

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGEM

**Estudo da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem
Subaquática com Eletrodos Revestidos**

José Antônio Esmerio Mazzaferro

**Tese para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia**

**Porto Alegre
1998**

**ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA**

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGEM

**Estudo da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem
Subaquática com Eletrodos Revestidos**

José Antônio Esmerio Mazzaferro
Engenheiro Mecânico
Mestre em Engenharia

Trabalho realizado no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (*LS&TC*), Centro de Tecnologia (CT), Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de concentração: Metalurgia da Transformação

Porto Alegre
1998

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia,
Área de Concentração: Metalurgia de Transformação, em 23/07/98 pelo orientador e
pela Banca Examinadora composta por:

Orientador: Prof. Dr. IVAN GUERRA MACHADO
UFRGS - RS

Banca Examinadora: Prof. Dr. NELSON GUEDES DE ALCÂNTARA
UFSCar - SP

Prof. Dr. ALEXANDRE QUEIROZ BRACARENSE
UFMG - MG

Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ KISS
UFRGS - RS

Prof. Dr. RENATO MACHADO DE BRITO
UFRGS - RS

Coordenador do PPGEM
Prof. Dr. LUÍS FREDERICO PINHEIRO DICK

Dedico este trabalho a meus pais,

Valderez Esmerio Mazzaferro e

Moacyr Mazzaferro

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ivan Guerra Machado, pela criteriosa orientação recebida e confiança depositada nestes mais de dez anos de convivência acadêmica.

Ao Prof. Dr. Renato Machado de Brito, pelo projeto e construção do acoplador óptico utilizado neste trabalho, além das sugestões e auxílio constante em questões relacionadas à instrumentação.

Ao Prof. Dr. Milton Antônio Zaro, pela cessão do programa SAD 2 - Sistema de Aquisição de Dados, desenvolvido pelo Eng^o Luciano L.R. Silva. Ao Eng^o Carlos Kern Thomas pelo auxílio na resolução de problemas relativos ao sistema automático de soldagem.

A meu amigo Arnaldo Rubén Gonzales, pelo inestimável auxílio na análise e resolução de problemas, durante o tempo em que trabalhamos juntos.

Aos meus amigos e colegas do LS&TC: Luiz H.M. Zaniratti, e Ricardo G. Mombrú (co-responsáveis pela fabricação da câmara hiperbárica e dispositivos para soldagem subaquática), Cândido N. Postinger, Victor H.V. Acosta, Márcio L.K. de Macedo, Giovani Dalpiaz, Valmor Carnino, Alexandre E. Alves, Ben Hur R. Escobar e Henrique da Silva, pelas inúmeras sugestões, auxílio e inigualável ambiente de trabalho.

À CAPES pelo suporte financeiro.

A minha namorada Luciana Mendes Andrade, pelo constante incentivo, apoio, compreensão e sobretudo paciência, durante estes cinco anos de trabalho árduo. A meus pais que sempre me incentivaram e apoiaram em todas as iniciativas.

A todos os parentes, amigos, funcionários e professores, que direta ou indiretamente colaboraram com a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| RESUMO | i |
| ABSTRACT | ii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | iii |
| ÍNDICE DE TABELAS | xi |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xii |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. TÉCNICAS DE SOLDAGEM SUBAQUÁTICA | 3 |
| 3. PROCESSO DE SOLDAGEM MOLHADA COM ELETRODOS REVESTIDOS | 6 |
| 3.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA SOLDAGEM POR ELETRODOS REVESTIDOS | 7 |
| 3.1.1 Fontes Utilizadas para Soldagem por Eletrodos Revestidos | 7 |
| 3.1.1.1 Salpicos e Transferência do Metal de Solda | 8 |
| 3.1.1.2 Características Estáticas das Fontes para Soldagem com Eletrodos Revestidos | 10 |
| 3.1.1.3 Comportamento Dinâmico das Fontes para Soldagem Manual por Eletrodos Revestidos em Corrente Contínua | 12 |
| 3.1.2 Fontes Utilizadas para Soldagem Molhada com Eletrodos Revestidos | 15 |
| 3.1.3 Porta-eletrodos | 16 |
| 3.1.4 Cabos | 16 |
| 3.2 Problemas Técnicos Relativos à Profundidade | 17 |
| 3.2.1 Penetração e Geometria do Cordão de Solda | 17 |
| 3.2.2 Corrente e Tensão de Soldagem | 18 |
| 3.2.3 Transferência do Metal de Solda | 18 |
| 3.2.4 Dinâmica de Formação de Bolhas | 20 |
| 3.2.5 Porosidade no Metal de Solda | 22 |
| 3.2.6 Composição Química do Metal de Solda | 25 |
| 4. DESENVOLVIMENTO DE ELETRODOS ESPECIAIS PARA SOLDAGEM MOLHADA | 29 |
| 4.1 Características dos Vários Tipos de Eletrodos | 29 |
| 4.2 Constituintes Utilizados no Fluxo de Eletrodos Revestidos | 31 |
| 4.2.1 Classificação dos Tipos de Fluxo de Revestimento de Eletrodos | 31 |
| 4.3 Testes Realizados para Definição do Tipo de Eletrodo Revestido a ser Usado em Soldagem Subaquática. | 33 |
| 4.4 Pesquisas Visando à Melhoria do Desempenho dos Eletrodos Revestidos para Soldagem Subaquática. | 36 |
| 5. TRANSFERÊNCIA DO METAL DE SOLDA NA SOLDAGEM POR ELETRODOS REVESTIDOS | 38 |
| 5.1 O Arco Elétrico | 38 |
| 5.2 Características Elétricas | 39 |
| 5.3 Forças Atuantes na Transferência de Metal do Eletrodo para a Peça | 42 |
| 5.4 Modelos de Transferência do Metal de Solda na Soldagem por Eletrodos Revestidos | 46 |

| | |
|---|------------|
| 5.4.1 Modelo de CONRADY | 46 |
| 5.4.2 Modelo de BECKEN | 47 |
| 5.4.3 Modelo de LARSON | 48 |
| 5.4.4 Modelo de CHEN | 50 |
| 5.5 Classificação dos Modos de Transferência do Metal de Solda | 51 |
| 6. ESTABILIDADE DO ARCO ELÉTRICO NA SOLDAGEM POR ELETRODOS REVESTIDOS | 52 |
| 6.1 Critérios para Caracterização da Estabilidade do Arco Elétrico | 52 |
| 6.1.1 Critérios para Caracterização da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem com Corrente Alternada | 52 |
| 6.1.2 Critérios para Caracterização da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem com Corrente Contínua | 55 |
| 6.1.3 Análise de Fourier | 56 |
| 6.2 Efeito dos Elementos Químicos Componentes do Revestimento do Eletrodo Sobre a Estabilidade do Arco Elétrico | 64 |
| 6.3 Efeito dos Elementos Químicos Componentes do Revestimento do Eletrodo Sobre a Transferência de Metal | 67 |
| 7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 71 |
| 7.1 Equipamento Utilizado | 71 |
| 7.1.1 Câmara para Soldagem Hiperbárica. | 71 |
| 7.1.2 Fonte de Soldagem | 72 |
| 7.1.2.1 Retificador Convencional | 73 |
| 7.1.2.2 Retificador com Controle Eletrônico de Saída | 75 |
| 7.1.2.3 Comparação entre as duas Fontes de Soldagem | 75 |
| 7.1.3 Dispositivo para Soldagem Mecanizada com Eletrodos Revestidos | 79 |
| 7.1.4 Extrusora de Eletrodos | 80 |
| 7.1.5 Equipamentos Auxiliares | 81 |
| 7.1.6 Sistema de Aquisição de dados | 81 |
| 7.1.6.1 Equipamentos | 81 |
| 7.1.6.2 Programas para Aquisição e Análise dos Dados | 84 |
| 7.1.6.3 Calibragem do Sistema de Aquisição de Dados | 85 |
| 7.2 Metal-Base | 86 |
| 7.3 Consumíveis | 86 |
| 7.4 Corpos de Prova | 89 |
| 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 91 |
| 8.1 Inspeção Visual | 91 |
| 8.2 Porosidade | 93 |
| 8.3 Oscilogramas de Corrente e Tensão de Soldagem | 95 |
| 8.4 Índices de Aferição da Estabilidade | 104 |
| 8.5 Análise de Fourier | 120 |
| 8.6 Histogramas de Tensão de Soldagem | 125 |
| 8.7 Composição Química do Revestimento | 126 |
| 9. CONCLUSÕES | 129 |
| 10. BIBLIOGRAFIA | 131 |
| APÊNDICE A | 138 |
| APÊNDICE B | 150 |

| | |
|------------|-----|
| APÊNDICE C | 157 |
| APÊNDICE D | 178 |
| APÊNDICE E | 199 |

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo dos fenômenos físicos envolvidos na soldagem subaquática molhada por eletrodos revestidos, relacionados ao aumento de pressão hidrostática e alterações na composição química do revestimento destes eletrodos, através da análise do comportamento do arco elétrico.

Utilizando uma câmara para soldagem subaquática, foram simuladas soldagens a diferentes profundidades (5,0; 12,5 e 20,0 m) e, tendo como referência um eletrodo revestido previamente desenvolvido no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (**LS&TC**), os teores dos compostos CaCO_3 , TiO_2 e alumínio no revestimento foram alterados. Todas as soldas foram executadas empregando um dispositivo automático de soldagem e utilizando os mesmos parâmetros (corrente, tensão do arco e velocidade de soldagem).

Os efeitos das alterações de condições de soldagem e composição química dos eletrodos revestidos foram avaliados, com base no exame visual das juntas, na medição da porosidade presente no metal de solda e na análise dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem.

Além dos métodos tradicionais de aferição da estabilidade através de índices calculados a partir dos valores instantâneos dos parâmetros de soldagem, propôs-se uma forma de análise com base no espectro de frequências do sinal, obtido através de transformadas de Fourier.

Todos os eletrodos testados apresentaram aumento na taxa e no rendimento de deposição com o aumento da profundidade, comprovando o efeito de aumento na densidade de corrente na coluna do arco causado pelo aumento da pressão hidrostática.

Constatou-se a existência de uma região de transição no modo de transferência, de curtos-circuitos para globular, ocorrendo à profundidade de 12,5 m.

Para as três profundidades de soldagem estudadas neste trabalho, observou-se uma nítida tendência ao aumento da estabilidade do arco elétrico com o aumento da profundidade, facilmente verificada através da análise dos oscilogramas de soldagem e confirmada pela quantidade de defeitos observados através da inspeção visual dos corpos de prova.

Observou-se ainda, que as misturas contendo maiores teores de CaCO_3 mostraram-se marcadamente mais estáveis do que as demais, a pequenas profundidades de soldagem.

ABSTRACT

The main objective of this work was to study the physical phenomenon during underwater wet welding with covered electrodes, related to the increase in hydrostatic pressure and small changes in the electrode coverage chemical composition, by analysing the welding arc behaviour.

Using an hyperbaric chamber, welding operations were simulated at three different depths (5.0; 12.5 and 20.0 m). Using as reference a covered electrode developed in the Welding & Related Techniques Laboratory (LS&TC), the relative amounts of CaCO_3 , TiO_2 and aluminum were changed to evaluate their effects on the final welding quality. The welds were performed by an automatic device and using the same welding parameters (arc current and voltage, and travel speed).

The effect of welding conditions and consumables chemical composition was analysed by visual examination of the weld beads, measurement of porosity amounts in the weld metal and analysis of welding current and voltage signals.

The welding arc signals were analysed using indexes calculated from current and voltage instantaneous values and by the FFT frequency spectrum.

All the electrodes studied have shown increase in deposition rate to the welds performed at greater water depths, confirming the effect of arc constriction and consequent increase in current density motivated by the higher hydrostatic pressure.

A region of transition in metal transfer mode, from short-circuit to globular, was identified, at 12.5 m depth.

For the three different depths studied, a clear tendency of increasing in arc stability, when welding depth became greater, could be noticed. The best quality weld seams were obtained at the higher depth tested.

The electrodes containing additions of calcium carbonate exhibit the best arc stability at lower welding depths.

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura. N° | Descrição | Página |
|------------|--|--------|
| Fig. 3.1 | Desenvolvimento histórico da soldagem ao arco elétrico. | 6 |
| Fig. 3.2 | Curva característica tipo corrente constante ou tombante. | 8 |
| Fig. 3.3 | Formação de salpicos causados pelo curto-circuito entre eletrodo e peça. | 9 |
| Fig. 3.4 | Representação da curva característica produzida por uma fonte de potência com circuito de manutenção do arco. | 10 |
| Fig. 3.5 | Oscilogramas de corrente para diferentes fontes de soldagem. | 13 |
| Fig. 3.6 | Comportamento da curva de potência de soldagem após o curto-circuito. | 14 |
| Fig. 3.7 | Queda de tensão em função do comprimento dos cabos condutores de corrente. | 16 |
| Fig. 3.8 | Forças atuando na soldagem subaquática molhada. | 20 |
| Fig. 3.9 | Efeito da pressão hidrostática sobre a porosidade. | 23 |
| Fig. 3.10 | Efeito da adição de CaCO_3 sobre a porosidade em juntas soldadas a profundidade de 10 m. | 24 |
| Fig. 3.11 | Variação no teor de hidrogênio em função da pressão. | 26 |
| Fig. 3.12 | Variação nos teores de oxigênio e carbono em função da pressão. | 27 |
| Fig. 3.13 | Variação no teor dos elementos de liga em função da pressão hidrostática. | 28 |
| Fig. 5.1 | Distribuição de Potencial (Volts) do arco entre eletrodo e peça. | 40 |
| Fig. 5.2 | Características Volt/Ampère e de transferência percentual de calor de um arco com eletrodo de tungstênio em atmosfera protegida por Argônio. | 41 |
| Fig. 5.3 | Valor do fator de correção $Y(r/c)$ em função da relação r/c para um eletrodo de aço ao carbono. | 43 |
| Fig. 5.4 | Forças envolvidas na transferência do metal de solda durante a soldagem por eletrodos revestidos. | 45 |
| Fig. 5.5 | Mecanismo de transferência do metal de solda proposto por Conrady. | 47 |
| Fig. 5.6 | Mecanismo de transferência do metal de solda proposto por Becken. | 48 |

| | | |
|----------|---|----|
| Fig. 5.7 | Mecanismo de transferência do metal de solda proposto por Larson. | 49 |
| Fig. 5.8 | Macrofotografia e desenho esquemático da ponta de um eletrodo revestido mostrando barreira à manutenção do arco (taça formada pelo revestimento) e bolha gasosa existentes. | 50 |
| Fig. 6.1 | Variação nos parâmetros durante a soldagem em corrente alternada (sem indutância no circuito. I - meio-ciclo positivo, II - meio-ciclo negativo). | 53 |
| Fig. 6.2 | Representação gráfica dos coeficientes de Fourier. | 58 |
| Fig. 6.3 | Variação no comportamento de um eletrodo rutilico durante a soldagem. A - comportamento durante os 1,6 s iniciais; B - após aproximadamente 11 s ; C - após 35 s do início da soldagem. | 63 |
| Fig. 6.4 | Efeitos mútuos de: (a) CaCO_3 , CaF_2 e TiO_2 ; (b) CaCO_3 , CaF_2 e SiO_2 ; sobre a estabilidade do arco. | 65 |
| Fig. 6.5 | Efeitos mútuos de CaCO_3 , CaF_2 e TiO_2 sobre o comprimento de extinção do arco. | 67 |
| Fig. 6.6 | Efeitos da proporção entre CaF_2 e CaCO_3 sobre o tempo de curto-circuito para as seguintes correntes de soldagem: \circ - $I = 120$ A; \bullet - $I = 170$ A. | 68 |
| Fig. 6.7 | Efeitos da proporção relativa entre CaF_2 e CaCO_3 sobre o diâmetro da gota formada na ponta do eletrodo, D_g , e a profundidade da "taça", h_{tc} | 69 |
| Fig. 6.8 | Efeitos do coeficiente de massa do revestimento sobre o tempo de curto-circuito durante a soldagem com eletrodos de 4 mm de diâmetro nas posições plana e sobre-cabeça. | 70 |
| Fig. 7.1 | Fotografia da câmara para soldagem hiperbárica. | 71 |
| Fig. 7.2 | Câmara para soldagem hiperbárica, dimensões principais. | 72 |
| Fig. 7.3 | Diagrama elétrico do retificador Soldarc RS-425NM. | 74 |
| Fig. 7.4 | Curvas características do retificador convencional, para os valores médios de corrente e tensão medidos nas três situações de carga. | 74 |
| Fig. 7.5 | Curva Característica do retificador com controle eletrônico de saída, para os valores médios de corrente e tensão medidos nas três situações de carga. | 75 |
| Fig. 7.6 | Comparação entre as curvas características das duas fontes de soldagem. | 76 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Fig. 7.7 | Comparação entre os sinais de corrente e tensão das duas fontes para os pontos assinalados nas figuras 7.4 e 7.5. | 78 |
| Fig. 7.8 | Dispositivo mecanizado de soldagem. | 80 |
| Fig. 7.9 | Extrusora Berner, modelo UP25. | 80 |
| Fig. 7.10 | Esquema do Sistema de Aquisição de Dados. | 82 |
| Fig. 7.11 | Calibração do sistema de aquisição de dados. | 85 |
| Fig. 7.12 | Fotografias dos eletrodos fabricados. | 88 |
| Fig. 7.13 | Junta de filete com ângulo de 90°. | 90 |
| Fig. 7.14 | Dimensões dos corpos de prova utilizados. | 90 |
| Fig 8.1 | Variação da porosidade com a profundidade de soldagem para cada um dos eletrodos estudados. | 94 |
| Fig 8.2 | Inversos dos desvios padrão relativos da corrente média de soldagem, $\bar{I} / \sigma \bar{I}$, em função da profundidade. | 100 |
| Fig 8.3 | Inversos dos desvios padrão relativos da tensão média de soldagem, $\bar{U} / \sigma \bar{U}$, em função da profundidade. | 101 |
| Fig 8.4 | Taxa de deposição observada, $T_{x_{dep}}$, em função da profundidade de soldagem (m). | 102 |
| Fig 8.5 | Rendimento de deposição observado, ρ_{dep} , em função da profundidade de soldagem (m). | 103 |
| Fig 8.6 | Tela do programa Estab mostrando dois curtos-circuitos típicos. | 108 |
| Fig 8.7 | Valores de tempo, tensão e corrente de reignição do arco. | 109 |
| Fig 8.8 | Número de curtos-circuitos observados, N_{cc} , em função da profundidade de soldagem (m). | 110 |
| Fig 8.9 | Tempo médio de curto-circuito, t_{cc} , em função da profundidade de soldagem (m). | 111 |
| Fig 8.10 | Período médio de curto-circuito, T_{cc} , em função da profundidade de soldagem (m). | 112 |
| Fig 8.11 | Facilidade de ocorrência de curtos-circuitos, F_{cc} , em função da profundidade de soldagem (m). | 114 |
| Fig 8.12 | Facilidade de transferência da gota, F_{tm} , em função da profundidade de soldagem (m). | 115 |
| Fig 8.13 | Regularidade na ocorrência de curtos-circuitos, R_{cc} , em função da | |

| | | |
|----------|---|-----|
| | profundidade de soldagem (m). | 116 |
| Fig 8.14 | Regularidade na transferência de metal, R_{tm} , em função da profundidade de soldagem (m). | 117 |
| Fig 8.15 | Facilidade de passagem de carga elétrica, FE_1 , em função da profundidade de soldagem (m). | 118 |
| Fig 8.16 | Regularidade de passagem de carga elétrica, RE_1 , em função da profundidade de soldagem (m). | 119 |
| Fig 8.17 | FFT das curvas de corrente e tensão de circuito aberto da fonte de soldagem. | 120 |
| Fig 8.18 | Potência relativa no intervalo 0 - 10 Hz x profundidade de soldagem para cada um dos eletrodos estudados. | 123 |
| Fig 8.19 | Potência relativa plotada em diferentes intervalos de frequência. | 124 |
| Fig. B1 | Juntas tipo filete, soldadas com a mistura Base | 150 |
| Fig. B2 | Juntas tipo filete, soldadas com a mistura Al01 | 151 |
| Fig. B3 | Juntas tipo filete, soldadas com a mistura Al02 | 152 |
| Fig. B4 | Juntas tipo filete, soldadas com a mistura Ca01 | 153 |
| Fig. B5 | Juntas tipo filete, soldadas com a mistura Ca02 | 154 |
| Fig. B6 | Juntas tipo filete, soldadas com a mistura Ti01 | 155 |
| Fig. B7 | Juntas tipo filete, soldadas com a mistura Ti02 | 156 |
| Fig. C1 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 5 m. | 157 |
| Fig. C2 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 12,5 m. | 158 |
| Fig. C3 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 20 m. | 159 |
| Fig. C4 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 5 m. | 160 |
| Fig. C5 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 12,5 m. | 161 |
| Fig. C6 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 20 m. | 162 |
| Fig. C7 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 5 m. | 163 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Fig. C8 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 12,5 m. | 164 |
| Fig. C9 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 20 m. | 165 |
| Fig. C10 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 5 m. | 166 |
| Fig. C11 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 12,5 m. | 167 |
| Fig. C12 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 20 m. | 168 |
| Fig. C13 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca02 a profundidade de 5 m. | 169 |
| Fig. C14 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca02 a profundidade de 12,5 m. | 170 |
| Fig. C15 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca02 a profundidade de 20 m. | 171 |
| Fig. C16 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 5 m. | 172 |
| Fig. C17 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 12,5 m. | 173 |
| Fig. C18 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 20 m. | 174 |
| Fig. C19 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti02 a profundidade de 5 m. | 175 |
| Fig. C20 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti02 a profundidade de 12,5 m. | 176 |
| Fig. C21 | Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti02 a profundidade de 20 m. | 177 |
| Fig. D1 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 5 m. | 178 |
| Fig. D2 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 12,5 m. | 179 |
| Fig. D3 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a | |

| | | |
|----------|--|-----|
| | mistura Base a profundidade de 20 m. | 180 |
| Fig. D4 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 5 m. | 181 |
| Fig. D5 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 12,5 m. | 182 |
| Fig. D6 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 20 m. | 183 |
| Fig. D7 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 5 m. | 184 |
| Fig. D8 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 12,5 m. | 185 |
| Fig. D9 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 20 m. | 186 |
| Fig. D10 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 5 m. | 187 |
| Fig. D11 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 12,5 m. | 188 |
| Fig. D12 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 20 m. | 189 |
| Fig. D13 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ca02 a profundidade de 5 m. | 190 |
| Fig. D14 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ca02 a profundidade de 12,5 m. | 191 |
| Fig. D15 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ca02 a profundidade de 20 m. | 192 |
| Fig. D16 | FFT s de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 5 m. | 193 |
| Fig. D17 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 12,5 m. | 194 |
| Fig. D18 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 20 m. | 195 |
| Fig. D19 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ti02 a profundidade de 5 m. | 196 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Fig. D20 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura TiO2 a profundidade de 12,5 m. | 197 |
| Fig. D21 | FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura TiO2 a profundidade de 20 m. | 198 |
| Fig. E1 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 5 m. | 199 |
| Fig. E2 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 12,5 m. | 200 |
| Fig. E3 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 20 m. | 201 |
| Fig. E4 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 5 m. | 202 |
| Fig. E5 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 12,5 m. | 203 |
| Fig. E6 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 20 m. | 204 |
| Fig. E7 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 5 m. | 205 |
| Fig. E8 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 12,5 m. | 206 |
| Fig. E9 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 20 m. | 207 |
| Fig. E10 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 5 m. | 208 |
| Fig. E11 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 12,5 m. | 209 |
| Fig. E12 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 20 m. | 210 |
| Fig. E13 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca02 a profundidade de 5 m. | 211 |
| Fig. E14 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca02 a profundidade de 12,5 m. | 212 |
| Fig. E15 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a | |

| | | |
|----------|---|-----|
| | mistura Ca02 a profundidade de 20 m. | 213 |
| Fig. E16 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 5 m. | 214 |
| Fig. E17 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 12.5 m. | 215 |
| Fig. E18 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 20 m. | 216 |
| Fig. E19 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti02 a profundidade de 5 m. | 217 |
| Fig. E20 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti02 a profundidade de 12,5 m. | 218 |
| Fig. E21 | Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti02 a profundidade de 20 m. | 219 |

ÍNDICE DE TABELAS

| Tabela N° | Descrição | Página |
|-----------|--|--------|
| Tab. 2.1 | Processos/Técnicas de Soldagem Subaquática. | 5 |
| Tab. 3.1 | Dados Técnicos sobre Diversas Fontes de Soldagem. | 11 |
| Tab. 3.2 | Valores característicos para as fontes A, B e C. | 13 |
| Tab. 3.3 | Tensão de Saída das Fontes usadas para Soldagem Subaquática a várias Profundidades e Correntes. | 17 |
| Tab. 4.1 | Condições Operacionais recomendadas para Soldagem e Oxi-Corte Subaquáticos. | 30 |
| Tab. 4.2 | Limites de Composição Química usados na cobertura de Eletrodos Revestidos. | 32 |
| Tab. 4.3 | Composição Química e Função dos Componentes normalmente usados na cobertura de Eletrodos Revestidos. | 33 |
| Tab. 4.4 | Variações de Composição Química das almas e fluxos usados na confecção dos Eletrodos Revestidos de Aço Inoxidável Austenítico. | 35 |
| Tab. 4.5 | Quantidade de Hidrogênio detectado no metal de solda. | 36 |
| Tab. 5.1 | Classificação dos Modos de Transferência do Metal segundo o IIW. | 51 |
| Tab. 6.1 | Processamento dos sinais de tensão da fonte de soldagem usando FFT. | 60 |
| Tab. 7.1 | Composição química do metal-base (% em peso). | 86 |
| Tab. 7.2 | Composição química da massa seca das misturas estudadas (% em peso). | 87 |
| Tab. 7.3 | Análise química dos componentes das misturas (% em peso). | 87 |
| Tab. 8.1 | Código de identificação das soldas. | 91 |
| Tab. 8.2 | Resultados da Inspeção Visual dos Corpos de Prova | 92 |
| Tab. 8.3 | Parâmetros e Condições de Soldagem. | 96 |
| Tab. 8.4 | Análise estatística dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem | 104 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Descrição | Equação |
|-----------------|---|---------|
| a_0, a_k, b_k | Coefficientes de Fourier | 8.5 |
| $A(w)$ | Componente da transformada de Fourier | 8.9 |
| A_1 | Área de entrada da corrente, (mm^2) | 5.5 |
| A_2 | Área de saída da corrente, (mm^2) | 5.5 |
| A_{GO} | Área projetada da gota, (mm^2) | 5.6 |
| B | Índice de aferição da estabilidade do arco elétrico, ($\Omega^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) | 6.2 |
| $B(w)$ | Componente da transformada de Fourier | 8.9 |
| c^2 | Constante de capilaridade = $\sigma / (\rho \cdot g)$ | 5.4 |
| c_{arr} | Coefficiente de arraste para uma esfera, (adimensional) | 3.6 |
| C | Capacitância do circuito, (Farad) | 6.1 |
| C_A | Coefficiente de atrito, (adimensional) | 5.6 |
| [C%] | Teor de Carbono diluído no metal de solda, (ppm) | 3.9 |
| d | Diâmetro do eletrodo, (mm) | 5.4 |
| d_{h_b} | Diâmetro das bolhas na profundidade h_B , (m) | 3.6 |
| d_D | Diâmetro das bolhas na profundidade h_{arco} , (m) | 3.7 |
| d_p | Densidade do plasma, (kg/m^3) | 5.6 |
| D_{arco} | Diâmetro do arco, (mm) | 3.8 |
| $D_{poça}$ | Diâmetro da poça de fusão, (mm) | 3.8 |
| E | Energia de soldagem, (KJ/mm) | cap. 8 |
| E_i | Queda de Potencial no ânodo, (V) | 5.2 |
| E_c | Queda de Potencial no cátodo, (V) | 5.2 |
| E_p | Queda de Potencial no plasma, (V) | 5.2 |
| E_1 | Energia média de reignição do arco, após a ocorrência de curto-circuitos, (W.s) | 6.10 |
| f | Frequência, (Hz) | 6.4 |
| $f(x)$ | Valor da FFT calculado no ponto x. | 8.1 |
| f_D | Fator de diluição ($f_D = (D_{arco} / D_{poça})^2$), (adimensional) | 3.8 |
| F_A | Força devido ao arraste do plasma e do gás de proteção, (N) | 5.6 |

| | | |
|--------------|--|------|
| F_E | Força eletromagnético (efeito "pinch") , (N) | 5.5 |
| FE_i | Índice que mede a facilidade da passagem de carga elétrica entre eletrodo e peça, ($W^{-1}.s^{-1}$) | 6.10 |
| F_{cc} | Índice que mede a facilidade de ocorrência de curto-circuitos entre eletrodo e peça, (s^{-1}) | 6.6 |
| F_G | Força devida à ação da gravidade, (N) | 5.3 |
| F_{tm} | Índice que mede a facilidade de transferência da gota de metal durante os curto-circuitos, (s^{-1}) | 6.7 |
| F_{TS} | Força devida à tensão superficial, (N) | 5.4 |
| g | Aceleração da gravidade, (m/s^2) | 3.6 |
| h | Constante de Planck, ($= 6.6256 \times 10^{-34}$ J.s) | 5.1 |
| h_B | Profundidade da bolha, (m) | 3.6 |
| h_{arco} | Profundidade do arco, (m). | 3.7 |
| H_N | Potência relativa da curva no intervalo (N-5, N) | 8.1 |
| $[H]_{calc}$ | Conteúdo de hidrogênio dissolvido no metal de solda, (ppm) | 3.8 |
| $[H]_i$ | Conteúdo de hidrogênio no metal de solda à pressão atmosférica, (ppm) | 3.8 |
| I | Corrente de soldagem, (A) | 5.2 |
| I_{min} | Valor mínimo da corrente após o curto-circuito, (A) | 3.1 |
| I_N | Corrente nominal de soldagem, (A) | 8.1 |
| I_{DC} | Valor médio da corrente de soldagem, (A) | 3.1 |
| I_{rms} | Raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da corrente instantânea de soldagem, (A). | |
| I_i | Corrente entre eletrodo e peça no momento de reignição do arco, após a mudança de polaridade, (A) | 6.2 |
| \bar{I}_i | Corrente média de reignição do arco, (A) | |
| k | Constante de Boltzmann, ($=1.38 \times 10^{-23}$ J/K) | 5.1 |
| K_{CO} | Constante de equilíbrio, (%) | 3.9 |
| m | Parâmetro que relaciona oxigênio dissolvido e carbono com monóxido de carbono a pressão parcial P_{CO} , (ppm) | 3.9 |
| m_e | Massa do elétron, (9.108×10^{-31} kg) | 5.1 |
| n | Número de elementos do conjunto de dados | 8.1 |

| | | |
|-----------------------|---|------|
| n_e, n_i, e e n_0 | Densidades de partículas (número por unidade de volume de elétrons, íons e átomos neutros, respectivamente) | 5.1 |
| N | Frequência, Hz (5, 10, 15, ..., X_{MAX}) | 8.1 |
| [O%] | Teor de oxigênio diluído no metal de solda, (ppm) | 3.9 |
| P_{atm} | Pressão atmosférica, (N/m ²) | 3.7 |
| P | Pressão de trabalho, (N/m ²) | 3.5 |
| P_W | Potência, (W) | 5.2 |
| P_{arco} | Pressão do arco medida à pressão atmosférica, sem constrição do arco, (N/m ²) | 3.8 |
| P_{CO} | Pressão parcial de monóxido de carbono dissolvido no metal de solda, (N/m ²) | 3.9 |
| P_{eff} | Pressão parcial efetiva dos gases que contém umidade, (N/m ²) | 3.8 |
| P_{hab} | Pressão do vapor, (N/m ²) | 3.8 |
| P_{min} | Valor mínimo da potência de soldagem, (W) | 3.4 |
| P_R | Potência de referência, (W) | 6.10 |
| P_0 | Potência média das perdas para o ambiente, (W) | 6.1 |
| P_1 | Potência média de reignição do arco, após a ocorrência de curto-circuitos, (W) | 6.10 |
| P_{10} | Potência média no intervalo de tempo de 10 ms posterior ao curto-circuito, (W) | 3.2 |
| P_{DC} | Valor médio da potência de soldagem, (W) | 3.2 |
| Q_0 | Potência dos corpos entre os quais é estabelecido o arco elétrico, (W) | 6.1 |
| r | Raio do eletrodo = $d / 2$, (mm) | 5.4 |
| r_f | Característica da fonte de soldagem, (adimensional) | 3.2 |
| R_{cc} | Índice que mede a regularidade de ocorrência de curto-circuitos entre eletrodo e peça, (adimensional) | 6.8 |
| RE_1 | Índice que mede a regularidade da passagem de carga elétrica entre eletrodo e peça, (adimensional) | 6.11 |
| R_{tm} | Índice que mede a regularidade de transferência da gota de metal durante os curto-circuitos, (adimensional) | 6.9 |
| R_0 | Resistência do espaço entre eletrodo e peça, (Ω) | 6.1 |

| | | |
|---------------|--|--------|
| S_{max} | Máxima solubilidade do hidrogênio a altas temperaturas. (ppm) | 3.8 |
| t | Tempo. (s) | 8.1 |
| t_1 | Tempo necessário para reestabelecer o arco, após a mudança de polaridade. (s) | 6.2 |
| \bar{t}_1 | Tempo médio de reignição do arco, após a ocorrência de curto-circuitos. (ms) | 6.10 |
| T | Temperatura absoluta. (K) | 3.5 |
| T_{cc} | Período médio de curto-circuito, (ms) | 6.6 |
| t_{cc} | Tempo médio do curto-circuito, (ms) | 6.7 |
| $T_{X_{dep}}$ | Taxa de deposição do eletrodo. (Kg/h) | cap. 8 |
| \bar{U} | Tensão média de soldagem, (V) | |
| U_{rms} | Raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da tensão instantânea do arco, (V). | |
| U_{CA} | Tensão de circuito aberto, (V) | 6.3 |
| U_p | Velocidade do plasma, (m/s) | 5.6 |
| U_0^{min} | Tensão em vazio mínima, (V) | 6.5 |
| U_1 | Tensão entre eletrodo e peça no momento de reignição do arco, após a mudança de polaridade, (V) | 6.2 |
| \bar{U}_1 | Tensão média de reignição do arco, (V). | |
| U_1^+ | Média dos picos de tensão no momento da reignição, no meio ciclo positivo, (V) | 6.5 |
| v | Velocidade de soldagem, (mm/s) | cap. 8 |
| V | Volume da gota, (mm ³) | 5.3 |
| V_{ASC} | Velocidade de ascensão da bolha, (m/s) | 3.6 |
| V_B | Volume de uma bolha gasosa, (mm ³) | 3.5 |
| V_i | Potencial de ionização do átomo neutro, (V) | 5.1 |
| w | Frequência angular, (rad/s) | 6.3 |
| $x(t)$ | Função periódica do tempo | 8.4 |
| x_{MAX} | Valor máximo no eixo das abscissas do gráfico Frequência x Amplitude | 8.1 |

| | | |
|---------------------|---|--------|
| Z_i e Z_o | Funções de partição para íons e partículas neutras | 5.1 |
| ρ | Peso específico do metal | 5.3 |
| ρ_A | Peso específico da água, (kg/m^3) | 3.6 |
| ρ_B | Peso específico da bolha, (kg/m^3) | 3.6 |
| ρ_{dep} | Rendimento de deposição do eletrodo, (%) | cap. 8 |
| ρ_f | Característica da fonte de soldagem, (adimensional) | 3.1 |
| σ | Tensão superficial, (N/m) | 5.4 |
| σI | Desvio padrão da corrente média de soldagem, (A) | cap. 8 |
| $\sigma_{i_{cc}}$ | Desvio padrão da raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da energia média de reignição do arco, (W.s) | 6.11 |
| σT | Desvio padrão da raiz quadrada da média aritmética dos quadrados do período, (ms) | 6.8 |
| $\sigma_{t_{cc}}$ | Desvio padrão da raiz quadrada da média aritmética dos quadrados do tempo de curto-circuito, (ms) | 6.9 |
| $\sigma \bar{U}$ | Desvio padrão da tensão média de soldagem, (V) | cap. 8 |
| σU_1^+ | Desvio padrão dos valores de U_1^+ , (V) | 6.5 |
| $\Psi(r/c)$ | Fator de correção | 5.4 |
| θ | Constante de tempo do arco | 6.1 |
| φ | Ângulo de fase entre corrente e tensão de circuito aberto, (rad) | 6.3 |

1 INTRODUÇÃO

Embora a soldagem subaquática com eletrodos revestidos já venha sendo empregada desde o início do século, sua utilização começou a ser intensificada apenas na década de 60, para atender as necessidades da indústria petrolífera. Os desenvolvimentos nesta área têm ocorrido principalmente devido às pesquisas de empresas que realizam esse tipo de serviço. Inicialmente, a execução de soldas em ambiente molhado era considerada um método emergencial para resolver temporariamente problemas críticos, até que fosse possível remover o equipamento para realizar a solda definitiva, em ambiente seco. Porém, com o desenvolvimento de eletrodos especiais e técnicas específicas para soldagem submarina, a qualidade destas soldas tem conseguido atingir os padrões de aceitação exigidos pelas normas de soldagem subaquática, e o seu emprego tem significado consideráveis economias, em comparação com os métodos empregados anteriormente.

Em 1975 foi executada a recuperação do Cruzador da Marinha Americana "USS Newport News", [/1/](#), que exigia o fechamento de 62 aberturas no casco do navio. Essa operação foi executada em 53 dias de trabalho por uma equipe de 18 mergulhadores/soldadores, totalizando um consumo de cerca de 225 kg de eletrodos em 504 homens-hora de trabalho. O custo total representou uma economia de 50% comparativamente ao custo de execução do mesmo trabalho em doca seca.

Outro exemplo de aplicação exigindo "soldagem molhada" com qualidade do código ANSI/AWS D 3.6, [/2/](#), inclui reparos e manutenção de instalações nucleares. Em 1990, [/3/](#), essa técnica foi utilizada para eliminar uma pequena fissura na chapa da camisa do canal de transporte de combustível na planta nuclear de "Wolf Creek", Kansas. Neste caso, toda a operação de reparo foi efetuada em dois dias, sendo que o mergulhador não passou mais de 3,5 horas dentro d'água executando soldagem e inspeção. Se o mesmo serviço fosse realizado a seco, uma equipe de seis homens levaria seis dias para drenagem e descontaminação, um dia para inspeção e reparos e mais dois dias reenchendo o reservatório. A execução do reparo através da técnica de soldagem molhada reduziu em 80% os custos estimados e diminuiu grandemente os riscos de exposição do pessoal envolvido na operação.

Esses exemplos mostram claramente que o atual estágio de evolução da tecnologia de soldagem subaquática permite a execução de soldas de responsabilidade, visando principalmente a redução de custos. Desta forma, a utilização dessa técnica deve aumentar

sensivelmente nos próximos anos, fazendo com que os requisitos de qualidade sejam cada vez mais severos.

É com o intuito de colaborar no desenvolvimento e avaliação de novos eletrodos que este trabalho foi desenvolvido. Embora as pesquisas nesta área tenham evoluído extraordinariamente nos últimos anos, existem alguns assuntos que ainda não mereceram a devida atenção dos pesquisadores. Por exemplo, quando se tenta caracterizar o desempenho de eletrodos revestidos para soldagem molhada, são sempre levados em consideração aspectos como aparência do cordão, nível de porosidades, absorção de hidrogênio, propriedades mecânicas e facilidade no manuseio. Essa última propriedade determinará a técnica de soldagem a ser utilizada pelo soldador/mergulhador e pode ser caracterizada pela estabilidade do arco elétrico proporcionada pelo eletrodo durante a soldagem.

Exatamente neste ponto começa a falta de informação. Normalmente, quando se cita a estabilidade do arco de determinado eletrodo em soldagem molhada, essa característica é avaliada de uma forma empírica, através da opinião do operador ou como sendo “*a capacidade do eletrodo ser depositado inteiramente, sem interrupção, ou, no caso de extinção do arco, sua re-ignição imediata*”, [4]. A falta de critérios objetivos de avaliação dificulta a comparação entre eletrodos diferentes e retarda o desenvolvimento de eletrodos com melhor desempenho em relação a esta importante característica.

No presente trabalho, pretendeu-se estabelecer critérios objetivos de avaliação da estabilidade do arco elétrico em soldagem subaquática com eletrodos revestidos e, através destes critérios, caracterizar eletrodos desenvolvidos especialmente para soldagem molhada. Procurou-se ainda avaliar o comportamento dos eletrodos a diferentes profundidades, como forma de estabelecer o efeito da variação de pressão hidrostática sobre esta estabilidade e melhor compreender os fenômenos físicos envolvidos.

Além disso, partindo-se de um eletrodo cuja composição química do revestimento foi adotada como padrão, foram feitas mudanças na formulação básica alterando os teores de alguns componentes e observando sua influência sobre a qualidade final da junta soldada.

2 TÉCNICAS DE SOLDAGEM SUBAQUÁTICA

Os métodos de soldagem subaquática, quanto à técnica empregada, dividem-se em duas categorias: soldagem molhada e soldagem seca, *[5 - 7]*.

O termo “soldagem molhada” é usado para indicar que a operação é realizada diretamente em contato com a água. O gás de proteção proveniente da queima do fluxo de revestimento é responsável pela estabilização da coluna do arco e proteção do metal transferido. Uma pequena coifa pode ser usada como método alternativo para evacuar a água próxima à região da junta. A maior vantagem desta técnica é a sua simplicidade e possibilidade de execução de soldas em diversas posições e em geometrias complexas. Os maiores problemas verificados na soldagem molhada são provenientes do rápido resfriamento causado pela água, o que gera microestruturas frágeis; e retenção do hidrogênio causando porosidade e condições favoráveis à ocorrência de trincas induzidas pelo hidrogênio.

Por outro lado, a técnica de soldagem subaquática seca pode ser dividida em:

⇒ *Solda em habitat de soldagem seco a uma atmosfera:*

A soldagem é executada em grandes câmaras, das quais a água é retirada, e a pressão reduzida a uma atmosfera, independente da profundidade de trabalho. Neste tipo de solda, podem ser obtidas juntas de qualidade comparável àsquelas realizadas na superfície, sem os problemas existentes no caso da soldagem molhada.

⇒ *Solda em habitat de soldagem seco hiperbárico:*

Nesse caso a solda também é realizada em uma câmara da qual a água é retirada, porém, à pressão ambiente. A qualidade das soldas também é comparável àsquelas realizadas na superfície, porém, em relação à soldagem em habitat seco, existem os problemas de constrição e instabilidade do arco causados pelo aumento de pressão hidrostática.

⇒ *Solda em mini-habitat seco de soldagem hiperbárico:*

Neste caso a solda é realizada em uma pequena câmara seca com capacidade de acomodar apenas a cabeça e ombros do soldador/mergulhador.

⇒ *Solda em pequena área seca:*

A região da solda é protegida por uma pequena câmara transparente, cheia de gás, com um orifício para passagem do eletrodo. Nessa técnica de soldagem, o soldador/operador permanece na água.

A Norma ANSI/AWS D 3.6, [2], define quatro classes de soldas: A, B, C e O. Para cada uma destas classes existe um nível de aplicabilidade e um conjunto de propriedades exigíveis da junta, os quais devem ser verificados durante a qualificação, através de ensaios mecânicos, inspeção visual e ensaios não destrutivos, definindo os requisitos que devem ser observados durante a construção.

A classe "A" define um conjunto de requisitos para soldas subaquáticas com aplicação estrutural. Esse tipo de qualificação é aplicado para juntas projetadas para resistir a níveis de tensão comparáveis àqueles encontrados nas soldas realizadas na superfície. Esses critérios só são atingidos por soldas subaquáticas realizadas em câmara seca.

Soldas subaquáticas da classe "B" são definidas por um conjunto intermediário de requisitos mecânicos e de inspeção, próprios para aplicações estruturais limitadas. Nesta classe de soldas podem ser tolerados ductilidade mais baixa, maior nível de porosidades e outras descontinuidades maiores. Esses requisitos podem ser atingidos em soldagem molhada.

Soldas da classe "C" são as de pior qualidade, mas devem ser livres de trincas e executadas de acordo com um procedimento de soldagem qualificado para aplicações em que a qualidade estrutural não é crítica.

Quaisquer juntas soldadas executadas dentro da água que, segundo especificações de projeto, devam atingir os requisitos de outras normas ou códigos (não específicos para soldagem subaquática), são classificadas pela ANSI/AWS D 3.6 como de classe "O". Esta qualidade normalmente é atingida apenas nas soldas realizadas em ambiente seco.

A Tab. 2.1 apresenta uma síntese dos principais processos/técnicas de soldagem subaquática empregados atualmente.

Tabela 2.1 - Processos/Técnicas de Soldagem Subaquática. [7].

| Processo | Aplicações | Limitações |
|---|---|--|
| Técnicas de Soldagem Molhada | | |
| A. Soldagem por Eletrodos Revestidos | Soldas complexas, juntas em "T" ou de topo. Alta versatilidade. Permite a execução de soldas multi-passe. | <ul style="list-style-type: none"> - Difícil visibilidade (a formação de bolhas atrapalha a visibilidade do soldador) - Posicionamento do soldador/operador (deve soldar e nadar ao mesmo tempo) - Resfriamento rápido - Altas quantidades de hidrogênio retido - Descontinuidades provenientes das paradas para troca de eletrodos |
| B. Soldagem por Eletrodos Revestidos em pequena área seca | Juntas pouco uniformes. Apenas um passe. Baixa versatilidade. | <ul style="list-style-type: none"> - Difícil visibilidade - Posicionamento do soldador/operador - Resfriamento rápido - Altas quantidades de hidrogênio retido - Descontinuidades provenientes das paradas para troca de eletrodos |
| C. Soldagem por Plasma | Juntas de topo, sobrepostas ou em "T". Boa aparência do cordão. Boa penetração. | <ul style="list-style-type: none"> - Baixa velocidade de soldagem - Difícil visibilidade - Posicionamento do soldador/operador - Resfriamento rápido - Moderada complexidade do equipamento. |
| D. MIG / MAG | Juntas de topo, sobrepostas ou em "T". Soldas multi-passe. Qualidade superior à obtida com eletrodos revestidos. | <ul style="list-style-type: none"> - Difícil visibilidade - Posicionamento do soldador/operador - Resfriamento rápido - Altas quantidades de hidrogênio retido |
| Técnicas de soldagem em câmara seca. | | |
| E. Câmara Móvel | Junta deve ser uniforme: juntas de topo e filete. Possibilidade de soldar tubulações. Soldas multi-passe. Alta qualidade do metal de solda. | <ul style="list-style-type: none"> - Difícil visibilidade - Posicionamento do soldador/operador - Equipamento complexo - Grande manutenção (há necessidade de uma grande área adjacente à junta). |
| F. Câmara Fixa | Esse tipo de solda normalmente é empregado na soldagem de tubulações marinhas submersas para transporte de petróleo. Alta qualidade do metal de solda obtido. | <ul style="list-style-type: none"> - Alto custo associado a essas operações - Relativa imobilidade das câmaras hiperbáricas, e sua pouca flexibilidade. |

3 PROCESSO DE SOLDAGEM MOLHADA COM ELETRODOS REVESTIDOS

Desde a primeira descrição do arco elétrico feita por Sir Humphry Davy na Inglaterra, em 1809, /8 - 10/, até que se desenvolvessem os primeiros eletrodos revestidos, na forma como são conhecidos atualmente, passou-se um século. Nestes primeiros eletrodos, o revestimento tinha menor espessura e atuava mais como estabilizante do arco do que como purificador do metal de solda. Desde então, outros processos foram desenvolvidos (Fig. 3.1), e inúmeros pesquisadores trabalharam com o intuito de transformar em ciência a "arte" da soldagem. Atualmente a quantidade de informações disponíveis sobre o assunto, além do surgimento de novas fronteiras, como a necessidade de exploração dos ambientes espacial e marinho, têm contribuído para tornar cada vez mais específicas e aplicadas as pesquisas realizadas para o desenvolvimento de novos processos, métodos e técnicas de soldagem.

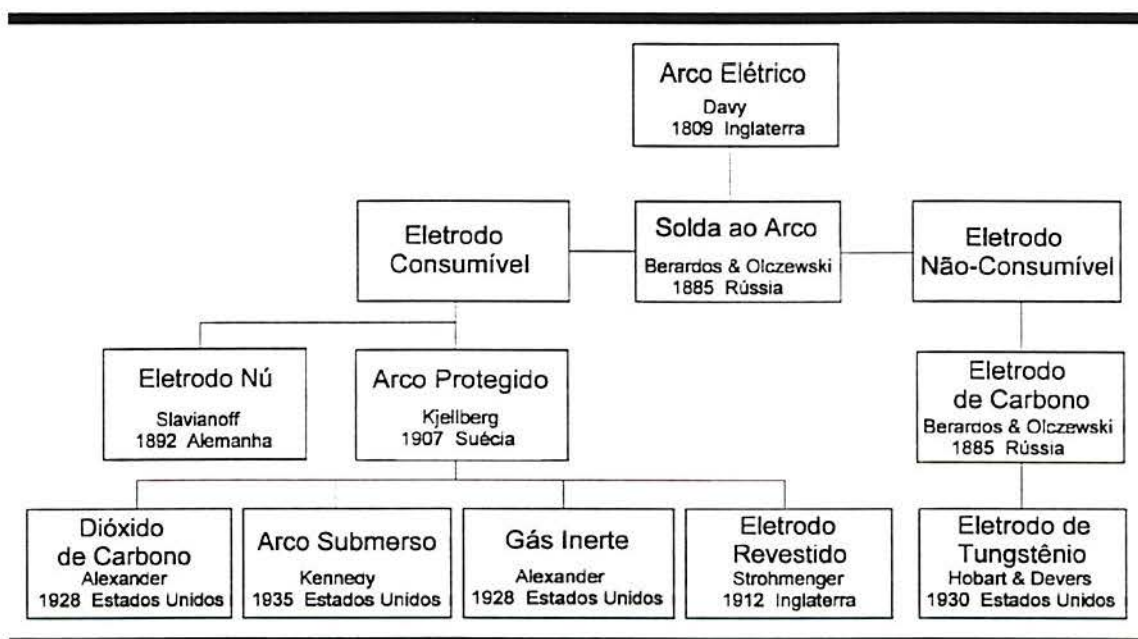


Fig. 3.1 - Desenvolvimento Histórico da soldagem ao Arco Elétrico, /8/.

Durante as décadas de 70 e 80, foram realizados grandes esforços no desenvolvimento de técnicas e processos capazes de melhorar a qualidade das juntas soldadas em ambiente aquático, como por exemplo: bocal com malha de arames de inox, /11/, soldagem pelo processo MIG/MAG com cavidade local, /12, 13/. Nessas pesquisas foram obtidos resultados promissores quanto as propriedades mecânicas, mas não se mostraram práticos e eficientes

como alternativa operacional viável para substituir o tradicional processo de soldagem molhada por eletrodos revestidos. Esse processo é caracterizado por. /4, 14/:

⇒ “Instabilidade do arco”, causando geometria irregular do cordão, inclusões e porosidades;

⇒ Altas taxas de resfriamento do metal de solda, resultando em elevada dureza na ZAC (zona afetada pelo calor) e baixa tenacidade no metal de solda e ZAC;

⇒ Formação de hidrogênio a partir da dissociação da água, causando porosidades, fragilização e trincas induzidas por hidrogênio;

⇒ Desintegração/dissolução do fluxo ou ineficiência do revestimento protetor (contra absorção de água durante a soldagem), gerando porosidade;

⇒ Dificuldade de visualização da região da junta em função da grande formação de bolhas;

⇒ Alta pressão (com o aumento de profundidade), que causa penetração de água no revestimento e constrição do arco com conseqüente dificuldade de manuseio.

3.1 Equipamento Utilizado para Soldagem por Eletrodos Revestidos

O equipamento completo recomendado para soldagem molhada por eletrodos revestidos inclui os seguintes itens: fonte de soldagem, porta-eletrodos e cabos de transmissão de energia elétrica. A seguir serão descritas as características desejáveis de cada um desses componentes, principalmente quanto à sua utilização para soldagem subaquática.

3.1.1 Fontes Utilizadas para Soldagem por Eletrodos Revestidos

As fontes de potência normalmente utilizadas para soldagem manual por eletrodos revestidos apresentam curva característica (Tensão / Corrente) com acentuada declividade na região de trabalho, de modo que a corrente de operação se mantém essencialmente constante, /15/. Este tipo de curva, também denominado curva tipo tombante, é mostrado na Fig. 3.2.

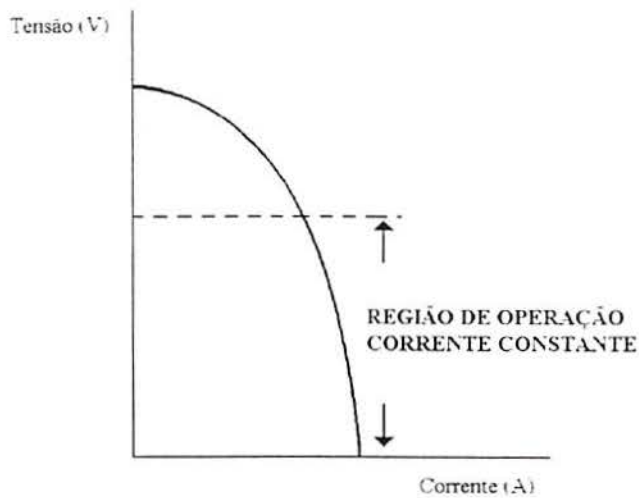


Fig. 3.2 - Curva característica tipo corrente constante ou tombante, /15/.

3.1.1.1 Salpicos e Transferência do Metal de Solda

No processo de soldagem por eletrodos revestidos, a gota de metal fundido na ponta do eletrodo é usualmente expulsa pela força do arco, transferindo-se por uma das formas que serão estudadas mais detalhadamente no capítulo 5. Algumas vezes a gota metálica é repelida, sendo jogada diretamente na poça de fusão, porém, outras vezes por efeito da tensão superficial ocorre o contato entre a gota e a poça de fusão antes do desprendimento da mesma da ponta do eletrodo, havendo curto-circuito na fonte e extinção temporária do arco elétrico, /15/. A tensão responsável pela manutenção do arco agora força a passagem de mais corrente através do circuito, a menos que a fonte de potência seja realmente uma máquina de corrente constante. Essa corrente extra, acompanhada do aumento da resistividade do metal, aquece ainda mais a gota (ponte formada entre o eletrodo e a poça de fusão), causando o seu rompimento (como um fusível quando sobrecarregado), com conseqüente dispersão de metal, sendo essa a principal causa dos indesejáveis salpicos. A Fig. 3.3 mostra a formação de salpicos causada pelo curto-circuito entre eletrodo e peça.

Portanto, a ocorrência de salpicos pode ser reduzida de duas maneiras:

⇒ Adição de compostos ao revestimento que diminuam as forças causadas pela tensão superficial do metal líquido e escória;

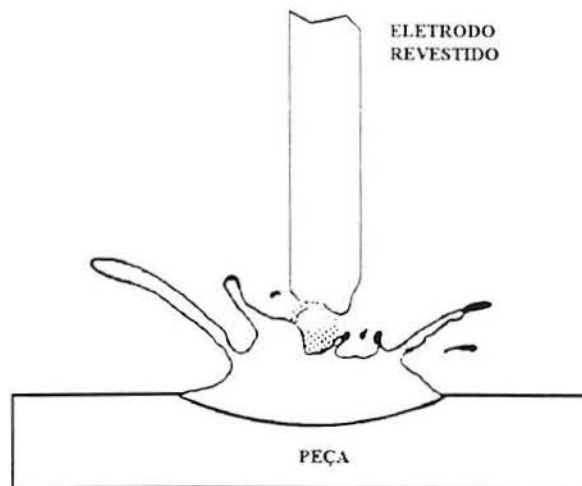


Fig. 3.3 - Formação de salpicos causada pelo curto-circuito entre eletrodo e peça, /15/.

⇒ Quanto mais rápida a ação de rompimento da ponte metálica, maior a ocorrência de salpicos. Essa ação pode ser retardada adicionando-se um indutor ao circuito da fonte de potência. Boas fontes de potência para soldagem por eletrodos revestidos utilizando corrente contínua possuem circuitos internos com alta indutância, para controlar a violência dessas explosões, e melhorar a estabilidade do arco.

Quando a curva característica da fonte apresenta uma declividade muito acentuada, ou mesmo vertical, não há mudança apreciável de corrente entre a fase de arco aberto e a de curto-circuito. Conseqüentemente, a ação de superaquecimento e rompimento da ponte metálica entre o eletrodo e a peça fica prejudicada. Nesse caso, o eletrodo “gruda” na peça, arruinando a solda. Para prevenir essa situação, são adicionados à fonte de potência circuitos de manutenção do arco (“drive ou dig circuits”), que nada mais são do que fontes de baixa tensão, alta corrente e baixo ciclo de trabalho (tempo máximo de atuação), conectados em paralelo com a fonte de potência principal. A Fig. 3.4 mostra a representação esquemática deste tipo de fonte, /15/.

Fontes de potência nas quais o valor da corrente de curto-circuito esteja entre 1.5 a 2 vezes a corrente de arco aberto, normalmente não necessitam deste tipo de circuito auxiliar.

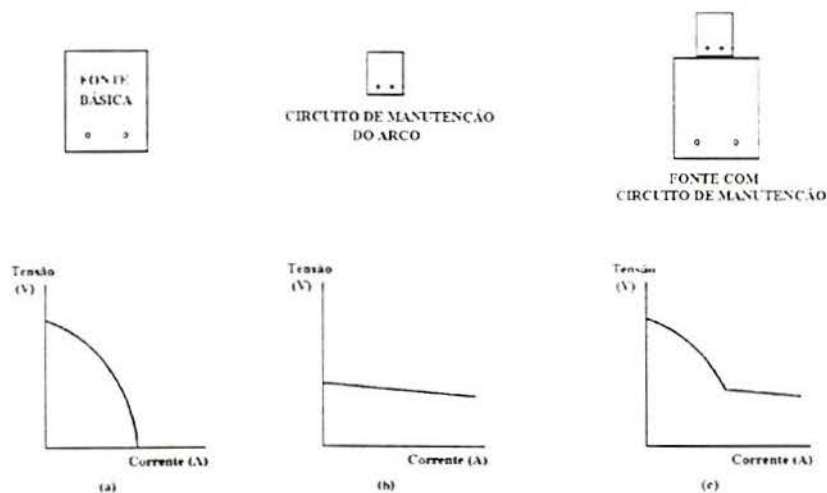


Fig. 3.4 - Representação da curva característica produzida por uma fonte de potência com circuito de manutenção do arco, /15/.

3.1.1.2 Características Estáticas das Fontes para Soldagem com Eletrodos Revestidos

As características estáticas que as fontes de potência normalmente usadas para soldagem por eletrodos revestidos devem satisfazer são as seguintes, /16/:

a) Tensão de circuito aberto - Deve ser tão alta quanto possível para possibilitar uma ignição do arco rápida e segura. Entretanto, devido à segurança e prevenção de acidentes, não deve ultrapassar os limites estabelecidos pelas normas de segurança. Especificamente durante a soldagem em corrente alternada, altas tensões de circuito aberto asseguram reignições seguras após a pausa com corrente nula, durante a inversão de polaridade.

b) Corrente de curto-circuito sustentada - Essa corrente não pode ser alta demais para não vaporizar muito material do eletrodo durante a reignição, e também não pode ser muito baixa para permitir uma boa reignição pelo efeito de estrição do pescoço da gota de metal líquido (“efeito pinch”).

c) Gradiente da curva característica - A curva estática não deve apresentar uma inclinação exagerada na região de trabalho, de maneira que a energia de soldagem, sendo diretamente proporcional ao produto de tensão por corrente de soldagem, não tenha grandes variações. Por outro lado, a curva também não pode ser plana nessa região, para evitar que a

corrente de soldagem varie excessivamente, afetando a estabilidade do arco.

Através de informações obtidas através da filmagem do arco, bem como medições instantâneas das características elétricas, é possível determinar valores característicos que descrevem o comportamento e propriedades dos diferentes tipos de fontes de soldagem. As características estáticas de diversas fontes de soldagem estão listadas na tabela. 3.1.

A melhor estabilidade do processo é obtida quando o ponto dinâmico de trabalho ocorre na região de máxima potência das características estáticas. Ligeiras alterações no comprimento do arco exercem grande influência sobre o consumo de energia. Desta forma, a variação de potência e corrente depois do curto-circuito pode ser mantida dentro de limites estreitos e o comportamento de queda de ambos os parâmetros pode ser influenciado com sucesso.

Tabela 3.1 - Dados Técnicos sobre Diversas Fontes de Soldagem, /16/

| Tipo | Construção | Campo de Ajustes (A) | Tensão de Circuito Aberto (V) | Ajuste | Corrente Máxima no Fator de Trabalho (A/%) | Fator de Potência $\cos \rho$ |
|------|---|----------------------|-------------------------------|------------------------|--|-------------------------------|
| A | Gerador de Campo Transversal | 10 - 185 | 75 | Contínuo | | 0.88 |
| B | Gerador com reação no induzido ampliada | 40 - 325 | 55 | Contínuo | 300 / 60 220 / 100 | |
| C | Retificador trifásico em ponte controlado por transdutor | 35 - 350 | 70 | Contínuo | 350 / 60 270 / 100 | 0.65 |
| D | Retificador com ponte de corrente alternada controlado por transdutor | 7 - 360 (cc) | 67 | Contínuo em 3 estágios | 360 / 60 270 / 100 | 0.50 |
| | | 7 - 360 (ca) | 70 | | 390 / 60 360 / 100 | 0.51 |
| E | Transformador de reatância | 65 - 150 | 80 | escalonado | | |
| F | Transformador com campo de dispersão | 80 - 210 | 80 | Contínuo | 300 / 60 220 / 100 | 0.70 |
| G | Retificador trifásico em ponte | 20 - 375 | 58 | escalonado | 450 / 60 350 / 100 | 0.82 |
| H | Retificador com unidade de potência transistorizada | 0 - 800 | | Contínuo em 3 estágios | 600 / 30 | |
| I | Retificador trifásico em ponte | 75 - 800 | | Contínuo | 800 / 70 700 / 10 | 0.82 |

Com relação à forma da curva característica, na prática, um comprimento específico do arco deve ser mantido já que somente dentro de uma região delimitada do arco obtém-se a máxima eficiência de deposição.

O fator de potência, eficiência e relação custo/benefício também são favoravelmente influenciados no projeto da fonte se o ponto de trabalho estiver localizado na região de potência máxima das características estáticas relevantes.

3.1.1.3 Comportamento Dinâmico das Fontes para Soldagem Manual por Eletrodos Revestidos em Corrente Contínua

O conhecimento apenas das características estáticas de uma fonte de potência não é suficiente para determinar o seu comportamento durante a execução de uma solda, [17 - 19].

A influência das rápidas variações no carregamento como as que ocorrem na transferência de metal afetada por curto-circuitos sobre o comportamento dos parâmetros elétricos do processo é uma importante característica da máquina. Nos conversores, a adequação à soldagem pode ser medida pela avaliação das curvas de corrente e potência de soldagem após o curto-circuito, através das seguintes fórmulas:

$$\rho_f = \frac{I_{\min}}{I_{DC}} > 0.7 \quad [3.1]$$

$$r_f = \frac{P_{10}}{P_{DC}} \quad [3.2]$$

Onde:

I_{\min} → Valor mínimo da corrente após o curto-circuito (A).

I_{DC} → Valor médio da corrente de soldagem (A).

P_{10} → Potência média no intervalo de tempo de 10 ms posterior ao curto-circuito (W).

P_{DC} → Valor médio da potência de soldagem (W).

A fonte pode ser considerada como tendo um bom comportamento para soldagem se

$$\frac{1}{5} \times \sum_{i=1}^{i=5} r_{f,i} > 0.8 \quad \text{e} \quad \frac{1}{10} \times \sum_{i=1}^{i=10} r_{f,i} > 0.9 \quad [3.3]$$

e o valor mínimo de r_f durante dez intervalos de 10 ms, $r_{f,\min} > 0.5$.

A fig. 3.5 mostra o oscilograma de corrente para os dois conversores (tipos A e B) e

para os dois retificadores (tipos C e D) da tabela 3.1.

A característica ρ_f fornece uma informação clara e pode ser rapidamente determinada, entretanto não permite avaliar a duração da queda de corrente. Já a característica r_f analisa o comportamento da fonte em relação ao tempo. Avaliações errôneas entretanto, são possíveis devido à consideração integral do comportamento da fonte a determinados intervalos de tempo. A análise dos valores médios feita a cada cinco ou dez regiões compensa substancialmente estas diferenças.

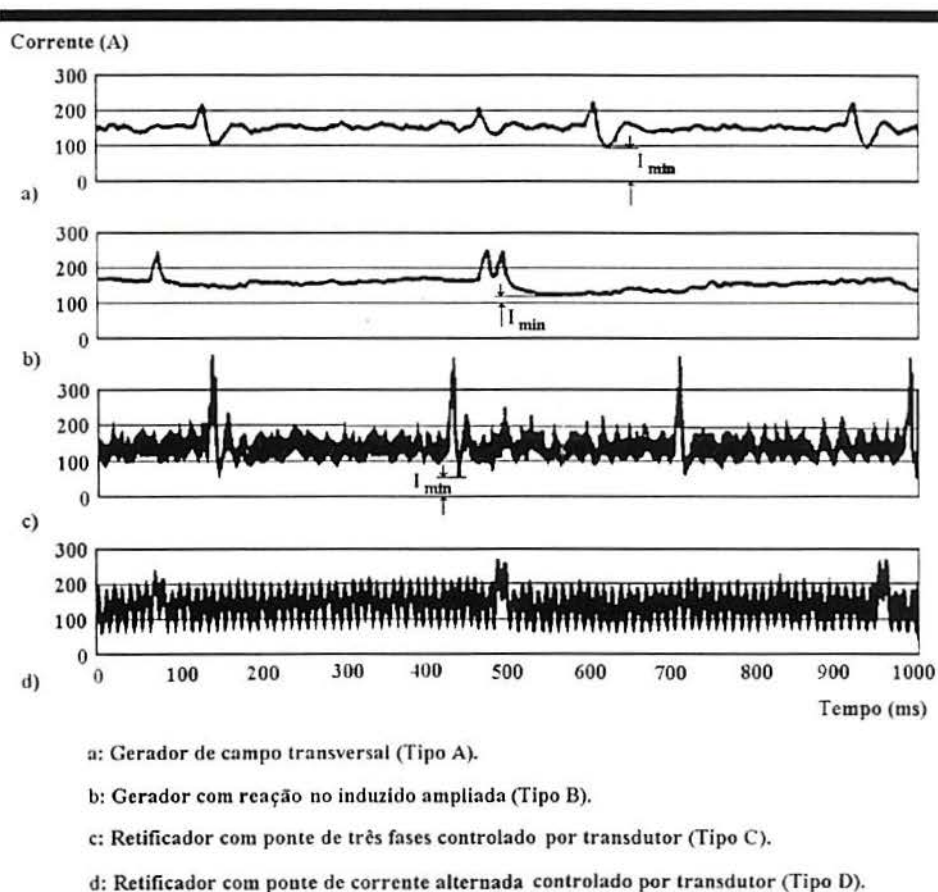


Fig. 3.5 - Oscilogramas de corrente para diferentes fontes de soldagem. /17/.

Os valores das características ρ_f e r_f para estas fontes estão listados na tabela 3.2.

| Tipo de Fonte | ρ_f | r_f | $r_{f,5}$ | $r_{f,10}$ | \bar{r} |
|---------------|----------|-------|-----------|------------|-----------|
| A | 0.62 | 0.68 | 1.01 | 1.05 | 0.59 |
| B | 0.86 | 1.00 | 1.08 | 1.04 | 0.91 |
| C | 0.35 | 0.62 | 0.86 | 0.87 | 0.32 |

A fig. 3.6 ilustra as curvas de potência logo após o curto-circuito (identificado na figura pela queda brusca da potência do arco, $V \approx 0$), para as fontes tipo A, B e C. Os altos valores observados na curva de potência da fonte A, bem como as características favoráveis da fonte B, podem ser notados apenas através do valor de $r_{f,min}$. A fonte C apresenta propriedades dinâmicas desfavoráveis com respeito à característica ρ_f , embora os valores de r_f , excetuando $r_{f,10}$, sejam suficientes. Se apenas a relação entre a potência mínima (P_{min}), e o valor médio da potência, de acordo com

$$\bar{r}_f = \frac{P_{min}}{P_{DC}} > 0.6 \quad [3.4]$$

for avaliado, o tempo não é levado em consideração. Como resultado da inércia dos processos térmicos, rápidas alterações com redução drástica de potência, podem afetar o processo.

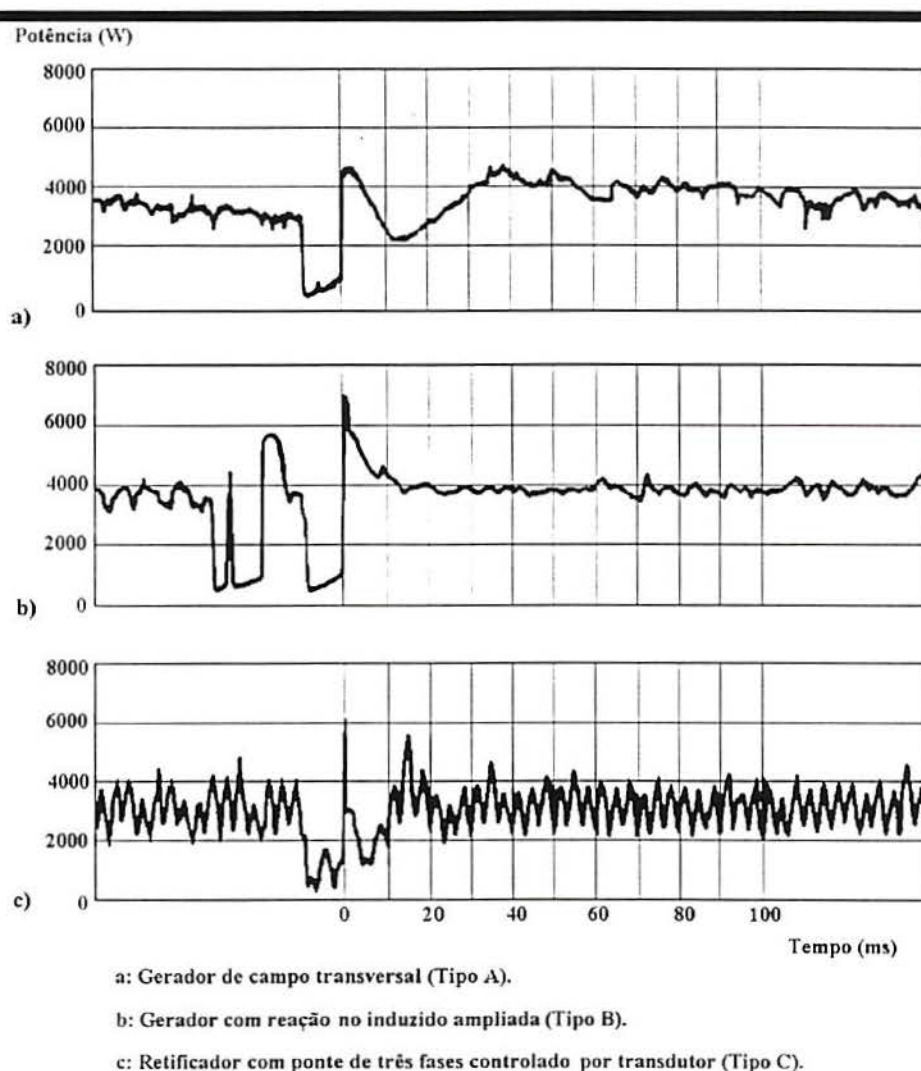


Fig. 3.6 - Comportamento da curva de potência de soldagem após o curto-circuito,

Os critérios acima permitem a quantificação das propriedades de uma fonte de soldagem dentro de condições de contorno específicas, permitindo classificá-las em “boas” ou “más”. Uma classificação entre “boas” e “muito boas”, entretanto, não é possível

3.1.2 Fontes utilizadas para soldagem molhada com eletrodos revestidos

Existem quatro problemas principais a serem equacionados no desenvolvimento de fontes de potência para soldagem subaquática, em comparação com as condições padrão de soldagem fora d'água, /20/:

- ⇒ A transferência de alta potência através de cabos longos.
- ⇒ A influência da pressão sobre a estabilidade do arco, o modo de transferência e a proteção gasosa.
- ⇒ Prioridade à segurança do soldador/mergulhador.
- ⇒ Seleção de parâmetros extremamente variável por controle remoto ou controles programáveis livres.

A solução destes problemas requer provisões elétricas que podem ser consideradas inconsistentes e também em contradição umas com as outras, como por exemplo: para sobrepujar a alta queda de tensão e a influência do aumento de pressão sobre o comportamento do arco, há necessidade de altas tensões de saída, entretanto, isso é incompatível com os regulamentos de segurança, que, mesmo no caso de falhas, exigem a limitação da tensão máxima a 65 V, /20/.

O grande campo de seleção de parâmetros para alta potência, entre 50 e 200 kVA pode ser atingido eficientemente apenas por controle tiristorizado, porém o largo campo de ajustes necessários para intensidade de corrente e profundidade resulta, inevitavelmente, em alta oscilação (“ripple”), que afeta adversamente a estabilidade do arco e a transferência do metal.

Na soldagem molhada com eletrodos revestidos utiliza-se normalmente corrente contínua, eletrodo negativo (polaridade direta). O uso preferencial de corrente contínua visa evitar o problema de extinção do arco durante a reigitação em corrente alternada devido à mudança de polaridade, embora possa-se utilizar corrente alternada para determinados tipos de eletrodos, /21/, com um acréscimo de 10 % na corrente de soldagem. De acordo com Sadowski, /4/, o uso de eletrodo com polaridade negativa é recomendado para soldagem

molhada em ambiente marinho, porque o emprego de polaridade positiva aceleraria a corrosão no porta-eletrodos (apesar dessas recomendações, muitos trabalhos têm sido feitos empregando CCEP, inclusive no LS&TC).

3.1.3 Porta-eletrodos

Os porta-eletrodos para soldagem molhada têm como principais requisitos: isolamento para proteção do soldador/mergulhador e durabilidade com o aumento da profundidade. Existem vários modelos disponíveis comercialmente.

3.1.4 Cabos

Recomenda-se que os cabos de conexão elétrica da fonte e terra tenham a mesma capacidade de condução de corrente, e esses cabos devem ser tão curtos quanto possível para minimizar a queda de tensão. A Fig. 3.7 mostra a queda de tensão em função da corrente empregada para cada 30 m de cabos, revelando o ajuste que deve ser feito na saída da fonte para compensar essa diferença. O alicate do cabo terra deve ser colocado tão próximo quanto possível da junta a ser soldada, devendo ser deslocado durante a deposição do cordão de modo a estar sempre próximo à região do arco (para minimizar a possibilidade de ocorrência de “sopro magnético”).

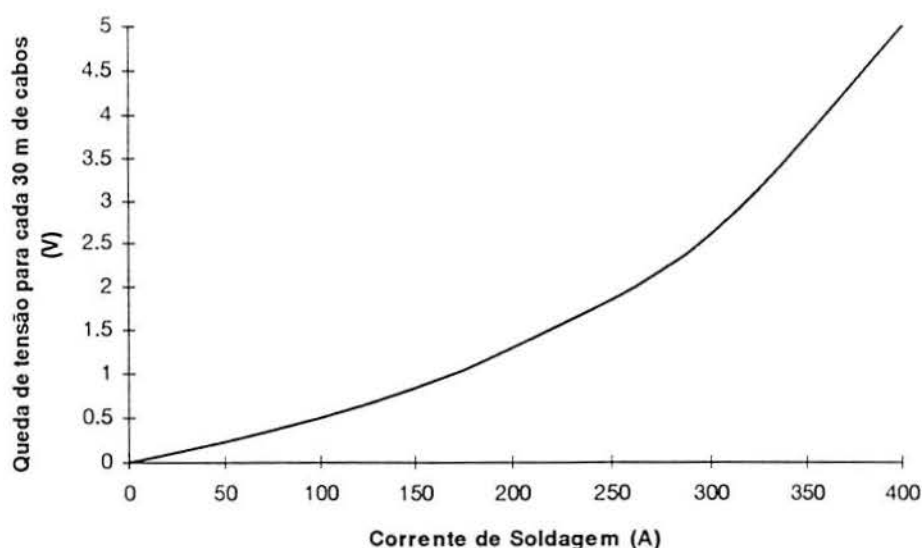


Fig. 3.7 - Queda de tensão em função do comprimento dos cabos condutores de corrente, [7].

O uso dos cabos existentes comercialmente com seção transversal com 120 mm² de cobre, causam uma queda de tensão de 3 V, para uma corrente de 100 A, a uma profundidade de 100 m, /20/. A alta pressão requer uma voltagem no arco cerca de 50% superior àquela utilizada nas soldas realizadas na superfície.

A tabela. 3.3 mostra a tensão de saída das fontes de soldagem para soldagem subaquática para várias profundidades e intensidades de corrente.

Tabela 3.3 - Tensão de Saída (V) das Fontes usadas para Soldagem Subaquática a várias Profundidades e Correntes, /20/

| Profundidade (m) | Intensidade de corrente | | |
|---------------------|-------------------------|-------|-------|
| | 200 A | 400 A | 600 A |
| 200 | 50 | 85 | 120 |
| 400 | 65 | 115 | 160 |
| 600 | 80 | 145 | 200 |

3.2 Problemas Técnicos Relativos à Profundidade

3.2.1 Penetração e Geometria do Cordão de Solda

As altíssimas temperaturas no centro do arco encontradas a grandes profundidades aumentam a penetração. Esse aumento de penetração, acompanhado de uma transferência mais rápida de metal, ocasiona um aumento na taxa de deposição do eletrodo, que pode ser considerado, normalmente, um fator benéfico. Entretanto, esse aumento de penetração a altas profundidades pode ocasionar perfuração do metal-base. /6/.

Em pesquisas realizadas em laboratório, Madatov, /22/, comprovou um aumento de penetração com a profundidade na soldagem com eletrodos revestidos, bem como uma variação no fator de forma (largura/profundidade) de 5 para 3.

Em alguns estudos, /6/, concluiu-se que em soldagem molhada com eletrodos revestidos usando polaridade reversa (eletrodo positivo), o cordão depositado apresenta menor penetração, maior largura e menor porosidade do que soldas semelhantes utilizando eletrodo negativo. Esta aparente reversão das características do arco com a profundidade não foi explicada.

3.2.2 Corrente e Tensão de Soldagem

As forças compressivas que atuam sobre o arco em soldagem subaquática afetam as curvas características das fontes utilizadas. Como a diferença de potencial necessária para abrir o arco é maior do que aquela requerida para mantê-lo, a corrente aumenta à medida em que a tensão diminui, uma vez estabelecido o arco elétrico. Com o aumento de profundidade, aumenta a constrição do arco devida à pressão hidrostática, com conseqüente aumento da densidade de corrente. A grandes profundidades, a concentração de calor devido a esse aumento de densidade de corrente aumenta, limitando a corrente máxima de soldagem a valores entre 180 e 240 A, /6/.

Brandon, /23/, em sua pesquisa, notou que aumentando-se a tensão consegue-se melhor estabilidade do arco. A baixas pressões, próximas à pressão atmosférica, a estabilidade do arco é relativamente insensível à variação de tensão de soldagem, entretanto, a altas pressões, o aumento de tensão aumenta a estabilidade do arco. Diversos pesquisadores têm sugerido que fontes de soldagem tipo tensão constante não são adequadas para operações a altas pressões. Fontes com curva característica tipo tombante devem ser utilizadas para profundidades superiores a 80 m.

De forma resumida, as seguintes relações de tensão e corrente de soldagem devem ser observadas na soldagem a maiores profundidades:

⇒ O aumento da pressão hidrostática somado às forças de constrição do arco, aumenta a densidade de corrente fazendo que uma maior tensão de soldagem seja necessária para manter o comprimento do arco constante.

⇒ A potência da fonte necessária para soldagem aumenta com a profundidade.

⇒ A corrente de soldagem também aumenta com a profundidade, porém a magnitude deste aumento de corrente ainda é motivo de controvérsia entre diversos pesquisadores.

3.2.3 Transferência do Metal de Solda

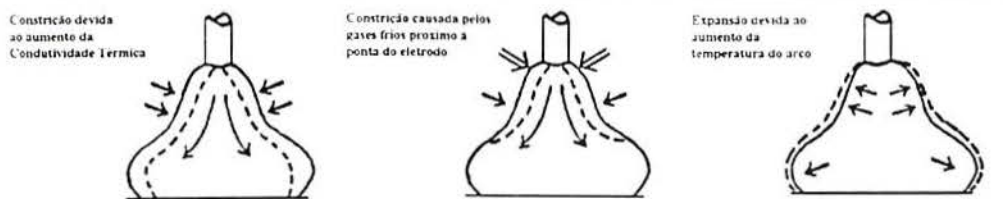
Existem três modos básicos de transferência do metal de solda para a peça a ser soldada (os modelos de transferência propostos para soldagem com eletrodos revestidos, bem como a classificação completa dos modos de transferência do metal de solda, segundo o IIW, são apresentados no capítulo 5).

Quando as correntes e tensões de soldagem utilizadas são baixas, a transferência se dá através de curtos-circuitos. Neste modo de transferência, a taxa de alimentação do arame, corrente e características dinâmicas da fonte de soldagem são tais que o metal é transferido durante o curto-circuito, e, durante o restante do ciclo, o arco é mantido sem transferência de metal. Aumentando-se a tensão de soldagem e mantendo-se a corrente constante, o modo de transferência passa a ser globular, ou seja, o metal passa a se transferir em grandes gotas que migram para o metal de solda. Um aumento na corrente de soldagem, causa rápida fusão do eletrodo de maneira que o metal passa a ser transferido na forma de aerossol, ou seja, grande quantidade de pequenas gotas de metal são ejetadas simultaneamente.

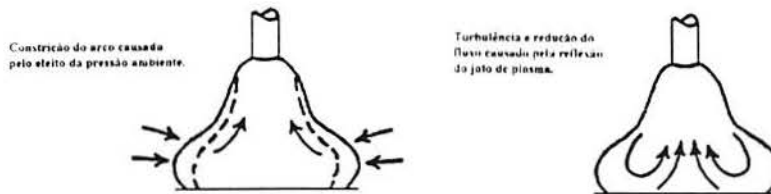
Com a constrição do arco a pressão radial aumenta. A equalização de pressão causa uma turbulência ao longo do eixo na região de maiores seções transversais e menores densidades de corrente. Essa turbulência propicia a entrada de gases mais frios na região do arco e uma redução ainda maior da seção transversal do arco. Este processo continua até que o gradiente de temperatura se torne suficientemente grande para que um estado estacionário se estabeleça. O jato de plasma estacionário facilita a passagem da corrente, por sua excelente condutividade elétrica. A passagem de corrente facilitada fornece calor suficiente (efeito Joule) para contrapor a queda de condutividade causada pelo resfriamento do jato de plasma e o equilíbrio é mantido, /6/.

Com o aumento da pressão ambiente, a condutividade térmica dos gases aumenta. Esse aumento na condutividade causa constrição do arco e um novo e mais rápido estado estacionário é atingido. Isso resulta em um aumento da taxa de transferência das gotas de metal e da penetração, até determinado limite. A níveis suficientemente altos de pressão, os efeitos combinados do jato de vapor refletido da peça e uma força de compressão induzida pela pressão na base da coluna do arco começa a retardar o fluxo elétrico no plasma. Isso pode causar uma eventual reversão no tipo de transferência para globular. A Fig. 3.8 ilustra o balanço entre o arco de plasma e as forças hidrostáticas.

Em soldagem molhada com eletrodos revestidos utilizando a técnica de arraste, a transferência normalmente ocorre na forma de pequenas gotas, exceto quando da ocasional ocorrência de curto-circuitos causados pela formação de gotas maiores. Silva, /24/, mostrou que, mesmo a pequenas profundidades, na soldagem molhada com eletrodos revestidos ocorre transferência globular, em vez de aerossol.



A. Forças atuando na parte superior do arco. O resultado da ação destas forças é a tendência de aceleração da transferência de metal e aumento da penetração.



B. Forças atuando na parte inferior do arco. O resultado da ação destas forças é o aumento da resistência à transferência de metal e redução na penetração.

Os conjuntos de forças A e B devem estar em equilíbrio. Quando as forças mostradas em A predominam, a transferência de metal ocorre predominantemente na forma de aerosol. Quando as forças mostradas em B se tornam maiores, a intensidade do jato de plasma diminui até a que a transferência de metal volta a ser globular.

Fig. 3.8 - Forças atuando na soldagem subaquática molhada, *[6]*.

3.2.4 Dinâmica de Formação de Bolhas

Duas das características mais óbvias associadas à soldagem subaquática molhada são a formação de bolhas gasosas e uma nuvem de água turva próximo ao arco. Estas bolhas são causadas pela dissociação da água no arco e decomposição do revestimento.

Uma análise simplificada dos efeitos da pressão sobre a formação de bolhas na soldagem subaquática pode ser feita rapidamente considerando-se que a bolha é formada por um gás ideal. Como a atmosfera da bolha é formada predominantemente por hidrogênio (62-82% de hidrogênio, 11-24% monóxido de carbono, 4-6% dióxido de carbono, acrescidos de pequenas quantidades de nitrogênio, oxigênio e gases metálicos), *[25]*, essa hipótese pode ser aceita dentro dos limites de temperatura e pressão de significância prática. O volume de uma bolha de gás ideal, V_B , de determinada massa, é diretamente proporcional à temperatura do gás e inversamente proporcional à pressão:

$$V_B \propto \frac{T}{P} \quad [3.5]$$

Com o aumento de profundidade o termo dependente da pressão também aumenta. O aumento da pressão hidrostática, por sua vez, causa maior constrição do arco do que ocasiona, como foi visto nas seções anteriores, aumento na densidade de corrente e, conseqüentemente, aumento na temperatura do arco e na temperatura dos gases gerados. Esse aumento de

temperatura, entretanto, não é tão significativo quanto o aumento de pressão, sendo que o termo relativo à pressão prevalece e o volume da bolha diminui para maiores profundidades de trabalho.

Silva, [25], baseado na Segunda Lei do Movimento de Newton, desenvolveu expressões que relacionam a velocidade de ascensão e o diâmetro das bolhas gasosas com a profundidade. Para chegar a estas expressões foram feitas as seguintes simplificações:

1. A bolha tem formato esférico no momento de sua formação.
2. A bolha permanece com forma esférica durante seu deslocamento em direção à superfície.
3. Os efeitos da tensão superficial podem ser negligenciados.
4. O gás dentro da bolha se comporta como um gás ideal.
5. A temperatura do gás na bolha permanece constante durante sua ascensão.

$$V_{ASC} = \sqrt{\frac{4gh_B d_h (\rho_A - \rho_B) + 0.532d_h^2}{2\rho_B d_h + 3c_{arr} \rho_A h_B}} \quad [3.6]$$

e

$$d_h = 3 \sqrt{\frac{p_{atm} + \rho_A g h_{arco}}{p_{atm} + \rho_A g h_B}} d_D^3 \quad [3.7]$$

Onde:

V_{ASC} → Velocidade de ascensão da bolha, (m/s). Esta velocidade varia com a posição da bolha.

g → Aceleração da gravidade, (m/s²).

h_B → Profundidade da bolha, (m). Profundidade instantânea da bolha em ascensão.

h_{arco} → Profundidade do arco, (m).

p_{atm} → Pressão atmosférica, (N/m²).

c_{arr} → Coeficiente de arraste para uma esfera, (adimensional).

d_h, d_D → Diâmetros das bolhas nas profundidades h_B e h_{arco} , respectivamente, (m).

ρ_A, ρ_B → Peso específico da água ou bolha, (kg/m³).

Os principais efeitos das bolhas sobre a solda são, [26]:

- As bolhas formam uma camada protetora entre a água circundante e o metal fundido sendo transferido da ponta do eletrodo para a peça. Sua presença reduz as taxas de

resfriamento do metal de solda.

- Quando a soldagem subaquática é feita utilizando um processo de soldagem com proteção gasosa da poça de fusão, o gás de proteção colide com as bolhas. Como resultado, qualquer técnica de proteção gasosa efetiva na soldagem fora da água, tende a perder sua eficiência quando usada em soldagem subaquática.

- Os gases nas bolhas podem ser as maiores fontes de porosidade no metal de solda.

- Devido às altas temperaturas do arco, parte do hidrogênio contido nas bolhas pode existir na forma atômica, difundindo-se no metal de solda e zona afetada pelo calor, podendo ocasionar trincas.

3.2.5 Porosidade no Metal de Solda

Uma visão geral dos principais fatores causadores de porosidades em soldas subaquáticas é apresentada por Liu, Pope e Daemen, [/27/](#).

Uma das características da soldagem subaquática molhada, citada no início deste capítulo, é a maior porosidade das soldas, quando comparadas àquelas realizadas fora da água. A norma AWS D3.6, [/2/](#), define a quantidade admissível de poros no metal de solda:

- Poros de diâmetro superior a 5 mm não são permitidos.

- Poros de diâmetro entre 5 e 1.6 mm são restritos a um número máximo de 7 dentro de um comprimento de 25.4 mm do cordão de solda, por 25.4 mm de espessura da chapa.

- Para os poros com diâmetro inferior a 1.6 mm, não existe restrição.

De um modo geral a maioria dos pesquisadores concorda que a quantidade de poros aumenta com o aumento da pressão hidrostática. A explicação para este fenômeno, segundo Szelagowski, [/28/](#), é o aumento da taxa de resfriamento associada ao aumento de profundidade. Estas grandes taxas de resfriamento diminuem o tempo disponível para que o gás dissolvido no metal de solda possa escapar para a atmosfera. Desta forma, bolhas gasosas ficam aprisionadas no metal de solda, causando porosidades. No trabalho citado foram comparadas as soldas de juntas de topo, multi-passe, feitas a três profundidades distintas: 5, 55 e 100 m.

Suga e Hasui, [/29/](#), investigaram a formação de poros na soldagem subaquática molhada por gravidade no intervalo entre 0 e 6 kgf / cm² (pressão manométrica). Foram testados os eletrodos tipo ilmenítico (D4301), alto teor de óxido de titânio (D4313) e alto pó de ferro - óxido de ferro (D4327). As principais conclusões deste estudo são as seguintes:

- Os poros se formam no metal de solda quando a pressão é superior a 0.5 kgf/cm^2 . A porosidade aumenta com a pressão.

- Os poros classificados como do tipo-A apresentam morfologia aproximadamente esférica e são causados pelo hidrogênio concentrado na frente de solidificação. Estes poros começam a ser observados à pressão de 0.5 kgf/cm^2 e aumentam em quantidade até que a pressão atinja 2 kgf/cm^2 . Na região com pressões entre 2 e 3 kgf/cm^2 sua ocorrência diminui sensivelmente, sendo substituídos pelos poros definidos como sendo do tipo-B.

- Os poros do tipo-B têm formato mais alongado e foram observados nas juntas soldadas entre 2 e 6 kgf/cm^2 . Estes poros são causados por bolhas presentes no metal de solda, aprisionadas pela progressão da frente de solidificação, sendo freqüentemente acompanhados da formação de linhas especiais de solidificação ao seu redor.

- As linhas especiais de solidificação são formadas pelo repetitivo deslocamento das bolhas durante o avanço da frente de solidificação.

- A mudança na forma dos poros, ou seja, mudança no mecanismo de formação em função da pressão hidrostática é causada pela concentração de hidrogênio no metal fundido que aumenta consideravelmente com o aumento de pressão.

A Fig. 3.9 mostra os resultados obtidos para os três tipos de eletrodos testados.

