em todas as posições. Sendo que o mesmo apresenta uma ampla faixa de parâmetros operacionais, baixo índice de escória. Tal consumível destina-se a soldagem de aços de baixo e médio teor de carbono, soldagem estrutural e construção pesado em geral. As principais características do eletrodo conforme divulgadas pelo fabricante são apresentadas na Figura 3.2.

ASME SFA-5.20 E71T-1C (M) E491T-1C(M) E71T-9C (M) E491T-9C (M)	100% CO ₂	Arame tubular rutílico, para soldagem em um único passe ou multipasse em todas as posições. Apresenta uma ampla faixa de parâmetros operacionais, baixo índice de respingos e ótima remoção de escória. Pode ser utilizado tanto com CO ₂ , ou mistura (Ar + 20-25% CO ₂).	100% CO ₂ L.R. 600 MPa L.E. 580 MPa A 26% ChV (-30°C) 60J		1,20	150A, 28V 210A, 29V 250A, 30V 290A, 33V 330A, 34V	87 87 88 88 90	1,90 2,85 3,85 4,85 5,75	100% CO ₂ CC+ ou Ar+ 20-25% CO ₂ CC+
	Ar+ 20-25% CO ₂	Destina-se a soldagem de aços de baixo e médio teor de carbono, soldagem estrutural e construção pesada em geral.	Ar+20-25% CO ₂ L.R. 670 MPa L.E. 630 MPa A 24% ChV (-30°C) 55J		1,60	190A, 27V 300A, 30V 365A, 33V 410A, 33V 450A, 33V 500 A, 39 V	87 87 88 89 90 90	2,75 4,60 5,60 6,35 7,30 9,11	
	C 0,04 Si 0,50 Mn 1,30	Homologações: 100% CO ₂ ABS 3YSA H10 BV SA 3Y 40 M HH DNV III Y40MS H10 LRS DXVudO BF 3S,3YS H15 NA FBTS 75% Ar + 25% CO ₂ ABS 3YSA H10 BV SA 3Y M HH DNV III YMS (H10) LRS DXVudO BF 3S,3YS H15 NA							

Figura 3.2 Características do eletrodo tubular

3.3.2.2 Gás de proteção

Para facilitar as análises dos dados coletados e melhorar a exposição dos resultados usaram-se as nomenclaturas comerciais, usuais aos consumidores finais dos produtos em análise, sendo elas C40 para o gás mistura de 60%Ar+40%CO₂, C25 para o gás mistura 75%Ar+25%CO₂ e CO₂ para o gás 100%CO₂. Os gases de proteção escolhidos para o estudo são de grande aplicação no mercado industrial especialmente com o processo FCAW, o que reforça a importância do estudo em questão.

4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 PLANEJAMENTO FATORIAL DOS EXPERIMENTOS

Para o planejamento fatorial dos experimentos levaram-se em conta duas variáveis, o gás utilizado e a corrente, com o objetivo de mensurar os efeitos de cada gás nas propriedades dos cordões de solda para níveis diferentes de corrente. Como foram testados 3 gases diferentes, com o objetivo de facilitar o cálculo do número de experimentos, bem como para cobrir uma razoável faixa operacional, optou-se por utilizar 3 níveis de corrente, definida como corrente baixa, corrente média e corrente alta. Assim sendo, calculou-se o número de experimentos necessários de acordo com a seguinte regra:

$$n_{\text{experimentos}} = n_{\text{níveis}}^{n_{\text{variáveis}}} = 3^2 = 9 \text{ experimentos}$$

Para observar a regularidade dos efeitos de cada variável, decidiu-se repetir cada experimento 3 vezes, gerando um total de 27 experimentos. Para a realização das análises propostas só se é necessário um corpo de prova para cada experimento, sendo assim, o número de corpos de prova necessários é igual ao número de experimentos, 27.

Os valores de corrente foram definidos tendo como base em primeiro lugar os valores de corrente mínimo e máximo indicados pelo fabricante, um intervalo de 150 A à 330 A para o diâmetro de 1,2 mm. Para a definição dos valores, definiu-se um valor de 170 A para a corrente baixa, pouco acima do mínimo, e então aplicou-se um intervalo de 40 A para cada nível subsequente, deixando as correntes dentro dos parâmetros e equidistantes entre si. Um dos objetivos desta definição de níveis foi trabalhar mais próximo ao limite inferior para a corrente baixa do que ao limite superior para a corrente alta, evitando gastos excessivos de energia bem como possíveis instabilidades devidas ao excesso de energia.

Durante os testes planejou-se colher dados relativos à tensão e à corrente, para o cálculo das médias, das RMSs e dos desvios padrões como monitoramento do processo, e também como parâmetros de estabilidade e regime de transferência.

Assim sendo, criou-se a Tabela 8.10 encontrada nos apêndices.

4.2 ESTUDO DOS ERROS

Como parte importante de qualquer procedimento experimental, um estudo dos erros foi realizado. Os erros associados às grandezas mensuradas no experimento podem ser de três naturezas: erros aleatórios, erros sistemáticos e erros grosseiros.

Os erros aleatórios são variações estatísticas nas medidas realizadas e estão associados a condições impossíveis de controlar ou simplesmente não controladas, sendo sua eliminação impossível mesmo quando se controlam todos os erros sistemáticos. Já estes estão associados a repetições consistentes de discrepâncias que podem estar associados a má calibração de equipamento, ao procedimento de coleta viciado, ao modelo matemático não condizente com o fenômeno, etc. Por fim, erros grosseiros são o resultado de um procedimento mal realizado, sendo inadmissíveis em resultados experimentais.

O procedimento de medição deve sempre ser repetido diversas vezes para que a repetição estatística da medição torne mais confiável o resultado, minimizando os erros aleatórios. Assim, o valor provável \bar{x} para uma grandeza x pode ser obtido através da média aritmética dos valores medidos:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Para a mensuração do erro aleatório, tendo como base a coleta estatística de medições, calcula-se a incerteza residual $\sigma_{\bar{x}}$, tendo como base o desvio padrão σ da amostra, de acordo com a fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)}} \quad (3)$$

Assim, o resultado de uma série de n medidas pode ser escrito como:

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \quad (4)$$

Ao se fazer operações com grandezas que possuem incertezas seus erros também tem de sofrer transformações através de operações que mensurem a propagação da incerteza através dessas operações. Para o cálculo dessas propagações foram utilizadas as regras expressas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 Regras de propagação de erros.

$\bar{x}(a, b, c \dots)$	REGRA DE PROPAGAÇÃO DE ERRO
$\bar{x} = a + b$	$\sigma_{\bar{x}}^2 = \sigma_a^2 + \sigma_b^2$
$\bar{x} = kx + h$	$\sigma_{\bar{x}} = k \sigma_x$
$\bar{x} = ab$	$\sigma_{\bar{x}}^2 = b^2\sigma_a^2 + a^2\sigma_b^2$
$\bar{x} = \frac{a}{b}$	$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma_a^2}{a^2} + \frac{\sigma_b^2}{b^2}$

Por fim, para cada valor se contabilizou também a contribuição da incerteza de medição, isto é, o quanto o instrumento é capaz de medir a grandeza com precisão. Para tanto, foi utilizado metade da escala do instrumento como o valor da incerteza de medição. As incertezas de medição estão listadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Incertezas de medição.

INSTRUMENTO	INCERTEZA DE MEDIÇÃO
Amperímetro	$\pm 0,5 \text{ mA}$
Balança	$\pm 0,05 \text{ g}$
Paquímetro	$\pm 0,05 \text{ mm}$
Trena	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Voltímetro	$\pm 0,5 \text{ mV}$

4.3 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram fabricados em chapa de material metálico, aço SAE 1020, com a geometria definida sendo: 200 mm de comprimento por 50,8 mm de largura por 6,35 mm de espessura. Todos os corpos de prova foram fabricados com barras chatas laminadas a quente como ilustrado na Figura 4.1.

Os corpos de prova passaram por um processo de limpeza para garantir a estabilidade do processo de soldagem onde a face a ser soldada deve estar livre de qualquer tipo de contaminantes como óleos,

graxas e oxidação. Para isso foi realizada a limpeza da superfície com o uso de desengraxante e posterior uso de um esmeril de chicote, garantindo assim a retirada de qualquer tipo de contaminante do corpo a ser soldado. Após a limpeza todos corpos de prova foram avaliados novamente antes da soldagem, caso algum corpo de prova apresentasse qualquer tipo de contaminante deveria ser realizado novamente o processo de limpeza. Com os corpos de prova já feitos realizou-se a marcação em ordem numérica, de 1 a 30, dos mesmos a fim de poder se relacionar cada corpo de prova com seu respectivo teste e filmagem.



Figura 4.1 Corpo de prova nº 1 - 200x50,8x6,35mm.

4.4 DEFINIÇÃO DA FAIXA OPERACIONAL – ENVELOPE DE PARÂMETROS

Como em processos MIG/MAG trabalha-se ajustando a tensão e a velocidade de avanço, foi necessário realizar um procedimento prévio para definir um envelope de parâmetros os quais serviriam como os níveis ideais dessas variáveis para entregar a corrente necessária à realização dos experimentos.

Como a DBCP é fixada em 20 mm e a vazão do gás de proteção é fixada em 18 litros por minuto, a corrente somente variará com a tensão e a velocidade de alimentação do arame. Assim, propuseram-se realizar diversas soldagens para três níveis diferentes de velocidade de alimentação V_a , variando-se a

tensão em 1V a cada nova soldagem. As velocidades de alimentação foram definidas objetivando-se adequar o volume de cordão para cada processo e embasadas em usos comuns de aplicação deste processo na indústria, e mantendo a taxa de volume de cordão por unidade de comprimento fixa.

Tabela 4.3 Experimentos para a definição da faixa operacional.

EXPERIMENTOS PARA A DEFINIÇÃO DA FAIXA OPERACIONAL					
V_a (m/min)	U_1 (V)	U_2 (V)	U_3 (V)	U_4 (V)	U_5 (V)
5,5	25	26	27	28	29
7,5	28	29	30	31	32
9,5	30	31	32	33	34

Cada teste foi repetido 3 vezes para cada gás para cada par de tensão de soldagem e velocidade de alimentação do eletrodo tubular. Com os dados de tensão e corrente de soldagem coletados por meio da bancada, foi concebida uma rotina em plataforma *MatLab* que primeiramente excluía as leituras feitas sem o arco aberto, para então desprezar os dois primeiros segundos de leitura de modo a analisar somente a região onde o arco já havia adquirido certa estabilidade. Por fim, a rotina calculava as médias das correntes e tensões em cada soldagem, e a média entre as três medições. Foram levantadas tabelas com os valores de corrente média para cada situação. Os valores que mais se aproximavam das correntes objetivadas, 170 A, 210 A e 250 A foram selecionados para os testes. Por serem feitas dezenas de milhares de medidas, o erro aleatório é praticamente igual a zero. Considerando também a precisão do amperímetro e do voltímetro, sua incerteza de medição é desprezível em relação aos valores trabalhados, e de muitos mais algarismos significativos do que os necessários para a análise. Sendo assim, desprezou-se o erro. Com se obteve resultados muito próximos entre os dados coletados em alguns testes foi necessária a utilização de outro critério de escolha da tensão de soldagem a ser trabalhada, para isso a decisão foi realizada pela comparação com as indicações de tensão e corrente fornecidas pelo próprio fabricante do eletrodo tubular utilizado nos experimentos. As tensões escolhidas estão listadas nas tabelas: Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6.

Tabela 4.4 Valores de corrente para $V_a=5,5$ m/min.

<i>I (A)</i>			
<i>U (V)</i>	C25	C40	CO₂
25	<u>168,2</u>	170,8	163,7
26	181,6	166,3	164,7
27	175,4	<u>170,2</u>	<u>169,4</u>
28	181,9	173,6	167,9
29	183,0	175,5	169,4

Tabela 4.5 Valores de corrente para $V_a=7,5$ m/min.

<i>I (A)</i>			
<i>U (V)</i>	C25	C40	CO₂
28	<u>210,9</u>	<u>210,8</u>	207,3
29	217,0	211,1	208,2
30	217,5	212,6	208,1
31	222,0	213,0	<u>210,3</u>
32	223,1	213,7	211,0

Tabela 4.6 Valores de corrente para $V_a=9,5$ m/min.

<i>I (A)</i>			
<i>U (V)</i>	C25	C40	CO₂
30	254,4	241,7	<u>249,9</u>
31	<u>251,4</u>	246,3	251,9
32	257,5	<u>249,7</u>	249,2
33	267,9	251,2	249,0
34	266,5	258,6	247,6

Tabela 4.7 Valores de tensão selecionados por gás e velocidade de alimentação.

Gás	V_a (m/min)	U (V)	I (A)
C25	5,5	25	168,2
C25	7,5	28	210,9
C25	9,5	31	251,4
C40	5,5	27	170,2
C40	7,5	28	210,8
C40	9,5	32	249,7
CO ₂	5,5	27	169,4
CO ₂	7,5	31	210,3
CO ₂	9,5	31	249,9

4.4 TESTES

O primeiro passo para a realização dos testes foi a pesagem dos corpos de prova antes do processo de soldagem ser realizado. Para isso foi utilizada uma balança de precisão Diamond modelo 500, com carga máxima de 500 g e resolução de 0,1 g. As pesagens foram repetidas 10 vezes para cada corpo de prova e anotadas em uma planilha Excel para posterior análise. Os corpos de prova foram limpos antes das pesagens.

Como segundo passo se tem a montagem do corpo de prova na bancada, onde ele dever ser fixado a plataforma móvel da bancada com o auxílio de quatro suportes presos por parafusos e roscas conforme visto na Figura 4.2. Com o corpo de prova já devidamente posicionado se realizou a montagem da estrutura de captação dos respingos, o posicionamento do fundo de pano branco para servir de contraste durante a filmagem e posicionou-se a câmera que realizou a filmagem em sua posição mais adequada.

Com isso, os testes prosseguiram de maneira sequencial de acordo com o planejamento fatorial apresentado na seção 4.1 seguindo em ordem numérico o uso dos corpos de prova. Com os corpos de prova montados na bancada, a tocha era posicionada com sua angulação de trabalho e sua DBCP pré-determinadas e o aparato experimental era ligado para a realização da coleta de dados do experimento durante a soldagem. Por questão de facilidade de montagem, decidiu-se realizar os experimentos com a seguinte ordem dos gases de proteção: Ar+40%CO₂, 100%CO₂ e Ar+25%CO₂. A estrutura de papel branco de além de servir para a captação dos respingos servia também guardar informações de alcance e a quantidade de energia dos respingos quando esses o atingissem, o papel queimaria e seria possível

observar o alcance dos respingos bem como sua energia de acordo com a severidade da queimadura observada no papel. Os papéis foram divididos em dois lados, direito e esquerdo, e um na frente da mesa como demonstrado na Figura 4.3. Os lados direito e esquerdo foram numerados de acordo com a proximidade da mesa de 1 a 10 para possibilitar posterior remontagem do sistema fora da bancada experimental. Ao final de cada soldagem de corpo de prova os respingos eram recolhidos e os papéis trocados por um novo jogo com indicação de posição e qual teste ele pertencia.

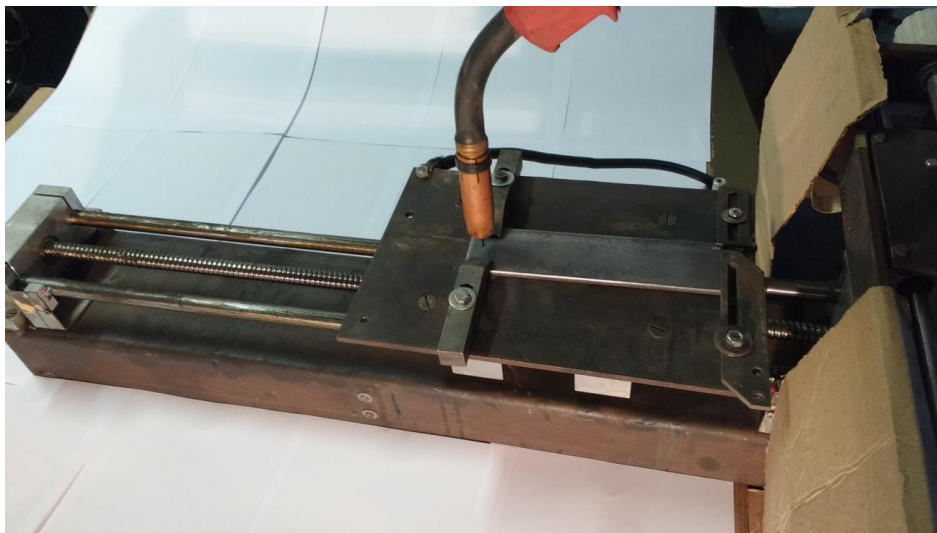


Figura 4.2 Montagem do corpo de prova na bancada.

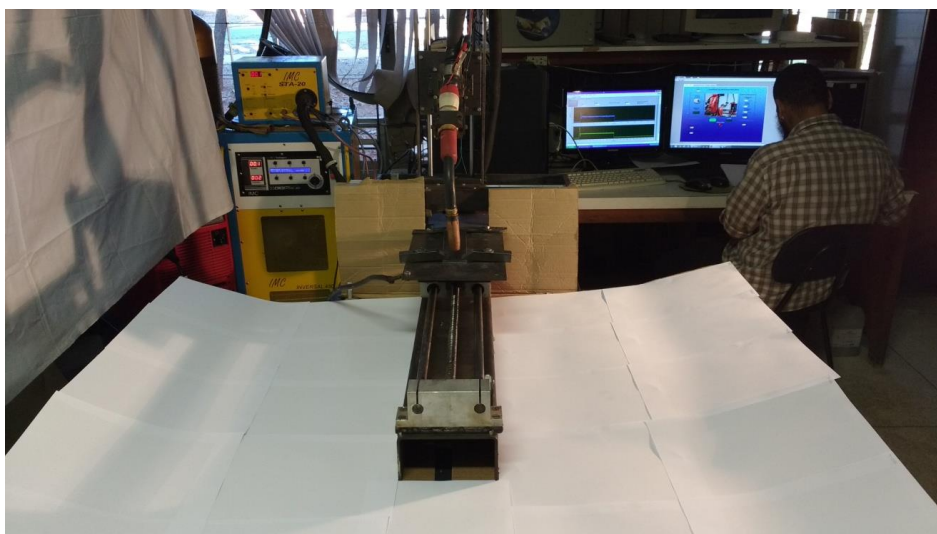


Figura 4.3 Demonstração da montagem da bancada com a estrutura de papel.

