

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA
DE VARIÁVEIS NA SOLDAGEM MIG/MAG PULSADO
EM CORRENTE ALTERNADA**

Autor: Thairone Conti Serafini Aguiar

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa

Itajubá, MG, maio de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA
DE VARIÁVEIS NA SOLDAGEM MIG/MAG PULSADO
EM CORRENTE ALTERNADA**

Autor: Thairone Conti Serafini Aguiar

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ITAJUBÁ, maio de 2014,
M.G. – BRASIL

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

A282c

Aguiar, Thairone Conti Serafini

Uma contribuição ao estudo da influência de variáveis na soldagem MIG/MAG pulsado em corrente alternada / Thairone Conti Serafini Aguiar. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2014.
134 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. MIG/MAG pulsado - CA. 2. Soldagem em corrente alternada. 3. Estabilidade do arco. I. Costa, Sebastião Carlos da, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA
DE VARIÁVEIS NA SOLDAGEM MIG/MAG PULSADO
EM CORRENTE ALTERNADA**

Autor: **Thairone Conti Serafini Aguiar**

Orientador: **Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro – CEFET – MG

Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes – IEPG/UNIFEI

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa – IEM/UNIFEI (Orientador)

Dedicatória

Daniel C. de Aguiar, meu amado pai;

Janete C. S. Aguiar, minha amada mãe;

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me fortalecer e acolher a todo o momento;

Aos meus pais, por acreditarem em meus sonhos;

Ao meu orientador professor Dr. Sebastião Carlos da Costa pelo valioso ensinamento, empenho e competência em sua orientação ao longo deste trabalho;

Ao corpo docente do Instituto de Engenharia Mecânica (IEM);

À minha namorada Fernanda Savini de Oliveira pelo afeto e motivação;

Aos amigos de mestrado e doutorado, Adriano Cássio Baldim, Alberto Cardoso Almeida, Felipe de Souza Eloy, Jean M. C. Suveges entre outros, pelo convívio e apoio nesse período;

Ao meu querido amigo Davi Ferri de Carvalho Dias pelo incentivo;

Ao apoio financeiro através do programa de bolsas da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES);

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.

(Albert Einstein 1879-1955)

Resumo

AGUIAR, T. C. S. (2014), Uma contribuição ao estudo da influência de variáveis na soldagem MIG/MAG pulsado em corrente alternada, Itajubá, 134 p. Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

O processo de soldagem MIG/MAG pulsado CA, apesar de ainda se encontrar em uma fase de desenvolvimento, desfruta de um cenário propício para aplicações nos mais variados campos da engenharia. Entretanto nota-se um desprovimento de informações em relação ao comportamento e viabilidade do mesmo aplicado aos principais materiais utilizados nos meios industriais, incluindo o alumínio, aços inoxidáveis e aços carbono. Desta forma o objetivo desse trabalho é evidenciar que o processo, apesar de sua alta dinâmica pela inversão dos ciclos durante soldagem, pode atingir um patamar estável gerando cordões de soldas de boa qualidade aplicadas em soldagem de aços carbono. Para análise comprobatória foi realizado uma avaliação por meio da técnica estatística baseada no projeto e análise de experimentos dos efeitos principais e de interações das variáveis do processo na geometria do cordão de solda, produtividade e estabilidade do arco baseado na análise da característica dinâmica do par tensão e corrente de soldagem. Os resultados obtidos fornecem uma visão ampla dos efeitos das principais variáveis analisadas bem como de suas interações no comportamento do processo de soldagem MIG/MAG Pulsado - CA, permitindo estabelecer condições adequadas de utilização para cada característica avaliada.

Palavras-chave

MIG/MAG pulsado – CA, Soldagem em Corrente Alternada, Estabilidade do Arco, DOE.

Abstract

AGUIAR, T. C. S. (2014), A contribution to the study of pulsed MIG/MAG welding process in alternating current, Itajubá, 134 p. MSc. Dissertation, Master Degree in Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Institute, Federal University of Itajubá.

The VP – GMAW welding process, although is still in a development phase, enjoying a supportive setting for applications in various fields of engineering. However there has been a dismissal of information regarding the behavior and viability of this welding process applied to the main materials used in industrial environments including aluminum, stainless steels and carbon steels. Thus the aim of this work is to show that the process, despite of its great dynamical behavior by reversing cycles during welding, can achieve a stable welding performance level by generating good quality welds applied in carbon steels welding beads. In order to achieve these objectives, a series of analysis by using statistical technique based on the design of experiments and analysis of the main effects and interactions of process variables on the welding geometry, productivity and arc stability based on the behavior of dynamical characteristic of voltage and current electrical signals was performed. The results provide a broad overview of the effects of the main variables and their interactions on the behavior of the VP – GMAW welding process, establishing appropriate variable adjustment in each individual response evaluated.

Keywords

VP- GMAW, Alternating Current in Welding, Arc Stability, DOE.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
SIMBOLOGIA.....	xiii
CAPÍTULO 1	01
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Importância do tema.....	03
1.2. Objetivos	04
1.3. Limitações.....	04
1.4. Motivação e possíveis contribuições.....	05
1.5. Estrutura do trabalho	05
CAPÍTULO 2	07
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	07
2.1. Aspectos fundamentais do processo MIG/MAG.....	07
2.2. Fundamentos do processo de soldagem MIG/MAG – CA	09
2.2.1 Formato de onda para corrente de soldagem.....	11
2.2.2 Principais parâmetros do processo	15
2.2.3 Misturas de gases para proteção do arco elétrico	21
2.3. Influência das polaridades no processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA.....	23
2.3.1 Fenômeno da escalada do arco como propulsor para a taxa de fusão	25
2.3.2 Métodos de avaliação para estabilidade do arco	28

2.4. Vantagens e Desvantagens do processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA.....	32
2.5. Técnica para o projeto e análise de experimentos	34
CAPÍTULO 3	37
3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	37
3.1. Estratégia experimental e etapas projetadas	37
3.2. Descrições dos equipamentos e materiais empregados.....	39
3.3. Preparação e solda de simples deposição.....	40
3.4. Medições efetuadas	45
3.4.1 Aspectos geométricos	45
3.4.2 Aspectos produtivos.....	47
3.4.3 Análise da estabilidade do arco	49
CAPÍTULO 4	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1. Seleções dos parâmetros e níveis de operação	50
4.2. Respostas de interesse do processo	55
4.3. Definição da matriz de ensaios	55
4.4. Registro de respostas da estabilidade do arco.....	56
4.5. Resultados obtidos.....	59
4.6. Análise dos efeitos principais e de interação dos parâmetros.....	63
4.6.1 Características geométricas do cordão.....	64
4.6.1.1 Penetração da solda	64
4.6.1.2 Largura do cordão.....	67
4.6.1.3 Reforço do cordão	70
4.6.1.4 Diluição do cordão	72
4.6.2 Características econômicas do processo	75
4.6.3 Estabilidade do arco no processo	76
4.6.4 Regularidade do par tensão corrente ($U \cdot I_r$)	76
4.6.5 Frequência de picos.....	79
4.7. Avaliações complementares	81
4.8. Otimização	82
CAPÍTULO 5	86
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
5.1. Conclusões gerais	86
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	88

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXOS	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Equipamento para execução do processo MIG/MAG	08
Figura 2.2 – Formato de onda para MIG/MAG Pulsado e MIG/MAG Pulsado – CA	11
Figura 2.3 – Formatos de ondas e reflexos na taxa de fusão	12
Figura 2.4 – Tipos de ondas para soldagem em corrente alternada	13
Figura 2.5 – Transferência metálica para formato de onda “A”	14
Figura 2.6 – Comparativo para união de chapas de alumínio	15
Figura 2.7 – Esquema do formato de onda comum para MIG/MAG Pulsado – CA destinado para aços e suas variáveis	16
Figura 2.8 – Destacamento da gota sob diferentes níveis de corrente negativa	18
Figura 2.9 – Formato do cordão obtido com variação da velocidade de alimentação nas polaridades positiva e negativa	19
Figura 2.10 – Oscilograma de (I, U e V_a) <i>versus</i> tempo	19
Figura 2.11 – Relação entre a alimentação do arame e corrente média em CC^- e CC^+	21
Figura 2.12 – Gota “girando” ao redor do arco	23
Figura 2.13 – Cordões gerados com diferentes valores para EN	24
Figura 2.14 – Influência da polaridade nas características dos cordões de solda	25
Figura 2.15 – “Escalada” do arco	26
Figura 2.16 – Comportamento da gota/Esquema do possível formato do arco	27
Figura 2.17 – Escalada do arco para diferentes tipos de gases e correntes	28
Figura 2.18 – Comportamento dinâmico da corrente e tensão em modo de transferência por curto-circuito	30
Figura 2.19 – Análise da estabilidade do arco baseado na dispersão do par tensão <i>versus</i> corrente	30

Figura 2.20 – Diagrama tensão-corrente para dois ensaios efetuados nas mesmas condições, boa e razoável regularidade	31
Figura 2.21 – Diagramas tensão-corrente avaliados com boa regularidade para dois ensaios executados em MIG Pulsado – CA	32
Figura 3.1 – Bancada experimental	39
Figura 3.2 – Cordões gerados em testes preliminares	41
Figura 3.3 – Detalhes da balança de precisão utilizada	42
Figura 3.4 – Sentido de execução da solda	43
Figura 3.5 – Deposição do cordão de solda sobre a chapa	43
Figura 3.6 – Instabilidade dos sinais de corrente (I) e tensão (U) após operação contínua do equipamento de soldagem	44
Figura 3.7 – Característica dinâmica normal dos sinais de corrente (I) e tensão (U) após um intervalo de tempo com o equipamento de soldagem	44
Figura 3.8 – Medições da largura (W), reforço (R), penetração (P) e diluição (D) do cordão de solda	46
Figura 3.9 – Equipamento utilizado para ampliações dos cordões	46
Figura 3.10 – Método para as medições geométricas do cordão de solda	47
Figura 4.1 – Oscilogramas para corrente e tensão, respectivamente	56
Figura 4.2 – Critério para medição e avaliação da corrente de soldagem	57
Figura 4.3 – Critério para medição e avaliação da tensão de soldagem	57
Figura 4.4 – Gráfico de dispersão $U \cdot I$	58
Figura 4.5 – Interação com apenas um ciclo e critério de medição para avaliação	59
Figura 4.6 – Efeitos principais dos parâmetros na penetração da solda	65
Figura 4.7 – Efeito da interação entre o percentual de tempo do arame eletrodo em polaridade negativa e a alimentação do arame sobre a penetração da solda	65
Figura 4.8 – Ensaio 10 com maior penetração	66
Figura 4.9 – Ensaio 15 com menor penetração	66
Figura 4.10 – Influência dos parâmetros sobre a largura do cordão	67
Figura 4.11 – Ensaio 10 com maior largura	68
Figura 4.12 – Ensaio 19 com menor largura	68
Figura 4.13 – Efeito da interação entre o percentual de tempo do arame eletrodo em polaridade negativa e a alimentação do arame sobre a largura	69
Figura 4.14 – Plotagem cúbica da interação $t_b \cdot EN \cdot V_a$ na largura do cordão	69
Figura 4.15 – Efeitos principais dos parâmetros sobre o reforço	70

Figura 4.16 – Efeito da interação entre o tempo de base e a alimentação do arame sobre o reforço do cordão de solda	71
Figura 4.17 – Ensaio 15 com maior reforço	71
Figura 4.18 – Ensaio 01 com menor reforço	72
Figura 4.19 – Efeitos dos parâmetros principais na diluição do cordão	72
Figura 4.20 – Efeito da interação entre o percentual de tempo do arame eletrodo em polaridade negativa e a alimentação do arame sobre a taxa de diluição	73
Figura 4.21 – Ensaio 10 com maior taxa de diluição	74
Figura 4.22 – Ensaio 31 com menor taxa de diluição	74
Figura 4.23 – Efeitos principais sobre a taxa de deposição	75
Figura 4.24 – Plotagem cúbica das interações significativas na taxa de deposição	76
Figura 4.25 – Efeitos principais sobre a regularidade do processo	77
Figura 4.26 – Plotagem cúbica com as interações significativas na regularidade do arco	78
Figura 4.27 – Interação da nota atribuída à regularidade do arco na penetração do cordão	78
Figura 4.28 – Efeitos principais sobre a frequência de picos no semi-ciclo positivo	79
Figura 4.29 – Influência da frequência de ciclos na penetração	80
Figura 4.30 – Correlação entre a corrente média e a frequência de picos	80
Figura 4.31 – Interação da velocidade de alimentação com a regularidade de <i>U versus I</i>	82
Figura 4.32 – Respostas para otimização	83
Figura 4.33 – Perfil e cordão de solda para o ensaio 01	84
Figura 4.34 – Perfil e cordão de solda para o ensaio 17	84
Figura 4.35 – Gráficos de dispersões $U \cdot I$ dos ensaios 01 e 17	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais métodos do Projeto e Análise de Experimentos e suas características fundamentais	35
Tabela 3.1 – Composição química do material de deposição e metal base	40
Tabela 3.2 – Parâmetros para reprodução em testes preliminares	41
Tabela 4.1 – Testes preliminares comentados	53
Tabela 4.2 – Parâmetros variáveis e níveis de trabalho	54
Tabela 4.3 – Parâmetros fixos, tipos e níveis de trabalho	54
Tabela 4.4 – Arranjo dos ensaios e respostas para a geometria e economia do cordão	61
Tabela 4.5 – Respostas para a análise da estabilidade do arco e comportamento $U \cdot I$	62
Tabela 4.6 – Análise de variância para as respostas	63
Tabela 4.7 – Dados dos ensaios 01 e 17 para otimização	83

SIMBOLOGIA

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	<i>Alternating Current</i>
ANOVA	Análise de Variância
AWS	<i>American Welding Society</i>
BOP	<i>Bead On Plate</i>
CA	Corrente Alternada
CCEN	Corrente Contínua Eletrodo Negativo
CCEP	Corrente Contínua Eletrodo Positivo
cdp	corpo de prova
DBCP	Distância do Bico Com a Peça
DOE	<i>Design of Experiments</i> ou Projeto e Análise de Experimentos
GMAW	<i>Gas Metal Active Welding</i>
IEM	Instituto de Engenharia Mecânica
IEPG	Instituto de Engenharia de Produção e Gestão
LSO	Laboratório de Soldagem
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
TIG	Tungstênio Inerte Gás

UGPP	Uma Gota Por Pulso
VP	<i>Variable Polarity</i>

Lista de símbolos

AD	Coeficiente de Anderson-Darling	
A_p	Área de penetração	mm^2
A_r	Área de reforço ou convexidade	mm^2
Ar	Gás argônio	
CC^+	Corrente contínua e eletrodo conectado ao polo positivo	A
CC^-	Corrente contínua e eletrodo conectado ao polo negativo	A
CO_2	Mistura gasosa de dióxido de carbono	
D	Diluição	%
D_{base+}	Varição na base positiva (oscilograma)	
D_{pico-}	Varição no pico negativo (oscilograma)	
EN	Razão entre o tempo em que o arame eletrodo opera na polaridade negativa e o período total do formato de onda	%
EP	Percentual de eletrodo em polaridade positiva	%
F	Frequência de números de picos	
I	Corrente de soldagem	A
I^-	Corrente de soldagem na polaridade negativa	A
I^+	Corrente de soldagem na polaridade positiva	A
I_b	Corrente de soldagem de base	A
I_n	Corrente de soldagem na polaridade negativa	A
I_m	Corrente média de soldagem	A
I_p	Corrente de soldagem de pico positivo	A
K_b	Taxa constante relativa alimentação do arame na base positiva	m/min.A
K_n	Taxa constante relativa alimentação do arame na polaridade negativa	m/min.A

K_p	Taxa constante relativa alimentação do arame na polaridade positiva	m/min.A
l_a	Comprimento do arame eletrodo consumido	m
m_f	Massa do corpo de prova depois do processo de soldagem	g
m_i	Massa do corpo de prova antes do processo de soldagem	g
O_2	Gás oxigênio	
P	Penetração	mm
Pinte	Picos intermediários	
PO	Potencial de oxigênio	%
<i>Pvalue</i>	Nível de significância	
R	Reforço	mm
T	Período	Hz
t	tempo	
t_b	Tempo de permanência do eletrodo na corrente de base	ms
TD	Taxa de deposição	kg/h
t_{EN}	Tempo de permanência do arame eletrodo em polaridade negativa	ms
t_{EP}	Tempo de permanência do arame eletrodo em polaridade positiva	ms
TF	Taxa de fusão	kg/h
t_n	Tempo de permanência do eletrodo em corrente negativa	ms
t_p	Tempo de permanência do eletrodo em corrente de pico positivo	ms
t_s	Tempo de soldagem	ms
U	Tensão	V
$U*I$	Dispersão tensão versus corrente	
$U*Ir$	Resposta para o comportamento do processo	
V_a	Velocidade de alimentação	m/min
V_s	Velocidade de soldagem	cm/min
W	Largura do cordão	mm
α	Coefficiente da contribuição do arco para fusão	
β	Coefficiente da contribuição do efeito Joule para fusão	
η	Rendimento do processo de soldagem	%
ρ	Densidade linear do tipo do arame	g/m

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

No âmbito da indústria metal mecânica, somente os processos de fabricação que apresentam melhor desempenho e contribuem com maior produtividade ao menor custo são selecionados e executados. Um setor de crucial importância neste domínio são os processos de soldagem, principalmente o processo MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*) que tem sido explorado e desenvolvido através de estudos e pesquisas desde provavelmente, na primeira metade do século XX (CIRINO, 2009).

Ao decorrer do tempo, o processo de soldagem MIG/MAG foi herdando aperfeiçoamentos e modificações que auxiliaram no seu crescimento e aplicações em diversas áreas industriais. Parte desse fato se deve ao desenvolvimento de componentes eletrônicos empregados nas fontes de soldagem, que permitem manipular e controlar um conjunto de variáveis através de uma sistemática forma de onda de corrente e tensão.

Consequentemente, tem aberto um leque de oportunidades para a criação de novos métodos de soldagem derivados do MIG/MAG. Logo surgiram novas formas de ondas, combinações gasosas e modos de aplicações, tanto na polaridade positiva, quanto na polaridade negativa.

Porém, tais desenvolvimentos despertaram novas limitações para o processo, tal como soldar em polaridade negativa, pois o processo não se comporta de forma estável, a despeito de fornecer alta taxa de fusão. Da mesma forma, ocorrem limitações ao soldar em polaridade positiva, uma vez que o processo impõe alto valor de aporte térmico ao material base o que limita suas aplicações em chapas de menor espessura, a despeito de sua maior estabilidade.

Com o objetivo de reunir as vantagens dos processos de soldagem tanto em polaridade positiva quanto negativa, eclodiu a modalidade em corrente alternada ou MIG/MAG-CA, pela utilização de uma forma de onda senoidal. Posteriormente o sistema evoluiu e o processo MIG/MAG Pulsado – CA pode ser considerado atualmente um dos mais pesquisados pelas possibilidades de controle das fases tanto na polaridade positiva quanto na negativa.

O processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA ou originalmente VP-GMAW (*Variable Polarity Gas Metal Active Welding*) desfruta de um cenário favorável para sua aplicação. Isto se deve ao comportamento do mercado que proporciona sempre novos tipos de ligas metálicas diferenciadas, com menores valores de espessura comercialmente importantes e das quais necessitam serem unidas com alta qualidade pela aplicação de um método rentável que não ocasione perfurações e deformações nas chapas ou nos produtos resultantes.

Devido suas numerosas variáveis e níveis de controle, além da alta dinâmica nas suas variações bruscas de polaridades, o processo MIG/MAG Pulsado – CA conceitua-se como um processo instável, ainda em desenvolvimento e, portanto, de uso limitado em aplicações industriais. Porém pesquisas tem quebrado esse paradigma e demonstrado ser possível obter cordões de solda com excelente qualidade, operando em corrente alternada em chapas de alumínio, com vantagens específicas aos processos convencionais, principalmente com relação a taxa de fusão e aporte térmico ao material base, resultando em menores deformações, podendo ser aplicáveis a chapas mais finas. Entretanto, nota-se um desprovemento de informações em relação ao comportamento e viabilidade do processo aplicado aos aços de forma geral.

Neste contexto, este trabalho dedica-se à investigação do comportamento do processo MIG/MAG Pulsado – CA aplicado em chapas de aço baixo-carbono, considerando que uma das principais limitações da viabilidade do uso deste processo, expressa-se pelo grande número de variáveis para operação; pela avaliação da influência destas variáveis e, identificadas as mais influentes, necessita-se situar os níveis de trabalho destas. Obviamente que a ideia principal seria combiná-las de tal forma, a gerar uma condição estável de soldagem e com reflexos positivos nas características geométricas de formação do cordão de solda, bem como na produtividade do cordão.

Assim, a inversão das polaridades a cada ciclo no processo de soldagem em questão age no sentido de induzir uma condição altamente dinâmica que sem dúvida tende a comprometer a estabilidade do arco e, por consequência, deve afetar as propriedades citadas. Attingir este equilíbrio requer um desafio grande no sentido de adequar as variáveis, sendo este um dos objetivos deste trabalho.

Devido ao alto dinamismo do processo, a utilização de métodos estatísticos como meios de planejamento e análise de resultados é altamente desejável no sentido de identificar com confiabilidade, a validade dos resultados. Desta maneira, neste trabalho será utilizado o método de Projeto e Análise de Experimentos (DOE – do inglês *Design of Experiments*) como ferramenta principal para identificar a influência das principais variáveis nas características mencionadas, bem como avaliar se estas ferramentas se adéquam a um processo altamente dinâmico como é o caso aqui presente.

Para tanto, foi necessário se familiarizar com o processo por intermédio de testes preliminares, reproduzindo ensaios de pesquisadores dos quais alegam ter obtido uma condição estável para determinados níveis de trabalho, além de um estudo de combinações de parâmetros. Durante a execução destes testes foi legitimado a dificuldade em se manter a estabilidade do processo, uma vez que ocorrem alternâncias bruscas de polaridade sujeitando a extinção do arco a cada ciclo.

Para mensurar o processo, julgou-se necessário executar os dados de aquisição em uma ferramenta computacional, que opera com dados estatísticos para melhor visualização e confiabilidade nos dados obtidos. Com posse dos resultados, foi validado o que condiz a literatura clássica em relação à maior taxa de fusão e menores valores de penetração nas chapas.

Apesar de impor um desafio aos estudos para obter um método confiável de avaliação do comportamento do arco voltaico, o processo MIG/MAG Pulsado - CA encaminha-se a um patamar aceitável para aplicações no meio comercial.

1.1 Importância do tema

O processo de soldagem MIG/MAG é considerado um dos mais importantes meios de união de metais aplicados nos processos de fabricação, sendo largamente utilizado por características como produtividade e garantia de qualidade nos cordões gerados. Entretanto, apresenta algumas limitações na aplicação em chapas finas, como elevado valor de penetração do cordão de solda e maior aporte térmico sobre a peça. O processo MIG/MAG Pulsado – CA, ainda em desenvolvimento, tende a seguir o mesmo rumo, porém conseguindo, de certa forma, suprir algumas das limitações do processo original principalmente em aplicações em chapas de menor espessura, em razão de conceder menor aporte térmico, com a finalidade de promover a união, sem ocasionar imperfeições ou qualquer tipo de deformações na chapa e/ou

no cordão. Tem ainda a vantagem de melhorar a produtividade da solda, a despeito de um maior número de variáveis de trabalho e alto dinamismo provocado pelas inversões das polaridades que afetam a estabilidade do arco. Portanto, combinar as variáveis de trabalho no sentido de estabilizar estas condições de formação do arco, bem como avaliar a influência das mesmas na formação dos cordões soldados, tem sido alvo de intensas pesquisas e este trabalho se insere neste rol de investigação.

1.2 Objetivos

Tendo em vista as condições de trabalho disponíveis e de acordo com a literatura atual, o que se propõe como objetivo principal deste trabalho é identificar e analisar as possíveis variáveis mais influentes do processo em função dos cordões gerados e encontrar um modo ótimo para as combinações de variáveis na modalidade MIG/MAG Pulsado – CA, realizando análises da qualidade, características geométricas e econômicas dos cordões soldados em simples deposição ou BOP (*bead on plate*) em corpos de prova de aço carbono.

Além disso, outros objetivos denominados secundários, também serão estabelecidos cuja meta é:

- ✓ Contribuir com o entendimento do comportamento do arco voltaico ao decorrer do processo mediante um estudo concentrado nas dispersões e oscilações dos gráficos oriundos da corrente e tensão, comparando-os com os níveis de trabalho adotados das variáveis;
- ✓ Avaliar a aplicabilidade de métodos estatísticos baseados no projeto e análise de experimentos em processos altamente dinâmicos como é o caso do processo MIG/MAG Pulsado – CA.

1.3 Limitações

Tornam-se fatores limitantes na execução deste projeto de pesquisa:

- ✓ Os experimentos foram exclusivamente voltados ao aço carbono; qualquer reprodução dos parâmetros utilizados neste trabalho para soldagem em outro material pode não corresponder às expectativas mencionadas;

- ✓ Em virtude da análise da taxa de fusão, da taxa de deposição, largura, reforço, penetração e qualidade dos cordões de solda, foram realizadas soldas de simples deposição. Sendo assim, ensaios que analisam a resistência á deformações não foram analisados;
- ✓ Como mencionado anteriormente, as soldas foram realizadas em simples deposição; restringe-se neste contexto, apenas a posição plana de soldagem em todos os experimentos;
- ✓ Devido ao grande número de parâmetros reguláveis no processo, foi necessário manter fixas algumas variáveis do processo, tais como: material e diâmetro do arame eletrodo, gás de proteção 98%Ar+2%O₂, distância do bico com a peça (DBCP) e velocidade de soldagem, o que não torna possível analisar suas influências nos parâmetros avaliados.

1.4 Motivação e possíveis contribuições

A principal motivação deste trabalho foi a possibilidade de trabalhar com um processo de soldagem ainda em desenvolvimento técnico, portanto, pouco acessível em termos de utilização, devido aos requisitos técnicos dos equipamentos e, conseqüentemente, contribuir com melhor conhecimento do mesmo, em aplicações mais voltadas à realidade industrial em termos de materiais soldáveis como o uso de aços carbono. Assim, como contribuição do trabalho, espera-se colaborar para melhor conhecimento analisando, com auxílio das interações de corrente e tensão o comportamento do processo, bem como aumentar o acervo técnico/científico de utilização deste processo em atividades mais corriqueiras como é o caso de aços carbono.

1.5 Estrutura do trabalho

A divisão deste trabalho se baseia em cinco capítulos. Os capítulos estão estruturados de maneira a conduzir uma sequência lógica das etapas até as obtidas no processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA.

- **Capítulo 1 – INTRODUÇÃO:**

Na introdução é descrita a importância do tema, os objetivos, as limitações, as motivações e contribuições e a estrutura do trabalho.

- **Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:**

Aborda por meio de uma revisão da literatura conceitos fundamentais necessários para compreender o processo MIG/MAG Pulsado – CA, bem como os desenvolvimentos até o presente momento.

- **Capítulo 3 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS:**

Neste capítulo é exposto todo método experimental utilizado para realização do trabalho e descreve os passos e procedimentos seguidos para se chegar aos resultados.

- **Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES:**

São apresentados e discutidos os resultados obtidos para variação dos parâmetros do processo MIG/MAG Pulsado – CA.

- **Capítulo 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:**

Conclusões após todo o percurso bibliográfico percorrido e testes realizados são gerados neste capítulo, bem como são propostas sugestões para possível continuidade da pesquisa em relação ao processo estudado.

- **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

Relação do acervo bibliográfico necessário para confecção do trabalho.

- **ANEXOS:**

Gráficos e figuras estão anexadas para informações complementares.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem o propósito de formar um embasamento teórico por meio de informações coletadas na literatura que permitam uma caracterização dos aspectos relevantes do processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA. Pretende assim, criar uma base de conhecimentos que possa dar suporte ao desenvolvimento experimental e análise de resultados, no sentido de atingir os objetivos preconizados neste trabalho. Em função deste processo de soldagem estar ainda em um estágio de evolução, tais informações são absolutamente fundamentais no sentido de consubstanciar os resultados experimentais obtidos no desenvolvimento deste trabalho. Desta forma, fatos relevantes sobre aspectos fundamentais do processo serão aqui abordados, como, por exemplo, a influência da polaridade e seus reflexos na taxa de fusão, características geométricas do cordão, tipo de transferência metálica, formato de onda, gás de proteção, estabilidade do arco entre outros, bem como suas influências no cordão de solda e estabilidade do processo.

2.1 Aspectos fundamentais do processo MIG/MAG

Referenciada pela AWS (1991) por GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) ou MIG/MAG, termo popularmente usado no Brasil, este processo de soldagem se baseia na fonte de calor de

um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame sólido nu consumível, alimentado de forma contínua, e concomitantemente com a poça de fusão, sendo protegidos da atmosfera por gás inerte, ativo ou uma mistura de ambos (SCOTTI E PONOMAREV, 2008).

A **Figura 2.1** expõe basicamente os componentes necessários para execução do processo de soldagem MIG/MAG, onde se destacam como elementos básicos a fonte de soldagem, o sistema alimentador de arame, o gás de proteção e a tocha de soldagem.

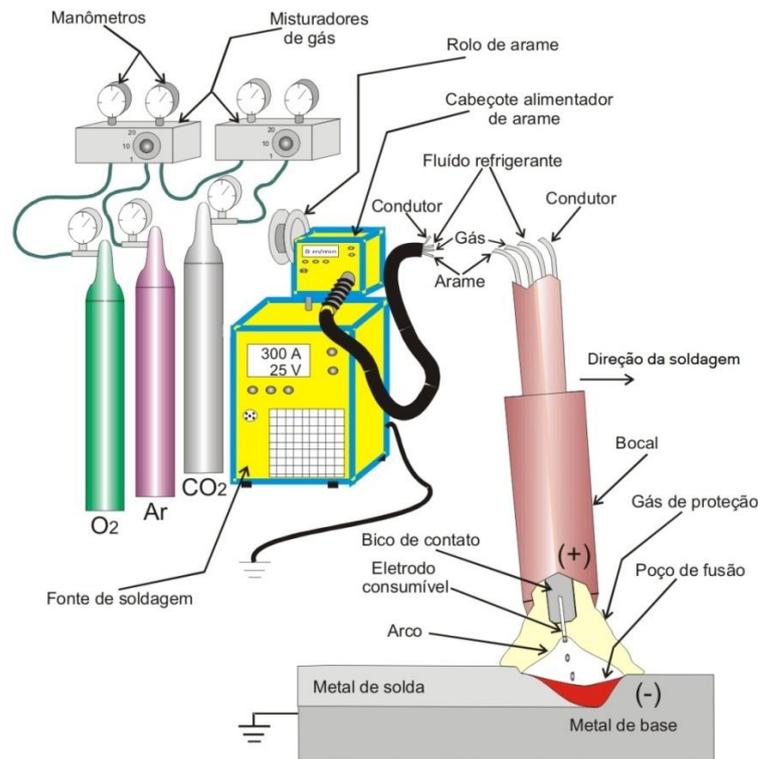


Figura 2.1 – Equipamento para execução do processo MIG/MAG. Fonte: Barra (2003).

Com a alimentação contínua do material a ser fundido, o processo de soldagem MIG/MAG se caracteriza pela alta produtividade e pode ser configurado de forma automática ou semi-automática. Outra característica é a pequena extensão do arame eletrodo em relação à peça, no qual é energizado por uma alta densidade de corrente que ocasiona um elevado consumo do arame. Tal fato proporciona alto valor da taxa de fusão em relação a outros processos de soldagem tais como TIG (Tungstênio Inerte Gás) ou eletrodo revestido (CIRINO, 2009).

Uma característica fundamental do processo se refere ao modo de transferência metálica que decorre por diversas formas nas quais dependem de fatores como: nível de corrente empregado, tipo de gás, velocidade de alimentação do arame, polaridade entre outros parâmetros (SCOTTI *et al.*, 2012). Dentre as formas comuns de transferência, normalmente

predomina a transferência por curto-circuito, globular ou *spray* aerossol dependendo do nível de ajuste para tensão/corrente ou alimentação do arame.

Em alguns casos, o processo de soldagem MIG/MAG apresenta limitações específicas para união de chapas finas metálicas ou até mesmo em soldagens fora de posição. Isto ocorre devido, principalmente, ao elevado valor da taxa de aporte térmico transferido ao metal base, o qual pode ocasionar imperfeições, deformações e inclusive perfurações inviabilizando a peça a ser soldada. Entretanto, ajustes nos modos de transferência, bem como desenvolvimento na concepção eletrônica dos equipamentos, têm permitido avanços significativos no sentido de superar tais dificuldades. Percebe-se assim que no decorrer dos últimos anos foram desenvolvidas pesquisas e investigações em relação às fontes de energia para soldagem baseadas em novos formatos de ondas e maneiras alternativas para a transferência metálica, das quais inovações tecnológicas foram agregadas tornando-se possível explorar novos métodos de união de chapas metálicas que atingissem ou melhorassem o controle operacional (HARWIG *et al.*, 2006).

Na utilização do processo de soldagem MIG/MAG, a polaridade é de fundamental importância em suas aplicações industriais. Normalmente, este processo é comumente executado em polaridade reversa (CC^+), condição esta que se apresenta de forma favorável para obtenção de uma ótima geometria do cordão de solda, bem como na estabilidade do arco elétrico (PUHL, 2011). Entretanto, com a exploração de novos métodos de soldagem conjuntamente com a necessidade de aplicação em chapas finas e maior tolerância com relação ao posicionamento das juntas, a utilização do processo de soldagem MIG/MAG em corrente alternada surge como uma oportunidade para sobrepor, em tese, as dificuldades anteriormente mencionadas e que será abordado neste trabalho de pesquisa.

2.2 Fundamentos do processo de soldagem MIG/MAG-CA

Scotti e Ponomarev (2008) afirmam que a corrente alternada não deveria ser uma alternativa para a corrente contínua em soldagem, devido à sua maior instabilidade (períodos sob tensão elétrica abaixo da tensão requerida durante transições de corrente). Apesar do atrativo da maior taxa de fusão, a polaridade negativa apresenta limitações na formação do cordão e geração de respingos. Porém, mesmo assim, o processo de soldagem MIG/MAG operando em corrente alternada tem sido objeto de desenvolvimento, principalmente com o advento de fontes com controles eletrônicos mais sofisticados.

Desta forma, este processo começou a ser apresentado na literatura sob diversas denominações como VP-GMAW (*Variable Polarity Gas Metal Arc Welding*) ou AC-GMAW (*Alternating Current*). No Brasil, o processo se popularizou como MIG/MAG-CA, que ilustra uma forma de onda que se alterna entre as polaridades (positiva e negativa). Entretanto, como esclarecem Nascimento e Vilarinho (2007) citando Talkington (1998), o termo CA é usado para descrever uma onda senoidal que alterna entre as polaridades positiva e negativa. O termo polaridade variável é usado para descrever formas de ondas (além da senoidal) nas quais a razão das duas polaridades podem ser variadas.

Segundo Mulligan (2003), o processo de soldagem MIG/MAG em corrente alternada combina as vantagens da soldagem convencional MIG/MAG (eletrodo conectado ao polo positivo), com o aumento na taxa de deposição e redução do aporte térmico que ocorre quando o processo é operado com o eletrodo em polaridade negativa. O uso dessa polaridade para controlar o aporte térmico sobre o metal base e penetração tem gerado interesse similar para o processo MIG/MAG em corrente alternada. No entanto, a instabilidade do arco e salpicagens inaceitáveis geradas pela forte força repulsiva nesta polaridade são obstáculos para sua utilização. Isso poderia ser facilmente resolvido com a utilização de fluxos com elementos estabilizantes, porém como o arame é maciço, o processo é operado quase exclusivamente em polaridade positiva.

Nascimento e Vilarinho (2007) citando Talkington (1998) afirmam que para superar os problemas de reignição do arco quando a corrente passa por zero durante mudança de polaridade em CA, necessita-se da aplicação inviável de altos picos de tensão, por questões de segurança. Entretanto, isso pode ser facilmente eliminado pelo uso de forma de onda retangular que reduz a quantidade de tempo que a corrente está, ou aproxima-se, de zero.

Portanto, nos modos em desenvolvimento do processo de soldagem MIG/MAG em corrente alternada o princípio de operação do processo parte do modo de soldagem MIG Pulsado e os formatos de onda da corrente são semelhantes aos observados no modo pulsado, porém com alternância nas polaridades.

A **Figura 2.2** apresenta o formato de onda do MIG Pulsado e MIG/MAG-CA, que a partir de agora para este trabalho será denominado MIG/MAG Pulsado – CA, para efeitos de comparação.

O formato de onda mostrado na **Figura 2.2** não é único. Dependendo da capacidade tecnológica dos equipamentos empregados e do tipo de material para a aplicação, outros ajustes podem ser implementados, ou seja, pode-se obter formatos de ondas com diferentes aspectos afim de melhorar o desempenho e a qualidade no processo de soldagem.

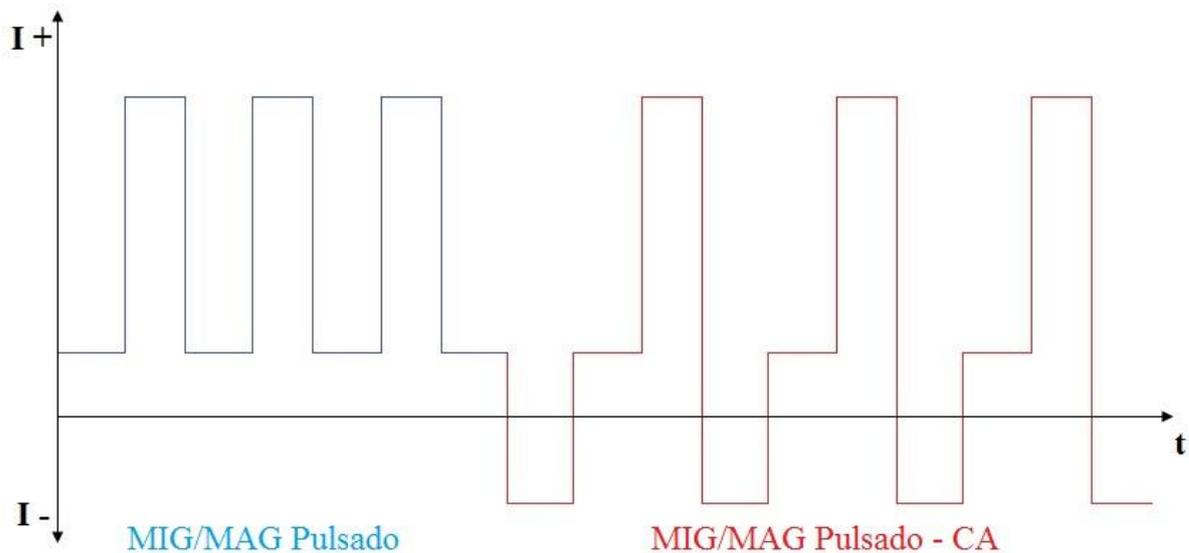


Figura 2.2 – Formato de onda para MIG/MAG Pulsado (azul) e para MIG/MAG Pulsado – CA (vermelho).

Na verdade, o que se percebe na fase positiva é a antecipação de uma inserção com base antes da fase de pico, cuja avaliação desta influência não é muito bem esclarecida na literatura e tem como um dos objetivos a ser estudado no desenvolvimento deste trabalho. Outras formas de inserção desta fase de base podem ser utilizadas, o que de certa forma diferencia os modos de pulsação na corrente alternada.

2.2.1 Formato de onda para corrente de soldagem

Como já visto, o formato de onda para o processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA é derivativo do processo MIG/MAG pulsado convencional com o acréscimo de uma base em polaridade negativa por um determinado período de tempo. Dessa forma, a corrente a cada período atravessa os limites das polaridades e ocasiona a extinção e reignição do arco. Conseqüentemente, são empregados elevados valores para picos de tensão com a função de preservar a ionização na coluna de arco para garantir a reignição.

Com o constante progresso das fontes de energia, foram introduzidas novas tecnologias na eletrônica de potência com inversores que possibilitam gerar diferentes formas de ondas. Tais problemas com a reignição do arco foram solucionados com a aplicação de formas de ondas retangulares que reduzem o valor do tempo em que a corrente se aproxima ou assume o

valor de zero, eliminando assim o risco de utilizar altos valores de tensão, como em formas de onda senoidal (CIRINO, 2009).

Nascimento *et al.* (2012) afirmam que o tipo de formato de onda com base positiva anterior ao pulso proporciona maiores valores na taxa de fusão. Os autores ainda sugerem que tal característica acontece em virtude da pausa após o pulso reduzir o aquecimento do arame-eletrodo enquanto que, se a pausa for ao início o aquecimento se torna mais lento. A **Figura 2.3** ilustra os formatos de onda citados.

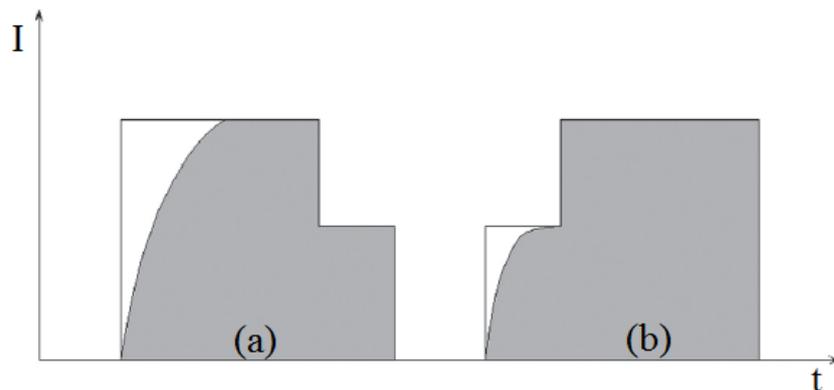


Figura 2.3 – Formatos de ondas e reflexos na taxa de fusão. (a) Onda com base após o pulso e menor taxa de fusão. (b) Onda com base antes do pulso. Fonte: Nascimento *et al.* (2012).

Santos (2008) com seus experimentos julga ser viável a utilização do processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA com forma de onda sem a base positiva. O autor obteve significativa redução de penetração e em depósitos regulares com qualidade comparável aos cordões executados pelo processo MIG Pulsado CC⁺.

Nascimento *et al.* (2009) em um comparativo com quatro diferentes formatos de onda concluíram que independentemente do tipo de onda, ao operar com o arame eletrodo em percentual de tempo em polaridade negativa (EN) de 70% ocorre grande instabilidade na transferência metálica. Os autores consideraram tal fato, devido à formação de gotas com diâmetros três vezes maior que o diâmetro do arame eletrodo e alto nível de respingos em função da força repulsiva atuante na gota em CCEN (Corrente Contínua Eletrodo Negativo), o que condiz com Lancaster (1986).

A **Figura 2.4** apresenta determinados tipos de ondas que podem ser comumente aplicadas ao processo de soldagem operando em corrente alternada.

