

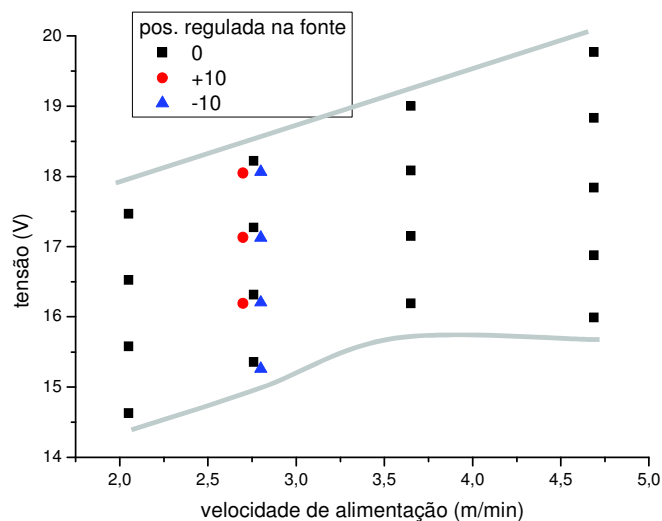


Figura 6.8 – Influência da taxa de crescimento e decrescimento da corrente na região de estabilidade operacional de operação em curto-circuito para uma dada velocidade de alimentação utilizando como gás de proteção Ar + 8% CO₂

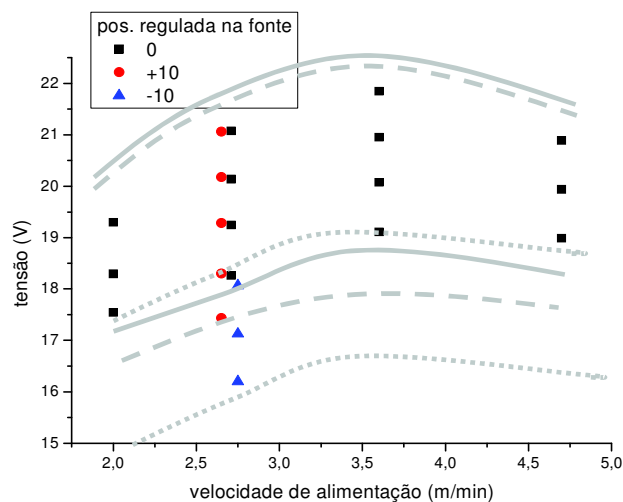


Figura 6.9 – Influência da taxa de crescimento e decrescimento da corrente na região de estabilidade operacional de operação em curto-circuito para uma dada velocidade de alimentação utilizando como gás de proteção Ar + 25% CO₂

Esta diferença na faixa de tensão em que o processo opera com maior estabilidade com a regulação do efeito indutivo na posição -10 não era esperada. Partindo-se do princípio que o processo opera de forma regular em uma pequena faixa de comprimento de arco ótimo, a mudança nos valores de tensão de operação regular provocada pela mudança na taxa de

crescimento e decrescimento da corrente não era esperada, pois não se espera que esta mudança altere o comprimento do arco. Além disto, como mostrado anteriormente, a frequência, a corrente média e a tensão média não foram alteradas com a mudança do efeito indutivo. Assim, para se verificar a causa deste comportamento não esperado, seria necessária a realização de mais experimentos. Mas este assunto foge do escopo do presente trabalho.

CAPÍTULO VII

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS SOBRE A REGULARIDADE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO NA REGIÃO OPERACIONAL

O objetivo desta etapa foi verificar a influência da tensão, velocidade de alimentação (corrente) e indutância sobre a regularidade do processo, dentro da região proposta como região de estabilidade operacional de transferência por curto-circuito levantada no Capítulo IV. Para a determinação da regularidade foi utilizado o índice de regularidade apresentado no item 4.1.3. Como visto, a região de estabilidade operacional é definida pelas coordenadas velocidade de alimentação e tensão (o mapa de transferência para o modo de curto-circuito, Fig. 4.5, é reproduzido aqui como Fig. 7.1, para facilitar o entendimento dos resultados a seguir). Porém, no respectivo capítulo não é discutido mais profundamente se dentro da região, ou entre regiões para diferentes gases, há variação ou não da regularidade de transferência.

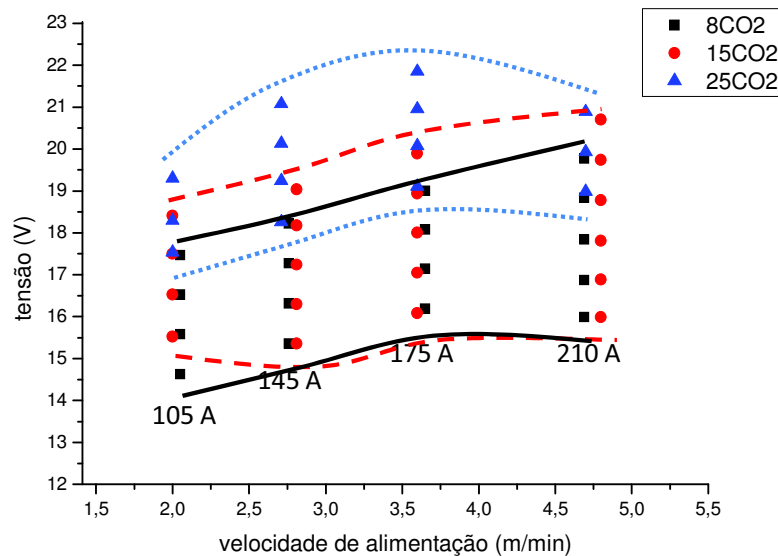


Figura 7.1 – Região de estabilidade operacional de transferência por curto-circuito para o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e utilizando DBCP de 12 mm na polaridade CC+

7.1. Influência da Tensão e Velocidade de Alimentação na Regularidade da Transferência por Curto-Circuito

A Fig. 7.2 apresenta o índice de regularidade (IV_{cc}) calculado para cada ponto utilizado do mapa de transferência levantado. Nesta figura, pode-se perceber que a tensão de soldagem não apresenta uma relação clara com a regularidade do processo. Porém, deve-se lembrar que os pontos observados são os de melhor regularidade para cada corrente, após o uso dos critérios de refino da faixa de tensão (item no item 4.1.3). Sendo assim, o resultado indica que, dentro da região de operacionalidade do mapa, pequenas variações na tensão não melhoram ou pioram significativamente a regularidade de transferência, o que não ocorreria se fosse avaliada a regularidade fora desta faixa.

Ainda nesta figura, pode-se verificar que o aumento da velocidade de alimentação (corrente de soldagem) faz piorar a regularidade de transferência. Isto mostra que, se por um lado tem-se maior capacidade de produção (taxa de fusão) com correntes mais altas, em contrapartida o processo opera com transferência mais irregular, podendo assim gerar mais respingos e/ou fumos, afetando a capacidade de produção real (taxa de deposição). A relação entre o índice de regularidade e a eficiência de deposição (diferença entre a taxa de fusão e deposição) será apresentada mais adiante.

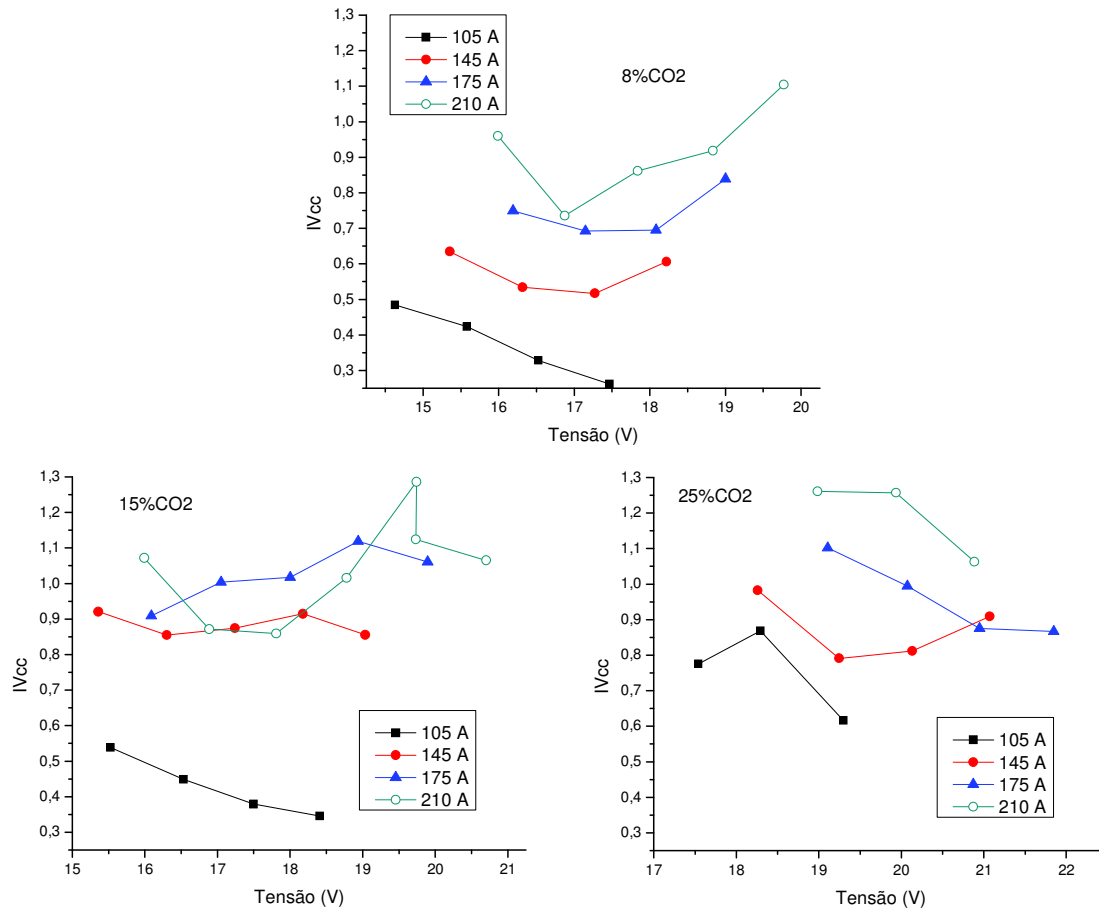


Figura 7.2 – Comportamento do índice de regularidade (IVcc) em função da tensão de soldagem e corrente de soldagem na região de estabilidade operacional dos mapas de transferência por curto-circuito para distintos os gases de proteção

7.2. Influência do Gás de Proteção na Regularidade da Transferência por Curto-Circuito

A Fig. 7.3 apresenta o índice de regularidade (IVcc) em função do gás de proteção utilizado. Observando somente o gráfico que mostra a variação da tensão sob a corrente de aproximadamente 105 A, pode-se afirmar que o aumento do teor de CO₂ na mistura de proteção diminui a regularidade do processo. Porém, à medida que a corrente utilizada no teste aumenta, a influência do gás de proteção fica menos clara. Pelo menos para os gases utilizados, os resultados indicam que o nível de corrente usado na soldagem é mais importante, no que diz respeito à regularidade do processo, do que o gás de proteção. Para

altos valores de corrente a mudança do gás de proteção passa a não melhorar a regularidade do processo de modo significativo.

Suban e Tusek (2003) analisaram a influência do gás de proteção na estabilidade do processo por curto-circuito. Eles utilizaram como índice de estabilidade que eles chamaram de ciclogramas, que são gráficos de tensão em função da corrente, mostrados na Fig. 7.4. Segundo estes autores a análise destes gráficos mostram que a utilização de 100%CO₂ promoveu maior estabilidade do que quando se utilizou Ar + 18%CO₂ com corrente média de 90 A. Comparando os resultados obtidos por eles com o resultado do gráfico de 105 A (Fig. 7.3), pode-se observar que a tendência de piora da regularidade com o aumento do teor de CO₂ não se confirmou, pelo menos para os teores de CO₂ utilizados por eles.

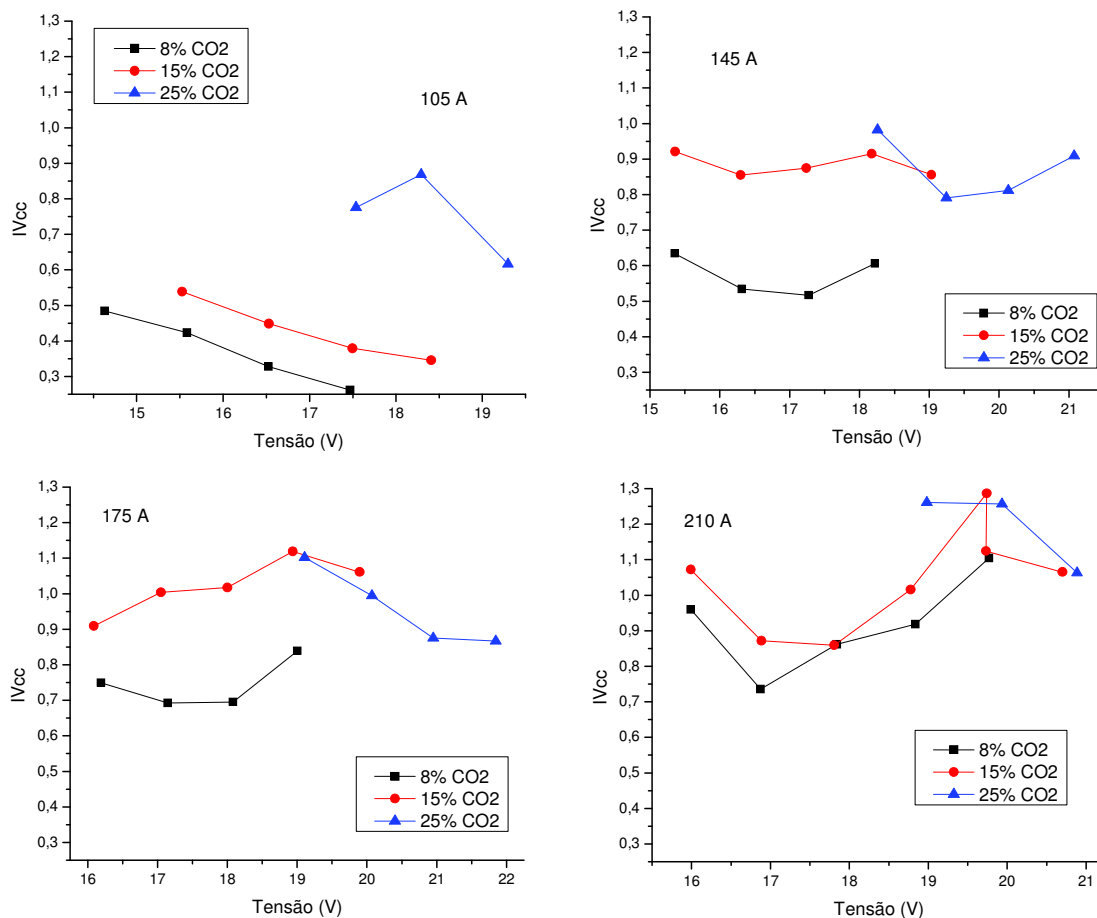


Figura 7.3 – Comportamento do índice de regularidade (IVcc) em função da tensão de soldagem e gás de proteção na faixa operacional dos mapas de transferência por curto-circuito para distintos valores de correntes de soldagem

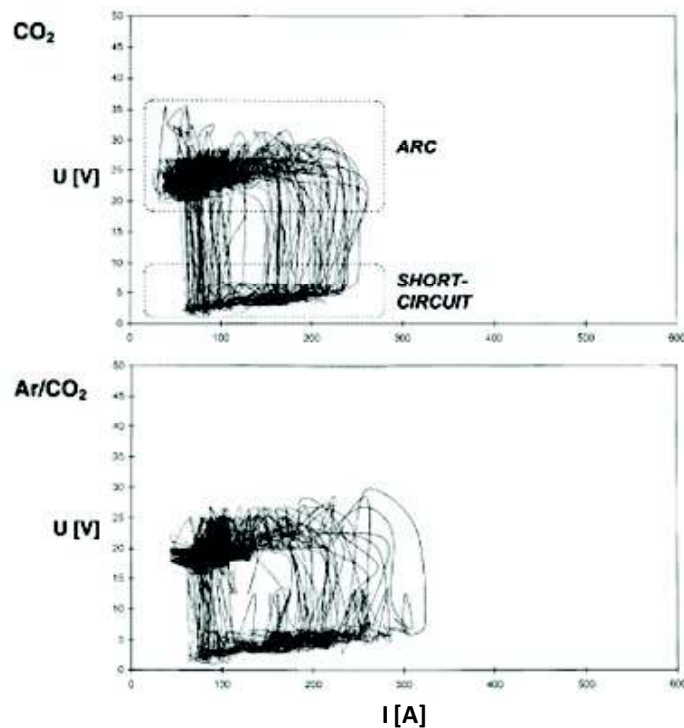


Figura 7.4 – Comparação da estabilidade, por meio de ciclogramas, entre os gases de proteção 100%CO₂ e Ar + 18%CO₂ soldando com arame maciço de 1,6 mm de diâmetro. Quanto mais uniforme os oscilogramas maior a estabilidade do processo (SUBAN; TUSEK, 2003)

7.3. Influência da Indutância na Regularidade da Transferência por Curto-Circuito

As Figs. 7.5 e 7.6 mostram, respectivamente para as misturas Ar + 8% CO₂ e Ar + 25% CO₂, o índice de regularidade (IVcc) em função da tensão de soldagem para diferentes posições de regulagem do efeito indutivo da fonte, conforme resultados da influência da indutância na faixa de operação do mapa de curto-circuito (Capítulo VI). Nota-se nestas figuras que a melhor regularidade ocorre quando se regula o efeito indutivo da fonte na posição +10 ao se utilizar a mistura Ar + 8% CO₂. Porém, para mistura Ar + 25% CO₂, esta ocorre para na posição -10.

Os resultados indicam que apesar do processo operar com valores de tensão que proporcionam a melhor regularidade de operação, a mudança da taxa de crescimento e decrescimento da corrente afeta a regularidade do processo. No geral, a regulagem da faixa de tensão em que o processo opera com melhor regularidade (região de curto-circuito com estabilidade operacional) não é alterada com a mudança da taxa de variação da corrente, mas a mudança desta pode melhorar ainda mais a regularidade do processo.

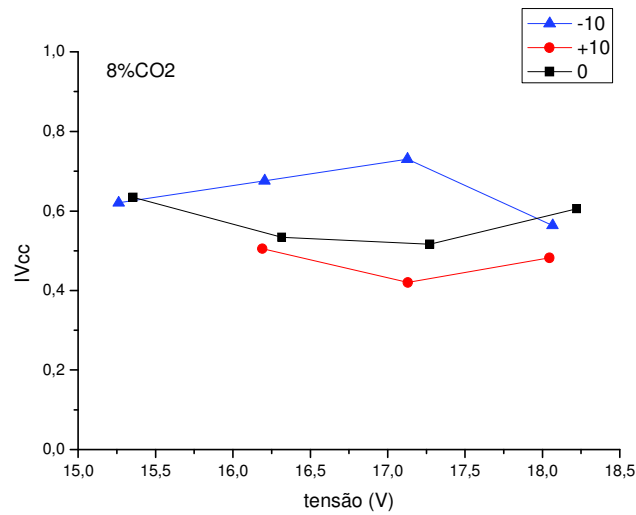


Figura 7.5 – Efeito da regulação do efeito indutivo sobre o índice de regularidade (IV_{cc}) na faixa de operação em curto-circuito estável utilizando como gás de proteção Ar + 8% CO_2

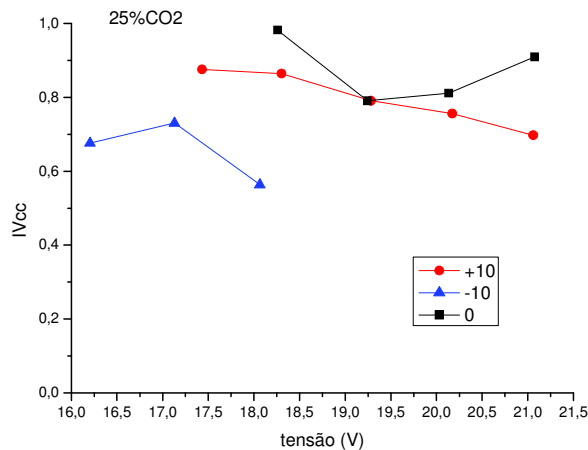


Figura 7.6 – Efeito da regulação do efeito indutivo sobre o índice de regularidade (IV_{cc}) na faixa de operação em curto-circuito estável utilizando como gás de proteção Ar + 25% CO_2

7.3.1. *Correlação entre as Taxas de Crescimento e Decrescimento da Corrente e a Regularidade do Processo*

Na tentativa de se caracterizar melhor a real influência das taxas de crescimento e decrescimento da corrente na regularidade da transferência, utilizaram-se os dados do experimento para caracterização da indutância (Capítulo VI). Neste experimento, variaram-se as posições do efeito indutivo em toda faixa permitida pela fonte, utilizando um valor fixo de

tensão e dois gases de proteção diferentes. As taxas de variação da corrente em função da posição de regularidade são reproduzidas na Fig. 7.7.