Para a coleta de dados novamente a interface no programa LabView foi iniciada antes da abertura do arco e encerrada após seu fechamento, sendo os dados tratados posteriormente. Buscou-se uma velocidade de avanço da mesa, V_{mesa} , adequada que proporcionasse o comprimento ideal de 160 mm que desprezasse os primeiros e os últimos 20 mm do corpo de prova a ser soldado. A tocha foi posicionada em um ângulo de 90° com os corpos de prova, e o DBCP foi fixado no valor padrão de

20 mm. A Tabela 4.8 Parâmetros gerais utilizados nos ilustra os parâmetros comuns a todos os testes realizados.

Tabela 4.8 Parâmetros gerais utilizados nos experimentos.

PARÂMETROS UTILIZADOS NO TESTE				
DBCP (mm)	V_{mesa} (cm/min)	$Q_{\text{gás}}$ (l/min)	t_{soldagem} (s)	f_{coleta} (Hz)
$20 \pm 0,05$	36	18	27	1500

Considerando o tempo de soldagem e as velocidades de avanço do eletrodo tubular, podemos definir as quantidades de arame a serem fundidas pela Equação 5 e como resultados temos a Tabela 4.9 Quantidades de arame..

$$l_a = \frac{V_a \cdot t_{\text{soldagem}}}{60} \text{ (m)} \quad (5)$$

Tabela 4.9 Quantidades de arame.

QUANTIDADES DE ARAME	
V_a (m/min)	l_a (m)
5,5	2,475
7,5	3,375
9,5	4,275

Na realização do primeiro e do oitavo experimentos apresentaram erros durante a coleta de dados, com isso esses experimentos tiveram de ser repetidos utilizando os corpos de prova reserva 28 e 29 respectivamente.

Todos os experimentos foram filmados, vide Figura 4.4, buscando observar através da ajuda do fundo branco possíveis diferenças notáveis a olho nu na emissão de fumos e respingos.

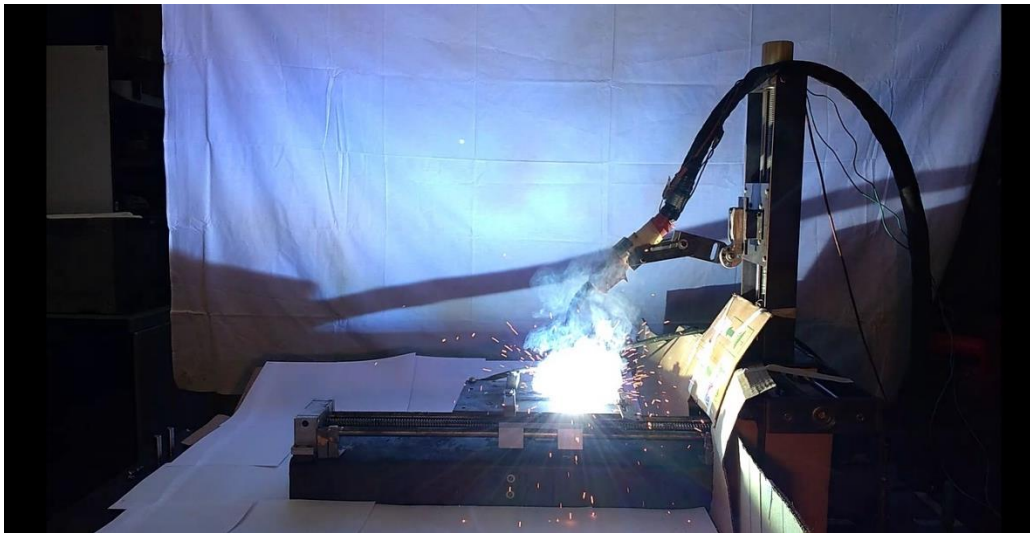


Figura 4.4 Captura de imagem do vídeo do experimento 3-2.



Figura 4.5 Corpos de prova com respingos recolhidos.

Com os cordões de solda realizados reuniu-se todos os corpos de provas após seu resfriamento, como demonstrado na Figura 4.5, para facilitar a realizações de teste, assim efetuou a pesagem destes com a escória, Figura 4.6 Corpo de prova 28 com a escória ainda não destacada.. Com isso também se obteve a diferença de massa entre os corpos de prova antes e depois da soldagem, com a presença de escória. Logo a seguir, a escória foi destacada, Figura 4.7e além de pesada, observou-se a facilidade de seu destacamento. Com isso, os corpos de prova foram limpos para que a escória não destacada fosse eliminada, Figura 4.8 e os corpos de prova pudessem ser pesados novamente. Isso possibilitou mensurar o valor da diferença de massa sem escória, o que por fim nos dá o valor da massa de escória aderida ao CP. Após isso, os respingos recolhidos foram pesados.

Para a realização dos testes de geometria e molhabilidade, os corpos de prova foram cortados em 4 regiões, desprezando-se os 3 primeiros e últimos centímetros de cordão. Após o corte, o corpo de prova

foi polido em preparação a um ataque químico com ácido clorídrico para revelar a penetração do cordão na seção transversal, Figura 4.11 Seção do corpo de prova 22 após o ataque químico., que foi então medida. As Figura 4.9 e a Figura 4.10 demonstram os tratamentos utilizados.

Por fim, para o cálculo da densidade linear do arame, um metro foi cortado e pesado 10 vezes.

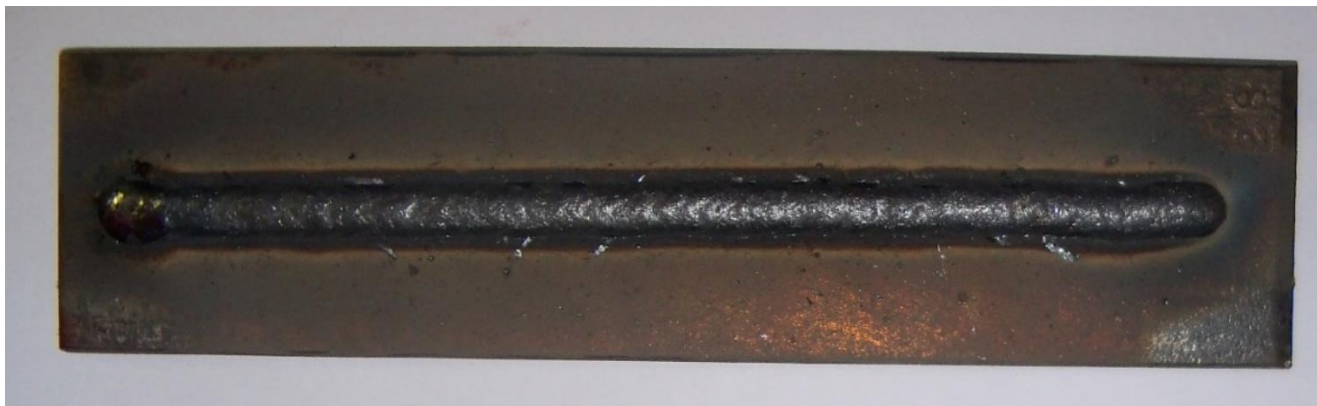


Figura 4.6 Corpo de prova 28 com a escória ainda não destacada.

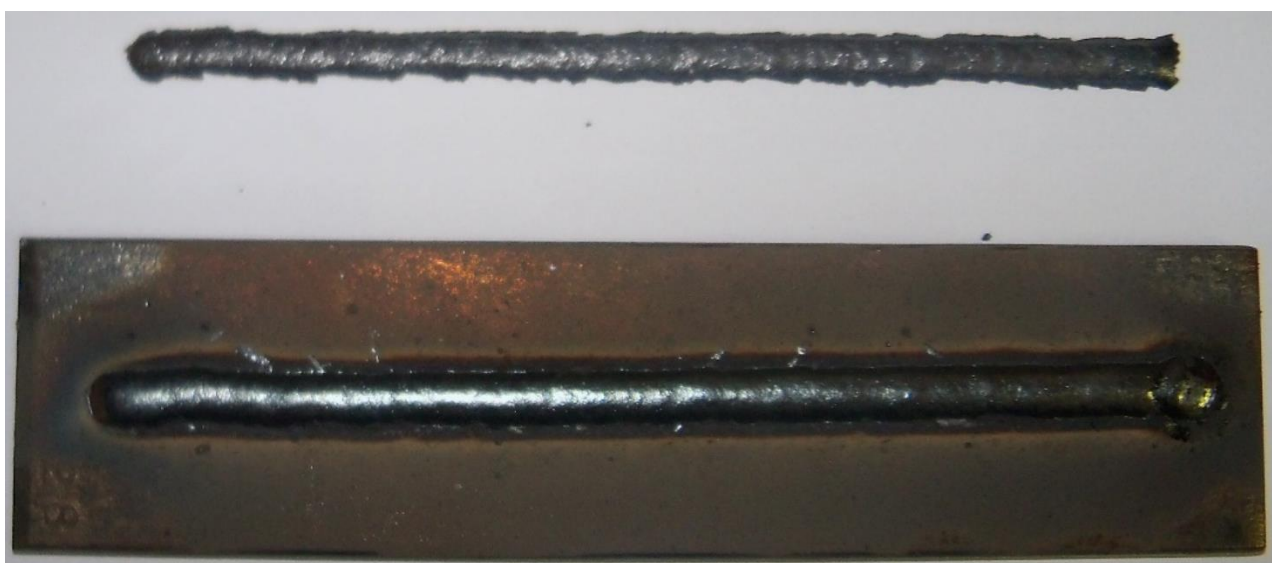


Figura 4.7 Corpo de prova 28 com a escória destacada.

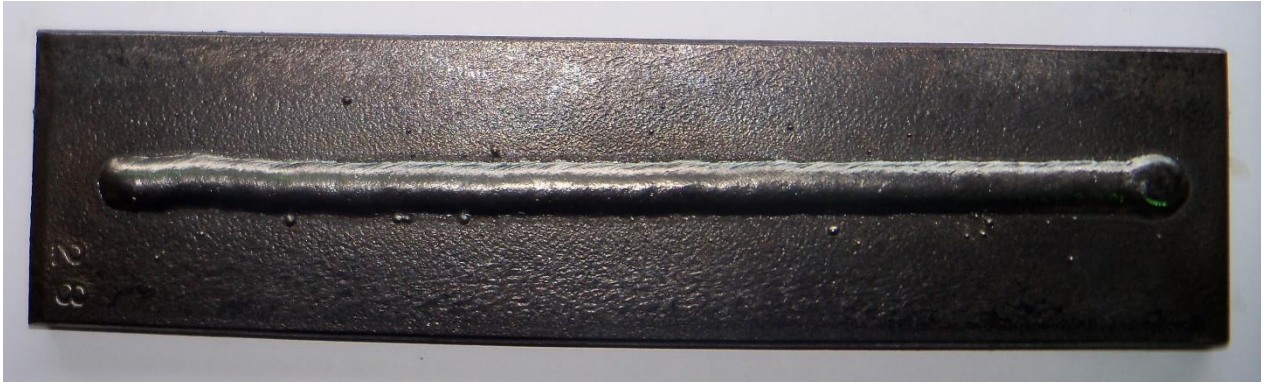


Figura 4.8 Corpo de prova 28 após a limpeza.



Figura 4.9 Seção do corpo de prova 22 antes do polimento.

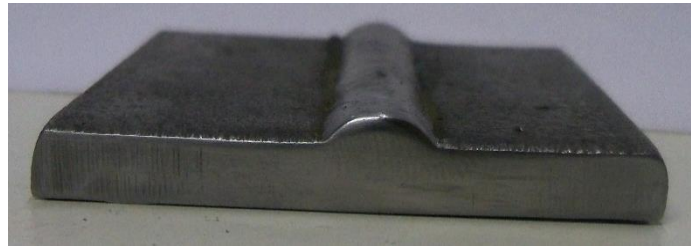


Figura 4.10 Seção do corpo de prova 22 após o polimento.

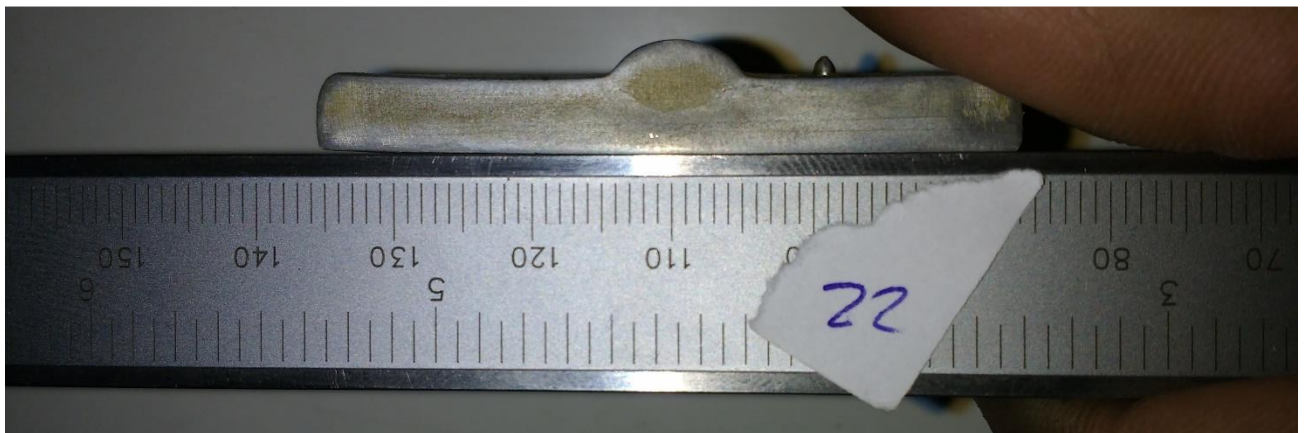


Figura 4.11 Seção do corpo de prova 22 após o ataque químico.

5 DISCUSSÃO

5.1 CÁLCULO DAS CORRENTES E TENSÕES

Para o cálculo das correntes e das tensões um procedimento semelhante ao utilizado para definir os parâmetros operacionais foi utilizado, sendo os dados colhidos pelo LabView analisados através de uma rotina MatLab que descarta os dados referentes aos períodos onde os arcos não estão abertos, e prossegue calculando a média e o desvio, além da RMS. De posse dos dados de corrente e tensão, calculou-se também a potência, Equação 6. Da mesma maneira que na definição dos parâmetros, o erro foi desprezado. Com isso obtiveram-se os da Tabela 5.1. Todos os resultados são apresentados no Sistema Internacional de medidas. Os dados completos das 27 soldagens estão apresentados na Tabela 8.11.

$$W = V * I \quad (6)$$

É importante ressaltar que o desvio nos cálculos não representa os erros associados às grandezas, mas o quanto os valores medidos durante a soldagem variam em relação à média amostral. Por fim, temos como resultados apresentados na Tabela 5.1, os resultados da média aritméticas dos resultados das três repetições dos experimentos.

Tabela 5.1 Resultados Finais.

Exp	Gás	i	\bar{i}	i_{RMS}	σ_i	\bar{V}	V_{RMS}	σ_V	\bar{W}	W_{RMS}
1	C40	170 A	175,67	176,33	14,23	24,63	24,80	3,00	4327,17	4373,29
2	C40	210 A	218,60	219,17	15,93	24,63	24,53	2,07	5383,43	5376,80
3	C40	250 A	254,50	255,03	16,30	28,03	28,13	2,07	7134,37	7174,82
4	CO ₂	170 A	168,60	170,20	23,13	24,67	24,93	3,50	4155,67	4239,80
5	CO ₂	210 A	218,77	219,63	19,60	27,57	27,67	2,60	6030,74	6076,59
6	CO ₂	250 A	253,87	255,27	26,27	26,07	26,23	3,00	6617,63	6696,67
7	C25	170 A	170,80	171,87	19,17	22,67	22,87	3,07	3871,60	3930,21
8	C25	210 A	216,43	216,90	13,43	24,77	24,80	2,20	5360,06	5378,71
9	C25	250 A	260,73	261,33	17,87	27,03	27,20	2,77	7048,52	7108,27

5.2 ESTABILIDADE DO PROCESSO

Para avaliar a estabilidade do processo a principal ferramenta é o desvio medido na corrente e na tensão, pois ele representa o quanto os valores oscilam durante o processo de soldagem, bem como o número de curtos-circuitos. Assim, se comparou-se somente esses valores para os mesmos níveis de corrente com gases diferentes.

Tabela 5.2 Comparação dos desvios medidos na corrente (σ_i) e na tensão (σ_V).

<i>i</i>	Gás	σ_i	σ_V
170 A	C40	14,23	3,00
170 A	CO ₂	23,13	3,50
170 A	C25	19,17	3,07
210 A	C40	15,93	2,07
210 A	CO ₂	19,60	2,60
210 A	C25	13,43	2,20
250 A	C40	16,30	2,07
250 A	CO ₂	26,27	3,00
250 A	C25	17,87	2,77

Analisando a Tabela 5.2, nota-se que em todos os experimentos os desvios das análises utilizando-se o gás CO₂ é são maiores, enquanto os da mistura C25 são intermediários e os da mistura C40 é são menores para 170 A e 250 A, fato que nos demonstra que o processo usando mistura C40 tende a ser o com maior estabilidade via análise dos parâmetros de tensão e corrente durante o processo de soldagem.

5.3 EMISSÃO DE FUMOS

Para avaliar a emissão de fumos pensou-se em fazer duas análises, uma qualitativa através da análise dos vídeos e a observação da quantidade de fumos desprendida e uma quantitativa, através da análise da massa total de arame utilizada por cada cordão e a massa final, somando cordão respingos e escórias. A análise qualitativa se mostrou insuficiente para avaliar a quantidade de fumos, pois visualmente não foi possível discernir diferenças visíveis. Assim, com a densidade linear do arame calculada em $\lambda_a = 6,7 \text{ g/m}$ tem se a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Massas de arame.

MASSAS DE ARAME		
V_a (m/min)	l_a (m)	m_a (g)
5,5	2,475	16,6
7,5	3,375	22,6
9,5	4,275	28,6

Faz-se então um balanço de massa seguindo a Equação 7 e a Equação 8.

$$\therefore m_{fumos} = -\Delta m_{CP,escória-cru} + m_{arame} + m_{escória\ destacada} - m_{respingo} \quad (7)$$

$$m_{CP,cru} + m_{arame} = m_{CP,escória} - m_{escória\ destacada} + m_{respingo} + m_{fumos} \quad (8)$$

Tabela 5.4 Comparação das quantidades de fumos desprendidos para cada gás.

<i>i</i>	Gás	<i>m_{fumo}</i>
170 A	C40	1,9±0,1
170 A	CO ₂	2,3±0,1
170 A	C25	1,9±0,1
210 A	C40	2,2±0,1
210 A	CO ₂	2,8±0,1
210 A	C25	2,1±0,1
250 A	C40	2,3±0,1
250 A	CO ₂	3,0±0,1
250 A	C25	2,1±0,1

Nota-se ao analisar a Tabela 5.4 que em todos os níveis de corrente o uso do CO₂ acarreta num maior desprendimento de fumos, enquanto o C40 e o C25 têm resultados equiparáveis.

