

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**ANDRÉ LUIZ POUBEL BASTOS ROSA
CAMILA MOURA ALMEDA**

**IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES OTIMIZADAS QUANTO
AOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM ATRAVÉS DO MAPA
DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA**

**VITÓRIA
2014**

ANDRÉ LUIZ POUBEL BASTOS ROSA

CAMILA MOURA ALMEDA

**IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES OTIMIZADAS QUANTO
AOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM ATRAVÉS DO MAPA
DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica do Centro
Tecnológico da Universidade Federal do
Espírito Santo, como requisito para
obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Temístocles de
Sousa Luz.

VITÓRIA

2014

ROSA, André Luiz Poubel Bastos; ALMEIDA, Camila Moura.

Identificação de Regiões Otimizadas Quanto aos Parâmetros de Soldagem Através do Mapa de Transferência Metálica / André Luiz Poubel Bastos Rosa; Camila Moura Almeida – 2014.

106 páginas.

Orientador: Professor Doutor Temístocles de Sousa Luz

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Fundamentos da soldagem MIG/MAG.
 2. Regulagem de parâmetros de soldagem.
 3. Modos de transferência metálica no processo MIG/MAG.
 4. Estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG.
- I. ROSA, André Luiz Poubel Bastos. II. ALMEIDA, Camila Moura. III. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Identificação de Regiões Otimizadas Quanto aos Parâmetros de Soldagem Através do Mapa de Transferência Metálica.

**ANDRÉ LUIZ POUBEL BASTOS ROSA
CAMILA MOURA ALMEDA**

**IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES OTIMIZADAS QUANTO
AOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM ATRAVÉS DO MAPA
DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 07 de agosto de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Temístocles
Orientador

Engenheiro Mecânico
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

Engenheiro Mecânico Fábio Arpini Carminati
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

Dedicamos este trabalho primeiramente a Deus. Aos nossos pais Arlon Bastos da Rosa / Ana Cristina Poubel Bastos Rosa e Maxwell Miranda de Almeida / Lucimar Rosa de Moura Almeida que nos apoiaram incondicionalmente do começo ao fim.

AGRADECIMENTOS

Aos nossos familiares que sempre nos apoiaram nessa nossa longa caminhada.

Aos nossos verdadeiros amigos que estavam presentes nos melhores momentos vividos dentro e fora da universidade e que fizeram essa jornada muito mais divertida.

Ao nosso professor orientador Temístocles de Sousa Luz pelo incentivo e conhecimento ensinado durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial ao responsável pelo laboratório de soldagem Lázaro Coutinho pelo apoio na realização dos experimentos.

Muitíssimo Obrigado!

RESUMO

Este trabalho pretende mapear os diferentes modos de transferência metálica obtidos e encontrar a região que proporcione uma solda mais uniforme, quase sem respingos, com bom controle do cordão, e com boa estabilidade térmica. Através da soldagem do tipo MIG, foram feitas várias soldas alterando alguns parâmetros, como tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, para análise da influência dos mesmos na mudança do modo de transferência metálica. No total serão realizadas trinta soldas, variando a tensão, a velocidade de alimentação e a velocidade de soldagem e, durante os testes, um software de aquisição de dados – SAP 4.0 – armazena os valores dos parâmetros para posteriormente avaliar a transferência metálica através do comportamento dinâmico das variáveis de soldagem. Em seguida, será confeccionado o mapa de transferência e definida a região ótima de soldagem.

Palavras-Chave: MIG, modo de transferência metálica, curto-circuito, globular, mapeamento de transferência metálica, goticular.

ABSTRACT

This paper aims to map different transfer metal modes obtained and search for the region who provides a more uniform weld, with almost no spatter, with a good control of the bead weld, and with good thermal stability. Through the Metal Inert Gas Welding, several welds were made by changing some parameters, like voltage, feed speed of the electrode wire and welding speed, to analyze the influence of them on changing the transfer metal mode. Thirty welds will be performed, varying the voltage, the feed speed and the welding speed and, during the tests, a data acquisition program – SAP 4.0 – will store the parameter values for future evaluation of the metal transfer through the dynamic behavior of the welding variables. Then, a transfer map will be made and set the optimal region of welding.

Keywords: MIG, modes of transfer metal, short-circuit, globular, mapping the transfer metal, spray.

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 2.1</u> – Vista típica de um equipamento para soldagem MIG/MAG	23
<u>Figura 2.2</u> – Componentes básicos de uma tocha para soldagem MIG/MAG	25
<u>Figura 2.3</u> – Exemplo de bico de contato.....	26
<u>Figura 2.4</u> – Exemplos de bocais.....	26
<u>Figura 2.5</u> – Exemplo de Arame-eletrodo.....	27
<u>Figura 2.6</u> – Oscilograma de tensão e de corrente durante a transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota em crescimento e destacamento	30
<u>Figura 2.7</u> – Alterações do comprimento do arco durante a fase de arco aberto para o processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito. Em (a), a tensão de regulagem ($U_a=18V$) é menor do que em (b) ($U_a=20,5V$), assim como é menor o gradiente de subida e maior o de descida da corrente de curto-circuito, resultando numa corrente de pós curto-círcito mais baixa e atuando por um período mais curto	31
<u>Figura 2.8</u> – Oscilogramas de tensão e de corrente do processo de soldagem MIG/MAG usando uma fonte eletromagnética, evidenciando o comportamento aleatório da transferência. O oscilograma de baixo representa uma ampliação do de cima (proteção com CO_2 puro, arame de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro de 1,2 mm de diâmetro, U_a de 22V; I_s de 140 A e V_{alim} de 4 m/min).....	32
<u>Figura 2.9</u> – Na vista superior, um exemplo da transferência metálica no modo globular, na vista inferior, oscilogramas deste tipo de transferência	34
<u>Figura 2.10</u> – Exemplo da transferência metálica globular repulsiva	35
<u>Figura 2.11</u> – Variação de tensão e corrente de soldagem em condições de transferência metálica goticular	36
<u>Figura 2.12</u> – Exemplos de transferência combinada do tipo “curto-circuito-goticular”, acima com “elongamento” e abaixo “projetada”	41
<u>Figura 2.13</u> – Parâmetros de tempo de transferência por curto-circuito determinados na base do uso da tensão de referência	45
<u>Figura 2.14</u> – Ilustração da alteração do comprimento e, respectivamente, da luminosidade do arco, durante a formação e destacamento da gota no processo de soldagem.....	46
<u>Figura 2.15</u> – Princípio do <i>Back-lighting</i> aplicado à soldagem.....	47
<u>Figura 2.16</u> – Histograma típico de tempo de curto-círcito nas condições de soldagem MIG/MAG.....	48
<u>Figura 3.0</u> – Gás de proteção utilizado – Mistura de 98% Ar e 2% O_2	50
<u>Figura 3.1</u> – Fonte Inversal 450	51
<u>Figura 3.2</u> – Tartílope – IMC Soldagem	51

<u>Figura 3.3</u> – Maleta de aquisição de dados – IMC Soldagem.....	51
<u>Figura 3.4</u> – Ilustração do programa SAP 4.0 mostrando os gráficos de tensão, corrente e velocidade de alimentação, referentes a solda de número 6, com tensão de 18V e velocidade de alimentação de 4 m/min	53
<u>Figura 3.5</u> – Ilustração do SAP 4.0 mostrando as informações do histograma referentes a solda de número 6, com tensão de 18V e velocidade de alimentação de 4 m/min.....	54
<u>Figura 4.0</u> – Gráfico Tensão x Velocidade de alimentação, ilustrando a região desconhecida e as regiões de cada modo de transferência.....	57
<u>Figura 4.1</u> – Gráfico Tensão x Velocidade de alimentação.....	58
<u>Figura 4.2</u> – Gráfico de dispersão, ilustrando as regiões específicas dos modos de transferência metálica.....	58
<u>Figura 4.3</u> – Soldas que apresentaram modo de transferência por Curto-Círcuito.....	59
<u>Figura 4.4</u> – Soldas que apresentaram modo de transferência Curto-Círcuito/Globular.....	59
<u>Figura 4.5</u> – Soldas que apresentaram modo de transferência Globular.....	60
<u>Figura 4.6</u> – Soldas que apresentaram modo de transferência Globular/Goticular.....	60
<u>Figura 4.7</u> – Soldas que apresentaram modo de transferência Goticular.....	60
<u>Figura A.1</u> – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 1 – Tensão 18V e Velocidade de Alimentação de 2 m/min.....	64
<u>Figura A.2</u> – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 2 – Tensão 21V e Velocidade de Alimentação de 2 m/min.....	64
<u>Figura A.3</u> – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 3 – Tensão 24V e Velocidade de Alimentação de 2 m/min.....	65
<u>Figura A.4</u> – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 4 – Tensão 27V e Velocidade de Alimentação de 2 m/min.....	65
<u>Figura A.5</u> – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 5 – Tensão 30V e	

Velocidade de Alimentação de 2
m/min.....66

Figura A.6 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 6 – Tensão 18V e
Velocidade de Alimentação de 4
m/min.....66

Figura A.7 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 7 – Tensão 21V e
Velocidade de Alimentação de 4
m/min.....67

Figura A.8 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 8 – Tensão 24V e
Velocidade de Alimentação de 4
m/min.....67

Figura A.9 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 9 – Tensão 27V e
Velocidade de Alimentação de 4
m/min.....68

Figura A.10 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 10 – Tensão 30V e
Velocidade de Alimentação de 4
m/min.....68

Figura A.11 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 11 – Tensão 18V e
Velocidade de Alimentação de 6
m/min.....69

Figura A.12 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 12 – Tensão 21V e
Velocidade de Alimentação de 6
m/min.....69

Figura A.13 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 13 – Tensão 24V e
Velocidade de Alimentação de 6
m/min.....70

Figura A.14 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 14 – Tensão 27V e
Velocidade de Alimentação de 6
m/min.....70

Figura A.15 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 15 – Tensão 30V e
Velocidade de Alimentação de 6
m/min.....71

Figura A.16 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 16 – Tensão 18V e
Velocidade de Alimentação de 8
m/min.....71

Figura A.17 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 17 – Tensão 21V e
Velocidade de Alimentação de 8

m/min.....72

Figura A.18 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 18 – Tensão 24V e
Velocidade de Alimentação de 8
m/min.....72

Figura A.19 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 19 – Tensão 27V e
Velocidade de Alimentação de 8
m/min.....73

Figura A.20 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 20 – Tensão 30V e
Velocidade de Alimentação de 8
m/min.....73

Figura A.21 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 21 – Tensão 18V e
Velocidade de Alimentação de 10
m/min.....74

Figura A.22 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 22 – Tensão 21V e
Velocidade de Alimentação de 10
m/min.....74

Figura A.23 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 23 – Tensão 24V e
Velocidade de Alimentação de 10
m/min.....75

Figura A.24 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 24 – Tensão 27V e
Velocidade de Alimentação de 10
m/min.....75

Figura A.25 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 25 – Tensão 30V e
Velocidade de Alimentação de 10
m/min.....76

Figura A.26 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 26 – Tensão 18V e
Velocidade de Alimentação de 12
m/min.....76

Figura A.27 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 27 – Tensão 21V e
Velocidade de Alimentação de 12
m/min.....77

Figura A.28 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 28 – Tensão 24V e
Velocidade de Alimentação de 12
m/min.....77

Figura A.29 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 29 – Tensão 27V e
Velocidade de Alimentação de 12
m/min.....78

<u>Figura A.30</u> – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 30 – Tensão 30V e Velocidade de Alimentação de m/min.....	78	12
<u>Figura B.1</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 1.....	79	
<u>Figura B.2</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 2.....	79	
<u>Figura B.3</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 3.....	80	
<u>Figura B.4</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 4.....	80	
<u>Figura B.5</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 5.....	81	
<u>Figura B.6</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 6.....	81	
<u>Figura B.7</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 7.....	82	
<u>Figura B.8</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 8.....	82	
<u>Figura B.9</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 9.....	83	
<u>Figura B.10</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 10.....	83	
<u>Figura B.11</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 11.....	84	
<u>Figura B.12</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 12.....	84	
<u>Figura B.13</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 13.....	85	
<u>Figura B.14</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 14.....	85	
<u>Figura B.15</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 15.....	86	
<u>Figura B.16</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 16.....	86	
<u>Figura B.17</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 17.....	87	
<u>Figura B.18</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 18.....	87	
<u>Figura B.19</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 19.....	88	
<u>Figura B.20</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 20.....	88	
<u>Figura B.21</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 21.....	89	
<u>Figura B.22</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 22.....	89	
<u>Figura B.23</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 23.....	90	
<u>Figura B.24</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 24.....	90	
<u>Figura B.25</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 25.....	91	
<u>Figura B.26</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 26.....	91	
<u>Figura B.27</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 27.....	92	
<u>Figura B.28</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 28.....	92	
<u>Figura B.29</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP – SOLDA 29.....	93	
<u>Figura B.30</u> – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS		

SAP – SOLDA 30.....	93
<u>Figura C.1</u> – Aspectos gerais de todas chapas e solda	94
<u>Figura C.2</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 1.....	95
<u>Figura C.3</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 2.....	95
<u>Figura C.4</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 3.....	95
<u>Figura C.5</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 4.....	96
<u>Figura C.6</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 5.....	96
<u>Figura C.7</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 6.....	96
<u>Figura C.8</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 7.....	97
<u>Figura C.9</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 8.....	97
<u>Figura C.10</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 9.....	97
<u>Figura C.11</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 10.....	98
<u>Figura C.12</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 11.....	98
<u>Figura C.13</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 12.....	98
<u>Figura C.14</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 13.....	99
<u>Figura C.15</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 14.....	99
<u>Figura C.16</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 15.....	99
<u>Figura C.17</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 16.....	100
<u>Figura C.18</u> – Aspecto do cordão – SOLDA 17.....	100

<u>Figura</u>	<u>C.19</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
18.....			100				
<u>Figura</u>	<u>C.20</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
19.....			101				
<u>Figura</u>	<u>C.21</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
20.....			101				
<u>Figura</u>	<u>C.22</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
21.....			101				
<u>Figura</u>	<u>C.23</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
22.....			102				
<u>Figura</u>	<u>C.24</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
23.....			102				
<u>Figura</u>	<u>C.25</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
24.....			103				
<u>Figura</u>	<u>C.26</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
25.....			103				
<u>Figura</u>	<u>C.27</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
26.....			104				
<u>Figura</u>	<u>C.28</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
27.....			104				
<u>Figura</u>	<u>C.29</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
28.....			105				
<u>Figura</u>	<u>C.30</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
29.....			105				
<u>Figura</u>	<u>C.31</u>	-	Aspecto	do	cordão	-	SOLDA
30.....			106				

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.0 – Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG.....29

Tabela 3.0 – Composição química (% em peso) do aço inoxidável
410D.....49

Tabela 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas do aço inoxidável
410D.....49

<u>Tabela 3.2</u> – Composição química do arame eletrodo utilizado.....	50
<u>Tabela 3.3</u> – Relações das velocidades de alimentação e soldagem por tensão, dos testes.....	52
<u>Tabela 4.0</u> – Relações das velocidades de alimentação e de soldagem por tensão, dos testes.....	30 55

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍGLAS

GMAW Gas Metal Arc Welding.

I_n	Corrente Nominal de Soldagem (A).
I_s	Corrente de Soldagem (Valor instantâneo ou médio medido ao longo da soldagem, em A).
L_a	Comprimento do Arco (mm).
MIG	Metal Inerte Gás.
MIG/MAG	Denominação Genérica do processo, independente do caráter inerte ou ativo do gás de proteção.
SAP	Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem.
U_a	Tensão de arco (valor instantâneo ou médio medido ao longo da soldagem, em V).
U_{ref}	Tensão de referência para ações de controle (V).
V_{alim}	Velocidade de alimentação do Arame eletrodo (m/min).
V_s	Velocidade de soldagem (cm/min ou min).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
---------------------------	-----------

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
<u>2.1INTRODUÇÃO</u>	20
<u>2.2A SOLDAGEM DO TIPO MIG/MAG</u>	21
<u>2.2.1EQUIPAMENTOS PARA A SOLDAGEM MIG/MAG</u>	22
<u>2.2.2ARAMES-ELETRODO.....</u>	26
<u>2.2.3GASES DE PROTEÇÃO</u>	27
<u>2.3MODOS DE TRANSFERÊNCIA.....</u>	28
<u>2.3.1MODOS NATURAIS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....</u>	29
<u> 2.3.1.1TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO</u>	29
<u> 2.3.1.2TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR VÔO LIVRE</u>	33
<u> 2.3.2MODOS CONTROLADOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA</u>	39
<u> 2.3.3MODOS COMBINADOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA</u>	40
<u>2.4CONTROLE DOS PARÂMETROS</u>	42
<u>2.4.1ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.....</u>	43
<u> 2.4.1.1CONCEITO E APLICAÇÃO</u>	43
<u> 2.4.2IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DE CORRENTE E TENSÃO DO ARCO.....</u>	44
<u> 2.4.3LUMINOSIDADE E EMISSÃO SONORA COMO FONTES ADICIONAIS DE INFORMAÇÃO</u>	45
<u> 2.4.4APLICAÇÃO DE FILMAGEM PARA ANÁLISE DO PROCESSO.....</u>	46
<u> 2.4.5ASPECTOS DA ESTABILIDADE DO PROCESSO MIG/MAG</u>	47
<u> 2.4.6AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO</u>	47
 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	 49
<u>3.1MATERIAIS</u>	49
<u> 3.1.1AÇO UTILIZADO PARA CONFECÇÃO DO CORPO DE PROVA.....</u>	49
<u> 3.1.2ELETRODOS / FLUXO UTILIZADO</u>	50
<u> 3.1.3EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA SOLDAGEM E PARA AQUISIÇÃO DE DADOS</u>	50
<u>3.2METODOLOGIA.....</u>	51
<u> 3.2.1SOLDAGEM COM O PROCESSO GMAW (MIG/MAG)</u>	51
<u> 3.2.2AQUISIÇÃO DE DADOS</u>	53
<u> 3.2.3TRATAMENTO DOS DADOS E ELABORAÇÃO DO MAPA DE TRANSFERÊNCIA</u>	54
 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	 55
 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	 61

<u>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	62
<u>ANEXO A - GRÁFICOS DE TENSÃO X CORRENTE DE CADA TESTE ANALISADO.....</u>	64
<u>ANEXO B - INFORMAÇÕES DO HISTOGRAMA DE CADA TESTE FORNECIDAS PELO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS</u>	79
<u>ANEXO C - FOTOS DAS SOLDAS.....</u>	94

1 INTRODUÇÃO

A soldagem a arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW) é um processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos. O processo usado neste trabalho é conhecido como MIG (Metal Inert Gas) onde a proteção é feita com gases inertes ou rica em gases inertes [1].

A soldagem MIG/MAG é um processo normalmente semi-automático, em que a alimentação do eletrodo é feita mecanicamente, através de um alimentador motorizado, e o soldador é responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além de mover a tocha ao longo da junta. No processo automático, um braço mecânico é responsável por mover a tocha ao longo da junta, sendo responsabilidade do soldador apenas a iniciação e interrupção da soldagem. A manutenção do arco é garantida pela alimentação contínua do arame eletrodo, e o comprimento do arco é, em princípio, mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema [1].

Por ser um processo que utiliza eletrodo consumível, é caracterizado pela transferência de metal para poça de fusão através do arco. Essa transferência ocorre por meio de gotas de metal fundido na ponta do arame eletrodo (com diferentes tempos de crescimento, dimensões e frequências de destacamento) e é influenciada, dentre outros fatores, pelo material e diâmetro do eletrodo, pelo gás de proteção, pela intensidade e polaridade da corrente de soldagem, pelo comprimento do arco e pela pressão do ambiente. O modo pelo qual o material é transferido no arco determina a estabilidade do processo e afeta fortemente a quantidade de respingos gerada [2].

O controle dos parâmetros do processo de soldagem é de suma importância para obtenção de uma solda de qualidade, e eles exercem forte influência no modo de transferência metálica no processo MIG/MAG.

Este trabalho tem como objetivo controlar os parâmetros, de tensão, de corrente,

velocidades de alimentação e soldagem, construir um mapa de transferência utilizando os modos de transferência metálica convencionais, baseado nesses parâmetros, analisar a região do mapa de transferência que proporciona uma solda mais uniforme e de qualidade, e comparar essas regiões para cada modo de transferência utilizado. Com isso, pode-se aumentar o rendimento e consequentemente otimizar os custos.

Desejamos um tipo de soldagem com boas características, tais como, elevada estabilidade do arco, praticamente não gerar respingos, bom molhamento, boa penetração da solda, bom aspecto superficial dos cordões, favorável a soldagem em alta velocidade e alta taxa de deposição. A escolha da utilização dos métodos mais convencionais na análise, foi feita devido ao menor custo de soldagem e a maior facilidade de controle dos parâmetros.

Esses parâmetros serão analisados através de programas computacionais (Sistema de Aquisição de Dados – SAP 4.0) e de sistemas automatizados utilizados nos processos de MIG/MAG. Os dados adquiridos serão tratados para confecção do mapa de transferência, que será analisado para definição das regiões ótimas. Em seguida, as mesmas serão analisadas para cada modo de transferência para descobrir qual delas proporcionará uma solda de maior qualidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

A Soldagem MIG/MAG é um processo bastante versátil em termos de ligas soldáveis e espessuras de materiais, podendo ser usado em todas as posições. A soldagem MIG/MAG encontra uma vasta gama de aplicações na soldagem de ferrosos, não ferrosos (como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas) e aços inoxidáveis [1].

Esse tipo de soldagem apresentou nos últimos anos um grande crescimento em termos de utilização no mundo. Esse crescimento é devido à tendência em substituir, sempre que possível, a soldagem manual por processos semi-automáticos e mecanizados, para a obtenção de maior produtividade durante a soldagem [1].

Como é um processo semi-automático e que usa densidades de corrente elevadas (corrente por unidade de área da seção transversal do eletrodo), sua produtividade é bastante elevada, sendo, quase sempre, uma alternativa viável à soldagem com outros processos. Além disso, pode ainda ser mecanizado de forma relativamente simples, com o uso de dispositivos de posicionamento e deslocamento da tocha [1].

Além da união, a soldagem MIG/MAG tem sido usada na fabricação e manutenção de equipamentos e peças metálicas, na recuperação de peças desgastadas e no recobrimento de superfícies metálicas com materiais especiais [1].

A soldagem MIG/MAG tem sido amplamente usada na indústria automobilística, particularmente com a utilização de robôs, na indústria ferroviária, na fabricação de equipamentos e bens de médio e grande porte, como pontes rolantes, vigas, escavadeiras, tratores, etc. [1].

As principais vantagens da soldagem MIG/MAG comparada à soldagem com eletrodos revestidos, são a alta taxa de deposição e alto fator de ocupação do

soldador, grande versatilidade quanto ao tipo de material e espessuras aplicáveis, não existência de fluxos de soldagem e, consequentemente, a ausência de operações de remoção de escória e limpeza, além da exigência de menor habilidade do soldador [1].

A principal limitação é a grande sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem, o que influencia diretamente na qualidade do cordão de solda, além da necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros para se obter um determinado conjunto de características no cordão depositado. A determinação destes parâmetros é dificultada pela forte interdependência destes e por sua influência no resultado final da operação. O maior custo do equipamento, a maior necessidade de manutenção do mesmo em comparação com o equipamento de soldagem com eletrodos revestidos, além da menor variedade de consumíveis, são outras limitações deste processo. [1].

2.2 A SOLDAGEM DO TIPO MIG/MAG

O Processo de Soldagem MIG/MAG é um processo de soldagem que se baseia na fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da solda é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte (comercialmente, Ar, He ou uma mistura dos dois) [2].

A Soldagem MIG/MAG pode ser aplicada de forma automática, quando o movimento da tocha é feito por uma máquina, ou semi-automática, quando a tocha é conduzida manualmente pelo operador (soldador). Em ambos os casos, a alimentação do arame é feita mecanicamente, onde o equipamento, por si só, mantém a velocidade de alimentação e o comprimento do arco constantes. O arame é também designado por arame-eletrodo ou simplesmente por eletrodo, pois, a partir do ponto de contato elétrico até o metal de base, ele passa a ter função de condutor elétrico [2].

O gás de proteção tem a função de evitar a contaminação do arame, das gotas de metal fundido em transferência e da poça de fusão, pelos gases da atmosfera. Este gás também tem a função de ser o meio ionizante, conferindo as propriedades de estabilidade do arco e controlando a transferência metálica, o

consumo do eletrodo e a fusão do metal de base [2].

A alimentação do arame-eletrodo, embobinado em um carretel na forma mais convencional de trabalho, se dá por roletes do alimentador de arame, que o impulsiona até a saída da tocha a uma velocidade regulada e rigorosamente constante. O equilíbrio entre a velocidade de alimentação e a taxa de fusão do arame será estabelecido automaticamente [2].

O equipamento básico para a soldagem MIG/MAG consiste de fonte de energia, tocha de soldagem, fonte de gás e alimentador de arame. A fonte de energia tem, em geral, uma saída de tensão constante, regulável entre 15 e 50V, que é usada em conjunto com um alimentador de arame com velocidade regulável entre 1 e 20 m/min. Este sistema ajusta automaticamente o comprimento do arco através de variações de corrente [3].

As principais características do processo MIG/MAG são a relativamente elevada taxa de fusão do arame-eletrodo, a possibilidade da variação do modo de transferência metálica e a relativa portabilidade da tocha. O pequeno comprimento do eletrodo (extensão energizada do arame-eletrodo) permite o uso de uma alta densidade de corrente (levando a um alto consumo) sem afetar a rigidez mecânica do eletrodo por aquecimento ao longo de seu comprimento. Seus diâmetros pequenos conferem um arco elétrico concentrado e de alto poder de fusão do metal de base. Pelo fato de a alimentação ser contínua, pode-se aumentar o ciclo de trabalho (relação entre o tempo de arco aberto e o tempo total de soldagem), conferindo maior produtividade. A soldagem pode ser feita em diversas posições, devido a possibilidade de se alterar o modo de transferência metálica [2].

Em relação as restrições do processo, a emissão de calor e luz durante a soldagem é alta, a maior robustez dos equipamentos dificulta seu manuseio e a necessidade de maior controle dos parâmetros de soldagem geram a necessidade de maior experiência do operador. Além disso, à uma inter-relação dos parâmetros a serem regulados, o que faz com que a regulagem tenha de ser mais rigorosa para obtenção de uma soldagem de maior qualidade [2].

2.2.1 EQUIPAMENTOS PARA A SOLDAGEM MIG/MAG

Os equipamentos básicos para soldagem MIG/MAG são (Figura 2.1) [2]:

- Fonte de energia [2];
- Alimentador de Arame [2];
- Tocha de Soldagem [2];
- Fonte de Gás de Proteção (seja um cilindro do gás ou fornecimento centralizado) com regulador de pressão e fluxômetro [2];

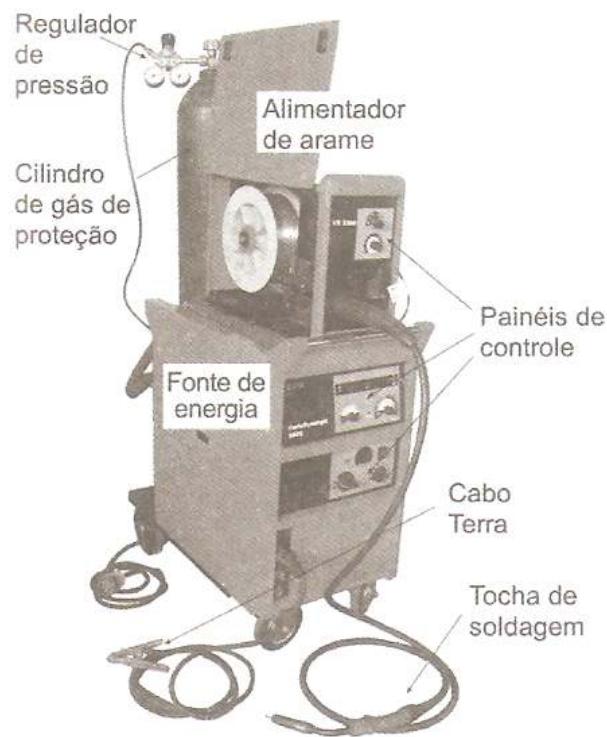


Figura 2.1 – Vista típica de um equipamento para soldagem MIG/MAG [2].

A Fonte de energia pode ser considerada simplesmente como o ponto de alimentação da energia elétrica do processo. Existem três requisitos básicos para uma fonte de energia para soldagem a arco [2]:

- Produzir saídas de corrente e tensão em níveis e com características adequadas para o processo de soldagem (baixa tensão e alta corrente) [2];

- Permitir a regulagem adequada dos valores de corrente e/ou tensão para as aplicações a que se destinam [2];
- Controlar a variação da intensidade e a forma dos sinais de corrente e/ou tensão, de acordo com os requerimentos do processo de soldagem e aplicação [2];

Ela exerce grande influência sobre o desempenho do processo de soldagem (qualidade e produtividade), sendo necessário maior conhecimento das características e princípios de funcionamento destas fontes [2].

Nos processos de soldagem a arco, a energia elétrica da rede é convertida de sua forma de tensão relativamente alta e corrente disponível relativamente baixa para menores valores de tensão e maiores valores de corrente. Esta tarefa é feita pelos transformadores. Para permitir as regulagens adequadas dos sinais elétricos de saída, indutores e controles eletrônicos são usados, estes últimos também são responsáveis pela variação controlável destes sinais. Se a corrente contínua é necessária, um banco de retificadores pode ser colocado na saída do transformador [2].

O alimentador do arame é o sistema que impulsiona o arame na direção da tocha, ou seja, é o responsável pela alimentação do material de consumo. O alimentador pode vir embutido, formando, juntamente com a fonte, um bloco único e compacto, ou separado. De qualquer forma, trabalham sempre interligados pelos sistemas de controle [2].

Em geral, máquinas compactas são projetadas para menores diâmetros de arame e, consequentemente, correntes mais baixas. Além do melhor aproveitamento de espaço, protegem o arame contra poeira e objetos estranhos, sendo assim muito aplicado em soldagens de ligas de alumínio e de aços inoxidáveis. Alimentadores separados, por outro lado, oferecem maior manobrabilidade e flexibilidade do equipamento, podendo ser fixados tanto para ficar próximos ou distantes da fonte de energia [2].