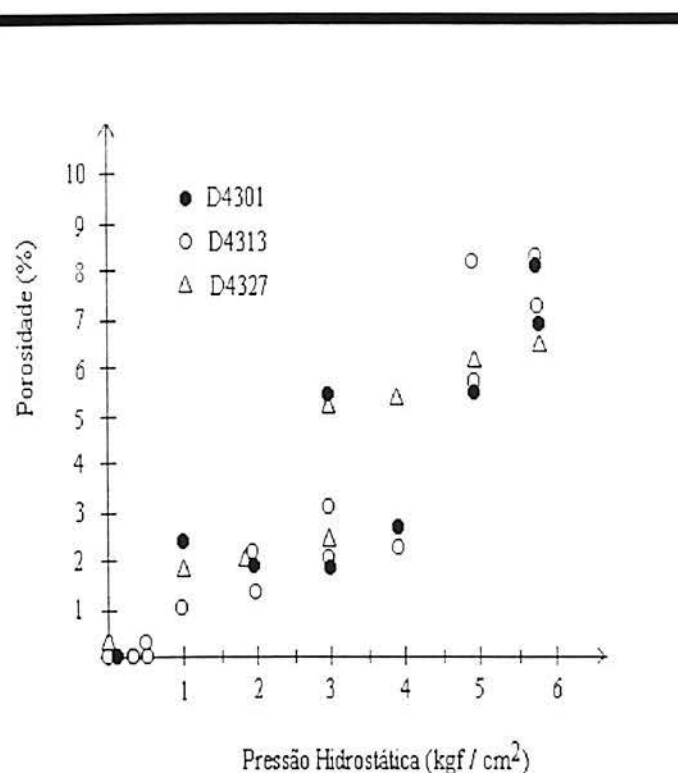


Fig. 3.9 - Efeito da pressão hidrostática sobre a porosidade, /29/.

Além da pressão hidrostática, a porosidade é influenciada pela composição química do eletrodo, o trabalho de Sanchez-Osio et al. [\[30\]](#), cita que para um teor de aproximadamente 12 % de CaCO_3 , em soldas feitas a 10 m de profundidade, há redução na porosidade do cordão, como mostra a Fig. 3.10.

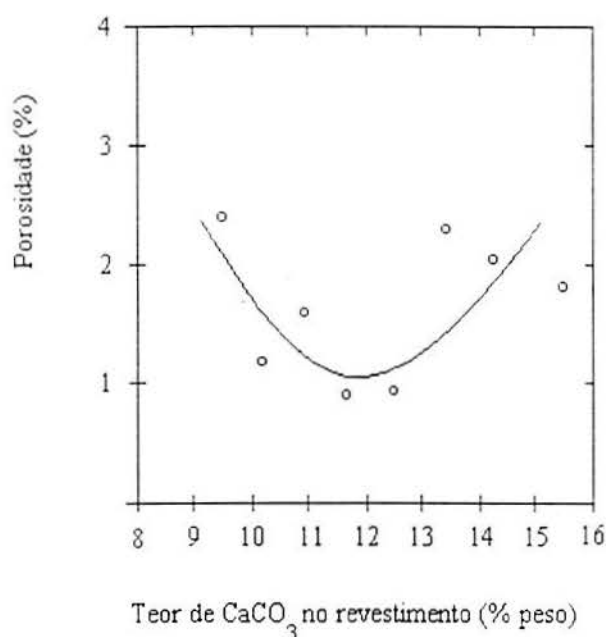


Fig. 3.10 - Efeito da adição de CaCO_3 sobre a porosidade em juntas soldadas a profundidade de 10 m, [\[30\]](#).

Outro fator importante na ocorrência de porosidade é a estabilidade do arco. Nixon e Graham, [\[31\]](#), estudaram o comportamento do arco elétrico em soldas feitas a baixas profundidades: 1,5, 3 e 6 m. Não foi observada diferença significativa entre o comportamento dos eletrodos nas profundidades de 1,5 e 3 m, porém, à profundidade de 6 m foi relatado pelos soldadores, notável melhoria na estabilidade do arco. Este fato foi comprovado através da análise dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem, inspeção visual e macrográfica dos cordões de solda. Neste estudo foram avaliados eletrodos de 3,2 e 4 mm de diâmetro, sendo que os de menor diâmetro obtiveram melhor performance. Embora ambos possuíssem excelente capacidade de abertura do arco, e proporcionassem depósito suave e efetivo do metal, a aparência do cordão obtida com o eletrodo com diâmetro de 4 mm foi bastante inferior. A explicação para este comportamento, segundo os autores, está na menor densidade

de corrente gerada nestas condições.

3.2.6 Composição Química do Metal de Solda

Com exceção dos processos de soldagem protegidos com atmosfera de gás inerte, todos os processos de soldagem ao arco caracterizam-se por uma extensiva interação entre o metal líquido e a atmosfera na região da poça de fusão. A composição do metal de solda é o resultado das reações que ocorrem nessa região, sendo que determinados elementos são absorvidos durante os estágios iniciais (altas temperaturas) do processo e parcialmente rejeitados durante os estágios subsequentes, de resfriamento e solidificação. [/32/](#).

O aumento da pressão favorece as reações que consomem compostos gasosos e suprime as reações que os produzem. Importantes reações desse tipo são a dissolução do hidrogênio a partir de gases contendo umidade e a reduzida evolução de monóxido de carbono. Os efeitos prováveis em soldas hiperbáricas são o do aumento dos teores de hidrogênio, oxigênio e carbono. Esse aumento de oxigênio resulta, por sua vez, no aumento das perdas de silício e manganês no metal de solda.

Considerando que a efetiva composição da atmosfera do arco é tremendamente influenciada pela constrição do arco que ocorre com o aumento de pressão, Christensen, [/32/](#), propôs uma correção à lei de Siewert para prever a quantidade de hidrogênio absorvida pelo metal de solda em soldagem molhada dada pela seguinte equação:

$$[H]_{calc} = S_{max} \cdot \sqrt{P_{eff}} = [H]_1 \cdot \sqrt{P \cdot f_D + 0.56 \cdot P \cdot (1 - f_D) \cdot (P_{hab} / P_{arco})} \quad [3.8]$$

Onde:

$[H]_{calc}$ → Conteúdo de hidrogênio dissolvido no metal de solda, (ppm).

S_{max} → Máxima solubilidade do hidrogênio a altas temperaturas, (ppm).

P_{eff} → Pressão parcial efetiva dos gases que contém umidade, (N/m²).

$[H]_1$ → Conteúdo de hidrogênio no metal de solda à pressão atmosférica,

(ppm).

P → Pressão de trabalho, (N/m²).

f_D → Fator de diluição ($f_D = (D_{arco} / D_{poça})^2$), (adimensional).

D_{arco} → Diâmetro do arco, (mm).

$D_{poça}$ → Diâmetro da poça de fusão, (mm).

P_{hab} → Pressão do vapor, (N/m²).

$P_{\text{arco}} = P ([H]_1 / S_{\text{max}})^2 \rightarrow$ Pressão do arco medida à pressão atmosférica, sem constrição do arco, (N/m²).

A Fig. 3.11 apresenta a variação no teor de hidrogênio observada na soldagem com os eletrodos E7016 e E8018, em função da pressão, em soldas realizadas a seco e molhada em pressões de até 30 bar.

Com o oxigênio e carbono, o comportamento é semelhante. Em soldagem e na fabricação do aço, o conteúdo de carbono tende a ser baixo quando o teor de oxigênio é alto, e vice-versa. O produto "m" é o parâmetro que relaciona oxigênio dissolvido e carbono com monóxido de carbono a pressão parcial P_{CO} :

$$m = [C\%] \cdot [O\%] = K_{\text{CO}} \cdot P_{\text{CO}} \quad [3.9]$$

onde K_{CO} é a constante de equilíbrio, que vale 0.0020 (%)² à temperatura de 1600 °C e 0.0026 (%)² a 2000 °C.

Na soldagem hiperbárica (seca) o aumento de ambos, carbono e oxigênio, ocorre simultaneamente.

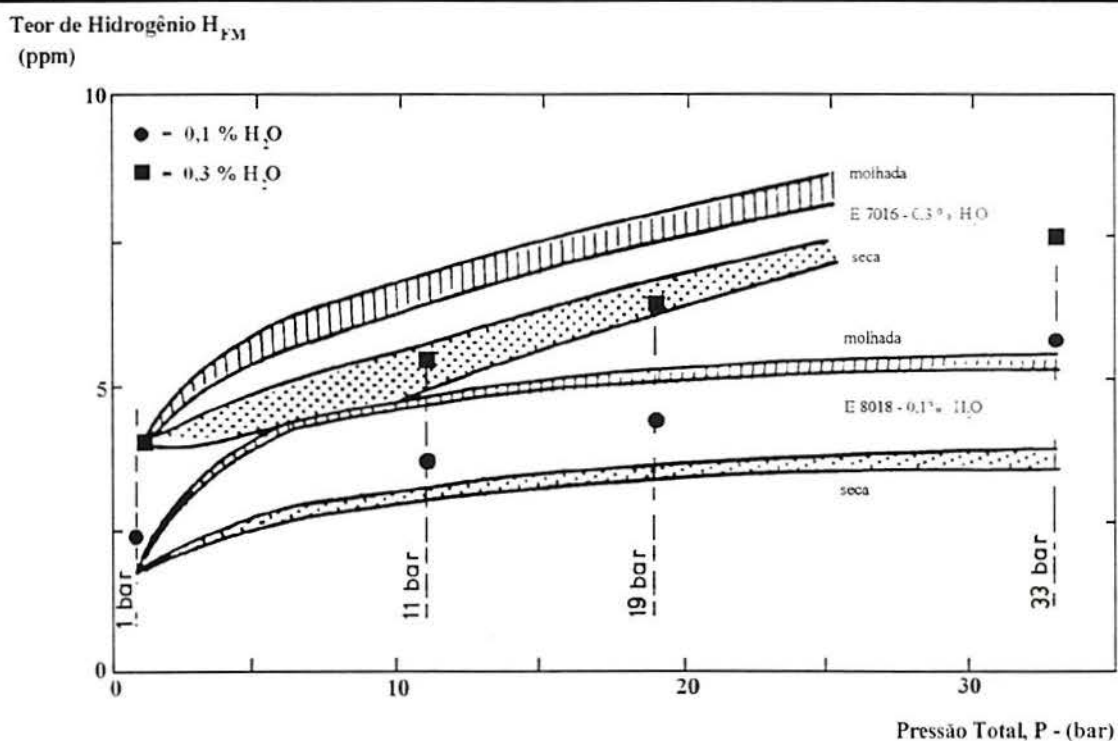


Fig. 3.11 - Variação no teor de hidrogênio em função da pressão, [32].

A Fig. 3.12 apresenta os resultados dos testes realizados com uma série de eletrodos experimentais, E8018-C1, com aumento gradual do teor de ferrosilício do revestimento. Nessa figura também pode-se observar a variação do produto $[C\%] \cdot [O\%]$ com a pressão, mostrando que, para esse eletrodo, o produto "m" é unicamente função da pressão.

A Fig. 3.13 mostra o efeito do aumento da pressão sobre o teor de elementos de liga presentes no metal de solda em soldagem hiperbárica seca a profundidades de até 25 bar. Pode-se notar que existe uma queda contínua nas concentrações de manganês e silício. O teor de molibdênio também diminui com o aumento de pressão, mas com uma menor tendência de queda do que aquela observada no caso do manganês e do silício. A concentração de níquel, por sua vez, não é afetada pela variação de pressão.

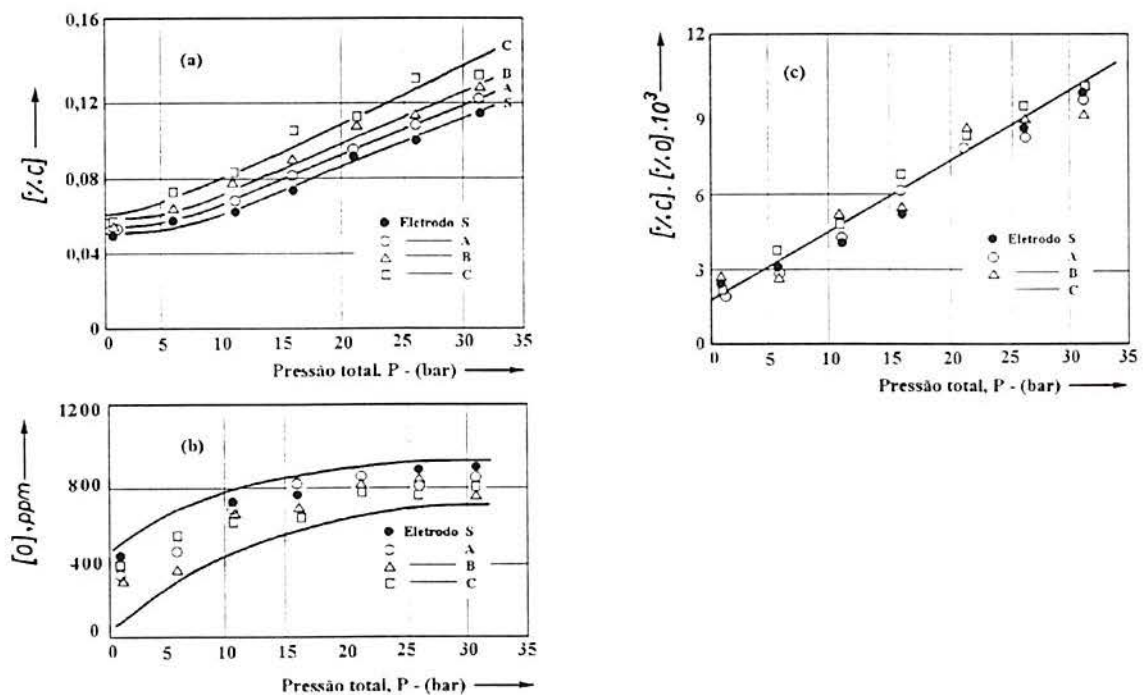


Fig. 3.12 - Variação nos teores de oxigênio e carbono, em função da pressão, /32/.

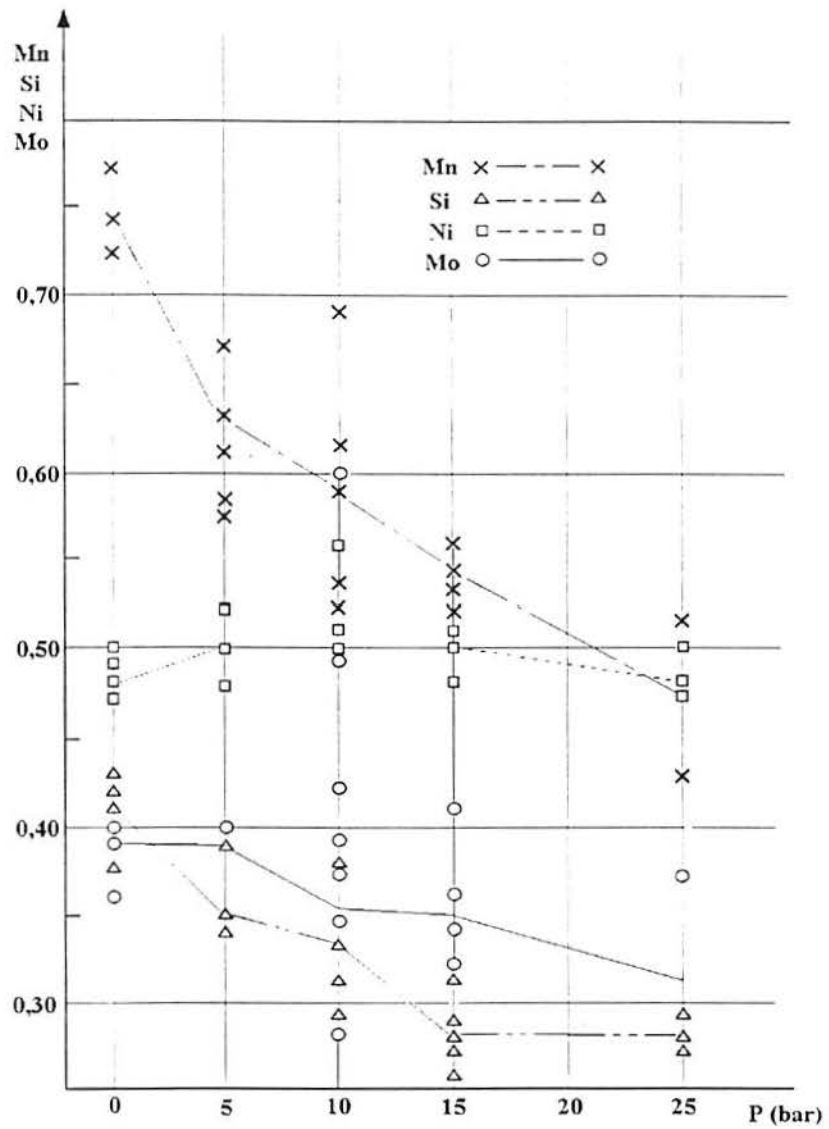


Fig. 3.13 - Variação no teor dos elementos de liga em função da pressão hidrostática.

[32].

4 DESENVOLVIMENTO DE ELETRODOS ESPECIAIS PARA SOLDAGEM MOLHADA

Os eletrodos para soldagem molhada são semelhantes àqueles utilizados nas soldas realizadas na superfície. O fluxo de revestimento, nesse caso, além daquelas funções que deve desempenhar fora da água, ainda deve satisfazer alguns requisitos impostos pelo ambiente aquático.

Durante a soldagem, o revestimento dos eletrodos deve cumprir as seguintes funções, /33, 34/, as quais não se alteraram nos últimos 50 anos:

- a) Dissolver ou reduzir as impurezas da chapa, agindo como fluxante.
- b) Alterar a tensão superficial do metal fundido tornando o fluxo metálico mais uniforme.
- c) Aumentar a estabilidade através da introdução de materiais com baixo potencial de ionização.
- d) Produzir uma atmosfera redutora ou não-oxidante na região do arco, reduzindo a possibilidade de contaminação do metal de solda.
- e) Formar uma camada de escória que protege o metal de solda e retarda o seu resfriamento.
- f) Formar uma “taça” na ponta do eletrodo que ajuda na concentração e direcionamento do arco.
- g) Introduzir elementos de liga no metal de solda.
- h) Isolar a superfície lateral do eletrodo de maneira que o arco se forme apenas na ponta do mesmo. Essa função do revestimento é particularmente importante quando da soldagem em chanfro estreito ou juntas em “V” com pequeno ângulo em chapas de grande espessura.

4.1 Características dos Vários Tipos de Eletrodos

As correntes de soldagem para soldagem molhada devem ser cerca de 20 a 25% superiores àquelas empregadas no ar atmosférico, /21, 35/. A tabela 4.1 apresenta uma listagem de condições operacionais recomendadas para eletrodos revestidos e oxi-corte dentro da água. O autor não cita para que profundidades estas condições são válidas, porém, sabe-se

que oxi-corte somente pode ser empregado a pequenas profundidades devido à pressão interna dos cilindros.

Tabela 4.1 - Condições Operacionais recomendadas para Soldagem e Oxi-Corte Subaquáticos. /21/.

| Condições operacionais para soldagem molhada com eletrodos revestidos | | | |
|---|---------------------|---------------------------|--------------------|
| Diâmetro do Eletrodo (mm) | Posição de Soldagem | Corrente de Soldagem (A)* | Tensão do Arco (V) |
| Eletrodo Tipo E-6013 | | | |
| 3.98 | Horizontal | 170 - 210 | 29 -35 |
| 3.98 | Vertical | 170 - 210 | 29 -35 |
| 3.98 | Sobre-Cabeça | 170 - 190 | 29 -35 |
| 4.76 | Horizontal | 220 - 260 | 29 -35 |
| 4.76 | Vertical | 220 -260 | 29 -35 |
| 4.76 | Sobre-Cabeça | 190 - 210 | 29 -35 |
| Eletrodo com Pó de Ferro** | | | |
| 4.76 | Horizontal | 220 -270 | 23 - 28 |
| 4.76 | Vertical | 220 - 270 | 23 - 28 |
| 4.76 | Sobre-Cabeça | 200 - 230 | 23 - 28 |

* Para corrente alternada os valores são 10% superiores
 ** Pode-se utilizar corrente contínua com qualquer polaridade

| Condições operacionais recomendadas para oxi-corte | |
|--|---|
| Espessura da Chapa (mm) | Pressão de Oxigênio (kg/cm ²) |
| 6.35 | 1.40 |
| 12.7 | 2.10 |
| 19.05 | 2.81 |
| 25.4 | 3.51 |
| Acima de 25.4 | 5.27 ou mais |

Observações: Esses valores devem ser verificados na tocha. A queda de pressão nas mangueiras deve ser calculada.

Os eletrodos básicos testados demonstraram características de difícil soldabilidade, o que pode ser explicado pela absorção de umidade e resolvido através de proteção adequada.

Eletrodos com revestimento contendo pó de ferro são capazes de produzir uma região cônica estável no fim do eletrodo que permite soldagem por arraste, encostando o eletrodo na peça, o que minimiza a habilidade necessária do operador em situações de pouca visibilidade. A abertura do arco com esses eletrodos é relativamente fácil e a taxa de deposição é alta.

4.2 Constituintes Utilizados no Fluxo de Eletrodos Revestidos

Na composição do fluxo de eletrodos revestidos são empregadas as seguintes categorias de constituintes, /36/:

- a) Minerais usados para proteger o arco e a poça de fusão da contaminação atmosférica
 - Formadores de gases: carbonatos de cálcio, manganês e potássio; fluoreto de cálcio; materiais orgânicos (como celulose).
 - Formadores de escória: carbonato de cálcio e manganês; rutilo; sílica; silicatos; talco; argila; dióxido de manganês; óxidos de ferro.
- b) Minerais usados como agentes de limpeza da poça de fusão
 - Carbonatos de cálcio e manganês; óxido de cálcio; fluoreto de cálcio; rutilo; sílica; talco; óxidos de ferro.
- c) Elementos que facilitam a abertura e auxiliam na estabilização do arco.
 - Pós de níquel e ferro; silicatos de sódio e potássio; feldspato; argila; talco.
- d) Desoxidantes ou agentes de redução
 - Ferro-ligas; ferrossilício; ferromanganês; pó de ferro.
- e) Minerais utilizados para controlar propriedades físicas importantes do fluxo que influem na geometria do cordão e destacabilidade da escória.
 - Óxidos de magnésio, manganês, ferro; rutilo; alumina e sílica junto com fluoreto de cálcio.
- f) Elementos que aumentam a taxa de deposição e auxiliam no controle da composição da solda.
 - Ferro-ligas; pós de ferro e níquel.
- g) Aglutinantes e minerais empregados para aumentar a resistência do fluxo
 - Silicatos, mica e ligantes orgânicos.

4.2.1 Classificação dos tipos de fluxo de revestimento de eletrodos

- *Ácido*: os fluxos de revestimento ácidos contêm altas quantidades de minérios de ferro e manganês e alumino-silicatos. Esses componentes tornam o revestimento extremamente ativo, resultando em um aço metalurgicamente efervescente em função do alto teor de hidrogênio e oxigênio. Soldas feitas com eletrodos ácidos usualmente apresentam excelente aparência, mas baixas propriedades mecânicas.

- *Rutilico*: no revestimento dos eletrodos rutilicos, os minérios de ferro e manganês são substituídos por TiO_2 (Rutilo). Isso reduz o efeito de contaminação pelo ar atmosférico existente nos eletrodos ácidos. O arco é mais estável e estes eletrodos são considerados bons para soldas de utilização geral.

- *Celulósico*: como o próprio nome sugere, este tipo de eletrodo contém material orgânico (normalmente celulose), responsável por cerca de 30% do peso total do fluxo. Silicato de zircônio é freqüentemente usado nestes eletrodos como estabilizante do arco e para facilitar a destacabilidade da escória. Com o teor de oxigênio e hidrogênio contido no revestimento, ocorre transferência por aerossol ("spray") e o hidrogênio auxilia no aumento de penetração, o que é vantajoso para determinadas aplicações.

- *Básico*: o modo de transferência observado na soldagem com eletrodos básicos se dá por gotas, depositando um metal de solda desoxidado com baixo teor de hidrogênio. Estes eletrodos podem ser secos, atingindo baixíssimo nível de umidade, minimizando os riscos de trincas induzidas por hidrogênio e proporcionando um metal de solda com baixas concentrações de oxigênio e conseqüentemente maior tenacidade.

A tabela. 4.2 mostra os intervalos de composição para cada um dos quatro tipos de fluxos de revestimento definidos acima, enquanto a tabela 4.3 apresenta um quadro resumido com a composição química e função dos componentes normalmente usados no revestimento dos eletrodos.

Tabela 4.2 - Limites de Composição Química usados na cobertura de Eletrodos Revestidos, /36/

| Composto | Tipo (% Peso) | | | |
|----------------------|---------------|-----------|------------|-----------|
| | Ácido | Rutilico | Celulósico | Básico |
| Ca C O ₃ | 5 - 15 | 15 - 25 | 5 - 15 | 25 - 40 |
| Ca F ₂ | | | | 30 - 40 |
| Celulose | | | 25 - 40 | |
| Fe O | 10 - 20 | 5 - 10 | 0 - 10 | |
| Ferro-ligas | | 0 - 5 | | |
| Fe Si | | | | 5 - 10 |
| Mica | | 10 - 20 | | |
| Mn O | 10 - 20 | 5 - 10 | 0 - 10 | |
| Mn O ₂ | 10 - 20 | | | |
| Si O ₂ | 10 - 20 | 5 - 15 | 5 - 15 | 5 - 15 |
| Ti O ₂ | Traço - 10 | 30 - 50 | Traço - 5 | Traço - 5 |
| Zr Si O ₄ | Traço - 5 | Traço - 5 | Traço - 10 | |

Tabela 4.3 - Composição Química e Função dos Componentes normalmente usados na cobertura de Eletrodos Revestidos, // (corrigida).

| Nome | Composição Química | Funções Principais |
|----------------------|--|--|
| Actinolita | Ca (Mg Be ₃) (Si O ₃) ₄ | |
| Alumina | Al ₂ O ₃ | Estabilizante do arco, formação de escória |
| Argila | Al ₂ O ₃ . 2 Si O ₂ . 2 H ₂ O | Lubrificante do fluxo, formação de escória |
| Bentonita | Complexo Al, Mg, Ca, Fe, Hidróxido | Elemento de liga |
| Cal | Ca O | Formação de gases, oxidante |
| Celulose | (C ₆ H ₁₀ O ₅) _x | Formação de gases |
| Criolita | Na ₃ Al F ₆ | |
| Dolomita | Mg . Ca . (C O ₂) ₃ | Estabilizante do arco, formação de gases |
| Feldspato | K ₂ O . Al ₂ O ₃ . 6 Si O ₂ | Lubrificante do fluxo |
| Fluorita | Ca F ₂ | Formação de escória, redução da viscosidade da escória |
| Ferromanganês | Mn Si O ₂ | Elemento de liga |
| Ferrossilício | Fe Si O ₂ | Elemento de liga, resistência do revestimento |
| Hematita | Fe ₂ O ₃ | Formação de escória, estabilizante do arco |
| Ilmenita | Fe O . Ti O ₂ | |
| Magnetita | Fe ₃ O ₄ | Formação de escória |
| Mica | K ₂ O . 3 Al ₂ O ₃ . 6 Si O ₂ . 2 H ₂ O | Estabilizante do arco |
| Muscovita | K Al ₂ (OH) ₂ . Al Si O ₃ O ₁₀ | |
| Pedra Calcária | Ca C O ₃ | Estabilizante do arco, formação de gases |
| Quartzo | Si O ₂ | Desoxidante, Fluidez da escória |
| Rutilo | Ti O ₂ | Formação de escória, redução da viscosidade de escória |
| Silica | Si O ₂ | Desoxidante, fluidez da escória, aumento da viscosidade da escória |
| Silicato de Potássio | K ₂ Si O ₃ | Aglomerante |
| Silicato de Sódio | Na ₂ Si O ₃ | Aglomerante |
| Talco | 3 Mg O . 4 Si O ₂ . H ₂ O | Lubrificante do fluxo, formação de escória |
| Titânia | Ti O ₂ | Formação de escória, estabilizante do arco |
| Zircônia | Zr O ₂ | Estabilizante do arco |

4.3 Testes Realizados para Definição do Tipo de Eletrodo Revestido a ser Usado em Soldagem Subaquática.

A seleção de uma combinação alma/fluxo de revestimento adequada pode ser considerada logicamente o primeiro passo no desenvolvimento de eletrodos especiais. Os seguintes critérios são considerados os mais adequados para aplicações universais de soldagem molhada, /3/:

1. Altas taxas de deposição.
2. Capacidade de trabalhar com altas correntes de soldagem.
3. Soldagem em todas as posições.
4. Penetração média.

Baseado nestas características, uma série de eletrodos revestidos para soldagem dos aços ao carbono das séries AWS E60XX e E70XX foram avaliados, chegando-se à conclusão de que os eletrodos da série E70XX produziam os melhores resultados.

Inicialmente foram utilizados os eletrodos da série E60XX (6010, 6011 e 6013) com proteção contra a umidade.

Sadowski, ^[4], realizou uma série de testes com o objetivo de determinar a possibilidade de melhoria da qualidade de juntas executadas por soldagem molhada, em aço ao carbono (SAE 1020), através da utilização de eletrodos à base de níquel e austeníticos. Neste trabalho, foram sugeridas inicialmente três possíveis procedimentos para a obtenção de juntas de boa qualidade:

a) Desenvolvimento de um eletrodo cuja alma tivesse baixo teor de carbono (0.03 % no máximo).

b) Uso de eletrodos que proporcionassem um depósito com maior tolerância ao hidrogênio - isto é, composição química à base de níquel ou aço inoxidável austenítico para aços com qualquer carbono equivalente.

c) Uso de chapas de aço baixo carbono ou endurecíveis por precipitação, como o IN-787 (C = 0.07 % máx., Mn = 0.55 %, Cr = 0.75 %, Ni = 0.85%, Mo = 0.2 %, Cu = 1.15 %, Cb = 0.2 % mín.).

Dentre essas hipóteses de desenvolvimento, a segunda foi escolhida por ser a mais imediatamente adaptável às condições e necessidades da equipe de pesquisa. Foram comparados 5 tipos de eletrodos à base de níquel (designados A, A1, A2, 112 e 182). Um eletrodo de aço inoxidável austenítico semi-comercial foi escolhido por causa da sua resistência à corrosão galvânica em ambiente marinho e cinco modificações no fluxo de revestimento desse eletrodo (designado R142), foram testadas. A tabela 4.4 apresenta as variações de composição química das almas e fluxos de revestimento deste eletrodo de aço inoxidável austenítico, além do E6013, o qual foi usado como padrão. Todos os eletrodos foram protegidos da absorção de água através de dois banhos de 20 s em uma solução contendo 1.5 g de nitrato de celulose para cada litro de acetona.

Os eletrodos foram classificados de acordo com sua operacionalidade (definida através da facilidade de remoção de escória, estabilidade do arco e facilidade de operação); nível de porosidades e ausência de defeitos (trincas e mordeduras).

Tabela 4.4 - Variações de Composição Química das almas e fluxos usados na confecção dos Eletrodos Revestidos de Aço Inoxidável Austenítico. /4/

| Código | Alma do Eletrodo ^(a) | | | | | | | | | |
|--------|---------------------------------|------|------|------|-----|------|-------|-------|--------|--------|
| | C | Si | Ni | Cr | Mo | Mn | P | S | Al | Ti |
| A | 0.27 | 0.56 | 24.2 | 20.3 | 6.4 | 1.42 | 0.023 | 0.004 | 0.04 | - |
| B | 0.10 | 0.98 | 24.2 | 19.8 | 6.2 | 1.79 | 0.015 | 0.004 | 0.052 | 0.037 |
| C | 0.43 | 0.31 | 24.1 | 20.2 | 6.5 | 0.96 | 0.003 | 0.013 | < 0.01 | < 0.01 |
| D | 0.012 | 0.50 | 26.0 | 20.3 | 7.1 | 0.31 | 0.004 | 0.005 | < 0.01 | < 0.01 |
| E | 0.059 | 0.10 | 26.1 | 21.7 | 6.7 | 0.05 | 0.002 | 0.004 | 0.15 | 0.07 |

| Código | Fluxo de Revestimento ^(b) | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|--|----------------------------------|--|
| | Ca CO ₃ | Na Al ₃ F ₆ | Ti O ₂ | Mn CO ₃ | Mn O ₂ | Fe ₆₀ Cb | Na ₂ Si O ₃ ^(c) | K ₂ Si O ₃ | |
| 1 ^(d) | 25 | 18 | 18 | - | 18 | 18 | 15 | - | |
| 2 ^(e) | 25 | 18 | 18 | - | 18 | 18 | 15 | - | |
| 3 | 28 | 21 | 18 | - | 12 | 18 | 15 | - | |
| 4 | 29 | 22 | 20 | - | 8 | 18 | 15 | - | |
| 5 | 30 | 22 | 23 | 22 | - | - | 15 | - | |
| 6 | 25 | 18 | 18 | 18 | - | 18 | 15 | - | |
| 7 | 30 | 22 | 23 | 22 | - | - | - | 15 | |

(a) - Eletrodos enviados para avaliação consistiam de: Alma do Eletrodo A + Fluxo 1- diâmetro 4.8 mm, R142; Alma do Eletrodo B + Fluxo 2- diâmetro 5.6 mm, R142.

(b) - Todos os fluxos contém 3% de bentonita.

(c) - 15 Na₂SiO₃ e K₂SiO₃ adicionados ao peso de outros componentes secos.

(d) - Produzidos comercialmente.

(e) - Produzidos no Inco Research & Development Center.

Quanto à operacionalidade e estabilidade, os eletrodos foram classificados, em ordem decrescente de desempenho, na seguinte seqüência: R142, 112, A e 182. Excetuando-se o eletrodo A, todos apresentaram fácil remoção de escória. As seguintes observações foram colocadas:

- Soldas feitas com os eletrodos à base de níquel e de aço inoxidável se mostraram livres de mordeduras e trincas.

- A aparência do cordão melhorou e houve redução do nível de porosidades para um dado eletrodo, com o aumento da corrente. Constatou-se que para eletrodos com 3.2 mm de diâmetro, com uma corrente de até 150 A, obteve-se os melhores resultados. Aquecimento excessivo do eletrodo causa contração e perda de aderência da cobertura de proteção contra a umidade.

- A espessura ótima do fluxo de revestimento varia para cada tipo de eletrodo. A profundidade da taça formada pelo revestimento durante a soldagem aumenta com a espessura da cobertura.

- Proteção adequada contra a umidade do ambiente é fundamental para operação satisfatória dos eletrodos dentro da água.

4.4 Pesquisas Visando à Melhoria do Desempenho dos Eletrodos Revestidos para Soldagem Subaquática.

Nas recentes pesquisas realizadas com o intuito de obter-se eletrodos apropriados para a soldagem de aços de alta resistência mecânica (soldas realizadas na superfície), a adição de pó de alumínio ao revestimento de eletrodos tipo E7018 foi investigada, [37]. Nesse estudo, foram comparados os seguintes eletrodos:

- Eletrodos tipo E7018 com adição de pó de alumínio, sem secagem, após exposição a atmosfera com 100% de umidade por vinte dias (corpo de prova - A).

- Eletrodos tipo E7018 armazenados em recipiente aberto durante vários meses (corpo de prova - B).

- Eletrodos tipo E7018 mantidos de acordo com as técnicas recomendadas para eletrodos de baixo hidrogênio (corpo de prova - C).

- Eletrodos tipo E6013 armazenados em local seco (corpo de prova - D).

Os resultados obtidos com a adição do pó de alumínio superaram as expectativas iniciais de desempenho. Esses eletrodos foram armazenados em condições mais críticas que aquelas observadas nas soldas realizadas em situações reais. Apesar disso, a quantidade de hidrogênio detectada no metal de solda foi muito pequena, como pode ser observado na tabela. 4.5.

Tabela 4.5 - Quantidade de Hidrogênio detectado no metal de solda, [37]

| Corpo de prova | Quantidade de hidrogênio detectada (ppm) |
|----------------|--|
| A | 2.3 |
| B | 11.2 |
| C | 1.3 |
| D | 25.5 |
| Metal Base | 6.2 |

Além disso, foram realizados os testes necessários para verificar se a adição de pó de alumínio não reduzia a qualidade da junta (exame radiográfico, ensaio de tração em corpos de prova totalmente retirados do metal de solda, teste de impacto e exame de juntas em filete soldadas nas posições vertical e sobre-cabeça). Os resultados obtidos comprovaram que a junta soldada estava em conformidade com os requisitos da norma AWS A5.1. [\[38\]](#). O autor acredita que a adição de pó de alumínio, aproximadamente 10 micropolegadas no diâmetro, é vaporizada no arco. A pressão parcial do gás de alumínio no gás de proteção o torna reativo, possibilitando sua combinação com hidrogênio e oxigênio na periferia do arco. Entretanto, é necessário um estudo mais aprofundado do fenômeno para explicar com maior precisão o mecanismo de atuação do alumínio.

Segundo o autor, os usuários relataram uma operação suave, com arco estável e mais fácil de soldar sobre superfícies contaminadas, como as normalmente encontradas nos casos de reparos. Os eletrodos foram usados na soldagem de aços de alta resistência. Para o caso específico da soldagem subaquática, a adição desse componente talvez possa reduzir os problemas de absorção de umidade e proporcionar soldas de maior qualidade.

5 TRANSFERÊNCIA DO METAL DE SOLDA NA SOLDAGEM POR ELETRODOS REVESTIDOS

5.1 O Arco Elétrico

Existem várias definições de arco elétrico. Segundo Jackson, /10/, o arco elétrico consiste de uma descarga elétrica sustentada através de um plasma condutor com alta temperatura, capaz de produzir energia térmica suficiente para unir metais por fusão. Manz, /15/, considera que, para todos os fins práticos, o arco na soldagem pode ser considerado um condutor gasoso que transforma energia elétrica em calor. O arco é a fonte de calor utilizada por diversos processos de soldagem porque produz alta intensidade de calor e é de fácil controle através dos parâmetros elétricos. Os arcos, além de fontes de calor, são fontes de radiação. Quando usado em processos de soldagem, um arco pode ajudar na remoção de óxidos da superfície, além de servir como fonte de calor, /39/. O arco também influencia no modo de transferência de metal do eletrodo para a peça.

O arco elétrico é um grupo particular de descargas elétricas que são formadas e mantidas pelo desenvolvimento de um meio gasoso de condução. Os condutores de corrente para o meio gasoso são produzidos através de meios térmicos e emissão de campos. Muitos tipos de arcos elétricos para soldagem já foram concebidos, cada um com uma aplicação particular no campo de união de metais. Em alguns casos, o arco elétrico é um dispositivo em estado estacionário. Mais freqüentemente o mesmo é intermitente, sujeito a interrupções por curto-circuito elétrico, ou continuamente não estacionário, estando influenciado por um fluxo alternadamente direcional de corrente ou por um fluxo turbulento do meio gasoso de condução.

A corrente do arco é transferida através do chamado "plasma", o estado ionizado da matéria, composto de aproximadamente igual número de elétrons e íons. Os elétrons, responsáveis pela maior parte da condução de corrente, saem do polo negativo (cátodo) em direção ao terminal positivo (ânodo). Misturados ao plasma estão outros estados da matéria, incluindo metais fundidos, escórias, vapores, átomos gasosos neutros e excitados, e moléculas. O estabelecimento de um estado de plasma neutro através de meios térmicos, isto é, por processos de colisão, requer que sejam atingidas as temperaturas de equilíbrio de acordo com o potencial de ionização do material no qual esse plasma é produzido. A formação do plasma é

governada por um conceito derivado da Lei dos Gases Ideais e da Lei da Ação da Massa. A equação básica é a seguinte:

$$\frac{n_e n_i}{n_o} = \frac{2Z_i (2\pi m_e kT)^{3/2}}{Z_o h^3} \exp\left[\frac{-V_i}{kT}\right] \quad [5.1]$$

Onde:

n_e , n_i , e n_o → Densidades de partículas (número por unidade de volume de elétrons, íons e átomos neutros, respectivamente).

V_i → Potencial de ionização do átomo neutro, (V).

T → Temperatura absoluta, (K).

Z_i e Z_o → Funções de partição para íons e partículas neutras.

h → Constante de Planck, ($= 6.6256 \times 10^{-34}$ J.s)

m_e → Massa do elétron, (9.108×10^{-31} kg).

k → Constante de Boltzmann, ($= 1.38 \times 10^{-23}$ J/K).

5.2 Características Elétricas

O arco elétrico é uma impedância ao fluxo de corrente, como acontece em todos os condutores de eletricidade. A impedância específica é inversamente proporcional à densidade dos portadores de corrente e sua mobilidade, sendo que a impedância total depende da distribuição radial e axial desses condutores de corrente. A impedância da coluna do plasma é função da temperatura, mas geralmente não nas regiões do arco próximas aos seus extremos. A potência elétrica dissipada em cada uma das três regiões que compõem o arco é o produto da corrente que atravessa o arco e a queda de potencial em cada região. A corrente e as quedas de potencial em cada região são expressas de acordo com:

$$P_w = I (E_i + E_c + E_p) \quad [5.2]$$

Onde: P_w → Potência, (W).

E_i → Queda de Potencial no ânodo, (V)

E_c → Queda de Potencial no cátodo, (V)

E_p → Queda de Potencial no plasma, (V)

I → Corrente, (A)

Essas três regiões são conhecidas como espaço de queda catódica, espaço da coluna do arco, e espaço de queda anódica. A Fig. 5.1 mostra a distribuição de potencial ao longo do

arco. Entretanto, existem regiões intermediárias agindo no sentido de expandir ou contrair a seção transversal do condutor gasoso de maneira a acomodar cada região principal. Como consequência, o arco pode assumir a forma cônica, contornos elípticos ou outras configurações não-cilíndricas. Diversos fatores podem contribuir para essa variação na forma, incluindo a configuração dos extremos do arco, forças gravitacionais e magnéticas, e interações entre o plasma e as pressões ambientes.

A área pela qual a corrente escoava entre os extremos do arco (pontos catódico e anódico) tem fundamental importância sobre a configuração do arco e sobre o fluxo de energia térmica entre estes terminais. A densidade de corrente no terminal da peça a ser soldada é de fundamental importância para o tamanho e forma da zona de fusão, e para a penetração em uma junta soldada.

A tensão de soldagem inicialmente diminui com o aumento de corrente, para depois aumentar. As curvas típicas de tensão-corrente e características percentuais de transferência de calor em um arco elétrico obtido com eletrodo de tungstênio em atmosfera de argônio são exibidas na Fig. 5.2.

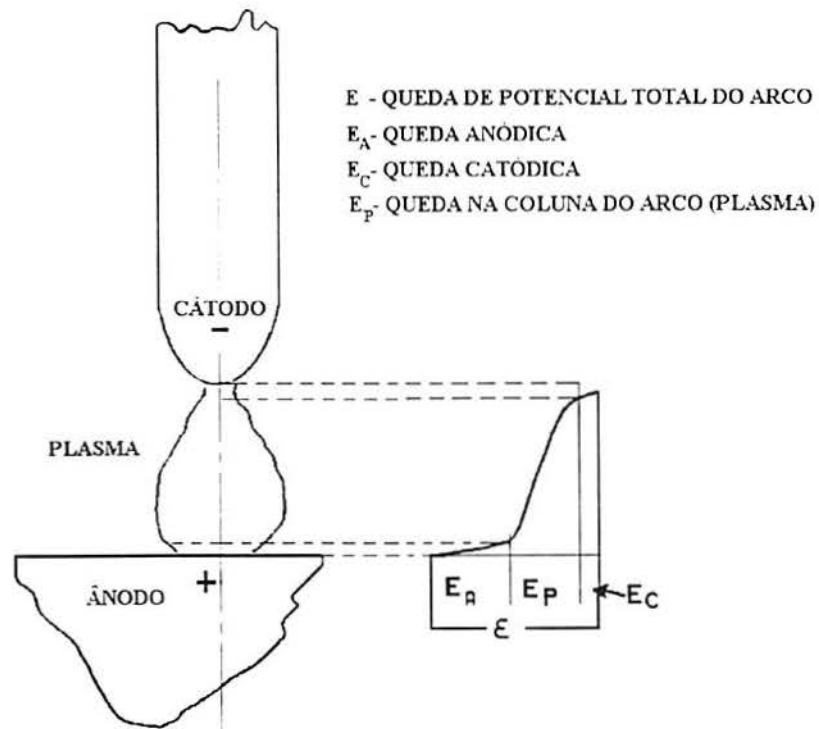


Fig. 5.1 - Distribuição de Potencial (Volts) do arco entre eletrodo e a peça, /8/.

A queda de potencial do arco com o aumento da corrente pode ser atribuída a um crescimento da ionização por efeito da temperatura e emissão eletrônica induzida pelo calor no cátodo. A diferença de potencial total dos arcos geralmente aumenta com o espaçamento entre os terminais do arco. Como a coluna do arco perde continuamente transportadores de carga por causa da migração radial para a zona periférica do arco, mais fria, aumentando o comprimento do arco aumenta a exposição da coluna do arco a essa região periférica fria, impondo uma maior dificuldade na manutenção de transportadores de carga. Para superar essa perda de energia e manter a estabilidade, é necessário aumentar a tensão aplicada.

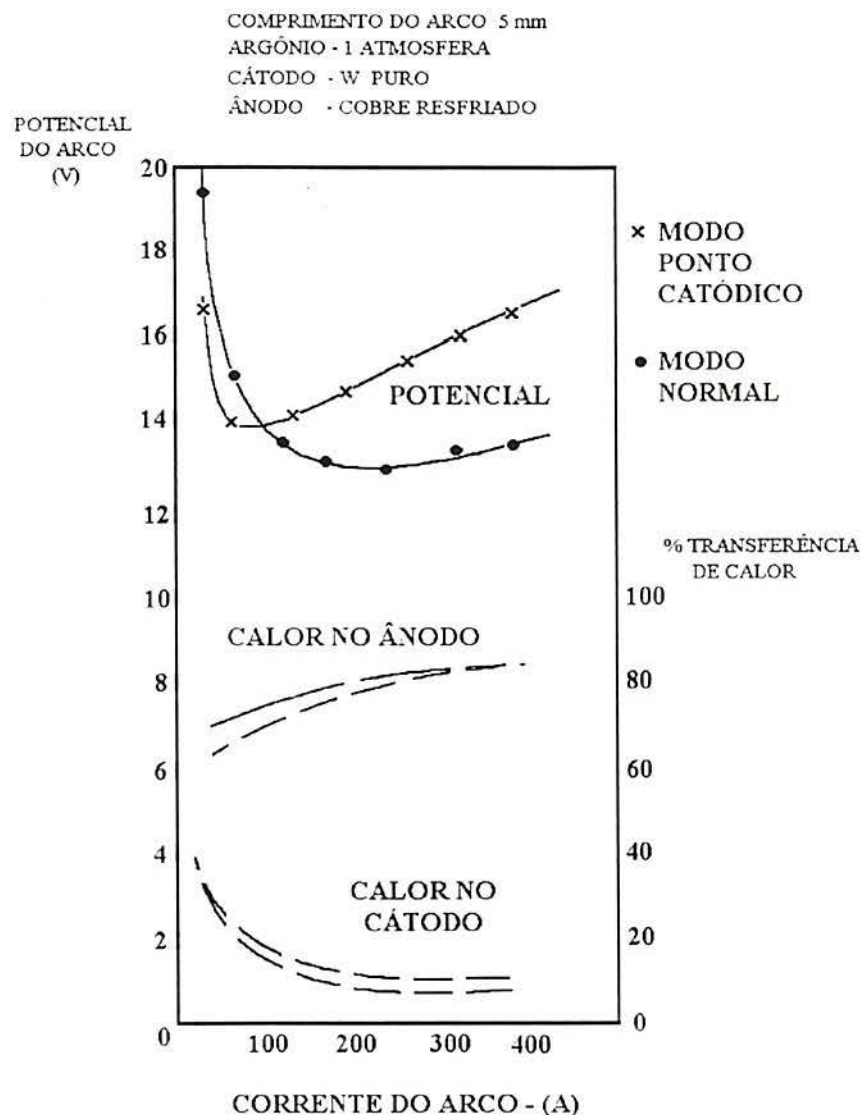


Fig. 5.2 Características Volt/Amperé e de transferência percentual de calor de um arco com eletrodo de tungstênio em atmosfera protegida por argônio, /8/.

É essencial que o material do cátodo proporcione elétrons por emissão de densidade suficiente para transportar a corrente. No processo TIG, o eletrodo de tungstênio foi escolhido por causa de sua grande capacidade de emissão de elétrons quando apenas uma pequena porção da ponta do eletrodo é fundida. No caso de eletrodos consumíveis, devem ser adicionados aditivos ao revestimento para assegurar transferência estável ou livre de salpicos.

5.3 Forças Atuantes na Transferência de Metal do Eletrodo para a Peça

Uma revisão das pesquisas realizadas sobre a maneira pela qual o metal líquido se transfere do eletrodo para a peça é objeto de alguns trabalhos virtualmente dedicados à soldagem por eletrodos revestidos, /9, 33, 40 - 52/ e as forças consideradas importantes em relação à transferência de metal são:

a) Força gravitacional.

A força gravitacional é a mais simples de calcular e permanece constante durante o período em que a gota de metal líquido é transferida, podendo assumir valor positivo ou negativo, dependendo da posição de soldagem. Em comparação com as demais forças atuantes durante a transferência, a força da gravidade não é considerada uma força de grande importância. Essa conclusão é baseada nas seguintes observações, /44/:

- Na soldagem em posição descendente, as velocidades das partículas são muito superiores àquelas que poderiam ser produzidas pela força da gravidade.

- Mesmo na soldagem em posição ascendente, contra a força da gravidade, as partículas são projetadas na direção horizontal.

- A taxa de deposição do metal de adição é praticamente a mesma quando medida nas posições sobre-cabeça e descendente.

A força da gravidade é dada por:

$$F_G = \rho \cdot g \cdot V \quad [5.3]$$

Onde:

ρ → Peso específico do metal, (kg/m³).

g → Aceleração da gravidade, (m/s²).

V → Volume da gota, (mm³).

b) Força devida à tensão superficial.

A tensão superficial é considerada a força de maior magnitude, no sentido de reter a gota na ponta do eletrodo. No caso isotérmico e com a força peso agindo, o valor da tensão superficial é dado por, [45]:

$$F_{TS} = \pi \cdot d \cdot \sigma \cdot \Psi(r/c) \quad [5.4]$$

Onde:

d → Diâmetro do eletrodo, (mm).

σ → Tensão superficial, (N/m).

r → Raio do eletrodo = $d / 2$, (mm).

c^2 → Constante de capilaridade = $\sigma / (\rho \cdot g)$.

$\Psi(r/c)$ → Fator de correção, varia entre 0.6 e 1.0 dependendo da relação entre r e c . A Fig. 5.3 mostra essa função para um eletrodo de aço ao carbono.

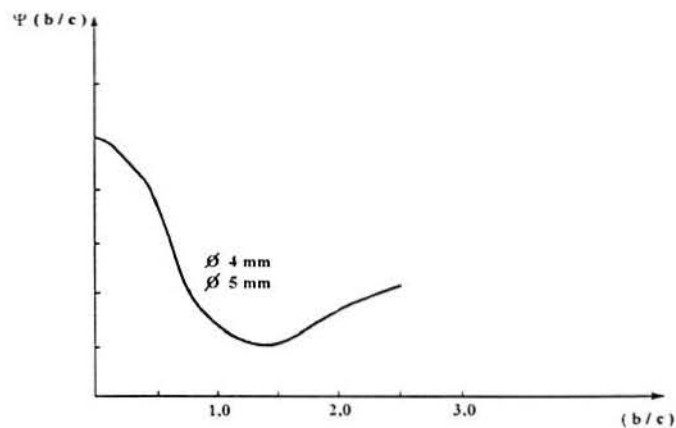


Fig. 5.3 - Valor do fator de correção $\Psi(r/c)$ em função da relação r/c para um eletrodo de aço ao carbono, [45].

c) Forças eletromagnéticas (efeito "pinch").

Sabe-se que dois condutores paralelos pelos quais circula corrente na mesma direção sofrem atração mútua. Um condutor único pode ser considerado como sendo constituído por um conjunto de filamentos condutores de corrente. Desta forma, existe uma força agindo sobre o condutor no sentido de reduzir o seu diâmetro. Nos condutores usualmente utilizados, essa força pode ser considerada desprezível em função da sua rigidez, mas no caso de condutores líquidos, como a gota de metal fundido na ponta de eletrodos consumíveis para soldagem ao

arco, ela se torna importante. A força eletromagnética pode ser representada pela expressão abaixo, /46/:

$$F_E = \frac{I^2}{200} \ln(A_2 / A_1) \quad [5.5]$$

Onde:

I → Corrente de Soldagem, (A).

A₁ → Área de entrada da corrente, (mm²).

A₂ → Área de saída da corrente, (mm²).

d) Força de arraste do plasma e do gás de proteção

As forças de arraste do plasma e do gás de proteção são originadas pelo atrito entre o gás e a superfície da gota e a diferença de pressão causada pela vorticidade. Essas forças ajudam no destacamento e na aceleração da gota durante a sua passagem pelo arco elétrico. A expressão dessa força é dada por, /47/:

$$F_A = C_A \cdot A_{GO} \cdot d_p \cdot \frac{U_p^2}{2} \quad [5.6]$$

Onde:

C_A → Coeficiente de atrito, (adimensional)

A_{GO} → Área projetada da gota, (mm²).

d_p → Densidade do plasma, (kg/m³).

U_p → Velocidade do plasma, (m/s).

e) Força devido à pressão gerada pela mancha catódica na ponta do eletrodo.

Essa força foi proposta por Conrady, /40/ (ver seção 5.4.1) como sendo a responsável pela transferência de metal na soldagem com eletrodos nus em posição sobre-cabeça.

Porém, segundo Larson, /44/, essa força não aparece como fator importante na transferência do metal de solda. Essa afirmação é sustentada pela constatação de que diversas operações de soldagem são efetuadas nas posições vertical e sobre-cabeça usando corrente contínua, eletrodo positivo. Nesse caso, o ponto catódico encontra-se na peça e não no eletrodo. Larson também cita testes realizados com eletrodos de aço ao carbono que receberam tratamento especial para que estivessem livres de gases, com os quais foi impossível soldar na posição sobre-cabeça, mesmo usando eletrodo negativo (polaridade direta).

f) Forças causadas pelo fluxo gasoso gerado pelo revestimento do eletrodo e pela formação de bolhas de gás dentro da gota líquida.

Em seu modelo de transferência (ver seção 5.4.3), Larson considera a existência das forças geradas dentro da gota metálica pela expansão de gases e vapores metálicos, como o principal fenômeno atuando na transferência do metal de solda na soldagem por eletrodos revestidos.

A Fig. 5.4 apresenta um desenho esquemático da ponta fundida de um eletrodo revestido ilustrando as diferentes forças envolvidas na transferência do metal durante a soldagem, [48]. As forças devidas à tensão superficial, evaporação metálica e expansão de gases na ponta do eletrodo são consideradas as mais influentes no caso de soldagem ao arco elétrico com eletrodos revestidos.

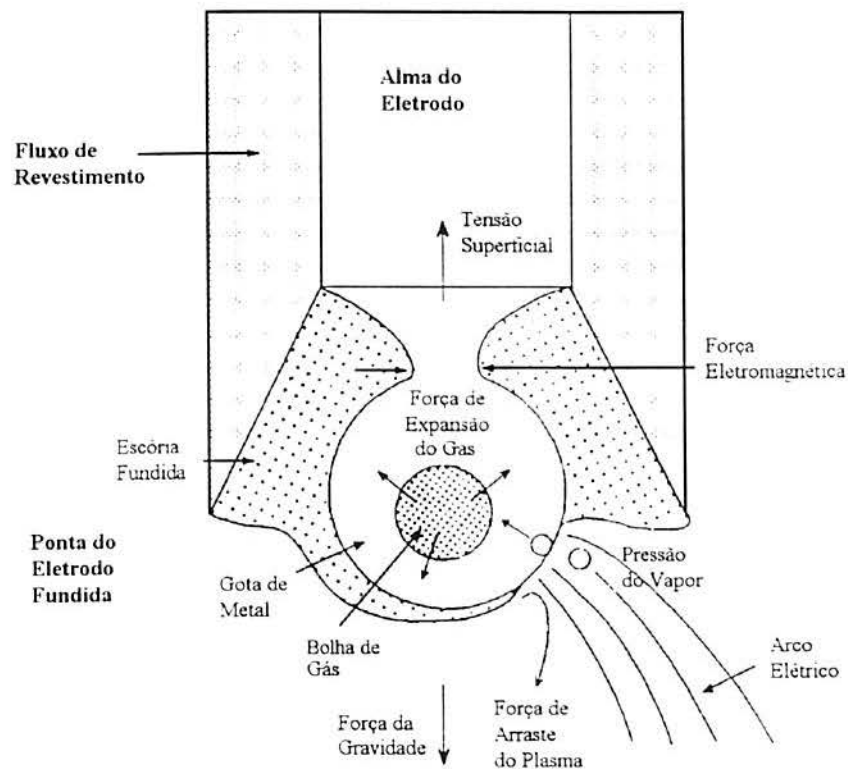


Fig. 5.4 - Forças envolvidas na transferência do metal durante a soldagem por eletrodos revestidos, [48].

5.4 Modelos de Transferência do Metal de Solda na Soldagem por Eletrodos Revestidos

A transferência de massa é um aspecto essencial na maioria dos processos de soldagem ao arco. No caso dos processos com eletrodo consumível, onde o eletrodo é, ao mesmo tempo, fonte de calor e de metal de adição líquido, essa característica assume uma importância fundamental.

Os processos de soldagem ao arco elétrico com eletrodo consumível são usados largamente por que o metal de adição é depositado mais eficientemente e com maiores taxas de deposição em relação aos outros processos de soldagem. Para ser mais efetivo, o metal de adição necessita ser transferido a partir do eletrodo, sem muitas perdas devido à escória. Além disso, curto-circuitos excessivos entre o eletrodo e a peça devem ser evitados, para que o soldador tenha condições de controlar o processo.

Conrady, (1940), e Larson, (1942), foram os primeiros pesquisadores a propor modelos para a transferência do metal na soldagem por eletrodos revestidos. Após a publicação destes trabalhos, as pesquisas sobre modos de transferência se concentraram no estudo do processo de soldagem ao arco metálico com proteção gasosa ("MIG"). Apenas recentemente surgiram alguns novos estudos sobre o assunto: Becken, em 1969, e Chen et al., em 1989.

A seguir serão descritos esses modelos.

5.4.1 Modelo de CONRADY

Conrady, ^[40] estudou a soldagem com eletrodo nu na posição sobre-cabeça em corrente contínua, eletrodo negativo, e atribuiu a transferência de metal à pressão existente sobre o ponto catódico. O metal líquido sofre um aumento de pressão, nesse ponto, fazendo que as regiões adjacentes avancem em direção ao metal base. O arco então se desloca para a região da ponta do eletrodo mais próxima do metal base, passando a agir sobre esse ponto da mesma maneira que no anterior, causando um movimento alternado de aproximação com a peça que eventualmente resulta em curto-circuito. O metal então se transfere para a poça de fusão auxiliado pela tensão superficial, e finalmente o efeito de estrição separa o eletrodo da peça.

O modelo de transferência proposto por Conrady está representado na figura 5.5.

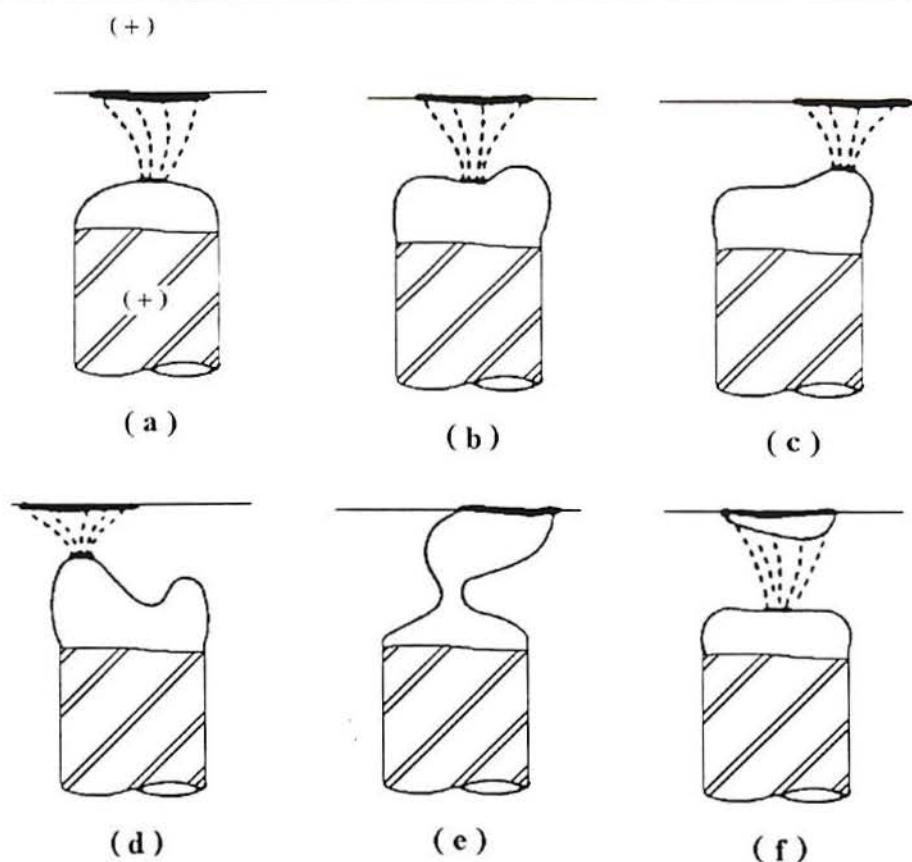


Fig. 5.5 - Mecanismo de transferência do metal de solda proposto por Conrady, /40/.

5.4.2 Modelo de BECKEN

Um mecanismo similar foi proposto posteriormente por Becken, /43/, baseado na avaliação de filmes de raios-X de alta velocidade feitos durante a soldagem. Entretanto, Becken atribuiu a variação de pressão na gota líquida à reação com os vapores formados a partir do revestimento e/ou do metal líquido e sugeriu que a gota pode se destacar do eletrodo apenas por efeito das forças eletromagnéticas sem ocorrência de curto-circuito. Nesse trabalho foi utilizado um eletrodo com revestimento rutilico, alma de aço acalmado em corrente contínua, eletrodo negativo.

A Fig. 5.6 ilustra os dois modos de transferência (fig. 5.6 c e d) observados nos filmes de raios-X: a ocorrência ou não de curto-circuito depende do comprimento do arco.

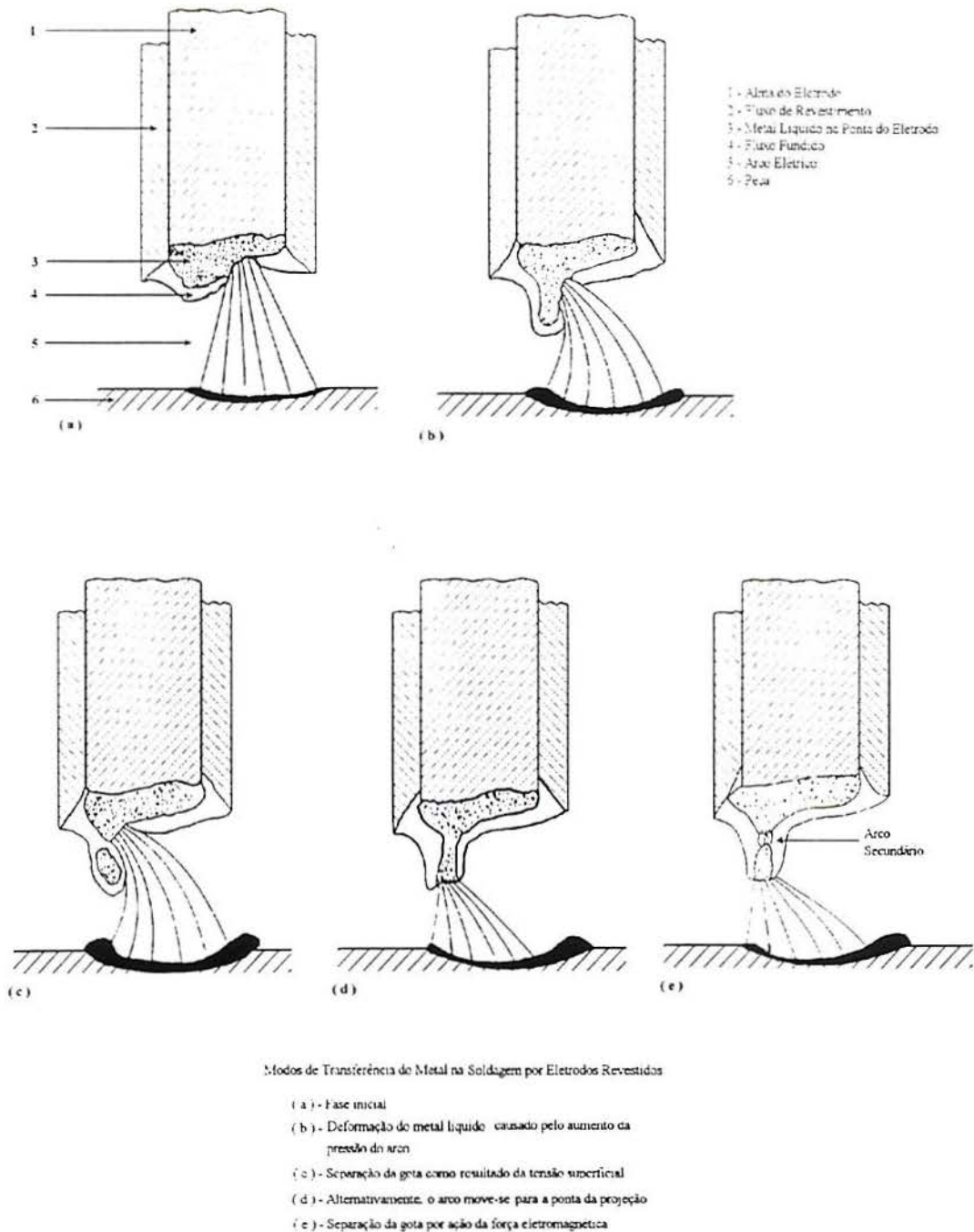


Fig. 5.6 - Mecanismo de transferência do metal de solda proposto por Becken, /43/.

5.4.3 Modelo de LARSON

Larson, /44/ propôs uma hipótese alternativa: que a transferência seria o resultado da

formação de bolhas de gás dentro da gota metálica formada na ponta do eletrodo. Essas bolhas crescem e, eventualmente, explodem, gerando pequenas gotas que se transferem para a peça.

Os aços comerciais contêm gases dissolvidos além de inclusões não metálicas e elementos mais voláteis, como o Mn que são vaporizados pelo arco. Quando esses gases e vapores são liberados rapidamente, podem ocasionar a expulsão de pequenas partículas a partir da ponta do eletrodo. Entretanto, uma explicação mais plausível é a de que esses gases são formados sob a superfície do metal fundido e, por causa da tensão superficial do líquido, a expansão dos gases forme bolhas de metal na ponta do eletrodo. Essas bolhas podem ser grandes ou pequenas, caso a evolução de gases seja geral ou localizada. Podendo haver rompimento da bolha, com conseqüente transferência de grande número de finas partículas para a peça; ou a bolha pode expandir-se, tocando a chapa e ocasionando um curto-circuito onde a alta corrente que circula através do filme metálico causa uma explosão transferindo o material para a peça.

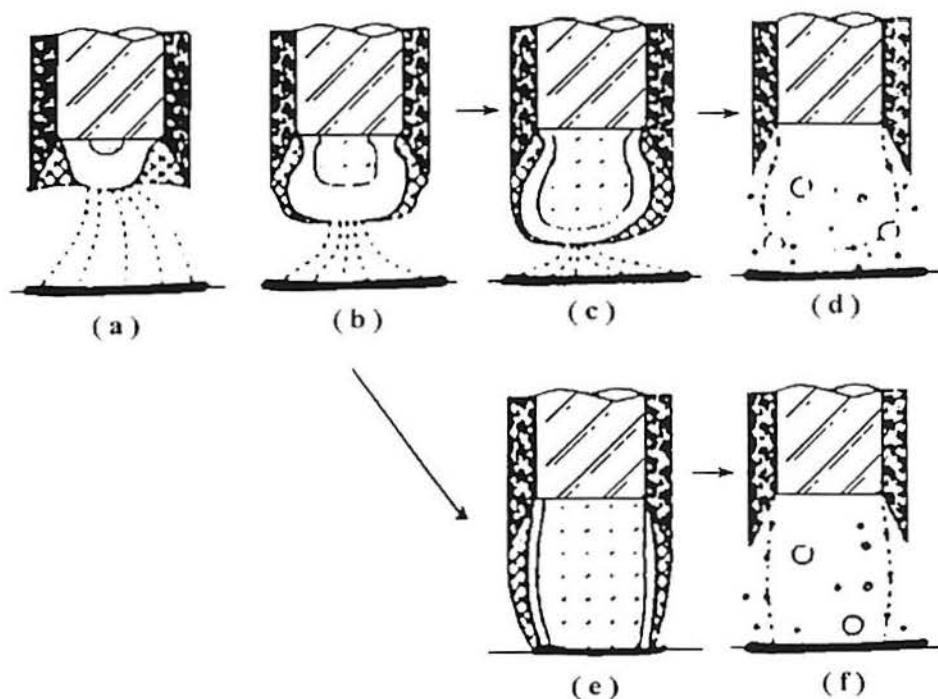


Fig. 5.7 - Mecanismo de transferência do metal de solda proposto por Larson, [44].

Brandi et al. /48/, em trabalho realizado recentemente, comprovaram a ocorrência de formação destas bolhas de gás. A Fig. 5.8 apresenta uma macrofotografia mostrando a taça e a bolha de gás formadas na ponta de um eletrodo.

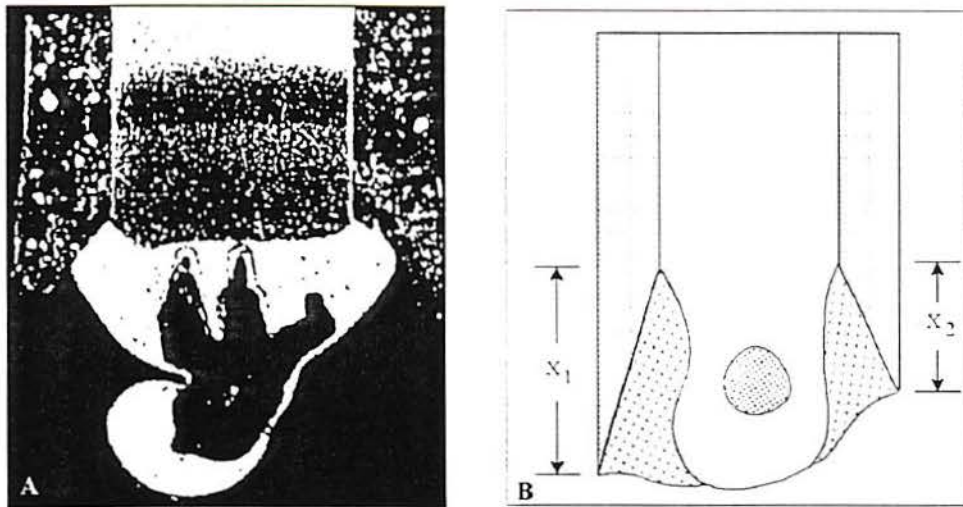


Fig. 5.8 - Macrofotografia e desenho esquemático da ponta de um eletrodo revestido, mostrando barreira à manutenção do arco (taça formada pelo revestimento), e bolha gasosa existentes, /48/.

5.4.4 Modelo de CHEN

Chen et al., /50/ realizaram um extenso trabalho, medindo a força do arco, tensão superficial e tamanho das gotas transferidas por eletrodos revestidos básicos e de aço inoxidável soldados com corrente contínua, eletrodo positivo. Baseados nas medições e análises quantitativas e sistemáticas dos fatores mecânicos atuantes, um mecanismo de transferência globular foi hipotetizado. A força do arco, produzida pelo vapor gasoso emitido principalmente a partir da decomposição do carbonato e outros componentes do revestimento, atua sobre a gota de metal fundido na ponta do eletrodo. Sob a ação combinada da força do arco e da tensão superficial, a gota oscila. Quando o tamanho da gota aumenta, a força efetiva do arco e a amplitude dessas oscilações também aumentam. Neste momento, a força para baixo (soma da força do arco com força inercial oscilatória e peso da gota), excede o valor da tensão superficial da gota, destacando-a do eletrodo.

Os modelos propostos por Conrady e Becken foram identificados em alguns momentos, mas a partir da análise de grande número de filmagens em alta velocidade, chegou-se à conclusão de que no caso de soldagem com eletrodos básicos ou de aço-inoxidável em corrente contínua, eletrodo positivo, esses mecanismos ocorrem apenas em casos excepcionais.

5.5 Classificação dos Modos de Transferência do Metal de Solda

De acordo com o Welding Handbook, /39/, os modos de transferência de metal através do arco no processo de eletrodos revestidos podem ser caracterizados como: globular (gotas massivas) ou como aerossol (“spray”) aparente (grande número de pequenas gotas).

O International Institute of Welding - IIW apresenta uma classificação mais completa e detalhada envolvendo todos os processos de soldagem ao arco metálico com eletrodo consumível, /53/. Nesta classificação os tipos de transferência são divididos em três grandes grupos: vôo livre, por contato e guiada pela escória. A tabela. 5.1 apresenta essa classificação completa.

Tabela 5.1 - Classificação dos Modos de Transferência do Metal segundo o IIW, /53/

| Designação do Modo de Transferência | Processo de Soldagem (exemplo) |
|---|---|
| - Transferência em Vôo Livre | |
| Globular | |
| Por Gotas | MIG / MAG com baixos níveis de corrente |
| Por Repulsão | MAG com proteção gasosa de CO ₂ |
| Aerossol | |
| Projetada | MIG / MAG com nível de corrente intermediário |
| Por Pulverização Axial | MIG / MAG com nível de corrente maior |
| Por Pulverização Rotacional | MIG / MAG com nível de corrente elevado |
| Por Explosão | Eletrodo Revestido |
| - Transferência por Contato | |
| Por Curto-circuito | MIG / MAG com arco curto |
| Por Contato sem Interrupção | Soldagem com adição de metal - TIG |
| - Transferência Protegida pela Escória | |
| Guiada pela Parede - Fluxo | Arco Submerso |
| Outros modos | Eletrodo Revestido, Eletrodo Tubular, Eletroescória |

6 ESTABILIDADE DO ARCO ELÉTRICO NA SOLDAGEM POR ELETRODOS REVESTIDOS

Na soldagem ao arco elétrico com eletrodos revestidos, um fator importantíssimo para estabelecer a técnica adequada de realização da solda é empiricamente definido como “facilidade ou dificuldade no manuseio”, durante o decorrer da operação de soldagem. Na soldagem subaquática, em função da baixa visibilidade, sensibilidade ao tato e audição assumem grande importância para que o operador saiba se o cordão está sendo depositado como desejado.

Nessas condições, fácil abertura do arco e deposição “suave”, são características que afetam dramaticamente as duas variáveis controladas pelo soldador/mergulhador: a força aplicada ao eletrodo e a velocidade de soldagem. Por essa razão, é importante a definição de critérios objetivos, os quais permitam caracterizar e classificar um eletrodo quanto ao nível de estabilidade do arco elétrico que o mesmo proporciona.

6.1 Critérios para Caracterização da Estabilidade do Arco Elétrico

A definição de estabilidade do arco é ainda motivo de muitas controvérsias, porque implica tanto na facilidade de soldagem, quanto na obtenção de uma geometria o mais regular possível do cordão de solda. De qualquer maneira, um arco estável deve atender a dois requisitos, /54/:

⇒ *Transferência de metal uniforme e eficiente.*

⇒ *Rápida reignição do arco*, tanto após curto-circuitos como em mudanças de polaridade.

6.1.1 Critérios para Caracterização da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem com Corrente Alternada

A estabilidade de um arco elétrico durante a soldagem com corrente alternada é determinada pelos fenômenos que ocorrem durante o período de transição. Um arco pode ser considerado estável quando a potência elétrica fornecida pela fonte compensa a potência necessária para estabelecer o arco no espaço existente entre eletrodo e peça e pela dissipação de calor para o ambiente.

As condições de estabilidade dinâmica no espaço do arco na região de corrente zero

são dadas pela seguinte equação, /55/:

$$\frac{1}{C.R_0} > \frac{1}{\theta} \quad [6.1]$$

Onde:

C → capacitância do circuito, (Farad).

R_0 → resistência do espaço entre eletrodo e peça, (Ohm).

θ → $\frac{Q_0}{P_0}$ = constante de tempo do arco, isto é, tempo durante o qual a

potência dos corpos entre os quais é estabelecido o arco elétrico, Q_0 , é completamente dissipada, sendo a potência média das perdas igual a P_0 .

Analisando-se esta desigualdade (Eq. 6.1), nota-se que a característica de estabilidade do arco elétrico pode ser avaliada através de parâmetros que indiquem a resistência (ou condutividade) no espaço entre eletrodo e material base. Através desse conceito, Pokodnya, /56/, propôs um índice, "B", o qual indica a velocidade média de aumento na condutividade elétrica da região entre eletrodo e peça, no período de reignição do arco. A Fig. 6.1 ilustra a variação que ocorre nos parâmetros (tensão e corrente) durante um ciclo completo de soldagem.

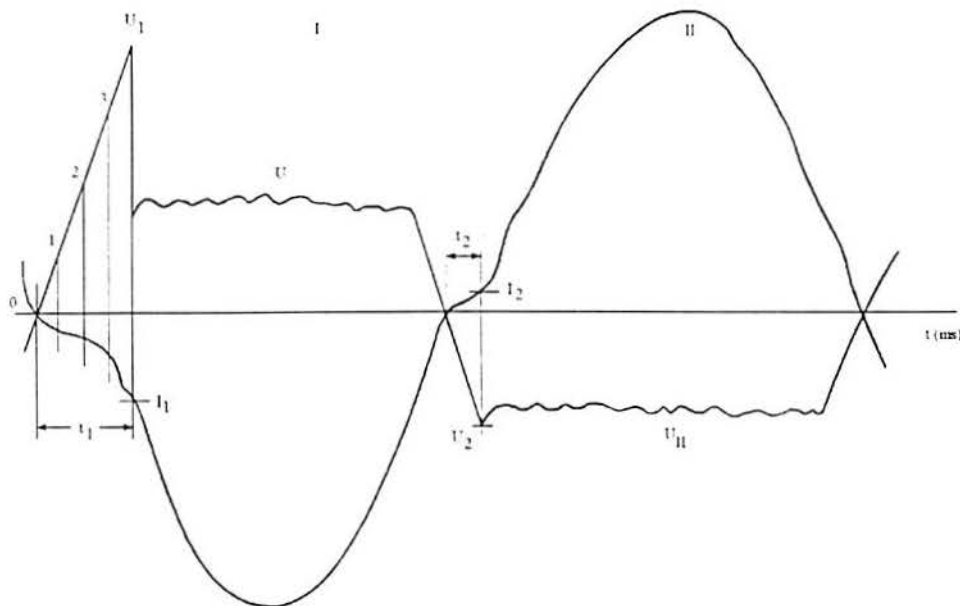


Fig. 6.1 - Variação nos parâmetros durante a soldagem em corrente alternada (sem indutância no circuito). I - meio-ciclo positivo, II - meio-ciclo negativo, /56/.

Durante cada meio-ciclo, um tempo t_1 passa antes que a potência fornecida aos eletrodos atinja o nível necessário para restabelecer a descarga do arco.

O índice "B" é definido na Eq. 6.2, onde U_1 e I_1 são, respectivamente, tensão entre eletrodo e peça e corrente nessa região no instante de reignição do arco.

$$B = \frac{I_1}{U_1 \cdot t_1} \quad (\Omega^{-1} \cdot s^{-1}) \quad [6.2]$$

A tensão de ignição, U_1 , pode ser definida como:

$$U_1 = \sqrt{2} \cdot U_{CA} \cdot \text{sen}(w \cdot t_1 + \varphi) \quad [6.3]$$

Onde:

$w \rightarrow$ frequência angular, (rad/s).

$\varphi \rightarrow$ ângulo de fase entre corrente e tensão de circuito aberto, (rad).

$U_{CA} \rightarrow$ tensão de circuito aberto, (V).

Substituindo-se $w = 2 \cdot \pi \cdot f$ e U_1 dado pela Eq. 6.3 na Eq. 6.2, obtém-se a expressão completa de "B":

$$B = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_1}{U_1 \left(\arcsen \left(\frac{U_1}{\sqrt{2} \cdot U_{CA} - \varphi} \right) \right)} \quad [6.4]$$

onde f representa a frequência, (Hz).

De acordo com esta equação, a estabilidade do arco aumenta proporcionalmente a um aumento no valor da corrente, I_1 , frequência da fonte, f , tensão de circuito aberto, U_{CA} , ângulo de fase da corrente em relação à tensão de circuito aberto, φ , e com a diminuição de U_1 .

Em outro trabalho, [57], Pokodnya relaciona a estabilidade à menor tensão eficaz em vazio de uma fonte com arco estável, calculando a tensão em vazio mínima, U_0^{min} , através da seguinte equação:

$$U_0^{min} = \frac{U_1^* + 3 \cdot \sigma U_1^*}{\sqrt{2}} \quad [6.5]$$

Onde:

$U_1^* \rightarrow$ Média dos picos de tensão no momento da reignição (Fig. 6.1), no meio

ciclo positivo, (V).

$\sigma U_1^+ \rightarrow$ Desvio padrão dos valores de U_1^+ , (V).

Quanto menor U_0^{min} , mais estável o arco elétrico.

6.1.2 Critérios para Caracterização da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem com Corrente Contínua

Vários critérios para caracterização da estabilidade em corrente contínua têm sido propostos. Estes critérios estabelecem índices de aferição da estabilidade baseados na avaliação dos valores instantâneos dos parâmetros de soldagem, /54, 58, 59- 66/:

I_{rms} \rightarrow Raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da corrente instantânea de soldagem, (A).

U_{rms} \rightarrow Raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da tensão instantânea do arco, (V).

\bar{I}_1 \rightarrow Corrente média de reignição do arco, (A).

\bar{U}_1 \rightarrow Tensão média de reignição do arco, (V).

Além destes indicadores, a estabilidade é caracterizada através das definições de:

a) *Transferência de metal.*

A transferência de metal de adição da ponta do eletrodo para a peça é avaliada através de dois critérios:

- A *facilidade* de ocorrência de curto-circuitos, F_{cc} , e a *facilidade* de transferência da gota, durante o curto-circuito, F_{tm} , são definidas respectivamente como:

$$F_{cc} = \frac{1}{T_{cc}} \quad [6.6]$$

$$F_{tm} = \frac{1}{t_{cc}} \quad [6.7]$$

onde:

T_{cc} \rightarrow Período médio de curto-circuito, (ms).

t_{cc} \rightarrow Tempo médio do curto-circuito, (ms).

- A *regularidade* na transferência de metal é avaliada através dos índices R_{cc} e R_{tm} , definidos como:

$$R_{sc} = \frac{T_{sc}}{\sigma_T} \quad [6.8]$$

$$R_{tm} = \frac{t_{cc}}{\sigma_{t_{cc}}} \quad [6.9]$$

onde:

σ_T → Desvio padrão da raiz quadrada da média aritmética dos quadrados do período.

$\sigma_{t_{cc}}$ → Desvio padrão da raiz quadrada da média aritmética dos quadrados do tempo de curto-circuito.

b) Transferência de carga elétrica.

A *facilidade* de passagem de carga elétrica entre eletrodo e peça é avaliada através do índice FE_1 :

$$FE_1 = \frac{1}{E_1} = \frac{2000}{(P_1 - P_R) \cdot \bar{t}_1}$$

[6.10]

onde:

E_1 → Energia média de reignição do arco, após a ocorrência de curto-circuitos, (W.s).

P_1 → Potência média de reignição do arco, após a ocorrência de curto-circuitos, (W).

P_R → Potência de referência, (W).

\bar{t}_1 → Tempo médio de reignição do arco, após a ocorrência de curto-circuitos, (ms).

A *regularidade* da passagem de corrente é avaliada através do índice RE_1 , que representa o inverso dos desvios da raiz quadrada da média aritmética dos quadrados relativos do índice E_1 .

$$RE_1 = \frac{E_1}{\sigma_{E_1}} \quad [6.11]$$

6.1.3 Análise de Fourier

Uma função periódica qualquer pode ser desmembrada em suas componentes

harmônicas e sintetizada através da adição destas componentes. /67 - 70/. Assim, se $x(t)$ é uma função periódica do tempo t , com um período T , pode-se sempre expressar $x(t)$ como uma série trigonométrica infinita (Série de Fourier), da forma:

$$x(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} + a_2 \cdot \cos \frac{4 \cdot \pi \cdot t}{T} + \dots \\ + b_1 \cdot \text{sen} \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} + b_2 \cdot \text{sen} \frac{4 \cdot \pi \cdot t}{T} + \dots \quad [6.12]$$

ou, em notação mais compacta:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T} + b_k \cdot \text{sen} \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T} \right) \quad [6.13]$$

onde a_0 , a_k e b_k são as constantes chamadas coeficientes de Fourier e dadas por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot dt \quad [6.14.1]$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T} \cdot dt \quad p / k \geq 1 \quad [6.14.2]$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \text{sen} \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T} \cdot dt \quad p / k \geq 1 \quad [6.14.3]$$

As condições matemáticas para convergência das equações 6.14 são extremamente gerais e cobrem praticamente todas as situações encontradas em engenharia. A única restrição importante é que, no caso de descontinuidade da função $x(t)$, a série fornece o valor médio de $x(t)$ na descontinuidade.

Ajustando a posição do eixo t de tal forma que o valor médio de $x(t)$ seja zero, o coeficiente a_0 também será igual a zero. Os coeficientes a_k e b_k serão em geral todos diferentes e seus valores podem ser ilustrados graficamente como é mostrado na Fig. 6.2.

O eixo horizontal representa a frequência e a localização do coeficiente é dado por

$$w_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{T} \quad [6.15]$$

que representa a harmônica de ordem k . Sendo o espaço entre harmônicas adjacentes definido como:

$$\Delta w = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad [6.16]$$

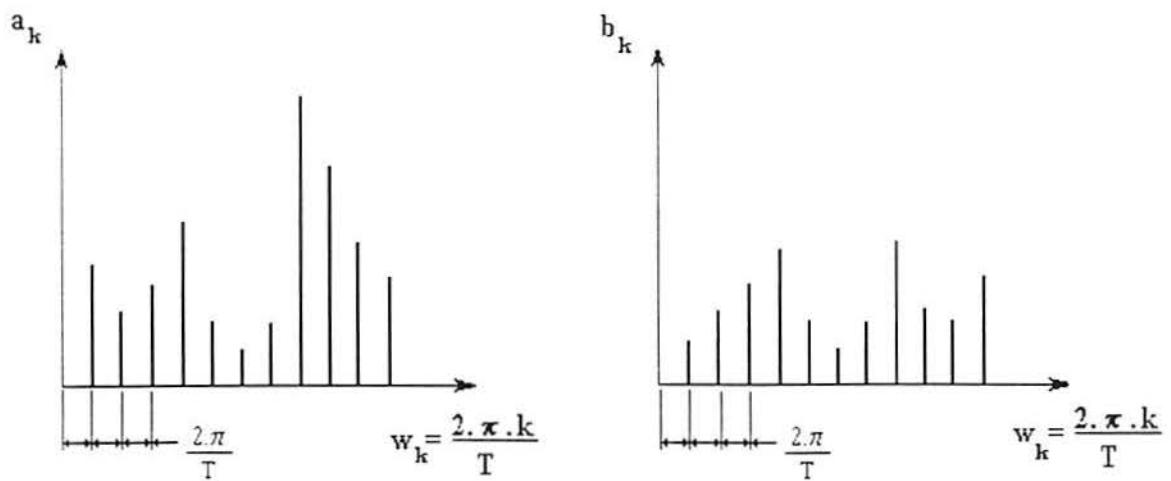


Fig. 6.2 - Representação gráfica dos coeficientes de Fourier, [67].

à medida em que o valor do período da função, T , aumenta, o intervalo de frequência, $\Delta\omega$, diminui. No limite, quando $T \rightarrow \infty$, a função $x(t)$ já não representa um fenômeno periódico e não pode ser analisada na forma de componentes discretas. Neste caso as séries se transformam em integrais de Fourier e os coeficientes são substituídos por funções contínuas de frequência chamadas transformadas de Fourier. A equação 6.17 representa a integral de Fourier.

$$x(t) = 2 \int_0^{\infty} A(\omega) \cdot \cos \omega t \cdot d\omega + 2 \int_0^{\infty} B(\omega) \cdot \sin \omega t \cdot d\omega \quad [6.17]$$

onde $A(\omega)$ e $B(\omega)$, definidos pelas equações 6.18 são as componentes da transformada de Fourier:

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \cos \omega t \cdot dt \quad [6.18.1]$$

$$B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \sin \omega t \cdot dt \quad [6.18.2]$$

As integrais de Fourier indicam a composição de frequências de uma função aperiódica. Para compreender as características de frequência de um processo aleatório é necessário analisar a composição de frequências de suas funções de correlação, que são geralmente funções aperiódicas.

Para obter o espectro a partir de dados experimentais o método óbvio consiste em

estimar a função de correlação apropriada e então transformá-la, usando Fourier. Este procedimento foi empregado até o final dos anos 60, quando desenvolveu-se um método chamado "fast Fourier transform" (ou simplesmente FFT), que é um algoritmo para o cálculo da transformada de Fourier de maneira discreta, através de computador. Este procedimento gera uma drástica redução no tempo de processamento, além de aumentar a precisão dos resultados. O método consiste em dividir a seqüência total de dados a ser analisada em determinado número de seqüências menores, calculando a transformada nestas seqüências e finalmente combinando os resultados de maneira a obter valores correspondentes a todo o espectro.

Este procedimento é largamente empregado para análise de vibrações em sistemas mecânicos e a sua utilização no caso da análise da estabilidade do arco elétrico, pode auxiliar na diferenciação e classificação de séries de dados (curvas de corrente e tensão instantâneas de soldagem) tratadas como superposição de funções aleatórias, quando houver qualquer alteração nas condições de soldagem.

Wang e colaboradores, [\[71\]](#), estudaram a transferência de metal na soldagem com eletrodo tubular. Neste trabalho os sinais da fonte de soldagem foram monitorados e processados usando a técnica de FFT para caracterizar os diferentes modos de transferência. Foram observados espectros de frequências características, relacionadas a transferência por curtos-circuitos, globular e aerossol. A tabela 6.1 apresenta o resultado desta análise para diferentes condições de soldagem. O primeiro gráfico de cada linha mostra o oscilograma de tensão, o gráfico seguinte mostra o espectro resultante obtido através de FFT. Os parâmetros de soldagem alterados em cada uma destes experimentos são apresentados ao lado das curvas.

O comportamento observado neste tipo de soldagem e nas condições de ensaio demonstrou uma mistura destes três modos de transferência. Transferência pura por aerossol não foi observada em nenhum momento.

Na tabela 6.1.a o oscilograma de tensão de soldagem mostra uma transferência de metal irregular e inconsistente. O gráfico da FFT se mostra uniforme, sem a ocorrência de nenhuma frequência com alta amplitude. Grandes flutuações na curva de tensão, como extinção do arco ou transferência por curtos-circuitos, quando transformados para o domínio de frequências, tendem a uniformizar todo o espectro reduzindo as amplitudes para frequências maiores.