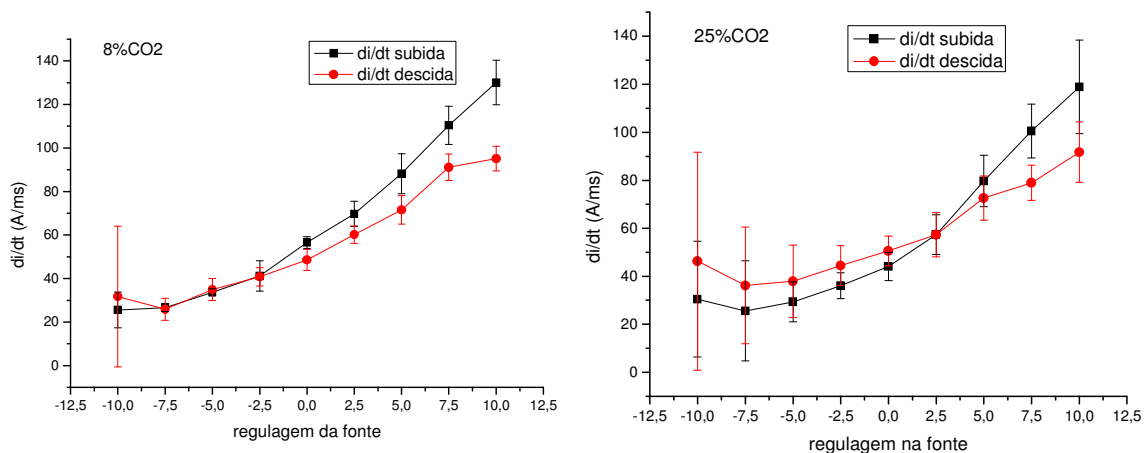


Figura 7.7 – Valores médios das taxas de subida e de descida da corrente (di/dt) em função da regulagem do efeito indutivo da fonte (tensão regulada no equipamento de 22 V e velocidade de alimentação de 2,71 m/min, ~145 A)

Para uma verificação mais consistente da influência das taxas de crescimento e decrescimento da corrente na regularidade da transferência, a correlação entre estas taxas e o índice regularidade foi levantada para um maior número de posições de regulagem do efeito indutivo. As Figs. 7.8 e 7.9 apresentam essa correlação utilizando como gás de proteção Ar + 8% CO₂ e Ar + 25% CO₂, respectivamente. Na Fig. 7.8, relativo ao Ar + 8% CO₂, observa-se que a regularidade apresenta valores em torno de 0,6 para taxas de subida menores do que 80 A/ms e descida menores do que 65 A/ms e regularidade de 0,85 para taxas acima destas, evidenciando que quanto maior a taxa de variação da corrente pior é a regularidade do processo. Já pela Fig. 7.9, utilizando-se a mistura Ar + 25% CO₂, observa-se que, no geral, a regularidade apresenta valores em torno de 1,2 para taxas de subida menores do que 80 A/ms e taxas de descida menores do que 65 A/ms e de 0,90 para taxas acima destas, com comportamento ao contrário do observado pelo uso do Ar + 8% CO₂ (quanto maior a taxa de variação da corrente melhor é a regularidade do processo). Dutra (2008), em um estudo utilizando uma fonte eletrônica que permitia a regulagem da taxa de crescimento e decrescimento separadamente, encontrou em seus resultados que a taxa de crescimento da corrente pouco influi na estabilidade. Assim, este autor, trabalhando apenas na variação da taxa de decrescimento da corrente, encontrou que a melhor estabilidade para o gás de proteção

Ar + 25% CO₂ seria com taxa de decrescimento de 20 A/ms, mas que para 100% CO₂ taxa seria de 44 A/ms. Esta conclusão está em concordância com os resultados presentes, confirmando a tendência de que utilizado gases com maior teor de CO₂ o processo opera mais estável com taxas de crescimento e decrescimento maiores.

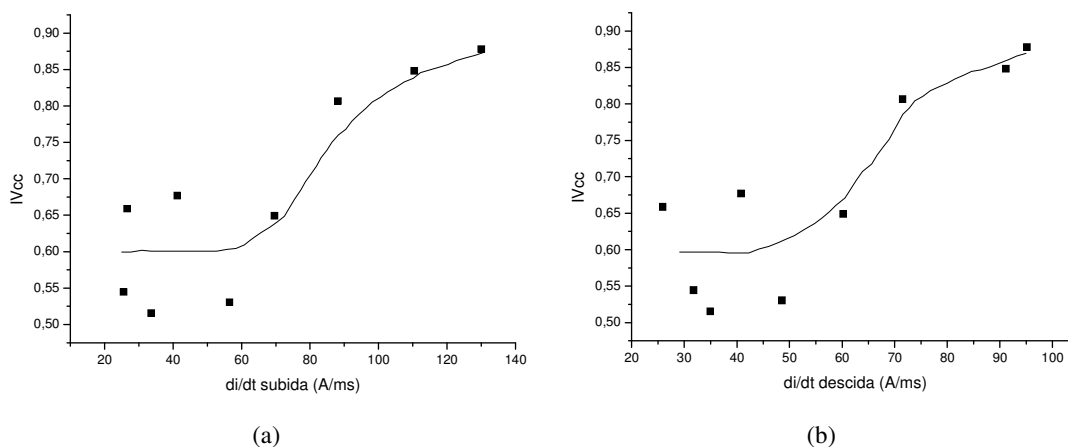


Figura 7.8 – Valores do índice de regularidade em função da taxa de crescimento (a) e da taxa de decrescimento (b) da corrente, utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 8% CO₂ (Tensão de regulagem = 22 V e Velocidade de alimentação = 2,71 m/min) – A linha é apenas uma indicação de tendência e não uma curva de ajuste

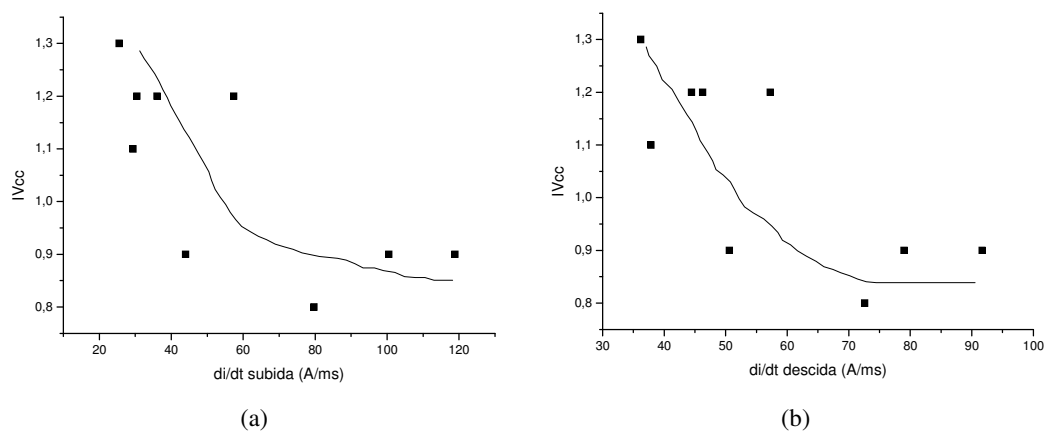


Figura 7.9 – Valores do índice de regularidade em função da taxa de crescimento (a) e da taxa de decrescimento (b) da corrente utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 25% CO₂ (Tensão de regulagem = 22 V e Velocidade de alimentação = 2,76 m/min) – A linha é apenas uma indicação de tendência e não uma curva de ajuste

Este comportamento mostra que utilizando diferentes misturas de gases de proteção, para uma mesma tensão e velocidade de alimentação, obtém-se uma correlação diferente entre as taxas de variação da corrente e a regularidade do processo. Tal resultado implica que a correlação entre a taxa de variação da corrente e a regularidade, no mínimo, é dependente do gás de proteção utilizado. Pode-se especular, até o momento, que gases mais ricos em CO₂ possibilitam soldagens mais regulares com taxas de subida e descida mais rápidas, enquanto gases com menor teor alcançam maior regularidade com baixas taxas de crescimento e decrescimento da corrente.

Desta forma, pelos resultados obtidos, faz-se necessária uma avaliação da influência do gás de proteção na correlação entre a taxa de variação da corrente e regularidade do processo.

7.3.2. Influência do Gás de Proteção na Correlação entre as Taxas de Crescimento e Decrescimento da Corrente e a Regularidade do Processo

Para verificar melhor a influência do gás de proteção e se a tensão de soldagem também apresenta influência na correlação entre estes dois parâmetros, soldagens foram realizadas variando-se a tensão para duas posições de regulagem do efeito indutivo. A Fig. 7.10 mostra as curvas do índice de regularidade em função da tensão de soldagem para as posições de regulagem de -10 e +10, utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 8% CO₂, enquanto a Fig. 7.11 apresenta as mesmas curvas, porém utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 25% CO₂.

Nestas figuras pode-se observar a influência do gás de proteção na correlação entre as taxas de variação da corrente e a regularidade do processo. Nos níveis em que o processo opera com melhor regularidade (valores mais baixos do índice de regularidade – IVcc) quando utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 8% CO₂ tem-se melhor regularidade para taxas de crescimento e decrescimento da corrente mais altas (posição de regulagem +10), enquanto quando utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 25% CO₂ tem-se melhor regularidade para taxas de crescimento e decrescimento da corrente mais baixas (posição de regulagem -10).

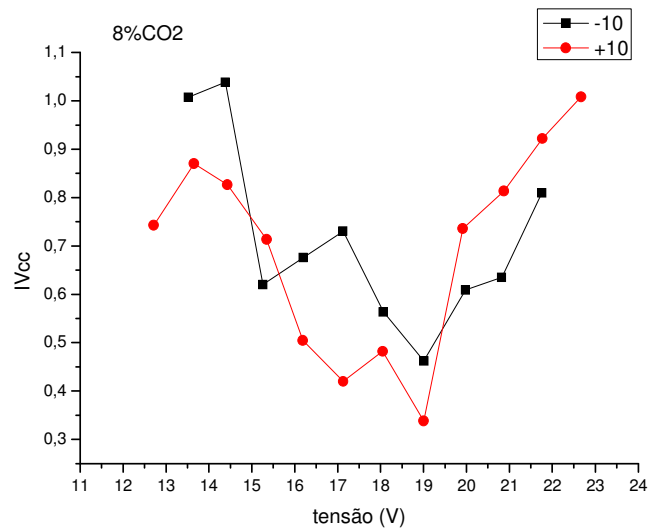


Figura 7.10 - Índice de regularidade em função da tensão de soldagem para as posições de regulagem do efeito indutivo da fonte em -10 e +10 utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 8% CO₂

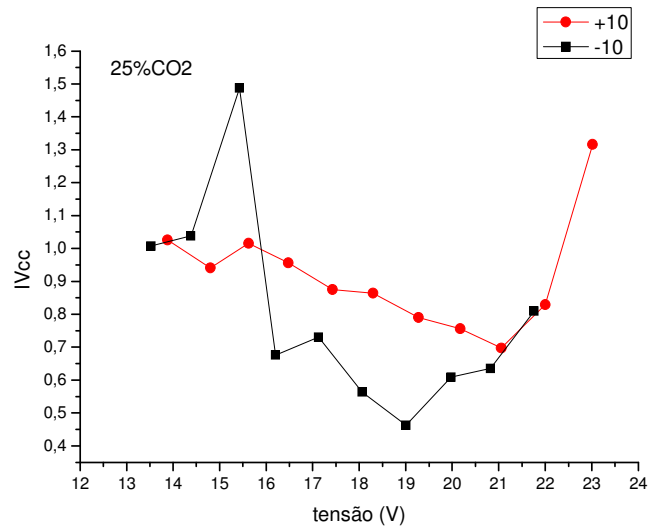


Figura 7.11 - Índice de regularidade em função da tensão de soldagem para as posições de regulagem do efeito indutivo da fonte em -10 e +10 utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 25% CO₂

A tensão de soldagem também altera a correlação entre as taxas de variação da corrente e a regularidade do processo. Analisando-se ainda as Figs. 7.10 e 7.11 pode-se observar que a regularidade em função da tensão tem um comportamento parabólico apresentando um ponto de mínimo. No geral, para menores valores de regularidade (melhor

regularidade) a correlação entre as taxas de variação da corrente e a regularidade do processo apresenta um comportamento e para piores valores de regularidade apresenta outro comportamento diferente.

Tais resultados sugerem uma forte influência do gás de proteção e da tensão de soldagem na correlação entre as taxas de variação da corrente e a regularidade. Além disto, sugerem também que, na prática, deve-se primeiro encontrar os valores de tensão que propiciam transferências estáveis e depois ajustar o efeito indutivo da fonte para refinar a estabilidade do processo.

CAPÍTULO VIII

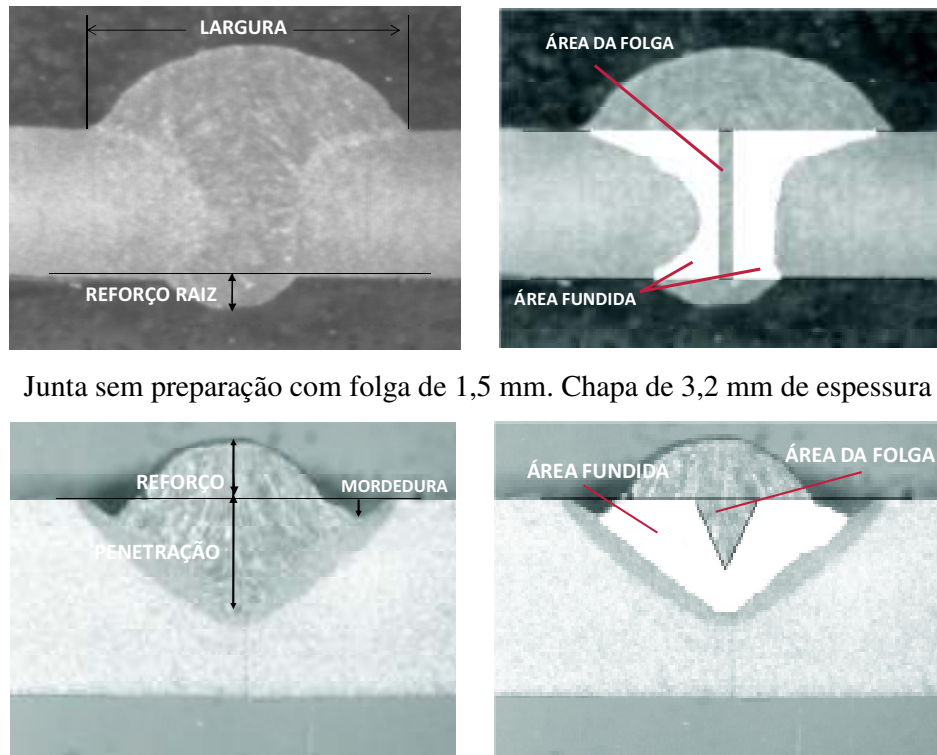
VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO SOBRE O ACABAMENTO E GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA APLICANDO OS MAPAS OPERACIONAIS

O objetivo desta etapa foi verificar a influência da tensão, velocidade de alimentação (corrente) e gás de proteção sobre o acabamento e geometria do cordão em soldagens representativas da consequência de se utilizar regulagens adequadas (dentro da região de estabilidade operacional) e inadequadas (fora da região de estabilidade operacional) para transferência por curto-circuito e goticular.

Para isto, foram utilizadas chapas de testes confeccionadas conforme item 3.5.4 do Capítulo III. A tocha foi inclinada com ângulo de trabalho igual a 0° e com um ângulo de ataque de 15° em relação a uma linha vertical perpendicular ao plano de soldagem, de modo que a soldagem ocorresse puxando a poça de fusão. A indutância da fonte foi regulada na posição zero (indicado pela palavra *off* no painel de regulagem). Todos os valores de regulagem dos parâmetros e resposta dos sinais elétricos são apresentados no Apêndice II.

Para realização da análise da geometria do cordão, seções transversais dos cordões foram metalograficamente preparadas para revelação do perfil do cordão. O corte foi realizado aproximadamente no meio da metade final do cordão e as amostras foram lixadas e atacadas com Nital 10%. Foi feita apenas uma seção por teste, pois mais importante do que quantificar os valores geométricos era visualizar a tendência de alteração do perfil do cordão. Foram medidas a penetração (ou reforço de raiz no caso das juntas com folga), reforço e área fundida através de um sistema de captura e medição das imagens. Os parâmetros geométricos medidos, em função do tipo de junta, são ilustrados na Fig. 8.1 para os dois tipos de junta

utilizados. A largura do cordão foi medida utilizando-se um paquímetro para cinco posições do cordão para verificação da regularidade geométrica do cordão através do desvio padrão deste parâmetro.



Junta sem preparação com folga de 1,5 mm. Chapa de 3,2 mm de espessura

Junta chanfrada em V sem folga. Chapa de 9,5 mm de espessura

Figura 8.1 – Ilustração dos parâmetros geométricos para cada tipo de junta utilizado nas soldagens

Para auxiliar na análise dos parâmetros geométricos, foi necessário o cálculo da energia de soldagem. A energia de soldagem (E), definida pela Eq. 8.1, fisicamente representa a potência gerada na fonte por unidade de comprimento de cordão de solda.

$$E = \frac{P}{V_{sold}} = \frac{U \times I}{V_{sold}} \quad (\text{J/mm}) \quad (8.1)$$

onde P = potência de soldagem (W); V_{sold} = velocidade de soldagem (mm/s); U = tensão (V) e I = corrente.

Nascimento et al (2007) mostraram em um artigo diferenças significativas no cálculo da potência utilizando diferentes métodos. Eles descrevem quatro métodos para o cálculo da

potência e concluem que o melhor foi um método proposto por eles e batizado de Potência Instantânea RMS ($P_{instRMS}$). Assim, neste estudo este método foi adotado para o cálculo da energia de soldagem e a Eq. 8.2 permite calcular a potência utilizando-o.

$$P_{instRMS} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (U_i \times I_i)^2}{n}\right)} \quad (8.2)$$

onde n = número de amostras da aquisição.

8.1. Influência da Regulagem da Tensão e Velocidade de Alimentação e do Tipo de Gás no Modo de Transferência por Curto-Circuito

As Figs. 8.2 a 8.7 mostram as vistas superiores e inferiores das placas de teste soldadas, enquanto as Figs. 8.8 a 8.10 mostram os perfis dos cordões para cada gás proposto. Pode-se notar que para soldagens dentro da região de estabilidade operacional, os cordões apresentam acabamentos superficiais mais lisos e larguras mais regulares. Nesta região, em geral, a raiz do cordão também apresenta acabamento melhor e mais uniforme e os perfis se apresentam mais regulares. Os valores de largura, exemplificados na Fig. 8.11 para um dos gases, quantificam a mencionada regularidade da largura para as soldagens dentro da região de estabilidade operacional através de menores valores de desvios padrões, assim como mostram a tendência de aumento do cordão para valores de tensão mais altos.

Pelas figuras das placas de teste, é ainda possível verificar que soldando com tensão com valores acima da região de estabilidade operacional (arcos longos suficientemente para fazer com que as gotas cresçam em demasiado antes de transferir) piora o acabamento superficial, cordões menos lisos e com aparecimento de mordeduras. Também se observa a tendência do colapso da poça (furo da chapa), principalmente para os gases mais ricos em CO_2 . O perfil do cordão acima de região de estabilidade operacional se mostrou dependente da velocidade de alimentação (corrente). Para os menores valores de velocidade de alimentação, ainda se consegue cordões regulares, mas para velocidades de alimentação mais altas a penetração fica excessiva. Já a operação com tensão em valores abaixo da região de estabilidade operacional (arcos curtos suficientemente para prejudicar a regularidade da transferência) apresenta cordões com irregularidades geométricas (largura e reforço),

acabamento não homogêneo, mordeduras e respingos visíveis. Também produz cordões com perfis irregulares.

O aumento da velocidade de alimentação (corrente) piora o acabamento de uma forma geral, aumenta a quantidade de respingos e mordeduras. Acima de um determinado valor provoca o colapso da poça (perfurações) em soldagens fora da região de estabilidade operacional.

Os gases de proteção apresentaram pouco efeito sobre o acabamento e perfil do cordão. Porém, a penetração e a área fundida aumentam com o teor de CO_2 . A Fig. 8.12 mostra a relação entre as áreas fundidas para as energias de soldagem calculada para as soldagens cujos pontos estão dentro da região de estabilidade operacional para cada gás de proteção. A correlação foi agrupada por gases para mostrar a influência deles na energia de soldagem e, conseqüentemente, na área fundida. Esta abordagem tenta mostrar que o aumento na área fundida se deve ao fato de que maior teor de CO_2 no gás de proteção promover o aumento da energia de soldagem.

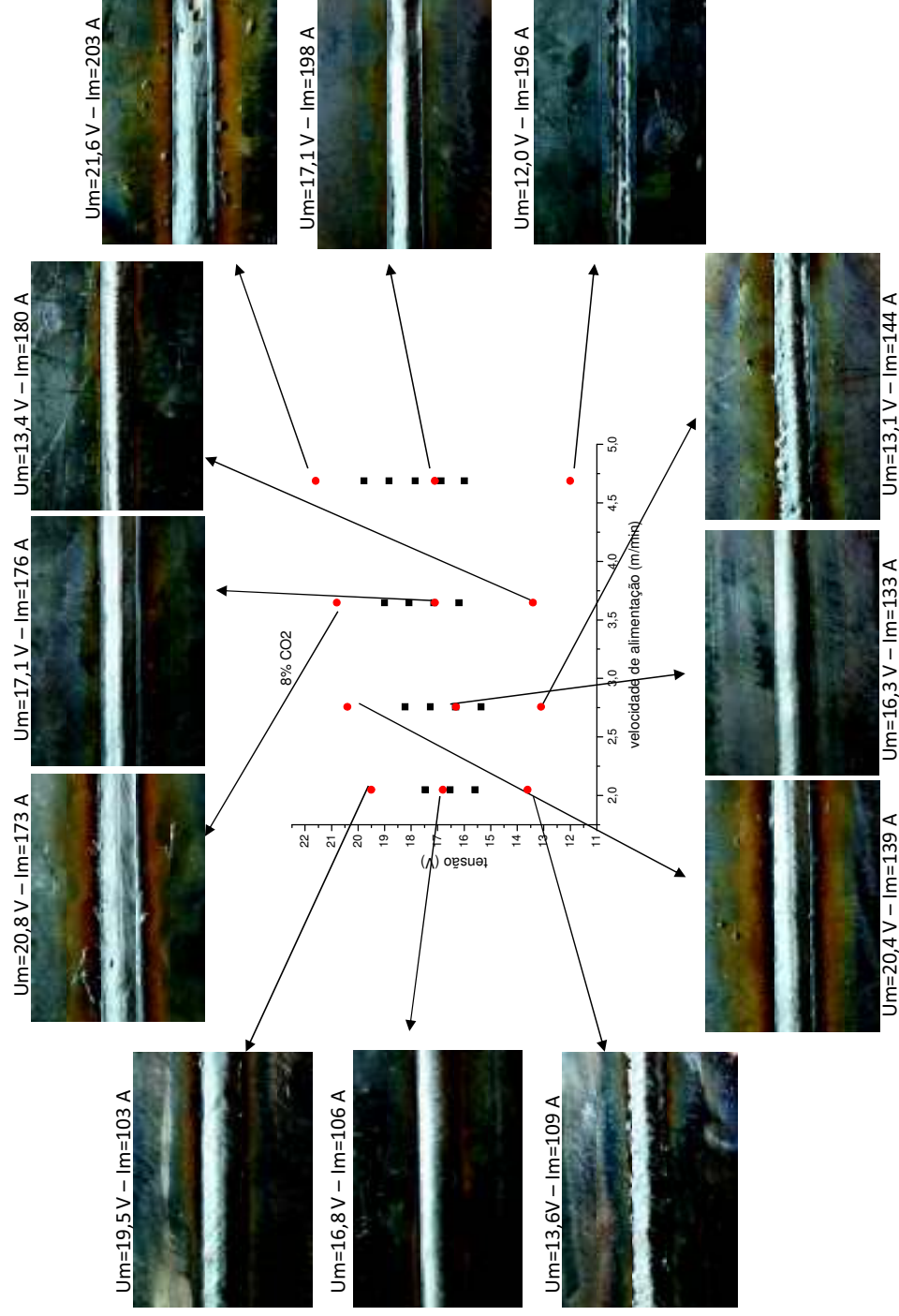


Figura 8.2 – Vista superior das placas de teste soldadas (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de curtos-circuitos, enquanto o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre a superfície do cordão de solda)