A tocha de soldagem é uma parte integrante do sistema de alimentação do arame e, por isto, são, com a fonte de energia e o alimentador, componentes

essenciais da soldagem MIG/MAG. A figura 2.2 ilustra os componentes básicos de uma tocha, todos eles devidamente projetados e dimensionados para garantir uma alimentação de arame contínua e suave [2].

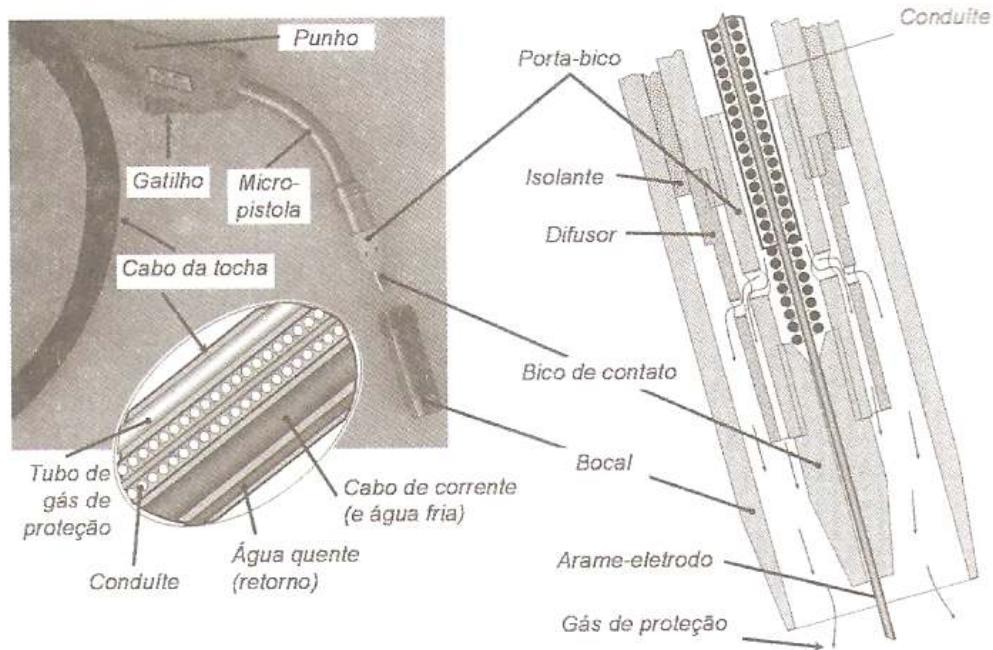


Figura 2.2 – Componentes básicos de uma tocha para soldagem MIG/MAG [2].

As tochas, por trabalharem muito próximas ao arco elétrico e a poça de fusão, demandam refrigeração. Em função da forma desta refrigeração, as tochas são classificadas como refrigeradas à gás, onde o próprio gás de proteção serve como meio de refrigeração, ou à água, onde este fluido circula desde o conector até o suporte do bico de contato. Em termos de comparação, as tochas refrigeradas à água são mais leves e promovem maior vida útil dos bicos de contato, porém necessitam de uma unidade de resfriamento, ou refrigeração, da água, que além de ser um investimento extra, é uma fonte apreciável de ruídos [2].

A qualidade e o uso correto dos bicos de contato (figura 2.3) são condições necessárias para o bom desempenho do processo. Bicos de baixa qualidade podem apresentar falta de concentricidade e alinhamento. O valor real do diâmetro interno do bico deve ser ligeiramente superior ao do arame, para garantir maior vida útil aos bicos e reduzir a instabilidade [2].



Figura 2.3 – Exemplo de bico de contato.

Os bocais (figura 2.4), se caracterizam por direcionar o fluxo do gás de proteção. Excesso de respingos, e pontas danificadas, em bocais, podem tornar o fluxo de gás instável, proporcionando porosidades e dificuldades de operação. A aplicação frequente de anti-respingos e/ou a utilização de dispositivos para remoção dos respingos, são algumas das ações que podem ser tomadas para reduzir a presença de respingos. Os bocais possuem formatos e dimensões próprias para diferentes tipos de operação [2].



Figura 2.4 – Exemplos de bocais.

2.2.2 ARAMES-ELETRODO

Popularmente denominado de arame (devido ao seu formato cilíndrico de pequeno diâmetro e de grande comprimento), o arame-eletrodo (figura 2.5) se torna eletrodo na sua região que ultrapassa o bico de contato, ou seja, entre o bico de contato e a poça no metal de base [2].

Para permitir uma alimentação contínua do material de adição no processo MIG/MAG, o arame-eletrodo é fornecido em carretéis (bobinas), conforme ilustrado na figura 2.5. O tamanho dos carretéis varia de acordo com sua aplicação ou necessidade [2].



Figura 2.5 – Exemplo de arame-eletrodo.

Quanto menor o diâmetro do arame, menor é a sua “alimentabilidade”, porém maior é a sua capacidade de soldagem com correntes mais baixas. Arames de grandes diâmetros, exigem fontes e tochas de maiores potências nominais para se tornarem viáveis [2].

Os arames podem assumir as mais diversas composições químicas (diferentes tipos de metais e classes dentre cada material) de acordo com a aplicação. São fabricados especialmente para soldagem de um determinado material, levando em consideração o controle das propriedades do material da peça a ser soldada [2].

2.2.3 GASES DE PROTEÇÃO

No processo de soldagem MIG/MAG, é necessário um fluxo de gás em torno do conjunto metal de base/arame-eletrodo para proteger a poça de fusão e as gotas em transferência e, assim, produzir soldas de qualidade. Além de proteção contra o meio externo, o gás ajuda a estabilizar o arco, promove um melhor controle da operacionalidade, controla o modo de transferência metálica e influí sobre a

geometria, propriedades mecânicas e características metalúrgicas da solda [2].

A eficiência de proteção, depende da capacidade do sistema em excluir os gases do meio ambiente. A combinação do tipo do bocal da tocha e da junta, com a vazão do gás, é essencial para uma boa proteção do processo. Deve-se minimizar ao máximo a incidência de corrente de ar durante a soldagem, mesmo que fraca, devido ao comprometimento da proteção da poça de fusão [2].

A correta escolha do gás, ou mistura de gases, depende de fatores relativos aos materiais e ao modo operacional do processo. Os principais tipos de gás de proteção usados no processo MIG/MAG são o Argônio, o Hélio, o Dióxido de Carbono (CO_2) e o Oxigênio [2].

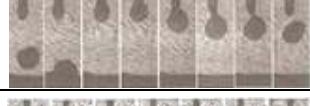
2.3 MODOS DE TRANSFERÊNCIA

Na soldagem com eletrodos consumíveis, o metal fundido na ponta do eletrodo tem que se transferir para a poça de fusão. O modo de ocorrência desta transferência é muito importante na soldagem MIG/MAG, pois afeta muitas características do processo, como, a estabilidade do arco, a quantidade de gases (destaque para o hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) absorvida pelo metal fundido, aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem e o nível de respingos gerados [1].

Na soldagem MIG/MAG, a transferência metálica natural ocorre basicamente por dois mecanismos, caracterizando duas classes: transferência por curto-círcuito e transferência por voo livre. No primeiro há o contato da gota com a poça antes do destacamento. Já no segundo mecanismo, a gota destaca-se antes do contato com a poça. A transferência por voo livre se subdivide em seis diferentes modos conforme as particularidades da formação e destacamento das gotas (figura 2.6) [2].

As classes e os respectivos modos de transferência estão relacionados com parâmetros de regulagem do processo e tipos de gases de proteção. É importante ressaltar que entre os campos dos modos existem zonas de intercessão, nas quais pode aparecer instabilidade de transferência causada entre dois modos [2].

Tabela 2.0 – Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica que acontecem no processo MIG [2]

CLASSE DE TRANSFERÊNCIA	MODO DE TRANSFERÊNCIA	IMAGEM	FORÇA (EFEITO) GOVERNANTE PRINCIPAL
Por Curto-Circuito	Por Curto-Circuito		Tensão superficial
Por vôo livre	Globular		Gravitacional
	Globular Repulsiva		Gravitacional e reação
	Goticular (ou Goticular projetada)		Eletromagnética
	Goticular com elongamento		
	Goticular Rotacional		
	Explosiva		Reações Químicas

2.3.1 MODOS NATURAIS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

2.3.1.1 TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO

A transferência por curto-círcito ocorre quando se usam baixos valores de tensão e corrente e é o modo normalmente usado para soldagem fora de posição (posições diferentes da posição plana) ou na união de peças de pequena espessura, quando baixa energia de soldagem é necessária. Uma gota de metal se forma na ponta do eletrodo e vai aumentando de diâmetro, até tocar na poça de fusão, sendo rapidamente atraída para esta, como consequência da ação da tensão superficial. Este modo de transferência caracteriza-se por uma grande instabilidade do arco, podendo apresentar formação intensa de respingos.

Entretanto, a quantidade de respingos pode ser limitada pela seleção adequada de parâmetros de soldagem e ajuste da indutância na fonte de energia, de forma que os curtos-circuitos ocorram de forma suave, com um valor máximo de corrente durante o curto-circuito limitado e de modo que a ponta do eletrodo fique parcialmente mergulhada na cratera da poça de fusão. De um modo geral, a estabilidade do arco e do processo aumenta com a frequência de curto-circuito, até um certo limite [1].

A frequência de transferência de curtos-circuitos geralmente varia de 20 a 200 vezes por segundo. A figura 2.6 mostra o comportamento dos sinais de corrente e de tensão durante este modo de transferência. Pode-se perceber que a tensão cai bruscamente quando a gota toca a poça (início do curto-circuito) e permanece baixa até o fim do curto-circuito, enquanto a corrente aumenta rapidamente, decaindo apenas após o destacamento da gota [2].

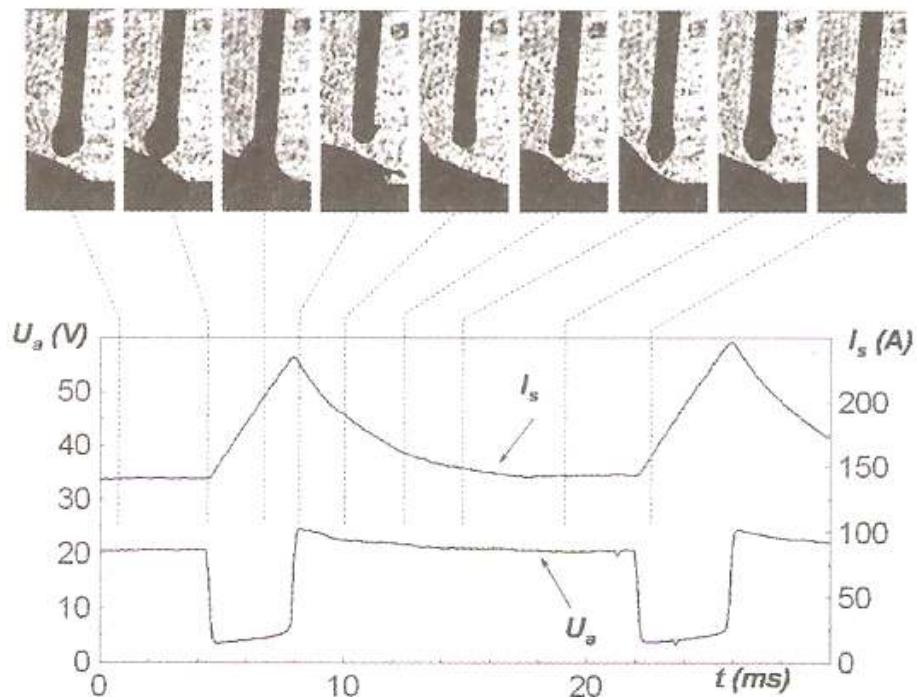


Figura 2.6 – Oscilograma típico de tensão e de corrente durante a transferência por curto-círcito em função do comportamento da gota em crescimento e destacamento [2]

Apesar de que em média há um equilíbrio entre a taxa de fusão e a velocidade de alimentação nas soldagens com esse modo de transferência, pode-se dizer que, imediatamente após o fim do curto-circuito, a taxa de fusão de eletrodo torna-se

maior do que a de alimentação, graças ao valor elevado da corrente de pós curto-circuito. Ou seja, logo após o rompimento do curto-círcuito, o comprimento do arco cresce rapidamente, enquanto uma nova gota começa a se formar na ponta do arame-eletrodo. O comprimento de arco alcançado depende de vários fatores, sendo os de maior importância, as regulagens de tensão de soldagem e os gradientes de subida e descida de corrente (Figura 2.7) [2].

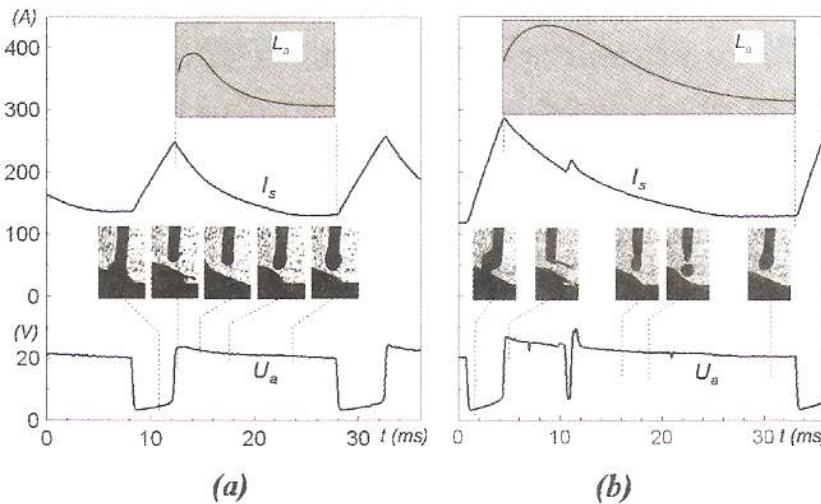


Figura 2.7 – Alterações do comprimento do arco durante a fase de arco aberto para o processo MIG com transferência por curto-círcuito. Em (a), a tensão de regulagem ($U_a=18\text{ V}$) é menor do que em (b) ($U_a=20,5\text{ V}$), assim como é menor o gradiente de subida e maior o de descida da corrente de curto-círcuito, resultando numa corrente de pós curto-círcito mais baixa e atuando por um período mais curto [2].

Após a reabertura de arco, as taxas de fusão e de alimentação se igualam, devido à redução de corrente, para em seguida, ainda sob ação do arco, a taxa de fusão se tornar um pouco menor do que a de alimentação, fazendo a ponta do arame aproximar-se gradualmente da poça [2].

Oscilações mútuas da gota (que está em crescimento permanente, acumulando o metal fundido) e da superfície da poça, provocam alterações do comprimento de arco ao redor de um valor médio de 1 a 2 mm, até um novo curto-círcuito acontecer. À medida que o tamanho da gota aumenta, a probabilidade de um curto-círcito acontecer também aumenta [2].

A transferência por curto-círcito é de natureza aleatória, e se reflete na variabilidade da duração do curto-círcito e do tempo de arco aberto (ou do

tempo entre curtos-circuitos), e nas formas irregulares das curvas de tensão e de corrente de soldagem (Figura 2.8). O grau de aleatoriedade vai depender da regulagem mais ou menos apurada da tensão e indutância, para uma dada velocidade de alimentação e combinação gás de proteção/arame-eletrodo. Nas condições mais adversas, observam-se muitos curtos-circuitos do tipo incidentais ou prematuros (aqueles de curtíssima duração que podem acontecer antes de um curto-circuito normal). A natureza do curto-circuito incidental é relacionada, com as forças normalmente atuantes (tensão superficial, eletromagnética, gravitacional, etc.), e com o movimento caótico da superfície da poça de fusão e da gota formada na ponta de eletrodo. Caso o balanço destas forças não seja favorável, a gota será repelida no momento em que encosta na poça e o curto-circuito não será acompanhado de transferência metálica propriamente dita. Esse tipo de curto-circuito pode gerar respingos [2].

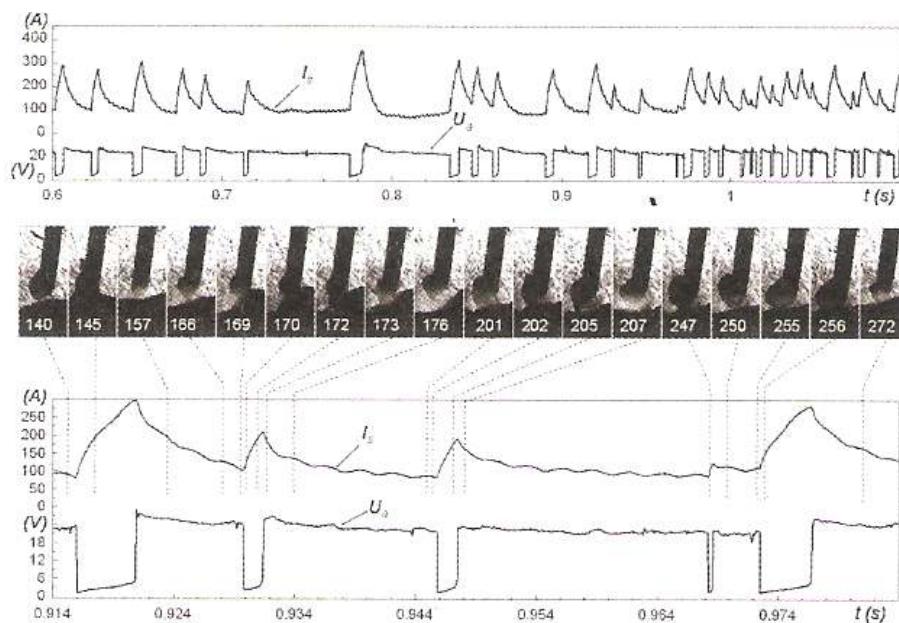


Figura 2.8 – Oscilogramas de tensão e de corrente do processo de soldagem MIG/MAG usando uma fonte eletromagnética, evidenciando o comportamento aleatório da transferência.

O oscilograma de baixo representa uma ampliação do de cima (proteção com CO₂ puro, arame de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro de 1,2 mm de diâmetro, U_a de 22V; I_s de 140 A e V_{alim} de 4 m/min) [2]

Devido aos valores baixos de corrente e de tensão durante a fase de arco aberto, assim como o fato de que, durante parte do processo, o arco tende a se apagar, o calor transferido para a peça é reduzido. Esta característica torna a soldagem por curtos-circuitos muito adequada para chapas finas e soldagem fora da posição plana (inclusive sobre cabeças). A poça de fusão com pequenas

dimensões e o arco curto o bastante para limitar o crescimento excessivo das gotas acarretam uma alta controlabilidade deste processo. Em contrapartida, no caso da soldagem de chapas grossas, pode ocorrer falta de fusão. Também existe uma grande dificuldade em soldas de alumínio com este modo de transferência, pois a alta condutibilidade térmica deste material faz com que a poça resfrie e solidifique rapidamente, dificultando a fusão do metal de base e aprisionando gases (originando porosidades) [2].

2.3.1.2 TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR VÔO LIVRE

TRANSFERÊNCIA METÁLICA GLOBULAR

A transferência globular ocorre com valores intermediários de tensão e corrente de soldagem e resulta em arco mais estável que no caso de curto-circuito, contudo, a transferência é mais caótica e imprevisível. O diâmetro médio das gotas transferidas varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento desta, mas, em geral, é maior que o diâmetro do eletrodo. A transferência globular é caracterizada por um nível de respingos relativamente elevado e, como gotas de metal fundido se transferem principalmente por ação da gravidade, sua utilização estaria limitada à posição plana, mas em função de seu caráter casuístico, é evitada. [1]

Este tipo de transferência ocorre quando se utilizam tensões de arco de moderadas a altas (ou seja, arcos longos para evitar curto-circuito), e correntes baixas (forças eletromagnéticas não significativas), caracterizando-se principalmente pela transferência irregular de gotas grandes (maiores que o diâmetro do eletrodo) em frequência muito baixa (1 a 10 gotas por segundo), conforme ilustrado na figura 2.9. O tamanho, a forma e a posição da gota, assim como a frequência da transferência, dependem, principalmente, do diâmetro e a composição do arame-eletrodo, do gás de proteção e da intensidade da corrente de soldagem. Durante a formação (crescimento) e o destacamento de gota, a resistência elétrica no trecho “gota-arco” vai progressivamente se alterando, o que dá um caráter dinâmico bem característico aos sinais de tensão e corrente, como também visto na figura 2.9 [2].

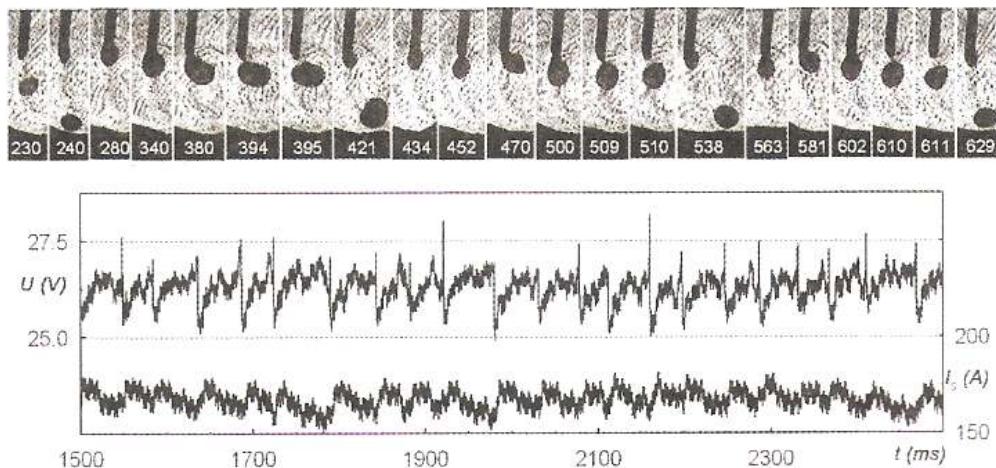


Figura 2.9 – Na vista superior, um exemplo da transferência metálica no modo globular, na vista inferior, oscilogramas deste tipo de transferência.

Durante a formação da gota (crescimento), esta permanece no eletrodo devido principalmente à ação combinada das forças de tensão superficial e de vaporização. À medida que o volume de gota se torna grande o suficiente, e seu peso e, em menor escala (em virtude da corrente não ser muito alta), a força eletromagnética e a força de arraste superam as forças contrárias à transferência e causam destacamento. Este comportamento justifica a baixa taxa de transferência, enquanto a baixa corrente impede de alcançar uma alta taxa de deposição do arame (baixa capacidade de produção) [2].

Pelo fato de a força gravitacional ser dominante neste tipo de transferência metálica, a soldagem é limitada à posição plana. Esta desvantagem, e o aspecto irregular do cordão de solda, fazem com que este modo de transferência seja pouco aplicado na soldagem MIG/MAG, com raras exceções, como a soldagem de alumínio em chapas finas, na qual há dificuldade de se utilizar o modo curto-circuito e não se tem disponibilidade de usar um modo controlado de transferência [2].

TRANSFERÊNCIA METÁLICA GLOBULAR REPULSIVA

Com as mesmas características da transferência globular quanto ao tamanho da gota e a frequência de transferência, o modo globular repulsivo ocorre principalmente em soldagem MIG/MAG em polaridade positiva, mas utilizando gases de proteção que favorecem o aumento das forças de reação (H_e e CO_2)

puro, por exemplo). Nestas situações, a gota passa a sofrer uma pressão elevada sobre uma pequena área na parte inferior, podendo ser empurrada para cima e desviada de sua trajetória normal, Figura 2.11 [2].

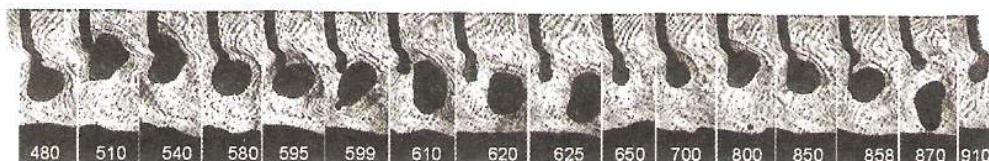


Figura 2.10 – Exemplo da transferência metálica globular repulsiva.

A força de reação contrapõe as forças favoráveis à transferência, de modo que a gota se destaca quando atingir um grande volume, ou seja, quando a força da gravidade superar a força de reação. As limitações da transferência metálica globular repulsiva são as mesmas que as da transferência metálica globular, porém mais pronunciadas [2].

TRANSFERÊNCIA METÁLICA GOTICULAR (PROJETADA)

A transferência goticular projetada, mais conhecida pelo inadequado termo inglês spray ou project spray, ou referenciada em português simplesmente goticular, é caracterizada pela transferência de pequenas gotas uniformes (com o diâmetro próximo ao diâmetro do eletrodo) de forma sequencial (e não pulverizada), em alta frequência (Figura 2.11). Por isso, os oscilogramas de corrente e tensão deste tipo de transferência não mostram variações significativas dos sinais. Ocorre normalmente na soldagem MIG/MAG com polaridade positiva, com altas correntes (forças eletromagnéticas altas), tensões elevadas (para garantir um arco suficientemente longo, lembrando que a característica estática de arcos MIG/MAG é ascendente, ou seja, para um mesmo comprimento de arco, a tensão tem de ser maior do que quando em correntes baixas) e atmosfera protetora à base de argônio [2].

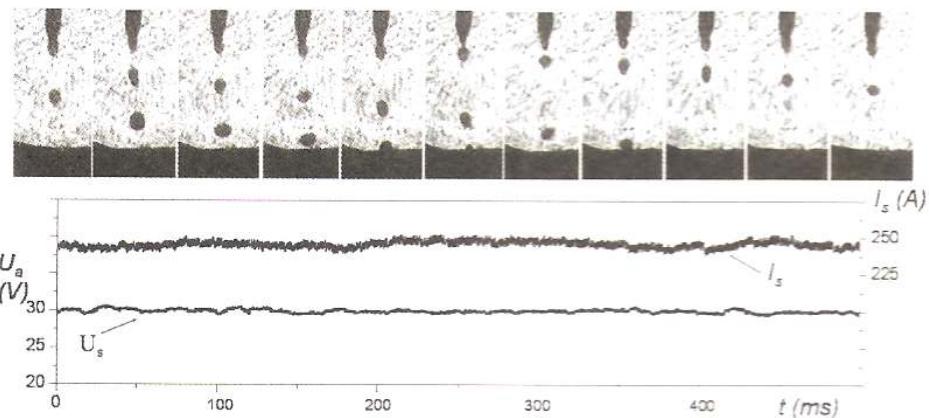


Figura 2.11 – Variações de tensão e corrente de soldagem em condições de transferência metálica goticular.

Uma condição indispensável para que este modo de transferência possa ocorrer é que a corrente de soldagem ultrapasse um valor crítico, denominado de corrente de transição (I_n). Quando a corrente de soldagem excede o nível da I_n , ocorre uma redução abrupta do tempo de formação da gota até o destacamento, acarretando também um aumento súbito da frequência de transferência das gotas [2].

As gotas não conseguem atingir grandes dimensões, destacando-se em grande frequência (maior do que 200 gotas por segundo). Na transferência goticular, o arco passa a envolver completamente a gota ou, pelo menos, mais que a sua metade, enquanto que, nos modos da transferência por curto-círcito e globular, o arco é confinado à parte inferior da gota [2].

A corrente de transição depende, principalmente, do material e diâmetro do eletrodo, do seu comprimento energizado e do tipo de gás de proteção. Quanto maior a resistividade elétrica, menor o ponto de fusão, menor o diâmetro, maior o comprimento energizado e menor a I_n . De uma forma geral, pequenas adições de O₂ em Ar reduzem I_n , fenômeno associado a uma menor tensão superficial originária da reação do O₂ com a superfície da gota [2].

O mesmo efeito deveria ser observado para o aumento do teor de CO₂, mas o comportamento é inverso. Assim, misturas de argônio com baixos teores de oxigênio (o limite prático para utilização de O₂ é de 5%) e CO₂ são os gases de proteção que proporcionam a transferência goticular mais facilmente. Quando se

trabalha acima da corrente I_n , as gotas, simplesmente, passam a ser arrastadas compulsoriamente da ponta do eletrodo e projetadas (daí a denominação “transferência gótica projetada”) com alta velocidade em direção a poça de fusão [2].

A trajetória de seu voo coincide com o eixo do eletrodo, qualquer que seja a inclinação do eletrodo. Desta maneira, a transferência gótica poderia ser empregada em qualquer posição. Entretanto, por demandar correntes altas, o que vai conduzir a altas energias impostas e à criação de uma grande poça de fusão, esse tipo de transferência dificulta a soldagem fora da posição plana ou de chapas finas [2].

A transferência gótica tem como aplicações principais a união e o enchimento de chanfros em chapas mais espessas, muito utilizada em caldeirarias pesadas e construção naval. As principais características da transferência gótica são a elevada estabilidade do arco, praticamente não gerar respingos, ter bom molhamento e boa penetração da solda, proporcionar cordões com bom aspecto superficial, favorecer a soldagem em alta velocidade e apresentar alta taxa de deposição. Devido a estas qualidades, a transferência gótica é a mais desejada [2].

A medida que a corrente de soldagem é aumentada, a transferência gótica transforma-se na transferência gótica com elongamento e na transferência gótica rotacional [2].

TRANSFERENCIA METÁLICA GOTICULAR COM ELONGAMENTO

Na transferência gótica projetada, a ponta do eletrodo torna-se afunilada durante a formação de gotas, mas o comprimento desse afunilamento é curto (menor ou igual ao diâmetro do eletrodo). Para correntes maiores do que a transferência gótica projetada o arco começa escalar a superfície do eletrodo, superaquecendo-a e tornando pastoso um comprimento de superfície cilíndrica acima da sua ponta. Assim, com a ajuda das forças eletromagnéticas, a ponta do eletrodo fica “elongada” [2].

O elongamento pode atingir comprimentos da ordem de algumas vezes o diâmetro do eletrodo. Dessa forma, as gotas são lançadas axialmente da extremidade do elongamento do eletrodo, muito próximas umas das outras, quase formando um jato contínuo. Do ponto de vista do oscilogramas, não se nota diferença no caso de solda com goticular projetada, mas o valor de tensão é mais alto, pois o filamento líquido pode ser tornar longo a ponto de tocar a poça de fusão, causando curtos-circuitos e perturbando a estabilidade do processo. Esse tipo de transferência mantém características operacionais da transferência goticular projetada e, sem aparelhagem especial, um soldador não consegue visualizar diferenças de comportamento entre este modo e o outro [2].

Gases com pouca capacidade de troca de calor, como o Ar ou misturas muito ricas em Ar, favorecem a esse tipo de transferência. Materiais de arame-eletrodos com baixa condutividade térmica são também mais prováveis de assumirem esse tipo transferência, mesmo sob correntes não tão altas [2].