Tabela 6.1 - Processamento dos sinais de tensão da fonte de soldagem usando FFT, [71]

| Oscilograma de tensão de soldagem | FFT da curva instantânea de tensão | Parâmetros |
|--|--|--|
| <p>a)</p> <p>Oscilograma de tensão de soldagem (a) mostrando a tensão em Voltagem (V) versus Tempo (s). Há uma interrupção do arco visível no gráfico.</p> | <p>FFT da curva instantânea de tensão (a) mostrando a Amplitude (dB) versus Frequência (Hz).</p> | <p>Tensão média 36 V</p> <p>Velocidade alimentação do arame 40.6 mm/s</p> <p>Velocidade soldagem 5.1 mm/s</p> |
| <p>b)</p> <p>Oscilograma de tensão de soldagem (b) mostrando a tensão em Voltagem (V) versus Tempo (s).</p> | <p>FFT da curva instantânea de tensão (b) mostrando a Amplitude (dB) versus Frequência (Hz). Há um pico marcado em 196 Hz.</p> | <p>Tensão média 36 V</p> <p>Velocidade alimentação do arame 44.5 mm/s</p> <p>Velocidade soldagem 2.5 mm/s</p> |
| <p>c)</p> <p>Oscilograma de tensão de soldagem (c) mostrando a tensão em Voltagem (V) versus Tempo (s).</p> | <p>FFT da curva instantânea de tensão (c) mostrando a Amplitude (dB) versus Frequência (Hz). Há picos marcados em 126 Hz e 368 Hz.</p> | <p>Tensão média 34 V</p> <p>Velocidade alimentação do arame 74.5 mm/s</p> <p>Velocidade soldagem 3.8 mm/s</p> |
| <p>d)</p> <p>Oscilograma de tensão de soldagem (d) mostrando a tensão em Voltagem (V) versus Tempo (s).</p> | <p>FFT da curva instantânea de tensão (d) mostrando a Amplitude (dB) versus Frequência (Hz). Há picos marcados em 120 Hz, 190 Hz e 380 Hz.</p> | <p>Tensão média 27 V</p> <p>Velocidade alimentação do arame 44.5 mm/s</p> <p>Velocidade soldagem 2.5 mm/s</p> |

Tabela 6.1 - Processamento dos sinais de tensão da fonte de soldagem usando FFT, [71] (continuação)

| Oscilograma de tensão de soldagem | FFT da curva instantânea de tensão | Parâmetros |
|--|--|---|
| <p>e)</p> <p>Oscilograma de tensão de soldagem (e) mostrando Voltagem (V) versus Tempo (s). O eixo Y varia de -10 a 10 V, e o eixo X varia de 0 a 0,64 s. A tensão oscila rapidamente em torno de 0 V.</p> | <p>FFT da curva instantânea de tensão (e) mostrando Amplitude (dB) versus Frequência (Hz). O eixo Y varia de 30 a 150 dB, e o eixo X varia de 0 a 1000 Hz. Há picos marcados em 120 Hz e 360 Hz.</p> | <p>Tensão média 27 V</p> <p>Velocidade alimentação do arame 77.5 mm/s</p> <p>Velocidade soldagem 4.2 mm/s</p> |
| <p>f)</p> <p>Oscilograma de tensão de soldagem (f) mostrando Voltagem (V) versus Tempo (s). O eixo Y varia de -20 a 10 V, e o eixo X varia de 0 a 2,04 s. A tensão oscila rapidamente em torno de 0 V.</p> | <p>FFT da curva instantânea de tensão (f) mostrando Amplitude (dB) versus Frequência (Hz). O eixo Y varia de 30 a 150 dB, e o eixo X varia de 0 a 1000 Hz. Há picos marcados em 120 Hz e 360 Hz.</p> | <p>Tensão média 23 V</p> <p>Velocidade alimentação do arame 63.5 mm/s</p> <p>Velocidade soldagem 4.2 mm/s</p> |

Quando, em uma condição onde a soldagem é feita predominantemente por aerossol, ocorre aproximadamente 10 % de transferência globular, observou-se apenas um pico predominante no espectro da FFT, situado na frequência de 360 Hz, como pode ser visto na tabela 6.1.b.

Com a tensão do arco acima de 25 V, com menos de 10 % de eventos de transferência globular na soldagem predominantemente por aerossol, dois picos de frequência foram observados nas posições correspondentes a 120 Hz e 360 Hz (tabela 6.1.c).

Quando mais de 90 % do metal é transferido do eletrodo por aerossol, três picos são observados no espectro da FFT: 120 Hz, 360 Hz e uma posição intermediária entre estas duas. Outros picos de menor amplitude podem estar presentes. Um exemplo típico desta condição é mostrado na tabela 6.1.d.

Ocorrendo transferência simultânea por aerossol, globular e curto-circuito (sendo que os curtos-circuitos representam menos de 3 % do metal transferido), nota-se dois picos

predominantes: a 45 e 360 Hz. Esta situação é mostrada na tabela 6.1.e.

As transferências por curto-circuito envolvem grandes variações na tensão do arco que predominam sobre o sinal do arco afetando o resultado da análise por FFT. Com mais de 3 % de ocorrência de curtos-circuitos, o espectro obtido pela transformada de Fourier é uniforme, mascarando o efeito dos demais modos de transferência. Este comportamento é exemplificado na tabela 6.1.f.

A soldagem por eletrodos revestidos difere da soldagem pelos processos MIG e eletrodo tubular por ser um processo inerentemente transiente. Pistorius e Liu, *[72]*, estudaram a variação no modo de transferência durante a soldagem ao arco elétrico com eletrodos revestidos. O comportamento dos eletrodos, quanto à transferência de metal, foi caracterizado através da análise do sinal do arco, plotando o histograma da tensão de soldagem, e calculando as frequências presentes neste sinal. O modo de transferência apresentou grandes alterações durante a soldagem, de acordo com o consumo do eletrodo, sendo que estas variações foram maiores quando correntes de soldagem mais altas foram utilizadas.

Nesta situação não é observado o comportamento contínuo onde as curvas frequência-potência de soldagem são dominadas por um pequeno número de picos bem definidos, verificados na soldagem por eletrodo tubular.

A figura 6.3 mostra a variação no comportamento de um eletrodo rutilico (E6013) enquanto este é consumido durante a soldagem na forma de simples deposição sobre uma chapa, caracterizada pelo sinal de tensão instantânea, histograma de tensão e resposta de frequências, apresentada como sendo o resultado da FFT integrado em um número limitado de campos de frequência (●) e da magnitude das flutuações instantâneas de tensão de soldagem (○). O comportamento do eletrodo é verificado em três diferentes momentos da soldagem: logo após o início do cordão, após 11 s e após 35 s de arco aberto. Em cada uma destas posições os dados foram adquiridos durante 1,6 s com uma frequência de 2500 Hz por canal.

Durante os instantes iniciais da soldagem, o espectro de potência do sinal exibe picos em uma larga faixa de frequências até 150 Hz. O histograma de tensão de soldagem mostra inicialmente um pico de grande largura, tornando-se mais alto e estreito durante o consumo do eletrodo. Este comportamento é atribuído à redução no número de transferências por curtos-circuitos.

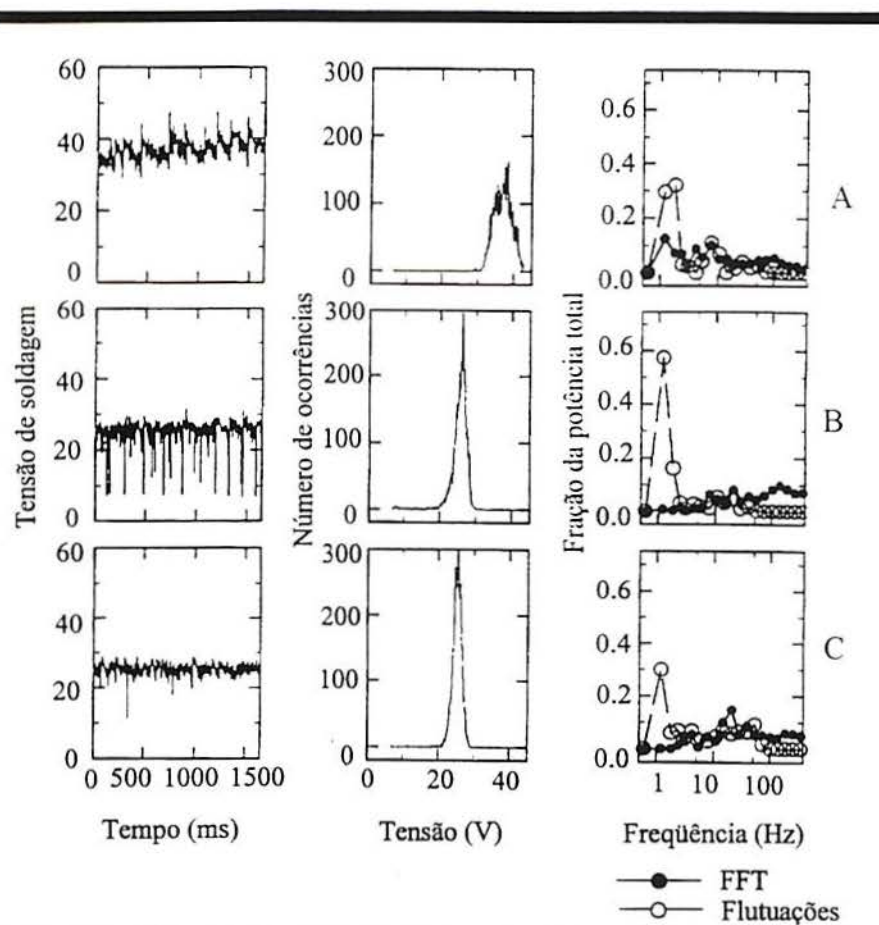


Fig. 6.3 - Variação no comportamento de um eletrodo rutilico durante a soldagem. A - comportamento durante os 1,6 s iniciais; B - após aproximadamente 11 s ; C - após 35 s do início da soldagem, [72].

O comportamento dos eletrodos celulósico (E6010), rutilico (E6013) e básico (E7018), apresentaram sensíveis alterações, quanto à transferência de metal, relacionadas ao consumo do eletrodo. Estas alterações foram maiores quando maiores níveis de corrente de soldagem foram utilizados.

O comportamento dos diferentes tipos de eletrodos também apresentou características diversas. Especificamente, a soldagem com eletrodos básicos caracterizou-se por um elevado número de transferências por curtos-circuitos, sendo que, durante o consumo do eletrodo, o número de curtos-circuitos e o tamanho médio das gotas aumentaram. Já durante a soldagem com eletrodos rutilicos, o tamanho médio das gotas e o número de curtos-circuitos observados diminuíram, com o consumo do eletrodo.

Além destes três tipos, eletrodos para soldagem de aço inoxidável (E309) também foram analisados. Este eletrodo foi o que apresentou as menores alterações de comportamento

durante o consumo e o que demonstrou menor sensibilidade à variação de corrente de soldagem. Durante o consumo do eletrodo um pequeno deslocamento no sentido de maiores frequências foi observado.

6.2 Efeito dos Elementos Químicos Componentes do Revestimento do Eletrodo Sobre a Estabilidade do Arco Elétrico

Os elementos químicos componentes do revestimento têm grande efeito sobre a maneira pela qual o metal fundido é transferido e sobre a estabilidade do arco elétrico estabelecido entre o eletrodo e a peça.

Os principais componentes dos eletrodos com revestimento básico (seção 4.1) são a fluorita (CaF_2) e a pedra calcária (CaCO_3). Pokhodnya, *[73, 74]*, estudou a relação entre a estabilidade do arco elétrico em corrente alternada e a composição do revestimento, e os efeitos da proporção relativa entre esses componentes e também do coeficiente de massa do revestimento (ou sua espessura) sobre a transferência de metal do eletrodo.

Neste estudo, a estabilidade do arco durante a soldagem foi avaliada quantitativamente através do parâmetro “ B_z ”, o qual exprime a taxa média de aumento da condutividade elétrica do espaço entre eletrodo e peça, no período anterior ao arco. Também foi avaliado quantitativamente pelo comprimento do arco quando este se extingue naturalmente.

A Fig. 6.4 apresenta as curvas de estabilidade do arco em sistemas ternários dos componentes do revestimento formadores de gás e escória $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ e $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-SiO}_2$ (nesta figura são dadas as frações molares dos componentes nos sistemas). Nesses gráficos, detalhes da estabilidade para os sistemas binários são mostrados ao lado dos diagramas.

Considerando o sistema $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2$, pode-se notar que à medida que aumenta o teor de CaF_2 no revestimento, o arco se torna menos estável, o que está de acordo com dados publicados por outros pesquisadores.

É de conhecimento geral que os revestimentos de eletrodos rútilicos possuem excelentes propriedades de estabilização do arco, o que também pode ser comprovado através da análise dos resultados apresentados na Fig. 6.4. Os eletrodos que contêm 100% de TiO_2 proporcionam o mais alto nível de estabilidade ($B_z = 450 \Omega^{-1} \times \text{s}^{-1}$). Os experimentos mostraram que estas propriedades de estabilização do TiO_2 se deterioram rapidamente na presença de CaF_2 .

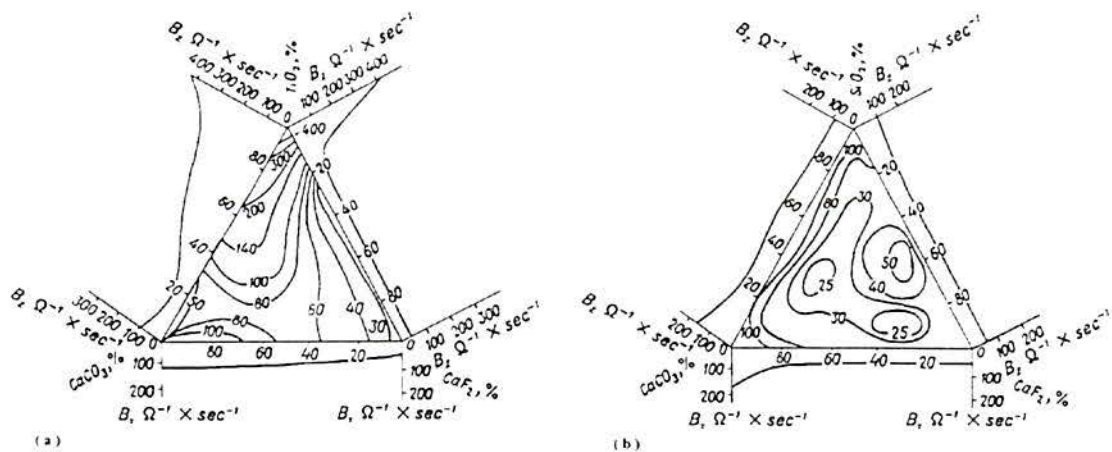


Fig. 6.4 - Efeitos mútuos de: (a) CaCO_3 , CaF_2 e TiO_2 ; (b) CaCO_3 , CaF_2 e SiO_2 ; sobre a estabilidade do arco, [73].

Com 10% de CaF_2 o arco se torna 50% menos estável, e com 20% de CaF_2 a estabilidade cai para $B_z = 20 \Omega^{-1} \times \text{s}^{-1}$, permanecendo nesse nível para qualquer aumento na fração molar de CaF_2 de até 100%. Ao mesmo tempo, este efeito não é observado no sistema CaCO_3 - CaF_2 . Não se nota anormalidades como variação na estabilidade do arco no sistema CaCO_3 - TiO_2 . Um fato que merece atenção, é o de que a pedra calcária, normalmente considerada completamente estabilizante, é, com respeito a essa propriedade, grandemente inferior ao rutilo, TiO_2 . Aqui obviamente um efeito é exercido pelo fato de que apesar da mais baixa função de trabalho eletrônico das escórias altamente básicas em comparação com as ácidas, o CO_2 desprendido durante a dissociação causa a contração do plasma, resultando na diminuição das condições para re-ignição do arco.

A queda abrupta nas propriedades de estabilização dos eletrodos cujo revestimento contém TiO_2 quando CaF_2 é introduzido pode ser associado com a formação (a relativamente baixas temperaturas) do composto gasoso TiF_4 , que entra diretamente no espaço vazio entre o eletrodo e a peça.

Os íons negativos que aparecem, nesse caso, na forma de TiF_n^- causam um espaço de cargas negativas não compensadas que se desenvolve na superfície do eletrodo, onde será formado o cátodo na inversão de polaridade. Este espaço negativo evita que os elétrons deixem o cátodo, e conseqüentemente entrem no espaço entre eletrodo e peça, o que retarda a re-ignição do arco.

Os dados que relacionam os efeitos mútuos de CaCO_3 e TiO_2 nas propriedades de estabilização do arco podem ser confirmados pelo resultado dos experimentos realizados para determinar o comprimento de extinção do arco (l_b). Estes testes foram feitos com o mesmo eletrodo utilizando corrente contínua, eletrodo negativo. O resultado destas medições é mostrado na Fig. 6.5. Pode-se notar que o comprimento de extinção do arco é maior para eletrodos com 100% de CaCO_3 . Segundo o autor, com um considerável aumento no comprimento do arco, a pressão parcial de CO_2 na região do arco diminui grandemente por causa da diluição na atmosfera que circunda o arco, e o plasma contrai-se menos, isto é, as condições se tornam favoráveis a uma transferência de cargas mais estável. Levando em consideração o fato de que, nos experimentos realizados, o cátodo situava-se na ponta do eletrodo (eletrodo negativo), pode-se supor que o mecanismo de termo-emissão desempenha um papel mais importante.

A natureza do processo de reignição do arco também depende da maneira pela qual o metal se transfere do eletrodo. Sabe-se que no momento do curto-circuito, seguido da transferência de grandes gotas de metal, a temperatura na ponta do eletrodo e no plasma cai consideravelmente, o que reduz a corrente de emissão e encurta o tempo para que exista plasma residual. Por essa razão, após o curto-circuito é mais difícil a reignição do arco, podendo inclusive haver interrupção do processo. No caso da transferência se dar na forma de pequenas gotas de metal fundido, a corrente de termo-emissão é submetida a oscilações bem menores nos diferentes meio-ciclos depois da extinção do arco.

À medida em que o teor de SiO_2 contido no revestimento do eletrodo aumenta, no sistema CaCO_3 - SiO_2 (Fig. 6.4), o arco começa a ser mais instável. Sabe-se que o SiO_2 aumenta a função de trabalho eletrônico, reduzindo a quantidade de elétrons emitidos pelo cátodo e, dessa forma, aumentando a tensão de abertura do arco.

No caso do sistema SiO_2 - CaF_2 , quando o teor de CaF_2 é de 20% a estabilidade do arco é reduzida em 50%, e com um conteúdo de CaF_2 maior do que 25%, o valor de B_z cai para 25-30 $\Omega^{-1} \times \text{s}^{-1}$, permanecendo nesse nível para teores de CaF_2 entre 25 e 100%.

A queda nas propriedades de estabilização do arco de eletrodos cujos revestimentos contenham SiO_2 , acompanhada pela introdução de fluoreto de cálcio, também pode ocorrer devido à formação do composto gasoso SiF_4 . Os efeitos dos íons negativos SiF_n^- sobre as propriedades de estabilização do arco são similares ao efeito, considerado anteriormente, do TiF_n^- .

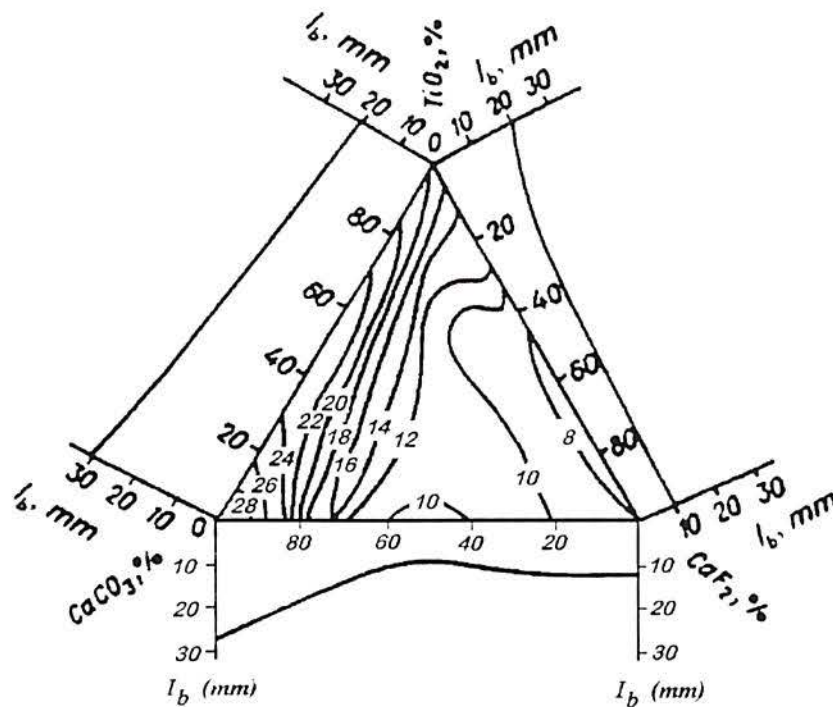


Fig. 6.5 - Efeitos mútuos de CaCO_3 , CaF_2 e TiO_2 sobre o comprimento de extinção do arco, [73].

O fato de que no sistema ternário $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-SiO}_2$ existem vários campos de composição em que há baixa estabilidade do arco ($B_Z = 25\text{-}30 \Omega^{-1} \times \text{s}^{-1}$), ainda menor do que para eletrodos com revestimento com 100% de CaF_2 ($B_Z = 30\text{-}40 \Omega^{-1} \times \text{s}^{-1}$), é digno de atenção.

A interação entre CaF_2 e SiO_2 acompanhada da formação de fluoretos compostos torna-se mais intensiva dentro do campo de composições que geram arcos com menor estabilidade. Quando um revestimento é selecionado, é necessário, para que o arco seja altamente estável ($B_Z \geq 80\text{-}100 \Omega^{-1} \times \text{s}^{-1}$), que os teores de CaF_2 e SiO_2 não excedam a 20% (convertidos para o sistema ternário).

6.3 Efeito dos Elementos Químicos Componentes do Revestimento do Eletrodo Sobre a Transferência de Metal

O efeito dos componentes do revestimento, pedra calcária e fluorita, e também das condições de soldagem, sobre a duração dos curto-circuitos também foi investigada nesse

trabalho, /73/.

A relação entre τ_{cc} e a proporção entre CaF_2 e CaCO_3 no revestimento de eletrodos com diâmetro de 4 mm foi investigada. A Fig. 6.6 apresenta os resultados obtidos, mostrando que o CaF_2 aumenta o tempo de curto-circuito.

É possível diminuir o tempo de curto-circuito aumentando a corrente de soldagem. Pode-se notar na Fig. 6.6 que o tempo de curto-circuito, para $I = 170$ A, fica abaixo da região de valores críticos de τ_{cc} (a região hachurada representa a combinação de parâmetros e composições em que o eletrodo solda na peça - média estatística). Com adição de CaF_2 ao revestimento, estreita-se o campo de correntes de trabalho possíveis.

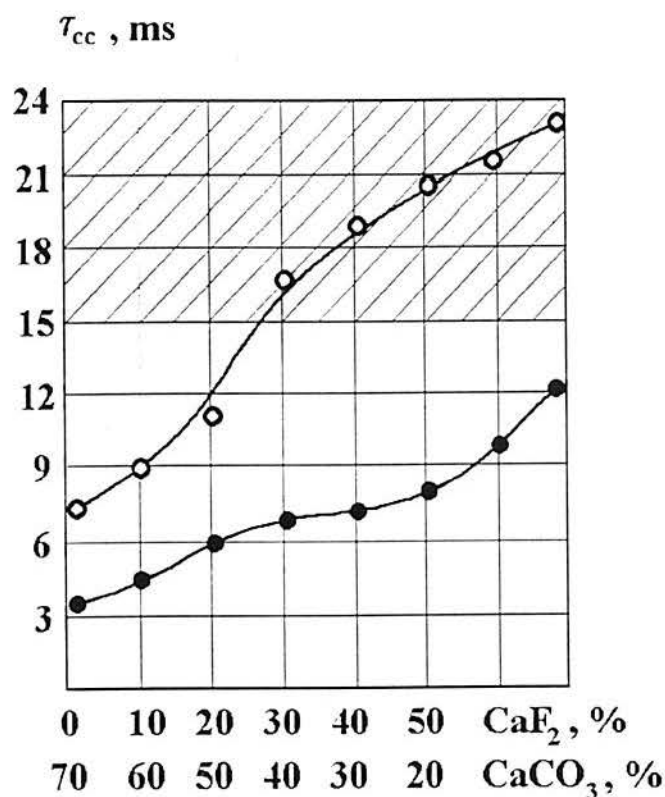


Fig. 6.6 - Efeitos da proporção entre CaF_2 e CaCO_3 sobre o tempo de curto-circuito para as seguintes correntes de soldagem: \circ - $I = 120$ A; \bullet - $I = 170$ A, /73/.

Quando se solda com eletrodos que contenham teores de CaF_2 entre 25 e 30%, o soldador encontra dificuldades, já que ele deve trabalhar com altas correntes de soldagem ou com grande comprimento do arco.

O risco de que o eletrodo "grude" na peça também aumenta por que o volume de metal fundido deixado na ponta do eletrodo após a transferência da gota, dentro da "taça", torna-se maior. Como a profundidade da "taça", h_{tc} , diminui com o aumento do teor de CaF_2 , a combinação dessa característica com o aumento do volume da gota torna-se desfavorável, aumentando o risco de o eletrodo ficar preso à peça (Fig. 6.7), e tornando difícil a soldagem com baixa energia.

A possibilidade de soldar o eletrodo à peça se torna menor à medida em que a distância entre a gota e a poça de fusão aumenta. Uma solução simples é aumentar a profundidade da "taça" empregando-se um revestimento mais espesso.

Na Fig. 6.8 pode-se observar que aumentando-se a espessura do revestimento (isto é o coeficiente de massa), dentro de limites reais, é possível reduzir grandemente o tempo de curto-circuito. Nesse caso, a proteção gasosa natural da gota de metal é melhorada.

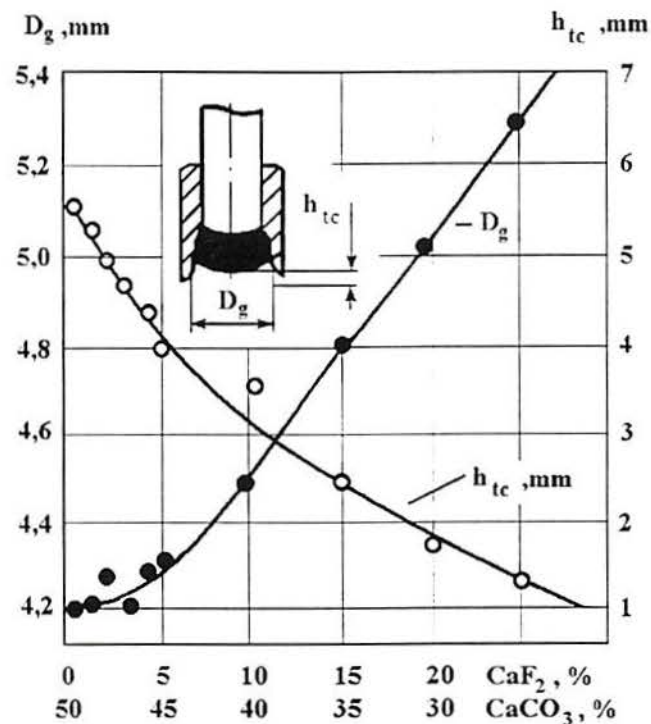


Fig. 6.7 - Efeitos da proporção relativa entre CaF_2 e CaCO_3 sobre o diâmetro da gota formada na ponta do eletrodo, D_g , e a profundidade da "taça", h_{tc} , [73].

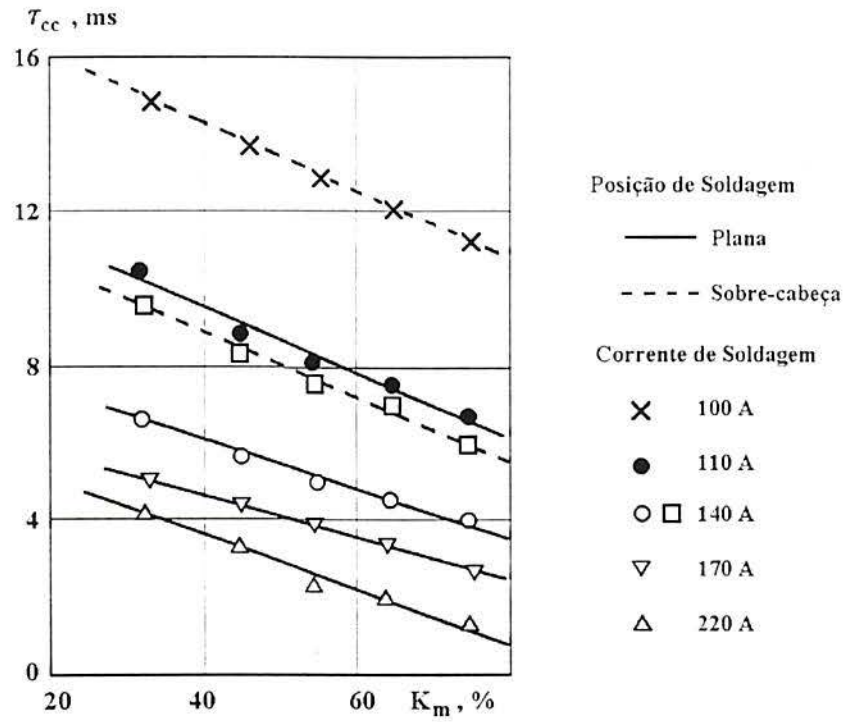


Fig. 6.8 - Efeitos do coeficiente de massa do revestimento sobre o tempo de curto-circuito durante a soldagem com eletrodos de 4 mm de diâmetro nas posições plana e sobre-cabeça, [73].

7 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

7.1 Equipamento utilizado

7.1.1 Câmara para soldagem hiperbárica.

Como já foi mencionado anteriormente, para a simulação das operações de soldagem molhada a profundidades de até 25 m, foi construída, no LS&TC uma câmara hiperbárica que permite operar com pressões de trabalho de até 2.5 atm.

As figuras 7.1 e 7.2 mostram, respectivamente, fotografia da câmara e desenho apresentando suas dimensões principais.

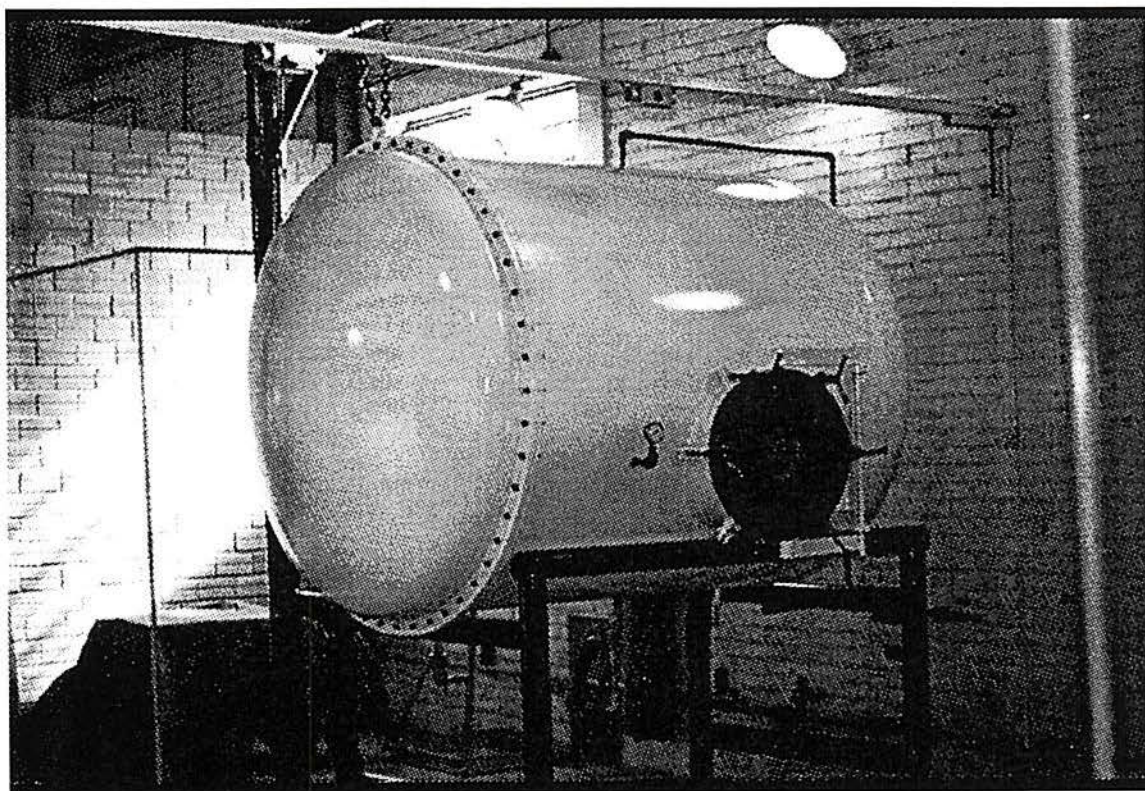


Fig. 7.1 - Fotografia da câmara para soldagem hiperbárica.

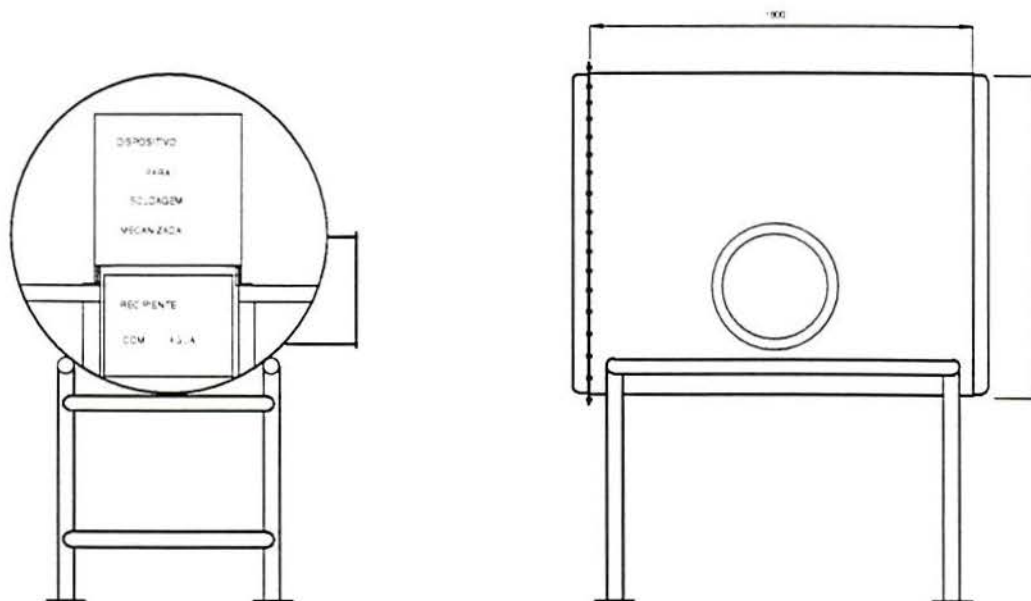


Fig. 7.2 - Câmara para soldagem hiperbárica, dimensões principais.

Essa câmara tem concepção bastante simples, e foi projetada para permitir a soldagem mecanizada por eletrodo revestido, MIG ou arame tubular. Como pode-se notar nas figuras, a câmara consiste basicamente de um vaso de pressão com diâmetro suficiente para acomodar um reservatório que contém água e o dispositivo de soldagem. As calotas têm perfil torisférico sendo que uma delas possui um flange e pode ser aberta para permitir a colocação do reservatório e equipamentos dentro da câmara. A troca de eletrodos e posicionamento das chapas é feita através da boca de visita frontal.

Para a execução dos testes, os corpos de prova são submersos no reservatório com água, a boca de visita frontal é fechada e a câmara pode ser pressurizada até a pressão de execução da solda.

7.1.2 Fonte de soldagem

O primeiro passo no estudo da estabilidade do arco elétrico é, sem dúvida, o conhecimento das características da fonte de soldagem utilizada. Como já foi descrito nos capítulos 3 e 6, a avaliação da estabilidade é feita a partir da análise dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem (muitos trabalhos analisam apenas o oscilograma de tensão), através da formulação de índices que possam exprimir o desvio no comportamento destas

curvas em relação a uma situação ideal. Muitos dos índices citados no capítulo 6 avaliam as variações nas curvas obtidas durante a soldagem através de um tratamento estatístico bastante simplificado, onde são levados em consideração a tensão média de soldagem e o seu desvio padrão como itens principais para caracterizar a estabilidade do arco elétrico. Este método de análise considera que as fontes de soldagem empregadas fornecem uma tensão constante, que só é alterada em função da instabilidade causada pela transferência de metal e variação no comprimento do arco elétrico, o que não é correto para as situações práticas, particularmente na soldagem em corrente contínua. Neste caso as fontes de soldagem utilizam algum método de retificação de corrente que fornece uma saída diferente para cada tipo de fonte, e que deve ser levado em consideração. Qualquer irregularidade nas curvas de tensão e corrente só pode ser analisada tomando-se por base o comportamento destas curvas na situação de carregamento estático e, a partir daí, as alterações resultantes da transferência de metal e variação no comprimento do arco citados acima.

No LS&TC, no momento do início deste trabalho, estavam disponíveis duas fontes de soldagem próprias à soldagem manual com eletrodos revestidos: um retificador convencional e um retificador com controle eletrônico da tensão e corrente de saída. Para decidir sobre a adequação de utilização de uma destas fontes foram levantadas as características estáticas de ambas de acordo com o seguinte procedimento:

Para cada uma das fontes foram obtidas as curvas de tensão e corrente de soldagem em situação de carregamento estático para três diferentes regulagens de corrente de soldagem, sendo que a variação na carga para cada uma destas regulagens foi feita através de uma resistência ôhmica variável. Os dados gerados foram captados através de um osciloscópio digital Schlumberger 5602-C, transferidos para um microcomputador e armazenados em disco. Os resultados obtidos são discutidos abaixo.

7.1.2.1 Retificador Convencional

O retificador Soldarc RS-425NM, fabricado pela White Martins é uma fonte de soldagem convencional com alimentação trifásica e o ajuste da corrente de solda é feito através de um sistema de bobina com núcleo móvel variando assim a reatância do sistema. O Diagrama elétrico desta fonte é mostrado na fig. 7.3. No decorrer deste trabalho esta fonte será identificada como “retificador convencional”.

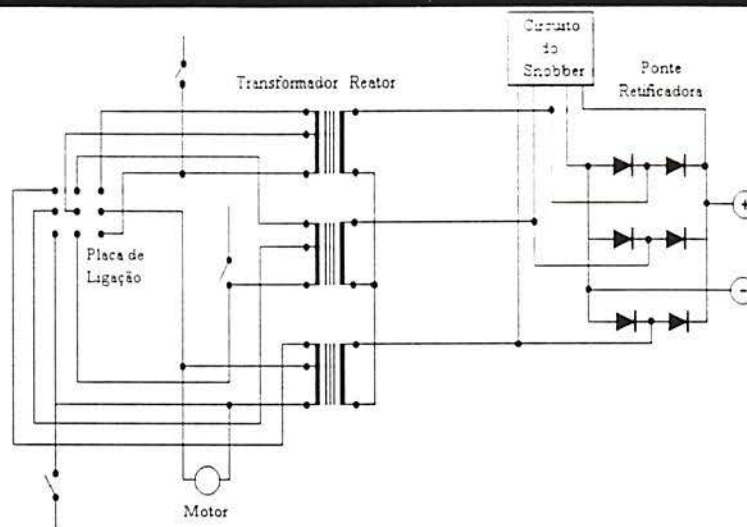


Fig. 7.3 - Diagrama elétrico do retificador Soldarc RS-425NM.

A fonte de soldagem foi regulada para soldagem com três situações distintas de carregamento: 50 A, 140 A e 200 A, e, para cada uma destas regulagens, variou-se a resistência, registrando-se os oscilogramas dos parâmetros instantâneos de soldagem nesta situação. Os valores médios de tensão e corrente foram calculados e estão identificados pelos pontos mostrados na figura 7.4. Os três pontos de cada curva identificados por um número serão analisados mais detalhadamente durante a comparação entre as duas fontes de soldagem (seção 7.1.2.3).

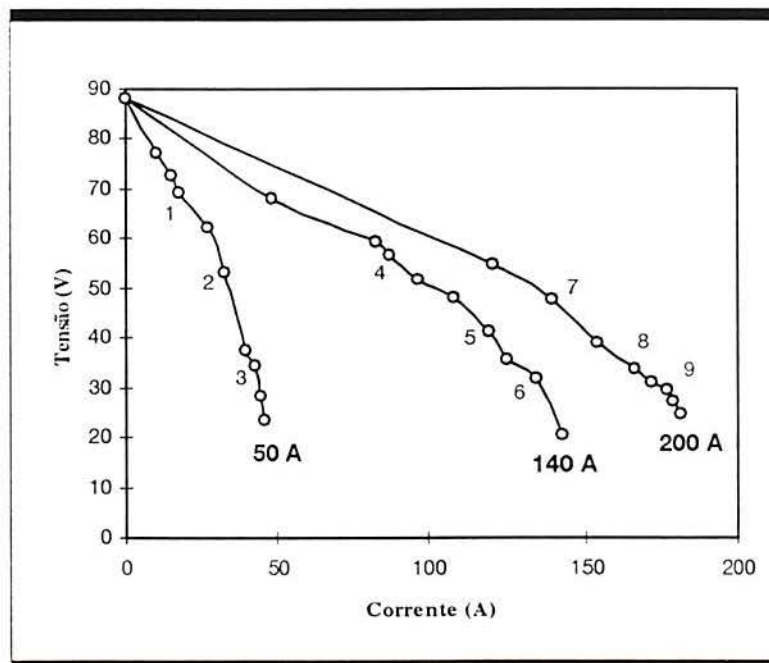


Fig. 7.4 - Curvas características do retificador convencional, para os valores médios de corrente e tensão medidos nas três situações de carga.

7.1.2.2 Retificador com controle eletrônico de saída

A fonte de soldagem Soltig 435DC - Eletrônico, fabricada pela White-Martins, segundo o fabricante apresenta precisa regulagem da corrente de saída mesmo com variações na tensão de entrada. No decorrer deste trabalho esta fonte será identificada como "retificador com controle eletrônico da saída". O manual do fabricante não apresenta detalhes do diagrama elétrico.

O mesmo procedimento descrito no item anterior foi adotado para verificação do comportamento das curvas de tensão e corrente. A fig. 7.5 mostra as curvas características da fonte obtidas através dos valores médios das tensões e correntes medidas para as seguintes regulagens da fonte: 50 A, 130 A e 170 A.

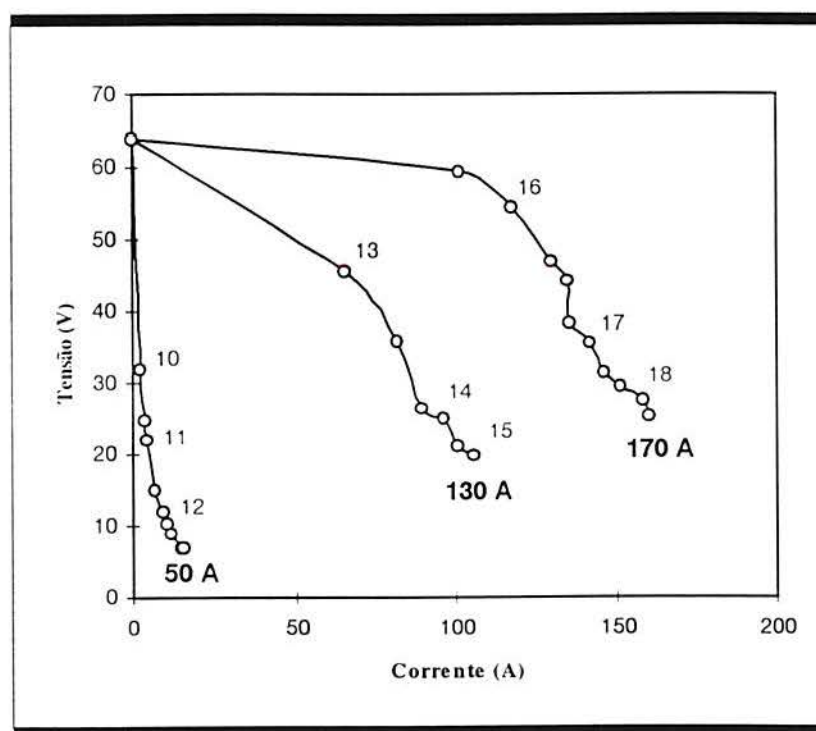


Fig. 7.5 - Curva Característica do retificador com controle eletrônico de saída, para os valores médios de corrente e tensão medidos para três situações de carga.

7.1.2.3 Comparação entre as duas fontes de soldagem

Com base nos dados apresentados acima pode-se comparar a performance das fontes e escolher aquela que possibilite um sinal de saída mais constante e confiável. Na fig. 7.6 estão

sobrepostas as curvas vistas anteriormente nas figuras 7.4 e 7.5.

Pode-se notar que as curvas representadas pelas linhas pontilhadas (retificador convencional) têm comportamento caracterizado por uma pequena declividade inicial, mantida até que seja atingida a região de trabalho, onde passa a ser tombante. Já as curvas cheias (retificador com controle eletrônico de saída) apresentam desde o início declividade bem mais acentuada.

A região de interesse é representada pelas duas linhas horizontais tracejadas delimitando a zona de tensões entre 20 e 45 V, nesta faixa se situam as tensões de significância prática para o diâmetro de eletrodos e correntes de soldagem que serão utilizados neste trabalho. Pode-se notar que nesta região o comportamento de ambas as fontes é semelhante (as curvas são praticamente paralelas).

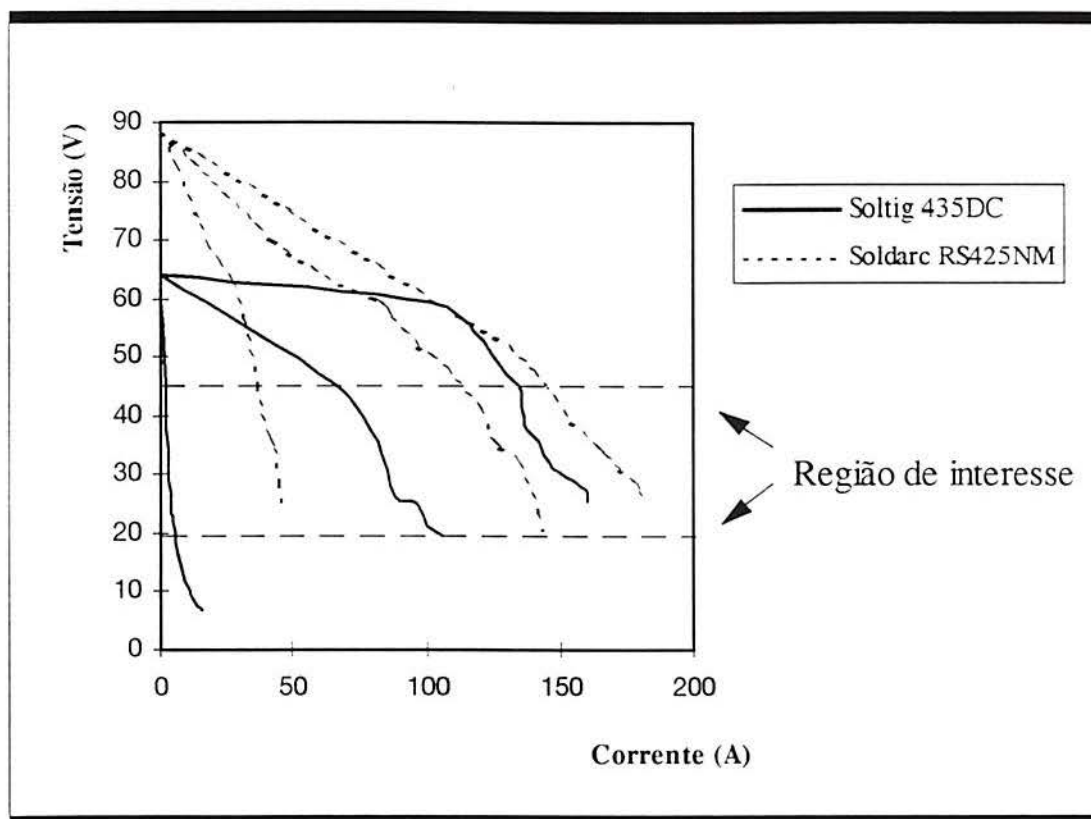


Fig. 7.6 - Comparação entre as curvas características das duas fontes de soldagem.

Outra importante característica da fonte de soldagem é a sua tensão de circuito aberto. Como foi visto no capítulo 3, quanto maior a tensão de circuito aberto, mais fácil se torna a abertura do arco. Essa característica se torna particularmente importante em nosso trabalho uma vez que as soldas serão realizadas dentro de uma câmara pressurizada e os corpos de prova estarão submersos na água.

As normas internacionais de segurança, como foi visto anteriormente, recomendam que a tensão de circuito aberto nas fontes utilizadas para soldagem subaquática não ultrapasse os 65 V. para evitar riscos ao soldador, porém neste caso as soldas serão feitas através de um dispositivo de soldagem mecanizada, não havendo perigo de choque elétrico. Além disso, a abertura do arco na soldagem manual é bem mais fácil, pois a sensibilidade e habilidade do soldador compensam a maior dificuldade de abertura do arco na água. O emprego de um dispositivo de soldagem exige a utilização de artifícios para facilitar a abertura do arco, como colocação de pedaço de esponja de aço ao carbono ou de uma massa contendo silicato e pó de ferro, na ponta do eletrodo.

A fonte de soldagem convencional apresenta uma tensão de circuito aberto (média) de 88.12 V, enquanto na fonte com controle eletrônico esta tensão é de 63.93 V. Para os nossos propósitos de estudo da estabilidade do arco durante a soldagem, o retificador convencional, com relação à tensão de circuito aberto, é mais adequado do que a fonte com controle eletrônico, pois minimiza a possibilidade de falha no instante da abertura do arco, o que implica em cancelamento do experimento até que a câmara seja despressurizada, o corpo de prova e o eletrodo trocados e/ou reposicionados, e haja nova pressurização até as condições do teste.

Comparadas as curvas características com base nos valores médios de tensão e corrente de soldagem, será avaliada agora a forma dos oscilogramas de saída destas fontes em pontos específicos. A figura 7.7 mostra o comportamento destas curvas para os pontos assinalados nas figuras 7.4 e 7.5, para cada uma das fontes. Esta análise, como já foi dito, é a mais importante, pois, qualquer tentativa de mensuração da estabilidade precisa, necessariamente, levar em consideração o comportamento estático da fonte.

No lado esquerdo da fig. 7.7 são mostradas as formas de ondas obtidas na situação de carregamento estático para a fonte convencional. Esta fonte é extremamente simples, porém confiável. Pode-se notar na figura, para a frequência da rede de 60 Hz, um ciclo de carga (16.67 ms), com retificação trifásica de onda completa (tipo ponte) que resulta em uma forma de onda de saída semelhante para tensão e corrente para qualquer uma das nove situações. Nestas curvas nota-se também que a amplitude das oscilações ("ripple") da fonte para qualquer uma destas situações não varia consideravelmente.

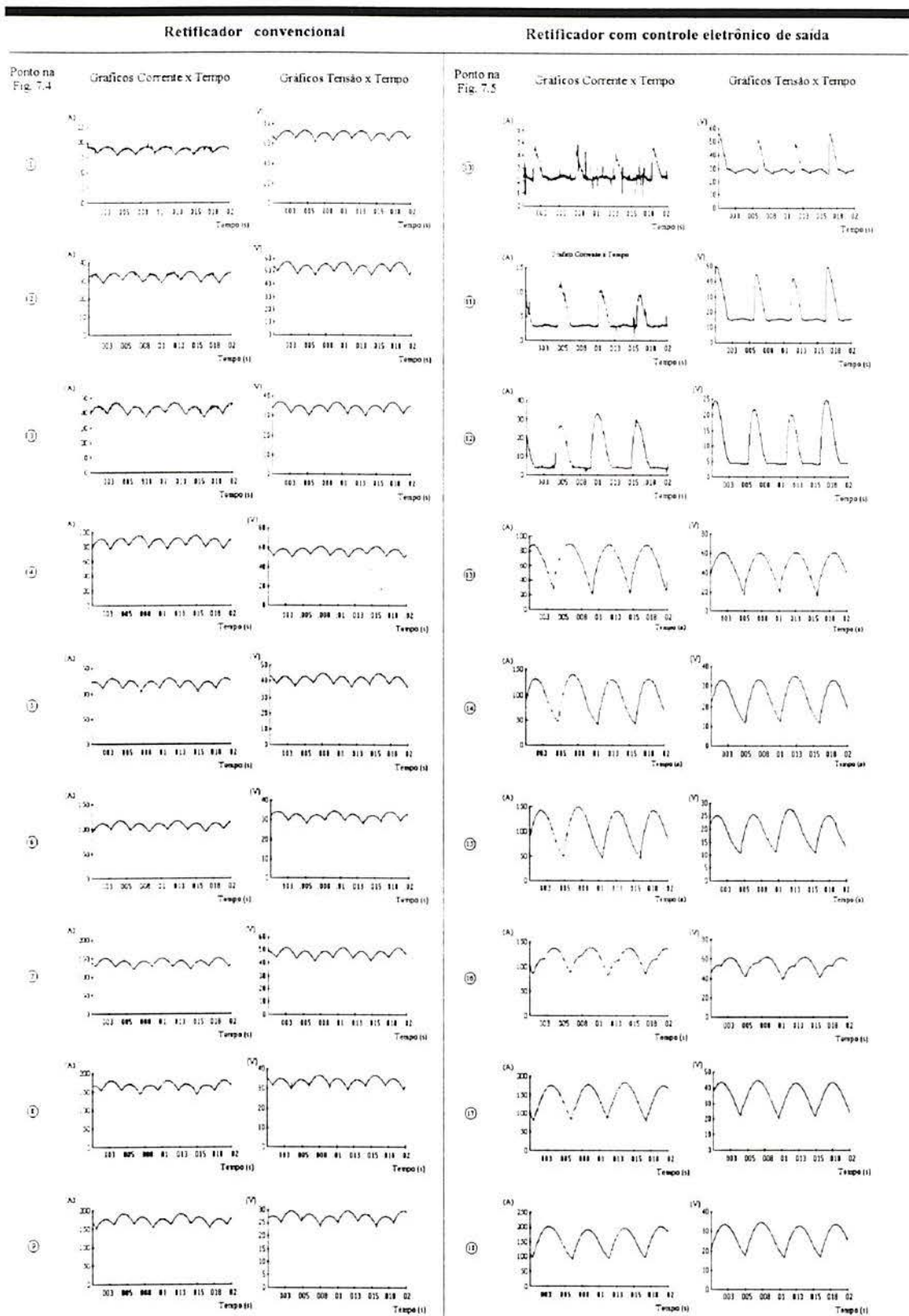


Fig. 7.7 - Comparação entre os sinais de corrente e tensão das duas fontes para os pontos assinalados nas figuras 7.4 e 7.5.

As curvas obtidas para a fonte de soldagem com controle eletrônico de saída estão representadas do lado direito da fig. 7.7. Pode-se notar que para cada uma das curvas da figura 7.5 existe uma forma de onda de saída característica.

A curva representada pelos pontos 10, 11 e 12 é caracterizada pelo baixo valor da corrente. Esses parâmetros de soldagem não têm significância prática para os eletrodos que serão empregados neste trabalho, mas servem para nos ajudar a compreender melhor o comportamento da fonte. Esta fonte controla a tensão de saída através de tiristores, que podem atuar em intervalos preestabelecidos tempo, ou em determinados ângulos de fase, controlando com precisão o valor médio (que é o que importa na maioria das aplicações), mas podendo deformar completamente a forma da onda, como acontece nestes pontos onde os valores de corrente média são muito baixos.

Nas curvas seguintes, 13 a 18 pode-se perceber claramente que esta fonte utiliza o método de retificação de corrente de meia onda, fazendo que no mesmo intervalo de tempo da fonte anterior (16.67 ms), tenha-se metade das oscilações, porém com maior amplitude. Nestas faixas de correntes mais altas o efeito dos tiristores não é notado, exceto na curva 16, onde pode-se notar uma deformação na forma da onda para correção da corrente média.

Com base nestas informações o retificador convencional pode ser considerado o mais adequado para as nossas aplicações por apresentar maior constância na forma da onda e menor amplitude de oscilação, além da maior tensão de circuito aberto.

7.1.3 Dispositivo para soldagem mecanizada com eletrodos revestidos

As soldas foram realizadas através de um dispositivo mecanizado para soldagem com eletrodos revestidos (Fig. 7.8). Esse dispositivo tem as seguintes características:

- Permite o uso de eletrodos com diâmetro de até 3,25 mm e comprimento de 350 mm.
- Velocidades de soldagem na faixa de 0 a 6 mm/s.
- Velocidade de descida do eletrodo variável em função da tensão do arco.

Sempre que a tensão do arco superar o valor de referência (ajustável através de um potenciômetro localizado no painel frontal do painel de comando do dispositivo) o braço é acionado e o eletrodo avança em direção à peça, até que o valor da tensão do arco seja igual ou inferior ao desejado. Se o valor instantâneo da tensão de soldagem for inferior à tensão de referência a alimentação do motor que move o braço é interrompida e este permanece na mesma posição até que o próprio consumo do eletrodo eleve novamente a tensão do arco.

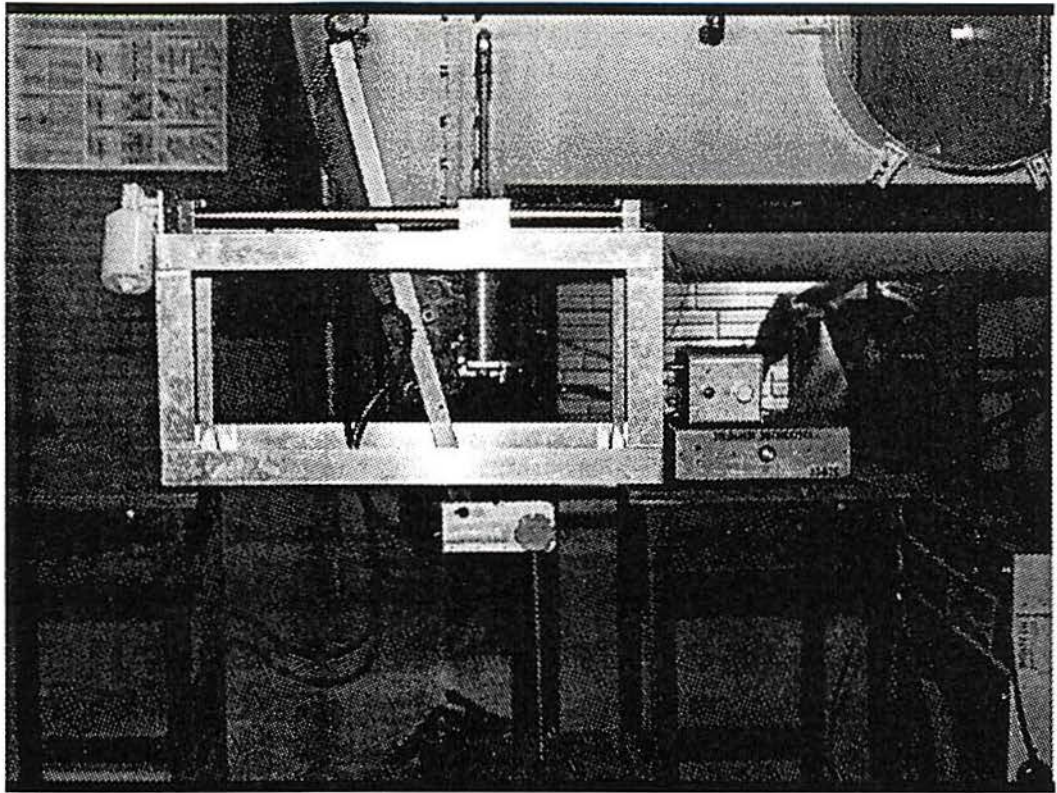


Fig. 7.8 - Dispositivo mecanizado de soldagem.

7.1.4 Extrusora de eletrodos

Os eletrodos foram fabricados através de uma extrusora Berner, modelo UP 25 (figura 7.9).

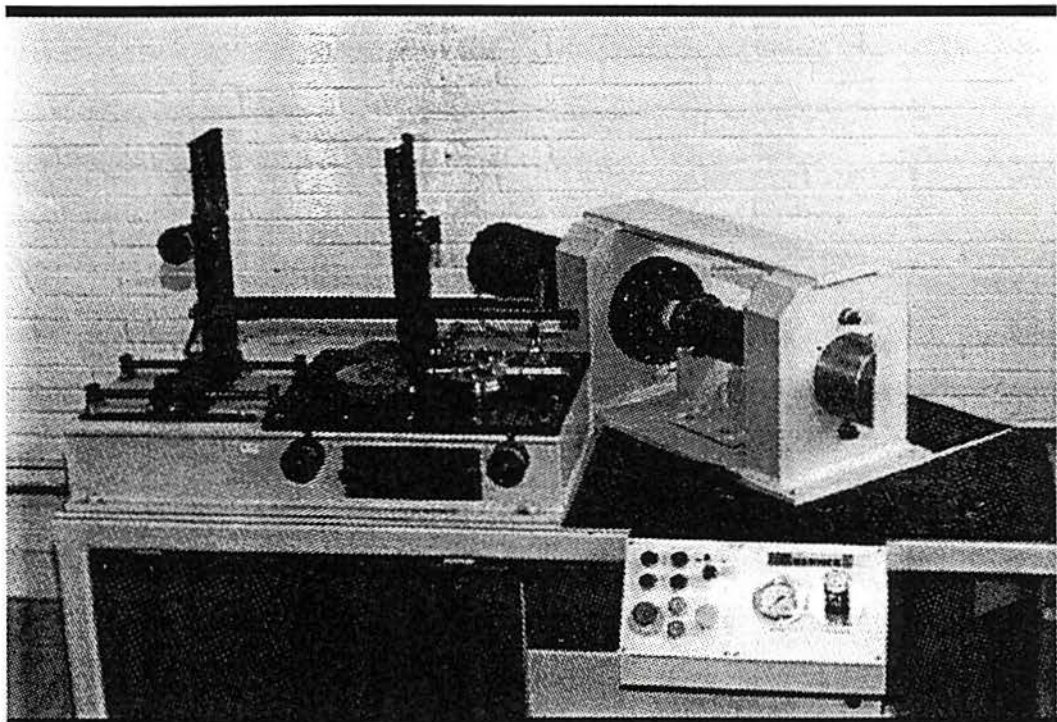


Fig. 7.9 - Extrusora Berner, modelo UP25.

Esta extrusora é projetada para fabricação de eletrodos em escala laboratorial e apresenta as seguintes características técnicas:

| | |
|---|--------------|
| - Força máxima: | 299 kN |
| - Pressão específica máxima na mistura: | 1000 bar |
| - Diâmetro do cilindro (reservatório de massa): | 60 mm |
| - Volume do cilindro: | 0.9 l |
| - Velocidade máxima de extrusão: | 1 l |
| - Diâmetros de alma admissíveis: | 1.6 - 6 mm |
| - Comprimentos de alma admissíveis: | 200 - 550 mm |

Esta extrusora foi adquirida com a finalidade de assegurar excelente qualidade aos eletrodos fabricados no **LS&TC** e usados neste e em vários outros trabalhos. Anteriormente estes eletrodos eram fabricados em uma extrusora manual, na qual a repetibilidade dos parâmetros de extrusão era mais difícil. Um dos principais problemas detectado nesta máquina era a freqüente ocorrência de excentricidade entre a alma do eletrodo e o seu revestimento, causando proteção inadequada da poça de fusão e tornando o arco errático. Com a utilização da nova extrusora este problema foi resolvido.

7.1.5 Equipamentos Auxiliares

Além dos equipamentos descritos nas seções anteriores, foram usados os seguintes equipamentos:

- Forno para secagem dos eletrodos após a extrusão.
- Estufa para armazenamento dos eletrodos antes dos testes.
- Medidor Oerlikon, tipo ZTM 004 para verificar a excentricidade dos eletrodos.

7.1.6 Sistema de Aquisição de dados

7.1.6.1 Equipamentos

A figura 7.10 apresenta um diagrama esquemático mostrando os elementos básicos do sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho:

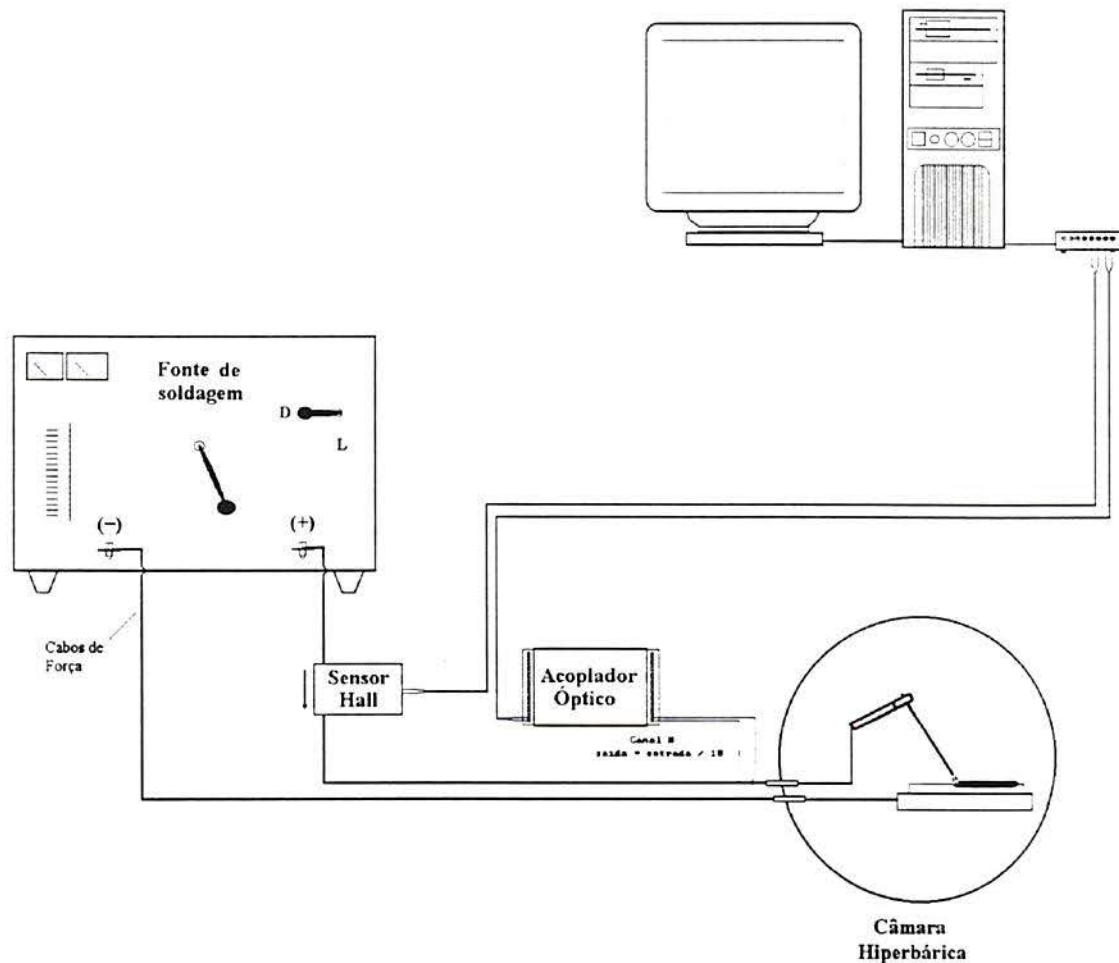


Fig. 7.10 - Esquema do sistema de aquisição de dados.

a) Transdutores para medição da corrente de soldagem:

Para medição da corrente de soldagem foi usado inicialmente um shunt com capacidade de 400 A e sinal na saída de 60 mV, fundo de escala. Este transdutor foi usado para a comparação entre as fontes de soldagem discutida no item 7.1.2 porque neste caso os testes foram feitos na condição estática de carregamento, onde o arco elétrico foi substituído por uma resistência variável. Em uma operação de soldagem real qualquer sistema de medição no qual existe ligação física entre a parte de potência (fonte de soldagem) e a de instrumentação é potencialmente perigosa, uma vez que as tensões envolvidas são bastante elevadas (tensão de circuito aberto da fonte convencional = 88.12 V). Além disso o sinal de saída do shunt (60 mV) é muito baixo, aumentando a possibilidade de ocorrência de ruídos.

Para a aquisição dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem durante as soldas feitas dentro da câmara utilizou-se como transdutor um sensor Hall com capacidade de

500 A e sinal na saída de 10 V, fundo de escala. Este transdutor se caracteriza por ser um sensor para medição eletrônica de correntes com isolamento galvânica entre os circuitos primário (corrente de soldagem) e o secundário (eletrônico). Suas características técnicas são as seguintes:

- Fabricante LEM S.A. - Suíça, modelo LT 500-S
- Precisão a 25 °C : $\pm 0.3\%$ de I_N .
- Linearidade: menos que 0.1%.
- Tempo de resposta: menor que 1 μ s.
- Resistência do dielétrico 6 kV rms / 50 Hz (entre primário e secundário).

b) Acoplador óptico.

A medição da tensão do arco foi feita diretamente a partir dos cabos de força da fonte de soldagem, no ponto mais próximo ao arco, a fim de minimizar as quedas de tensão. Neste caso como a solda é realizada dentro de um compartimento totalmente fechado, os pontos escolhidos para medição da tensão estão localizados próximo ao ponto onde os cabos atravessam a parede da câmara. Para fazer essa medição é necessário, mais uma vez isolar fisicamente a parte de eletrônica de potência dos instrumentos de medição. Além disso a tensão de circuito aberto da fonte é muito elevada para ser medida diretamente e necessita ser reduzida através de um divisor de tensões, uma vez que o sinal máximo admissível na entrada da placa de aquisição de dados é de 10 V.

Para resolver este problema, foi desenvolvido pelo **Laboratório de Instrumentação do Departamento de Energia Elétrica da UFRGS**, um acoplador óptico, capaz de condicionar os sinais mais comuns nas operações de soldagem. Este equipamento conta com oito canais de entrada de dados com diferentes relações entre o sinal de entrada e a saída. Quatro destes canais têm entrada diferencial sendo que o sinal de saída é 100 (cem) vezes superior àquele observado na entrada (estes canais foram projetados para aquisição do sinal de termopares). Em três dos canais o sinal na saída é exatamente igual ao da entrada, e, o último canal, conta com um divisor de tensões na razão de dez para um, ou seja, o valor lido corresponde 10 % do sinal real. Este último canal (H) foi usado para adquirir o valor instantâneo da tensão de soldagem, durante os experimentos.

c) Placa analógico-digital:

A placa Axiom - AX-5412 LG é uma placa multifunção de aquisição /

conversão analógico-digital de dados de alta velocidade, com as seguintes características:

- Resolução A/D de 12 bits.
- Ganhos programáveis por software de 1, 2, 4 e 8.
- Capacidade de 16 canais utilizando terra comum ("single ended"), ou 8 canais

diferenciais, de entrada de dados.

- Aquisição utilizando gatilho de software (baixa velocidade), código de interrupção ("IRQ"), ou canal de acesso direto à memória ("DMA"), possibilitando velocidades de conversão de até 90 kHz.

- Precisão (ganho = 1): +/- 0.03.
- Sinal máximo na entrada = 10 V.

d) Caixa de conexões: Permite a conexão dos sinais de entrada na placa AX-5412 através de oito entradas (modo não-diferencial) para cabos coaxiais com terminais tipo BNC. A conexão entre as duas placas e a caixa é feita através de cabos flexíveis ("flat cable") com terminais de cinquenta pinos.

e) Microcomputador:

- PC-AT 386 DX 40, com disco rígido de 1.28 Gb.

7.1.6.2 Programas para aquisição e análise dos dados

Foram feitos dois programas de computador para a aquisição e análise dos dados gerados em cada experimento. A necessidade de fazer dois programas distintos surgiu porque quando estes programas estavam sendo desenvolvidos ainda não havia "drivers" que permitissem que a aquisição fosse feita, utilizando a placa descrita do item anterior, dentro do ambiente Windows, problema este que não existe mais atualmente.

O primeiro programa, chamado ESTAB, foi desenvolvido na linguagem Visual Basic 3.0 e serve como pré e pós-processador para o processo de aquisição. Por apresentar uma interface gráfica mais atrativa (roda no ambiente Windows) este programa permite que facilmente sejam definidas todas as condições de aquisição (configuração da placa, tipo de dado e canais a serem lidos), gerando um arquivo de configuração.

Para fazer a aquisição propriamente dita foi feito um outro programa em linguagem C++, chamado AQUIS, que lê os parâmetros definidos no arquivo de configuração e, a partir deles, desencadeia o processo de leitura, conversão analógico-digital e armazenamento, gerando um arquivo de dados.

Para analisar os dados obtidos, o arquivo de dados é lido através do programa ESTAB que converte o formato dos dados gerados de acordo com o tipo de transdutor empregado, fornecendo os oscilogramas e histogramas de corrente, tensão e potência instantâneos de soldagem, além de permitir a análise através dos índices e métodos que serão citados no decorrer deste trabalho. Estes programas estão listados no apêndice A.

7.1.6.3 Calibragem do sistema de aquisição de dados

Antes de começar os testes era necessário saber se os dados lidos através do sistema de aquisição mostravam efetivamente o que estava ocorrendo na prática durante o experimento, ou seja, se os valores de tensão e corrente mostrados nos gráficos gerados pelos programas reproduziam com exatidão as grandezas físicas em estudo. Para isto foi utilizado um gerador de sinais Leader LFG - 1300S para comparar a leitura dos sinais gerados feita através do programa e do osciloscópio, como mostra a figura 7.11.

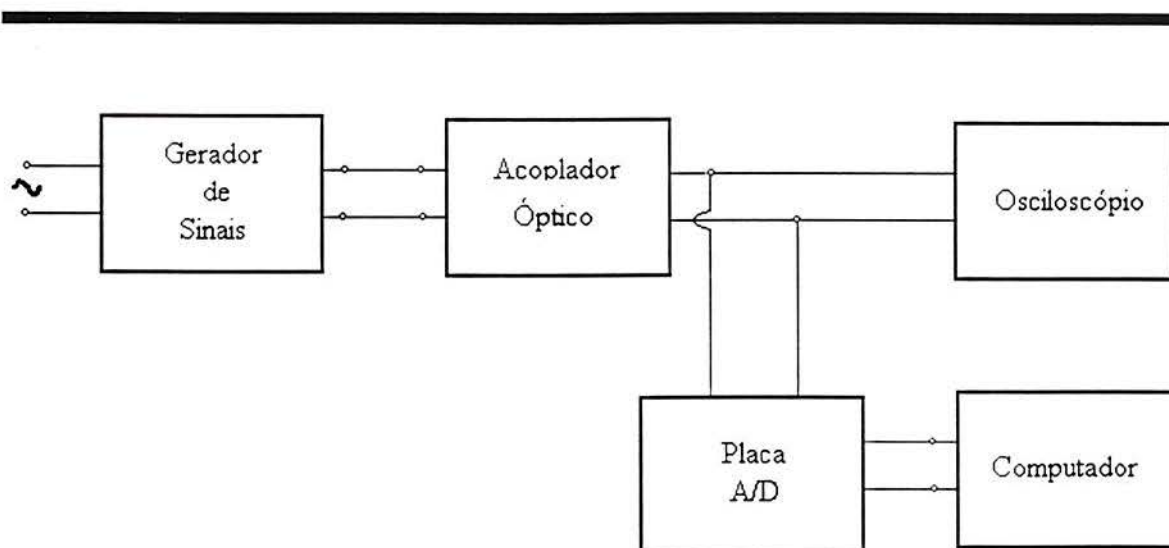


Fig. 7.11 - Calibração do sistema de aquisição de dados.

Foram gerados sinais, com as seguintes formas de onda: senoidal, triangular, quadrada e dente de serra. Para cada uma destas formas de onda, variou-se a frequência (0.1, 1, 10, 100, 1 k, 10 k, 100 kHz), a amplitude (entre 2 e 10 V) e atenuação (10, 20 e 40 dB) do sinal.

As ondas obtidas através do osciloscópio e do sistema de aquisição foram comparadas e mostraram-se idênticas em forma, frequência e amplitude do sinal, confirmando que o

sistema reproduz com precisão o sinal existente, mesmo para sinais de baixa amplitude (50 mV).

7.2 Metal-base

O metal-base utilizado foi um aço com baixo teor de carbono cujo resultado da análise de composição química se encontra listado na tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Composição química do metal-base (% em peso).

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Al | Cu | Ti | Pb | Sn | Fe |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 0.06 | <0.01 | 0.44 | 0.012 | 0.01 | <0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.002 | <0.01 | <0.005 | 0.003 | <0.002 | 99.44 |

7.3 Consumíveis

Os eletrodos revestidos usados neste trabalho foram fabricados a partir de uma composição base rutilica testada para soldagem subaquática com bons resultados. A partir desta mistura, designada “base”, variou-se os teores de carbonato de cálcio (CaCO_3), rutilo (TiO_2) e alumínio.

O composto TiO_2 foi escolhido pelo seu conhecido efeito como estabilizante do arco em soldas realizadas em ambiente seco (seção 6.2). O CaCO_3 foi citado, [/27/](#), como capaz de reduzir a porosidade nas soldas subaquáticas, em adições de 12,5 % em peso. O Alumínio foi testado por também ter sido considerado útil como “estabilizante” do arco, [/37/](#), em soldagem molhada.

A tabela 7.2 mostra as composições químicas de cada uma das 7 misturas testadas, identificadas, respectivamente como:

- Base: mistura original a partir da qual foram feitas alterações nas quantidades dos diferentes componentes. Tomando esta composição química como ponto de partida, em cada uma das misturas descritas abaixo aumentou-se a proporção de determinado elemento, reduzindo proporcionalmente as quantidades de todos os outros.

- Ca 01: aumento no teor de carbonato de cálcio para 11 % (valor nominal, o real pode ser visto na tabela: 10.94), em relação à mistura base.

- Ca 02: teor de carbonato de cálcio de 16 %.

- Ti 01: 40% de rutilo.

- Ti 02: 50% de rutilo.

- Al 01: 2% de alumínio.

- Al 02: 5 % de alumínio.

Tabela 7.2 - Composição química da massa seca das misturas estudadas (% em peso).

| Composto | Base | Ca 01 | Ca 02 | Ti 01 | Ti 02 | Al 01 | Al 02 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Alumínio | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.04 | 5.06 |
| Argila | 5.00 | 4.68 | 4.41 | 4.29 | 3.57 | 4.90 | 4.75 |
| Ca CO ₃ | 5.00 | 10.94 | 16.18 | 4.29 | 3.57 | 4.90 | 4.75 |
| C.M.C. | 1.00 | 0.94 | 0.88 | 0.86 | 0.71 | 0.98 | 0.95 |
| Fe Mn | 10.00 | 9.38 | 8.82 | 8.57 | 7.14 | 9.80 | 9.49 |
| Fe Si | 5.00 | 4.69 | 4.41 | 4.29 | 3.57 | 4.90 | 4.75 |
| Mica | 4.00 | 3.75 | 3.53 | 3.43 | 2.86 | 3.92 | 3.80 |
| Mg | 3.00 | 2.81 | 2.65 | 2.57 | 2.15 | 2.94 | 2.85 |
| Pó de Ferro | 37.00 | 34.68 | 32.65 | 31.70 | 26.43 | 36.24 | 35.12 |
| Ti O ₂ | 30.00 | 28.13 | 26.47 | 40.00 | 50.00 | 29.38 | 28.48 |
| Total | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

A tabela 7.3 apresenta os resultados da análise química dos componentes da mistura.

Tabela 7.3 - Análise química dos componentes das misturas (% em peso).

| Composto | Cu | Zn | Pb | Mg | Mn | Si | C | Fe | P | S | Al |
|-------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fe Mn | | | | | 76.420 | 1.690 | 0.090 | bal | 0.026 | 0.019 | |
| Fe Si | | | | | | 45.470 | 0.090 | bal | 0.029 | 0.008 | 0.370 |
| Mg | 0.010 | 0.030 | 0.020 | 99.500 | 0.230 | 0.040 | | 0.020 | | | |
| Pó de Ferro | | | | | 0.200 | 0.050 | 0.100 | bal | 0.015 | 0.025 | |

O processo de fabricação dos eletrodos consiste das seguintes etapas:

- a) Pesagem dos componentes.
- b) Colocação da massa seca em um misturador tipo “Y” com esferas de metal, durante quatro horas.
- c) Adição de silicato de potássio em quantidade proporcional ao peso da massa seca para que as porcentagens em peso de K₂O e SiO₂ não variassem apreciavelmente de uma mistura para a outra. Assim obtém-se a chamada “massa verde”.
- d) Pré-compactação da massa verde.
- e) Extrusão.
- f) Secagem a uma temperatura de 110 °C durante duas horas.
- g) Medição da excentricidade.
- h) Aplicação de uma camada de revestimento protetora contra a ação da umidade. Foi

utilizado o verniz vinílico Tubolit - VVE 815 (usado pela PETROBRÁS S.A.).

i) Armazenagem em estufa a 60 °C até o momento do uso.

Para facilitar a abertura do arco dentro da água, a ponta dos eletrodos foi recoberta com um pedaço de esponja de aço impregnada de silicato de potássio.

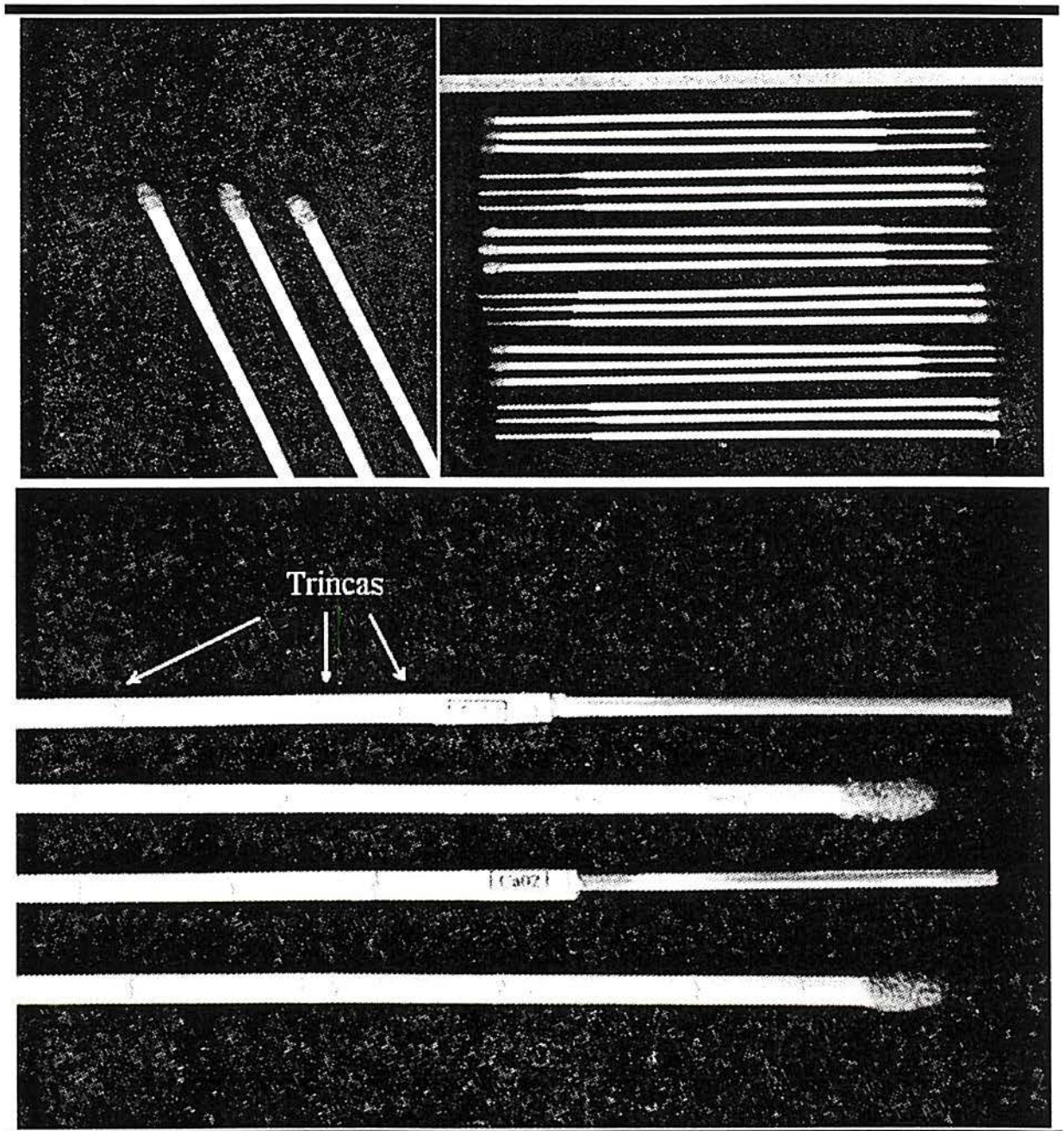


Fig. 7.12 - Fotografias dos eletrodos fabricados.

A fig. 7.12 mostra os eletrodo prontos para soldagem, no quadrante superior esquerdo é mostrado um detalhe da ponta dos eletrodos, no quadrante superior direito os eletrodos

inteiros identificados e prontos para soldagem e na parte inferior da figura é mostrado um detalhe dos eletrodos obtidos em uma das extrusões, cujo revestimento apresentou trincas transversais após a secagem.

Os eletrodos que apresentaram trincas após a secagem foram protegidos com verniz e testados em condições normais de soldagem, juntamente com os demais, porém foi impossível realizar uma solda completa com um destes eletrodos dentro da água, ocorrendo sempre extinção do arco quando uma destas trincas transversais era atingida. Para resolver o problema, foi reduzida a quantidade de silicato de potássio utilizada para obtenção da massa verde, alterado o procedimento de secagem destes eletrodos e refeitas as corridas defeituosas, eliminando o problema.

7.4 Corpos de prova

Neste trabalho, foram utilizados dois tipos diferentes de corpos de prova. O primeiro dos quais consiste simplesmente de uma chapa de aço ao carbono sobre o qual o eletrodo é depositado, na posição horizontal, denominada simples deposição sobre chapa (“bead-on-plate”). No segundo tipo de corpo de prova procurou-se escolher uma configuração de junta que se aproximasse daquela utilizada nas soldas reais, para isto escolheu-se juntas em ângulo, nas quais as condições de soldagem são mais críticas e, conseqüentemente, a ocorrência de defeitos é maior do que quando as soldas são feitas na forma de simples deposição sobre a chapa.

Neste tipo de junta as duas chapas são posicionadas em ângulo, utilizando-se geralmente 90° (junta tipo filete). Em soldas subaquáticas, entretanto, é bastante difícil manter o alinhamento do cordão de solda, pois ele tende a se depositar em apenas uma das chapas. Isso ocorre porque neste tipo de junta, para as tensões de arco geralmente empregadas, a distância entre a ponta do eletrodo e a lateral de cada uma das chapas (d_1) é menor do que entre a ponta do eletrodo e o chanfro (d_2), como mostra a fig. 7.13. Na água o dielétrico é facilmente rompido e o arco procura o caminho mais fácil, ou seja, a menor distância. Por esta razão preferiu-se utilizar um ângulo maior evitando este problema.

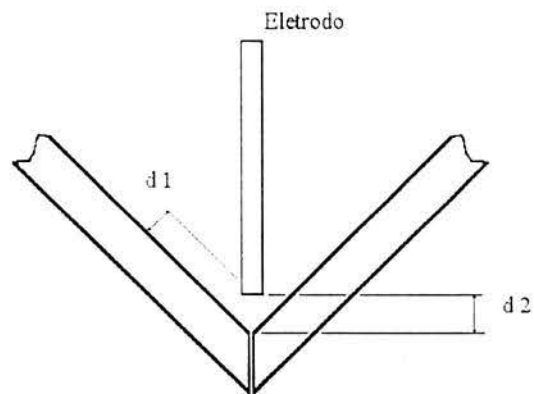


Fig. 7.13 - Junta de filete com ângulo de 90°.

Os corpos de prova utilizados têm as dimensões mostradas na fig. 7.14. O ângulo entre as chapas é de 120°, as quais têm comprimento de 150 mm, suficiente para deposição de um eletrodo com as velocidades de soldagem empregadas.

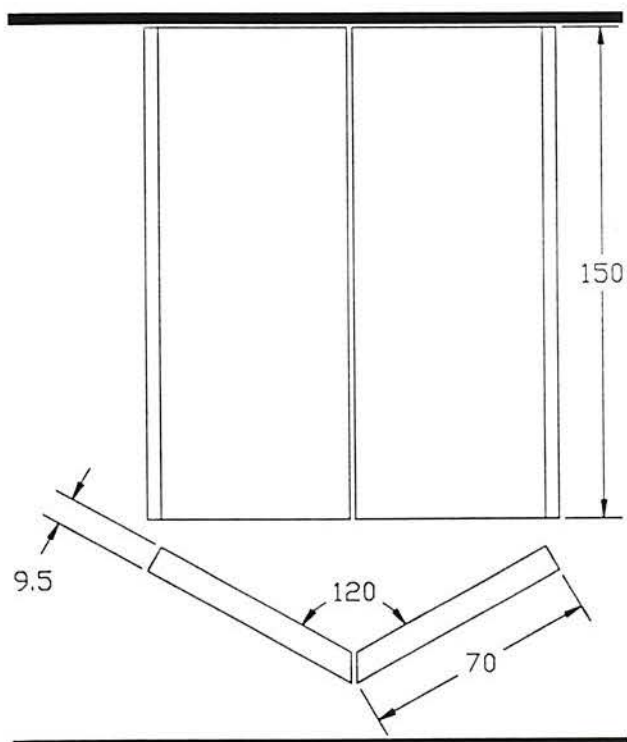


Fig. 7.14 - Dimensões dos corpos de prova utilizados.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos. Como já foi mencionado anteriormente, após um período de testes para a definição de parâmetros ótimos de soldagem para o tipo e diâmetro do eletrodo adotado como base, as soldas foram realizadas, totalizando 84 diferentes experimentos.

Foram executados 4 cordões de solda para cada condição de soldagem (ou seja, para um determinado eletrodo a profundidade constante), sendo dois dos quais em juntas do tipo filete e dois por simples deposição sobre a chapa. Sendo assim, os resultados apresentados no desenvolvimento do texto para uma determinada condição de soldagem, quando nada diferente for mencionado, referem-se a média dos quatro experimentos que identificam cada situação.

A tabela 8.1 fornece a nomenclatura utilizada no texto para referência direta a cada uma das soldas executadas, o código alfanumérico de identificação é formado pelos seguintes elementos: composição do eletrodo, tipo de junta, profundidade de soldagem, número do cordão.

Tabela 8.1 - Código de identificação das soldas

| Eletrodo | Profundidade de Soldagem (m) | | | | | |
|----------|------------------------------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|
| | 5 | | 12,5 | | 20 | |
| | Filete | Simple Deposição | Filete | Simple Deposição | Filete | Simple Deposição |
| Base | BaF051 | BaS051 | BaF121 | BaS121 | BaF201 | BaS201 |
| | BaF052 | BaS052 | BaF122 | BaS122 | BaF202 | BaS202 |
| Al 01 | A1F051 | A1S051 | A1F121 | A1S121 | A1F201 | A1S201 |
| | A1F052 | A1S052 | A1F122 | A1S122 | A1F202 | A1S202 |
| Al 02 | A2F051 | A2S051 | A2F121 | A2S121 | A2F201 | A2S201 |
| | A2F052 | A2S052 | A2F122 | A2S122 | A2F202 | A2S202 |
| Ca 01 | C1F051 | C1S051 | C1F121 | C1S121 | C1F201 | C1S201 |
| | C1F052 | C1S052 | C1F122 | C1S122 | C1F202 | C1S202 |
| Ca 02 | C2F051 | C2S051 | C2F121 | C2S121 | C2F201 | C2S201 |
| | C2F052 | C2S052 | C2F122 | C2S122 | C2F202 | C2S202 |
| Ti 01 | T1F051 | T1S051 | T1F121 | T1S121 | T1F201 | T1S201 |
| | T1F052 | T1S052 | T1F122 | T1S122 | T1F202 | T1S202 |
| Ti 02 | T2F051 | T2S051 | T2F121 | T2S121 | T2F201 | T2S201 |
| | T2F052 | T2S052 | T2F122 | T2S122 | T2F202 | T2S202 |

8.1 Inspeção Visual

A inspeção visual dos corpos de prova constituiu a primeira etapa da análise das juntas. Este procedimento tem o objetivo de fornecer um indicativo inicial da qualidade da junta soldada. Todas

as juntas foram inspecionadas visualmente, sem o auxílio de qualquer instrumento, a fim de verificar-se a presença dos seguintes defeitos: trincas, mordeduras, reforço excessivo, interrupção momentânea do cordão, porosidade superficial, inclusão de escória e excesso de salpicos. A fonte foi regulada para uma corrente de soldagem de 165 A, e a tensão do arco, definida pela distância entre a ponta do eletrodo e a superfície da junta, foi ajustada para o valor de 25 V. A velocidade média de soldagem foi de 2,7 mm/s.