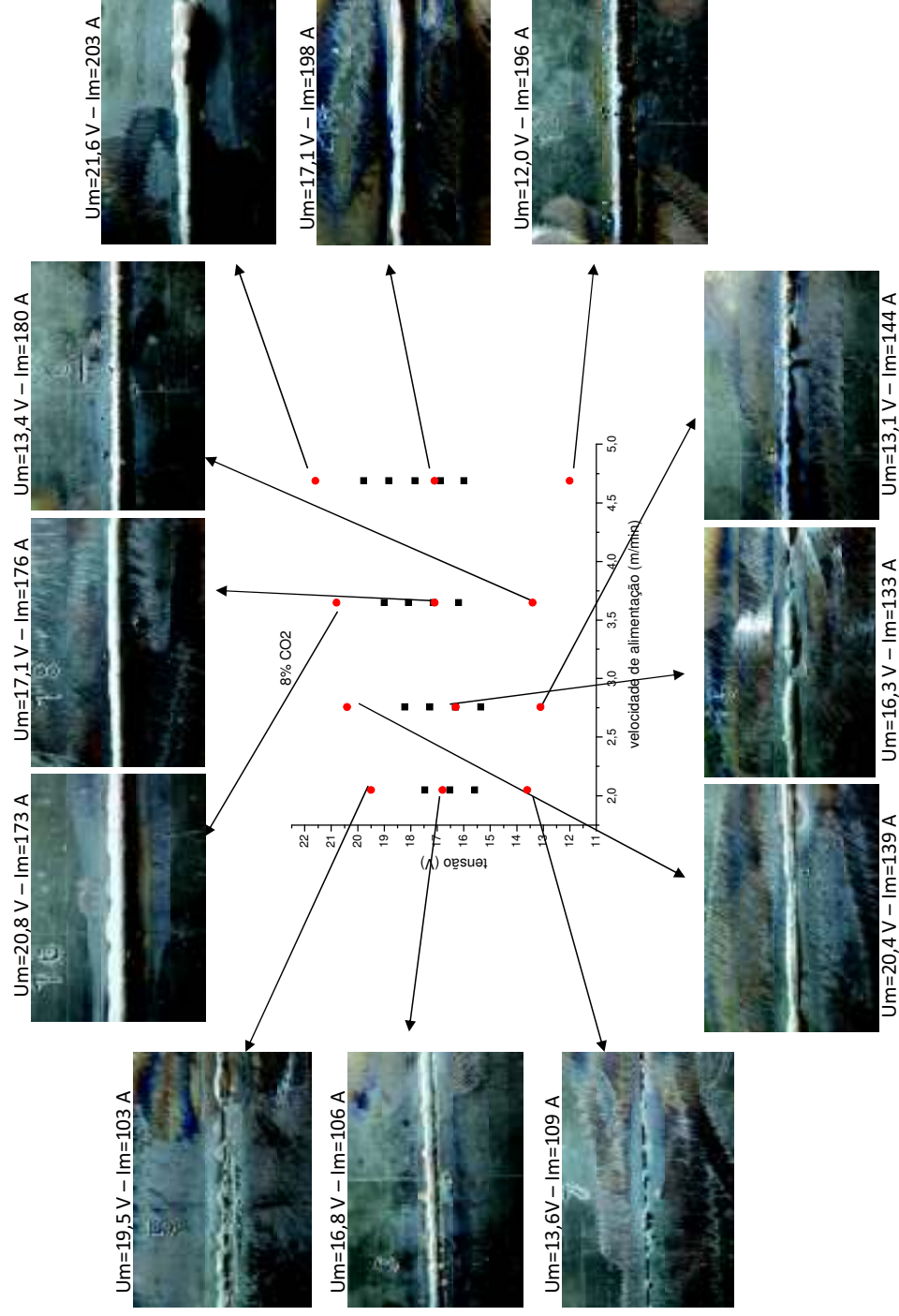


Figura 8.3 – Vista inferior das placas de teste soldadas (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de curtos-circuitos, enquanto o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre a raiz do cordão de solda)

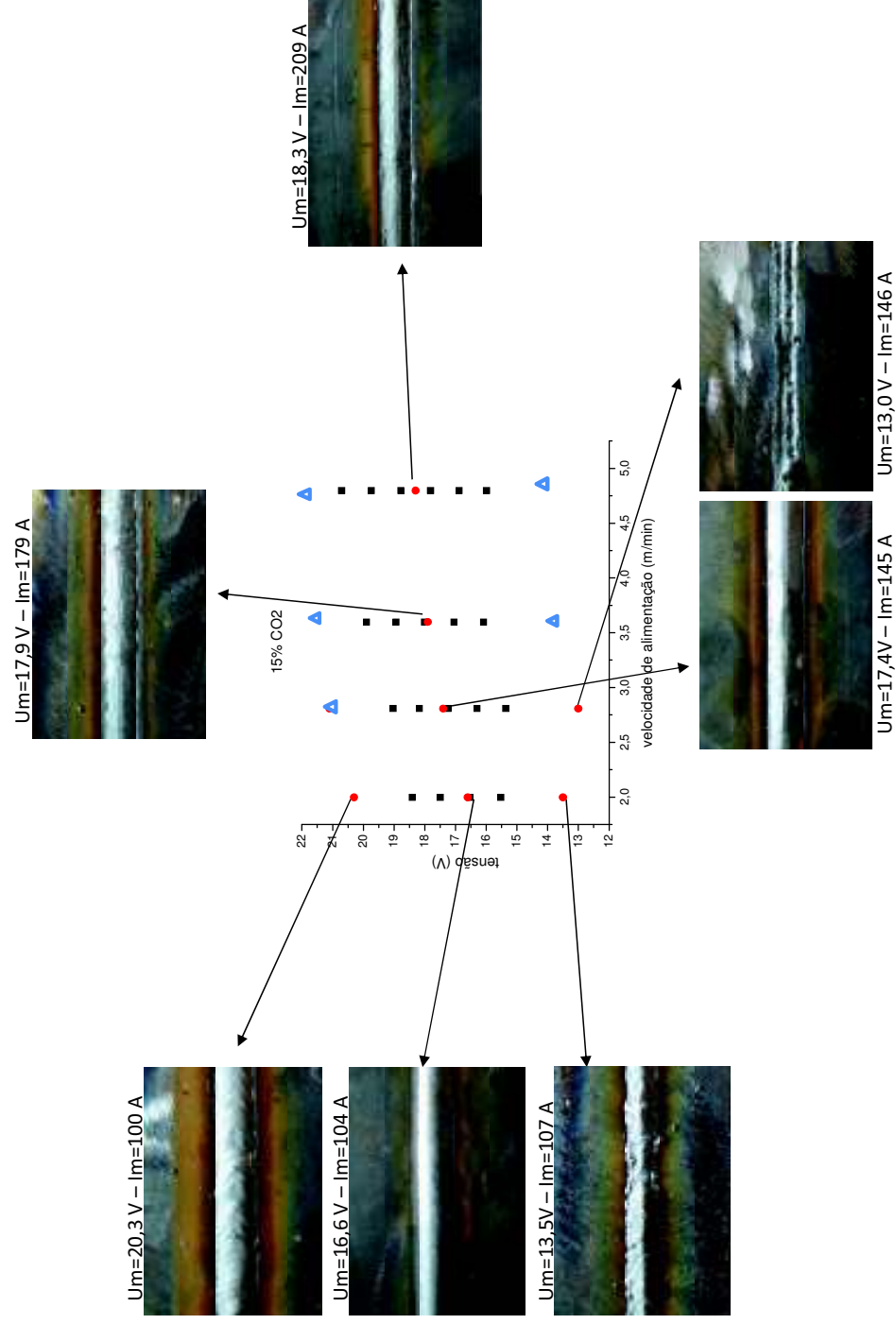


Figura 8.4 – Vista superior das placas de teste soldadas (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de curtos-circuitos, o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre a superfície do cordão de solda e o símbolo triângulo refere-se à combinação de parâmetros que levam ao colapso da poça - furo da chapa)

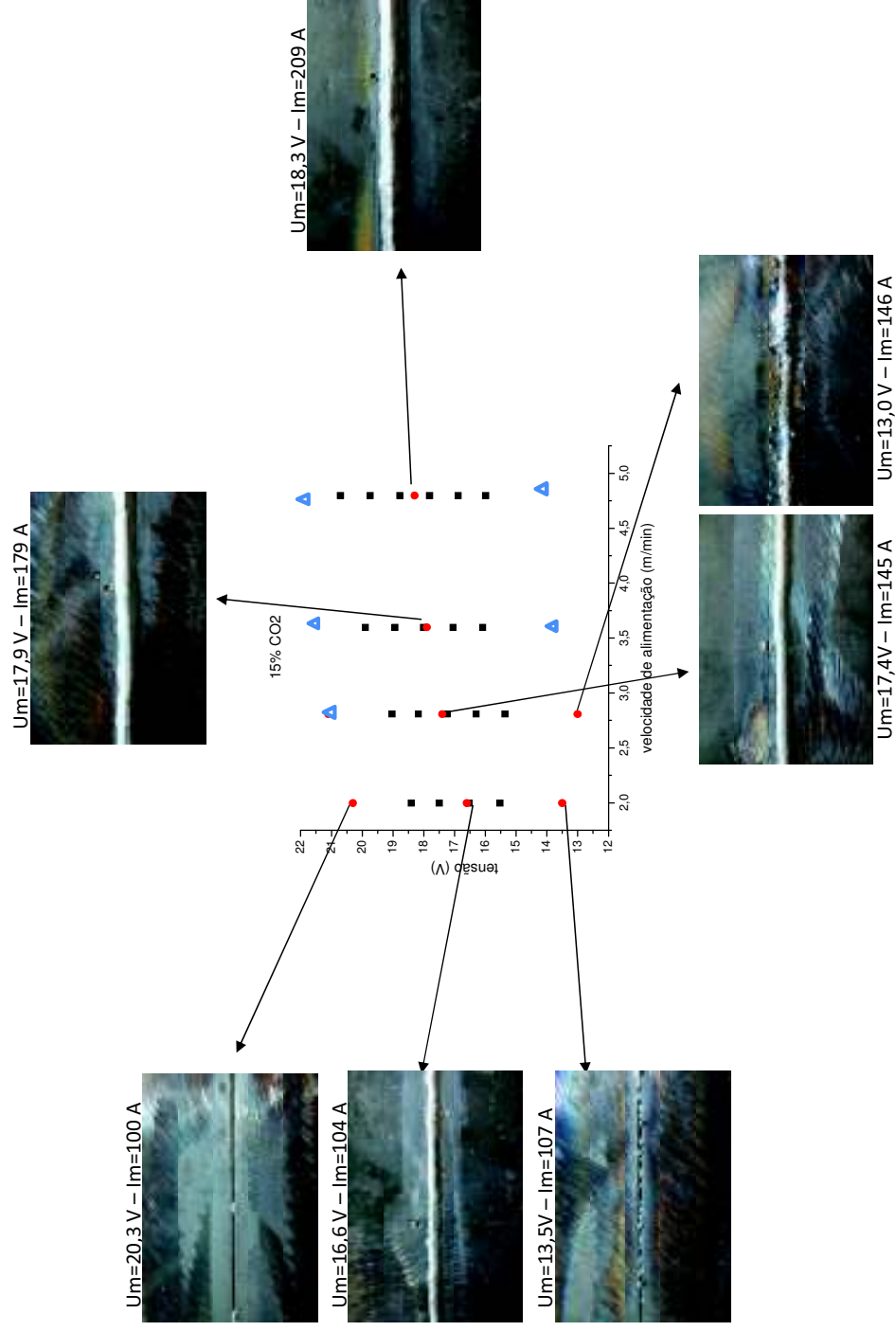


Figura 8.5 – Vista inferior das placas de teste soldadas (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de curtos-circuitos, o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre a raiz do cordão de solda e o símbolo triângulo refere-se à combinação de parâmetros que levam ao colapso da poça - furo da chapa)

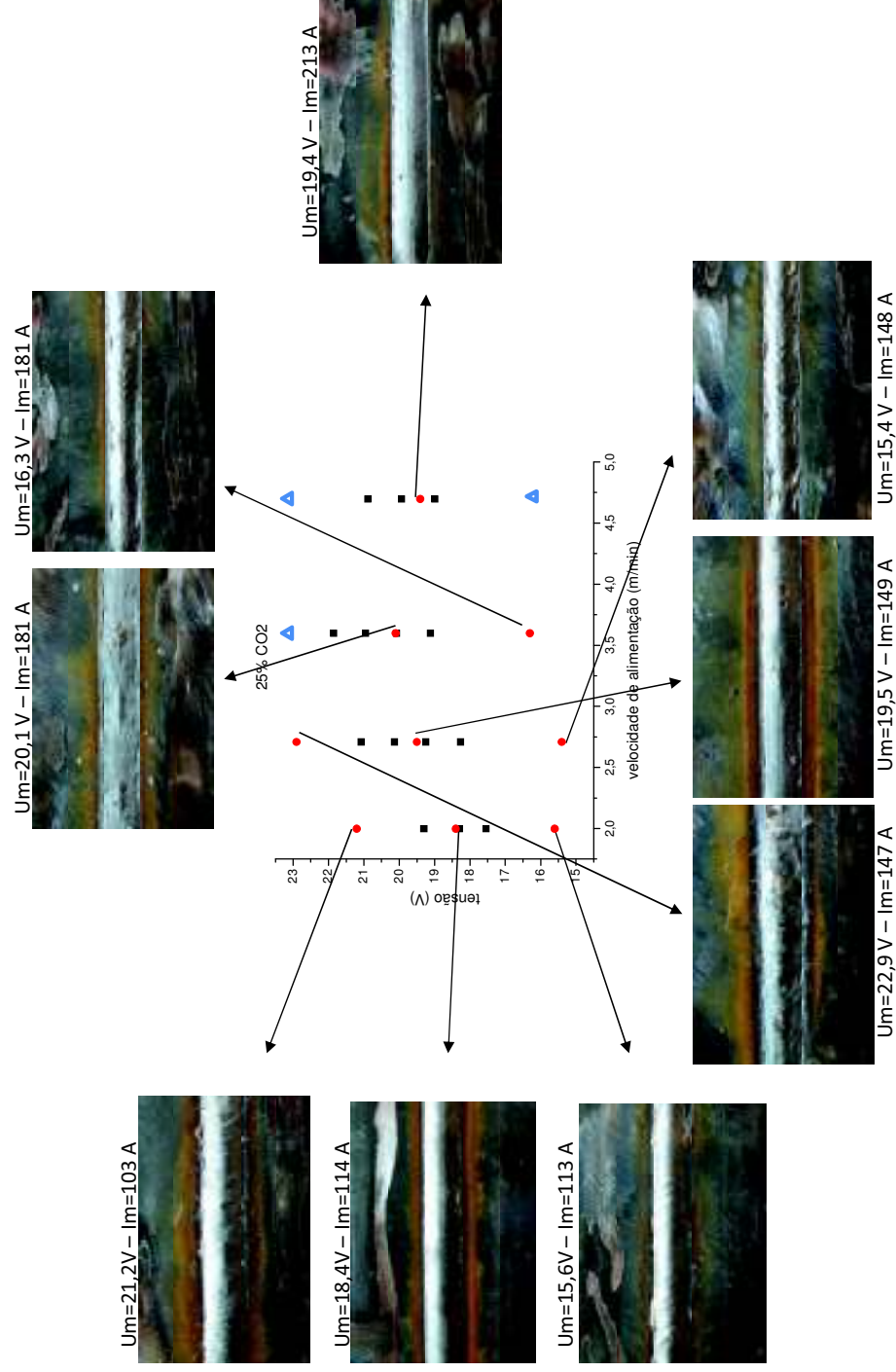


Figura 8.6 – Vista superior das placas de teste soldadas (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de curtos-circuitos, o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre a superfície do cordão de solda e o símbolo triângulo refere-se à combinação de parâmetros que levam ao colapso da poça - furo da chapa)

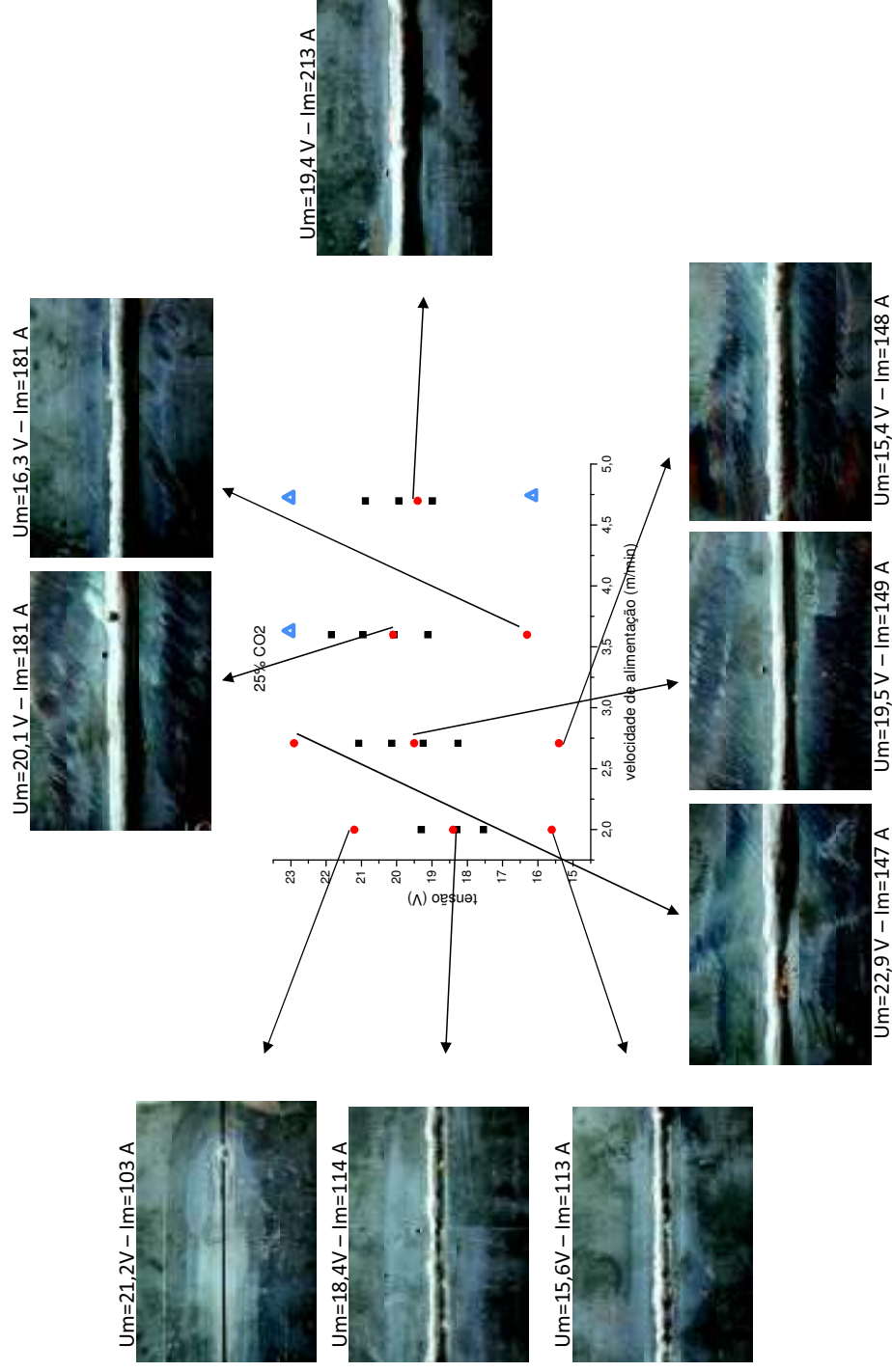


Figura 8.7 – Vista inferior das placas de teste soldadas (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de curtos-circuitos, o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre a raiz do cordão de solda e o símbolo triângulo refere-se à combinação de parâmetros que levam ao colapso da poça - furo da chapa)

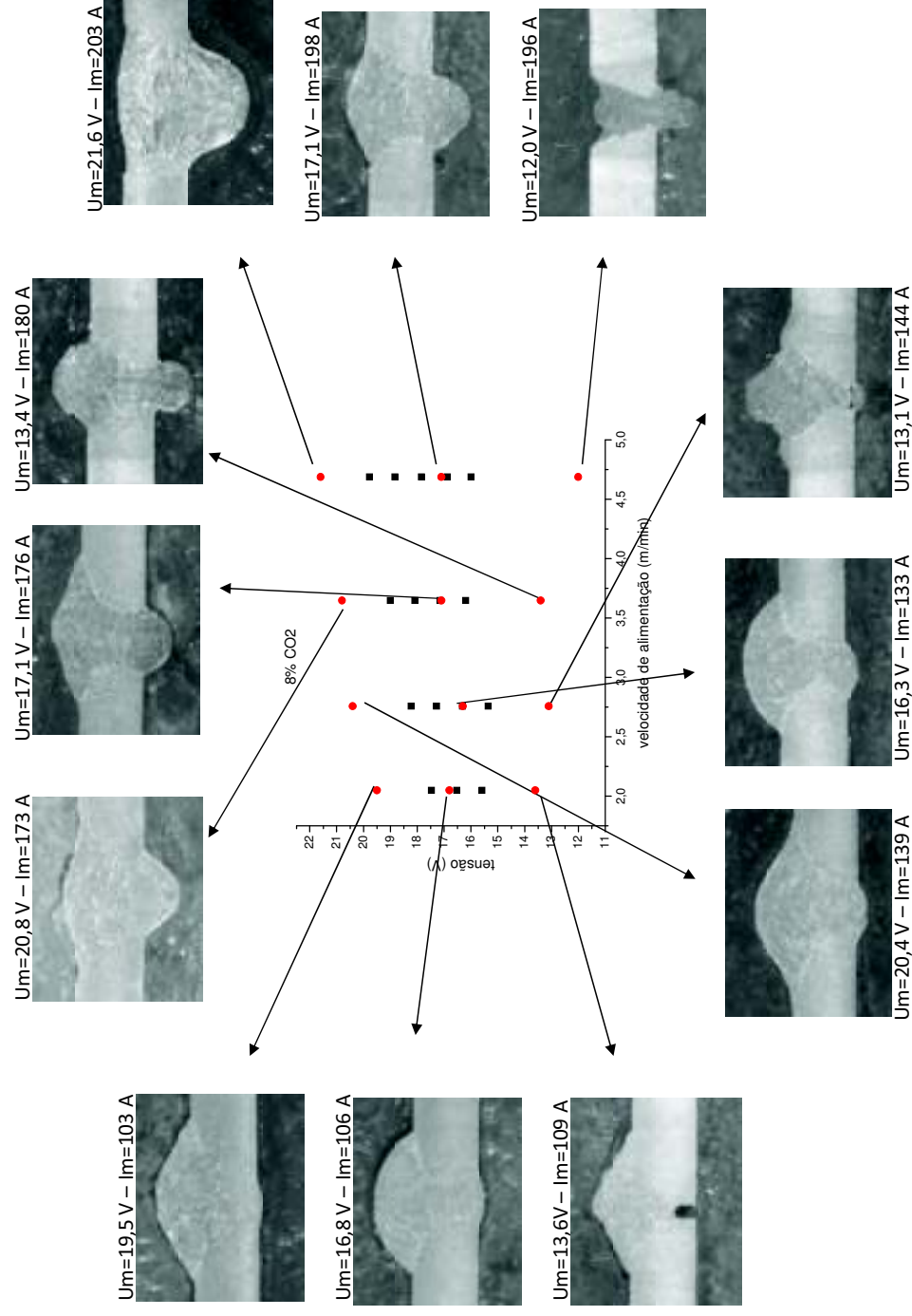


Figura 8.8 – Perfis dos cordões de solda (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de curtos-circuitos, enquanto o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre o perfil do cordão de solda – espessura da chapa igual a 3,2 mm)