TRANSFERÊNCIA METÁLICA GOTICULAR ROTACIONAL

Para correntes ainda maiores de que aquelas da transferência goticular com elongamento, uma nova transferência ocorre no modo da transferência metálica. A extremidade do eletrodo fica mais superaquecida, aumentando o comprimento da coluna de metal pastoso na ponta do eletrodo. Neste caso, o campo magnético, criado pela alta corrente da soldagem, é capaz de gerar um efeito torsional no elongamento do eletrodo, de maneira que sua base passa a realizar um movimento rotacional em forma de cone ou mesmo espiral [2].

A transferência não é mais axial. As gotas passam a ser transferidas na direção oblíqua (quase radial) do arco, provocando normalmente uma grande quantidade de respingo finos [2].

TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR EXPLOSÃO

O modo de transferência por explosão ocorre quando as reações químicas de componentes altamente reativos presentes no eletrodo formam bolhas no interior

das gotas em formação, que, superaquecidas e aglomeradas, provocam explosões, desconfigurando-as durante a transferência. A transferência por explosão usualmente acontece quando são usados arame-eletrodos de ligas de alumínio com magnésio. Este tipo de transferência metálica é, normalmente, acompanhado pela geração excessiva de respingos extremamente finos e de grande geração de fumos [2].

2.3.2 MODOS CONTROLADOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Os modos naturais de transferência metálica de forma geral apresentam limitações quando se requer otimização de características operacionais (por exemplo, soldar chapas finas ou fora da posição plana sem grande incidência de respingos). Isto só foi possível com advento dos equipamentos modernos, que passaram a permitir controlar a transferência metálica (modos controlados) [2].

Modos controlados são nada mais do que modos naturais obtidos de uma forma proposital e dominada, seja através da programação de alterações de parâmetros ou de autorregularem via a monitoração das variáveis [2].

Os exemplos mais comuns dos modos controlados de transferência são as transferências pulsada e por curto-círcuito controlado. A transferência pulsada é conseguida pela pulsação da corrente, de tal forma que, durante um período de pulso, a corrente ultrapassa o valor da corrente de transição para combinação de arame/gás de proteção, enquanto que, durante o período de tempo de base, a corrente apenas mantém o arco aberto sem transferências. Com a regulagem correta dos parâmetros do pulso, consegue-se uma transferência goticular regular (uma gota por pulso), com tamanhos de gotas aproximadamente iguais ao do diâmetro do eletrodo e com corrente média bem abaixo da corrente de transição (permitindo soldar chapas finas e fora da posição plana sem respingos). Já a transferência por curto-círcuito controlado é o modo por curto-círcuito em que a ocorrência perde o caráter aleatório, passando a regular (homogeneamente sequencial) em relação ao tempo e com destacamento mais suave. Para tal, um sistema de controle adaptativo faz comandar a variação da corrente a partir dos valores de tensão a cada etapa do curto-círcuito. Com o modo de curto-círcuito controlado se consegue uma operação praticamente sem respingos e um maior controle de poça fundida pela regularidade térmica [2].

2.3.3 MODOS COMBINADOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Além dos modos clássicos de transferências naturais, existem algumas outras formas de transferência. Instabilidade de transferência ou transição entre dois modos naturais são classificados em “*modos combinados*” e se caracterizam por serem de transferências metálicas em que dois ou até três dos modos naturais tomam lugar durante a soldagem, de forma intercalada, sequencial e repetitiva e sem intenção do operador/soldador ou controle do equipamento. Os campos de ocorrência dessas transferências se situam entre os campos dos modos tradicionais, mas mesmo assim não devem ser confundidos com transição de modos [2].

O modo combinado de transferência, por sua vez, acontece quando condições concorrentes se alinham, ou seja, quando há combinações de corrente, comprimento de arco, material e diâmetro do arame-eletrodo e material de base, gás de proteção, distância bico de contato-peça e comportamento dinâmico da fonte de energia (indutância) favorável. Ou seja, numa região de intercessão dos modos naturais podem nunca ocorrer os modos combinados se não houverem as condições propícias [2].

Acreditava-se haver duas razões para estas variações transitórias e cíclicas da corrente acontecerem (sozinha ou acumulativamente). A primeira está relacionada com a ocorrência de curto-circuito [2].

Dependendo principalmente da indutância da fonte (resposta dinâmica da corrente) e o par eletrodo/gás de proteção (valor da corrente de transição e do tempo de duração do curto para que a corrente cresça), a alta corrente, que se mantém temporariamente após o final do curto-círcito pode fazer com que a transferência passe a ocorrer pelo modo goticular projetada ou até goticular com elongamento. Nesse momento a taxa de fusão está bem maior do que a velocidade de alimentação e comprimento do arco passa a aumentar progressivamente [2].

Como maiores arcos fazem a corrente decrescer em fontes no modo de tensão constante, a taxa de fusão vai aos poucos decrescendo até atingir o equilíbrio e, em seguida, a ponta do arame com a gota volta a se aproximar da poça. Com menores correntes e menores arcos se criam as condições para a transferência por curto-circuito e o ciclo se reinicia. Essa razão é a predominante para justificar a ocorrência do modo “Curto-circuito-Goticular” (Figura 2.12). A segunda razão é que a resistividade da gota torna-se maior do que a coluna do arco em soldagens com arames de aço-carbono quando o teor de CO₂ na mistura do gás de proteção é abaixo de 10% a 12% [2].

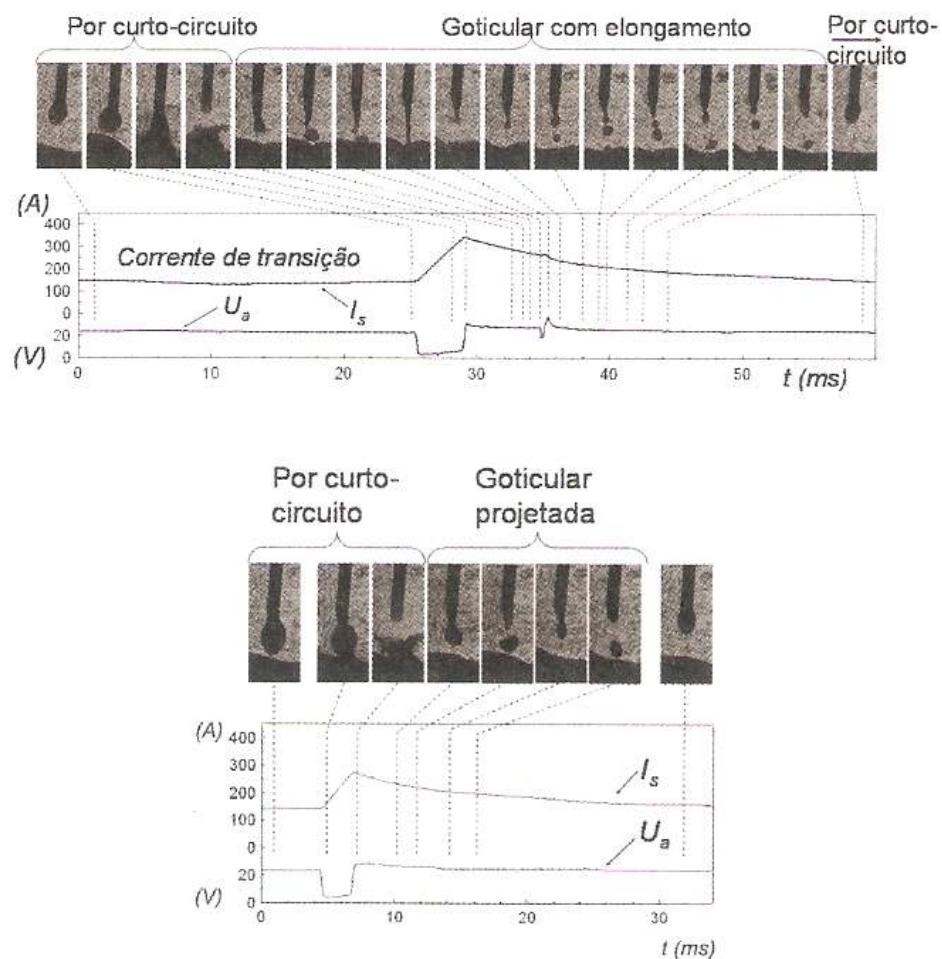


Figura 2.12 – Exemplos de transferência combinada do tipo “curto-circuito-goticular”, acima com “elongamento” e abaixo “projetada”.

Assim durante uma transferência globular, à medida que a gota vai crescendo sequencialmente, o arco vai se reduzindo, a tensão da demanda cresce ao invés de se reduzir. Como a maior tensão demandada pela solda faz diminuir a corrente em fontes do tipo tensão constante (em gradiente imposto pela

indutância), a taxa de fusão do arame torna-se menor do que a velocidade de alimentação do arame-eletrodo. Então, a ponta do arame (com uma gota globular) se aproxima da poça sem tocá-la, mas às vezes gerando curtos-circuitos incipientes com a correntes de curto-círcito tão insignificantes em tempo e/ou amplitude que não afetam o fenômeno. Os modos combinados, são dificilmente identificados pelos soldadores/operadores, mas por provocarem perturbações do processo (respingos, má formação do cordão e outras) devam ser evitados [2].

2.4 CONTROLE DOS PARÂMETROS

O número de parâmetros a regular no processo MIG/MAG é muito grande e todos eles, em maior ou menor grau, governam a saída do processo, ou seja, a geometria do cordão e a produção. Considera-se como parâmetro de soldagem toda variável que possa alterar as características do cordão de solda, desde a composição e vazão do gás de proteção, passando pelo diâmetro do arame-eletrodo, velocidade de soldagem, ângulo da tocha, velocidade de alimentação do arame, corrente, comprimento do arco, etc. [2].

Existe uma correlação e dependência muito grande entre todos, isto é, dificilmente se consegue regular só um parâmetro sem alterar outro, ou regular só um parâmetro sem alterar ao mesmo tempo as duas saídas do processo. Em algumas ocasiões, não se consegue regular diretamente o parâmetro que se deseja. Alguns podem ser alterados pela regulagem de outros parâmetros, como no caso da corrente em equipamentos com fontes do tipo tensão constante, que é obtida pela regulagem da velocidade de alimentação. Também existem os parâmetros auto-reguláveis [2].

Entretanto, muitos parâmetros, incluindo a própria distância da tocha até a peça, são regulados de forma independente, visando conseguir um cordão de solda com características desejadas, sejam elas ligadas à geometria, à existência de descontinuidades ou à composição química e microestrutural [2].

Para se trabalhar de forma diferenciada em soldagem, além de saber o efeito individual de um parâmetro sobre a característica de um cordão de solda, deve-se saber como regulá-los em um equipamento e como predizer a interferência da

regulagem de um parâmetro sobre outros [2].

Fixando-se no processo convencional, os principais tipos de regulagens possíveis ao operador são a tensão e a velocidade de alimentação do arame-eletrodo. A regulagem da velocidade de alimentação torna-se igual ao consumo do arame-eletrodo [2].

2.4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG

A análise estatística aplicada em um processo de soldagem tem como objetivo [2]:

- Estimar a influência de diversos parâmetros sobre o comportamento do processo, de forma a se procurar a otimização do mesmo [2];
- Controlar e otimizar formulações e robustez de fabricação de eletrodos ou equipamentos [2];
- Avaliar temporalmente o desempenho dos equipamentos e peças consumíveis, com o intuito de controle de qualidade [2];
- Estudar o comportamento operacional do processo, visando entender melhor os fenômenos ou determinar critérios relacionados com a estabilidade do processo e qualidade da solda [2];
- Fornecer dados processados necessários para sistemas de monitoramento e controle do processo [2];

Os parâmetros ou variáveis que são usados para preparar o processo e regular os equipamentos, como tipo de gás de proteção, diâmetro do arame, tensão de regulagem, etc., são chamados de fatores de entrada. Os resultados, durante ou após a operação, tais como valor médio ou instantâneo da corrente de soldagem ou do nível de ruído acústico, geometria do cordão, propriedades mecânicas da solda, tensões residuais, etc., são chamados de respostas [2].

2.4.1.1 CONCEITO E APLICAÇÃO

Estatística é a ciência de coletar, analisar e interpretar dados. É particularmente

adequada em situações em que existe a incerteza experimental, ou seja, nas quais os valores dos dados que serão analisados possuem características aleatórias e podem variar dentro de uma larga faixa. As respostas do processo de soldagem, como a tensão do arco e a corrente de soldagem, são exemplos de dados cujos valores instantâneos variam constantemente com o tempo [2].

2.4.2 IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DE CORRENTE E TENSÃO DO ARCO

Para proporcionar uma solda com a qualidade desejada é importante realizar um ajuste de cada parâmetro do processo (tensão e corrente de soldagem, velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, vazão de gás de proteção, etc.). Todos esses parâmetros devem ser mantidos durante a soldagem dentro dos limites de tolerância exigidos. Desvios de qualquer um deles, além dos limites desejados, poderão resultar em defeitos na solda. Contudo, a importância de cada um para o processo de soldagem MIG/MAG não é igual [2].

As curvas de tensão e corrente de soldagem registram a maior parte das peculiaridades do processo de soldagem. A análise destas curvas pode fornecer informações sobre as características e as propriedades da fonte de energia, do cabeçote de alimentação, dos consumíveis de soldagem, e até da qualidade de solda esperada. Por esse motivo, e pelo fato de estas variáveis serem de fácil medição, a tensão e corrente de soldagem são tão atrativas para análise estatística [2].

Para que se tenha estas informações, as curvas deverão ser “decifradas” por meio da determinação de índices específicos. Frequentemente esses índices são baseados nas estatísticas dos sinais elétricos. Outra possibilidade importante de se analisar os oscilogramas de corrente e tensão é para identificar a estabilidade da soldagem MIG com transferência por curto-círcuito [2].

A Figura 2.13 ilustra curvas de tensão e corrente e respectivos índices correlacionados com o modo de transferência por curto-círcuito. Os dois índices básicos são o tempo de arco aberto (duração do crescimento da gota metálica fundida na ponta do eletrodo) e o tempo de curto-círcuito (duração da transferência da gota fundida para a poça de fusão). Muitos índices auxiliares de transferência metálica são derivados do tempo de arco aberto e de curto-círcuito,

como o período de curto-circuito e a frequência de curto-círcito [2].

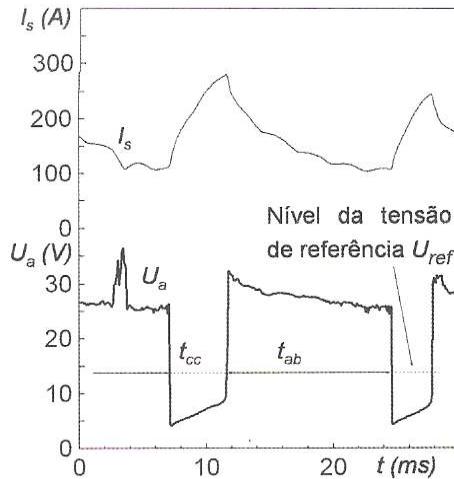


Figura 2.13 – Parâmetro de tempo de transferência por curto-círcito determinados na base do uso da tensão de referência [2].

2.4.3 LUMINOSIDADE E EMISSÃO SONORA COMO FONTES ADICIONAIS DE INFORMAÇÃO

O fluxo luminoso emitido pelo arco de soldagem pode ser alterado de diversas maneiras durante a soldagem, dentre as quais pode-se citar a alteração da corrente de soldagem, do comprimento do arco e do gradiente de tensão. Quanto maior a corrente e o comprimento do arco, maior será o fluxo luminoso gerado por estes [2].

A transferência metálica produz alterações no comprimento do arco, e esta mudança reflete no fluxo luminoso gerado pelo arco. Fotodiodos de silício são os sensores de luz mais utilizados, em função da sua versatilidade e do seu alto rendimento [2].

A figura 2.14 mostra como acontecem alterações do comprimento do arco durante o ciclo de destacamento de uma gota em um processo de soldagem. Na fase I a corrente é baixa e consequentemente a luminosidade também. Na fase II, a corrente é aumentada fazendo crescer coerentemente a luminosidade. A medida que a gota cresce, a luminosidade vai caindo, como esquematizam as ilustrações (a) e (b), atingindo seu mínimo num momento pouco antes do destacamento (fase III). Neste instante, devido ao empescoçamento da gota

decorrente do efeito Pinch, o arco sobe subitamente para a ponta do eletrodo (c), fazendo com que a luminosidade volte a crescer (fase IV).

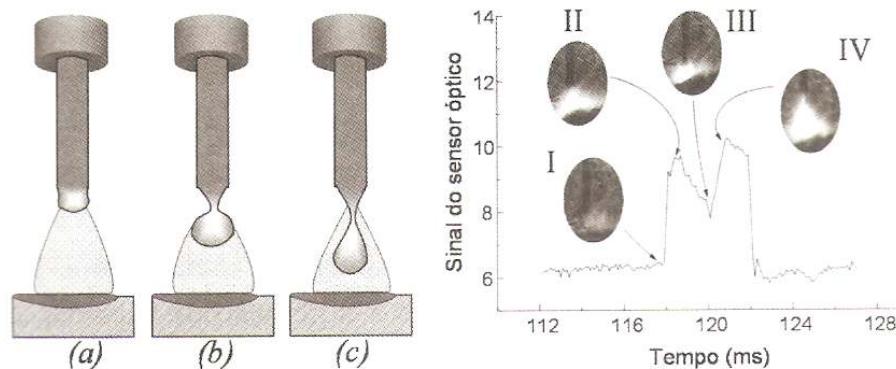


Figura 2.14 – Ilustração da alteração do comprimento e, respectivamente, da luminosidade do arco, durante a formação e destacamento da gota no processo de soldagem.

Outro fenômeno decorrente da transferência metálica que pode provocar mudanças na luminosidade do arco é a geração de vapores metálicos no arco elétrico, pois estes podem modificar as dimensões do raio do plasma. Quanto maior for a quantidade de vapores metálicos maior será o raio do plasma na região anódica e consequentemente maior a luminosidade do arco [2].

Outra fonte adicional de informação que pode auxiliar no controle dos parâmetros de soldagem é o monitoramento da emissão sonora do arco. Sabe-se que a principal fonte de ruído em soldagem é a coluna do arco. Como a temperatura e, consequentemente, a densidade de gás na coluna do arco diferem em algumas ordens de grandeza das do ar ambiente, a variação pulsativa das dimensões de um arco gera ondas sonoras. Razões para a coluna do arco pulsar são alterações da corrente, mudanças no comprimento do arco durante a transferência das gotas do metal fundido, assim como apagamentos e reaberturas em soldagem com curto-círcuito [2].

2.4.4 ALICAÇÃO DE FILMAGEM PARA ANÁLISE DO PROCESSO

Em uma análise completa de soldagem, são realizados estudos de imagens da região de arco. O método utilizado para conseguir tais imagens é a formação de uma sombra projetada de vários elementos da região de soldagem (toga, eletrodo, gotas, cordão, e chapa) em um filme fotográfico ou diretamente sobre a

lente de uma filmadora, técnica conhecida como *back-lighting* (figura 2.15) [2].

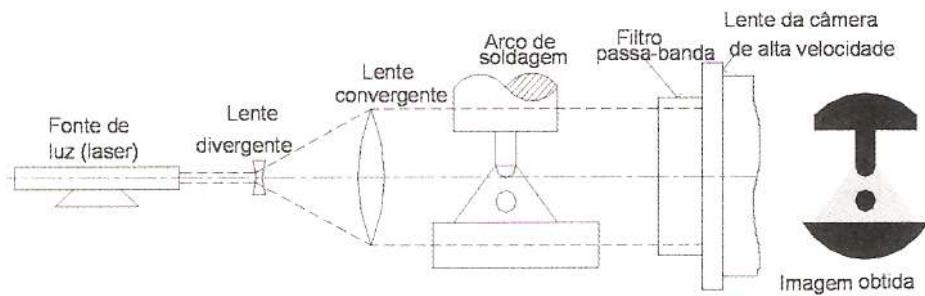


Figura 2.15 – Princípio do *Back-lighting* aplicado à soldagem [2].

Análises de imagens da região de arco sincronizadas com oscilogramas de tensão de arco e corrente de soldagem podem fornecer muitos dados sobre o comportamento do processo de soldagem.

2.4.5 ASPECTOS DA ESTABILIDADE DO PROCESSO MIG

Sabe-se que, estabilidade do arco é a capacidade do arco manter ou restabelecer rapidamente suas características de fonte de calor (condução elétrica, temperatura, perfil, etc.) sob a ação de distúrbios transitórios que possam ocorrer durante uma soldagem, tais como mudanças de comprimento do arco provocadas pela transferência metálica e pela oscilação da superfície da poça de fusão, ou alterações energéticas como durante curtos-circuitos [2].

A capacidade do arco em manter a estabilidade é governada pelas propriedades físico-químicas dos constituintes do mesmo e do meio ambiente. É também fortemente influenciada pelas características estáticas e dinâmicas da fonte de soldagem e pelas características do alimentador do arame. As condições operacionais de soldagem também exercem influência na estabilidade do arco, como o valor regulado da corrente e do comprimento do arco, além da habilidade do operador e do equipamento de manipulação da tocha [2].

2.4.6 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO

Normalmente, os curtos-circuitos têm uma natureza randômica, facilmente identificada pelas formas irregulares das curvas de tensão e de corrente de

soldagem e refletida pelas instabilidades tanto do período de curto-circuito em si como dos tempos de curto-circuito e de arco aberto ou entre curtos-circuitos. Estas características aumentam a incidência de respingos, uma das limitações maiores do uso da transferência por curto-circuito [2].

Para avaliação da estabilidade de um processo de soldagem por curto-circuito, deve-se utilizar primeiramente histogramas de tempo de curto-circuito, tempo de arco aberto e período de curto-circuito. Os histogramas de tempo de curto-circuito (figura 2.16) são usualmente bimodais, indicando a presença de dois tipos de curtos-circuitos, os incidentais (na parte esquerda do histograma) e os de mais longa duração (na parte direita do histograma) também chamados de curtos-circuitos normais [2].

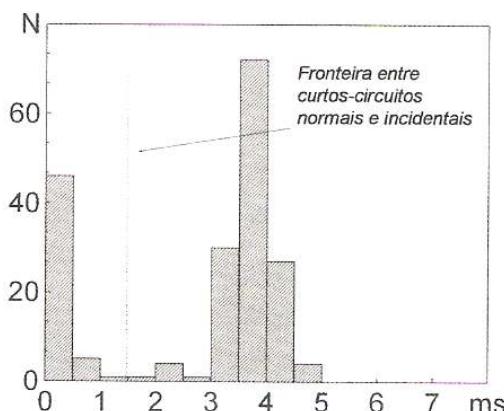


Figura 2.16 – Histograma típico de tempo de curto-circuito nas condições de soldagem MIG/MAG.

Em algumas situações, quando se mede a transferência metálica de pequenas gotículas, os histogramas desse parâmetro podem ser obtidos sem uma separação nítida entre os dois tipos de curtos-circuitos. Nestes casos, não é possível realizar o exame separado da área direita e esquerda do histograma. Contudo, qualquer que seja a forma dos histogramas de tempo de curto-circuito, os incidentais não deverão ser sempre ignorados, pela razão de eles existirem de fato e influenciarem a quantidade de respingos gerada e o comportamento da poça de fusão [2].

É importante frisar a correlação entre os valores de tempo de curto-circuito e o tamanho das gotas destacadas durante esse período, pois a gota metálica

formada na ponta do eletrodo nunca se transfere completamente para a poça de fusão durante o curto-circuito, tornando imprecisa a análise do diâmetro, da massa e da área superficial da gota, apenas com o valor do tempo de curto-circuito [2].

Os valores do tempo de curto-circuito dependem muito do comprimento do arco. Quanto maior for este comprimento mais rapidamente a ponte metálica poderá ser rompida e menor será o valor deste índice. Uma avaliação mais completa da transferência metálica implica no cálculo das estatísticas dos parâmetros de tempo de curto-circuito e de arco aberto, do período e da frequência de curto-circuito, e da fração do tempo de curto-circuito num ciclo total de transferência, além da análise visual (filmagem) da transferência metálica [2].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram realizadas soldagens em chapas de aço inoxidável 410D, devido as suas características (excelente resistência a ambientes corrosivos e abrasivos, alta resistência mecânica, durabilidade e boa soldabilidade, alinhadas a um dos menores custos na cadeia de aços especiais).

3.1 MATERIAIS

3.1.1 AÇO UTILIZADO PARA CONFECÇÃO DO CORPO DE PROVA

Como o objetivo deste trabalho é mapear as regiões ótimas, fornecendo assim os melhores ajustes de parâmetros para se obter soldas de maior qualidade, foi escolhido o aço inoxidável da classe 410D, muito utilizado na indústria, resistente a corrosão, e com um custo reduzido comparado a outros aços especiais. Os corpos de prova possuem uma espessura de 4,0 mm.

Tabela 3.0 - Composição química (% em peso) do aço inoxidável 410D. Fonte: Empresa Aperam South America.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
0,03 máx.	1,50 máx.	1,00 máx.	0,04 máx.	0,015 máx.	10,5- 12,5	0,3- 1,0	0,03 máx.

Tabela 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas do aço inoxidável 410D. Fonte: Empresa Aperam South America.

Massa Específica (g/cm³)	Coeficiente de Expansão Térmica Média de 0 °C a 100 °C 538 °C (µm/m/°C) (µm/m/°C)		Conduvidade Térmica a 100 °C (W/m.K)	Resistência Elétrica (n ohm.m)	Calor Específico (J/kg.K)	Módulo de Elasticidade (GPa)
7,7	10,8	12	30,5	570	480	200
Limite de Resistência (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)		Alongamento 50mm (%)	Dureza (HRB)		
450-650	340		30	80		

3.1.2 ELETRODOS / FLUXOS UTILIZADOS

Os consumíveis utilizados foram: arame eletrodo maciço austenítico, com classificação 309LSiA, bitola de 1,2 mm e o gás de proteção comercial contendo 98%Ar e 2%O₂.

Tabela 3.2 – Composição química do arame eletrodo utilizado – Dados fornecidos pelo fabricante.

Elemento	AWS ER 309LSi
C	0,017
Cr	23,17
Cu	0,12
Mn	1,56
Mo	0,14
N	0,113
Ni	13,64
P	0,020
Ti	*
V	*
S	0,012
Si	0,91

* Elementos não informados



Figura 3.0 – Gás de proteção utilizado – Mistura de 98% Ar e 2% O₂.

3.1.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA SOLDAGEM E PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

Todas as soldagens foram realizadas de forma automática através de um posicionador linear unilateral e de um acionamento remoto, tanto do sistema de posicionamento quanto da fonte e do sistema de aquisição de dados. Os equipamentos utilizados foram uma fonte INVERSAL 450 – LABSOLDA/UFSC, um Tartílope, uma maleta de aquisição de dados, e um notebook para armazenar e tratar os dados adquiridos.



Figura 3.1 – Fonte Inversal 450.



Figura 3.2 – Tártílope - IMC Soldagem.



Figura 3.3 - Maleta de aquisição de dados - IMC Soldagem.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 SOLDAGEM COM O PROCESSO GMAW (MIG/MAG)

Para realizar o mapeamento proposto, foram realizadas uma sequência de soldagens, usando a literatura de referência para estabelecer os pontos de partida e a escolha dos parâmetros utilizados.

Foram utilizados 5 valores diferentes de tensões: 18V, 21V, 24V, 27V e 30V e 6 valores de velocidades de alimentação: 2 m/min, 4 m/min, 6 m/min, 8 m/min, 10 m/min, 12 m/min, resultando assim em 30 testes diferentes (Tabela 3.3). Uma tabela foi confeccionada relacionando os valores de tensão e velocidade de tensão e numerando os testes. Para evitar erros sequenciais, uma ordem aleatória foi definida para fazer os testes, variando as tensões e velocidades.

Tabela 3.3 – Relações das velocidades de alimentação e soldagem por tensão, dos 30 testes.

Tensão	18	21	24	27	30	Velocidade de soldagem (cm/min)
Velocidade de alimentação (m/min)						
2	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	6
4	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10	12
6	Teste 11	Teste 12	Teste 13	Teste 14	Teste 15	17
8	Teste 16	Teste 17	Teste 18	Teste 19	Teste 20	23
10	Teste 21	Teste 22	Teste 23	Teste 24	Teste 25	29
12	Teste 26	Teste 27	Teste 28	Teste 29	Teste 30	35

Como citado anteriormente, os corpos de prova utilizados foram fabricados de aço inoxidável da classe 410D e tinham 4,0 mm de espessura. 12 chapas foram separadas e preparadas para os testes e essas foram, uma a uma, posicionadas e presas na cabine de soldagem para realizar o procedimento. Com a peça no local correto, ajustou-se o bico de contato do eletrodo a uma distância de 18 mm do corpo de prova.

Também já citado anteriormente, o gás de proteção utilizado foi uma mistura de Argônio (98%) e Oxigênio (2%), e o fluxo do mesmo foi de 12 l/min.

Para determinação dos valores de velocidade de soldagem, utilizou-se a relação

k igual a 0,35. Essa relação é o valor da relação entre a velocidade de alimentação e velocidade de soldagem.

Depois de calcular quais seriam os valores de soldagem, os valores de alimentação foram calibrados. O alimentador estava descalibrado, então com a ajuda do SAP foi possível definir a relação para o ajuste dos valores.

3.2.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados – SAP 4.0 – coletou e armazenou os dados de corrente, tensão, vazão do gás de proteção durante todo o processo de soldagem. Além de arquivar essas informações, o programa forneceu por exemplo, as correntes e tensões médias e eficazes, gráficos, histogramas, quantidades de curtos-circuitos e tamanho estimado da gota de solda, facilitando a análise posterior.



Figura 3.4 – Ilustração do programa SAP 4.0 mostrando os gráficos de tensão, corrente e velocidade de alimentação, referentes a solda de número 6, com tensão de 18V e velocidade de alimentação de 4 m/min.