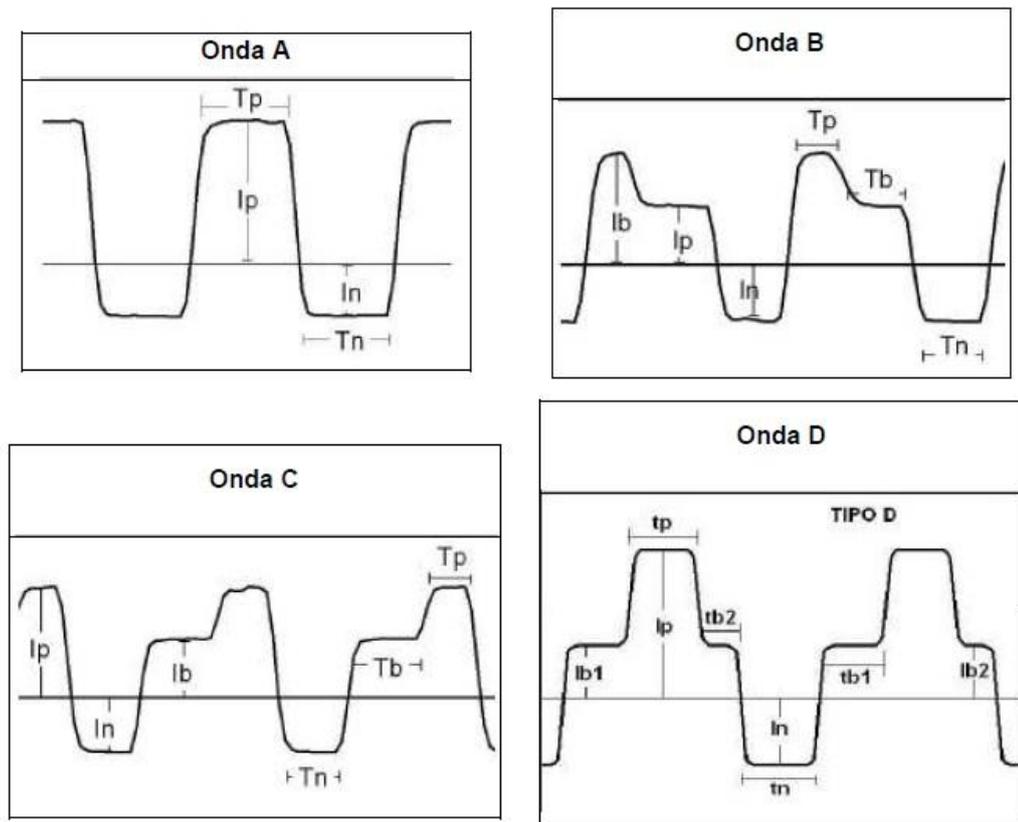


Figura 2.4 – Tipos de ondas para soldagem em corrente alternada. Fonte: Nascimento *et al.* (2009).

Conforme a **Figura 2.4** os parâmetros são definidos por:

- ✓ I_p , nível da corrente em polaridade positiva de pico [A];
- ✓ T_p , tempo da corrente em polaridade positiva de pico [ms].
- ✓ I_n , nível da corrente em polaridade negativa [A];
- ✓ T_n , tempo da corrente em polaridade negativa [ms];
- ✓ I_b , nível da corrente em polaridade positiva de base [A];
- ✓ I_{b1} , nível da corrente em polaridade positiva de base antes do pico [A];
- ✓ I_{b2} , nível da corrente em polaridade positiva de base após o pico [A];
- ✓ T_b , tempo da corrente em polaridade positiva de base [ms];
- ✓ T_{b1} , tempo da corrente em polaridade positiva de base antes do pico [ms];
- ✓ T_{b2} , tempo da corrente em polaridade positiva de base após o pico [ms].

Nascimento (2011) adotou valores de EN com 30 e 50% para os formatos de onda B, C e D da figura anterior e obteve a condição de UGPP (Uma Gota Por Pulso) com diâmetros equivalentes ao do arame eletrodo. Porém, para o formato “A”, que não possui uma base para

suavizar as inversões de polaridades, a transferência metálica foi de forma irregular não atingindo a UGPP, como mostra a **Figura 2.5**.



Figura 2.5 – Transferência metálica operando com EN 50% e formato de onda “A”. Fonte: Nascimento (2011).

Faria *et al.* (2007) ao utilizarem formas de onda A, B e C referente à **Figura 2.4**, também averiguaram boa performance do processo, entretanto, concluíram que esses formatos não influenciaram estatisticamente a geometria do cordão de solda aplicada às chapas de alumínio.

No formato de onda “C” (adotada neste trabalho), Vilarinho *et al.* (2009) afirmam que a transferência metálica é realizada de forma regular e estável sempre na polaridade positiva onde a gota se destaca no final do pulso positivo e ao cruzar o arco sofre ação de forças repulsivas na polaridade negativa, que provocam o aquecimento e desaceleração suavizando sua transferência metálica e diminuindo o nível de respingo. Também notam um aumento na penetração.

Para Ueyama *et al.* (2005) e Tong *et al.* (2001) a base após o pulso para chapas de alumínio, tem a finalidade de impedir que a gota se destaque em polaridade negativa para prevenir a produção de respingos.

Santos (2008) cita que a utilização de rampas suaves pode ter uma significativa contribuição para reduzir o ruído acústico gerado em alguns equipamentos.

Tong *et al.* (2001) mencionam que para uma forma de onda de corrente modulada em baixa frequência, o processo de soldagem CA é altamente competitivo e produtivo com soldas de qualidade em chapas finas de alumínio com grande distanciamento entre elas, a qual fornece cordões com alto valor de reforço e o mínimo de deformação para o metal base conforme mostra a **Figura 2.6**.

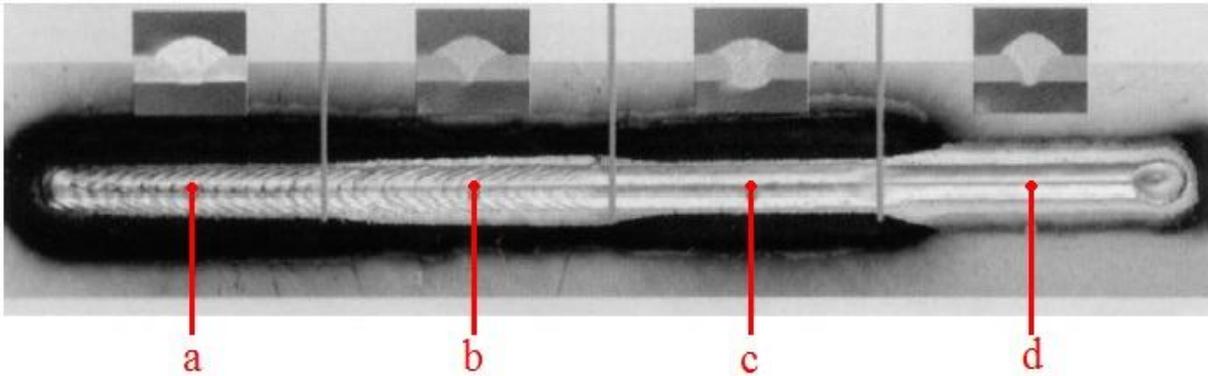


Figura 2.6 – Comparativo para união de chapas de alumínio: (a) CC^+ modulada em baixa frequência, (b) CA modulada em baixa frequência, (c) CC^+ e (d) CA. Fonte: Adaptada de Tong *et al.* (2001)

Ueyama *et al.* (2011) também comprovaram o bom desempenho do processo aplicado a união de chapas finas de alumínio. Ao realizarem uma comparação para uma taxa de alimentação constante, a utilização de EN com 0% exigia uma corrente de 100A para efetuar a união das chapas, ao passo que para EN com 40% a corrente necessária para realizar a solda diminuiu para 65A, reduzindo assim o calor imposto nas chapas.

Nascimento *et al.* (2012) afirmam que, tanto para os formatos de onda com base positiva antes ou após o pulso, não influenciam no reforço do cordão tanto quanto o percentual de tempo em que o arame eletrodo permaneceu em polaridade negativa (%EN). Concluíram que há acúmulo de calor no arame eletrodo gerado em função do maior tempo de envolvimento do arco que produz um aumento do volume de metal depositado e menor molhabilidade resultando em maiores reforços.

Nascimento (2011) menciona a grande diversidade de formatos de ondas para corrente aplicada no processo MIG/MAG Pulsado – CA, porém existe uma escassez nas informações relativas aos benefícios ou inferioridade de cada onda, assunto o qual Santos (2008) sugere ainda carecer de mais investigações.

2.2.2 Principais parâmetros do processo

Como exposto na seção anterior, dentre todos os formatos de ondas definidos, há um interesse crescente pelo formato de onda pulsado com antecipação da fase de base à fase de pulso comum para chapas de aço carbono. Os parâmetros de regulação para este formato de onda de corrente podem ser representados pela *Figura 2.7*.

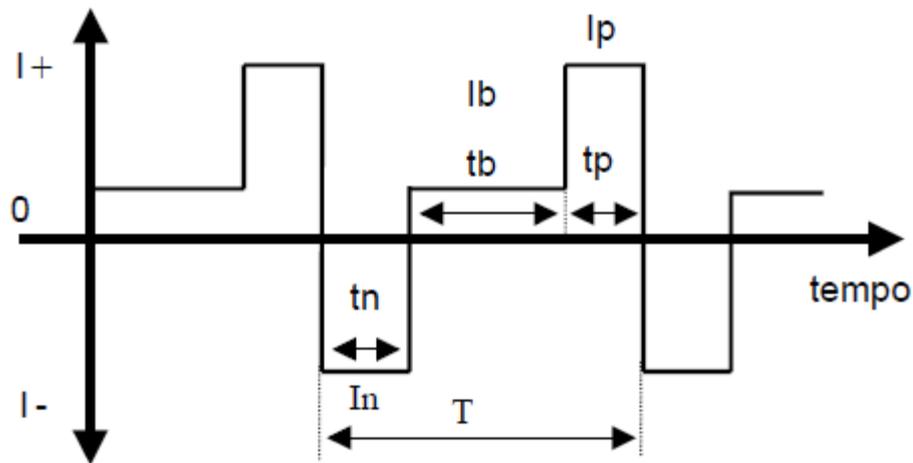


Figura 2.7 – Esquema do formato de onda comum para MIG/MAG Pulsado – CA destinado para aços e suas variáveis. Fonte: Gohr (2002).

Conforme a **Figura 2.7** os parâmetros são definidos por:

- ✓ I^+ , corrente de soldagem na polaridade positiva [A];
- ✓ I^- , corrente de soldagem na polaridade negativa [A];
- ✓ T , período [Hz];
- ✓ I_n , nível da corrente em polaridade negativa [A];
- ✓ t_n , tempo da corrente em polaridade negativa [ms];
- ✓ I_b , nível da corrente em polaridade positiva de base [A];
- ✓ t_b , tempo da corrente em polaridade positiva de base [ms];
- ✓ I_p , nível da corrente em polaridade positiva de pico [A];
- ✓ t_p , tempo da corrente em polaridade positiva de pico [ms].

Um fator preocupante reconhecido por vários autores está associado à estabilidade do processo que a cada semi-ciclo de corrente ocorre inversão da polaridade, momento em que o arco se apaga e reacende com uma polaridade diferente (GOHR, 2002; MODENESI E REIS, 2007; SCOTTI *et al.*, 2012). Gohr (2002) entre outros pesquisadores cita que no exato momento em que ocorre a mudança das polaridades e ocasiona a extinção do arco, é gerada instabilidade no processo de transferência metálica, fato que está presente em todos os formatos de onda do processo MIG/MAG Pulsado – CA.

Scotti e Monteiro (2012) direcionaram seus estudos a uma metodologia para definir os parâmetros do processo MIG/MAG Pulsado – CA. Os pesquisadores explicam que, por se tratar de um processo de alternância de polaridades, deve-se garantir que a transferência metálica ocorra somente na polaridade positiva condicionada a ocorrência da UGPP, o que

condiz com Dutra *et al.* (1992), com diâmetro próximo ao do arame eletrodo. Sendo assim, inicialmente é selecionado o formato de onda de corrente que atenda essa necessidade. Logo em seguida, os valores de corrente média na polaridade positiva, o valor de percentual de tempo em que o eletrodo trabalha em polaridade negativa (EN), a seleção do gás de proteção e o tipo de arame eletrodo.

A definição de um nível de trabalho para a corrente de pulso em MIG/MAG Pulsado – CA irá depender da finalidade da aplicação. Scotti e Monteiro (2012) ressaltam que, se almejar maior penetração, o valor adotado será excessivamente maior que a corrente de transição, já no caso de revestimento o valor será ligeiramente maior que a corrente de transição.

A corrente de base positiva pode ser aplicada antes e/ou depois da corrente de pulso positivo com a função de evitar a inversão brusca das polaridades e estabilizar o arco. A aplicação da corrente de base antes do pulso positivo tem a função de manter a gota antes da corrente pico que intensifica a força eletromagnética e ocasiona o destacamento da gota metálica. Scotti e Monteiro (2012) afirmam que a corrente de base deve ser selecionada tendo em vista a corrente média desejada e recomenda valores acima de 40A.

Em relação à corrente na polaridade negativa, Santos (2008) e Nascimento (2011) obtiveram diferentes resultados ao efetuarem em suas pesquisas cordões de soldas por simples deposição. A intensidade dessa corrente influenciou na transferência da gota, conforme mostrado na **Figura 2.8**. Percebe-se que, ao se utilizar o mesmo percentual de tempo de permanência do eletrodo em polaridade negativa, índice que pode ser determinado pela **Equação (2.1)**, a utilização de uma corrente na fase negativa de 60A conduziu a uma transferência metálica mais estável (SANTOS, 2008). Ao passo que uma corrente de 198A levou a uma forma de transferência repulsiva (NASCIMENTO, 2011).

De toda forma, para Nascimento e Vilarinho (2007) o modo de transferência em corrente alternada é tipicamente pulsado globular, com crescimento substancial das gotas durante o período EN devido às forças de repulsão presentes durante esta fase. Segundo os autores, outro fator que influencia no tamanho das gotas transferidas se refere à frequência de pulsação e, neste sentido, menor frequência provoca o aumento do tamanho da gota, efeito este, porém, inferior ao do período EN.

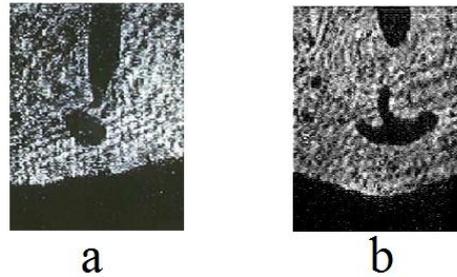


Figura 2.8 – Destacamento da gota sob diferentes níveis de corrente negativa. (a) Forma estável com corrente negativa de 60A. (b) Forma repulsiva com corrente negativa de 198A.

Fonte: Santos (2008) e Nascimento (2011).

Nascimento (2011) sugere que não é recomendável adotar longos valores de tempo para a permanência do arame eletrodo em polaridade negativa em função das forças repulsivas que realizam o crescimento demasiado da gota metálica, já que o ideal é obter gotas de menores diâmetros e modo de transferência metálica estável.

Para calcular o percentual de tempo em que o arame eletrodo trabalha em polaridade negativa é necessário utilizar a **Equação 2.1**:

$$\%EN = \left(\frac{tn}{tn + tb + tp} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

Onde:

$\%EN$ = Percentual de tempo em que o arame eletrodo opera em polaridade negativa (%);

tn = Tempo de permanência do arame eletrodo em polaridade negativa (ms);

tb = Tempo de permanência do arame eletrodo na base positiva (ms);

tp = Tempo de permanência do arame eletrodo no pico positivo (ms).

Para calcular o tempo de permanência do arame eletrodo em polaridade negativa é necessário utilizar a **Equação 2.2**:

$$tn = \frac{\%EN \times (tb + tp)}{1 - \%EN} \quad (2.2)$$

Para a determinação da velocidade de soldagem Modenesi (2012) mencionou que, ao elevar a velocidade de deslocamento, ocasiona influência nas características geométricas como largura e penetração, isso por causa da redução do aporte térmico.

Entretanto a definição correta para o valor da velocidade de alimentação no processo MIG/MAG Pulsado – CA é um fator preocupante, visto que há uma tendência de maior

consumo do arame eletrodo em polaridade negativa. Puhl (2011) obteve um cordão de solda em corrente alternada com ótimas características geométricas, conforme apresenta a **Figura 2.9**. Para tal resultado a velocidade de alimentação foi diferenciada com valor de 8m/min para o eletrodo em polaridade positiva e 10,7m/min para o eletrodo em polaridade negativa.



Figura 2.9 – Formato do cordão obtido com variação da velocidade de alimentação nas polaridades positiva e negativa. Fonte: Puhl (2011).

No entanto, Puhl (2011) constatou que o alimentador do arame eletrodo não pode suprir o valor exato fixado, devido à alta dinâmica do processo, e resultou em variações de velocidade nas mudanças de polaridade como mostra a **Figura 2.10**. Posteriormente, concluiu que a melhor solução foi utilizar uma velocidade de arame constante que atendesse as duas polaridades.

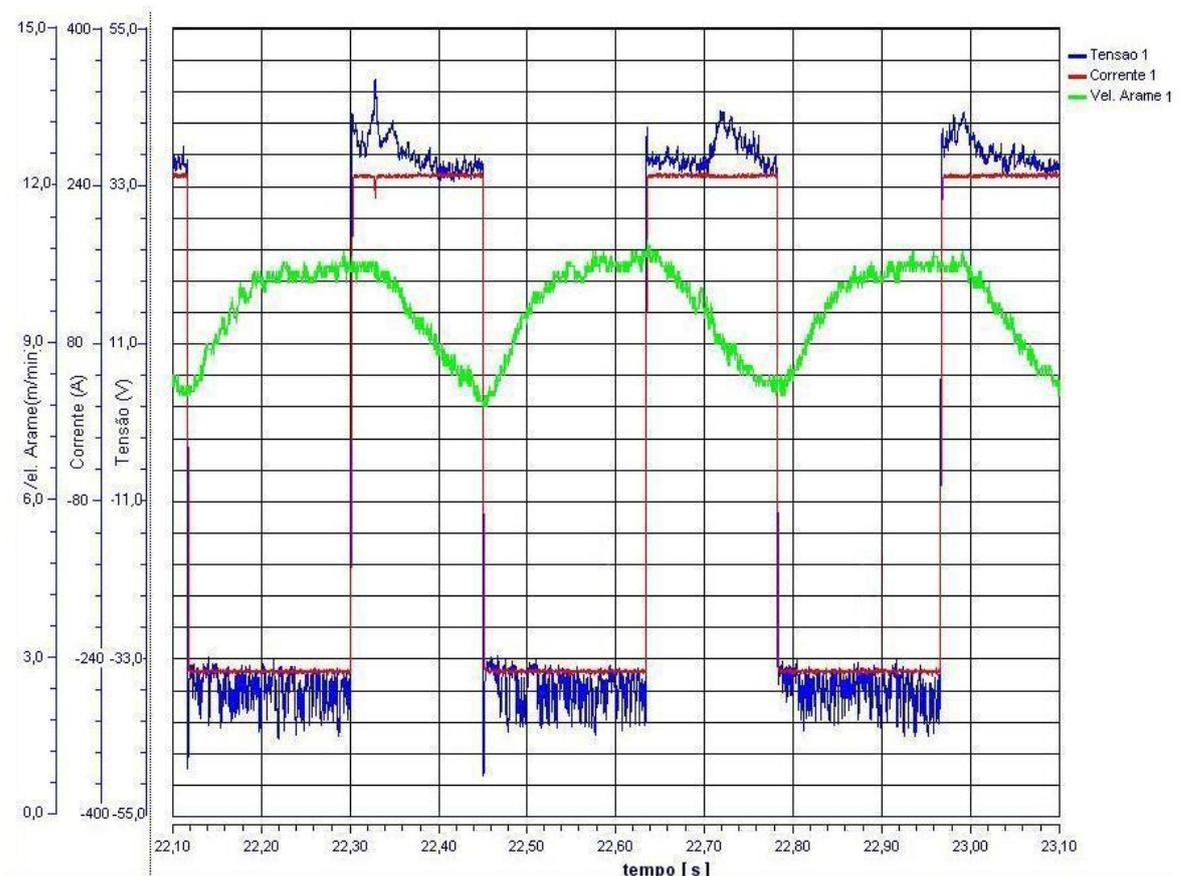


Figura 2.10 – Oscilograma de (I, U e Va) versus tempo. Fonte: Puhl (2011).

Neste sentido, Santos (2008) em uma pesquisa sobre MIG/MAG-CA pulsado aplicado ao aço, derivou relações entre a velocidade de alimentação do arame e a corrente média, mostrando haver diferenças significativas para cada polaridade, como se pode observar pelas *Equações (2.3) e (2.4)*, correspondentes à polaridade negativa e positiva respectivamente.

$$Va = \alpha \times Im(r) + \beta \times L \times Im(r)^2 \quad (2.3)$$

Onde: $\alpha = 0,0259$ (m/min.A);

$\beta = 0,0156$ (m/min.A);

L = Comprimento do arame eletrodo (m);

$Im(r)$ = Corrente média real (A).

$$Va = Kp \times Im \quad (2.4)$$

Onde: $Kp = 0,0261$ (m/min.A).

Através de uma análise gráfica referente à **Figura 2.11**, Santos (2008) concluiu que a taxa de fusão na polaridade negativa não apresenta um comportamento linear como na polaridade positiva. Entretanto como os equipamentos não permitem um ajuste variável desta velocidade em cada polaridade em separado, o mesmo autor derivou uma relação média ponderada entre as polaridades negativa e positiva que permitisse uma boa estabilidade do arco.

A **Equação (2.5)** mostra a relação determinada e que será aplicada neste trabalho como referência para a determinação da velocidade real a ser utilizada.

$$Va = \frac{(Kp \times Ip \times tp) + (Kn \times In \times tn) + (Kb \times Ib \times tb)}{tp + tn + tb} \quad (2.5)$$

Onde: $Kn = 0,032$ (m/min.A);

$Kp = 0,0261$ (m/min.A);

$Kb = 0,0261$ (m/min.A).

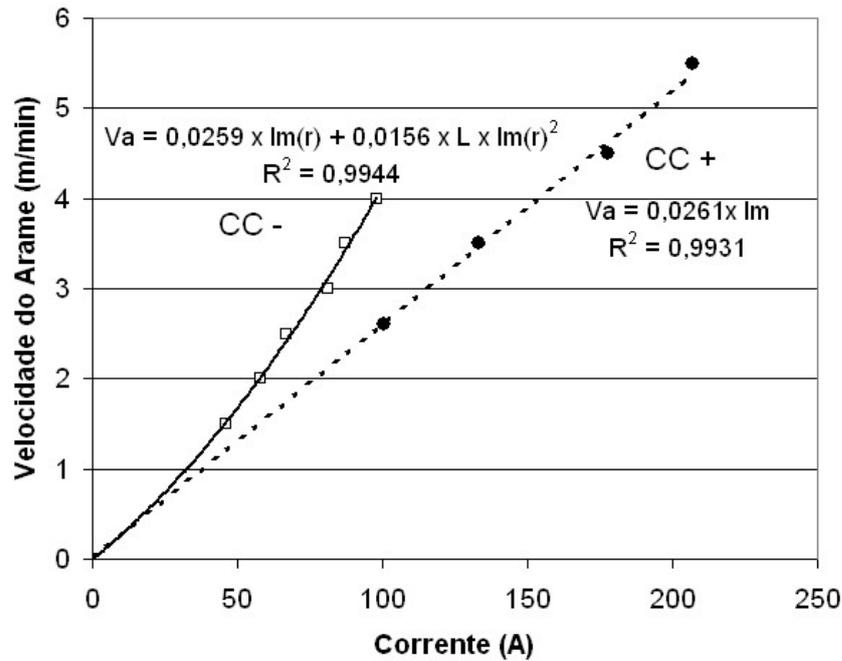


Figura 2.11 – Relação entre a alimentação do arame e corrente média em CC⁻ e CC⁺. Fonte: Santos, (2008).

Outro requisito de extrema importância no processo é a seleção ideal do gás ou mistura gasosa para proteção do arco. Marques *et al.* (2007) mencionam que o tipo de gás ou de mistura gasosa pode gerar influências no formato do cordão, em função de fatores como: mudanças nas condições de transmissão de calor para a peça, modo de transferência metálica, pressão do arco sobre a poça de fusão e no movimento do metal líquido na poça de fusão.

2.2.3 Misturas de gases para proteção do arco elétrico

O gás de proteção influencia nos quesitos penetração, geração de respingos, acabamento e perfil dos cordões de solda, ou seja, nos aspectos geométricos de forma diferente dependendo da polaridade utilizada (SOUZA *et al.* 2009).

Harada *et al.* (1999) ao utilizar correntes relativamente elevadas, relata que o emprego de gases de proteção como argônio, oxigênio e dióxido de carbono, colabora para o sucesso da operação nos arcos em polaridade negativa.

O teor dos componentes das misturas tem influência substancial no perfil do cordão. Nota-se de forma geral que, a partir do momento em que se aumenta a concentração de CO₂ na mistura gasosa, há redução na convexidade do cordão, porém o aspecto superficial do cordão é prejudicado por reações exotérmicas (NASCIMENTO *et al.* 2012).

Souza *et al.* (2009) ao utilizarem uma mistura gasosa com 82%Ar+18%CO₂ notaram um aumento na largura e menor convexidade do cordão, porém com piores aspectos superficiais, além de menor taxa de fusão e penetração em comparação com 98%Ar+2%O₂ operando em um mesmo nível de corrente.

Santos (2008) não constatou forte repulsão da gota e observou que a transferência metálica foi realizada com uma gota por pulso firmando que, além dos níveis das variáveis empregadas, a proteção gasosa de 92%Ar+8%CO₂ mostrou-se adequada para soldagem em corrente alternada em aços.

Cirino (2009) através de ensaios preliminares observou que o uso de argônio puro como gás de proteção gera instabilidade no arco na fase de polaridade negativa. Porém conseguiu uma melhoria substancial na estabilidade e aparência superficial nos cordões de solda ao utilizar uma mistura gasosa 98%Ar+2%O₂. O mesmo autor notou que a presença de O₂, propiciou a oxidação da gota metálica e do eletrodo, que pode ter amenizado o efeito da polaridade negativa sobre a gota metálica. Possivelmente, elas se desprenderam com menores volumes, tornando-as menos vulneráveis a ação catódica de repulsão, condizente com Scotti e Ponomarev (2008) que mencionam obter menor tensão superficial com presença de O₂ na mistura gasosa de proteção. Tanto para Cirino (2009) quanto para Nascimento (2011) a utilização desta mistura gasosa conduziu a uma taxa de fusão em média 50% maior na fase negativa.

Nascimento (2011) realizou experimentos com misturas gasosas com teores crescentes de oxigênio (1%O₂, 2%O₂ e 8%CO₂) e corrente fixa de 200A. Observou que para ambas as polaridades, independentemente do tipo de gás utilizado, houve uma propensão para maior taxa de fusão em CCEN do que para CCEP. Porém, o autor notou uma modesta influência na ação dos gases e concluiu que, para maior taxa de fusão, foi necessário menor potencial oxidante contido na mistura gasosa, ou seja, a maior taxa de fusão foi para a mistura binária contendo 99%Ar+1%O₂.

Souza *et al.*(2009) confirmaram que a penetração da solda está associada ao tipo de gás empregado e não apenas à polaridade usada. Quanto ao nível de respingos, os autores observaram maior quantidade de respingos em polaridade negativa utilizando uma mistura gasosa contendo CO₂ e, também constataram as observações realizadas por Nascimento (2011) de que o arco “gira” em torno da gota mudando sua direção, fenômeno que não ocorria na utilização de O₂.

2.3 Influência das polaridades no processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA

Pesquisadores como Gohr (2002), Puhl (2011) entre outros, destacam a mudança de polaridade ao decorrer do processo como o fator mais impactante sobre a taxa de fusão do que outras variáveis tais como corrente de soldagem e distância do bico com a peça.

No processo MIG/MAG operando em CCEN o fator de destaque para os problemas de instabilidade está associado à forte força repulsiva que atua no hemisfério inferior da gota, localizado na ponta do arame eletrodo. Tal problema pode ser relacionado com a alta mobilidade da raiz catódica na superfície da gota devido às reações dentro do fluxo do arco e o catodo (LANCASTER, 1986).

Norrish (1992) relata que, ao utilizar o arame eletrodo em polaridade negativa, a gota formada na extremidade do arame eletrodo pode, em alguns casos, ser lançada para os lados em função dos jatos de vapores ou das forças de plasma eletromagnéticas induzidas que atuam na raiz do arco para suspender o metal fundido. No momento em que a gota é suspensa, um campo magnético assimétrico é formado no qual a gota pode ser rotacionada ou expulsa sob influência das forças resultantes.

Tal fato torna-se indesejável devido ao elevado nível de respingos e baixa estabilidade no processo de transferência, cenário semelhante retratado por Talkington (1998) conforme mostra a **Figura 2.12**:

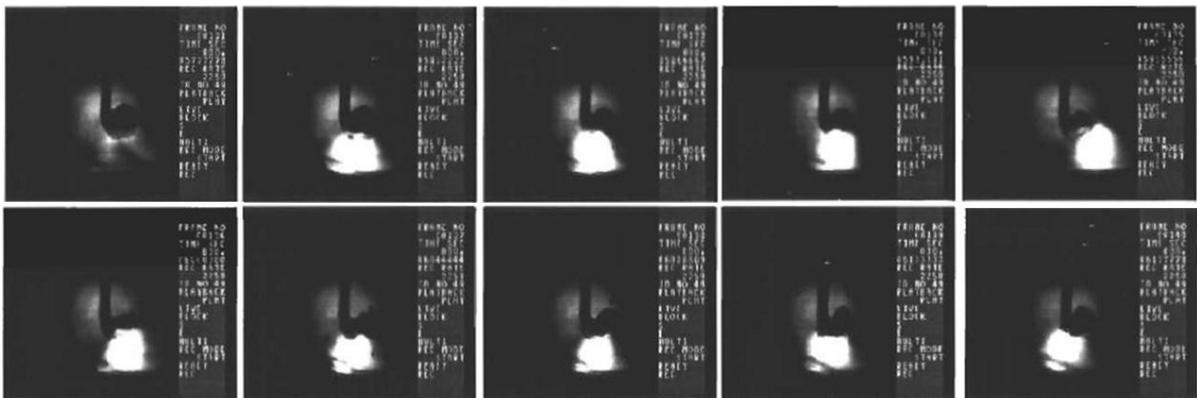


Figura 2.12 – Gota “girando” ao redor do arco. Fonte: Adaptada de Talkington (1998).

Harwig (2000) menciona que em CCEN ocorre instabilidade na transferência globular, uma vez que são geradas gotas com diâmetros maiores que do arame eletrodo. Entretanto, afirma que ao empregar elevadas correntes associadas com uma mistura gasosa de proteção ativa é possível diminuir tal valor.

Santos (2008) ao realizar experimentos com o arame eletrodo em diferentes percentuais de EN (30, 50 e 70%) confirma, como previsto pela literatura que, quanto maior for o percentual de tempo de permanência do arame eletrodo na polaridade negativa, menor será a penetração. A **Figura 2.13** mostra os perfis macrográficos dos cordões com diferentes percentuais de tempo.

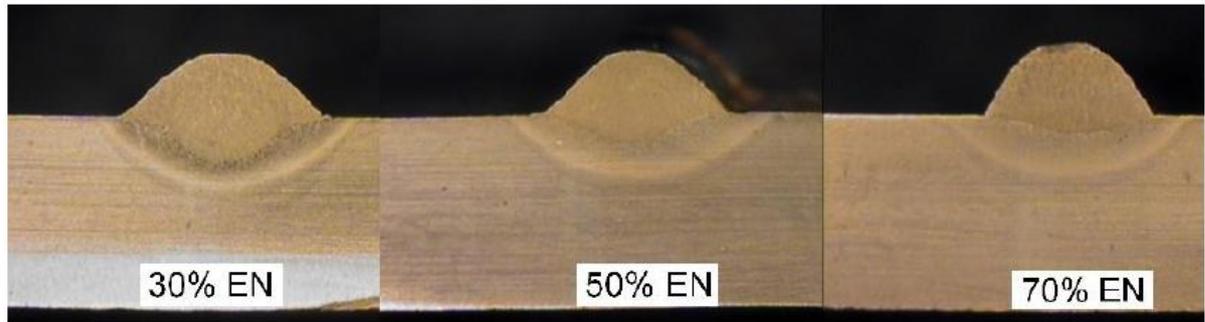


Figura 2.13 – Cordões gerados com diferentes valores para EN. Fonte: Santos (2008).

Em um consenso na literatura a configuração CC^+ se caracteriza por fornecer boa estabilidade do arco elétrico e penetração da solda, nível reduzido de respingos e condições favoráveis para se soldar com diferentes modos de transferência metálica.

De acordo com Vilarinho *et al.* (2009) entre outros pesquisadores, as características do arco elétrico em CC^+ (quando comparadas com CC^-) basicamente são explicitadas pela baixa eficiência de fusão do arame eletrodo, onde o fluxo de elétrons segue do metal base para o consumível e a maior fração do calor é concentrada no metal de base. Enquanto que, na polaridade direta negativa (CC^-), o arco apresenta maior eficiência de fusão do arame eletrodo, onde o fluxo de elétrons parte do arame eletrodo sentido ao metal base, sendo que a maior concentração de calor está localizada no arame eletrodo.

Essers e Walter (1979) notaram que, menor penetração está relacionada com a redução da velocidade das gotas, devido à mancha catódica localizada na parte sólida do arame eletrodo que ocasiona um desvio no fluxo de corrente em relação à gota, diminuindo o efeito *pinch* que reduz a penetração.

De acordo com a **Figura 2.14**, Cirino (2009) demonstra que ao efetuar soldas em CC^+ o cordão aparenta ser mais liso, largo, com melhor molhabilidade e com relativa penetração, típica de uma transferência goticular. Entretanto, em CC^- o autor gera um cordão moderadamente com menor largura, com maior convexidade do reforço, menor penetração e área fundida. Ao passo que, com os mesmos parâmetros, porém com maior velocidade de soldagem, o cordão mostrou-se menos largo em função do menor aporte térmico.

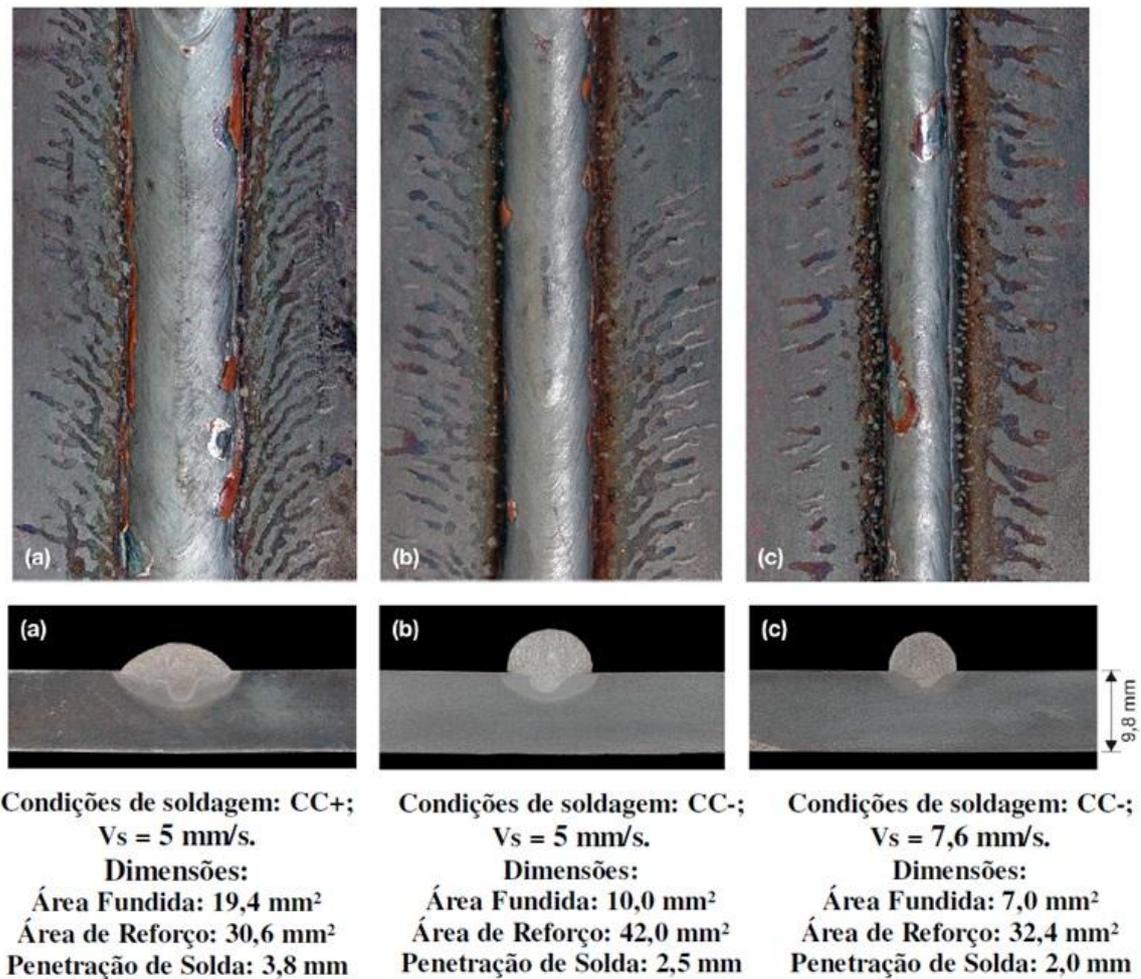


Figura 2.14 – Influência da polaridade nas características dos cordões de solda. Fonte: Cirino (2009).

2.3.1 Fenômeno da escalada do arco como propulsor para a taxa de fusão

O fenômeno da escalada do arco é de fundamental importância para que o processo MIG/MAG operando em corrente alternada atinja níveis de produtividade crescente em função de ser o responsável pela maior taxa de fusão na polaridade negativa.

Tong *et al.* (2001) citam que na condição CC⁺ o arco envolve a gota metálica em formação na extremidade do arame (região anódica), no qual favorece a ação da força eletromagnética, responsável por destacar a gota, fato que gera significativa estabilidade no arco. Por outro lado, na polaridade negativa o arco procura locais favoráveis para a emissão de elétrons; esses locais são pontos catódicos onde estão presentes óxidos, localizados na extensão sólida do arame eletrodo. Isso faz com que o arco “escale” em busca desses pontos e

o calor imposto pelo arco ao longo do arame eletrodo beneficia a sua fusão (aumento da taxa de fusão), porém resulta em uma gota maior que o diâmetro do arame eletrodo que pode ser repelida bem distante da poça de fusão.

Cirino (2009) ilustra este comportamento através da **Figura 2.15**, onde é possível notar em polaridade positiva, o núcleo central de alta energia (característica típica de arcos em atmosferas de argônio) e o arco ancorado diretamente sobre a gota na extremidade do arame eletrodo faz superaquecer a gota metálica que é transferida para a poça de fusão. Entretanto, na polaridade negativa percebe-se que o núcleo de energia é menos denso e ocorre um salto do arco, envolvendo a extremidade do arame eletrodo.

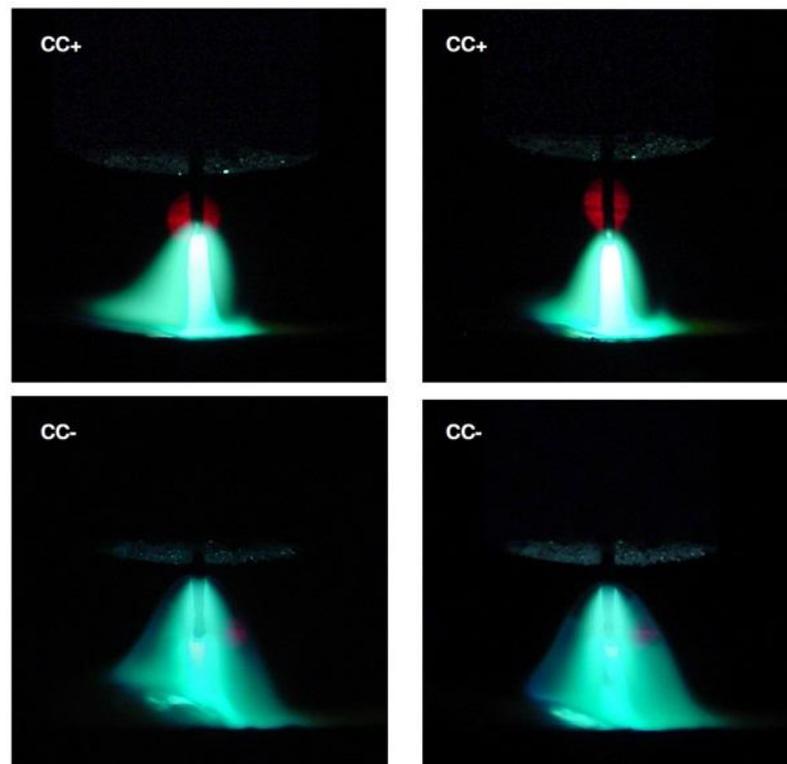


Figura 2.15 – “Escalada” do arco. Fonte: Cirino (2009).

Lancaster (1984) associa a essa “escalada do arco” que envolve a região sólida do arame como resultado da limpeza catódica que procura a camada de óxido ainda não removida. Apesar de haver maior aproveitamento do calor gerado para a fusão do arame, ele é disperso ao longo de toda extensão e Cirino (2009) supõe que a gota metálica é destacada e transferida, com menor calor para a poça de fusão.

Souza *et al.* (2009) confirmaram menções da literatura clássica que há maior taxa de fusão ao utilizar a polaridade CC^- , não em função de maior calor gerado na conexão catódica e sim pelo resultado que indica que a maior taxa de fusão está ligada à escalada do arco pelas

paredes da ponta do arame atingindo uma maior área do eletrodo e conseqüentemente maior eficiência térmica.

De certa forma, o comportamento do arco nestas diferentes polaridades tem efeito sobre a sua estabilidade, visto que a velocidade de alimentação do arame ocorre de forma constante. Neste sentido, Puhl (2011) afirma que durante a polaridade positiva a taxa de alimentação do arame é superior a taxa de fusão ocasionando um aumento gradativo da extensão sólida do arame. Porém, em polaridade negativa, ocorre o contrário fazendo com que a extensão sólida do arame vá diminuindo ao decorrer da fase.

Nota-se que esta escalada do arco é influenciada pela formação de pontos catódicos e os gases de proteção tem uma importância fundamental na ocorrência do fenômeno. Nascimento (2011) afirma que em misturas gasosas com maiores níveis de CO_2 , menor será a escalada do arco, já que fica limitado no mais baixo hemisfério da gota em função das menores zonas de condução o que dificulta a escalada do arco no eletrodo.

A **Figura 2.16** mostra o comportamento da gota metálica ao empregar uma mistura gasosa com alto teor de CO_2 e também apresenta um esquema do possível formato do arco, respectivamente, para baixo e alto teor de CO_2 .

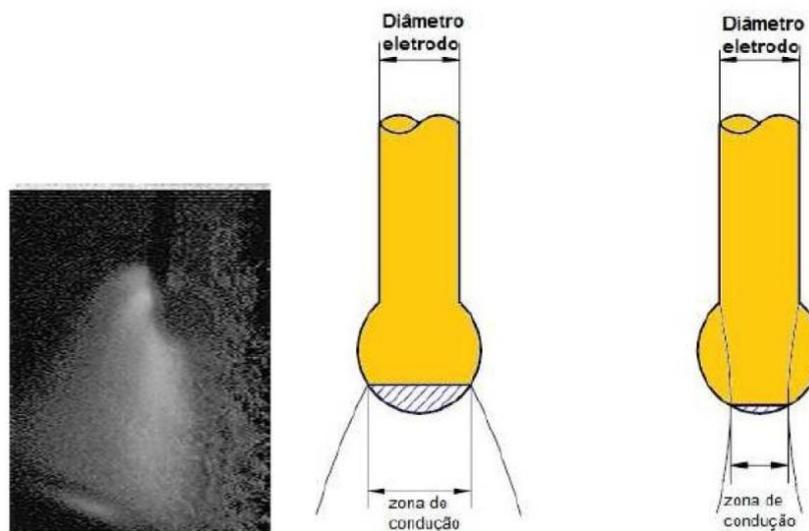


Figura 2.16 – Comportamento da gota com a mistura gasosa 82%Ar+18% CO_2 / Esquema do possível formato do arco para baixo e alto teor de CO_2 , respectivamente. Fonte: Adaptada de Nascimento (2011).