A Tabela 8.2 apresenta resumidamente os resultados da inspeção visual dos corpos de prova. Para cada condição de soldagem são listadas separadamente as observações feitas em cada um dos quatro corpos de prova executados, dois do tipo filete e dois por simples deposição sobre chapa.

| Tabela 8.2 - Resultados da Inspeção Visual dos Corpos de Prova | | | | | |
|---|---------------------|-------------------|----------|---------------------|---------------------|
| Mistura | Profundidade (m) | Defeito observado | | | |
| | | Filete 1 | Filete 2 | Simples Deposição 1 | Simples Deposição 2 |
| Base | 5,0 | M, R | - | - | - |
| Base | 12,5 | L | - | R | R, S |
| Base | 20,0 | - | - | R | R |
| Al 01 | 5,0 | M, R | M, P | M, S | P, R |
| Al 01 | 12,5 | M, I | R | R | R, S |
| Al 01 | 20,0 | - | - | R | - |
| Al 02 | 5,0 | M, R, P, E | L | S | - |
| Al 02 | 12,5 | M, R, P, S | M, S | R | - |
| Al 02 | 20,0 | - | - | - | R |
| Ca 01 | 5,0 | - | - | - | - |
| Ca 01 | 12,5 | M | - | - | - |
| Ca 01 | 20,0 | - | - | R | - |
| Ca 02 | 5,0 | - | - | - | R |
| Ca 02 | 12,5 | - | - | R | - |
| Ca 02 | 20,0 | - | R | - | - |
| Ti 01 | 5,0 | M, I | I | - | - |
| Ti 01 | 12,5 | R, P, S | - | M | - |
| Ti 01 | 20,0 | - | R, L | I | R |
| Ti 02 | 5,0 | M, R | M, R, S | M, S, L | M, S |
| Ti 02 | 12,5 | R | - | - | - |
| Ti 02 | 20,0 | - | R | - | - |

obs: E = inclusão de escória; I = Interrupção do cordão; L = variação na largura do cordão; M = mordedura; P = Porosidade superficial; R = Reforço excessivo; S = Excesso de salpicos; - = sem defeito aparente.

A listagem de defeitos demonstra grande dispersão dos dados. Na maioria das situações não houve repetibilidade no tipo de defeito observado para soldas realizadas nas mesmas condições.

Não foram observadas trincas superficiais em nenhum dos corpos de prova examinados. Isso já era esperado pois o material base utilizado (tab. 7.1) apresenta baixo carbono equivalente ($C_{eq} = 0,135$ de acordo com o índice do IIW), o que o torna dúctil.

Os defeitos mais freqüentes são: mordeduras e reforço excessivo do cordão. As mordeduras

podem ter sido estimuladas pelo alto valor da corrente de soldagem utilizada. Pode-se notar, entretanto que este defeito ocorreu apenas nas soldas realizadas a 5 e 12.5 m de profundidade e em maior quantidade nas misturas contendo adição de alumínio. O reforço excessivo do cordão ocorreu indistintamente, sendo, provavelmente causado pelas baixa velocidade de soldagem utilizada (2.7 mm/s). O número de defeitos observados em juntas do tipo filete foi, como esperado, superior àquele verificado nas soldas do tipo simples deposição sobre chapa.

As soldas realizadas a 20 m de profundidade, para todos os eletrodos testados, foram as que apresentaram menor quantidade de defeitos. A altura do reforço nestas soldas foi inferior ao observado nas outras duas profundidades e, para nenhuma das misturas testadas, ocorreram mordeduras. Isto mostra o efeito do aumento da pressão hidrostática sobre a poça de fusão e, conseqüentemente sobre a forma final do cordão.

Dentre todas as misturas testadas, pode-se observar que aquelas contendo CaCO_3 (Ca01 e Ca02) foram as que apresentaram a menor quantidade defeitos, proporcionando juntas de qualidade igual ou superior à mistura base.

A inspeção visual das soldas com alto teor de TiO_2 (misturas Ti01 e Ti02) revelou soldas com maior número de defeitos que a composição Base. Embora a maioria destas soldas tenha apresentado problemas não geralmente causados por instabilidade do arco, tais como mordeduras e reforço excessivo. As soldas realizadas com as misturas contendo alumínio (Al01 e Al02) foram as que apresentaram os piores resultados. Além de mordedura e reforço excessivo, foram observados diversos tipos de defeitos, tais como: porosidade superficial, inclusão de escória, excesso de salpicos e variação na largura do cordão, os quais caracterizam soldas de baixa qualidade.

O apêndice B contém as fotografias de uma das juntas tipo filete executadas para cada condição de soldagem, mostrando o aspecto dos cordões de solda e os defeitos observados. A análise foi feita na região central, desprezando-se as regiões de início e fim dos cordões de solda.

8.2 Porosidade

Os poros foram contados pelo método estatístico puntual, /75/. Sobre a seção transversal do cordão de solda, analisada através de um projetor de perfis com aumento de 100 vezes, foi colocada uma malha com pontos igualmente espaçados e contados os poros. Os poros observados são apresentados na forma de percentual sobre a área total do cordão. Para cada junta soldada foram analisadas três seções distintas, sendo o resultado apresentado a média dos valores obtidos.

Os resultados aqui exibidos são mais completos do que aqueles apresentados em trabalho anterior, /76/, mas apontam a mesma tendência. Os dados apresentados naquela oportunidade

representavam o resultado obtido com apenas uma das soldas, em junta tipo filete, para cada condição (composição química x profundidade). Posteriormente foram realizadas mais três soldas para cada situação.

Na Fig. 8.1 estão plotados os resultados da medição da porosidade nas juntas, em função da profundidade, para cada um dos eletrodos estudados.

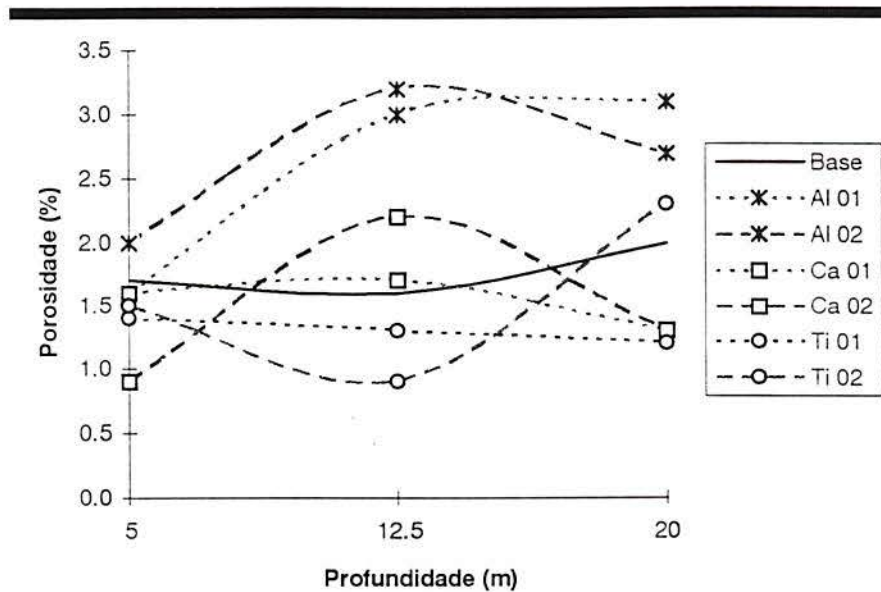


Fig. 8.1 - Variação da porosidade com a profundidade de soldagem para cada um dos eletrodos estudados.

Na mistura Base observa-se um pequeno crescimento no número de poros com o aumento da profundidade de soldagem. Aumentando o teor de carbonato de cálcio para 11% (mistura Ca01), pode-se notar que nas profundidades de 5 e 12,5 m a porosidade observada é semelhante àquela existente na mistura Base, porém a 20 m, o número de poros observado foi inferior ao verificado na mistura Base. Aumentando-se a quantidade de carbonato de cálcio para 16 % (mistura Ca02), a porosidade observada foi inferior a da mistura base a 5 e 20 m, aumentando nas soldas realizadas a 12,5 m de profundidade.

Aumentando-se o teor de rutilo para 40 % observa-se uma redução de porosidade média, em relação à mistura Base, para todas as profundidades testadas. Quando o teor de rutilo foi aumentado para 50 %, notou-se uma grande redução no número de poros na região de 12,5 m, porém esta tendência não se confirmou na solda realizada a 20 m.

Nas duas misturas com adição de Al o número de poros aumentou sensivelmente nas soldas realizadas a 12,5 e 20 m, constituindo os piores resultados dentre as composições testadas.

O fato de as soldas terem sido feitas em um único passe pode prejudicar a análise, pois

existem indícios de que o número de poros é superior em soldas multi-passe. Porém, os resultados descritos aqui são bastante semelhantes àqueles mostrados na Fig. 3.9, onde os testes também foram executados em passe único e, naquele caso, na forma de simples deposição sobre a chapa (“bead-on-plate”). Para as soldas feitas a profundidades semelhantes, a maioria dos corpos de prova apresentou uma quantidade percentual muito pequena de poros (entre 0.5 e 2,5 %).

8.3 Oscilogramas de Corrente e Tensão de Soldagem

Durante a soldagem dos corpos de prova os valores instantâneos de tensão e corrente de soldagem foram adquiridos utilizando o sistema de aquisição de dados descrito no item 7.1.6. Antes de iniciar os experimentos foram feitos diversos testes com eletrodos comerciais e com os eletrodos fabricados no **LS&TC** para definir os parâmetros que proporcionassem boa definição das curvas de corrente e tensão durante o máximo tempo de aquisição possível.

Nestes testes foram feitas soldas com eletrodos de diferentes bitolas e com parâmetros variando desde os limites inferiores de tensão e corrente recomendados pelo fabricante, até seus valores máximos. Os valores instantâneos de tensão e corrente foram adquiridos a diferentes frequências e comparados. Após a realização dos testes, a frequência de 5 kHz por canal (10 KHz no total) foi escolhida por permitir excelente definição das curvas. O tempo de aquisição durante cada solda foi de 6 s, que representa cerca de 20% do tempo de arco aberto das soldas realizadas, o que é suficiente para caracterizar o comportamento do eletrodo e, por outro lado, não gera arquivos demasiadamente grandes (60000 pontos e 763 kb).

O “driver” de aquisição da placa (biblioteca desenvolvida pelo fabricante do hardware que deve ser utilizada para execução da leitura de dados) possui uma limitação: a função que executa as leituras permite o armazenamento na memória, durante uma operação de leitura de, no máximo, 16384 pontos. Desejando adquirir mais pontos deve-se gravar os que estão na memória e, posteriormente, executar nova instrução de leitura. O inconveniente deste procedimento é que, para altas frequências de aquisição, durante o tempo gasto no procedimento de transferência dos dados da memória para um arquivo o experimento prossegue, podendo resultar um espaço de tempo maior entre o último ponto da leitura anterior e o primeiro da próxima, do que aquele definido pela frequência de aquisição. Para minimizar esta possibilidade, durante a aquisição os dados foram gravados em um driver virtual (definido como partição da memória RAM), cujo acesso é bem mais rápido do que aquele observado nos discos rígidos. Na prática este procedimento se mostrou eficaz, uma vez que não foram observadas descontinuidades nos sinais de tensão e corrente instantâneos de soldagem, nas posições correspondentes a estes intervalos de gravação.

Os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem de cada uma das soldas realizadas são mostrados no Apêndice C.

A tabela 8.3 resume os dados relativos a parâmetros e condições efetivos de soldagem. Nesta tabela são mostrados os valores médios de tensão e corrente de soldagem, bem como seus desvios padrão e inversos dos desvios padrão relativos, para cada uma das soldas realizadas. Além destes dados, são listados:

v velocidade de soldagem, (mm/s),

E Energia de soldagem, ($E = \bar{I} \cdot \bar{U} / v$),

$T_{x_{dep}}$ Taxa de deposição do eletrodo, definida como sendo a massa do metal de adição depositada por unidade de tempo, (Kg/h),

ρ_{dep} Rendimento de deposição do eletrodo, definido como a razão entre a massa do metal de solda depositado e a massa da alma do eletrodo consumida, (%).

| Código | Corrente (A) | | | Tensão (V) | | | v (mm/s) | E (kJ/mm) | $T_{x_{dep}}$ (kg/h) | ρ_{dep} (%) |
|--------|--------------|------------------|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------------------|---------------------|
| | \bar{I} | $\sigma \bar{I}$ | $\bar{I} / \sigma \bar{I}$ | \bar{U} | $\sigma \bar{U}$ | $\bar{U} / \sigma \bar{U}$ | | | | |
| BaF051 | 157,28 | 38,88 | 4,05 | 28,16 | 15,15 | 1,86 | 2,48 | 1,78 | 1,22 | 96,99 |
| BaF052 | 161,31 | 18,60 | 8,67 | 30,58 | 8,02 | 3,81 | 3,17 | 1,55 | 0,93 | 76,93 |
| BaS051 | 132,84 | 66,32 | 2,00 | 40,32 | 24,65 | 1,64 | 3,13 | 1,71 | 0,93 | 72,35 |
| BaS052 | 170,19 | 15,02 | 11,33 | 26,53 | 6,16 | 4,31 | 2,51 | 1,80 | 1,07 | 86,95 |
| BaF121 | 168,35 | 15,05 | 11,19 | 25,78 | 6,05 | 4,26 | 3,11 | 1,40 | 1,34 | 98,13 |
| BaF122 | 158,45 | 20,22 | 7,84 | 30,87 | 8,62 | 3,58 | 2,84 | 1,72 | 1,32 | 94,89 |
| BaS121 | 168,56 | 13,42 | 12,56 | 25,87 | 4,62 | 5,60 | 3,49 | 1,25 | 1,43 | 102,05 |
| BaS122 | 167,31 | 12,95 | 12,92 | 26,03 | 4,47 | 5,82 | 2,30 | 1,90 | 1,35 | 104,45 |
| BaF201 | 170,02 | 15,67 | 10,85 | 25,90 | 5,93 | 4,37 | 2,92 | 1,51 | 1,77 | 110,73 |
| BaF202 | 170,68 | 12,91 | 13,22 | 24,96 | 4,07 | 6,13 | 2,54 | 1,68 | 1,67 | 111,35 |
| BaS201 | 168,08 | 13,31 | 12,63 | 24,42 | 3,74 | 6,53 | 2,25 | 1,82 | 1,58 | 105,39 |
| BaS202 | 166,72 | 12,87 | 12,95 | 25,34 | 3,99 | 6,35 | 1,95 | 2,17 | 1,57 | 108,62 |
| A1F051 | 162,82 | 15,99 | 10,18 | 25,18 | 6,04 | 4,17 | 3,13 | 1,31 | 1,37 | 97,17 |
| A1F052 | 128,72 | 73,25 | 1,76 | 39,52 | 27,63 | 1,43 | 2,91 | 1,75 | 1,00 | 83,99 |
| A1S051 | 161,32 | 22,80 | 7,08 | 29,57 | 9,56 | 3,09 | 3,12 | 1,53 | 1,16 | 86,94 |
| A1S052 | 153,84 | 41,35 | 3,72 | 29,27 | 15,75 | 1,86 | 2,71 | 1,66 | 0,73 | 75,35 |
| A1F121 | 168,26 | 13,70 | 12,28 | 24,00 | 4,65 | 5,16 | 2,77 | 1,46 | 1,58 | 106,82 |
| A1F122 | 165,98 | 12,57 | 13,20 | 25,63 | 4,05 | 6,33 | 2,71 | 1,57 | 1,50 | 106,05 |
| A1S121 | 165,14 | 13,86 | 11,91 | 26,91 | 5,45 | 4,94 | 2,54 | 1,75 | 1,43 | 103,50 |
| A1S122 | 165,85 | 14,88 | 11,15 | 26,01 | 5,85 | 4,45 | 2,41 | 1,79 | 1,44 | 99,23 |
| A1F201 | 170,28 | 13,61 | 12,51 | 24,86 | 4,80 | 5,18 | 3,13 | 1,35 | 1,67 | 114,31 |
| A1F202 | 171,55 | 14,37 | 11,94 | 25,73 | 4,43 | 5,81 | 2,30 | 1,92 | 1,66 | 110,93 |
| A1S201 | 169,72 | 13,39 | 12,68 | 24,16 | 4,02 | 6,01 | 2,24 | 1,83 | 1,63 | 108,50 |
| A1S202 | 161,69 | 22,54 | 7,17 | 26,82 | 8,88 | 3,02 | 2,47 | 1,76 | 1,58 | 103,99 |

| Tabela 8.3 - Parâmetros e Condições de Soldagem | | | | | | | | | | (continuação) |
|---|--------------|-----------------|-------------------------|------------|-----------------|-------------------------|-------------|--------------|-----------------------------|-------------------------|
| Código | Corrente (A) | | | Tensão (V) | | | v (mm/s) | E (kJ/mm) | T _{xdep} (kg/h) | ρ _{dep} (%) |
| | \bar{I} | $\sigma\bar{I}$ | $\bar{I}/\sigma\bar{I}$ | \bar{U} | $\sigma\bar{U}$ | $\bar{U}/\sigma\bar{U}$ | | | | |
| A2F051 | 146,99 | 42,09 | 3,49 | 31,64 | 16,78 | 1,89 | 2,61 | 1,78 | 1,36 | 101,68 |
| A2F052 | 171,77 | 18,44 | 9,32 | 24,66 | 7,92 | 3,11 | 2,46 | 1,72 | 1,07 | 83,48 |
| A2S051 | 166,87 | 16,17 | 10,32 | 26,21 | 6,55 | 4,00 | 2,70 | 1,62 | 1,29 | 89,34 |
| A2S052 | 165,94 | 15,41 | 10,77 | 25,29 | 6,09 | 4,15 | 2,86 | 1,47 | 1,07 | 81,26 |
| A2F121 | 161,38 | 14,12 | 11,43 | 26,43 | 5,78 | 4,57 | 2,66 | 1,61 | 1,57 | 109,87 |
| A2F122 | 128,17 | 68,62 | 1,87 | 40,44 | 26,01 | 1,55 | 2,88 | 1,80 | 0,90 | 85,08 |
| A2S121 | 167,53 | 12,95 | 12,94 | 24,38 | 4,63 | 5,27 | 3,08 | 1,33 | 1,37 | 99,26 |
| A2S122 | 152,50 | 44,11 | 3,46 | 30,82 | 16,63 | 1,85 | 2,85 | 1,65 | 1,27 | 95,17 |
| A2F201 | 163,16 | 13,29 | 12,28 | 26,08 | 4,81 | 5,42 | 2,35 | 1,81 | 1,69 | 112,86 |
| A2F202 | 166,80 | 13,50 | 12,36 | 24,16 | 4,58 | 5,28 | 2,86 | 1,41 | 1,60 | 109,65 |
| A2S201 | 166,35 | 15,82 | 10,52 | 26,09 | 6,19 | 4,21 | 2,84 | 1,53 | 1,62 | 105,59 |
| A2S202 | 166,44 | 13,76 | 12,10 | 24,43 | 4,42 | 5,53 | 2,39 | 1,70 | 1,60 | 108,40 |
| C1F051 | 169,71 | 12,84 | 13,22 | 24,24 | 4,44 | 5,46 | 2,13 | 1,93 | 1,20 | 102,90 |
| C1F052 | 158,38 | 25,64 | 6,18 | 28,82 | 10,39 | 2,77 | 2,70 | 1,69 | 1,00 | 76,06 |
| C1S051 | 169,24 | 12,09 | 14,00 | 24,81 | 3,49 | 7,11 | 3,19 | 1,32 | 1,43 | 100,19 |
| C1S052 | 169,47 | 12,04 | 14,08 | 24,78 | 3,89 | 6,37 | 3,04 | 1,38 | 1,22 | 91,86 |
| C1F121 | 168,33 | 12,90 | 13,05 | 25,84 | 4,57 | 5,65 | 2,62 | 1,66 | 1,49 | 98,52 |
| C1F122 | 169,68 | 12,07 | 14,06 | 24,76 | 3,28 | 7,55 | 2,63 | 1,60 | 1,55 | 111,29 |
| C1S121 | 151,40 | 46,47 | 3,26 | 30,93 | 17,41 | 1,78 | 3,18 | 1,47 | 1,32 | 98,01 |
| C1S122 | 167,86 | 12,09 | 13,88 | 24,93 | 3,88 | 6,43 | 2,88 | 1,45 | 1,49 | 106,62 |
| C1F201 | 165,49 | 13,59 | 12,18 | 27,06 | 5,60 | 4,83 | 2,96 | 1,51 | 1,56 | 109,48 |
| C1F202 | 160,87 | 20,22 | 7,96 | 27,87 | 8,86 | 3,15 | 2,58 | 1,74 | 1,48 | 107,03 |
| C1S201 | 159,28 | 28,35 | 5,62 | 29,96 | 10,92 | 2,74 | 2,40 | 1,99 | 1,46 | 100,16 |
| C1S202 | 167,21 | 12,46 | 13,42 | 26,65 | 4,12 | 6,47 | 2,81 | 1,59 | 1,37 | 96,11 |
| C2F051 | 165,79 | 12,26 | 13,52 | 24,94 | 4,20 | 5,94 | 2,40 | 1,72 | 1,37 | 78,60 |
| C2F052 | 164,04 | 13,78 | 11,90 | 23,76 | 4,79 | 4,96 | 2,46 | 1,58 | 0,95 | 68,95 |
| C2S051 | 164,29 | 16,97 | 9,68 | 25,83 | 7,30 | 3,54 | 2,96 | 1,43 | 1,06 | 86,52 |
| C2S052 | 162,29 | 12,83 | 12,65 | 27,65 | 4,81 | 5,75 | 2,84 | 1,58 | 1,14 | 87,41 |
| C2F121 | 165,10 | 12,63 | 13,07 | 25,83 | 4,60 | 5,62 | 2,13 | 2,00 | 1,39 | 102,22 |
| C2F122 | 170,58 | 15,06 | 11,33 | 27,04 | 5,76 | 4,69 | 2,91 | 1,58 | 1,10 | 79,19 |
| C2S121 | 168,17 | 12,13 | 13,86 | 26,61 | 4,04 | 6,59 | 2,76 | 1,62 | 1,48 | 102,21 |
| C2S122 | 168,54 | 12,16 | 13,86 | 25,73 | 4,11 | 6,26 | 2,79 | 1,55 | 1,34 | 90,87 |
| C2F201 | 167,42 | 12,89 | 12,99 | 25,14 | 4,11 | 6,12 | 2,31 | 1,82 | 1,53 | 106,83 |
| C2F202 | 176,17 | 12,77 | 13,80 | 24,28 | 3,34 | 7,27 | 2,93 | 1,46 | 1,48 | 97,72 |
| C2S201 | 160,59 | 40,63 | 3,95 | 30,48 | 14,98 | 2,03 | 3,13 | 1,56 | 1,33 | 89,00 |
| C2S202 | 172,82 | 12,92 | 13,38 | 25,12 | 3,92 | 6,41 | 3,06 | 1,42 | 1,51 | 102,20 |

| Tabela 8.3 - Parâmetros e Condições de Soldagem | | | | | | | | | | (continuação) |
|---|--------------|-----------------|-------------------------|------------|-----------------|-------------------------|-------------|--------------|-----------------------------|-------------------------|
| Código | Corrente (A) | | | Tensão (V) | | | v (mm/s) | E (kJ/mm) | T _{Xdep} (kg/h) | ρ _{dep} (%) |
| | \bar{I} | $\sigma\bar{I}$ | $\bar{I}/\sigma\bar{I}$ | \bar{U} | $\sigma\bar{U}$ | $\bar{U}/\sigma\bar{U}$ | | | | |
| T1F051 | 171,52 | 15,79 | 10,86 | 24,50 | 5,99 | 4,09 | 2,79 | 1,51 | 1,20 | 97,02 |
| T1F052 | 139,37 | 61,59 | 2,26 | 38,21 | 22,04 | 1,73 | 2,80 | 1,90 | 0,85 | 69,10 |
| T1S051 | 158,89 | 35,08 | 4,53 | 30,86 | 13,20 | 2,34 | 2,74 | 1,79 | 0,97 | 76,74 |
| T1S052 | 170,84 | 15,51 | 11,01 | 26,18 | 6,14 | 4,26 | 2,76 | 1,62 | 1,14 | 85,89 |
| T1F121 | 170,58 | 16,49 | 10,34 | 26,16 | 6,67 | 3,92 | 2,49 | 1,79 | 1,29 | 97,50 |
| T1F122 | 169,30 | 15,72 | 10,77 | 26,12 | 6,07 | 4,30 | 2,72 | 1,63 | 1,20 | 87,18 |
| T1S121 | 169,04 | 14,61 | 11,57 | 26,37 | 5,37 | 4,91 | 2,80 | 1,59 | 1,41 | 100,79 |
| T1S122 | 171,87 | 13,49 | 12,74 | 25,27 | 4,26 | 5,93 | 2,85 | 1,53 | 1,36 | 94,77 |
| T1F201 | 174,22 | 13,55 | 12,86 | 24,11 | 4,23 | 5,70 | 3,03 | 1,39 | 1,49 | 103,60 |
| T1F202 | 168,13 | 15,41 | 10,91 | 27,68 | 5,95 | 4,65 | 2,66 | 1,75 | 1,48 | 105,59 |
| T1S201 | 176,00 | 14,17 | 12,42 | 24,35 | 4,15 | 5,87 | 2,88 | 1,49 | 1,58 | 103,68 |
| T1S202 | 168,06 | 14,35 | 11,71 | 26,02 | 5,42 | 4,80 | 2,42 | 1,81 | 1,46 | 101,64 |
| T2F051 | 168,13 | 14,93 | 11,26 | 25,49 | 5,35 | 4,76 | 2,20 | 1,95 | 1,10 | 93,59 |
| T2F052 | 161,60 | 39,26 | 4,12 | 30,45 | 14,40 | 2,11 | 3,10 | 1,59 | 1,14 | 85,28 |
| T2S051 | 174,71 | 16,54 | 10,56 | 25,27 | 6,18 | 4,09 | 3,20 | 1,38 | 1,08 | 77,13 |
| T2S052 | 173,24 | 15,98 | 10,84 | 25,30 | 6,51 | 3,89 | 3,04 | 1,44 | 1,27 | 86,68 |
| T2F121 | 162,00 | 15,91 | 10,18 | 26,14 | 6,45 | 4,05 | 2,13 | 1,99 | 1,32 | 93,29 |
| T2F122 | 163,38 | 32,02 | 5,10 | 30,00 | 12,50 | 2,40 | 3,05 | 1,61 | 0,93 | 65,93 |
| T2S121 | 154,21 | 44,97 | 3,43 | 30,36 | 16,19 | 1,88 | 2,73 | 1,72 | 1,36 | 94,77 |
| T2S122 | 169,65 | 14,35 | 11,82 | 26,33 | 4,96 | 5,31 | 2,82 | 1,59 | 1,23 | 92,54 |
| T2F201 | 163,16 | 13,96 | 11,69 | 24,77 | 4,95 | 5,00 | 2,53 | 1,60 | 1,34 | 96,25 |
| T2F202 | 171,07 | 15,19 | 11,26 | 25,70 | 5,91 | 4,35 | 2,47 | 1,78 | 1,11 | 82,02 |
| T2S201 | 169,84 | 14,82 | 11,46 | 25,35 | 5,38 | 4,71 | 2,78 | 1,55 | 1,33 | 94,34 |
| T2S202 | 173,50 | 15,21 | 11,41 | 24,35 | 4,93 | 4,94 | 2,44 | 1,73 | 1,31 | 95,64 |

Comparando-se os valores obtidos para corrente e tensão médias de soldagem em todas as soldas, pode-se notar que a variação foi bastante pequena: média de 164,57 A com desvio padrão de 9,12 A para a corrente, e média de 27,04 V com desvio padrão de 3,45 V para a tensão de soldagem. Algumas soldas, porém, apresentam um comportamento anormal, evidenciado por valores médios de corrente mais baixos, e de tensão mais altos do que a distribuição normal dos demais. Estes valores aparecem nas soldas em que houveram pequenas extinções do arco, durante a execução do cordão, como pode ser visto na figura C1.a e C1.c (Apêndice C), por exemplo.

Nas figuras 8.2 e 8.3 são plotados os valores dos inversos dos desvios padrão relativos da corrente e tensão de soldagem, respectivamente, em função da profundidade de soldagem. Estes índices fornecem uma medida da constância do sinal, sendo empregados sempre que a transferência metálica não se dá por curtos-circuitos, [77], e, quanto maior o seu valor, mais estável é considerada a solda.

Em cada uma destas figuras, os sete primeiros gráficos apresentam os valores médios obtidos para cada uma das soldas realizadas com um mesmo eletrodo. No último gráfico, situado no canto inferior direito da figura, são comparadas as curvas obtidas para cada tipo de eletrodo testado.

A mistura Base apresenta uma forte tendência ao aumento da regularidade dos sinais de tensão e corrente com o aumento da profundidade de soldagem, principalmente entre 5 e 12.5 m. Esta tendência se mantém para pequenas adições de alumínio (Al01) e rutilo (Ti01), porém, nos eletrodos com maiores os teores destes elementos (Al02 e Ti02) observou-se que o comportamento na profundidade de 12.5 m foi bastante irregular, mantendo-se praticamente nos mesmos níveis verificados aos 5 m, acontecendo um maior aumento na regularidade dos sinais apenas entre 12.5 e 20 m. Já nos eletrodos com adição de carbonato de cálcio o comportamento é distinto. Os eletrodos Ca01 e Ca02 apresentam maior regularidade que todos os demais na profundidade de 5 m, regularidade esta que tende a manter-se constante ou sofrer uma pequena redução com o aumento de profundidade.

As figuras 8.4 e 8.5 mostram o comportamento de taxa e rendimento de deposição dos eletrodos.

A análise destas curvas, mostra que, para todas as composições testadas, há aumento nestes índices com o aumento da profundidade de soldagem. Isso comprova o efeito da pressão ambiente sobre as características do arco elétrico em soldagem subaquática já descrita por outros pesquisadores e apresentadas no capítulo 3.2. Com o aumento da profundidade aumentam a condutividade térmica dos gases e a constrição do arco devida à pressão hidrostática radial sobre a coluna do arco, com conseqüente aumento de densidade de corrente, o que resulta em acréscimo na taxa de transferência de metal. Os resultados demonstram que mesmo para as relativamente pequenas diferenças e magnitudes de profundidades abrangidas por este trabalho, o efeito da pressão ambiente sobre a quantidade de metal de solda depositado é bastante sensível e consistente, verificando-se para todas as composições químicas testadas.

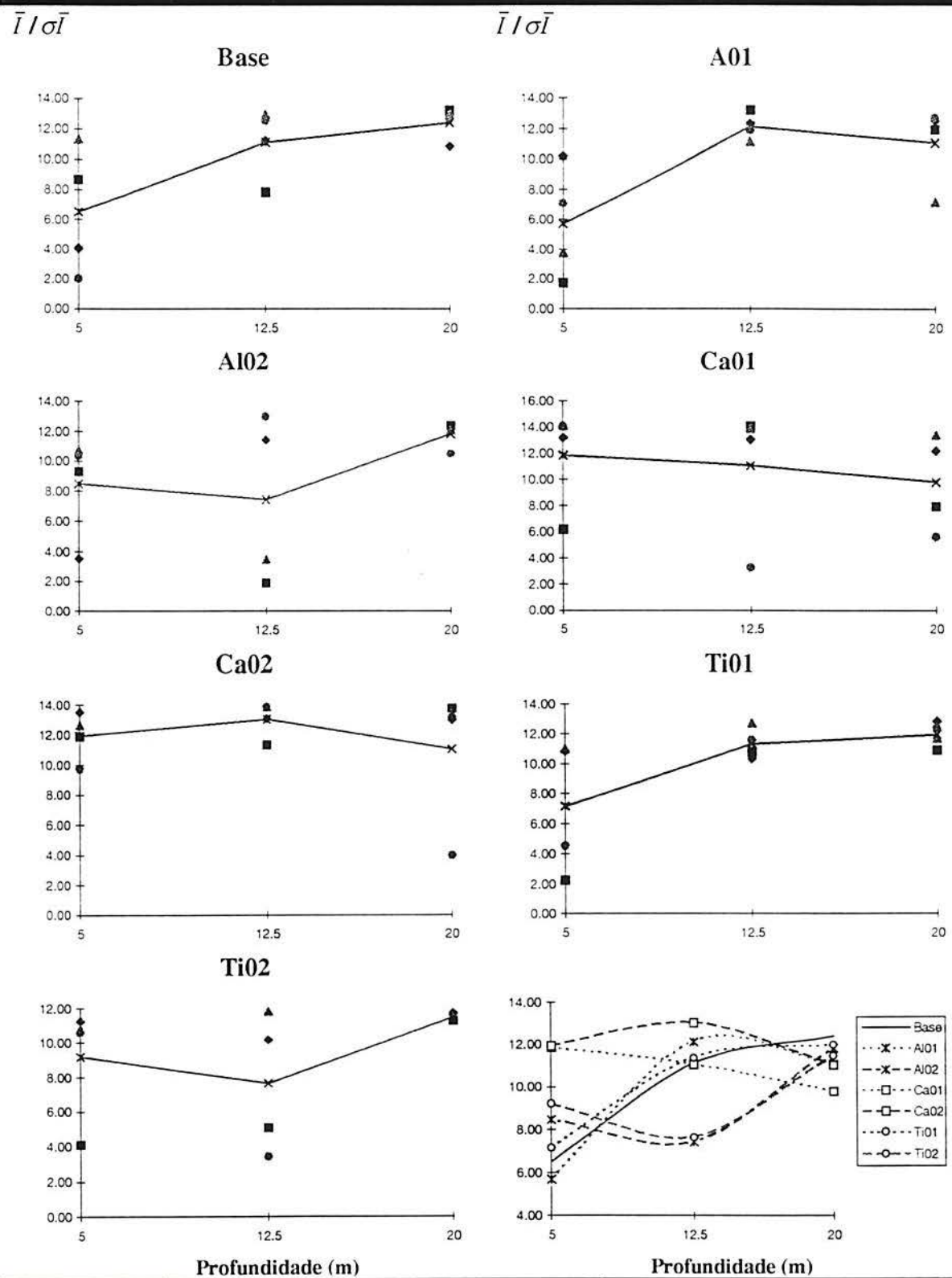


Fig 8.2 - Inversos dos desvios padrão relativos da corrente média de soldagem, $\bar{I} / \sigma \bar{I}$, em função da profundidade. ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

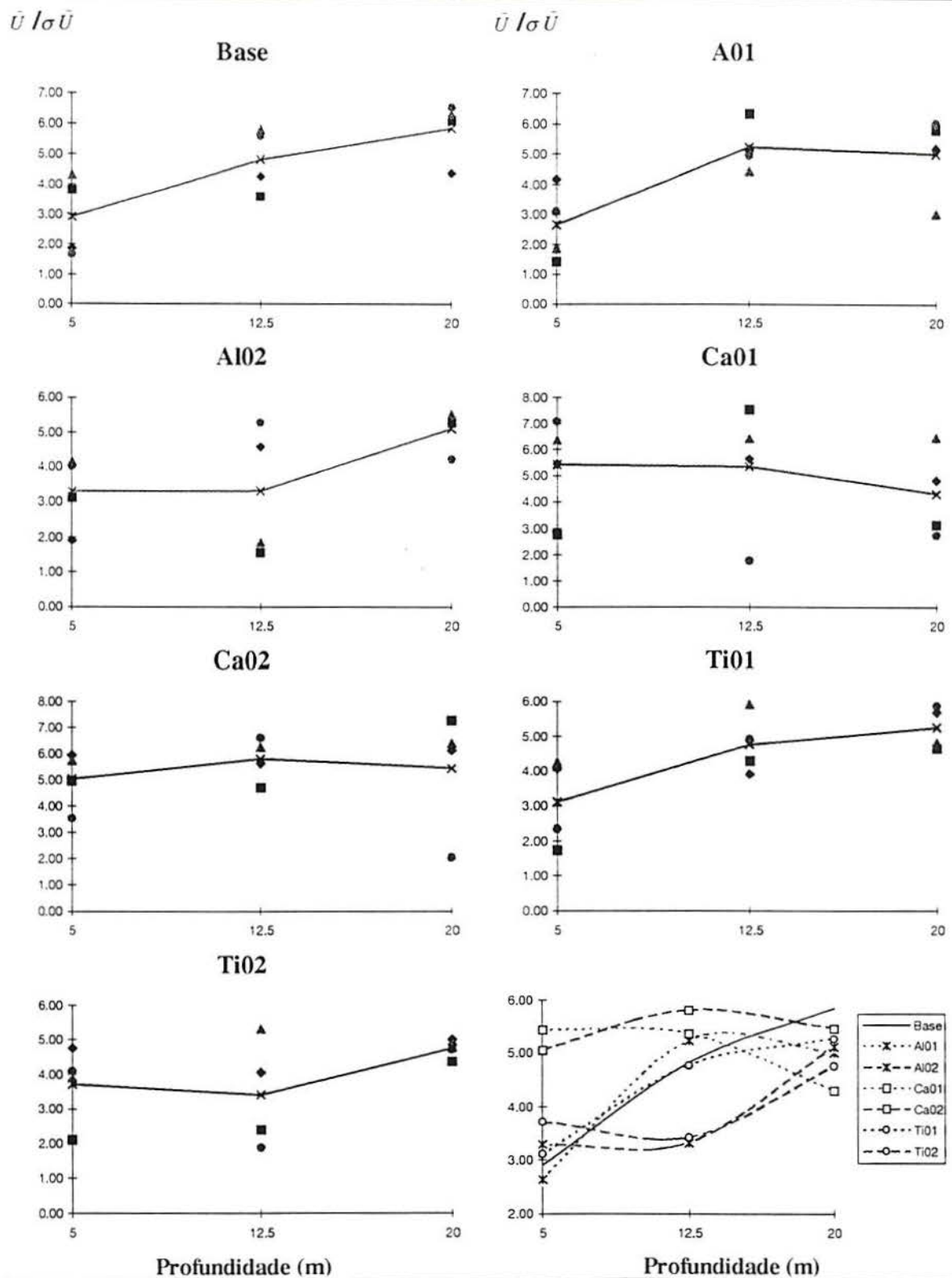


Fig 8.3 - Inversos dos desvios padrão relativos da tensão média de soldagem, $\hat{U} / \sigma \bar{U}$, em função da profundidade. ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

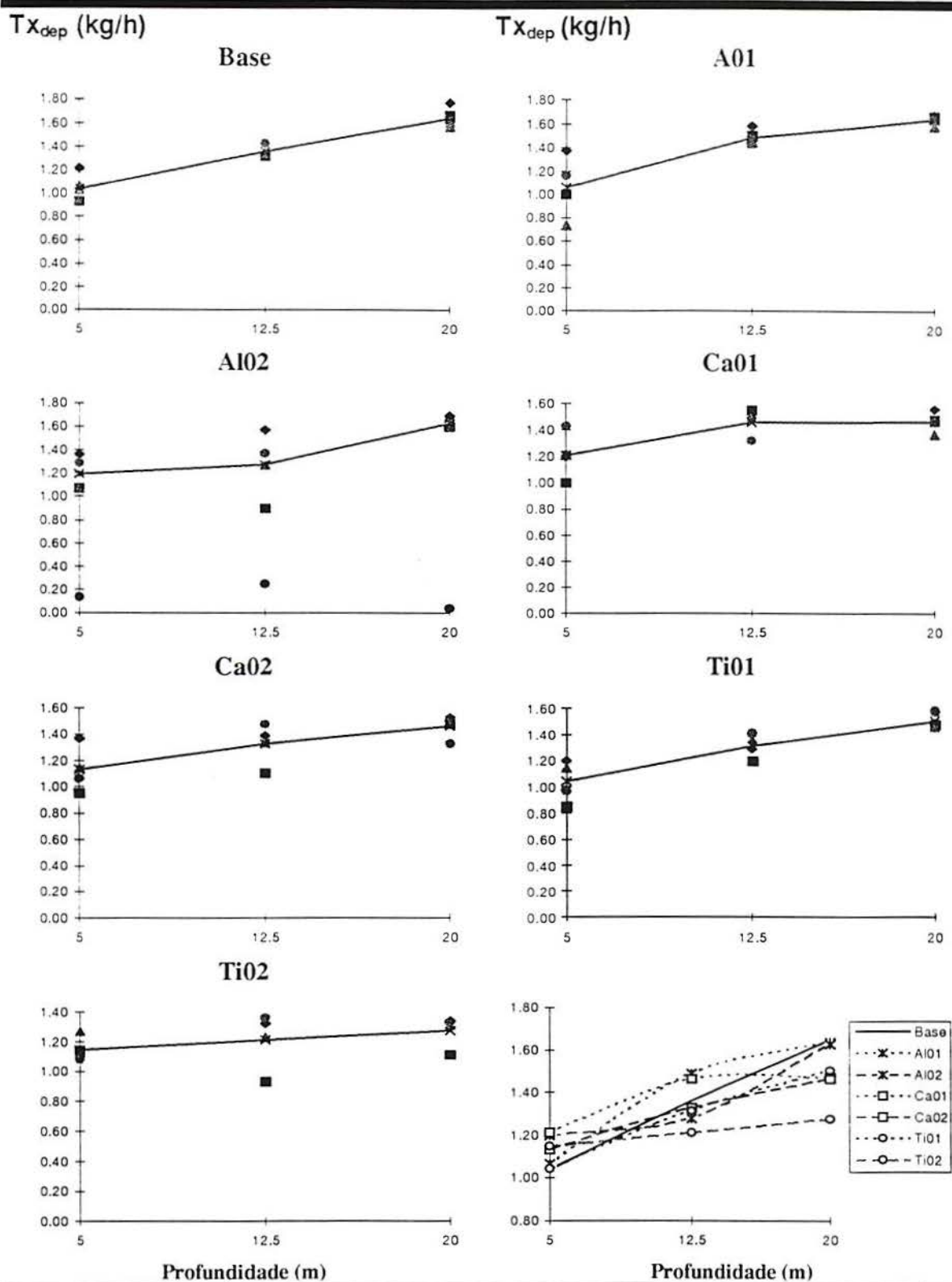


Fig. 8.4 - Taxa de deposição observada, Tx_{dep} , em função da profundidade de soldagem (m). ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

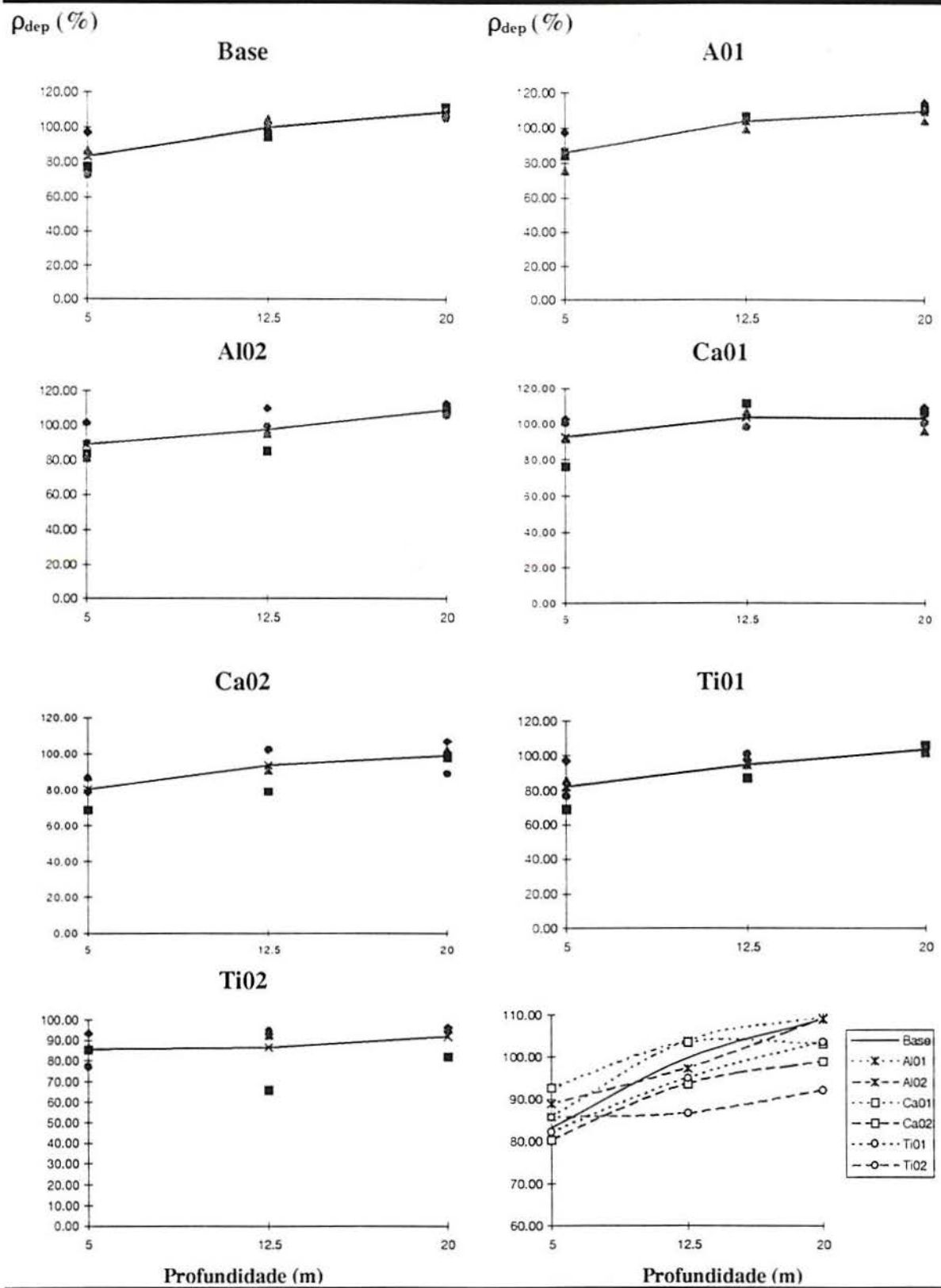


Fig 8.5 - Rendimento de deposição observado, ρ_{dep} , em função da profundidade de soldagem (m).
 ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; * - média.

8.4 Índices de aferição da estabilidade

A partir dos dados, armazenados em disco, foram calculados os índices propostos pelos pesquisadores relacionados no item 6.1.2 para caracterizar a estabilidade do arco elétrico. A tabela 8.4 lista os dados relativos à ocorrência de curto-circuitos, além dos índices que caracterizam facilidade e regularidade nas transferências de metal e de carga elétrica (os índices dependentes do desvio padrão do número de curtos-circuitos não existem nas soldas em que estes ocorreram apenas 2 vezes).

Tabela 8.4 - Análise estatística dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem

| Código | Curto-circuitos | | | | | Transferência de metal | | | | Transferência de carga elétrica | | | | |
|--------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Nº | t _{cc} | σ _{tcc} | T _{cc} | σT _{cc} | F _{cc} | F _{tm} | R _{cc} | R _{tm} | U _l | I _l | t _l | FE _l | RE _l |
| BaF051 | 26,0 | 7,10 | 3,60 | 222,2 | 313,0 | 4,50 | 140,1 | 0,71 | 1,99 | 31,12 | 180,4 | 0,68 | 2,46 | 0,79 |
| BaF052 | 7,0 | 4,90 | 1,90 | 750,0 | 928,2 | 1,30 | 203,5 | 0,81 | 2,64 | 31,33 | 190,3 | 0,77 | 2,52 | 0,80 |
| BaS051 | 24,0 | 8,80 | 10,90 | 240,0 | 434,8 | 4,20 | 113,2 | 0,55 | 0,81 | 28,93 | 197,3 | 0,69 | 8,19 | 0,18 |
| BaS052 | 11,0 | 7,20 | 3,10 | 500,0 | 883,8 | 2,00 | 139,6 | 0,57 | 2,29 | 28,50 | 187,5 | 0,64 | 3,79 | 0,39 |
| Média | 17,0 | 7,00 | 4,88 | 428,1 | 640,0 | 3,00 | 149,1 | 0,66 | 1,93 | 29,97 | 188,9 | 0,70 | 4,24 | 0,54 |
| σ | 8,2 | 1,39 | 3,53 | 216,0 | 270,0 | 1,38 | 33,2 | 0,11 | 0,69 | 1,27 | 6,0 | 0,05 | 2,34 | 0,27 |
| BaF121 | 24,0 | 5,50 | 2,60 | 240,0 | 183,5 | 4,20 | 182,4 | 1,31 | 2,07 | 31,89 | 184,2 | 1,23 | 1,06 | 0,66 |
| BaF122 | 7,0 | 5,20 | 1,50 | 750,0 | 1748,0 | 1,30 | 193,4 | 0,43 | 3,35 | 28,10 | 196,9 | 0,66 | 4,76 | 0,79 |
| BaS121 | 10,0 | 4,40 | 1,20 | 545,5 | 803,0 | 1,80 | 227,3 | 0,68 | 3,58 | 29,05 | 204,6 | 0,46 | 2,74 | 0,95 |
| BaS122 | 4,0 | 4,30 | 2,10 | 1200,0 | 1418,2 | 0,80 | 229,9 | 0,85 | 2,07 | 40,01 | 203,8 | 0,50 | 1,05 | 0,99 |
| Média | 11,3 | 4,85 | 1,85 | 683,9 | 1038,2 | 2,03 | 208,3 | 0,82 | 2,77 | 32,26 | 197,4 | 0,71 | 2,40 | 0,85 |
| σ | 7,7 | 0,51 | 0,54 | 348,9 | 598,8 | 1,30 | 20,7 | 0,32 | 0,70 | 4,69 | 8,2 | 0,31 | 1,53 | 0,13 |
| BaF201 | 9,0 | 3,60 | 1,40 | 600,0 | 627,9 | 1,70 | 281,2 | 0,96 | 2,60 | 30,21 | 215,4 | 0,56 | 1,71 | 0,46 |
| BaF202 | 9,0 | 3,00 | 1,20 | 600,0 | 674,9 | 1,70 | 335,8 | 0,89 | 2,44 | 26,53 | 204,8 | 0,42 | 4,03 | 1,59 |
| BaS201 | 8,0 | 3,00 | 0,60 | 666,7 | 533,7 | 1,50 | 333,3 | 1,25 | 5,30 | 27,42 | 200,5 | 1,33 | 1,08 | 1,65 |
| BaS202 | 2,0 | 4,50 | - | 2000,0 | - | 0,50 | 222,2 | - | - | 27,12 | 183,8 | 0,50 | 5,26 | - |
| Média | 7,0 | 3,53 | 1,07 | 966,7 | 612,2 | 1,35 | 293,1 | 1,03 | 3,45 | 27,82 | 201,1 | 0,70 | 3,02 | 1,23 |
| σ | 2,9 | 0,61 | 0,34 | 597,2 | 58,7 | 0,50 | 46,4 | 0,16 | 1,31 | 1,42 | 11,4 | 0,37 | 1,70 | 0,55 |
| A1F051 | 29,0 | 6,80 | 2,90 | 200,0 | 157,8 | 5,00 | 147,7 | 1,27 | 2,35 | 34,01 | 190,6 | 0,54 | 1,56 | 0,78 |
| A1F052 | 26,0 | 5,00 | 2,00 | 222,2 | 488,3 | 4,50 | 199,7 | 0,46 | 2,46 | 25,60 | 189,9 | 1,16 | -7,65 | -0,20 |
| A1S051 | 17,0 | 5,50 | 2,80 | 333,3 | 396,1 | 3,00 | 182,4 | 0,84 | 1,99 | 28,15 | 203,8 | 0,64 | 3,26 | 0,48 |
| A1S052 | 28,0 | 5,30 | 2,90 | 206,9 | 222,8 | 4,80 | 187,9 | 0,93 | 1,86 | 26,02 | 185,7 | 1,07 | 5,68 | 0,15 |
| Média | 25,0 | 5,65 | 2,65 | 240,6 | 316,3 | 4,33 | 179,4 | 0,88 | 2,17 | 28,45 | 192,5 | 0,85 | 0,71 | 0,30 |
| σ | 4,7 | 0,69 | 0,38 | 54,1 | 132,1 | 0,79 | 19,4 | 0,29 | 0,25 | 3,36 | 6,8 | 0,27 | 5,05 | 0,37 |
| A1F121 | 18,0 | 5,50 | 2,40 | 315,8 | 336,6 | 3,20 | 182,2 | 0,94 | 2,28 | 30,67 | 192,7 | 0,83 | 1,28 | 1,30 |
| A1F122 | 4,0 | 4,70 | 2,40 | 1200,0 | 550,7 | 0,80 | 212,8 | 2,18 | 1,95 | 31,10 | 186,2 | 1,30 | 1,00 | 2,32 |
| A1S121 | 9,0 | 6,70 | 4,30 | 600,0 | 957,9 | 1,70 | 150,0 | 0,63 | 1,55 | 33,65 | 189,7 | 1,09 | 0,95 | 2,35 |
| A1S122 | 10,0 | 4,00 | 1,00 | 545,5 | 412,1 | 1,80 | 251,3 | 1,32 | 4,12 | 32,62 | 217,9 | 0,44 | 1,63 | 1,29 |
| Média | 10,3 | 5,23 | 2,53 | 665,3 | 564,3 | 1,88 | 199,1 | 1,27 | 2,48 | 32,01 | 196,6 | 0,92 | 1,22 | 1,82 |
| σ | 5,0 | 1,00 | 1,17 | 326,6 | 239,9 | 0,86 | 37,4 | 0,58 | 0,98 | 1,19 | 12,5 | 0,32 | 0,27 | 0,52 |

Tabela 8.4 - Análise estatística dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem

(continuação)

| Código | Curto-circuitos | | | | | Transferência de metal | | | | Transferência de carga elétrica | | | | |
|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|------------------------|----------|----------|----------|---------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| | Nº | t_{cc} | σt_{cc} | T_{cc} | σT_{cc} | F_{cc} | F_{tm} | R_{cc} | R_{tm} | U_l | I_l | t_l | FE_l | RE_l |
| A1F201 | 17,0 | 4,60 | 2,40 | 333,3 | 446,1 | 3,00 | 219,1 | 0,75 | 1,90 | 28,88 | 186,5 | 0,94 | 1,84 | 0,78 |
| A1F202 | 14,0 | 3,80 | 1,00 | 400,0 | 317,1 | 2,50 | 263,2 | 1,18 | 3,79 | 27,70 | 210,7 | 0,40 | 3,52 | 1,52 |
| A1S201 | 11,0 | 3,30 | 0,90 | 500,0 | 591,5 | 2,00 | 307,3 | 0,85 | 3,43 | 35,16 | 197,3 | 0,76 | 0,92 | 1,43 |
| A1S202 | 4,0 | 4,90 | 1,20 | 1200,0 | 1322,0 | 0,80 | 204,1 | 0,91 | 3,94 | 42,23 | 213,5 | 0,45 | 0,95 | 2,04 |
| Média | 11,5 | 4,15 | 1,38 | 608,3 | 669,2 | 2,08 | 248,4 | 0,92 | 3,27 | 33,49 | 202,0 | 0,64 | 1,81 | 1,44 |
| σ | 4,8 | 0,63 | 0,60 | 346,7 | 389,2 | 0,82 | 40,3 | 0,16 | 0,81 | 5,79 | 10,9 | 0,22 | 1,06 | 0,45 |
| A2F051 | 27,0 | 9,10 | 7,50 | 214,3 | 278,0 | 4,70 | 110,2 | 0,77 | 1,21 | 32,83 | 170,5 | 1,13 | 1,86 | 0,33 |
| A2F052 | 38,0 | 11,60 | 17,10 | 153,8 | 186,2 | 6,50 | 86,2 | 0,83 | 0,68 | 29,05 | 180,6 | 1,41 | 1,41 | 1,61 |
| A2S051 | 29,0 | 6,00 | 3,10 | 200,0 | 372,0 | 5,00 | 167,8 | 0,54 | 1,93 | 28,18 | 188,5 | 0,99 | 2,15 | 0,68 |
| A2S052 | 21,0 | 6,80 | 4,20 | 272,7 | 358,3 | 3,70 | 146,2 | 0,76 | 1,63 | 29,66 | 192,6 | 0,70 | 1,87 | 1,29 |
| Média | 28,8 | 8,38 | 7,98 | 210,2 | 298,6 | 4,98 | 127,6 | 0,73 | 1,36 | 29,93 | 183,1 | 1,06 | 1,82 | 0,98 |
| σ | 6,1 | 2,18 | 5,51 | 42,5 | 74,2 | 1,00 | 31,5 | 0,11 | 0,47 | 1,75 | 8,4 | 0,26 | 0,27 | 0,50 |
| A2F121 | 11,0 | 7,10 | 2,90 | 500,0 | 665,5 | 2,00 | 141,8 | 0,75 | 2,44 | 28,09 | 168,7 | 1,27 | 3,31 | 0,67 |
| A2F122 | 16,0 | 6,20 | 1,80 | 352,9 | 598,3 | 2,80 | 161,0 | 0,59 | 3,36 | 27,82 | 190,8 | 0,74 | 21,74 | 0,07 |
| A2S121 | 13,0 | 4,40 | 1,90 | 428,6 | 547,2 | 2,30 | 228,1 | 0,78 | 2,34 | 27,52 | 193,1 | 0,91 | 1,79 | 1,59 |
| A2S122 | 9,0 | 6,50 | 3,50 | 600,0 | 646,1 | 1,70 | 154,1 | 0,93 | 1,83 | 28,44 | 179,9 | 1,07 | 4,50 | 0,43 |
| Média | 12,3 | 6,05 | 2,53 | 470,4 | 614,3 | 2,20 | 171,3 | 0,76 | 2,49 | 27,97 | 183,1 | 1,00 | 7,84 | 0,69 |
| σ | 2,6 | 1,01 | 0,71 | 91,1 | 45,8 | 0,41 | 33,5 | 0,12 | 0,55 | 0,34 | 9,7 | 0,20 | 8,09 | 0,56 |
| A2F201 | 11,0 | 4,00 | 1,60 | 500,0 | 669,8 | 2,00 | 250,0 | 0,75 | 2,53 | 32,86 | 193,1 | 0,80 | 1,20 | 0,33 |
| A2F202 | 17,0 | 5,30 | 2,50 | 333,3 | 405,0 | 3,00 | 187,2 | 0,82 | 2,16 | 31,22 | 202,2 | 0,55 | 1,58 | 0,76 |
| A2S201 | 11,0 | 3,50 | 0,90 | 500,0 | 455,0 | 2,00 | 285,0 | 1,10 | 3,93 | 30,98 | 206,4 | 0,76 | 1,28 | 1,02 |
| A2S202 | 9,0 | 3,40 | 1,00 | 600,0 | 596,8 | 1,70 | 292,2 | 1,01 | 3,41 | 29,31 | 208,8 | 0,67 | 1,46 | 1,98 |
| Média | 12,0 | 4,05 | 1,50 | 483,3 | 531,7 | 2,18 | 253,6 | 0,92 | 3,01 | 31,09 | 202,6 | 0,70 | 1,38 | 1,02 |
| σ | 3,0 | 0,76 | 0,64 | 95,8 | 106,4 | 0,49 | 41,5 | 0,14 | 0,70 | 1,26 | 6,0 | 0,10 | 0,15 | 0,61 |
| C1F051 | 14,0 | 4,80 | 2,30 | 400,0 | 450,1 | 2,50 | 209,6 | 0,89 | 2,08 | 29,01 | 196,5 | 0,59 | 2,15 | 1,73 |
| C1F052 | 18,0 | 7,70 | 5,10 | 315,8 | 485,4 | 3,20 | 129,9 | 0,65 | 1,51 | 27,75 | 182,2 | 0,88 | 4,64 | 0,53 |
| C1S051 | 5,0 | 3,90 | 1,80 | 1000,0 | 1065,8 | 1,00 | 257,7 | 0,94 | 2,17 | 29,33 | 188,7 | 0,76 | 1,97 | 3,12 |
| C1S052 | 3,0 | 4,50 | 1,40 | 1500,0 | 1411,8 | 0,70 | 220,6 | 1,06 | 3,33 | 25,52 | 196,5 | 0,80 | 3,07 | 1,20 |
| Média | 10,0 | 5,23 | 2,65 | 804,0 | 853,3 | 1,85 | 204,5 | 0,89 | 2,27 | 27,90 | 191,0 | 0,76 | 2,96 | 1,65 |
| σ | 6,2 | 1,47 | 1,45 | 480,7 | 404,7 | 1,04 | 46,6 | 0,15 | 0,66 | 1,50 | 6,0 | 0,11 | 1,06 | 0,95 |
| C1F121 | 5,0 | 4,20 | 1,60 | 1000,0 | 1630,7 | 1,00 | 240,4 | 0,61 | 2,59 | 28,50 | 211,7 | 0,28 | 4,24 | 1,09 |
| C1F122 | 3,0 | 5,40 | 2,00 | 1500,0 | 1088,0 | 0,70 | 185,2 | 1,38 | 2,73 | 24,08 | 188,2 | 1,40 | 4,32 | 0,48 |
| C1S121 | 10,0 | 7,40 | 5,90 | 545,5 | 461,4 | 1,80 | 135,5 | 1,18 | 1,25 | 33,06 | 185,0 | 0,76 | 1,84 | 0,38 |
| C1S122 | 4,0 | 3,90 | 2,10 | 1200,0 | 783,1 | 0,80 | 256,4 | 1,53 | 1,84 | 31,74 | 179,7 | 1,30 | 1,01 | 1,76 |
| Média | 5,5 | 5,23 | 2,90 | 1061,4 | 990,8 | 1,08 | 204,4 | 1,18 | 2,10 | 29,35 | 191,1 | 0,94 | 2,85 | 0,93 |
| σ | 2,7 | 1,38 | 1,74 | 347,0 | 430,8 | 0,43 | 47,7 | 0,35 | 0,60 | 3,46 | 12,2 | 0,45 | 1,46 | 0,55 |

Tabela 8.4 - Análise estatística dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem

(continuação)

| Código | Curto-circuitos | | | | | Transferência de metal | | | | Transferência de carga elétrica | | | | |
|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|------------------------|----------|----------|----------|---------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| | Nº | t_{cc} | σt_{cc} | T_{cc} | σT_{cc} | F_{cc} | F_{tm} | R_{cc} | R_{tm} | U_l | I_l | t_l | FE_l | RE_l |
| C1F201 | 10.0 | 4.30 | 2.20 | 545.5 | 807.6 | 1.80 | 233.6 | 0.68 | 1.98 | 36.19 | 189.4 | 1.18 | 0.71 | 1.73 |
| C1F202 | 13.0 | 3.90 | 1.30 | 428.6 | 486.5 | 2.30 | 256.9 | 0.88 | 2.89 | 27.91 | 199.1 | 0.77 | 2.42 | 1.11 |
| C1S201 | 4.0 | 3.20 | 0.70 | 1200.0 | 1063.9 | 0.80 | 307.7 | 1.13 | 4.86 | 42.09 | 206.5 | 0.30 | 1.70 | 2.76 |
| C1S202 | 2.0 | 2.20 | - | 2000.0 | - | 0.50 | 454.5 | - | - | 40.81 | 193.0 | 0.50 | 1.17 | - |
| Média | 7.3 | 3.40 | 1.40 | 1043.5 | 786.0 | 1.35 | 313.2 | 0.90 | 3.24 | 36.75 | 197.0 | 0.69 | 1.50 | 1.87 |
| σ | 4.4 | 0.80 | 0.62 | 625.6 | 236.2 | 0.73 | 85.9 | 0.18 | 1.20 | 5.56 | 6.5 | 0.33 | 0.64 | 0.68 |
| C2F051 | 5.0 | 3.50 | 1.10 | 1000.0 | 841.6 | 1.00 | 284.1 | 1.19 | 3.29 | 31.21 | 199.3 | 0.76 | 1.26 | 1.09 |
| C2F052 | 19.0 | 5.30 | 1.80 | 300.0 | 689.7 | 3.30 | 190.4 | 0.43 | 2.93 | 25.89 | 184.8 | 1.19 | 1.89 | 0.98 |
| C2S051 | 17.0 | 7.90 | 2.60 | 333.3 | 292.3 | 3.00 | 127.1 | 1.14 | 3.06 | 29.73 | 181.9 | 0.65 | 2.65 | 0.94 |
| C2S052 | 2.0 | 7.40 | - | 2000.0 | - | 0.50 | 135.1 | - | - | 35.49 | 187.7 | 0.50 | 1.84 | - |
| Média | 10.8 | 6.03 | 1.83 | 908.3 | 607.9 | 1.95 | 184.2 | 0.92 | 3.09 | 30.58 | 188.4 | 0.78 | 1.91 | 1.00 |
| σ | 7.4 | 1.75 | 0.61 | 689.4 | 231.6 | 1.22 | 62.6 | 0.35 | 0.15 | 3.44 | 6.6 | 0.26 | 0.49 | 0.06 |
| C2F121 | 6.0 | 3.70 | 1.10 | 857.1 | 791.5 | 1.20 | 267.9 | 1.08 | 3.32 | 30.54 | 192.7 | 1.23 | 1.00 | 0.75 |
| C2F122 | 7.0 | 6.80 | 4.10 | 750.0 | 1016.2 | 1.30 | 147.1 | 0.74 | 1.67 | 35.99 | 177.6 | 1.20 | 0.94 | 0.57 |
| C2S121 | 2.0 | 3.20 | - | 2000.0 | - | 0.50 | 312.5 | - | - | 38.49 | 198.1 | 0.40 | 1.59 | - |
| C2S122 | 4.0 | 4.10 | 2.00 | 1200.0 | 1546.9 | 0.80 | 243.9 | 0.78 | 2.05 | 30.05 | 205.9 | 0.70 | 1.54 | 1.38 |
| Média | 4.8 | 4.45 | 2.40 | 1201.8 | 1118.2 | 0.95 | 242.9 | 0.87 | 2.35 | 33.77 | 193.6 | 0.88 | 1.27 | 0.90 |
| σ | 1.9 | 1.39 | 1.26 | 489.9 | 316.7 | 0.32 | 60.5 | 0.15 | 0.71 | 3.59 | 10.3 | 0.35 | 0.30 | 0.35 |
| C2F201 | 8.0 | 2.90 | 0.50 | 666.7 | 693.3 | 1.50 | 341.9 | 0.96 | 6.11 | 28.98 | 202.9 | 0.65 | 1.84 | 0.79 |
| C2F202 | 5.0 | 4.20 | 1.80 | 1000.0 | 1091.0 | 1.00 | 240.4 | 0.92 | 2.34 | 30.24 | 222.4 | 0.32 | 2.55 | 1.01 |
| C2S201 | 10.0 | 4.80 | 2.50 | 545.5 | 546.5 | 1.80 | 210.1 | 1.00 | 1.88 | 31.17 | 208.5 | 0.50 | 2.49 | 1.18 |
| C2S202 | 6.0 | 4.60 | 1.40 | 857.1 | 1145.0 | 1.20 | 217.4 | 0.75 | 3.20 | 38.08 | 189.9 | 1.40 | 0.49 | 6.38 |
| Média | 7.3 | 4.13 | 1.55 | 767.3 | 869.0 | 1.38 | 252.5 | 0.91 | 3.38 | 32.12 | 205.9 | 0.72 | 1.84 | 2.34 |
| σ | 1.9 | 0.74 | 0.72 | 174.3 | 255.1 | 0.30 | 52.8 | 0.10 | 1.64 | 3.53 | 11.7 | 0.41 | 0.83 | 2.34 |
| T1F051 | 29.0 | 7.20 | 3.40 | 200.0 | 160.0 | 5.00 | 139.6 | 1.25 | 2.10 | 31.76 | 179.4 | 0.97 | 1.38 | 0.80 |
| T1F052 | 15.0 | 5.30 | 1.50 | 375.0 | 517.6 | 2.70 | 189.9 | 0.72 | 3.45 | 28.42 | 197.9 | 0.96 | 6.97 | 0.18 |
| T1S051 | 14.0 | 5.00 | 2.00 | 400.0 | 648.2 | 2.50 | 199.4 | 0.62 | 2.45 | 34.01 | 191.5 | 1.09 | 1.14 | 1.39 |
| T1S052 | 22.0 | 4.60 | 1.90 | 260.9 | 327.7 | 3.80 | 217.4 | 0.80 | 2.43 | 30.04 | 215.0 | 0.46 | 2.17 | 1.31 |
| Média | 20.0 | 5.53 | 2.20 | 309.0 | 413.4 | 3.50 | 186.6 | 0.85 | 2.61 | 31.06 | 195.9 | 0.87 | 2.92 | 0.92 |
| σ | 6.0 | 1.00 | 0.72 | 81.9 | 185.4 | 1.00 | 28.9 | 0.24 | 0.51 | 2.07 | 12.8 | 0.24 | 2.37 | 0.48 |
| T1F121 | 18.0 | 5.30 | 2.20 | 315.8 | 247.9 | 3.20 | 188.7 | 1.27 | 2.39 | 36.21 | 188.9 | 0.92 | 0.91 | 0.89 |
| T1F122 | 16.0 | 4.40 | 1.90 | 352.9 | 528.5 | 2.80 | 225.4 | 0.67 | 2.30 | 27.64 | 196.1 | 0.86 | 2.32 | 0.68 |
| T1S121 | 7.0 | 3.10 | 1.10 | 750.0 | 765.3 | 1.30 | 318.2 | 0.98 | 2.81 | 34.01 | 209.6 | 0.89 | 0.85 | 0.79 |
| T1S122 | 11.0 | 3.90 | 1.70 | 500.0 | 705.5 | 2.00 | 253.5 | 0.71 | 2.29 | 30.02 | 198.3 | 1.09 | 1.14 | 1.96 |
| Média | 13.0 | 4.18 | 1.73 | 479.7 | 561.8 | 2.33 | 246.5 | 0.91 | 2.45 | 31.97 | 198.2 | 0.94 | 1.31 | 1.08 |
| σ | 4.3 | 0.80 | 0.40 | 170.6 | 201.1 | 0.73 | 47.4 | 0.24 | 0.21 | 3.34 | 7.4 | 0.09 | 0.60 | 0.51 |

Tabela 8.4 - Análise estatística dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem
(continuação)

| Código | Curto-circuitos | | | | | Transferência de metal | | | | Transferência de carga elétrica | | | | |
|--------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | N ^o | t _{cc} | σt _{cc} | T _{cc} | σT _{cc} | F _{cc} | F _{tm} | R _{cc} | R _{tm} | U _l | I _l | t _l | FE _l | RE _l |
| T1F201 | 7,0 | 3,20 | 1,00 | 750,0 | 1014,3 | 1,30 | 312,5 | 0,74 | 3,12 | 26,23 | 203,3 | 0,71 | 2,47 | 1,55 |
| T1F202 | 10,0 | 3,80 | 1,10 | 545,5 | 525,2 | 1,80 | 261,8 | 1,04 | 3,41 | 32,31 | 199,3 | 1,28 | 0,88 | 1,20 |
| T1S201 | 11,0 | 2,90 | 0,80 | 500,0 | 566,3 | 2,00 | 343,8 | 0,88 | 3,76 | 28,78 | 206,0 | 0,73 | 1,67 | 2,05 |
| T1S202 | 17,0 | 3,80 | 2,00 | 333,3 | 458,8 | 3,00 | 260,7 | 0,73 | 1,96 | 33,01 | 197,8 | 0,73 | 1,27 | 1,07 |
| Média | 11,3 | 3,43 | 1,23 | 532,2 | 641,2 | 2,03 | 294,7 | 0,85 | 3,06 | 30,08 | 201,6 | 0,86 | 1,57 | 1,47 |
| σ | 3,6 | 0,39 | 0,46 | 148,5 | 218,8 | 0,62 | 35,2 | 0,13 | 0,68 | 2,74 | 3,2 | 0,24 | 0,59 | 0,38 |
| T2F051 | 20,0 | 6,20 | 2,30 | 285,7 | 256,4 | 3,50 | 161,6 | 1,11 | 2,67 | 27,57 | 183,1 | 1,02 | 2,57 | 1,02 |
| T2F052 | 21,0 | 4,70 | 1,20 | 272,7 | 514,8 | 3,70 | 214,7 | 0,53 | 3,82 | 26,89 | 202,1 | 1,04 | 3,74 | 0,56 |
| T2S051 | 32,0 | 4,10 | 1,10 | 181,8 | 309,5 | 5,50 | 243,5 | 0,59 | 3,76 | 27,44 | 206,9 | 1,01 | 1,57 | 1,37 |
| T2S052 | 41,0 | 4,30 | 1,50 | 142,9 | 152,5 | 7,00 | 230,1 | 0,94 | 2,96 | 28,45 | 204,0 | 0,90 | 1,56 | 1,05 |
| Média | 28,5 | 4,83 | 1,53 | 220,8 | 308,3 | 4,93 | 212,5 | 0,79 | 3,30 | 27,59 | 199,1 | 0,99 | 2,36 | 1,00 |
| σ | 8,6 | 0,82 | 0,47 | 60,2 | 131,9 | 1,43 | 31,1 | 0,24 | 0,50 | 0,56 | 9,4 | 0,05 | 0,90 | 0,29 |
| T2F121 | 19,0 | 4,20 | 1,70 | 300,0 | 363,5 | 3,30 | 238,1 | 0,83 | 2,52 | 32,98 | 200,7 | 0,65 | 1,29 | 1,21 |
| T2F122 | 19,0 | 5,40 | 2,10 | 300,0 | 645,1 | 3,30 | 184,5 | 0,47 | 2,59 | 27,75 | 197,6 | 0,89 | 3,85 | 0,43 |
| T2S121 | 21,0 | 4,30 | 1,50 | 272,7 | 232,8 | 3,70 | 231,3 | 1,17 | 2,86 | 30,36 | 192,4 | 0,96 | 1,79 | 0,52 |
| T2S122 | 9,0 | 3,60 | 1,20 | 600,0 | 737,5 | 1,70 | 274,4 | 0,81 | 3,15 | 36,21 | 212,7 | 0,87 | 0,71 | 1,49 |
| Média | 17,0 | 4,38 | 1,63 | 368,2 | 494,7 | 3,00 | 232,1 | 0,82 | 2,78 | 31,83 | 200,9 | 0,84 | 1,91 | 0,91 |
| σ | 4,7 | 0,65 | 0,33 | 134,3 | 204,6 | 0,77 | 32,0 | 0,25 | 0,25 | 3,14 | 7,5 | 0,12 | 1,18 | 0,45 |
| T2F201 | 22,0 | 4,40 | 2,10 | 260,9 | 244,9 | 3,80 | 225,9 | 1,07 | 2,07 | 32,58 | 183,4 | 0,90 | 1,15 | 0,70 |
| T2F202 | 18,0 | 4,90 | 2,30 | 315,8 | 573,3 | 3,20 | 203,6 | 0,55 | 2,18 | 29,42 | 193,9 | 0,93 | 1,64 | 0,38 |
| T2S201 | 9,0 | 5,00 | 2,90 | 600,0 | 618,8 | 1,70 | 201,8 | 0,97 | 1,71 | 30,12 | 192,3 | 1,40 | 0,96 | 1,14 |
| T2S202 | 24,0 | 3,30 | 1,30 | 240,0 | 340,0 | 4,20 | 303,0 | 0,71 | 2,56 | 28,26 | 201,8 | 0,63 | 2,17 | 0,77 |
| Média | 18,3 | 4,40 | 2,15 | 354,2 | 444,3 | 3,23 | 233,6 | 0,83 | 2,13 | 30,10 | 192,8 | 0,97 | 1,48 | 0,75 |
| σ | 5,8 | 0,67 | 0,57 | 144,6 | 156,3 | 0,95 | 41,2 | 0,21 | 0,30 | 1,58 | 6,5 | 0,28 | 0,47 | 0,27 |

Na figura 8.6 é reproduzida a tela do programa de análise mostrando dois curtos-circuitos típicos, observados na solda A1F051. Existe uma queda repentina na tensão do arco, que assume valores próximos a 5 V. Simultaneamente ocorre um pico de corrente.

O programa ESTAB identifica um curto-circuito da seguinte forma: os valores instantâneos da tensão de soldagem são lidos sequencialmente; se em determinado instante o valor da tensão de soldagem observado é inferior a 10 V, este tempo é marcado como início de um curto-circuito e os valores subsequentes são lidos até que o valor da tensão volte a superar os 10 V; quando isso ocorre, o ponto imediatamente anterior é marcado como fim do curto-circuito. Se o intervalo de

tempo entre o início e o fim do curto-circuito for inferior a 2 ms ele não é considerado, pois, segundo Scotti, [78], só existe transferência metálica quando o tempo de curto-circuito, t_{cc} , é superior a este valor. O período de curto-circuito, T_{cc} , definido como o intervalo de tempo entre dois curtos-circuitos sucessivos, também é mostrado na figura.

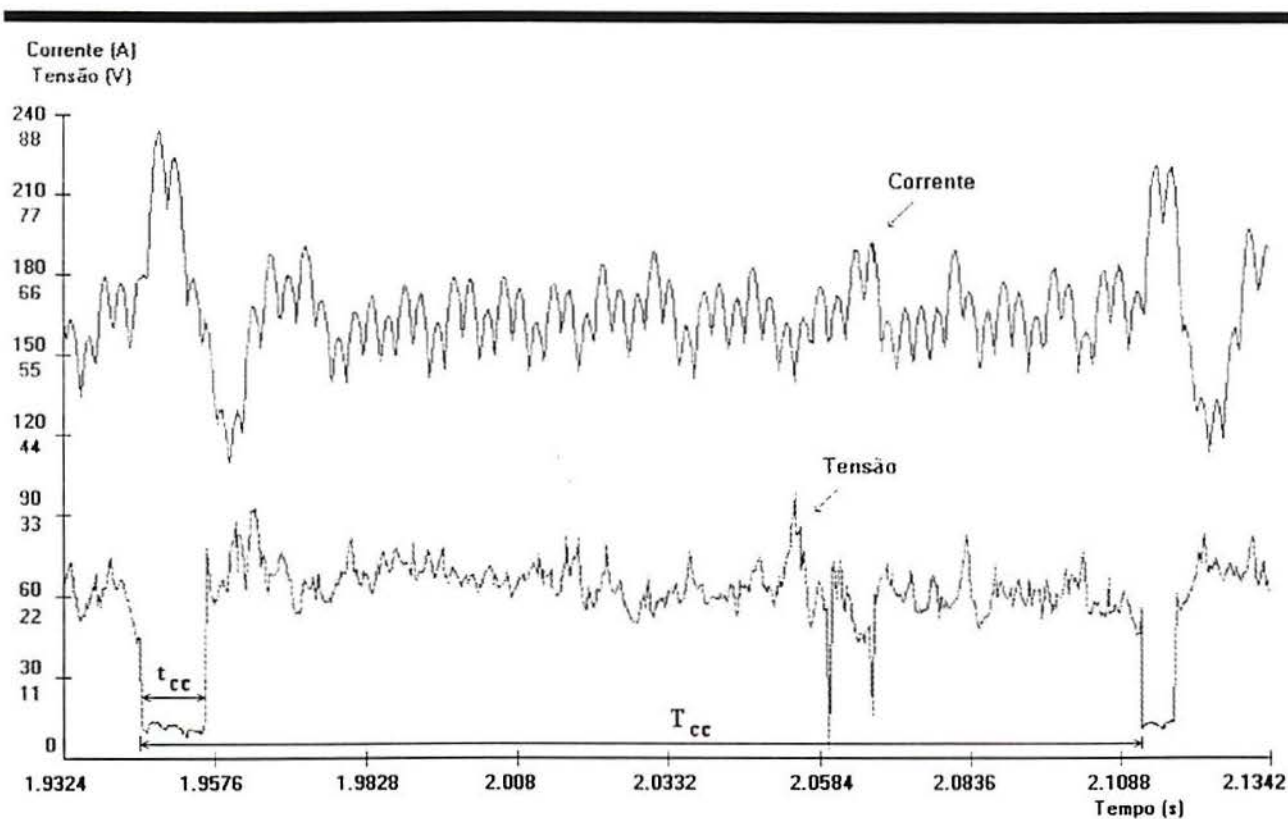


Fig. 8.6 - Tela do programa ESTAB mostrando dois curtos-circuitos típicos.

A figura 8.7 mostra outro curto-circuito, onde são mostrados os valores do tempo, tensão e corrente de reabertura do arco, designados, respectivamente, por t_1 , U_1 e I_1 . Sempre que um curto-circuito é identificado, como foi descrito anteriormente, estes valores são obtidos através da análise da curva de tensão instantânea de soldagem. O tempo final de curto-circuito coincide com o início do tempo de reignição. Os valores subsequentes de tensão são lidos até que em determinado ponto atinja valores mais altos que os três pontos anteriores e que os três posteriores, indicando um pico, designado tensão de reignição. Este ponto marca o fim do processo de reignição e os parâmetros instantâneos de soldagem, neste ponto, correspondem a tensão e corrente de reignição deste curto-circuito.

As rotinas do programa que fazem esta análise estão listadas no apêndice A.

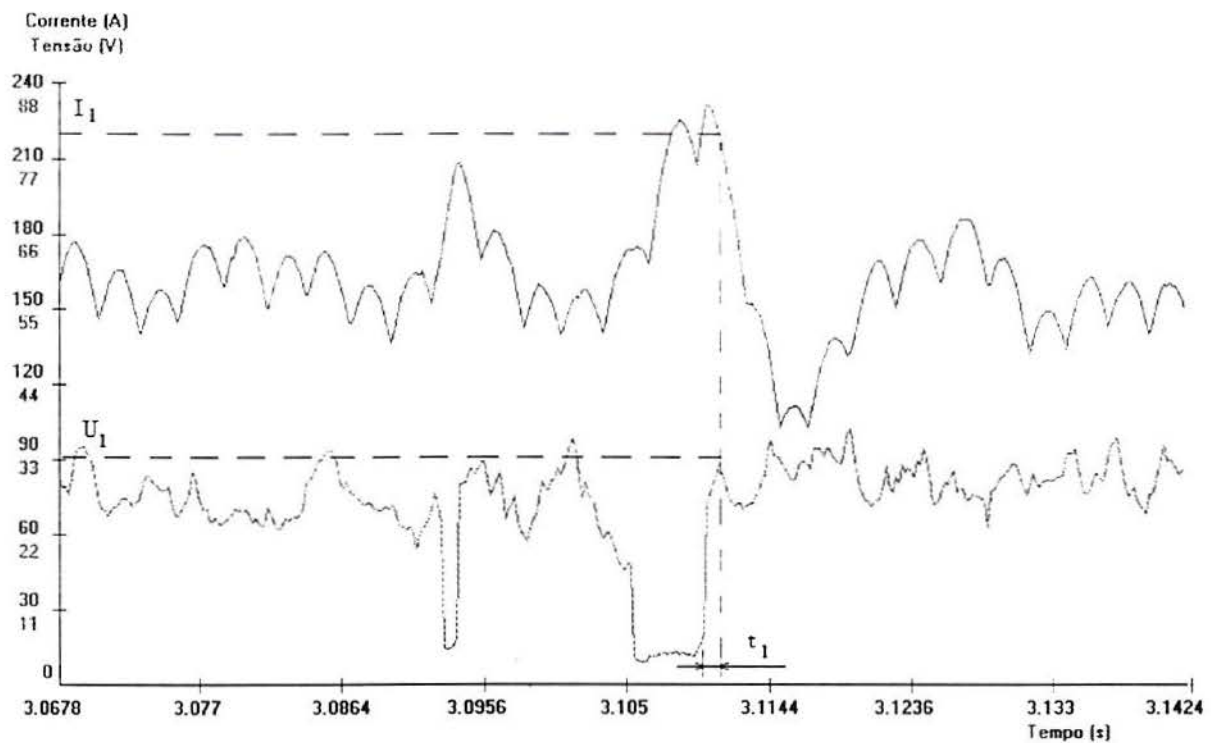


Fig. 8.7 - Valores de tempo, tensão e corrente de reignição do arco.

Nas figuras 8.8, 8.9 e 8.10 estão plotados, respectivamente, o número de ocorrências, tempo e período médios dos curtos-circuitos em função da profundidade de soldagem para cada tipo de eletrodo avaliado.

O número de curtos-circuitos observados, N_{cc} , diminui consideravelmente, para todas as composições estudadas, quando passa-se de 5 para 12,5 m de profundidade, e, a 20 m para alguns eletrodos este número continua a cair (Base, Al02, Ti01), enquanto nos outros há uma pequena elevação (Al01, Ca01, Ca02 e Ti02).

Nota-se também um comportamento diferenciado provocado pela variação na composição química dos eletrodos. Em relação à composição Base, os eletrodos com adição de $CaCO_3$ foram aqueles nos quais resultaram as menores quantidades de curtos-circuitos, principalmente, nas menores profundidades, não se observando diferenças sensíveis entre as duas composições. Os aumentos nos teores de Al e TiO_2 , por sua vez, acarretaram um maior número de curtos-circuitos, principalmente a 5 e 20 m.

O tempo médio de duração dos curtos-circuitos, t_{cc} , também diminui, com o aumento da profundidade, porém neste caso a tendência de redução mantém-se constante.

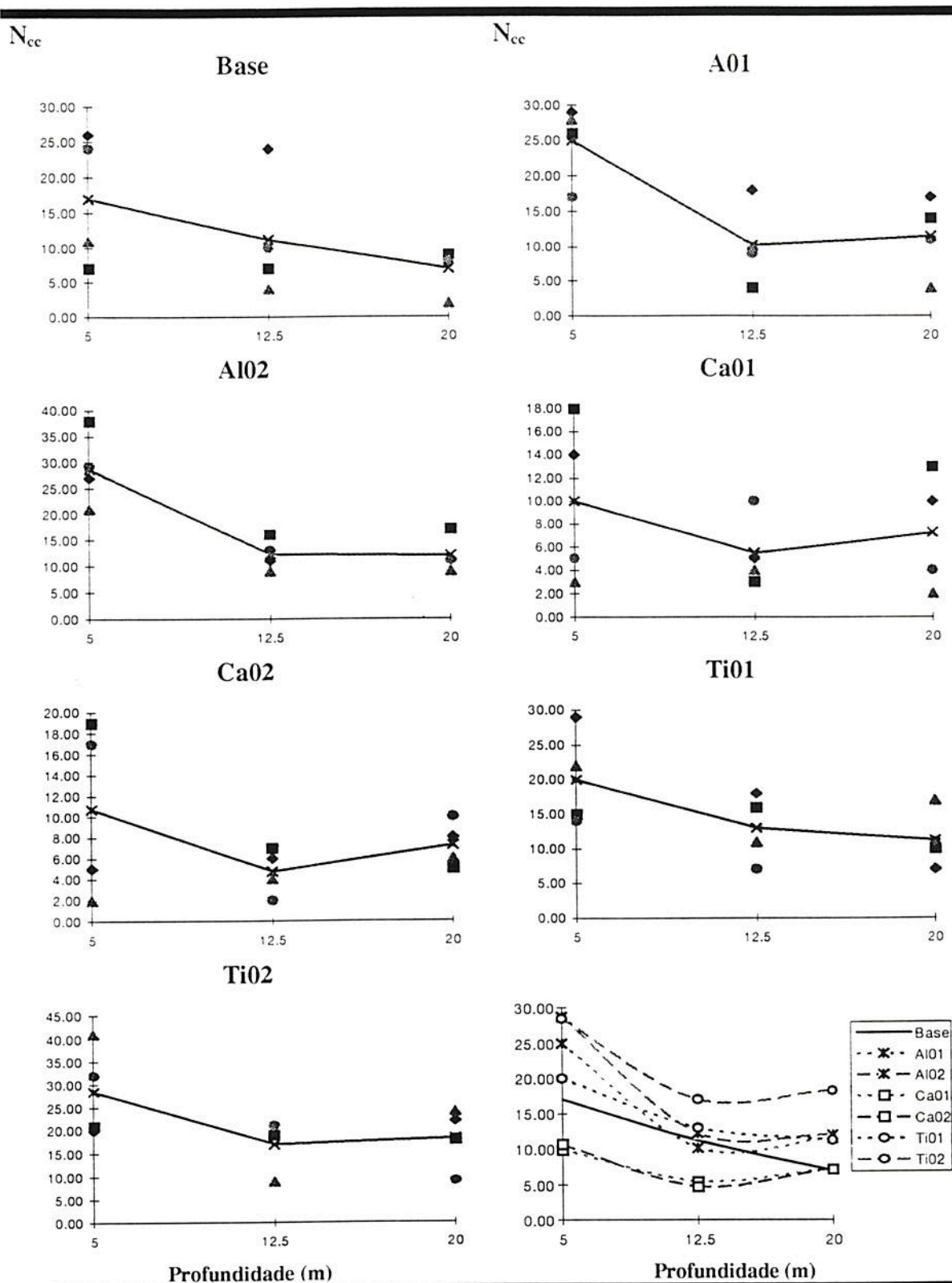


Fig 8.8 - Número de curtos-circuitos observados, N_{cc} , em função da profundidade de soldagem (m).
 ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

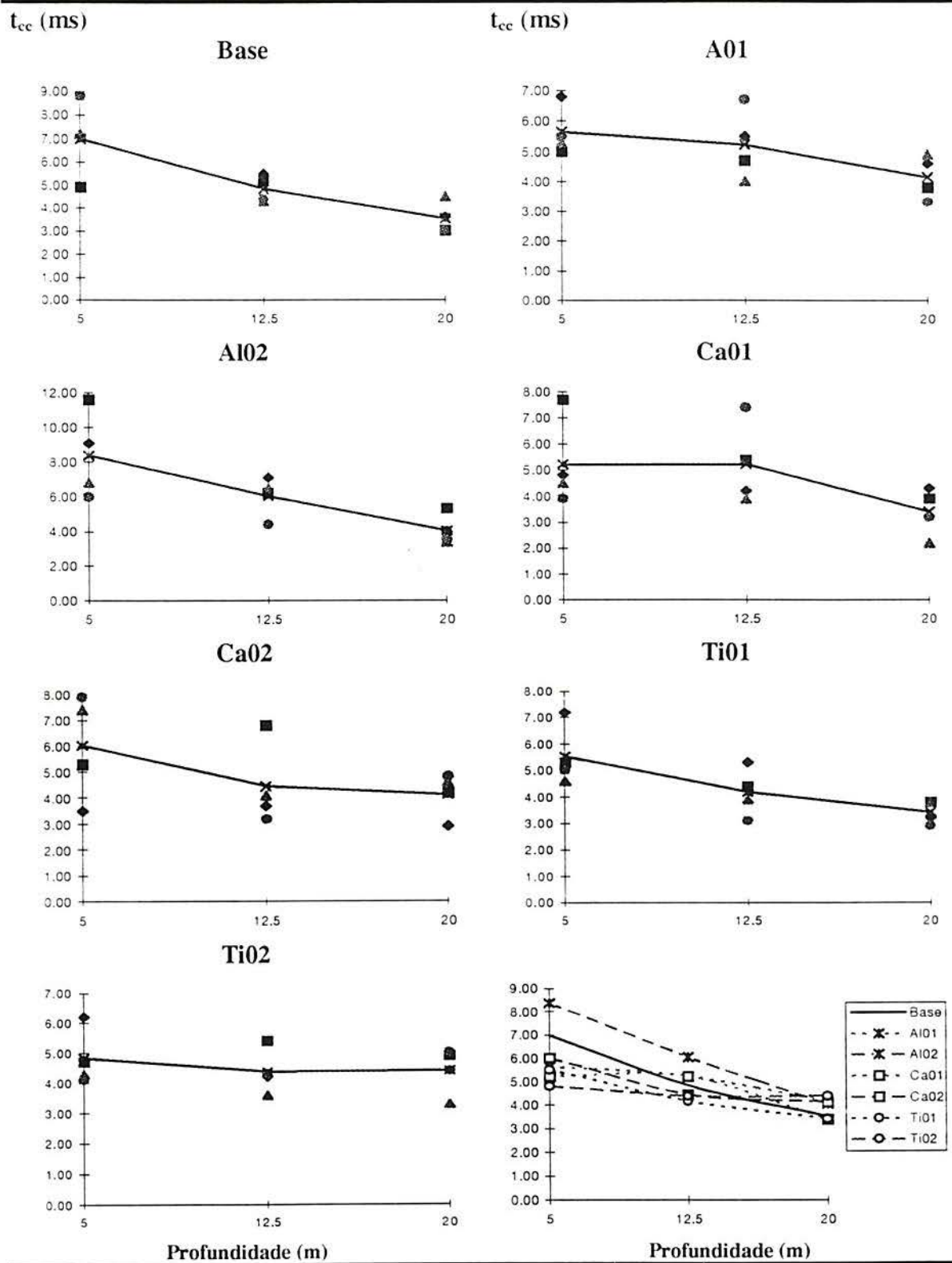


Fig 8.9 - Tempo médio de curto-circuito, t_{cc} , em função da profundidade de soldagem (m). ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

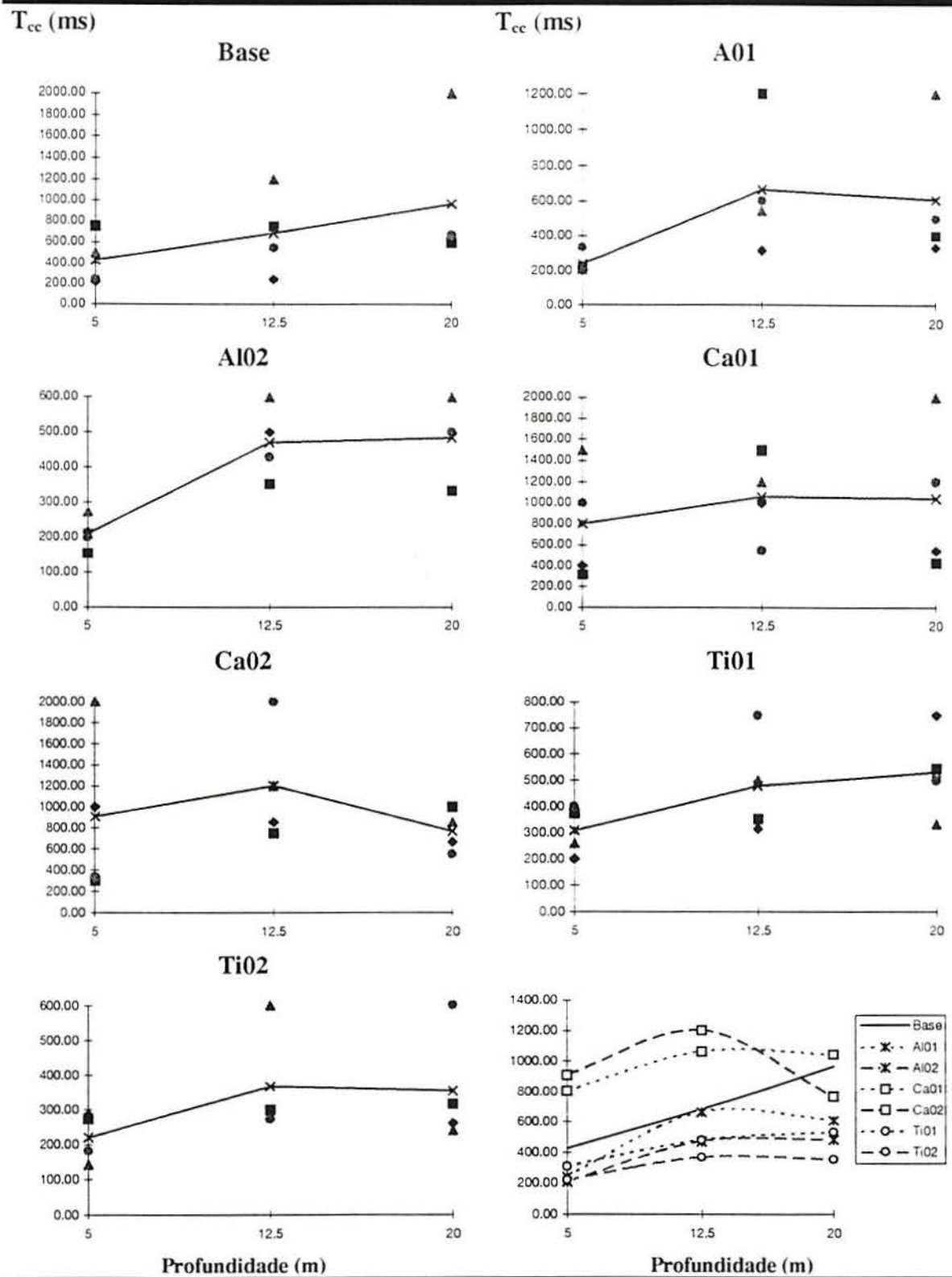


Fig 8.10 - Período médio de curto-circuito, T_{cc} , em função da profundidade de soldagem (m). ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

Esta diminuição de t_{cc} indica uma tendência á redução do tamanho médio das gotas de metal transferidas durante o curto-circuito quando a pressão hidrostática aumenta. O número de curtos-circuitos também diminui, mostrando que menor quantidade de metal é transferida por curtos-circuitos com o aumento de profundidade. Por outro lado, como foi visto anteriormente, a taxa e o rendimento de deposição dos eletrodos aumentam, demonstrando que maior quantidade de metal de solda é depositada. Este comportamento indica uma mudança no modo de transferência de curtos-circuitos para globular ocorrendo, provavelmente na profundidade de 12,5 m, a partir da qual o número de curtos-circuitos não apresenta grandes variações.