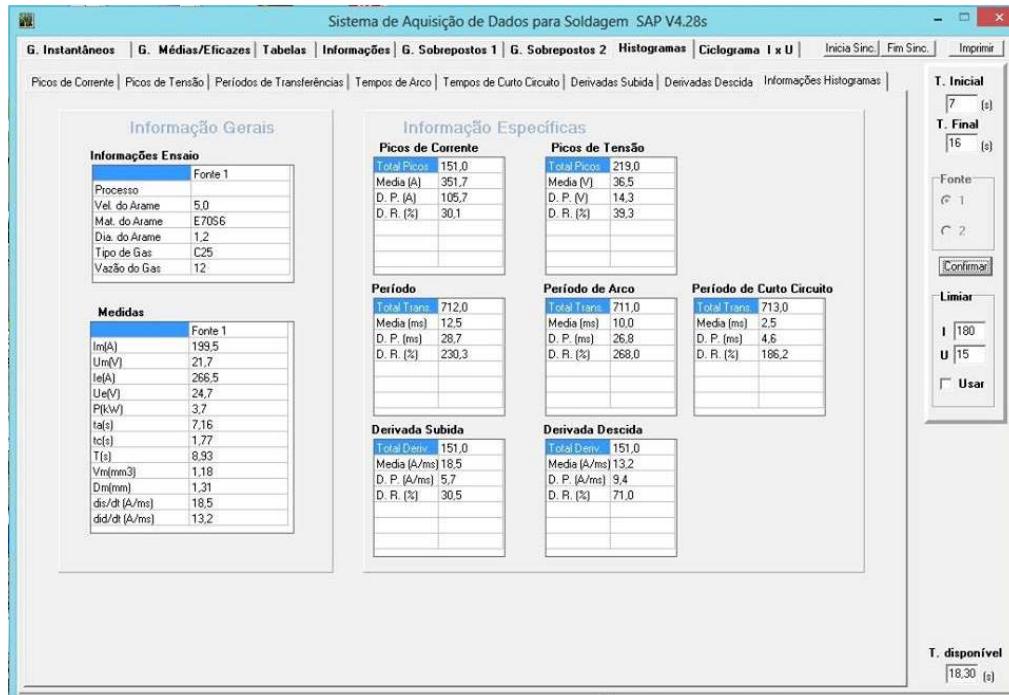


Figura 3.5 – Ilustração do SAP 4.0 mostrando as informações do histograma referentes a solda de número 6, com tensão de 18V e velocidade de alimentação de 4 m/min.

3.2.3 TRATAMENTO DOS DADOS E ELABORAÇÃO DO MAPA DE TRANSFERÊNCIA

Ao final da realização de todos os testes, os dados do programa foram salvos para posterior tratamento. Primeiramente, definiu-se a faixa de estabilidade de cada soldagem, para determinar qual a faixa de tempo seria usada, pois será usada a mesma quantidade de tempo para análise de todos os testes.

Assim, determinou-se um intervalo de 9 segundos dentro da faixa de estabilidade. Em seguida, os gráficos de tensão e corrente para cada teste foram plotados. Numa análise conjunta das informações destes gráficos e dos dados, histogramas e gráficos do SAP, iniciou-se a identificação do modo de transferência metálica de cada ponto.

Posteriormente, um gráfico de dispersão foi confeccionado (Tensão equivalente x Corrente Equivalente) e cada teste foi analisado. Na medida que os tipos de transferência em cada ponto eram definidos, os mesmos eram diferenciados no gráfico de dispersão. Ao final das análises de todos os pontos, determinou-se onde se concentravam cada tipo de transferência metálica. Em alguns pontos, não foi

possível definir claramente o tipo de transferência. Posteriormente, com uma análise mais detalhada, percebeu-se que esses pontos se localizam nas áreas de transição, tendo comportamento combinado de transferência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para iniciar a análise, adquiriu-se informações do histograma fornecidos pelo SAP. Para facilitar a visualização e comparação destes dados, uma tabela foi elaborada com os seguintes dados: tempo inicial e final (intervalo estável de cada teste), tensão, velocidade de alimentação, velocidade de soldagem, tensão equivalente, corrente equivalente, diâmetro e volume hipotéticos da gota, número de curtos-circuitos e desvio padrão relativo.

Tabela 4.0 – Relações das velocidades de alimentação e soldagem por tensão, dos 30

	INTERVALO DE TEMPO USADO (s)	TENSÃO	CORRENTE EQUIVALENTE (A)	TENSÃO EQUIVALENTE (V)	VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO (m/min)	VELOCIDADE DE SOLDAGEM (cm/min)	DIÂMETRO DA GOTA (mm)	CURTOS-CIRCUITOS	VOLUME (mm³)	DESVIO PADRÃO RELATIVO
T1	16 - 25	18	93,6	18,5	2	6	2,64	88	9,69	27,5
T2	17 - 26	21	89,6	21,3	2	6	4,21	22	39,22	17,4
T3	15 - 24	24	91,9	24,5	2	6	4,15	22	37,36	33,1
T4	11 - 20	27	97,9	29,4	2	6	4,15	0	0	negativo
T5	12 - 21	30	106,8	30,1	2	6	4,15	0	0	negativo
T6	11 - 20	18	157,5	18,7	4	12	1,35	657	1,29	40,8
T7	6 - 15	21	161,3	23,5	4	12	1,84	258	3,26	74
T8	9 - 18	24	164	24,5	4	12	1,87	294	289	90
T9	8 - 17	27	166,2	27	4	12	5,92	7	108,88	102,4
T10	18 - 27	30	197,2	32,7	4	12	5,92	0	0	negativo
T11	8 - 17	18	197,4	18,6	6	17	1,26	811	1,04	51,7
T12	10 - 19	21	202,9	23,7	6	17	1,26	812	1,04	90,6
T13	9 - 18	24	198,2	24,3	6	17	1,23	861	0,99	89,6
T14	9 - 18	27	211	27,1	6	17	3,31	27	19,4	122,9
T15	8 - 17	30	231,4	30,3	6	17	3,31	0	0	negativo
T16	3 - 12	18	237,8	20,2	8	23	1,31	713	1,18	186,2
T17	8 - 17	21	241,1	22	8	23	1,13	1137	0,75	65,4
T18	5 - 14	24	228,9	26,7	8	23	1,23	875	0,97	96,2
T19	5 - 14	27	243,1	29,3	8	23	1,91	232	3,66	173,7
T20	8 - 17	30	235,9	30,9	8	23	3,31	3	18,93	145,5
T21	7 - 16	18	266,5	24,7	10	29	1,31	713	1,18	186,2
T22	9 - 18	21	253,3	24,1	10	29	1,1	1225	0,69	65,9
T23	7 - 16	24	268,3	25,4	10	29	1,1	1211	0,7	66,9
T24	5 - 14	27	268,2	29,5	10	29	1,24	840	1,01	127,8
T25	6 - 15	30	300,2	32,9	10	29	1,24	0	0	negativo
T26	6 - 15	18	286,4	25,1	12	35	1,2	928	0,91	216,1
T27	8 - 17	21	261,4	28	12	35	1,66	354	2,39	151,8
T28	27 - 36	24	285,9	25,5	12	35	1,04	1414	0,59	68,1
T29	6 - 15	27	286,1	29,3	12	35	1,27	776	1,07	573,3
T30	7 - 16	30	324	32,7	12	35	3,31	0	0	negativo

testes.

Através da análise geral dos gráficos e das informações dos histogramas de cada solda, iniciou-se a elaboração de um gráfico de dispersão, identificando os tipos de transferência. Assim, foi possível perceber algumas áreas definidas onde o modo de transferência era por curto-circuito, globular e goticular.

Porém, observou-se uma área onde não era possível identificar claramente o modo de transferência. Nos pontos 4, 5, 10, 15, 25 e 30, não houve ocorrência de curtos-circuitos, podendo, assim, ser globular ou goticular. Para definir cada ponto, utilizou-se os gráficos de tensão x corrente. De acordo com o comportamento dos gráficos (Anexo A), foi possível determinar que os pontos 4 e 5 são do tipo globular, devido a seus altos valores de tensão e relativamente baixos valores de corrente equivalente, e que os pontos 25 e 30 são do tipo goticular, pois o gráfico dos mesmos não mostraram variações significativas dos sinais. Os outros dois pontos ainda geraram dúvidas. Os testes 6, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 26, 28 e 29 foram classificados como por curto-circuito, visto não só a presença, como também o elevado número de curtos-circuitos. Nos pontos restantes ainda não era possível definir seu modo de transferência.

O ponto 27 foi o ponto que gerou mais dúvida, pois o gráfico apresentou um comportamento diferente dos outros, porém após análise minuciosa percebemos que ele se tratava também de um modo curto-circuito. A diferença foi o tempo de curto-circuito, que foi o maior dentre todos, e isso ocorreu devido à combinação da alta taxa de alimentação com um valor baixo de tensão. A figura 4.0 mostra o gráfico tensão x velocidade de alimentação, ilustrando as regiões de cada modo de transferência e a área desconhecida citada anteriormente.

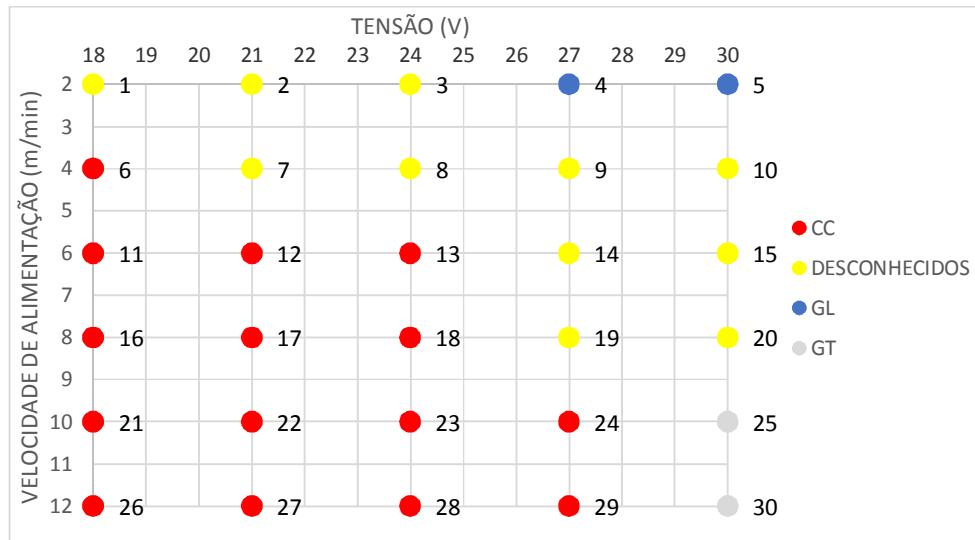


Figura 4.0 – Gráfico Tensão x Velocidade de alimentação, ilustrando a região desconhecida e as regiões de cada modo de transferência.

Para os testes onde não foi possível identificar claramente o modo de transferência, foi feito um estudo junto ao professor orientador e a literatura correspondente definindo-se que, os mesmos se encontravam em áreas de transição, onde os pontos poderiam apresentar comportamento combinado de dois ou mais modos de transferência, apresentando comportamentos diferentes ao longo do tempo de solda.

Os pontos 1, 2, 3, 7, 8, 9, 14 e 19 apresentaram comportamentos curto-circuito e globular, e os pontos 10, 15 e 20 apresentaram comportamento do tipo goticular e globular, como se pode ver nos gráficos do Anexo A correspondentes a tais testes.

A figura 4.1 mostra o gráfico de tensão x velocidade de alimentação caracterizando cada teste e seu respectivo modo de transferência metálica, único ou combinado.

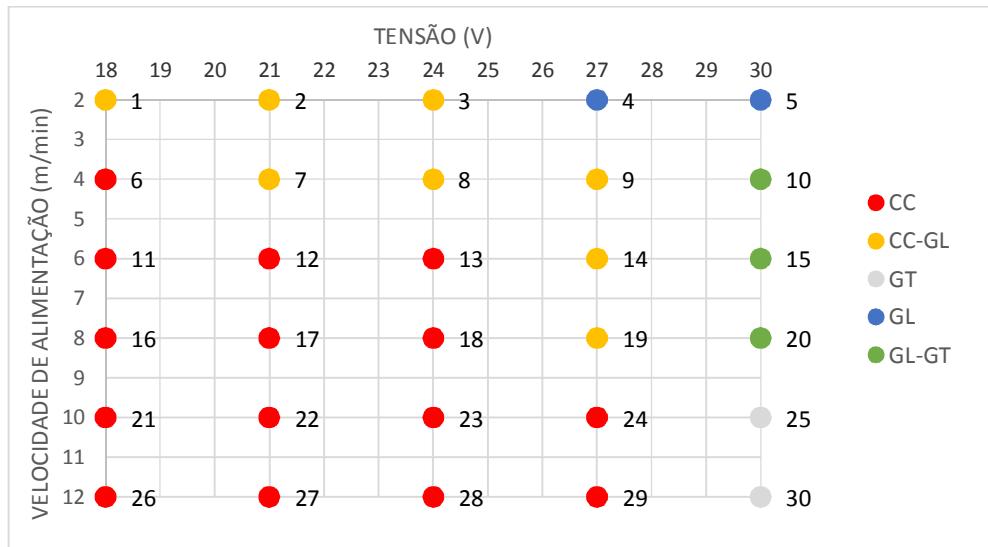


Figura 4.1 – Gráfico Tensão x Velocidade de alimentação.

Após essa análise detalhada, utilizou-se os valores de tensão e corrente equivalentes fornecidos pelo SAP para plotar o gráfico de dispersão (figura 4.2). Onde foi possível identificar claramente as regiões de cada modo de transferência e de transição.

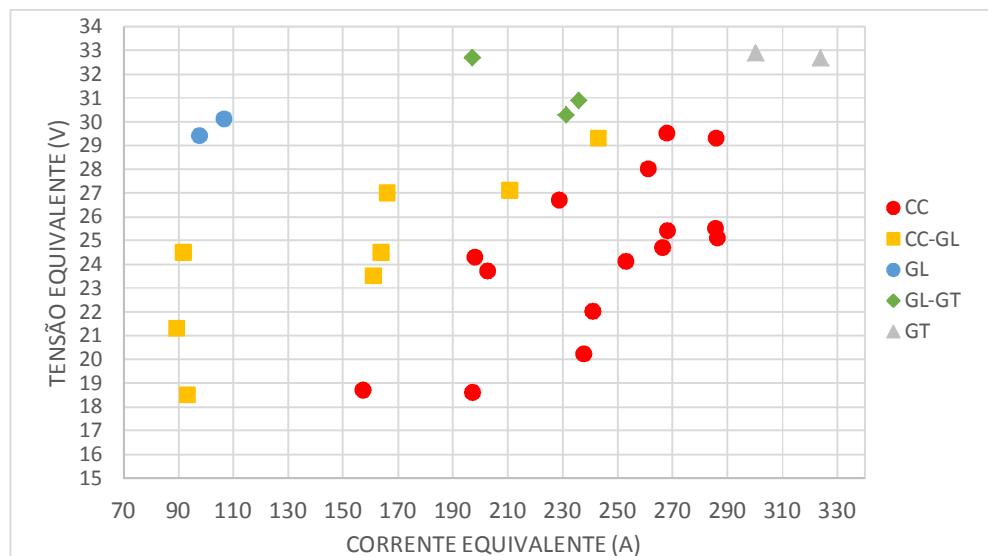


Figura 4.2 – Gráfico de dispersão, ilustrando as regiões específicas dos modos de transferência metálica.

Nas figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 pode-se observar o aspecto geral dos cordões de solda reunidos por modo de transferência (curto-circuito, curto-circuito/globular, globular, globular/goticular e goticular, respectivamente). No anexo C foram incluídas fotos detalhadas de cada solda.



Figura 4.3 – Soldas que apresentaram modo de transferência por Curto-Circuito.

Analisando apenas o aspecto visual, observamos que as soldas que foram do modo de transferência por curto-circuito (Figura 4.3), apresentaram diferentes aspectos. Quando a tensão e a velocidade de alimentação foram baixas ou moderadas, a taxa de fusão foi pequena, não apresentando bom rendimento. Quando a velocidade de alimentação foi alta e a tensão foi baixa, o cordão se apresentou bastante irregular e houve uma grande geração de respingos, uma vez que a tensão era muito baixa, não fornecendo energia suficiente para a fusão necessária para aquelas altas velocidades de alimentação.

Os melhores cordões foram àqueles da região de moderadas a altas velocidades de alimentação e tensão. Porém, é válido ressaltar que houve um ponto que a geração de energia foi tanta, que ocasionou no derretimento da chapa-teste.

Na figura 4.4 podemos observar as soldas da região de transferência por modo curto-circuito/globular. No geral, os cordões apresentaram pequena taxa de deposição. Com valores médios de velocidade de alimentação e altas tensões, o rendimento aumentou, porém, não o suficiente, quando comparado a outros modos de transferência.



Figura 4.4 – Soldas que apresentaram modo de transferência curto-circuito / globular.

As soldas do tipo globular e globular/goticular (Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente) não apresentaram bons cordões. Sendo seu rendimento e taxa de deposição, muito baixos.



Figura 4.5 – Soldas que apresentaram modo de transferência globular.



Figura 4.6 – Soldas que apresentaram modo de transferência globular / goticular.

E por fim, as melhores soldas foram do tipo goticular (Figura 4.7), com bom aspecto, boa taxa de deposição e mínimo de respingos. Como citamos anteriormente, esse é o modo de transferência mais desejado. Pela regularidade da transferência, pela uniformidade das gotas (que geralmente têm o mesmo diâmetro do eletrodo), e pela alta frequência (por isso os oscilogramas de corrente e tensão não apresentam variações significativas de sinais).



Figura 4.7 – Soldas que apresentaram modo de transferência goticular.

É muito importante destacar, que essa última análise que fizemos foi meramente visual. Uma avaliação completa deverá ser feita através de estudos metalográficos, onde se poderá observar a taxa de penetração e a zona termicamente afetada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Frente aos resultados obtidos com a análise das soldas, determinou-se que:

- Havia regiões bem definidas para cada modo de transferência metálica, bem como das regiões de transição.
- As classes e os respectivos modos de transferência estão relacionados com os parâmetros de regulagem do processo.
- Ouve uma tendência de mudança do modo de transferência por curto-circuito para os modos de transferência por voo livre, com o aumento dos valores de tensão.
- Com o aumento da velocidade de alimentação do arame, com os mesmos valores de tensão, houve um aumento da taxa de fusão do arame e, consequentemente, um crescimento mais acelerado da gota.
- O comprimento do arco influencia no modo de transferência metálica, pois limita o crescimento da gota.
- O tamanho da gota tende a diminuir com o aumento da corrente, pois a taxa de fusão aumenta, devido ao aumento de calor gerado na soldagem.
- Os melhores cordões, visualmente falando, foram obtidos através do modo por curto-circuito (sob específicas condições – moderadas a altas velocidade de alimentação e tensão) e principalmente sob o modo de transferência goticular.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MARQUES, V. M.; MODENESI, P. J.; BACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e tecnologia, 3^a edição, Belo Horizonte, 2011, Editora UFMG, p. 362.
- [2] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG, 1^a edição, São Paulo, 2008, Editora UFMG, p. 284.
- [3] ROSA, A. L. P. B.; ALMEIDA, C. M. Análise do Modo de Transferência Metálica com a Variação da Tensão e da Velocidade de Alimentação do Eletrodo Utilizando o Processo de Soldagem MIG. Vitória, 2012. 16 p. Relatório (Disciplina Processos da Soldagem) – Universidade do Espírito Santo. Orientador Temístocles de Sousa Luz.
- [4] CARMINATTI, F. A. Estudo preliminar da tenacidade ao impacto na solda de alta resistência. Vitória, 2009. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Espírito Santo. Orientador Temístocles de Sousa Luz.
- [5] Apostila de Soldagem MIG/MAG, ESAB, 2005.
- [6] Manual do Sistema SAP V – 4.01, IMC Soldagem 2005.
- [7] MOGROVEJO, M. G. Estudo do Processo MIG-MAG com dois arames e único arco. Florianópolis, 2011. 80 p. Projeto de Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Orientador Professor Doutor Jair Carlos Dutra.
- [8] SOUZA, D. Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana. Uberlândia, 2010. 280 p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Orientador Professor Doutor Américo Scotti.
- [9] FIGUEIREDO, K. M.; FERRARESI, V. A. Mapas de Transferência Metálica na Soldagem MIG de Alumínio. 1º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia e Fabricação. 02 a 04 de abril de 2001. Curitiba, Paraná.

[10] ANDRADE, A. F. C. Influência da corrente de pulso, tempo de pulso e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P. Natal, 2012. 107 p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Orientador Professor Doutor Rubens Maribondo do Nascimento.

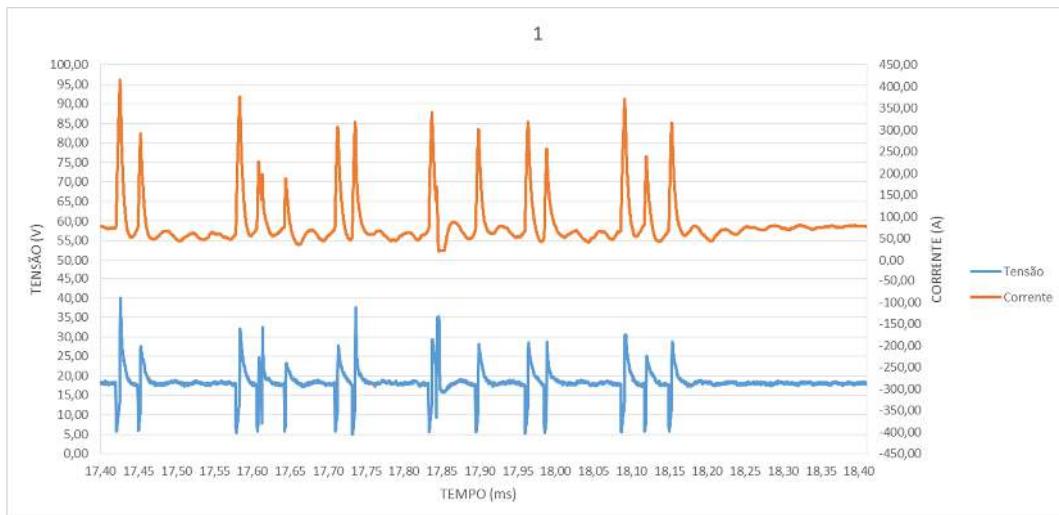
**ANEXO A -
ANALISADO**
GRÁFICOS DE TENSÃO X CORRENTE DE CADA TESTE


Figura A.1 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 1 – Tensão 18V e Velocidade de Alimentação de 2 m/min.

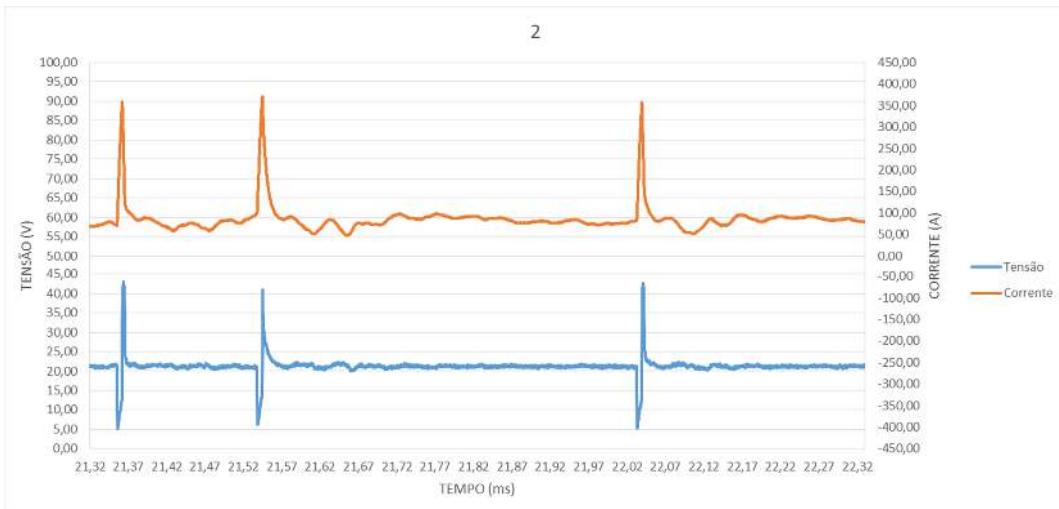


Figura A.2 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 2 – Tensão 21V e Velocidade de Alimentação de 2 m/min.

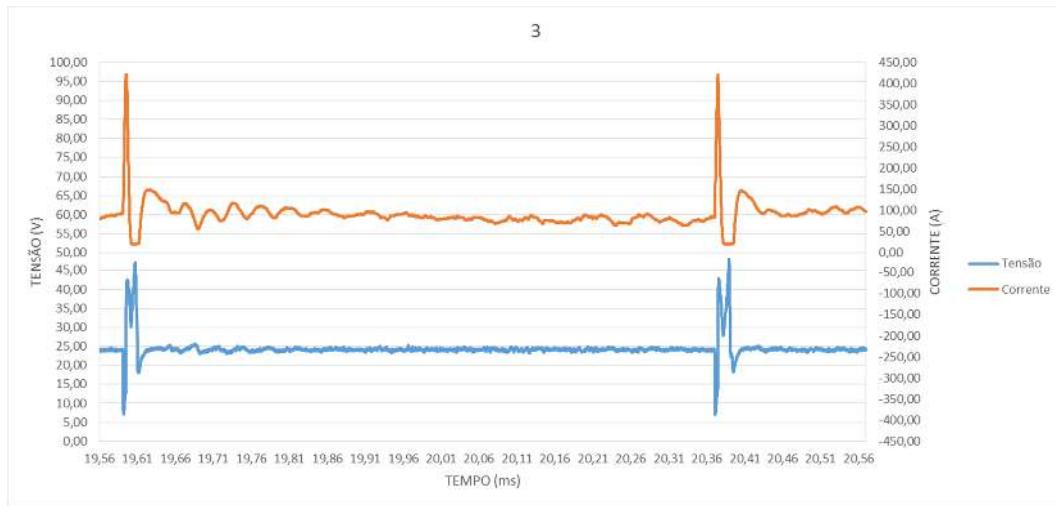


Figura A.3 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 3 – Tensão 24V e Velocidade de Alimentação de 2 m/min.

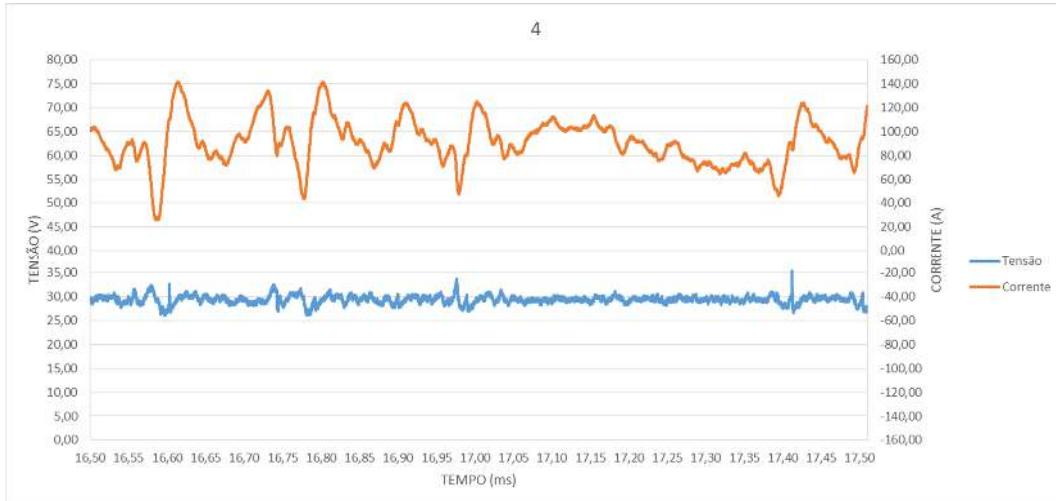


Figura A.4 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 4 – Tensão 27V e Velocidade de Alimentação de 2 m/min.

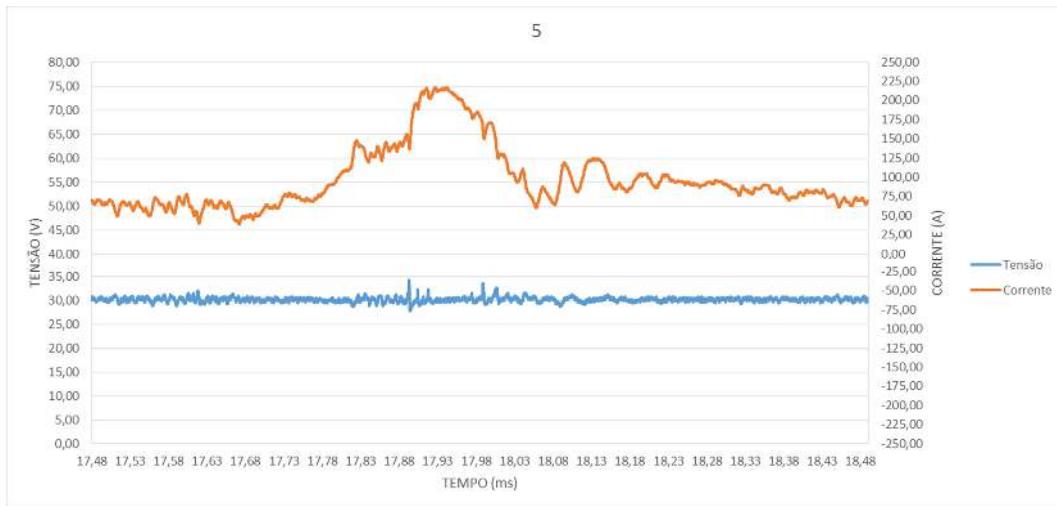


Figura A.5 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 5 – Tensão 30V e Velocidade de Alimentação de 2 m/min.

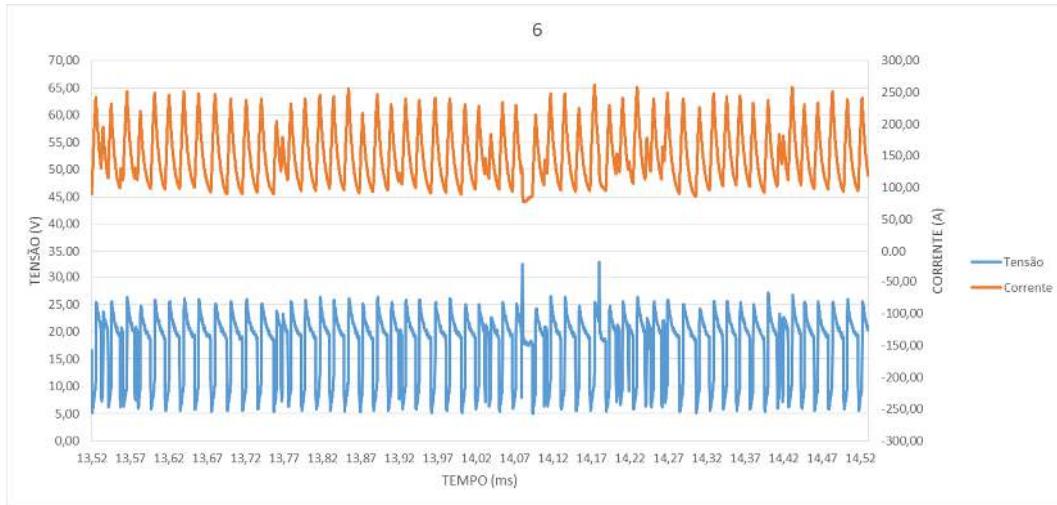


Figura A.6 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 6 – Tensão 18V e Velocidade de Alimentação de 4 m/min.