Nascimento (2011) ao empregar gases com atributos diferentes (O_2 e CO_2) calculou PO (Potencial de Oxigênio) citado por Stenbacka e Person (1989), com a finalidade de comparar os teores de oxigênio livre para formação de óxidos. O resultado observado foi a ocorrência

de uma maior escalada do arco para a mistura com 98%Ar+2%O₂ a uma corrente de pico de 250A, porém com correntes menores o resultado não foi condizente.

Nascimento (2011) realizou ainda uma comparação no tocante escalada do arco, com as misturas gasosas tendo como gás base argônio, com teores de 2%O₂, 5%O₂, 8%CO₂ e 18%CO₂ e constatou que o arco tende a saltar mais para a parte sólida do arame eletrodo em situações com menor teor de oxigênio, devido ao potencial de ionização.

A **Figura 2.17** elucida os resultados de Nascimento (2011), para os gases de mesma natureza. Observa-se a escalada do arco de 3,38mm para uma mistura gasosa de 95%Ar+5%O₂ contra um maior valor de escalada do arco de 5,26mm para uma mistura gasosa de 98%Ar+2%O₂, ambos com corrente de 250A.

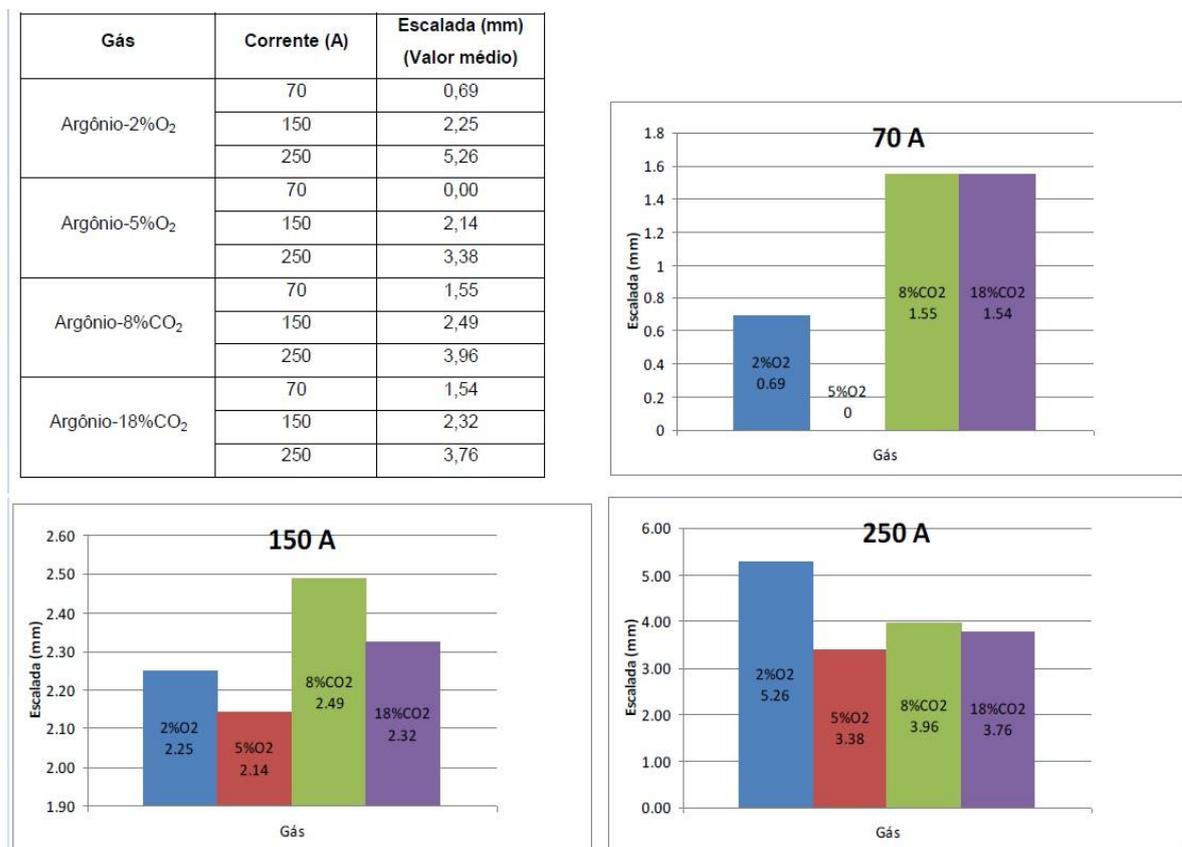


Figura 2.17 – Escalada do arco para diferentes tipos de gases e correntes. Fonte: Adaptado de Nascimento (2011).

2.3.2 Métodos de avaliação para estabilidade do arco

De forma geral, pode-se dizer que a estabilidade para um processo de soldagem MIG/MAG é alcançada quando se garante a invariabilidade do arco e da transferência

metálica ao mesmo tempo. Acredita-se, pois, com o conhecimento de técnicas para se avaliar estabilidade e os conceitos que interferem no equilíbrio do arco e da transferência, torna-se mais fácil a elaboração e aplicação de uma metodologia que permita ao usuário perseguir a estabilidade do processo (SCOTTI E PONOMAREV, 2008).

A estabilidade do arco é responsável pela execução de soldas com boa qualidade. Um arco estável depende das características do equipamento, das propriedades do eletrodo (física e química), da atmosfera ionizante e do material de base. Como estes fatores são influentes entre si, a estabilidade só será alcançada com base no conhecimento das propriedades do arco. O ajuste das variáveis elétricas será baseado no potencial de ionização do gás, nas dimensões e tipo de metal de base e do eletrodo, na posição de soldagem, na qualidade exigida (SCOTTI E PONOMAREV, 2008; MIRANDA, 1999).

A avaliação da estabilidade do arco pode ser determinada por vários critérios, como por exemplo, baseado nos sinais de ruído emitidos, pela luminosidade do arco, por câmeras de alta velocidade, calorimetria, entre outros. Entretanto, análises baseadas no comportamento dinâmico da tensão (U) *versus* corrente (I) são normalmente os mais utilizados e, por consequência, dependentes dos modos das transferências metálicas.

Assim, em uma transferência por curto circuito, o tempo de arco deve ser o mais uniforme com relação ao tempo de curto para que tenhamos uma condição mais estável. Na transferência por spray, o tempo entre duas pequenas gotas subsequentes deve ser praticamente o mesmo. No modo pulsado, a condição de uma gota por pulso deve ser o suficiente para garantir a estabilidade (SUBAN E TUSEK, 2003). De maneira geral, a consequência mais visível da estabilidade de um arco será na redução da formação de respingos devido a uma transferência de massa uniforme, com um comprimento de arco constante, e com reflexos positivos no aspecto visual do cordão e qualidade final da solda.

Na tentativa de melhor caracterizar a estabilidade do arco na transferência metálica por curto-circuito, autores como Roca *et al.* (2005) e Suban e Tusek (2003) basearam suas análises na dispersão dos laços obtidos a partir da característica dinâmica do par tensão *versus* corrente.

Através de uma avaliação da dispersão entre as áreas correspondentes aos curtos-circuitos (que pode ser feito através da análise estatística do coeficiente de variação do tempo de duração de curtos), é possível analisar a influência de variáveis no processo para obtenção de melhores qualidades nos cordões de solda. Neste sentido Suban e Tusek (2003) avaliaram a estabilidade do arco em uma soldagem MIG/MAG por curto-circuito sob diferentes projeções utilizando esta conceituação, como se pode observar nas **Figuras 2.18 e 2.19**.

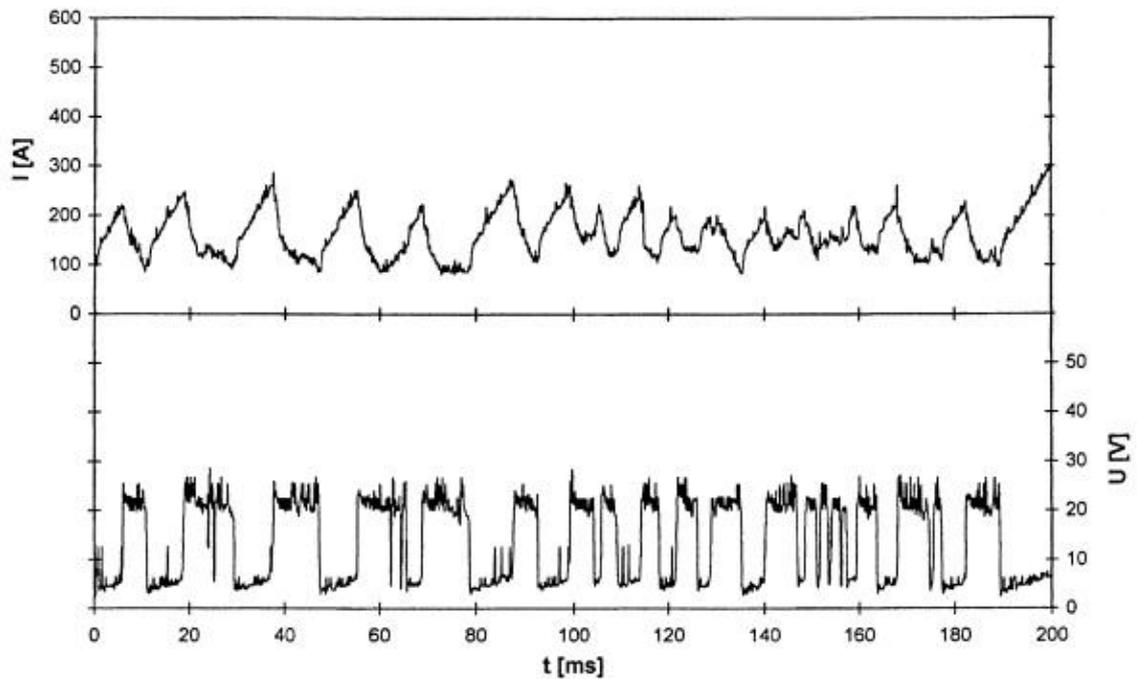


Figura 2.18 – Comportamento dinâmico da corrente (I) e tensão (U) em um modo de transferência por curto-circuito. Fonte: Suban e Tusek (2003).

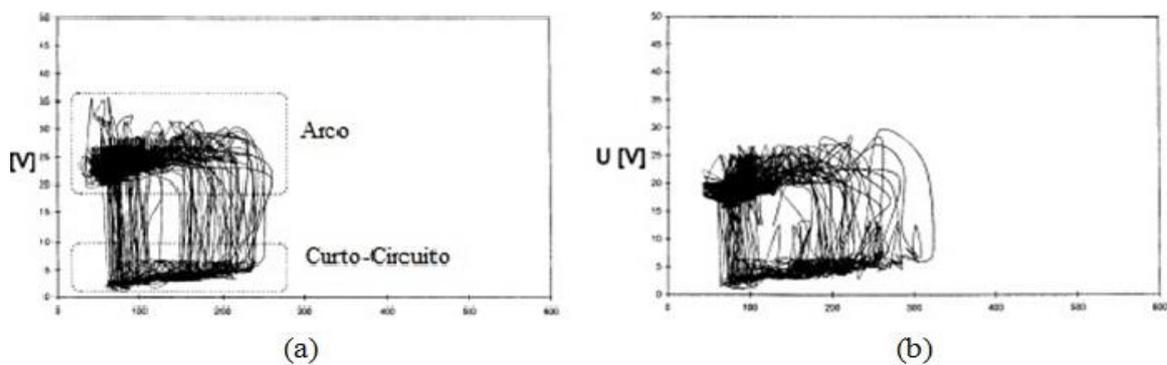


Figura 2.19 – Análise da estabilidade do arco baseada na dispersão do par tensão *versus* corrente. (a) CO₂ e (b) Ar/CO₂. Fonte: Suban e Tusek (2003).

Cirino (2009) estendeu o método de análise proposto por Roca *et al.* (2005) aplicando-o em MIG Pulsado para análise do comportamento do processo de soldagem em chapas de alumínio, sem contudo realizar cálculos das áreas dos laços e sim estipulando que quanto maior as sobreposições das curvas, maior a regularidade do processo.

De acordo com **Figura 2.20** o autor afirma que o cordão de solda (a) ficou limpo, regular e com boa aparência sem evidência de ocorrência de curtos circuitos e o diagrama (b) comprova sua análise por meio da elevada taxa de sobreposições das curvas que ocuparam menor região do gráfico, portanto foi avaliado com grande estabilidade. No entanto, para o

cordão de solda (c), Cirino (2009) julgou bastante razoável sua aparência com indícios de curto-circuito (representados pelas manchas de fuligem) e foi comprovado pelo diagrama (d) que apresentou picos de corrente próximos de 350A a baixa tensão.

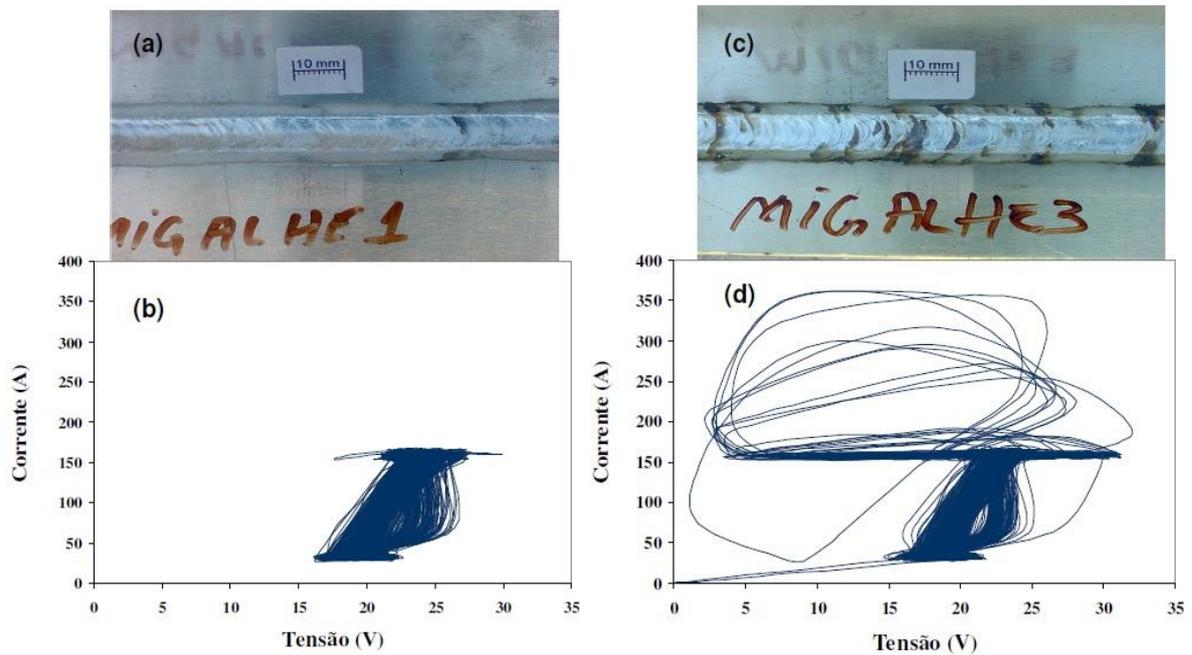


Figura 2.20 – Diagramas tensão-corrente para dois ensaios efetuados nas mesmas condições, (a) e (b) boa regularidade e (c) e (d) razoável regularidade. Fonte: Adaptado de Cirino (2009).

O autor mencionado ainda estendeu a aplicação da análise para o MIG CA e observou algumas curvas dispersas similares as da **Figura 2.20**, no entanto, já tinha constatado melhor aparência visual nos cordões gerados em CA comparados com CC^+ com uma boa distribuição das curvas que evidenciava boa regularidade do processo em CA. Desta forma concluiu que o método de análise dos diagramas de tensão-corrente foi eficaz tanto para curto circuito como para MIG pulsado CC^+ e MIG pulsado CA.

Santos (2008) baseou suas análises do comprimento do arco nas leituras de oscilogramas referentes à tensão, tendo como princípio de investigação o desvio padrão como indicador de estabilidade de comprimento do arco. O comprimento do arco elétrico está diretamente associado aos níveis de tensão, significando que, oscilações no comprimento do arco condizem a oscilações nos níveis de tensão (CIRINO, 2009).

Portanto, amparado por citações na literatura, neste trabalho tal metodologia baseada na dispersão dos sinais de tensão e corrente, tal como mostrado na **Figura 2.21** será utilizada como forma auxiliar para avaliar a estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA, visando analisar a influência de diferentes parâmetros do processo.

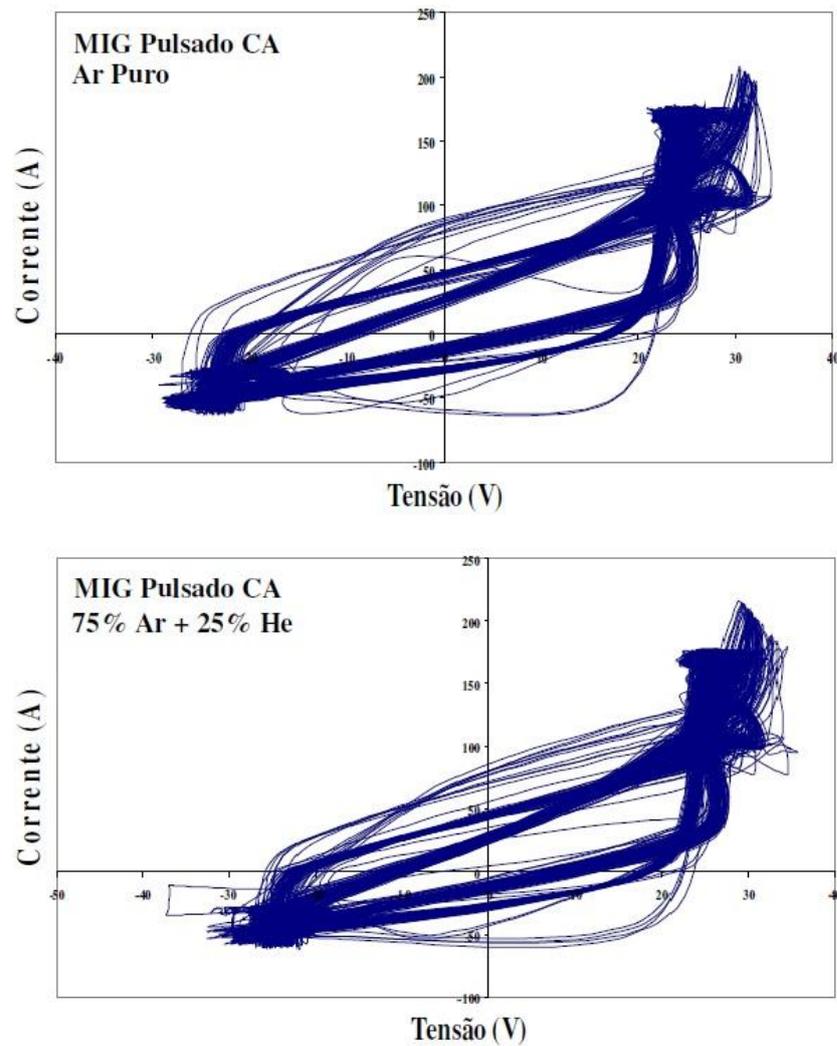


Figura 2.21 – Diagramas tensão-corrente avaliados com boa regularidade para dois ensaios executados em MIG Pulsado – CA. Fonte: Cirino (2009).

2.4 Vantagens e Desvantagens do processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA

Considerando todo o exposto anteriormente, de forma geral, o processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA apresenta as seguintes vantagens:

- ✓ Baixo aporte térmico;
- ✓ Aumento na taxa de fusão pelo aumento do período do EN;
- ✓ Diminuição da deformação pelo aumento do tempo do eletrodo na fase negativa;
- ✓ Possibilidades de aplicação em chapas finas pela redução da penetração com o aumento do tempo na polaridade negativa;

- ✓ Eventualidade aplicação para revestimentos;
- ✓ Maior tolerância na montagem das peças pela possibilidade da utilização de uma folga maior, principalmente na execução de passes de raiz.

Harwig (2000) em uma comparação com os processos de soldagem MIG/MAG pulsado e corrente alternada, manteve a mesma velocidade de alimentação para ambos os casos e concluiu que, o processo em corrente alternada proporcionou menores valores de aporte térmico (mínimo 25%) ao metal base, favorecendo segundo Gerritsen (2002), a redução de distorções, deformações e risco de alta penetração. Outra vantagem do processo em corrente alternada é indicada por Harris (2001) mencionando em seu trabalho o possível controle da penetração no cordão de solda, além de uma maior tolerância de montagem.

Por teoria, o processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA basicamente agrega as vantagens em operar na polaridade negativa (CC^-) a qual permite uma maior produção (taxa de fusão) e possibilidades de soldar chapas finas com maior tolerância de montagem (maiores folgas) devido ao menor aporte térmico, com os benefícios em trabalhar com a polaridade convencional positiva (CC^+), permitindo maior estabilidade do processo (MULLIGAN, 2003; SCOTTI E PONOMAREV, 2008).

O processo de soldagem MIG Pulsado exibe um intervalo de onda correspondente à base positiva e ao pulso positivo para a corrente como já visto anteriormente. No processo MIG/MAG-CA basicamente é introduzido um intervalo na forma de onda de corrente na polaridade negativa, tal modo ocasiona alterações na taxa de fusão do arame eletrodo e no calor transferido ao metal de base (IMC, 2011). Com o acréscimo desse intervalo de base negativa ocorre o aumento de parâmetros e níveis de entrada para se regular.

Uma das principais limitações da viabilidade do uso do processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA se expressa pela dificuldade em definir os níveis de trabalho das variáveis, além dos parâmetros do processo tais como tipo de material a ser soldado, arame eletrodo, gás de proteção, DBCP, velocidade de soldagem e de alimentação, para ao combiná-los gerar uma condição estável de soldagem.

Neste sentido, a inversão das polaridades a cada ciclo age de forma a induzir uma condição altamente dinâmica que, sem dúvida, tende a comprometer a estabilidade do arco. Atingir esse equilíbrio requer um enorme desafio no sentido de adequar as variáveis, o que será um dos objetivos deste estudo.

2.5 Técnica para o projeto e análise de experimentos

Projeto de experimentos é supracitado como um método de planejamento de experimentos, de maneira que as informações oportunas sejam analisadas por meio de métodos estatísticos e geradas conclusões válidas e objetivas. (MONTGOMERY, 2005).

Fundamentalmente, o objetivo do projeto experimental visa estimar como alterações nos elementos de entrada afetam as respostas do experimento (KELTON, 1999). Vários métodos podem ser empregados como, por exemplo, Taguchi, Fatorial Completo e Fracionado, Superfície de Respostas, entre outros.

Métodos experimentais baseados no planejamento de experimentos tem sido utilizados com frequência no melhor entendimento e a consequente a otimização de processos de manufatura, principalmente quando se tem múltiplas entradas e respostas. A aplicabilidade desses métodos tem se mostrado de grande valia para o desenvolvimento dos processos de soldagem e no caso específico do estudo do processo MIG/MAG Pulsado – CA. O projeto Fatorial se desponta como um método interessante no sentido de contribuir com o aperfeiçoamento de um processo ainda em fase de desenvolvimento. Portanto, este método será utilizado neste trabalho experimental, seguindo para isto a sequência lógica estabelecida por Montgomery (2005) através da realização das seguintes etapas:

1. Erudição e exposição do problema: o pesquisador deve reunir o máximo de dados referentes ao problema.
2. Definição de fatores e respectivos níveis de controle: designar fatores (entradas de processo e seus níveis) que sofrerão alterações propositalmente para avaliação dos efeitos gerados.
3. Seleção das variáveis de resposta: são as variáveis dependentes que foram influenciadas de alguma forma com as alterações durante a execução do experimento, a seleção deve assegurar que as variáveis de resposta concedam informações suficientes para análise.
4. Seleção do projeto experimental: averiguação em função dos objetivos, limitações, despesas e tempo para selecionar o método de análise mais adequado.
5. Execução dos experimentos: procedimento de aquisição de informações.
6. Investigação dos dados: aplicação de métodos estatísticos e/ou *softwares* para análise e conclusões.
7. Conclusão e sugestão: validação e conclusões em função dos resultados obtidos.

Nilo Júnior (2003) cita que em relação às técnicas do projeto e análise de experimentos, as mais utilizadas são: Planejamento Fatorial Completo, Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta. O autor ainda descreve as principais características de forma resumida ligadas a cada técnica, de acordo com a **Tabela 2.1**.

Tabela 2.1 – Principais métodos do Projeto e Análise de Experimentos e suas características fundamentais. Fonte: Adaptado de Nilo Júnior (2003).

Planejamento experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Possibilita uma varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois apenas trabalha em dois níveis. Requer um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis.	Processos em que já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demandam maior tempo ou custo.
Fatorial Fracionado $2^{(k-1)}$	Proporciona uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas.	Não permite a varredura completa da região experimental.	Processos em que se pretende um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada. Em realização de corridas que demandam maior tempo ou custo.
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos.	Fornecer uma idéia do processo, entretanto pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos onde há o mínimo ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com elevada dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo.
Metodologia de Superfície de Resposta	Propicia a verificação de variações intermediárias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos (+2) e (-2) já que são realizadas poucas corridas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

A meio de todos os processos descritos na **Tabela 2.1**, o presente trabalho usufruiu do projeto experimental Fatorial Completo, em razão do prévio conhecimento (após uma

pesquisa refinada) do processo de soldagem MIG/MAG pulsado em corrente alternada. Ademais esta técnica de análise permite uma varredura completa da região de estudo.

Para Pinho *et al.* (2007) um importante modelo de projeto experimental é o Fatorial, dado que cada fator experimentado é combinado com todos os níveis dos outros fatores que, para um elevado número de fatores, é estabelecido um nível alto e baixo, com objetivo de conservar a dimensão dos experimentos em padrões satisfatórios.

Ao utilizar o método Fatorial Completo, é possível obter benefícios tais como: maior eficiência em estimar os efeitos principais dos fatores perante a variável em análise e na definição da interação entre todos os fatores (COX E REID, 2000). Entretanto, como fator limitante o método não identifica a variação intermediária por trabalhar em dois níveis (máximo e mínimo), além disso, requer elevado número de experimentos para casos com alto número de variáveis. (MONTGOMERY, 2005).

Capítulo 3

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem como objetivo detalhar todos os equipamentos, acessórios e materiais consumíveis utilizados nos experimentos, bem como descrever as etapas dos ensaios, os procedimentos e passos para sua realização.

3.1 Estratégia experimental e etapas projetadas

Para realização de um trabalho de pesquisa experimental, torna-se necessário planejar e aplicar um método de pesquisa eficaz que proporcione informações objetivas e de relevância científica. Desta forma, para sistematizar a operação foi aplicada uma ferramenta computacional para auxiliar o desenvolvimento deste trabalho por métodos estatísticos baseado no projeto e análise de experimentos.

Nesta pesquisa, foi utilizada como método a experimentação tendo em vista que o objeto de estudo necessita de uma forma complexa para otimização devido suas variáveis e o processo de soldagem empregado possui múltiplos parâmetros de entrada com seus correspondentes níveis de trabalho. Para tal circunstância, torna-se imprescindível a aplicação de uma abordagem científica para que as ferramentas de análises possam ser definidas corretamente permitindo a obtenção de resultados coerentes e significativos.

Desta forma a metodologia experimental pode ser dividida em cinco etapas:

1. **Testes preliminares e definição do formato de onda de pulsação:** Logo após a revisão da literatura sobre o assunto, foram selecionados os trabalhos que possuíam maior proximidade com o objetivo da pesquisa. Em seguida foram reproduzidos experimentos em forma de testes preliminares com intuito de assimilação do comportamento do processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA. Considerando que este processo apresenta diferentes possibilidades para o formato de onda como mostrado na *Figura 2.4*, e, através de testes e informações na literatura, decidiu-se pelo formato de onda “C” (com uma base positiva antes do pico de corrente) da respectiva figura. Tal escolha será melhor justificada no item 4.1;
2. **Definição das variáveis do processo a serem estudadas:** Com o embasamento literário necessário a partir do formato de onda selecionado (detalhamento mostrado na *Figura 2.7*) e a realização de testes preliminares alterando os parâmetros de entrada, foram selecionadas as variáveis que aparentaram ter maior influência no processo. A partir da definição dos parâmetros e fixação dos níveis de trabalho foi aplicado o processo de planejamento dos experimentos;
3. **Processo de soldagem:** Com a elaboração do planejamento, foram realizados criteriosamente os cordões de solda através do processo MIG/MAG Pulsado – CA no laboratório de soldagem e coletados todos os dados necessários.
4. **Preparação para análise:** Nesta etapa, cada corpo de prova foi cortado transversalmente em duas seções, posteriormente os corpos de prova foram submetidos ao processo de lixamento, polimento e ataque químico para caracterização macrográfica de suas superfícies e, por fim, realizadas as medições geométricas dos perfis obtidos;
5. **Análise dos resultados:** De posse dos resultados obtidos, nesta etapa foram analisadas, por métodos estatísticos, as respostas de toda operação a fim de se ter conclusões válidas e objetivas.

3.2 Descrições dos equipamentos e materiais empregados

Os testes e ensaios foram realizados no Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Itajubá (LSO), cujo detalhamento do banco de ensaios é mostrado na **Figura 3.1**. Para a realização das soldagens foi utilizado uma fonte IMC-INVERSAL[®] 300 com comando digital e possibilidades de soldagem no modo MIG/MAG Pulsado – CA, em diferentes formatos de onda e um cabeçote alimentador IMC-STA-20[®].

Com a função de manter constante a distância do bico de contato com a peça, a velocidade de soldagem e a posição de 90° da tocha em relação ao metal base, foi empregado um dispositivo deslocador semi-automático (carro tartaruga) para a tocha no banco de testes. Em todos os testes executados, optou-se por manter a DBCP em 15mm e com um recuo de 3mm do bico em relação ao bocal de proteção.



Figura 3.1 – Bancada experimental.

A **Figura 3.1** mostra os equipamentos utilizados para executar os cordões de solda:

- ✓ (1) Cabeçote alimentador com arame eletrodo;
- ✓ (2) Fonte de soldagem multiprocessos;
- ✓ (3) Bancada de soldagem;

- ✓ (4) Medidor de vazão de gases;
- ✓ (5) Cilindros de gás de proteção;
- ✓ (6) Dispositivo de deslocamento da tocha de soldagem;
- ✓ (7) Corpo de prova;
- ✓ (8) Computador para aquisição de dados.

Como o objetivo do trabalho é o de contribuir para o melhor conhecimento do processo MIG/MAG Pulsado – CA, o material de base utilizado foi um aço carbono ABNT 1020 de uso corriqueiro na engenharia. As chapas foram preparadas nas dimensões 110 x 50 x 4,7mm e todas as soldagens foram realizadas utilizando a técnica de simples deposição.

Para maior controle e segurança nos resultados, inclusive em termos de comparação posterior, foi utilizado o arame AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,2mm. A *Tabela 3.1* fornece valores da composição química dos materiais utilizados. Como gás de proteção, optou-se neste trabalho pela utilização da mistura 98% Ar + 2% O₂, devido a mesma ser citada na literatura como uma das mais viáveis para este modo de soldagem, conforme detalhes descritos no item 2.2.3.

Tabela 3.1 – Composição química do material de deposição e metal base.

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)
ER 70S-6	0,06 – 0,15	0,80 – 1,15	1,40 – 1,85	0,025	0,035	0,50
ABNT1020	0,18 – 0,23	–	0,30 – 0,60	0,04	0,05	–

Fonte: ESAB (2012).

3.3 Preparação e solda de simples deposição

Como exposto no capítulo 2, o processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA possui numerosas variáveis de operação com diferentes níveis de regulagem. Em função do objetivo principal do trabalho, foram executados testes preliminares usando como fundamento pesquisas relacionadas ao aço carbono de baixa liga, das quais foram possíveis empregar regulagens consideradas ideais para o bom funcionamento do processo.

A *Figura 3.2* demonstra alguns cordões de solda resultantes de testes preliminares.



Figura 3.2 – Cordões gerados em testes preliminares.

Nos testes preliminares foram reproduzidos experimentos citados na literatura, principalmente os desenvolvidos por Santos (2008), conforme mostra a **Tabela 3.2** e segundo o qual, boas condições de operação puderam ser obtidas.

Tabela 3.2 – Parâmetros para reprodução em testes preliminares.

Ensaio	EN %	Va m/min	Vs cm/min	Ip A	tp ms	In A	tn ms	Ib A	tb ms
1	30	3,0	60	350	4	-51	7,2	70	70
2	50	3,0	90	350	4	-51	12	74	74
3	70	3,0	60	350	4	-51	16,8	93	3,2
4	0	2,7	54	300	4	0	0	78	20
5	30	2,7	54	300	4	-60	7	80	13
6	50	2,7	54	300	4	-60	12	84	8
7	70	2,7	54	300	4	-60	17	101	3
8	0	2,7	54	300	4	0	0	78	20
9	30	2,7	54	300	4	-60	7	80	13
10	50	2,7	54	300	4	-60	12	84	8
11	70	2,7	54	300	4	-60	17	101	3
12	0	2,7	54	300	4	0	0	78	20
13	30	2,7	54	300	4	-60	7	80	13
14	50	2,7	54	300	4	-60	12	84	8
15	70	2,7	54	300	4	-60	17	101	3

Fonte: Santos (2008).

De posse destas informações como ponto de partida, o objetivo dos testes foi identificar as variáveis que exerciam maior influência no processo, através de mudanças em seus níveis de trabalho de forma a determinar as condições extremas (máximas e mínimas) de cada variável de controle, limites estes que a partir do qual desestabilizava o processo.

Tal apuração teve grande importância para que não fossem adotados valores que inviabilizassem ou resultassem em condições inseguras para a execução dos experimentos. Em função do dinamismo do processo e número de variáveis presentes, optou-se neste trabalho em operar com técnicas estatísticas permitindo maior confiabilidade e facilidade na análise dos resultados finais.

Para organização e melhor aproveitamento dos experimentos, foi aplicado o método Fatorial Completo, o qual permite, com excelente resolução estatística, avaliar a influência dos parâmetros em determinadas respostas a serem analisadas. Foi utilizado o *software* comercial MINITAB[®] versão 15, uma ferramenta computacional que opera com métodos estatísticos. As seleções das variáveis e respectivos níveis a serem empregados bem como o delineamento experimental serão descritos em detalhes no item 4.1.

Ao definir as condições de soldagens, os testes foram realizados em uma sequência padrão estabelecido pelo *software* MINITAB[®]. Antes de cada soldagem, foi preparado o corpo de prova, realizando-se a limpeza, pesagem e posicionando-o de forma adequada em relação à tocha de soldagem de forma a garantir um ângulo de 90° e uma DBCP de 15mm. Após os ajustes dos níveis dos parâmetros, as soldagens foram realizadas e os sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame foram aquisitados durante 1s através de um sistema de aquisição de dados denominado Oscilos4[®]. Após a soldagem, os respingos impregnados nos corpos de prova (cdp) foram removidos e os cdp's pesados novamente. As massas foram registradas através de uma balança de precisão da marca Coleman[®] modelo BN-V6-12-1200, conforme exhibe a **Figura 3.3**.



Figura 3.3 – Detalhes da balança de precisão utilizada.

A **Figura 3.4** demonstra o deslocador da tocha no final de seu trajeto de execução da solda sobre a chapa e a **Figura 3.5** mostra a chapa já com o cordão de solda gerado no processo.



Figura 3.4. – Sentido de execução da solda.



Figura 3.5 – Deposição do cordão de solda sobre a chapa.

É importante destacar que o equipamento utilizado não se mostrou robusto o suficiente para manter as condições de soldagem após um tempo relativamente longo de operações para a forma de onda de soldagem selecionada.

Acredita-se que, pelo alto dinamismo provocado pelas inversões dos ciclos do negativo para o positivo e vice-versa, as exigências eletrônicas são intensas e, desta forma, notou-se que após um determinado número de soldas, as condições de estabilidade do arco começaram a se deteriorar. O equipamento utilizado destina-se apenas para ensaios de pesquisa, não enfoca larga produção.

Neste caso, a título de exemplificação, a **Figura 3.6** exibe a solda sequencial nº13 que, apresenta características dinâmicas de corrente e tensão com elevada instabilidade nos ciclos de soldagem, refletido pela irregularidade na formação do arco observada, em função da baixa robustez dos componentes eletrônicos de controle do equipamento como já citado

anteriormente. Por outro lado, ao repetir o ensaio após um determinado intervalo de tempo, notou-se a adequação das características dinâmicas de tensão e corrente conforme o esperado. Isto pode ser observado pela *Figura 3.7*.



Figura 3.6 – Instabilidade dos sinais de corrente (I) e tensão (U) após operação contínua do equipamento de soldagem.

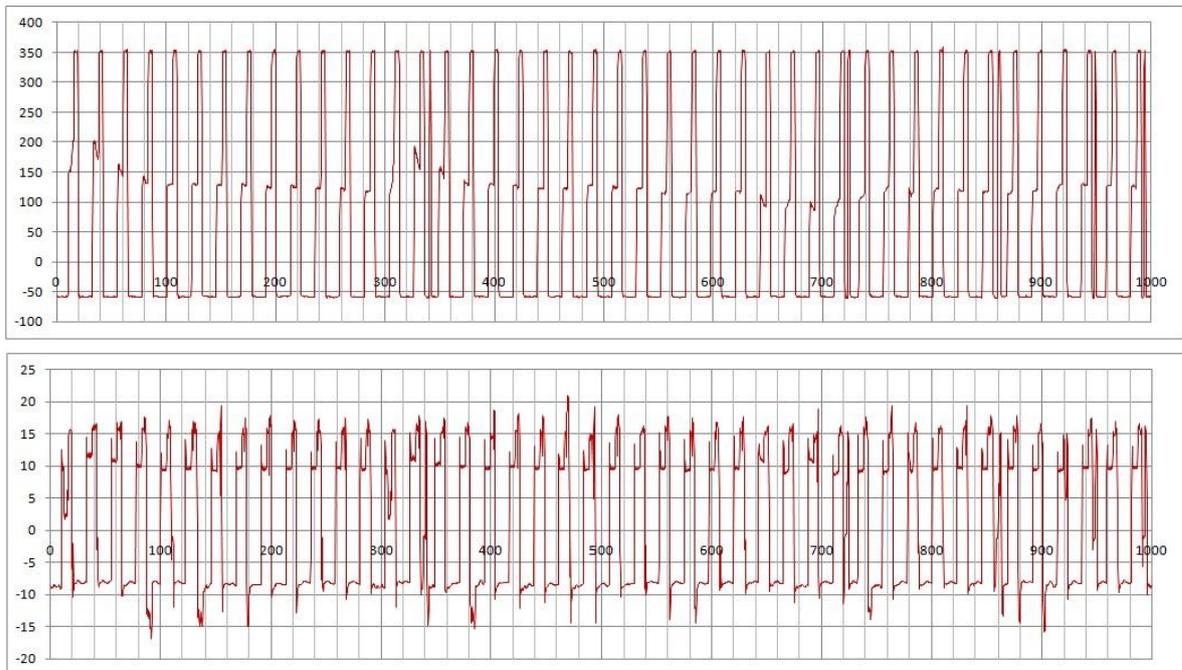


Figura 3.7 – Característica dinâmica normal dos sinais de corrente (I) e tensão (U) após um intervalo de tempo com o equipamento de soldagem.

Em face de tais fatos, julgou-se conveniente fornecer um intervalo de tempo para a máquina a cada cinco ensaios realizados para reestabilização, sem contudo gerar no planejamento experimental via MINITAB® uma blocagem. Verificou-se que para esta estratégia adotada, todos os ensaios desfrutaram da oportunidade de serem executados em melhores condições de estabilidade para o arco, retratando obviamente a diversificação de níveis utilizados em cada experimento.

3.4 Medições efetuadas

Para atender aos objetivos estabelecidos neste trabalho, optou-se, realizadas as soldas, avaliar os resultados mediante aos aspectos geométricos e produtivos dos cordões gerados, a avaliação da estabilidade dos sinais com as análises das características dinâmicas da tensão e corrente.

Muito embora tenha sido aquisitado a velocidade de alimentação do arame, verificou-se pelos resultados que a mesma se manteve praticamente constante durante a realização das soldas, sendo desta forma descartada uma análise aprofundada da mesma. A seguir os métodos adotados para as medições serão descritos com maiores detalhes.

3.4.1 Aspectos geométricos

Como aspectos geométricos foram mensurados em cada cordão de solda:

- ✓ Penetração;
- ✓ Reforço;
- ✓ Largura;
- ✓ Diluição.

A *Figura 3.8* apresenta maiores detalhes. Para determinar a taxa de diluição foi utilizada a *Equação 3.1*:

$$D = \left(\frac{A_p}{A_p + A_r} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Onde: D = Diluição (%);

A_p = Área de penetração (mm^2);

A_r = Área do reforço (mm^2).

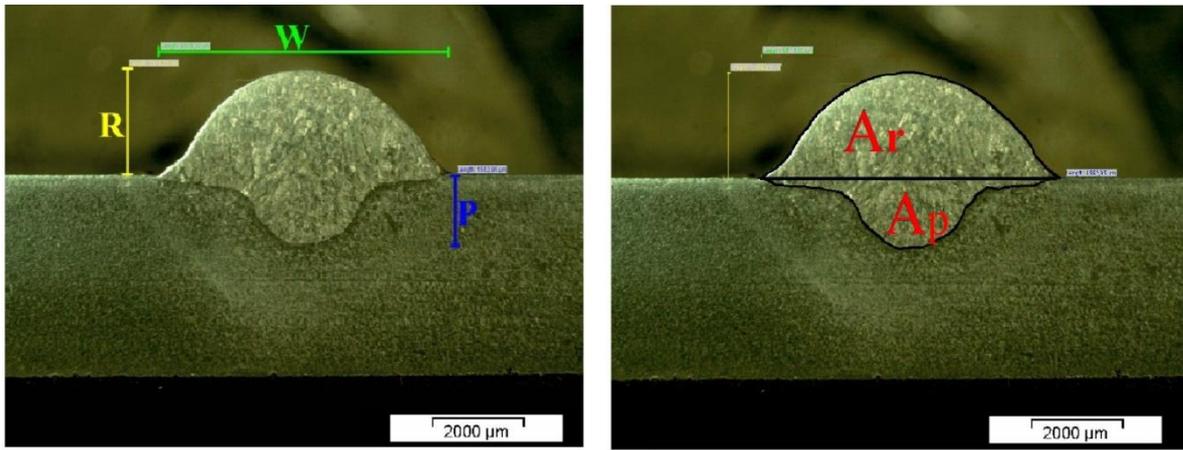


Figura 3.8 – Medições da largura (W), reforço (R), penetração (P) e diluição (D) do cordão de solda.

Para determinar essas características geométricas, os cdp's, após as soldas, foram seccionados transversalmente, em dois pontos distintos conforme detalhes mostrados na **Figura 3.10**, através da máquina de Serra fita SACORA[®] modelo SF-18, tomando-se o cuidado de desprezar o início do cordão (adaptação da máquina à regulagem imposta) e final do cordão (encerramento da solda e possibilidades de formação de cratera). Após os cortes, os corpos de prova foram lixados e polidos conforme sequência citada por Rohde (2010).

Posteriormente os mesmos foram atacados com nital 4% para então serem avaliados macrograficamente nos dois pontos selecionados. Para isto utilizou-se o *software* analisador de imagens *Analysis Doc*[®] acoplado ao estereoscópio da marca *Olympus*[®], modelo Z61 com zoom de 6,7x – 45x e o *software Analysis FIVE digital imaging solutions Olympus* (observar **Figura 3.9**) para realização das ampliações dos cordões de solda em 10x e as medições da geometria do cordão. As respostas medidas foram determinadas pela média das respectivas medições.



Figura 3.9 – Equipamento utilizado para ampliações dos cordões.