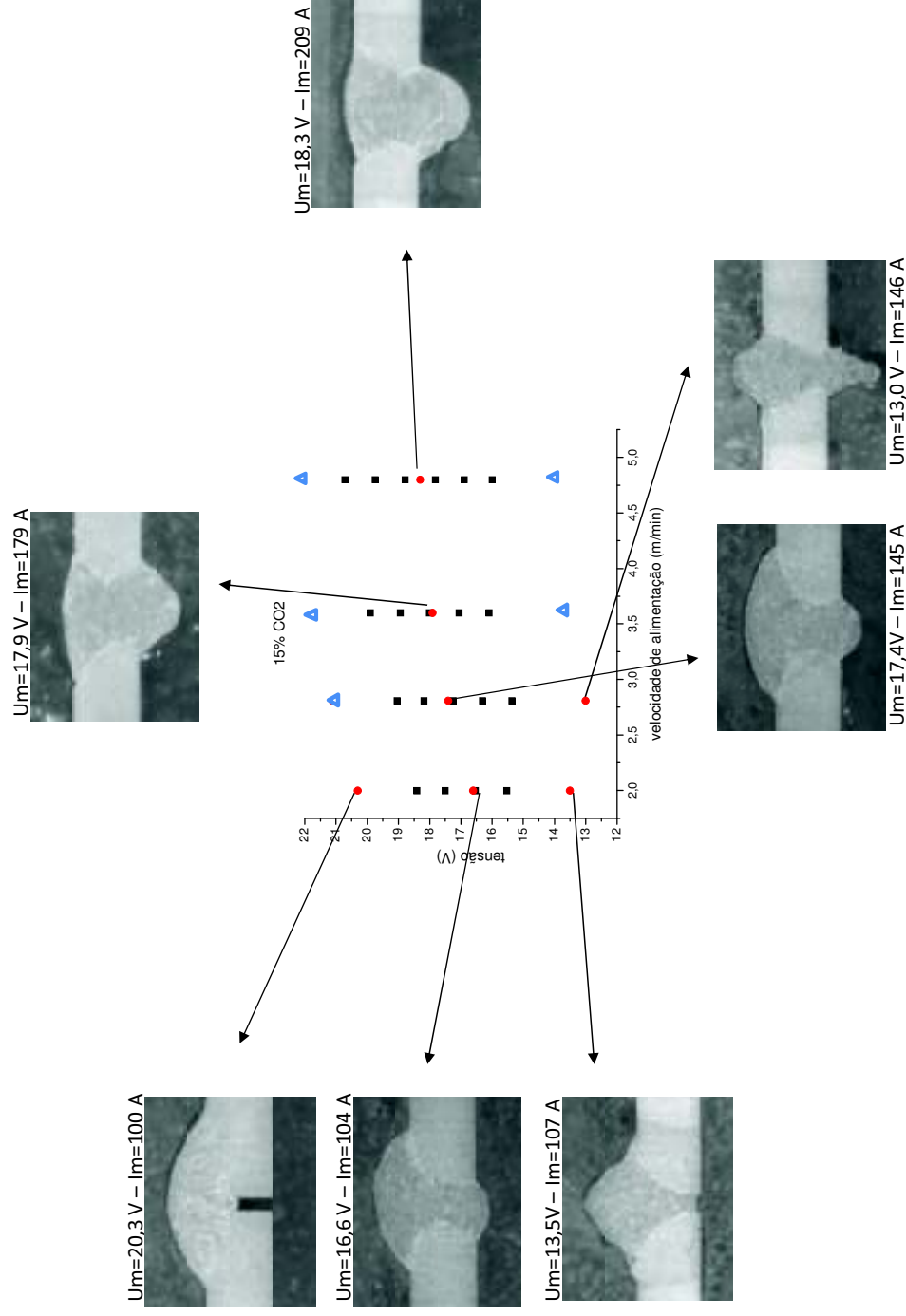


Figura 8.9 – Perfis dos cordões de solda (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de curtos-circuitos, o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre o perfil do cordão de solda e o símbolo triângulo refere-se à combinação de parâmetros que levam ao colapso da poça – furo da chapa – espessura da chapa igual a 3,2 mm)

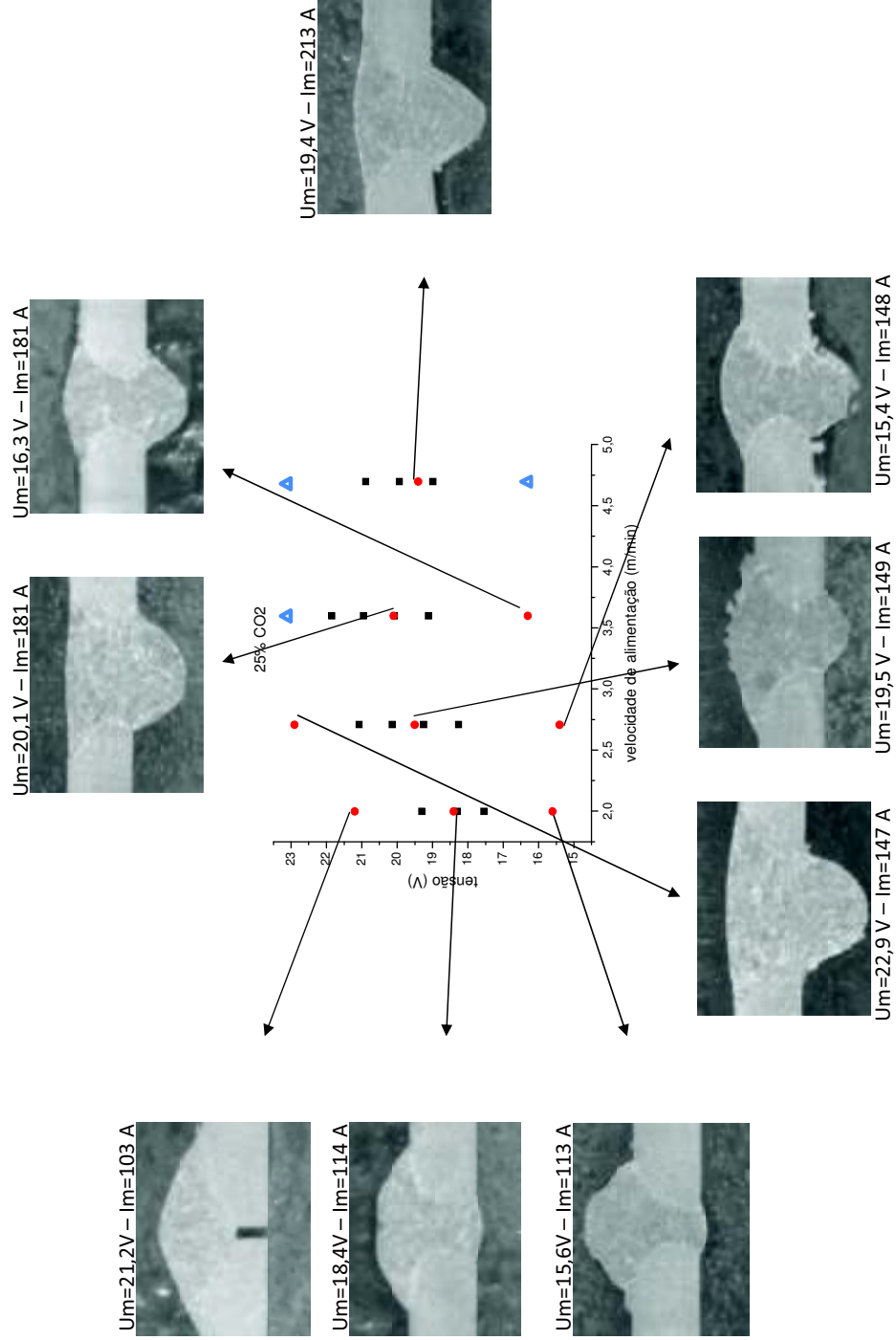


Figura 8.10 – Perfis dos cordões de solda (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de curtos-circuitos, o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre o perfil do cordão de solda e o símbolo triângulo refere-se à combinação de parâmetros que levam ao colapso da poça - furo da chapa - espessura da chapa igual a 3,2 mm)

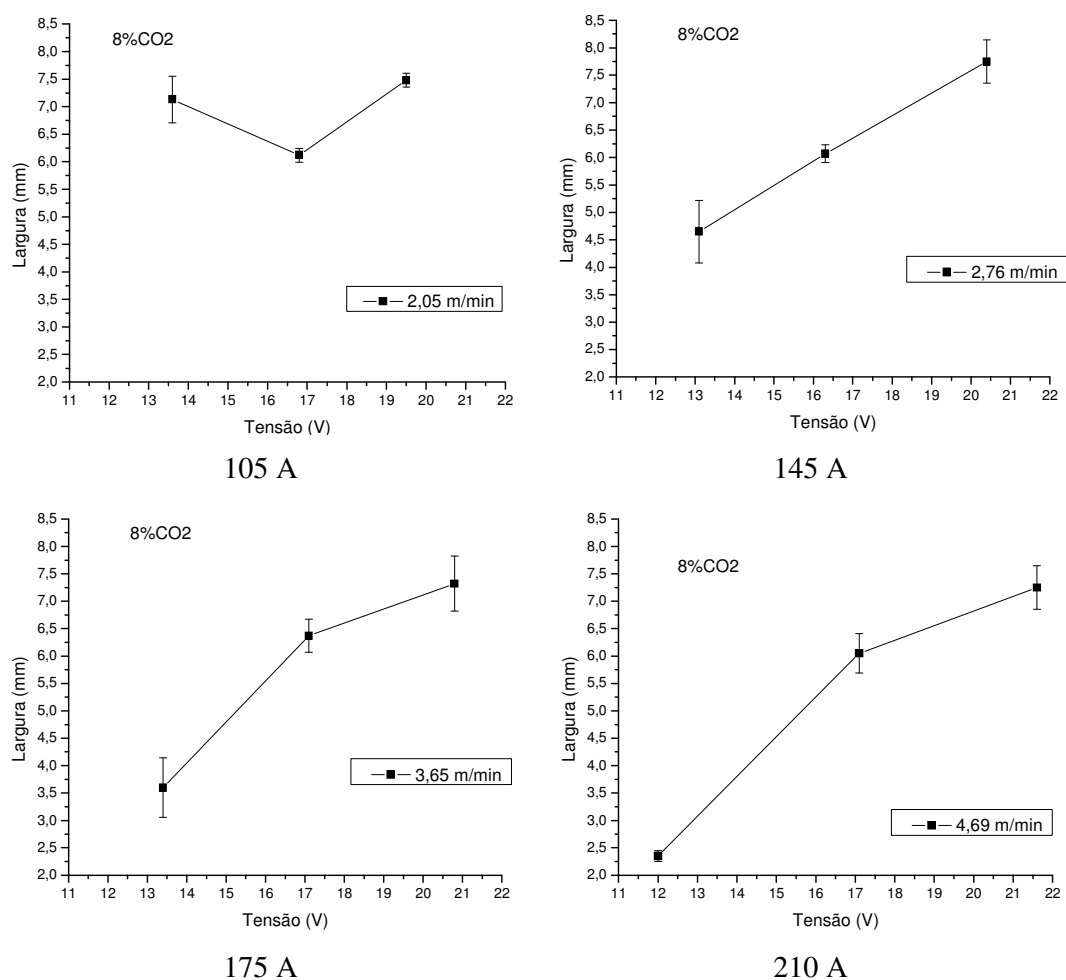


Figura 8.11 – Largura média do cordão e respectivos desvios padrões (cinco medidas) para a soldagem em curto-circuito com proteção com Ar + 8%CO₂ (o ponto no meio da faixa de tensão representa parâmetros dentro da região de estabilidade operacional no mapa, enquanto os pontos com valores menores e maiores são aqueles fora da região)

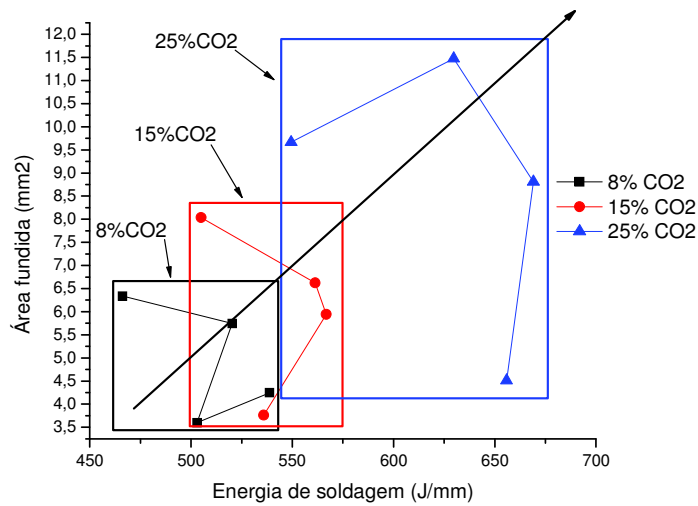


Figura 8.12 – Área fundida em função da energia de soldagem e gás de proteção para as soldagens dentro da região de estabilidade operacional de curto-circuito (os quatro pontos de cada gás são em relação às velocidades de alimentação/correntes - as áreas delimitadas pelos retângulos são apenas para facilitar a visualização, não podendo se interpolar os pontos dentro deles)

8.2. Influência da Regulagem da Tensão e Velocidade de Alimentação e do Tipo de Gás no Modo de Transferência Goticular

As Figs. 8.13 a 8.15 mostram as vistas superiores das placas de teste soldadas, enquanto as Figs. 8.16 a 8.18 mostram os perfis dos cordões para cada gás proposto. Para soldagens com tensões acima da região de estabilidade operacional (comprimento de arco acima de 8 mm) é possível notar a deterioração do cordão e o aparecimento de mordeduras, mesmo com baixas velocidades de alimentação (a Fig. 8.19 quantifica o efeito do comprimento de arco, traduzido pela tensão, na ocorrência de mordeduras). Para soldagens com tensões abaixo da região de estabilidade operacional (onde começam a ocorrer curtos-circuitos), o cordão não apresentou piora do acabamento superficial (ao contrário em alguns casos nota-se uma melhora), exceto quando o gás de proteção utilizado foi Ar + 5%O₂. Lembrar que as soldagens foram realizadas dentro de juntas chanfradas, sendo sabido que este tipo de junta é muito suscetível a mordeduras e irregularidades, mesmo com arcos de comprimento moderado. Por isto, quando se utilizou arcos muito curtos (provocando curtos-circuitos) ocorreu à melhora do acabamento, pois o arco provavelmente não oscilava como

acontece com arcos mais longos, mas sob pena de perda de material por respingos. Além disso, ainda para tensões abaixo da região de estabilidade operacional, os cordões apresentaram maior penetração (principalmente a altas velocidades de alimentação), porém com pouca largura, produzindo perfis de cordões metalurgicamente indesejáveis (alta relação penetração/largura).

Finalmente, para soldagens dentro da região de estabilidade operacional, os cordões apresentam acabamentos superficiais lisos e regulares, porém com aparecimento de algumas mordeduras. Esses resultados, dentro e fora da região de estabilidade operacional, sugerem que talvez o critério de arco com 8 mm para o limite superior desse região não seja o mais apropriado, pelo menos para a junta utilizada, já que nas soldagens de simples deposição mordeduras não foram evidenciadas para esses comprimentos de arco.

O aumento da velocidade de alimentação tem como principal efeito o aumento da penetração e ocorrência de mordeduras. Já os gases de proteção Ar + 8%CO₂ e Ar + 15%CO₂ afetam pouco o acabamento e aumentam a molhabilidade da poça para formar o cordão, enquanto a mistura Ar + 5%O₂ promove acabamento menos regular e cordões mais convexos, principalmente a altas correntes. A mistura Ar + 5%O₂ foi a única que mostrou ocorrência de mordeduras, mesmo dentro da região de estabilidade operacional. Outra observação interessante é a ocorrência de “humping” nas soldagens com proteção de Ar + 5%O₂ e velocidades de alimentação mais altas (conseqüentemente maiores velocidades de soldagem). Porém, este resultado contradiz dados da literatura que afirmam que a adição de O₂ no gás de proteção diminui a tensão superficial aumentando, assim, a fluidez da poça e permitindo maiores velocidades de soldagem; Persson (1988 apud STENBACKA; PERSSON, 1989), apresenta resultados que mostram (Fig. 8.20) que a adição de O₂ aumenta a velocidade de soldagem ótima (maior velocidade possível sem defeitos) e cita que isto ocorre devido ao aumento da fluidez da poça de fusão. Por outro lado, Reis e Scotti (2007) mostraram, para soldagens com plasma, que a adição de 5% de O₂ em Ar piorou o acabamento do cordão em relação à mistura Ar + 5%H₂, deixando a impressão de que o oxigênio não foi capaz de favorecer o acabamento do cordão (pela redução da tensão superficial), ainda segundo estes autores, mostrando que outros fatores, como condutividade térmica, podem governar o fenômeno de formação do cordão.

De forma similar à Fig. 8.12, a Fig. 8.21 mostra a influência do gás de proteção em soldagens dentro da região de estabilidade operacional sobre a área fundida. Pode-se perceber que existe uma tendência de o aumento do teor de CO₂ aumentar a energia de soldagem,

acrescendo, como consequência, a área fundida. Nota-se que a mistura com 5% de O_2 tem efeito intermediário, sustentando a regra geral no meio da soldagem de que o efeito do O_2 é o dobro do CO_2 , mesmo que a aplicação desta regra seja ainda um assunto controverso.

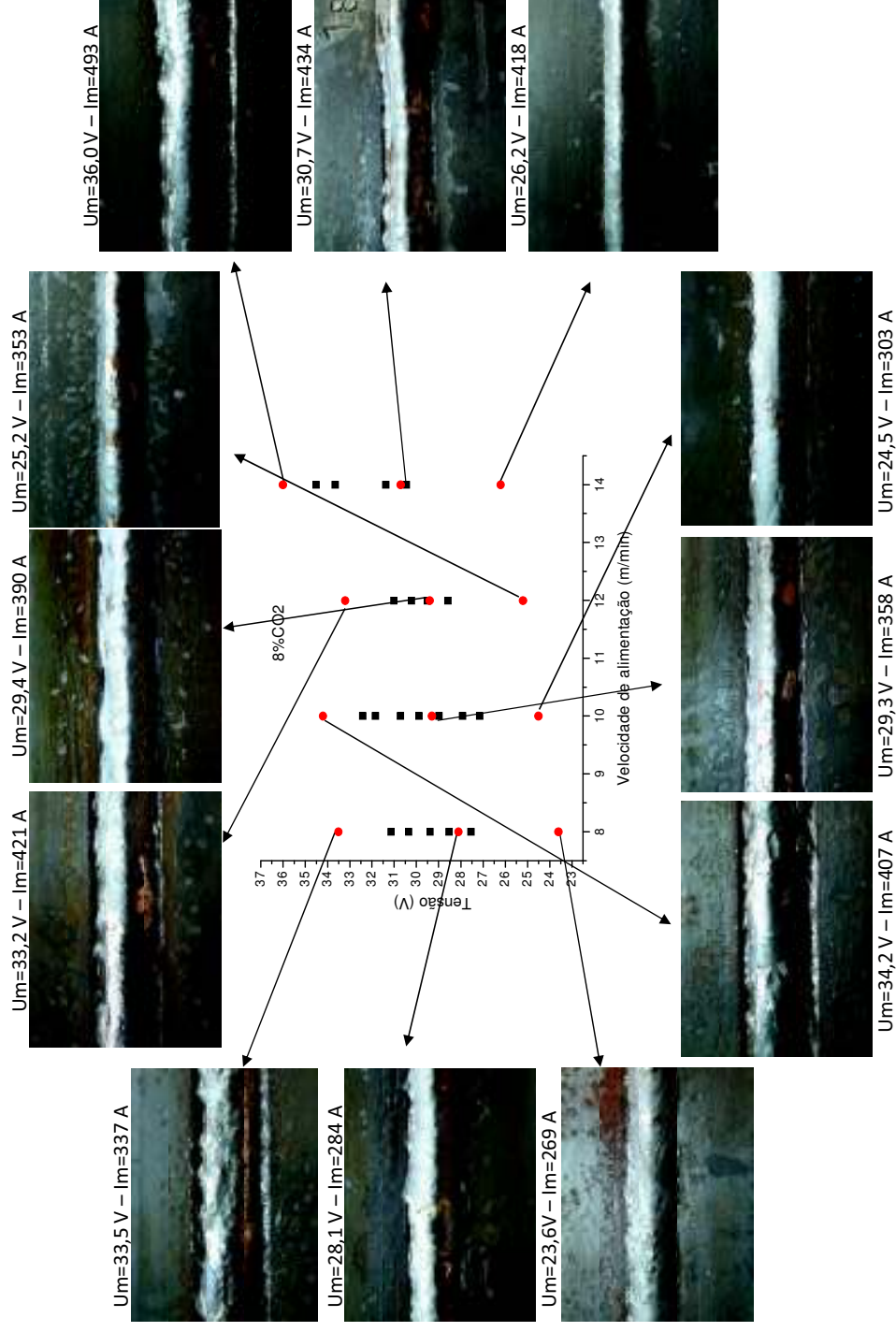


Figura 8.13 – Vista superior das placas de teste soldadas (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de transferência goticular, enquanto o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre a superfície do cordão de solda)