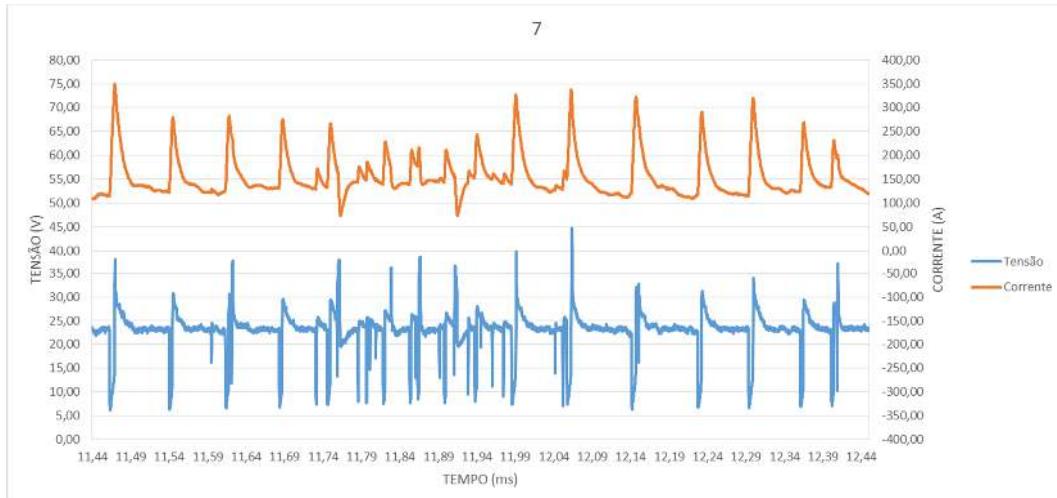


Figura A.7 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 7 – Tensão 21V e Velocidade de Alimentação de 4 m/min.

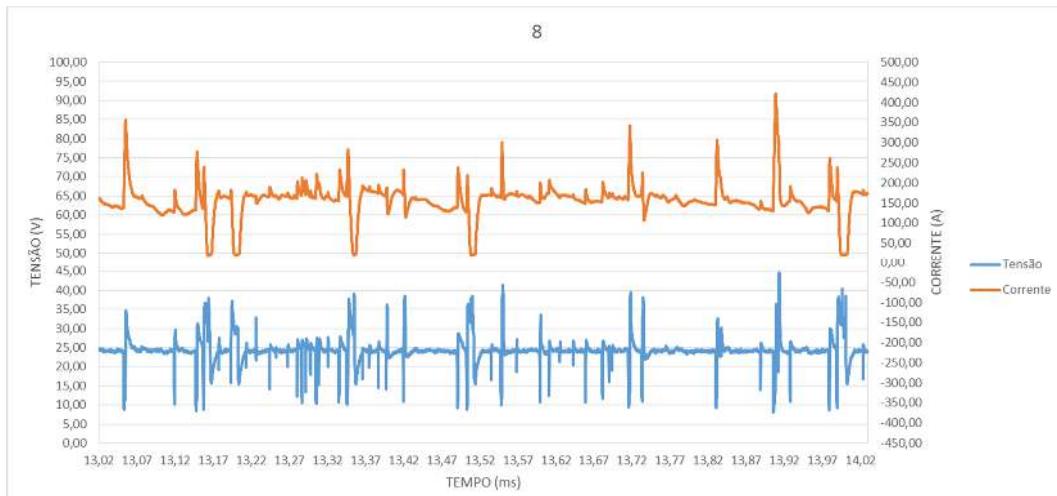


Figura A.8 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 8 – Tensão 24V e Velocidade de Alimentação de 4 m/min.

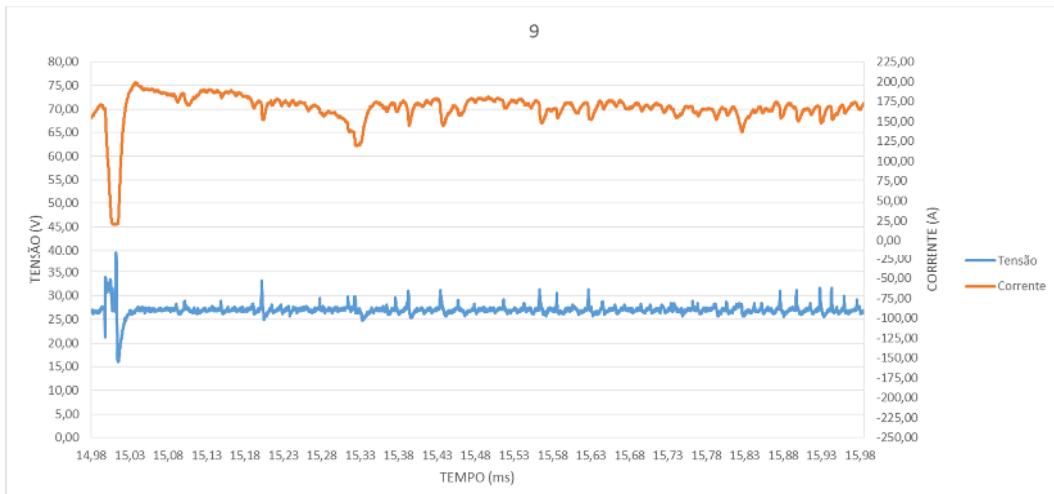


Figura A.9 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 9 – Tensão 27V e Velocidade de Alimentação de 4 m/min.

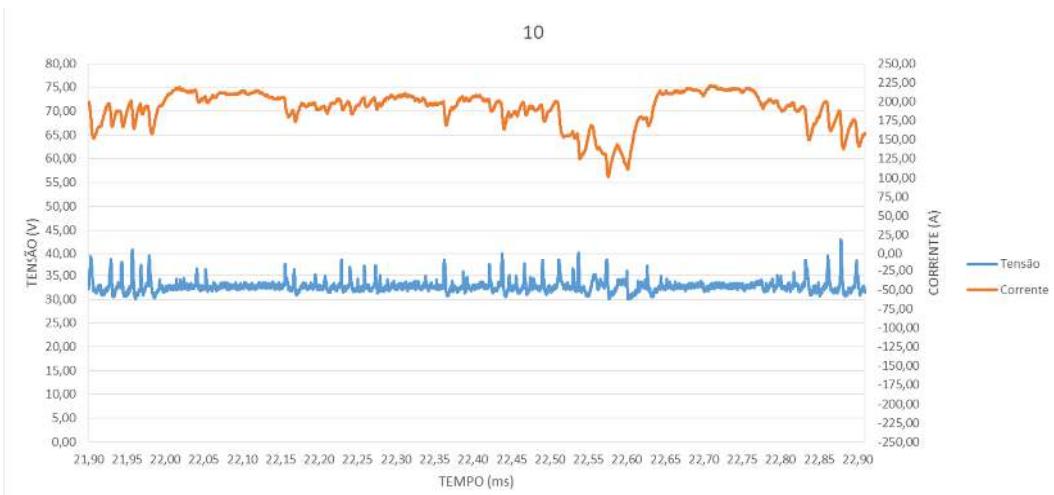


Figura A.10 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 10 – Tensão 30V e Velocidade de Alimentação de 4 m/min.

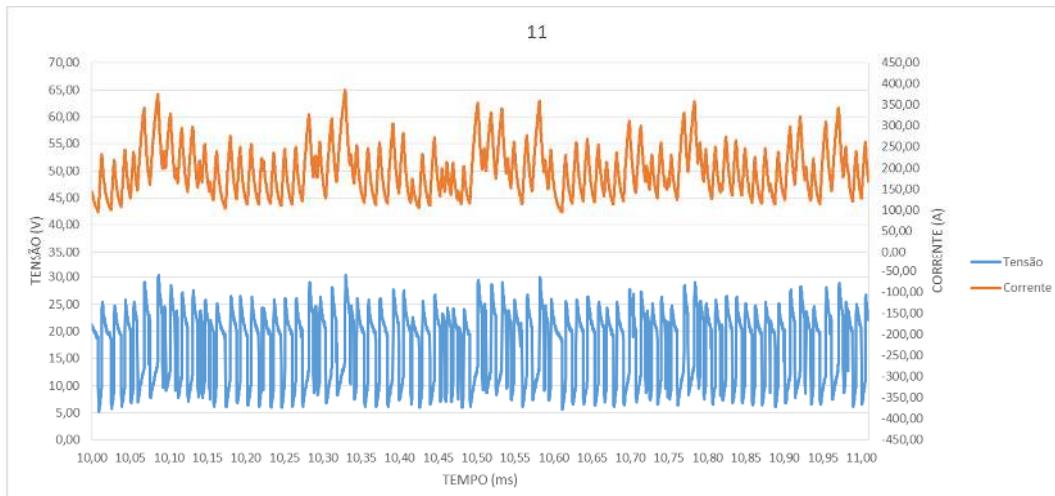


Figura A.11 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 11 – Tensão 18V e Velocidade de Alimentação de 6 m/min.

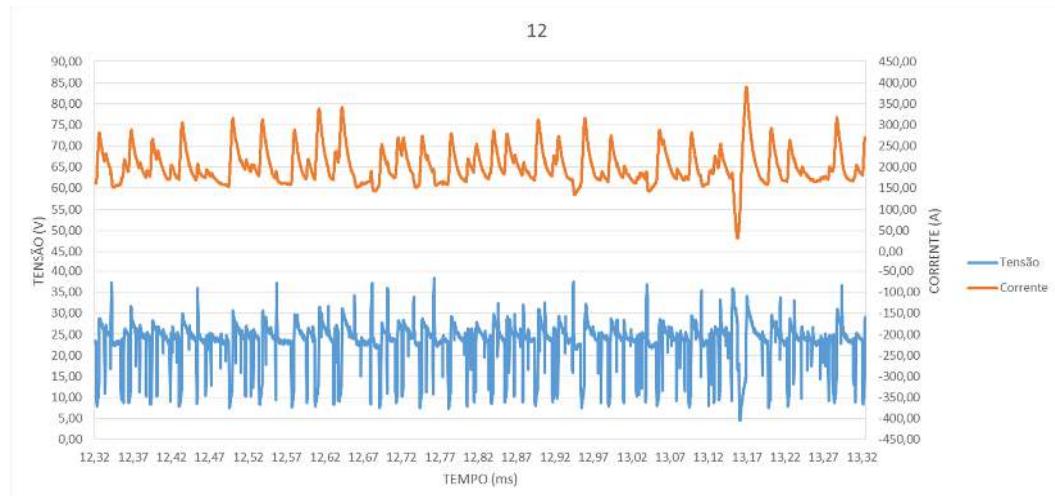


Figura A.12 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 12 – Tensão 21V e Velocidade de Alimentação de 6 m/min.

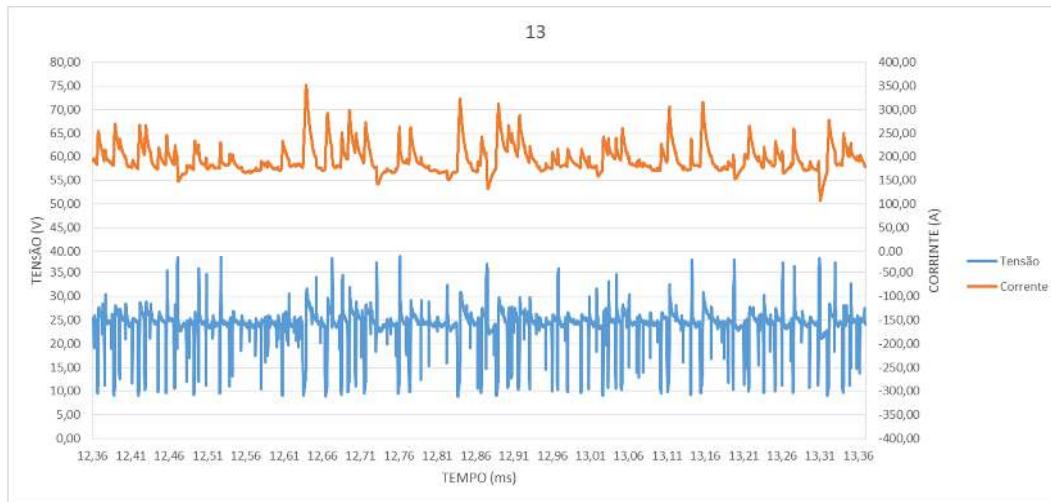


Figura A.13 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 13 – Tensão 24V e Velocidade de Alimentação de 6 m/min.

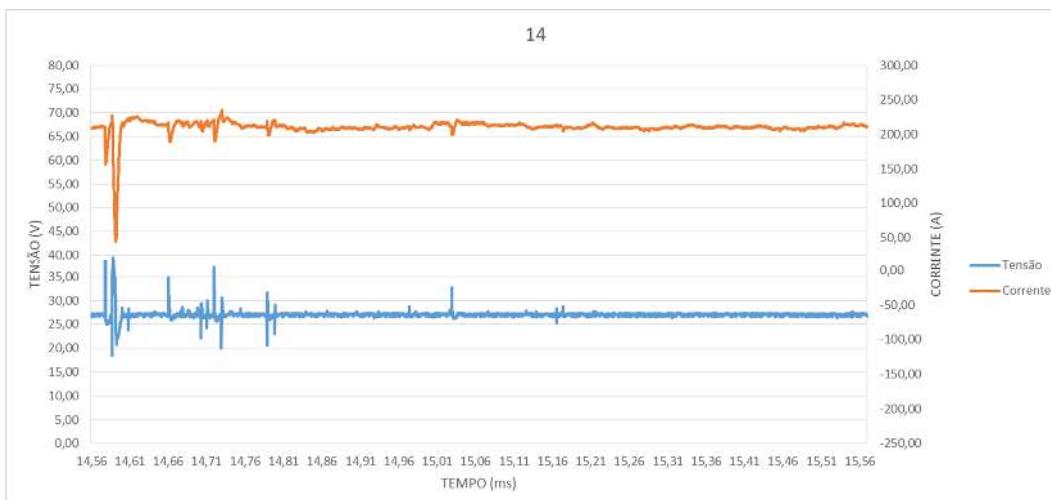


Figura A.14 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 14 – Tensão 27V e Velocidade de Alimentação de 6 m/min.

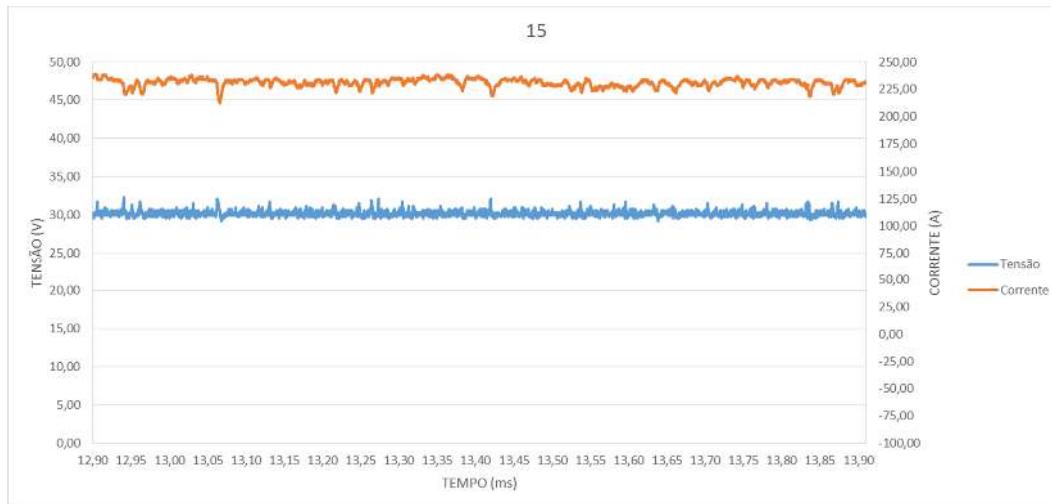


Figura A.15 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 15 – Tensão 30V e Velocidade de Alimentação de 6 m/min.

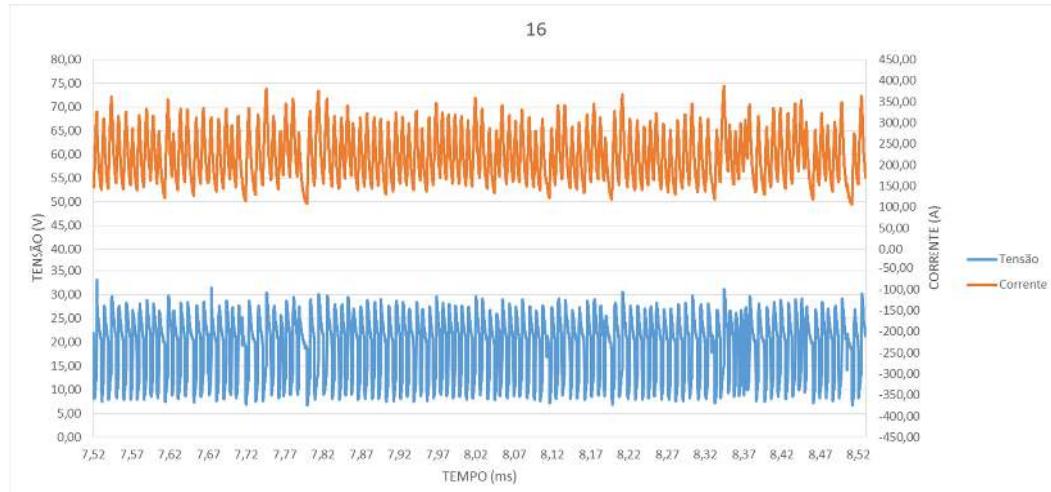


Figura A.16 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 16 – Tensão 18V e Velocidade de Alimentação de 8 m/min.

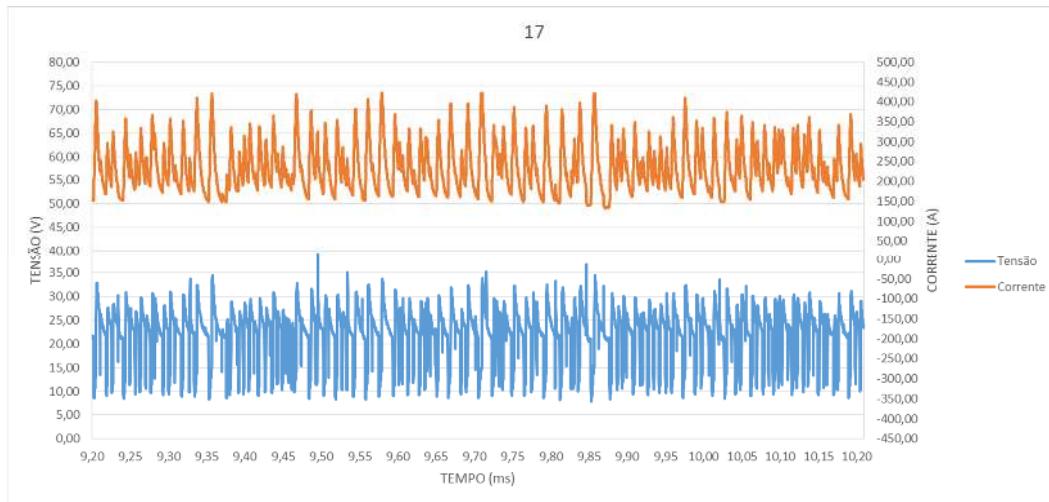


Figura A.17 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 17 – Tensão 21V e Velocidade de Alimentação de 8 m/min.



Figura A.18 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 18 – Tensão 24V e Velocidade de Alimentação de 8 m/min.

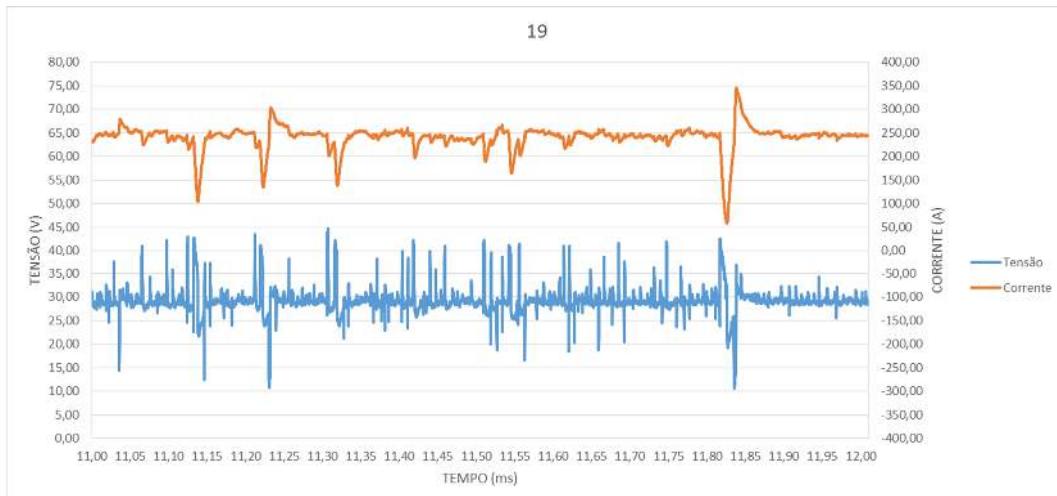


Figura A.19 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 19 – Tensão 27V e Velocidade de Alimentação de 8 m/min.

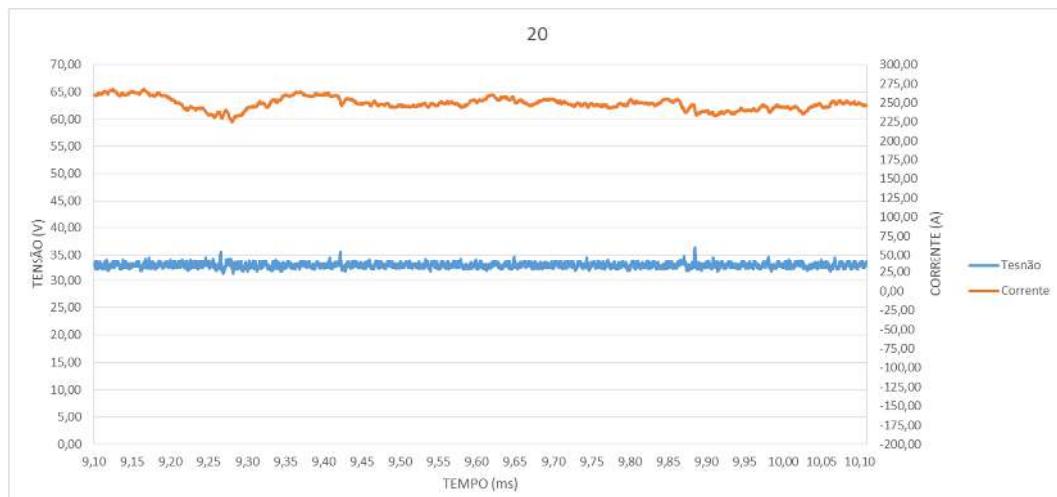


Figura A.20 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 20 – Tensão 30V e Velocidade de Alimentação de 8 m/min.

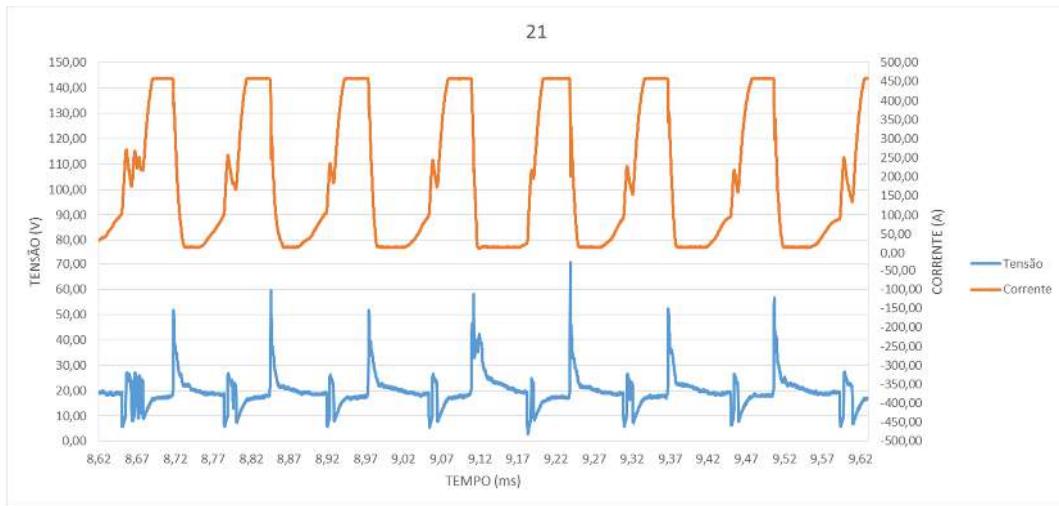


Figura A.21 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 21 – Tensão 18V e Velocidade de Alimentação de 10 m/min.

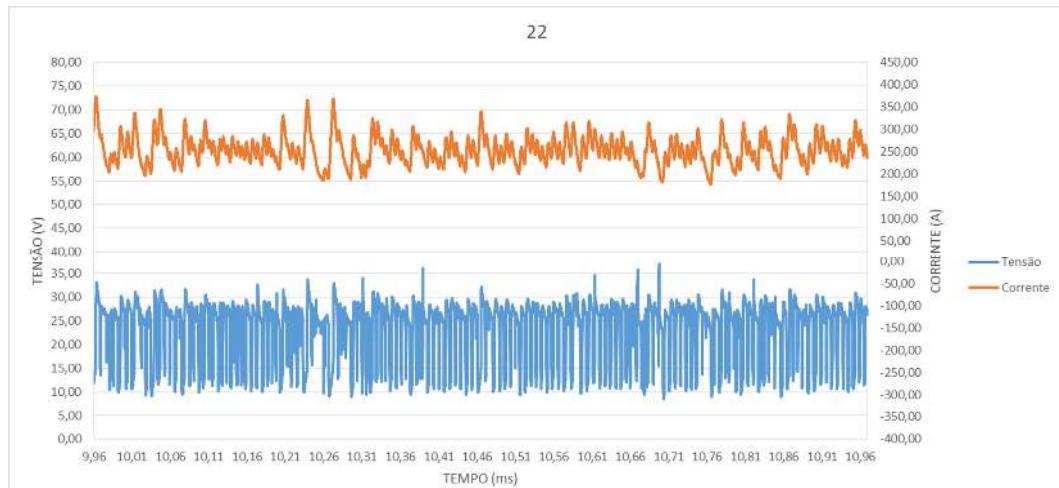


Figura A.22 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 22 – Tensão 21V e Velocidade de Alimentação de 10 m/min.

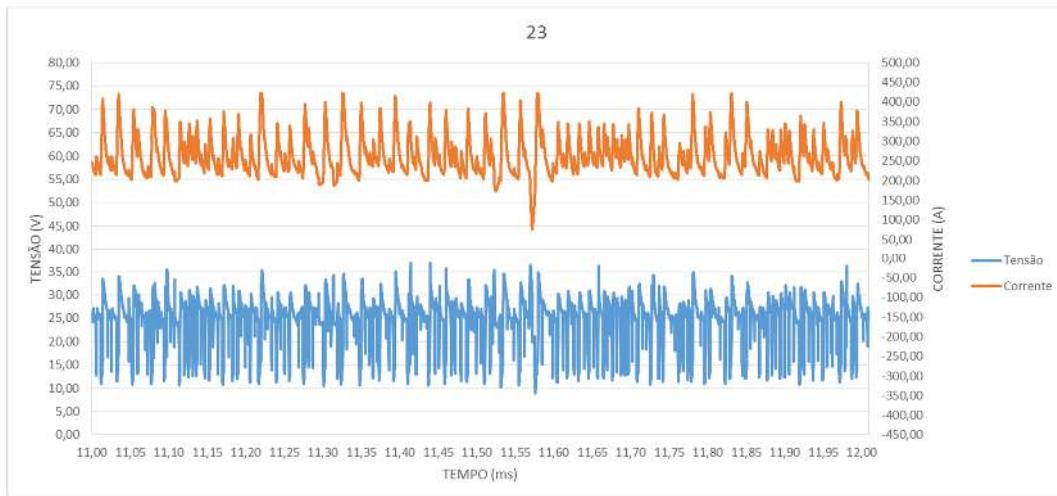


Figura A.23 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 23 – Tensão 24V e Velocidade de Alimentação de 10 m/min.

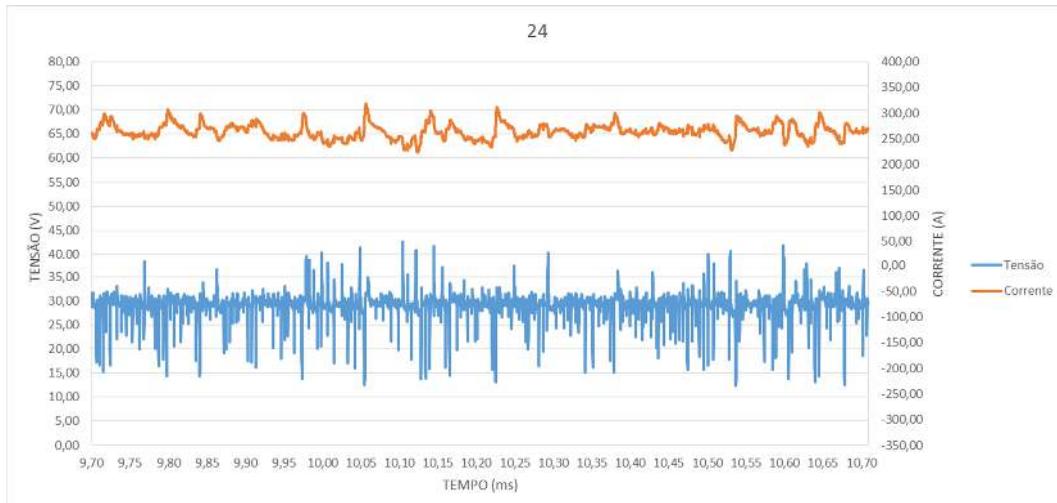


Figura A.24 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 24 – Tensão 27V e Velocidade de Alimentação de 10 m/min.