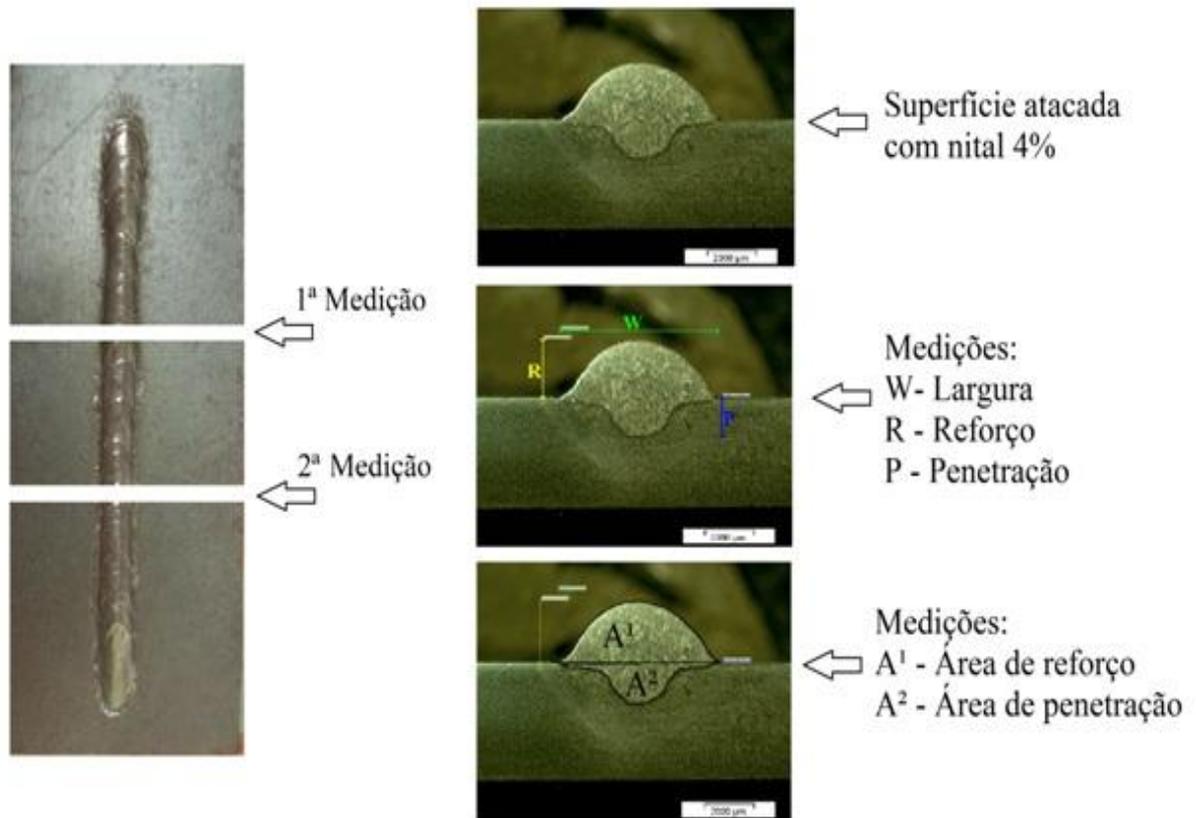


Figura 3.10 – Método para as medições geométricas do cordão de solda.

3.4.2 Aspectos produtivos

Uma das motivações no desenvolvimento do processo MIG/MAG Pulsado – CA para aplicações industriais se refere a, teoricamente, maior taxa de fusão do mesmo quando no ciclo negativo. Portanto, a avaliação da influência dos parâmetros na produtividade do processo é importante sob o ponto de vista da viabilidade de utilização do mesmo. De certa forma, esta produtividade pode ser medida pela taxa de deposição, taxa de fusão e rendimento do processo, utilizando para isto as *Equações 3.2, 3.3 e 3.4*, respectivamente:

$$TD = \left(\frac{m_f - m_i}{t_s} \right) \times 3,6 \quad (3.2)$$

Onde: TD = Taxa de deposição (kg/h);

m_f = Massa do corpo de prova após a solda (g);

m_i = Massa do corpo de prova antes da solda (g);

t_s = Tempo de soldagem (s).

$$TF = \left(\frac{l_a \times \rho}{t_s} \right) \times 3,6 \quad (3.3)$$

Onde: TF = Taxa de fusão (kg/h);

l_a = Comprimento do arame eletrodo consumido (m);

ρ = Densidade linear do tipo do arame (g/m);

t_s = Tempo de soldagem (s).

$$\eta = \left(\frac{TD}{TF} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

Onde: η = Rendimento do processo (%);

TD = Taxa de deposição (kg/h);

TF = Taxa de fusão (kg/h).

Vale ressaltar que, para as respostas de interesse em relação às características econômicas, não foi possível obter uma análise plausível sobre os resultados para a taxa de fusão (uma característica notável do processo MIG/MAG-CA), visto a mesma estar relacionada à velocidade de alimentação do arame, que por sua vez exigiria uma maior velocidade quando no semi-ciclo negativo.

Como destacado no item 2.2.2, os equipamentos não permitem um ajuste variável desta velocidade a cada polaridade em separado, podendo esta velocidade ser determinada pela média ponderada entre as polaridades negativa e positiva que permitisse uma boa estabilidade do arco através da **Equação (2.5)**. Neste trabalho, esta equação foi utilizada como referência para a determinação da velocidade real de soldagem.

Visto que a taxa de fusão do arame eletrodo em polaridade negativa é maior que em polaridade positiva, a aplicabilidade da **Equação 3.3** de certa forma retrata um resultado não representativo da taxa de fusão na polaridade negativa (fato este importante de ser analisado), o que deixou de ser realizado neste trabalho. Em consequência, não foi possível obter valores reais do rendimento do processo, uma vez que o cálculo é em função da taxa de fusão de acordo com a **Equação 3.4**.

Concluindo, neste trabalho, os aspectos produtivos ficaram então concentrados apenas na análise da taxa de deposição.

3.4.3 Análise da estabilidade do arco

Em função da reconhecida instabilidade do processo de soldagem MIG/MAG – CA pelas inversões nos ciclos de soldagem do polo positivo para o negativo e vice-versa, é de fundamental importância para a avaliação o comportamento dinâmico dos parâmetros elétricos como a corrente e tensão de soldagem.

Neste estudo estes oscilogramas foram avaliados após os dados serem adquiridos como mencionados anteriormente. Paralelamente a estes oscilogramas, outras informações foram analisadas do comportamento dinâmico dos mesmos e que serão descritas na apresentação dos resultados dos testes finais.

Em função da dificuldade da avaliação da regularidade dos sinais de tensão e corrente, neste trabalho utilizou-se uma metodologia similar a normalmente empregada em modos de soldagem por curto-circuito e caracterizada pelo gráfico de dispersão destes sinais, tal como discutido no item 2.3.2. Similar ao anteriormente escrito, estes gráficos de dispersão e critérios de avaliação a serem adotados serão apresentados com maiores detalhes na apresentação dos resultados dos testes executados.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os experimentos realizados e detalhes específicos utilizados em suas avaliações, os resultados preliminares e os resultados definitivos obtidos, bem como as discussões pertinentes aos mesmos.

4.1 Seleções dos parâmetros e níveis de operação

Conforme descrito no capítulo dois, o processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA possui uma gama relativamente elevada de variáveis se comparado ao processo MIG/MAG convencional. Sendo assim, com auxílio de uma revisão da literatura clássica referente ao processo, foi possível iniciar o critério de seleção dos parâmetros (variáveis e fixos) e seus respectivos níveis de operação através de testes preliminares.

Em princípio foi estabelecido o tipo de metal base que iria ser estudado. Devido ao fato de que o processo soldagem MIG/MAG Pulsado – CA encontra-se ainda em desenvolvimento, os resultados publicados na literatura são ainda bastante limitados, concentrando-se basicamente nos estudos voltados ao alumínio e aço carbono. Optou-se nesta pesquisa em trabalhar com este último, decisão em parte atribuída pelas disponibilidades experimentais, o que não se verificaria para o alumínio.

Verificou-se na literatura que, para os aços, as condições a seguir são as mais utilizadas, permitindo assim melhor aproveitamento, maior contribuição e segurança na obtenção dos

resultados, além de promover maior condição de comparação com os resultados obtidos por outros pesquisadores.

Em função do tipo de metal de base e de adição, foi selecionada a forma de onda mais apropriada para execução do processo, no caso o formato de onda “C” (com uma base positiva antes da fase de pico positivo) apresentada no capítulo dois pela **Figura 2.4**. Segundo Nascimento (2011) este formato de onda fornece melhor estabilidade para o processo, além de proporcionar maior taxa de calor ao arame eletrodo e conseqüentemente favorece para maior taxa de fusão.

Em relação à seleção para o tipo de gás de proteção empregado foram realizados testes preliminares com uma mistura binária de 75%Ar+25%CO₂ (C₂₅) para as condições de soldagem referentes a Santos (2008). Verificou-se que o comportamento do processo, além dos cordões gerados, não foi satisfatório, comprovando o que muitos autores já mencionaram sobre a maior instabilidade e nível de respingos ao empregar esse tipo de mistura gasosa de proteção.

Tais resultados já eram conjecturados, visto que na literatura há menções de misturas com teores máximos de 20% de CO₂. Portanto, ao utilizar 25% de CO₂ (mistura gasosa popular no ramo da soldagem), tal instabilidade era esperada.

Após uma investigação mais detalhada a respeito, foi apurado melhor desempenho para a mistura gasosa com base de argônio e reduzido teor de O₂ para o processo de soldagem MIG Pulsado – CA aplicado ao material aço carbono.

Em um consenso da literatura foi averiguado que a mistura gasosa binária com 98%Ar+2%O₂ propicia maior “escalada” do arco, estabilidade do processo e melhores características geométricas para os cordões. Vale ressaltar que o objetivo da maior escalada do arco se refere à característica de soldagem no semi-ciclo negativo de gerar maior taxa de fusão, sendo este uma das pressupostas vantagens do processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA. Em suma, foi fixado como gás de proteção a mistura binária com 98%Ar+2%O₂.

Citado por Nascimento (2011), Ojo e Scotti (2005) observaram que, no processo de soldagem MIG/MAG pulsado, as condições que conferiram maior estabilidade na transferência metálica por meio de uma gota por pulso, foram aquelas configuradas com uma corrente de pico com 300A e o tempo de permanência de 4ms.

Com o propósito de garantir maior estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA e em função do formato de onda com a base positiva antes do pulso, deseja-se que a transferência metálica se dê por UGPP na polaridade positiva, mais precisamente que a gota se destaque no momento final da corrente positiva de pico.

Para garantir essa circunstância, foram adotados valores de 350A para a corrente positiva de pico com um tempo de permanência de 4ms em todos os experimentos a serem executados.

Ademais, outro critério de extrema importância é a análise do percentual de tempo em que o eletrodo permanece em polaridade negativa (EN), citado pela maioria dos pesquisadores.

Presumiu-se então, ser mais benéfico e interessante para contribuição científica no trabalho, analisar os efeitos de diferentes percentuais de tempo de permanência do eletrodo em polaridade negativa do que avaliar os níveis de trabalho da corrente negativa (tn). Sendo assim, haverá alternância no tempo do arame eletrodo em corrente negativa para suprir a necessidade percentual de EN em estudo.

Em virtude da alta dinâmica do processo alternando incessantemente suas polaridades do extremo positivo para o negativo, acreditou-se ser mais contundente analisar os efeitos da corrente de base juntamente com o seu tempo de permanência nos cordões de solda gerados.

O último parâmetro a ser variado foi a velocidade de alimentação do arame, para estudar os efeitos de suas interações com outras variáveis do processo mantendo-se a velocidade de soldagem constante em 30cm/min.

Decididos os parâmetros a serem analisados verificando a influência dos mesmos no processo, houve a necessidade de fixação de seus níveis de trabalho (máximo e mínimo), bem como de outros parâmetros considerados fixos, que permitissem realizações de soldagens em todas as condições a serem idealizadas.

Para isto, houve a necessidade da realização de alguns testes preliminares partindo-se de informações divulgadas por Santos (2008), como já informado, o qual utilizou uma mistura gasosa de 92% Ar+8% CO₂.

A **Tabela 4.1** mostra alguns testes realizados e observações durante execução do processo.

Tabela 4.1 – Testes preliminares comentados.

Testes	EN %	In A	tn ms	Ib A	tb ms	Observações
1	30	-51	7,2	70	12,8	Cordão regular, boa estabilidade do arco.
2	50	-51	12	74	8	Cordão regular, boa estabilidade do arco.
3	70	-51	16,8	93	3,2	Cordão regular, boa estabilidade do arco.
4	70	-71	16,8	93	3,2	Cordão regular, boa estabilidade do arco, porém melhor que a solda 3.
5	70	-80	16,8	93	3,2	Não adequado. Iniciou a soldagem, porém houve acúmulo de material no bico de contato talvez pela escalada exagerada do arco, interrompendo a soldagem.
6	70	-80	10	93	3,2	Idem ao teste 5, iniciando a solda e se desequilibrando na sequência.
7	70	-70	7	93	3,2	Verificou acúmulo de material no bico, o que provocou instabilidade na sequência.
8	70	-70	12	93	3,2	Cordão regular, boa estabilidade do arco.
9	50	-70	4	90	5	Solda com cordão com poucos respingos e um pouco irregular.
10	70	-70	17	90	3	Cordão regular, solda estável, baixo nível respingos.
11	50	-70	7	90	3	Solda estável, baixo nível de respingos, menos convexa.
12	70	-70	18	90	4	Começo instável (perdeu um pequeno comprimento de eletrodo), maior nível de respingos e maior barulho.
13	30	-70	6	90	10	Muito semelhante á solda 10, porém nota-se uma gota grande fora do cordão, um respingo.
14	70	-50	17	90	3	Solda instável, cordão irregular, acúmulo de metal fundido no bico da tocha, respingos, maior barulho pior que solda 12.
15	50	-50	7	90	3	Semelhante á solda 10, porém com aparência mais convexa.
16	30	-50	3	90	3	Solda estável, menos convexa que a solda 10, porém no início desprende um pequeno comprimento de eletrodo.
17	70	-50	17	70	3	Solda estável.
18	30	-50	3	70	3	Solda estável. (obs.: cordão com traços ondulados).
19	30	-198	2,6	40	2	Não soldou, acúmulo de arame eletrodo fundido no bico da tocha e extinção do arco.
20	50	-198	6	40	2	Solda com baixo nível de respingos e praticamente estável, cordão um pouco irregular e convexo.
21	70	-198	14	40	2	Semelhante á solda 20, porém um pouco menos estável e cordão um pouco mais irregular.
22	70	-90	17	90	3	Solda estável, cordão mais convexas que para outros testes.
23	50	-90	7	90	3	Solda muito bem, menos convexidade no cordão, menos respingos (obs. houve mudança no som no meio do processo de soldagem).
24	30	-90	3	90	3	Solda estável, semelhante a 23.
25	70	-100	17	40	3	Solda estável, mas com cordão convexo.

Observação: A velocidade de alimentação foi constante (3m/min) para todos os testes da Tabela 4.1

No transcorrer dos testes, foram selecionados níveis de trabalho e adotados limites que acreditavam fornecer melhor comportamento do arco e formato do cordão para os parâmetros variáveis. Desta forma, após a realização dos mesmos e variações executadas, foram estabelecidos os níveis e delimitados os limites de operação para cada parâmetro. A **Tabela 4.2** fornece informações a respeito dos parâmetros variáveis e seus respectivos níveis de trabalho para estudo e a **Tabela 4.3** proporciona dados relativos às variáveis consideradas fixas e seus correspondentes valores de operação.

Tabela 4.2 – Parâmetros variáveis e níveis de trabalho.

Parâmetros	Unidade	Notação	Níveis de trabalho	
			-1	+1
Velocidade de alimentação	m/min	Va	3,0	3,5
Corrente de base	A	Ib	50	90
Tempo de base	ms	tb	5,0	10
Percentual de tempo negativo	%	EN	30	60

Tabela 4.3 – Parâmetros fixos, tipos e níveis de trabalho.

Parâmetros	Valores de trabalho / Tipo	Unidade
Vs	30	cm/min
Ip	350	A
tp	4	ms
In	-60	A
tn*	3,9; 6; 13,5 e 21	ms
DBCP	15	mm
Recuo do bico da tocha	3	mm
Tipo de mistura gasosa	98%Ar+2%O ₂	%
Vazão do gás de proteção	15	l/min
Posição de soldagem	Plana (deposição simples)	–
Ângulo da tocha	90	graus
Arame-eletrodo	ER 70S-6	–
Diâmetro do arame-eletrodo	1,2	mm
Material do metal base	Aço carbono ABNT 1020	–
Espessura do metal de base	4,7	mm

Vale ressaltar que, no trabalho, foi estabelecido variável o parâmetro EN, conseqüentemente houve a necessidade em alterar os valores de t_n , porém a variável em estudo é o percentual de tempo em que o arame eletrodo opera em polaridade negativa e não tempo em polaridade negativa.

4.2 Respostas de interesse do processo

Em vista do objetivo do trabalho e do potencial de análise do conteúdo resultante, as respostas consideradas de maior relevância compreendem os seguintes itens:

- ✓ Características geométricas:
 - Largura (W)
 - Penetração (P)
 - Reforço (R)
 - Diluição (D)
- ✓ Características econômicas:
 - Taxa de deposição (TD)
- ✓ Estabilidade do arco:
 - Gráficos de oscilogramas de corrente
 - Gráficos de oscilogramas de tensão
- ✓ Características do comportamento do processo:
 - Gráficos de dispersão da tensão *versus* corrente.

4.3 Definição da matriz de ensaios

Para avaliar a influência dos parâmetros do processo, foi utilizado um planejamento fatorial completo em dois níveis, com uma replicagem com dois pontos centrais, perfazendo assim um total de 34 experimentos. Utilizou-se ainda uma sequência padrão sem aleatorização e blocagem. Como afirmado anteriormente, foi utilizado o *software* MINITAB® versão 15 para geração da matriz experimental, bem como das análises subsequentes.

4.4 Registro de respostas da estabilidade do arco

Para todas as soldagens realizadas foram aqisitados os valores de tensão e corrente utilizando o *software* Oscilos4[®]. A aquisição ocorreu durante 1s e iniciado tão logo ocorresse a estabilização da soldagem. Após aqisitados, os dados foram processados através do *software* comercial Excel[®], visando a plotagem dos oscilogramas de tensão e corrente representando as características dinâmicas durante período de soldagem avaliado.

A *Figura 4.1* mostra, a título de exemplificação, a característica típica dos sinais e tensão aqisitados, característica esta que permite observar a ocorrência de uma fase de base antes do pico de corrente no ciclo positivo (formato C). Paralelamente foram determinados os diagramas de dispersão da tensão e corrente, cuja metodologia foi considerada primordial para a avaliação da estabilidade e constância do arco durante soldagem, conjuntamente com os distúrbios nos sinais como será explicado adiante.

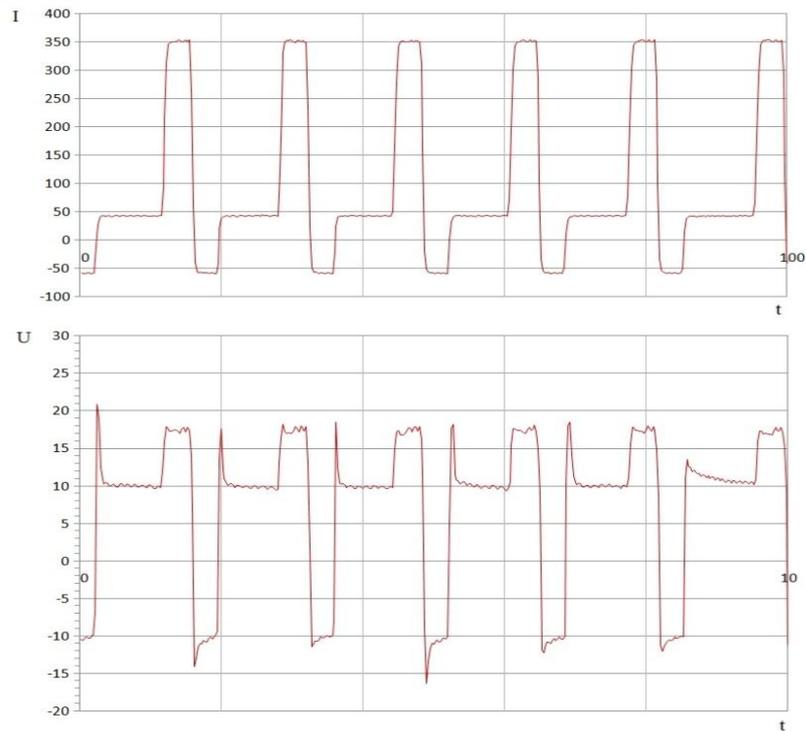


Figura 4.1 – Oscilogramas para corrente e tensão, respectivamente.

Para uma avaliação refinada foram analisados separadamente cada oscilograma (corrente e tensão) e contabilizados os números de ciclos, oscilações em polaridade negativa e positiva. Devido ao grande número de oscilações notado nos gráficos achou-se viável para maior contribuição deste trabalho coletar informações relativas às oscilações contidas em cada ciclo de cada gráfico.

A **Figura 4.2** mostra o sistema adotado para extração dos dados, onde no seguimento ilustrado em (A) possui um ciclo de corrente de soldagem considerado estável com pico positivo, base positiva e negativa satisfatoriamente definidos. Como se pode observar no segmento (B) o ciclo não é uniforme com a presença de picos e/ou oscilações, que neste caso foram denominados por pico positivo pré-base e pico negativo.

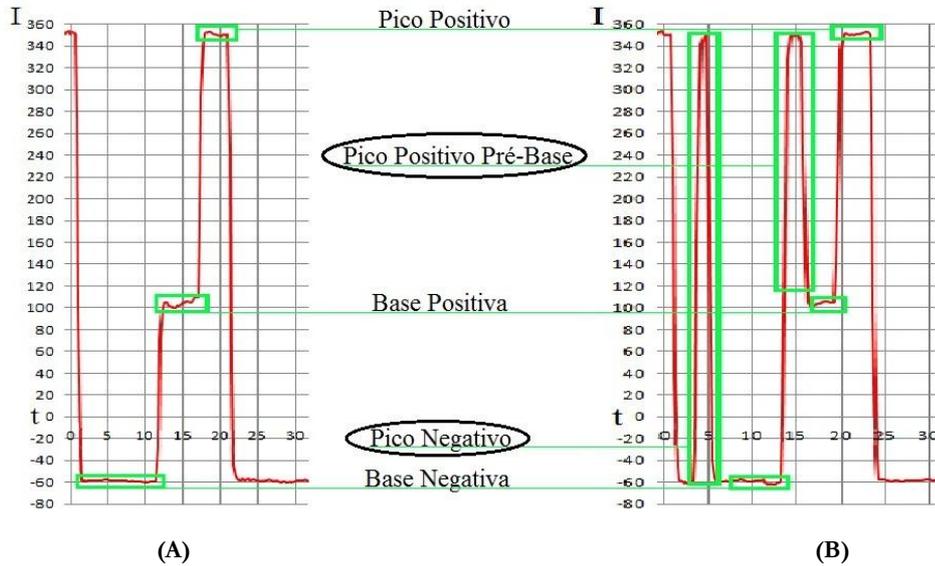


Figura 4.2 – Critério para medição e avaliação da corrente de soldagem, (A) ciclo bem definido e (B) ciclo com oscilações.

A **Figura 4.3** segue a mesma tendência para análise, porém aplicada para ciclos de tensão da soldagem. O segmento (A) ilustrado nesta figura refere-se a um ciclo consideravelmente normal para a tensão de soldagem. No segmento (B) estão representados os tipos de picos e/ou oscilações encontrados em determinados ciclos.

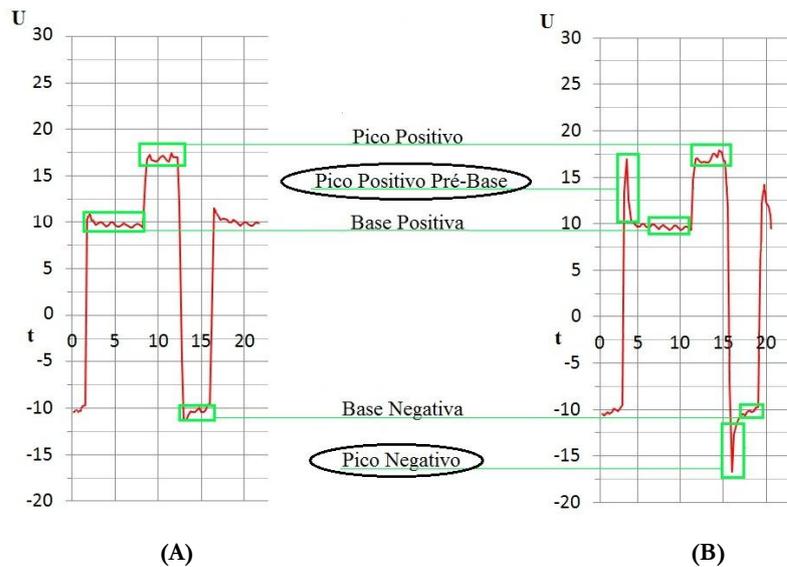


Figura 4.3 – Critério para medição e avaliação da tensão de soldagem, (A) ciclo bem definido e (B) ciclo com oscilações.

O registro de resposta do comportamento do processo ($U \cdot I_r$) se deu por meio da dispersão dos sinais de tensão e corrente de soldagem para cada experimento. Tais interações são constituídas de laços sobrepostos. Acredita-se que quanto mais uniformes os laços e quanto menor as dispersões entre eles, reflete um melhor comportamento do processo e estabilidade do processo e, conseqüentemente, melhor cordão de solda. A **Figura 4.4** exemplifica duas condições de soldagens avaliadas como uma solda com boa estabilidade dos parâmetros (ensaio 01) e outra considerada de baixa estabilidade (ensaio 16).

Desta forma, para cada experimento foi elaborado um gráfico comparativo ($U \cdot I$) e atribuídas notas pelos pesquisadores envolvidos no trabalho, a fim de elucidar qual condição de regulagem dos parâmetros poderia resultar em um melhor comportamento para o processo. Os critérios para avaliação foram realizados a partir da amplitude de dispersão gerada nos gráficos; a **Figura 4.5** ilustra o local das medições para fundamento da conjectura.

Para avaliação, o critério adotado para a resposta $U \cdot I$ foi atribuir notas de 01 a 10, segundo o seguinte:

- Nota 10: Laços mais uniformes e com mínimo de dispersões;
- Nota 05: Laços uniformes, porém não seguem no mesmo ciclo;
- Nota 01: Laços não uniformes e sem orientação de um ciclo;
- Notas intermediárias (01 a 05): Laços com tendência de serem uniformes;
- Notas intermediárias (05 a 10): Laços uniformes, porém com determinado nível de dispersões entre eles.

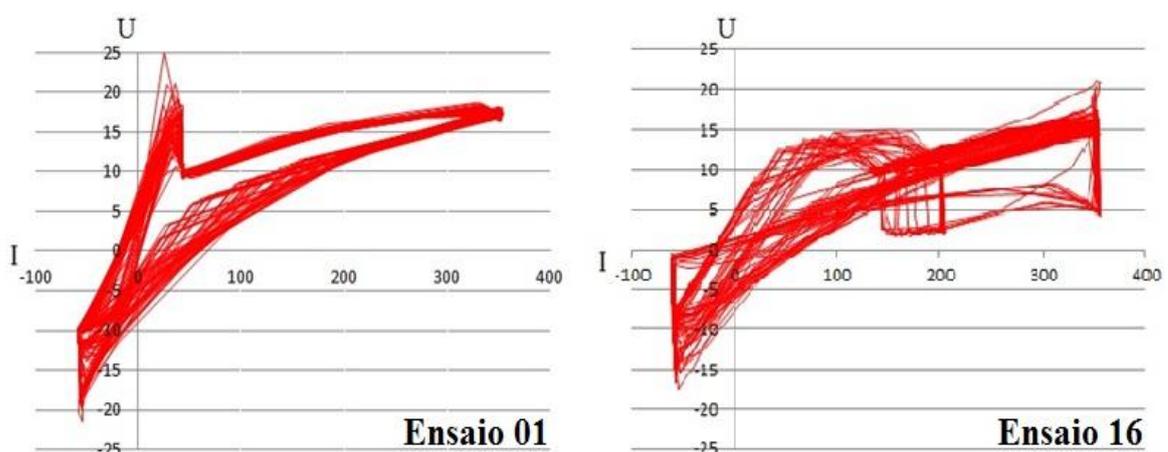


Figura 4.4 – Gráfico de dispersão $U \cdot I$. Ensaio 01 com boa estabilidade e Ensaio 16 com baixa estabilidade.

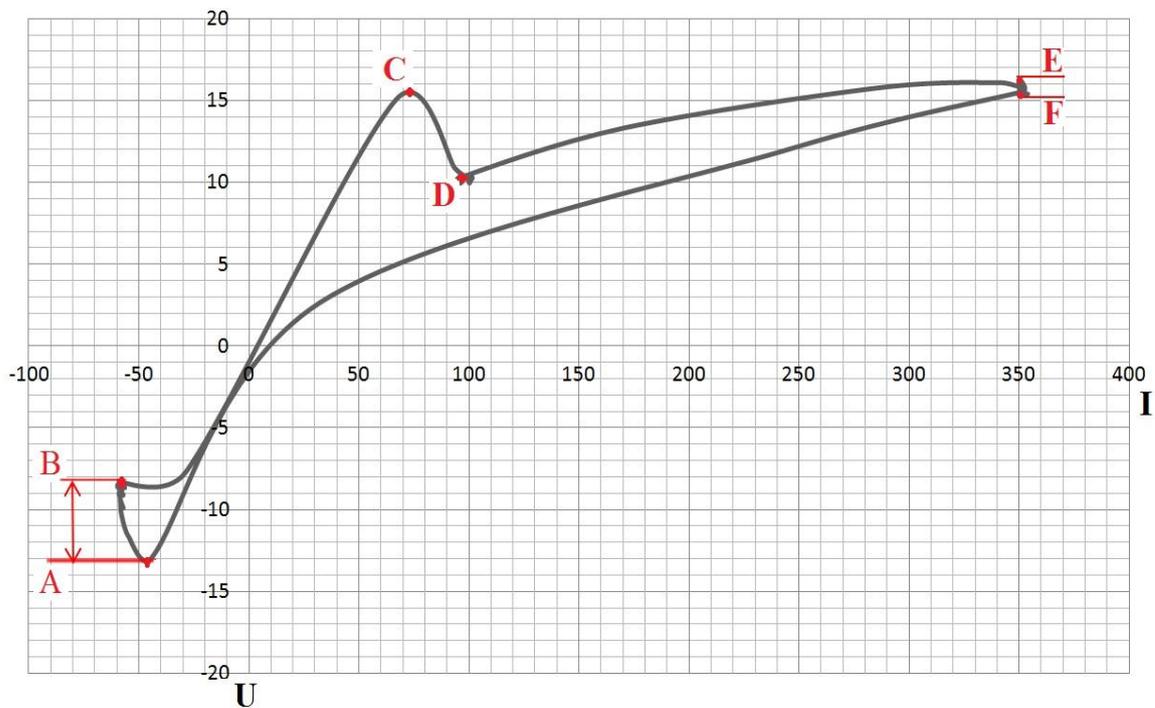


Figura 4.5 – Interação ($U \cdot I$) com apenas um ciclo e critério de medição para avaliação.

A **Figura 4.5** mostra o sistema adotado para avaliação, quanto maior a distância entre os pontos “A” e “B” e entre os pontos “E” e “F” menor a nota atribuída. Os pontos, isoladamente, “C” e “D” são pontos para referência, quanto menor as dispersões das linhas sobrepostas em relação a esses pontos, maior a nota.

Foi avaliada ainda a frequência do número de picos (F) durante cada segundo (fornecido pelo próprio sistema de aquisição) e a sua relação com a presença de picos intermediários (Pinte) verificados no período da corrente de base, após a inversão do ciclo negativo para o positivo, momento que, de certa forma ocorre uma reignição do arco. Alterações nesta resposta (Pinte) podem indicar aumento de instabilidade no processo.

4.5 Resultados obtidos

A **Tabela 4.4** apresenta os arranjos experimentais gerados, bem como os resultados das características geométricas (largura, penetração, reforço e taxa de diluição) e econômica (taxa de deposição). A **Tabela 4.5** mostra os resultados obtidos para as notas atribuídas à dispersão dos sinais ($U \cdot I_r$), variação na base (D_{base+}), variação no pico (D_{Pico-}), picos intermediários

na base (Pinte) e frequência do número de picos (F), avaliados conforme descritos anteriormente.

A partir dos resultados obtidos procedeu-se a Análise de Variância (ANOVA) para todas as respostas, procurando avaliar o efeito significativo dos parâmetros, bem como de suas interações (até três) sobre as respostas. Considerando um nível de significância de 95%, ou seja, valores de *Pvalue* inferiores a 5% indicam efeito significativo, procedeu-se a redução dos modelos pela eliminação dos fatores não significativos.

A **Tabela 4.6** mostra os resultados obtidos para estes modelos reduzidos onde se observa que, para as respostas de: penetração, diluição, taxa de deposição e dispersão da tensão e corrente (notas para U*Ir), os resultados mostram modelos com muito bons ajustes, visto que os valores de R^2_{adj} foram superiores a 81%. Para as respostas largura, reforço, variação do arco na base positivo (Dbase+) e frequência, os ajustes foram superiores a 61%, portanto considerados razoáveis. Para as respostas de variação do arco no pico negativo e percentual de picos intermediários na reignição, os ajustes foram inferiores a 43%, portanto muito pobres e desta forma considerados sem validade estatística.

Neste sentido, observou-se pelos resultados que a utilização de técnicas estatísticas baseadas no DOE para a avaliação do comportamento do arco no processo MIG/MAG Pulsado – CA, com exceção dos gráficos de dispersão (U*Ir), mostra resultados com pouca validade estatística (pouca capacidade de explicação real), condição esta provavelmente devido à alta dinâmica do processo na inversão dos ciclos, o que provoca uma aleatoriedade muito grande no comportamento do arco.

Visto que as análises estatísticas para a previsibilidade de modelos se baseiam em um comportamento de certa forma regular, tais resultados mostram o que já era esperado em função do alto dinamismo do processo. Porém, mesmo sem a validade estatística prevista, os resultados gerados para estas respostas podem ser aproveitados através da análise de tendências, o que será feito mais a frente.

Considerando ainda a utilização da análise de variância, para as respostas com R^2_{adj} superior a 61% foram determinados os efeitos principais dos parâmetros, bem como de suas interações.

A **Tabela 4.6** mostra em destaque (negrito) os parâmetros e suas interações (até 3ª ordem) que se mostraram significativos ($Pvalue < 0,05$), sendo que quanto menor o seu valor, mais significativo pode ser considerado a sua influência sobre a resposta analisada.

Tabela 4.4 – Arranjo dos ensaios e respostas para a geometria e economia do cordão.

Ensaio	Parâmetros					Geometria				Economia
	Ib A	tb ms	EN %	Va m/min	tn ms	W mm	P mm	R mm	D %	TD Kg/h
1	50	5	30	3	3,9	6,9	1,2	2,1	26,7	1,46
2	90	5	30	3	3,9	6,8	1,2	2,2	23,9	1,29
3	50	10	30	3	6	6,3	1,1	2,4	22,6	1,39
4	90	10	30	3	6	6,5	1,4	2,3	27,7	1,46
5	50	5	60	3	13,5	6,2	1,3	2,2	24,1	1,33
6	90	5	60	3	13,5	6,5	1,4	2,3	28,7	1,48
7	50	10	60	3	21	6,9	0,9	2,3	18,3	1,37
8	90	10	60	3	21	7,2	0,8	2,4	18,5	1,35
9	50	5	30	3,5	3,9	7,8	1,6	2,3	31,5	1,65
10	90	5	30	3,5	3,9	8,3	1,8	2,1	33,1	1,67
11	50	10	30	3,5	6	7,7	1,4	2,2	31,0	1,43
12	90	10	30	3,5	6	8,0	1,4	2,3	31,7	1,72
13	50	5	60	3,5	13,5	8,1	1,0	2,5	20,9	1,45
14	90	5	60	3,5	13,5	8,3	1,0	2,5	23,1	1,62
15	50	10	60	3,5	21	7,2	0,7	2,9	11,3	1,72
16	90	10	60	3,5	21	8,1	1,0	2,6	17,9	1,65
17	50	5	30	3	3,9	7,1	1,3	2,3	27,5	1,31
18	90	5	30	3	3,9	6,2	1,0	2,3	20,4	1,32
19	50	10	30	3	6	5,6	0,8	2,0	20,0	1,14
20	90	10	30	3	6	7,0	1,4	2,1	30,2	1,44
21	50	5	60	3	13,5	7,1	1,4	2,3	25,6	1,41
22	90	5	60	3	13,5	6,9	1,4	2,5	27,7	1,46
23	50	10	60	3	21	7,3	0,9	2,3	20,5	1,34
24	90	10	60	3	21	7,1	0,8	2,3	17,9	1,38
25	50	5	30	3,5	3,9	7,9	1,7	2,2	30,3	1,64
26	90	5	30	3,5	3,9	8,2	1,7	2,3	30,3	1,67
27	50	10	30	3,5	6	7,9	1,3	2,5	25,8	1,60
28	90	10	30	3,5	6	8,3	1,4	2,4	29,2	1,69
29	50	5	60	3,5	13,5	7,9	0,9	2,6	16,3	1,62
30	90	5	60	3,5	13,5	7,2	0,8	2,4	16,7	1,57
31	50	10	60	3,5	21	7,8	0,7	2,8	9,7	1,70
32	90	10	60	3,5	21	7,5	0,5	2,6	8,3	1,70
33	70	7,5	45	3,25	9,4	7,6	1,3	2,1	30,7	1,42
34	70	7,5	45	3,25	9,4	7,9	1,2	2,1	30,0	1,47

Tabela 4.5 – Respostas para a análise da estabilidade do arco e comportamento do par U*I.

Ensaio	Parâmetros					Comportamento do arco				
	Ib A	tb ms	EN %	Va m/min	tn ms	U*I _r -	DPico- -	Dbase+ -	Pinte -	F -
1	50	5	30	3	3,9	10,0	3,29	2,65	0,52	57
2	90	5	30	3	3,9	9,0	3,56	3,33	0,55	60
3	50	10	30	3	6	8,0	2,75	1,21	0,54	48
4	90	10	30	3	6	8,5	2,82	1,18	0,33	48
5	50	5	60	3	13,5	8,0	2,54	1,07	0,55	44
6	90	5	60	3	13,5	7,8	2,66	1,10	0,53	43
7	50	10	60	3	21	4,5	4,80	1,15	0,28	28
8	90	10	60	3	21	5,0	2,50	0,98	0,29	28
9	50	5	30	3,5	3,9	5,5	2,09	1,52	0,65	75
10	90	5	30	3,5	3,9	6,0	2,02	1,46	0,65	76
11	50	10	30	3,5	6	4,5	2,40	1,20	0,44	48
12	90	10	30	3,5	6	6,0	2,36	1,12	0,76	50
13	50	5	60	3,5	13,5	4,0	4,13	0,96	0,68	25
14	90	5	60	3,5	13,5	1,5	2,33	0,89	*	17
15	50	10	60	3,5	21	3,0	2,27	2,88	0,19	78
16	90	10	60	3,5	21	2,5	2,75	0,89	0,17	54
17	50	5	30	3	3,9	9,5	3,78	3,54	0,52	67
18	90	5	30	3	3,9	8,5	3,51	3,06	0,65	65
19	50	10	30	3	6	7,5	3,10	2,02	0,78	40
20	90	10	30	3	6	7,5	3,54	1,49	0,58	38
21	50	5	60	3	13,5	5,0	3,16	1,13	0,39	44
22	90	5	60	3	13,5	7,0	3,13	0,96	0,64	44
23	50	10	60	3	21	4,5	2,20	1,40	0,36	28
24	90	10	60	3	21	5,0	1,98	0,89	0,21	28
25	50	5	30	3,5	3,9	5,5	4,31	2,47	0,55	80
26	90	5	30	3,5	3,9	7,5	3,12	2,38	0,84	63
27	50	10	30	3,5	6	5,0	2,61	1,28	0,44	48
28	90	10	30	3,5	6	6,0	2,29	0,97	0,29	48
29	50	5	60	3,5	13,5	4,0	2,22	1,36	0,29	58
30	90	5	60	3,5	13,5	2,0	2,38	2,90	0,39	44
31	50	10	60	3,5	21	3,0	2,43	3,85	0,38	42
32	90	10	60	3,5	21	2,0	3,05	1,71	0,36	28
33	70	7,5	45	3,25	9,4	6,5	2,10	0,75	0,53	47
34	70	7,5	45	3,25	9,4	6,5	1,98	1,15	0,36	47

Tabela 4.6 – Análise de variância para as respostas.

Coeficiente	Geometria				Economia		Arco			
	W	P	R	D	TD	U*Ir	Dbase+	Dpico-	F	Pinte
Ib	0,261	0,269	0,937	0,132	0,022	0,933	0,157	0,281	0,335	0,899
tb	0,000	0,637	0,219	0,000	0,728	0,000	0,039	0,249	0,001	0,004
EN	0,000	0,615	0,000	0,000	0,463	0,000	0,034	0,418	0,000	0,001
Va	0,633	0,000	0,000	0,391	0,000	0,000	0,822	0,087	0,013	0,773
Ib*tb	0,234	0,111	-	0,166	0,195	0,194	-	-	-	0,231
Ib*EN	0,277	0,312	0,223	-	-	0,069	-	-	-	-
Ib*Va	-	-	0,082	-	-	-	-	-	-	-
tb*EN	0,043	0,201	0,222	0,001	0,285	-	0,000	-	0,012	0,261
tb*Va	-	-	-	-	0,185	0,008	0,042	-	0,189	-
EN*Va	0,000	0,029	0,046	0,000	-	-	0,000	-	-	-
Ib*tb*EN	0,093	-	0,164	0,031	0,003	-	0,098	-	-	-
Ib*tb*Va	0,297	-	-	-	-	-	0,144	0,131	-	0,229
Ib*EN*Va	-	-	0,180	-	0,292	0,000	-	-	-	0,202
tb*EN*Va	0,007	0,044	-	-	0,013	0,145	-	-	0,032	0,185
CtPt	0,582	0,077	0,015	0,001	0,249	0,102	0,059	0,090	0,779	0,753
R ² (adj)	81,12	73,91	63,79	84,42	82,17	92,48	64,10	15,27	61,89	43,64
AD	0,342	0,465	0,170	0,332	0,520	0,899	0,259	0,603	1,316	0,108
Pvalue	0,471	0,239	0,927	0,502	0,173	0,019	0,693	0,108	0,005	0,993
LOF	0,099	0,584	0,985	0,467	0,804	0,682	0,446	0,916	0,903	0,960

Coeficientes em **negrito** indicam os termos significativos

4.6 Análise dos efeitos principais e de interação dos parâmetros

Com a seleção e organização das respostas obtidas ao decorrer dos experimentos, foi possível investigar o comportamento do processo ao variar os níveis de trabalho dos parâmetros.

As análises dos efeitos principais e da interação destes parâmetros variáveis foram concentradas nas influências sobre as características geométricas, econômicas e aspecto visual dos cordões, além de uma avaliação do comportamento do arco durante soldagem, resposta esta avaliada através de informações geradas pelos gráficos de corrente e tensão para aço carbono.

4.6.1 Características geométricas do cordão

4.6.1.1 Penetração da solda

Os resultados gerados na **Tabela 4.6** mostraram que os parâmetros EN, t_b e as interações $EN*V_a$, t_b*EN*V_a e t_b*EN foram nesta ordem os mais significativos sobre a penetração da solda. A **Figura 4.6** mostra os efeitos principais dos parâmetros, indicando que somente o percentual de tempo do eletrodo na polaridade negativa e o tempo de base se mostraram significativos.