5.4 ASPECTO SUPERFICIAL

O teste de aspectos superficial dos cordões foi realizado de forma visual levando-se em conta a homogeneidade superficial assim também como porosidade superficial do cordão de solda nesses aspectos o gás de proteção não teve tanta influência a ponto de se ter uma sobreposição de qualidade de um gás comparado com os outros.

5.5 NÍVEL DE ESCÓRIA

Para a análise do nível de escória avaliou-se a massa total da escória como a soma da destacada e da escória aderida ao corpo de prova.

Tabela 5.5 Comparação entre as massas de escória.

<i>i</i>	Gás	$m_{escória}$
170 A	C40	4,52±0,10
170 A	CO ₂	4,49±0,09
170 A	C25	4,21±0,09
210 A	C40	6,12±0,10
210 A	CO ₂	6,59±0,12
210 A	C25	5,62±0,12
250 A	C40	7,62±0,11
250 A	CO ₂	7,75±0,09
250 A	C25	7,36±0,10

Como demonstrado na Tabela 5.5, nota-se que o C25 apresenta uma menor deposição de escória, enquanto em dois dos experimentos o CO₂ foi o que mais apresentou deposição.

5.6 RESPINGOS

Através da análise da massa dos respingos, tem-se a tabela:

Tabela 5.6 Comparação da massa dos respingos.

<i>i</i>	Gás	$m_{respingos}$
170 A	C40	0,33±0,03
170 A	CO ₂	0,40±0,02
170 A	C25	0,28±0,02
210 A	C40	0,47±0,02
210 A	CO ₂	0,55±0,02
210 A	C25	0,43±0,02
250 A	C40	0,65±0,02
250 A	CO ₂	0,57±0,01
250 A	C25	0,60±0,02

Nos dois níveis de corrente mais baixa o CO₂ apresentou a maior taxa de respingos, seguido pelo C40 e então pelo C25. Já para o nível de corrente mais alto o CO₂ apresentou o menor nível de respingos, seguido pelo C25 e pelo C40. A análise das folhas permitiu ver que os respingos se concentraram na região próxima à mesa, todas com alcance e energia equiparáveis. Apesar da inconclusividade comparativa os resultados são de interessante análise, permitindo ver o trajeto de várias gotículas que alcançaram o anteparo com muito energia, bem como podendo permitir a comparação da energia das partículas através da severidade da queimadura sofrida pelo papel.

5.7 TAXA DE DEPOSIÇÃO

As taxas de fusão e deposição foram calculadas, juntamente com a eficiência de deposição seguindo a Equação 9, a Equação 10 e a Equação 11.

$$TF = \frac{l_a \cdot \lambda_a \cdot 3,6}{t_s} \text{ [kg/h]} \quad (9)$$

$$TD = \frac{(m_f - m_i) \cdot 3,6}{t_s} \text{ [kg/h]} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{TD}{TF} \cdot 100\% \quad (11)$$

Tabela 5.7 Comparação final dos resultados de taxas de fusão, deposição e eficiência de deposição

<i>i</i>	Gás	TF	TD	η
170 A	C40	2,21	1,82±0,11	0,82
170 A	CO ₂	2,21	1,76±0,09	0,81
170 A	C25	2,21	1,86±0,10	0,84
220 A	C40	3,02	2,72±0,11	0,90
220 A	CO ₂	3,02	2,50±0,11	0,83
220 A	C25	3,02	2,63±0,11	0,87
250 A	C40	3,82	3,34±0,12	0,88
250 A	CO ₂	3,82	3,28±0,10	0,86
250 A	C25	3,82	3,39±0,10	0,89

Com a comparação, Tabela 5.7, nota-se que em todos os experimentos o rendimento e a taxa de deposição do CO₂ foram o que tiveram menores valores dos três gases analisados nas três correntes utilizadas no estudo, enquanto nas correntes baixas e altas o C25 apresenta melhor performance, em níveis de corrente médios o C40 obteve melhor resultado.

5.8 GEOMETRIA DO CORDÃO E MOLHABILIDADE

As características de geometria dos cordões foram realizadas de forma comparativa de através do cálculo da taxa de diluição onde se tem um comparativo das áreas do cordão através de um corte seção transversal do próprio cordão. A taxa de diluição segue a fórmula da Figura 5.1.

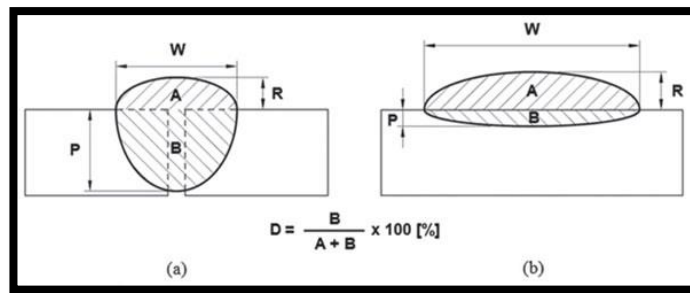


Figura 5.1 Taxa de diluição.

Os dados colhidos estão ilustrados na Tabela 5.8 Valores de taxa de diluição – resultados.

Tabela 5.8 Valores da taxa de diluição - resultados.

<i>i</i>	Gás	Diluição
170 A	C40	44,7 %
<u>170 A</u>	<u>CO₂</u>	<u>49,9 %</u>
170 A	C25	39,7 %
210 A	C40	43,1 %
<u>210 A</u>	<u>CO₂</u>	<u>48,8%</u>
210 A	C25	43,4 %
250 A	C40	39,2 %
<u>250 A</u>	<u>CO₂</u>	<u>44,4 %</u>
250 A	C25	39,2%

Já para a molhabilidade se tem a relação de molhamento com o ângulo formado pelo reforço do cordão com a superfície do corpo de prova como demonstrado na Figura 5.2.

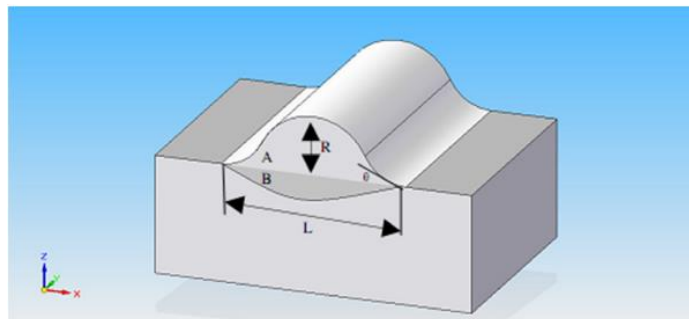


Figura 5.2 Ângulo de molhamento.

A molhabilidade dos cordões pode ser avaliada qualitativamente através do ângulo de molhamento ou de contato (θ) formado entre a superfície sólida e o plano tangencial à superfície do cordão depositado. Se $\theta < 90^\circ$ o cordão de solda tem tendência a molhar mais a superfície e o oposto

ocorre para $\theta > 90^\circ$. Portanto, quanto menor este ângulo, melhor será o molhamento. Pela análise visual foi inspecionado o ângulo de molhabilidade e foi aplicado critérios qualitativos sendo que se o ângulo se aproxima de 45° e dado o critério de qualidade do mesmo sendo neutra, com o ângulo visivelmente menor que 45° o critério fica sendo mais molhável e acima de 45° menos molhável, com esses critérios temos a Tabela 5.9 que mostra a classificação da molhabilidade nos corpos de prova.

Tabela 5.9 Análise do molhamento.

C40		CO ₂		C25	
CP	MOLHABILIDADE	CP	MOLHABILIDADE	CP	MOLHABILIDADE
1(28)	Neutro	10	Neutro	19	Menos molhável
2	Mais molhável	11	Neutro	20	Menos molhável
3	Mais molhável	12	Neutro	21	Menos molhável
4	Neutro	13	Mais molhável	22	Neutro
5	Neutro	14	Neutro	23	Neutro
6	Neutro	15	Mais molhável	24	Neutro
7	Mais molhável	16	Neutro	25	Mais molhável
8(29)	Mais molhável	17	Neutro	26	Neutro
9	Mais molhável	18	Mais molhável	27	Mais molhável

Com isso pode-se ver que a taxa de diluição não é constante dentro de um mesmo gás, ela não é a melhor sempre para o mesmo gás, como uma taxa de diluição alta nos resulta em uma maior penetração e como é claramente visto que o CO₂ possui maiores taxas de diluição ele se sobrepõem nesse teste onde o C25 resulta em pior rendimento nesta análise, tendo indicativo de possuir a menor penetração. A molhabilidade nos demonstra a interação do cordão com o corpo de prova sendo que o critério mais molhável nos dá uma melhor interação, nos levando a uma difusão do eletrodo tubular pela influência do gás de proteção, neste estudo temos o gás mistura C40 sendo o mais molhável dos três gases estudados e o C25 sendo o menos molhável.

5.9 CUSTOS

A análise de custo foi realizada comparando-se o custo da energia elétrica consumida para acionamento da máquina de solda na forma de potência consumida acrescida com o custo do consumo de arame por hora no processo de soldagem juntamente com o custo do gás consumido durante o processo. A potência consumida foi calculada através dos parâmetros coletados de tensão e corrente médias, o consumo de gás foi estipulado pela vazão manométrica indicada para o processo multiplicado pelo preço unitário de cada metro cúbico de cada gás. Já o custo do arame consumido foi estipulado pela velocidade de alimentação, de onde podemos tirar o fluxo mássico do sistema e aplicar o custo por unidade de massa do arame. Todos os três cálculos foram feitos em razão do custo por hora de trabalho seguindo os parâmetros do processo de soldagem.

Tabela 5.10 Análise de custos por hora de trabalho - resultado.

<i>i</i>	Gás	<i>Custo Total</i>
170 A	C40	R\$ 52,07
<u>170 A</u>	<u>CO₂</u>	<u>R\$ 43,36</u>
170 A	C25	R\$ 52,98
220 A	C40	R\$ 64,52
<u>220 A</u>	<u>CO₂</u>	<u>R\$ 56,11</u>
220 A	C25	R\$ 65,60
250 A	C40	R\$ 77,23
<u>250 A</u>	<u>CO₂</u>	<u>R\$ 68,41</u>
250 A	C25	R\$ 78,28

Com os dados da Tabela 5.10 pode-se constatar que o CO₂ apresenta o menor custo por hora de trabalho, principalmente pelo fato ser cerca de 50% mais barato que o C40 ou o C25.

6 CONCLUSÃO

A partir dos objetivos propostos e tendo em vista os resultados obtidos, bem como suas limitações, concluiu-se que é possível comparar o processo FCAW com combinações diferentes de gases em condições paramétricas diferenciadas e apropriadas a cada gás de proteção que evidenciam suas características.

Para a análise da performance do processo com as diferentes misturas de proteção gasosa através dos testes propostos, criou-se uma metodologia de pontuações para a colocação de desempenho no teste: a cada teste, o gás com melhor performance no foi pontuado com 3, o gás com desempenho mediano foi pontuado com 2 e o gás com pior desempenho foi pontuado com apenas 1 ponto. Com o somatório das pontuações aplicadas aos testes definiu-se qual gás apresentava melhor performance para o processo FCAW através dos testes propostos e realizados neste estudo. A Tabela 6.1 demonstra de forma organizada as pontuações aplicadas a cada teste para cada mistura de proteção gasosa.

Tabela 6.1 Pontuação dos testes.

TESTE	C40	CO ₂	C25
ESTABILIDADE DO PROCESSO	3	1	2
EMIÇÃO DE FUMOS	2,5	1	2,5
ASPECTO SUPERFICIAL DO CORDÃO	2	2	2
NIVEL DE ESCÓRIA	2	1	3
RESPINGOS	2	1	3
TAXA DE DEPOSIÇÃO	2,5	1	2,5
GEOMETRIA	2	3	1
MOLHABILIDADE	3	2	1
CUSTO	2	3	1
TOTAL	21	15	18

Com base na análise dos resultados dos testes conclui-se que o gás de proteção Ar+40% CO₂ se sobressai quando comparado com o 100% CO₂ e Ar+25% CO₂ nos quesitos de molhabilidade e estabilidade do processo de soldagem, sendo o gás de melhor aplicabilidade nos processos FCAW visto não ter recebido pontuação 1 em nenhum teste tendo ficado empatado no teste de emissão de fumos e no de taxa de deposição com a mistura gasosa Ar+25% CO₂ a mistura com uso mais difundido no meio industrial.

O gás 100% CO₂ mesmo ganhando pontuação máxima em dois dos nove testes realizados apresenta-se como a escolha de pior performance, porém de baixo custo, fato corroborado por seu extenso uso indústria. Tendo em vista a baixa diferença de custo entre as misturas de proteção Ar+40% CO₂ e Ar+25% CO₂ e a performance mais consistente da mistura de proteção Ar+40% CO₂, conclui-se que ela é a melhor escolha das três misturas de proteção gasosa estudada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAUNÉ, E., BONNET, C. e LIU, S. 2000. Reconsidering the Basicity of a FCAW. 2000, Vol. March.

BRACARENSE, A.Q. Processo de Soldagem por Arame Tubular. *Apostila UFMG*. Maio, Vol. Belo Horizonte, pp. 88- 104.

CASTNER, H.R. 1995. *Gas Metal Arc Welding Fume Generation using Pulsed Current*. vol. 74, nº2 : Welding Journal, 1995. p. 59-68.

DILLENBECK, V.R. e CASTAGNO, L. 1987. *The Effects of Various Shielding Gases*. vol. 66, nº 9, Sept : Welding Journal, 1987. pp 45-49.

FORTES, C., Contagem. *Arames Tubulares*. 2004 : Apostila ESAB S/A, Contagem. pp. 2-40.

GOMES, E. B. 2006. *Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito*. Universidade Federal de Itajubá : Dissertação de Mestrado, 2006. Itajubá.

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

HEWITT, P. J e HIRST, A. A. 1991. *Development and Validation of a model to predict the*. vol 35 p : Annals of Occupational, 1991. 223-232.

KOBAYASHI, M., SUGA, T. e TETSUO. (1985). *Fume generation in CO2 arc welding, R&D.*, 35 : Kobe Steel, Ltda, (1985). p.12-16 .

LYTTLE, K. A. e STAPON, W.F.G. 1990. *Select the Best Shielding Gas Blend for the*. November : Welding Journal, 1990. pp. 21 – 27.

NORRISH, J. 1992. *Advanced welding process*. s.l. : IOP Publishing Ltd, 1992. 375 p..

SALES, J.C. 2001. Estudo da Geometria do Cordão de Solda usando CO2 e uma. *COBEM*. Uberlândia –MG, 2001, Vols. V4, ref 172, pp 543-551.

Santos, Regina Paula Garcia. 2010. *Uma avaliação comparativa dos processos MIG/MAG e eletrodo tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingos*. Uberlândia : s.n., 2010.

STARLING, D.M.C. e MODENESI, P.J. 2005. “Efeito da Polaridade do Eletrodo na. *Soldagem & Inspeção*. Universidade Federal de Minas Gerais, 2005, Vol. 10, pp.101-108.

SUBAN, M e TUSEK, J. 2001. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type. 2001, Vol. n.119, p.185-192.

SUBRAMANIAN, S., et al. Droplet Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminum. *Welding Journal*. November, Vols. pp.459-465.

USHIO, M., et al. 1995. Effects of Shielding Gas on Metal. 1995, Vol. Volume 9.

WIDGERY, D. 1994. *Tubular Wire Welding*. Cambridge : Published by Abington Publishing Cambridge, 1994.