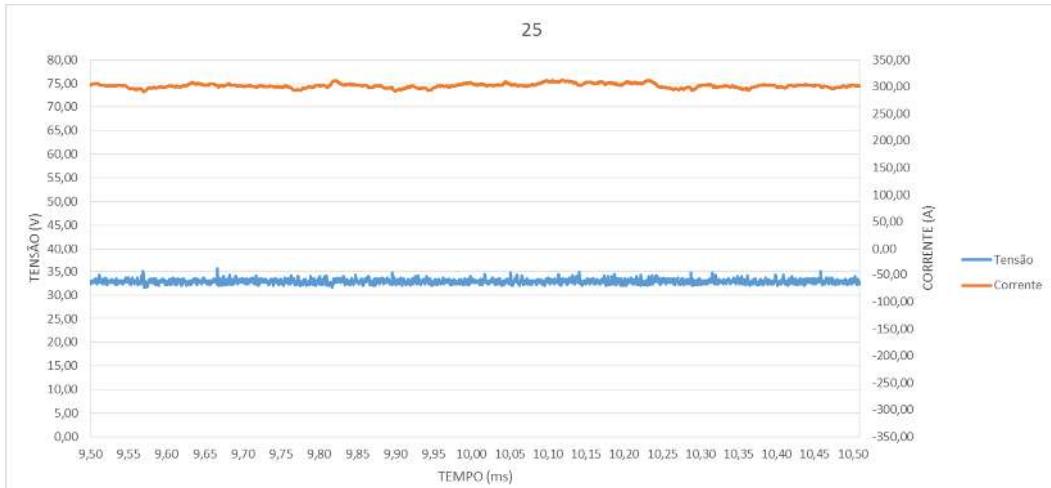


Figura A.25 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 25 – Tensão 30V e Velocidade de Alimentação de 10 m/min.

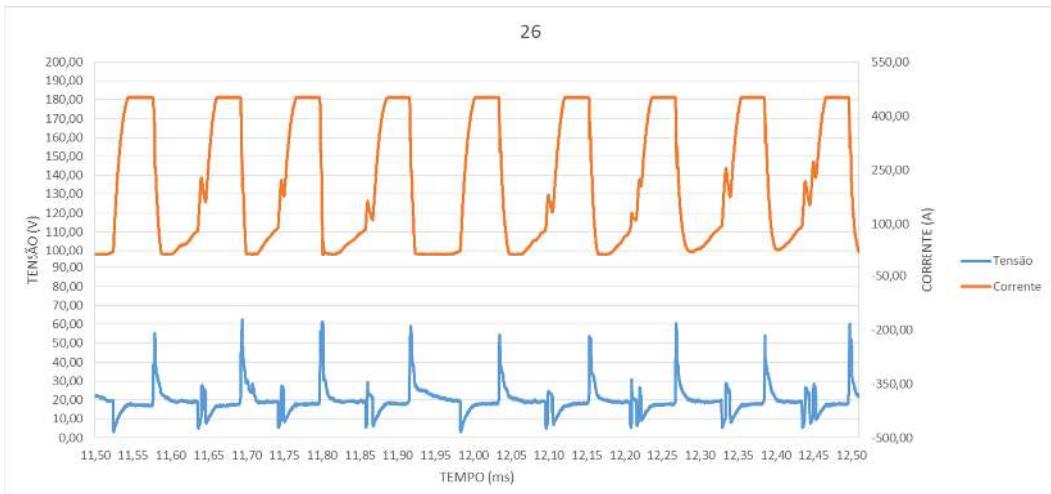


Figura A.26 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 26 – Tensão 18V e Velocidade de Alimentação de 12 m/min.

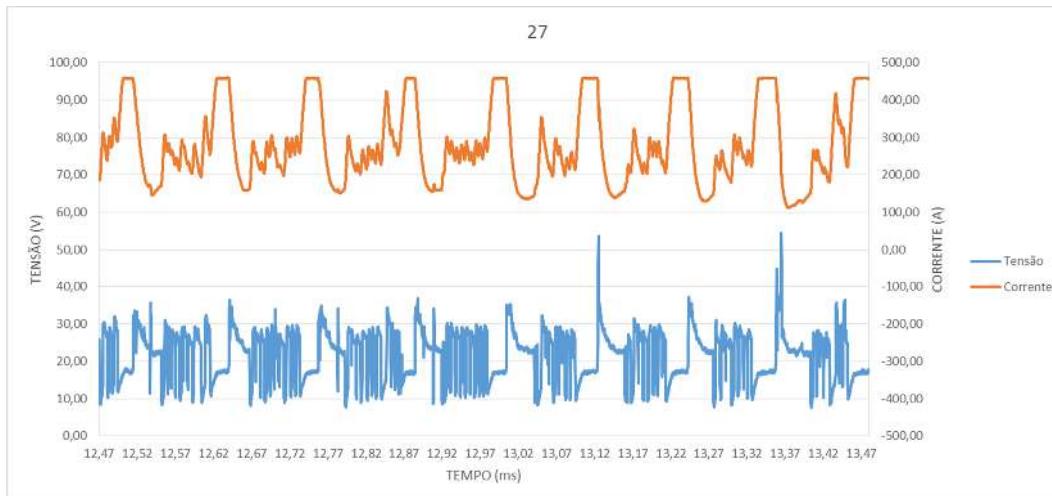


Figura A.27 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 27 – Tensão 21V e Velocidade de Alimentação de 12 m/min.

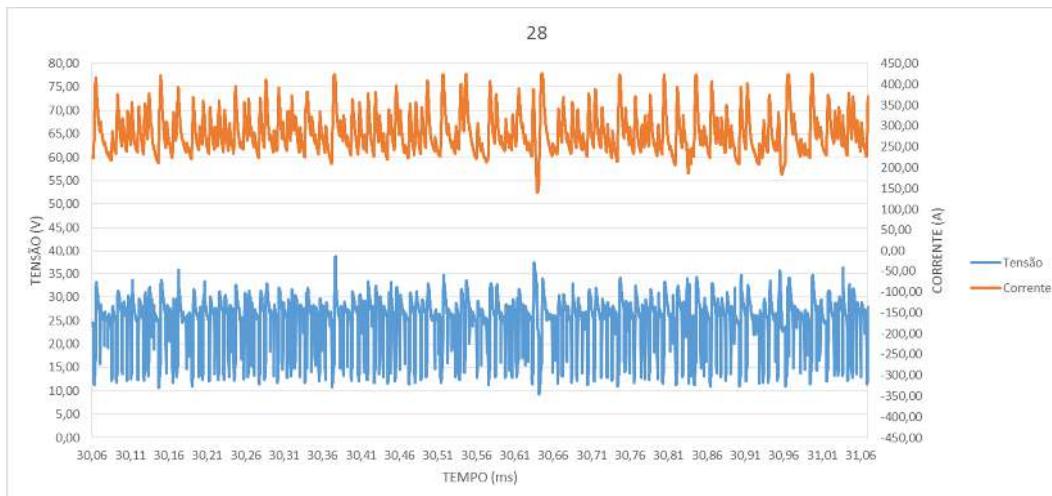


Figura A.28 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 28 – Tensão 24V e Velocidade de Alimentação de 12 m/min.

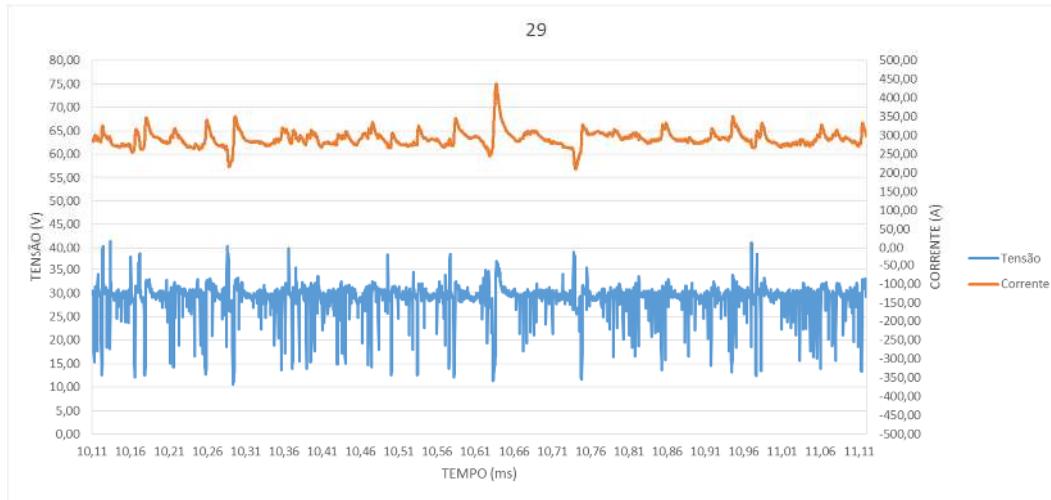


Figura A.29 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 29 – Tensão 27V e Velocidade de Alimentação de 12 m/min.

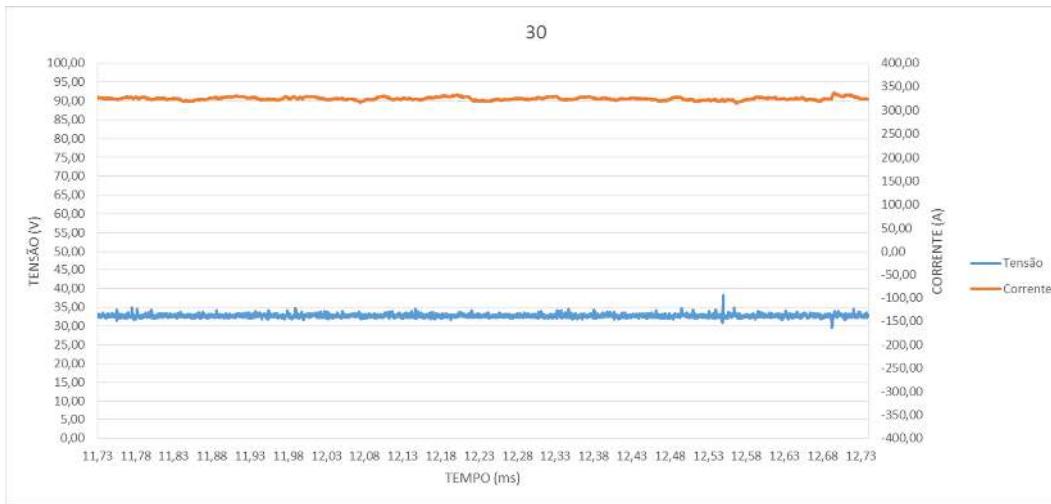


Figura A.30 – Gráfico de Tensão, Corrente e tempo no Teste 30 – Tensão 30V e Velocidade de Alimentação de 12 m/min.

ANEXO B - INFORMAÇÕES DO HISTOGRAMA DE CADA TESTE FORNECIDAS PELO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

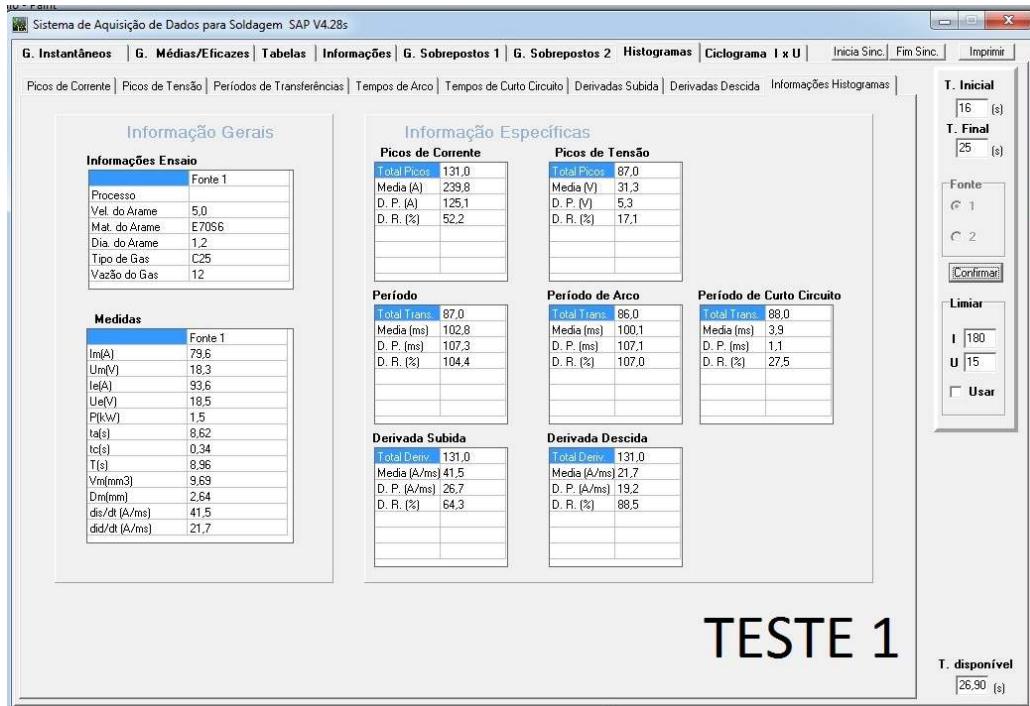


Figura B.1 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 1.

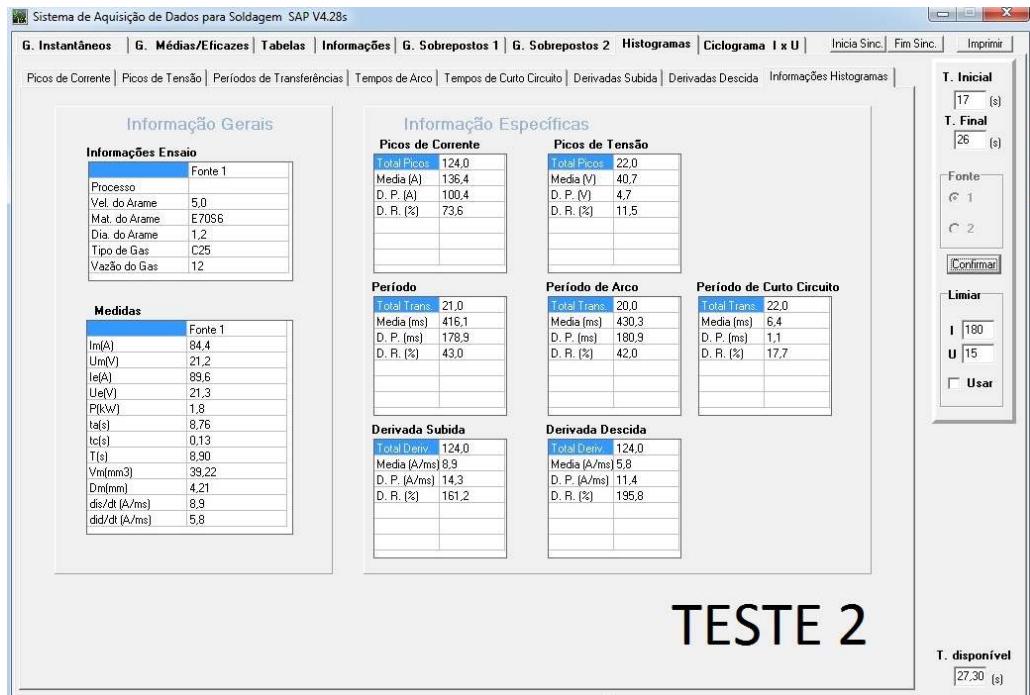


Figura B.2 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 2.

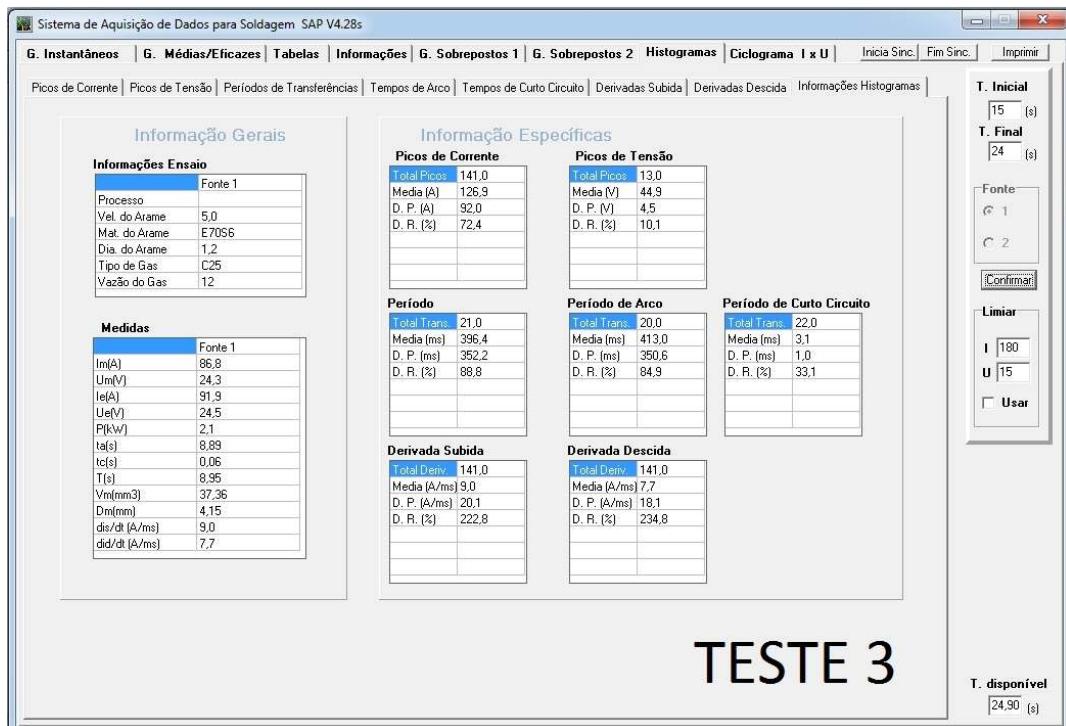


Figura B.3 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 3.

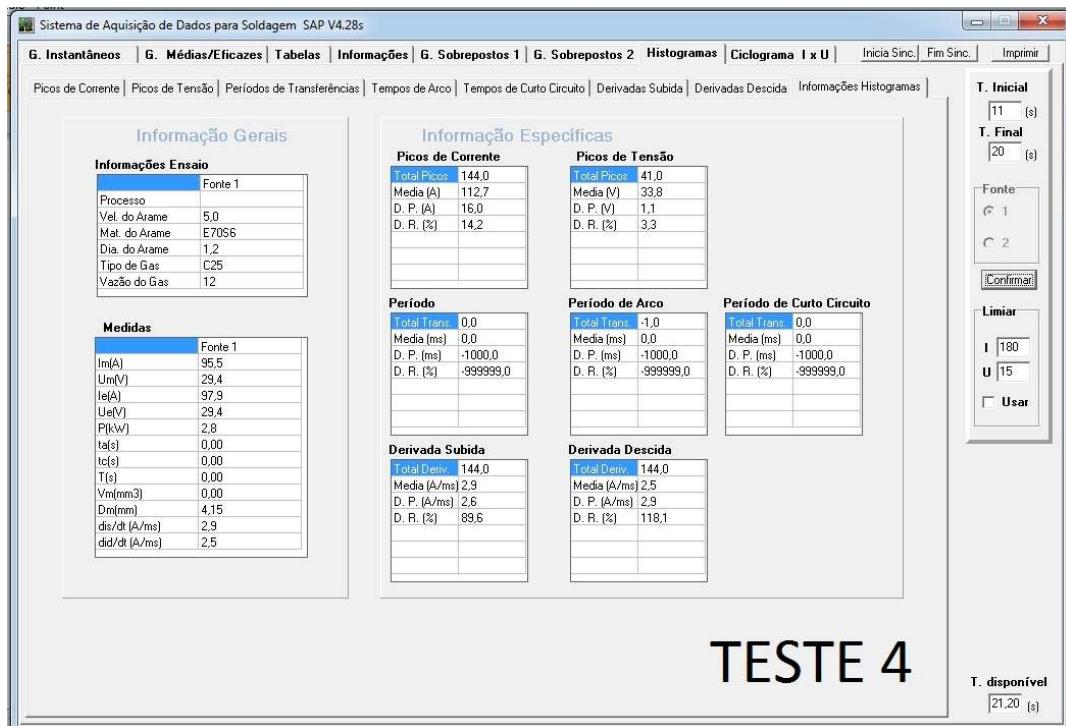


Figura B.4 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 4.

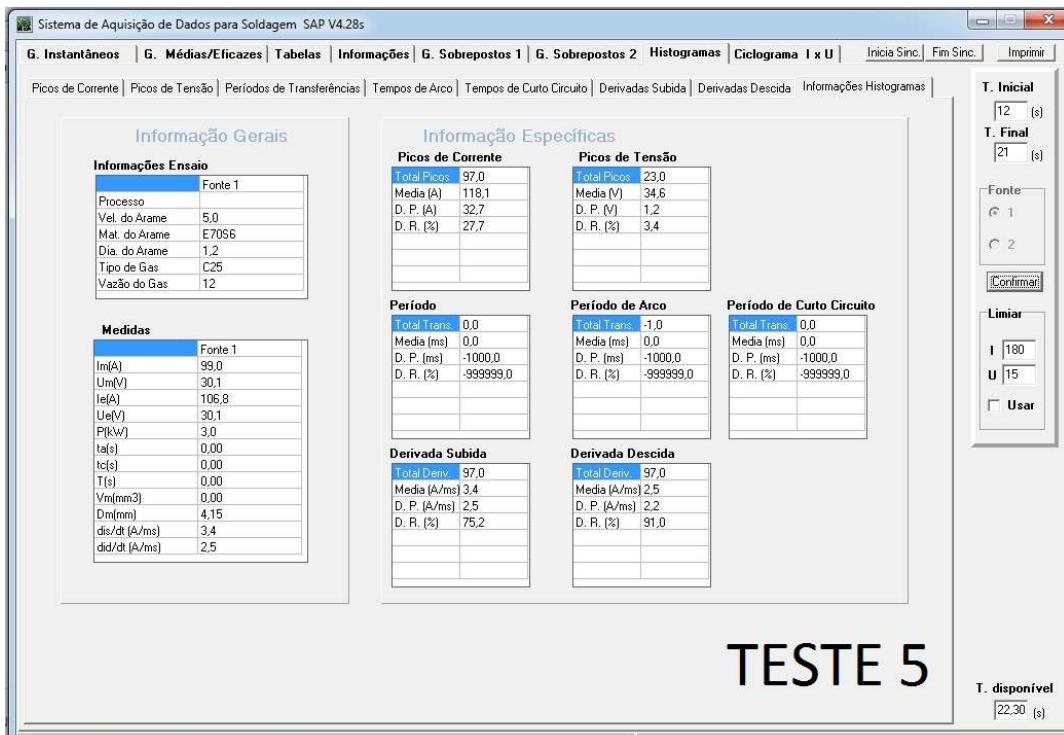


Figura B.5 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 5.

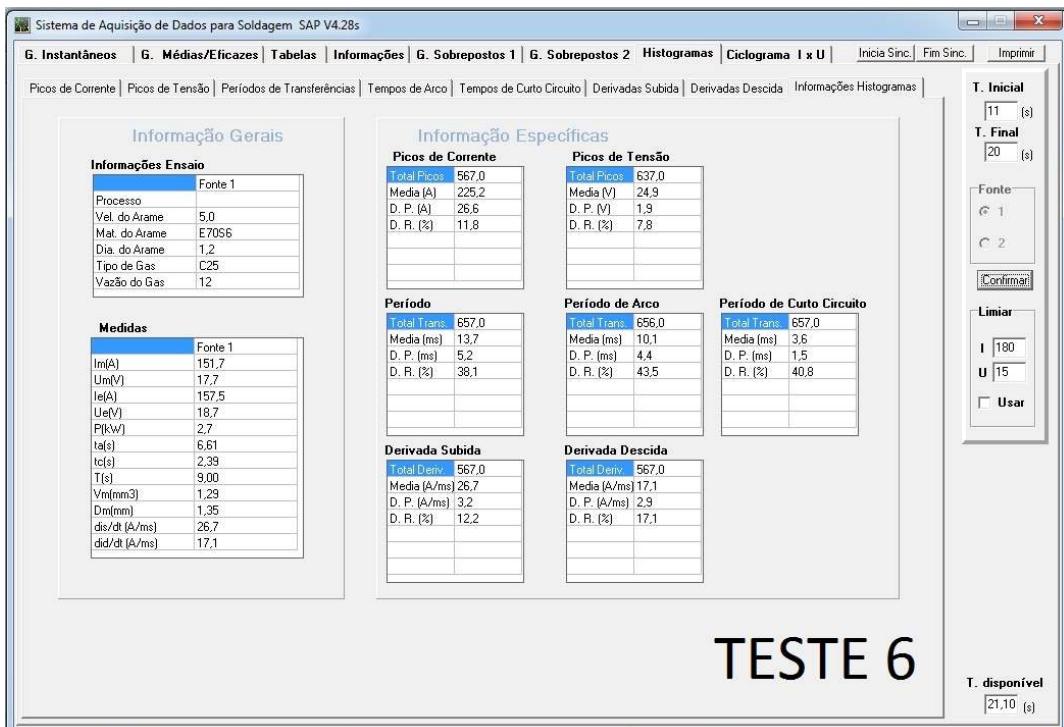


Figura B.6 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 6.

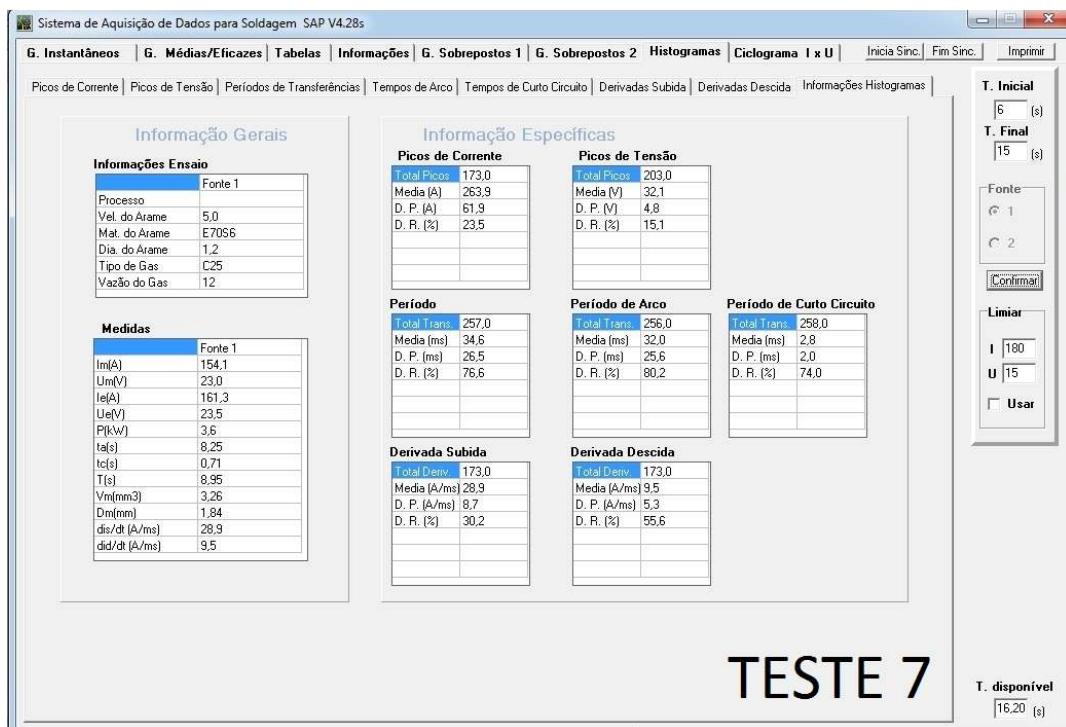


Figura B.7 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 7.

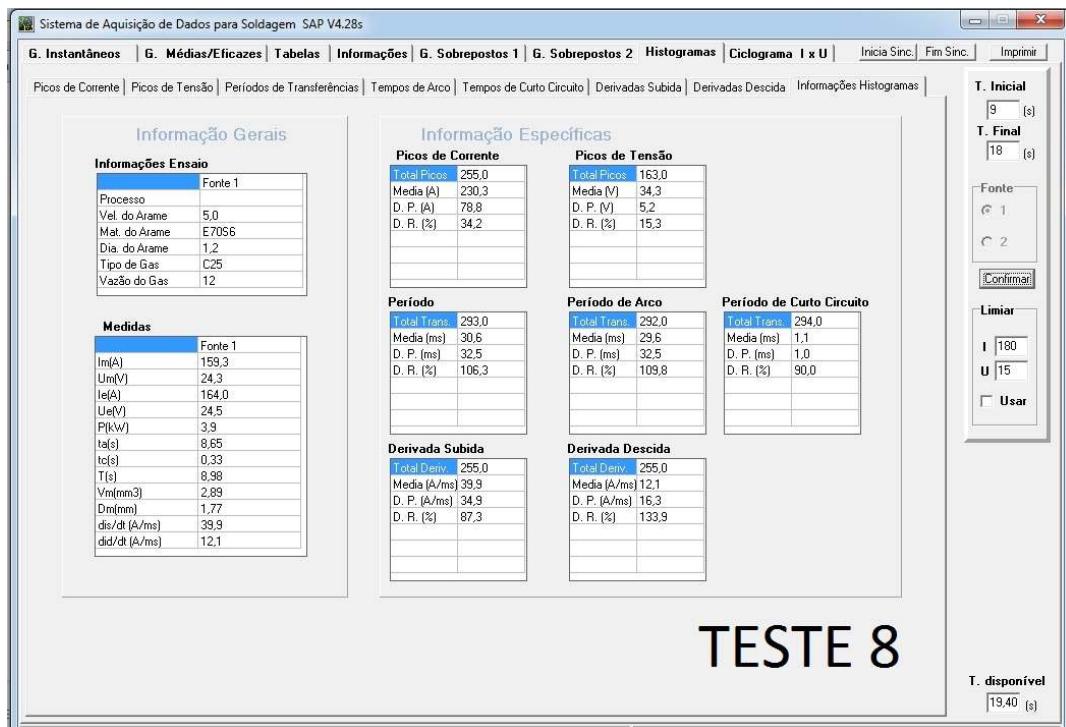


Figura B.8 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 8.