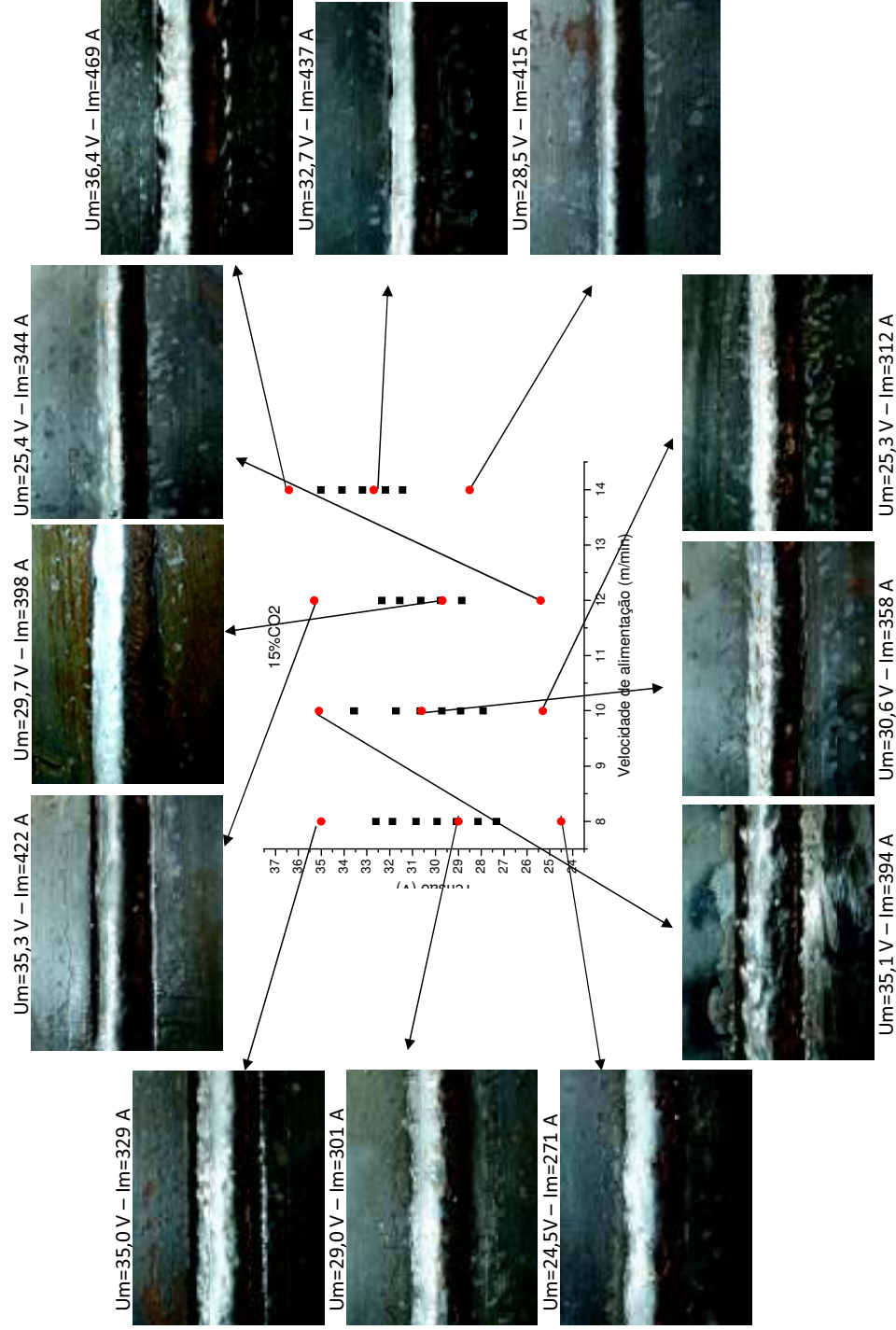


Figura 8.14 – Vista superior das placas de teste soldadas (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de transferência goticular, enquanto o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre a superfície do cordão de solda)

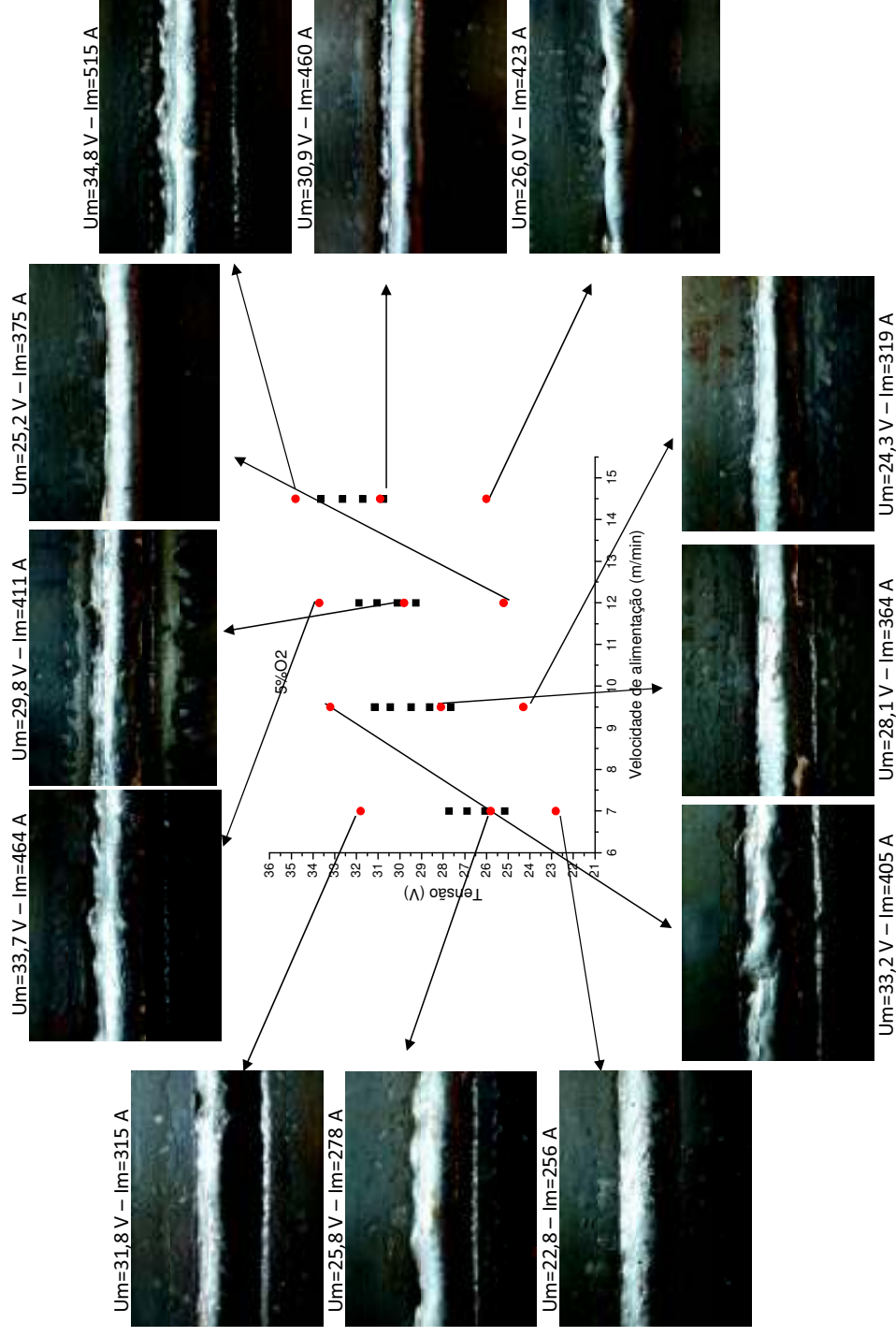


Figura 8.15 – Vista superior das placas de teste soldadas (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de transferência goticular, enquanto o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre a superfície do cordão de solda)

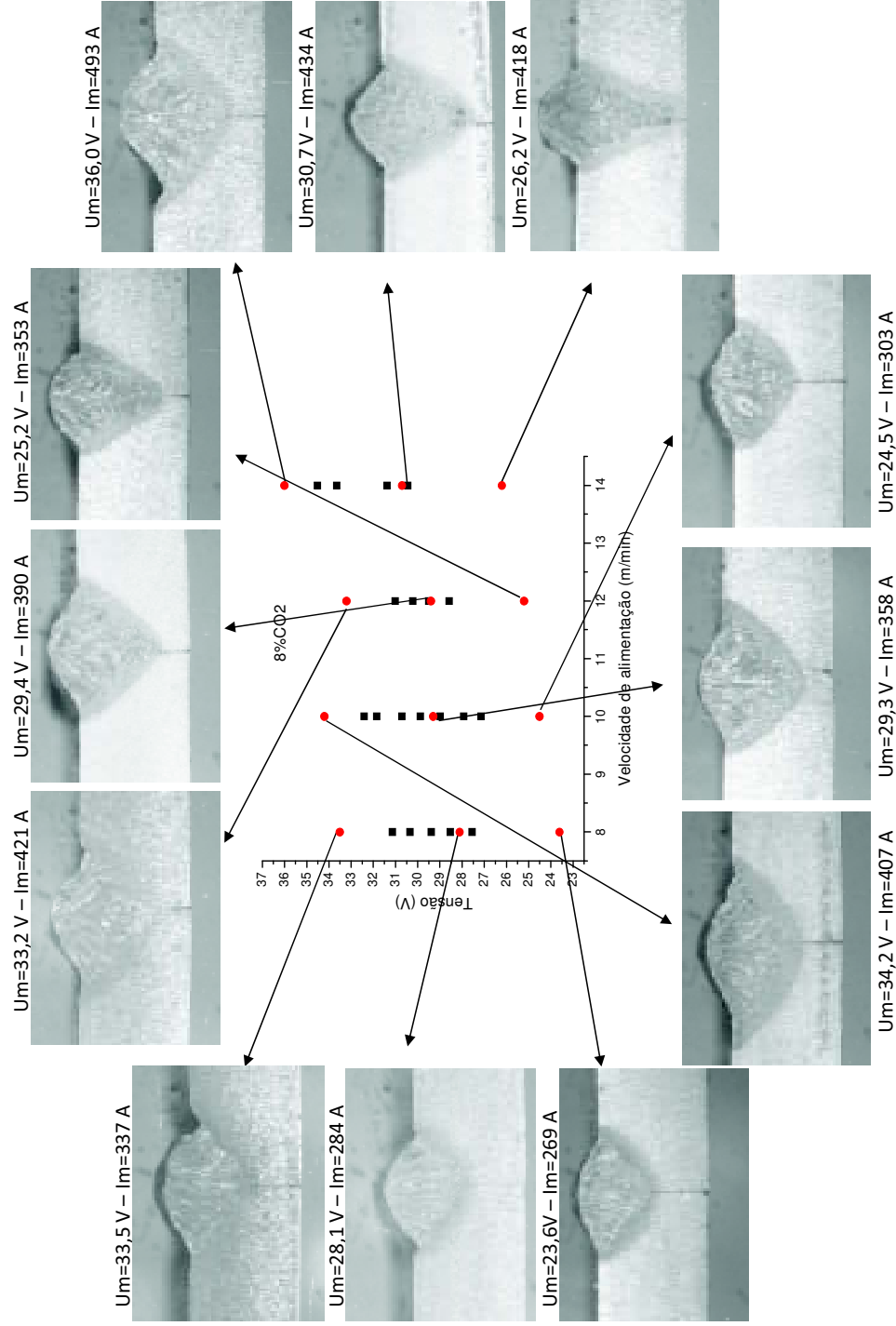


Figura 8.16 – Perfis dos cordões de solda (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de transferência gótica, enquanto o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre o perfil do cordão de solda – espessura da chapa igual a 9,5 mm)

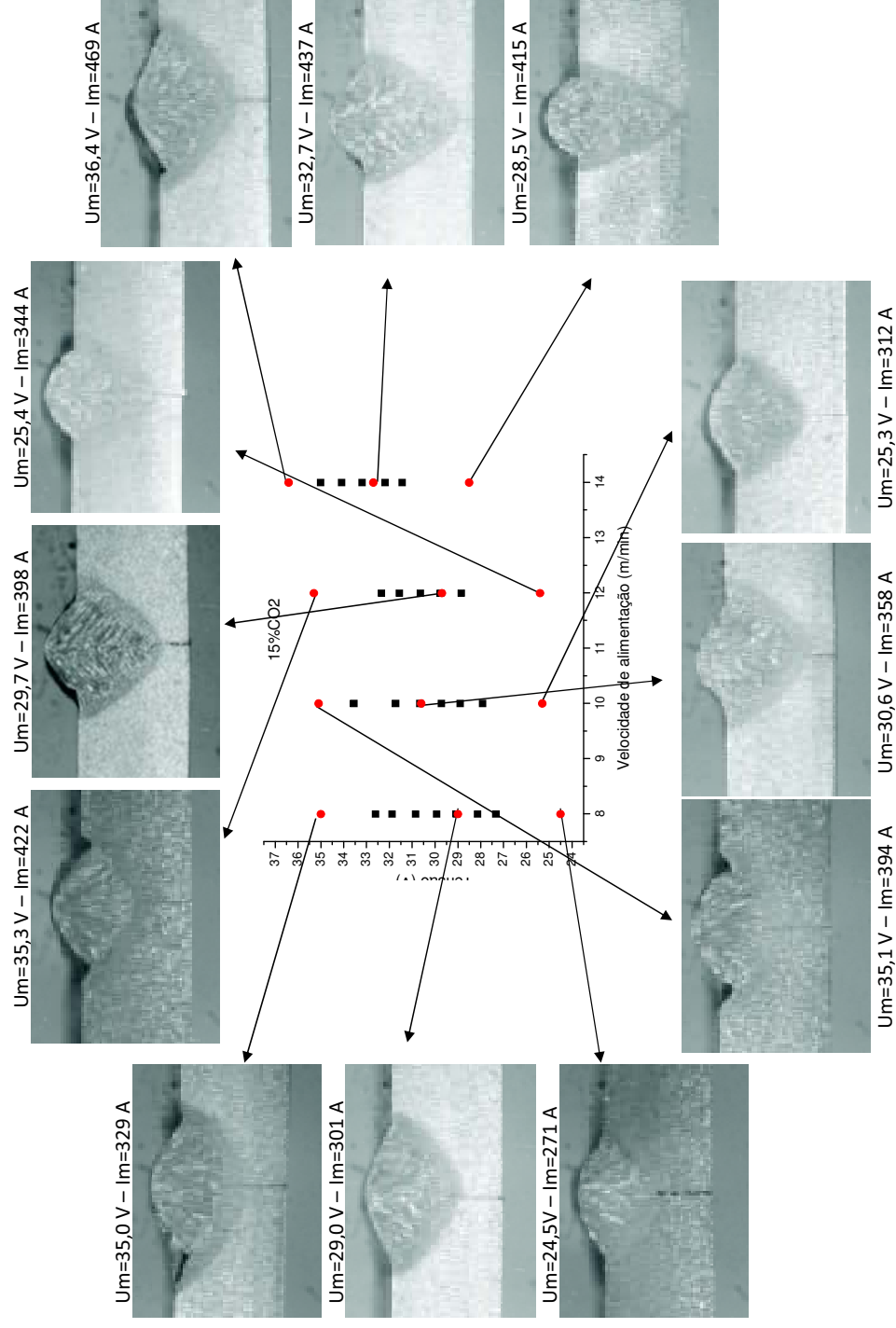


Figura 8.17 – Perfis dos cordões de solda (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de transferência gótica, enquanto o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre o perfil do cordão de solda – espessura da chapa igual a 9,5 mm)

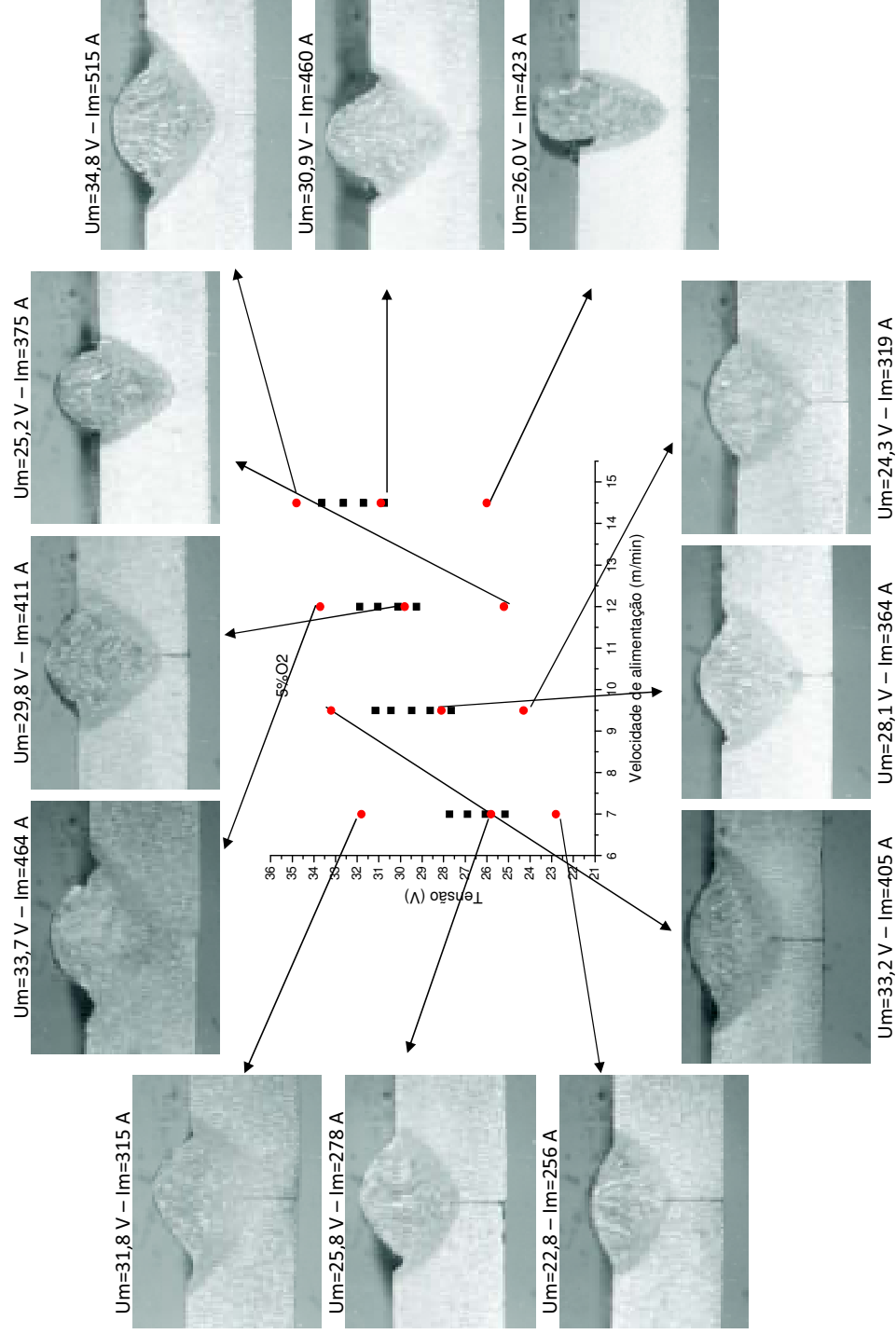


Figura 8.18 – Perfis dos cordões de solda (o símbolo quadrado representa as regulagens que estão dentro da região de estabilidade operacional de transferência goticular, enquanto o símbolo redondo indica as regulagens usadas para avaliar o efeito das mesmas sobre o perfil do cordão de solda – espessura da chapa igual a 9,5 mm)

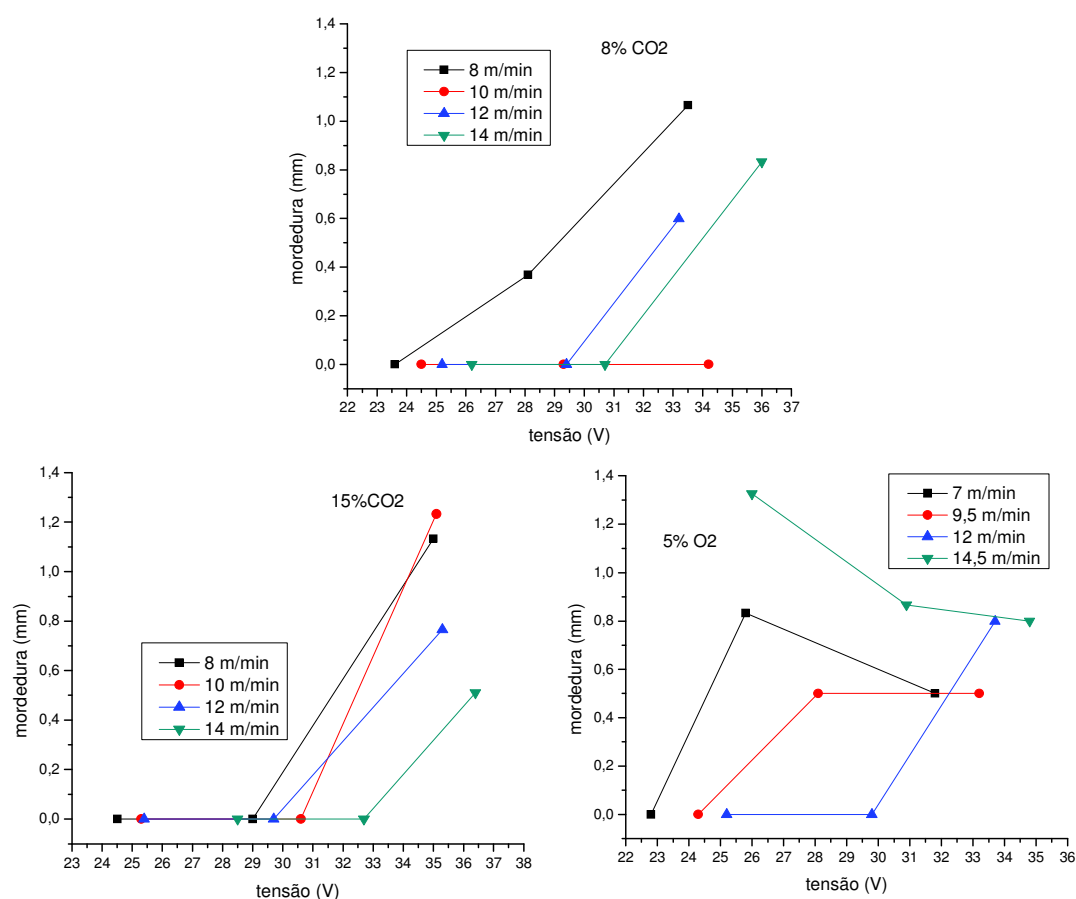


Figura 8.19 – Valores de profundidade de mordedura em função da tensão para os gases de proteção utilizados (o ponto no meio da faixa de tensão representa parâmetros dentro da região de estabilidade operacional no mapa, enquanto os pontos com valores menores e maiores são aqueles fora da região)

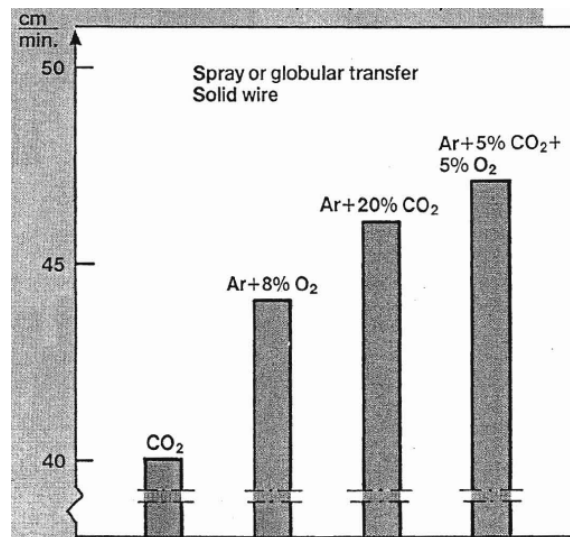


Figura 8.20 – Valores ótimos de velocidade de soldagem (no sentido de promover cordões sem defeito) para diferentes gases de proteção usando processo MIG/MAG mecanizado para soldagem de aço de médio carbono com velocidade de alimentação constante de 12 m/min, usando arame-eletrodo de 1,0 mm (PERSSON, 1988 apud STENBACKA; PERSSON, 1989)

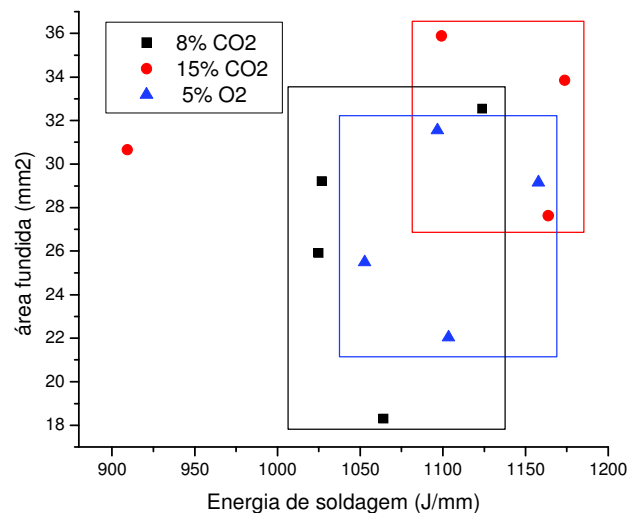


Figura 8.21 – Área fundida em função da energia de soldagem e gás de proteção para os pontos do mapa dentro da região de estabilidade operacional de transferência goticular (os quatro pontos de cada gás são em relação às velocidades de alimentação/correntes - notar que um dos pontos do gás Ar + 15%CO₂ foi descartado – as áreas delimitadas pelos retângulos são apenas para facilitar a visualização, não podendo se interpolar os pontos dentro deles)

CAPÍTULO IX

VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO SOBRE O RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO APLICANDO OS MAPAS OPERACIONAIS

O objetivo desta fase do trabalho foi verificar a influência da tensão, velocidade de alimentação (corrente) e gás de proteção sobre o rendimento de deposição, para soldagens que fossem representativas da consequência de se utilizar regulagens adequadas (dentro da região de estabilidade operacional) e inadequadas (fora da região de estabilidade operacional) para operações em curto-circuito e goticular.