Com relação ao eletrodo, observa-se que, quanto maior o percentual de tempo de permanência no semi-ciclo negativo, menor o valor de penetração no cordão de solda. Tal resultado está em concordância com o apresentado na literatura, visto que maior tempo na polaridade negativa tende a aumentar a escalada do arco e conseqüentemente o seu comprimento.

Desta forma a penetração é diminuída com o aumento do tempo de EN. Nesse sentido, Talkington (1998) afirma que a partir do momento que o arame eletrodo é submetido á maior porcentagem de tempo na polaridade negativa a gota metálica em formação cresce demasiadamente, como resultado da elevada exposição á forças repulsivas na polaridade negativa (LANCASTER, 1986). Cirino (2009) supõe que a gota é destacada com menor calor, em função da escalada do arco na extensão sólida do arame proporcionando maior aproveitamento do calor gerado para a fusão, porém este, disperso em uma pela maior região da extensão sólida envolvida pelo arco.

Quanto maior a porcentagem de tempo em polaridade negativa, menor será o valor da temperatura máxima sobre a superfície do metal de base, ou seja, menor aporte térmico (UEYAMA *et al.* 2005). Efeito similar ocorreu com o tempo de base, porém com uma influência menor na redução da penetração.

De acordo com a **Figura 4.6** os resultados para as respostas das variáveis corrente da base e velocidade de alimentação do arame não se mostraram significativos na penetração do cordão de solda, conforme mostra a **Tabela 4.6** com valores altos ($Pvalue < 0,05$).

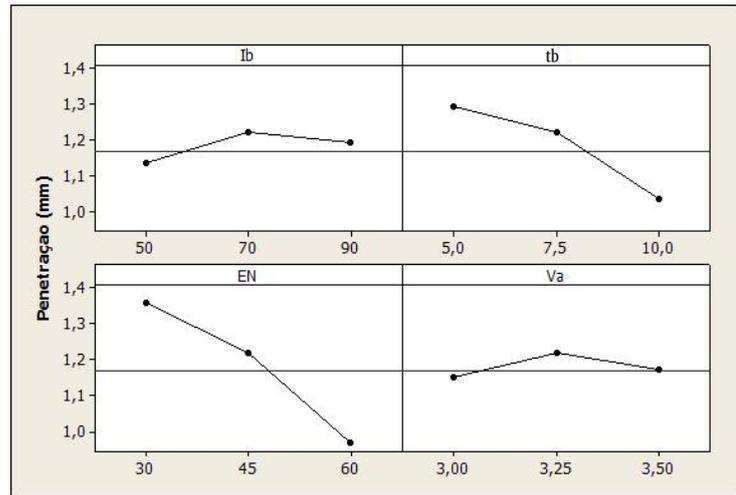


Figura 4.6 – Efeitos principais dos parâmetros na penetração da solda.

A **Figura 4.7** exibe o efeito da interação significativa entre o percentual de tempo do eletrodo negativo e a alimentação do arame na penetração. Consta-se desta interação que, se a característica desejável para soldas em chapas finas de aço carbono for a obtenção de menor penetração, é conseguida com a utilização de maior valor de EN (60%) e maior valor da velocidade de alimentação (3,5 m/min).

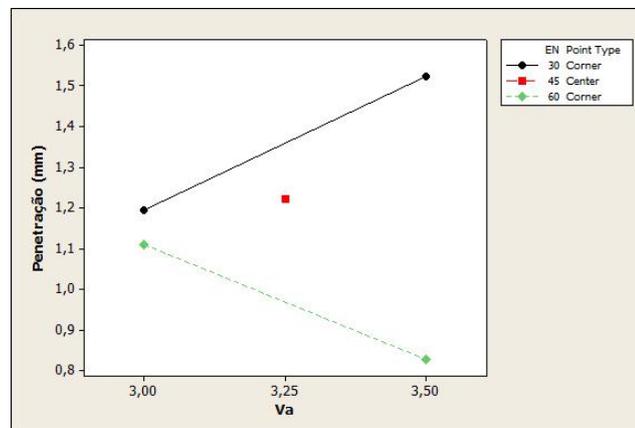


Figura 4.7 – Efeito da interação entre o percentual de tempo do arame eletrodo em polaridade negativa e a alimentação do arame sobre a penetração da solda.

A **Figura 4.8** mostra, a título de ilustração, o perfil do cordão de solda do ensaio 10 com maior penetração para EN=30% em comparação com a **Figura 4.9** que apresenta o cordão de solda do ensaio 15 com menor penetração para EN=60% com a mesma velocidade de alimentação 3,5m/min. O fato é que, o cordão do ensaio (10) possui menor valor de tempo a cada ciclo completo em comparação com ensaio (15), resultando em maior quantidade de

gotas sendo depositadas, provocando maior agitação da poça de fusão o que pode ter gerado maior penetração.

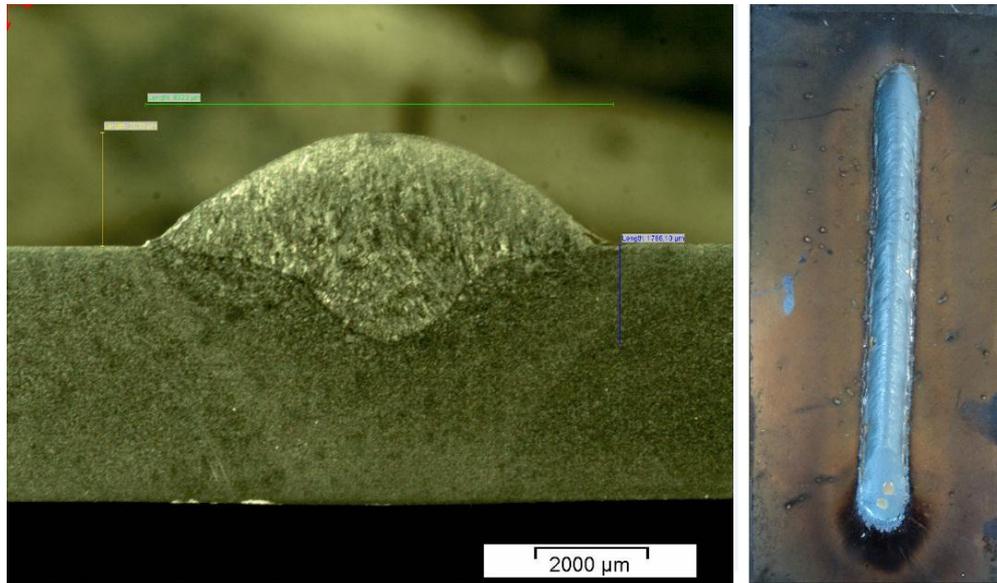


Figura 4.8 – Ensaio 10 com maior penetração.

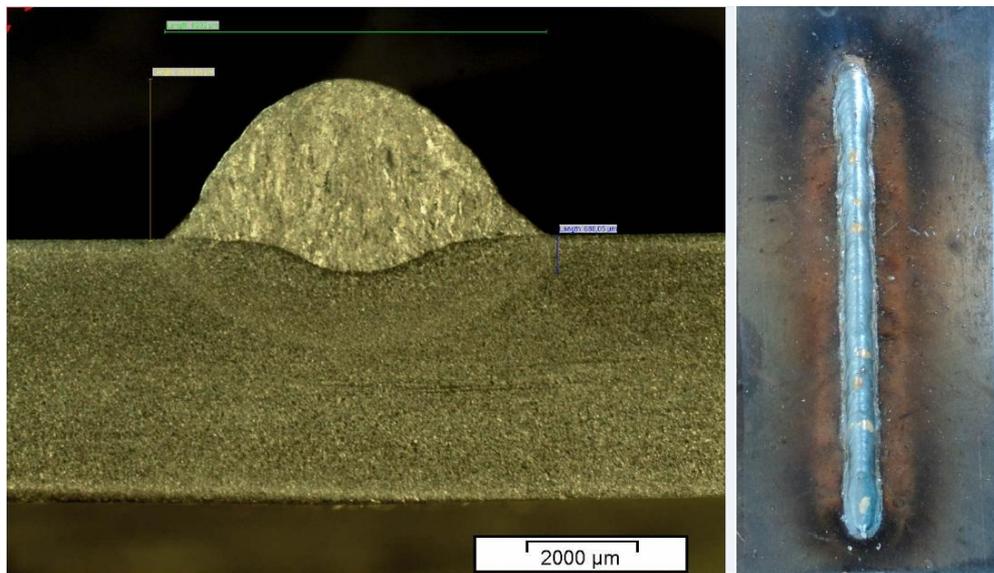


Figura 4.9 – Ensaio 15 com menor penetração.

Deste modo, associando todos os resultados, percebe-se que ocorre menor tendência à penetração no processo, nas condições estabelecidas neste trabalho, ao utilizar um alto percentual de tempo de permanência do arame eletrodo no semi-ciclo negativo com a velocidade de alimentação em seu valor máximo.

4.6.1.2 Largura do cordão

De acordo com a ANOVA (*Tabela 4.6*), o parâmetro Va e as interações EN*Va e tb*EN*Va foram nesta ordem os que apresentaram efeitos significativos sobre a largura do cordão.

Na *Figura 4.10* pode-se observar os efeitos principais dos parâmetros, destacando o comportamento da velocidade de alimentação, cujo aumento implica em maior valor da largura do cordão. Os outros parâmetros, praticamente, apresentaram efeitos lineares não significativos.

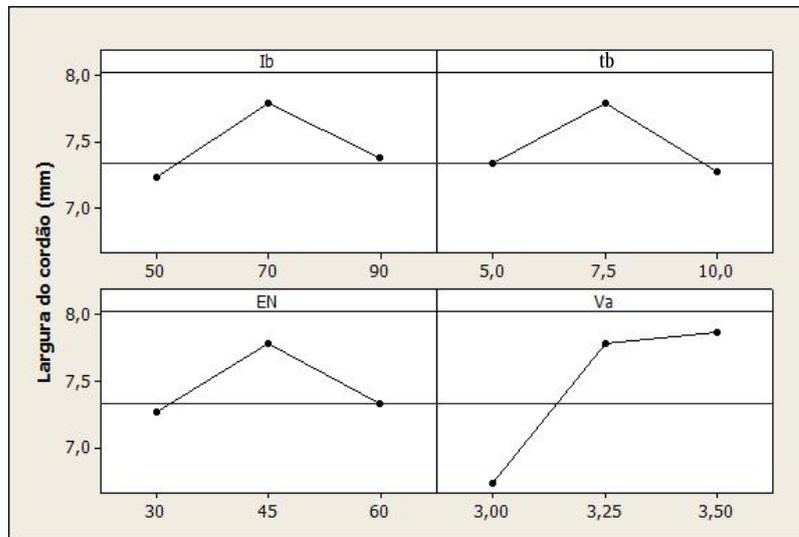


Figura 4.10 – Influência dos parâmetros sobre a largura do cordão.

A *Figura 4.11* ilustra tal afirmação; o ensaio 10 obteve maior largura operando uma velocidade de alimentação de 3,5m/min enquanto que, o ensaio 19 obteve menor largura com a velocidade de alimentação de 3m/min, como mostra a *Figura 4.12*. Tal fato ocorre em função da maior quantidade de material depositado, resultando em maiores dimensões do cordão.

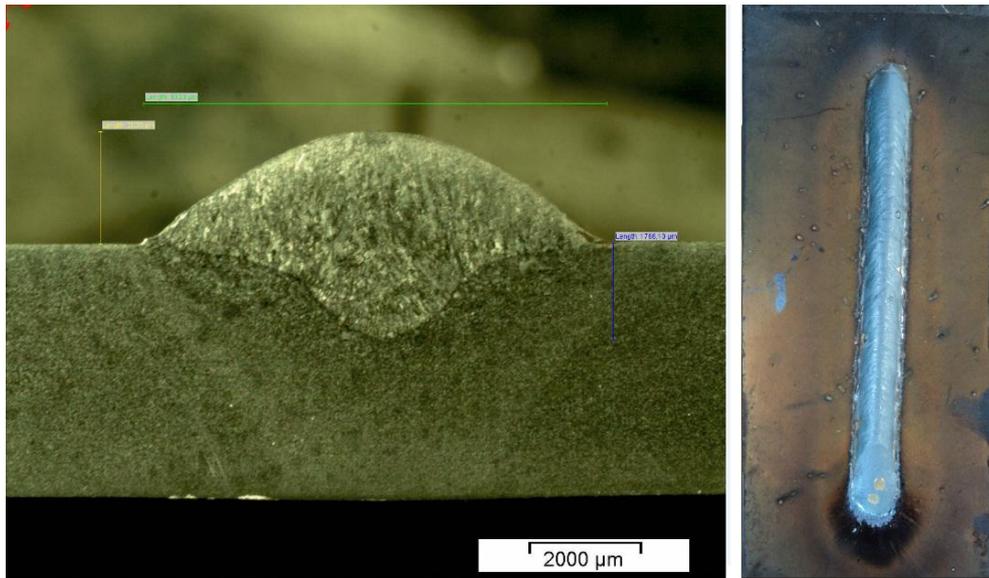


Figura 4.11 – Ensaio 10 com maior largura.

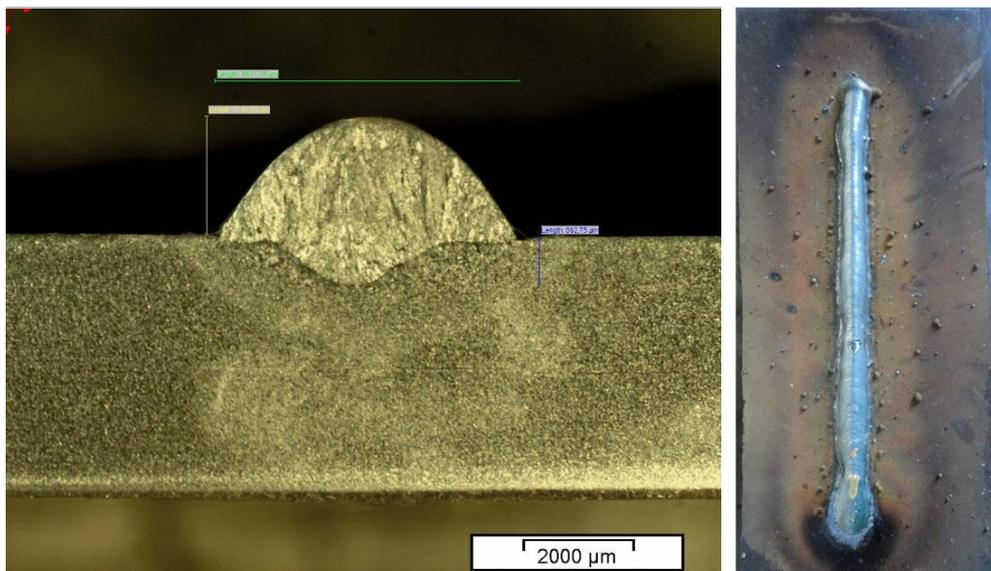


Figura 4.12 – Ensaio 19 com menor largura.

A **Figura 4.13** apresenta o efeito da interação entre o percentual de tempo do eletrodo negativo e a velocidade de alimentação do arame sobre a largura. Nota-se desta interação que maiores larguras do cordão foram obtidas com EN no nível mínimo (30%) e alimentação do arame no valor máximo (3,5 m/min). Entretanto, observa-se que a diferença de largura para o EN no nível máximo (60%) é relativamente pequena.

Esta pequena variação está em concordância com o anteriormente afirmado de que maior tempo de EN implica em maior escalada do arco e, conseqüentemente, maior largura do cordão. Porém, como a gota tende a ser transferida no pico no semi-ciclo positivo, outros

fatores físicos podem ocorrer com relação ao comportamento do arco fazendo com que esta tendência se inverta gerando maior largura com EN no nível mínimo.

Esta pequena variação da influência do EN é confirmada ao analisar a interação significativa $tb*EN*Va$, **Figura 4.14**, onde para um tempo de base mínimo (5ms) e velocidade de alimentação de 3,5 m/min, independente de EN, a largura do cordão é máxima com pequenas variações entre os extremos.

Como uma das supostas vantagens do processo MIG/MAG Pulsado – CA é a sua tolerância maior em relação à folga no posicionamento das juntas, valores maiores de largura favorecem este ajuste.

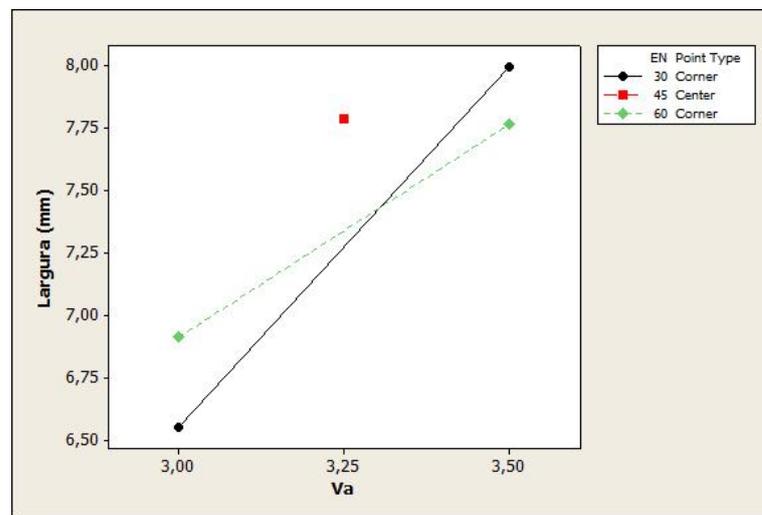


Figura 4.13 – Efeito da interação entre o percentual de tempo do arame eletrodo em polaridade negativa e a alimentação do arame sobre a largura.

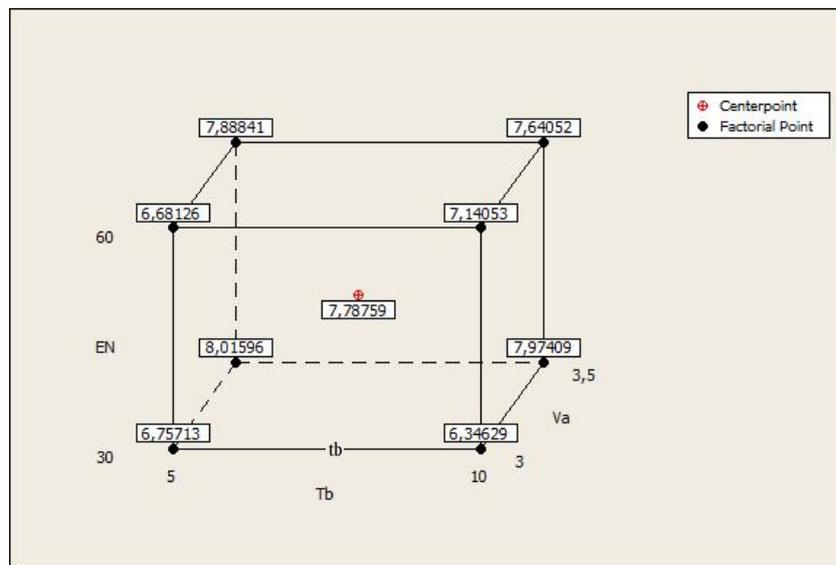


Figura 4.14 – Plotagem cúbica da interação $tb*EN*Va$ na largura do cordão.

4.6.1.3 Reforço do cordão

A ANOVA (*Tabela 4.6*) e a *Figura 4.15* revelam que para o reforço do cordão, somente o percentual de tempo do eletrodo na polaridade negativa e a velocidade de alimentação se mostraram significativos.

Com relação ao eletrodo observa-se que, quanto maior o tempo de permanência no semi-ciclo negativo, maior o reforço do cordão de solda, efeito este esperado devido a força repulsiva presente neste semi-ciclo que provoca redução da penetração e aumento de reforço no cordão. Para a velocidade de alimentação nota-se que, quanto maior a velocidade maior o valor do reforço efeito esse já esperado devido maior deposição de material. Os parâmetros de corrente de base e tempo de base não se mostraram significativos no reforço do cordão de solda.

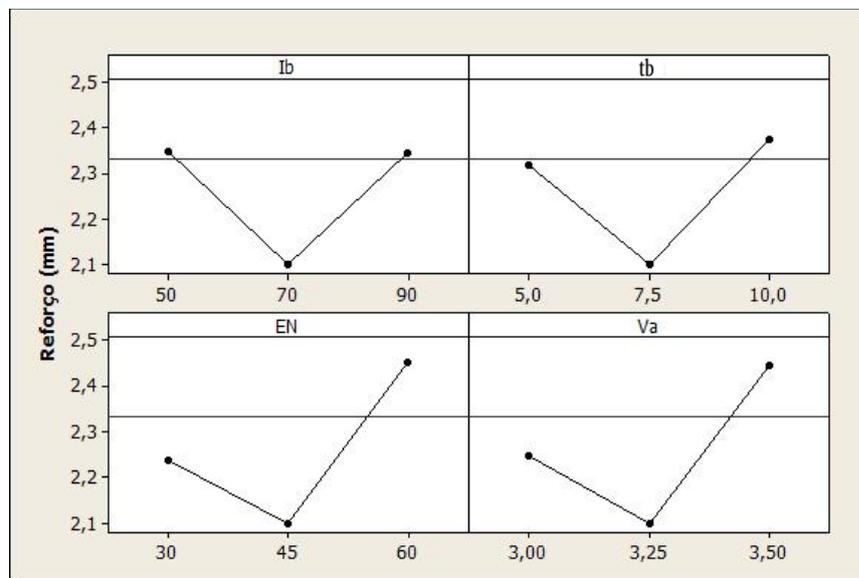


Figura 4.15 – Efeitos principais dos parâmetros sobre o reforço.

Na *Figura 4.16* observa-se que o maior valor de reforço se dá com a utilização do tempo da corrente de base e alimentação em seu nível máximo.

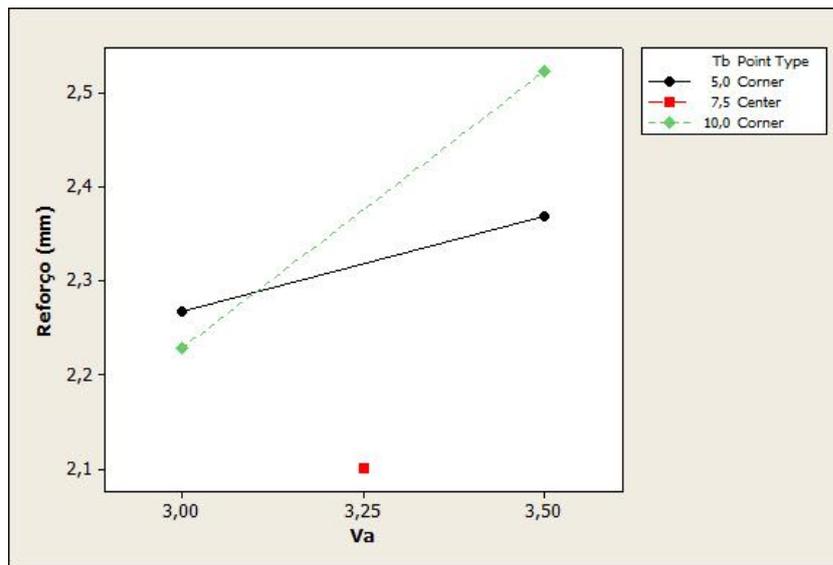


Figura 4.16 – Efeito da interação entre o tempo de base e a alimentação do arame sobre o reforço do cordão de solda.

Para ilustrar o resultado das interações, a **Figura 4.17** mostra o cordão de solda do ensaio 15 com maior valor de reforço executado para EN=60%, tempo de base de 10ms e 3,5m/min para velocidade de alimentação do arame.

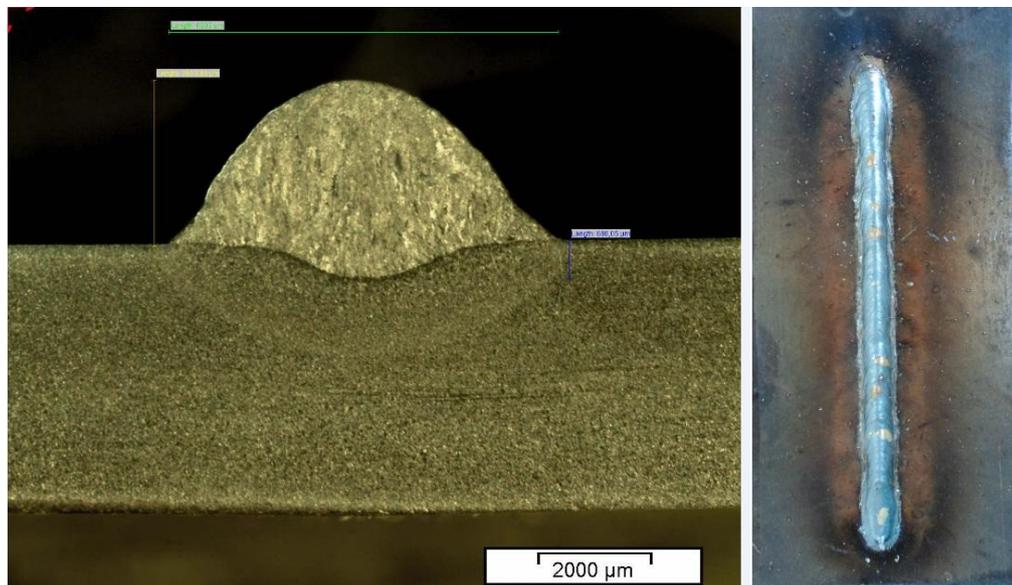


Figura 4.17 – Ensaio 15 com maior reforço.

A **Figura 4.18** apresenta o cordão de solda do ensaio 01 para EN=30%, tempo base de 5ms e 3m/min para a velocidade de alimentação do arame que obteve menor reforço.

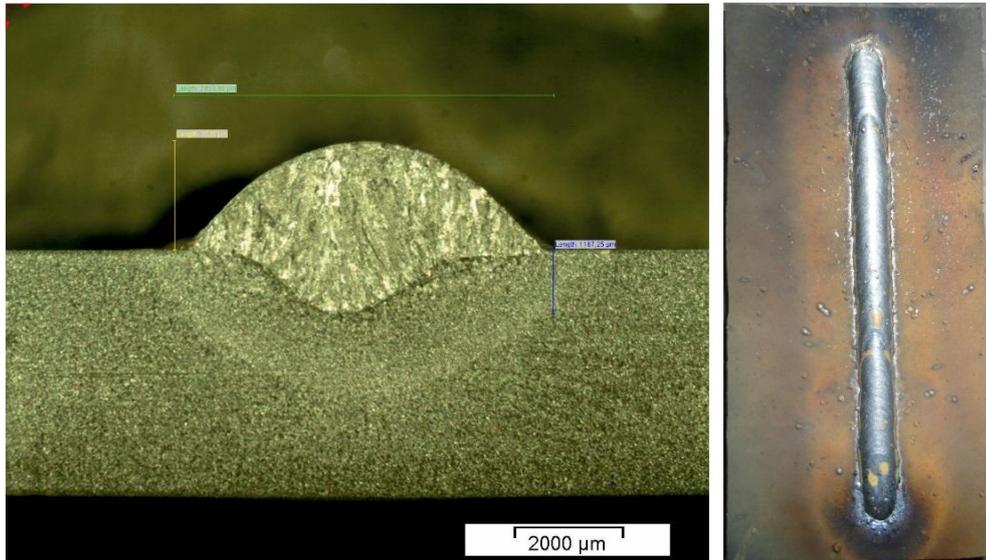


Figura 4.18 – Ensaio 01 com menor reforço.

Entretanto, é importante ressaltar que um aumento de reforço não se mostra positivo para o formato geométrico do cordão, podendo inclusive gerar defeitos como mordeduras. Assim a minimização deste pode ser positiva e pelos resultados gerados, a utilização de regulagens em seu ponto médio se mostra como as mais viáveis.

4.6.1.4 Diluição do cordão

Na diluição, a porcentagem de tempo do arame eletrodo em polaridade negativa mostrou-se significativa, seguida sutilmente pelo tempo de base em polaridade positiva, como se pode notar na *Figura 4.19*.

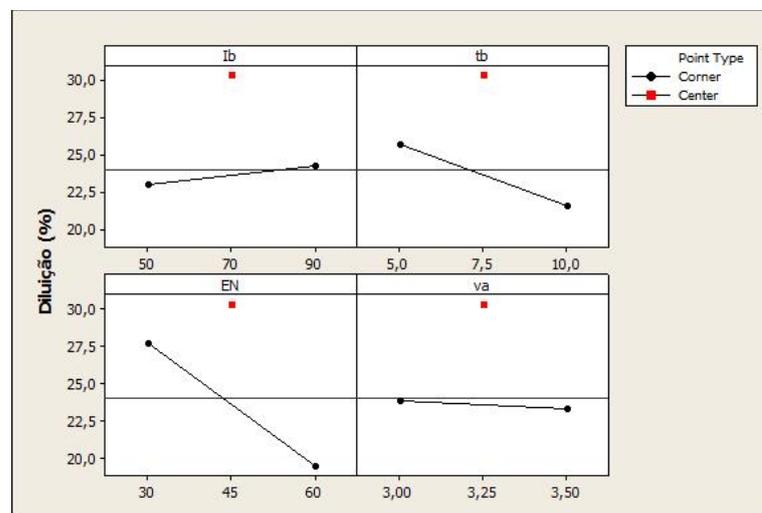


Figura 4.19 – Efeitos dos parâmetros principais na diluição do cordão.

Em relação ao arame eletrodo, como já era esperado, observa-se que, quanto maior o tempo de permanência no semi-ciclo negativo, menor a taxa de diluição do cordão de solda. Efeito similar ocorreu com o tempo de base, porém com efeito menor na redução da diluição.

O parâmetro corrente de base e velocidade de alimentação do arame não se mostraram significativos na diluição do cordão de solda. Entretanto, a interação do tempo de permanência no semi-ciclo negativo com a alimentação do arame foi altamente significativa. Observa-se desta interação (**Figura 4.20**) que a maior taxa de diluição se dá com a utilização do percentual de tempo do eletrodo em polaridade negativa em seu nível mínimo, associado a uma maior velocidade de alimentação do arame eletrodo.

Novamente, a permanência do eletrodo negativo em um tempo menor implica em maior geração de calor na chapa, fato este provocado pela diminuição da força repulsiva na formação de gotas na ponta do arame eletrodo. Assim, como afirmado anteriormente, a penetração do cordão aumenta e, conseqüentemente a sua diluição sendo esta favorecida ainda mais pelo aumento da velocidade de alimentação do arame.

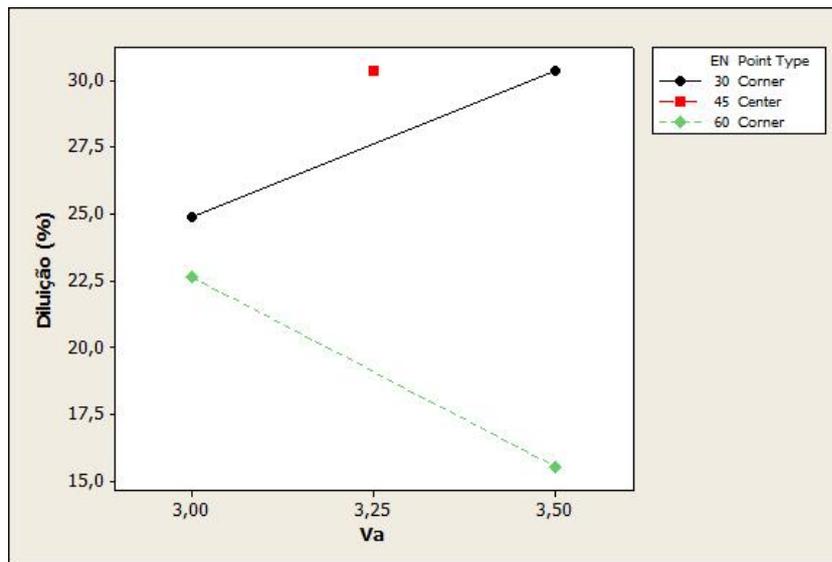


Figura 4.20 – Efeito da interação entre o percentual de tempo do arame eletrodo em polaridade negativa e a alimentação do arame sobre a taxa de diluição.

Para ilustrar resultado desta interação a **Figura 4.21** mostra o cordão de solda gerado pelo ensaio 10 com menor valor de EN e t_b , resultando em maior taxa de diluição.

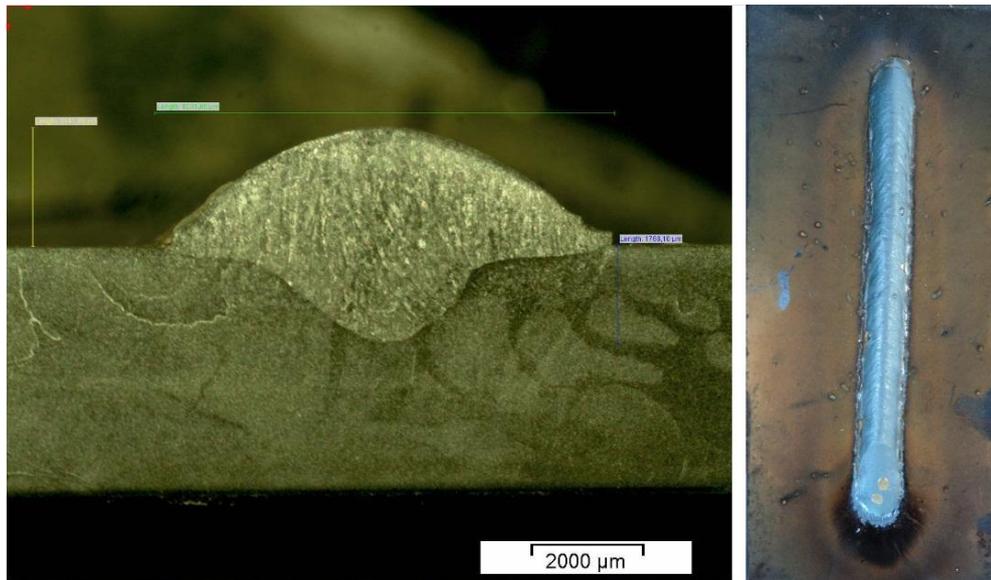


Figura 4.21 – Ensaio 10 com maior taxa de diluição.

A **Figura 4.22**, mostra o cordão gerado pelo ensaio 31 que ao usufruir de maiores valores de EN e t_b obteve menor valor para taxa de diluição.

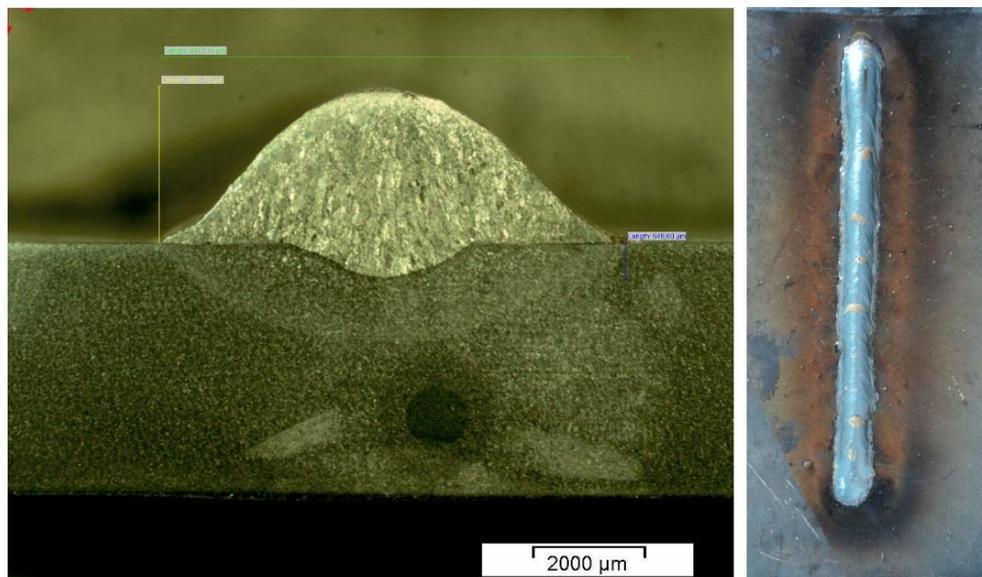


Figura 4.22 – Ensaio 31 com menor taxa de diluição.

Desta maneira conclui-se que para obter maior valor para taxa de diluição faz-se necessário a combinação de menor percentual de tempo do arame eletrodo em polaridade negativa, juntamente com menor tempo de duração na base positiva, nas condições estabelecidas para este trabalho.

4.6.2 Características econômicas do processo

A ANOVA (*Tabela 4.6*) associado à taxa de deposição mostra que o efeito principal da alimentação do arame e a corrente de base, bem como das interações $I_b*tb*EN$ e $tb*EN*Va$ foram os mais significativos.

A *Figura 4.23* mostra os efeitos principais resultantes em relação à taxa de deposição que representa a característica econômica do processo MIG/MAG Pulsado – CA, para as condições estabelecidas neste trabalho, onde se verifica que o aumento da alimentação do arame provoca uma maior taxa de deposição.

Como uma maior velocidade de alimentação provoca uma maior geração de calor (desde que os outros parâmetros se mantenham), conseqüentemente gera uma maior deposição. A corrente de base em polaridade positiva mostrou-se pouco significativa e as variáveis restantes não se mostraram influentes na taxa de deposição do cordão de solda.

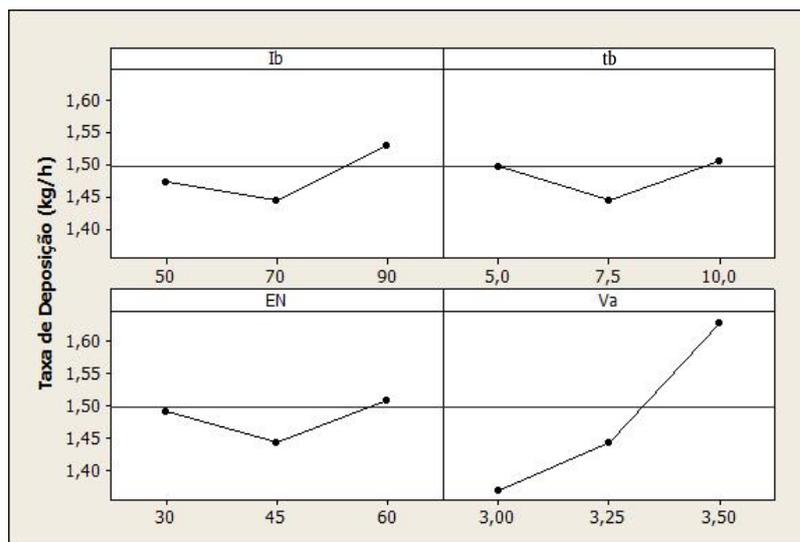


Figura 4.23 – Efeitos principais sobre a taxa de deposição.

A *Figura 4.24* mostra a plotagem cúbica das interações significativas $I_b*tb*EN$ e $tb*EN*Va$ sobre a taxa de deposição. Considerando esta última interação, para a máxima velocidade de alimentação, a taxa de deposição é maximizada para tempo na base e tempo do eletrodo no semi-ciclo negativo em seus níveis máximos, ou seja, 10ms e 60% respectivamente. Por sua vez, considerando a *Figura 4.24* (A), tal imposição de parâmetros exige para a maximização da deposição a utilização de uma corrente de base no seu nível inferior (50A).

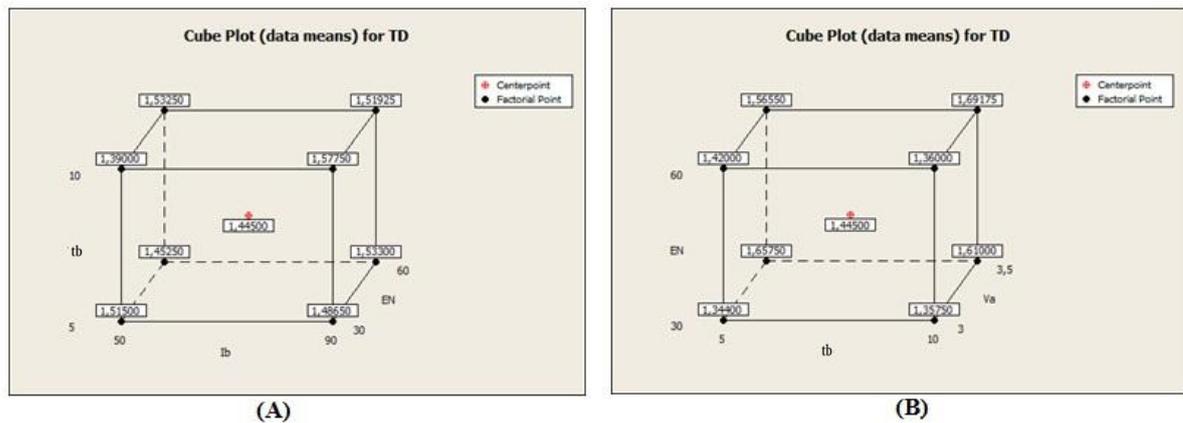


Figura 4.24 – Plotagem cúbica das interações significativas na taxa de deposição. (A) $I_b \cdot t_b \cdot EN$ e (B) $t_b \cdot EN \cdot V_a$.

4.6.3 Estabilidade do arco no processo

Como destacado no item 2.3.2, a estabilidade do processo MIG/MAG Pulsado – CA é afetada pelo alto dinamismo dos parâmetros elétricos, devido às suas inversões durante os semi-ciclos de soldagens. Exinções do arco seguidas por reignições, certamente inserem uma instabilidade ao processo, onde a influência dos parâmetros pode ajudar na melhoria deste comportamento.

Neste sentido, técnicas estatísticas foram aqui utilizadas para avaliar o comportamento dos parâmetros $U \cdot I$, durante soldagem, procurando avaliar a influência dos parâmetros no melhor comportamento do arco e, por conseguinte, do processo de soldagem. Como se observou dos resultados mostrados através da utilização da ANOVA (*Tabela 4.6*), algumas das respostas avaliadas não permitiram a obtenção de uma confiabilidade estatística que permitisse auferir conclusões definitivas.

Este foi o caso do desvio da corrente no pico em semi-ciclo negativo (D_{pico-}) e a ocorrência de picos intermediários na base positiva (P_{inte}), que não serão então analisados pelo baixo R^2_{adj} e, portanto, baixa capacidade de explicabilidade do modelo gerado.

4.6.4 Regularidade do par tensão corrente ($U \cdot I_r$)

De acordo com o sub-tópico 4.3.4 foi proposta uma forma de avaliação para estudo do comportamento do processo, onde a *Tabela 4.5* mostra o resultado das notas atribuídas pelos

pesquisadores para cada experimento. As análises estatísticas de variância destes conceitos mostram que os parâmetros t_b , EN, V_a e as interações $t_b \cdot V_a$ e $I_b \cdot EN \cdot V_a$ foram nesta ordem, os mais significativos nesta resposta.

A **Figura 4.25** apresenta os efeitos principais resultantes em relação à análise do comportamento do processo MIG/MAG Pulsado – CA, para as condições estabelecidas neste trabalho. Pode-se perceber que a melhor regularidade do processo, segundo o critério de avaliação adotado, ocorre para valores mínimos de ajuste dos tempos na base e do eletrodo no semi-ciclo negativo, bem como de uma menor velocidade de alimentação do arame.

Com relação ao tempo do eletrodo no semi-ciclo negativo, o resultado observado pode ser explicado pela menor ação da escalada do arco, gerando em consequência uma maior estabilização da tensão de soldagem. Por sua vez, este efeito combinado com a menor alimentação do arame, provoca em consequência uma provável regularidade maior na formação das gotas e suas transferências.