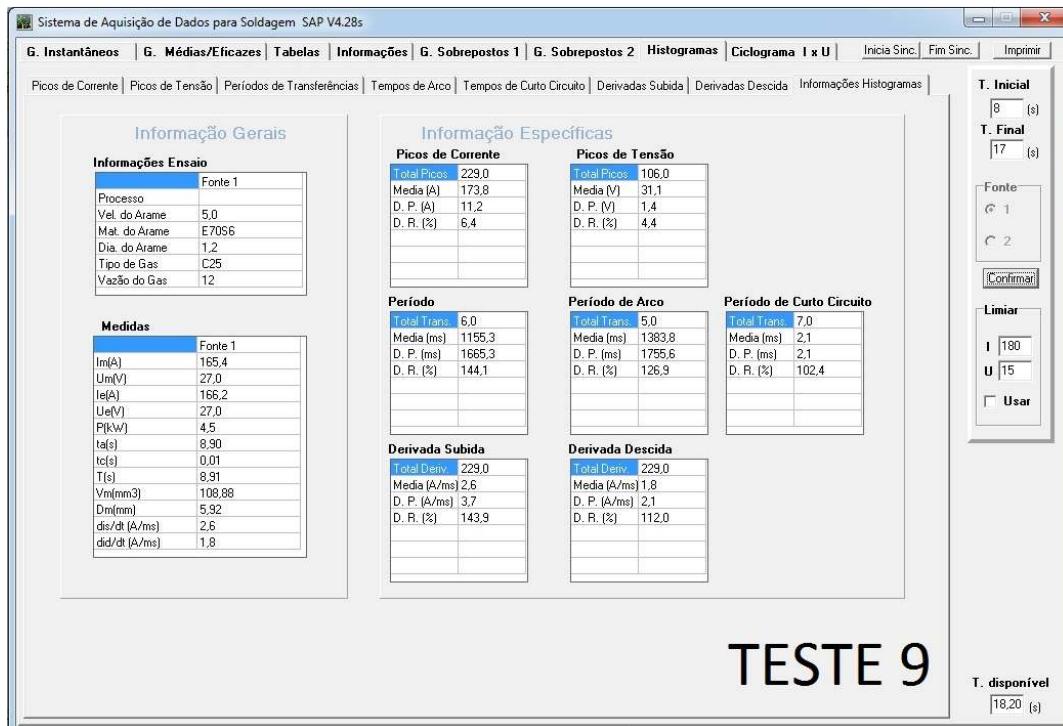


Figura B.9 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDADURA 9.

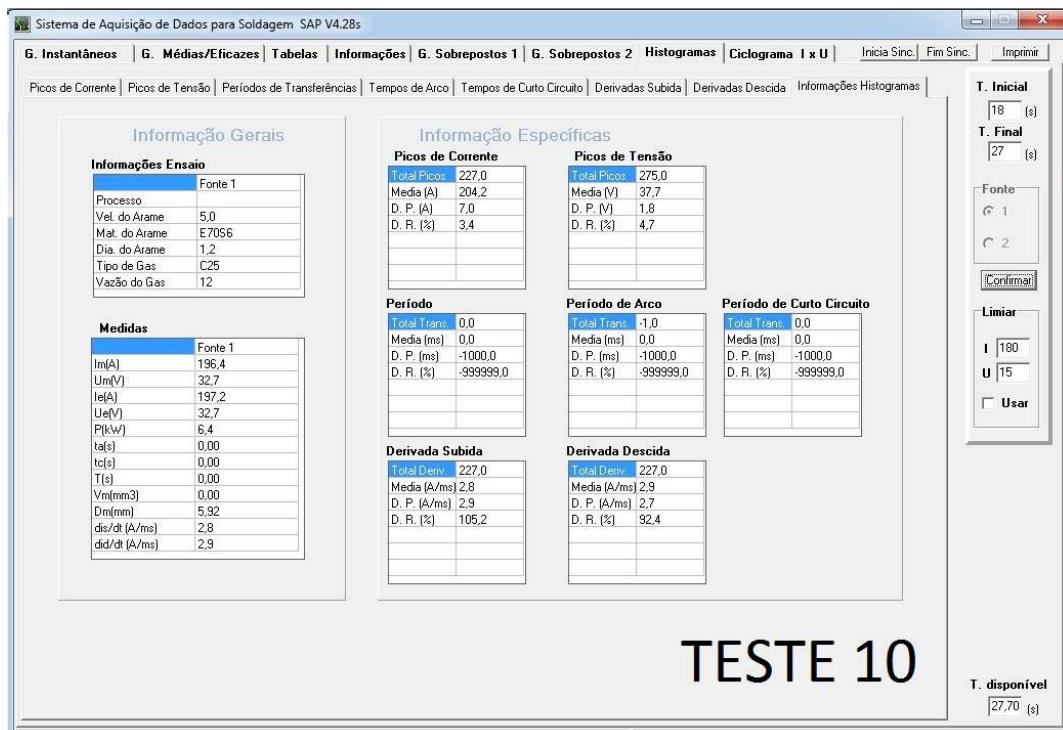


Figura B.10 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDADURA 10.

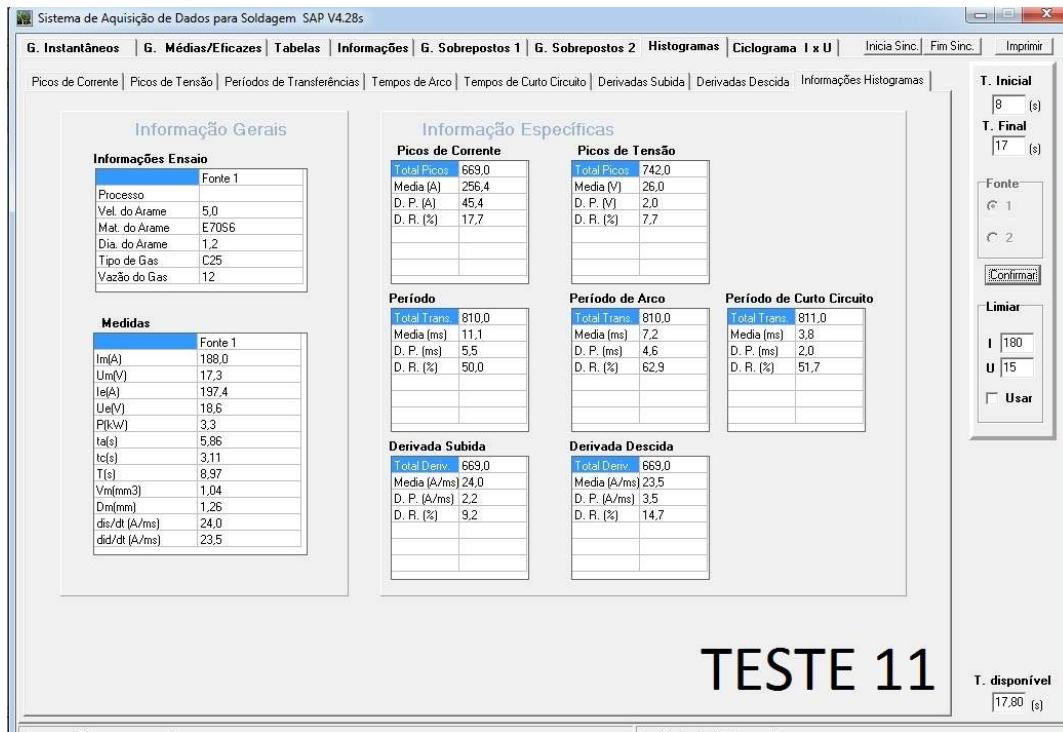


Figura B.11 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 11.

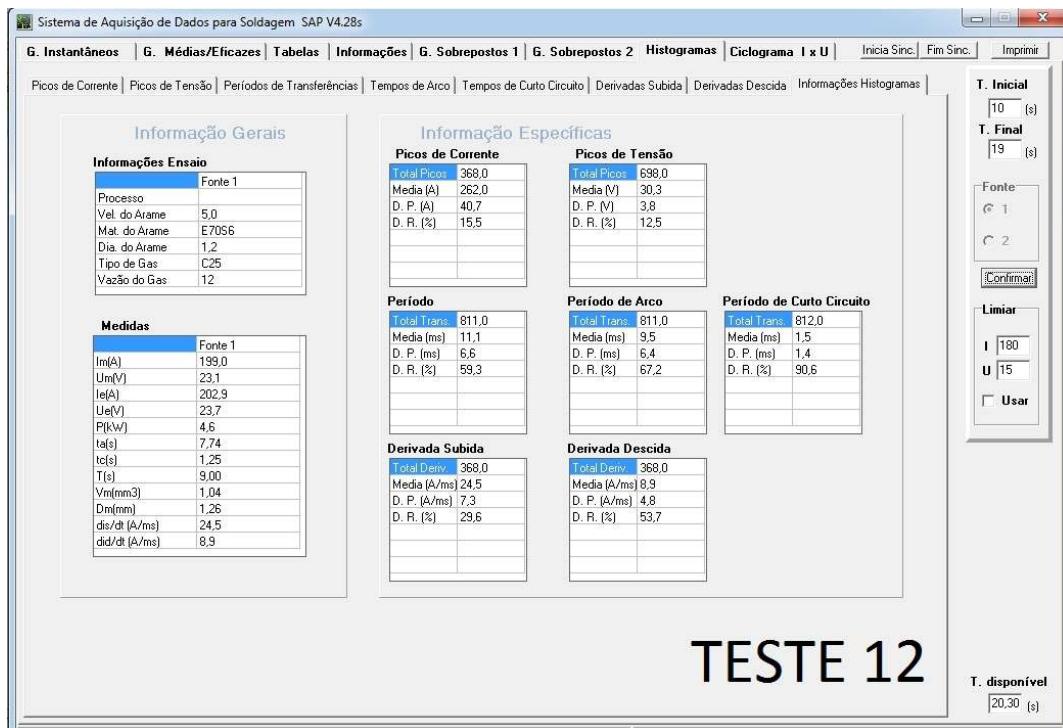


Figura B.12 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 12.

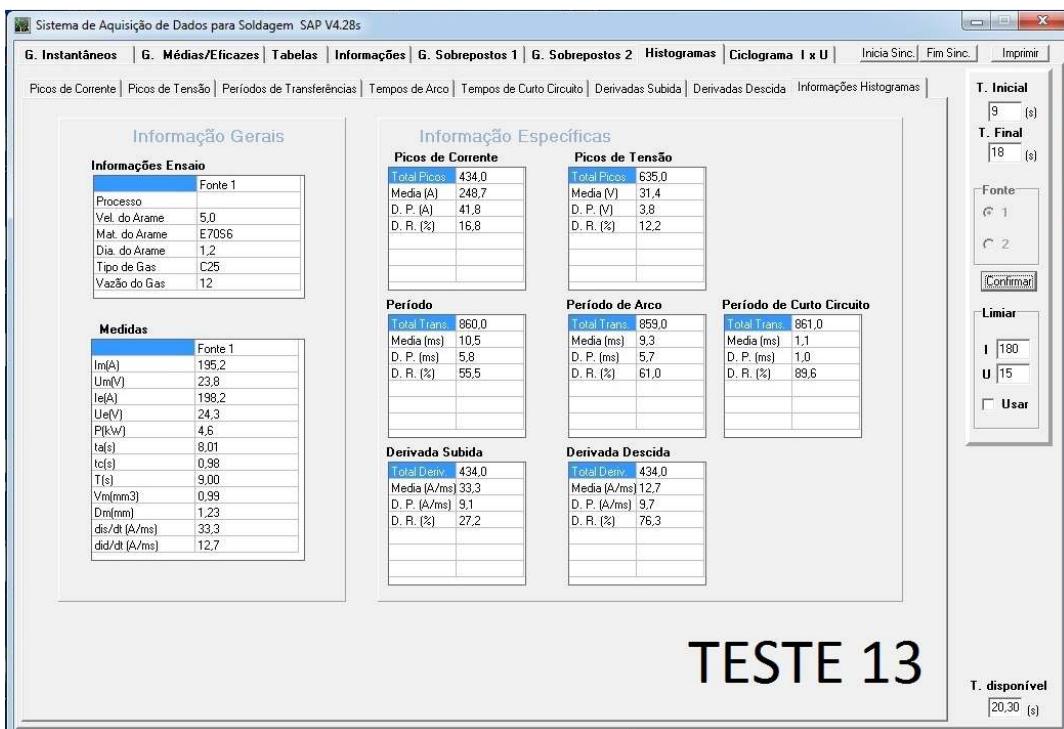


Figura B.13 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDADURA 13.

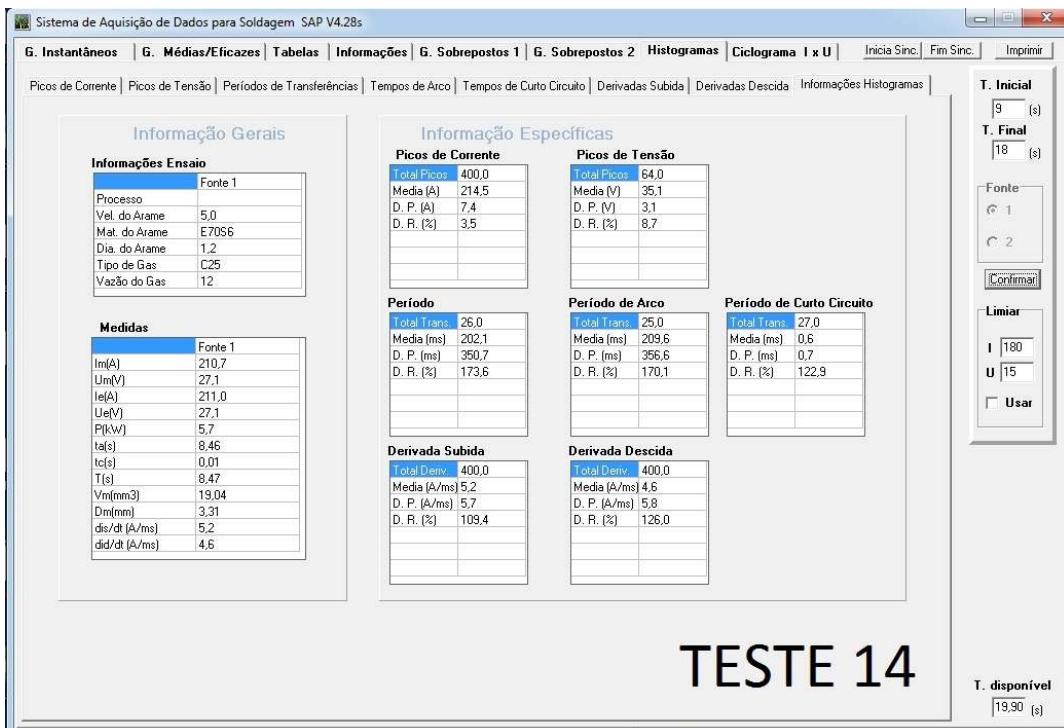


Figura B.14 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDADURA 14.

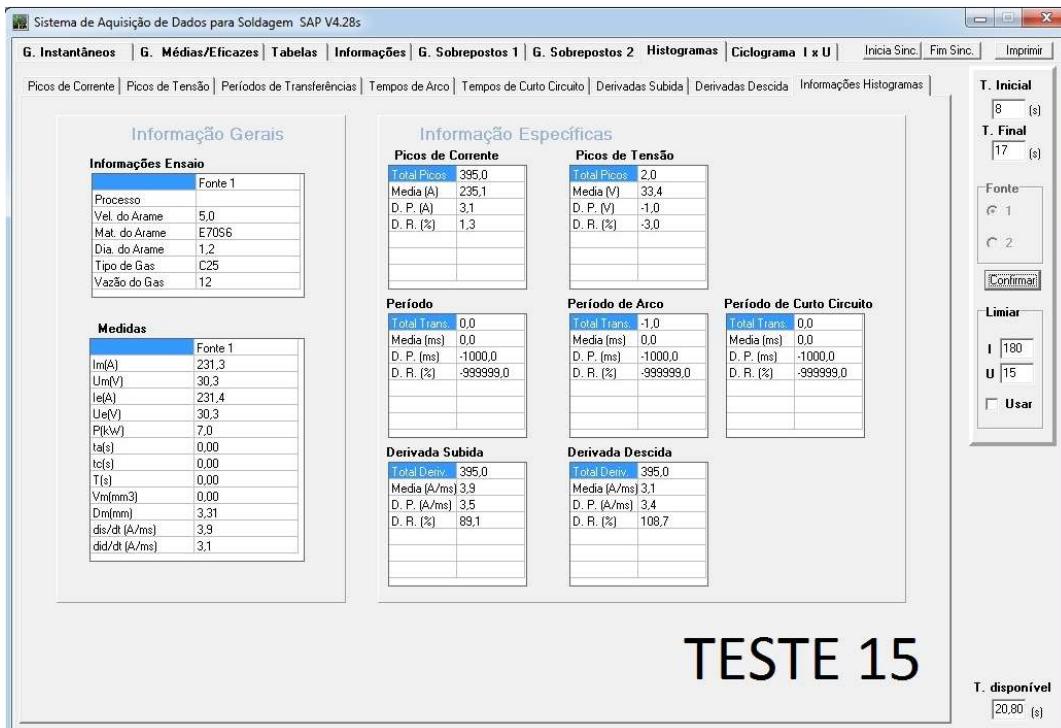


Figura B.15 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 15.

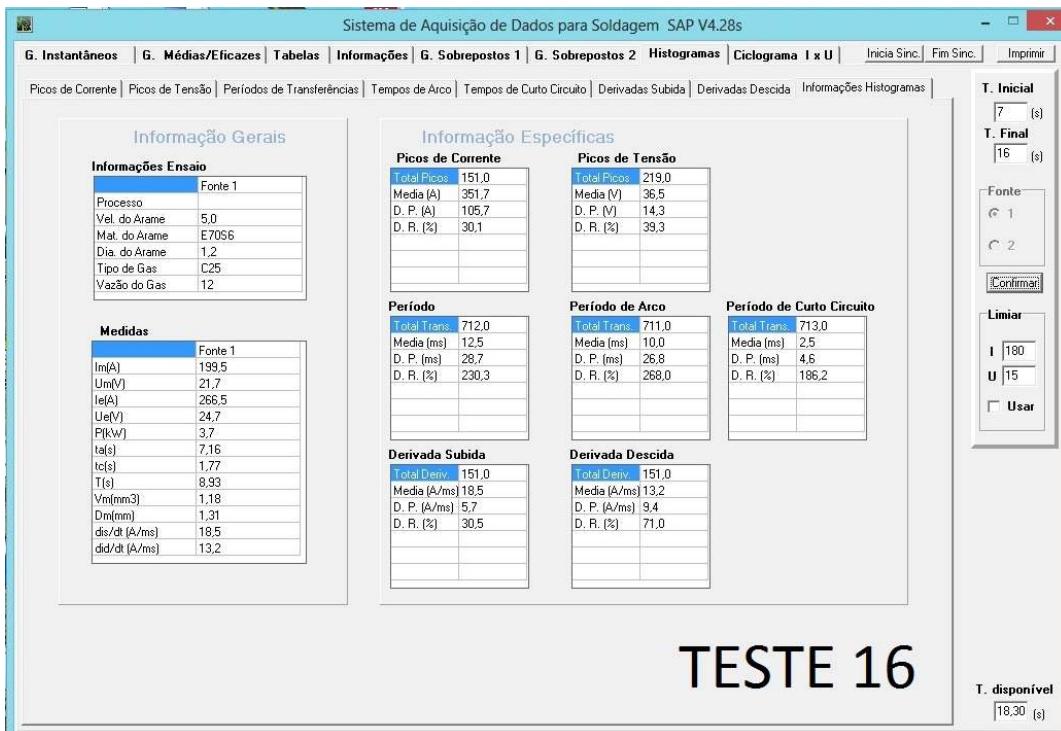


Figura B.16 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 16.

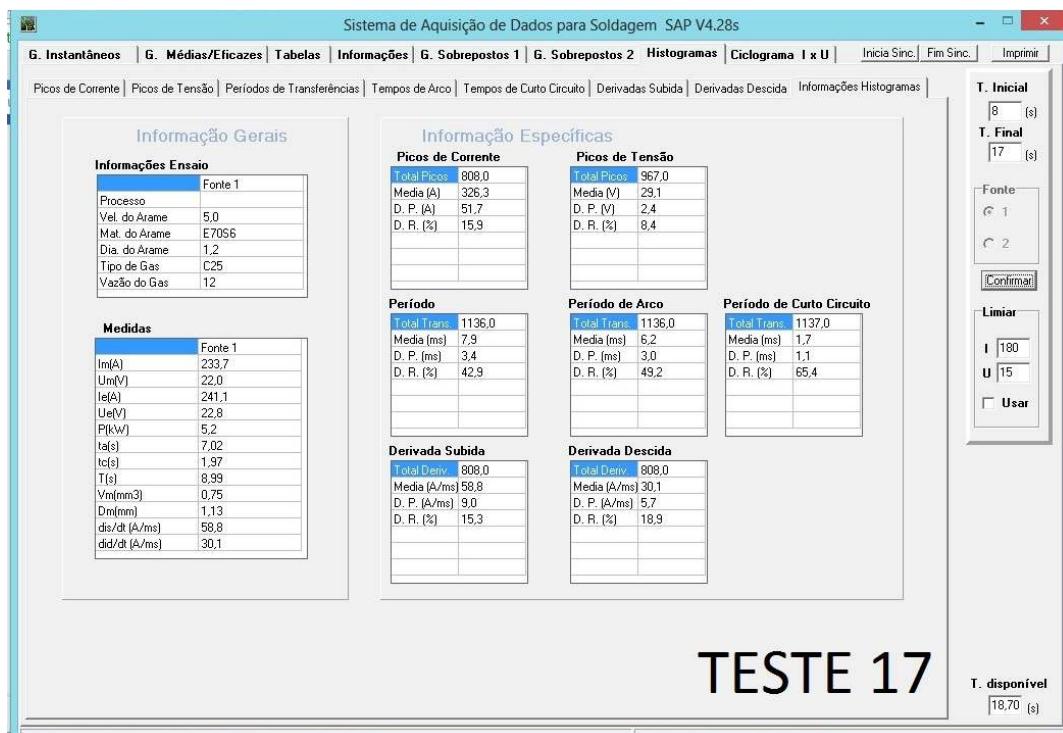


Figura B.17 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 17.

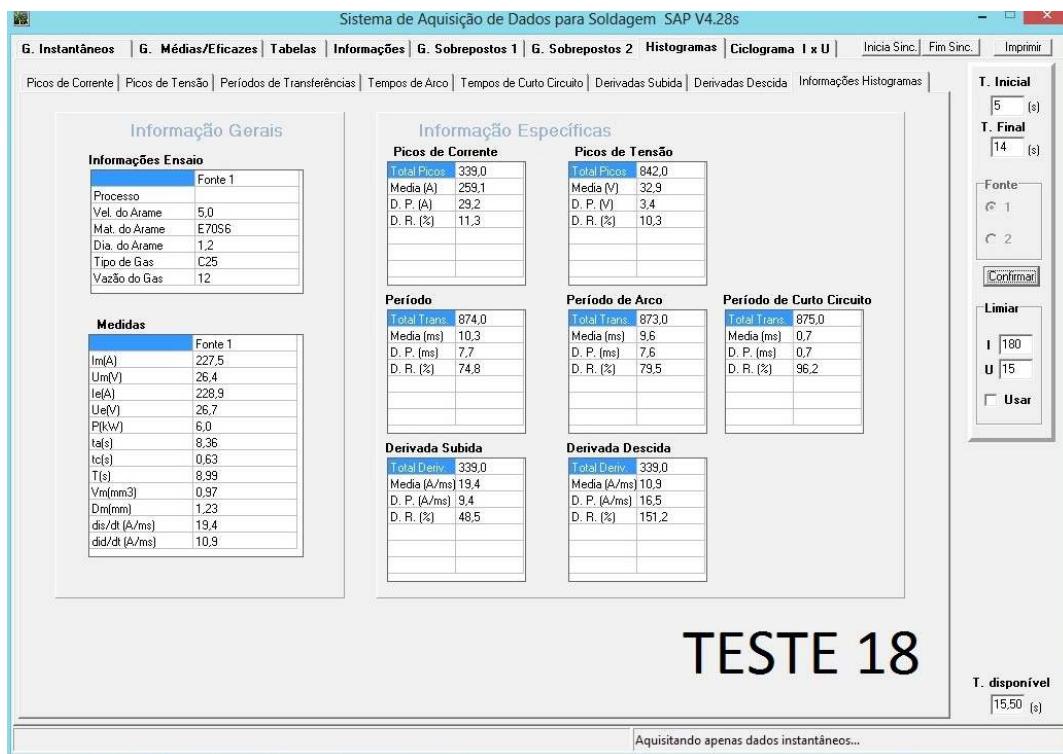


Figura B.18 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 18.

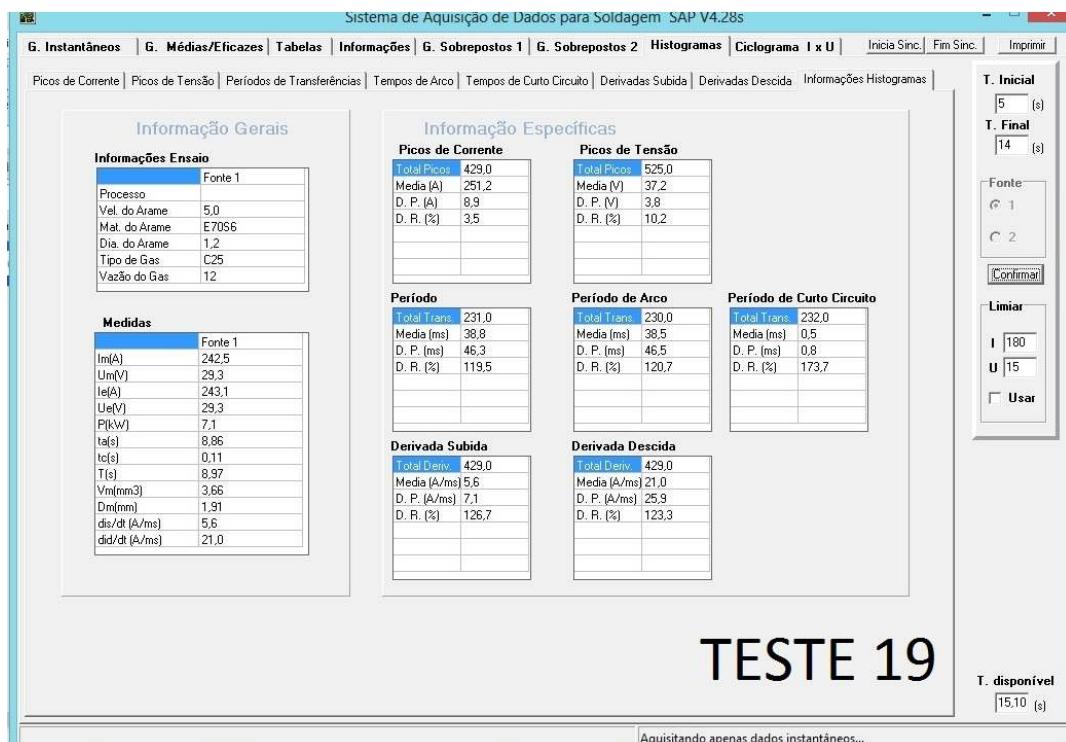


Figura B.19 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 19.

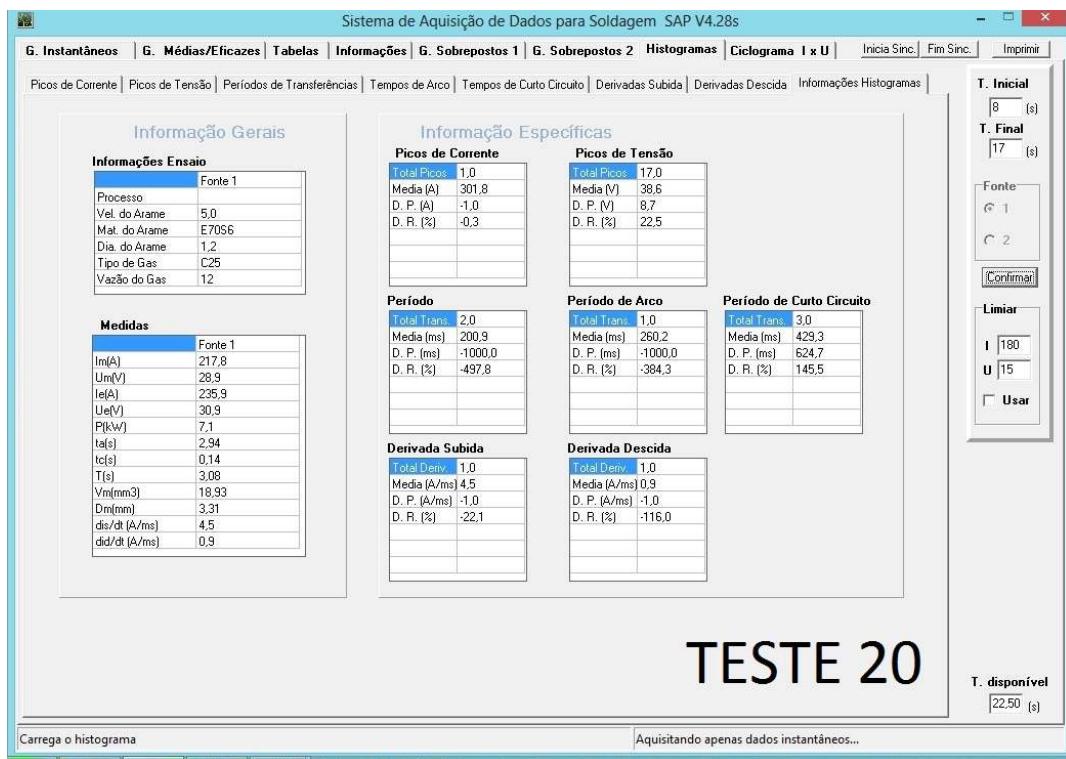


Figura B.20 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 20.