Para isto, foram utilizadas chapas de testes confeccionadas conforme item 3.5.4 do Capítulo III. A tocha foi inclinada com ângulo de trabalho igual a 0° e com um ângulo de ataque de 15° em relação a uma linha vertical perpendicular ao plano de soldagem, de modo que a soldagem ocorresse puxando a poça de fusão. A indutância da fonte foi regulada na posição zero (indicado pela palavra *off* no painel de regulagem). Todos os valores de regulagem dos parâmetros e resposta dos sinais elétricos são apresentados no Apêndice II.

O cálculo do rendimento de deposição (n_d) leva em conta a massa de arame fundido (m_f) e a massa depositada (m_d). A relação entre as duas é o rendimento de deposição (Eq. 9.1).

$$n_d = \frac{m_d}{m_f} \times 100 \quad (9.1)$$

A massa fundida pode ser calculada utilizando-se a Eq. 9.2, representando a velocidade de alimentação (V_{alim}) de um arame com densidade (ρ) e área da seção transversal do arame (A) durante um período de tempo (t).

$$m_f = \rho \times V_{alim} \times A \times t \quad (9.2)$$

Para obtenção do diâmetro, foram realizadas 10 medidas com um micrômetro em diferentes posições ao longo do pedaço de arame ($1,19 \pm 0,01$ mm). A densidade do arame (ρ) foi determinada buscando-se dados na literatura para um aço ABNT 1010, ou seja, $7,85 \text{ g/cm}^3$. O tempo (t) foi obtido pelos oscilogramas das soldagens e representa o período total entre a abertura e extinção do arco.

A massa fundida de arame é determinada pela diferença de massas antes e depois da soldagem. Para isto, pesa-se a placa de teste antes da soldagem e após a retirada da escória e respingos que por ventura ficarem agarrados a placa. Para realização das medidas das massas (placas e arame), utilizou-se uma balança com resolução de 0,01 g e capacidade máxima de 2000 g.

9.1. Influência dos Parâmetros sobre o Rendimento de Deposição para o Modo de Transferência por Curto-Circuito

A Fig. 9.1 apresenta o rendimento de deposição em função da tensão de soldagem para os três gases de proteção e regulagens de velocidades de alimentação utilizadas. O ponto central para cada combinação gás de proteção-velocidade de alimentação representa uma solda feita com parâmetros dentro da região de estabilidade operacional. Os dois outros pontos, um à esquerda e outro à direita, são pontos escolhidos propositalmente fora dessa região.

Para regulagens de soldagens com valores de tensão dentro da região de estabilidade operacional, os valores de rendimento de deposição ficaram altos, indicando baixo nível de respingos (lembrando que em MIG/MAG as perdas por evaporação ou formação de escória são desprezíveis). A geração de respingo é indesejável, pois, além de aumentar o custo da soldagem pela perda de material, promovem uma etapa a mais para retirada dos mesmos. Os valores de regulagem de tensão acima da região de estabilidade operacional também levam a baixo nível de respingos, mas estas regulagens devem ser evitadas por outros motivos, como baixa regularidade térmica (gotas maiores e mais esparsas ao se transferir) e arco longo (susceptibilidade à porosidade e efeito “humping” e menor rigidez do arco).

Porém, pode-se notar que para soldagens abaixo da região de estabilidade operacional (menores valores de tensão) existe uma tendência de diminuição do rendimento de deposição,

fato nem sempre observado somente com a mistura Ar + 25%CO₂. É importante também notar que em alguns casos, como para a velocidade de alimentação de 4,69 m/min e gás de proteção Ar + 8%CO₂ ou para a velocidade de alimentação de 2,81 m/min e gás de proteção Ar + 15%CO₂, essa queda de rendimento de deposição foi significativa. Deve-se lembrar que os limites à esquerda e à direita da região operacional não é algo definido com precisão, devendo existir uma faixa de transição. Assim, ao se escolher pontos fora da região de estabilidade operacional, estes podem ter sido de maior ou menor instabilidade, dependendo do valor de tensão escolhida. Nos casos apontados, pode-se ver que são os valores de menor tensão, conseqüentemente de menor comprimento de arco, susceptíveis a instabilidade por essa razão. Já para a mistura Ar + 25%CO₂, aparentemente não se trabalhou com regulagens muito instáveis. Observando as tensões reguladas para Ar + 8 e 15% de CO₂, respectivamente com valores de aproximadamente 12 e 13 V, pode-se verificar que, para Ar + 25%CO₂, a regulagem de aproximadamente 15 V provavelmente ficou mais próxima da região de estabilidade operacional do que para os outros gases. Assim, pode-se supor também que uma regulagem que proporcionasse tensões de soldagem 2 ou 3 V menores também reduziria a estabilidade operacional. Desta forma, não se pode avaliar estes resultados de forma quantitativa, mas somente qualitativa, considerando apenas a influência da mudança dos parâmetros de regulagem.

Baixo e Dutra (1991) explicaram o mecanismo de geração de respingos em arcos muito curtos operando no modo de transferência por curto-circuito. Segundo estes autores, em comprimentos de arco muito pequenos, o tempo de arco, onde ocorre a fusão do eletrodo, torna-se muito pequeno. Ao ocorrer o contato com a poça de fusão, a extremidade fundida do eletrodo ainda pode se encontrar em um estágio de fusão impróprio à transferência. Quanto mais prematuro o contato, maior o tempo para que o calor gerado por efeito Joule na ponte de ligação gere sua fusão, promovendo um maior valor de pico da corrente de curto. Ainda segundo estes autores, outro efeito seria uma pressão da extremidade fundida do eletrodo na poça de fusão devido ao constante avanço do arame durante o curto-circuito. Como resultado, há um deslocamento continuado da posição relativa da linha de fusão e geração de uma perturbação excessiva do metal fundido na poça metálica.

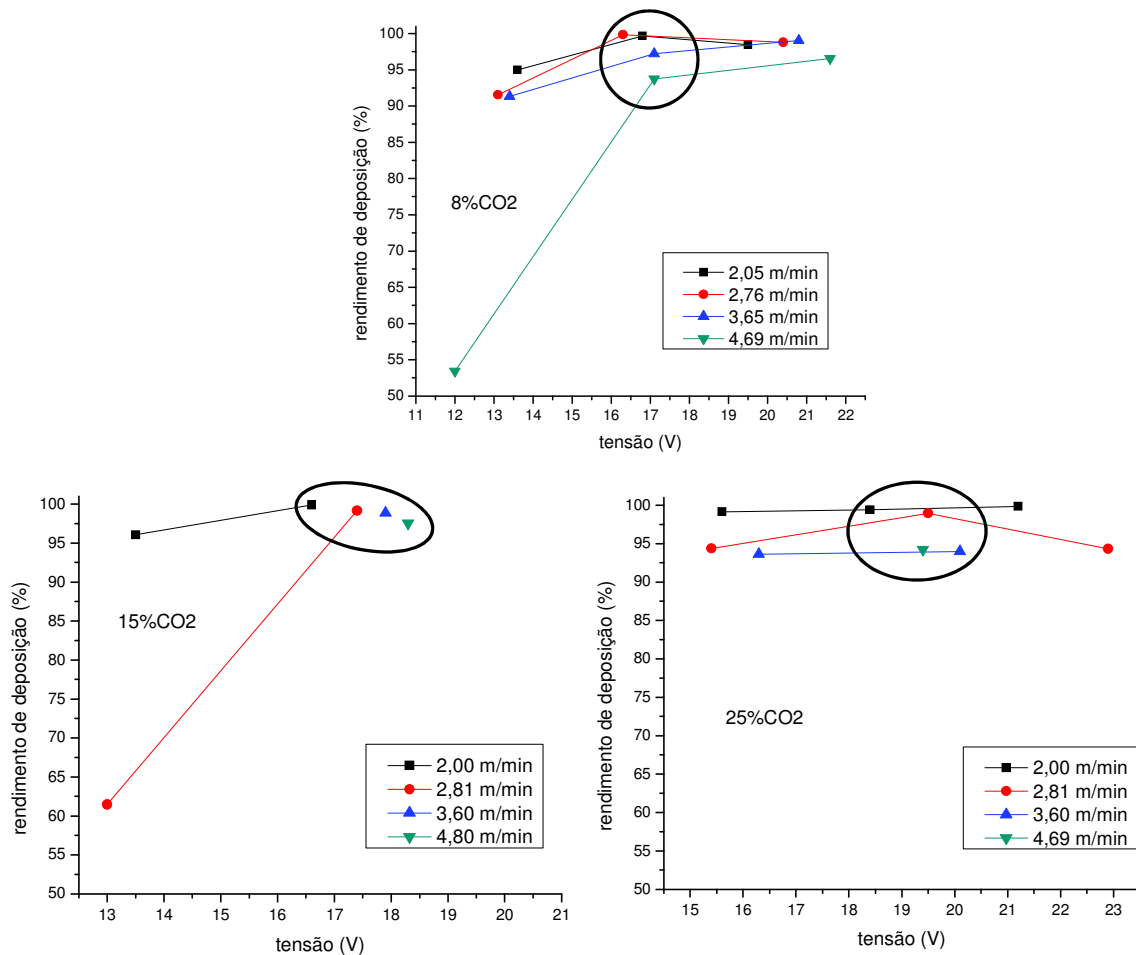


Figura 9.1 – Rendimento de deposição em função da tensão para diferentes velocidades de alimentação (valores de tensão envoltos pelo círculo estão dentro da região de estabilidade operacional de curto-circuito e valores menores e maiores de tensão estão fora da região - atentar para o fato de não existirem todos os experimentos propostos, para as misturas de Ar + 15%CO₂ e Ar + 25%CO₂ houve o colapso da poça - furo da chapa - em alguns testes)

Em relação à mudança na velocidade de alimentação (que tem relação direta com a corrente), o aumento desta, em geral, piora o rendimento de deposição (maior geração de respingos). Já os gases de proteção não apresentam uma influência clara no rendimento de deposição, se observados apenas pelos dados de regulação na região de estabilidade operacional.

A Fig. 9.2 mostra a relação entre rendimento de deposição e o índice de regularidade, proposto neste estudo, agora somente para os valores dentro da região de estabilidade operacional. Nota-se que para maiores valores do índice de regularidade (menor regularidade)

tem-se menor rendimento de deposição, ou seja, quando o índice indica operação com transferência menos regular ocorre maior perda de material por respingos. Este resultado indica uma relação entre a regularidade da transferência (medida pelo índice proposto) e a estabilidade do processo, neste caso, avaliada pela geração de respingos. Outra observação interessante é a tendência de queda da regularidade de transferência (maior IVcc) com o aumento do teor de CO₂ na mistura, mas não necessariamente em geração de mais respingos. Na prática estes resultados sugerem que soldagens abaixo da região de estabilidade operacional de transferência proposta no trabalho e maiores teores de CO₂ no gás de proteção, promovem maiores perdas de material (principalmente por respingos) que, além de aumentar o custo da soldagem, promovem uma etapa a mais para retirada dos mesmos.

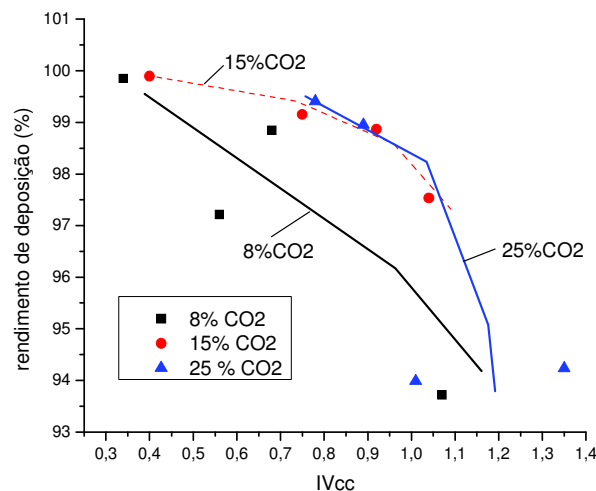


Figura 9.2 – Relação do rendimento de deposição com o índice de regularidade (IVcc) utilizando os gases propostos para tensões dentro da região de estabilidade operacional (os quatros pontos por gás referem-se a cada velocidade de alimentação experimentada)

9.2. Influência dos Parâmetros sobre o Rendimento de Deposição para o Modo de Transferência Goticular

A Fig. 9.3 apresenta o rendimento de deposição em função da tensão de soldagem para os três gases de proteção e regulagens de velocidades de alimentação utilizadas. Para regulagens de soldagens com valores de tensão dentro da região de estabilidade operacional os valores de rendimento de deposição ficaram altos, indicando baixo nível de respingos. Pode-se notar também que, no que pese a dispersão dos resultados típicos de levantamento

experimental como o presente, para soldagens abaixo da região de estabilidade operacional (menores valores de tensão) e acima (maiores valores de tensão) existe uma tendência de diminuição do rendimento de deposição. Este efeito é menos nítido quando utilizando Ar + 5%O₂. No caso abaixo da região, os presentes dados reforçam a explicação dada no item anterior onde para alguns gases não se verificou queda acentuada de rendimento. Pode-se ver no gráfico para Ar + 5%O₂ que trabalhando com uma tensão um pouco mais baixa do que as demais, o efeito se evidenciou.

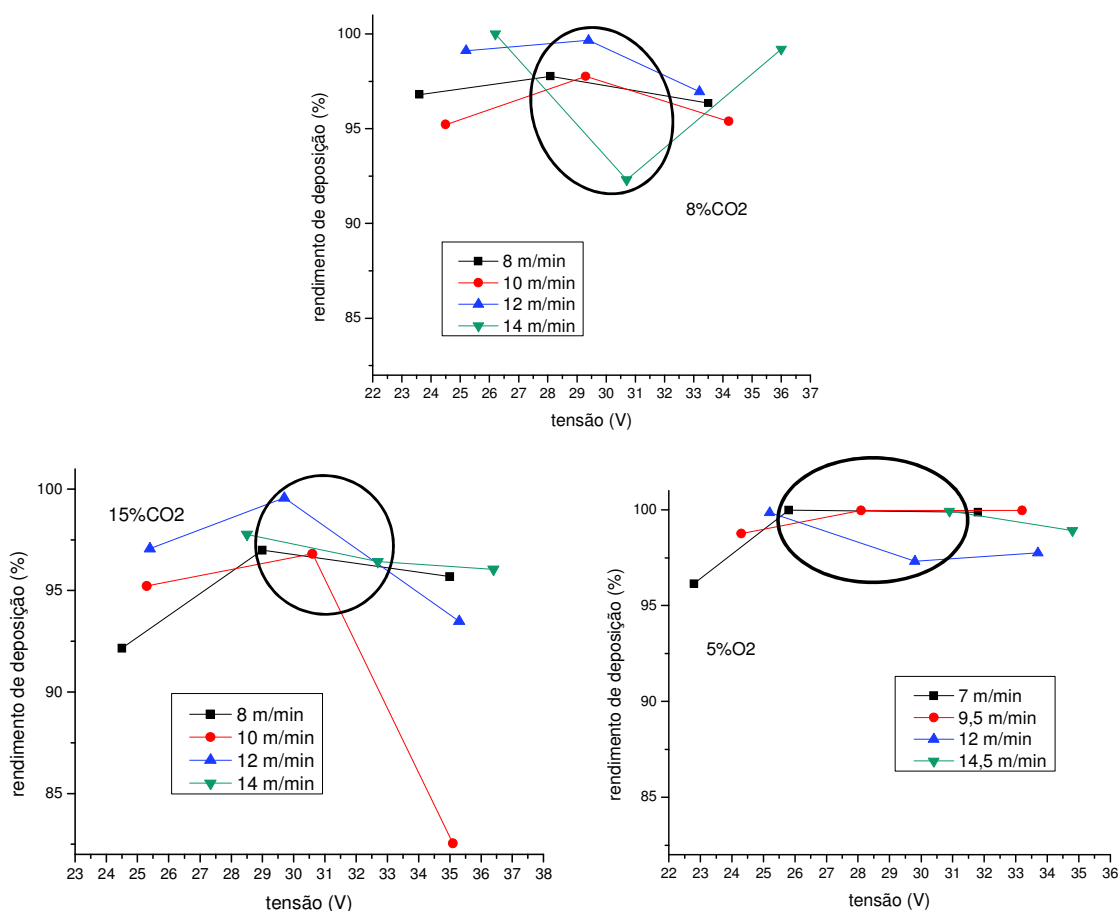


Figura 9.3 – Rendimento de deposição em função da tensão para diferentes velocidades de alimentação (valores de tensão envoltos pelo círculo estão dentro da região de estabilidade operacional do modo goticular e valores menores e maiores de tensão estão fora da região)

A diminuição do rendimento de deposição em baixas tensões se deve, provavelmente, à condição de arco curto que leva a ocorrência curtos-circuitos. Porém, o aumento da tensão não deveria provocar perda de material por respingos. Uma explicação poderia ser que em

gases de proteção contendo CO_2 ocorra o fenômeno de repulsão da gota, com geração de respingos (hipóteses sustentadas pelo melhor desempenho das soldas com $\text{Ar} + 5\%\text{O}_2$ quanto a este quesito). Pelos mesmos motivos discutidos no item 9.1, o uso de arcos com maior tensão do que proposto pelos mapas operacionais deve ser evitado.

O aumento da velocidade de alimentação (corrente), em geral, não afeta o rendimento de deposição (maior geração de respingos) como o foi para curto-circuito. A ausência da geração de respingos para correntes mais altas já era esperada, pois teoricamente só ocorreria se a transferência chegasse a se tornar rotacional, o que não foi o caso. Novamente, os gases de proteção não apresentam uma influência clara no rendimento de deposição.

CAPÍTULO X

VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO SOBRE A INTENSIDADE DE RADIAÇÃO EMITIDA APLICANDO OS MAPAS OPERACIONAIS

O objetivo foi verificar a influência da tensão, velocidade de alimentação (corrente) e gás de proteção sobre a intensidade de radiação emitida, para soldagens que fossem representativas da consequência de se utilizar regulagens adequadas (dentro da região de estabilidade operacional) e inadequadas (fora da região de estabilidade operacional) para operações em curto-circuito e goticular. Para isto, foram realizadas três soldagens dentro da região, variando-se a velocidade de alimentação, e duas soldagens fora da região, variando-se a tensão, uma acima e outra abaixo do estabelecido pela região, para cada gás e tipo de transferência mapeada. A Fig. 10.1 exemplifica as posições reguladas para soldagem em relação à região de estabilidade operacional.

Para este experimento em especial, foram utilizadas placas de teste com dimensões de aproximadamente 300 x 50 x 9,5 mm. A tocha foi posicionada de modo perpendicular à placa de teste (ângulos de trabalho e ataque iguais a zero). A indutância da fonte foi regulada na posição zero (indicado pela palavra *off* no painel de regulagem). Todos os valores de regulagem dos parâmetros e resposta dos sinais elétricos são apresentados no Apêndice II.

Uma fibra óptica foi utilizada para conduzir a radiação até o espectrômetro. Para posicionar a fibra óptica de forma a permitir a captação da radiação vinda do arco, foi utilizado um suporte (Fig. 10.2), projetado e construído no Laprosolda, que permitia uma regulagem de inclinação. O procedimento para posicionamento do suporte foi de se olhar pelo furo (indicado na Fig. 10.2) e regular a posição e inclinação que permitia a visão do local

esperado para arco durante a soldagem. Após a correta regulagem, a fibra óptica era conectada ao suporte.