8 APÊNDICES

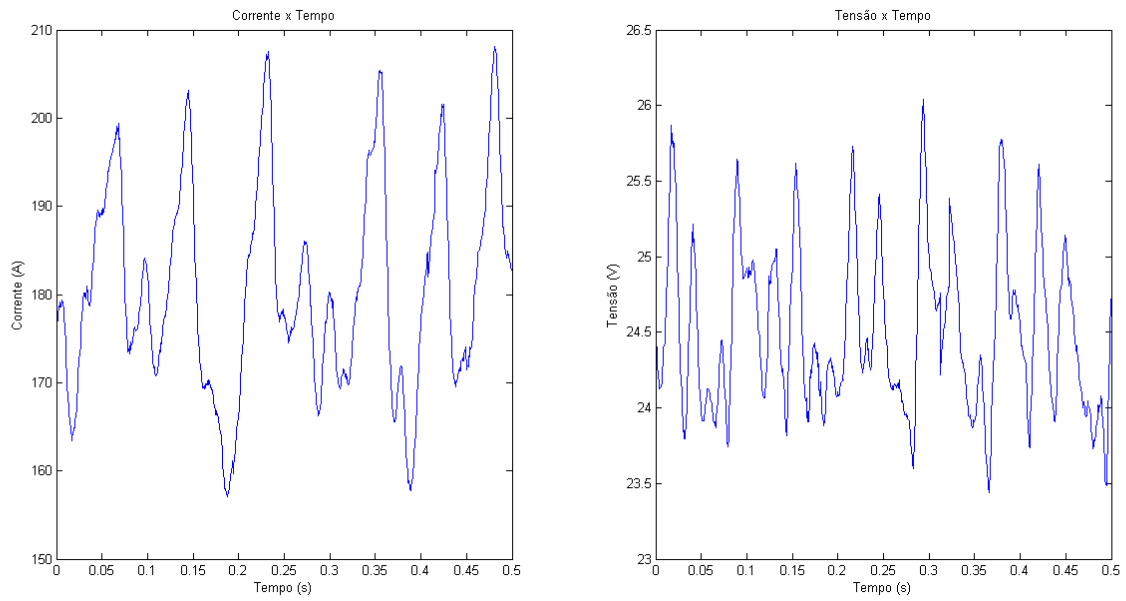


Figura 8.1 Oscilogramas experimento 1-1

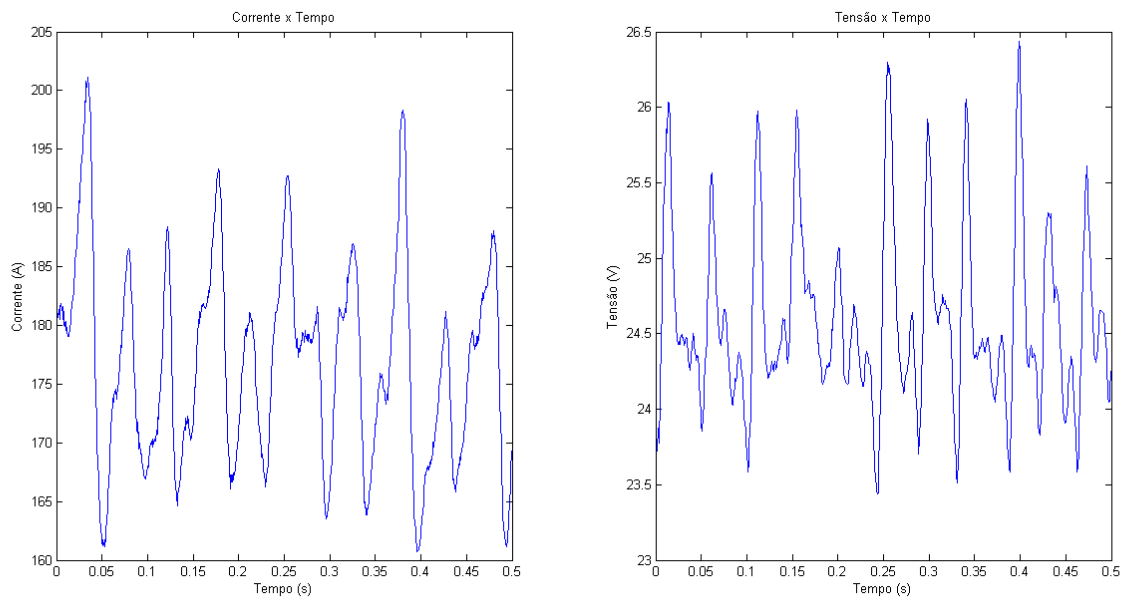


Figura 8.2 Oscilogramas experimento 1-2

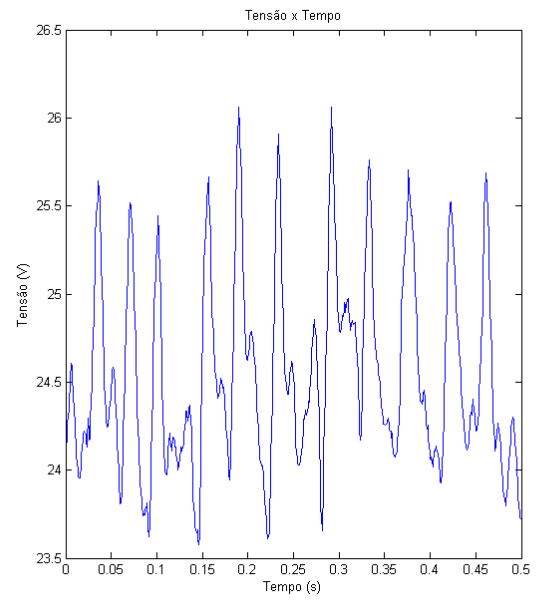
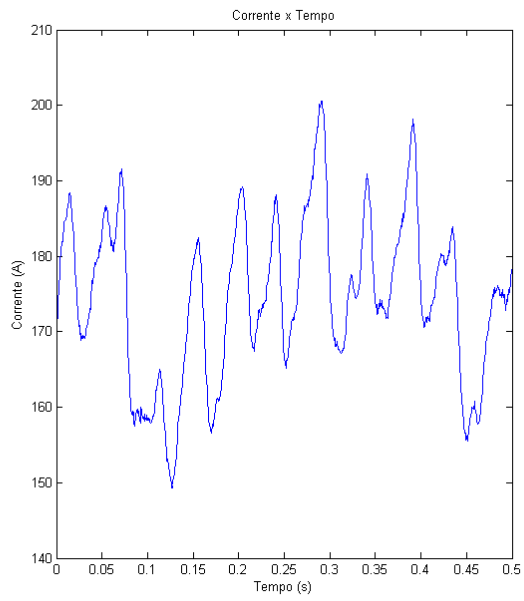


Figura 8.3 Oscilogramas experimento 1-3

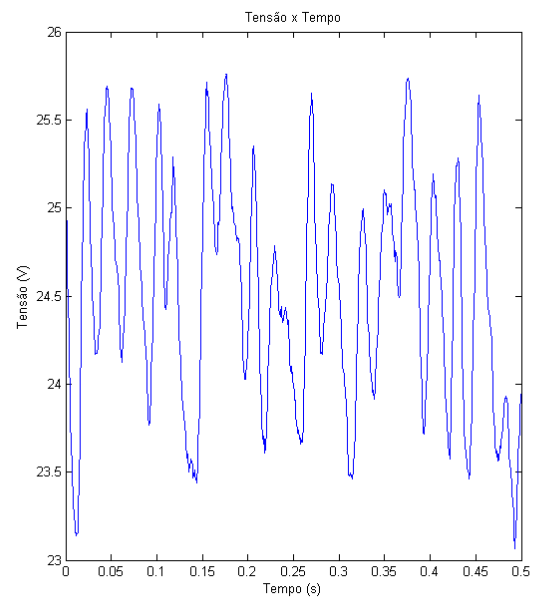
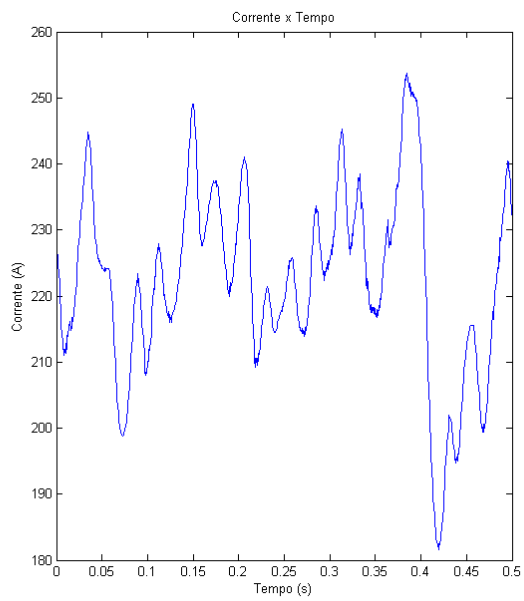


Figura 8.4 Oscilogramas experimento 2-1

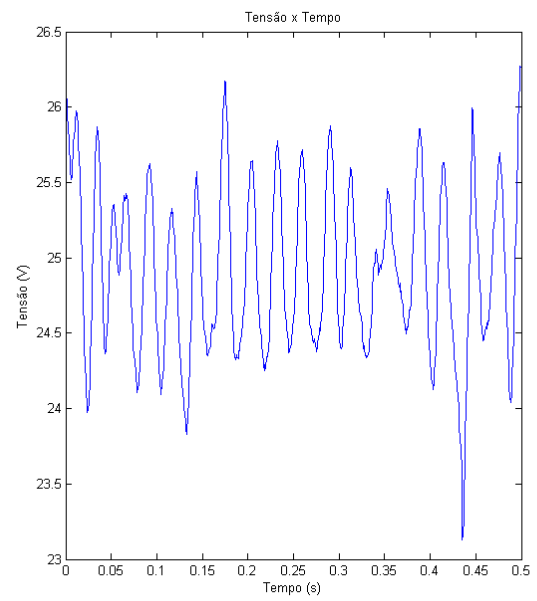
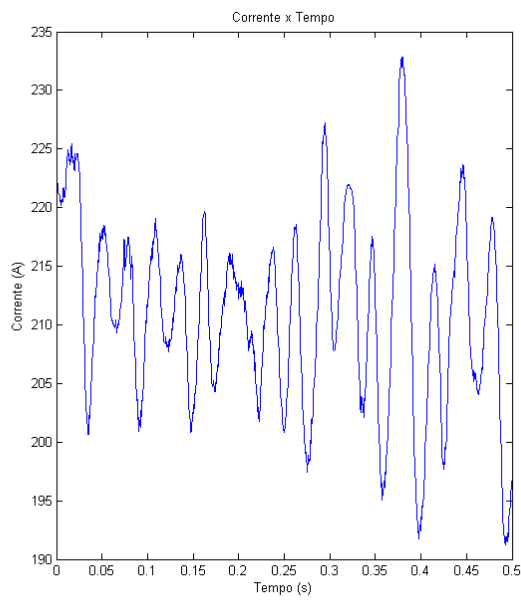


Figura 8.5 Oscilogramas experimento 2-2

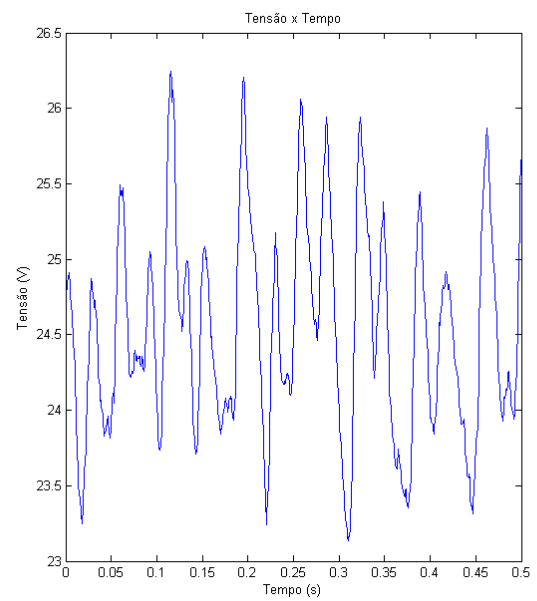
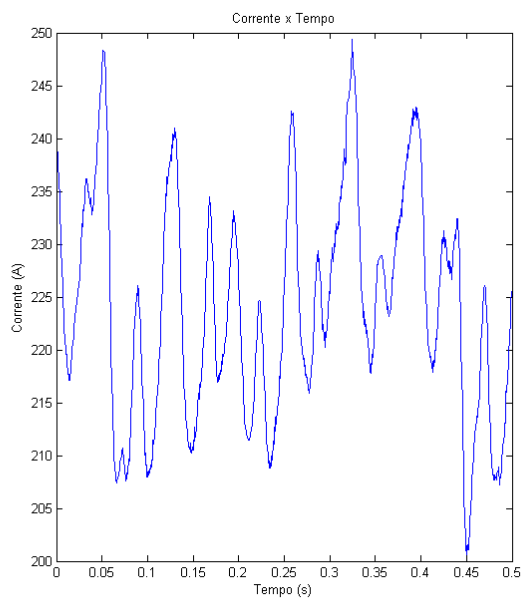


Figura 8.6 Oscilogramas experimento 2-3

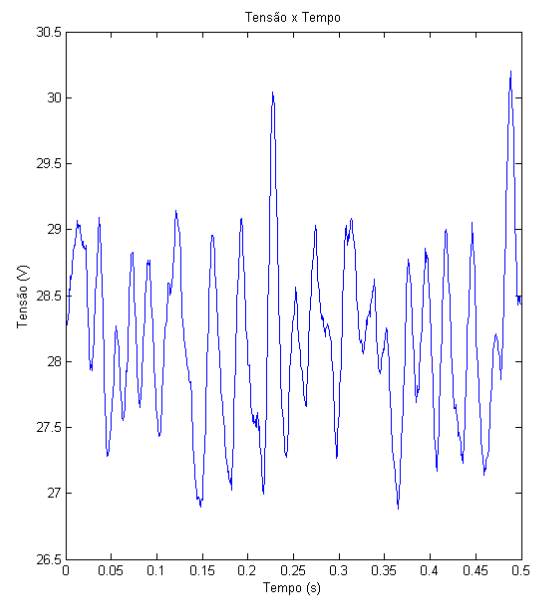
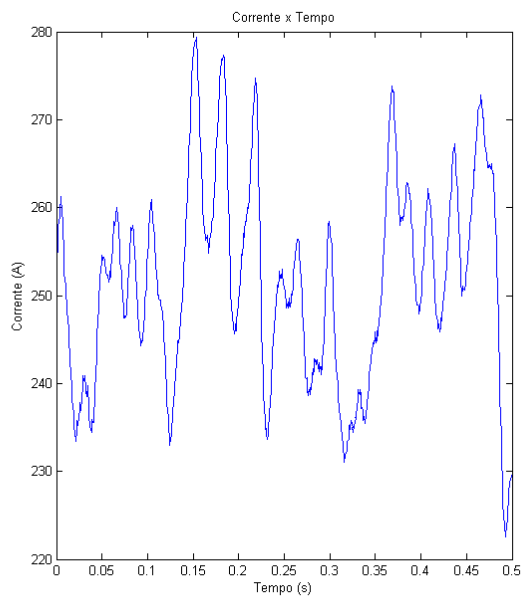


Figura 8.7 Oscilogramas experimento 3-1

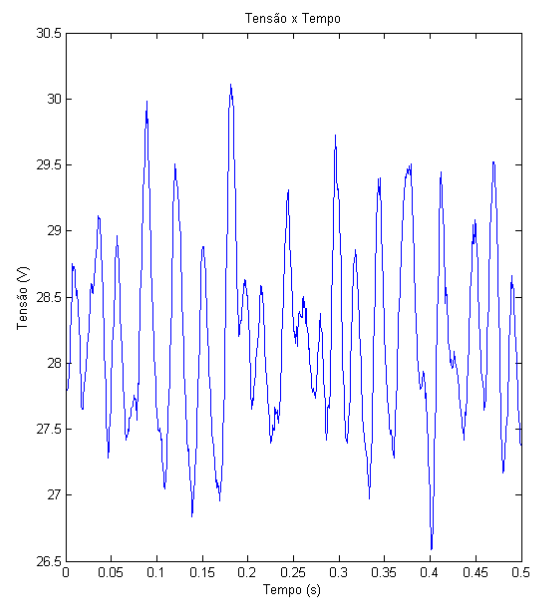
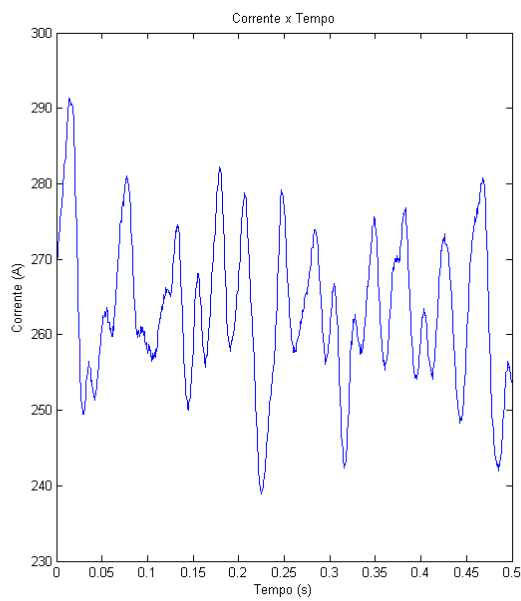


Figura 8.8 Oscilogramas experimento 3-2

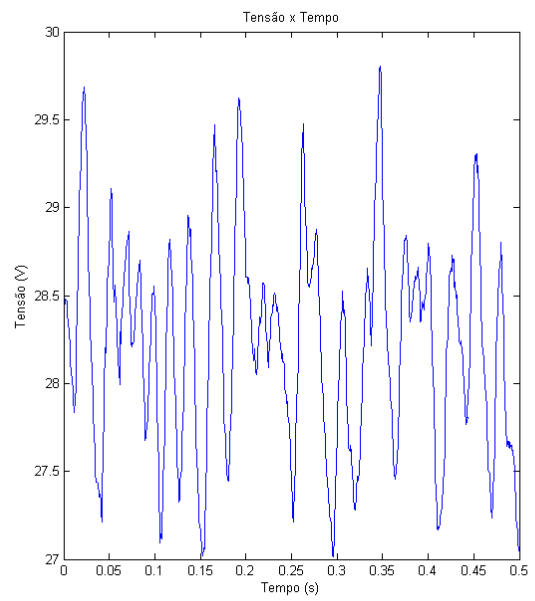
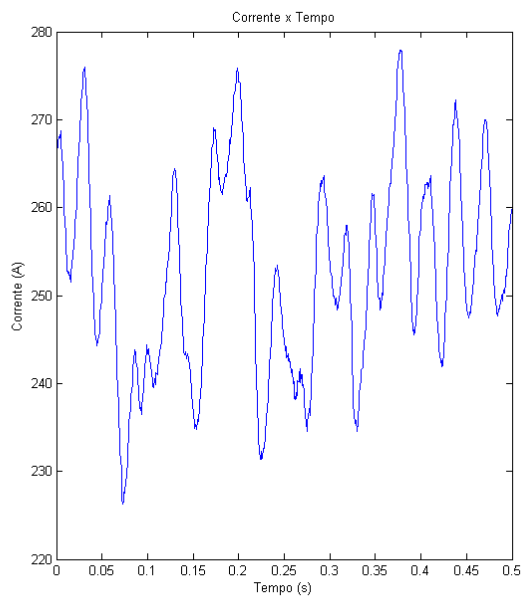


Figura 8.9 Oscilogramas experimento 3-3

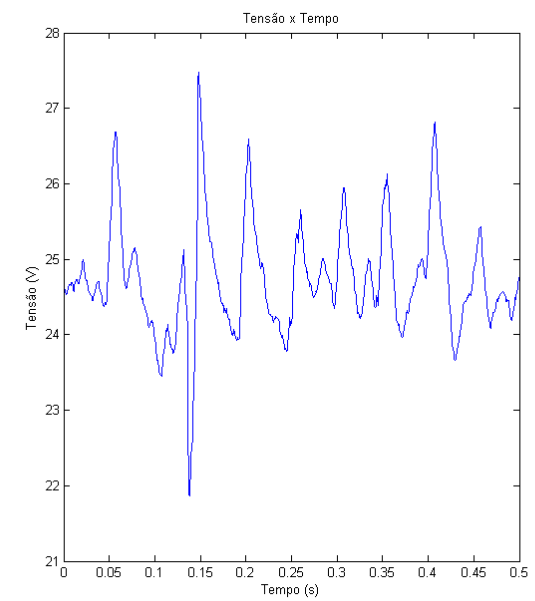
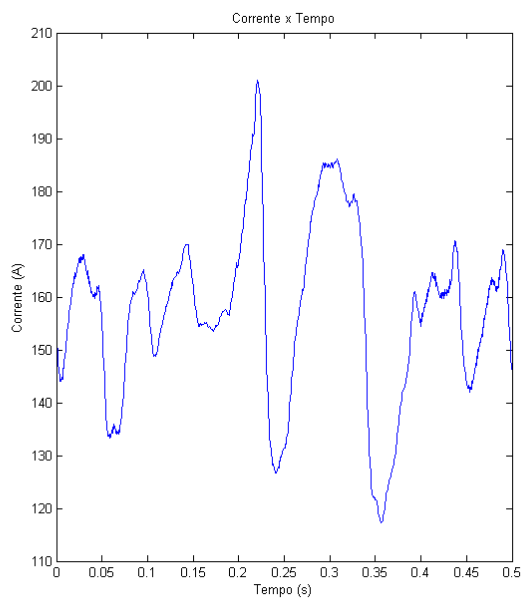