As figuras 8.11 e 8.12 mostram a variação de F_{cc} e F_{tm} com a profundidade de soldagem, para cada eletrodo. Estes índices, evidentemente, apresentam comportamento análogo ao das curvas vistas anteriormente, por sua própria definição: $F_{cc} = 1 / T_{cc}$ e $F_{tm} = 1 / t_{cc}$. Segundo esta definição a facilidade de ocorrência de curtos-circuitos diminui e a facilidade de transferência de metal do eletrodo para a peça aumenta com o aumento da profundidade de soldagem.

Os índices que definem regularidade na ocorrência dos curtos-circuitos, R_{cc} , e na transferência de metal, R_{tm} , são plotados nas figuras 8.13 e 8.14, respectivamente.

Nos eletrodos Ca02, Ti01 e Ti02, o comportamento da regularidade de ocorrência dos curtos-circuitos é estável, não havendo variação sensível; os eletrodos de composição Base e Al02 apresentam pequeno aumento neste índice com o aumento da profundidade; e nos eletrodos Al01 e Ca01 se observa grande aumento em R_{cc} na profundidade de 12,5 m.

Já quanto à regularidade na transferência de metal, excetuando-se o eletrodo Ti02, que apresenta tendência de queda, todos os outros eletrodos exibem aumento deste índice com o aumento da profundidade de soldagem.

As figuras 8.15 e 8.16 apresentam os gráficos que definem o comportamento dos eletrodos com respeito a facilidade e regularidade de passagem de carga elétrica, respectivamente.

Excetuando-se o eletrodo Ca02, que exhibe um valor bastante alto a 12,5 m, não se observa tendência sensível de aumento ou redução em FE_1 com a variação de profundidade ou da composição química dos eletrodos.

Quanto à regularidade, RE_1 , a tendência geral é de aumento, excetuando-se, mais uma vez, o eletrodo Ti02, que apresenta comportamento inverso.

A utilização destes índices para quantificação da estabilidade do arco pode conduzir a resultados equivocados, uma vez que eles são baseados na análise dos curtos-circuitos, e, como foi visto, há alteração no modo de transferência com o aumento da profundidade de soldagem, que passa a ser governado por outras formas, como por exemplo transferência globular.

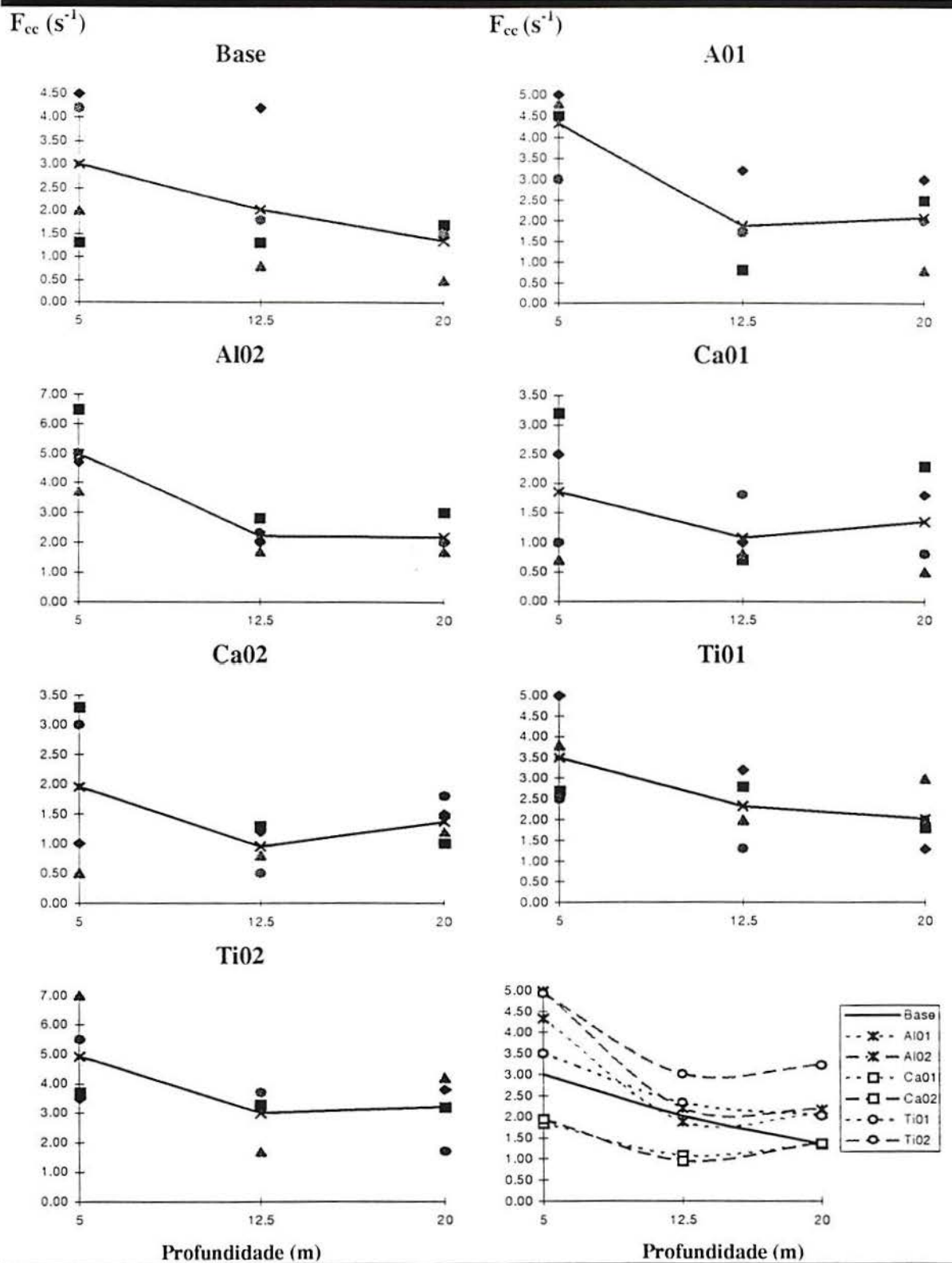


Fig 8.11 - Facilidade de ocorrência de curtos-circuitos, F_{cc} , em função da profundidade de soldagem (m). ■, ◆ - juntas tipo filete; ▲, ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

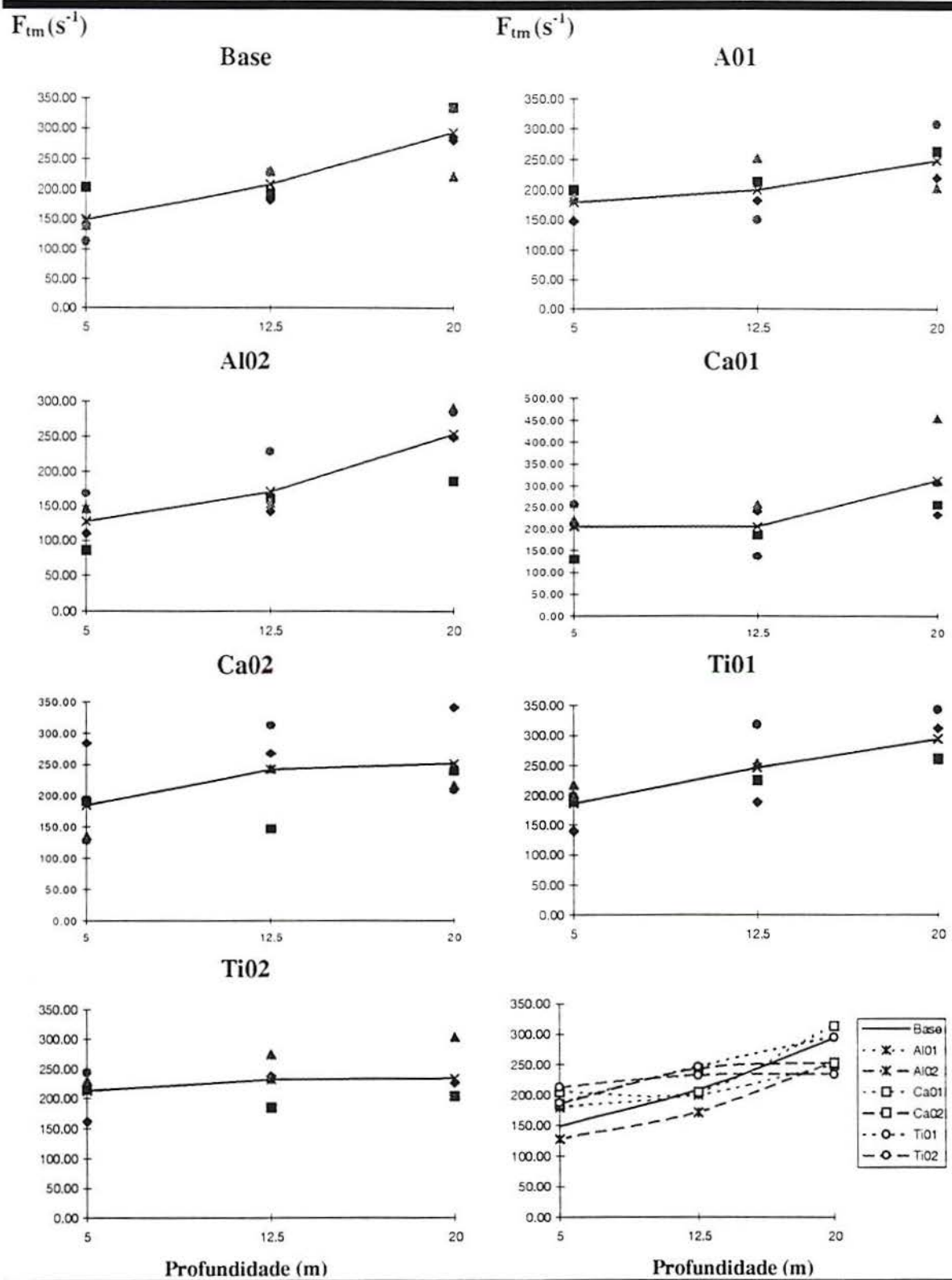


Fig 8.12 - Facilidade de transferência da gota, F_{tm} , em função da profundidade de soldagem (m). ■, ◆ - juntas tipo filete; ▲, ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

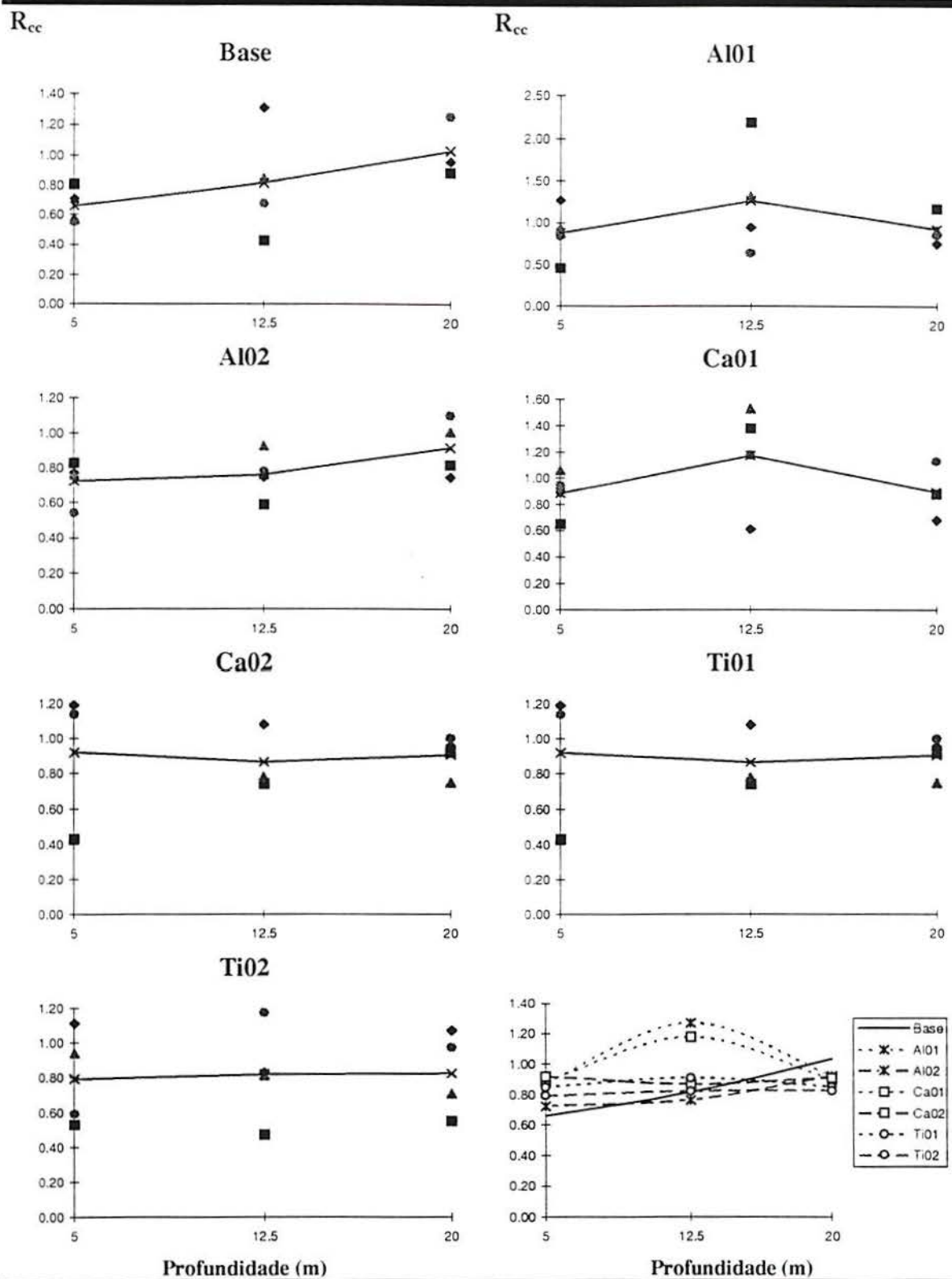


Fig 8.13 - Regularidade na ocorrência de curto-circuitos, R_{cc} , em função da profundidade de soldagem (m). ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

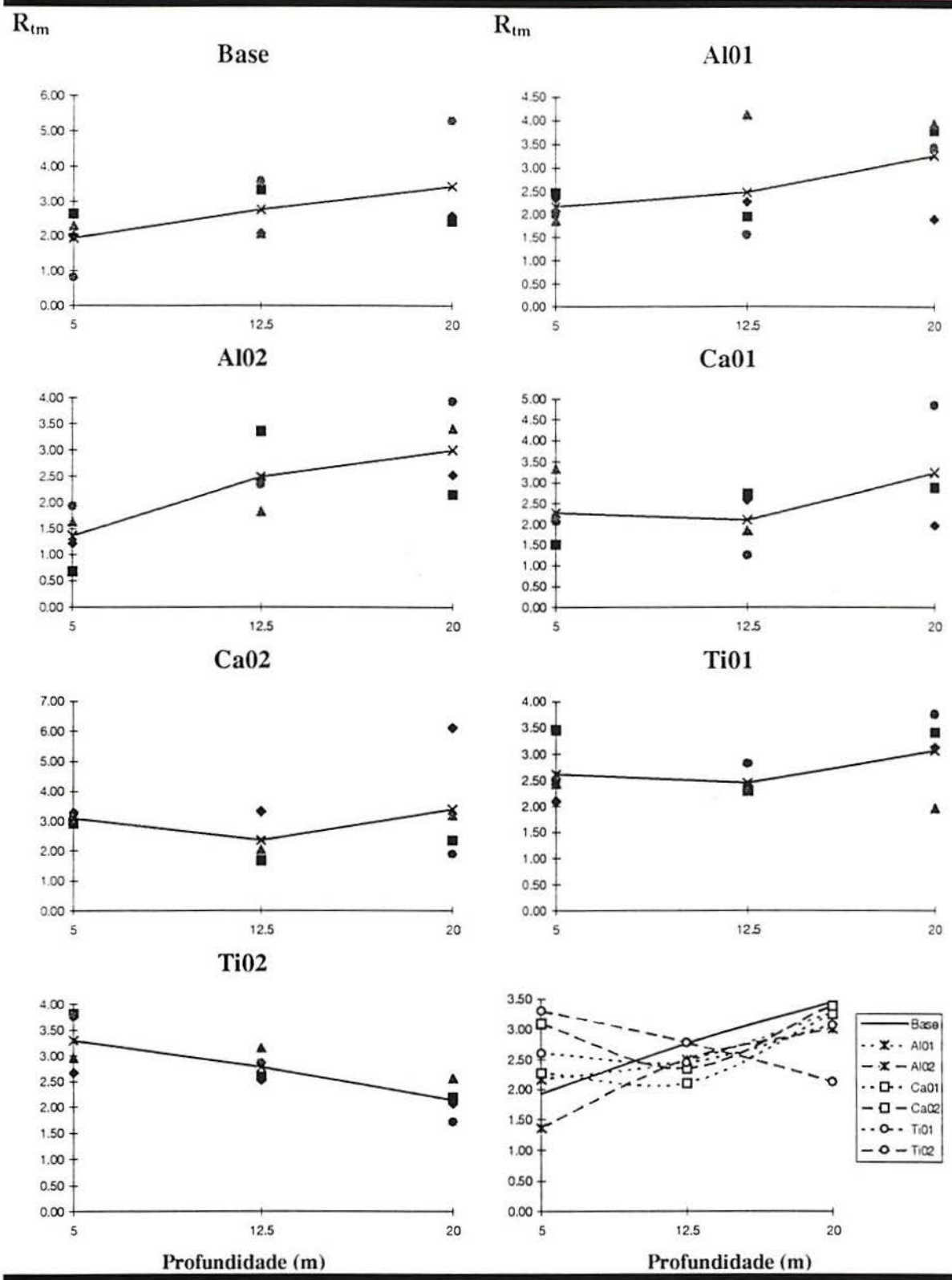


Fig 8.14 - Regularidade na transferência de metal, R_{tm} , em função da profundidade de soldagem (m).
 ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

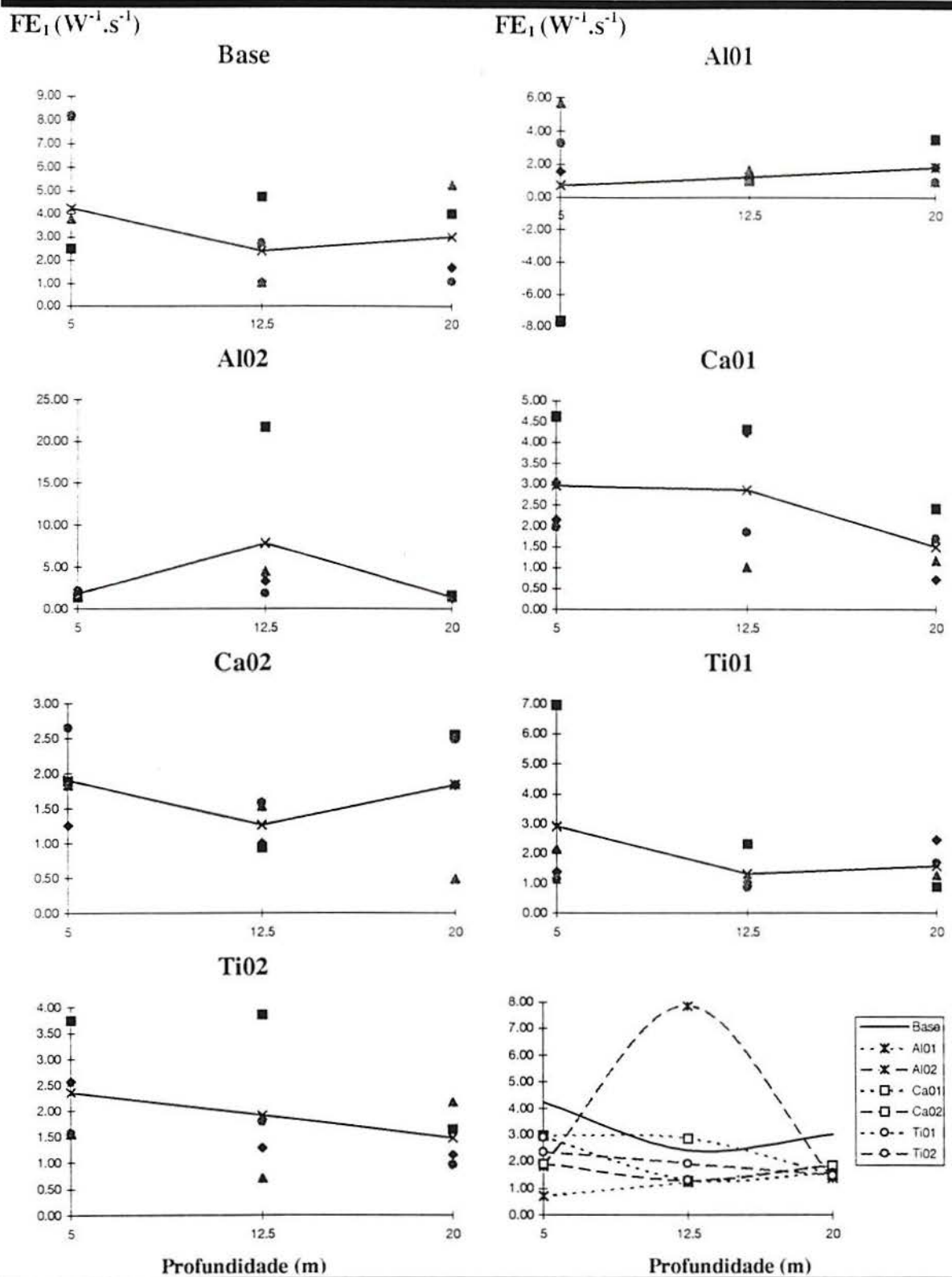


Fig 8.15 - Facilidade de passagem de carga elétrica, FE_1 , em função da profundidade de soldagem (m). ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; ✕ - média.

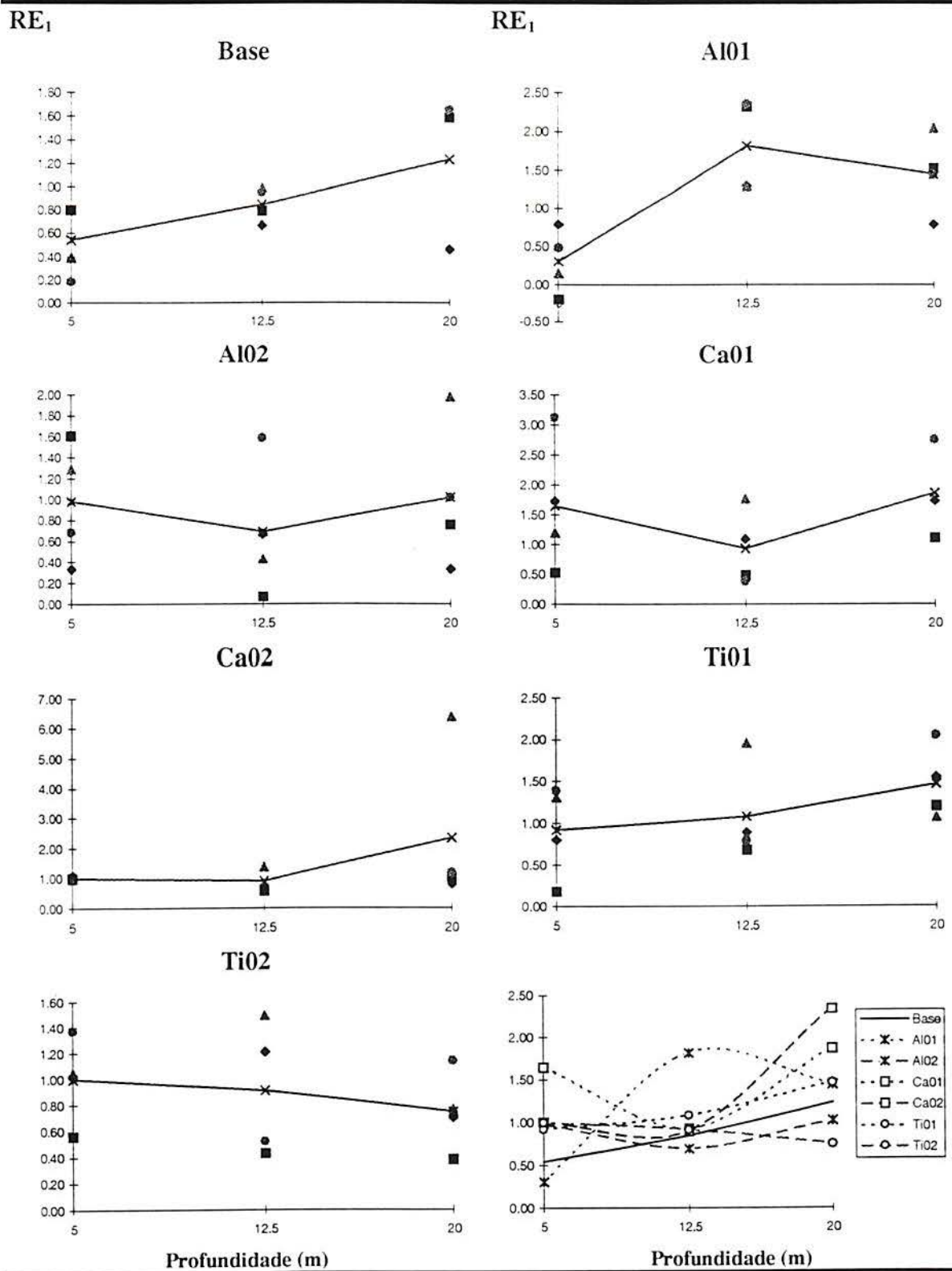


Fig 8.16 - Regularidade de passagem de carga elétrica, RE_1 , em função da profundidade de soldagem (m). ■ , ◆ - juntas tipo filete; ▲ , ● - soldagem por simples deposição sobre a chapa; × - média.

8.5 Análise de Fourier

As curvas de tensão e corrente de soldagem foram processadas utilizando FFT (seção 6.1.2), através de um programa desenvolvido no **Laboratório de Medições Mecânicas** da **UFRGS**, denominado **Sistema de Aquisição de Dados - SAD2** (32 bits), versão 2.5. Este programa foi desenvolvido para aquisição de sinais através do microcomputador e possui diversas rotinas de análise e processamento destes dados, [79].

A fig. 8.17 mostra a FFT dos sinais de corrente e tensão na condição de carregamento constante apresentada na fig. 7.7 (sem arco elétrico). Pode-se notar que nesta situação as frequências dominantes são harmônicas da frequência da rede, 60 Hz (120, 360, 720), atingindo o valor máximo em 360 Hz (retificação trifásica).

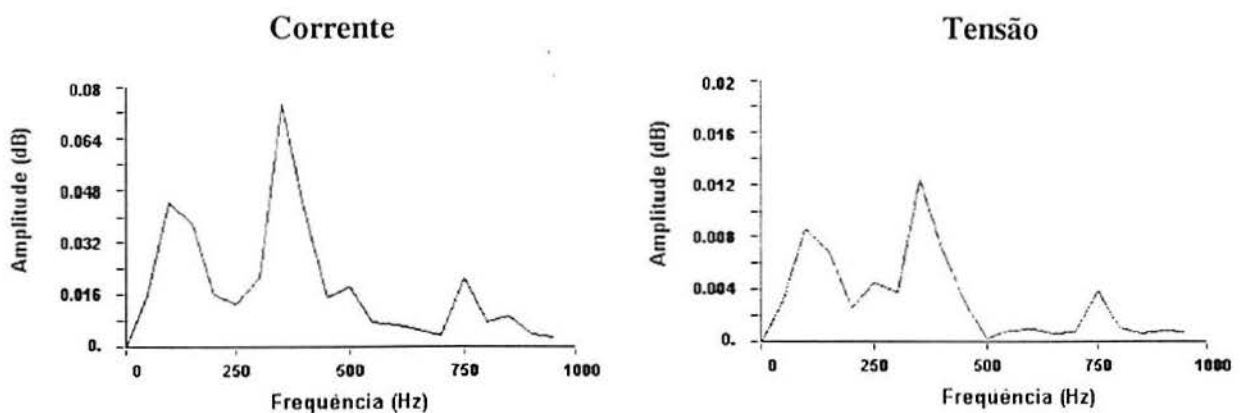


Fig. 8.17 - FFT das curvas de corrente e tensão na situação de carregamento constante .

Este sinal não sofre influência de nenhuma perturbação como transferência de metal, variação de temperatura por aquecimento ôhmico do eletrodo, distância da peça, e outras que ocorrem durante a operação de soldagem. Por esta razão a FFT dos sinais de tensão e corrente são bastante semelhantes, sendo possível identificar facilmente as frequências características.

Os sinais obtidos pelo processamento através de transformadas de Fourier dos oscilogramas de corrente e tensão adquiridos durante a soldagem são mostrados no Apêndice D. Estes gráficos foram plotados até o limite de 400 Hz, que representa, em nosso caso, a região de interesse. Observando estes sinais, pode-se notar um comportamento diferenciado.

A análise de frequências do sinal de corrente instantânea de soldagem mostra a presença destacada das mesmas frequências observadas no sinal de circuito aberto da fonte, ou seja, 120, 240 e 360 Hz. Isso se deve à constância deste sinal mesmo quando há pequenas variações na tensão,

característica de uma fonte de soldagem do tipo corrente constante (ou tombante), como a utilizada neste trabalho. Estes valores são característicos da fonte e não permitem tirar qualquer conclusão sobre o comportamento do arco. Observa-se apenas que, em algumas situações particulares, como a da figura D4-b, correspondente a um cordão de solda em que houve extinção do arco, as frequências citadas não se destacam, predominando valores de frequência muito baixos (próximos ao zero).

Já no caso da FFT da tensão instantânea de soldagem, o comportamento é diferente. As curvas apresentadas no Apêndice D (coluna da direita) não apresentam frequências que se destaquem das demais como no caso das curvas de corrente. Pode-se notar apenas uma atividade mais forte na frequência de 360 Hz, característica estática da fonte de soldagem. A diferença de amplitude máxima e as grandes oscilações de valores entre pontos adjacentes também torna difícil a comparação entre as diferentes curvas. Para tentar facilitar a visualização das diferenças entre elas dividiu-se o campo de frequências em intervalos de 10 Hz e definiu-se o valor ao final de cada um destes intervalos, como sendo o resultado da integral da curva no intervalo, calculada de forma discreta pelo método dos trapézios, $\int_{N-10}^N f(x).dx$, dividido pela integral calculada desde 0 até a frequência máxima observada (potência total do sinal), ou seja:

$$H_N = \frac{\int_{N-10}^N f(x).dx}{\int_0^{x_{MAX}} f(x).dx} \quad [8.1]$$

Onde:

H_N → Potência relativa da curva no intervalo (N-10, N).

N → Frequência, Hz (10, 20,30,...., x_{MAX}).

f(x) → Valor da FFT calculado no ponto x.

x_{MAX} → Valor máximo no eixo das abscissas do gráfico Frequência x Amplitude.

Os gráficos resultantes são mostradas na coluna da esquerda do Apêndice E, juntamente com os histogramas de tensão, que serão discutidos na próxima seção. Analisando desta forma uniformizou-se a escala do eixo das ordenadas como sendo um percentual da potência total do sinal, o que nos permite observar com maior facilidade se houve predominância em algum dos campos de frequência com relação aos demais e permite comparação entre as diferentes curvas. Os gráficos foram plotados na forma de barras, cada uma representando um intervalo de 10 Hz, entre 0 e 400 Hz, para facilitar a individualização e distinção do comportamento de campos de frequência vizinhos.

Em alguns sinais nota-se uma predominância marcante das componentes de baixa frequência

em relação às demais, que pode ser interpretada como um indicador de inconstância do sinal ou instabilidade do arco, uma vez que estas frequências não representam componentes cíclicas e sim a impossibilidade de identificação de uma frequência característica para os diferentes modos de transferência presentes no sinal, decomposto em grande número de componentes irreconhecíveis.

A análise e comparação das curvas resultantes com os oscilogramas e demais índices vistos anteriormente permite classificar as soldas realizadas em três situações distintas:

⇒ Sempre que há interrupção do arco durante a soldagem, o valor da amplitude no menor intervalo de frequências (0 a 10 Hz), exibe um pico acentuado, destacando-se dos demais pontos e assumindo valores superiores a 15 % da potência total do sinal, sendo tanto maior quanto maior o tempo de interrupção. Nesta situação observa-se também uma maior atividade na região dos 360 Hz, indicando a identificação do sinal de circuito aberto da fonte.

Esta situação configura o pior comportamento possível do arco e foi observada 10 vezes em soldas feitas a 5 m de profundidade (BaF051, BaS051, A1F052, A1S051, A1S052, A2F051, C1F052, T1F052, T1S051, T2F052); 5 vezes a profundidade de 12,5 m (A2F122, A2S122, C1S121, T2F122, T2S121); e apenas 3 vezes a 20 m (A1S202, C1S201, C2S201).

⇒ Soldas em que o campo de frequências de 0 a 10 Hz assume valores entre 8 e 15 % da potência total do sinal, destacando-se ligeiramente dos demais, são caracterizadas pela ocorrência de oscilações repentinas na curva tensão x tempo, caracterizando uma situação intermediária sob o ponto de vista de estabilidade do arco.

A maior parte das soldas realizadas encontra-se nesta condição, totalizando 18 vezes em soldas realizadas a profundidade de 5 m (BaF052, BaS052, A1F051, A2F052, A2S051, A2S052, C1F051, C1S051, C1S052, C2F051, C2F052, C2S051, C2S052, T1F051, T1S052, T2F051, T2S051, T2S052); 22 vezes a profundidade de 12,5 m (BaF121, BaF122, BaS121, BaS122, A1F121, A1F122, A1S121, A1S122, A2F121, A2S121, C1F121, C1S122, C2F121, C2F122, C2S121, C2S122, T1F121, T1F122, T1S121, T1S122, T2F121, T2S122); e 15 vezes a profundidade de 20 m (BaF201, BaF202, A1F201, A2F201, A2F202, A2S201, C1F201, C1F202, C1S202, C2S202, T1F202, T1S202, T2F201, T2F202, T2S201).

⇒ Finalmente, quando o campo definido entre 0 e 10 Hz apresenta valor inferior a 8 % da potência total do sinal, não se distinguindo dos demais, está caracterizada uma solda cuja curva de tensão apresenta um comportamento mais uniforme que as descritas anteriormente, sem variações bruscas do sinal ou interrupções do arco, ou seja, um arco mais estável.

Esta situação não foi identificada em nenhuma solda feita a profundidade de 5 m; verificou -

se apenas uma vez a 12.5 m (C1F122) ; e 10 vezes a 20 m (BaS201, BaS202, A1F202, A1S201, A2S202, C2F201, C2F202, T1F201, T1S201, T2S202).

Estes dados confirmam qualitativamente a tendência de aumento da estabilidade com o aumento da profundidade de soldagem, genericamente pode-se considerar a estabilidade do arco como sendo inversamente proporcional à participação das componentes de baixa frequência no espectro de potência total do sinal.

Na figura 8.18 são plotados os valores médios da potência relativa observada no intervalo 0 - 10 Hz para cada uma das composições químicas estudadas em função da profundidade de soldagem. Desta forma pode-se associar composição química do eletrodo e profundidade de soldagem ao nível de estabilidade e obter uma análise quantitativa da tendência de progressão desta propriedade.

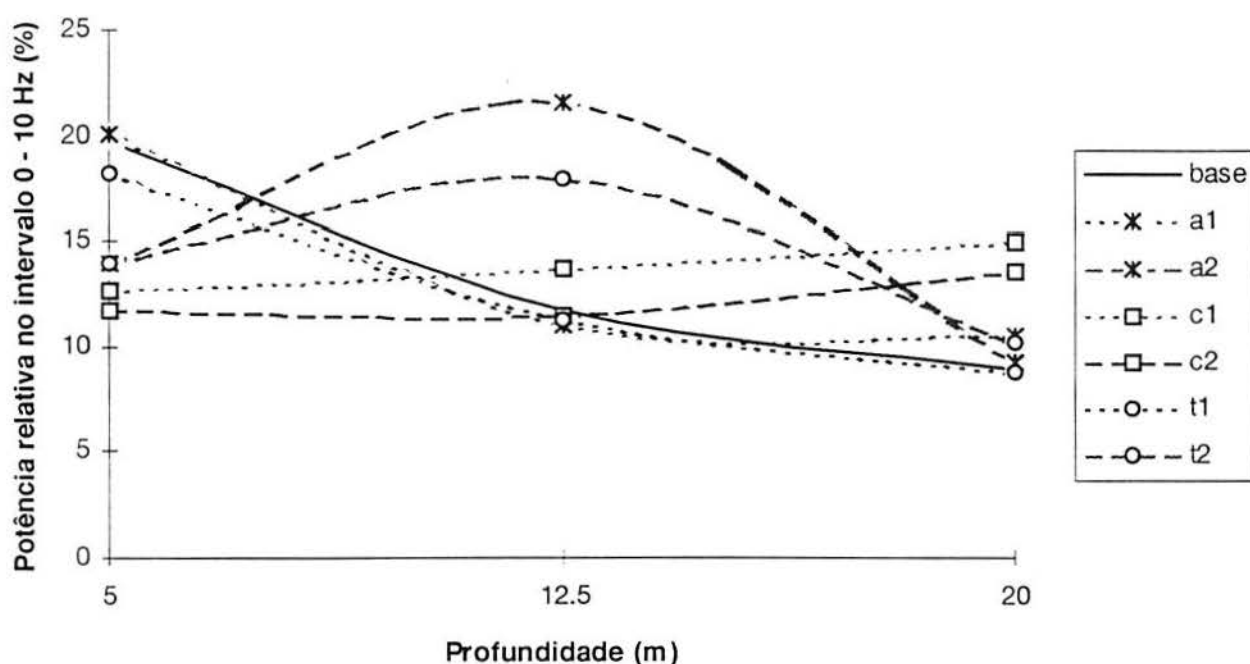


Fig. 8.18 - Potência relativa no intervalo 0 - 10 Hz x profundidade de soldagem para cada um dos eletrodos estudados.

Uma dúvida que surge quando observa-se estes dados é sobre a razão pela qual foi escolhido um intervalo de 10 Hz para a análise e se este seria o mais adequado. Este intervalo foi escolhido porque permite uma fácil visualização da tendência de progressão do sinal, permitindo que ele seja observado no intervalo 0 - 400 Hz, de maneira discreta, porém sem as grandes oscilações presentes quando todos os pontos do intervalo foram plotados. Antes desta definição outros intervalos foram testados.

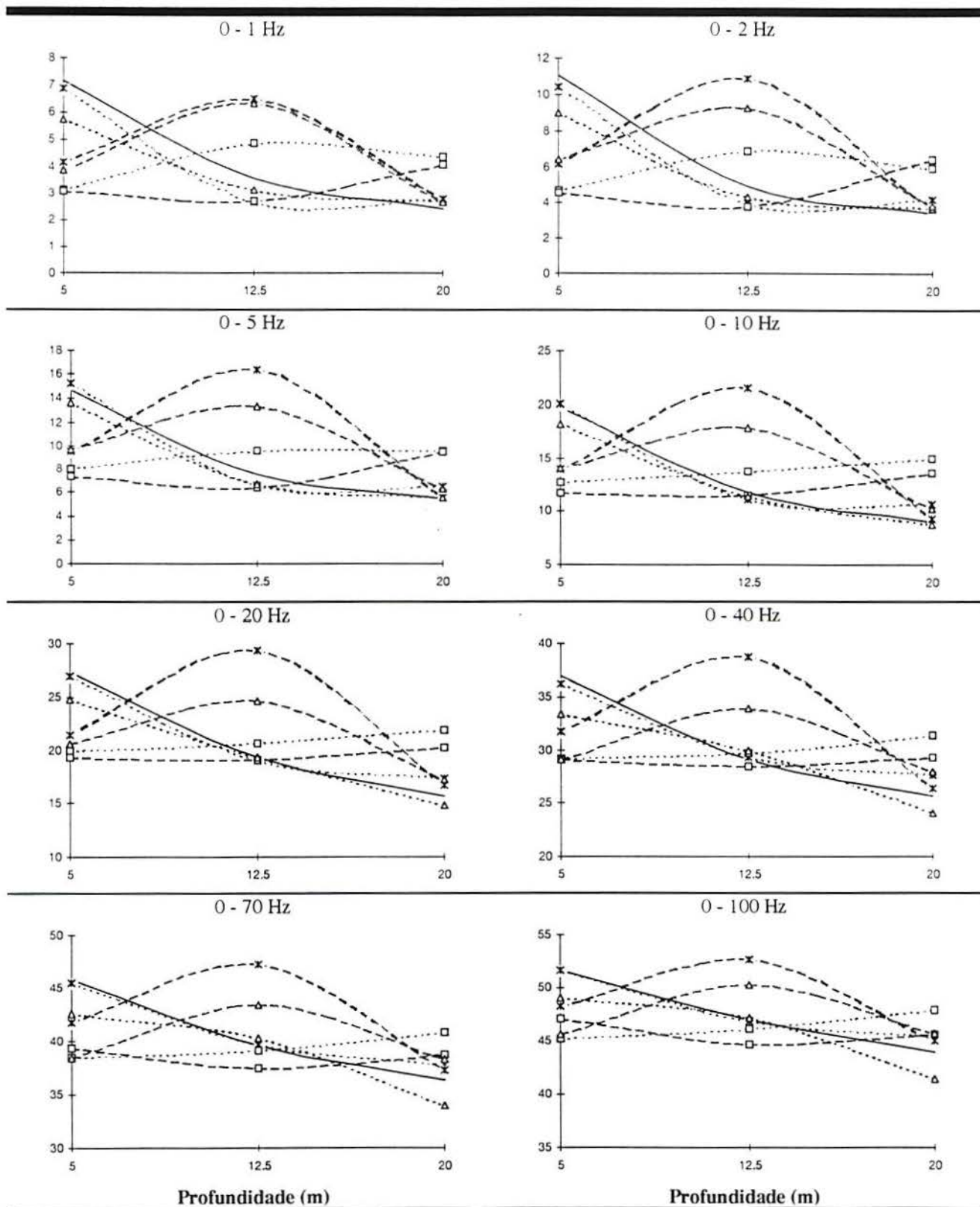


Fig. 8.19 - Potência relativa plotada em diferentes intervalos iniciais de frequência.

Uma questão importante é saber como se comportariam as curvas da figura 8.18 se outro intervalo tivesse sido escolhido. A figura 8.19 resume o resultado que teria sido obtido para a

potência relativa do primeiro intervalo, se diferentes valores de frequência tivessem sido adotados (1,2, 5, 10 20, 40, 70 e 100 Hz). A figura 8.19 resume o resultado que teria sido obtido para a potência relativa do primeiro intervalo, se diferentes valores de frequência tivessem sido adotados (1,2, 5, 10 20, 40, 70 e 100 Hz).

Pode-se observar que embora aumente a potência relativa quando o valor do intervalo inicial é ampliado, a tendência das curvas é rigorosamente a mesma, indicando que há uma participação proporcionalmente equilibrada das componentes de mais baixa frequência com relação às demais, para qualquer um dos intervalos escolhidos, em todas as soldas realizadas. Evidentemente com o aumento excessivo do intervalo as diferenças entre as curvas diminuem (como no caso 0 - 100 Hz), sendo que, no limite, todas as curvas tenderiam a 100 % da potência do sinal.

A tendência observada nestes gráficos é a de maior regularidade na transferência de metal nas misturas Ca01 e Ca02 a profundidade de 5 m. As misturas Base, Al01 e Ti 01, por sua vez apresentam comportamento semelhante, caracterizado por aumento da estabilidade com o aumento da profundidade de soldagem. As misturas Al02 e Ti02 mostram um comportamento distinto das demais, exibindo um pico de instabilidade na profundidade de 12,5 m.

Este comportamento coincide com as observações feitas anteriormente. É interessante notar que os gráficos aponta uma tendência idêntica àquela observada nas figuras 8.2 e 8.3, que mediam a regularidade do sinal.

8.6 Histogramas de tensão de soldagem

O histograma fornece uma indicação gráfica da forma como se distribui um conjunto de dados.

O limite inferior do primeiro intervalo do gráfico deve ser um pouco menor que o menor valor e o limite superior do último intervalo deve ser um pouco maior que o valor máximo de tensão adquiridos. Para definir o número adequado de intervalos pode ser usada a seguinte relação, /81/:

$$\text{Número de intervalos} = \sqrt{n} \quad (8.1)$$

Onde n representa o número elementos do conjunto de dados.

Os arquivos de tensão de soldagem possuem 30000 elementos o que, usando a fórmula acima, sugere a construção dos histogramas com 173 intervalos, distribuídos entre os limites superior e inferior de cada seqüência de dados.

Para fins de uniformidade, neste trabalho, adotar-se-á para todos os eletrodos a seguinte formatação dos histogramas: limite inferior = 0 V, limite superior = 100 V, número de intervalos =

100, correspondendo cada intervalo a 1 V.

Os histogramas de cada uma das soldas realizadas são mostrados na coluna da direita das figuras do Apêndice E.

A análise destes histogramas, revela a existência de três regiões distintas: a primeira das quais evidenciada pela existência de um pico situado na região próxima aos 5 V, representa a ocorrência de curtos-circuitos; a segunda região é um pico maior, situado entre 10 e 50 V, que representa o período da operação em que o arco é mantido dentro dos parâmetros nominais; a terceira região, quando houver, está localizada acima dos 60 V e representa extinções momentâneas do arco elétrico durante a execução do cordão.

Comparando as curvas obtidas para a mistura Base, por exemplo, pode-se notar que as curvas resultantes das soldas feitas a 5 m e 12,8 m (figs. E1 e E2) apresentam pico central de menor altura e maior largura que as curvas exibidas pelo mesmo eletrodo a 20m, indicando maior dispersão nos valores, além disso, o número de curtos-circuitos, naquelas curvas, é sensivelmente maior.

A análise histogramas aponta a mesma tendência verificada anteriormente para as curvas de potência relativa do sinal.

Estes dois métodos gráficos, permitem a visualização imediata do comportamento do arco durante toda a operação de soldagem, além de fornecer índices (potência máxima do sinal, ou número máximo de ocorrências no caso dos histogramas) que permitem tanto a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos, quanto a mensuração e comparação entre experimentos distintos. Além disso, este tipo de avaliação se mostrou mais eficiente e coerente do que a simples obtenção de índices calculados diretamente a partir dos oscilogramas de tensão e corrente instantâneos cuja validade está associada a uma série de condições e muitas vezes se mostram contraditórios entre si.

8.7 Composição Química do Revestimento

Os resultados obtidos mostram que uma maior estabilidade do arco, principalmente nas menores profundidades de soldagem, foi observada naqueles eletrodos que continham maiores teores de CaCO_3 . Isso pode ser explicado porque nestes eletrodos há grande produção de CO_2 , composto gasoso que além de proteger a poça de fusão da contaminação causada pelo meio circundante, aumenta a pressão sobre a coluna do arco, antecipando o efeito que, para as outras misturas estudadas, só acontece com o aumento da profundidade de soldagem. Por esta razão, estes eletrodos apresentam um comportamento bastante estável na profundidade de 5 m. Com o aumento da profundidade de soldagem, entretanto, não se verifica melhoria nesta propriedade porque o aumento

da pressão hidrostática dificulta a ocorrência da reação de formação deste composto gasoso.

Nas outras misturas há maior influência da pressão hidrostática do que da composição química sobre o comportamento do arco elétrico. As misturas com composição química mais próxima àquela da mistura Base (Al01 e Ti01), apresentam praticamente o mesmo comportamento que esta. Aumentando-se os teores destes dois elementos (Al02 e Ti02), observa-se uma região de instabilidade aos 12,5 m, associada, provavelmente, à mudança no modo de transferência destes eletrodos. A tendência geral destas misturas, todavia, é de aumento da estabilidade do arco com o aumento da profundidade de soldagem.

Os problemas verificados nas misturas contendo alumínio não parecem estar diretamente relacionados a uma maior instabilidade do arco elétrico em relação às demais misturas, e sim com a formação do composto Al_2O_3 , óxido refratário de alto ponto de fusão que, dissolvido na poça de fusão pode gerar inclusões e aumento da porosidade.

A partir destas observações é possível hipotetizar o seguinte mecanismo de transferência metálica (restrito ao campo de profundidades de soldagem cobertas por este trabalho):

a) Inicialmente a 5 m de profundidade o arco elétrico, independente da composição química dos eletrodos, sofre a influência negativa do ambiente, mostrando-se instável. A transferência de metal do eletrodo para a peça acontece preponderantemente por curtos-circuitos, principalmente nas misturas em que não há aumento nos teores relativos de $CaCO_3$. A quantidade de defeitos observados é grande, porém o nível de porosidade, influenciado principalmente pela pressão hidrostática, é baixo.

b) Aos 12,5 m o arco elétrico sofre ação de efeitos contraditórios. Com o aumento de profundidade aumenta a pressão radial sobre a coluna do arco, constringendo-o e causando acréscimo na densidade de corrente com conseqüente efeito benéfico sobre a estabilidade. Por outro lado, para algumas das composições do revestimento estudadas, há uma transição no modo de transferência evidenciada pela drástica redução do número e do tempo médio dos curtos-circuitos, acompanhada pelo aumento da quantidade de metal de solda transferido, como possível causa de instabilidade. A conjugação destes dois fatores ocasiona uma região em que se observa soldas que ainda apresentam uma quantidade razoável de defeitos e o aumento da porosidade, para a maioria das misturas testadas.

c) A 20 m de profundidade a ação de estabilização devida ao aumento da densidade de corrente é maior. Os oscilogramas de tensão revelam arcos bem mais estáveis que aqueles obtidos nas demais profundidades. A quantidade de defeitos observada também é muito pequena e há

tendência de estabilidade no número de poros, em relação a quantidade observada a 12,5 m.

Com o aumento da pressão, além dos limites pesquisados neste estudo, a constrição da coluna do arco reduzirá demasiadamente seu diâmetro, tornando-o instável e exercendo efeito nocivo sobre a estabilidade, como pode ser observado em diversos outros trabalhos.

A partir da compreensão destes fenômenos e utilizando os métodos propostos pode-se estudar outros aspectos do comportamento do arco elétrico não só na soldagem subaquática molhada por eletrodos revestidos, como em soldas realizadas fora da água e utilizando diferentes processos. Além disso a utilização de gráficos obtidos através de FFT e histogramas da tensão instantânea de soldagem podem se constituir em importantes ferramentas para construção de algoritmos a serem utilizados futuramente em automação de operações de soldagem.

9 CONCLUSÕES

- A inspeção visual revelou menor quantidade de defeitos nas soldas cujos revestimentos possuem maiores teores de CaCO_3 , já os eletrodos com adição de alumínio foram os que proporcionaram soldas de pior qualidade. Houve uma tendência geral de redução na quantidade de defeitos nas soldas realizadas a profundidade de 20 m.
- O tempo médio dos curtos-circuitos diminuiu com o aumento da profundidade de soldagem, apontando uma tendência à redução do tamanho médio das gotas de metal transferidas durante o curto-circuito, quando a pressão hidrostática aumenta. O número de curtos-circuitos também diminuiu, indicando que menor quantidade de metal é transferida por curtos-circuitos com o aumento de profundidade. Por outro lado, a taxa e o rendimento de deposição dos eletrodos aumentam, demonstrando que maior quantidade de metal de solda é depositada. Este comportamento indica uma mudança no modo de transferência de curtos-circuitos para globular ocorrendo, provavelmente na profundidade de 12,5 m, a partir da qual o número de curtos-circuitos não apresenta grandes variações. Esta transição no modo de transferência é responsável pela instabilidade do arco observada para alguns eletrodos, a esta profundidade.
- As composições Ca01 e Ca02 apresentaram número de curtos-circuitos sensivelmente menor que as demais, nas soldas realizadas a 5 m. Provavelmente o comportamento marcadamente mais estável destas misturas, a baixas profundidades de soldagem, deve-se à formação do composto gasoso CO_2 , que além de proteger a poça de fusão da contaminação, aumenta a pressão radial sobre a coluna do arco elétrico e conseqüentemente a densidade de corrente.
- O método proposto para análise da estabilidade do arco, utilizando transformadas de Fourier, demonstrou ser uma poderosa e eficiente ferramenta para avaliação e classificação das soldas com relação a esta importante característica.
- Para as três profundidades de soldagem estudadas neste trabalho, observou-se uma nítida tendência ao aumento da estabilidade do arco elétrico com o aumento da profundidade. Esta tendência é facilmente verificada através da análise dos oscilogramas de soldagem e confirmada pela quantidade de defeitos observados nos corpos de prova.
- Os métodos gráficos de quantificação da estabilidade, em comparação com os índices retirados diretamente dos oscilogramas de tensão e corrente de soldagem, geraram

resultados mais precisos, fornecendo uma mais fácil visualização do comportamento do arco elétrico durante toda a operação, além de permitirem a comparação entre soldas feitas em condições diversas.

- /1/ BLADH, J.C.: "Wet Welding Eliminates Drydocking". The Working Diver, 1976, U.S. Navy.
- /2/ ANSI/AWS D 3.6 - 89; "Specification for Underwater Welding". 1989.
- /3/ ODGEN, D.; JOOS, T.; "Specification Stirs Underwater Electrode Development". Welding Journal, 1990, August, 59-61.
- /4/ SADOWSKI, E.P.; "Underwater Wet Welding Mild Steel with Nickel Base and Stainless Steel Electrodes". Welding Journal, 1980, July, 30-38.
- /5/ COCHRANE, D.J.; SWETNAM, D.: "Wet Welding - A Viable Technique?". Metal Construction, 1986, November, 680-685.
- /6/ TSAI, C.L.; OZAKI, H.; MOORE, A.P.; ZANCA, L.M.; PRASAD, S.; MASUBUCHI, K.; "Development of New Improved Techniques for Underwater Welding". MIT Sea Grant Program, Report N° MITSG 77-9, 1977.
- /7/ TSAI, C.L.; MASUBUCHI, K.; "Interpretive Report on Underwater Welding". Welding Research Council Bulletin, 224, February, 1977, 37 pg.
- /8/ JACKSON, C.E.; "The Science of Arc Welding". Welding Journal, Welding Research Supplement, April, 1960, 129s-140s.
- /9/ JACKSON, C.E.; "The Science of Arc Welding - Part II". Welding Journal, Welding Research Supplement, May, 1960, 177s-190s.
- /10/ JACKSON, C.E.; "The Science of Arc Welding - Part III". Welding Journal, Welding Research Supplement, June 1960, 225s-230s.
- /11/ HAMASAKI, M.; SAKAKIBARA, J.; ARATA, Y.; "Underwater MIG Welding Using a Wire Brush Nozzle". Metal Construction, 1979, June, 288-289.
- /12/ TAMURA, M.; NISHIO, Y.; WADA, H.; "Development of Automatic Underwater Welding with Local Cavity Formation Method". OTC 2646, Houston, Texas, 1976.

- /13/ ALMEIDA, D.S.: **"Soldagem Subaquática com MIG/MAG"**. Dissertação de Mestrado, PPGEMM-UFRGS, 1992, 125 pg.
- /14/ SZELAGOWSKI, H.; STÜHFF, H.; LOEBEL, P.; BLIGHT, J.; DONELLY, C.; SCHAFFSTALL, H.G.: **"Properties of Wet Welding Joints"**. 21st Annual OTC in Houston, Texas, May, 1989, 77-87.
- /15/ MANZ, A.F.: **"Welding Power Handbook"**. UNION CARBIDE CORPORATION, Linde Division, New York, 1973, 208 pg.
- /16/ DORN, L; RIPPL, P; **"Influence of Power Source in arc Welding - Statistical Behaviour"**. Welding and Cutting, June.1986, 88-90.
- /17/ DORN, L; RIPPL, P; **"Power Source Influence in arc Welding - Dynamic Behaviour in Manual Arc Welding with Direct Current"**. Welding and Cutting, June.1987, 91-94.
- /18/ BYRD, T.; **"Inverter Power Sources: An Efficient Alternative"**. Welding Journal, January, 1993, 37-40.
- /19/ NORRISH, J.; **"Arc Welding Power Sources - an Update (of sources for courses)"**. Welding & Metal Fabrication , June, 1990, 261-267.
- /20/ GERHARDT, A.; JUNG, W.; **"Power Sources for Hyperbaric Underwater Arc Welding"**. Metal Construction, July, 1985. 440-442.
- /21/ **"Operating Conditions for Underwater Welding Electrodes"**. Welding Engineer, April, 1973.
- /22/ MADATOV, N.M.; **"Shape Relations for Underwater Welding"**. Welding Production, 16 (3), March, 1961, 18-23.
- /23/ BRANDON, E.D.; **"Parameters for Pressurized Inert Gas Metal Arc Welding of Aluminum "**. Welding Journal, Welding Research Supplement, 49, (11), November, 1970, 510s-520s.
- /24/ SILVA, E.A.; HAZLETT, T.H.; **"Shielded Metal Arc Welding Underwater with Iron-Powdered Electrodes"** . Welding Journal, 50 (6), June, 1971, 406-415.

- /25/ SILVA, E.A.: **“Gás Production and Turbidity during Underwater Shielded Metal-Arc Welding with Iron Powder Electrodes”**. Naval Engineers Journal, 83 (6), December, 1971, 59-64.
- /26/ MASUBUCHI, K.: **“Underwater Factors Affecting Welding Metallurgy”**. International Conference on Underwater Welding , November 5 - 6, 1980, New Orleans, Louisiana, USA.
- /27/ LIU, S.; POPE, A.M.; DAEMEN, R.; **“Welding Consumables and Weldability”**. International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, December 7 - 9, 1994, New Orleans, Louisiana, USA.
- /28/ SZELAGOWSKI, P.; STÜHFF, H.; SCHAFSTALL, H.G.; BLIGHT, J.; PACHNIUK, I.: **“Development in Manual Wet SMA-Welding”**. 22nd Annual OTC in Houston, Texas, May, 1990, 143-150.
- /29/ SUGA, Y.; HASUI, A.; **“On Formation of Porosity in Underwater Weld Metal (The First Report) - Effect of Water Pressure on Formation of Porosity”**. IIW Doc IX-1388-86, April 1986, pg. 58 - 64.
- /30/ SANCHEZ-OSIO, A.; LIU, S; OLSON, D.L.; IBARRA, S. **“Underwater Wet Welding Consumables for Offshore Applications”**. Proceedings OMAE, 1993, vol. III-A, pg. 119 - 128.
- /31/ NIXON, J.H.; GRAHAM, S.R.B.; **“Arc Instability in Shallow Water Wet Welding”**. Proceedings OMAE, 1993, vol. III-A, pg. 129 - 132.
- /32/ CRISTENSEN, N.: **“The Metallurgy of MMA Hyperbaric Welding”** . SINTEF Report N° STF34 F83032, 1983, March, 47 pg.
- /33/ SPARAGEN, W.; LENGYEL, B.A.; **“Physics of the Arc and the transfer of Metal in Arc Welding”**. Welding Journal, Welding Research Supplement, 22 (1), 1943, 2s-42s.
- /34/ THOMAS, W.J.F.; **“Underwater Welding - Principles and Practice”**. Metal Construction, 15 (1), 1983, 26-29.
- /35/ FEY, W.: **“Underwater Cutting and Welding”**. Ocean Engineering Handbook, Section 4, McGraw-Hill, 1969.
- /36/ DAVIS, L.; **“An Introduction to Welding Fluxes for Mild and Low Alloy Steels”**. The Welding Institute, 1981.

- /37/ ANDERSEN, L.: "Aluminum Powder Helps Covered Electrode Stay Dry". Welding Journal, November, 1990, 60-62.
- /38/ ANSI/AWS A 5.1 - 89; "Specification for Covered Carbon Steel Arc Welding Electrodes". 1991.
- /39/ AMERICAN WELDING SOCIETY; "Physics of Welding". In: Welding Handbook, Vol. 1 - Welding Technology, Eighth Edition, 1987, 31-63.
- /40/ CONRADY, H.: "Der Werkstoffübergang in Schweißlichtbogen". Elektroschweissung, 11 (7), pg. 109-114. In:_(42).
- /41/ GLICKSTEIN, B.E.E: "Arc Modelling for Welding Analysis". In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour, Vol. 1 - The Welding Institute, 1980, 1-16.
- /42/ LANCASTER, J.F.: "Metal Transfer in Fusion Welding". In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour, Vol. 1 - The Welding Institute, 1980, 135-146.
- /43/ BECKEN, O.: "Metal Transfer from Welding Electrodes". IIW Doc. N° 212-179-69. . In:_(42).
- /44/ LARSON, L.J.; "Metal Transfer in the Metallic Arc". Welding Journal, Welding Research Supplement, 21 (2), 1942, 107s-112s.
- /45/ BRANDI, S.; TANIGUCHI, C.; "Revisão das Forças que Atuam na Transferência Metálica e a Ação nos Mecanismos de Transferência Metálica na Soldagem com Eletrodo Revestido". Soldagem & Materiais, 2 (2), Abril-Junho, 1990. 36-40.
- /46/ SACK, J.; "Overhead Welding". Philips Technical Review, 4 (1), Jan., 1939, pg. 9 - 15.
- /47/ NEEDHAM, J.C.; COOKSEY, C.J.; MILNER, D.R.; "Metal Transfer in Inert-Gas Shielded-Arc Welding". British Welding Journal, 7 (2), Feb., 1960, pg. 101-114.
- /48/ BRANDI, S.; TANIGUCHI, C.; LIU, S.; "Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc Welding". Welding Journal, Welding Research Supplement, October, 1991, 261s-270s.

- /49/ LIU, S.; SIEWERT, T.A.; "Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate". Welding Journal, Welding Research Supplement, February, 1989, 52s-58s.
- /50/ CHEN, J.H.; FAN, D.; HE, Z.Q.; YE, J.; LUO, Y.C.; "A Study of the Mechanism for Globular Metal Transfer from Covered Electrodes". Welding Journal, Welding Research Supplement, April, 1989, 145s-150s.
- /51/ HALMOY, E.; "The Pressure of the Arc Acting on the Weld Pool". In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour, Vol. 1 - The Welding Institute, 1980, 259-266.
- /52/ LUDWIG, H.C.; "Metal Transfer Characteristics in Gas-Shielded Arc Welding". Welding Journal, 36 (1), Welding Research Supplement, 1957, 23s-26s.
- /53/ INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING; "Classification des Divers Modes de Transfert du Metal en Soudage a L'Arc". IIW Doc. N° XII-535-77.
- /54/ FARIAS, J.P.; QUITES, A. M.; "Estudo Comparativo do Arco de Eletrodos Revestido". Metalurgia & Materiais - ABM, vol. 49, N° 423, November, 1993.
- /55/ LESKOV, G.I.; "Electric Welding Arc". Moskow, Machinostojenije, 1970.
- /56/ POKHODNYA, I.K.; MARCHENKO, A.E.; GORPENYUK, V.N.; MAKARENKO, V.D.; STARODUBTSEV, L.V.; "Study of Alternating Current Arc Stability". In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour, Vol. 1 - The Welding Institute, 1980, 93-99.
- /57/ POKHODNYA, J.K.; "Effect of the Structure and Mass Factor of the Basic Electrode Coating on Arc Stability in Welding". Avtomaticheskaya Svarka, 1987 (8), 32-35.
- /58/ LUCAS, W.; "Computers in Arc Welding - The Next Industrial Revolution, Part 3: Instrumentation and Process Analysis". Metal Construction, July, 1985, 431-436.
- /59/ SCOTTI, A.; QUITES, A.M; KOBAYASHI, Y.; FARIAS, J.P; "Características Dinâmicas de Eletrodos Revestidos". Metalurgia-ABM, Vol. 41, N° 336, Novembro, 1985, 619-622.

- /60/ MORRIS, A.D.; GORE, W.C.: **"Analysis of Direct Current Arc"**. Welding Journal, Welding Research Supplement, March, 1956, 153s-160s.
- /61/ FARIAS, J.P.; QUITES, A.M.; MIRA, F.M.: **"A Estabilidade do Arco de Eletrodos Revestidos"**. 47º Congresso Anual da ABM, 1992, volume 2, pg. 533-550.
- /62/ FARIAS, J.P.; QUITES, A.M.; MIRA, F.M.: **"Técnica de Quantificação da Estabilidade do Arco Voltaico"**. 47º Congresso Anual da ABM, 1992, volume 2, pg. 563-576.
- /63/ LANCASTER, J.F.: **"The Physics of Welding"**. The International Institute of Welding, Pergamon Press, First Edition, 1984, 298 pg.
- /64/ DAVIES A.C.: **"The Science and Practice of Welding"**. Cambridge University Press, Seventh Edition, 1979, 713 pg.
- /65/ WASZINSKI, J.H.; GRAAT, L.H.J.: **"Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal"**. Welding Journal, Welding Research Supplement, 1983 (4), April, 108s-116s.
- /66/ FARIAS, J.P., QUITES, A.M., SURIAN, E.S.: **"The Effect of Mg Content on the Arc Stability of SMAW E7016-C2L/8016-C2 Manual Electrode"**. IIW Doc N° II-A-916-94.
- /67/ NEWLAND, D.E.: **"An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis"**. Longman Scientific & Technical. Second edition, Third impression, 1987, 377 pg.
- /68/ ASELTINE, J.A.: **"Transform Method in Linear System Analysis"**. McGraw-Hill Book Company, Inc., McGraw-Hill Electrical and Electronic Series, 1958, 300 pg.
- /69/ BOFFI, LV.; COUTINHO, J.A.M.: **"Elementos de Análise de Sistemas Lineares"**. ETEGIL-Editora Técnico-Gráfica Industrial Ltda., Brasil, 1966, 1ª Edição, 258 pg.
- /70/ ELLIOT, D.F.; RAO, K.R.: **"Fast Transforms - Algorithms, Analyses, Applications"**. Academic Press, INC., Orlando, Florida, 1982, 488 pg.

- /71/ WANG, W.; LIU, S.; JONES, J.E.; “**Flux Cored Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization**”. Welding Journal, Welding Research Supplement, 1995 (11), 369s - 377s.
- /72/ PISTORIUS, P.G.H.; LIU, S.; “**Changes in Metal Transfer Behaviour during Shielded Metal Arc Welding**”. Welding Journal, Welding Research Supplement, 1997 (8), 305s - 315s.
- /73/ POKHODNYA, J.K.; et al: “**Research into the Special features of Metal Transfer and Arc Running Stability**”. Automatic Welding, 1984 (4), 3-6.
- /74/ POKHODNYA, I.K.; STARODUBTSEV, L.V.; GORPENYUK, V.N.; “**The Emission of Electrons and Positive Ions from a Weld Pool and the Stability of AC Arc Burn**”. In: Arc Physics and Weld Pool Behaviour, Vol. 1 - The Welding Institute, 1980, 87-92.
- /75/ GLADMAN, T. and WOODHEAD, J.H.; “**The accuracy of point counting in Metallographic Investigation**”. Journal of the Iron and Steel Institute, Fevereiro, 1960, 189-193.
- /76/ MAZZAFERRO, J.A.E; MACHADO, I. G. “**Estudo Preliminar sobre a Qualidade das Juntas em Soldagem Subaquática Molhada**”. XXIII ENTS, São Paulo 1997, pg. 77-85.
- /77/ SILVA, C.L.M.; SURIAN, E.; e FARIAS, J.P.; “**Efeito do magnésio metálico sobre o comportamento do arco de eletrodos AWS E7024**”. XXIII ENTS, São Paulo, maio - 1997, pg. 285- 294.
- /78/ SCOTTI, A.; SANTOS, M.G. and FARIAS J.P.; “**Comparison between Inverter and Electromagnetic Power Sources for SMAW**”. Proc. 7th International Conference on Joining of Materials - JOM-7, Helsigor, Denmark, Jun 95, 593-600.
- /79/ SILVA, L.R.M.; “**SAD 2 - Sistema de Aquisição de Dados**”. Manual do Programa, Laboratório de Medições Mecânicas - UFRGS. Versão 2.5, Porto Alegre, 1997.
- /80/ PRESS, W.H.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T.; FLANNERY, B.P.; “**Numerical recipes in FORTRAN: the art of scientific computing**”. Second Edition. Cambridge University Press. U.K. 1992. Caps. 4, 12 e 13.
- /81/ CLARKE, G.M.; COOK, D.; “**A Basic Course in Statistics**”. Second Edition. Edward Arnold Ltda., London.

APÊNDICE A - PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

Neste apêndice estão listados os dois programas desenvolvidos para aquisição e análise dos dados gerados durante os experimentos. O programa AQUIS é apresentado na íntegra, a listagem do programa ESTAB, por sua vez, contém apenas as rotinas de leitura dos dados e de cálculo dos índices de estabilidade porque as demais rotinas constituem procedimentos “burocráticos” de controle dos formulários gráficos, que se listados, ocupariam muito espaço.

Descrição das Variáveis

Tipo (d = double, i = integer, l = long, s = single, st = string)

- Variáveis de configuração da placa de aquisição ou forma de captação dos dados

| | | |
|----|--------------------|--|
| i | Canal5412 | índice usado internamente para saber qual o canal ativo em AX5412 |
| i | CanalDMA | canal de DMA da placa de aquisição |
| i | CanalFim | canal final a ser lido durante a aquisição |
| i | CanalInicio | canal inicial a ser lido durante a aquisição |
| i | CodGanho | código que indica o ganho da placa |
| i | CodIRQ | canal de interrupção da placa |
| i | CorrenteHall | Corrente máxima para o sensor Hall utilizado (0-não, 250, 500) |
| i | Ganho | ganho real ($= 2^{\text{CodGanho}}$) |
| i | Polaridade | (1 - unipolar, 2 - bipolar) |
| i | SenDif | (1 - single ended, 2 - diferencial) |
| i | Shunt | (0 - não usado, 150, 400 ou 1000) |
| i | TipoCanal(0 a 15) | tipo sinal por canal aquisição (0-não,1-termopar k,2-termopar s,3-corrente,4-tensão) |
| s | PosicaoSinal(0-15) | usado na rotina de leitura de dados adquiridos através de AQUIS |
| s | ResistHall | resistência do sensor Hall (0, 50.0352, 100) |
| s | Sensib | sensibilidade da curva adquirida através do osciloscópio |
| s | TempAmb | temperatura ambiente |
| s | TmpDiv | tempo por divisão da curva adquirida através do osciloscópio |
| l | Divisor1 | usado para definição da frequência de aquisição na placa AX-5412 |
| l | Divisor2 | usado para definição da frequência de aquisição na placa AX-5412 |
| l | FreqAquis& | mostra a frequência definida em AX-5412 |
| l | FreqTimer | frequência do timer de AX-5412 (1000000 ou 10000000) |
| st | CanalSensor(0 a 8) | canal do sensor Hall |
| st | EndDMA | endereço de memória p/ aquisição via DMA |
| st | EndPlaca | endereçamento da placa AX-5412 |

- Características que definem cada um dos sinais

| | | |
|---|---------------|---|
| i | CorSinal() | indica a cor do sinal (0 a 15) |
| i | NroDaDos() | numero de dados total do sinal |
| i | NumeroSinais | numero de sinais carregados na memória do programa |
| i | SinalCorrente | numero do sinal de corrente a ser analisado nas rotinas estatísticas |
| i | SinalTensao | numero do sinal de tensão a ser analisado nas rotinas estatísticas |
| i | SinalNro | sinal ativo |
| i | TipoCurva() | (0 - pontos, 1 - linhas, 2 - barras) |
| i | TipoSinal() | (0 - não identificado, 1 - termo k, 2 - termo s, 3 - cor, 4 - ten) |
| i | Valores() | valores instantâneos mostrados abaixo do gráfico (0 - não, 1 - visível) |
| i | Visivel() | curva mostrada na tela (0 - não, 1 - visível) |
| s | Maximo | valor máximo de um sinal |

| | | |
|----|---------------------|---|
| s | Mínimo | valor mínimo de um sinal |
| s | Valor(sinal, pos) | armazena o valor do sinal na posição indicada |
| s | taxa() | taxa de aquisição = 1 / frequência |
| s | Posicao(sinal, pos) | valor instantâneo do tempo do sinal na posição indicada |
| l | Frequencia() | frequência do sinal |
| st | Descricao() | descricao do sinal de acordo com tipo sinal |
| st | Unidade() | unidade do sinal |

- Variáveis usadas nas rotinas estatísticas

| | | |
|---|------------------|---|
| d | MxTen | Valor máximo de tensão |
| d | MxCor | Valor máximo da corrente |
| d | MnTen | Valor mínimo da tensão |
| d | MnCor | Valor mínimo da corrente |
| d | SomaCorrente | Soma dos valores de corrente |
| d | SomaQuadCorrente | Soma dos quadrados da corrente |
| d | SomaQuadTensao | Soma dos quadrados da tensão |
| d | SomaTensao | Soma dos valores da tensão |
| d | TempoReig | Tempo de reignição do arco |
| d | TensaoReig | Tensão de reignição do arco |
| d | ER1 | Índice RE_1 |
| d | PotReig | Potência de reignição do arco |
| i | Curto | Indica ocorrência de um curto-circuito |
| i | NroCC | Número de curtos-circuitos |
| i | Pico | Indica ocorrência de um pico de tensão |
| i | NroPicos | Número de picos de tensão |
| s | CorrenteMedia | Corrente média |
| s | DPCorrente | Desvio padrão da corrente |
| s | DPTensao | Desvio padrão da tensão |
| s | TensaoMedia | Tensão média |
| s | PotRef | Potência de referência |
| s | SomaTempoCC | Soma do tempo de curto-circuito |
| s | TempoCC | Tempo de curto-circuito |
| s | TempoInicioCC | Marca o início de um curto-circuito |
| s | TempoFimCC | Marca o fim de um curto-circuito |
| s | TmpInPeriodoCC | Marca o início de um período de curto-circuito |
| s | SomaPeriodoCC | Soma dos períodos de curto-circuito |
| s | SomaQuadPrdCC | Soma dos quadrados dos períodos de curto-circuito |
| s | SomaQuadTmpCC | Soma dos quadrados do tempo de curto-circuito |
| s | DPTempoCC | Desvio padrão do tempo de curto-circuito |
| s | PeriodoCC | Período de curto-circuito |
| s | DPPeriodoCC | Desvio padrão do período de curto-circuito |
| s | CorrenteReig | Corrente de reignição do arco |
| s | SomaQuadER | Soma dos quadrados de RE_1 |
| s | DPER | Desvio padrão de RE_1 |
| s | SomaER | Soma de RE_1 |

1) AQUIS

```
/*
 * Programa: AQUIS4.C
 * Revisão: 4.0
 * Data: 26/07/1995
 *
 * Propósito: Este programa faz N conversões A/D, utilizando canais
 * de DMA e armazena os dados gerados em um arquivo
 */

#include <graphics.h>
#include <fcntl.h>
#include <dos.h>
#include <time.h>
#include <malloc.h>
#include <fcntl.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#define EndPlaca 0x240
#define EndDMA 0x5000
int far *ary1;
int far *ary2;
int fun,flag;
unsigned int dio[16],dio13[16];
extern "C"
{
    int ax5412(int fun,unsigned int dio[16],int far *ary1,int far *ary2);
}
main()
{
    unsigned int i, j, k;
    int TipoCanal[16],AmplifA[16];
    int zero=0;
    int SenDif, Polaridade, CodGanho5412, Ganho5412, CanalInicio5412, CanalFim5412,
        CanalDMA, CodIRQ;
    float Divisor1, Divisor2, NPontos=15000;
    float Frequencia, FreqTimer, TempoTotal;
    float QuantCiclos, NLeituras; /* NPontos = 1 - 15000 */
    char valor, canal, string[50];
    char cha, arquivo[12], leitura[12], nada[1];
    char EndDMA1[6], EndPlaca1[5], Termopar[1];
    FILE *le, *grava;
    ary1=(int far *) _fmalloc((int)NPontos * sizeof(int));
    if (ary1 == NULL)
    {
        printf("ary1 - erro de alocação\n");
        exit(1);
    }
    ary2=(int far *) _fmalloc((int)NPontos * sizeof(int));
    if (ary2 == NULL)
    {
        printf("ary2 - erro de alocação\n");
        exit(1);
    }
}
```

```

clrscr();
gotoxy(10,5);
printf("Entre nome do arquivo de configuração (.plc): ");
gotoxy(15,7);
scanf("%s",&leitura);
gotoxy(10,10);
printf("Entre nome do arquivo de dados (.dat): ");
gotoxy(15,12);
scanf("%s",&arquivo);
if((le=fopen(leitura, "r"))==NULL)
{
    gotoxy(20,20);
    printf("Erro na abertura do arquivo de configuração.\n");
    exit(1);
}
fscanf(le,"%5f, %5f, %1d, %1d, %1d, %2d, %2d, %1d, %1d", &Divisor1, &Divisor2,
&SenDif, &Polaridade, &CodGanho5412, &CanalInicio5412, &CanalFim5412,
&CanalDMA,&CodIRQ);
fscanf(le,"%6s, %5s, %8f, %6f" %4d, &EndDMA1, &EndPlaca1, &FreqTimer,
&TempoTotal, &TempAmb);
for (i=0;i<16;i++)
{
    fscanf(le,"%4d",&AmplifA[i]);
}
for (i=0;i<16;i++)
{
    fscanf(le,"%1d",&TipoCanal[i]);
}
Frequencia=FreqTimer/(Divisor1*Divisor2);
if ((TempoTotal*Frequencia)>NPontos)
{
    QuantCiclos=(TempoTotal*Frequencia)/NPontos;
    NLeituras=NPontos;
}
else
{
    QuantCiclos=1;
    NLeituras=TempoTotal*Frequencia;
}
clrscr();
gotoxy(5,2);
printf("Forma de captação dos dados:");
if(Polaridade==1)
{
    gotoxy(10,3);
    printf("Unipolar");
}
else
{
    gotoxy(10,3);
    printf("Bipolar");
}
if(SenDif==1)
{
    gotoxy(25,3);
    printf("Single ended");
}
else

```

```

{
    gotoxy(25,3);
    printf("Diferencial");
}
gotoxy(40,3);
printf("Ganho na placa AX-5412: %1d",CodGanho5412);
gotoxy(10,4);
printf("Código de interrupção: %1d Canal de DMA: %1d",CodIRQ,CanalDMA);
gotoxy(5,6);
printf("AX-5412:\n");
for(i=CanalInicio5412;i<=CanalFim5412;i++)
{
    if(TipoCanal5412[i]==0)
        printf(" Canal %2d - não utilizado\n",i);
    if(TipoCanal5412[i]==1)
        printf(" Canal %2d - termopar tipo K\n",i);
    if(TipoCanal5412[i]==2)
        printf(" Canal %2d - termopar tipo S\n",i);
    if(TipoCanal5412[i]==3)
        printf(" Canal %2d - corrente de soldagem\n",i);
    if(TipoCanal5412[i]==4)
        printf(" Canal %2d - tensão do arco\n",i);
}

printf("\n Frequencia de aquisição dos dados = %8f Hz\n", Frequencia);
printf(" Tempo total de aquisição dos dados = %4f s\n\n", TempoTotal);

fclose(le);
if((grava=fopen(arquivo, "a+"))==NULL)
{
    gotoxy(20,20);
    printf("Erro na abertura do arquivo de dados.\n");
    exit(1);
}
fprintf(grava,"%5f, %5f, %1d, %1d, %1d, %2d, %2d, %1d, %1d\n", Divisor1, Divisor2,
SenDif, Polaridade, CodGanho5412, CanalInicio5412, CanalFim5412, CanalDMA,
CodIRQ);
fprintf(grava,"%6s, %5s, %8f, %6f, %4d\n", EndDMA1, EndPlaca1, FreqTimer,
TempoTotal, TempAmb);
for (i=0;i<16;i++)
{
    fprintf(grava,"%4d\n",AmplifA[i]);
}
for (i=0;i<16;i++)
{
    fprintf(grava,"%1d,%1d\n",TipoCanal[i]);
}

/* *****
   INICIALIZAÇÃO AX5412 : FUNÇÃO 0
   ***** */

fun=0;
dio[0]=EndPlaca;
dio[1]=CodIRQ;
dio[2]=CanalDMA;
flag=ax5412(fun,dio,ary1,ary2);
if (flag != 0)

```

```

{
    printf (" Falha na função de inicialização! - Flag=%d\n",flag);
    exit(1);
}

/* *****
DEFINIÇÃO DOS CANAIS INICIAL E FINAL
***** */

fun=1;          /* definição dos canais */
dio[0]=CanalInicio5412;
dio[1]=CanalFim5412;
flag=ax5412(fun,dio,ary1,ary2);

/* *****
AJUSTE DA FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO (Max=60k) : FUNÇÃO 17
***** */

fun=17;          /* Frequência = 1M/(Divisor1 * Divisor2) */
dio[0]=Divisor1; /* Divisor 1 */
dio[1]=Divisor2; /* Divisor 2 */
flag=ax5412(fun,dio,ary1,ary2);
if (flag !=0 )
{
    printf ("Erro na Escolha da Frequência de aquisição! - Flag=%d\n",flag);
    exit(1);
}
do
{
    gotoxy(9,22);
    printf("***** Pressione Esc para começar a aquisição via DMA *****");
}
while (getch() != 27);
gotoxy(9,22);
printf("***** Adquirindo dados - aguarde *****");
for (k=0;k<QuantCiclos;k++)
{

/* *****
HABILITAÇÃO DO CANAL DE DMA DE ACORDO COM A FREQUÊNCIA : FUNÇÃO 6
***** */ fun=6;
dio[0]=(int)NLeituras;          /* número de pontos */
dio[1]=EndDMA;                  /* segmento de memória */
dio[2]=1;                       /* timer trigger */
dio[3]=0; //ciclos;              /* 0 : 1 ciclo ; 1 : reinicia */
dio[4]=CodGanho5412;           /* Código do ganho global */
flag=ax5412(fun,dio,ary1,ary2);
if (flag != 0)
{
    printf("DMA err NO=%d\n",flag);
    exit(0);
}

/* *****
STATUS DE LEITURA: FUNÇÃO 8
***** */

```

```

while (1)
{
    fun=8;
    flag=ax5412(fun.dio.ary1,ary2);
    if (dio[2]<(int)NLeituras);
    else break;
}

/* *****
   DESABILITAR CANAL DE DMA : FUNÇÃO 7
   ***** */

fun=7;
flag=ax5412(fun.dio.ary1,ary2);
if (flag != 0)
{
    printf("Falha na função 7! - Flag=%d\n",flag);
    exit(0);
}

/* *****
   TRANSFERÊNCIA DOS DADOS DA MEMORIA PARA VARIÁVEIS: FUNÇÃO 9
   ***** */

fun=9;          /* Função de transferência de dados */
dio[0]=(int)NLeituras; /* Total de dados a serem lidos */
dio[1]=EndDMA;   /* Segmento de memória da fonte */
dio[2]=0;        /* Número do dado inicial */
flag=ax5412(fun.dio.ary2.ary1);
if (flag!=0 )
{
    printf ("Falha na função 9! - Flag=%d\n",flag);
    exit(1);
}

/* *****
   GERAÇÃO DO ARQUIVO DE DADOS
   ***** */

for (i=0;i<(int)NLeituras;i++)
{
    fprintf(grava,"%5d,%5d\n",ary1[i],ary2[i]);
}
_ffree(ary1);
_ffree(ary2);
fclose(grava);
}
return 0;

```


2) ESTAB

*
* Programa: ESTAB.BAS
* Revisão: 4.02
* Data: 01/04/1998 Por: José Antônio Esmerio Mazzaferro
*
* Propósito: Este programa executa as funções de pré e pós-processador nas operações de aquisição
* de dados, ou seja, define os parâmetros para aquisição através de AQUIS e, posteriormente,
* permite a análise e apresentação dos dados.

```
Sub mnuDadosPlaca_Click ()          ==> Lê os dados gerados por AQUIS
  Dim TotalDados, k As Long
  Dim i, j, l, canal, valor, inicio, fim As Integer
  Placa = 1: Osciloscopio = 0: NroTermopares = 0
  CMDialog1.Filter = "Arquivos de Dados da Placa (*.dat)*.dat"
  CMDialog1.FilterIndex = 2
  CMDialog1.Action = 1
  Arquivo = CMDialog1.FileName
  Open Arquivo For Input Access Read As #6
  Input #6, Divisor1, Divisor2, SenDif, Polaridade, CodGanho, CanalInicio5412, CanalFim5412,
    CanalDMA, CodIRQ
  Input #6, EndDMA, EndPlaca, FreqTimer, TempoTotal, TempAmb
  TempAmb = TempAmb / 10
  TempoTotal = TempoTotal / 100
  For i = 0 To 15
    Input #6, AmplifA(i)
    AmplifA(i) = AmplifA(i) / 10
  Next i
  For i = 0 To 15
    Input #6, TipoCanal(i)
  Next i
  Ganho = 2 ^ CodGanho
  Frequencia = FreqTimer / (Divisor1 * Divisor2)
  NroCanais5412 = 0: NroTermopares = 0
  inicio = 15: fim = 0
  For i = 0 To 15
    If TipoCanal(i) <> 0 Then
      NroCanais5412 = NroCanais5412 + 1
      If TipoCanal(i) = 1 Or TipoCanal(i) = 2 Then
        NroTermopares = NroTermopares + 1
        CanalTemper(NroTermopares) = i
      ElseIf TipoCanal(i) = 3 Then
        CanalCorrente = i
      ElseIf TipoCanal(i) = 4 Then
        CanalTensao = i
      End If
      If i < inicio Then inicio = i
      If i > fim Then fim = i
    End If
  Next i
  TotalDados = Int(Frequencia * TempoTotal)
  If TotalDados > (30000 * NroCanais5412) Then TotalDados = (NroCanais5412 * 30000)
  If NroTermopares > 0 Then
    ReDim TermoparValor(1 To NroTermopares, 1 To Int(TotalDados / NroCanais5412) + 1)
    ReDim Temperatura(1 To NroTermopares, 1 To Int(TotalDados / NroCanais5412) + 1)
```

```

End If
ReDim Corrente(1 To (TotalDados / NroCanais5412) + 1)
ReDim Potencia(1 To (TotalDados / NroCanais5412) + 1)
ReDim ValorCor(1 To (TotalDados / NroCanais5412) + 1)
ReDim Tensao(1 To (TotalDados / NroCanais5412) + 1)
ReDim ValorTen(1 To (TotalDados / NroCanais5412) + 1)
ReDim Tempo(inicio To fim, 1 To (TotalDados / NroCanais5412) + 1)
NroDados = 0: NroDadosCor = 0: NroDadosTen = 0: NroDadosTermo = 0
CanalTermo = 100
Do While NroDados < TotalDados And Not EOF(6)
    NroDados = NroDados + 1
    Input #6, canal, valor
    Select Case TipoCanal(canal)
    Case 1 To 2
        If canal <= CanalTermo Then
            NroDadosTermo = NroDadosTermo + 1
        End If
        CanalTermo = canal
        TermoparValor(canal, NroDadosTermo) = valor
    Case 3
        NroDadosCor = NroDadosCor + 1
        ValorCor(NroDadosCor) = valor
    Case 4
        NroDadosTen = NroDadosTen + 1
        ValorTen(NroDadosTen) = valor
    End Select
Loop
Close #6
For j = 1 To Int(NroDados / NroCanais5412)
    For i = inicio To fim
        k = k + 1
        Tempo(i, j) = 1 / Frequencia * k
    Next i
Next j
mnuListarEscalas.Enabled = False
mnuPlacas.Enabled = False
If NroDadosCor > 0 Then
    mnugráficos.Enabled = True
    mnuGrafParametros.Enabled = True
    Shunt = 0: CorrenteHall = 500: ResistHall = 50.0352
    mnuAnálise.Enabled = True
    mnuAjusteOsc.Enabled = False
Elseif NroDadosTen > 0 Then
    mnugráficos.Enabled = True
    mnuGrafParametros.Enabled = True
    mnuAnálise.Enabled = True
    Shunt = 0: CorrenteHall = 0
End If
If NroDadosTermo > 0 Then
    mnugráficos.Enabled = True
    mnuGrafTemperaturas.Enabled = True
    mnuAnálise.Enabled = True
    Shunt = 0: CorrenteHall = 0
End If
Call mnuAjustePlc_Click
End Sub

Sub CalculaCorPlc ()
    ==> Converte os dados lidos para valores de corrente

```

```

Dim i As Integer
Dim valor As Single
MaxCor = 1: MinCor = 500
For i = 1 To NroDadosCor
    valor = (((ValorCor(i) + 1) * 10 / 4096 / Ganho * Polaridade)) / AmplifA(CanalCorrente)
    If ResistHall = 0 Then
        Corrente(i) = Abs(valor * Shunt / .06)
    ElseIf Shunt = 0 Then
        Corrente(i) = Abs(valor * 5000 / ResistHall)
    Else
        Mens = "Método usado na Leitura da Corrente não identificado"
        MsgBox Mens, 0, "Erro no tipo de dados"
    End If
    If Corrente(i) > MaxCor Then MaxCor = Corrente(i)
    If Corrente(i) < MinCor And Corrente(i) > 0 Then MinCor = Corrente(i)
Next i
End Sub

Sub CalculaTenPlc ()          ==> Converte os dados lidos para valores de tensão
    Dim i As Integer
    MaxTen = 1: MinTen = 200
    For i = 1 To NroDadosTen
        Tensao(i) = (((ValorTen(i) + 1) * 10 / 4096 / Ganho * Polaridade)) / AmplifA(CanalTensao)
        If Tensao(i) > MaxTen Then MaxTen = Tensao(i)
        If Tensao(i) < MinTen And Tensao(i) > 0 Then MinTen = Tensao(i)
    Next i
End Sub

Sub Indices ()              ==> Calcula índices de estabilidade
    Top = Screen.Height / 2 - Height / 2
    Left = Screen.Width / 2 - Width / 2
    Dim SomaCorrente, SomaQuadCorrente, SomaQuadTensao, SomaTensao As Double
    Dim CorrenteMedia, CorrenteRMS, DPCorrente, DPTensao, TensaoMedia, TensaoRMS As Single
    Dim PotRef, SomaTempoCC, TempoCC, TempoInicioCC, TempoFimCC, TmpInPeriodoCC As Single
    Dim SomaPeriodoCC, SomaQuadPeriodoCC, SomaQuadTempoCC As Single
    Dim DPTempoCC, PeriodoCC, DPPeriodoCC As Single
    Dim CorrenteReig, MxTen, MxCor, MnTen, MnCor, TempoReig, TensaoReig, ER1, ER2, PotReig As
    Double
    Dim SomaQuadER, DPER, SomaER As Single
    Dim i, Curto, NroCC, Pico, NroPicos As Integer
    label57.Visible = False
    SomaCorrente = 0: SomaQuadCorrente = 0: SomaTensao = 0: SomaQuadTensao = 0
    SomaQuadTempoCC = 0: PeriodoCC = 0: SomaQuadPeriodoCC = 0: Curto = 0: Pico = 0: TempoCC = 0
    NroCC = 0: TmpInPeriodoCC = 0: ER1 = 0: SomaQuadER = 0: TensaoReig = 0: CorrenteReig = 0
    TempoReig = 0: NroPicos = 0: PotReig = 0: MxTen = -10000: MxCor = -10000: MnTen = 10000
    MnCor = 10000: SomaQuadER = 0: SomaER = 0: SomaTempoCC = 0: SomaPeriodoCC = 0: TempoFimCC
    = 0
    For i = InicioIndices To FimIndices
        SomaCorrente = SomaCorrente + Valor(SinalCorrente, i)
        SomaQuadCorrente = SomaQuadCorrente + Valor(SinalCorrente, i) ^ 2
        SomaTensao = SomaTensao + Valor(SinalTensao, i)
        SomaQuadTensao = SomaQuadTensao + Valor(SinalTensao, i) ^ 2
        If Valor(SinalTensao, i) > MxTen Then MxTen = Valor(SinalTensao, i)
        If Valor(SinalTensao, i) < MnTen Then MnTen = Valor(SinalTensao, i)
        If Valor(SinalCorrente, i) > MxCor Then MxCor = Valor(SinalCorrente, i)
        If Valor(SinalCorrente, i) < MnCor Then MnCor = Valor(SinalCorrente, i)
    Next i
    CorrenteMedia = SomaCorrente / (FimIndices - InicioIndices + 1)

```

```

CorrenteRMS = Sqr(SomaQuadCorrente / (FimIndices - InicioIndices + 1))
DPCorrente = Sqr(SomaQuadCorrente / (FimIndices - InicioIndices + 1) - CorrenteMedia ^ 2)
Label2 = Format(CorrenteMedia, "#0.00")
Label5 = Format(DPCorrente, "#0.00")
Label8 = Format(MnCor, "#0.00")
Label11 = Format(MxCor, "#0.00")
Label14 = Format(CorrenteRMS, "#0.00")
TensaoMedia = SomaTensao / (FimIndices - InicioIndices + 1)
TensaoRMS = Sqr(SomaQuadTensao / (FimIndices - InicioIndices + 1))
DPTensao = Sqr(SomaQuadTensao / (FimIndices - InicioIndices + 1) - TensaoMedia ^ 2)
'CVTensao = DPTensao / TensaoMedia * 100
Label9 = Format(MnTen, "#0.00")
Label12 = Format(MxTen, "#0.00")
Label16 = Format(TensaoRMS, "#0.00")
Label15 = Format(TensaoMedia, "#0.00")
Label17 = Format(DPTensao, "#0.00")
PotRef = CorrenteMedia * TensaoMedia
For i = InicioIndices To FimIndices
  If Valor(SinalTensao, i) < 10 Then
    If Curto = 1 Then
      TempoFimCC = Posicao(SinalTensao, i)
    Else
      TempoInicioCC = Posicao(SinalTensao, i)
      Curto = 1
    End If
  ElseIf Curto = 1 Then
    If TempoFimCC - TempoInicioCC > .002 Then
      TempoCC = TempoFimCC - TempoInicioCC
      SomaTempoCC = SomaTempoCC + TempoCC
      SomaQuadTempoCC = SomaQuadTempoCC + TempoCC ^ 2
      If TmpInPeriodoCC = 0 Then
        SomaPeriodoCC = TempoInicioCC
        SomaQuadPeriodoCC = SomaPeriodoCC ^ 2
      Else
        PeriodoCC = TempoInicioCC - TmpInPeriodoCC
        SomaPeriodoCC = SomaPeriodoCC + PeriodoCC
        SomaQuadPeriodoCC = SomaQuadPeriodoCC + PeriodoCC ^ 2
      End If
      TmpInPeriodoCC = TempoInicioCC
      NroCC = NroCC + 1
      Pico = 1
    End If
  Curto = 0
End If
If Pico = 1 Then
  If i > (FimIndices - 3) Then
    label57.Visible = True
  ElseIf Valor(SinalTensao, i) > Valor(SinalTensao, i - 1) Then
    If Valor(SinalTensao, i) > Valor(SinalTensao, i - 2) Then
      If Valor(SinalTensao, i) > Valor(SinalTensao, i - 3) Then
        If Valor(SinalTensao, i) > Valor(SinalTensao, i - 4) Then
          If Valor(SinalTensao, i) > Valor(SinalTensao, i + 1) Then
            If Valor(SinalTensao, i) > Valor(SinalTensao, i + 2) Then
              If Valor(SinalTensao, i) > Valor(SinalTensao, i + 3) Then
                If Valor(SinalTensao, i) > Valor(SinalTensao, i + 4) Then
                  TensaoReig = TensaoReig + Valor(SinalTensao, i)
                  CorrenteReig = CorrenteReig + Valor(SinalCorrente, i)
                  TempoReig = TempoReig + Posicao(SinalTensao, i) - TempoFimCC
                End If
              End If
            End If
          End If
        End If
      End If
    End If
  End If
End If

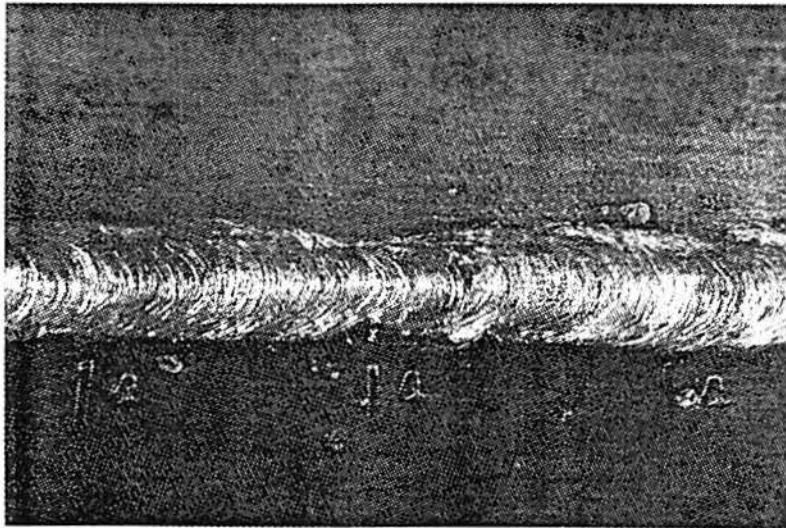
```

```

PotReig = Valor(SinalCorrente, i) * Valor(SinalTensao, i)
ER1 = (PotReig - PotRef) * (Posicao(SinalTensao, i) - TempoFimCC) / 2
SomaER = SomaER + ER1
SomaQuadER = SomaQuadER + ER1 ^ 2
NroPicos = NroPicos + 1: Pico = 0
End If
End If
End If
End If
End If
End If
End If
End If
Next i
PeriodoCC = Posicao(SinalTensao, NroDados(SinalTensao)) - TmpInPeriodoCC
SomaPeriodoCC = SomaPeriodoCC + PeriodoCC
SomaQuadPeriodoCC = SomaQuadPeriodoCC + PeriodoCC ^ 2
If NroCC > 0 Then
TempoCC = SomaTempoCC / NroCC
label21 = Format(TempoCC * 1000, "##0.0")
label27 = Format(NroCC, "###")
label46 = Format(1 / TempoCC, "###0.0")
If NroCC > 1 Then
'PeriodoCC = SomaPeriodoCC / (NroCC - 1)
PeriodoCC = SomaPeriodoCC / (NroCC + 1)
label24 = Format(PeriodoCC * 1000, "###0.0")
label32 = Format(1 / PeriodoCC, "#0.0")
label45 = Format(1 / PeriodoCC, "#0.0")
End If
If NroCC > 2 Then
DPTempoCC = Sqr(SomaQuadTempoCC / NroCC - TempoCC ^ 2)
DPPeriodoCC = Sqr(SomaQuadPeriodoCC / (NroCC + 1) - PeriodoCC ^ 2)
label36 = Format(DPTempoCC * 1000, "##0.0")
label39 = Format(DPPERiodoCC * 1000, "###0.0")
label49 = Format(PeriodoCC / DPPeriodoCC, "#0.00")
label50 = Format(TempoCC / DPTempoCC, "#0.00")
End If
If NroPicos > 0 Then
ER1 = SomaER / NroPicos: TempoReig = TempoReig / NroPicos
PotReig = (CorrenteReig / NroPicos) * (TensaoReig / NroPicos)
ER2 = (PotReig - PotRef) * TempoReig / 2
label52 = Format(TensaoReig / NroPicos, "##0.00")
label54 = Format(CorrenteReig / NroPicos, "##0.00")
label56 = Format(TempoReig * 1000, "#0.00")
label60 = Format(1 / ER1, "#0.00")
label62 = Format(1 / ER2, "#0.00")
If NroPicos > 2 Then
DPER = Sqr(SomaQuadER / NroPicos - ER1 ^ 2)
'label63 = Format(ER1 / DPER, "#0.00")
label67 = Format(ER2 / DPER, "#0.00")
End If
End If
End If
label28 = Format(Posicao(SinalCorrente, InicioIndices), "#0.00000")
label29 = Format(Posicao(SinalTensao, FimIndices), "#0.00000")
frmDetalhar!mnuIndices.Enabled = True
End Sub

```

APÊNDICE B - FOTOGRAFIAS DOS CORPOS DE PROVA

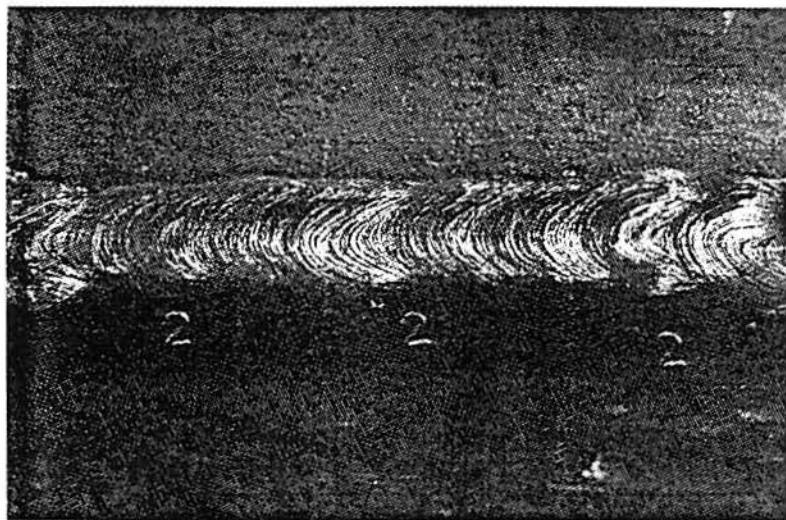


Solda BaF051

Profundidade: 5 m

Defeitos Observados:

- Mordedura.
- Reforço excessivo.