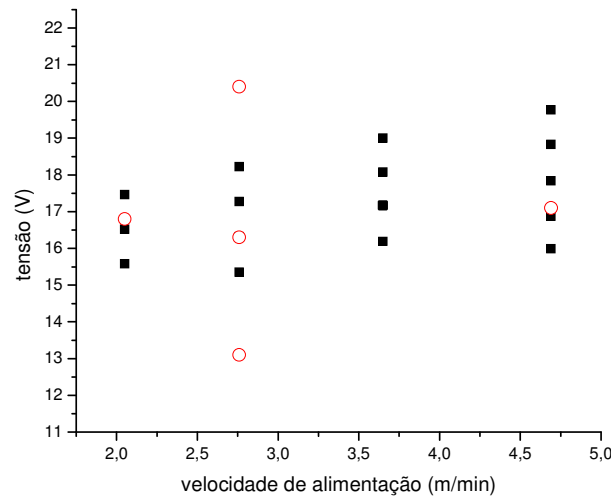


Figura 10.1 – Ilustração das posições reguladas de teste para soldagem, em relação à região de estabilidade operacional

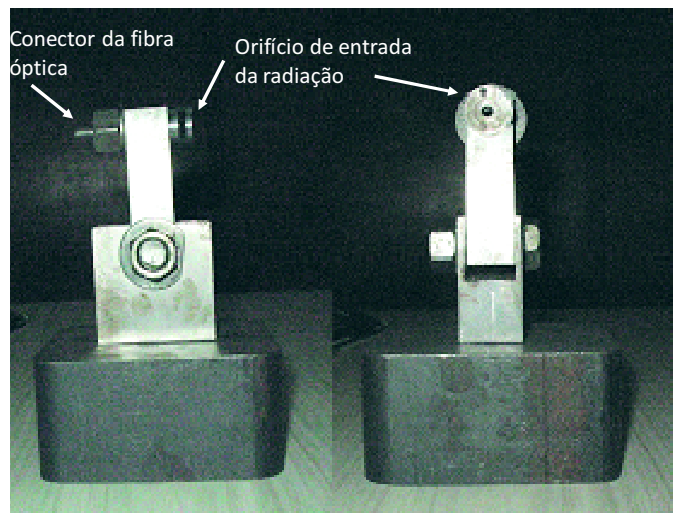


Figura 10.2 – Suporte para fibra óptica, com destaque para o parafuso que possibilita a regulagem de inclinação e para o conector da fibra óptica

A Fig. 10.3 apresenta um esboço do posicionamento do espectrômetro em relação ao arco de soldagem. O procedimento adotado foi a de se manter a fonte de radiação imóvel. Para isto, foi utilizada uma mesa que se movia ao invés da tocha (a placa de teste movimentava, permitindo que o arco de soldagem ficasse imóvel). Para definição da

distância correta do espectrômetro à fonte de radiação, era necessária a determinação de dois parâmetros; a distância do mesmo à fonte de radiação (arco) e o tempo de integração. Para isto, foram realizadas soldagens preliminares com os parâmetros (corrente e tensão) que se acreditava que fossem os mais críticos para emissão de radiação. Assim, para que não houvesse a saturação do espectrômetro foi utilizada a distância de 2,30 m e tempo de integração igual a 1 ms. O tempo de integração e o número de médias são parâmetros de entrada no programa de aquisição. O tempo de integração é o tempo de exposição da CCD do espectrômetro e o número de médias é a quantidade de vezes que ele expõe a CCD para fazer a média do espectro.

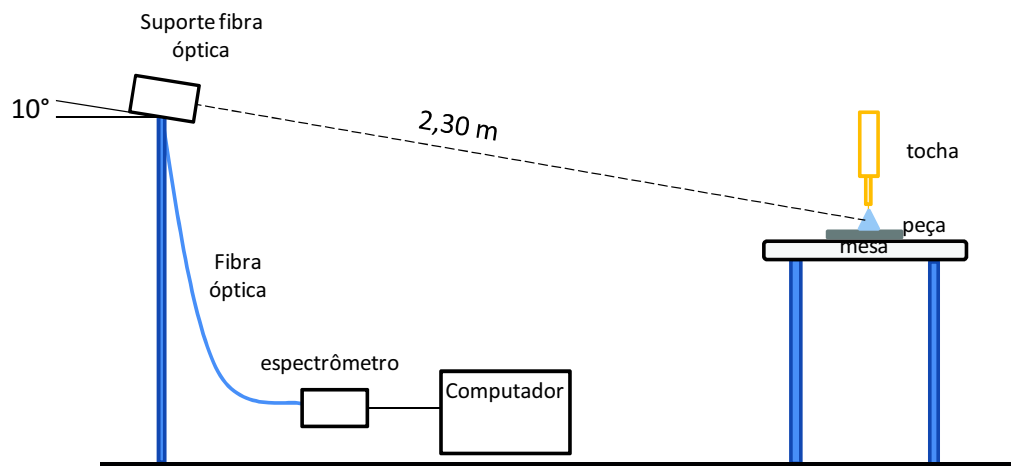


Figura 10.3 – Ilustração do posicionamento do espectrômetro em relação à fonte de radiação (arco de soldagem)

Nos experimentos foi utilizado um número de médias igual a três. Como o espectrômetro foi regulado para expor a CCD por apenas 1 ms (um tempo maior causava a saturação do mesmo) havia o risco de, nas soldagens em curto-circuito, a aquisição do espectrômetro ocorresse com o arco total ou parcialmente apagado. Assim, propôs-se fazer mais de uma aquisição por disparo do espectrômetro. Ao invés do espectrômetro abrir e fechar três vezes sucessivamente com tempo de 1 ms cada, como no nosso caso, podendo nestas vezes o arco estar total ou parcialmente apagado, programou-se 5 aquisições (cada aquisição equivalendo a 1 ms e três exposições para a média) com tempos entre cada aquisição diferentes, para garantir que não estivesse em fase com a frequência de curtos-circuitos. Os tempos escolhidos entre cada aquisição foram de 100, 200, 300 e 500 ms.

O resultado da aquisição do espectrômetro é um gráfico (espectro) de intensidade (cps – número de fótons que atingem a CCD por segundo) pelo comprimento de onda (nm). A intensidade é um parâmetro relativo, pois depende da distância à fonte de radiação e tempo de exposição da CCD, e é medida em relação ao número de fótons que atingem a CCD (cps). Rossi e Vilarinho (2008) propuseram uma metodologia interessante para o estudo da radiação. Estes dois autores multiplicaram a intensidade pelo comprimento de onda criando uma energia de radiação (cps.nm), a qual fisicamente traduz o nível de radiação total naquela faixa de comprimento de onda. Esta energia, então, pôde ser medida em faixas de comprimento de onda definidos, ou seja, além de definir a quantidade de radiação emitida total. Essa abordagem permitia também aos autores saber a quantidade de radiação emitida em faixas de comprimento importantes. Deve-se lembrar, conforme exposto no Capítulo III, que o espectrômetro utilizado não cobre todo o espectro. Assim, as faixas de análises foram divididas como:

- 200 – 850 nm: Faixa total disponível no espectrômetro;
- 200 – 400 nm: UV total;
- 400 – 850 nm: Espectro visível;
- 200 – 280 nm: UV-C (Ultravioleta remoto ou germicida);
- 280 – 315 nm: UV-B (Ultravioleta intermediário);
- 315 – 400 nm: UV-A (Ultravioleta próximo ou luz negra).

10.1. Influência dos Parâmetros sobre a Intensidade de Radiação Emitida para o Modo de Transferência por Curto-Circuito

A Fig. 10.4 mostra, com exemplo, parte do espectro resultante de uma das soldagens realizadas (o Apêndice III apresenta os espectros e gráficos de energia emitida em função das faixas de comprimento de onda para todas as soldagens realizadas). Podem-se observar vários espectros resultantes das cinco aquisições feitas. Este caso mostra que em uma das aquisições a intensidade de radiação foi maior, provavelmente pelas variações de intensidade do arco provocadas pelos curtos-circuitos. A Fig. 10.5 mostra, também para exemplificar, a distribuição da energia irradiada nas faixas de comprimento de onda propostos.

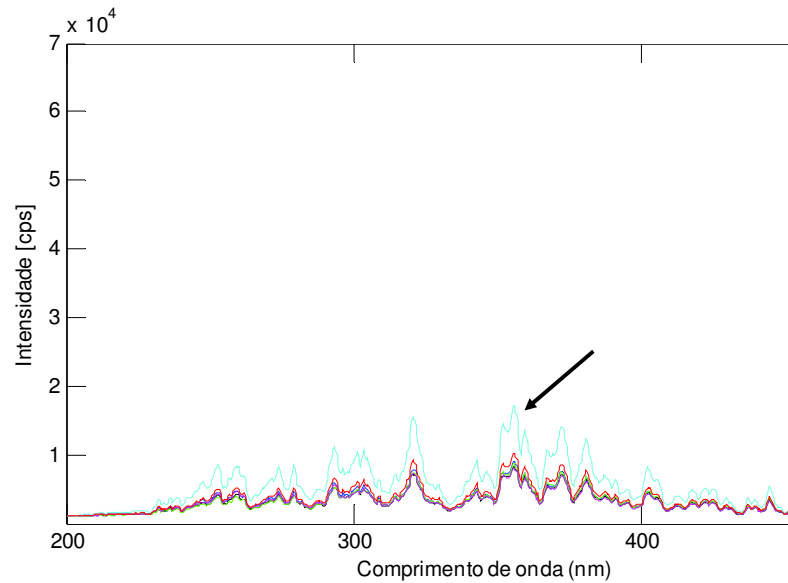


Figura 10.4 – Parte do espectro emitido pelo arco com o processo operando em curto-circuito, mostrando a diferença ocorrida entre disparos do espectrômetro (a seta indica que 1 dos 5 disparos teve maior intensidade de radiação): tensão de soldagem de 19,5 V e corrente de 152 A

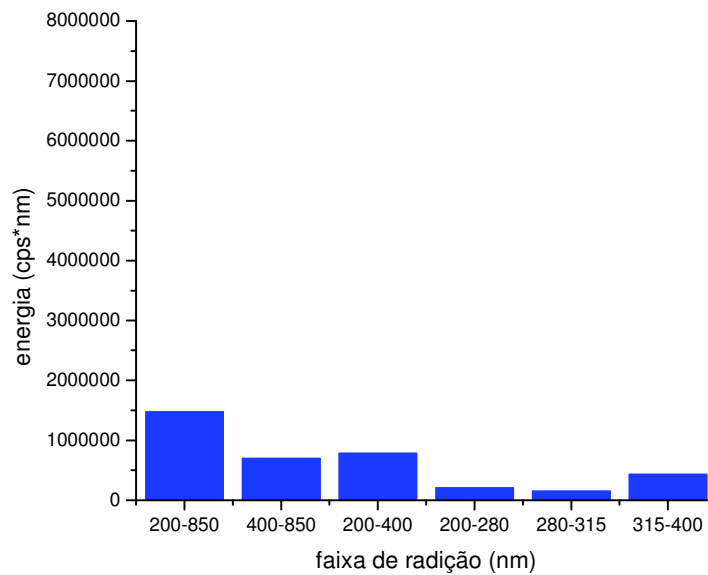


Figura 10.5 – Energia média irradiada em função de faixas de comprimento de onda de radiação (tensão de soldagem de 19,5 V e corrente de 152 A)

A Fig. 10.6 apresenta os valores de energia emitida pelo arco em função da tensão de soldagem para soldagens dentro e fora da região de estabilidade operacional, enquanto a Fig.

10.7 apresenta os valores de energia emitida para soldagens dentro da região de estabilidade operacional, variando-se a velocidade de alimentação. Nota-se na Fig. 10.6 que soldagens abaixo da região de estabilidade operacional promovem menor intensidade de radiação emitida do que para soldagens dentro da região, independentemente do gás de proteção. As soldagens acima da região de estabilidade operacional promovem maior intensidade de radiação emitida do que para soldagens dentro da região, exceto para Ar + 25% CO₂. De uma forma geral, pode-se inferir que o aumento do comprimento de arco aumenta a intensidade de radiação emitida. A discordância para o Ar + 25% CO₂ para o caso de um arco acima da região teria de ser mais bem estudada, pois por algum motivo houve também uma queda acentuada da corrente. Uma sugestão, que teria de ser confirmada (por exemplo, por filmagem em alta velocidade), é que transferência com repulsão é mais comum com maiores teores de CO₂ no gás de proteção, o que forçaria arcos mais curtos durante os períodos de arco aberto.

O aumento da corrente (Fig. 10.7) também fez aumentar a intensidade de radiação emitida, exceto para o caso do valor mais alto de corrente com o uso de Ar + 25% CO₂. Porém, pela proposta de procedimento experimental, o que se procurava era ver o efeito de regulagens de velocidade de alimentação progressivamente maiores dentro da região de estabilidade operacional. Desta forma, não se pode afirmar que o comprimento do arco, que já foi demonstrado ter influência na emissão luminosa, tenha se mantido constante. Mas, de uma forma geral, pode-se dizer que quanto maior a corrente, maior a radiação.

Os gráficos das Figs. 10.6 e 10.7 não permitem identificar uma tendência clara do efeito do gás de proteção sobre a radiação emitida em função, até por que não é possível se encontrar soldagens com mesmo comprimento de arco e corrente, para os distintos gases. Porém, comparando-se os 3 experimentos na faixa central de tensão (barra sólida), para os quais os comprimento de arco não são tão diferentes e nem os valores de corrente, pode-se perceber que o aumento do teor de CO₂ provoca aumento da radiação emitida.

Ainda por essas figuras, pode-se observar que, da intensidade total de radiação emitida e que foi capaz de ser captada pelo espectrômetro (200-850 nm), apenas aproximadamente metade é na faixa de comprimento da luz visível (400-850 nm), sendo a outra metade na faixa de radiação ultravioleta (200-400 nm). Outra observação é a ocorrência de radiação na faixa de comprimento do UV-C (200-280), a mais prejudicial ao ser humano.

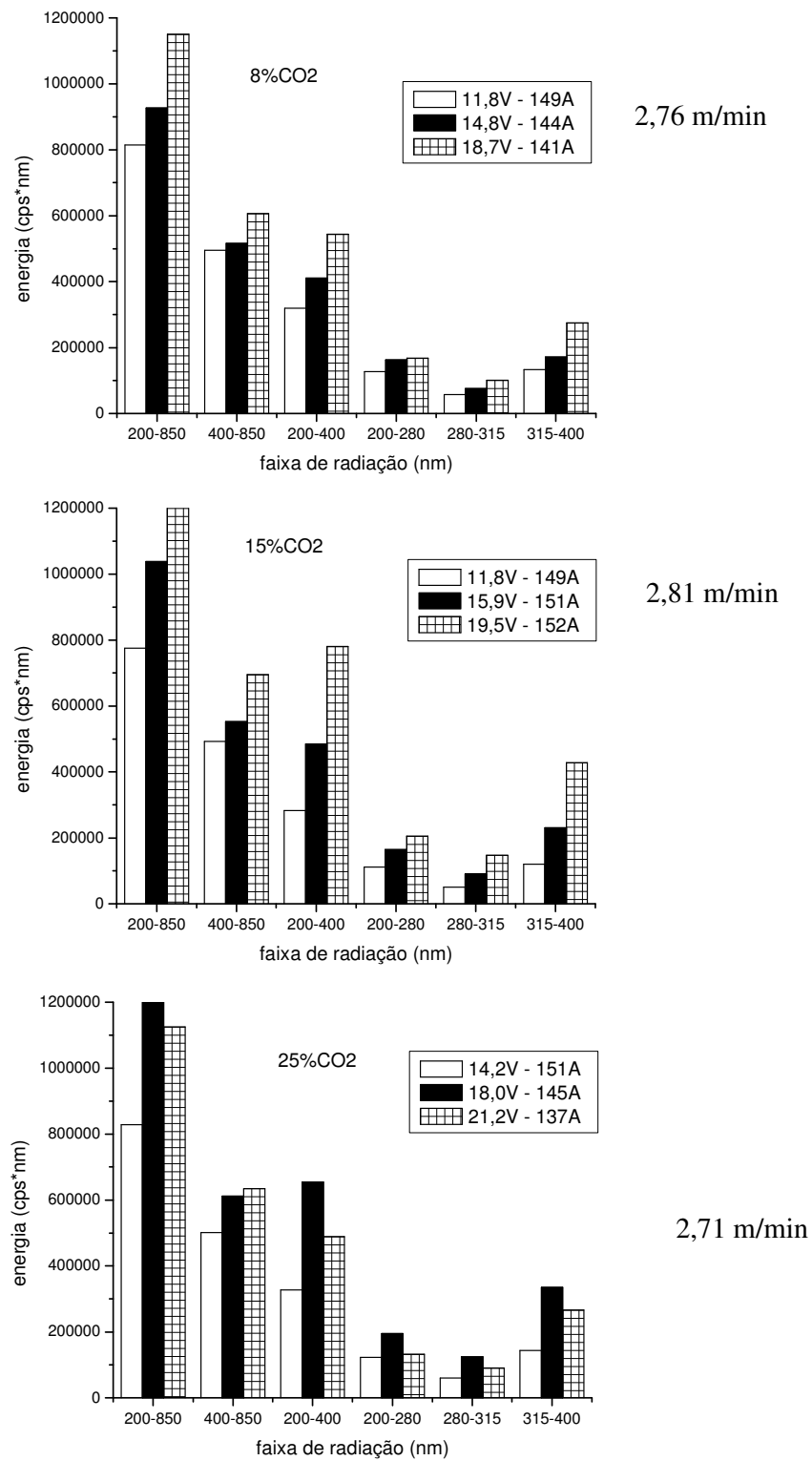


Figura 10.6 – Energia emitida para diferentes faixas de comprimento de onda para soldagens dentro (tensão intermediária) e fora da região de estabilidade operacional (tensões menores e maiores)

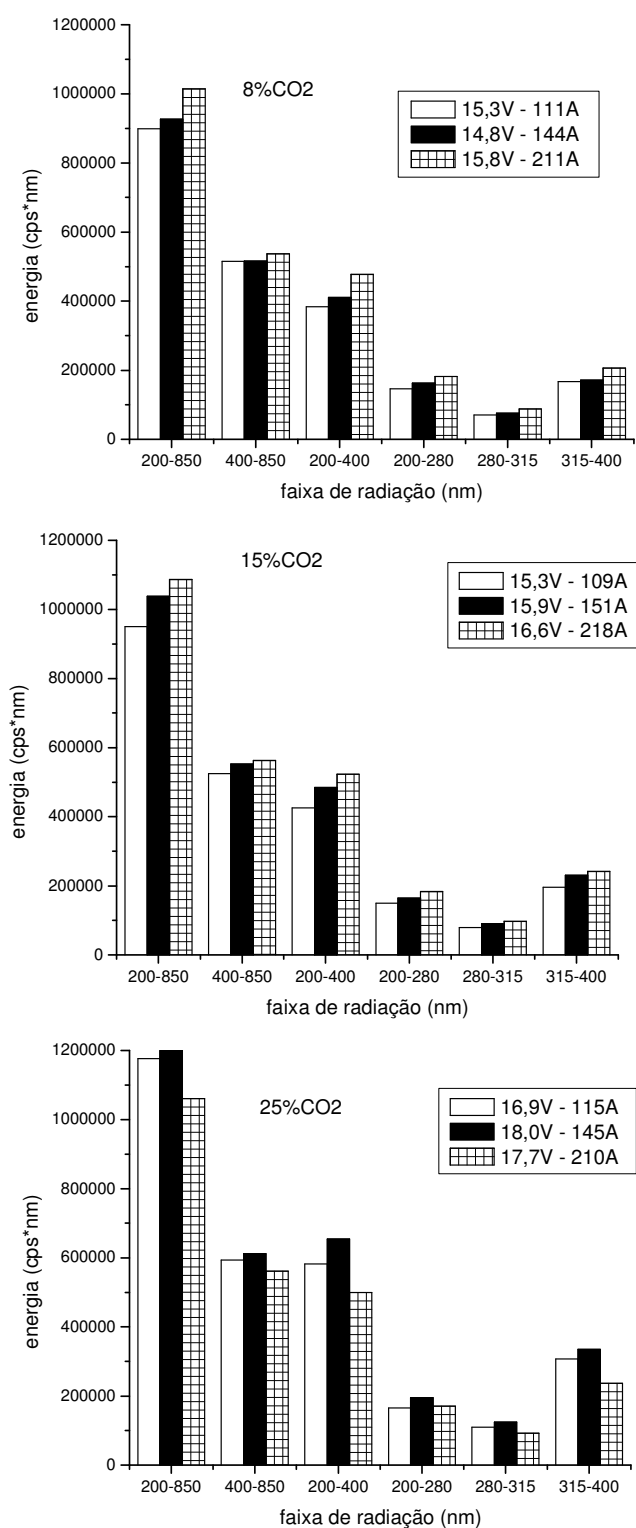


Figura 10.7 – Energia emitida para diferentes faixas de comprimento de onda para soldagens dentro da região de estabilidade operacional, sob diferentes valores de corrente (em função das velocidades de alimentação impostas)

10.2. Influência dos Parâmetros sobre a Intensidade de Radiação Emitida para o Modo de Transferência Goticular

A Fig. 10.7 mostra, com exemplo, parte do espectro resultante de uma das soldagens realizadas com transferência goticular (o Apêndice III apresenta os espectros e gráficos de energia emitida em função das faixas de comprimento de onda para todas as soldagens realizadas no modo goticular). Pode-se verificar que, quando comparado ao modo de operação por curto-circuito, a intensidade de radiação é sensivelmente maior. A Fig. 10.8 mostra, também para exemplificar, a distribuição da energia irradiada nas faixas de comprimento de onda propostos.

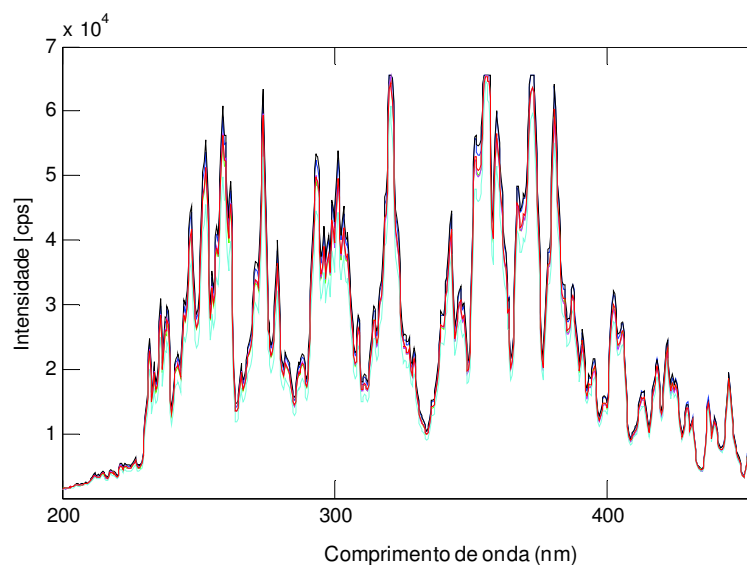


Figura 10.7 – Parte do espectro emitido pelo arco com o processo operando no modo goticular (tensão de soldagem de 31,6 V e corrente de 376 A)

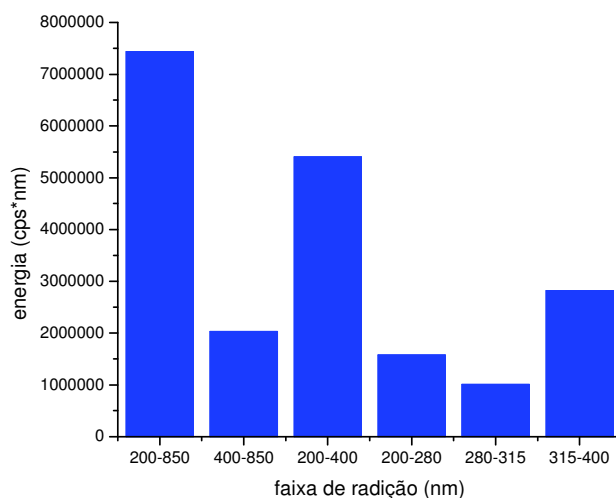


Figura 10.8 – Energia irradiada em função de faixas de comprimento de onda de radiação (tensão de soldagem de 31,6 V e corrente de 376 A)

A Fig. 10.9 apresenta os valores de energia emitida pelo arco em função da tensão de soldagem para soldagens dentro e fora da região de estabilidade operacional, enquanto a Fig. 10.10 apresenta os valores de energia emitida para soldagens dentro da região de estabilidade operacional, variando-se a velocidade de alimentação. Nota-se na Fig. 10.9 que soldagens acima da região de estabilidade operacional promovem maior intensidade de radiação emitida do que para soldagens dentro da região, que por sua vez emite mais do que a abaixo da região. Este comportamento confirma que o aumento do comprimento de arco aumenta a intensidade de radiação emitida.