Figura 8.10 Oscilogramas experimento 4-1

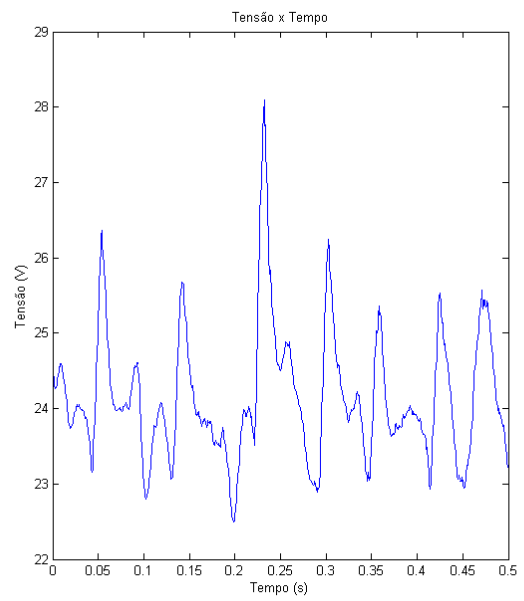
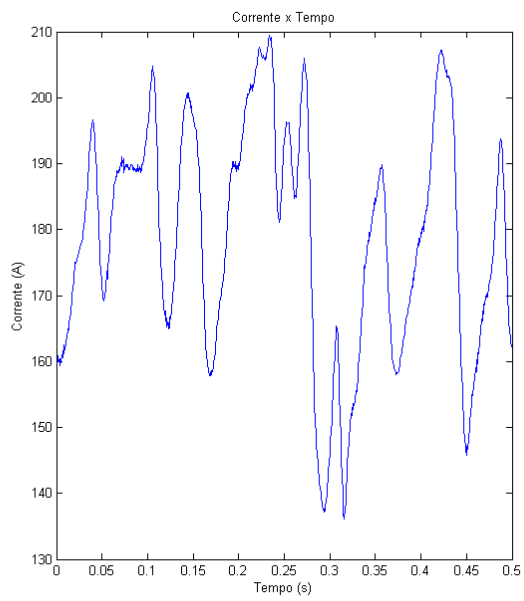


Figura 8.11 Oscilogramas experimento 4-2

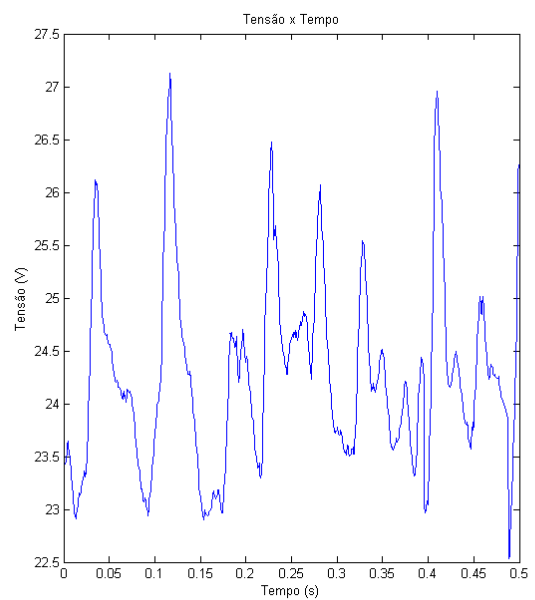
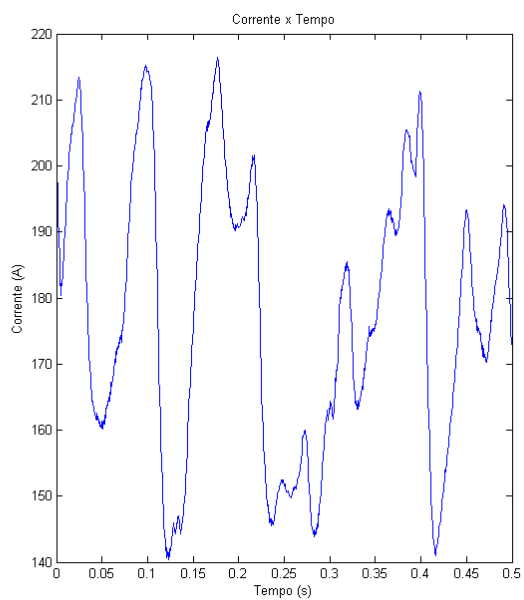


Figura 8.12 Oscilogramas experimento 4-3

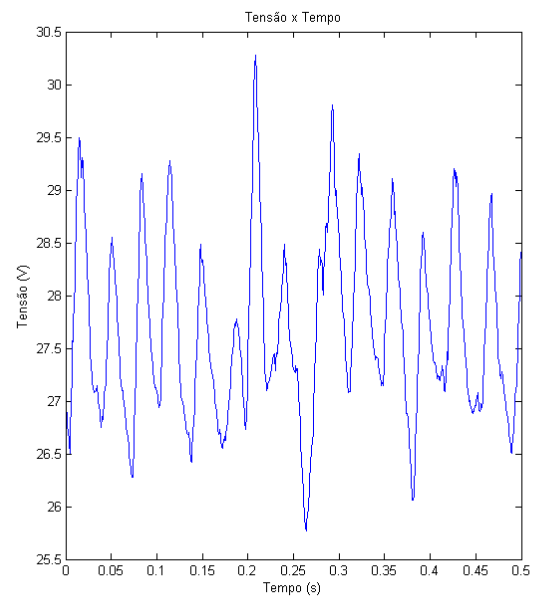
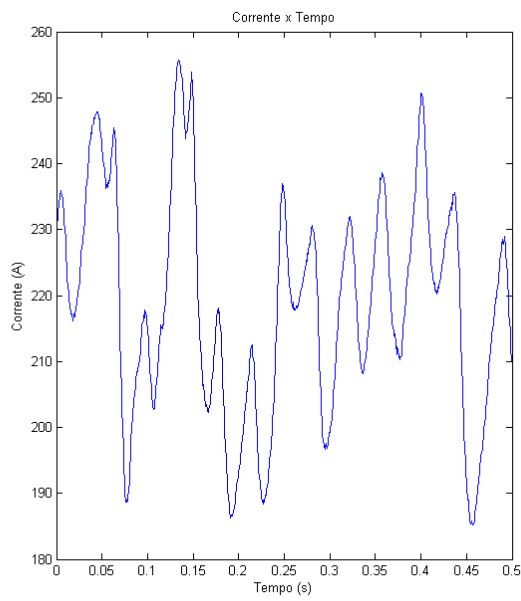


Figura 8.13 Oscilogramas experimento 5-1

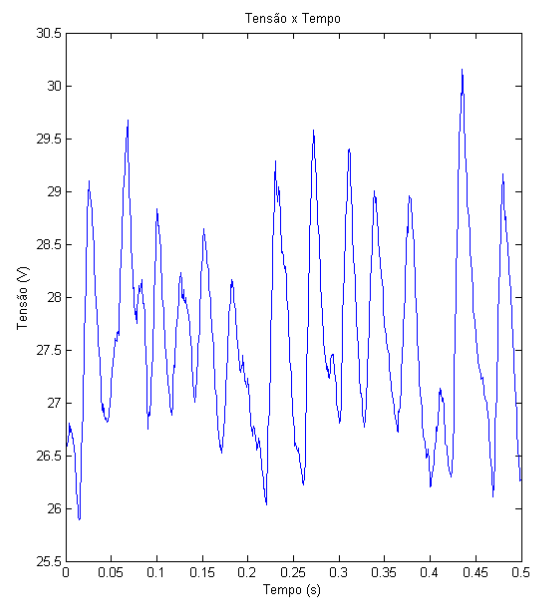
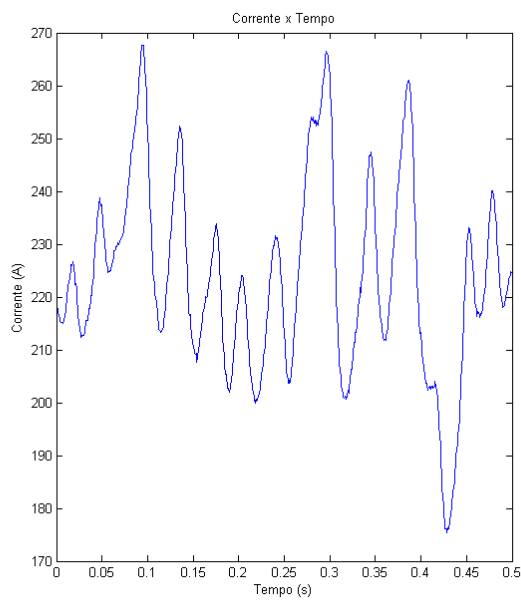


Figura 8.14 Oscilogramas experimento 5-2

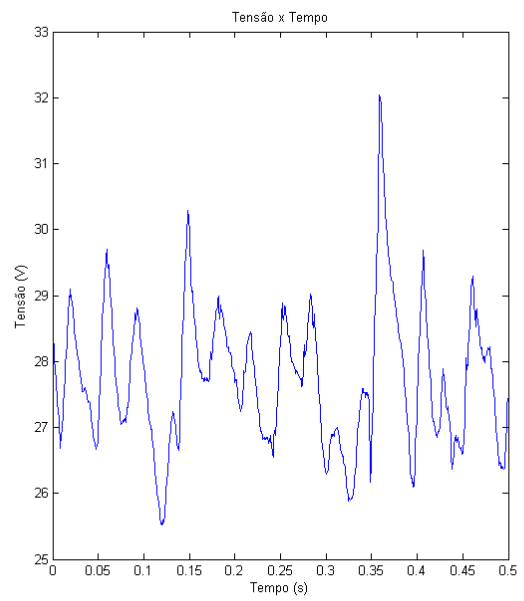
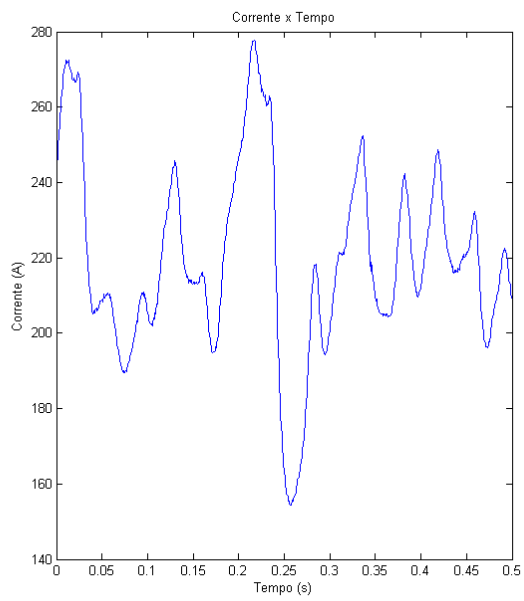


Figura 8.15 Oscilogramas experimento 5-3

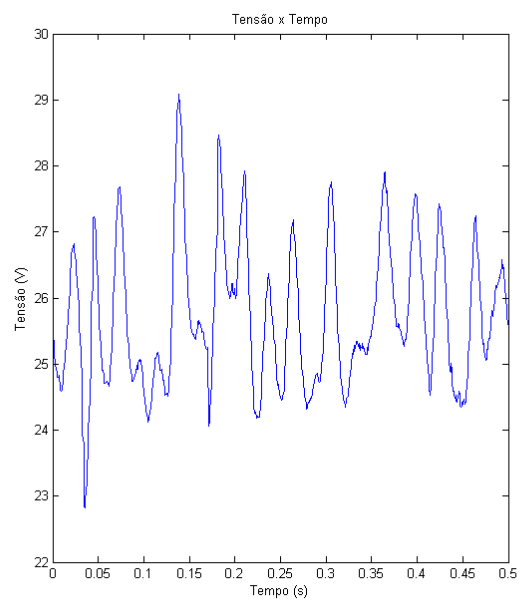
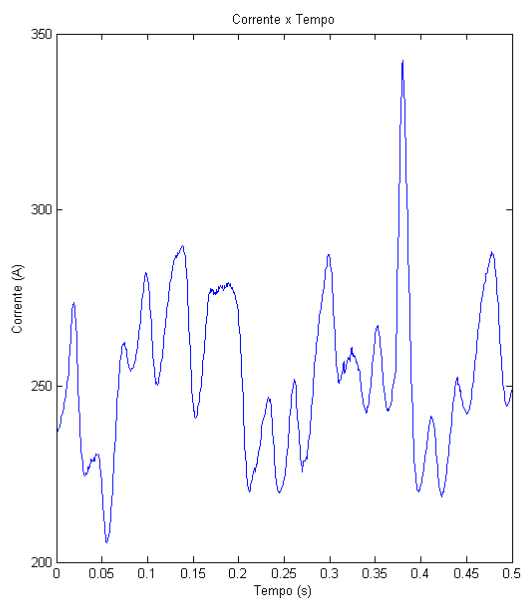


Figura 8.16 Oscilogramas experimento 6-1

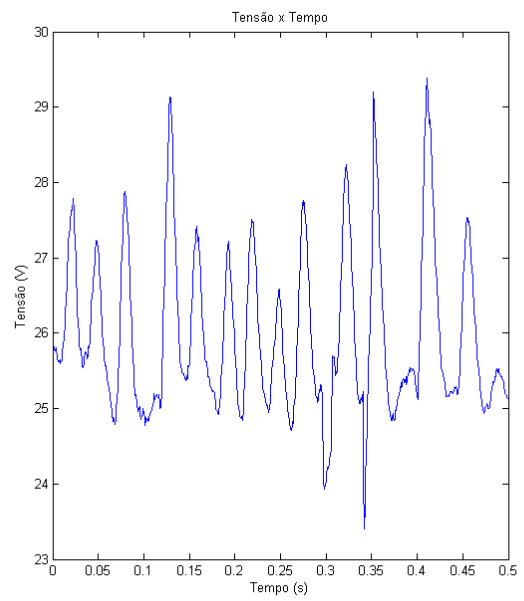
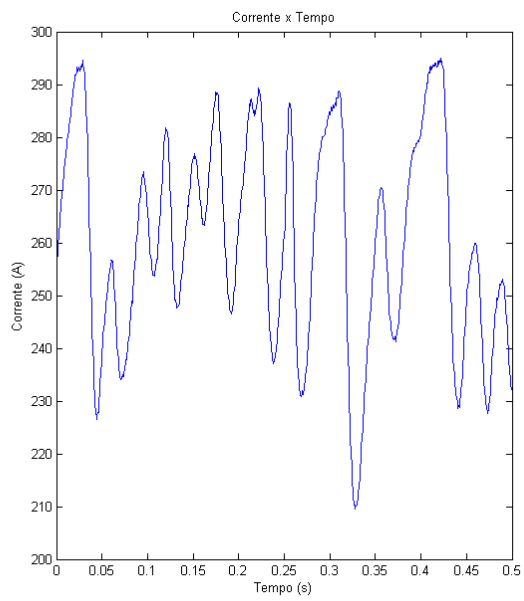


Figura 8.17 Oscilogramas experimento 6-2

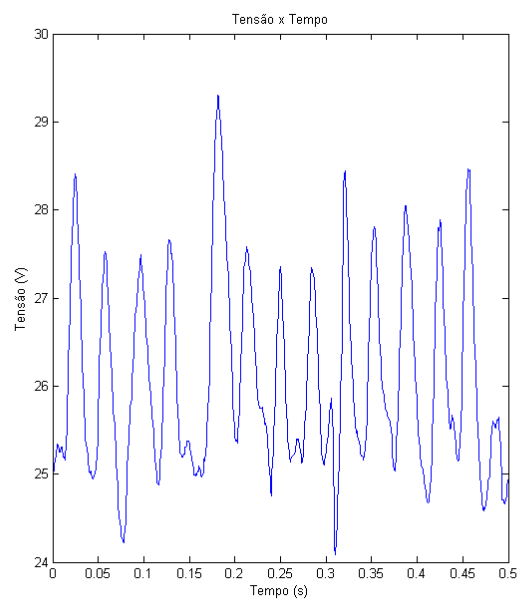
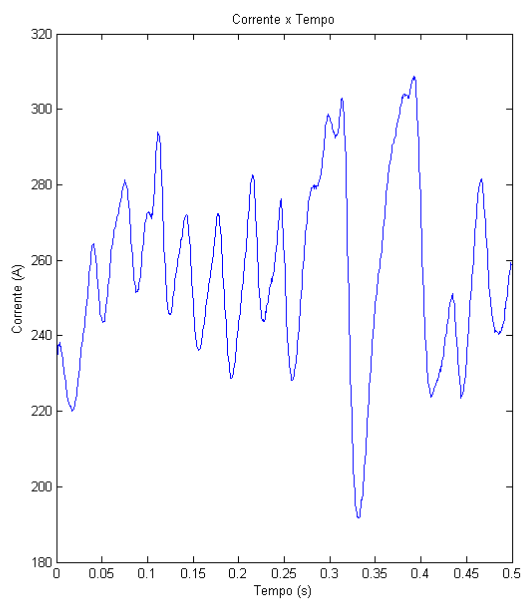


Figura 8.18 Oscilogramas experimento 6-3

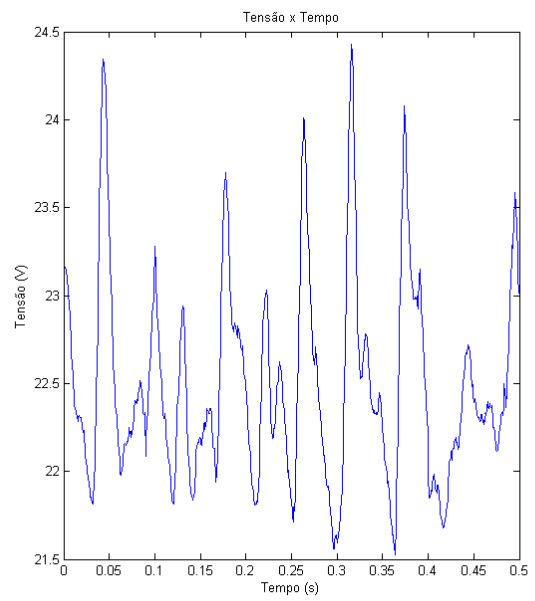
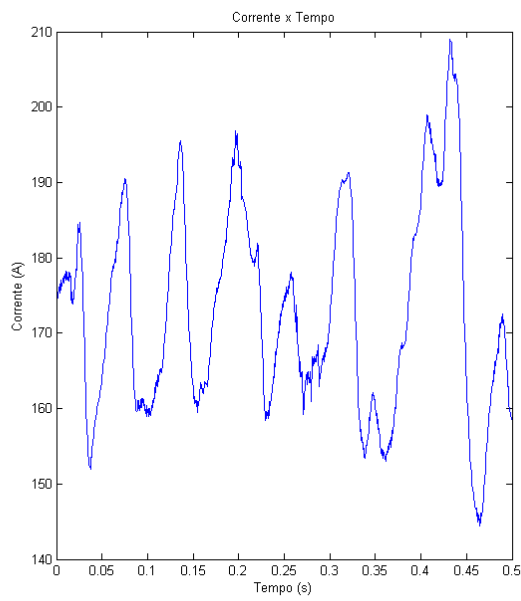