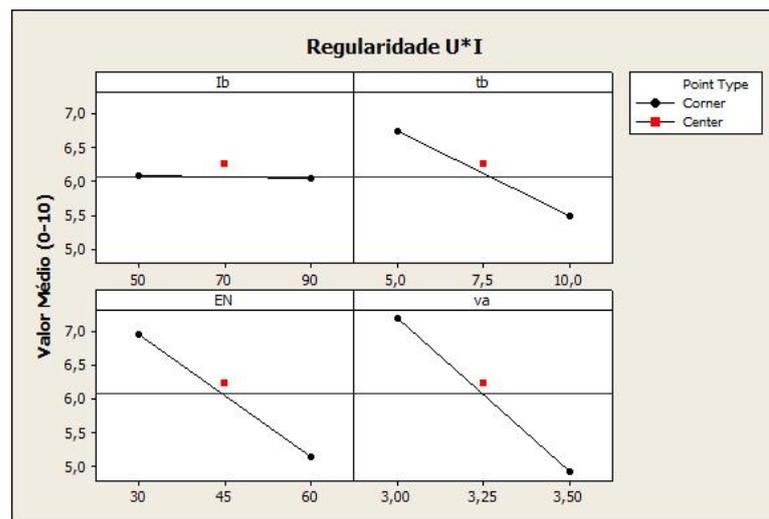


Figura 4.25 – Efeitos principais sobre a regularidade do processo.

Por outro lado, a corrente de base isoladamente não foi significativa neste resultado, porém ao interagir com o tempo do eletrodo no semi-ciclo negativo e alimentação do arame, gerou uma interação significativa cujo comportamento pode ser observado pela plotagem cúbica mostrada na **Figura 4.26**.

Como mostrado anteriormente que a melhor estabilidade ocorre para menores velocidades de alimentação do arame e tempo no semi-ciclo negativo, nota-se pela plotagem que tal condição imposta conjuntamente com a corrente na base no nível mínimo (50A), conduz a uma maior regularidade do processo. Portanto, os resultados mostram que, para a

superfície de contorno estudada, as melhores condições de estabilidade do arco se verificaram com a utilização de todos os parâmetros em seus níveis mínimos de soldagem.

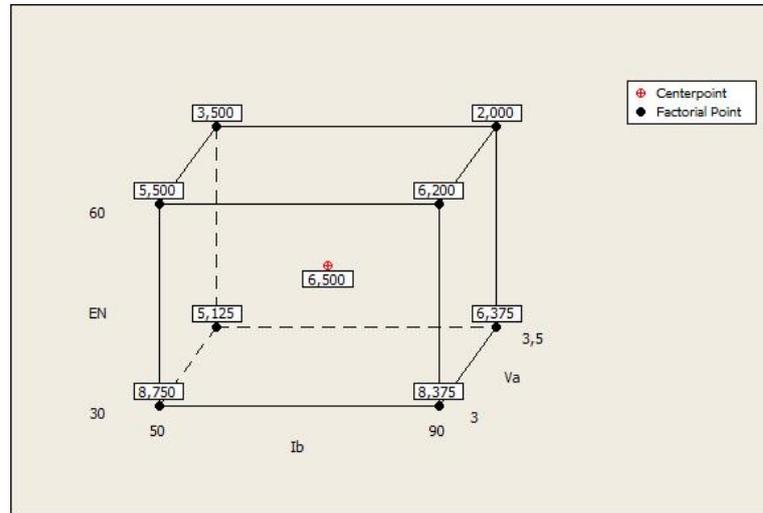


Figura 4.26 – Plotagem cúbica com as interações significativas na regularidade do arco.

Como o processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA apresenta uma alta dinâmica devido às inversões de ciclos, a regularidade dos sinais pode caracterizar um melhor comportamento do arco, sendo este requisito aparentemente fundamental para a utilização do mesmo na obtenção de boas condições de soldagem. Sob este aspecto, a **Figura 4.27** apresenta informações sobre a tendência observada entre a regularidade da dispersão U*I e a penetração do cordão. Observa-se a maior tendência para penetração a partir de melhores notas atribuídas, ou seja, para maiores regularidades dos laços.

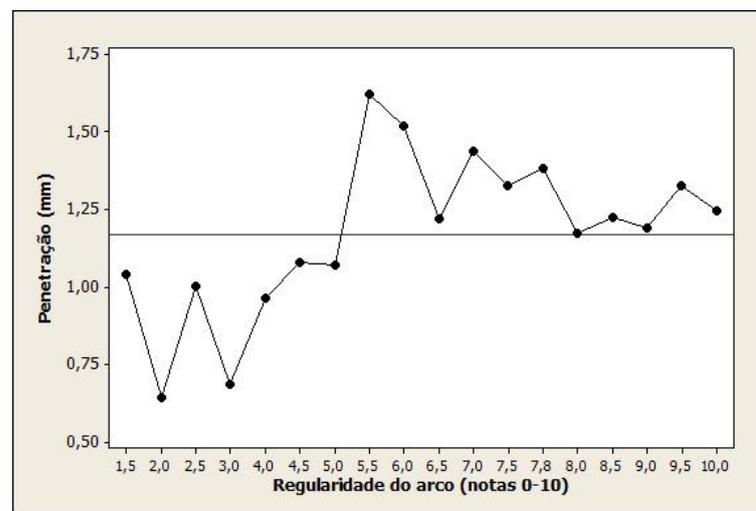


Figura 4.27 – Interação da nota atribuída à regularidade do arco na penetração do cordão.

4.6.5 Frequência de picos

É reconhecido no processo MIG/MAG pulsado em corrente contínua positiva que a melhor estabilidade do arco ocorre para a condição de UGPP associado a uma maior frequência de gotas. No processo MIG/MAG Pulsado – CA trabalhou-se nesta pesquisa com um valor fixo de corrente e tempo de pico, observa-se dos resultados obtidos que os parâmetros EN, tb e Va influenciam, nesta ordem, de forma significativa na frequência de picos no semi-ciclo positivo.

Conforme esperado, com menores tempos, observou-se a maior frequência de picos. No mesmo sentido o aumento da velocidade de alimentação do arame também aumentou a frequência, visto que maior a formação de gotas e conseqüentemente maiores destacamentos, melhorando a frequência dos picos. A corrente de base por sua vez teve pouca influência na frequência de picos. Tais resultados são mostrados na **Figura 4.28**.

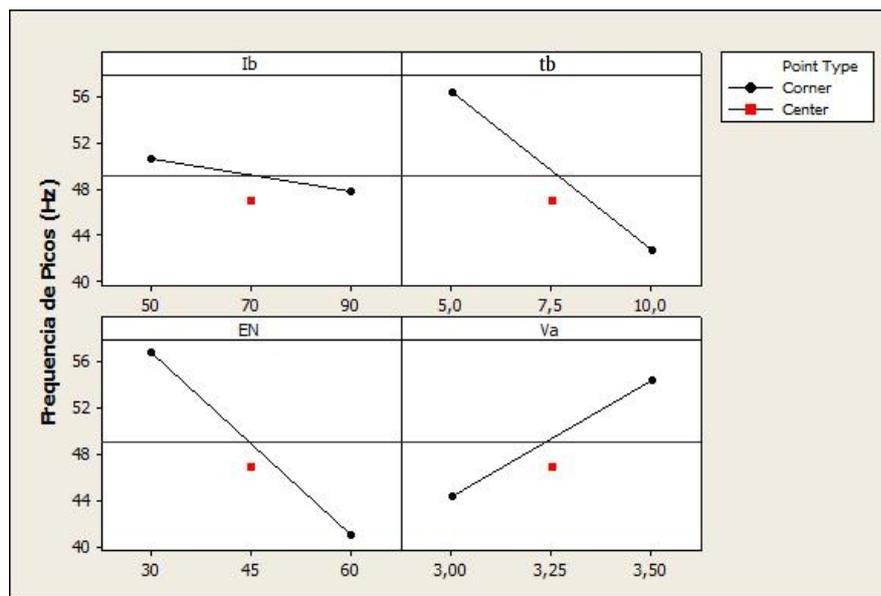


Figura 4.28 – Efeitos principais sobre a frequência de picos no semi-ciclo positivo.

A título de informação complementar foi analisada a curva de tendência na influência da frequência dos ciclos na penetração. Percebe-se pelo resultado gerado, **Figura 4.29**, um aumento significativo na penetração com o aumento da frequência. O aumento da frequência provoca normalmente um aumento da estabilidade do arco e, desta forma, uma melhor regularidade nas características dinâmicas de tensão e corrente.

Apenas para confirmar este aspecto, os resultados processados através do MINITAB® mostraram haver uma correlação positiva (0,508) e altamente significativa ($Pvalue = 0,002$)

entre a regularidade U*Ir com a penetração, confirmando a hipótese levantada. Por outro lado, a melhor estabilidade do arco associada a uma maior frequência de transferência de gotas gera uma transferência de calor provavelmente mais uniforme, reforçando o aumento da penetração.

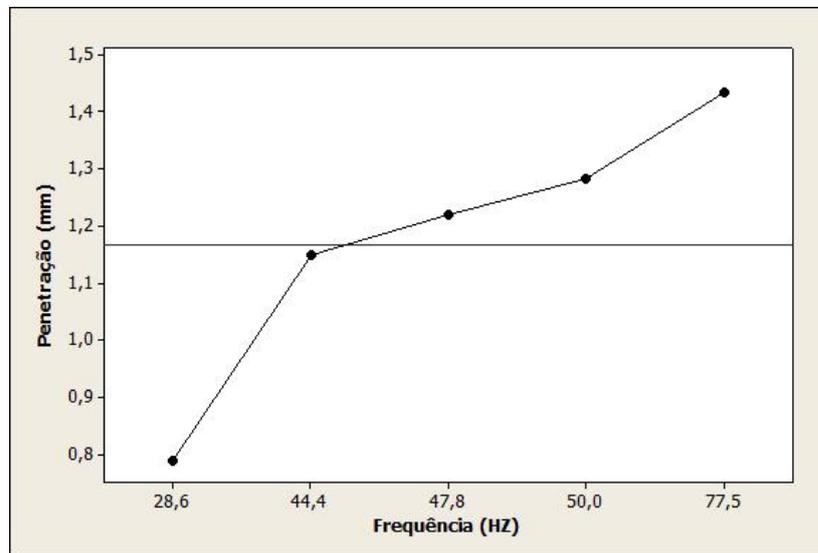


Figura 4.29 – Influência da frequência de ciclos na penetração.

Para reforçar estas análises, a **Figura 4.30** mostra a tendência da correlação positiva (0,633) e significativa ($Pvalue = 0,000$) entre a corrente média e a frequência dos ciclos de soldagem observada nos experimentos, confirmando o anteriormente exposto.

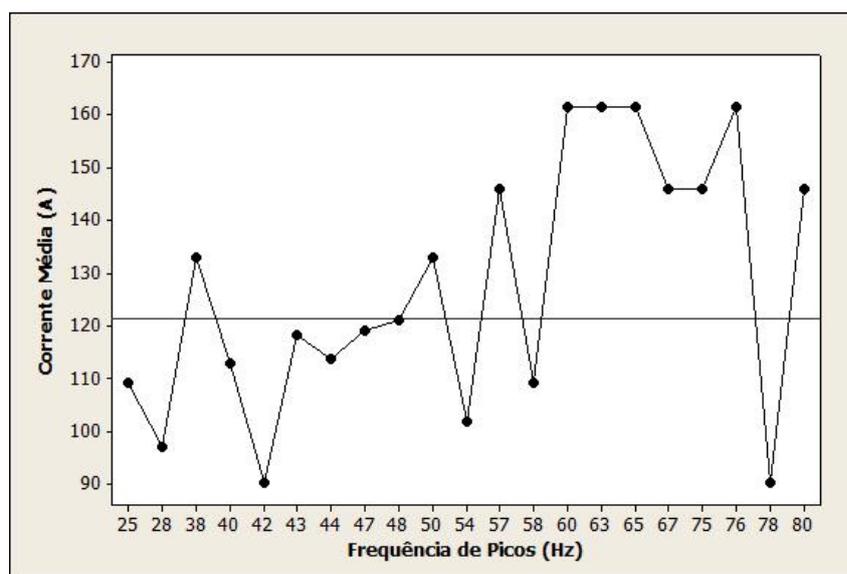


Figura 4.30 – Correlação entre a corrente média e a frequência de picos.

4.7 Avaliações complementares

Como o processo de soldagem MIG/MAG Pulsado – CA apresentou um comportamento com alta dinâmica durante a execução dos experimentos, presumiu ser conveniente apresentar informações complementares, obtidas através do *software* MINITAB[®], resumidas pelas curvas de tendência dos resultados obtidos. Tais resultados, muito embora sem validade estatística, mostra por sua vez a tendência observada face aos resultados obtidos, o que pode contribuir para uma melhor abrangência dos resultados e do conhecimento do processo.

Um dos grandes problemas da utilização do processo MIG/MAG Pulsado – CA é a teoricamente maior necessidade de velocidade de alimentação quando o processo se encontra no semi-ciclo negativo comparativamente ao positivo. Em virtude da escalada de arco nesta polaridade, faz com que a taxa de fusão seja maior e, para manter a estabilidade do arco, a alimentação do arame deveria ser aumentada.

Entretanto, isto não é possível de ser feito em função dos sistemas alimentadores de arame em uso atualmente. A **Figura 2.11** retrata tal exigência em resultados obtidos por Santos (2008). Como nos experimentos idealizados nesta pesquisa os limites de velocidades oscilaram entre um nível mínimo e máximo, certamente tais condições de soldagem não atenderiam os requisitos de velocidades ideais.

Desta forma, a **Figura 4.31** mostra que de certa forma a velocidade utilizada (desvio próximo de zero) conduziu à regularidade razoável (entre 5 e 8). Com auxílio da **Equação 2.5** utilizada por Santos (2008) para cálculo da velocidade de alimentação, esta interação mostrou que quando a velocidade usada foi menor que a calculada, a regularidade foi superior. Possivelmente isto se justifica pelo fato de que o período em que a corrente fica no positivo ($t_p + t_b$) seja maior que o período no negativo (t_n), vale lembrar que a velocidade de alimentação na polaridade positiva é teoricamente menor do que em polaridade negativa.

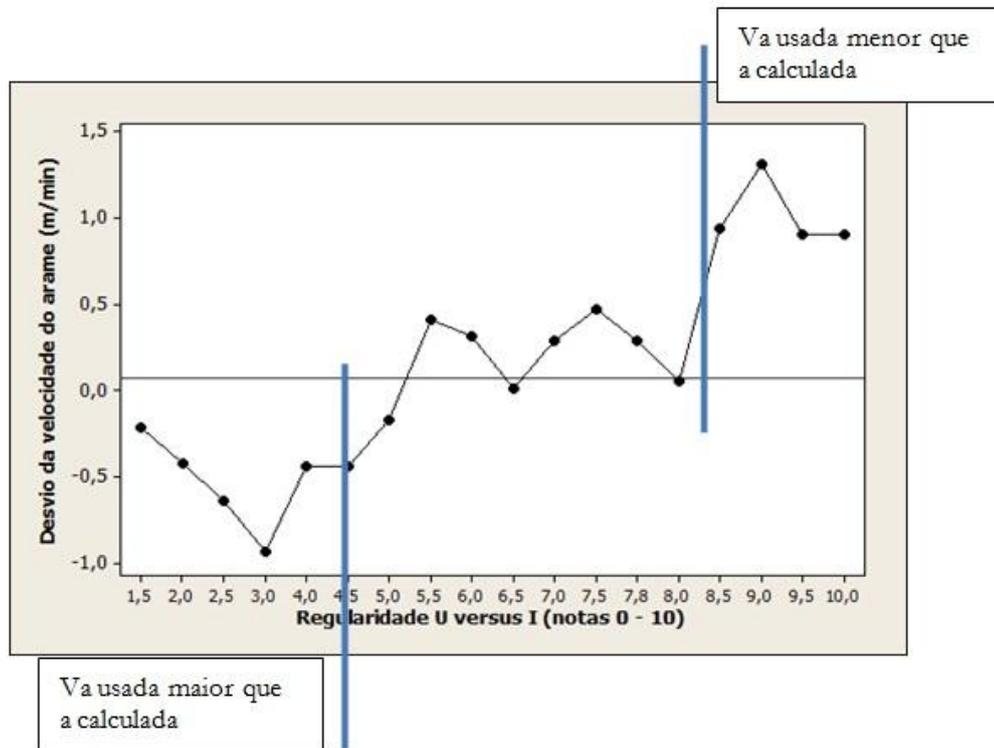


Figura 4.31 – Interação da velocidade de alimentação com a regularidade de U versus I.

4.8 Otimização

Com as respostas obtidas através das análises e investigações desenvolvidas ao longo deste trabalho, foi possível gerar a otimização para os parâmetros em estudo. A **Figura 4.32** mostra as repostas para a otimização do processo de soldagem MIG/MAG pulsado CA em função de obter os valores máximos de taxa de deposição, penetração, regularidade e largura e valor mínimo para o reforço do cordão de solda.

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
TD	Maximum	1,2	1,4	1,4	1	1
penetr	Maximum	1,0	1,3	1,3	1	2
U*ITh	Maximum	8,0	9,0	9,0	1	3
largura	Maximum	6,0	7,0	7,0	1	2
reforço	Minimum	2,3	2,3	2,6	1	1

Global Solution

Ib	=	50
Tb	=	5
EN	=	30
Va	=	3

Predicted Responses

TD	=	1,39316	,	desirability =	0,965781
penetr	=	1,24064	,	desirability =	0,802120
U*ITh	=	9,76875	,	desirability =	1,000000
largura	=	6,76739	,	desirability =	0,767394
reforço	=	2,23262	,	desirability =	1,000000

Composite Desirability = 0,894310

Figura 4.32 – Respostas para otimização.

Verifica-se que a otimização confirmou as previsões das análises dos efeitos principais e de interações, reforçando o fato de que a utilização de todos os parâmetros em seus níveis mínimos consegue gerar uma melhor combinação de parâmetros resultando em uma melhor condição de soldagem para este trabalho.

A **Tabela 4.7** mostra os ensaios que se aproximaram dos resultados obtidos na otimização.

Tabela 4.7 – Dados dos ensaios 01 e 17 para otimização.

Ensaio	Parâmetros				Geometria				Economia	Regularidade
	Ib A	tb ms	EN %	Va m/min	W mm	P mm	R mm	D %	TD Kg/h	U*Ir Nota
1	50	5	30	3	6,9	1,2	2,1	26,7	1,46	10
17	50	5	30	3	7,1	1,3	2,3	27,5	1,31	9,5
Previsto	50	5	30	3	6,8	1,24	2,2	22,6	1,39	9,77
Erro (%)	-	-	-	-	2,86	0,8	-	16,6	0,36	0,2

A *Figura 4.33* e *Figura 4.34* mostram o perfil e o cordão de solda do ensaio 01 e 17 que, aproximaram-se dos resultados para obtidos para otimização.

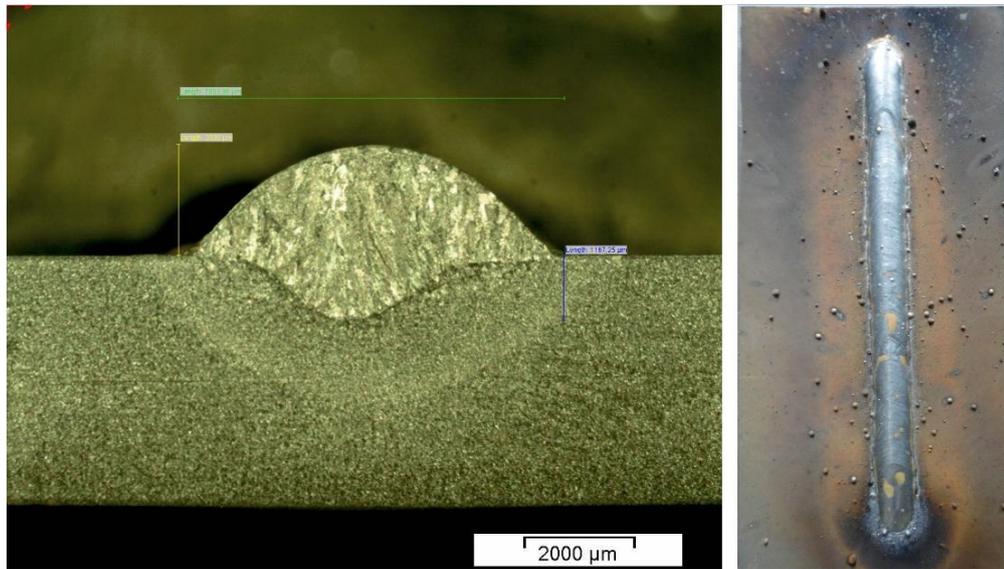


Figura 4.33 – Perfil e cordão de solda para o ensaio 01.

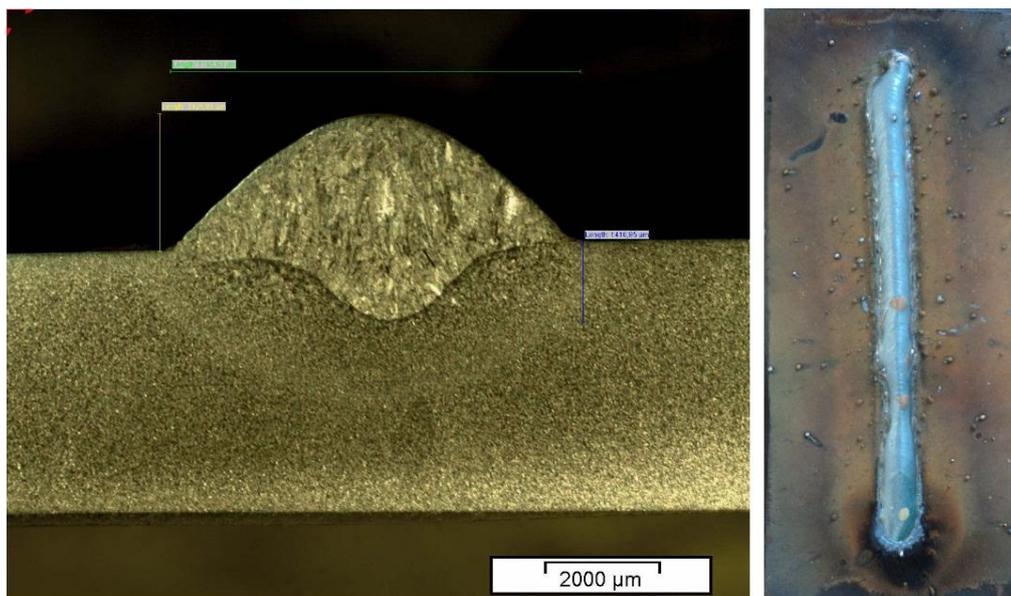
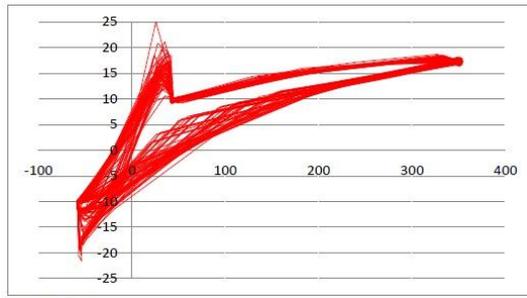
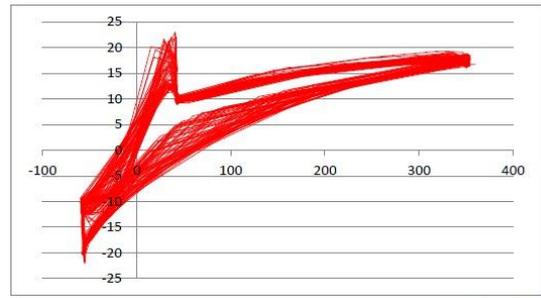


Figura 4.34 – Perfil e cordão de solda para o ensaio 17.

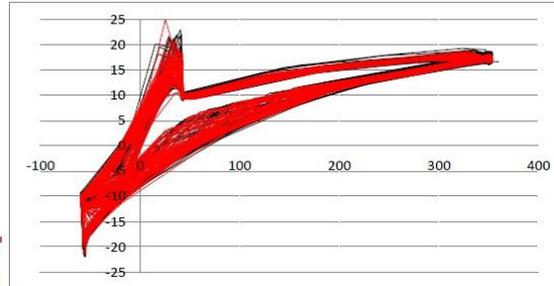
A *Figura 4.35* apresenta o comportamento do processo com os gráficos de dispersões U*I dos ensaios 01 e 17 e um comparativo entre tais experimentos.



ENSAIO 01



ENSAIO 17



	Ensaio	Nota
Vermelho	01	10,0
Preto	17	9,5

Figura 4.35 – Gráficos de dispersões U*I dos ensaios 01 e 17.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões gerais

Em função dos resultados obtidos e análises efetuadas para a soldagem de aços carbono ABNT 1020 através do processo MIG/MAG Pulsado – CA com formato de onda caracterizado pela inserção de uma corrente de base antes da corrente de pico este trabalho permite concluir que:

- ✓ Para todos os parâmetros investigados, foi apurada influência significativa sobre os resultados obtidos, todavia, a classe ou o nível de importância entre tais diversifica-se em função da resposta de interesse;
- ✓ A utilização de ferramentas estatísticas baseadas no projeto e análise de experimentos permitiu uma avaliação positiva do processo. Entretanto, para as análises baseadas nas características dinâmicas de tensão e corrente do arco, tal ferramenta não apresentou uma adequação estatística necessária motivada pela alta dinâmica dos ciclos de soldagens. Neste sentido a avaliação subjetiva do comportamento do arco através das análises dos formatos dos gráficos de dispersão U*I mostraram resultados coerentes com os esperados e apresentados na literatura;

- ✓ Avaliações do comportamento do arco através da metodologia utilizada, mostraram que melhores regularidades das características dinâmicas dos sinais tensão e corrente, foram obtidos para ajustes do tempo do eletrodo no semi-ciclo negativo e tempo de base nos níveis mínimos;
- ✓ A corrente de base isoladamente não apresentou um efeito significativo na estabilidade do arco; porém interações com outros parâmetros indicam que o seu ajuste no nível mínimo (50A) favoreceu a melhor regularidade na dispersão dos sinais U*I;
- ✓ Em relação aos efeitos dos parâmetros para a obtenção dos resultados desejados nos cordões de solda, constata-se que:
 - Largura: para menores valores de largura do cordão torna-se necessário operar com todos os parâmetros em seus níveis mínimos, sendo o oposto verdadeiro;
 - Penetração: o aumento da penetração está atribuído ao menor percentual de tempo do arame eletrodo em polaridade negativa com máxima alimentação;
 - Reforço: verifica-se a tendência de maior reforço do cordão ao conceder maior percentual de tempo do arame eletrodo em polaridade negativa;
 - Taxa de diluição: observa-se que ao combinar menor percentual de tempo em polaridade negativa com menor tempo de permanência na base positiva, ocorre maior taxa de diluição;
 - Taxa de deposição: para obter maior taxa de deposição além de elevar a velocidade de alimentação, observa-se que ocorre uma tendência sutil ao elevar o nível de corrente de base.
- ✓ A análise das interações entre os parâmetros revelou ser um componente de relativa importância para a compreensão do processo, visto que o modo de operação atua com alta dinâmica de suas variáveis, demonstrando que a ação

conjunta de parâmetros com pouca influência sobre uma dada resposta pode nortear a efeitos significativos;

- ✓ A otimização do processo de soldagem MIG/MAG pulsado em corrente alternada empregando o método experimental fatorial completo foi considerado satisfatório. Atribui-se este resultado os experimentos 01 e 17.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para investigações futuras apresentam-se as seguintes considerações:

- ✓ Aprofundar as investigações no sentido de avaliar o coeficiente de variação dos laços da dispersão dos sinais dinâmicos de tensão e corrente como forma de caracterizar a estabilidade do processo em corrente alternada;
- ✓ Avaliar, para o tipo de onda “C” utilizado, o efeito da eliminação da fase de base sobre o comportamento do arco e seus efeitos sobre a geometria do cordão;
- ✓ Com base no experimento que alcançou melhor desempenho, analisar os efeitos ao se modificar parâmetros tais como tipo de gás, DBCP, relação velocidade de soldagem/alimentação do arame, entre outros;
- ✓ Ampliar os estudos aqui realizados para outros tipos de formatos de onda em corrente alternada e materiais;
- ✓ Por fim, sugere-se realizar um estudo a partir dos melhores experimentos com intuito de analisar efeitos metalográficos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AWS (1991)**, *Welding handbook: Welding process (vol II)*, AWS, USA, 8ª Edição, 955 p. (ISBN 0-87171-354-3).
- BARRA, S. R. MIG/MAG, (2003)**. Disponível em <http://sitedasoldagem.com.br/conceito%20basico/>>. Acesso em: 24 jul. 2013.
- CIRINO, L. M. (2009)**, *Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 112 p.
- COX, D. R.; REID, N. (2000)**, The theory of the design of experiments. *Chapman & Hall/CRC*, p.33-41.
- DUTRA, J. C.; OLLÉ, L. F.; KIRST, E. R. (1992)**, Uma contribuição ao estudo da seleção de Variáveis na soldagem MIG/MAG Pulsada. *LABSOLDA*, v. 2, p. 925-942.
- ESAB, (2012)**, Catálogo de soldagem MIG/MAG Disponível em http://www.esab.com.br/br/por/Produtos/consumiveis/arames_solidos/upload/1901670-rev-7_CatalogoSoldagemMIGMAG_ArameSolidos_pt.pdf>. Acesso em: 04 set. 2013.
- ESSERS, W. G.; WALTER, R. (1979)**, Some aspects of the penetration mechanisms in metal inert gas (MIG) welding. *Arc physics and weld pool behaviour*, p. 289-300.

- FARIA, J. P.; MIRANDA, H. C.; MOTTA, M. F.; PAIVA, F. D. Q. (2007)**, Effect of square-wave AC GMAW on weld beam geometry. *Welding International*, v.21, nº3, p.212-219.
- GERRITSEN, C. H. J. (2002)**, Single-sided welding of thin galvanised sheet to hydro formed tube for automotive applications. *TWI 741/2002 – TWI*.
- GOHR JR., R. (2002)**, *Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 168 p.
- HARADA, S.; UYAMA, T.; MITA, T.; INNAMI T.; USHIO M. (1999)**, The state of the art of AC GMAW process in Japan. *IIW*, nº12, p.1589-1599.
- HARRIS, I. D. (2001)**, Arc welding automotive aluminum. *Advanced Materials & Processes*. v.159, p. 52.
- HARWIG, D. D.; DIERKSHEIDE, J. E.; YAPP, D.; BLACKMAN, S. (2006)**, Arc behavior and melting rate in the VP-GMAW process. *Welding journal*, v.85, nº3, p.52s-62s.
- HARWIG, D. D. (2000)**, *Arc behavior and melting rate in the VP-GMAW process*. PhD Thesis – Cranfield University, England. 221 p.
- IMC SOLDAGEM (2011)**, *Manual de instruções INVERSAL 300 DIGIPlus A7*, 2ª Edição, Florianópolis, 75 p.
- KELTON, W. D. (1999)**, Designing simulation experiments. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, p.1-9.
- LANCASTER, J. F. (1984)**, The physics of welding. *Phys. Technol. Northern Ireland*, v.15, p. 73-79.
- LANCASTER, J. F. (1986)**, *The physics of welding*. Ed.: Pergamon Press and International Institute of Welding, 340 p.

- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. (2007)**, *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. Ed. UFMG. Belo Horizonte, 362 p.
- MIRANDA, C. H. (1999)**, *Influência da indutância na soldagem MIG/MAG na posição sobrecabeça*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 170 p.
- MODENESI, P. J. (2012)**, *Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais*. Belo Horizonte, UFMG, 172 p.
- MODENESI, P. J.; REIS, R. I. (2007)**, A model for melting rate phenomena in GMA welding. *Materials Processing Technology*, v.189, p. 199-205.
- MONTGOMERY, D. C. (2005)**, Design and analysis of experiments. Ed. *John Wiley and Sons*, v.6, 643 p.
- MULLIGAN, S. J. (2003)**, Pulsed MIG arc welding processes for joining of thin sheet 154 aluminium. *TWI*, v.771.
- NASCIMENTO, A. S. (2011)**, *Fenomenologia da soldagem MIG/MAG-PV e sua aplicabilidade para juntas sobreposta e em V (Passe raiz)*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 186 p.
- NASCIMENTO, A. S.; FERNANDES, D. B.; MOTA, C. A. M.; VILARINHO, L. O. (2009)**, Methodology for determination of parameters for welding MIG with variable polarity. *Welding International*. v.23, nº6, p. 473-480.
- NASCIMENTO, A. S.; MENEZES JR, L. C.; VILARINHO, L. O. (2012)**, Efeito do formato de onda e gás de proteção sobre a taxa de fusão e geometria do cordão na soldagem MIG/MAG-PV. *Soldagem & Inspeção*. São Paulo, v.17, nº1, p. 40-48.
- NASCIMENTO, A. S.; VILARINHO, L. O. (2007)**, Uso da taxa de fusão na determinação de parâmetros para soldagem MIG com polaridade variável. In: *Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - POSMEC*, Uberlândia. Anais FEMEC. Uberlândia, p. 1-10.

- NILO JÚNIOR, L. P. (2003)**, *Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 111 p.
- NORRISH, J. (1992)**, *Advanced welding process*. Cranfield Institute of Technology, 375 p.
- OJO, E.; SCOTTI, A. (2005)**, Determinação de parâmetros de pulso na soldagem MIG/MAG pulsada. *Relatório interno LAPROSOLDA*. Universidade Federal de Uberlândia. p.24
- PINHO, A. F.; MONTEVECHI, J. A. B.; MARINS, F. A. S. (2007)**, Análise da aplicação de projeto de experimentos nos parâmetros dos algoritmos genéricos. *Sistemas e Gestão*. v.2, nº3, p. 319-331.
- PUHL, E. B. (2011)**, *Desenvolvimento de tecnologias no processo MIG/MAG para aumento de produtividade e melhoria da qualidade mediante o uso da polaridade negativa*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 82 p.
- ROCA, A. S.; FALS, H. C.; FERNANDEZ, J. B.; ADÁN, F. S. (2005)**, Application of U versus I diagrams for process stability evaluation in gas metal arc welding in short circuit transfer mode. *Soldagem & Inspeção*, v.10, nº2, p. 85-91.
- ROHDE, R. A. (2010)**, *Metalografia preparação de amostras*. Laboratório de ensaios mecânicos. Universidade Regional Integrada do alto Uruguai e Missões, 3ª Edição, Rio Grande do Sul 30 p.
- SANTOS, T. F. (2008)**, *Soldagem MIG com corrente alternada MIG CA*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 115 p.
- SCOTTI, A.; MONTEIRO, L. S. (2012)**, Uma metodologia para parametrização do processo MIG/MAG CA. *Soldagem & Inspeção*. São Paulo, v.17, nº3, p.271-277.

- SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. (2008)**, *Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento melhor desempenho*. Ed. Artliber, 284 p.
- SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. (2012)**, A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v.212, p. 1406-1413.
- SOUZA, D.; RESENDE, A. A.; SCOTTI, A. (2009)**, Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. *Soldagem & Inspeção*. São Paulo, v.14, nº3, p. 192-198.
- STENBACKA, N.; PERSSON, K. A. (1989)**, Shielding gases for gas metal arc welding. *Welding Journal*, p. 1-9.
- SUBAN, M.; TUSEK, J. (2003)**, Methods for the determination of arc stability. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 430-437.
- TALKINGTON, J. E. (1998)**, *Variable polarity gas metal arc welding*. MSc Dissertation – The Ohio State University. U.S.A.126 p.
- TONG, H.; UEYAMA, T.; HARADA, S.; USHIO, M. (2001)**, Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using current pulsed metal inert gas welding system. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.6, nº4, p. 203-208.
- UEYAMA, T.; ERA, T.; UEZONO, T.; TONG, H. (2011)**, Application of digital inverter-controlled AC pulsed MIG welding system to light metal joining. *Welding International*, v.25, nº9, p. 676-682.
- UEYAMA, T.; TONG, H.; HARADA, S.; PASSMORE, R.; USHIO, M. (2005)**, AC pulsed GMAW improves sheet metal joining. *Welding journal*, v.84, nº2, p. 215-223.
- VILARINHO, L. O.; NASCIMENTO, A. S.; FERNANDES, D. B.; MOTA C. A. M. (2009)**, Methodology for parameter calculation of VP-GMAW. *Welding Journal*, v.88, pp. 92s-98s.

Anexos

Anexo A – Ensaio de simples deposição sobre as chapas ABNT 1020



Ensaio 01



Ensaio 02



Ensaio 03



Ensaio 04



Ensaio 05



Ensaio 06



Ensaio 07



Ensaio 08



Ensaio 09



Ensaio 10



Ensaio 11



Ensaio 12



Ensaio 13



Ensaio 14



Ensaio 15



Ensaio 16



Ensaio 17



Ensaio 18



Ensaio 19



Ensaio 20



Ensaio 21



Ensaio 22



Ensaio 23



Ensaio 24



Ensaio 25



Ensaio 26



Ensaio 27



Ensaio 28



Ensaio 29



Ensaio 30



Ensaio 31



Ensaio 32

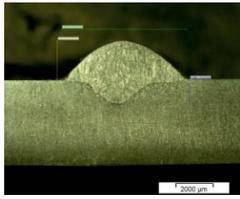


Ensaio 33

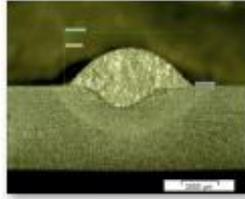


Ensaio 34

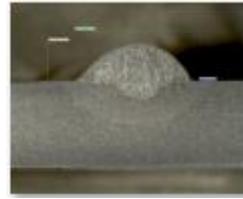
Anexo B – Metalografias



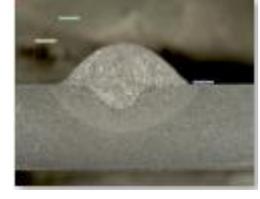
Ensaio 01 (a)



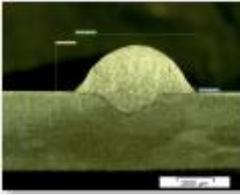
Ensaio 01 (b)



Ensaio 02 (a)



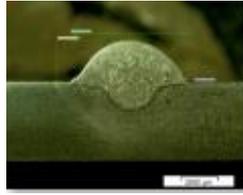
Ensaio 02 (b)



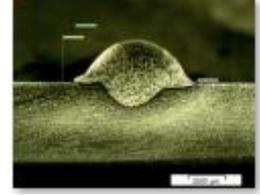
Ensaio 03 (a)



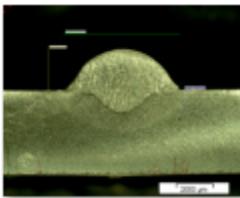
Ensaio 03 (b)



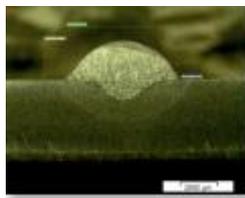
Ensaio 04 (a)



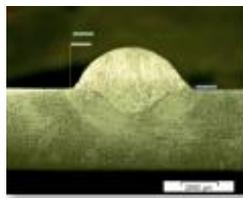
Ensaio 04 (b)



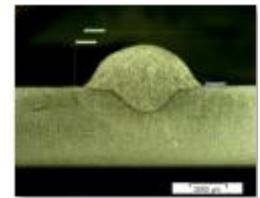
Ensaio 05 (a)



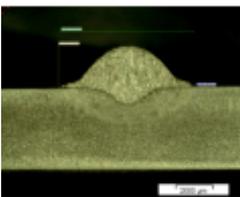
Ensaio 05 (b)



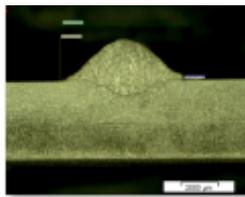
Ensaio 06 (a)



Ensaio 06 (b)



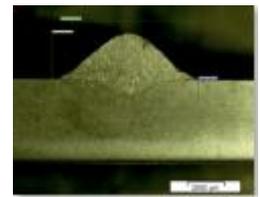
Ensaio 07 (a)



Ensaio 07 (b)



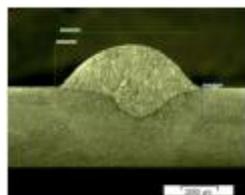
Ensaio 08 (a)



Ensaio 08 (b)



Ensaio 09 (a)



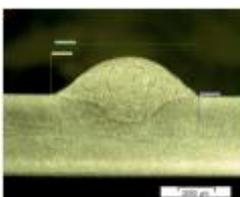
Ensaio 09 (b)



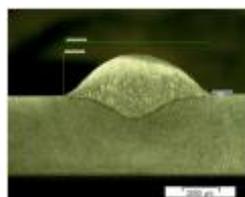
Ensaio 10 (a)



Ensaio 10 (b)



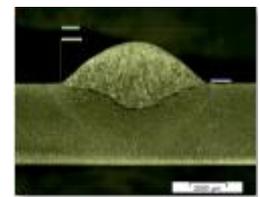
Ensaio 11 (a)



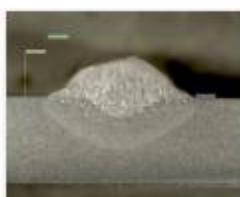
Ensaio 11 (b)



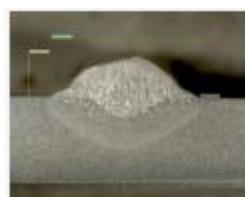
Ensaio 12 (a)



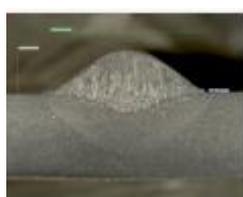
Ensaio 12 (b)



Ensaio 13 (a)



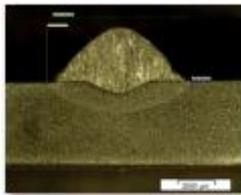
Ensaio 13 (b)



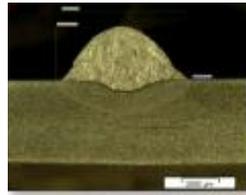
Ensaio 14 (a)



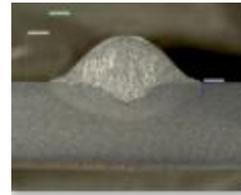
Ensaio 14 (b)



Ensaio 15 (a)



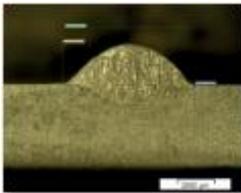
Ensaio 15 (b)



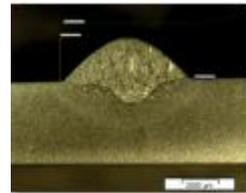
Ensaio 16 (a)



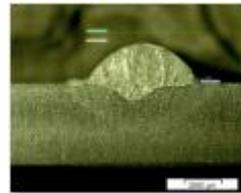
Ensaio 16 (b)



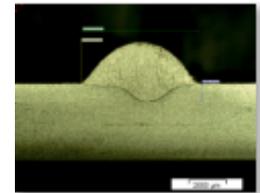
Ensaio 17 (a)



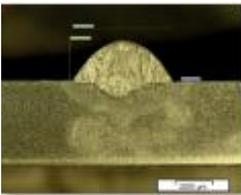
Ensaio 17 (b)



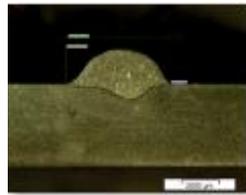
Ensaio 18 (a)



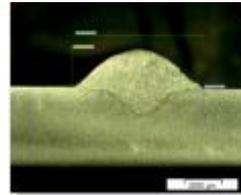
Ensaio 18 (b)



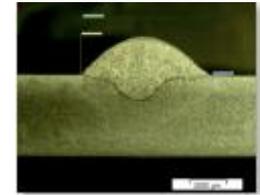
Ensaio 19 (a)