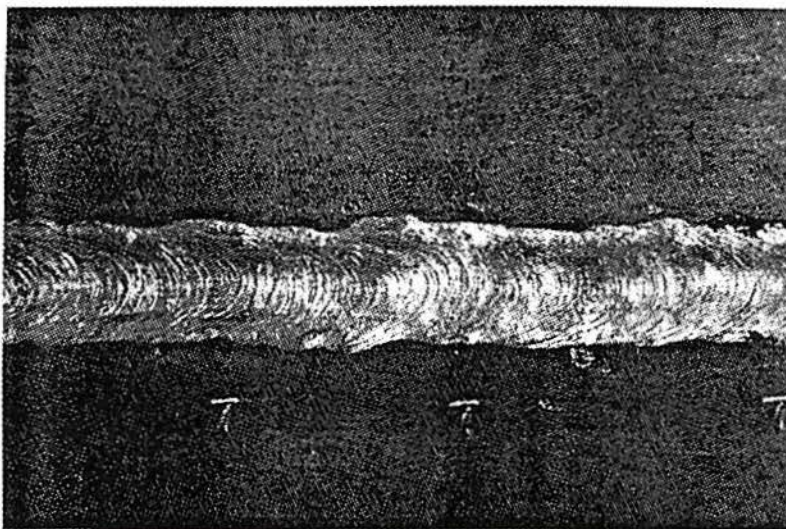


Solda BaF121.

Profundidade: 12,5 m

Defeito Observado:

- Variação da largura.

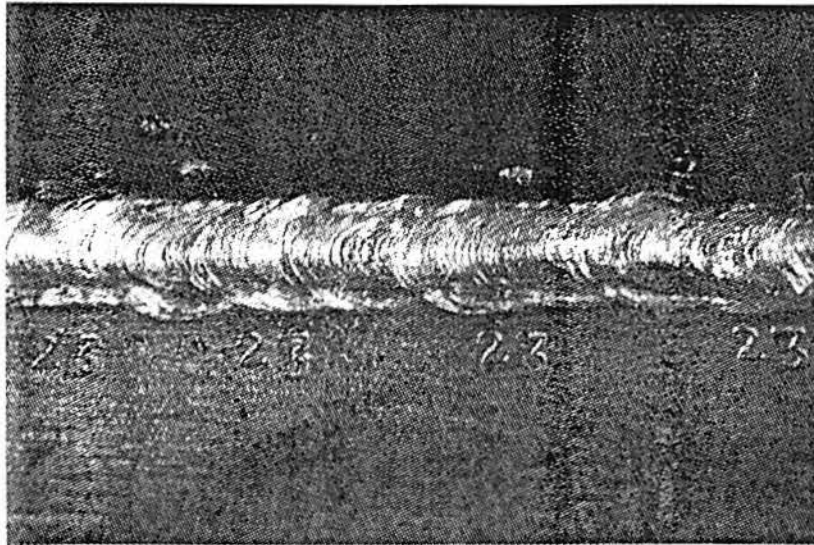


Solda BaF201.

Profundidade: 20 m

Solda sem defeito aparente

Fig. B1 - Juntas tipo filete, soldadas com a mistura Base

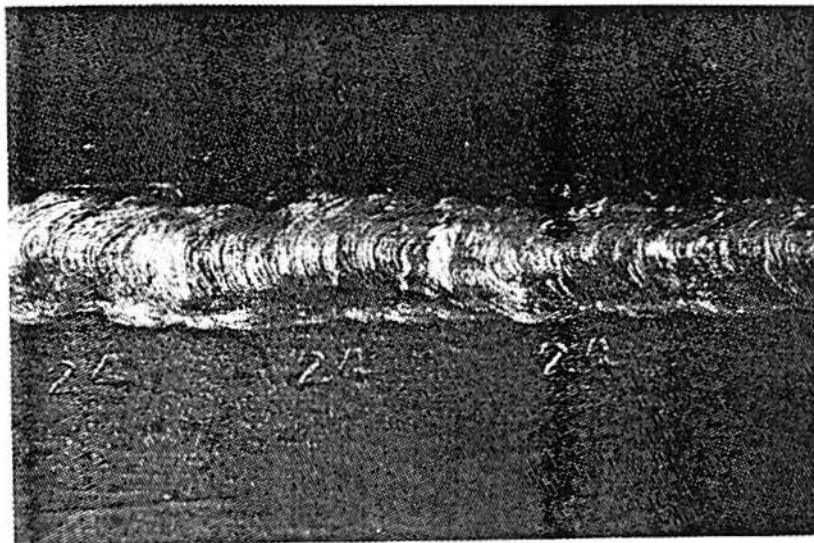


Solda A1F051.

Profundidade: 5 m.

Defeito Observado:

- Mordedura



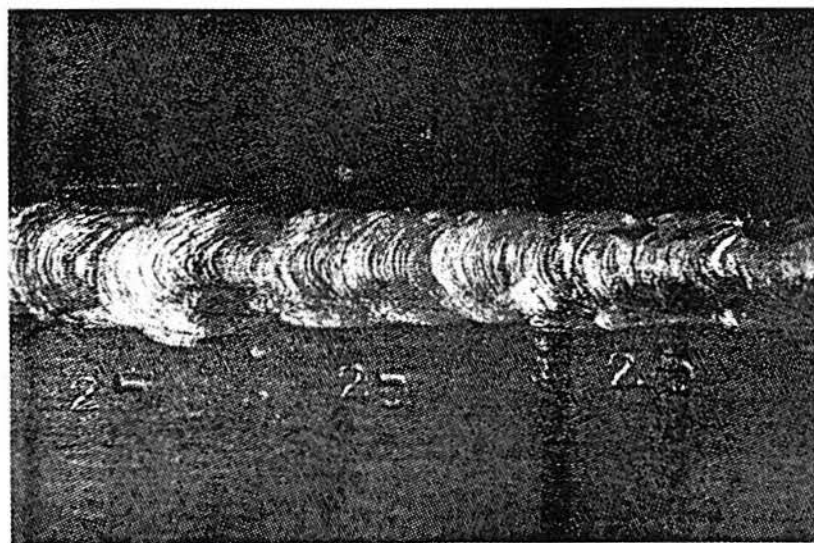
Solda A1F121.

Profundidade: 12,5 m

Defeitos Observados:

- Mordedura.

- Descontinuidade do
cordão.

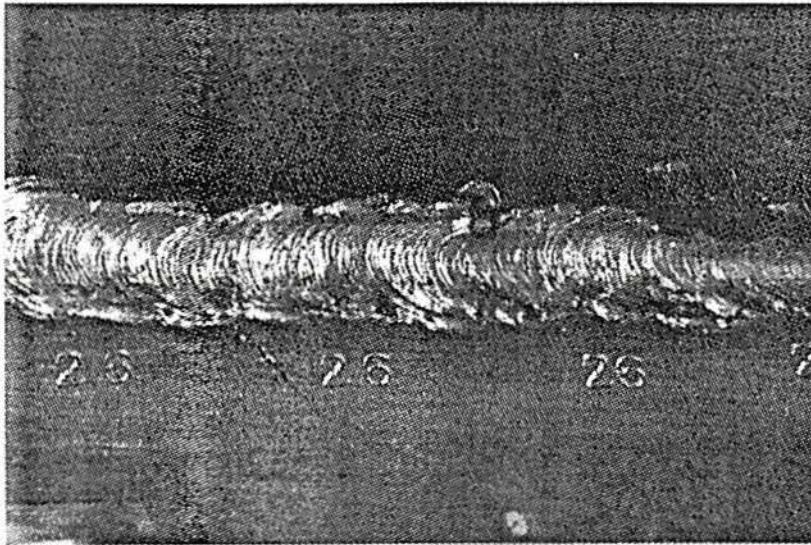


Solda A1F201.

Profundidade: 20 m

Solda sem defeito
aparente

Fig. B2 - Juntas tipo filete, soldadas com a mistura A101.

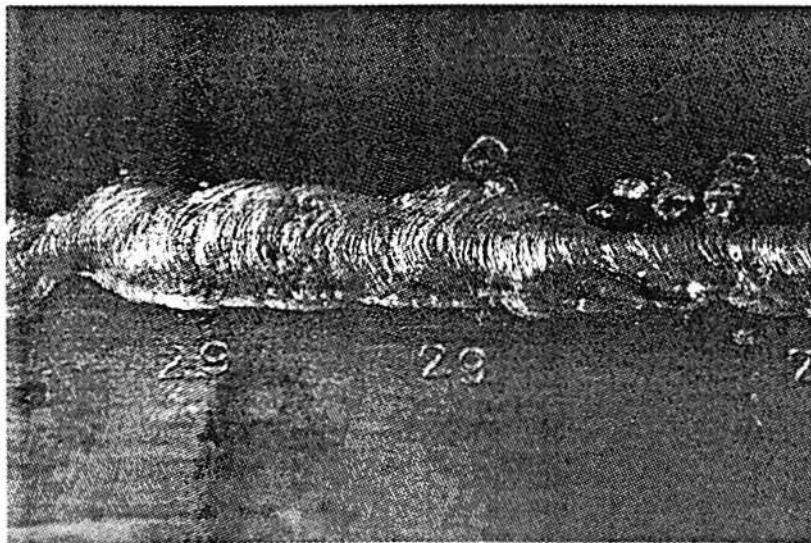


Solda A2F051.

Profundidade: 5 m.

Defeitos Observados:

- Mordedura
- Reforço excessivo
- Porosidade
- Inclusão de escória.

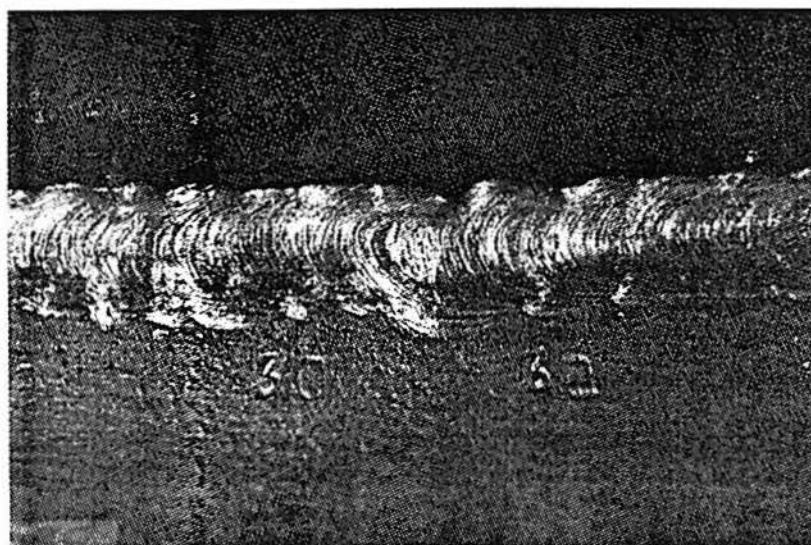


Solda A2F121.

Profundidade: 12,5 m.

Defeitos Observados:

- Mordedura
- Reforço excessivo
- Porosidade
- Excesso Salpicos

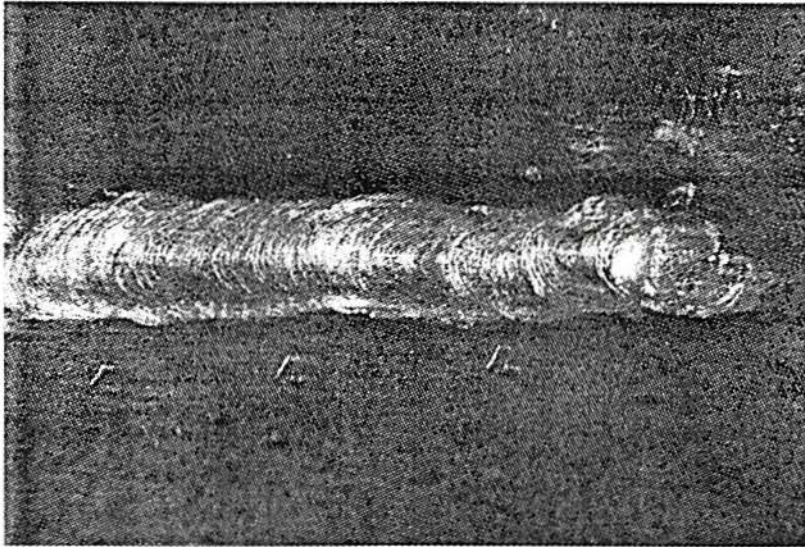


Solda A2F201.

Profundidade: 20 m.

Solda sem defeito aparente

Fig. B3 - Juntas tipo filete, soldadas com a mistura A102.

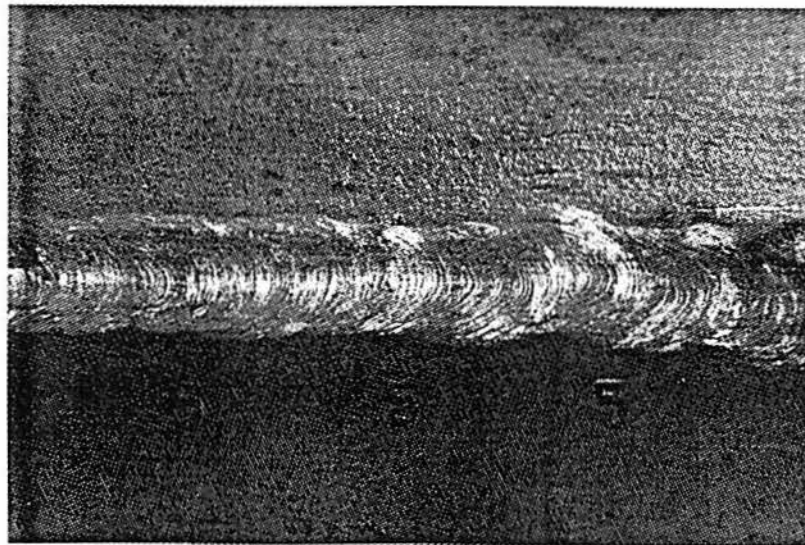


Solda C1F051.

Profundidade: 5 m

Defeito Observado:

- Variação da largura.

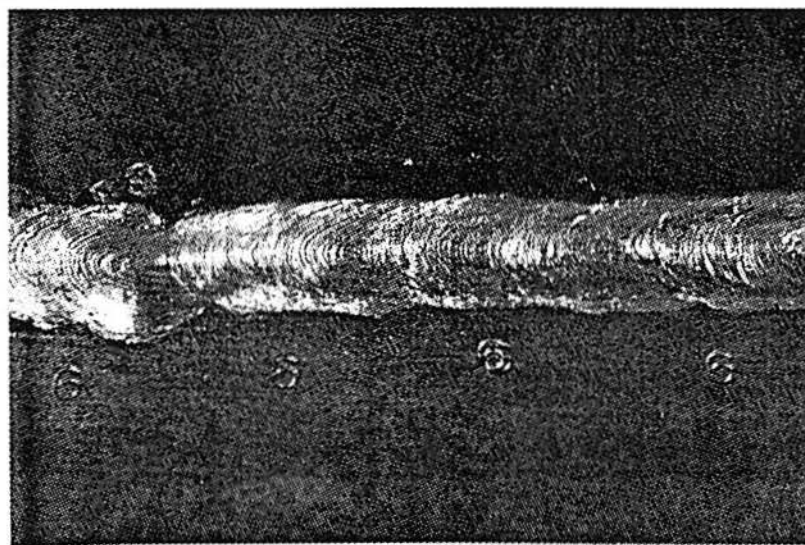


Solda C1F121.

Profundidade: 12,5 m

Defeito Observado:

- Mordedura

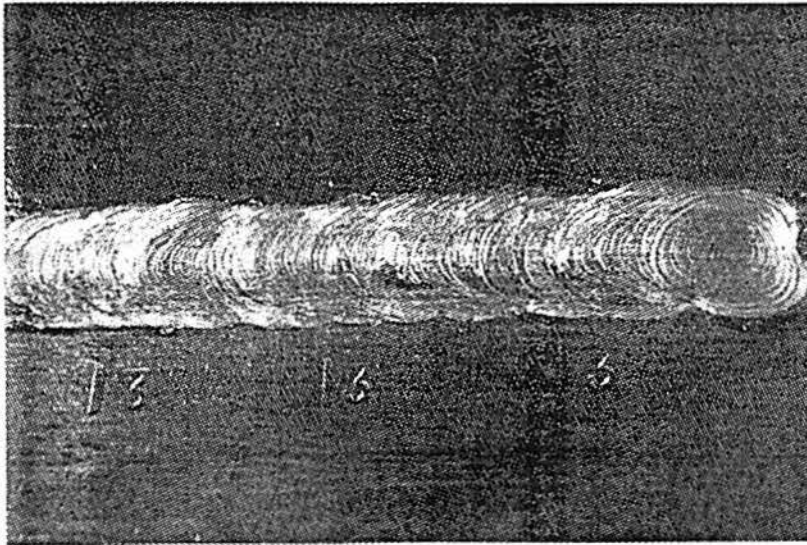


Solda C1F201.

Profundidade: 20 m.

Solda sem defeito
aparente

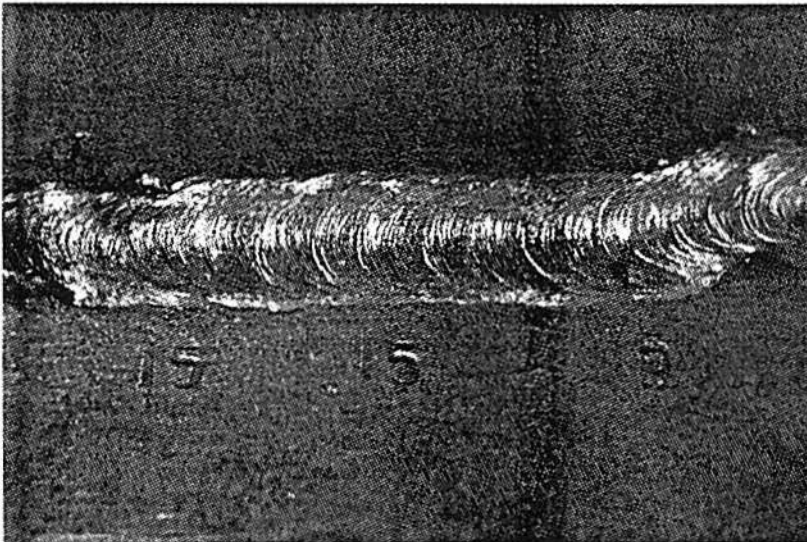
Fig. B4 - Juntas tipo filete, soldadas com a mistura Ca01.



Solda C2F051.

Profundidade: 5 m

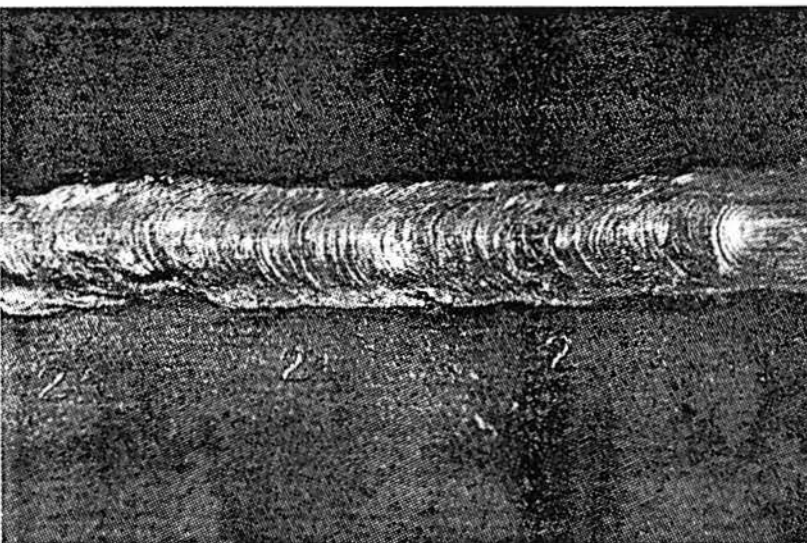
Solda sem defeito aparente



Solda C2F121.

Profundidade: 12,5 m

Solda sem defeito aparente

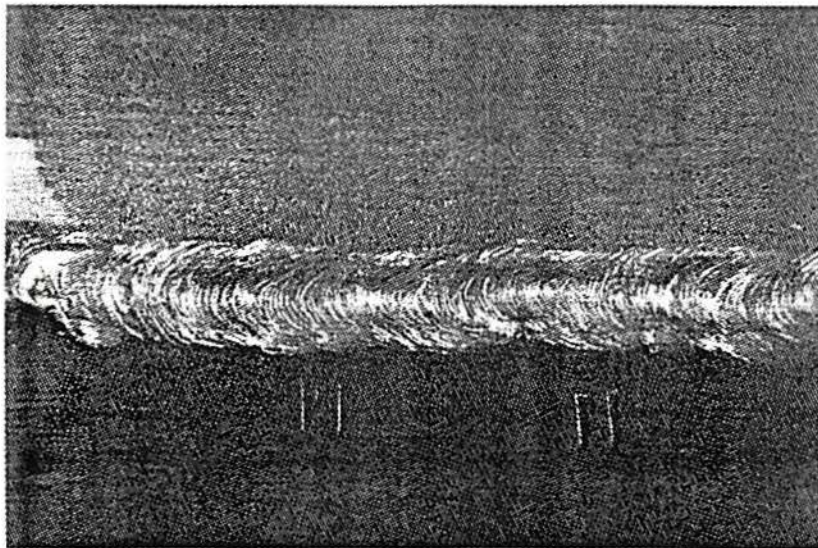


Solda C2F201.

Profundidade: 20 m

Solda sem defeito aparente

Fig. B5 - Juntas tipo filete, soldadas com a mistura CaO₂.

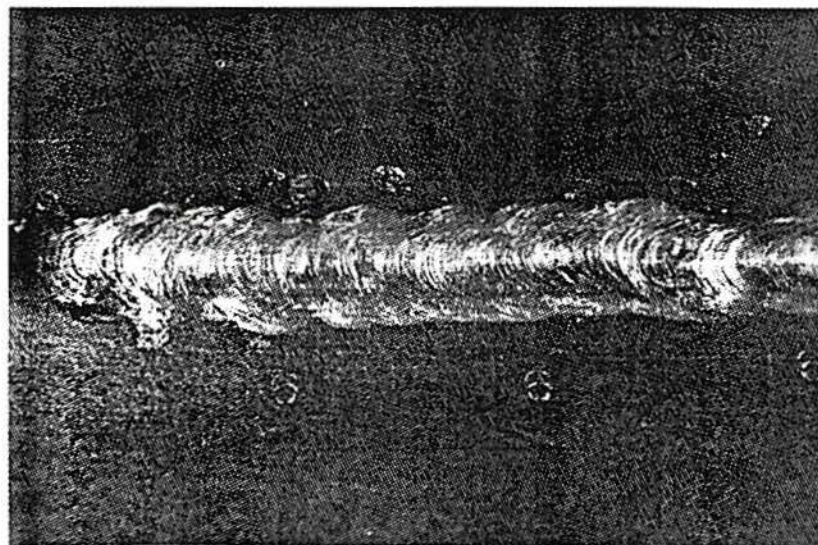


Solda T1F051.

Profundidade: 5 m

Defeitos Observados:

- Mordedura
- Descontinuidade do cordão

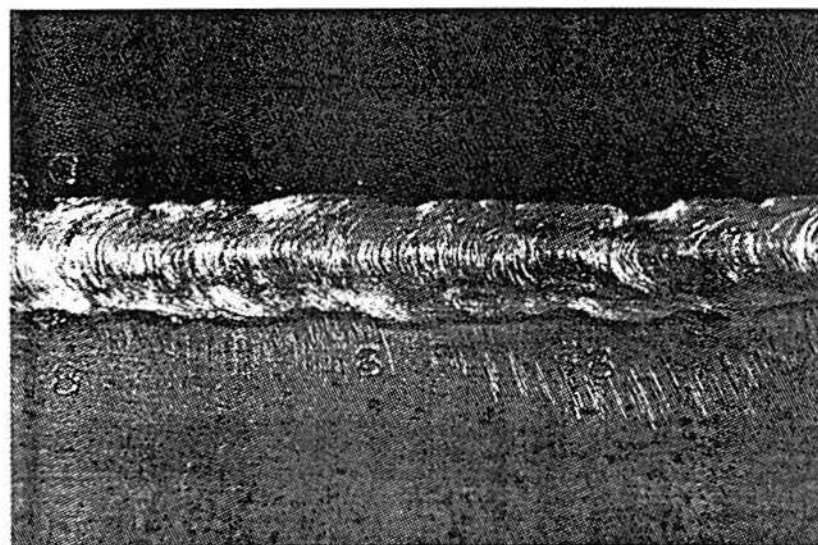


Solda T1F121.

Profundidade: 12,5 m.

Defeitos Observados:

- Reforço excessivo
- Porosidade superficial
- Excesso de salpicos

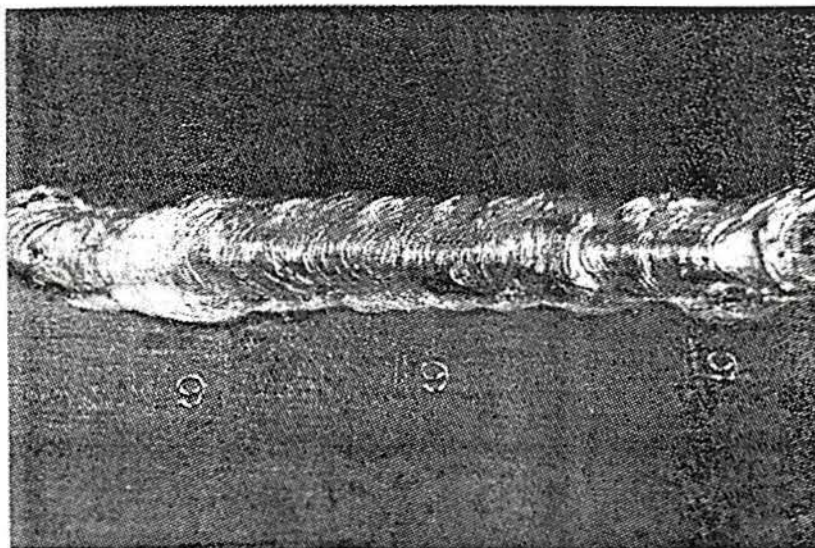


Solda T1F201.

Profundidade: 20 m

Solda sem defeito aparente

Fig. B6 - Juntas tipo filete, soldadas com a mistura Ti01.

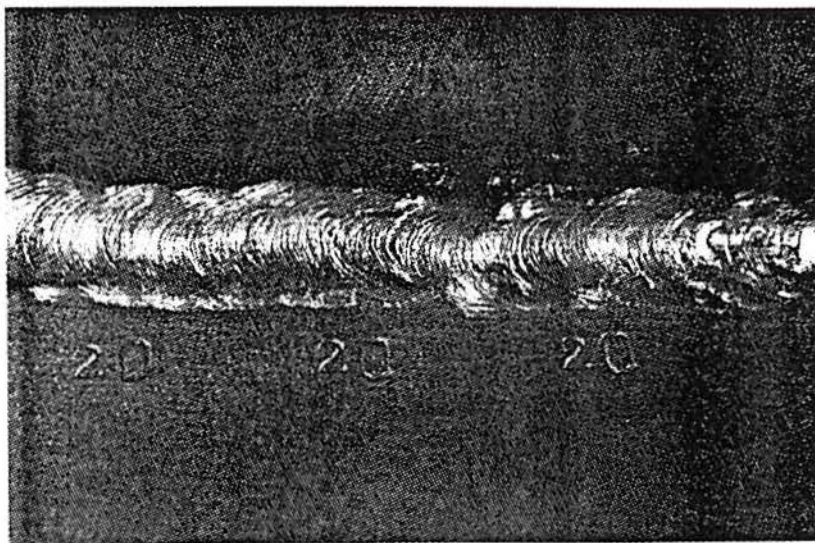


Solda T2F051.

Profundidade: 5 m

Defeitos Observados:

- Mordedura.
- Reforço excessivo

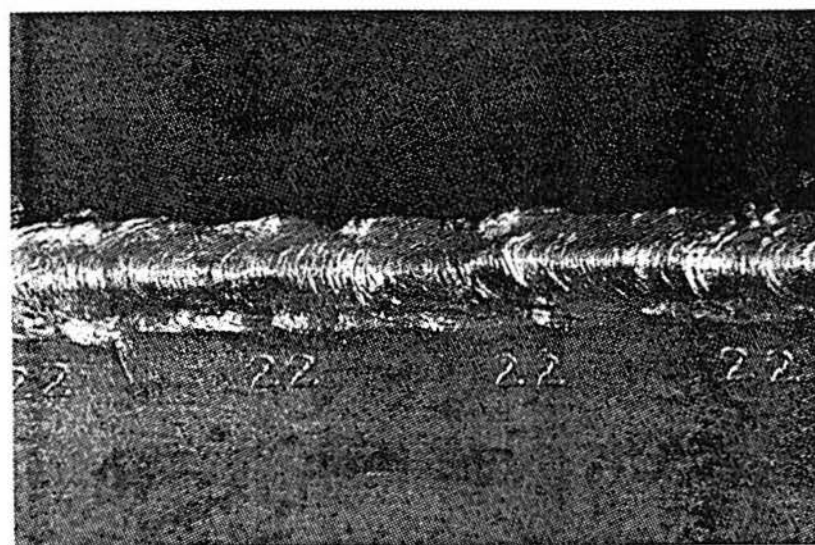


Solda T2F121.

Profundidade: 12.5 m

Defeito Observado:

- Reforço excessivo



Solda T2F201.

Profundidade: 20 m.

Defeitos Observados:

- Reforço excessivo

Fig. B7 - Juntas tipo filete, soldadas com a mistura TiO₂.

APÊNDICE C - OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E CORRENTE DE SOLDAGEM

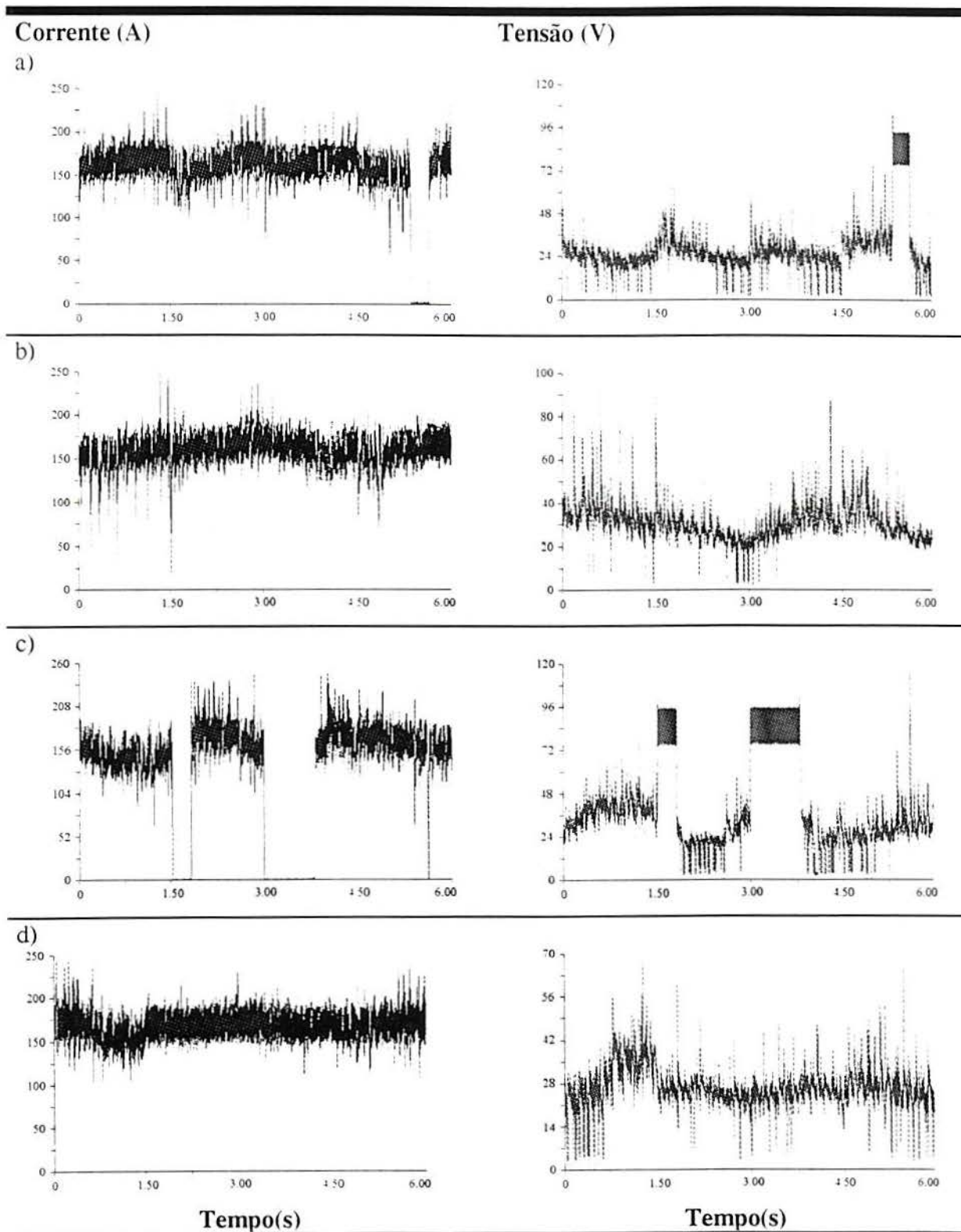


Fig. C1 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

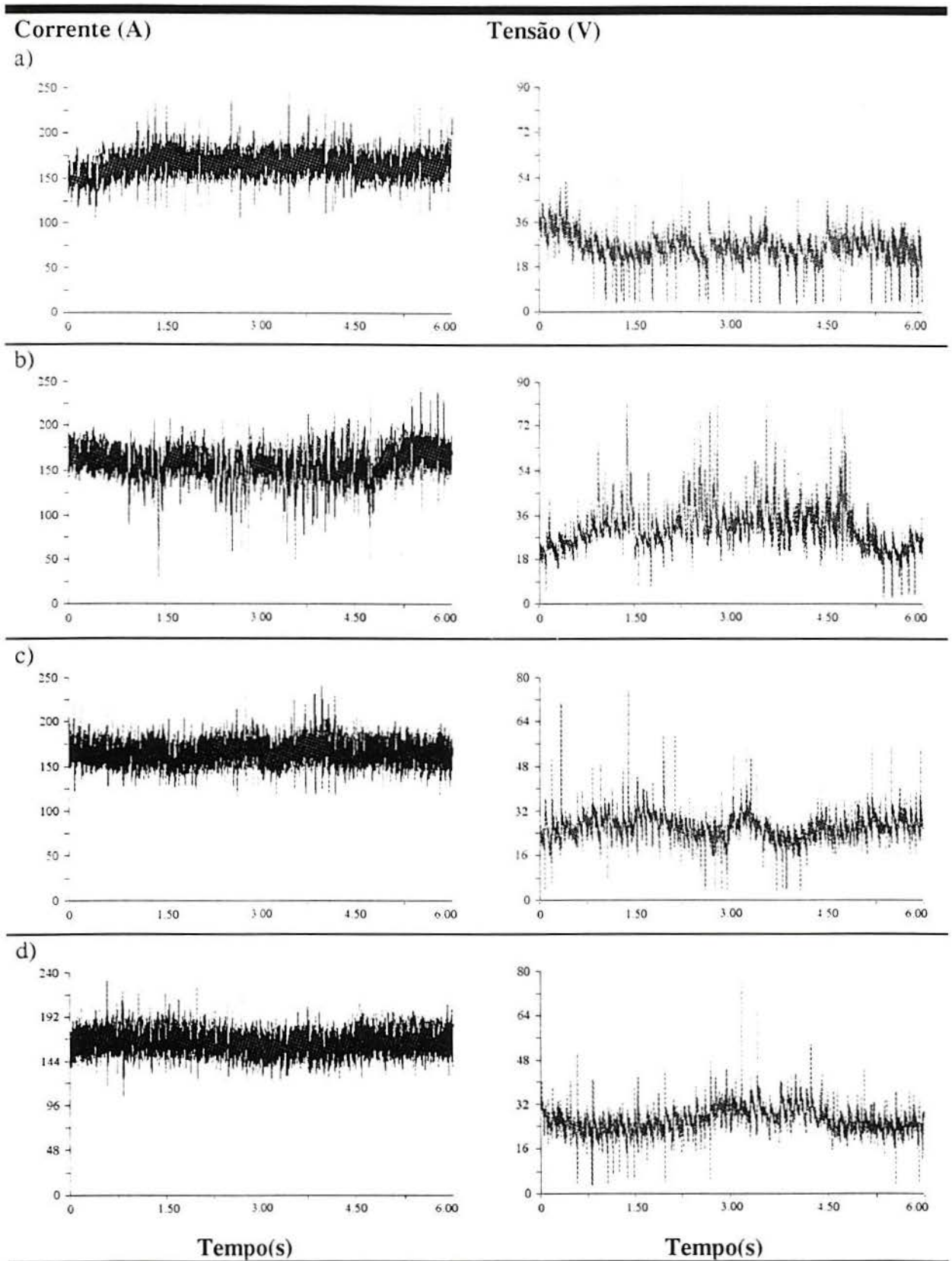


Fig. C2 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

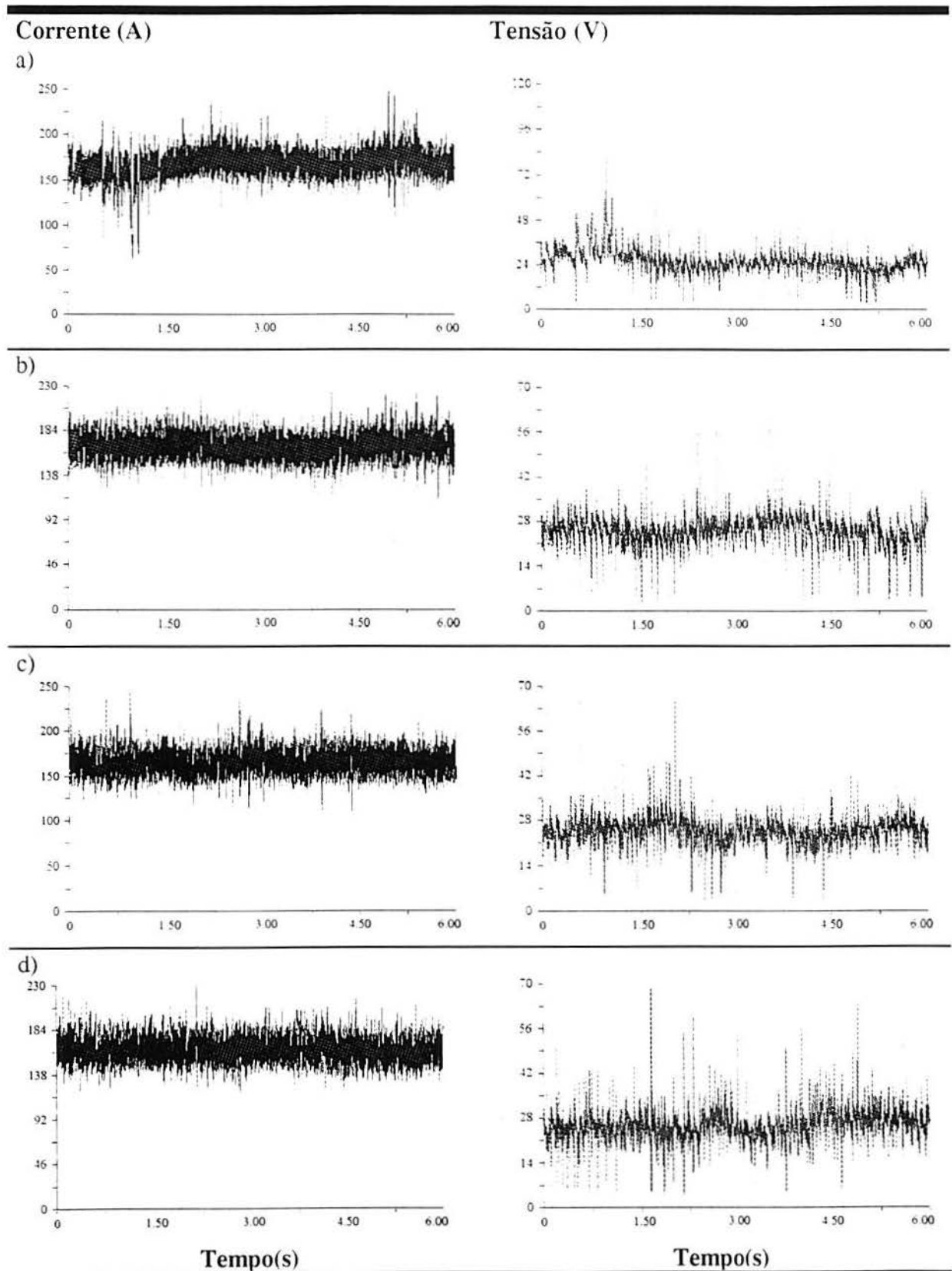


Fig. C3 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

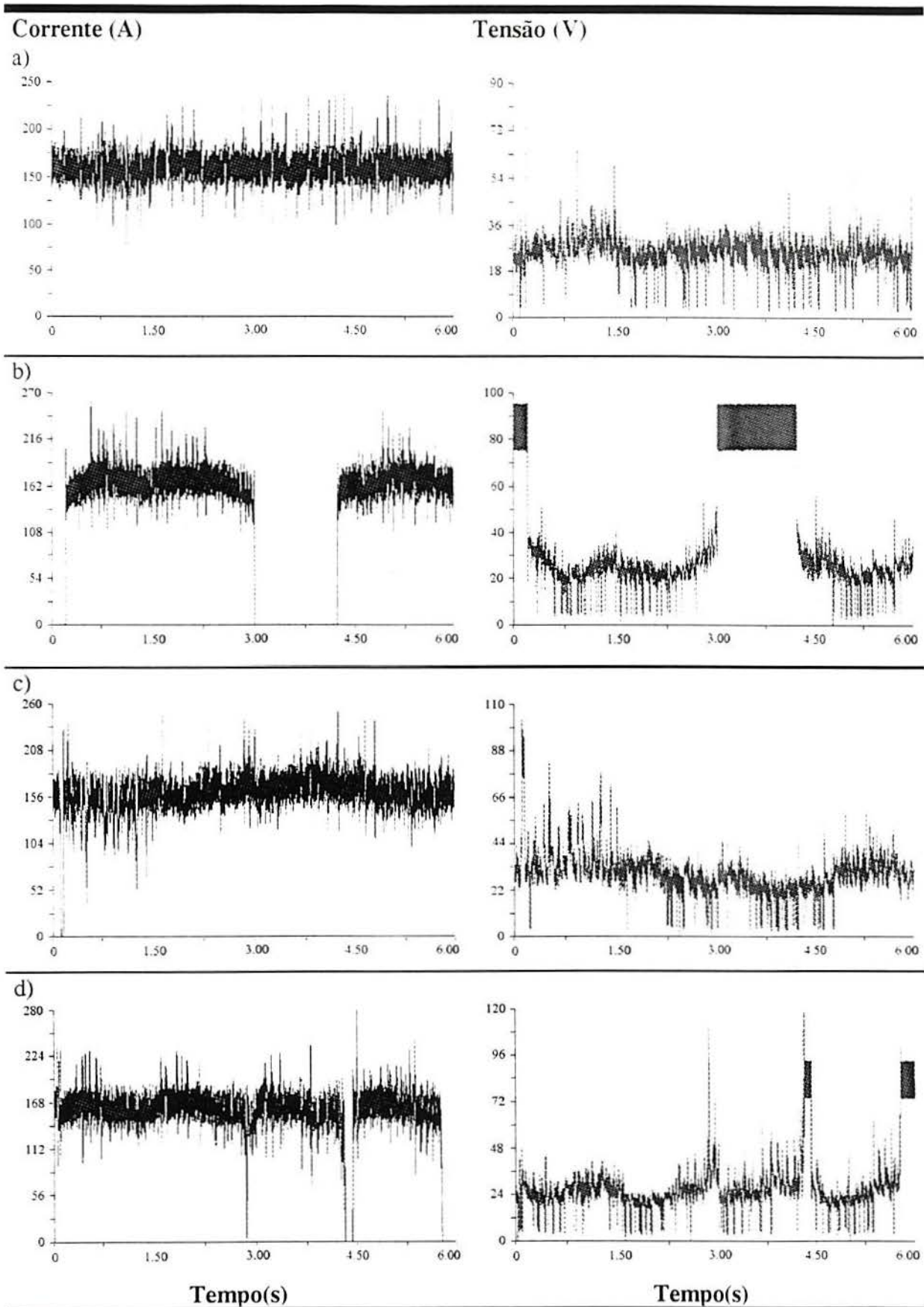


Fig. C4 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

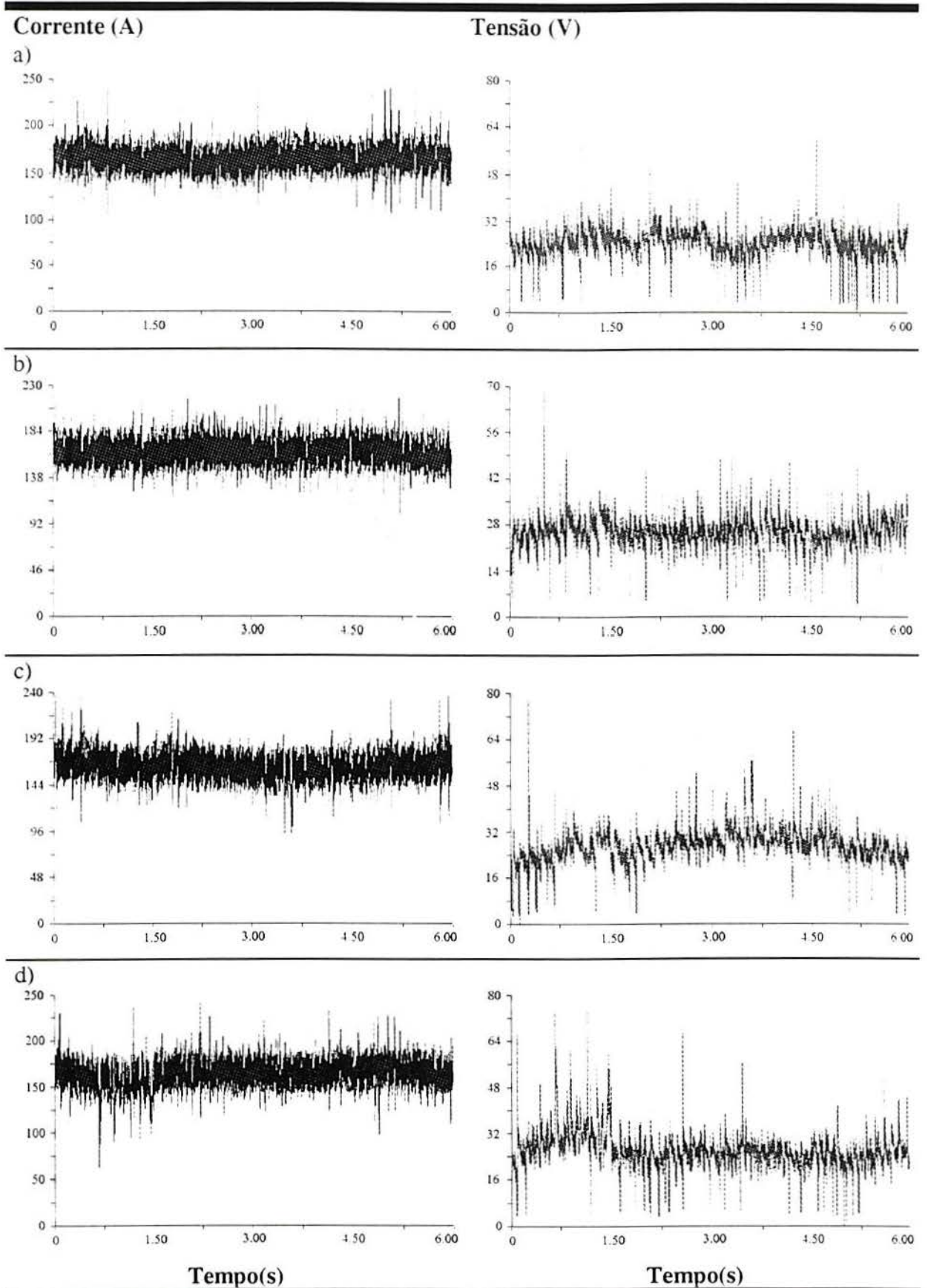


Fig. C5 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura A101 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

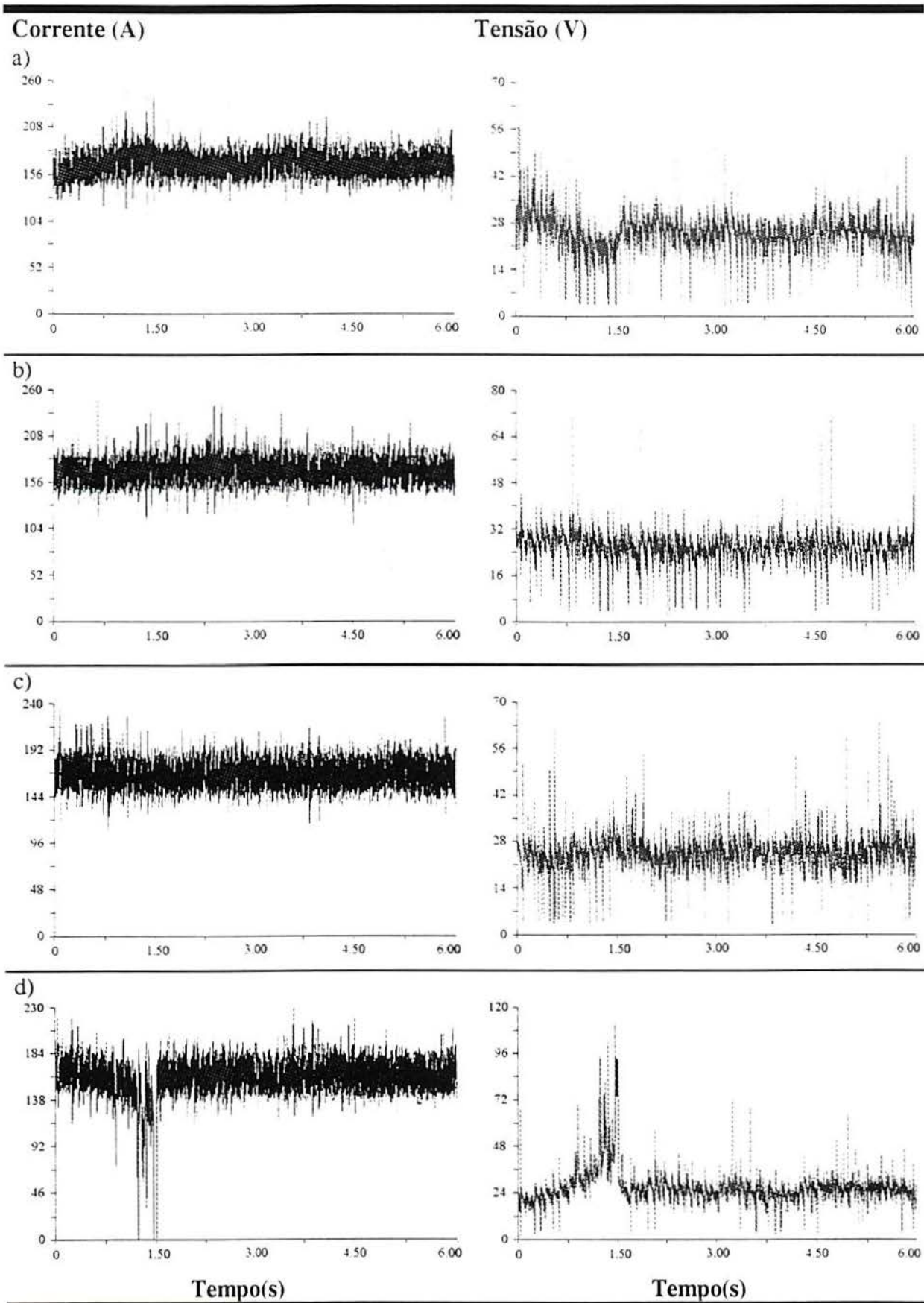


Fig.C6 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

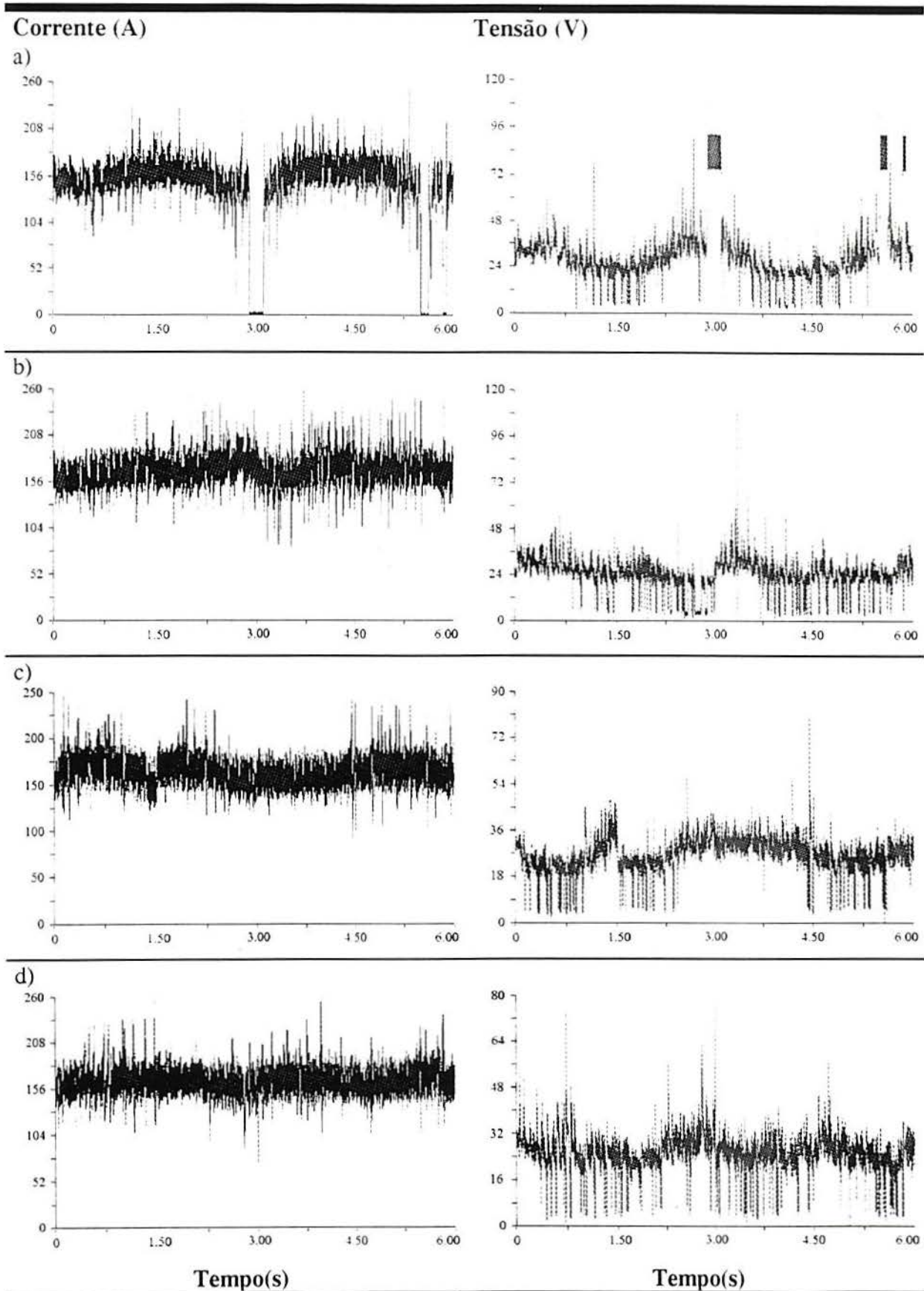


Fig. C7 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

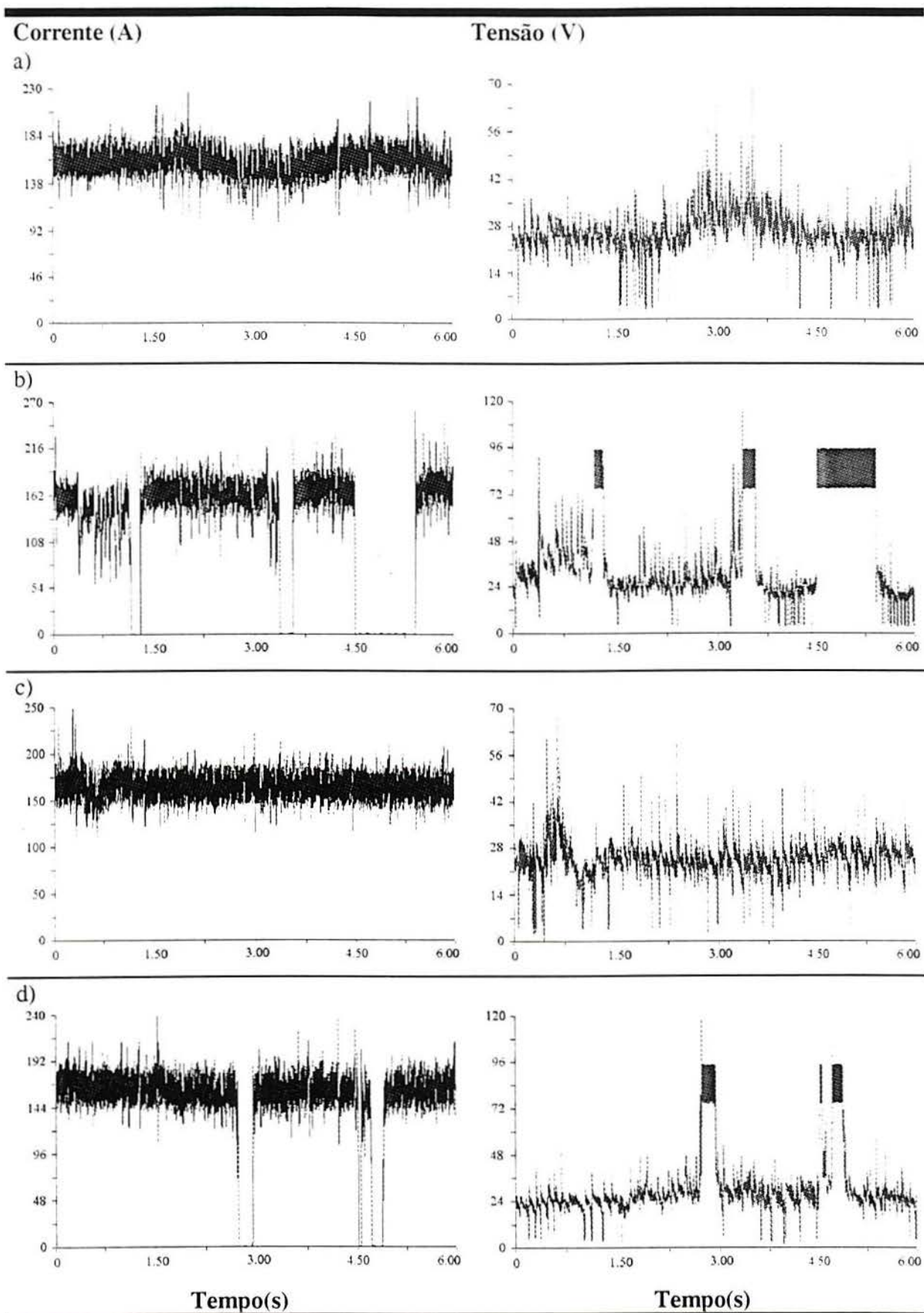


Fig. C8 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura AlO₂ a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

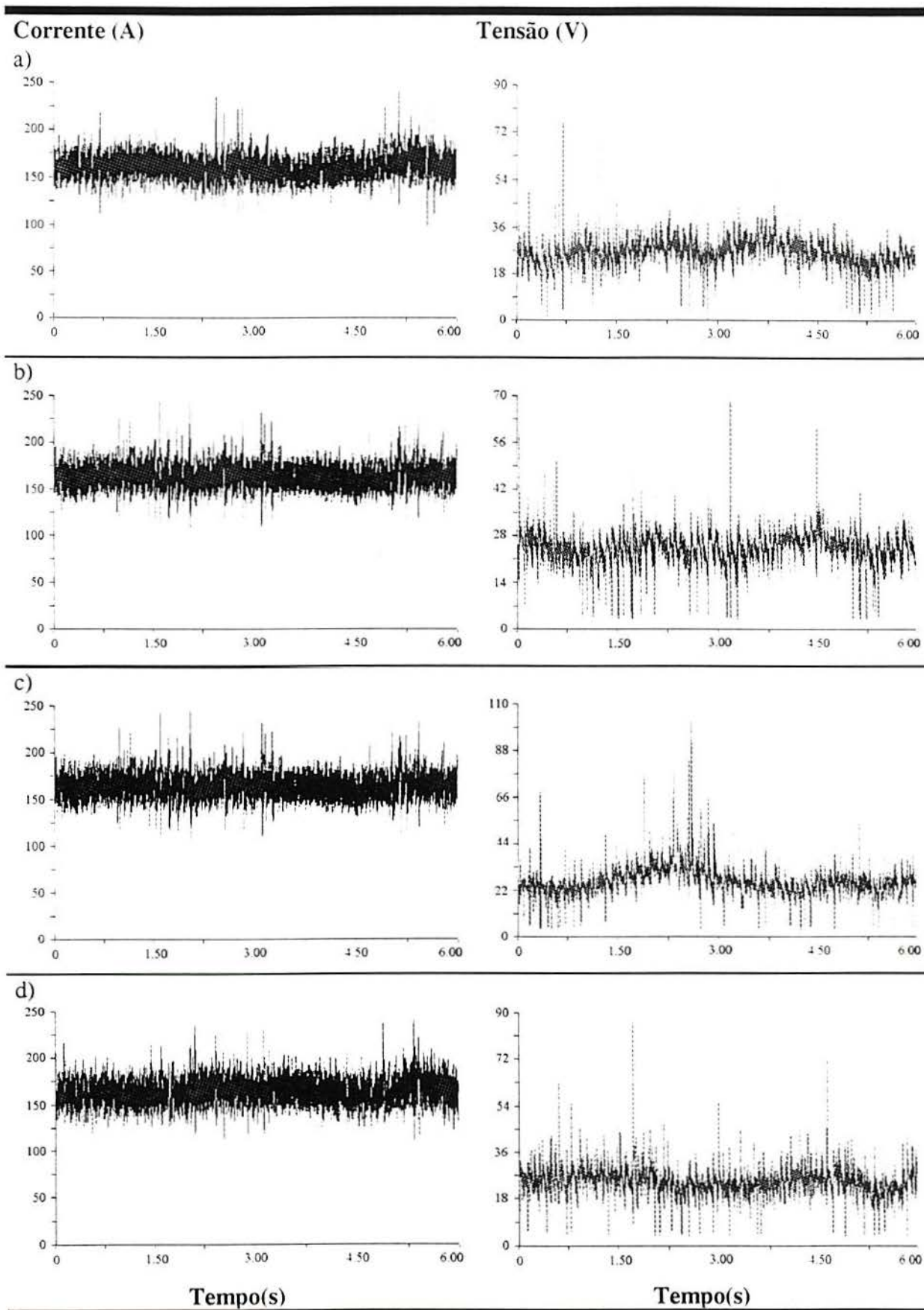


Fig. C9 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

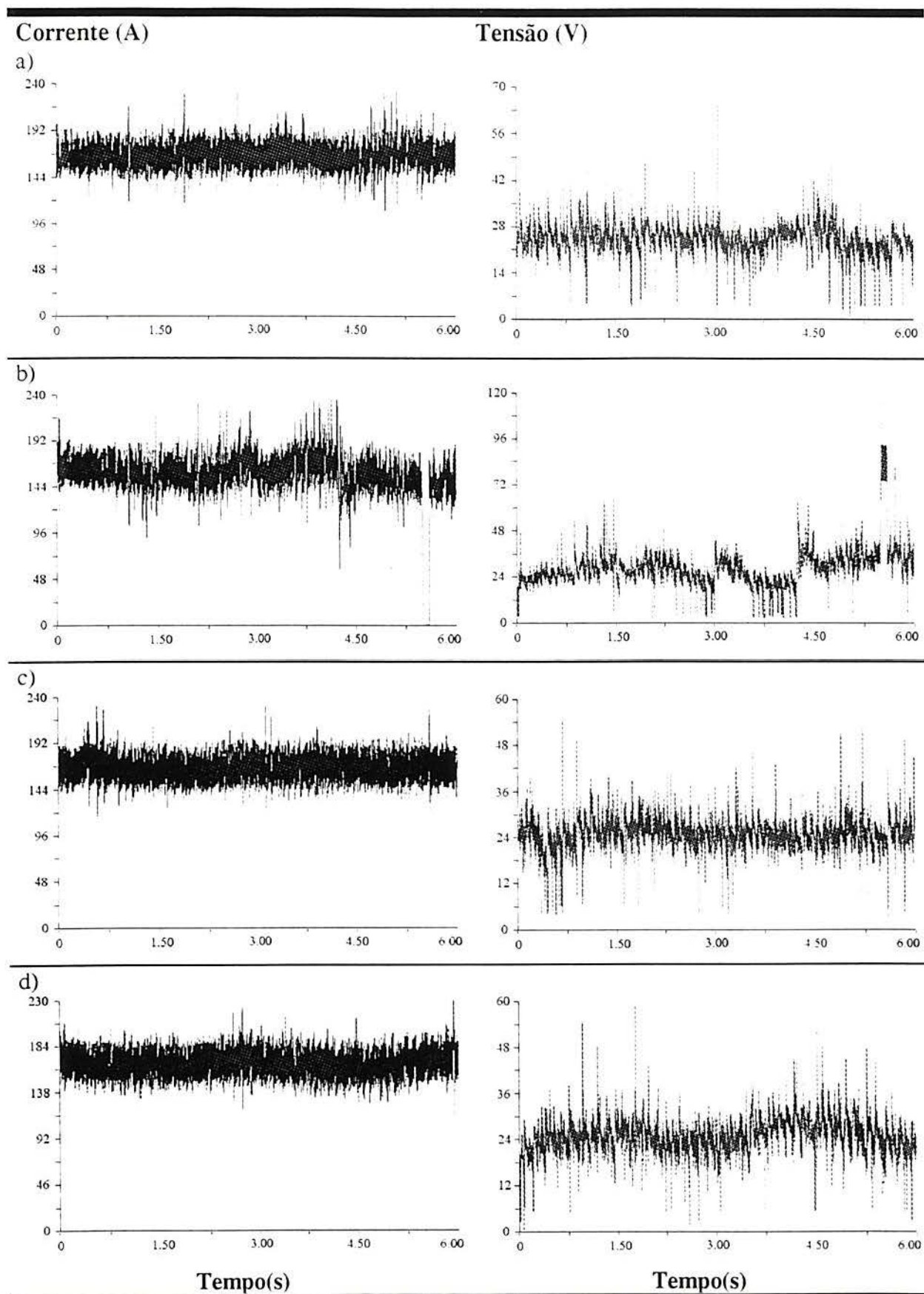


Fig. C10 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

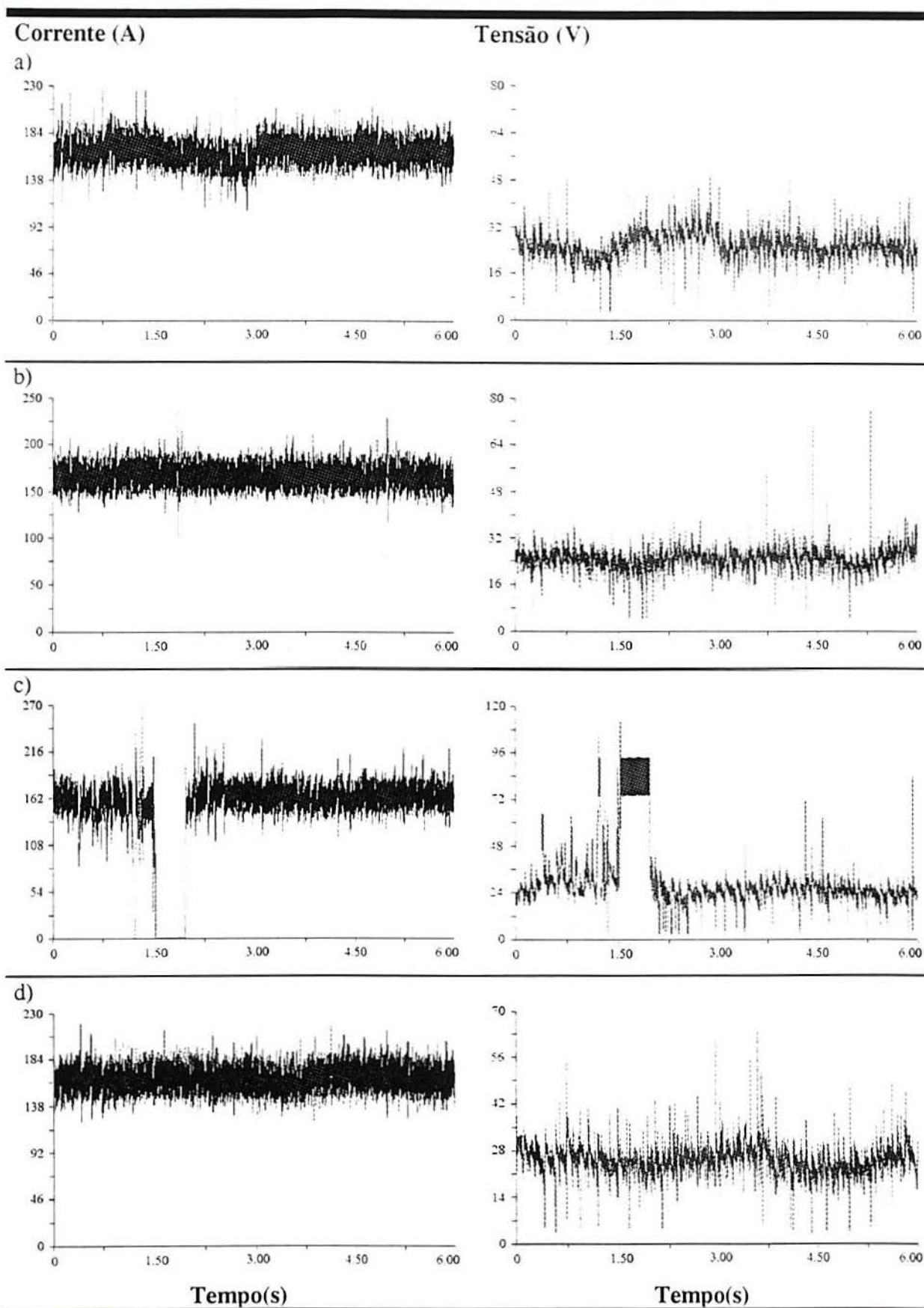


Fig. C11 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete: c) e d) Simples deposição sobre chapa.