Figura 8.19 Oscilogramas experimento 7-1

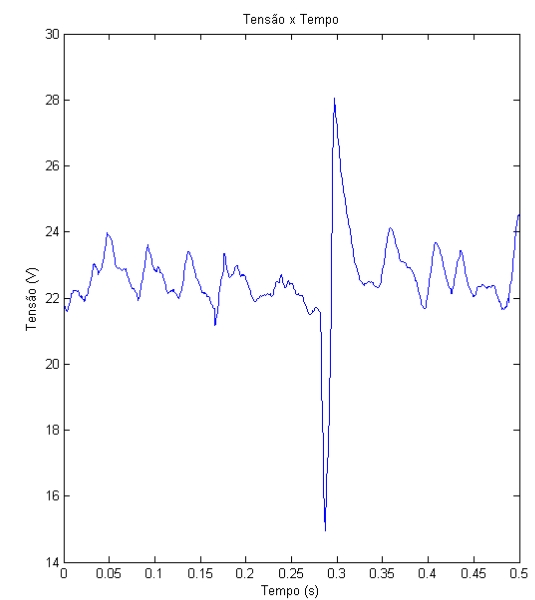
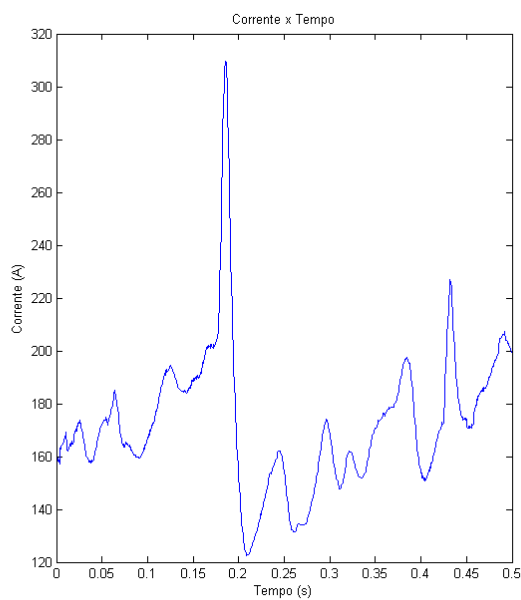


Figura 8.20 Oscilogramas experimento 7-2

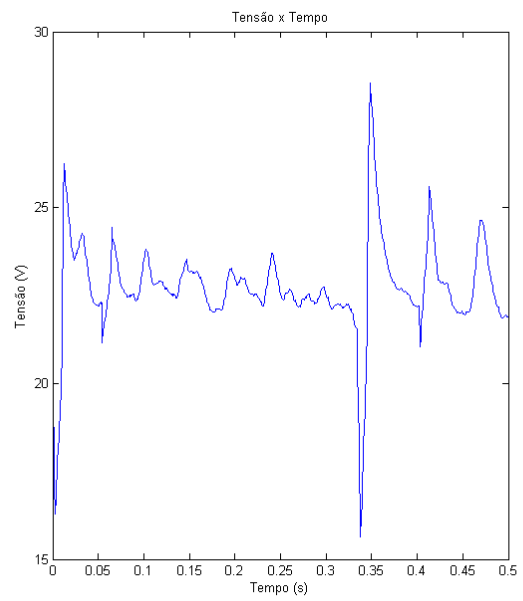
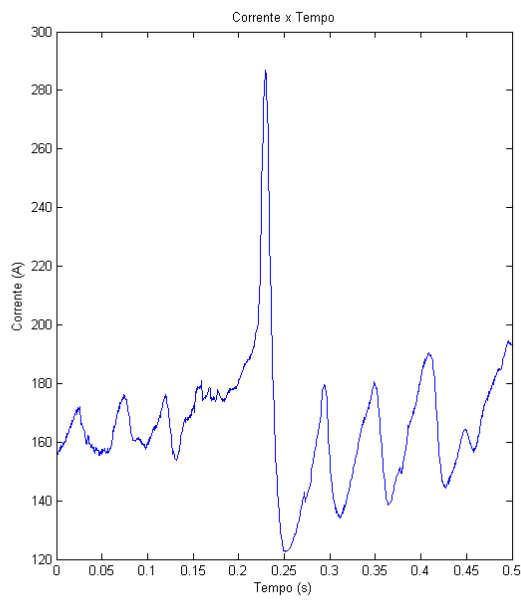


Figura 8.21 Oscilogramas experimento 7-3

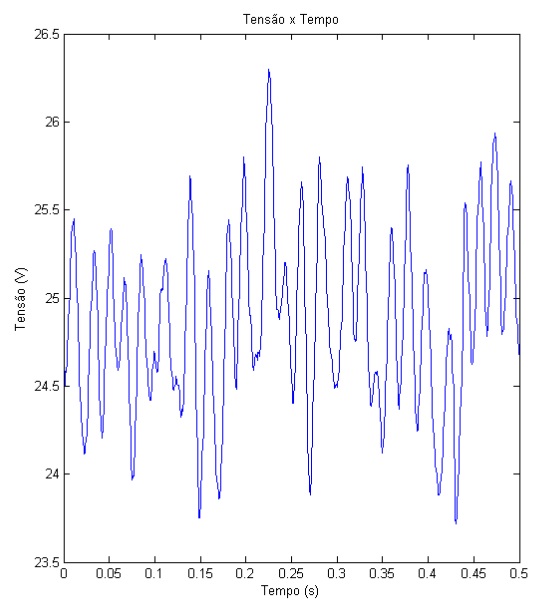
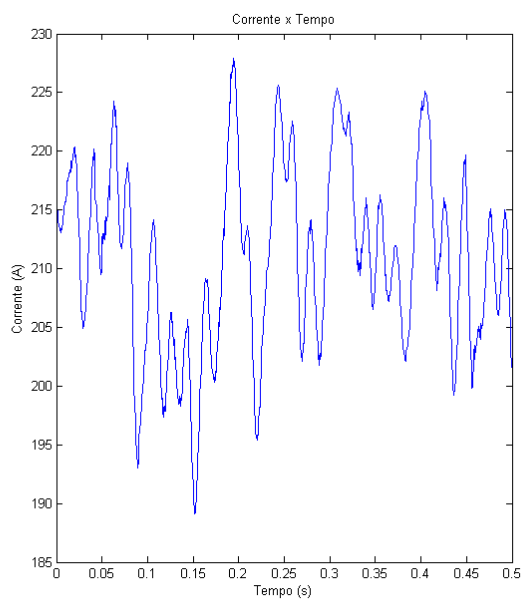


Figura 8.22 Oscilogramas experimento 8-1

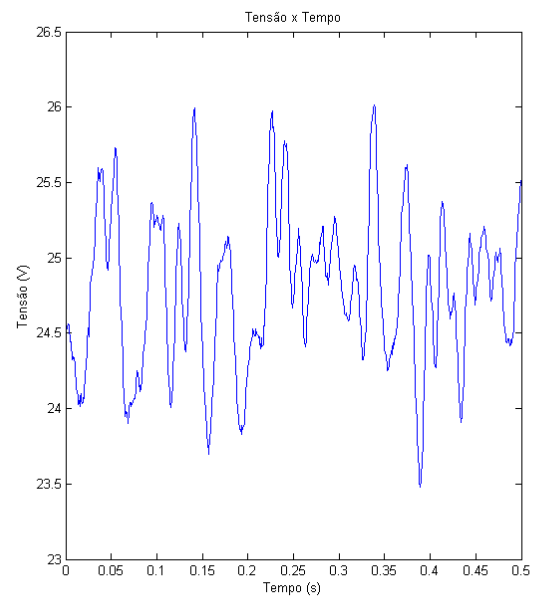
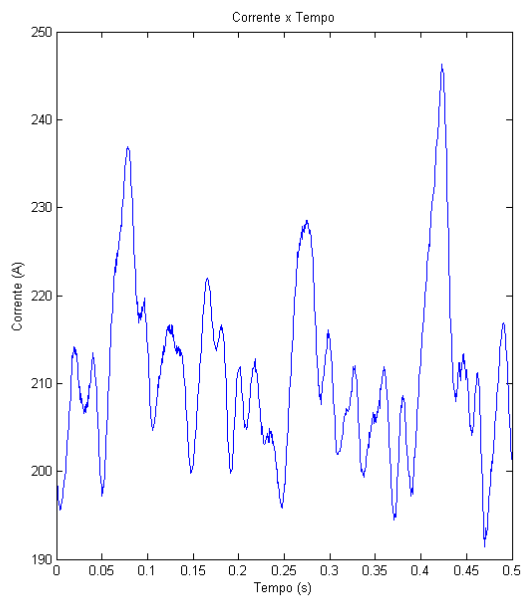


Figura 8.23 Oscilogramas experimento 8-2

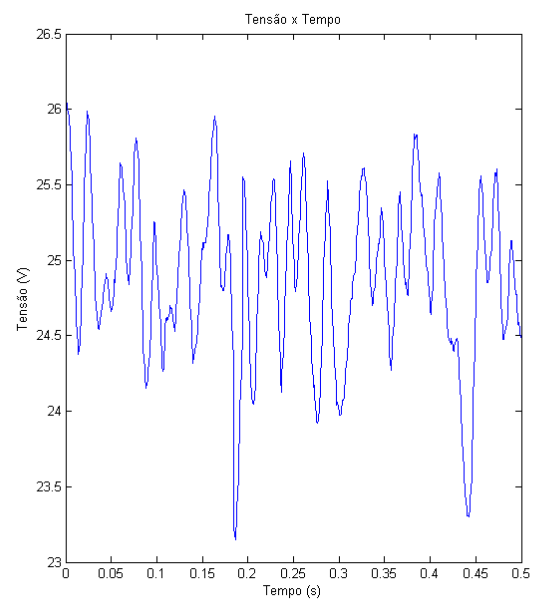
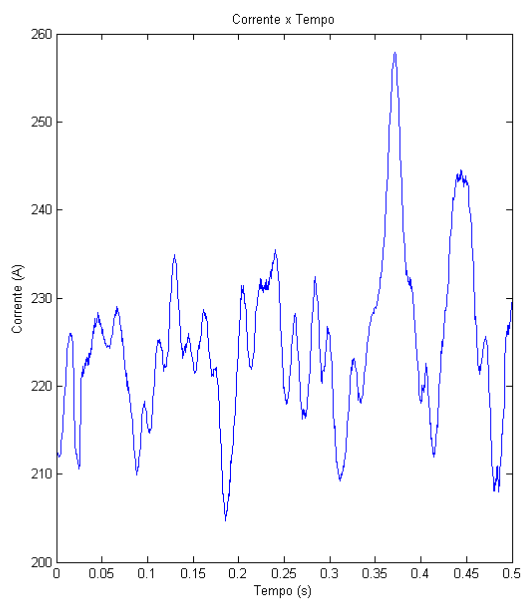


Figura 8.24 Oscilogramas experimento 8-3

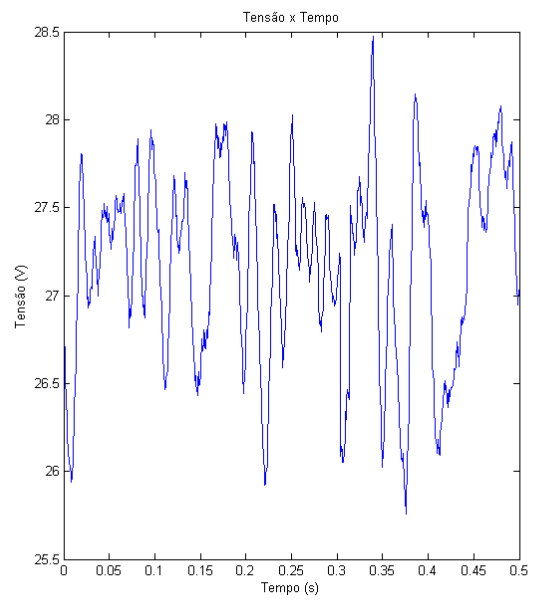
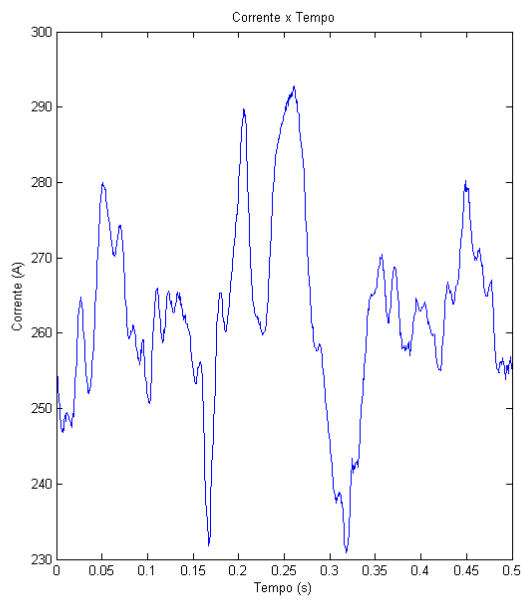


Figura 8.25 Oscilogramas experimento 9-1

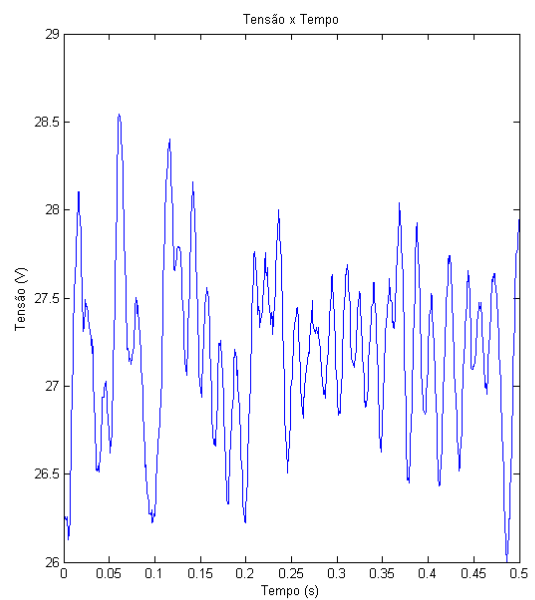
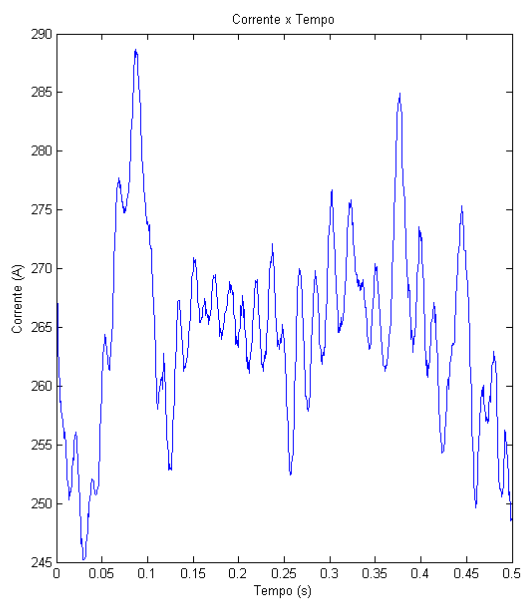


Figura 8.26 Oscilogramas experimento 9-2

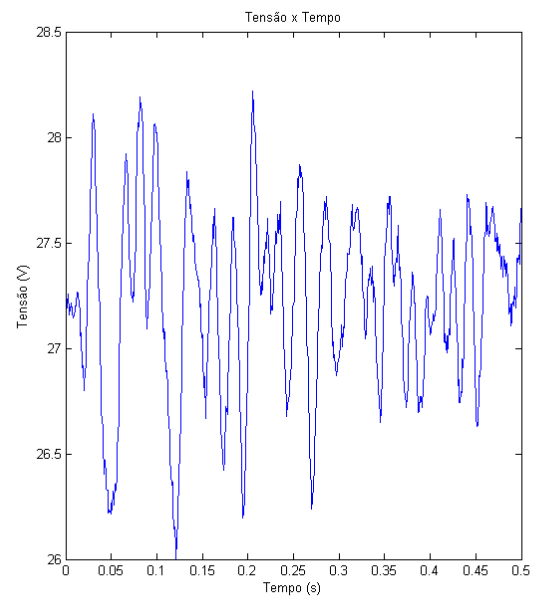
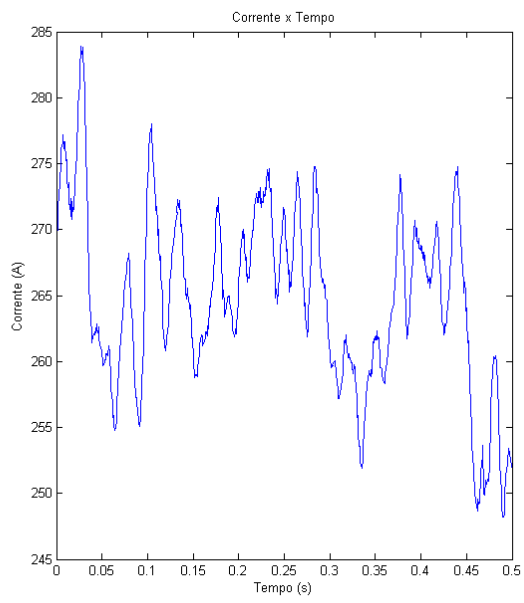


Figura 8.27 Oscilogramas experimento 9-3

Tabela 8.1 Massa dos corpos de prova antes da soldagem.