Ensaio 19 (b)



Ensaio 20 (a)



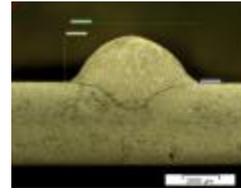
Ensaio 20 (b)



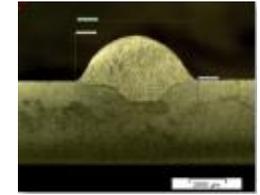
Ensaio 21 (a)



Ensaio 21 (b)



Ensaio 22 (a)



Ensaio 22 (b)



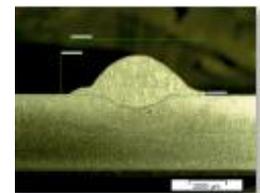
Ensaio 23 (a)



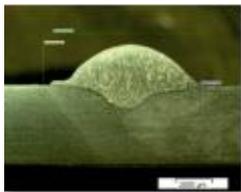
Ensaio 23 (b)



Ensaio 24 (a)



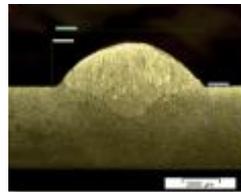
Ensaio 24 (b)



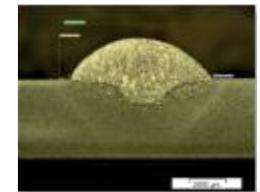
Ensaio 25 (a)



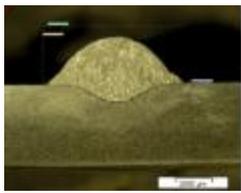
Ensaio 25 (b)



Ensaio 26 (a)



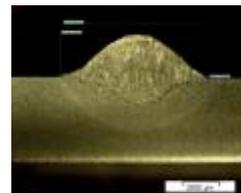
Ensaio 26 (b)



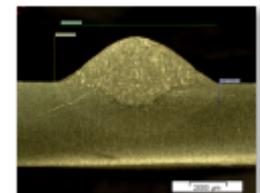
Ensaio 27 (a)



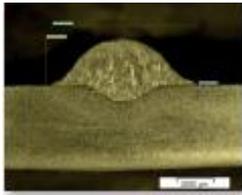
Ensaio 27 (b)



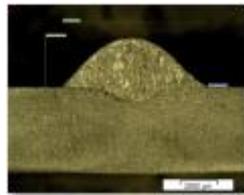
Ensaio 28 (a)



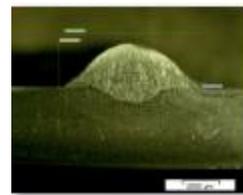
Ensaio 28 (b)



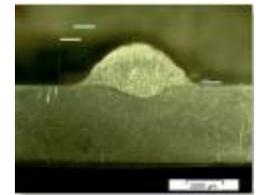
Ensaio 29 (a)



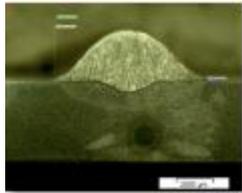
Ensaio 29 (b)



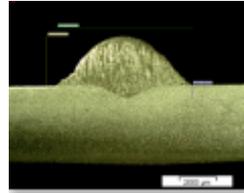
Ensaio 30 (a)



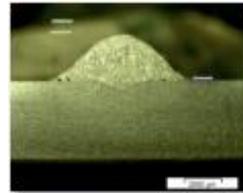
Ensaio 30 (b)



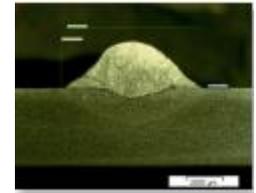
Ensaio 31 (a)



Ensaio 31 (b)



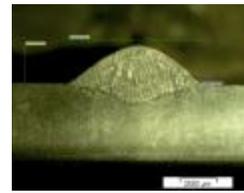
Ensaio 32 (a)



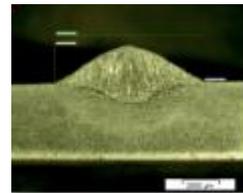
Ensaio 32 (b)



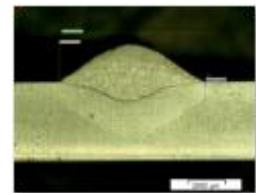
Ensaio 33 (a)



Ensaio 33 (b)

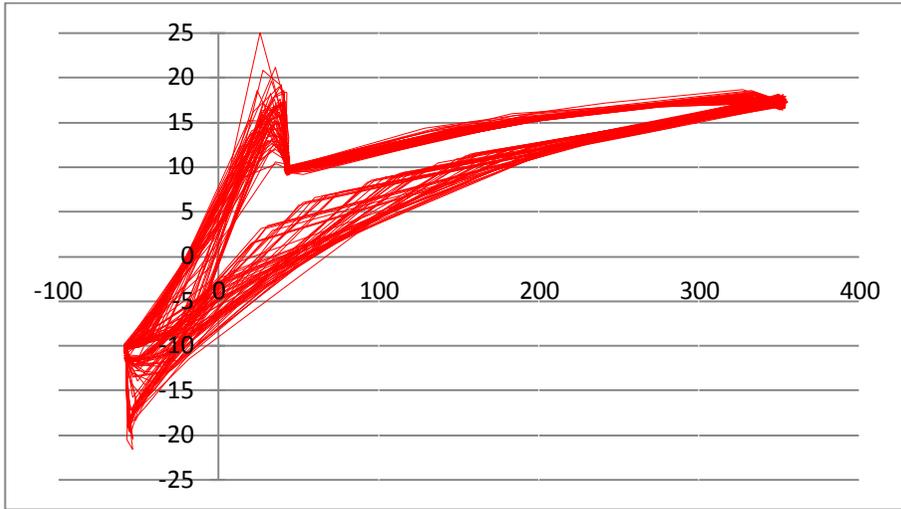


Ensaio 34 (a)

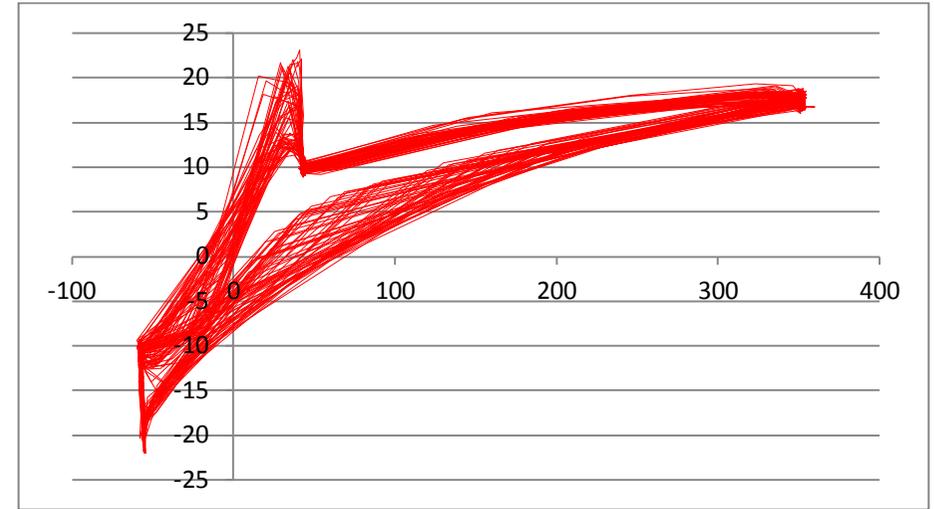


Ensaio 34 (b)

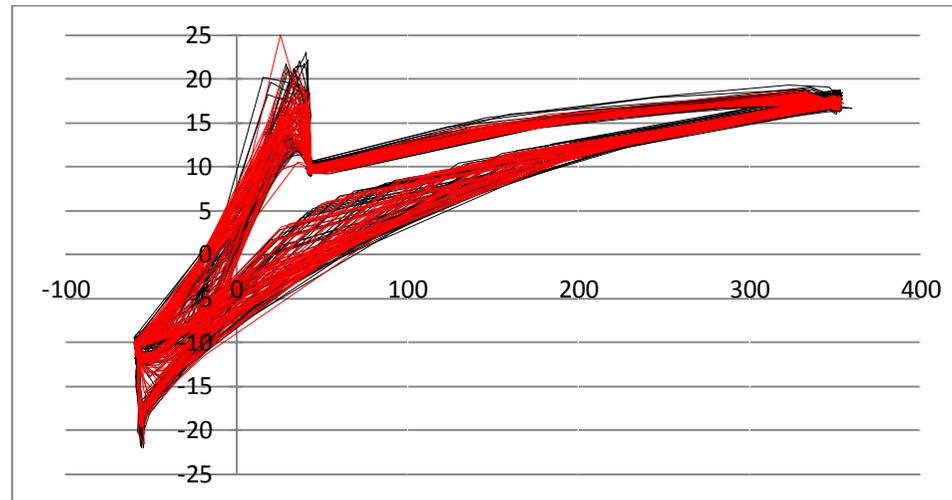
Anexo C – Avaliação das interações corrente *versus* tensão



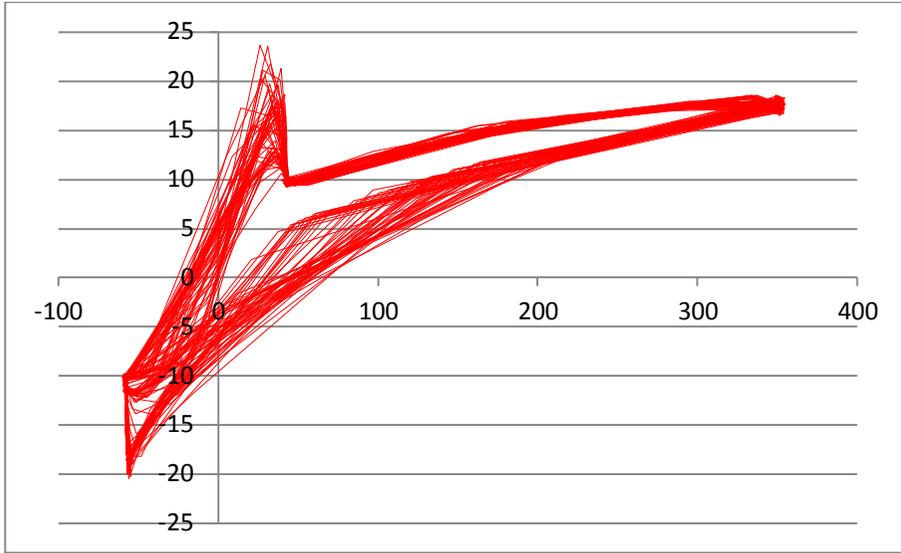
ENSAIO 01



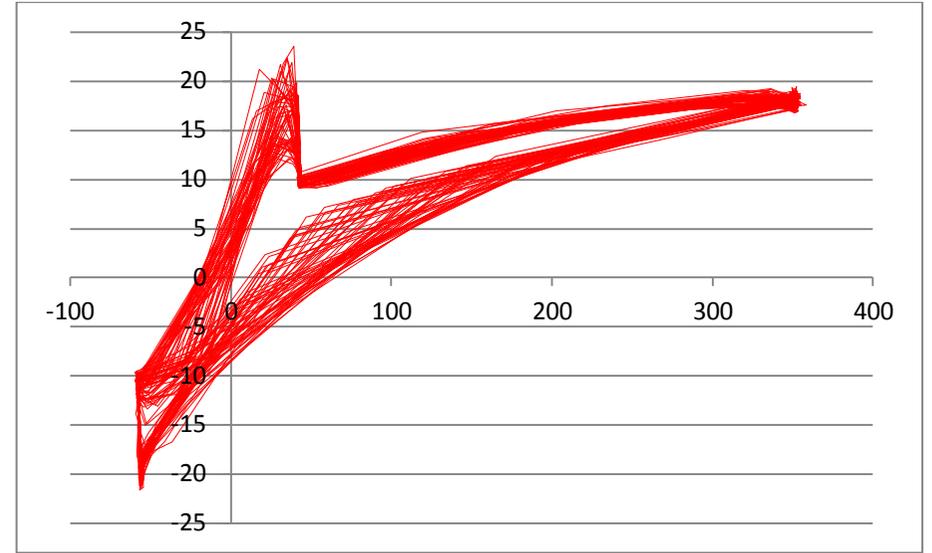
ENSAIO 17



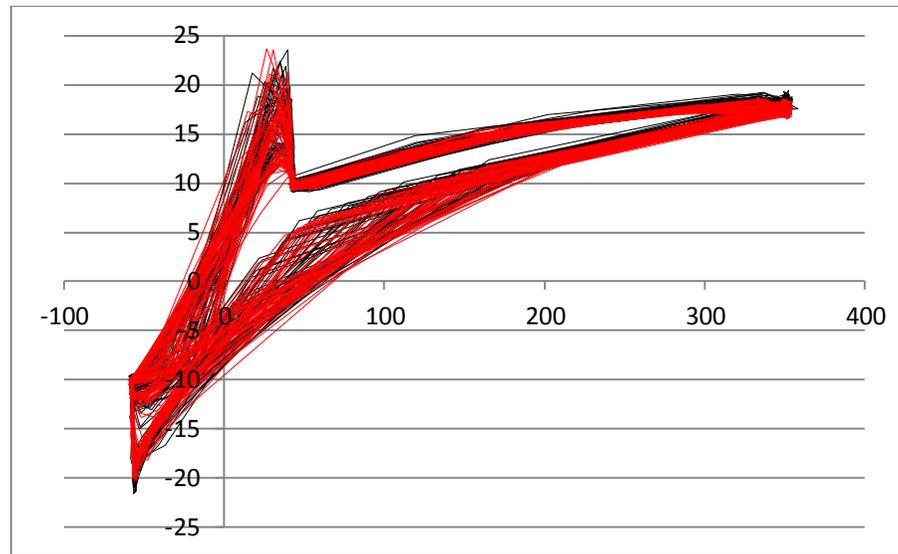
	Ensaio	Nota
Vermelho	01	10,0
Preto	17	9,5



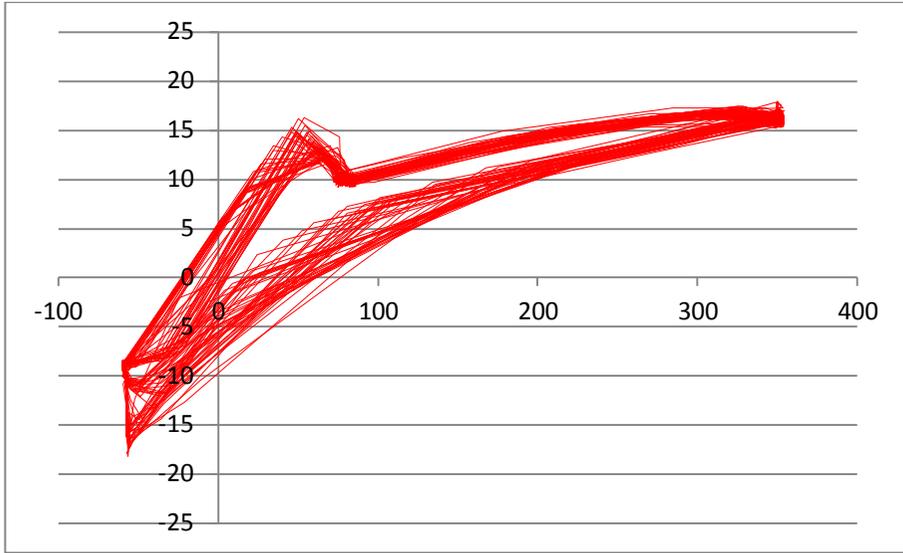
ENSAIO 02



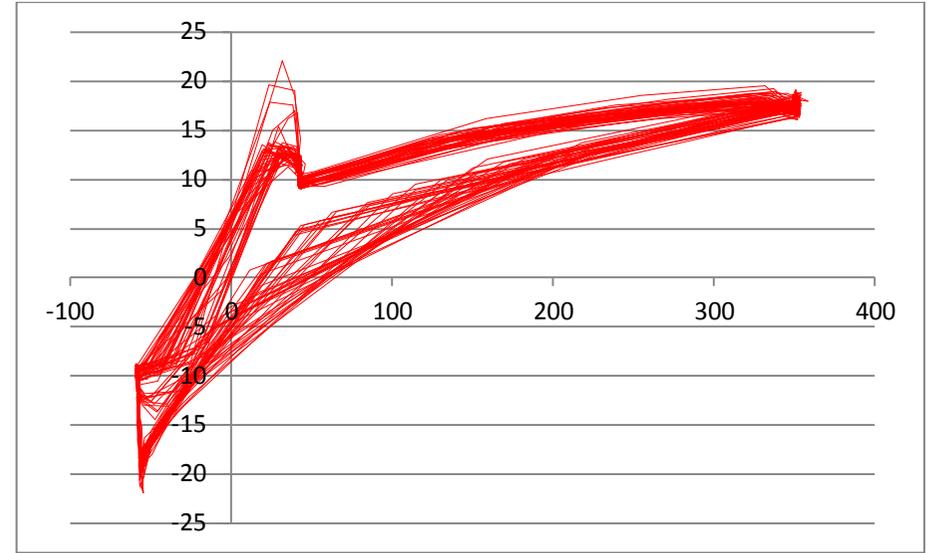
ENSAIO 18



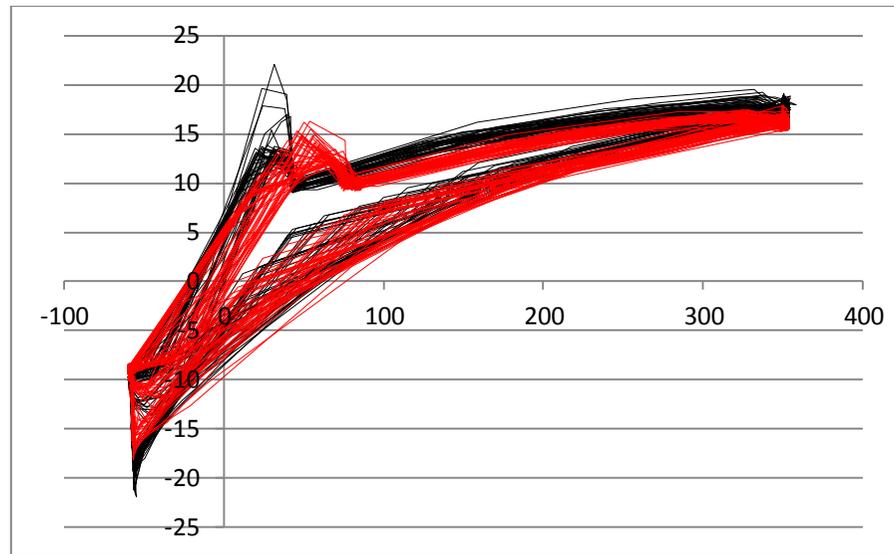
	Ensaio	Nota
Vermelho	02	9,0
Preto	18	8,5



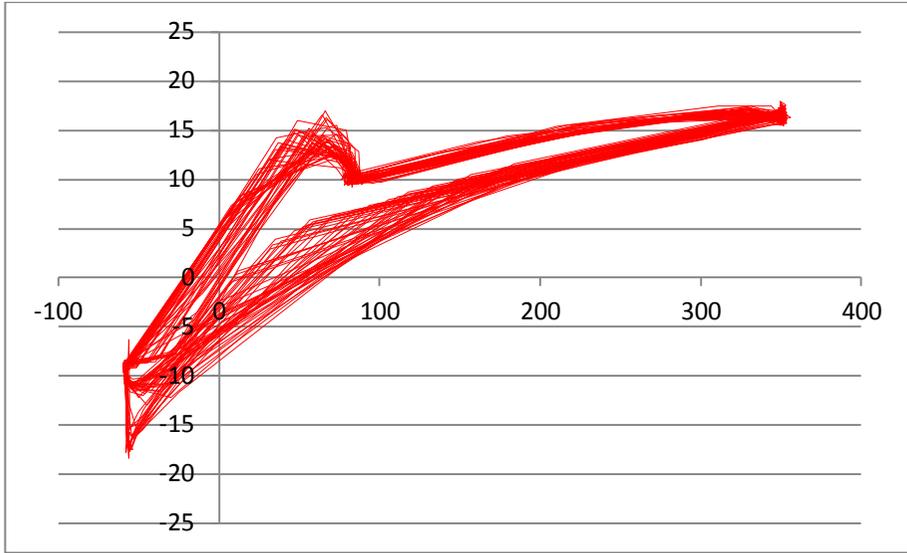
ENSAIO 03



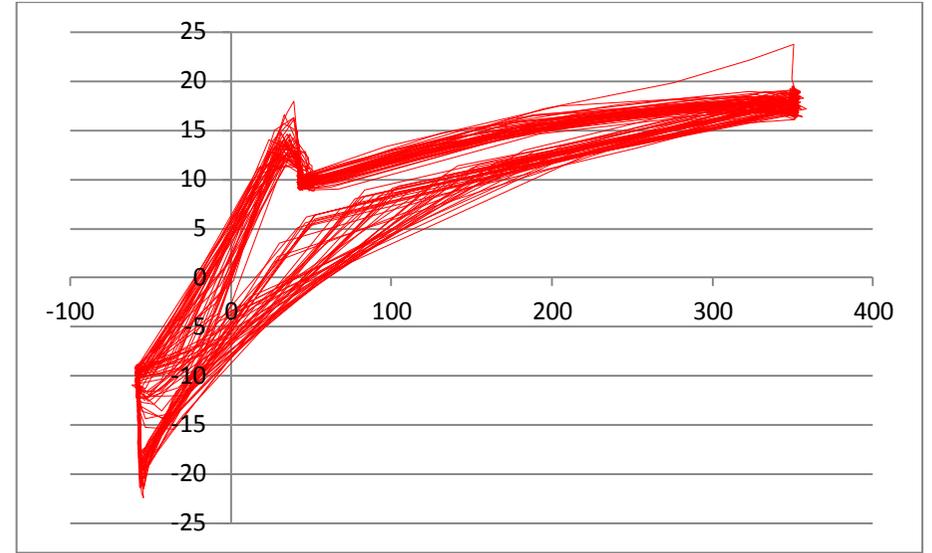
ENSAIO 19



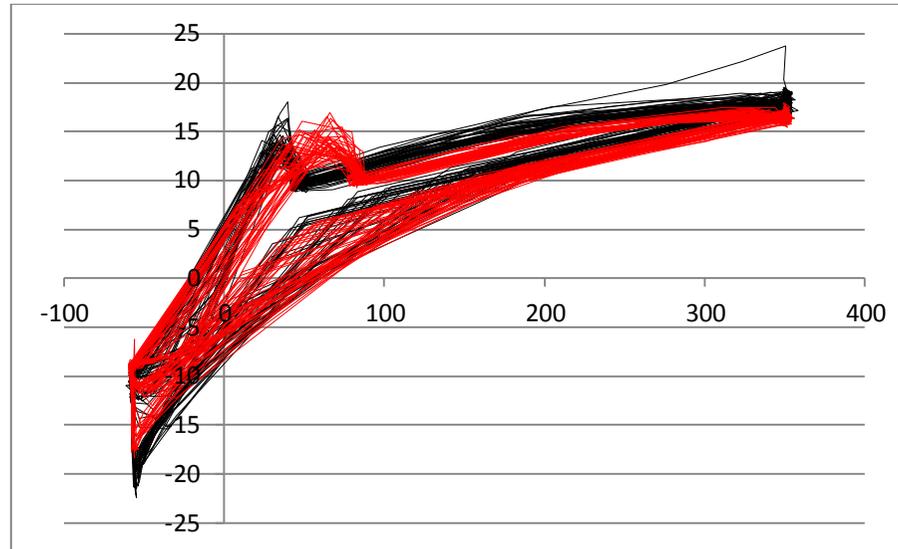
	Ensaio	Nota
Vermelho	03	8,0
Preto	19	7,5



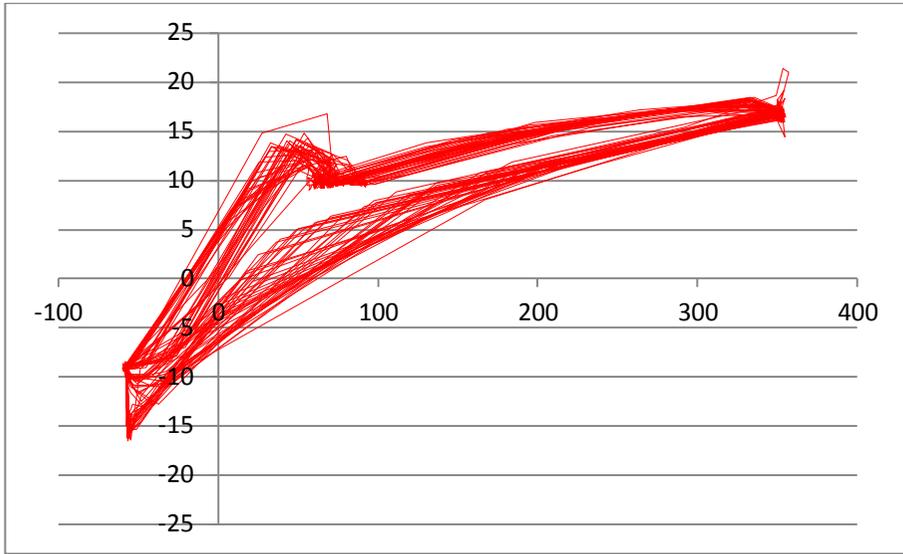
ENSAIO 04



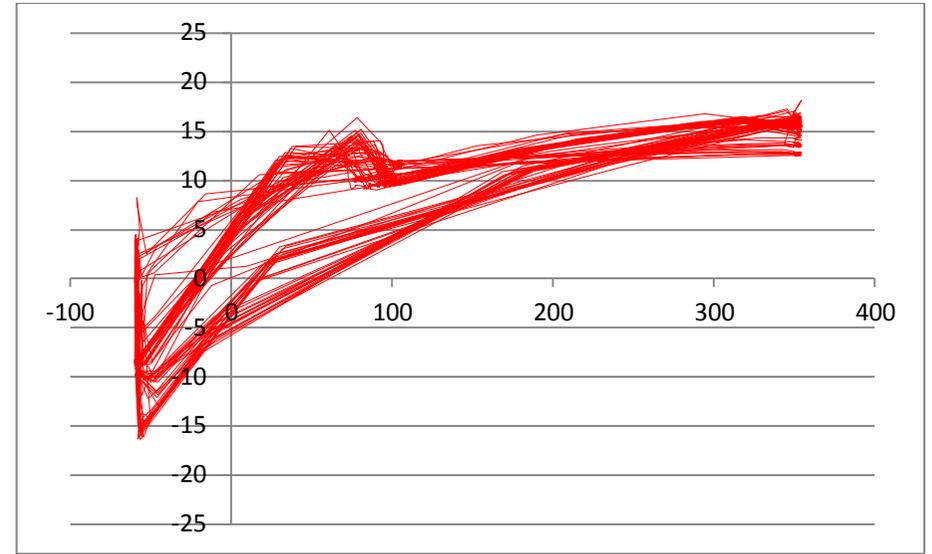
ENSAIO 20



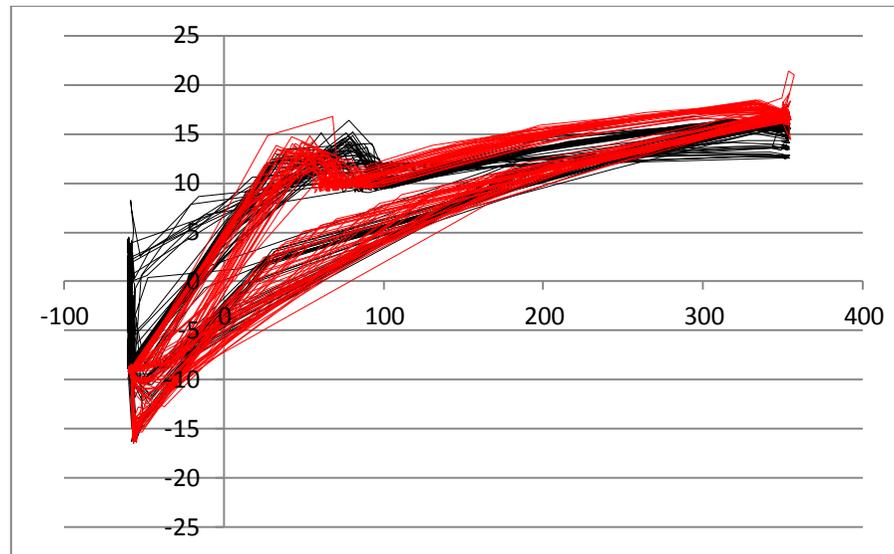
	Ensaio	Nota
Vermelho	04	8,5
Preto	20	7,5



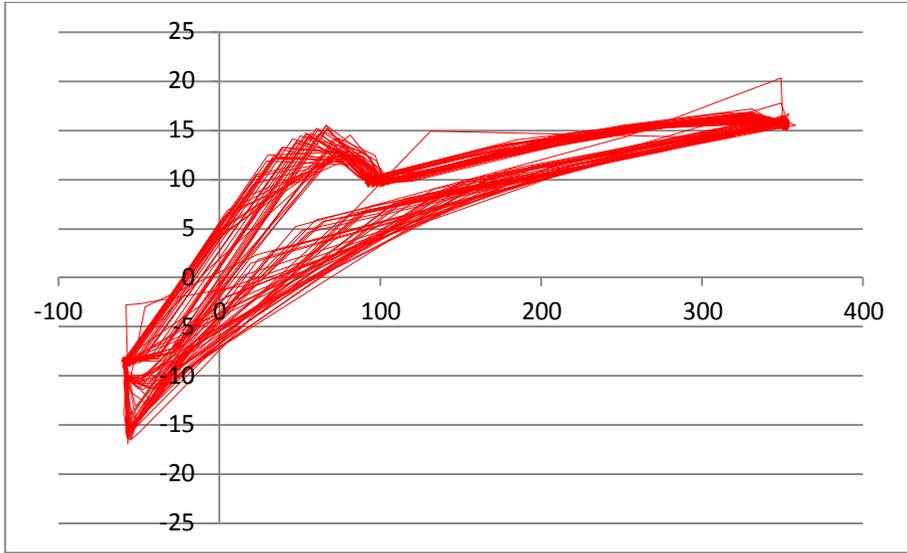
ENSAIO 05



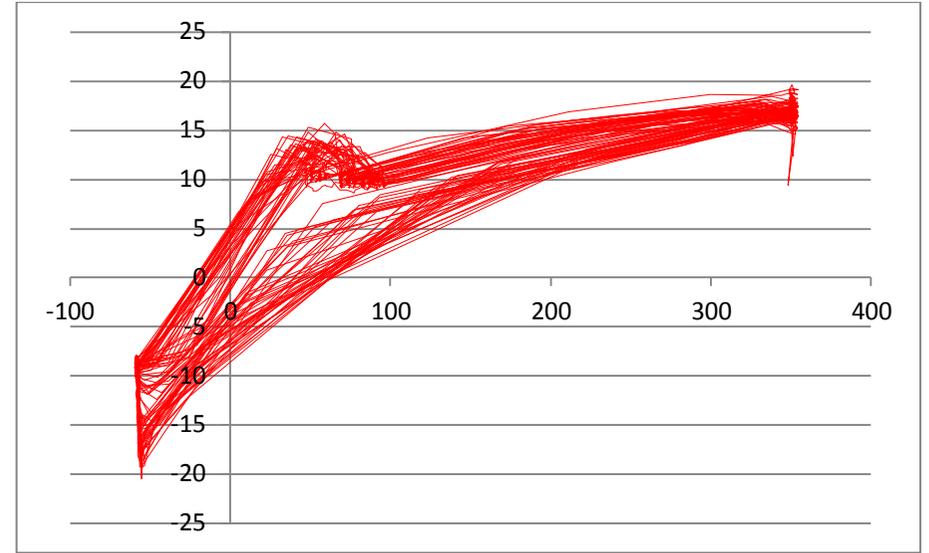
ENSAIO 21



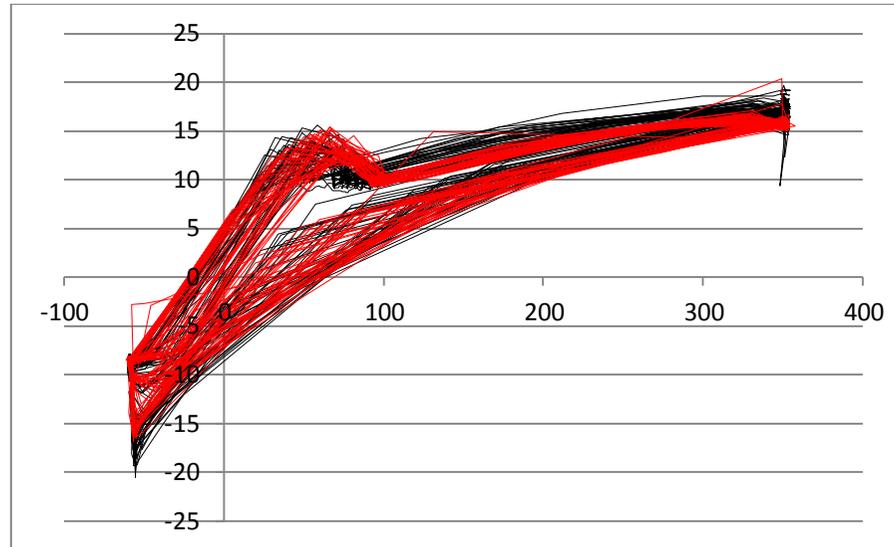
	Ensaio	Nota
Vermelho	05	8,0
Preto	21	5,0



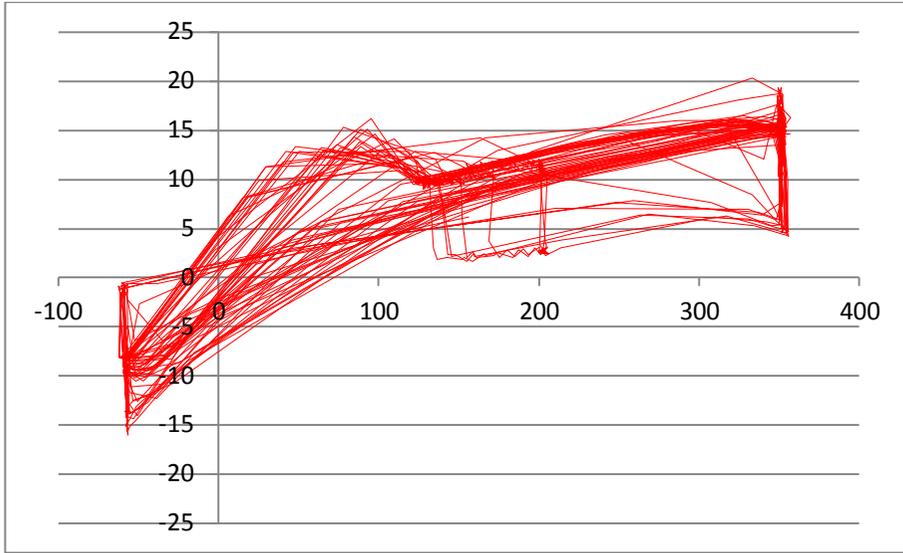
ENSAIO 06



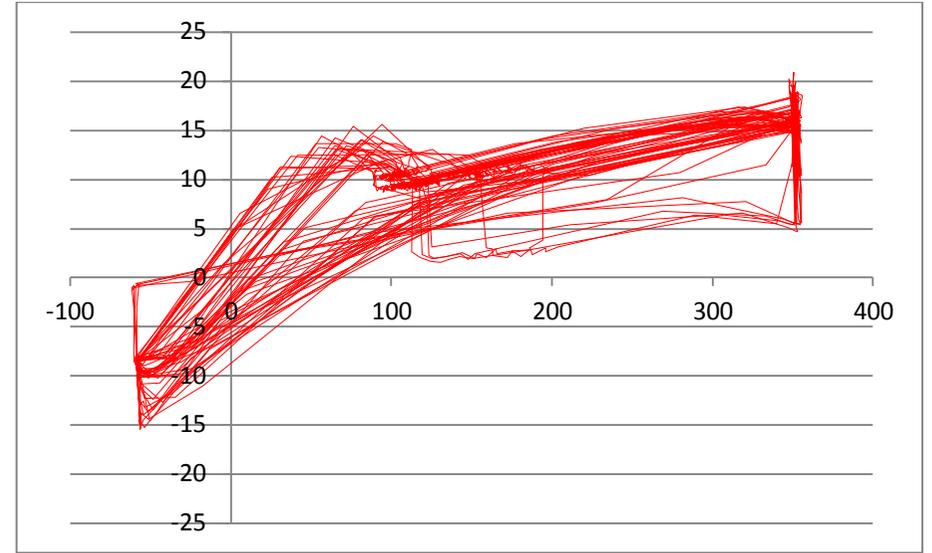
ENSAIO 22



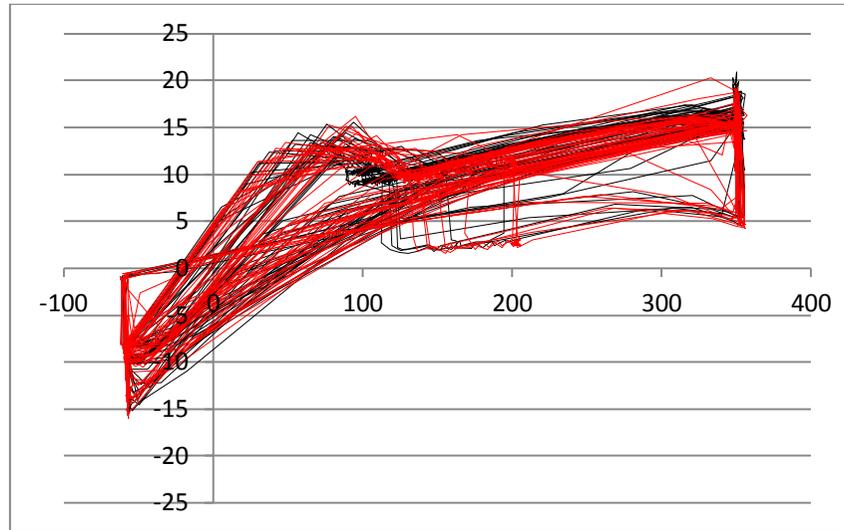
	Ensaio	Nota
Vermelho	06	7,8
Preto	22	7,0



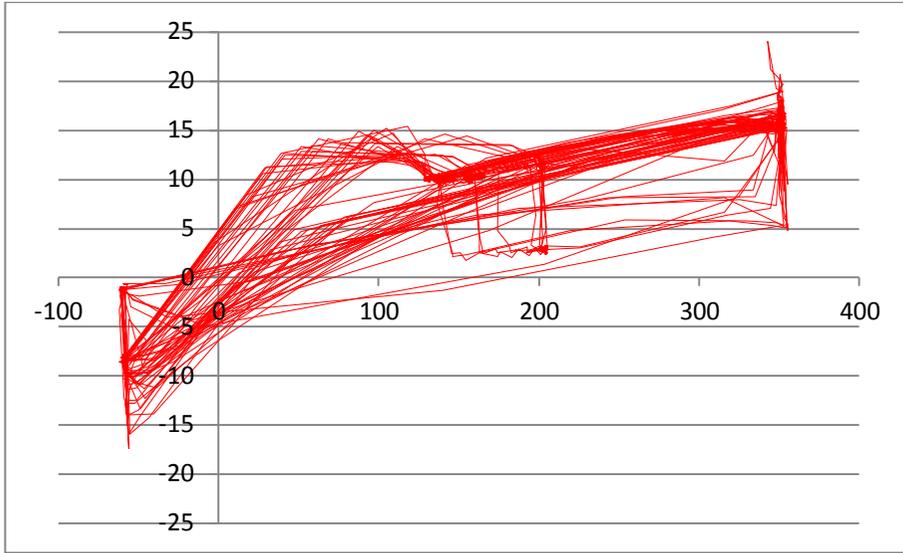
ENSAIO 07



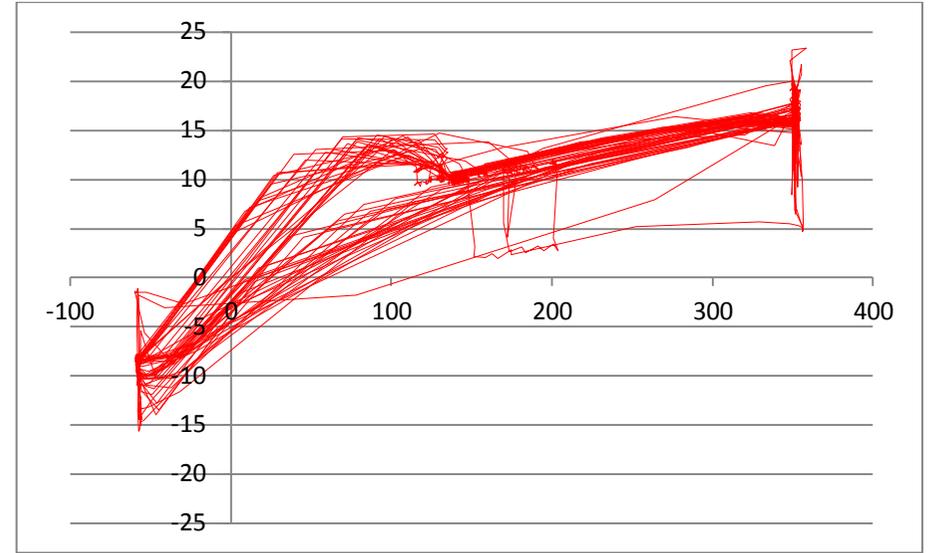
ENSAIO 23



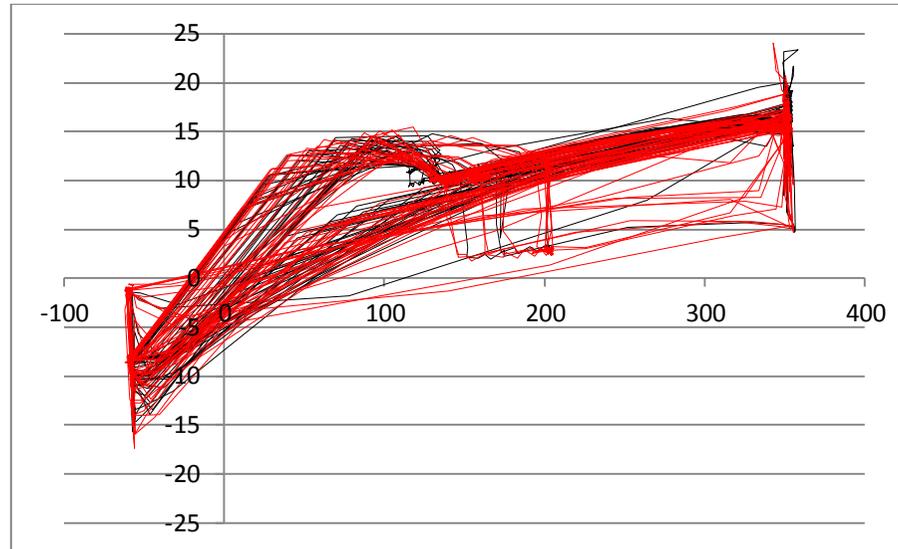
	Ensaio	Nota
Vermelho	07	4,5
Preto	23	4,5