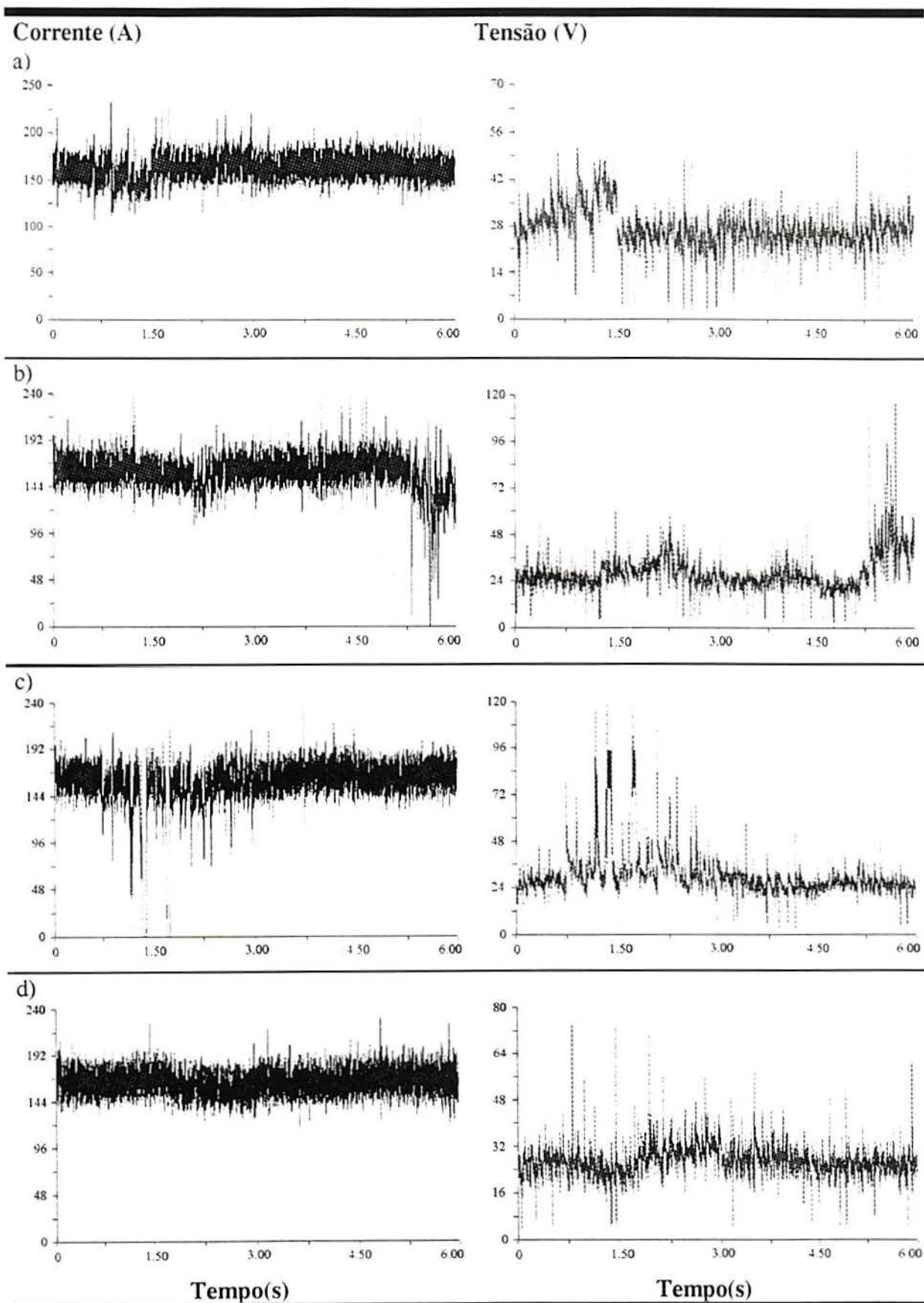


Fig. C12 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

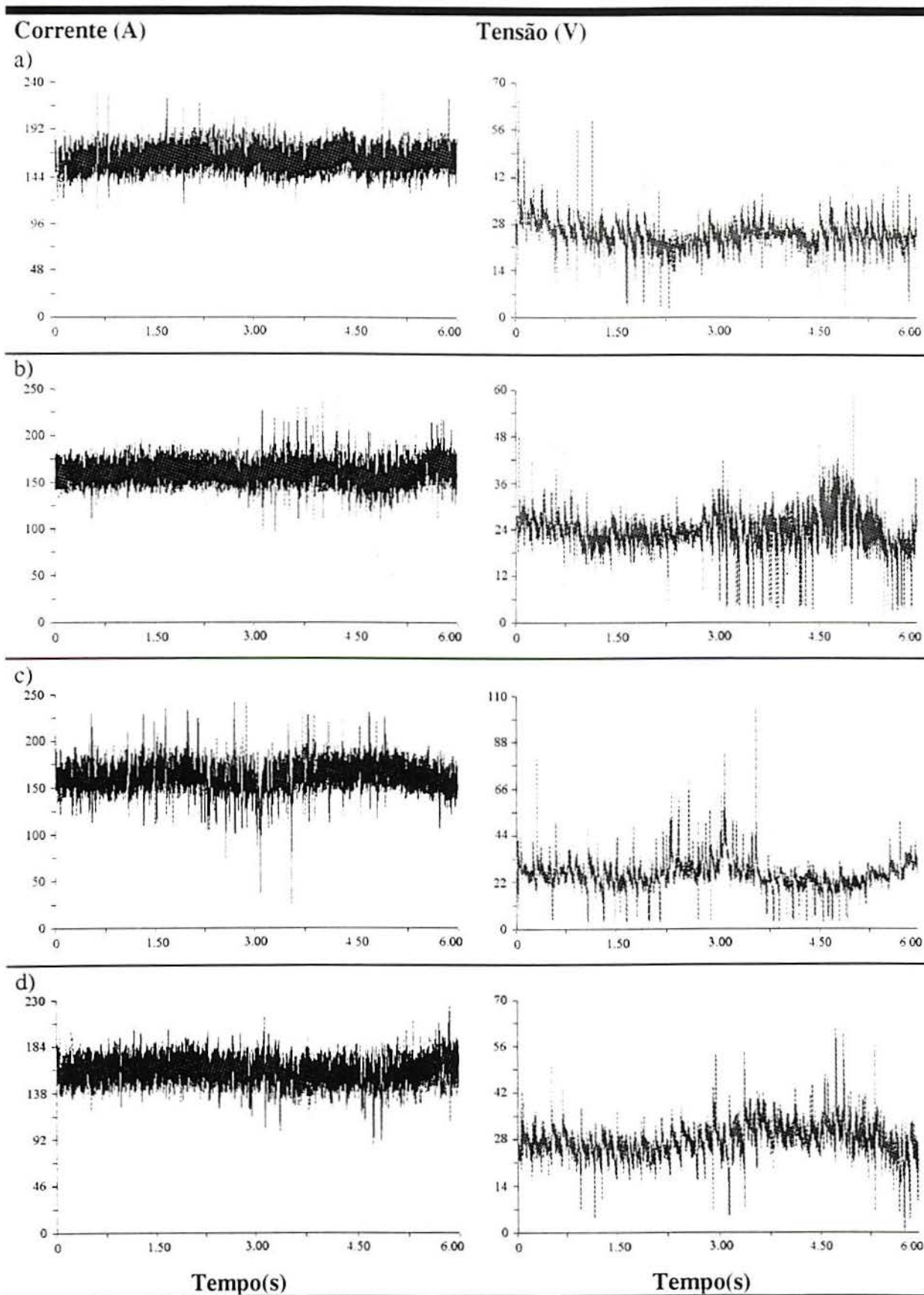


Fig. C13 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura CaO₂ a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

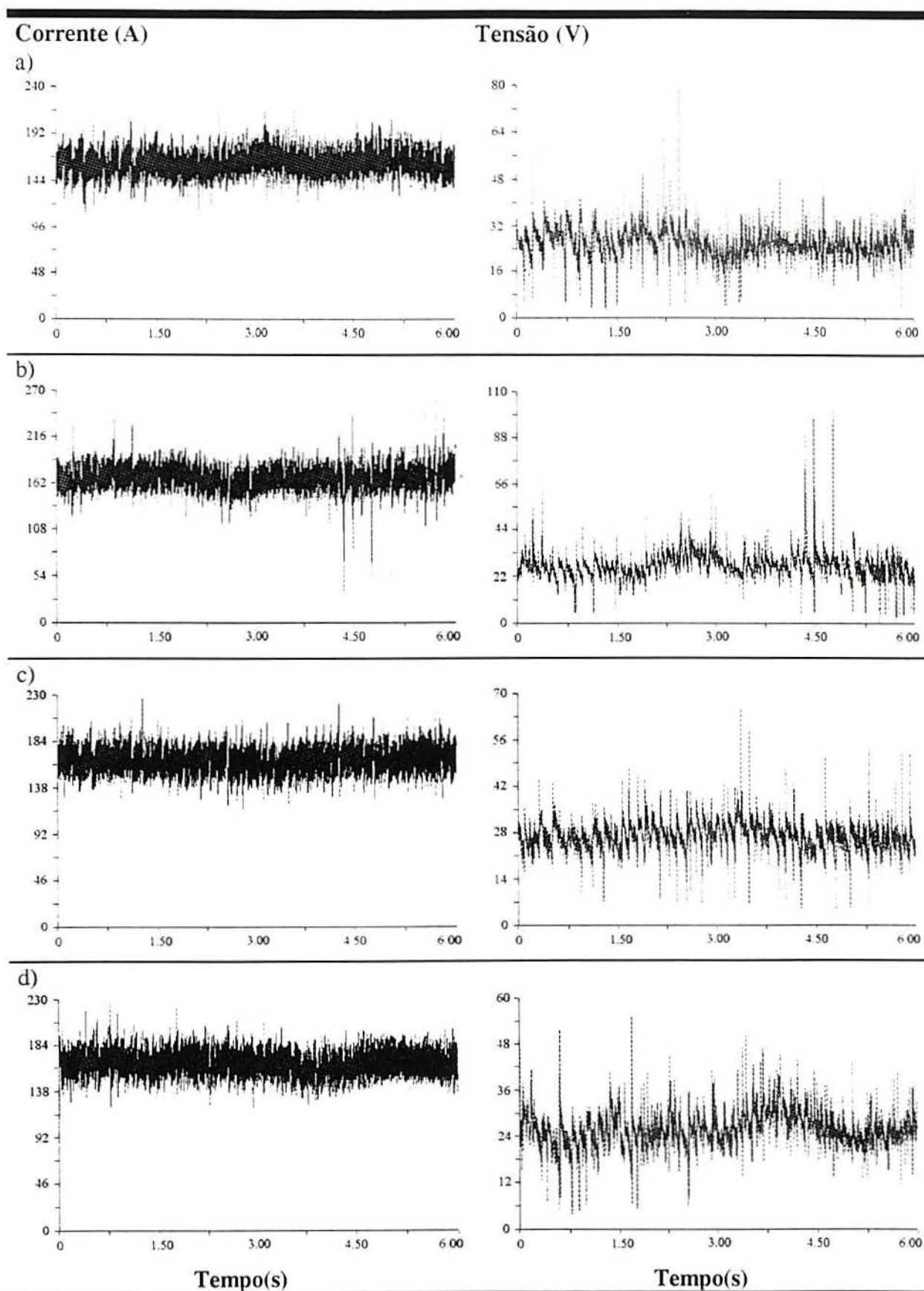


Fig. C14 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura CaO₂ a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

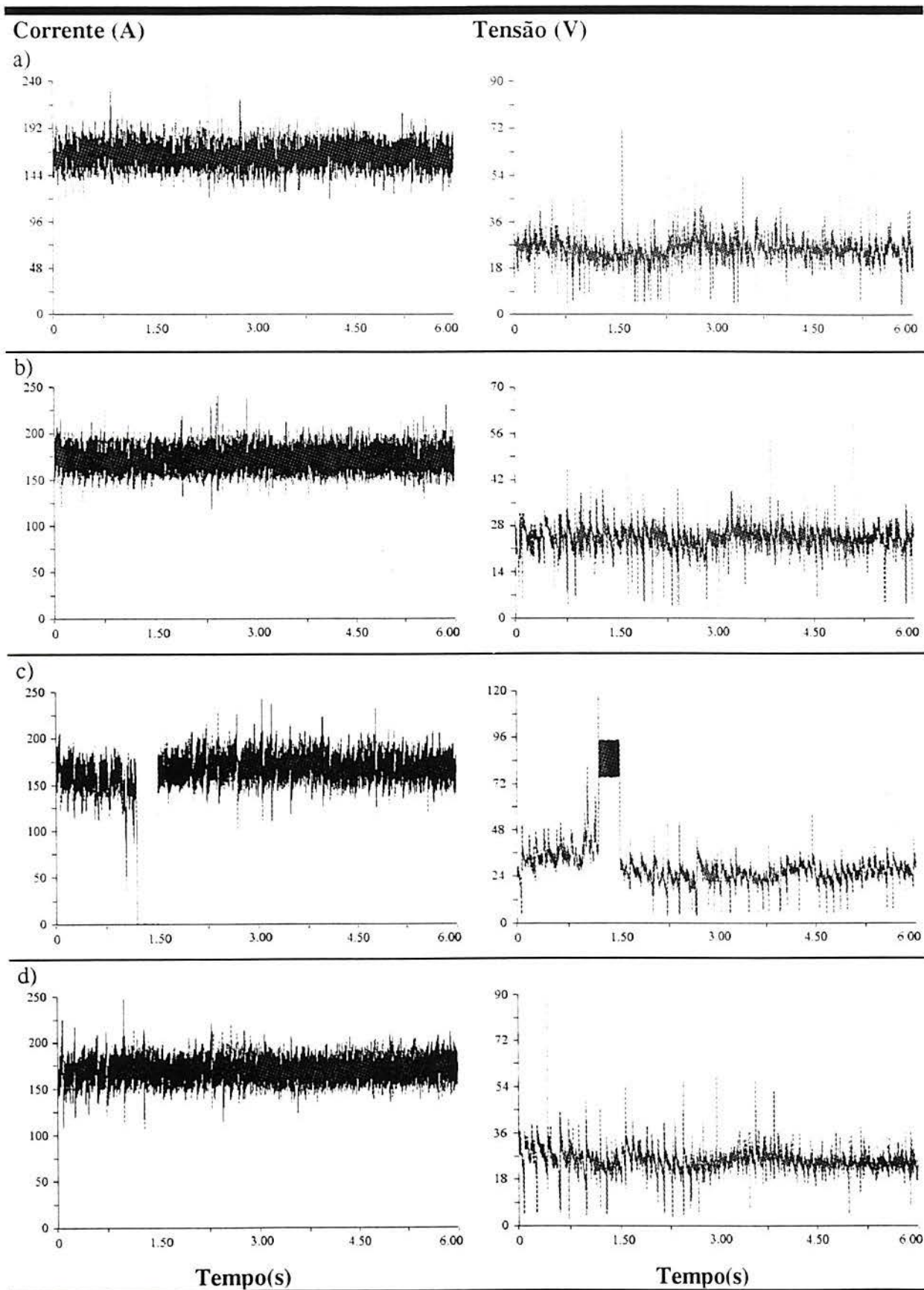


Fig. C15 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura CaO₂ a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

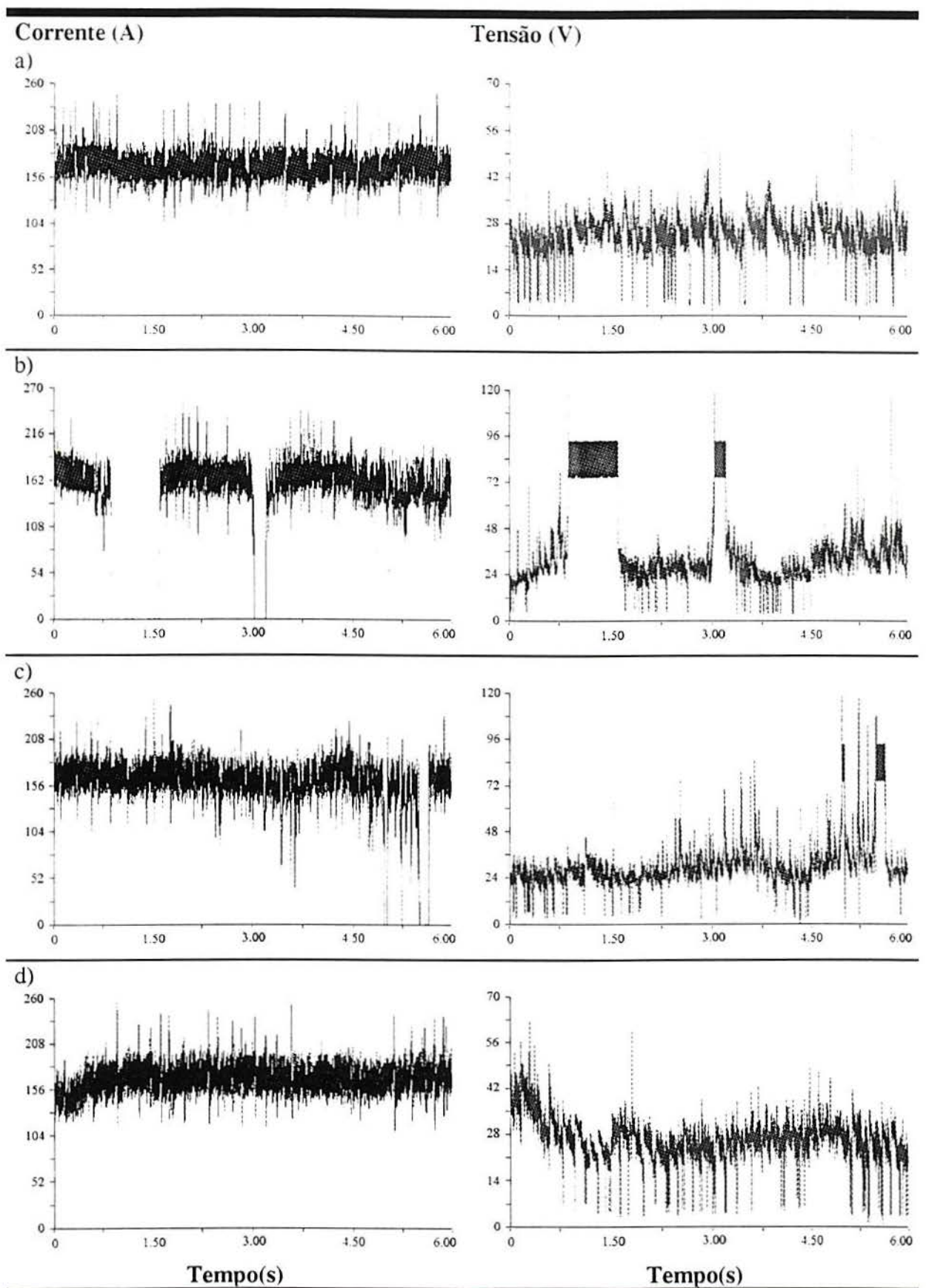


Fig. C16 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

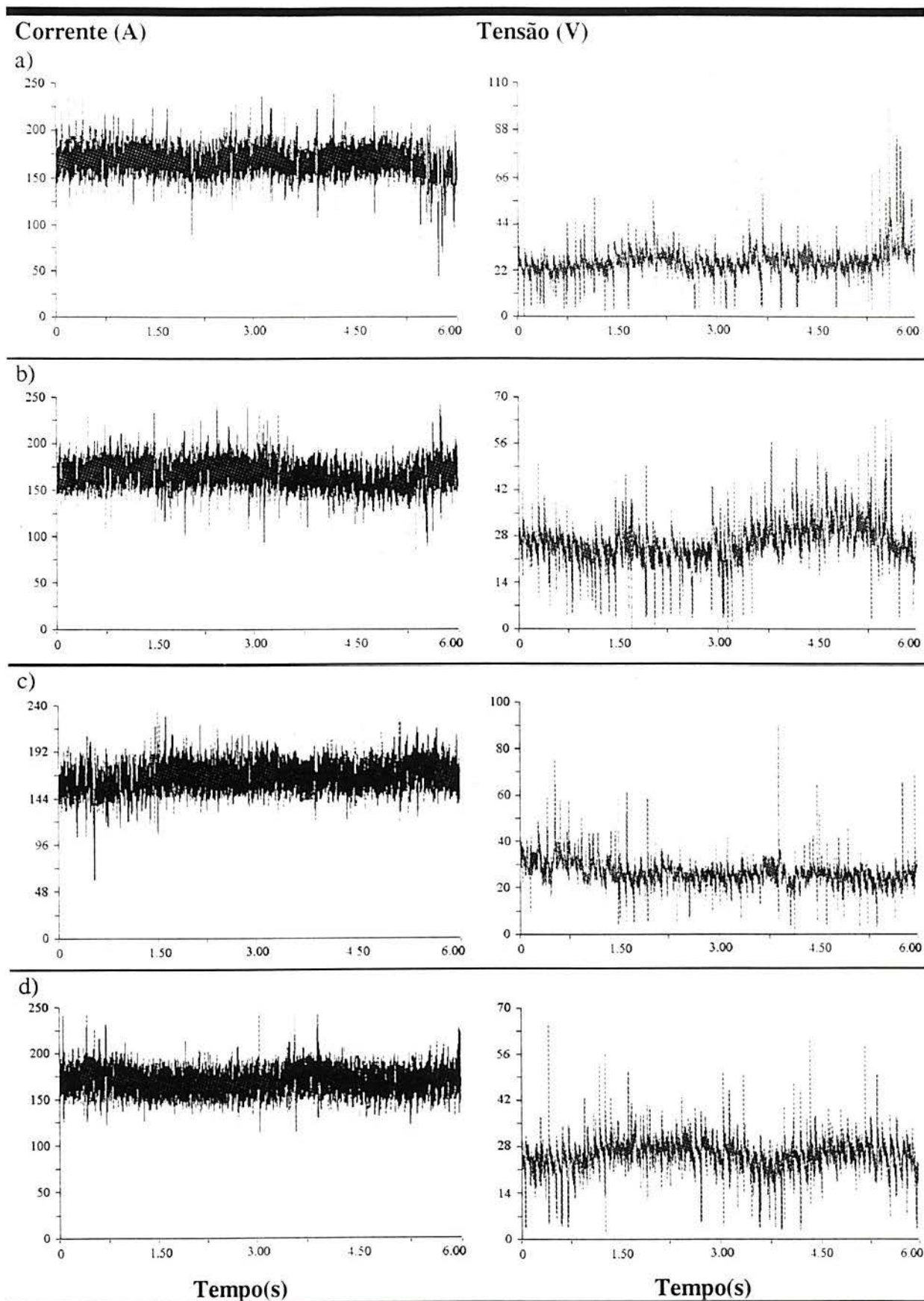


Fig. C17 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

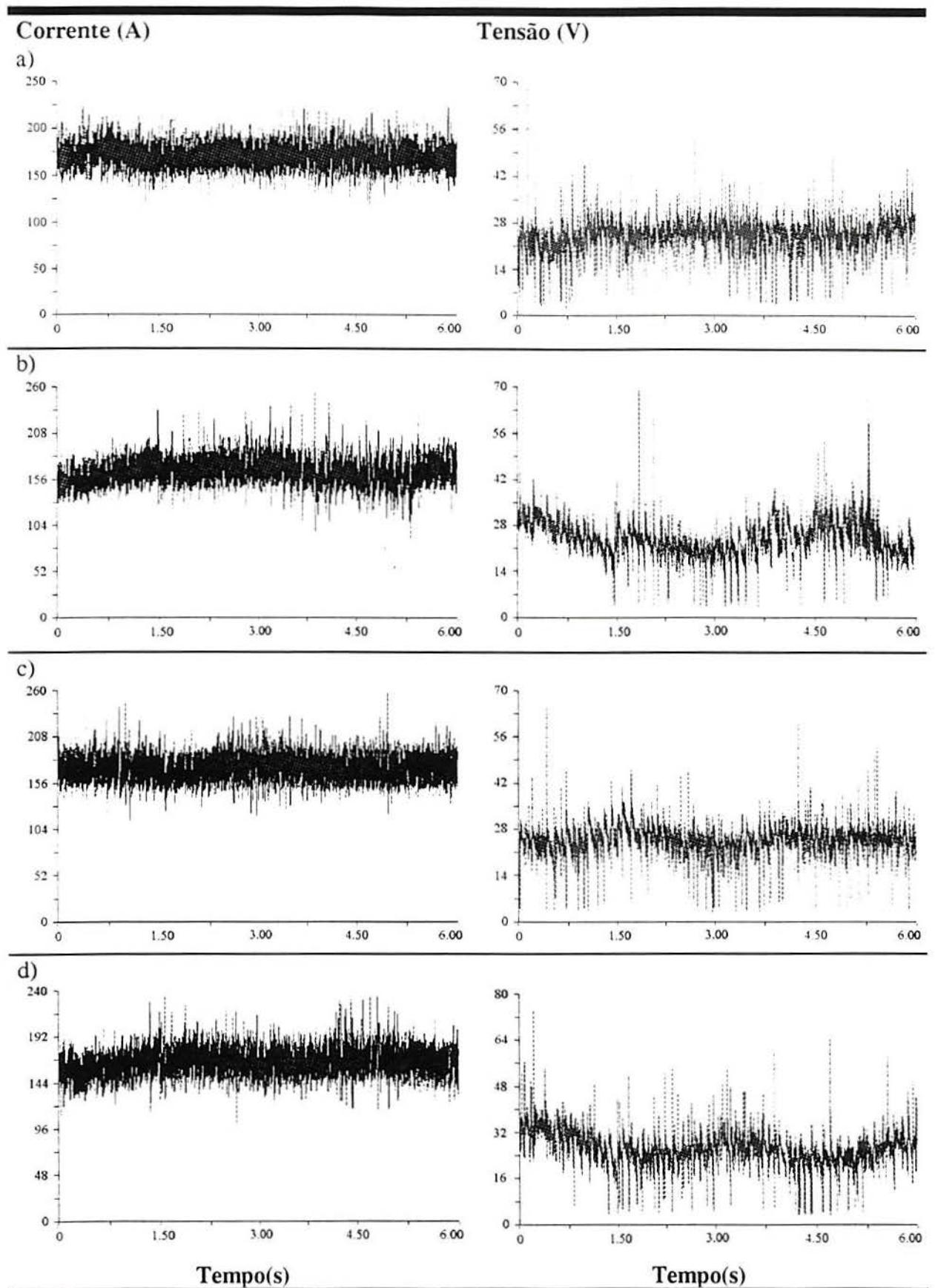


Fig. C18 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura TiO1 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

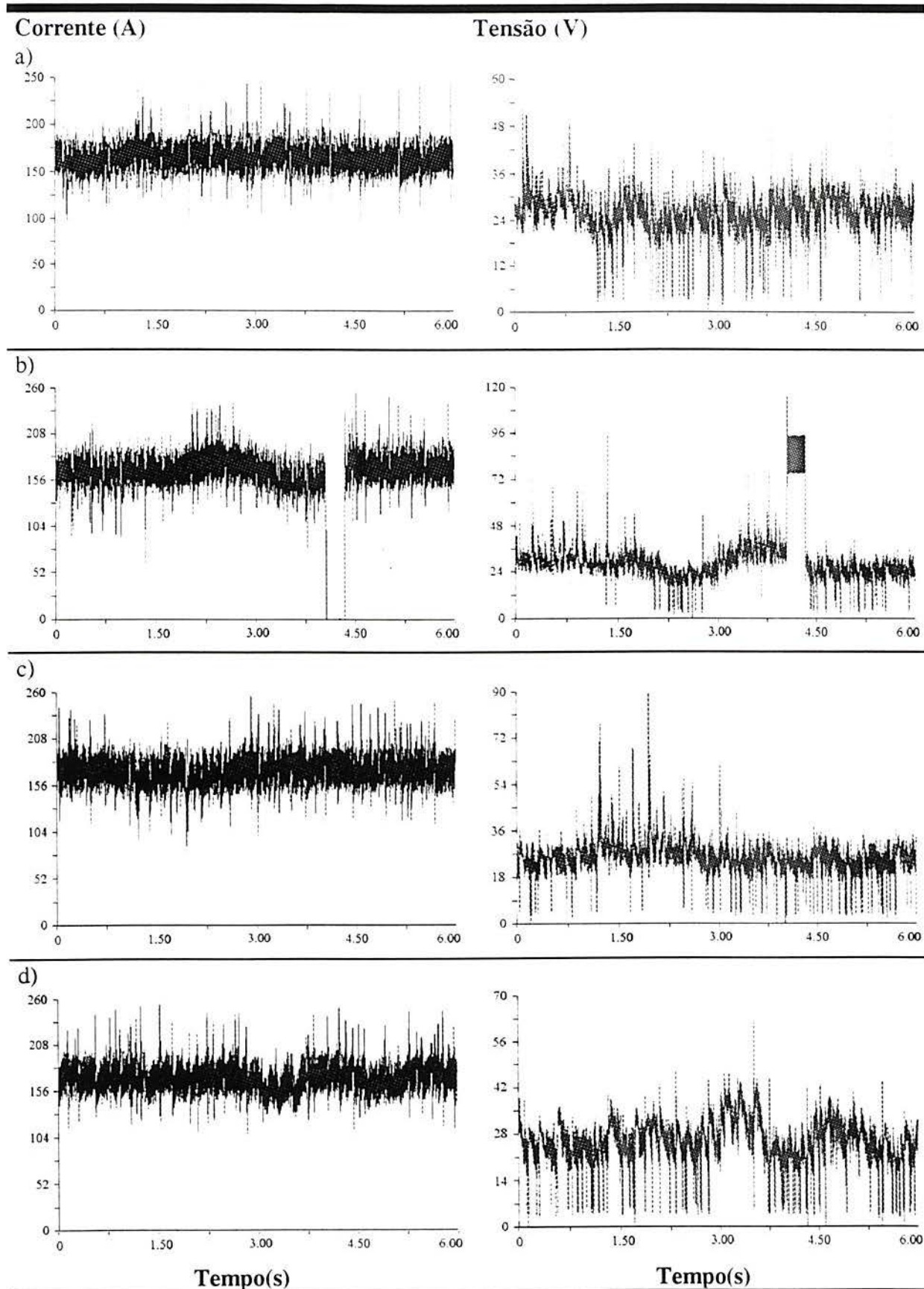


Fig. C19 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura TiO₂ a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

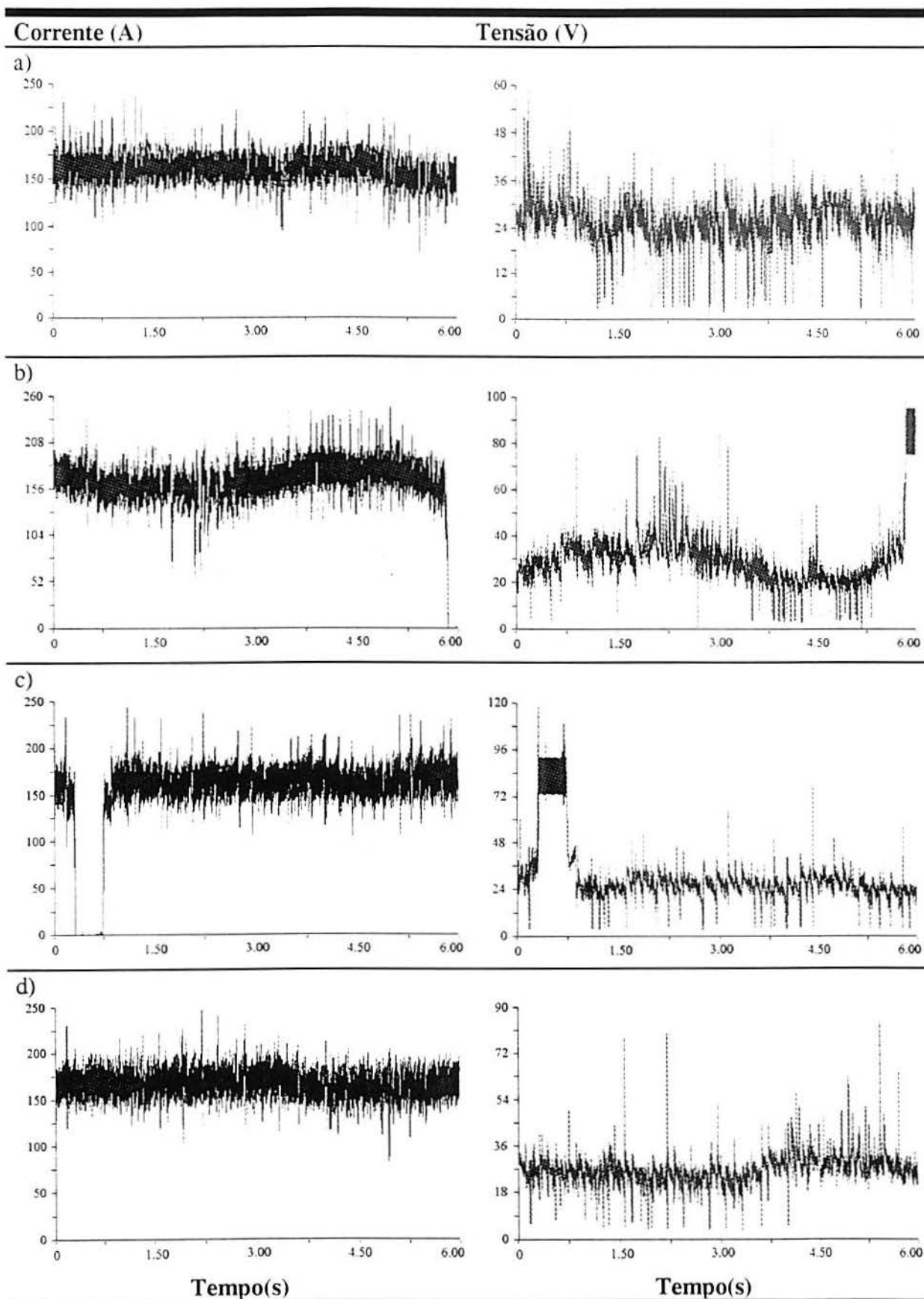


Fig. C20 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura TiO₂ a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

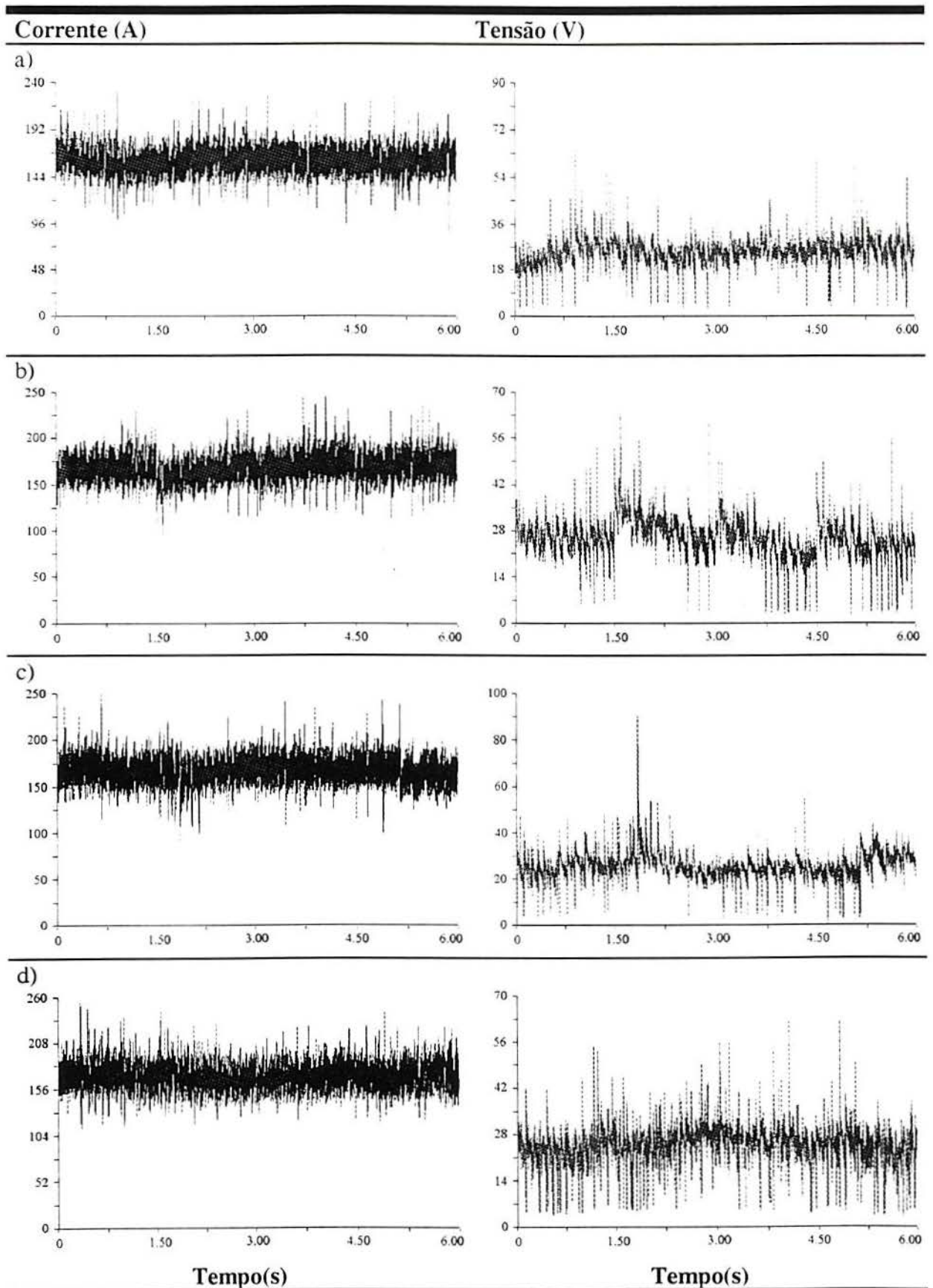


Fig. C21 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem obtidos com a mistura TiO₂ a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

APÊNDICE D - FFT DE CORRENTE E TENSÃO DE SOLDAGEM

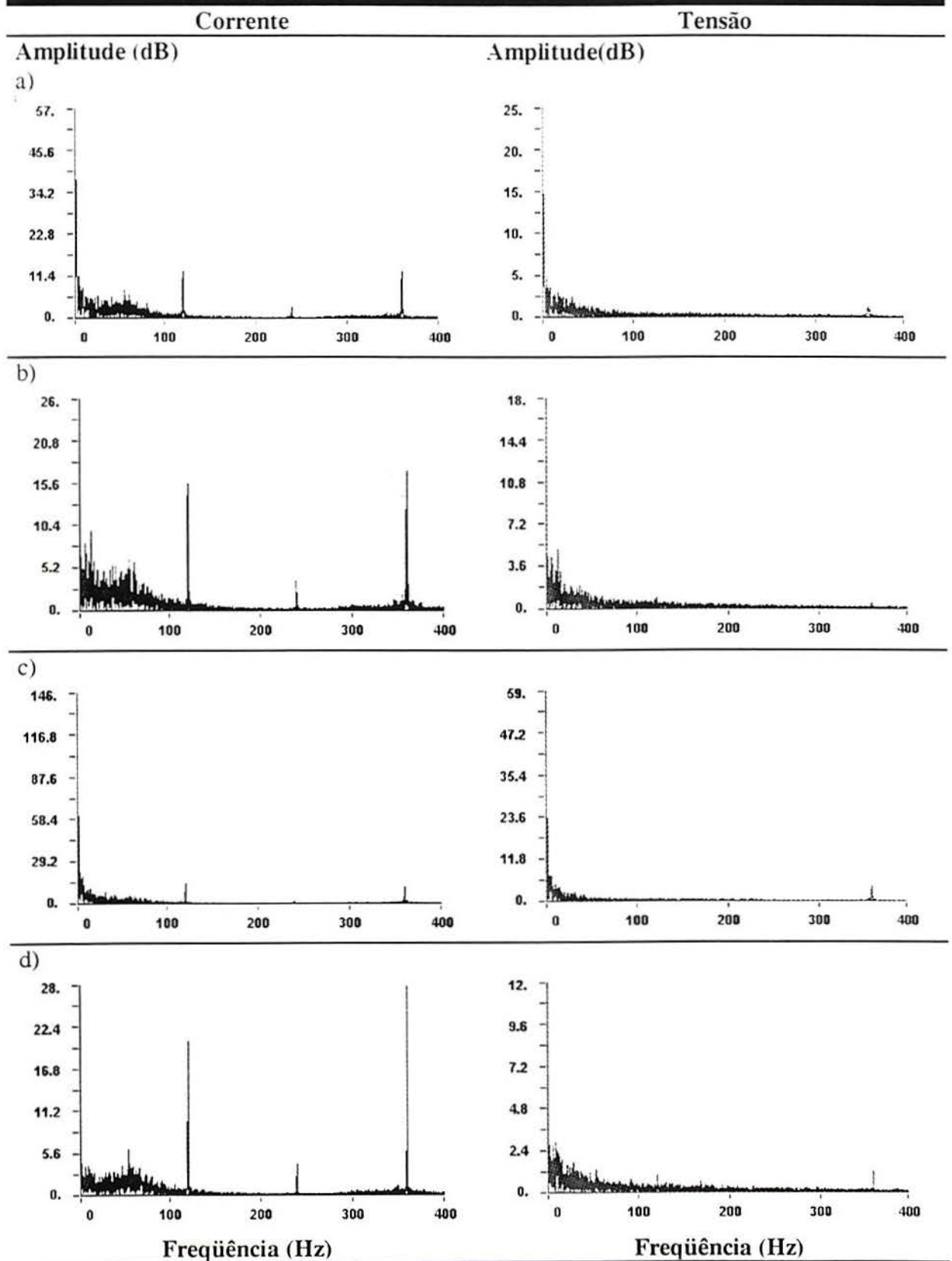


Fig. D1 - FFT de corrente tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

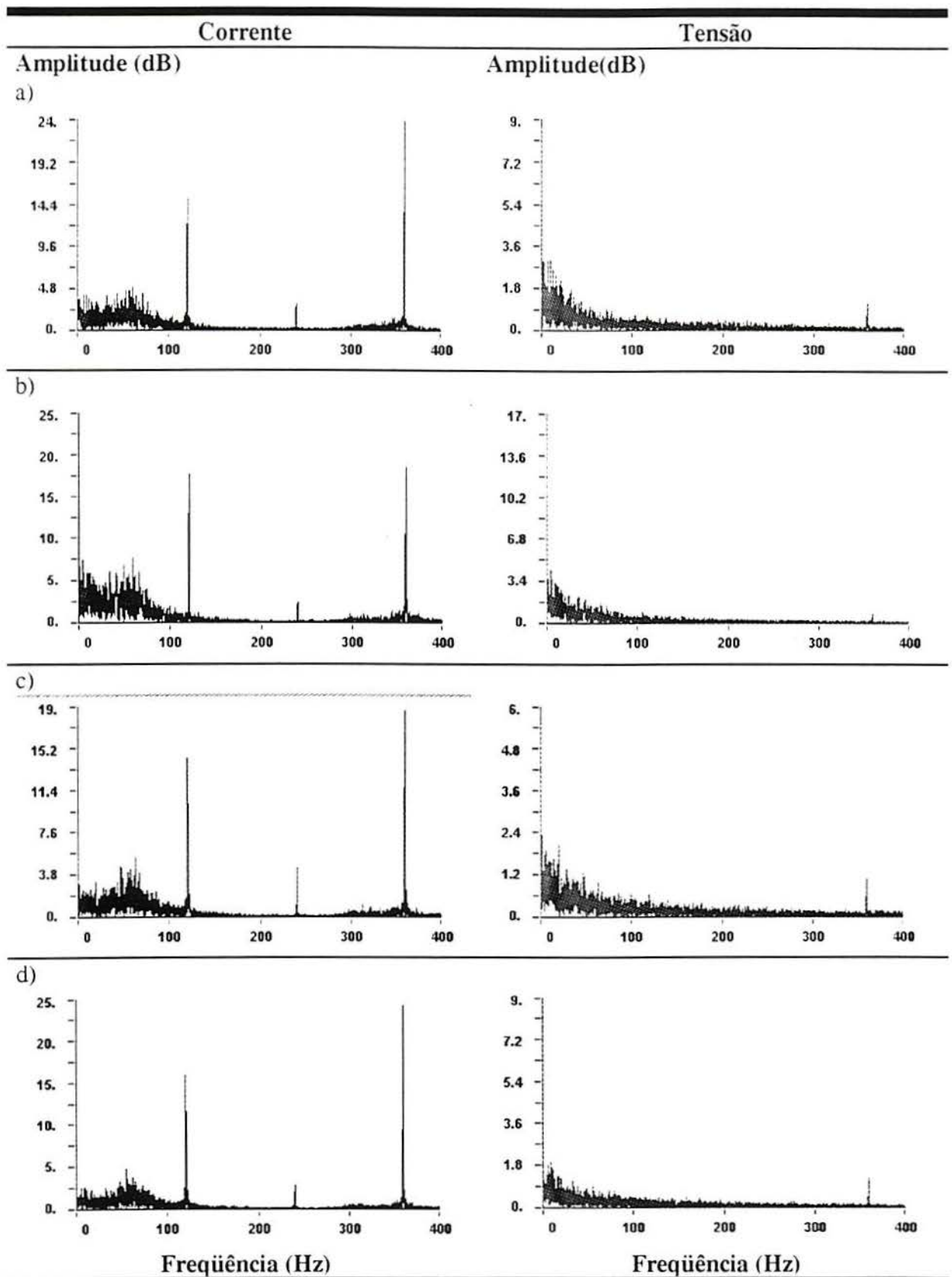


Fig. D2 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

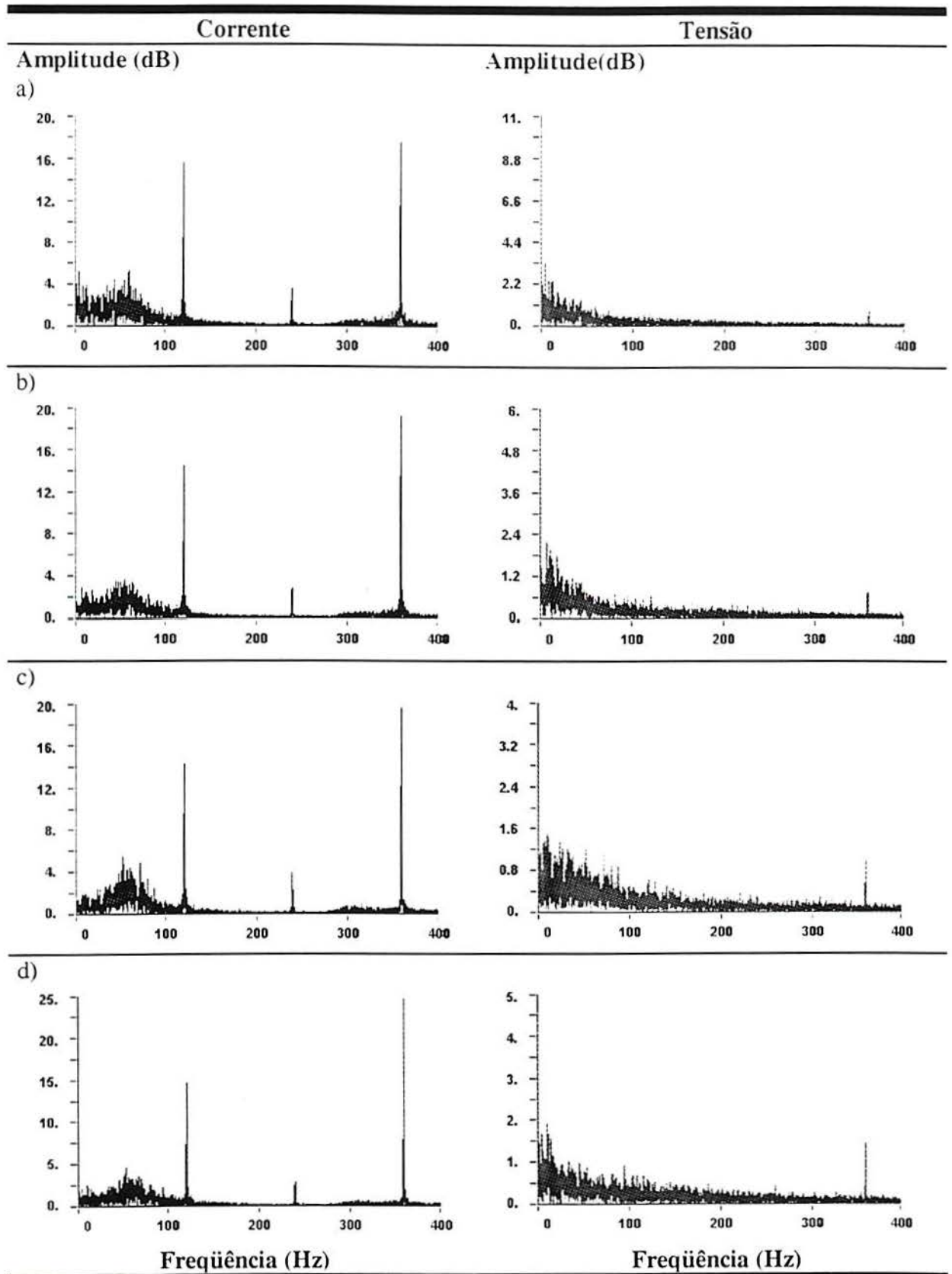


Fig. D3 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

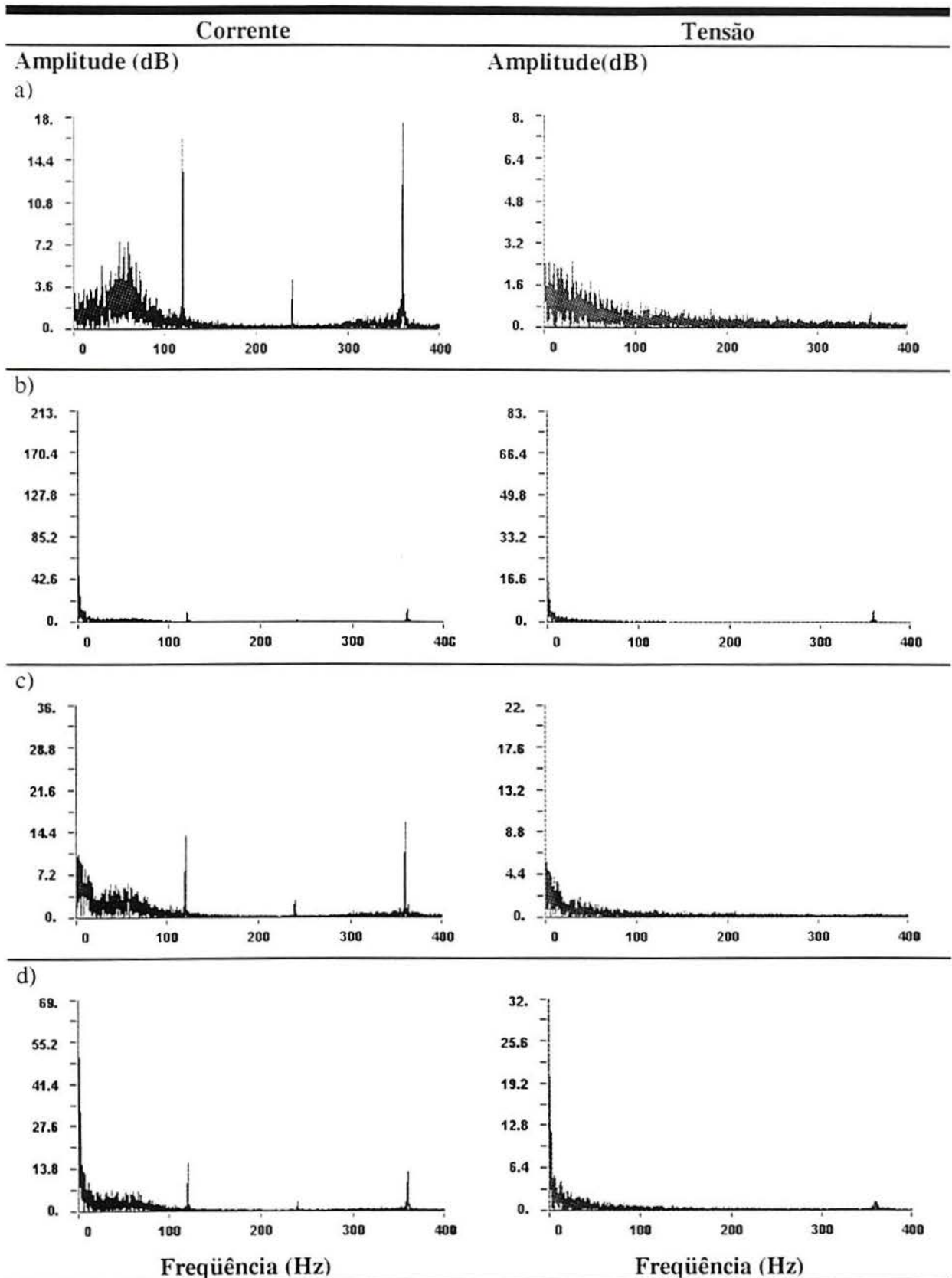


Fig. D4 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

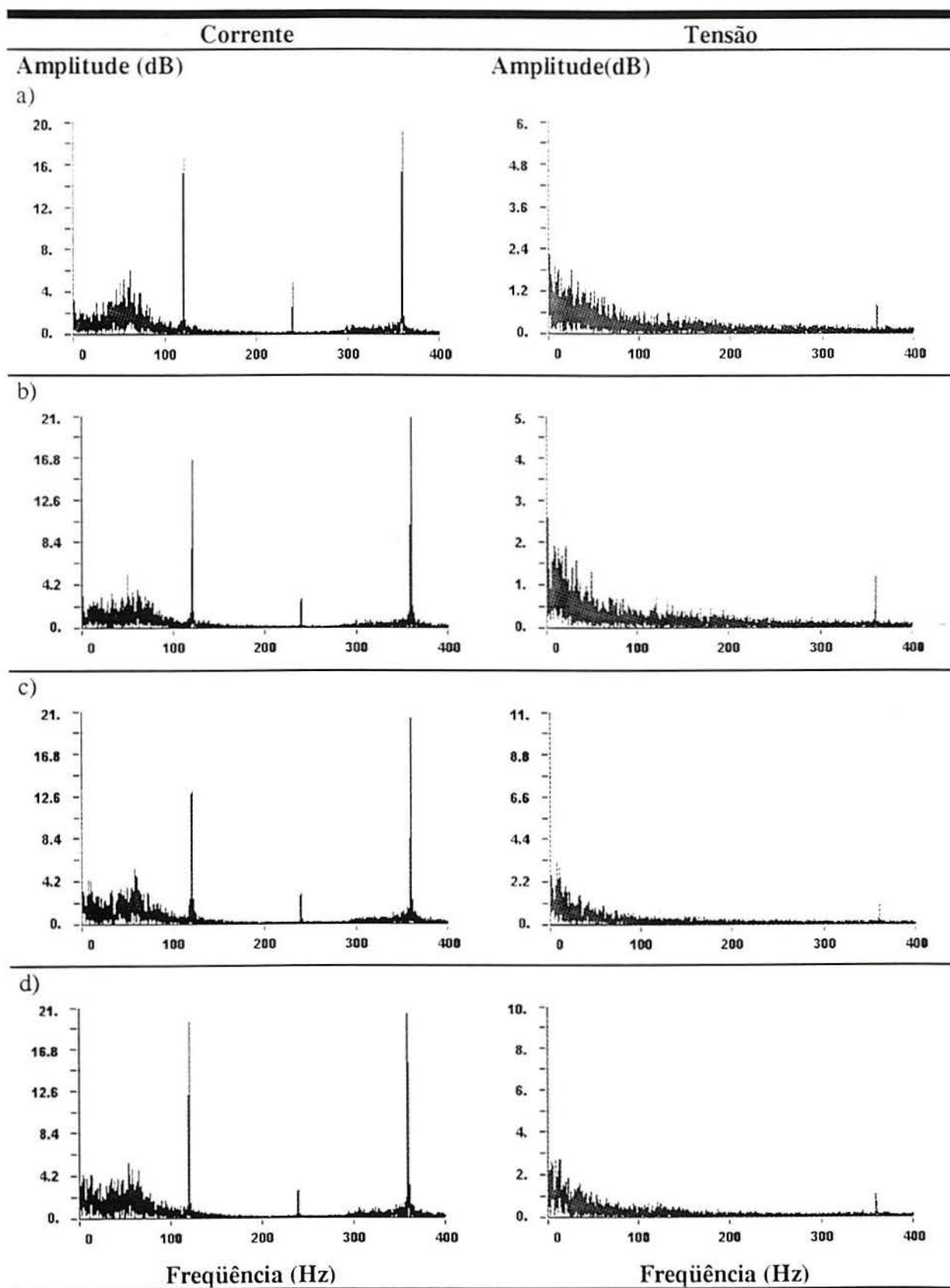


Fig. D5 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

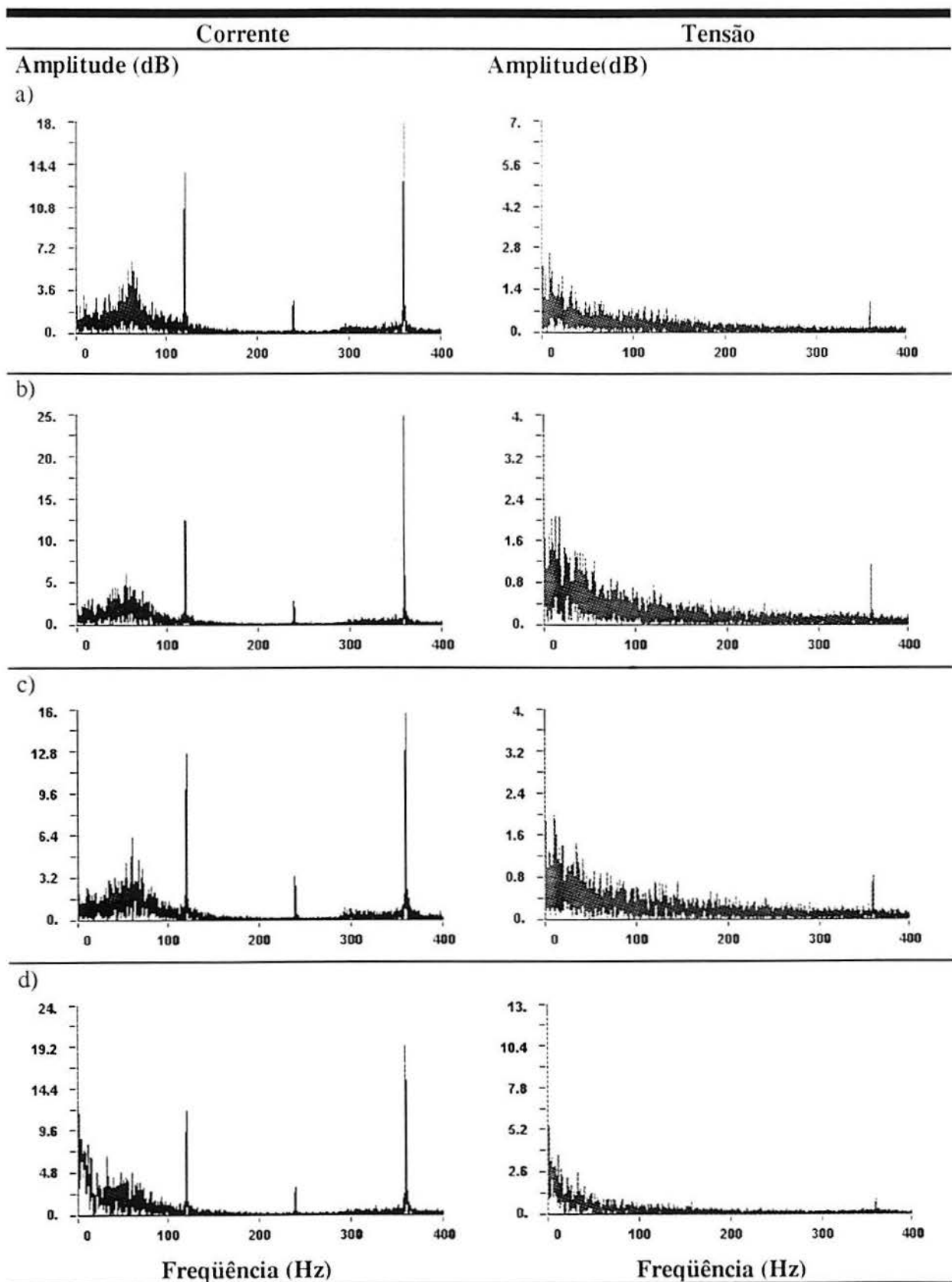


Fig. D6 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

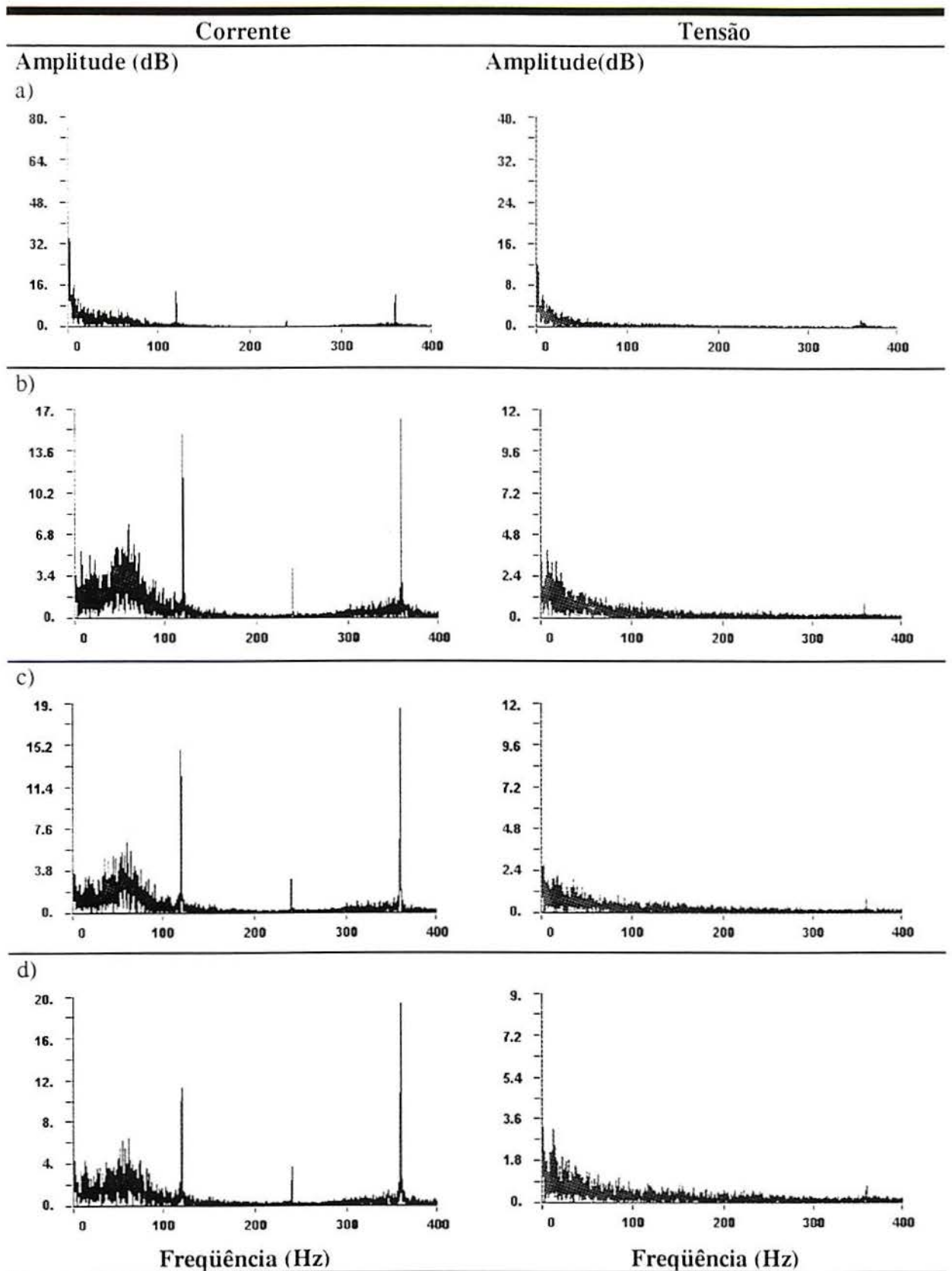


Fig. D7 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura AlO2 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

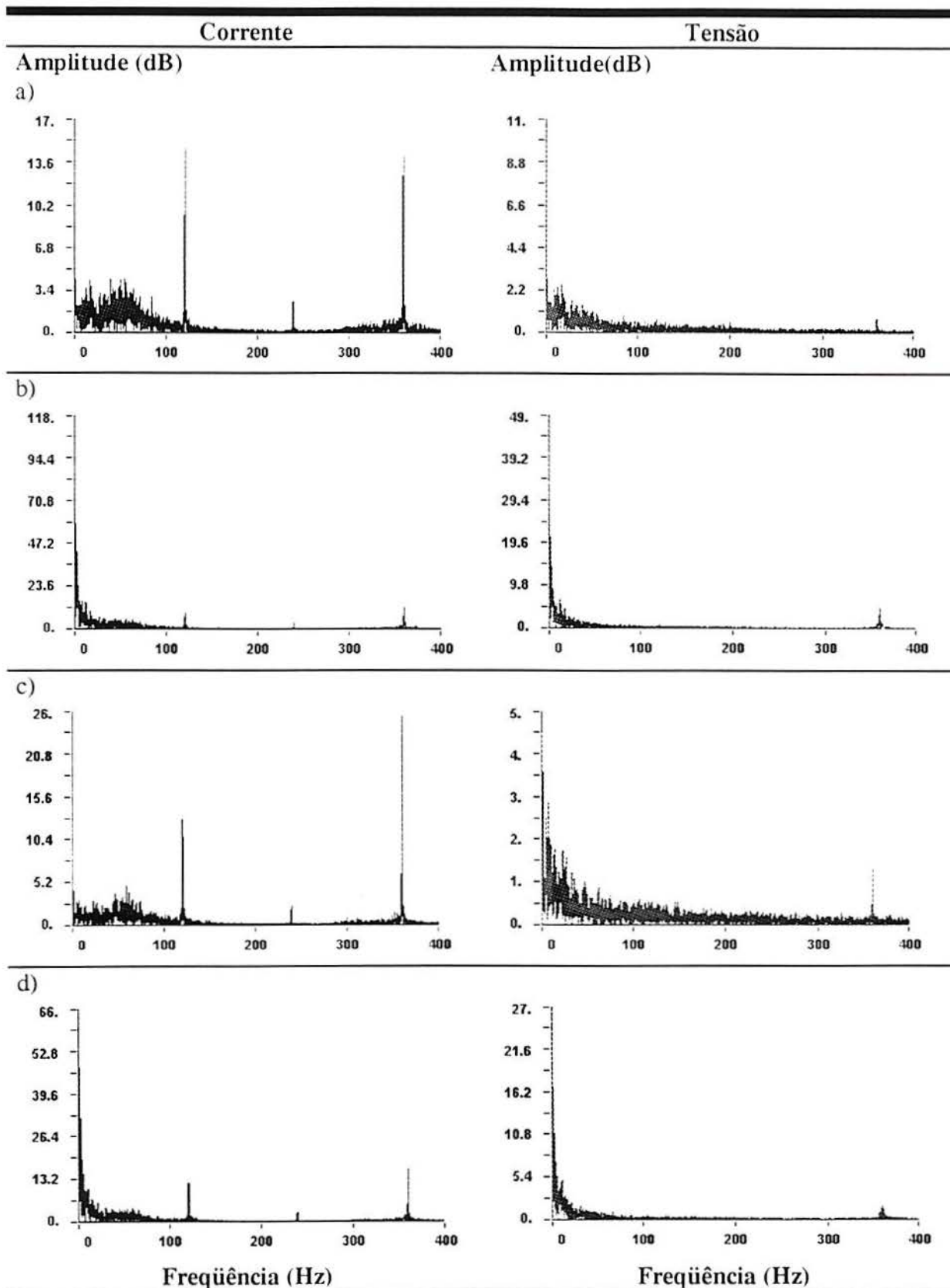


Fig. D8 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

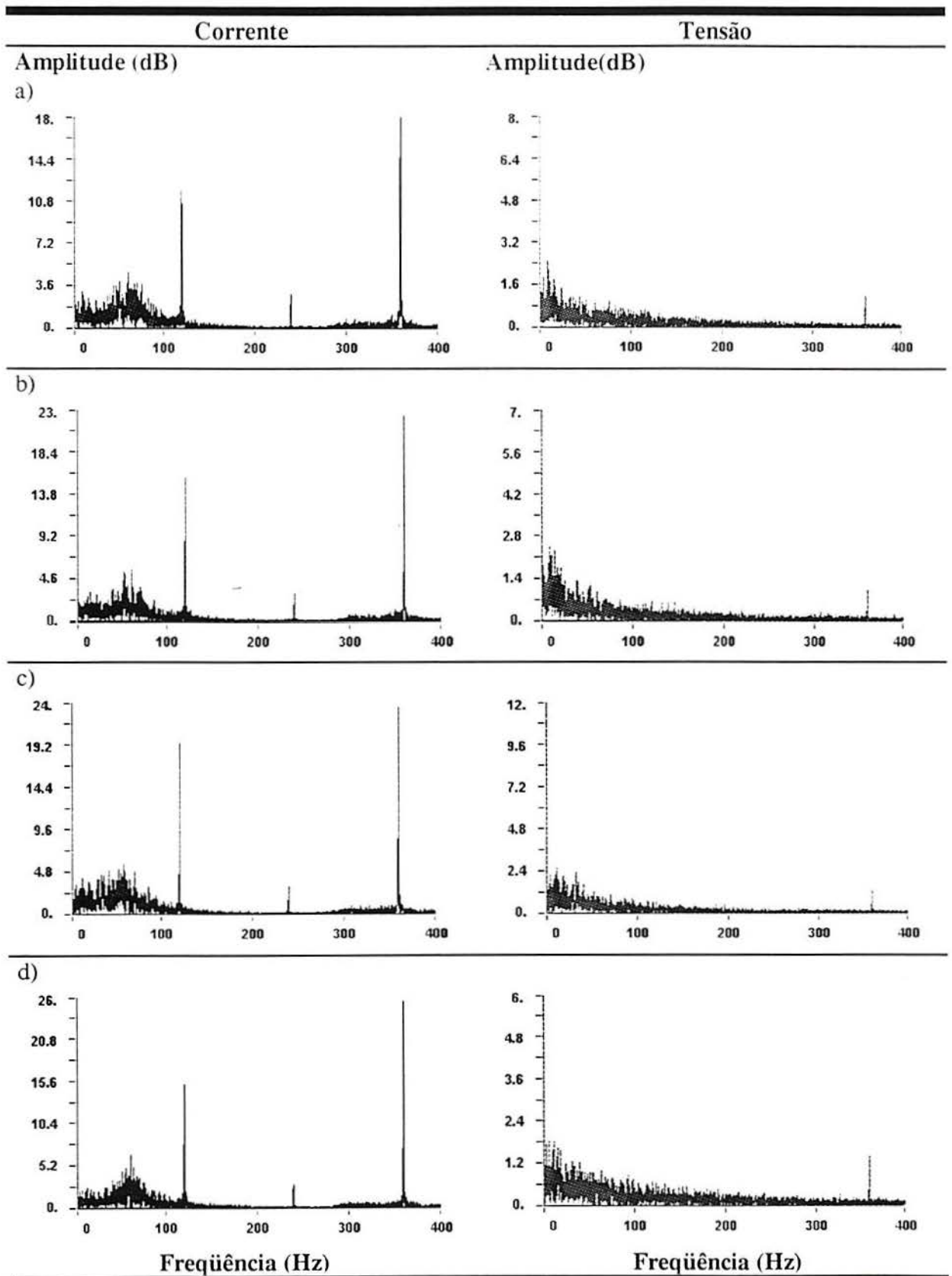


Fig. D9 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

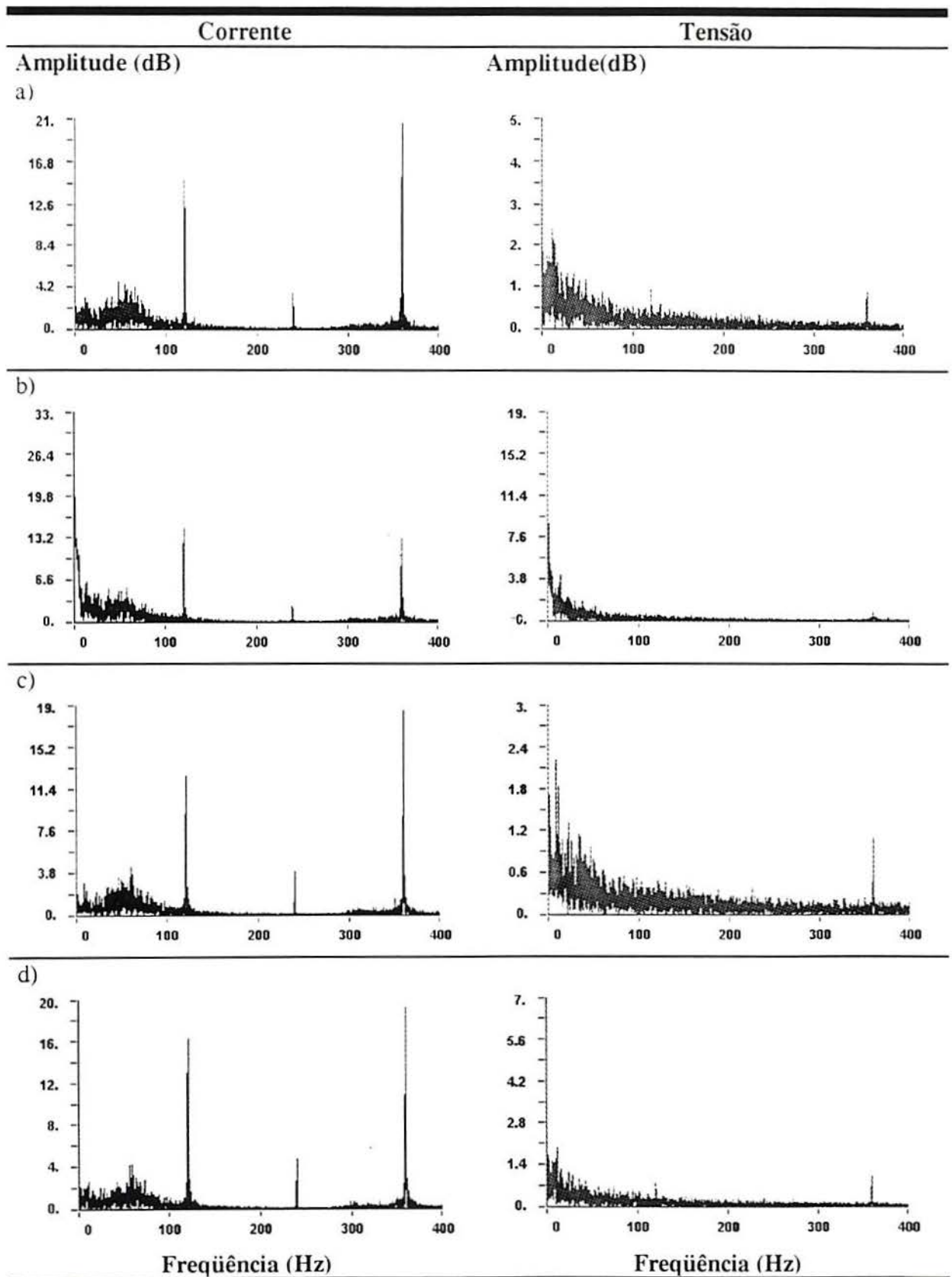


Fig. D10 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

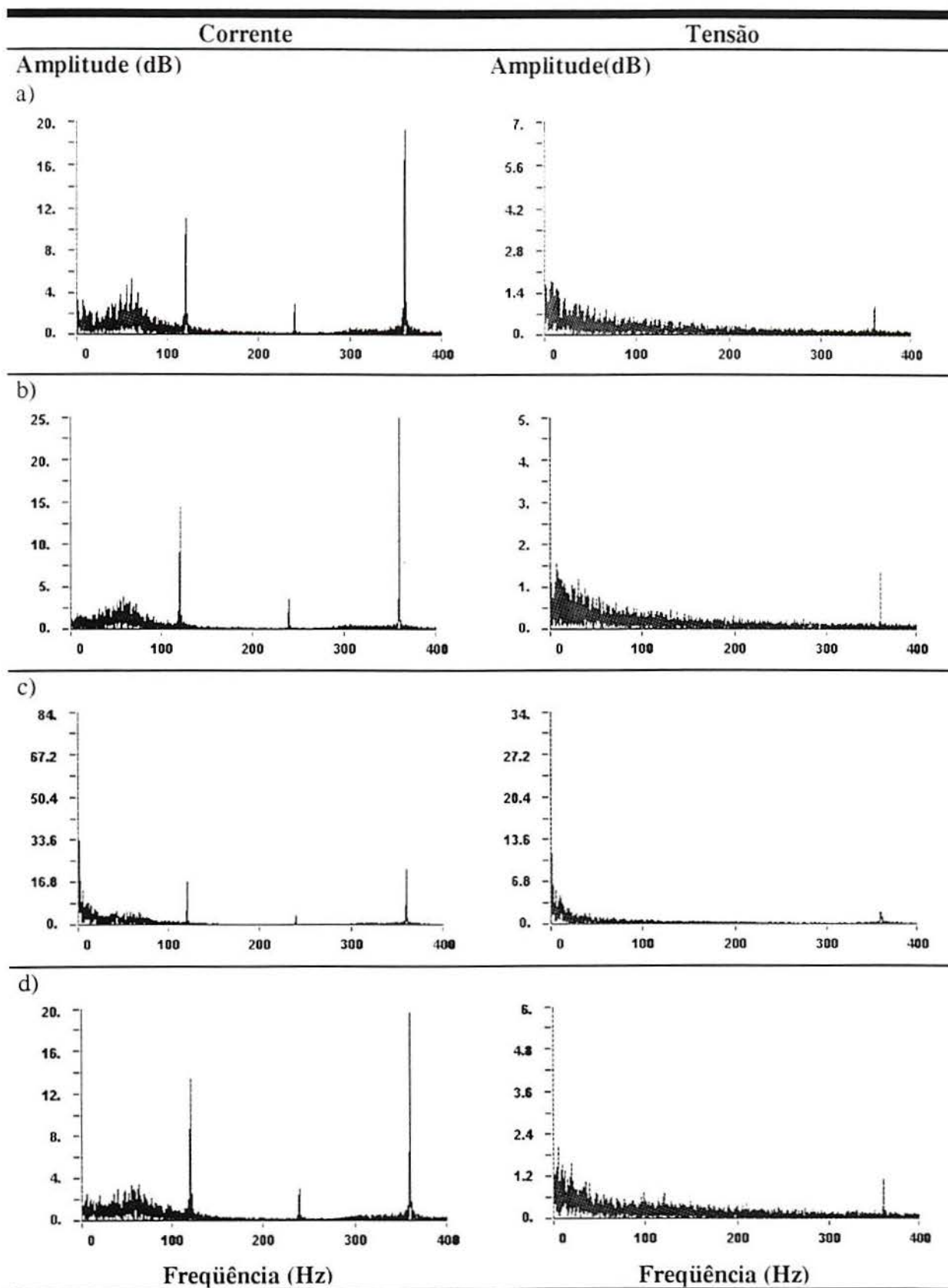


Fig. D11 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

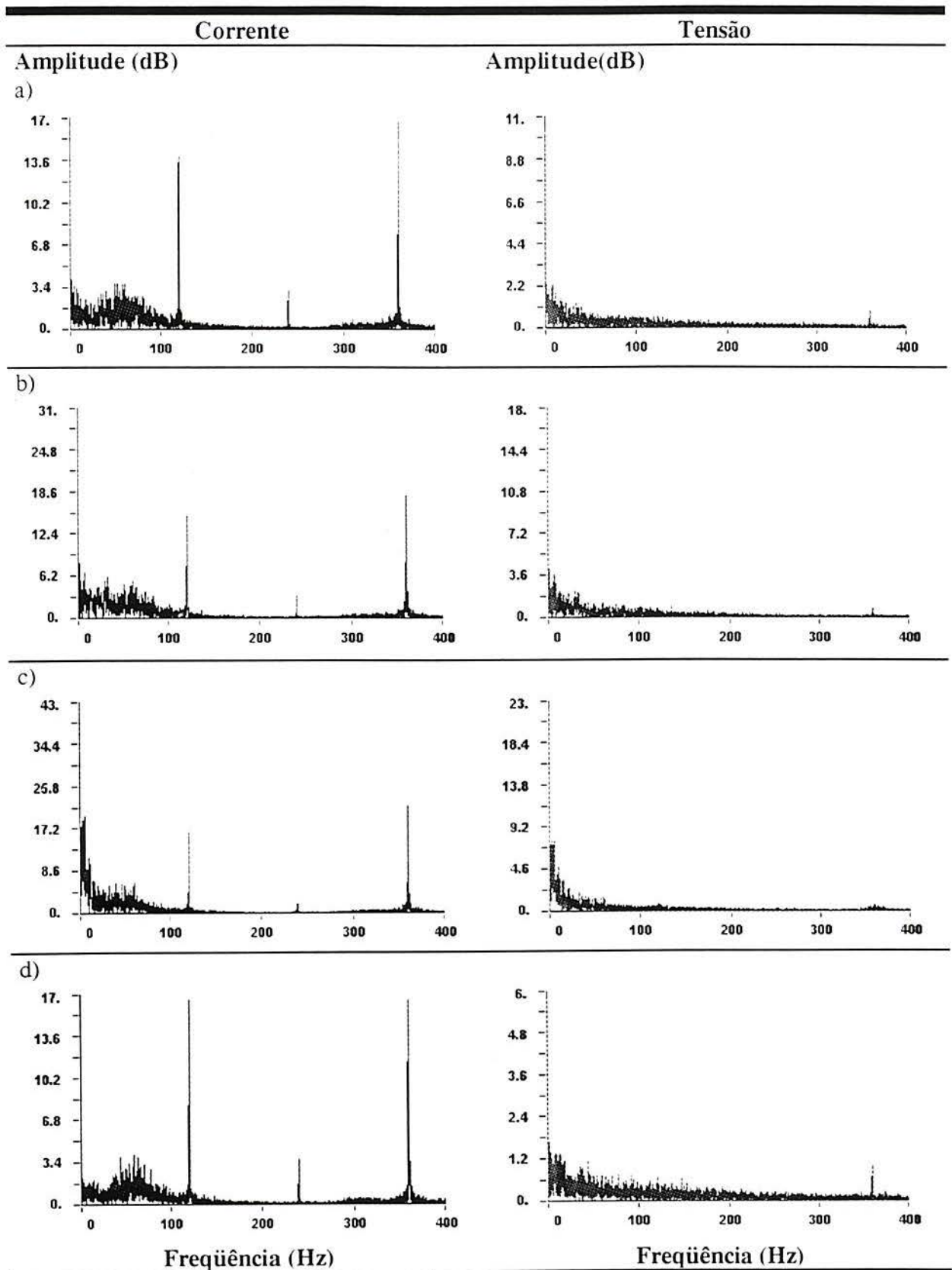


Fig. D12 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

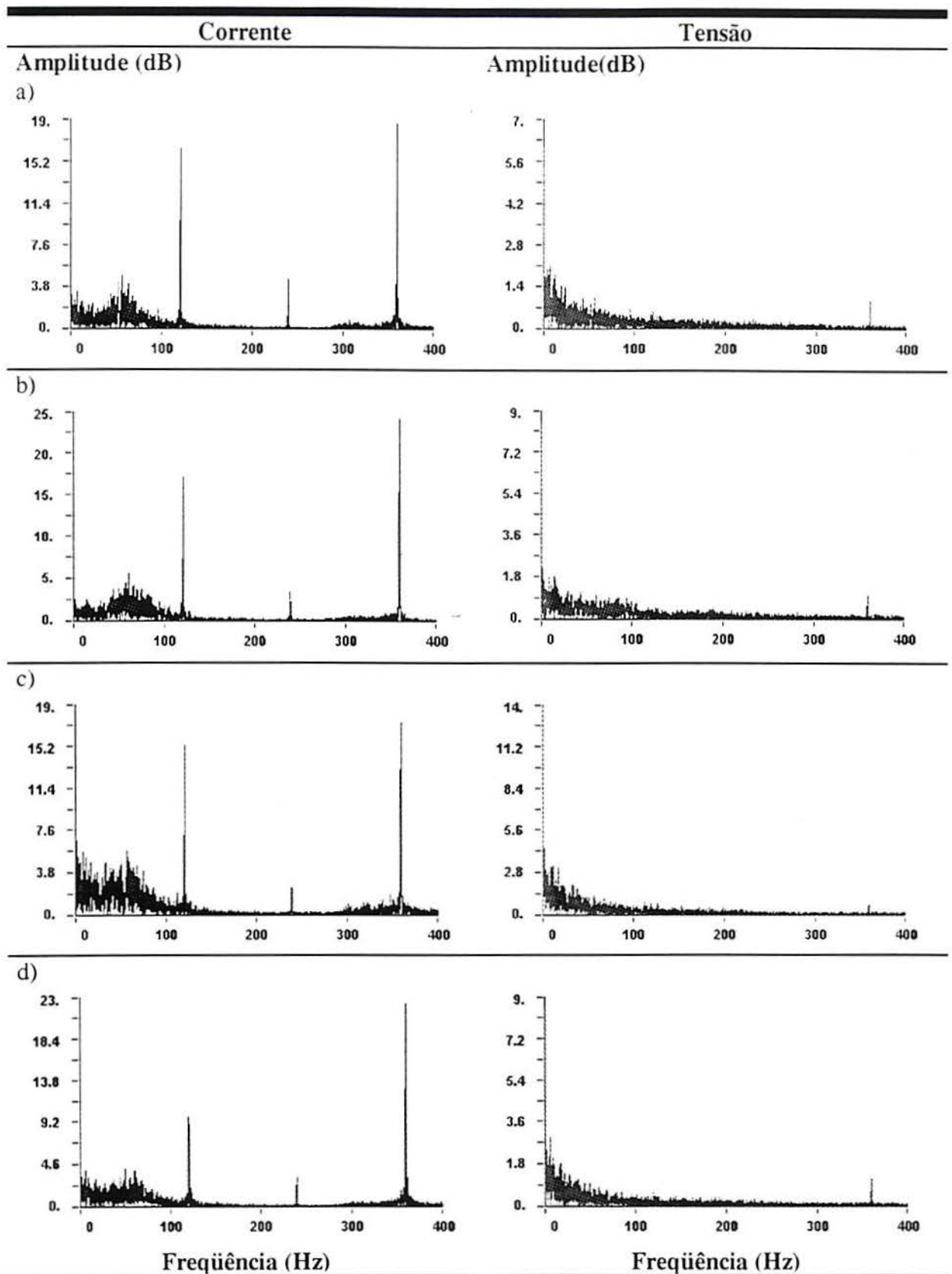


Fig. D13 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura CaO2 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

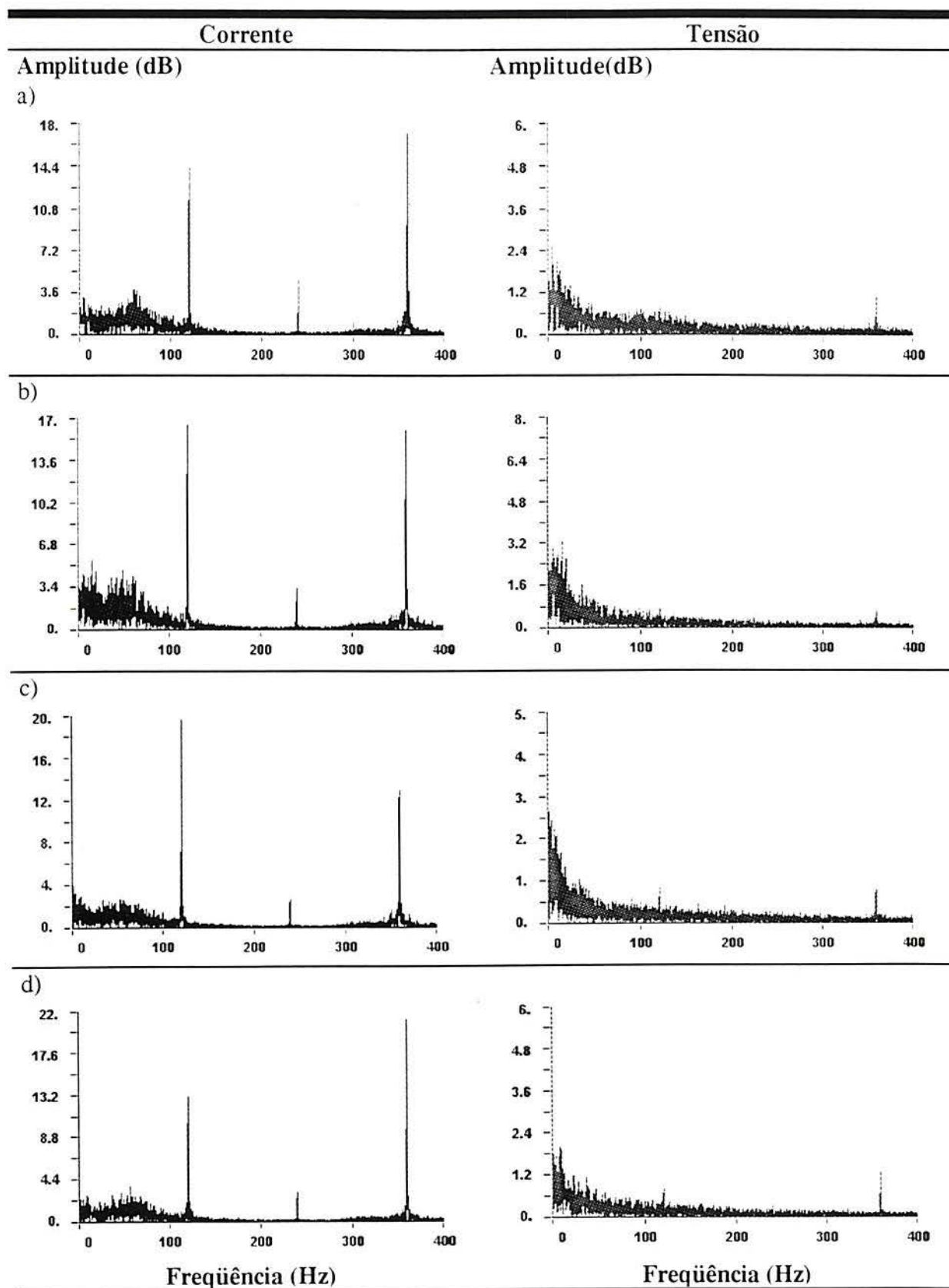


Fig. D14 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ca02 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

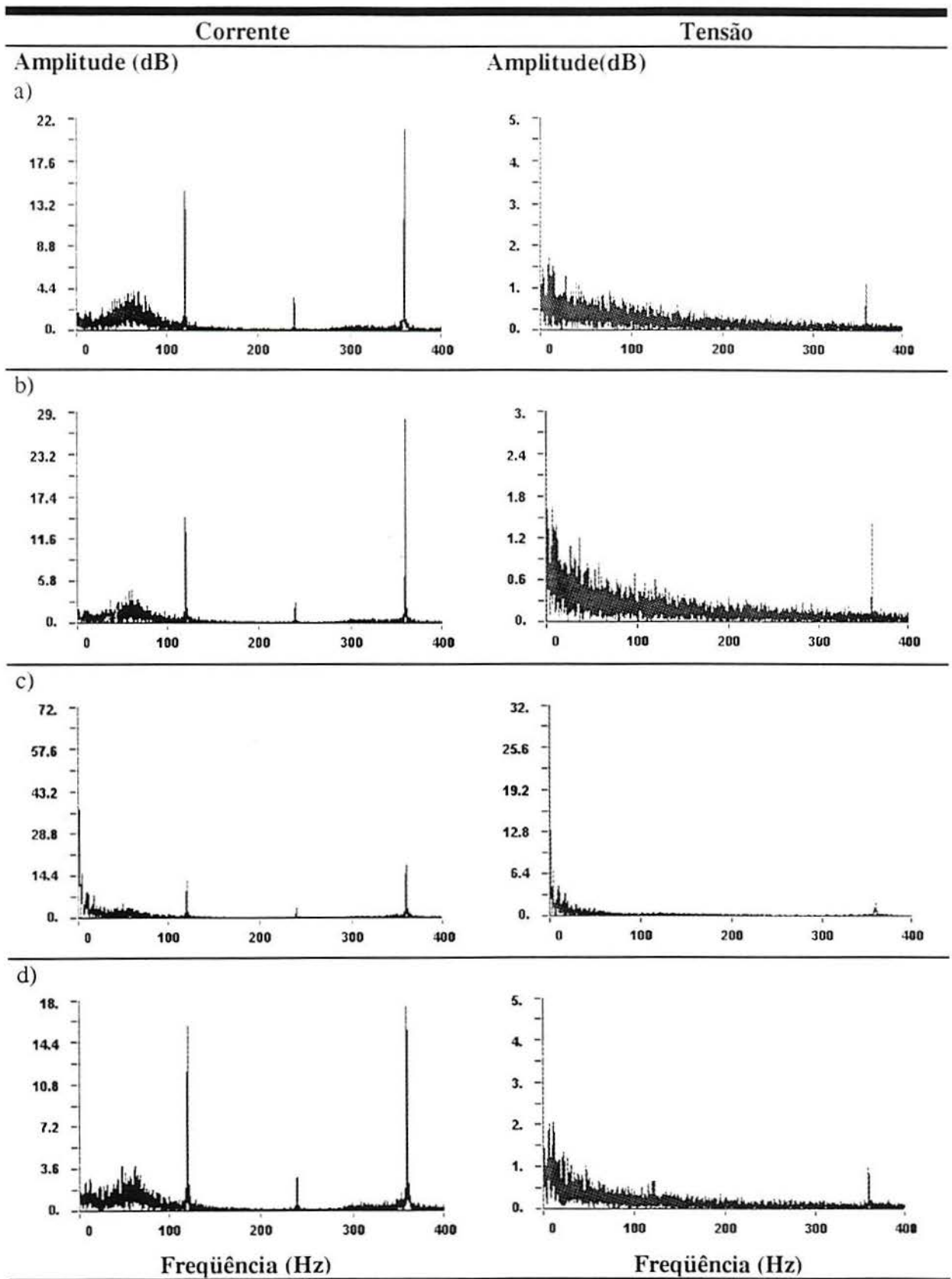


Fig. D15 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura CaO2 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

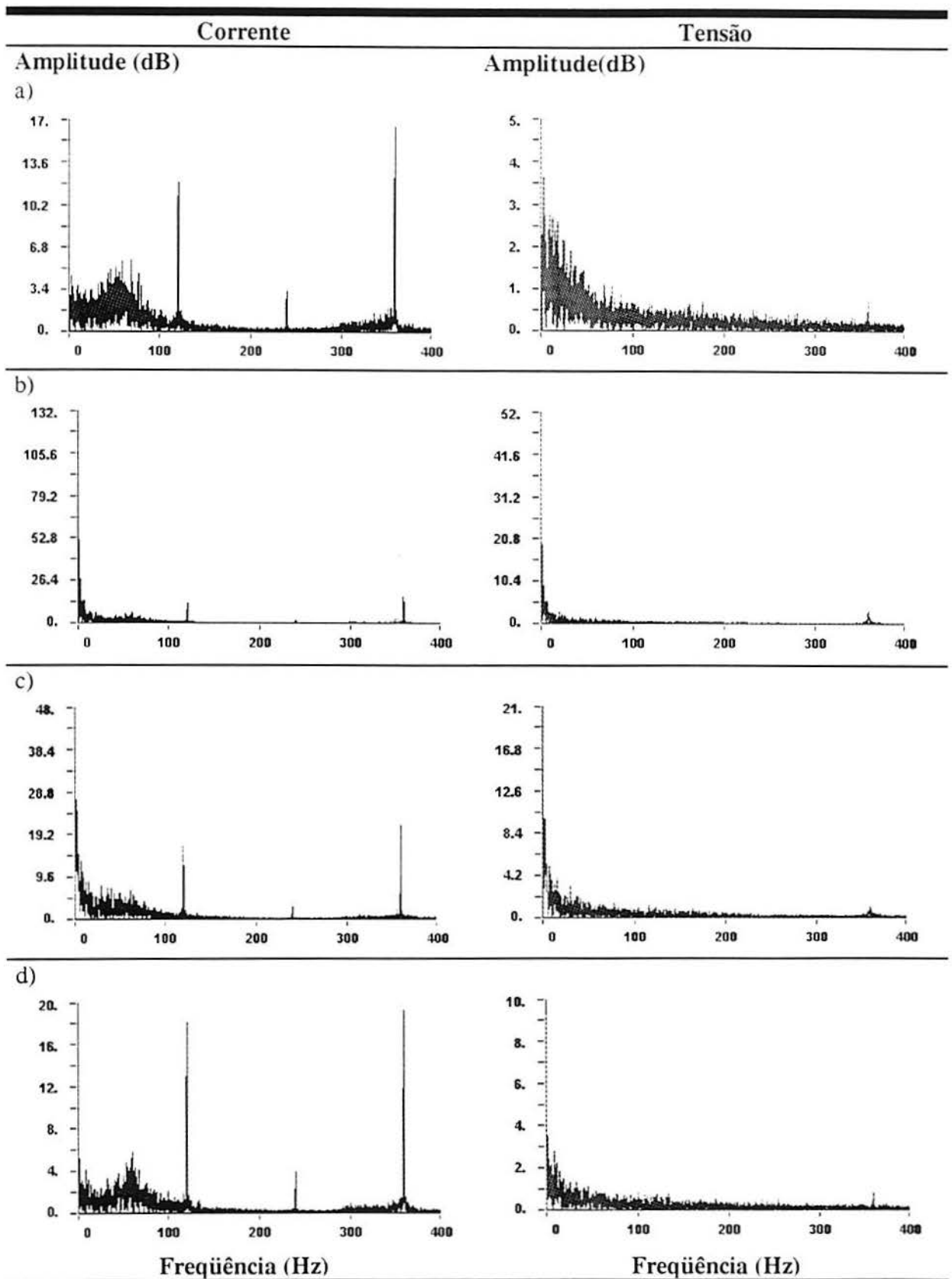


Fig. D16 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

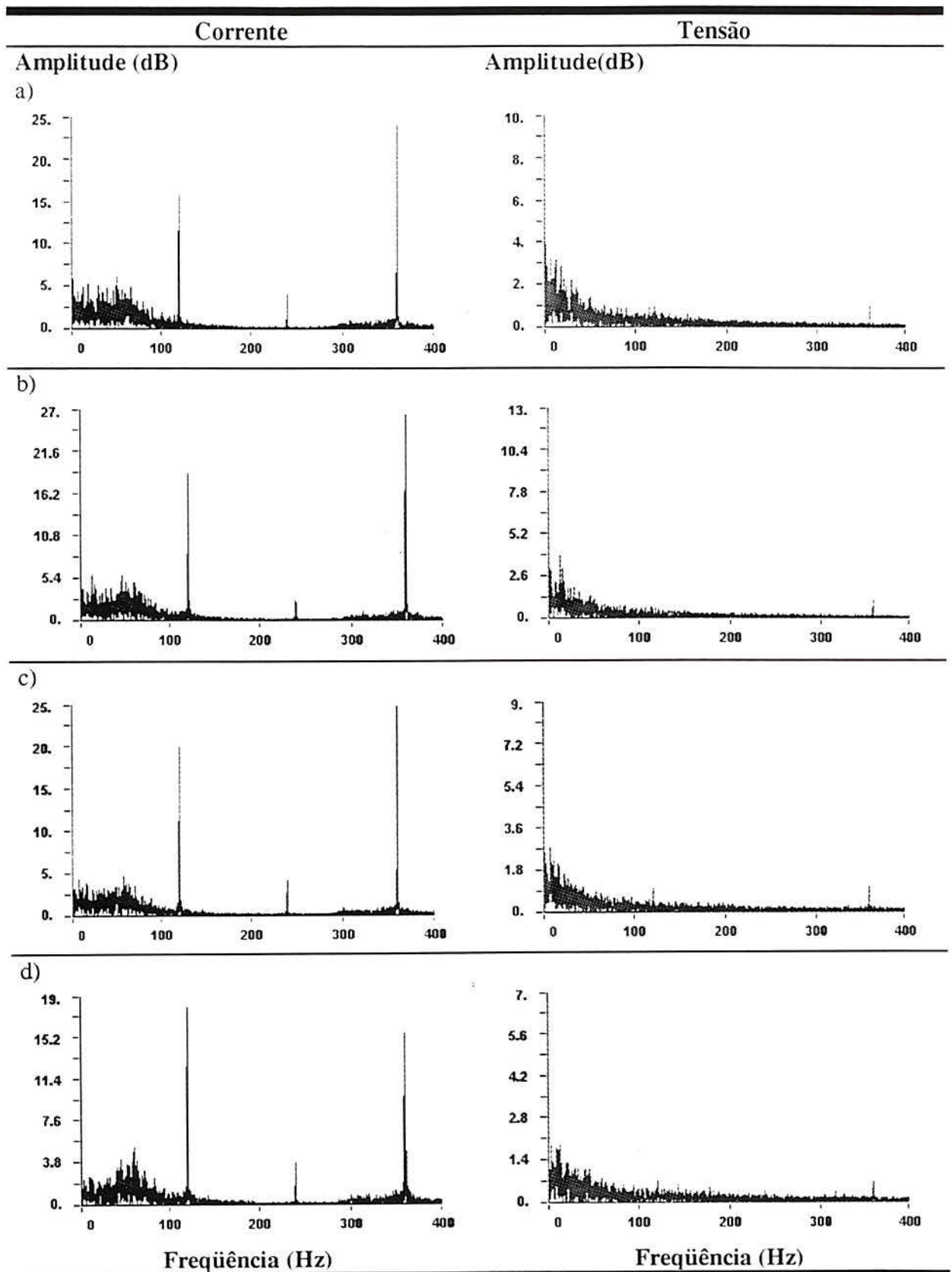


Fig. D17 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 12.5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