MEDIÇÕES DE MASSA EM GRAMAS - ANTES DA SOLDAGEM												
CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{m}	σ
1(28)	463,6	463,8	463,5	463,7	463,6	463,6	463,6	463,5	463,5	463,7	463,6±0,03	0,099
2	466,9	466,8	466,8	467,1	466,9	467,0	466,9	467,0	467,3	466,9	466,9±0,05	0,150
3	459,7	459,6	459,7	459,8	459,8	459,8	459,8	459,9	459,7	459,9	459,8±0,03	0,095
4	463,3	463,4	463,5	463,2	463,3	463,3	463,2	463,5	463,4	463,3	463,3±0,03	0,107
5	463,4	463,4	463,4	463,3	463,3	463,5	463,4	463,4	463,4	463,6	463,4±0,03	0,088
6	463,6	463,6	463,7	463,6	463,7	463,6	463,5	463,7	463,6	463,7	463,6±0,02	0,067
7	462,5	462,5	462,4	462,5	462,6	462,6	462,5	462,6	462,4	462,6	462,5±0,02	0,079
8(29)	459,0	458,9	459,0	459,1	459,2	459,1	459,0	459,0	459,1	458,9	459,0±0,03	0,095
9	460,4	460,6	460,5	460,6	460,4	460,5	460,6	460,5	460,5	460,4	460,5±0,03	0,082
10	462,6	462,7	462,6	462,8	462,8	462,9	462,6	462,7	462,7	462,8	462,7±0,03	0,103
11	461,2	461,2	461,3	461,2	461,2	461,3	461,1	461,3	461,3	461,1	461,2±0,02	0,079
12	460,0	460,0	460,0	460,2	459,9	460,0	460,1	460,1	460,0	460,1	460,0±0,03	0,084
13	466,1	466,1	466,3	466,3	466,2	466,2	466,4	466,3	466,5	466,2	466,3±0,04	0,126
14	467,6	467,6	467,5	467,6	467,5	467,7	467,6	467,6	467,6	467,5	467,6±0,02	0,063
15	463,3	463,4	463,3	463,4	463,6	463,4	463,2	463,5	463,5	463,6	463,4±0,04	0,132
16	462,3	462,2	462,4	462,2	462,4	462,2	462,3	462,3	462,2	462,2	462,3±0,03	0,082
17	455,2	455,4	455,2	455,4	455,3	455,4	455,4	455,3	455,5	455,4	455,4±0,03	0,097
18	459,9	460,0	459,9	459,8	459,8	459,9	459,9	460,0	460,0	459,9	459,9±0,02	0,074
19	460,3	460,4	460,4	460,1	460,2	460,4	460,3	460,4	460,4	460,3	460,4±0,03	0,103
20	461,4	461,2	461,3	461,3	461,4	461,4	461,3	461,5	461,3	461,3	461,3±0,03	0,084
21	461,0	461,0	460,8	460,9	461,0	460,9	460,9	461,0	461,0	460,9	461,0±0,02	0,070
22	462,9	462,6	462,7	462,8	462,6	462,7	462,9	462,7	462,7	462,7	462,7±0,03	0,106
23	474,1	474,0	473,8	473,9	474,0	474,1	474,2	474,1	474,1	474,0	474,1±0,04	0,116
24	463,5	463,5	463,6	463,5	463,7	463,6	463,5	463,6	463,5	463,5	463,5±0,02	0,071
25	460,8	460,9	460,8	460,7	460,5	460,6	460,8	460,6	460,7	460,6	460,7±0,04	0,125
26	459,0	459,1	459,1	459,0	459,2	459,2	459,1	459,1	459,2	459,0	459,1±0,03	0,082
27	462,8	462,7	462,8	462,8	462,9	462,8	462,7	462,8	462,8	462,9	462,8±0,02	0,067
28	462,9	462,7	462,9	462,7	462,7	462,8	462,9	462,8	462,6	462,7	462,8±0,03	0,106
29	462,0	461,9	461,8	461,9	461,8	461,9	462,0	462,1	462,0	462,0	462,0±0,03	0,097
30	457,2	457,3	457,2	457,2	457,1	457,1	457,0	457,1	457,1	457,0	457,1±0,03	0,095

Tabela 8.2 Massa dos corpos de prova após a soldagem com a escória.

MASSA EM GRAMAS - DEPOIS DA SOLDAGEM COM ESCÓRIA												
CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{m}	σ
1 (28)	479,4	479,6	479,7	479,6	479,7	479,7	479,7	479,7	479,8	479,8	479,70±0,04	0,116
2	482,6	482,6	482,7	482,6	482,5	482,6	482,7	482,6	482,6	482,5	482,60±0,02	0,067
3	476,8	476,6	476,8	476,7	476,8	476,6	476,7	476,7	476,8	476,9	476,75±0,03	0,097
4	484,7	484,7	484,8	484,9	484,9	484,9	484,7	484,7	484,9	484,7	484,75±0,03	0,099
5	485,7	485,8	485,7	485,8	485,8	485,7	485,7	485,8	485,7	485,8	485,75±0,02	0,053
6	490,8	490,7	490,8	490,9	490,8	490,8	490,8	491,0	491,0	491,1	490,80±0,04	0,125
7	491,1	491,1	491,1	491,1	491,0	491,0	491,1	490,8	490,9	491,0	491,05±0,03	0,103
8 (29)	489,6	489,7	489,8	489,8	489,7	489,7	489,8	489,7	489,7	489,6	489,70±0,02	0,074
9	488,9	488,9	488,8	488,7	488,8	488,8	489,0	489,0	488,7	488,8	488,80±0,03	0,107
10	478,2	478,4	478,3	478,3	478,4	478,4	478,3	478,3	478,6	478,6	478,35±0,04	0,132
11	476,7	476,6	476,6	476,8	476,8	476,7	476,8	476,8	477,0	476,7	476,75±0,04	0,118
12	476,1	476,2	476,3	476,3	476,2	476,2	476,2	476,4	476,1	476,2	476,20±0,03	0,092
13	489,1	489,3	489,3	489,2	489,0	489,0	489,1	489,2	489,0	489,1	489,10±0,04	0,116
14	489,4	489,3	489,2	489,2	489,2	489,4	489,4	489,4	489,4	489,5	489,40±0,03	0,107
15	486,2	486,6	486,6	486,7	486,5	486,6	486,8	486,6	486,6	486,8	486,60±0,05	0,170
16	491,3	491,3	491,4	491,3	491,4	491,4	491,4	491,3	491,3	491,3	491,30±0,02	0,052
17	483,5	483,8	483,9	483,7	483,7	483,7	483,6	483,7	483,6	483,8	483,70±0,04	0,115
18	488,4	488,3	488,6	488,6	488,6	488,4	488,5	488,5	488,6	488,6	488,55±0,03	0,110
19	476,6	476,5	476,5	476,7	476,5	476,6	476,4	476,5	476,5	476,6	476,50±0,03	0,084
20	477,5	477,7	477,6	477,6	477,7	477,7	477,6	477,5	477,6	477,5	477,60±0,03	0,082
21	477,3	477,3	477,2	477,2	477,4	477,2	477,4	477,3	477,3	477,2	477,30±0,02	0,079
22	485,1	485,1	485,0	485,3	485,1	485,2	485,1	485,3	485,2	485,1	485,10±0,03	0,097
23	496,7	496,8	496,7	496,6	496,7	496,8	496,9	496,8	496,8	496,9	496,80±0,03	0,095
24	486,5	486,2	486,6	486,3	486,6	486,3	486,6	486,4	486,4	486,5	486,45±0,05	0,143
25	490,5	490,4	490,5	490,7	490,6	490,4	490,7	490,5	490,7	490,7	490,55±0,04	0,125
26	488,7	488,7	488,6	488,6	488,7	488,7	488,7	488,6	488,7	488,7	488,70±0,02	0,048
27	491,3	491,3	491,3	491,3	491,3	491,4	491,2	491,4	491,4	491,3	491,30±0,02	0,063

Tabela 8.3 Diferença de massa dos corpos de prova antes e depois da soldagem, com escória.

DIFERENÇA DE MASSA ANTES E DEPOIS - COM ESCÓRIA												
CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{m}	σ
1 (28)	15,8	15,8	16,2	15,9	16,1	16,1	16,1	16,2	16,3	16,1	16,10±0,07	0,171
2	15,7	15,8	15,9	15,5	15,6	15,6	15,8	15,6	15,3	15,6	15,60±0,07	0,171
3	17,1	17,0	17,1	16,9	17,0	16,8	16,9	16,8	17,1	17,0	17,00±0,06	0,116
4	21,4	21,3	21,3	21,7	21,6	21,6	21,5	21,2	21,5	21,4	21,45±0,07	0,158
5	22,3	22,4	22,3	22,5	22,5	22,2	22,3	22,4	22,3	22,2	22,30±0,04	0,107
6	27,2	27,1	27,1	27,3	27,1	27,2	27,3	27,3	27,4	27,4	27,25±0,06	0,117
7	28,6	28,6	28,7	28,6	28,4	28,4	28,6	28,2	28,5	28,4	28,55±0,06	0,149
8 (29)	30,6	30,8	30,8	30,7	30,5	30,6	30,8	30,7	30,6	30,7	30,70±0,05	0,103
9	28,5	28,3	28,3	28,1	28,4	28,3	28,4	28,5	28,2	28,4	28,35±0,06	0,126
10	15,6	15,7	15,7	15,5	15,6	15,5	15,7	15,6	15,9	15,8	15,65±0,07	0,126
11	15,5	15,4	15,3	15,6	15,6	15,4	15,7	15,5	15,7	15,6	15,55±0,06	0,134
12	16,1	16,2	16,3	16,1	16,3	16,2	16,1	16,3	16,1	16,1	16,15±0,06	0,092
13	23,0	23,2	23,0	22,9	22,8	22,8	22,7	22,9	22,5	22,9	22,90±0,08	0,189
14	21,8	21,7	21,7	21,6	21,7	21,7	21,8	21,8	21,8	22,0	21,75±0,05	0,107
15	22,9	23,2	23,3	23,3	22,9	23,2	23,6	23,1	23,1	23,2	23,20±0,10	0,204
16	29,0	29,1	29,0	29,1	29,0	29,2	29,1	29,0	29,1	29,1	29,10±0,04	0,067
17	28,3	28,4	28,7	28,3	28,4	28,3	28,2	28,4	28,1	28,4	28,35±0,07	0,158
18	28,5	28,3	28,7	28,8	28,8	28,5	28,6	28,5	28,6	28,7	28,60±0,06	0,156
19	16,3	16,1	16,1	16,6	16,3	16,2	16,1	16,1	16,1	16,3	16,15±0,06	0,162
20	16,1	16,5	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,0	16,3	16,2	16,30±0,05	0,135
21	16,3	16,3	16,4	16,3	16,4	16,3	16,5	16,3	16,3	16,3	16,30±0,05	0,070
22	22,2	22,5	22,3	22,5	22,5	22,5	22,2	22,6	22,5	22,4	22,50±0,06	0,140
23	22,6	22,8	22,9	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,9	22,70±0,07	0,100
24	23,0	22,7	23,0	22,8	22,9	22,7	23,1	22,8	22,9	23,0	22,90±0,07	0,137
25	29,7	29,5	29,7	30,0	30,1	29,8	29,9	29,9	30,0	30,1	29,90±0,08	0,195
26	29,7	29,6	29,5	29,6	29,5	29,5	29,6	29,5	29,5	29,7	29,55±0,04	0,082
27	28,5	28,6	28,5	28,5	28,4	28,6	28,5	28,6	28,6	28,4	28,50±0,04	0,079

Tabela 8.4 Facilidade de destacamento e massa da escória destacada.

PROPRIEDADES DA ESCÓRIA													
CP	Facilidade	Massa em gramas										\bar{m}	σ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1 (28)	+	1,9	2,1	2,0	1,9	2,0	1,9	1,8	2,0	1,8	2,0	1,94±0,09	0,092
2	+	1,9	1,9	1,9	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,90±0,11	0,045
3	+	1,9	1,9	1,8	1,8	1,9	1,9	1,8	1,9	1,9	1,8	1,86±0,09	0,049
4	+	2,8	2,9	2,7	2,7	2,7	2,7	2,8	2,7	2,7	2,7	2,74±0,09	0,066
5	+	2,9	2,9	2,7	2,7	2,7	2,7	2,8	2,7	2,7	2,7	2,75±0,10	0,081
6	+	2,8	2,9	2,8	2,8	3,0	2,9	3,0	2,9	3,0	3,0	2,91±0,07	0,083
7	+	3,7	3,5	3,6	3,6	3,6	3,5	3,5	3,6	3,6	3,6	3,58±0,08	0,060
8 (29)	+	3,5	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,6	3,5	3,7	3,5	3,57±0,07	0,064
9	+	3,5	3,6	3,4	3,5	3,5	3,6	3,5	3,6	3,4	3,6	3,52±0,11	0,075
10	+	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	2,0	1,9	1,9	1,94±0,09	0,049
11	+	2,0	1,9	2,0	1,9	1,8	1,9	1,8	1,8	1,9	2,0	1,90±0,10	0,077
12	+	1,9	1,8	2,0	1,9	1,9	1,8	1,9	2,0	1,8	1,8	1,88±0,13	0,075
13	+	2,8	2,7	2,7	2,8	2,7	2,8	2,7	2,7	2,7	2,8	2,74±0,14	0,049
14	+	2,8	2,7	2,6	2,3	2,7	2,7	2,7	2,6	2,6	2,7	2,64±0,13	0,139
15	+	2,9	2,9	2,9	2,8	2,9	2,8	2,8	2,8	2,9	2,8	2,85±0,11	0,050
16	+	3,6	3,6	3,7	3,7	3,7	3,6	3,6	3,5	3,8	3,6	3,64±0,11	0,080
17	+	3,6	3,5	3,7	3,6	3,6	3,6	3,5	3,7	3,6	3,5	3,59±0,15	0,070
18	+	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,7	3,6	3,5	3,7	3,6	3,67±0,10	0,090
19	+	1,9	1,8	1,9	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,9	1,89±0,13	0,054
20	+	2,0	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,84±0,09	0,066
21	+	1,9	1,9	2,0	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,8	1,8	1,86±0,12	0,066
22	+	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,62±0,09	0,060
23	+	2,6	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5	2,7	2,6	2,6	2,5	2,60±0,06	0,063
24	+	2,6	2,7	2,6	2,7	2,7	2,7	2,7	2,8	2,7	2,7	2,69±0,12	0,054
25	+	3,5	3,6	3,5	3,5	3,5	3,6	3,5	3,6	3,4	3,5	3,52±0,13	0,060
26	+	3,5	3,5	3,6	3,5	3,5	3,4	3,4	3,6	3,6	3,5	3,51±0,08	0,070
27	+	3,3	3,3	3,4	3,3	3,4	3,3	3,4	3,3	3,4	3,4	3,35±0,10	0,050

Tabela 8.5 Massa dos CPs após a soldagem sem escória.

MEDIÇÕES DE MASSA EM GRAMAS - DEPOIS DA SOLDAGEM SEM ESCÓRIA												
CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{m}	σ
1 (28)	476,3	476,6	476,8	476,6	476,9	476,8	477,2	476,6	476,8	476,7	476,75±0,07	0,236
2	480,7	480,1	480,0	480,5	480,3	480,2	480,2	480,0	480,8	480,1	480,20±0,09	0,285
3	474,3	474,5	474,4	474,2	473,9	474,3	474,2	474,5	474,0	474,5	474,30±0,07	0,210
4	481,9	482,0	481,6	481,8	481,7	481,9	482,1	481,9	481,7	481,6	481,85±0,05	0,169
5	483,0	482,5	482,6	483,0	482,4	482,5	482,6	482,7	482,4	482,8	482,60±0,07	0,222
6	487,1	486,9	487,2	487,0	487,1	486,9	486,9	487,2	486,9	487,4	487,05±0,05	0,171
7	487,4	487,4	487,2	487,1	486,8	487,1	487,0	486,6	486,8	487,2	487,10±0,08	0,263
8 (29)	485,7	485,5	485,8	485,6	485,3	485,6	485,4	485,5	485,5	485,6	485,55±0,05	0,143
9	484,9	484,8	484,7	484,8	484,8	484,1	485,0	484,5	484,6	484,9	484,80±0,08	0,260
10	475,8	475,9	476,0	475,4	475,9	475,8	475,6	476,1	476,2	475,7	475,85±0,07	0,237
11	474,3	473,9	474,4	474,1	474,0	474,1	473,9	473,8	474,2	474,1	474,10±0,06	0,187
12	474,0	473,6	473,5	474,1	473,4	473,4	474,2	474,3	473,5	473,7	473,65±0,11	0,347
13	485,6	484,7	485,2	485,4	485,5	485,0	485,5	485,4	485,6	485,7	485,45±0,10	0,310
14	485,1	485,5	485,6	485,2	485,5	485,3	484,9	485,2	485,4	485,4	485,35±0,07	0,213
15	482,9	483,2	483,1	482,6	483,0	482,6	482,9	482,7	482,9	482,8	482,90±0,06	0,200
16	487,3	487,5	487,4	487,3	487,1	486,9	486,8	487,2	486,9	487,1	487,15±0,07	0,232
17	479,3	479,2	479,7	479,1	479,2	479,9	480,2	480,1	479,3	479,7	479,50±0,13	0,403
18	484,6	484,6	484,8	484,6	484,4	484,3	484,5	484,4	484,2	484,7	484,55±0,06	0,185
19	474,4	474,8	474,0	474,3	473,7	474,7	473,8	474,4	474,7	474,2	474,35±0,12	0,380
20	475,4	475,4	475,1	475,4	475,0	474,9	475,3	475,1	475,0	474,9	475,10±0,07	0,207
21	475,0	475,2	474,7	475,0	475,1	475,1	474,6	474,3	475,1	474,9	475,00±0,09	0,283
22	482,1	482,3	482,1	481,9	482,0	482,3	482,0	482,1	481,7	482,1	482,10±0,06	0,178
23	493,7	494,0	493,7	493,4	493,6	493,8	493,9	493,9	493,8	493,7	493,75±0,05	0,172
24	483,5	483,7	482,9	483,5	483,7	483,3	484,0	483,7	483,5	483,4	483,50±0,09	0,294
25	486,7	487,1	486,9	486,1	486,5	486,6	486,8	486,4	486,4	486,7	486,65±0,09	0,286
26	484,7	484,6	485,0	484,5	484,5	484,7	484,6	484,3	484,5	484,6	484,60±0,06	0,183
27	487,7	487,8	487,3	487,8	487,7	487,7	487,2	487,2	487,4	487,7	487,70±0,08	0,246

Tabela 8.6 Diferença de massa dos corpos de prova antes e depois da soldagem, sem escória.