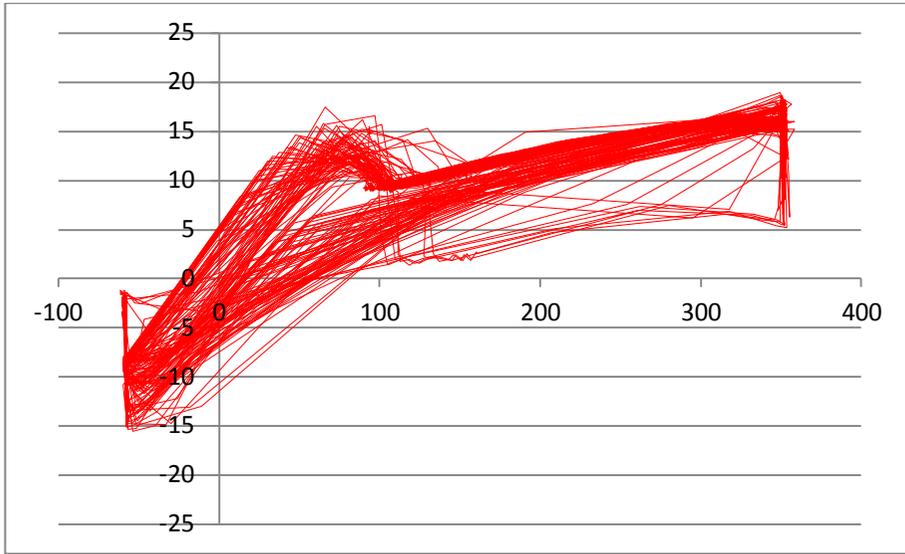
ENSAIO 08



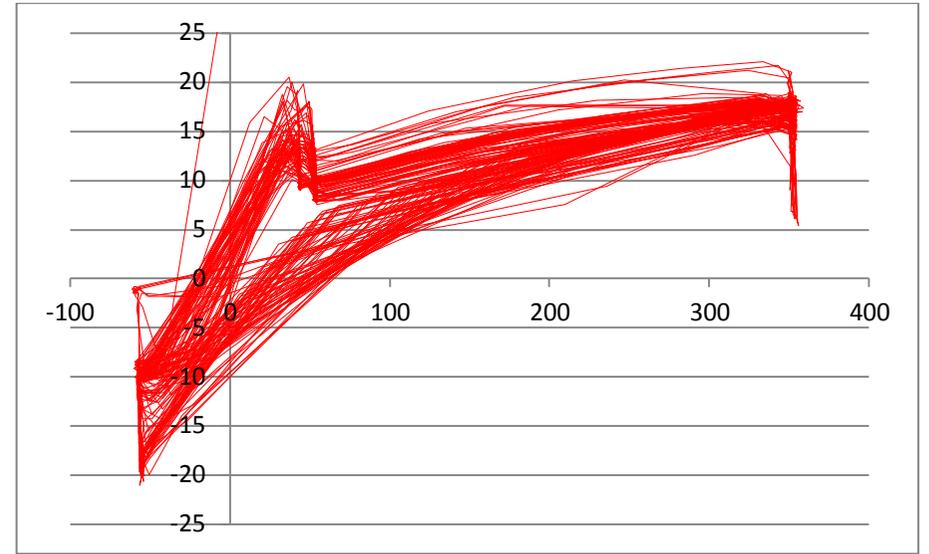
ENSAIO 24



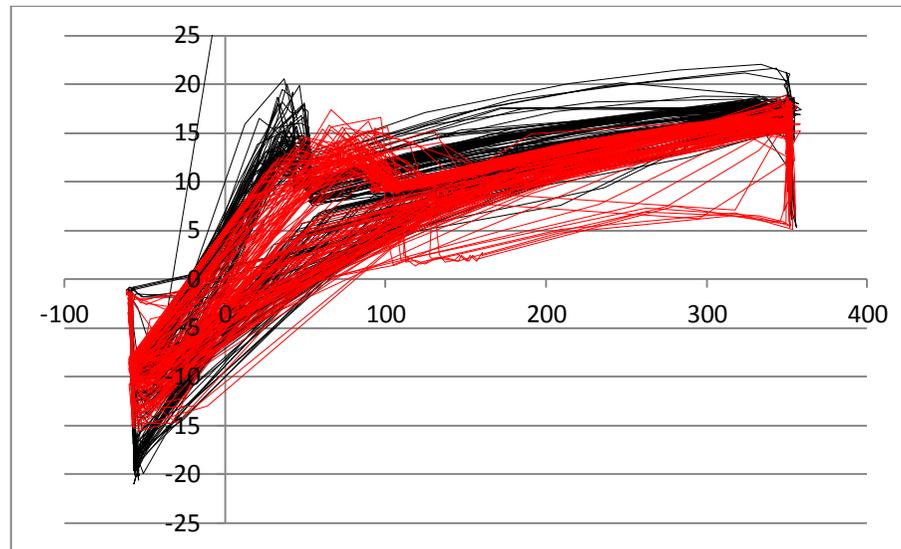
	Ensaio	Nota
Vermelho	08	5,0
Preto	24	5,0



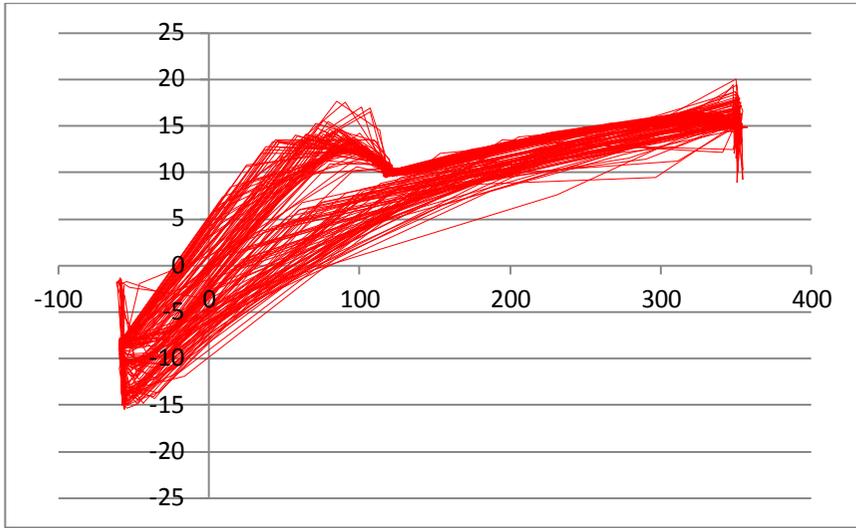
ENSAIO 09



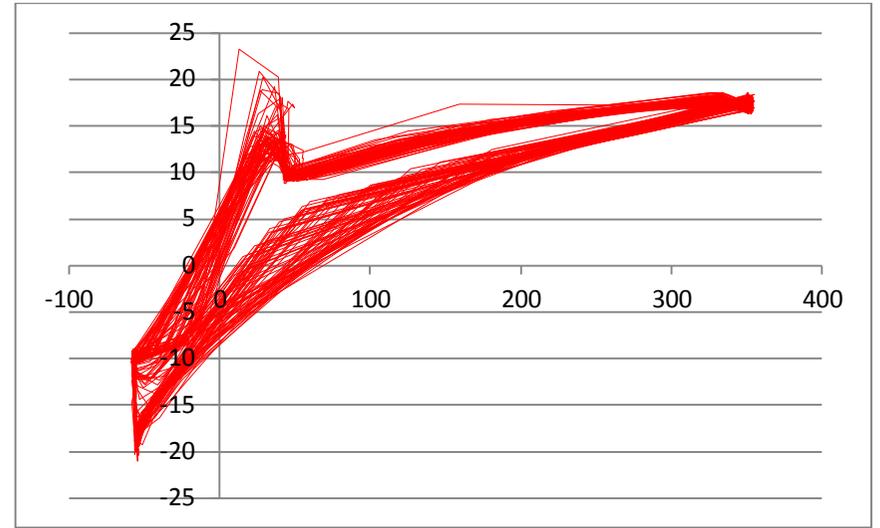
ENSAIO 25



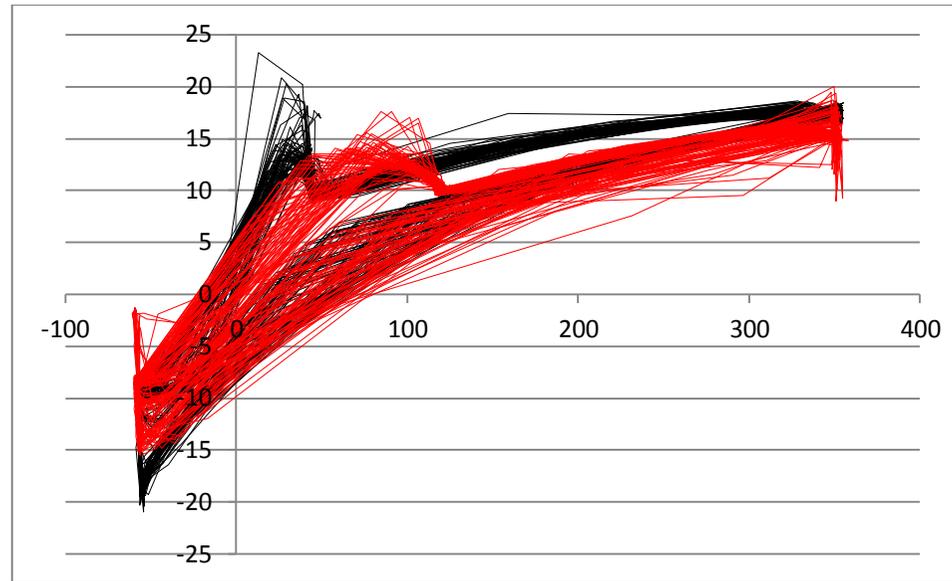
	Ensaio	Nota
Vermelho	09	5,5
Preto	25	5,5



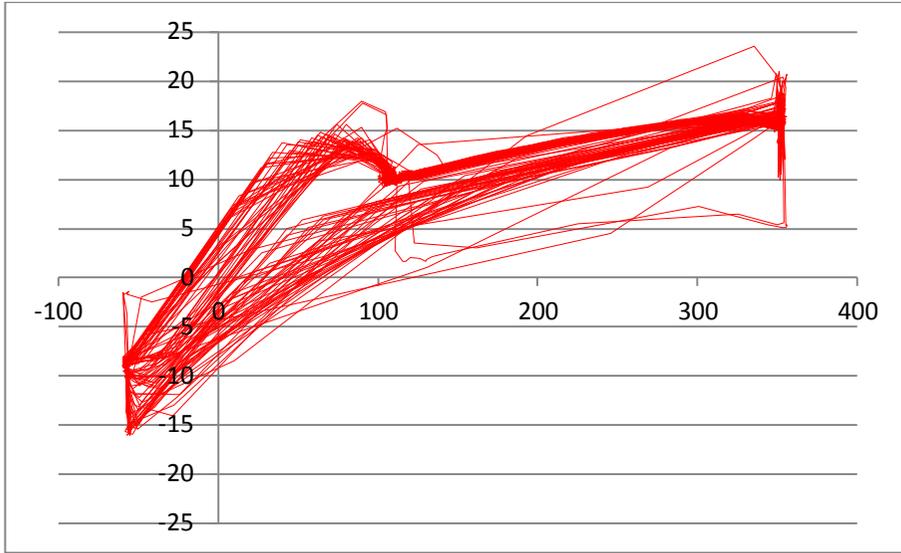
ENSAIO 10



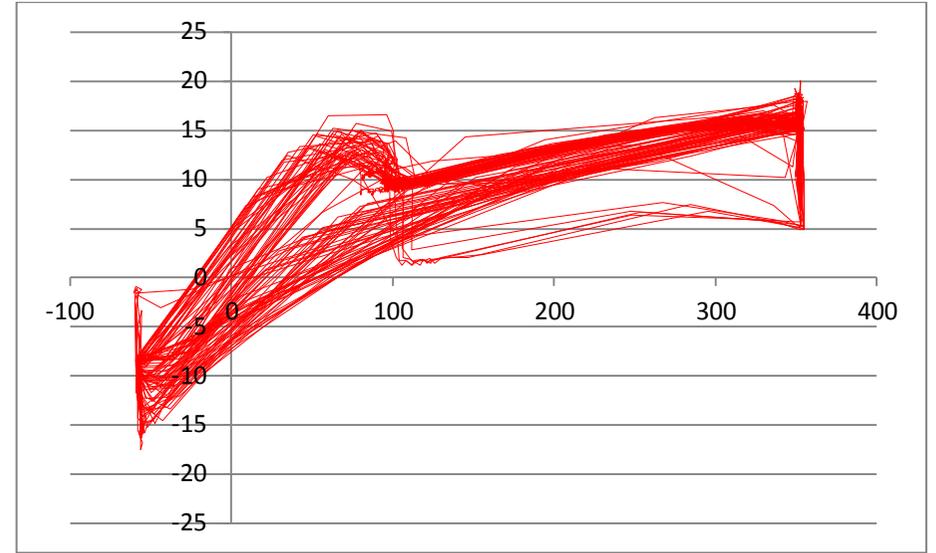
ENSAIO 26



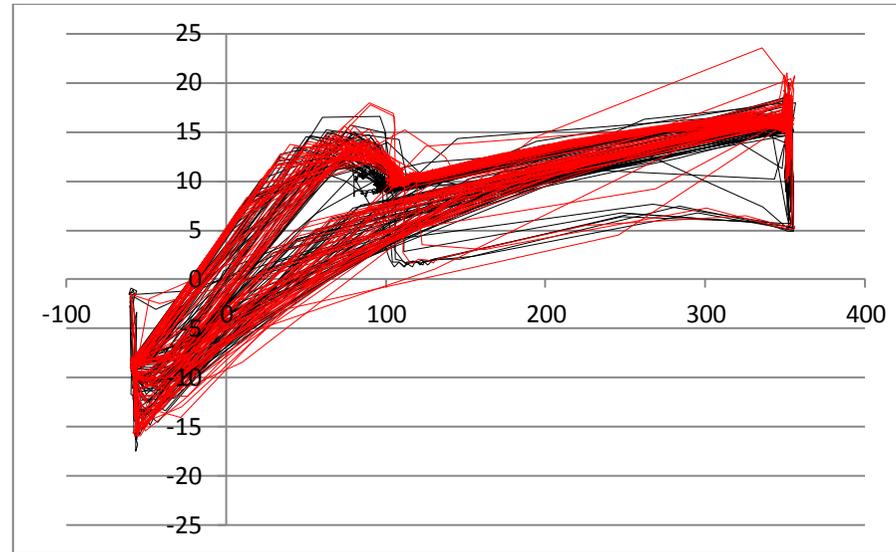
	Ensaio	Nota
Vermelho	10	6,0
Preto	26	7,5



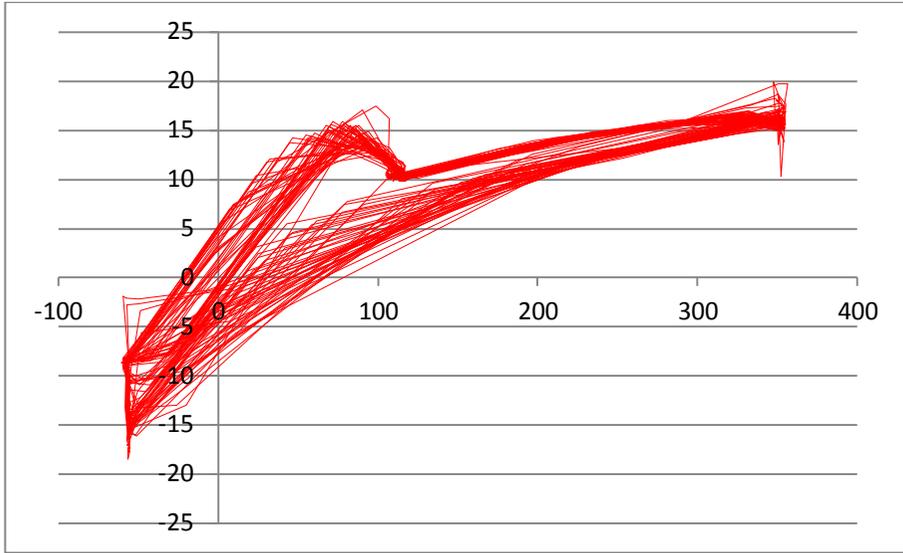
ENSAIO 11



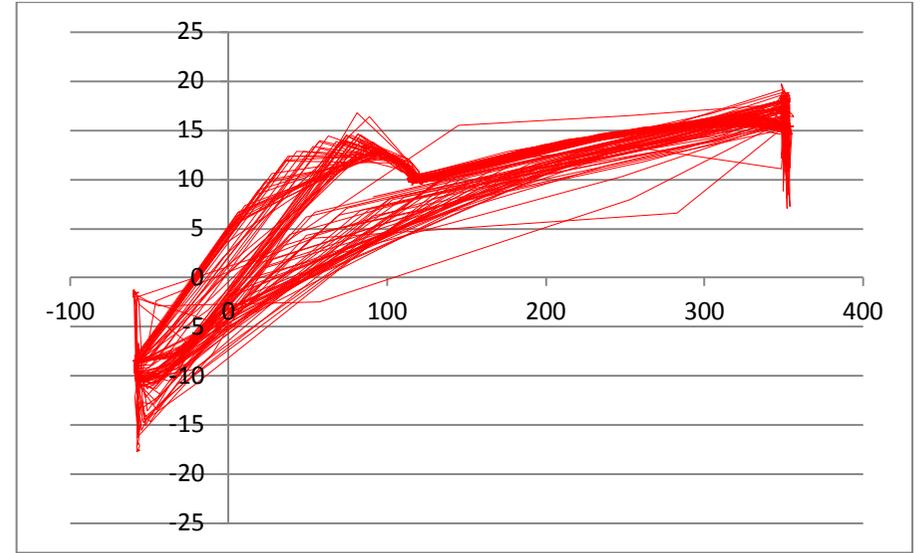
ENSAIO 27



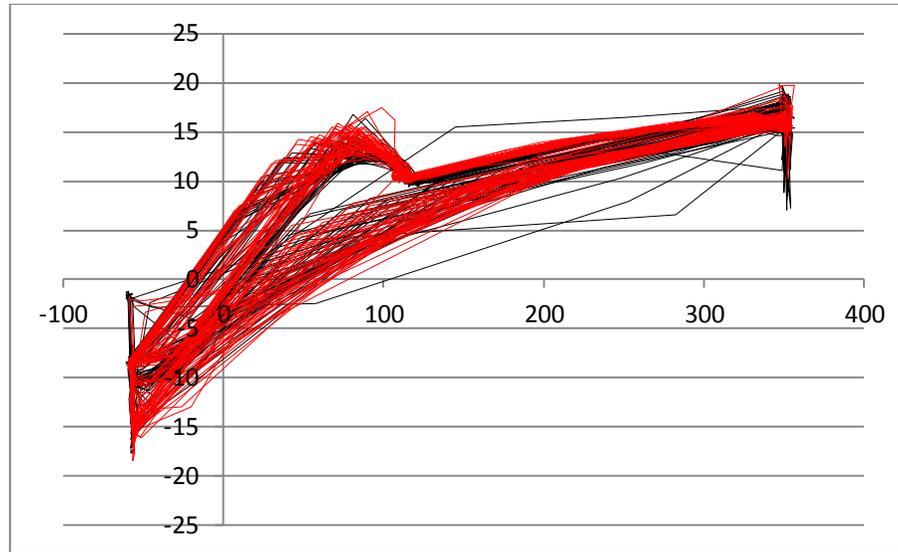
	Ensaio	Nota
Vermelho	11	4,5
Preto	27	5,0



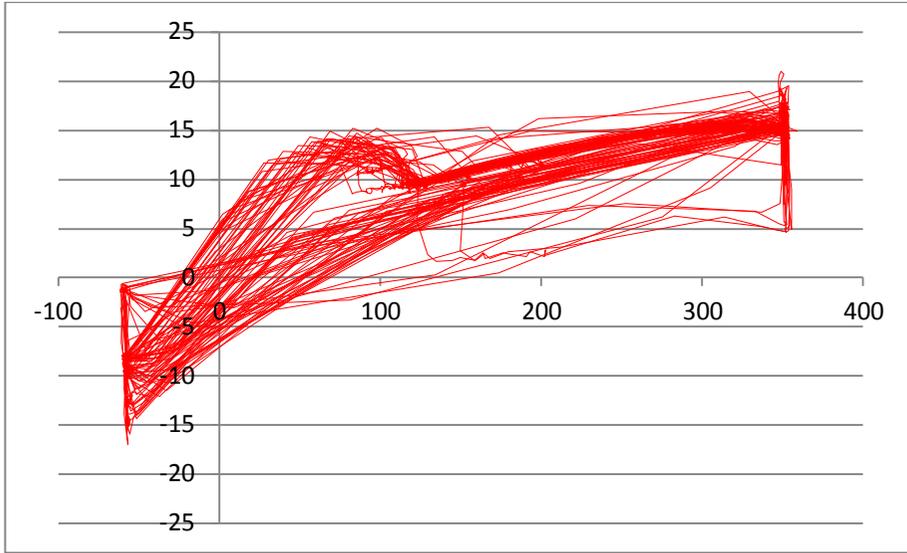
ENSAIO 12



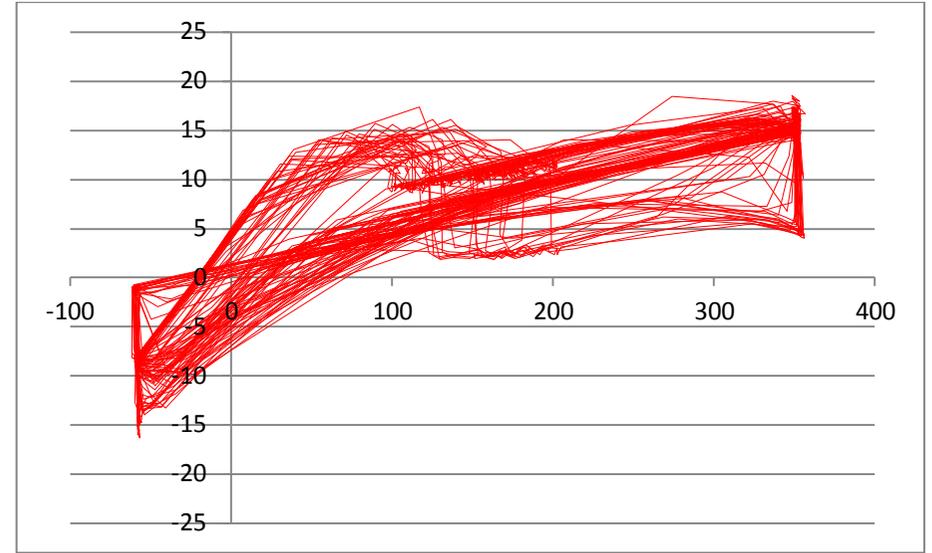
ENSAIO 28



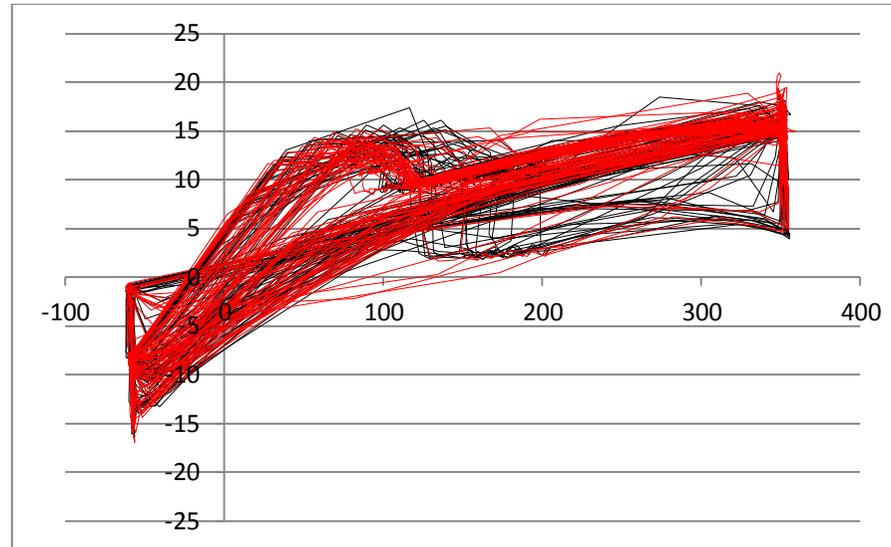
	Ensaio	Nota
Vermelho	12	6,0
Preto	28	6,0



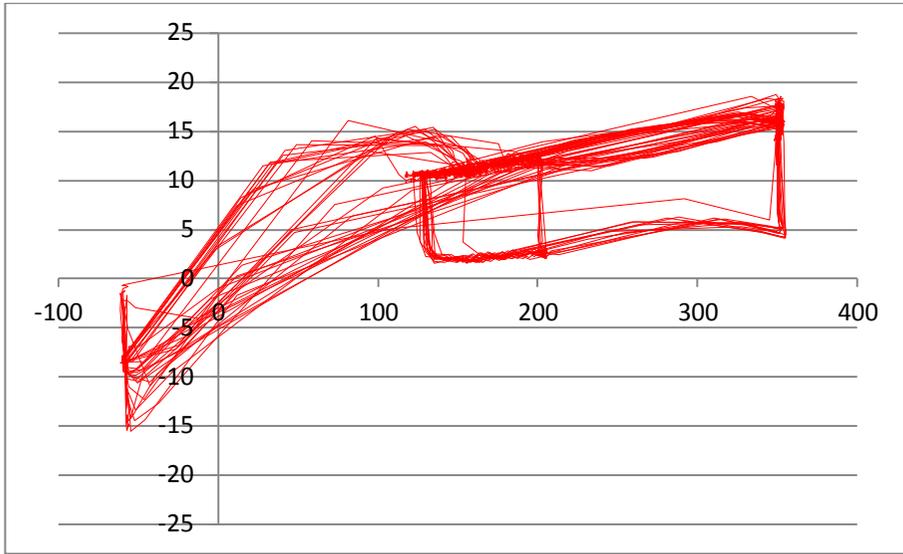
ENSAIO 13



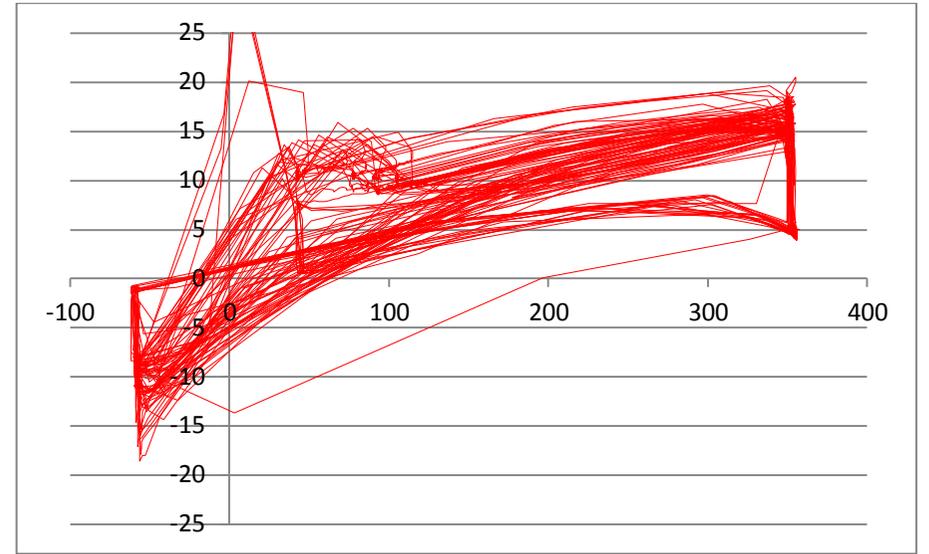
ENSAIO 29



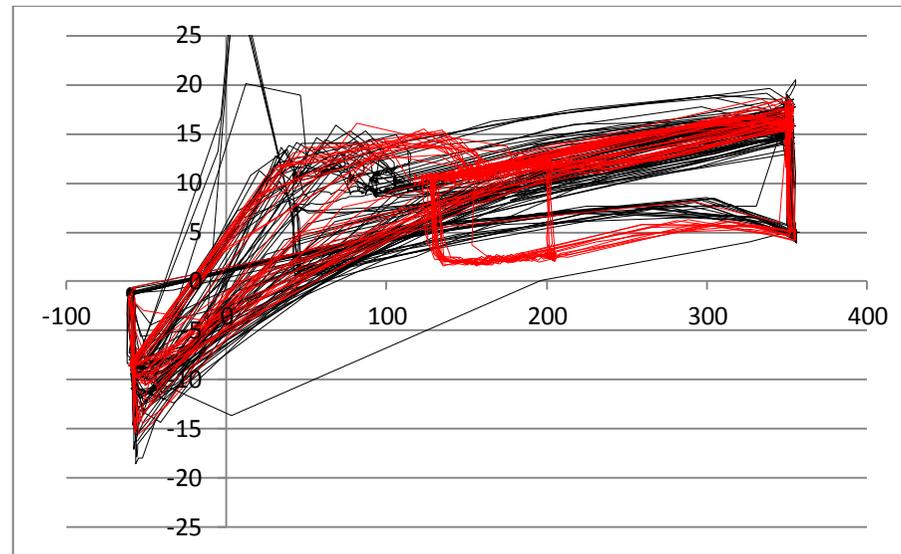
	Ensaio	Nota
Vermelho	13	4,0
Preto	29	4,0



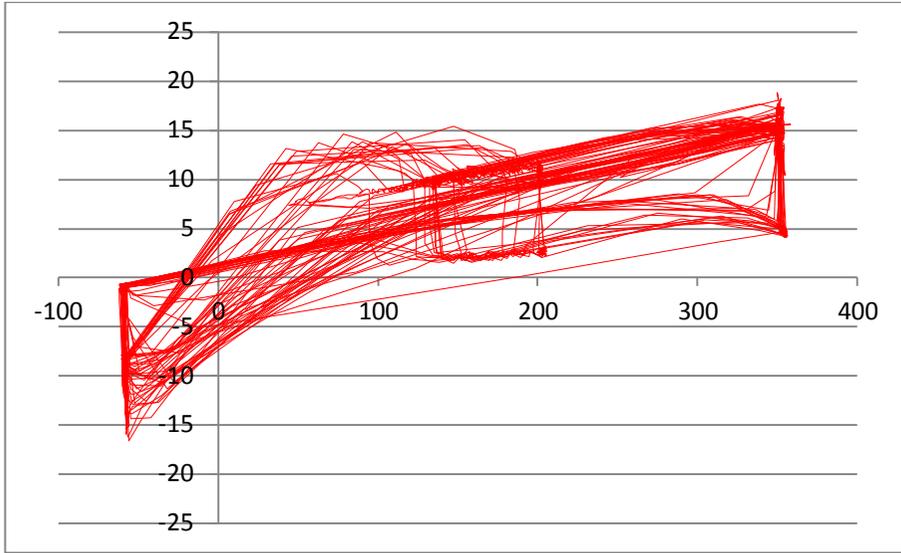
ENSAIO 14



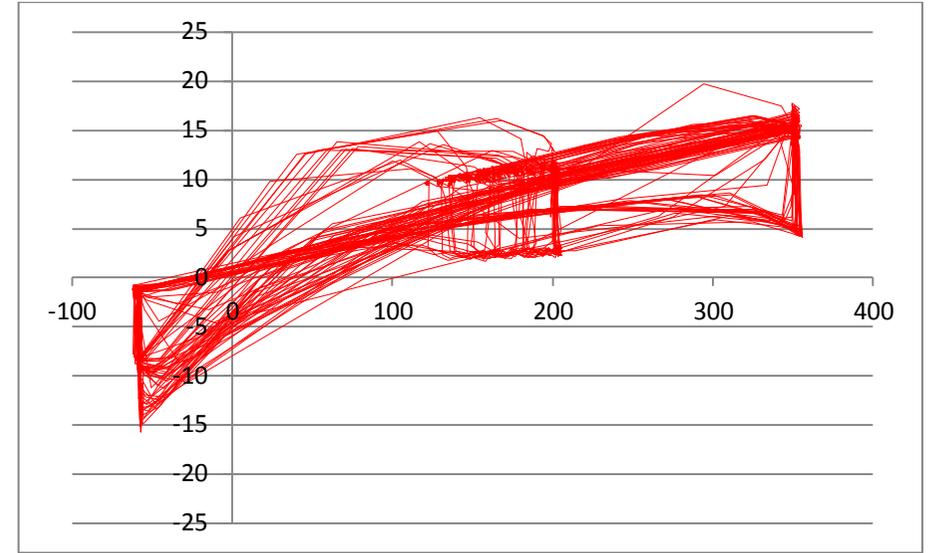
ENSAIO 30



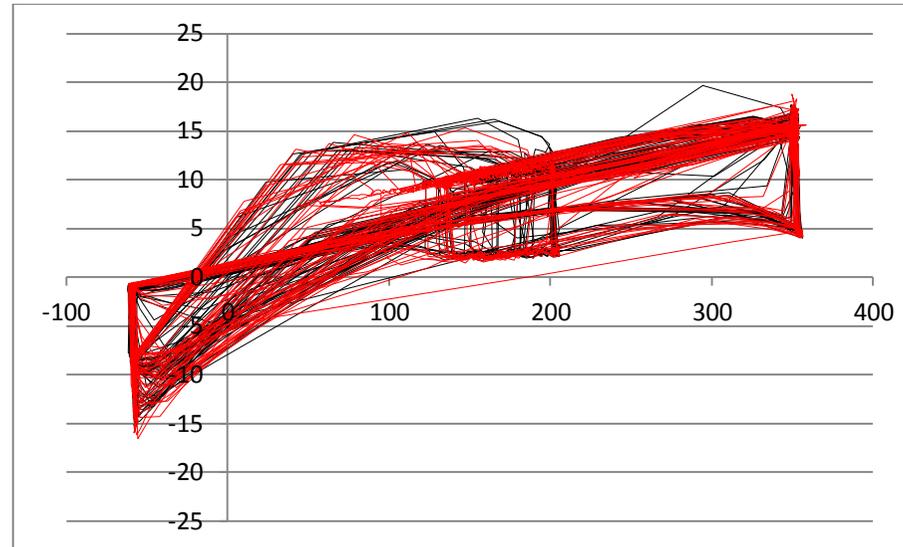
	Ensaio	Nota
Vermelho	14	1,5
Preto	30	2,0



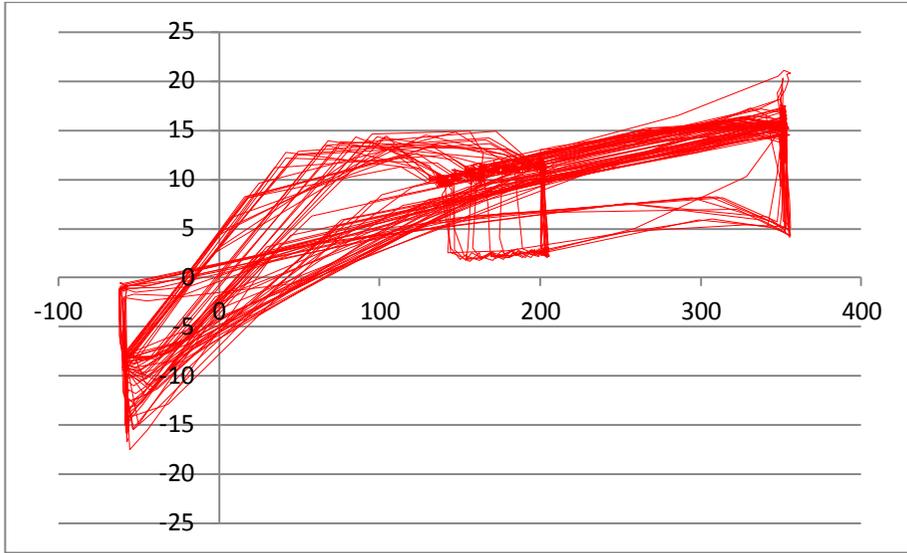
ENSAIO 15



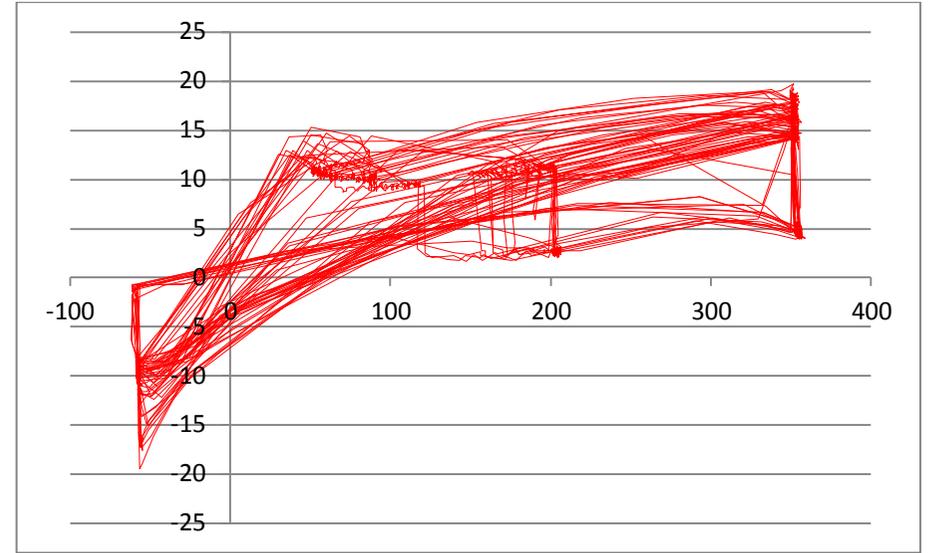
ENSAIO 31



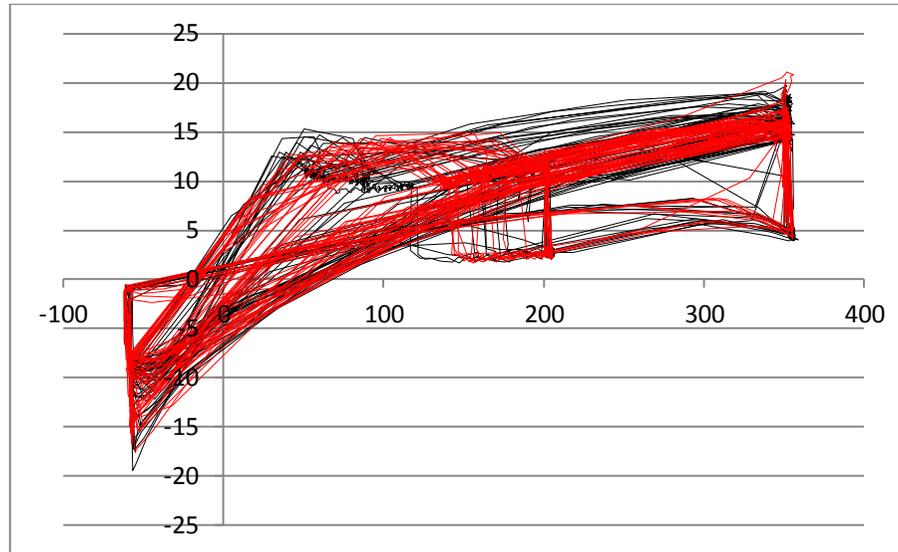
	Ensaio	Nota
Vermelho	15	3,0
Preto	31	3,0



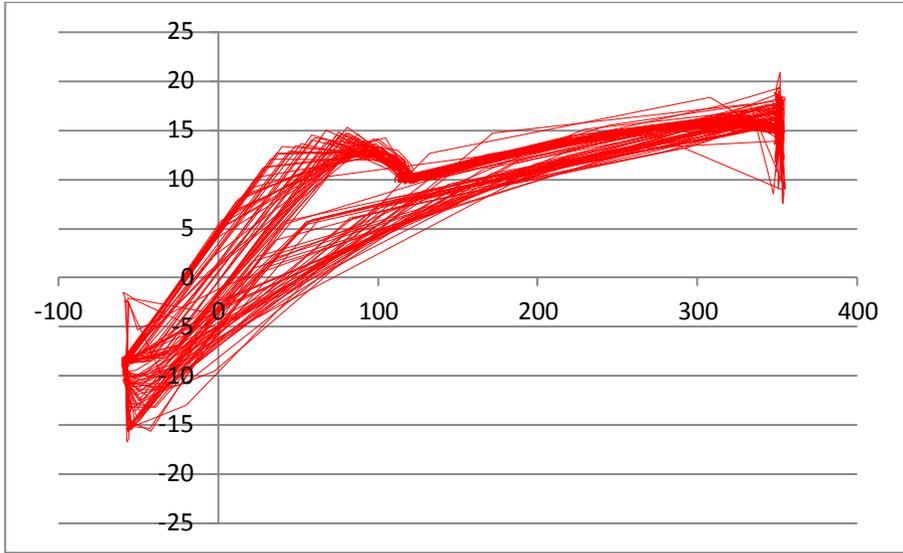
ENSAIO 16



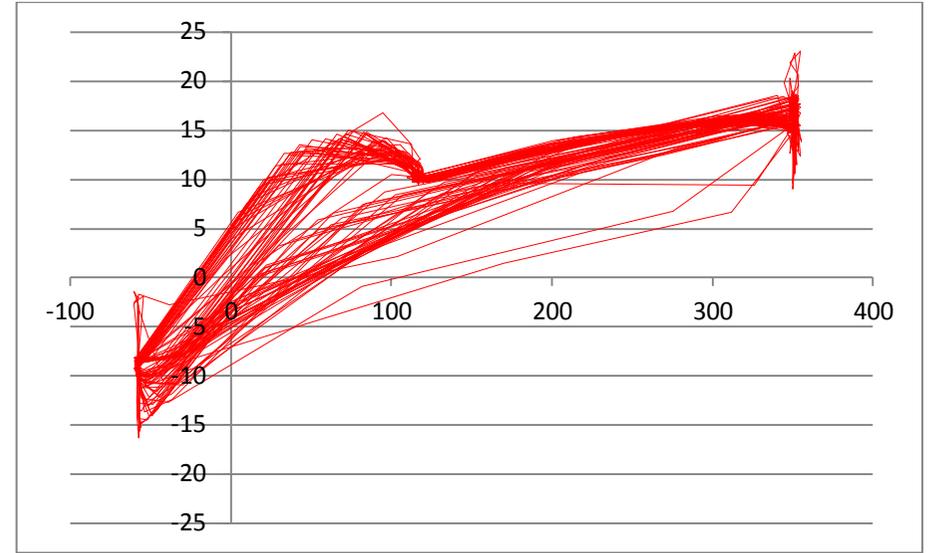
ENSAIO 32



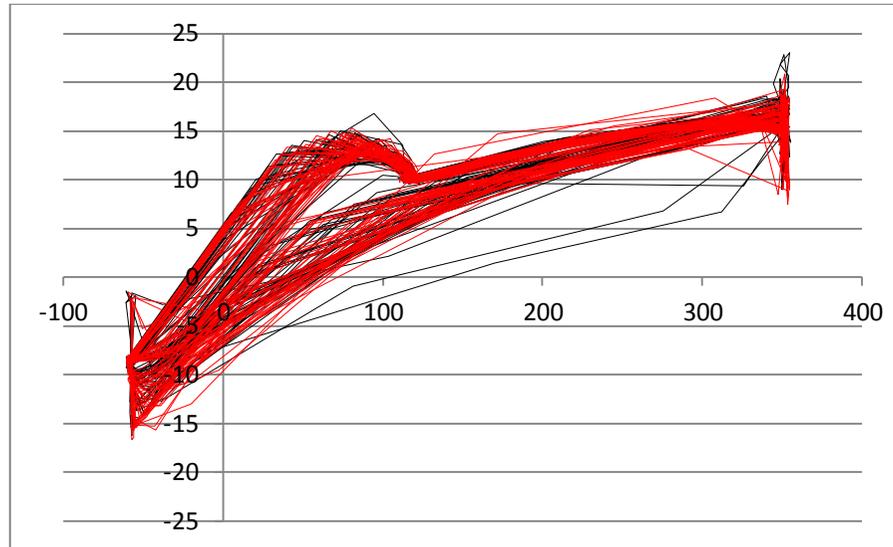
	Ensaio	Nota
Vermelho	16	2,5
Preto	32	2,0



ENSAIO 33



ENSAIO 34



	Ensaio	Nota
Vermelho	33	6,5
Preto	34	6,5