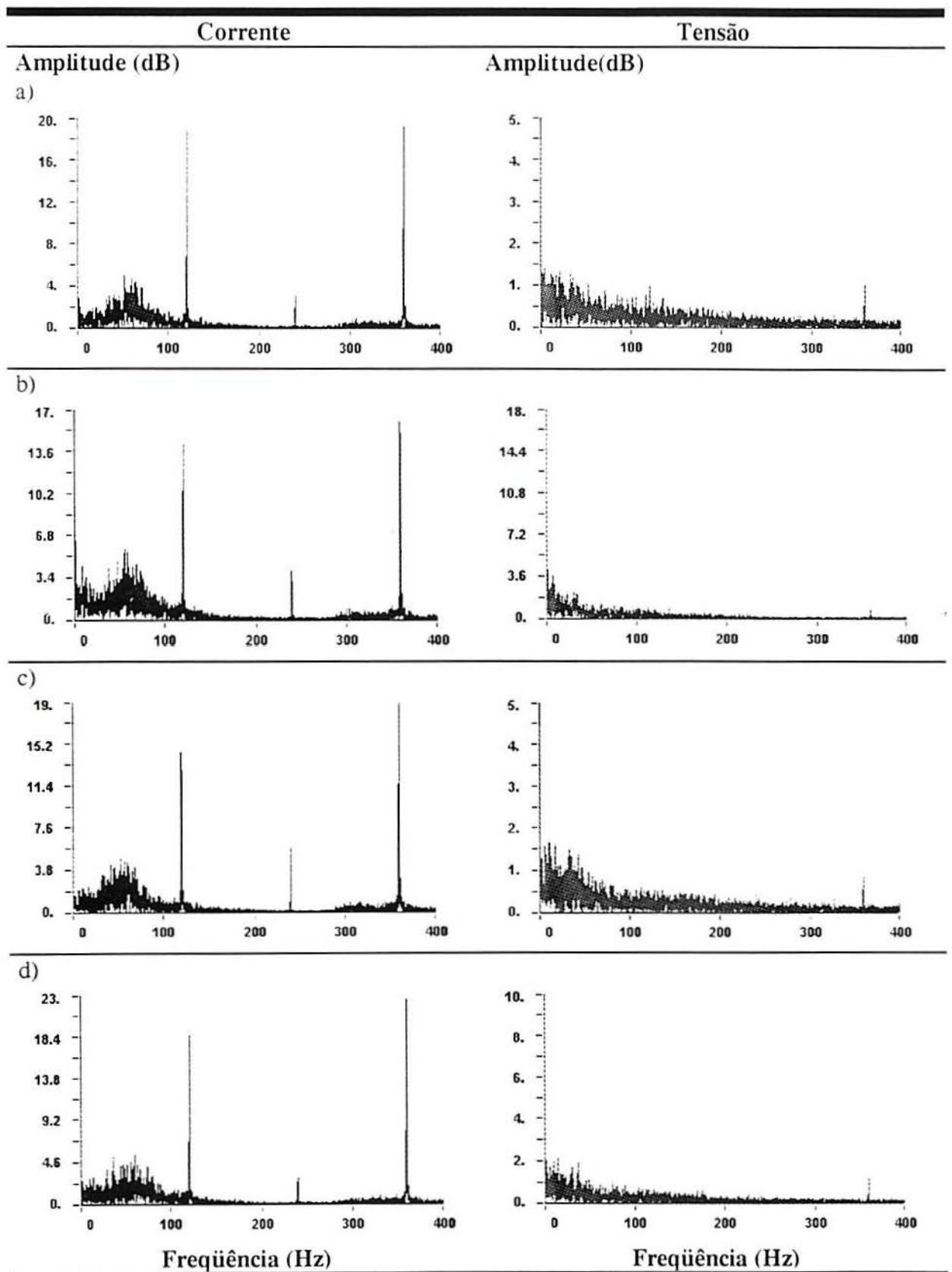


Fig. D18 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

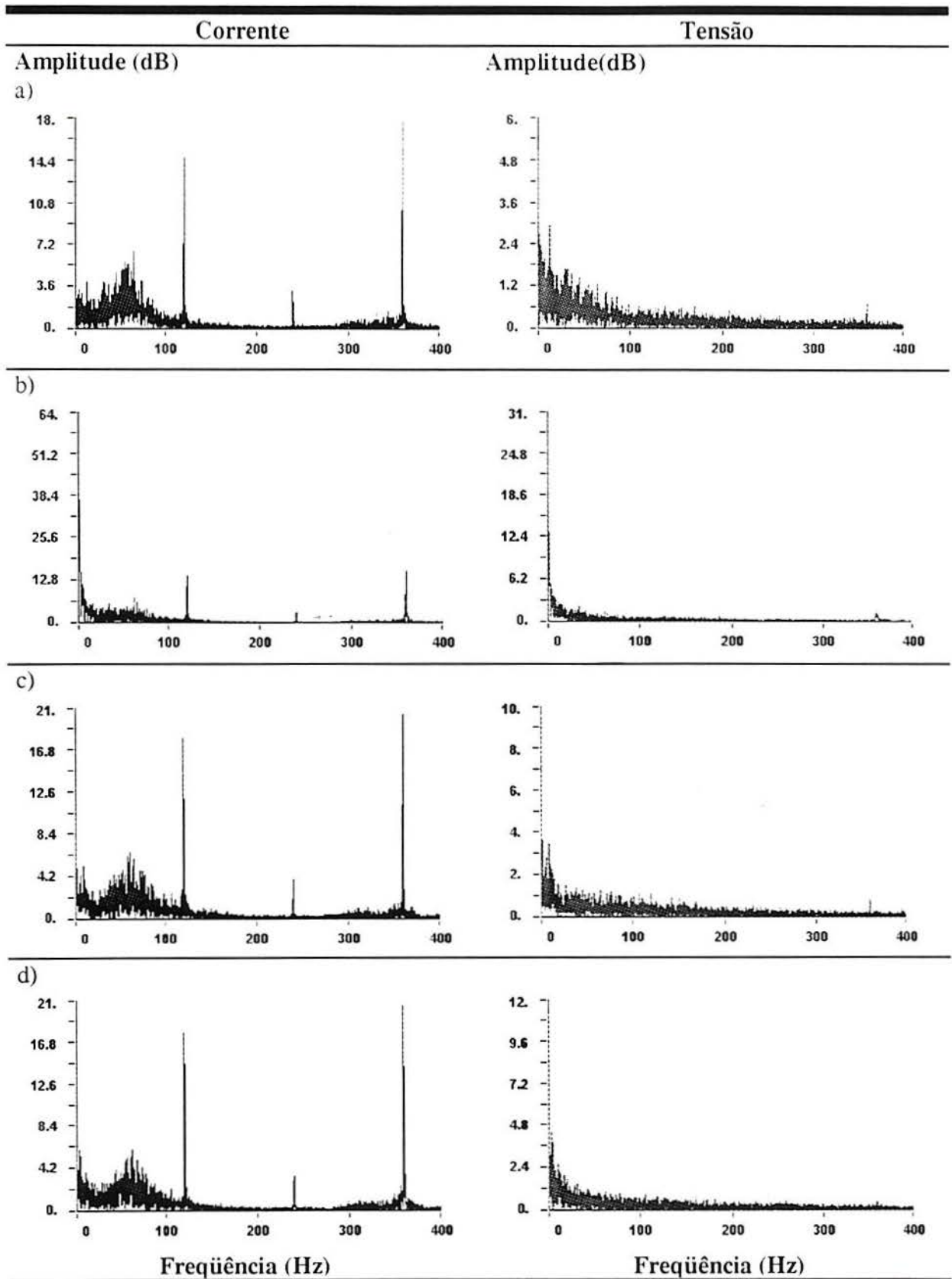


Fig. D19 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura TiO₂ a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

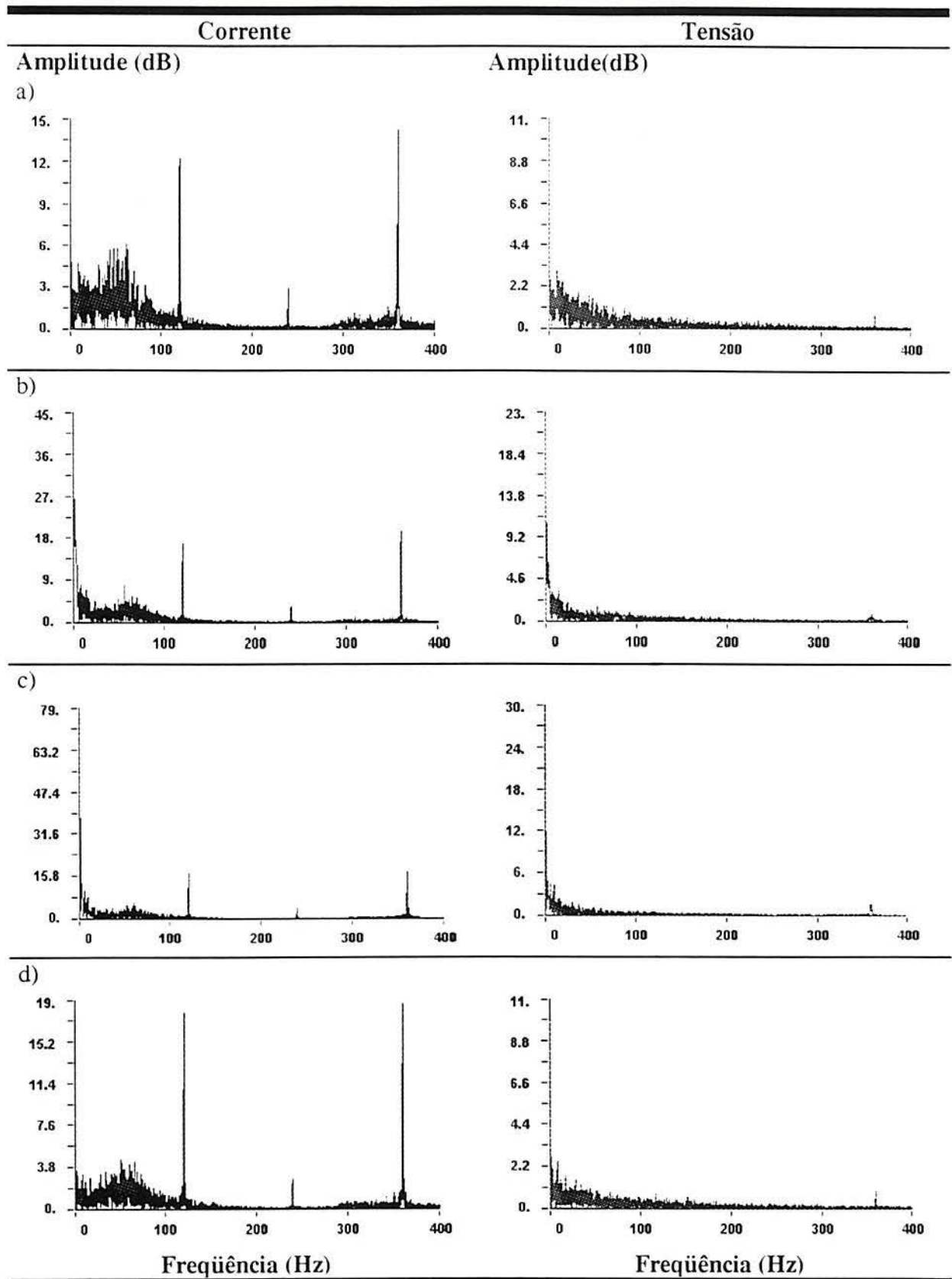


Fig. D20 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura TiO₂ a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

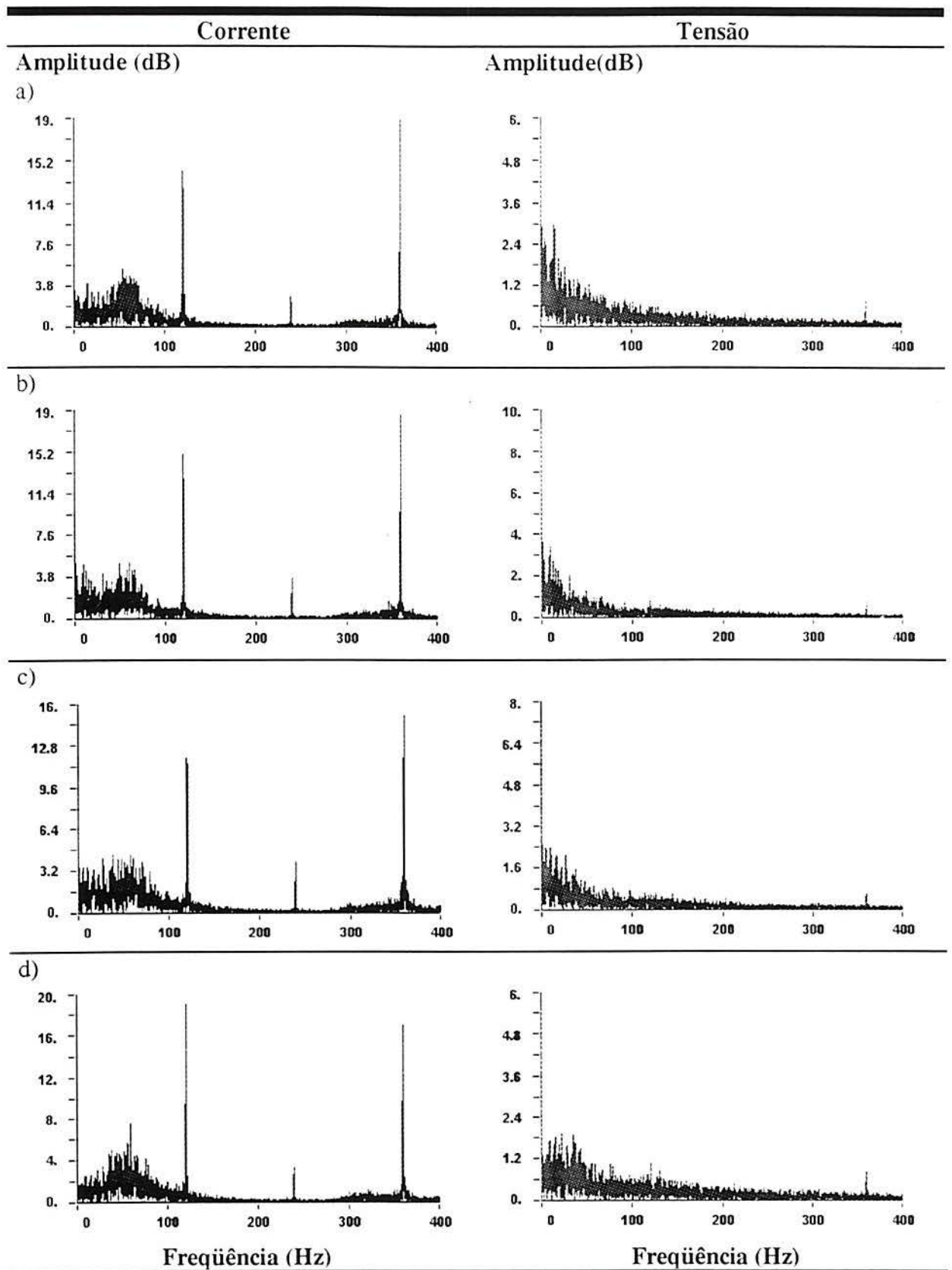


Fig. D21 - FFT de corrente e tensão instantâneas de soldagem obtidos com a mistura TiO2 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

APÊNDICE E - POTÊNCIA RELATIVA E HISTOGRAMA DA TENSÃO DE SOLDAGEM

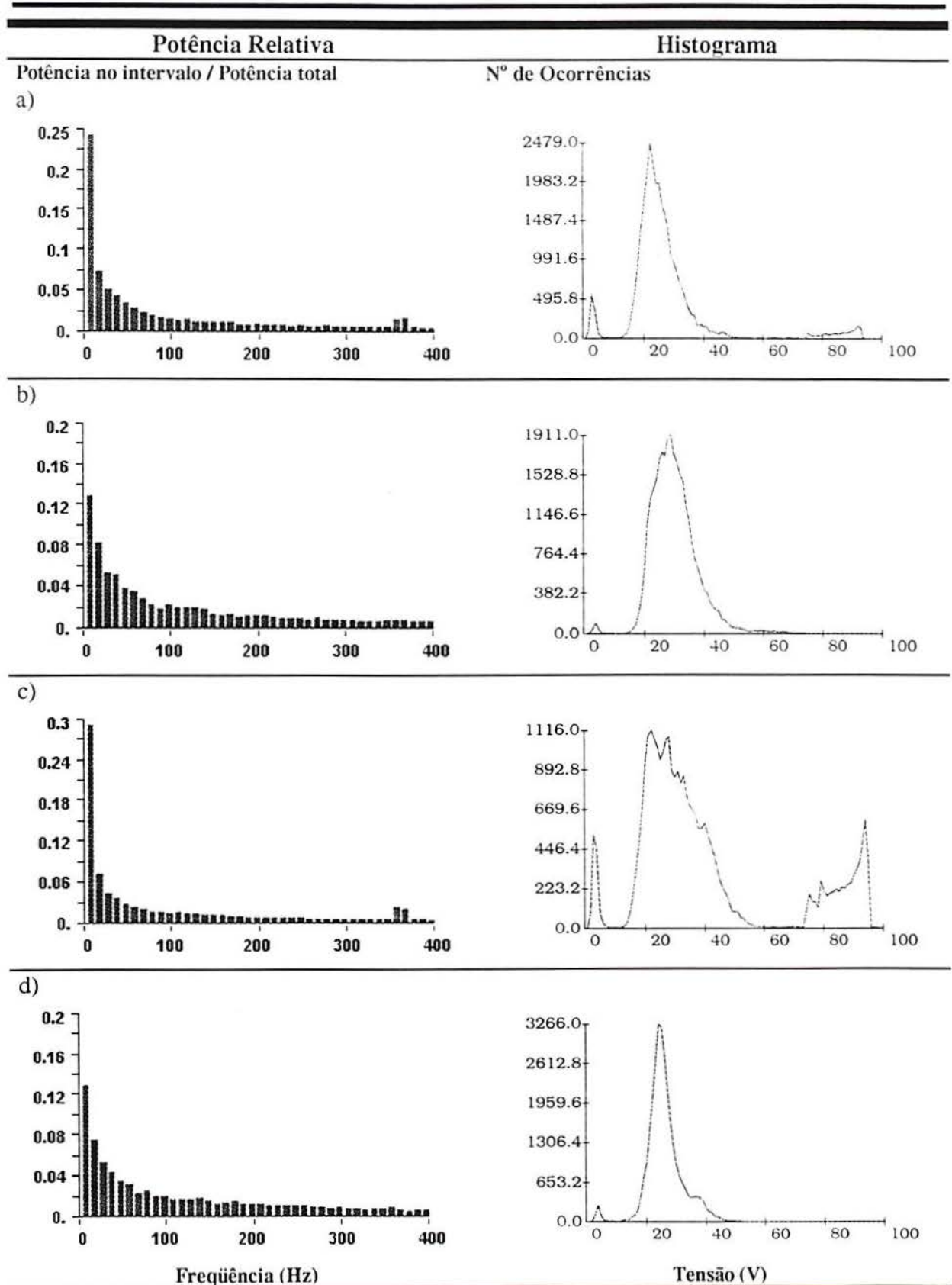


Fig. E1 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

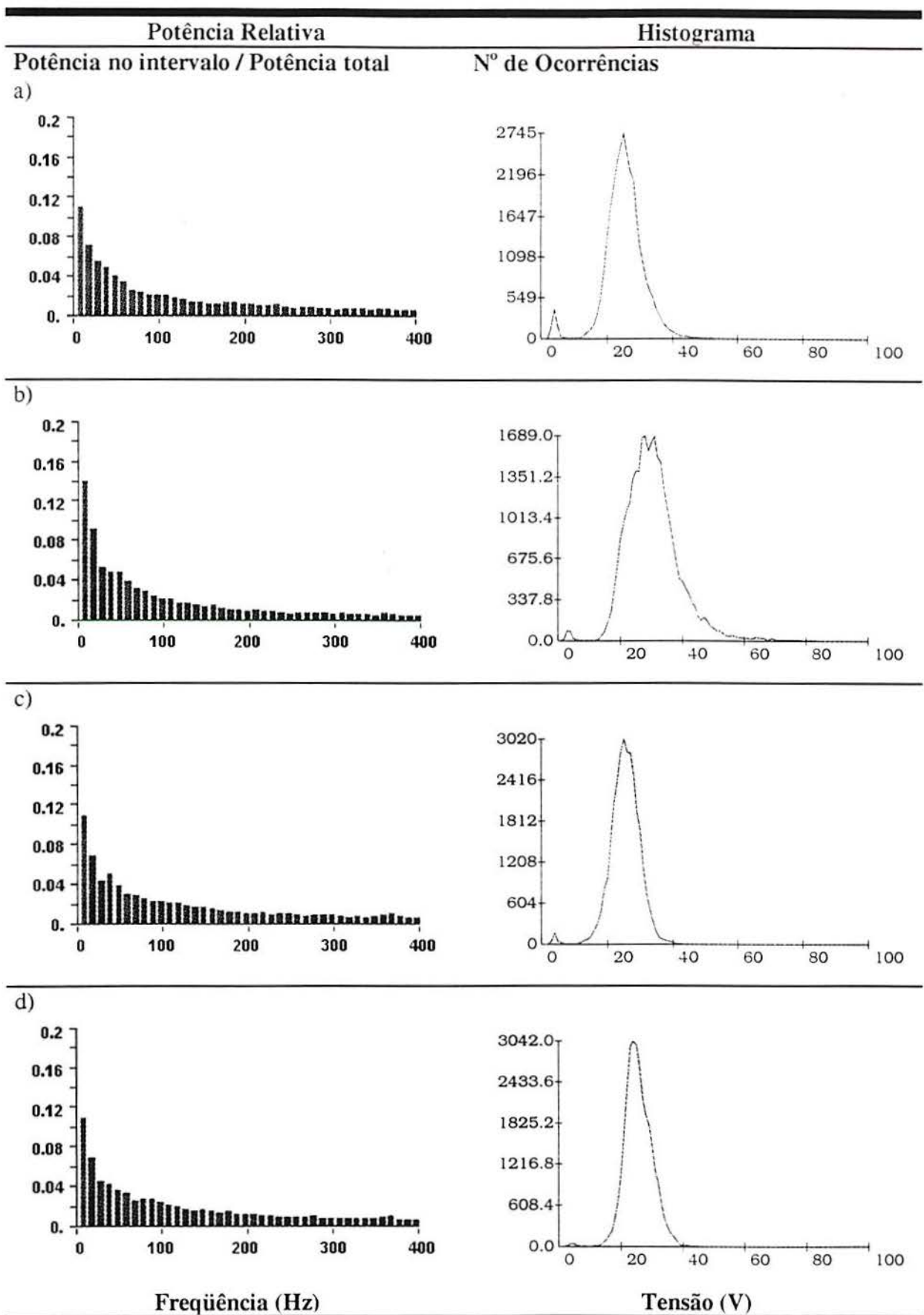


Fig. E2 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

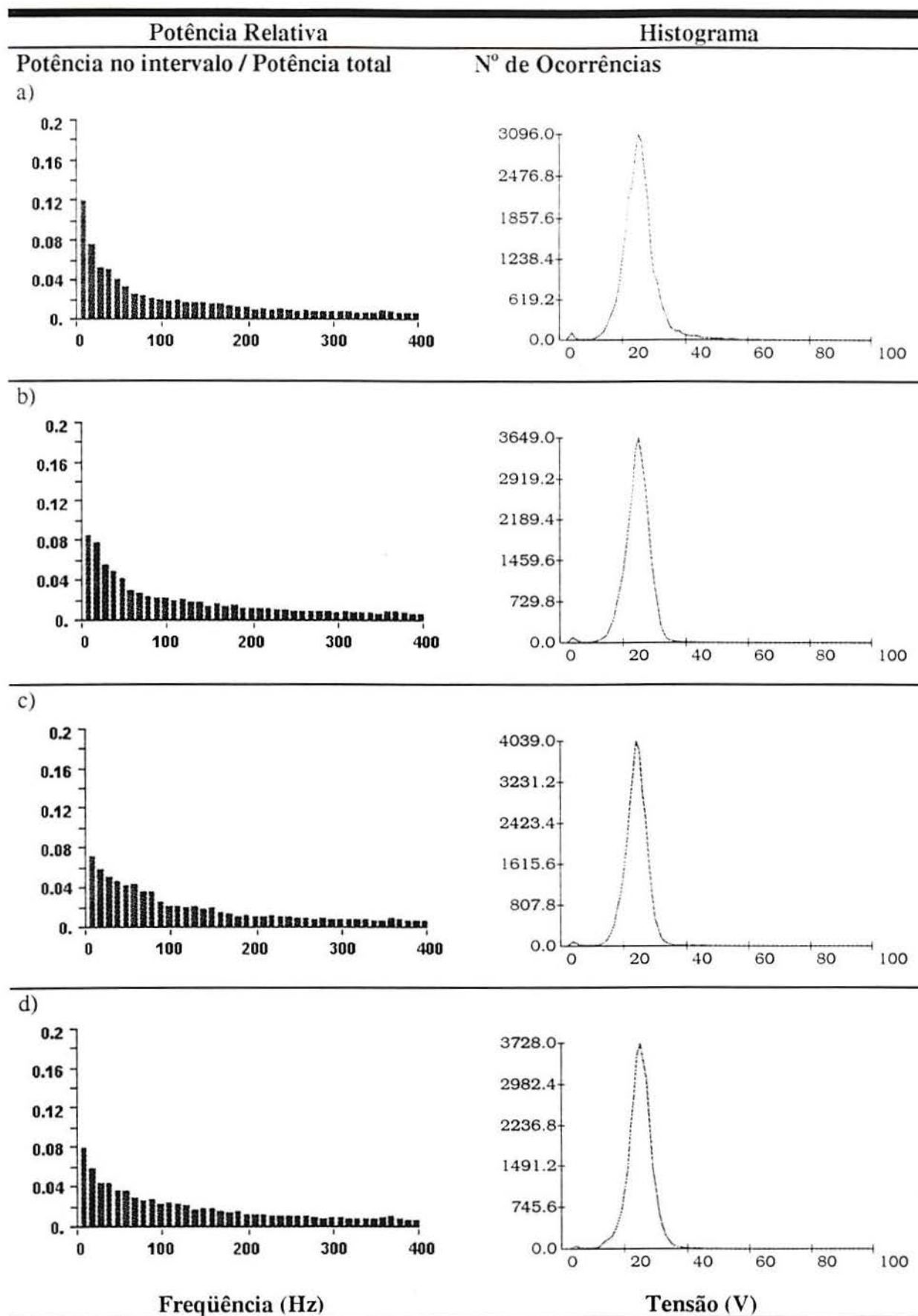


Fig. E3 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Base a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

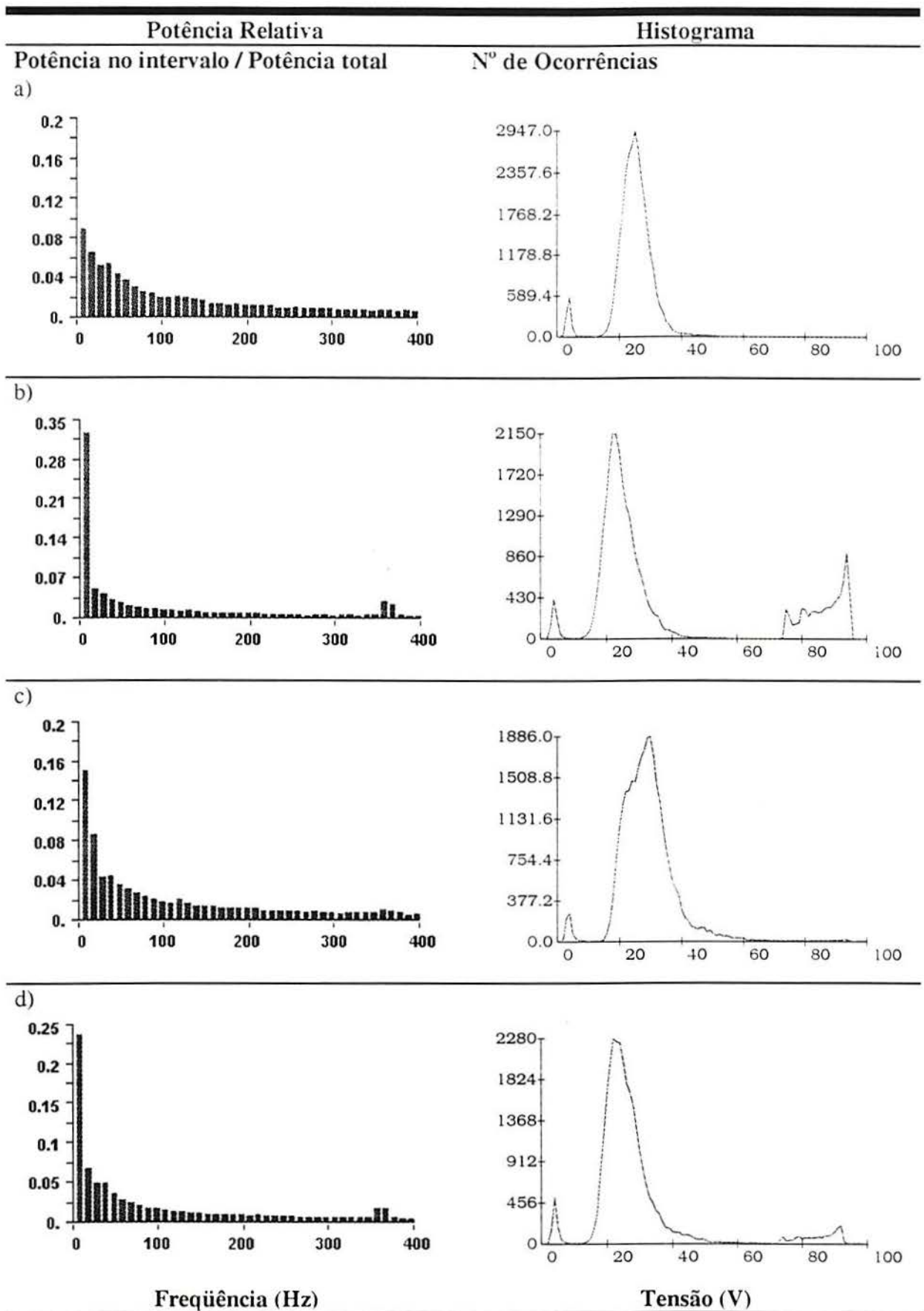


Fig. E4 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

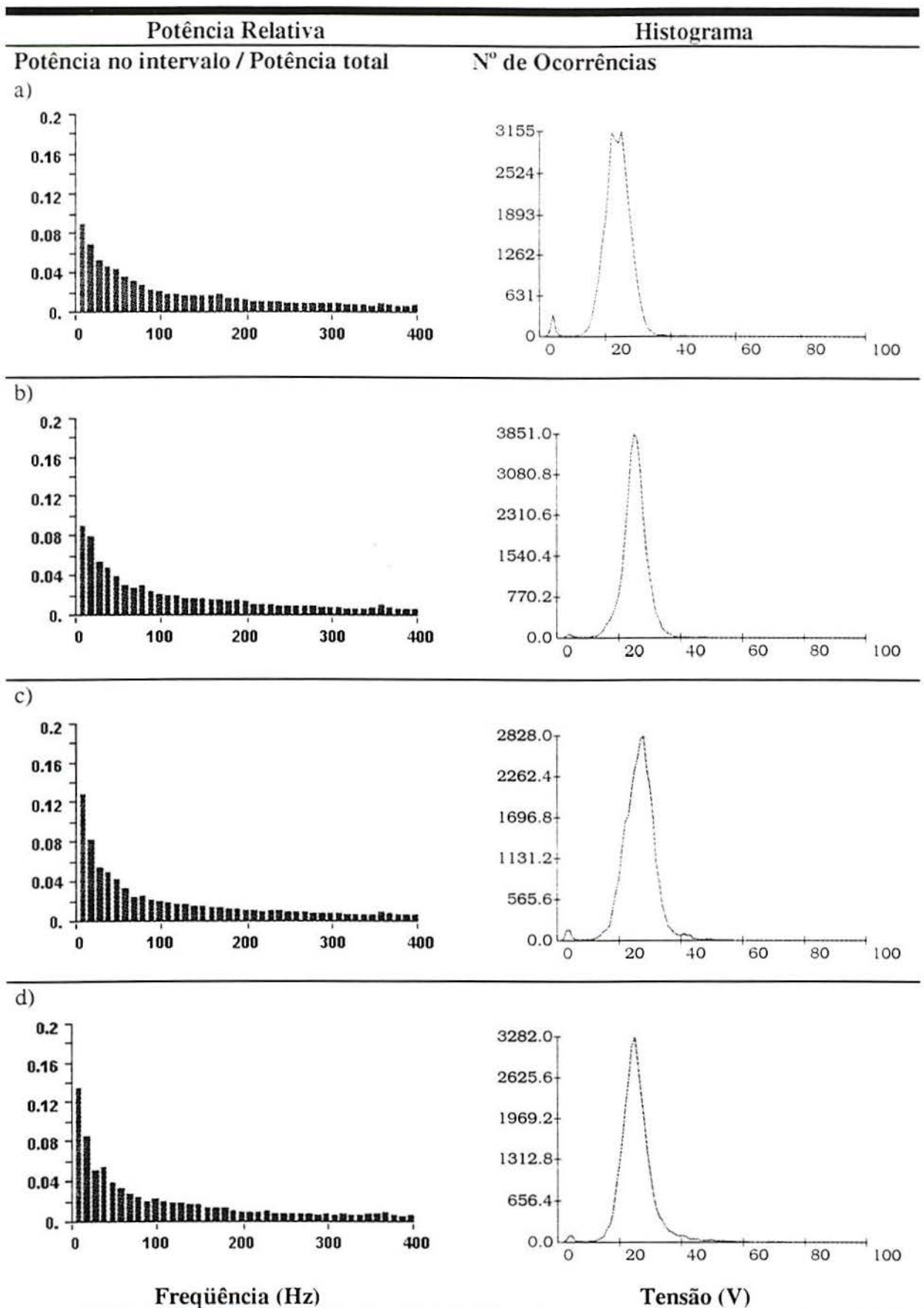


Fig. E5 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

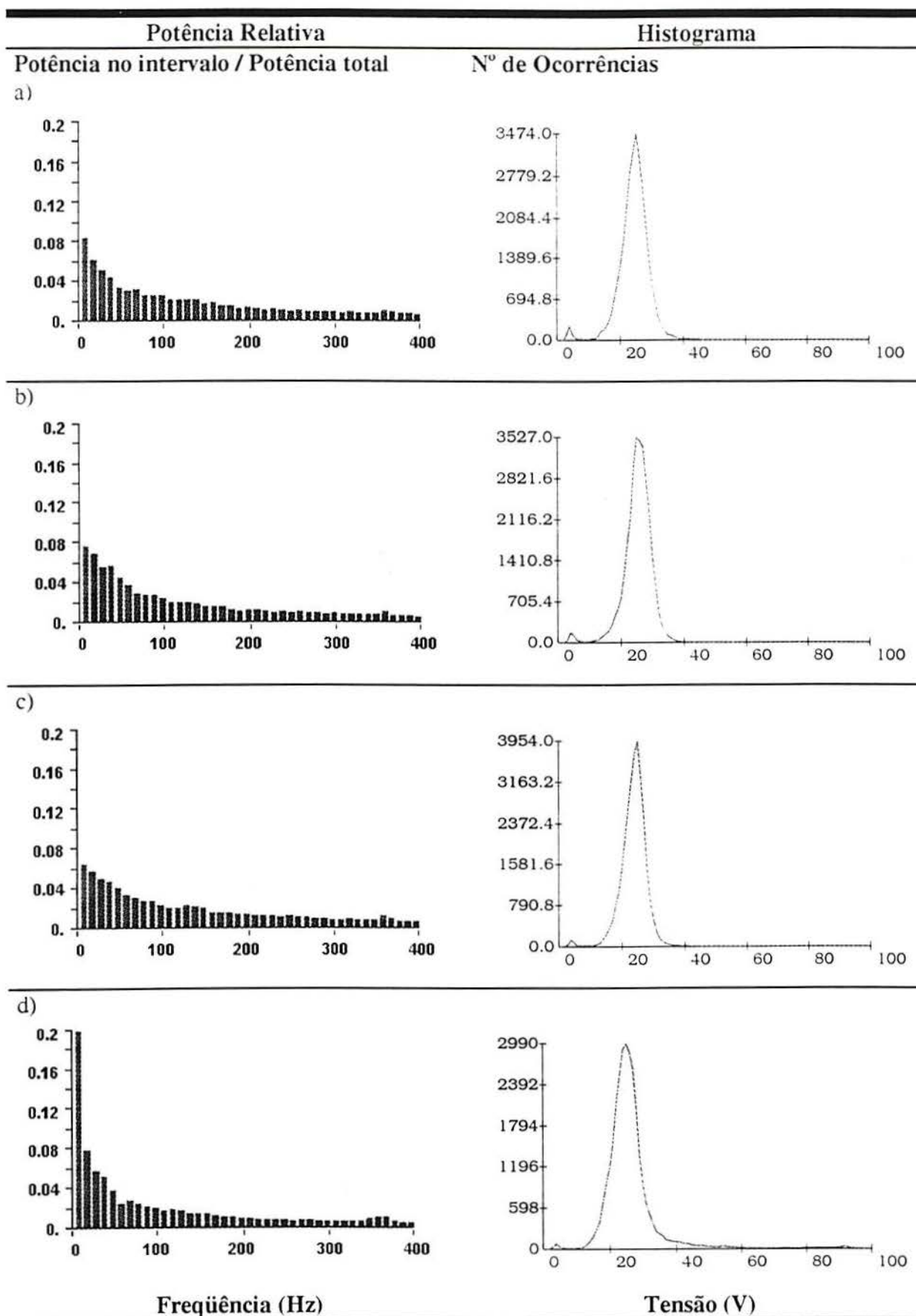


Fig. E6 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al01 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

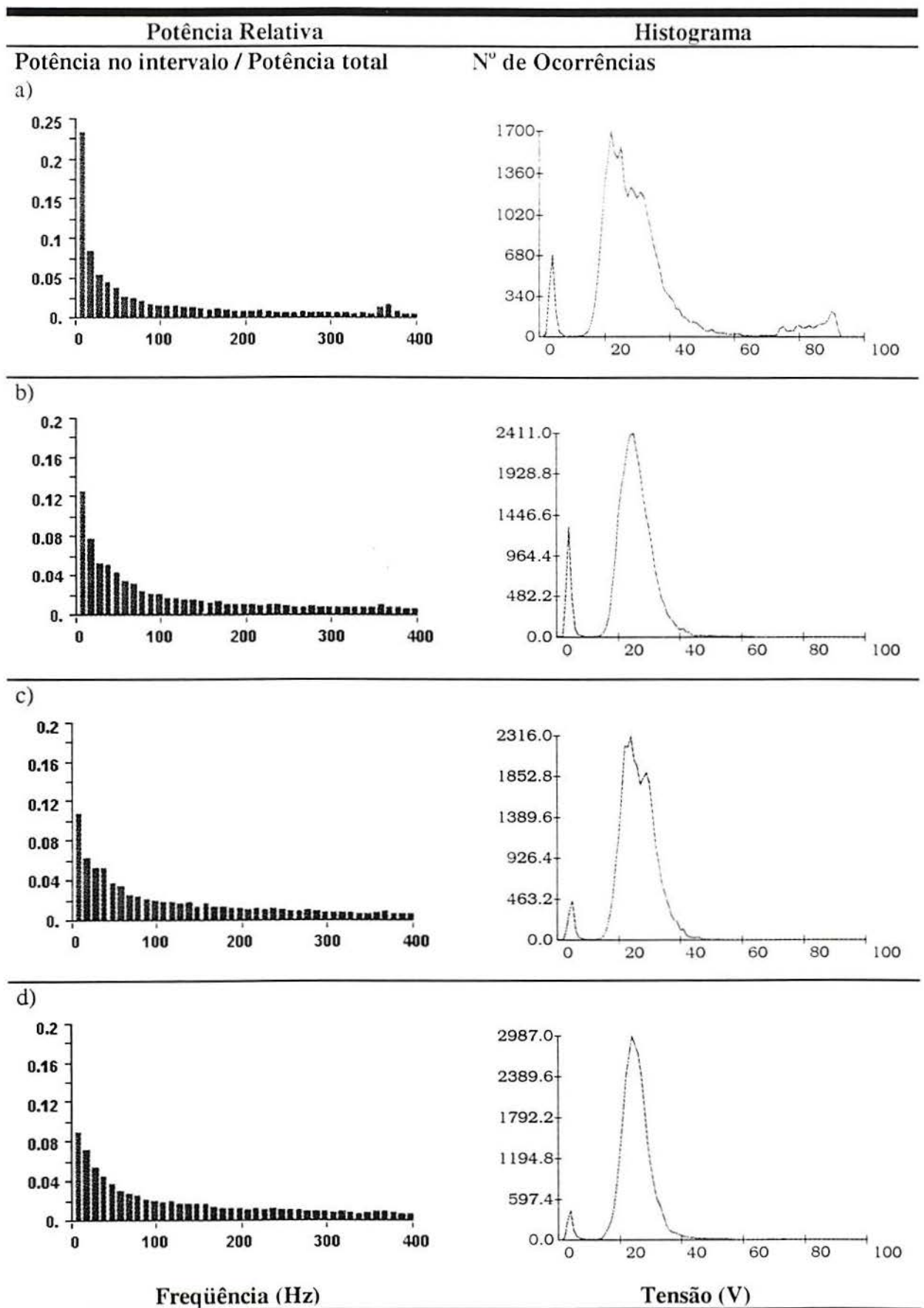


Fig. E7 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

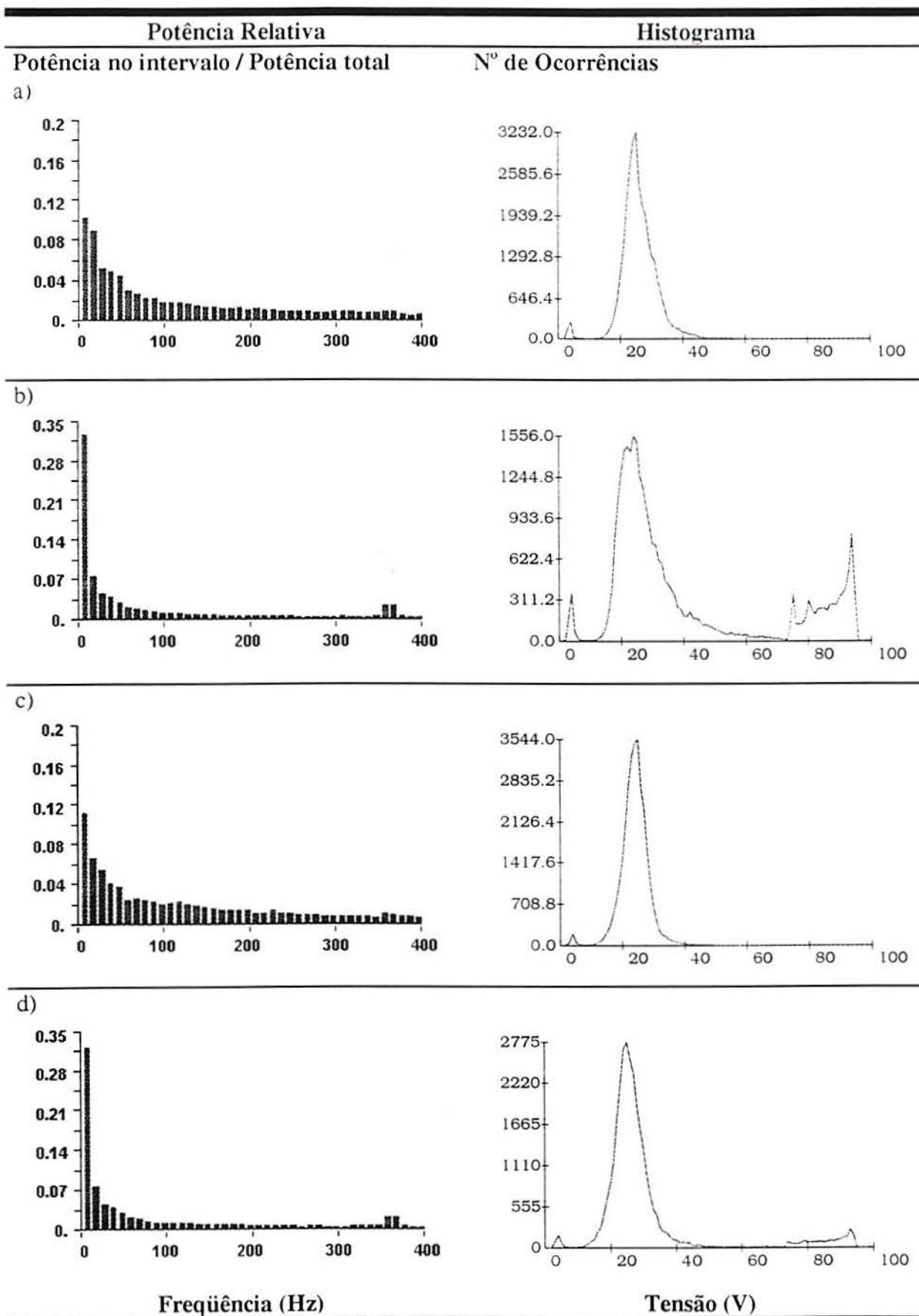


Fig. E8 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Al02 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

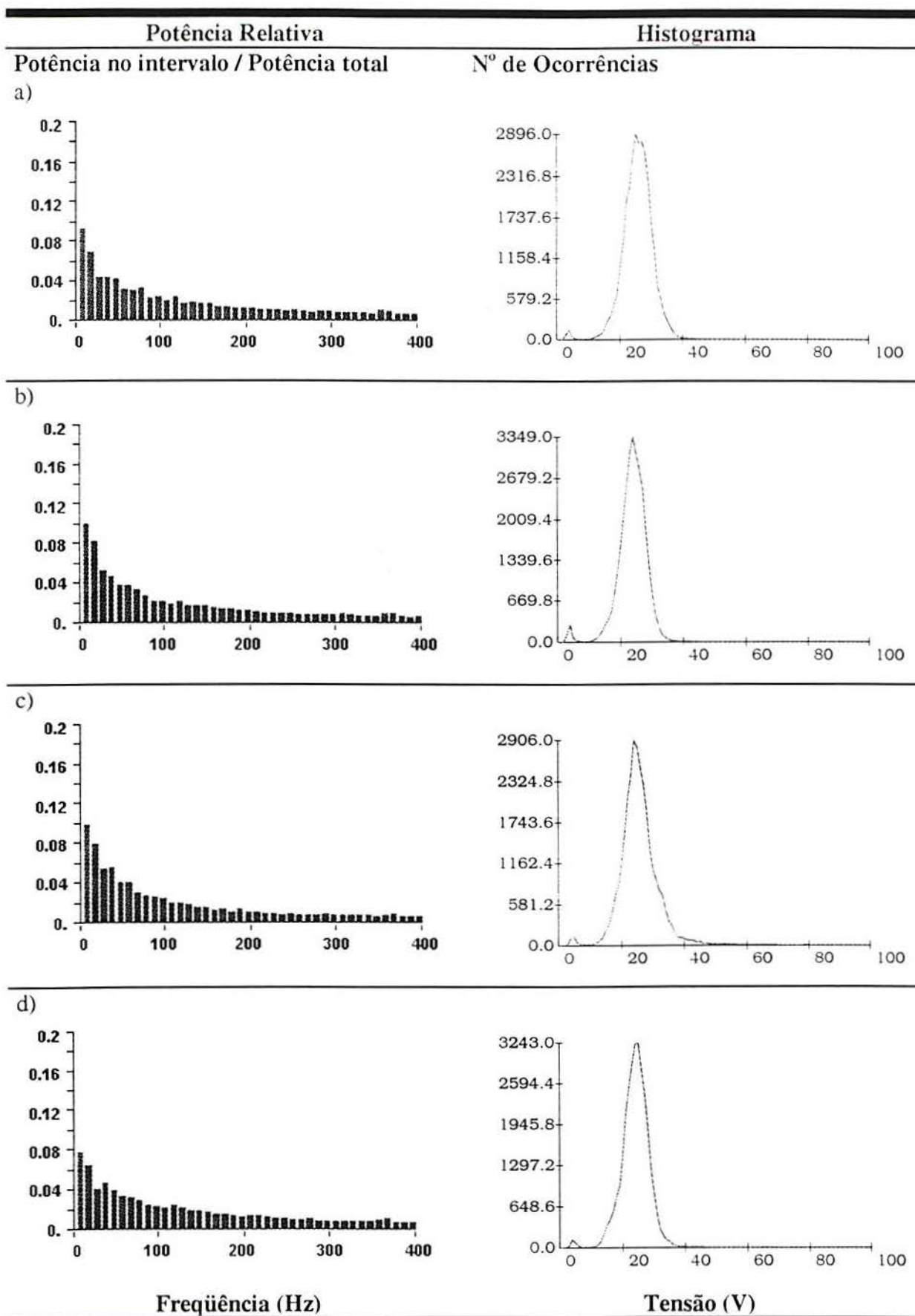


Fig. E9 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura AlO2 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

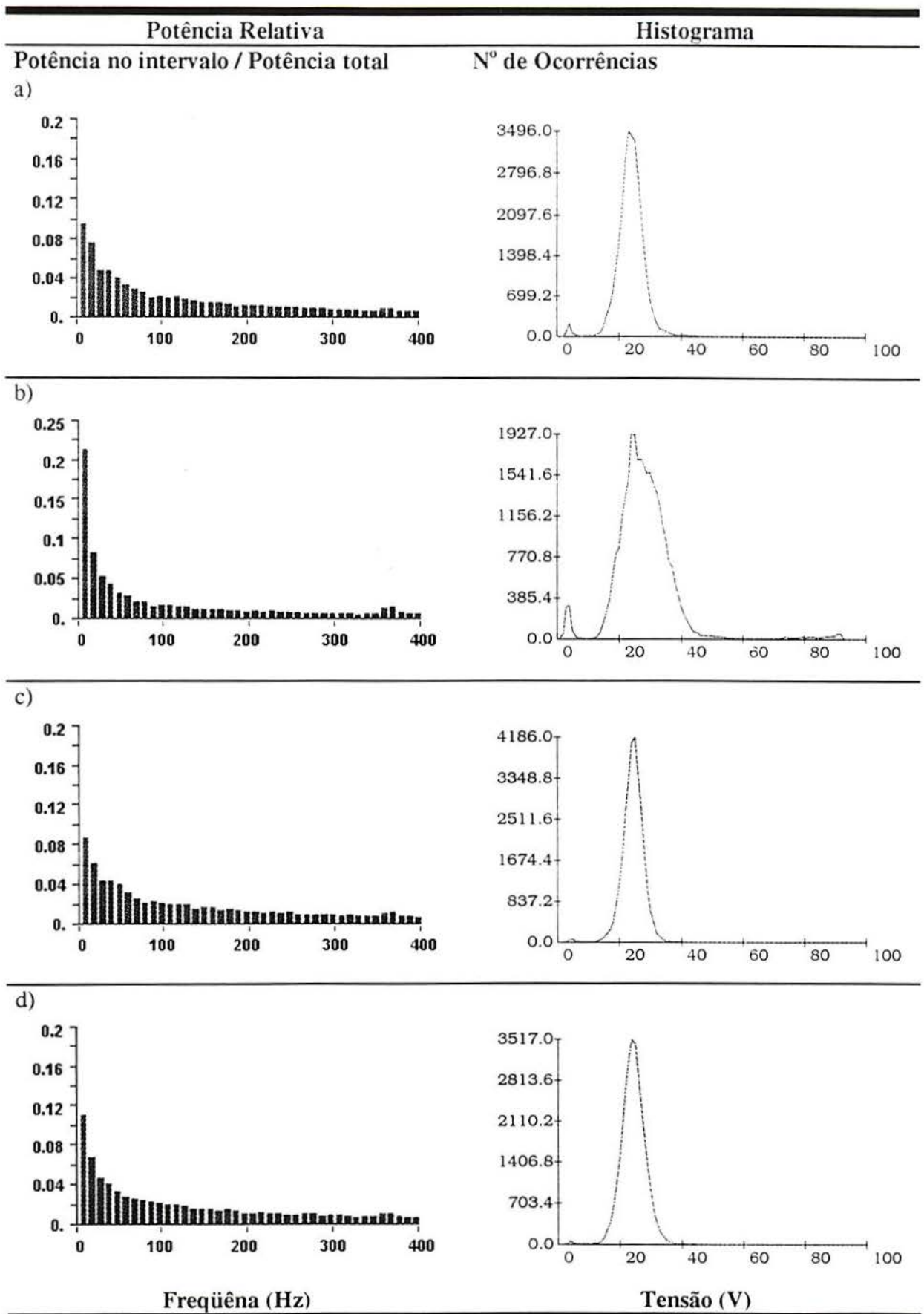


Fig. E10 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 5 m. **a)** e **b)** Junta tipo filete; **c)** e **d)** Simples deposição sobre chapa.

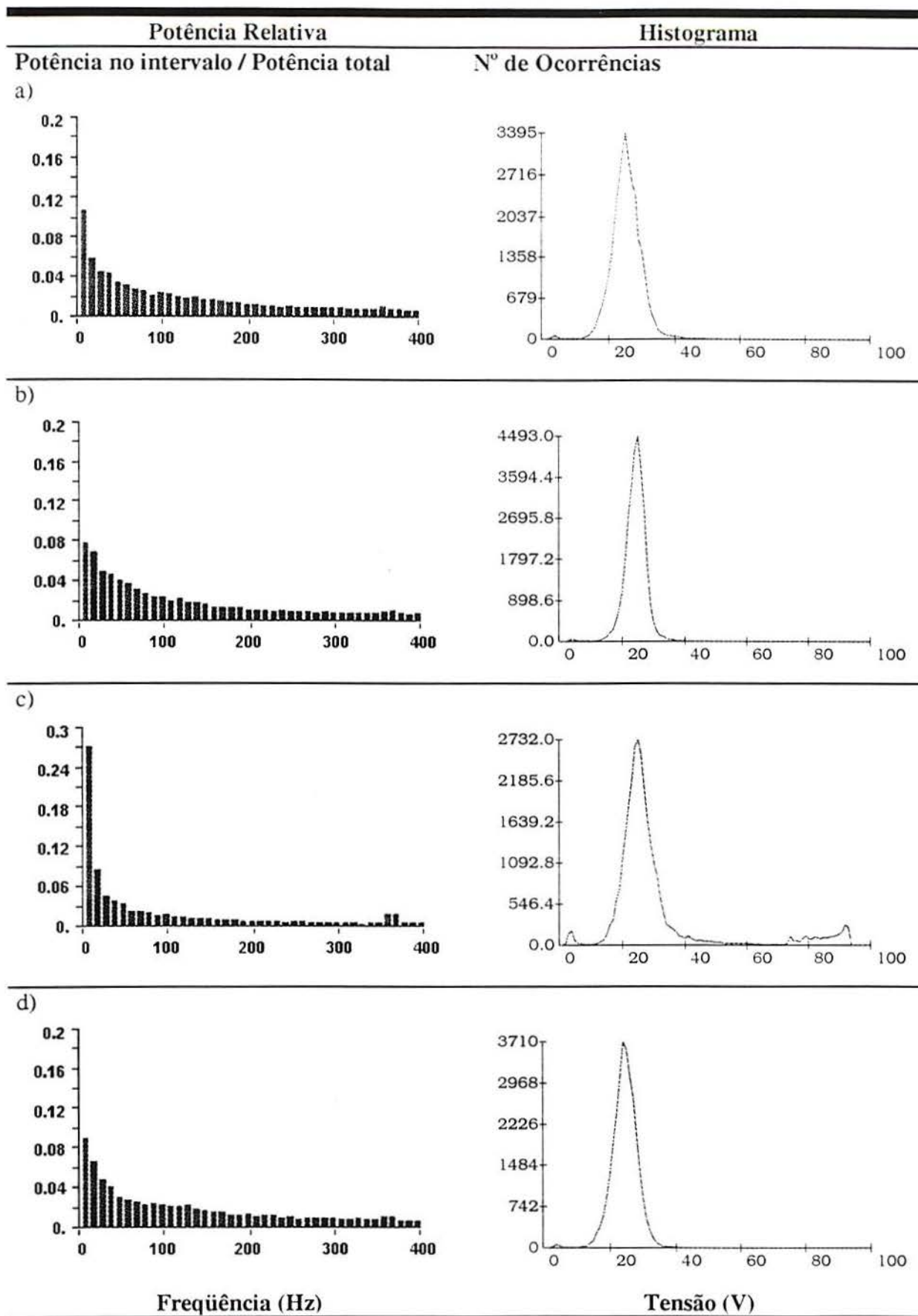


Fig. E11 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

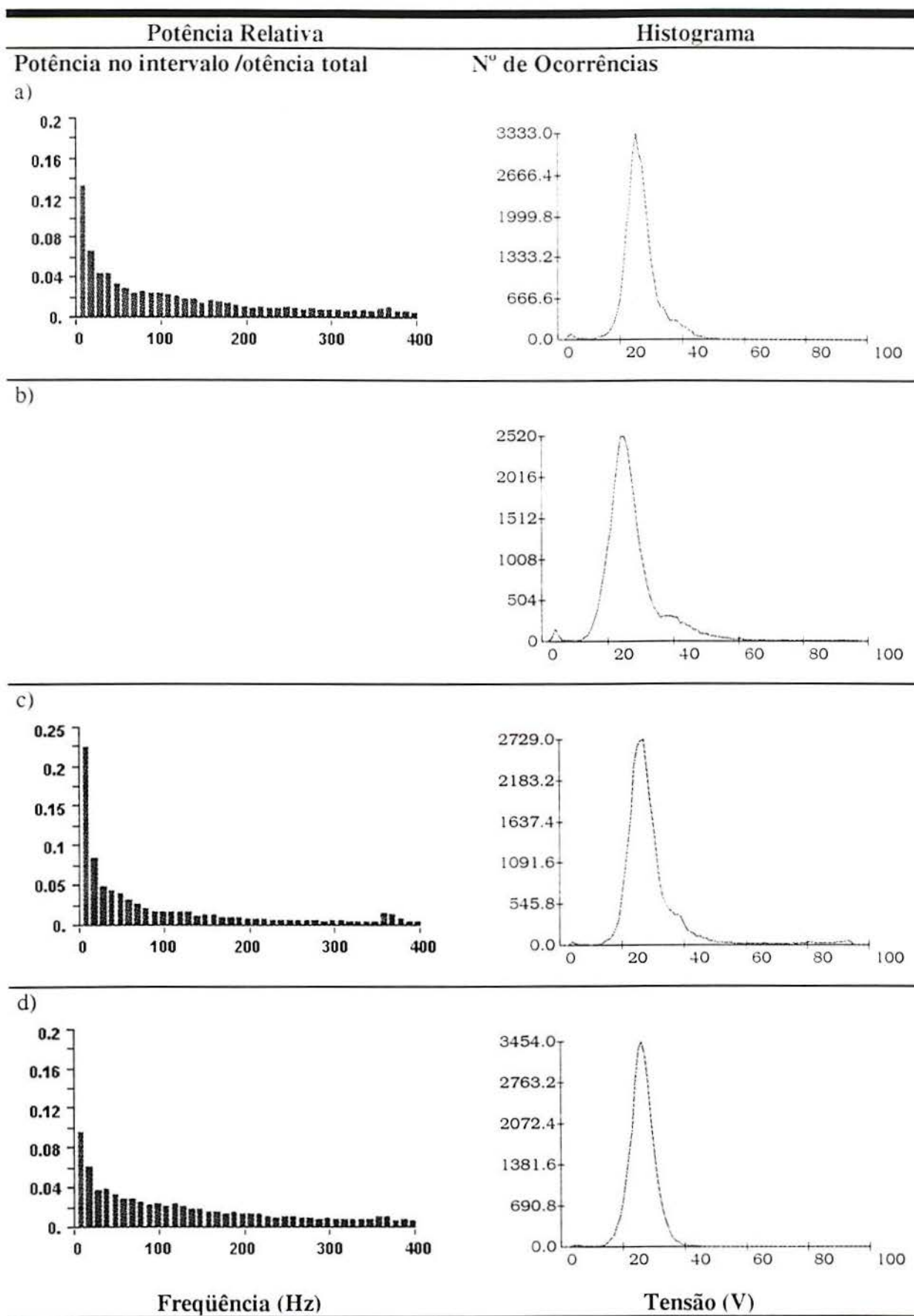


Fig. E12 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ca01 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

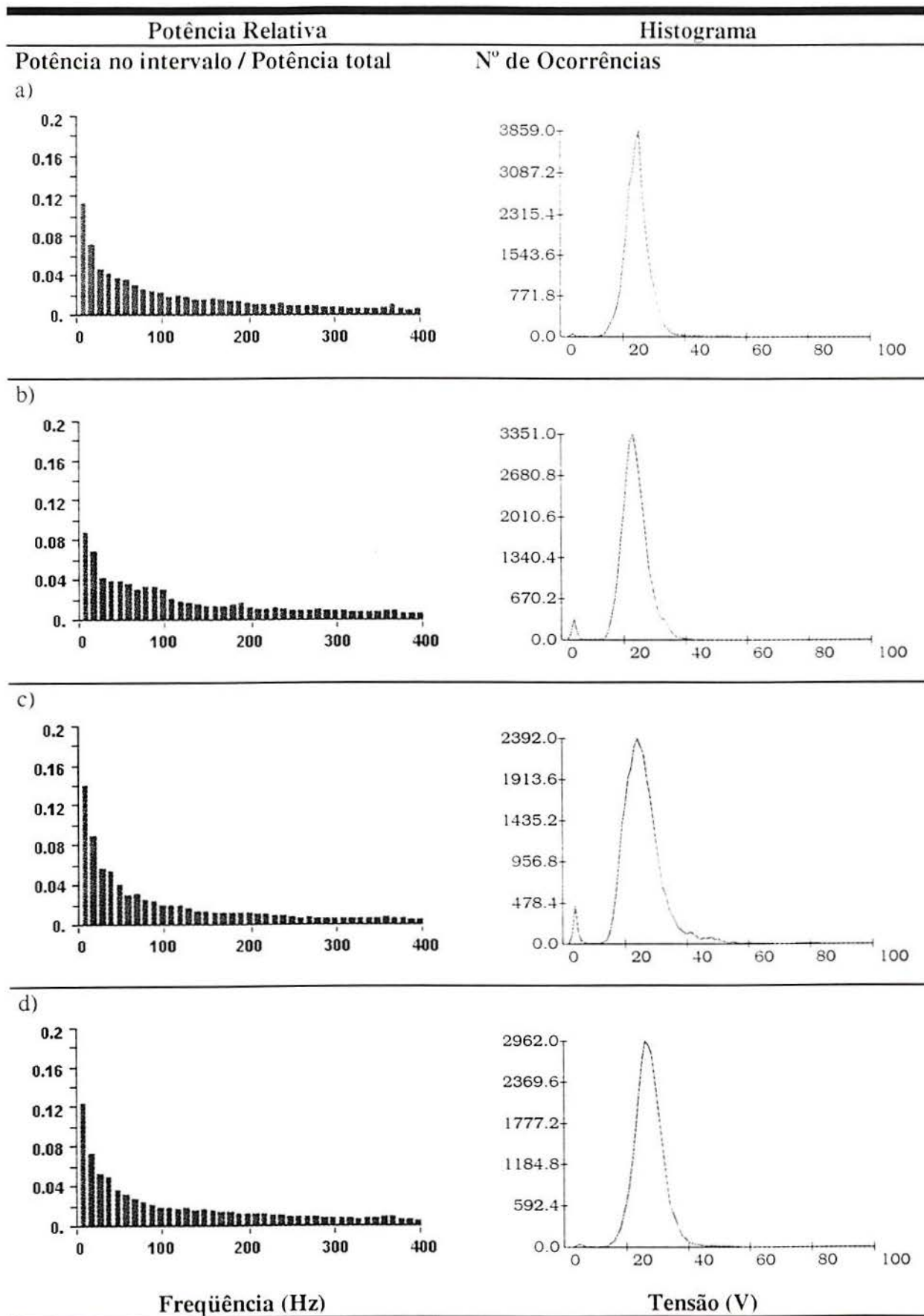


Fig. E13 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura CaO₂ a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

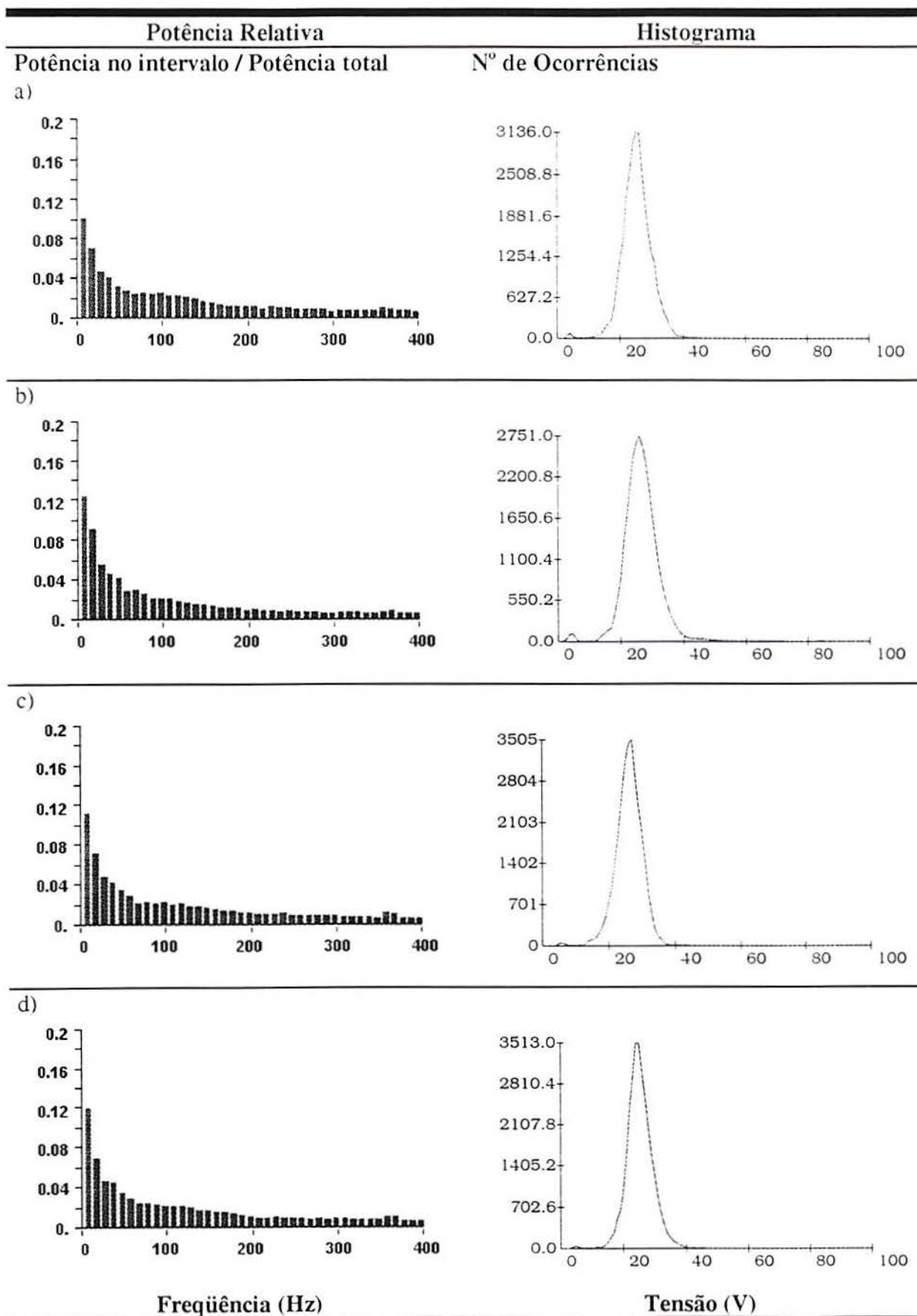


Fig. E14 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura CaO2 a profundidade de 12.5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

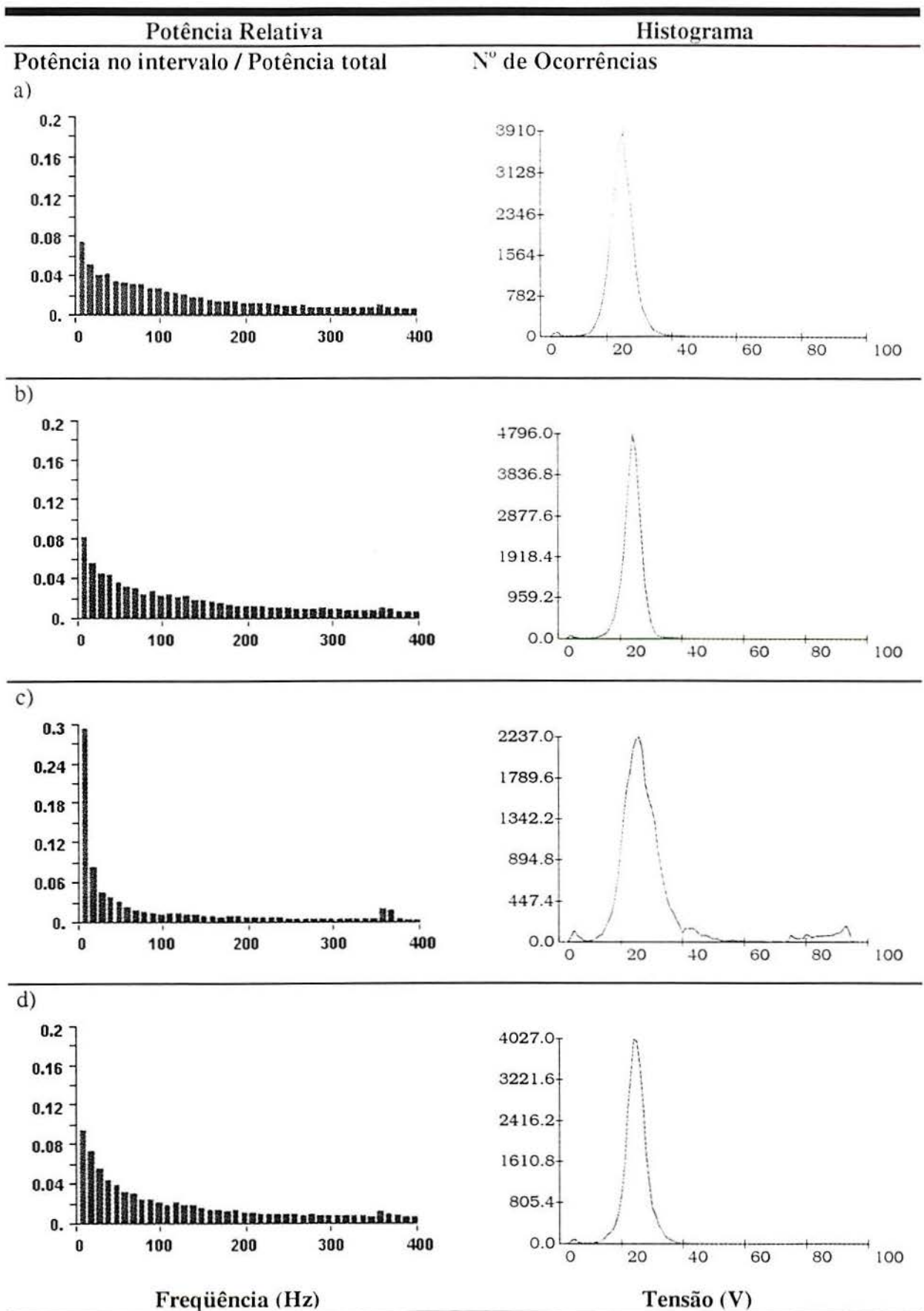


Fig. E15 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura CaO₂ a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

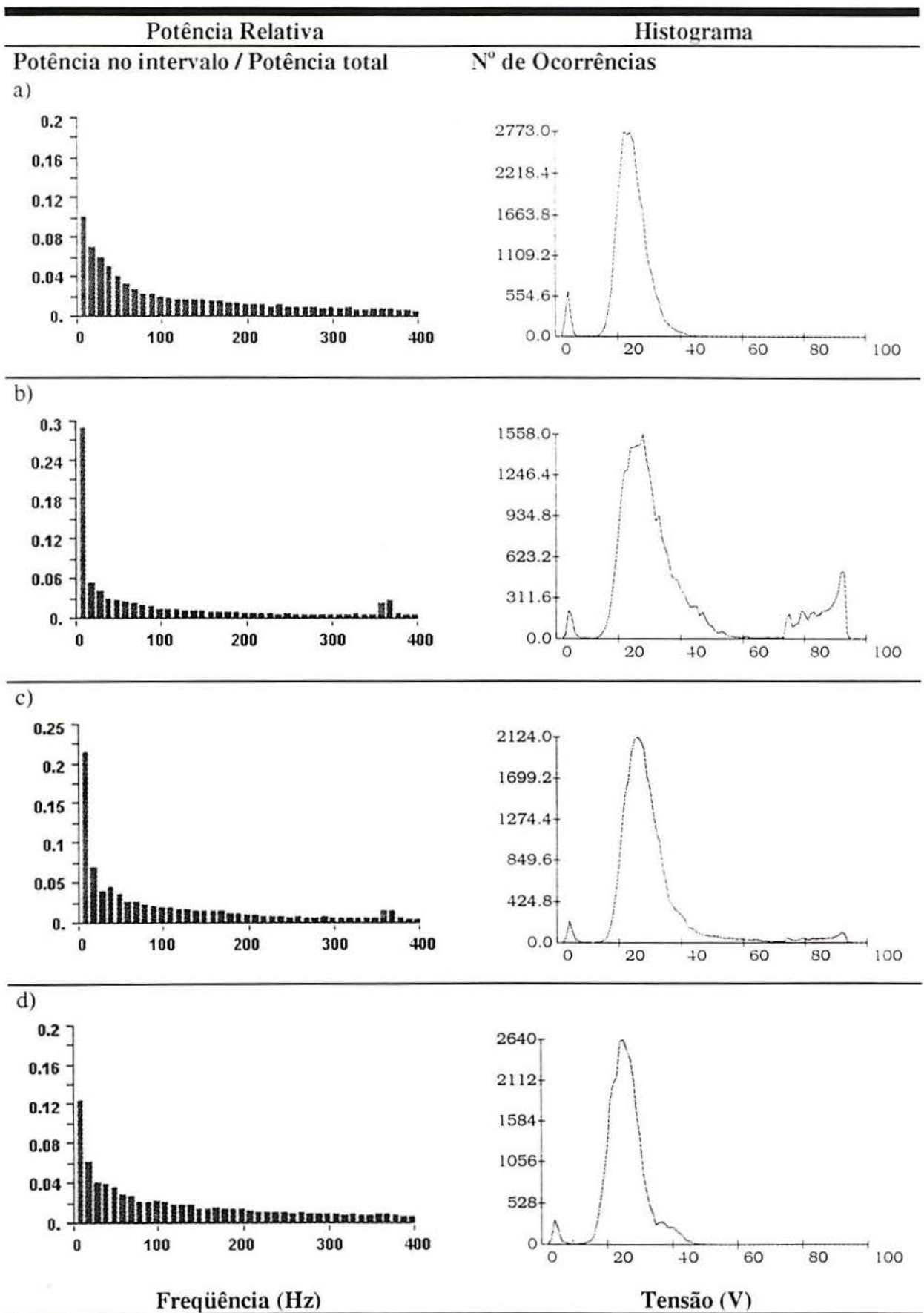


Fig. E16 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem btidos com a mistura Ti01 a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

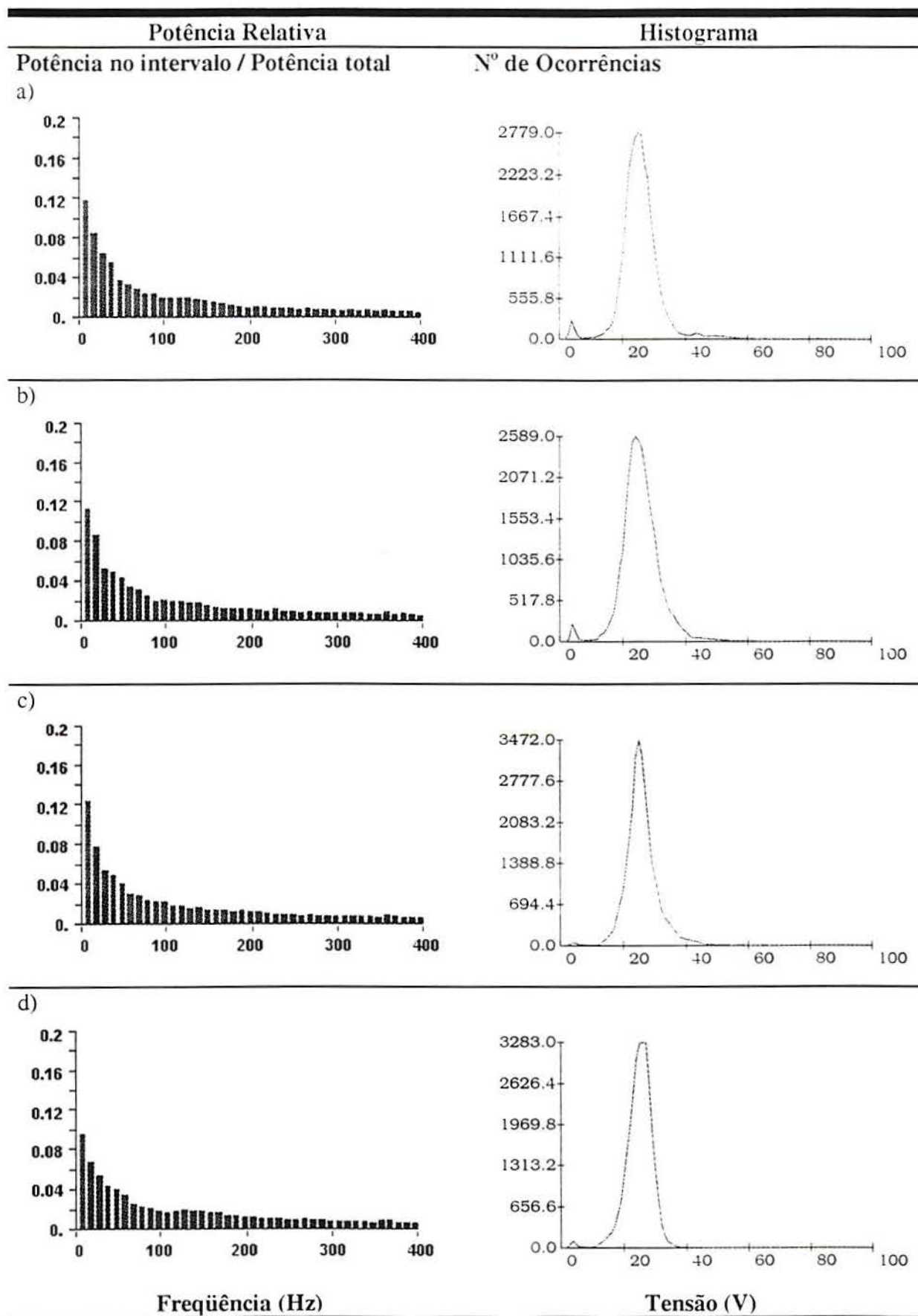


Fig. E17 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 12,5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

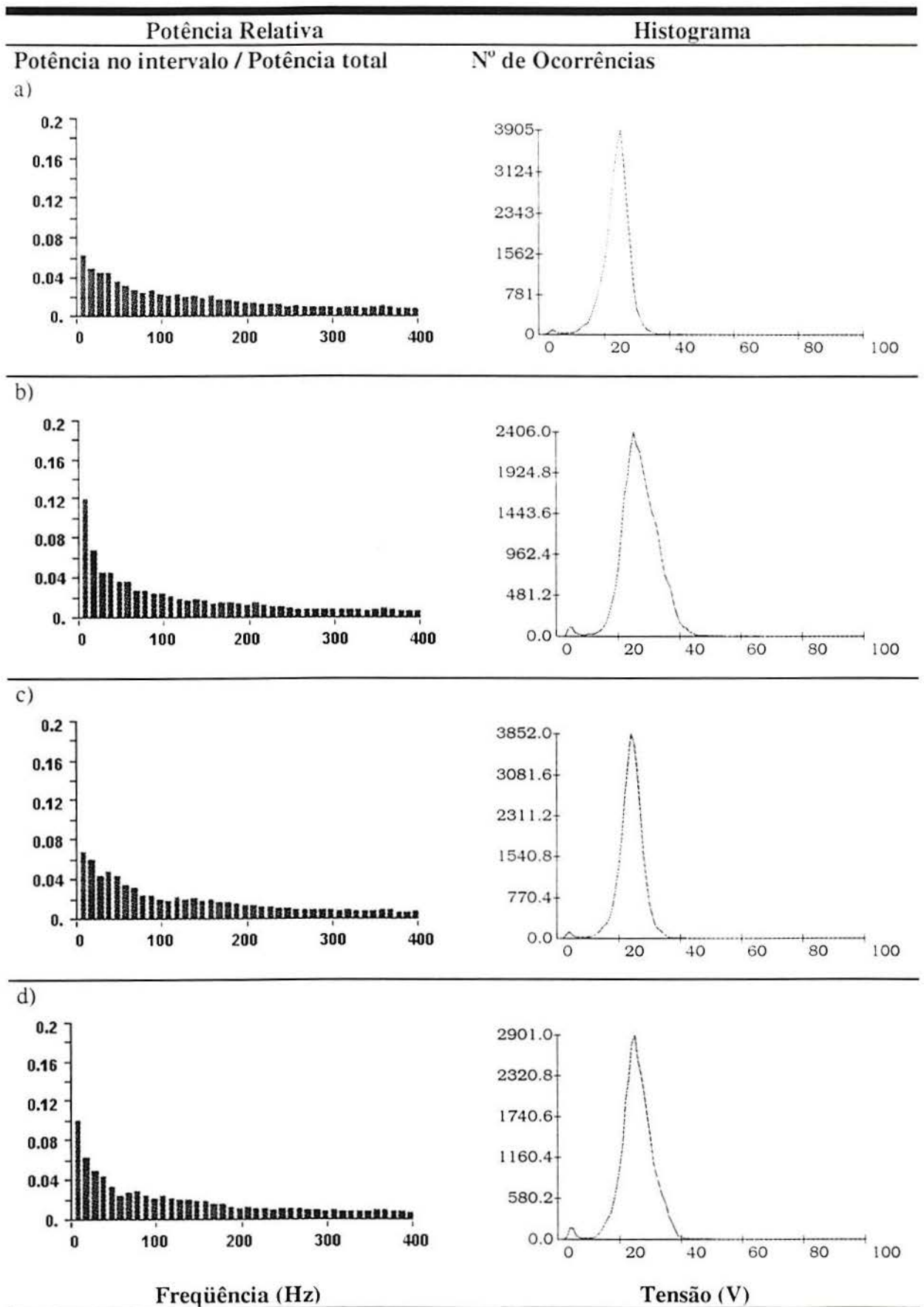


Fig. E18 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura Ti01 a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

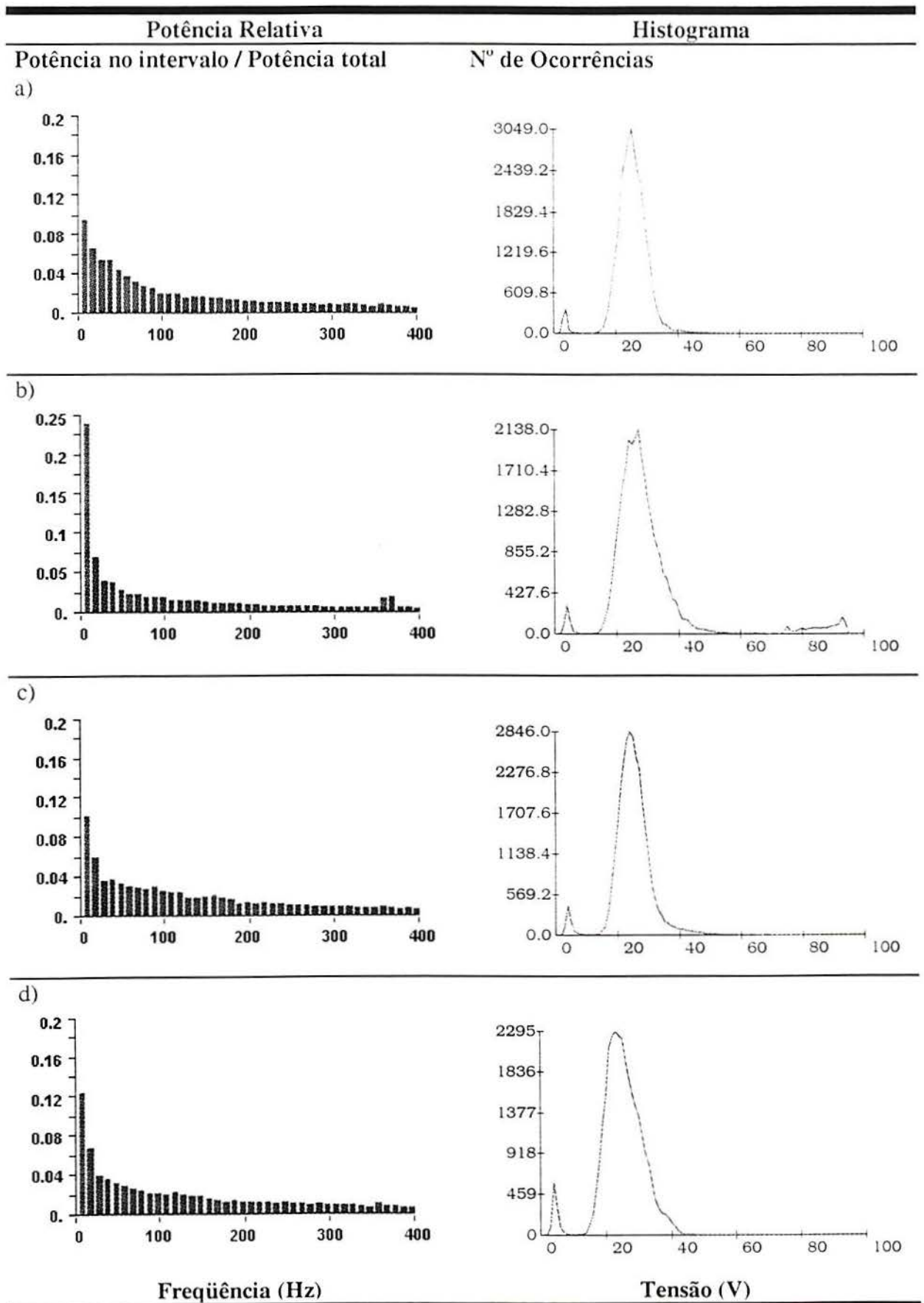


Fig. E19 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura TiO₂ a profundidade de 5 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.

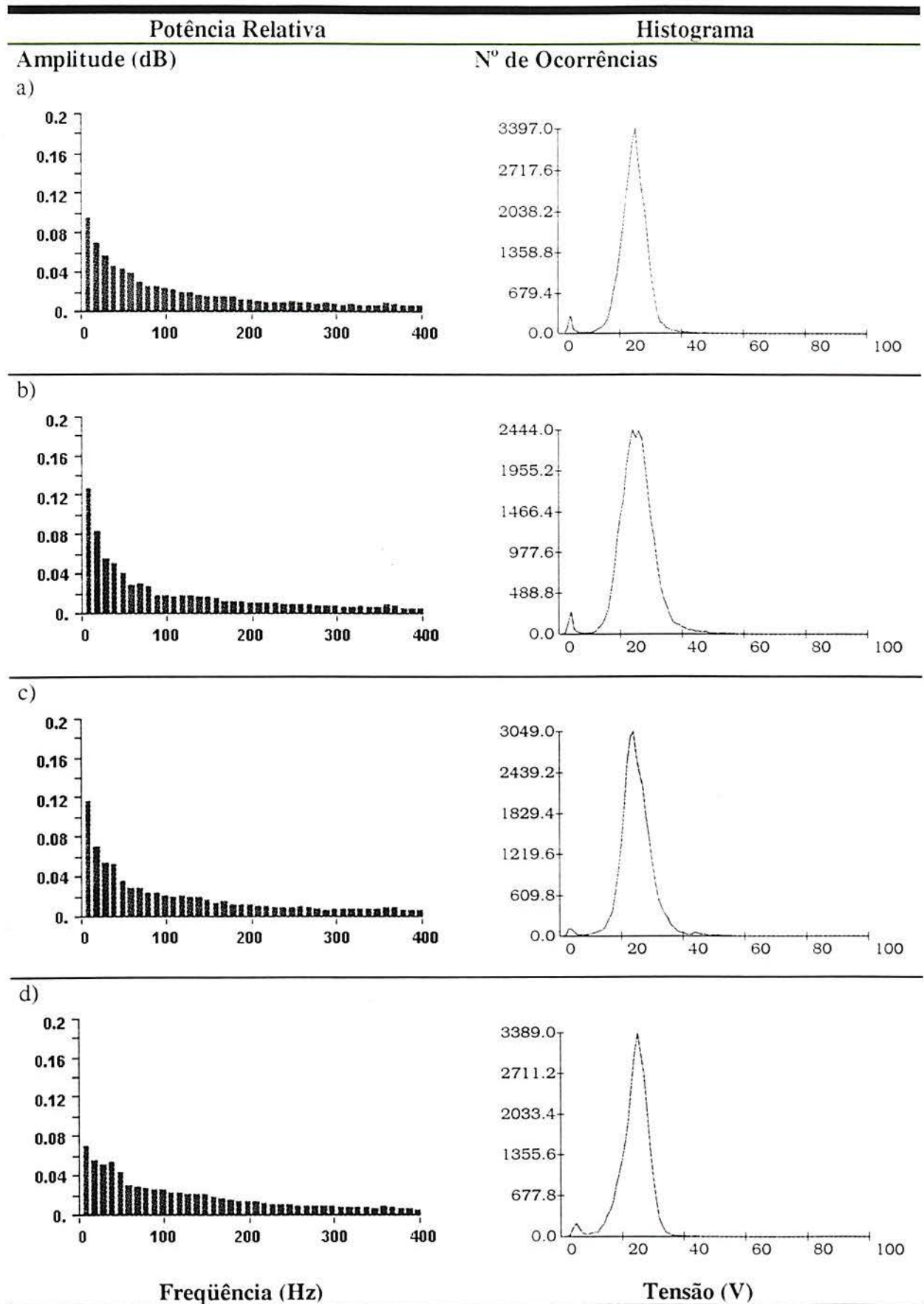


Fig. E21 - Potência relativa e histograma da tensão de soldagem obtidos com a mistura TiO₂ a profundidade de 20 m. a) e b) Junta tipo filete; c) e d) Simples deposição sobre chapa.