DIFERENÇA DE MASSA ANTES E DEPOIS - SEM ESCÓRIA												
CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{m}	σ
1 (28)	12,7	12,8	13,3	12,9	13,3	13,2	13,6	13,1	13,3	13,0	13,15±0,11	0,274
2	13,8	13,3	13,2	13,4	13,4	13,2	13,3	13,0	13,5	13,2	13,30±0,14	0,216
3	14,6	14,9	14,7	14,4	14,1	14,5	14,4	14,6	14,3	14,6	14,55±0,10	0,223
4	18,6	18,6	18,1	18,6	18,4	18,6	18,9	18,4	18,3	18,3	18,50±0,09	0,225
5	19,6	19,1	19,2	19,7	19,1	19,0	19,2	19,3	19,0	19,2	19,20±0,10	0,237
6	23,5	23,3	23,5	23,4	23,4	23,3	23,4	23,5	23,3	23,7	23,40±0,08	0,125
7	24,9	24,9	24,8	24,6	24,2	24,5	24,5	24,0	24,4	24,6	24,55±0,11	0,291
8 (29)	26,7	26,6	26,8	26,5	26,1	26,5	26,4	26,5	26,4	26,7	26,50±0,08	0,199
9	24,5	24,2	24,2	24,2	24,4	23,6	24,4	24,0	24,1	24,5	24,20±0,11	0,273
10	13,2	13,2	13,4	12,6	13,1	12,9	13,0	13,4	13,5	12,9	13,15±0,11	0,278
11	13,1	12,7	13,1	12,9	12,8	12,8	12,8	12,5	12,9	13,0	12,85±0,08	0,184
12	14,0	13,6	13,5	13,9	13,5	13,4	14,1	14,2	13,5	13,6	13,60±0,14	0,291
13	19,5	18,6	18,9	19,1	19,3	18,8	19,1	19,1	19,1	19,5	19,10±0,14	0,287
14	17,5	17,9	18,1	17,6	18,0	17,6	17,3	17,6	17,8	17,9	17,70±0,09	0,250
15	19,6	19,8	19,8	19,2	19,4	19,2	19,7	19,2	19,4	19,2	19,40±0,10	0,255
16	25,0	25,3	25,0	25,1	24,7	24,7	24,5	24,9	24,7	24,9	24,90±0,10	0,235
17	24,1	23,8	24,5	23,7	23,9	24,5	24,8	24,8	23,8	24,3	24,20±0,16	0,418
18	24,7	24,6	24,9	24,8	24,6	24,4	24,6	24,4	24,2	24,8	24,60±0,08	0,216
19	14,1	14,4	13,6	14,2	13,5	14,3	13,5	14,0	14,3	13,9	14,05±0,15	0,343
20	14,0	14,2	13,8	14,1	13,6	13,5	14,0	13,6	13,7	13,6	13,75±0,09	0,247
21	14,0	14,2	13,9	14,1	14,1	14,2	13,7	13,3	14,1	14,0	14,05±0,11	0,276
22	19,2	19,7	19,4	19,1	19,4	19,6	19,1	19,4	19,0	19,4	19,40±0,09	0,226
23	19,6	20,0	19,9	19,5	19,6	19,7	19,7	19,8	19,7	19,7	19,70±0,09	0,148
24	20,0	20,2	19,3	20,0	20,0	19,7	20,5	20,1	20,0	19,9	20,00±0,12	0,313
25	25,9	26,2	26,1	25,4	26,0	26,0	26,0	25,8	25,7	26,1	26,00±0,13	0,235
26	25,7	25,5	25,9	25,5	25,3	25,5	25,5	25,2	25,3	25,6	25,50±0,08	0,205
27	24,9	25,1	24,5	25,0	24,8	24,9	24,5	24,4	24,6	24,8	24,80±0,10	0,237

Tabela 8.7 Massa de escória aderida aos CPS.

MASSA DE ESCÓRIA ADERIDA AOS CP												
CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{m}	σ
1 (28)	3,1	3,0	2,9	3,0	2,8	2,9	2,5	3,1	3,0	3,1	3,00±0,06	0,184
2	1,9	2,5	2,7	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	1,8	2,4	2,40±0,09	0,300
3	2,5	2,1	2,4	2,5	2,9	2,3	2,5	2,2	2,8	2,4	2,45±0,08	0,246
4	2,8	2,7	3,2	3,1	3,2	3,0	2,6	2,8	3,2	3,1	3,05±0,07	0,226
5	2,7	3,3	3,1	2,8	3,4	3,2	3,1	3,1	3,3	3,0	3,10±0,07	0,221
6	3,7	3,8	3,6	3,9	3,7	3,9	3,9	3,8	4,1	3,7	3,80±0,05	0,145
7	3,7	3,7	3,9	4,0	4,2	3,9	4,1	4,2	4,1	3,8	3,95±0,06	0,190
8 (29)	3,9	4,2	4,0	4,2	4,4	4,1	4,4	4,2	4,2	4,0	4,20±0,05	0,165
9	4,0	4,1	4,1	3,9	4,0	4,7	4,0	4,5	4,1	3,9	4,05±0,08	0,263
10	2,4	2,5	2,3	2,9	2,5	2,6	2,7	2,2	2,4	2,9	2,50±0,07	0,237
11	2,4	2,7	2,2	2,7	2,8	2,6	2,9	3,0	2,8	2,6	2,70±0,07	0,236
12	2,1	2,6	2,8	2,2	2,8	2,8	2,0	2,1	2,6	2,5	2,55±0,10	0,321
13	3,5	4,6	4,1	3,8	3,5	4,0	3,6	3,8	3,4	3,4	3,70±0,12	0,380
14	4,3	3,8	3,6	4,0	3,7	4,1	4,5	4,2	4,0	4,1	4,05±0,09	0,275
15	3,3	3,4	3,5	4,1	3,5	4,0	3,9	3,9	3,7	4,0	3,80±0,09	0,287
16	4,0	3,8	4,0	4,0	4,3	4,5	4,6	4,1	4,4	4,2	4,15±0,08	0,256
17	4,2	4,6	4,2	4,6	4,5	3,8	3,4	3,6	4,3	4,1	4,20±0,13	0,414
18	3,8	3,7	3,8	4,0	4,2	4,1	4,0	4,1	4,4	3,9	4,00±0,07	0,211
19	2,2	1,7	2,5	2,4	2,8	1,9	2,6	2,1	1,8	2,4	2,30±0,11	0,363
20	2,1	2,3	2,5	2,2	2,7	2,8	2,3	2,4	2,6	2,6	2,45±0,07	0,227
21	2,3	2,1	2,5	2,2	2,3	2,1	2,8	3,0	2,2	2,3	2,30±0,10	0,301
22	3,0	2,8	2,9	3,4	3,1	2,9	3,1	3,2	3,5	3,0	3,05±0,07	0,223
23	3,0	2,8	3,0	3,2	3,1	3,0	3,0	2,9	3,0	3,2	3,00±0,04	0,123
24	3,0	2,5	3,7	2,8	2,9	3,0	2,6	2,7	2,9	3,1	2,90±0,11	0,333
25	3,8	3,3	3,6	4,6	4,1	3,8	3,9	4,1	4,3	4,0	3,95±0,11	0,363
26	4,0	4,1	3,6	4,1	4,2	4,0	4,1	4,3	4,2	4,1	4,10±0,06	0,189
27	3,6	3,5	4,0	3,5	3,6	3,7	4,0	4,2	4,0	3,6	3,65±0,08	0,254

Tabela 8.8 Massa dos respingos recolhidos.

MASSA DO RESPINGO EM GRAMAS												
CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{m}	σ
1 (28)	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,4	0,40±0,03	0,094
2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,30±0,02	0,071
3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,4	0,30±0,02	0,074
4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,30±0,02	0,057
5	0,4	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5	0,7	0,50±0,03	0,084
6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,60±0,01	0,042
7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,65±0,02	0,070
8 (29)	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,60±0,02	0,074
9	0,8	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,70±0,02	0,063
10	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,30±0,02	0,057
11	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,40±0,02	0,052
12	0,5	0,5	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5	0,5	0,50±0,02	0,079
13	0,7	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,7	0,60±0,02	0,067
14	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,55±0,02	0,053
15	0,5	0,5	0,5	0,6	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5	0,50±0,02	0,067
16	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5	0,50±0,02	0,048
17	0,6	0,6	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,60±0,01	0,047
18	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6	0,60±0,02	0,063
19	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,30±0,01	0,032
20	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,10±0,02	0,057
21	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,45±0,02	0,070
22	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,40±0,02	0,048
23	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,40±0,02	0,048
24	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,50±0,01	0,042
25	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,5	0,5	0,6	0,6	0,60±0,02	0,074
26	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,5	0,5	0,6	0,6	0,60±0,02	0,079
27	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,60±0,02	0,063

Tabela 8.9 Pesagem do arame.

MASSA DO ARAME											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{m}	σ
6,7	6,7	6,6	6,6	6,8	6,8	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7±0,02	0,067

Tabela 8.10 Matriz de planejamento fatorial dos experimentos.

PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS			
Experimento	Corpo de Prova	Gás	Corrente
1 – 1	1 (28)	C40	170 A
1 – 2	2	C40	170 A
1 – 3	3	C40	170 A
2 – 1	4	C40	210 A
2 – 2	5	C40	210 A
2 – 3	6	C40	210 A
3 – 1	7	C40	250 A
3 – 2	8 (29)	C40	250 A
3 – 3	9	C40	250 A
4 – 1	10	CO ₂	170 A
4 – 2	11	CO ₂	170 A
4 – 3	12	CO ₂	170 A
5 – 1	13	CO ₂	210 A
5 – 2	14	CO ₂	210 A
5 – 3	15	CO ₂	210 A
6 – 1	16	CO ₂	250 A
6 – 2	17	CO ₂	250 A
6 – 3	18	CO ₂	250 A
7 – 1	19	C25	170 A
7 – 2	20	C25	170 A
7 – 3	21	C25	170 A
8 – 1	22	C25	210 A
8 – 2	23	C25	210 A
8 – 3	24	C25	210 A
9 – 1	25	C25	250 A
9 – 2	26	C25	250 A
9 – 3	27	C25	250 A

Tabela 8.11 Correntes, tensões e potências.

CP	Experimento	Gás	\bar{i}	i_{RMS}	σ_i	\bar{V}	V_{RMS}	σ_V	\bar{W}	W_{RMS}
1(28)	1-1	C40	180,50	181,00	12,50	24,60	24,90	3,30	4440,30	4506,90
2	1-2	C40	173,20	173,60	11,40	24,70	24,80	2,90	4278,04	4305,28
3	1-3	C40	173,30	174,40	18,80	24,60	24,70	2,80	4263,18	4307,68
4	2-1	C40	220,80	221,40	15,70	24,60	24,70	2,60	5431,68	5468,58
5	2-2	C40	209,20	209,70	14,60	24,90	24,50	2,60	5209,08	5137,65
6	2-3	C40	225,80	226,40	17,50	24,40	24,40	1,00	5509,52	5524,16
7	3-1	C40	250,50	251,00	15,20	28,00	28,10	0,80	7014,00	7053,10
8(29)	3-2	C40	261,90	262,50	18,00	28,00	28,10	2,70	7333,20	7376,25
9	3-3	C40	251,10	251,60	15,70	28,10	28,20	2,70	7055,91	7095,12
10	4-1	CO ₂	157,10	159,10	24,90	25,20	25,60	5,00	3958,92	4072,96
11	4-2	CO ₂	173,40	175,00	23,70	24,50	24,90	4,50	4248,30	4357,50
12	4-3	CO ₂	175,30	176,50	20,80	24,30	24,30	1,00	4259,79	4288,95
13	5-1	CO ₂	219,20	220,10	19,60	27,60	27,70	2,60	6049,92	6096,77
14	5-2	CO ₂	220,40	221,30	20,30	27,60	27,70	2,60	6083,04	6130,01
15	5-3	CO ₂	216,70	217,50	18,90	27,50	27,60	2,60	5959,25	6003,00
16	6-1	CO ₂	251,90	253,00	23,80	26,00	26,20	3,30	6549,40	6628,60
17	6-2	CO ₂	253,30	255,00	28,60	26,00	26,10	2,20	6585,80	6655,50
18	6-3	CO ₂	256,40	257,80	26,40	26,20	26,40	3,50	6717,68	6805,92
19	7-1	C25	172,80	173,80	18,70	22,80	23,10	4,20	3939,84	4014,78
20	7-2	C25	168,90	169,90	18,60	22,60	22,80	2,40	3817,14	3873,72
21	7-3	C25	170,70	171,90	20,20	22,60	22,70	2,60	3857,82	3902,13
22	8-1	C25	212,40	212,80	12,00	24,90	25,00	2,50	5288,76	5320,00
23	8-2	C25	215,60	216,10	14,00	24,70	24,70	2,30	5325,32	5337,67
24	8-3	C25	221,30	221,80	14,30	24,70	24,70	1,80	5466,11	5478,46
25	9-1	C25	259,70	260,20	16,90	27,00	27,20	2,80	7011,90	7077,44
26	9-2	C25	260,80	261,50	19,00	27,00	27,20	2,70	7041,60	7112,80
27	9-3	C25	261,70	262,30	17,70	27,10	27,20	2,80	7092,07	7134,56

Tabela 8.12 Massa dos fumos para cada experimento.

Gás	CP	$\Delta m_{CP,escória-cru}$	m_{arame}	$m_{escória}$	$m_{respingo}$	m_{fumos}
C40	1 (28)	16,1	16,6	1,9	0,4	2,0±0,1
C40	2	15,6	16,6	1,9	0,3	2,6±0,1
C40	3	17,0	16,6	1,9	0,3	1,2±0,1
C40	4	21,5	22,6	2,7	0,3	3,6±0,1
C40	5	22,3	22,6	2,8	0,5	2,5±0,1
C40	6	27,3	22,6	2,9	0,6	2,3±0,1
C40	7	28,6	28,6	3,6	0,7	3,0±0,1
C40	8 (29)	30,7	28,6	3,6	0,6	0,9±0,1
C40	9	28,4	28,6	3,5	0,7	3,1±0,1
CO₂	10	15,7	16,6	1,9	0,3	2,6±0,1
CO₂	11	15,6	16,6	1,9	0,4	2,6±0,1,
CO₂	12	16,2	16,6	1,9	0,5	1,8±0,1
CO₂	13	22,9	22,6	2,7	0,6	1,8±0,1
CO₂	14	21,8	22,6	2,6	0,6	2,9±0,1
CO₂	15	23,2	22,6	2,9	0,5	1,7±0,1
CO₂	16	29,1	28,6	3,6	0,5	2,6±0,1
CO₂	17	28,4	28,6	3,6	0,6	3,2±0,1
CO₂	18	28,6	28,6	3,7	0,6	3,1±0,1
C25	19	16,2	16,6	1,9	0,3	2,0±0,1
C25	20	16,3	16,6	1,8	0,1	2,0±0,1
C25	21	16,3	16,6	1,9	0,5	1,7±0,1
C25	22	22,5	22,6	2,6	0,4	2,3±0,1
C25	23	22,7	22,6	2,6	0,4	2,1±0,1
C25	24	22,9	22,6	2,7	0,5	1,9±0,1
C25	25	29,9	28,6	3,5	0,6	1,6±0,1
C25	26	29,6	28,6	3,5	0,6	2,0±0,1
C25	27	28,5	28,6	3,4	0,6	2,9±0,1

Tabela 8.13 Comparação experimento a experimento das taxas de fusão, deposição e eficiência.

CP	Experimento	Gás	TF	TD	η
1(28)	1-1	C40	2,211	1,75±0,11	0,79
2	1-2	C40	2,211	1,77±0,14	0,80
3	1-3	C40	2,211	1,94±0,10	0,88
4	2-1	C40	3,015	2,47±0,09	0,82
5	2-2	C40	3,015	2,56±0,10	0,85
6	2-3	C40	3,015	3,12±0,08	1,03
7	3-1	C40	3,819	3,27±0,11	0,86
8(29)	3-2	C40	3,819	3,53±0,08	0,93
9	3-3	C40	3,819	3,23±0,11	0,84
10	4-1	CO ₂	2,211	1,75±0,11	0,79
11	4-2	CO ₂	2,211	1,71±0,08	0,77
12	4-3	CO ₂	2,211	1,81±0,14	0,82
13	5-1	CO ₂	3,015	2,55±0,14	0,84
14	5-2	CO ₂	3,015	2,36±0,09	0,78
15	5-3	CO ₂	3,015	2,59±0,10	0,86
16	6-1	CO ₂	3,819	3,32±0,10	0,87
17	6-2	CO ₂	3,819	3,23±0,16	0,84
18	6-3	CO ₂	3,819	3,28±0,08	0,86
19	7-1	C25	2,211	1,87±0,15	0,85
20	7-2	C25	2,211	1,83±0,09	0,83
21	7-3	C25	2,211	1,87±0,11	0,85
22	8-1	C25	3,015	2,59±0,09	0,86
23	8-2	C25	3,015	2,63±0,09	0,87
24	8-3	C25	3,015	2,67±0,12	0,88
25	9-1	C25	3,819	3,47±0,13	0,91
26	9-2	C25	3,819	3,40±0,08	0,89
27	9-3	C25	3,819	3,31±0,10	0,87

Tabela 8.14 Valores da taxa de diluição.

C40		CO ₂		C25	
CP	DILUIÇÃO	CP	DILUIÇÃO	CP	DILUIÇÃO
1(28)	44,6 %	10	48,9 %	19	37,5 %
2	43,8 %	11	50,7 %	20	40,6 %
3	45,8 %	12	50,1 %	21	38,7 %
4	44,5 %	13	48,0 %	22	44,1 %
5	43,9 %	14	49,6 %	23	43,5 %
6	40,8 %	15	48,9 %	24	42,6 %
7	39,2 %	16	44,6 %	25	37,5 %
8(29)	40,3 %	17	43,7 %	26	39,7 %
9	38,3 %	18	44,9 %	27	40,4 %

Tabela 8.15 Análise de custos por hora de trabalho.

Análise de custo				
CP	C ELETRODO/h	C GÁS/h	C EE/h	Custo Total
1(28)	R\$ 33,26	R\$ 17,28	R\$ 1,55	R\$ 52,10
2	R\$ 33,26	R\$ 17,28	R\$ 1,52	R\$ 52,07
3	R\$ 33,26	R\$ 17,28	R\$ 1,49	R\$ 52,04
4	R\$ 45,36	R\$ 17,28	R\$ 1,90	R\$ 64,54
5	R\$ 45,36	R\$ 17,28	R\$ 1,82	R\$ 64,46
6	R\$ 45,36	R\$ 17,28	R\$ 1,93	R\$ 64,57
7	R\$ 57,46	R\$ 17,28	R\$ 2,45	R\$ 77,19
8(29)	R\$ 57,46	R\$ 17,28	R\$ 2,57	R\$ 77,30
9	R\$ 57,46	R\$ 17,28	R\$ 2,47	R\$ 77,21
10	R\$ 33,26	R\$ 8,64	R\$ 1,39	R\$ 43,29
11	R\$ 33,26	R\$ 8,64	R\$ 1,49	R\$ 43,39
12	R\$ 33,26	R\$ 8,64	R\$ 1,49	R\$ 43,39
13	R\$ 45,36	R\$ 8,64	R\$ 2,12	R\$ 56,12
14	R\$ 45,36	R\$ 8,64	R\$ 2,13	R\$ 56,13
15	R\$ 45,36	R\$ 8,64	R\$ 2,09	R\$ 56,09
16	R\$ 57,46	R\$ 8,64	R\$ 2,29	R\$ 68,39
17	R\$ 57,46	R\$ 8,64	R\$ 2,31	R\$ 68,40
18	R\$ 57,46	R\$ 8,64	R\$ 2,35	R\$ 68,45
19	R\$ 33,26	R\$ 18,36	R\$ 1,38	R\$ 53,00
20	R\$ 33,26	R\$ 18,36	R\$ 1,34	R\$ 52,96
21	R\$ 33,26	R\$ 18,36	R\$ 1,35	R\$ 52,97
22	R\$ 45,36	R\$ 18,36	R\$ 1,85	R\$ 65,57
23	R\$ 45,36	R\$ 18,36	R\$ 1,87	R\$ 65,59
24	R\$ 45,36	R\$ 18,36	R\$ 1,91	R\$ 65,63
25	R\$ 57,46	R\$ 18,36	R\$ 2,45	R\$ 78,27
26	R\$ 57,46	R\$ 18,36	R\$ 2,46	R\$ 78,28
27	R\$ 57,46	R\$ 18,36	R\$ 2,48	R\$ 78,30