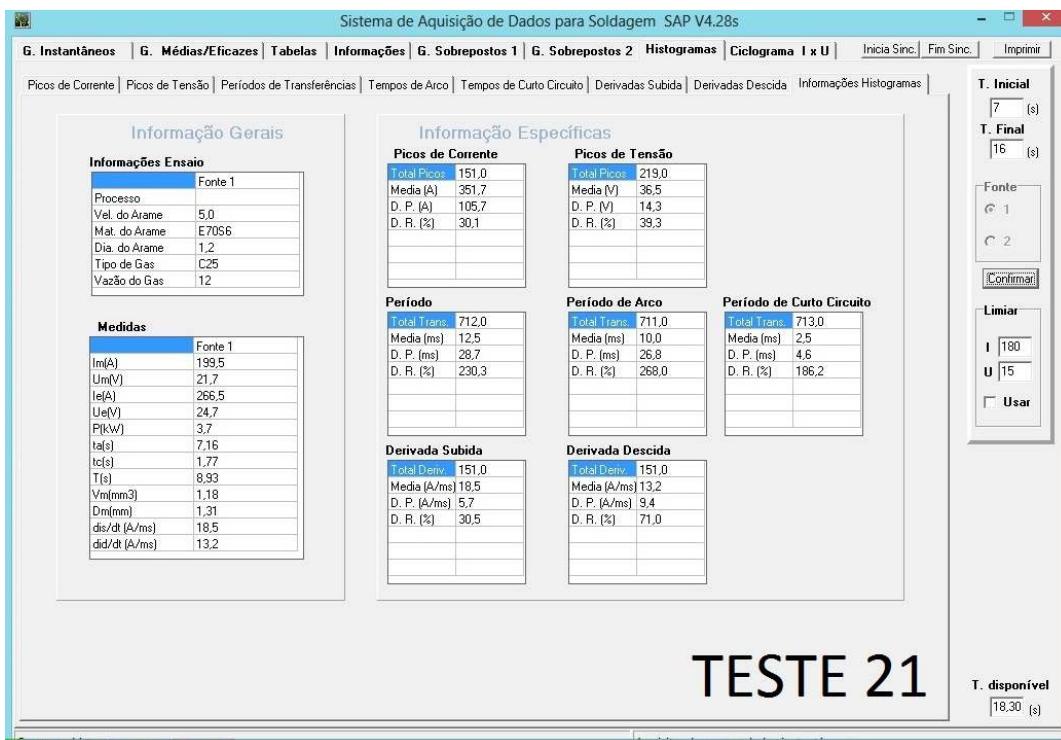


Figura B.21 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 21.

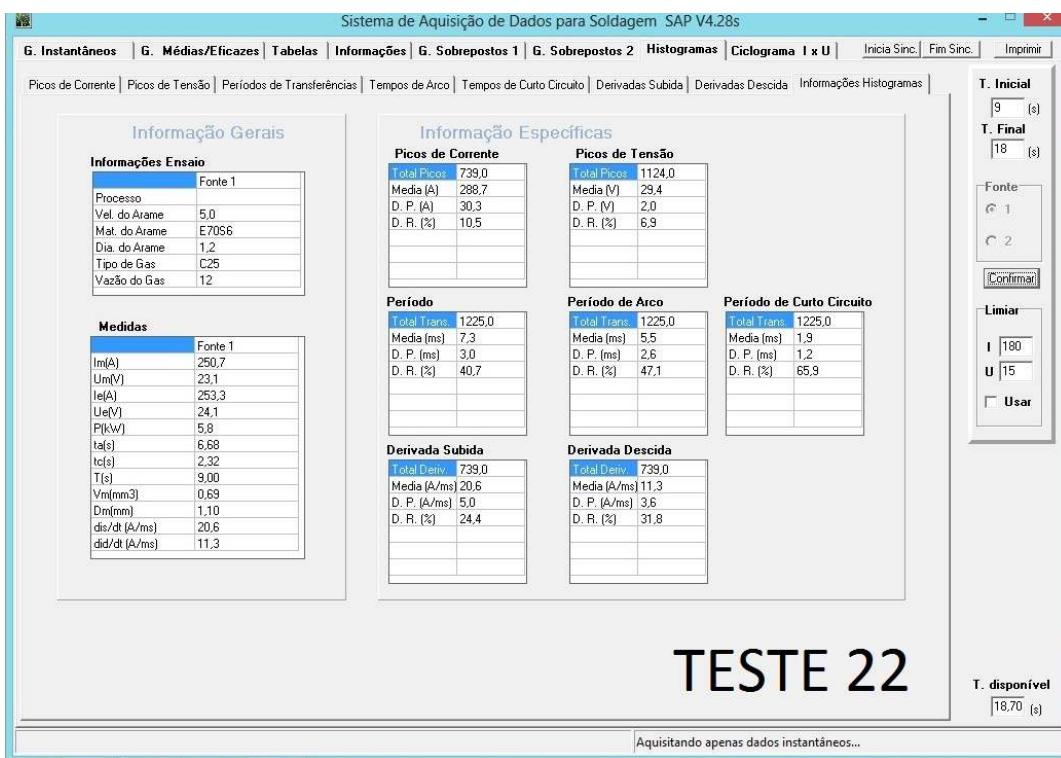


Figura B.22 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 22.

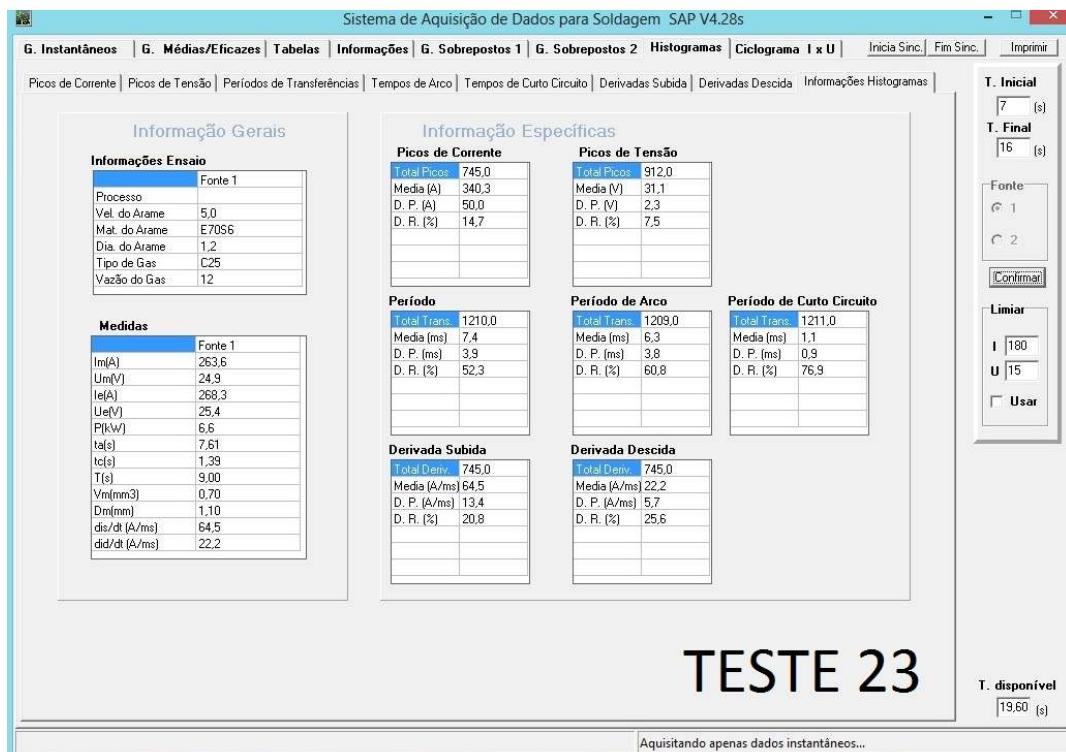


Figura B.23 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 23.

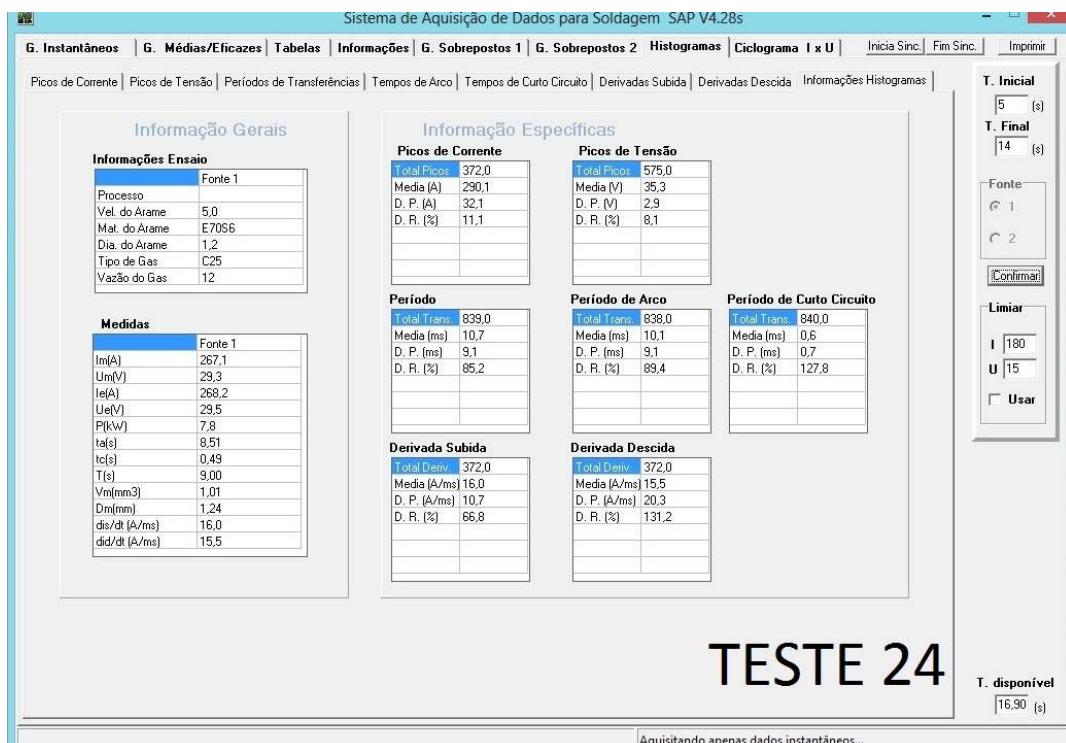


Figura B.24 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 24.

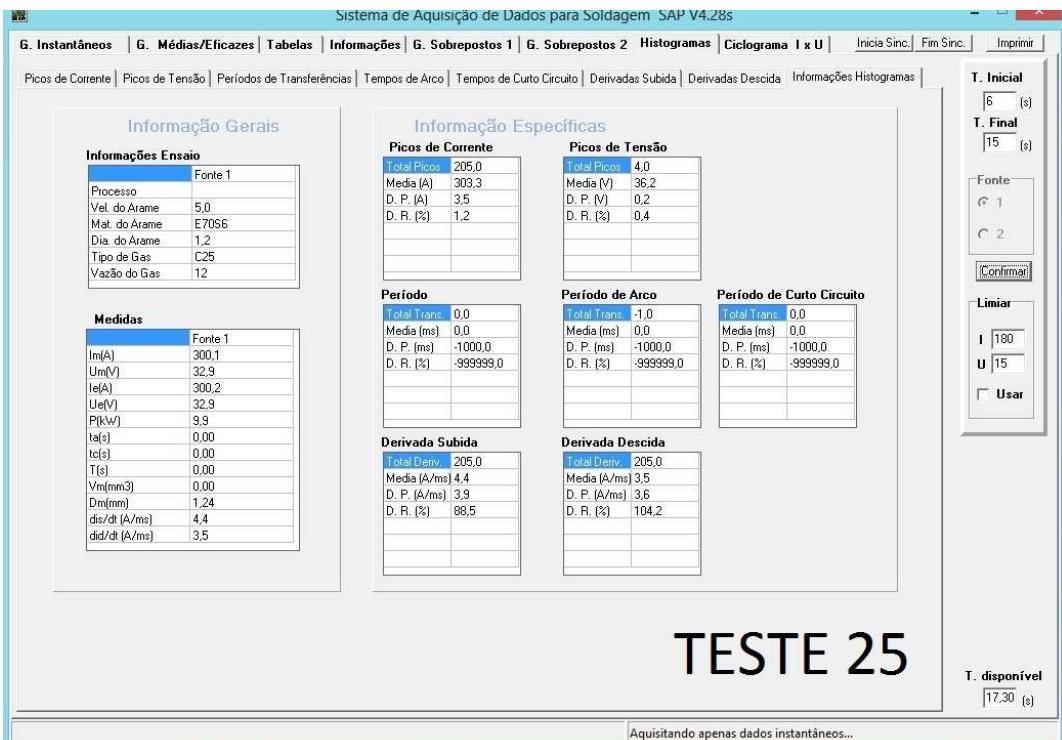


Figura B.25 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDADURA 25.

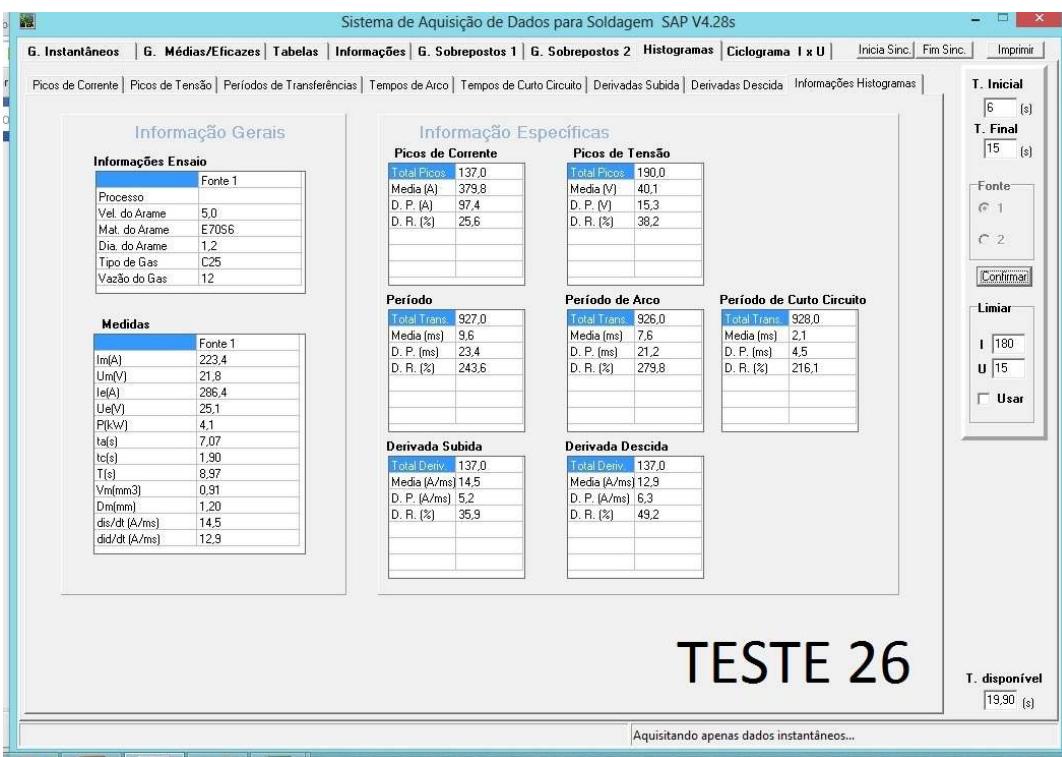


Figura B.26 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDADURA 26.

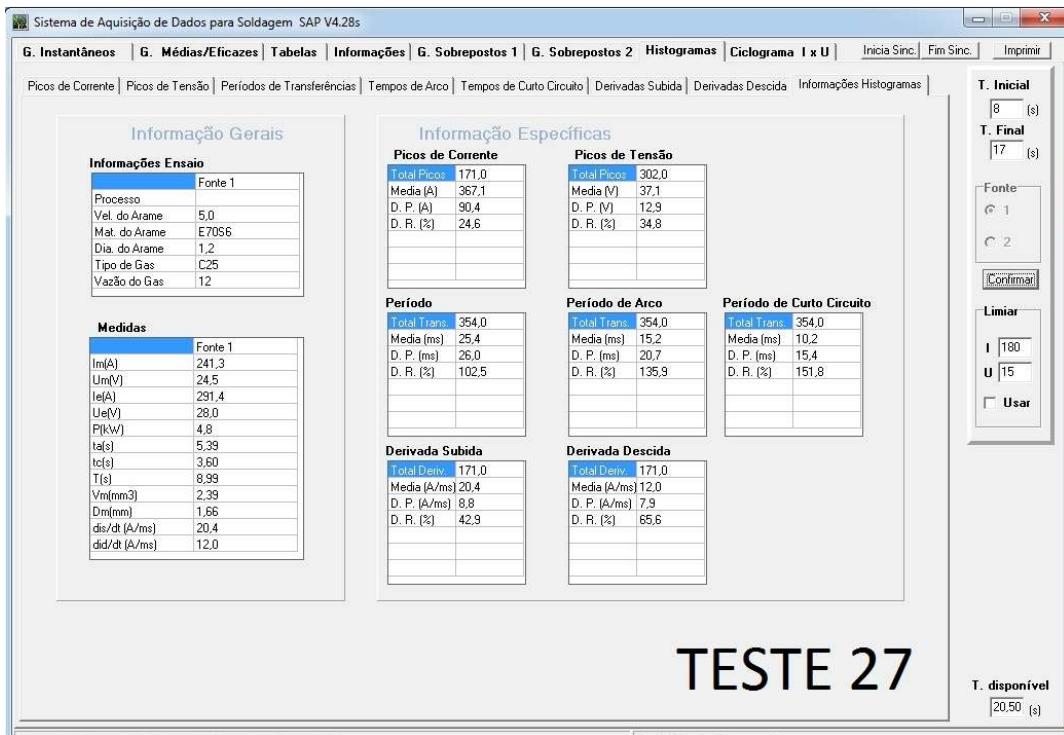


Figura B.27 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDADURA 27.

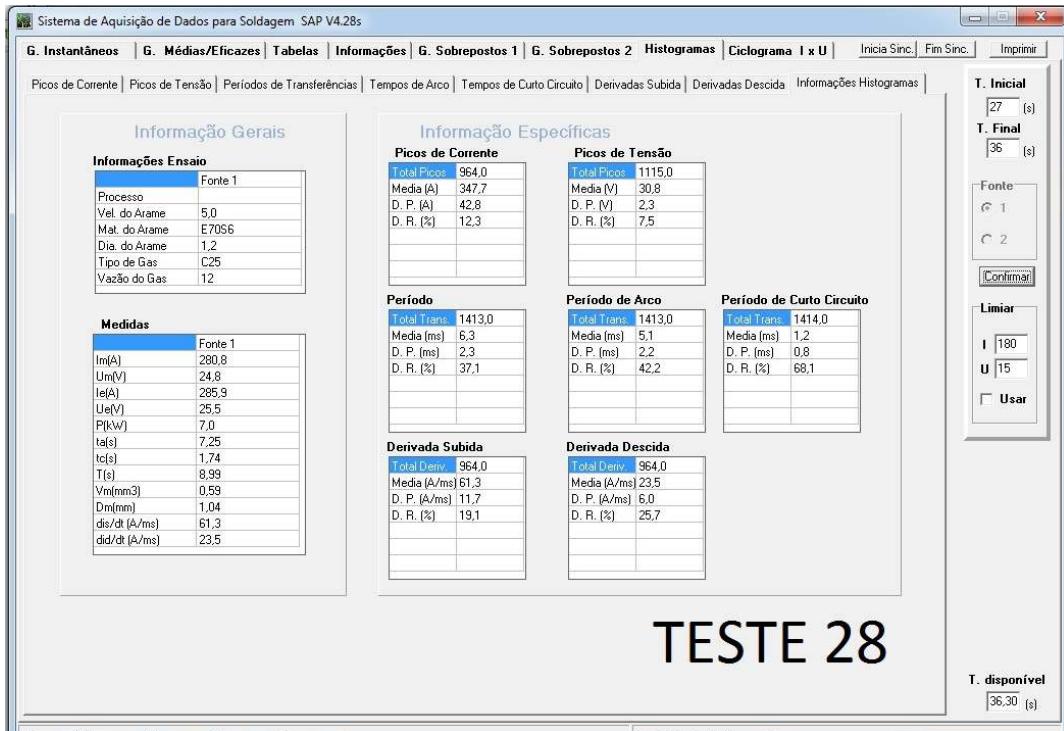


Figura B.28 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDADURA 28.

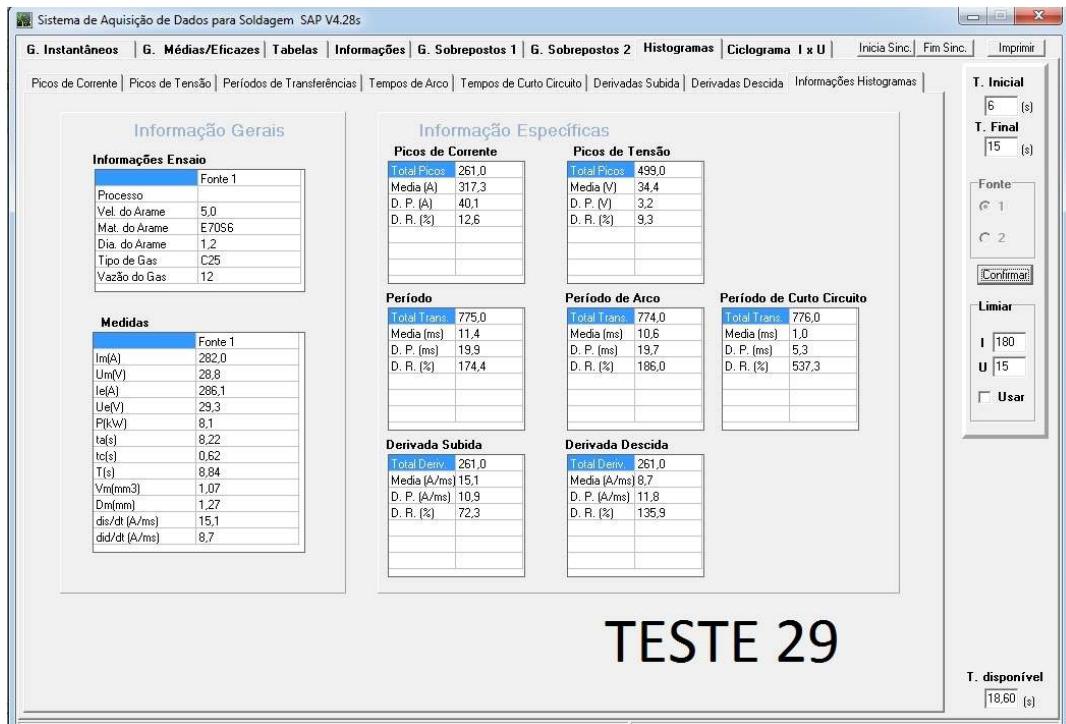


Figura B.29 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 29.

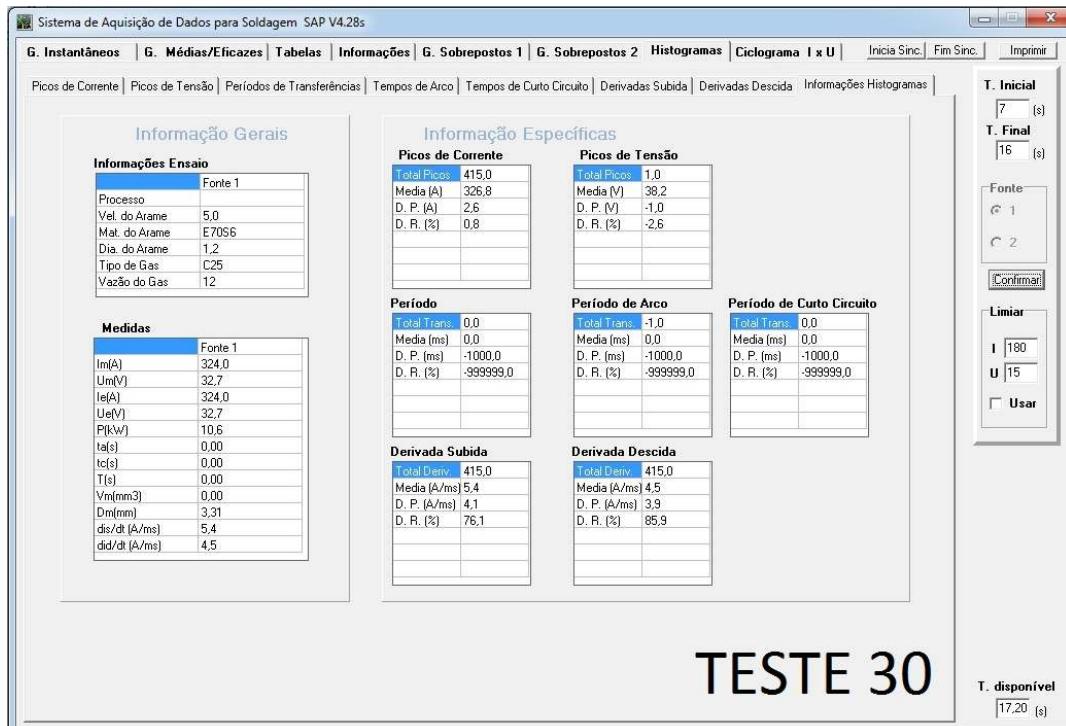


Figura B.30 – INFORMAÇÕES HISTOGRAMAS SAP - SOLDA 30.

ANEXO C - FOTOS DAS SOLDAS

Figura C.1 – Aspectos gerais de todas as chapas e soldas.



Figura C.2 – Aspecto do cordão - SOLDA 1.



Figura C.3 – Aspecto do cordão - SOLDA 2.



Figura C.4 – Aspecto do cordão - SOLDA 3.



Figura C.5 – Aspecto do cordão - SOLDA 4.



Figura C.6 – Aspecto do cordão - SOLDA 5.



Figura C.7 – Aspecto do cordão - SOLDA 6.



Figura C.8 – Aspecto do cordão - SOLDA 7.



Figura C.9 – Aspecto do cordão - SOLDA 8.



Figura C.10 – Aspecto do cordão - SOLDA 9.



Figura C.11 – Aspecto do cordão - SOLDA 10.



Figura C.12 – Aspecto do cordão - SOLDA 11.



Figura C.13 – Aspecto do cordão - SOLDA 12.



Figura C.14 – Aspecto do cordão - SOLDA 13.



Figura C.15 – Aspecto do cordão - SOLDA 14.



Figura C.16 – Aspecto do cordão - SOLDA 15.



Figura C.17 – Aspecto do cordão - SOLDA 16.



Figura C.18 – Aspecto do cordão - SOLDA 17.



Figura C.19 – Aspecto do cordão - SOLDA 18.



Figura C.20 – Aspecto do cordão - SOLDA 19.



Figura C.21 – Aspecto do cordão - SOLDA 20.



Figura C.22 – Aspecto do cordão - SOLDA 21.



Figura C.23 – Aspecto do cordão - SOLDA 22.

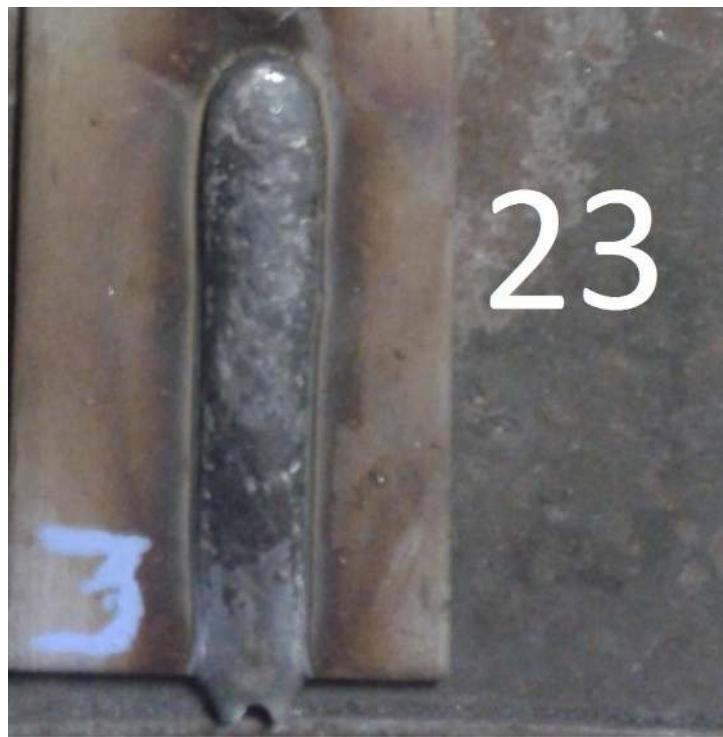


Figura C.24 – Aspecto do cordão - SOLDA 23.



Figura C.25 – Aspecto do cordão - SOLDA 24.



Figura C.26 – Aspecto do cordão - SOLDA 25.



Figura C.27 – Aspecto do cordão - SOLDA 26.



Figura C.28 – Aspecto do cordão - SOLDA 27.

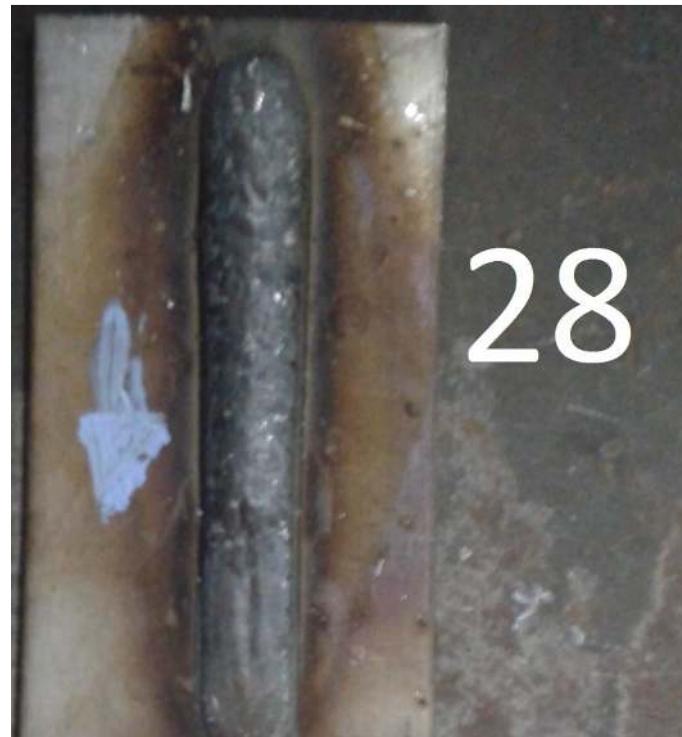


Figura C.29 – Aspecto do cordão - SOLDA 28.



Figura C.30 – Aspecto do cordão - SOLDA 29.



Figura C.31 – Aspecto do cordão - SOLDA 30.