Apesar dos aumentos expressivos de corrente na análise ilustrada pela Fig. 10.10, não se observa influência das mesmas sobre intensidade de radiação emitida, ao contrário das soldagens com curto-circuito. Agora similarmente ao efeito observado em curto-circuito, também não se pode afirmar que o comprimento do arco, que já foi demonstrado ter influência na emissão luminosa, tenha se mantido constante entre as condições, justificando as discordâncias de comportamento entre menores e maiores corrente para os diferentes gases. Porém, comparando-se os 3 experimentos na faixa central de tensão (barra sólida), para os quais os comprimentos de arco não são tão diferentes e nem os valores de corrente, pode-se perceber que o aumento do teor de CO_2 provoca pouca alteração na radiação emitida, ao contrário do que ocorre com curto-circuito. Como os comprimentos de arco para goticulares são maiores do que para curto-circuito, sua influência sobre a irradiação pode ter mascarado o

efeito do aumento do CO₂. Mas quando se mudou o gás para Ar + 5%O₂, pode-se observar que houve um acréscimo razoável.

Outra diferença de comportamento para a condição com curto-circuito foi de que da intensidade total de radiação emitida pelo arco (de 200 a 850 nm), a maior parte está na faixa de radiação ultravioleta (200-400 nm) e não na visível (mas que como já foi dito, a radiação total é maior em goticular do que em curto-circuito). Mas a ocorrência de alta radiação na faixa de comprimento do UV-C (200-280), ainda ocorre.

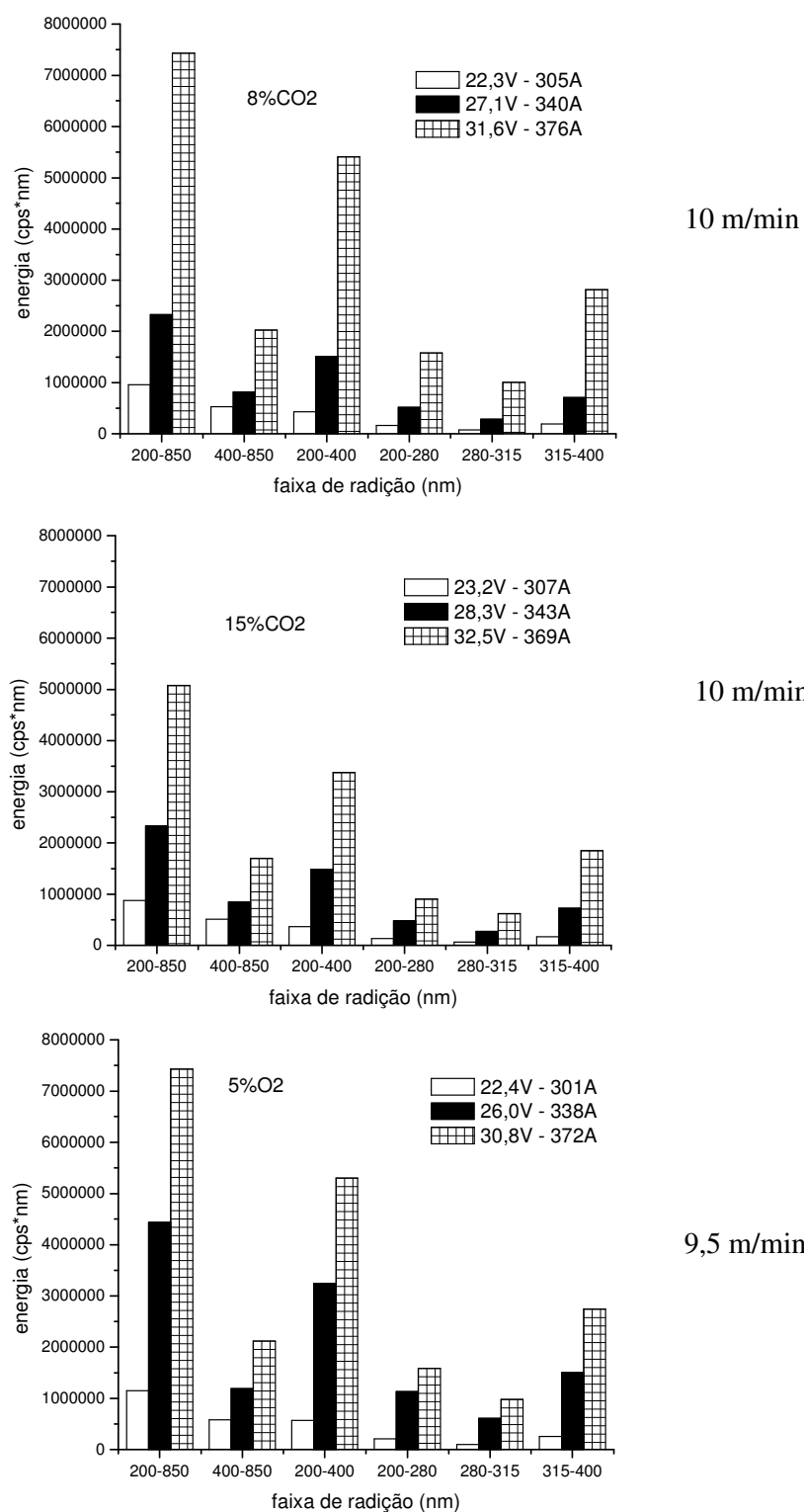


Figura 10.9 – Energia emitida para diferentes faixas de comprimento de onda para soldagens dentro (tensão intermediária) e fora da região de estabilidade operacional (tensões menores e maiores)

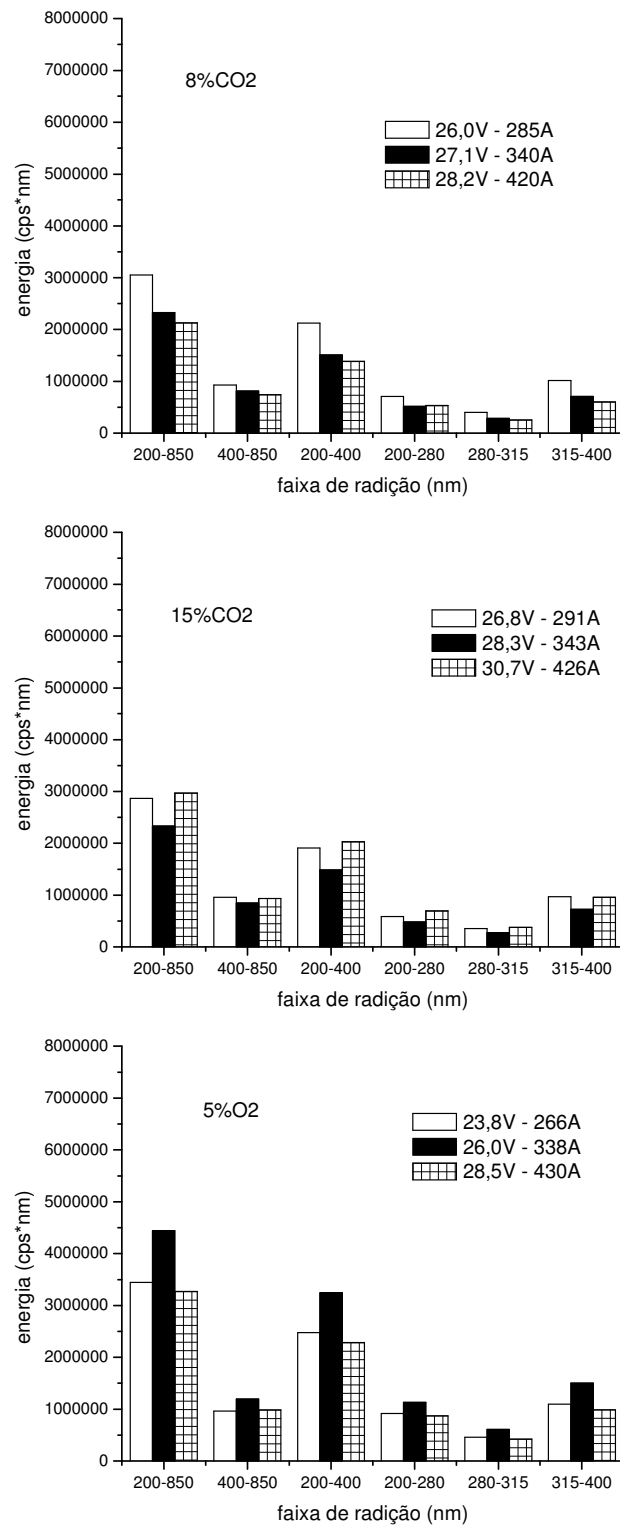


Figura 10.10 – Energia emitida para diferentes faixas de comprimento de onda para soldagens dentro da região de estabilidade operacional, sob diferentes valores de corrente (em função das velocidades de alimentação impostas)

CAPÍTULO XI

VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO SOBRE O CICLO TÉRMICO DE SOLDAGEM APLICANDO O MAPA OPERACIONAL DE TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

O objetivo foi verificar a influência das combinações corrente-velocidade de alimentação pertencentes à região de estabilidade operacional sobre o ciclo térmico, usando os diversos mapas levantados para transferência por curto-circuito. Para isto, foram realizadas três soldagens em placas de teste confeccionadas conforme item 3.4.5 do Capítulo III, com regulagem de parâmetros dentro desta região para cada gás de proteção, variando-se entre elas a velocidade de alimentação. A tocha foi inclinada com ângulo de trabalho igual a 0° e com um ângulo de ataque de 15° (em relação a uma linha vertical perpendicular ao plano de soldagem), de modo que a soldagem ocorresse puxando a poça de fusão. A indutância da fonte foi regulada na posição zero (indicado pela palavra *off* no painel de regulagem). Todos os valores de regulagem dos parâmetros e resposta dos sinais elétricos são apresentados no Apêndice II.

Para medição do ciclo térmico foi utilizado um termopar “soldado” por descarga capacitiva sob a placa de teste (face de baixo das chapas). A Fig. 11.1 ilustra a placa de teste montada no suporte já com o termopar preso a raiz da junta. A posição do termopar foi a mais próxima possível da raiz do cordão, levando em conta que para as juntas escolhidas para este trabalho (soldagem por curto-circuito) poderia acontecer penetração total. Então, para determinar a posição correta, foram realizadas soldagens preliminares nas condições de regulagem e gás de proteção que se acreditava ser as mais severas em termos de penetração. Em seguida foram feitas macrografias do perfil do cordão obtido e determinado que a posição

de soldagem do termopar para essa condição crítica. Encontrou-se que esta posição seria de 3 mm do centro da abertura da junta, a qual foi adotada para as outras condições menos severas. Além da posição do termopar, foram tomados cuidados também com a junção do mesmo com a placa. Araújo (2008) em seu trabalho chama atenção para o problema da inércia térmica em termopares causadas por pontas volumosas ou afastadas do ponto de medida, principalmente em medições onde a temperatura varia rapidamente, caso da soldagem. O autor mostra em uma figura (reproduzida na Fig. 11.2) o tipo correto de junta para que a velocidade de resposta do termopar não seja prejudicada.



Figura 11.1 – Suporte com a placa de teste montada, onde se pode ver o termopar saindo por debaixo da placa

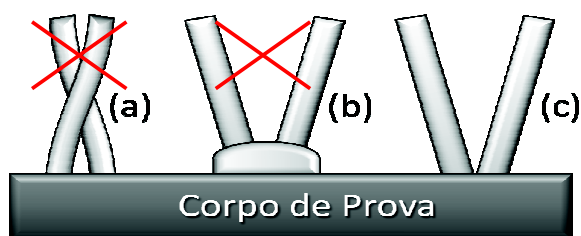


Figura 11.2 - Junta do termopar: (a) o contato está longe da peça, (b) a junta apresenta um alto volume, (c) união sem volume e próximo à peça (ARAÚJO, 2008)

A Fig. 11.3 ilustra a posição do termopar em relação junta de soldagem. É importante destacar a extrema dificuldade de se conseguir uma junta sem nenhum volume. E a susceptibilidade destes métodos em dar erros de medidas, por simples problemas de

acoplamento térmico, mas também pela impossibilidade de se manter a mesma distância do termopar ao cordão. Finalmente, outro fator importante é que em juntas com chapas finas, a distribuição de calor é altamente alterada em função do formato do cordão. Cordão com penetração total passa a perder calor também por radiação pelo lado da raiz, antes de transferir este calor por condução para dentro da chapa (o termopar irá sentir o calor transferido).



Figura 11.3 – Ilustração da posição do termopar na placa de teste em relação à junta de soldagem

11.1. Influência dos Parâmetros sobre o Ciclo Térmico de Soldagem

As Figs. 11.4 a 11.6 mostram os ciclos térmicos nas posições de regulação em relação às regiões de estabilidade operacional para os três tipos de gases utilizados, enquanto a Tab. 11.1 quantifica melhor estes resultados. Nota-se que, com o aumento da corrente ocorre uma tendência de aumento na taxa de resfriamento (resfriamento mais rápido). Este resultado não deveria ser a princípio esperado, pois, em soldagem, quando se aumenta a corrente também se aumenta a energia de soldagem. Porém, deve-se lembrar que neste caso a velocidade de soldagem era aumentada proporcionalmente com a velocidade de alimentação (que governa a corrente), para se conseguir o objetivo de se comparar cordões com mesmo volume. Assim, a energia de soldagem também não variaria muito.

Sendo assim, e assumindo que os comprimentos de arco eram semelhantes em cada regulação e que os arcos estavam em condições de estabilidade (pontos aproximadamente no centro região de estabilidade operacional), a influência da regulação dos parâmetros sobre o

ciclo térmico se caracteriza mais pelo efeito da corrente sobre a geometria do cordão. Esclarecendo melhor, como ilustrado na própria Tab. 11.1, o aumento da corrente, mesmo mantendo a relação Velocidade de Alimentação com a Velocidade de Soldagem constante, que como visto mantém aproximadamente a mesma energia, faz aumentar também a penetração. Quando a penetração chega ao outro lado da junta, o calor que se perderia por difusão dentro da chapa passa a também se perder por radiação. Quanto maior a área superficial de metal fundido na raiz, maior a perda por radiação (e menor o calor restante para se difundir pela chapa). Desta forma, acredita-se estar justificado o aumento na velocidade de resfriamento com o aumento da corrente.

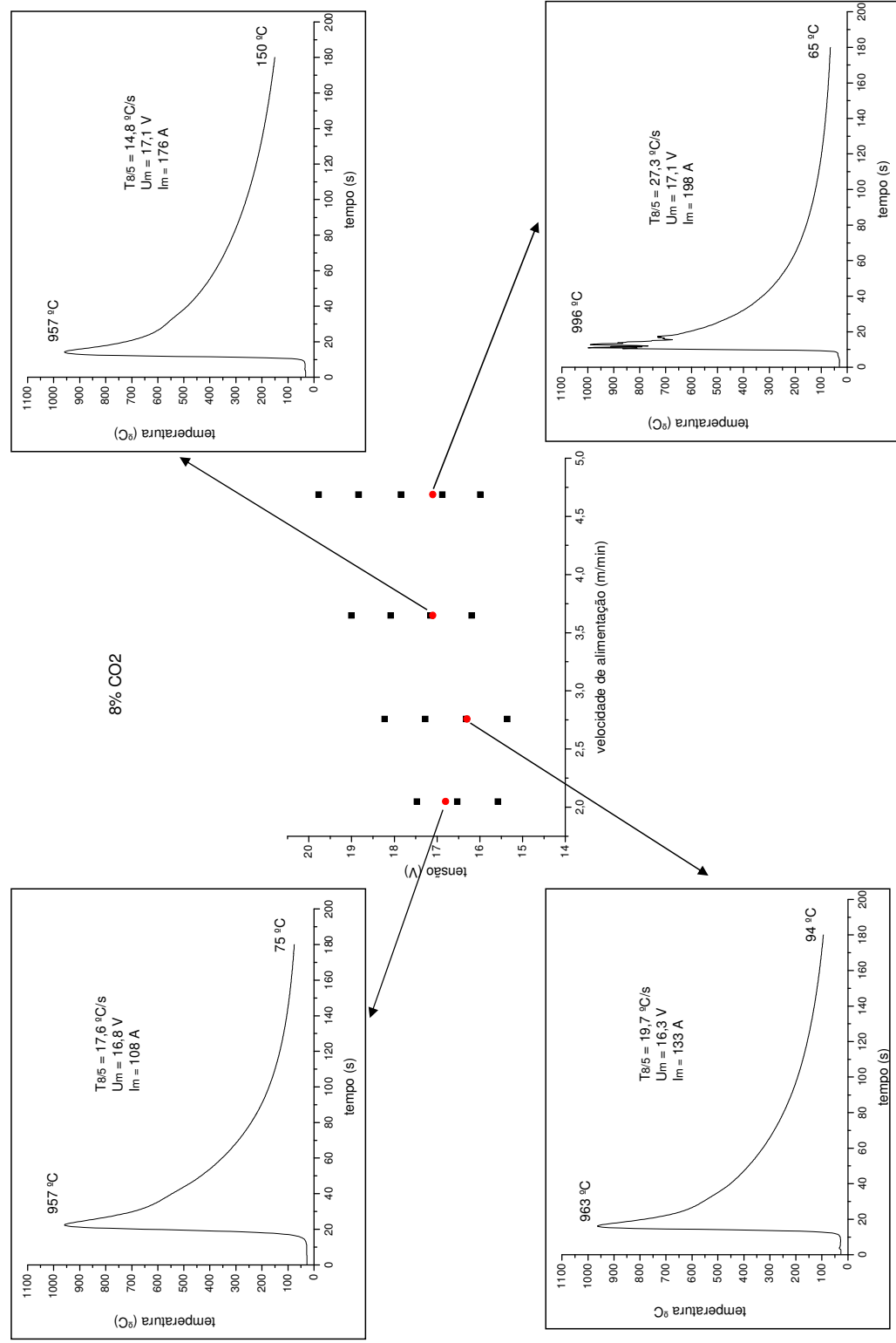


Figura 11.4 – Ciclos térmicos de soldagem medidos durante 3 min para cada região indicada na figura ($T_{8/5}$ = taxa de resfriamento entre as temperaturas de 800 e 500 °C; U_m = tensão média de soldagem e I_m = corrente média de soldagem - gás de proteção Ar + 8%CO₂)

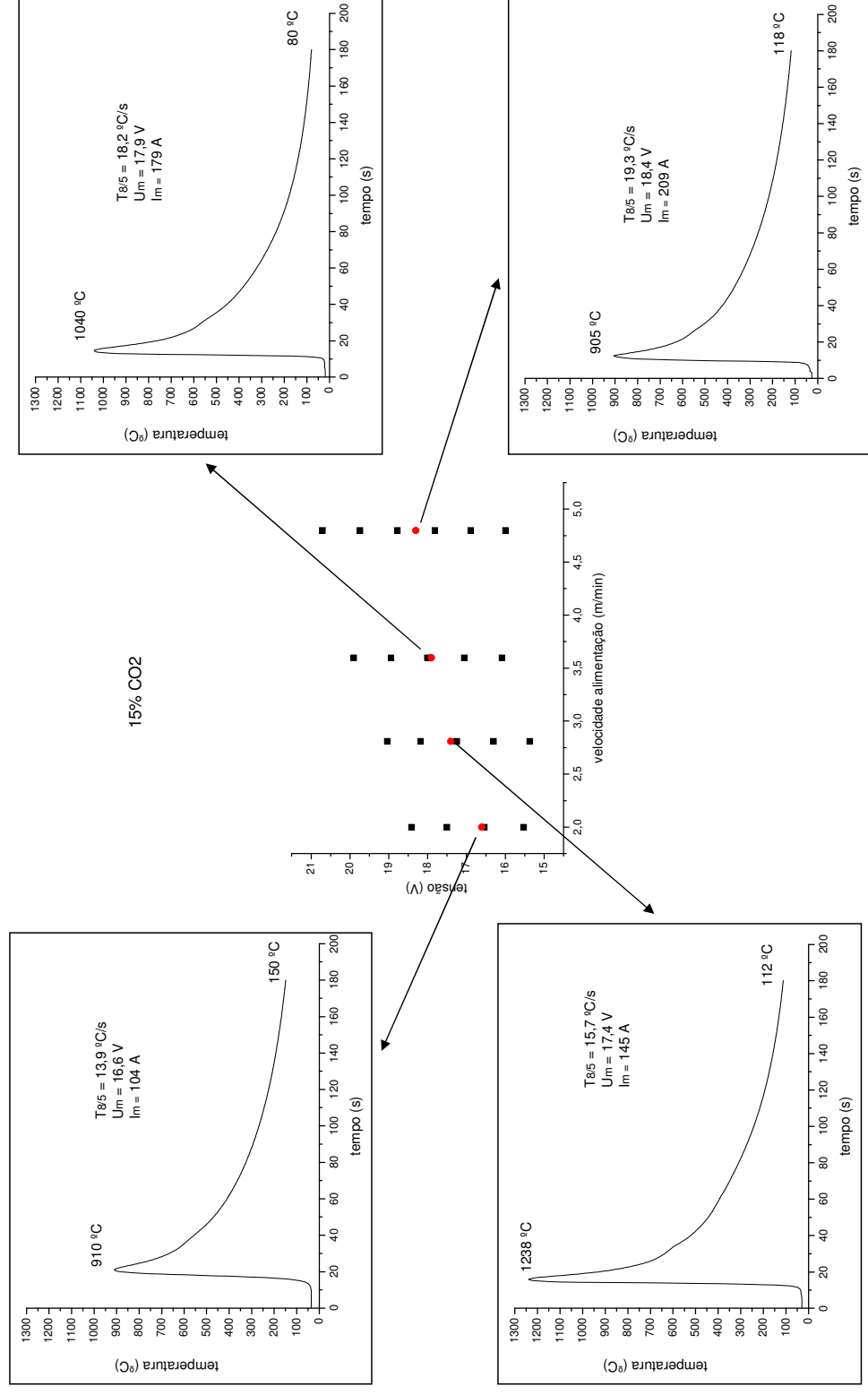


Figura 11.5 – Ciclos térmicos de soldagem medidos durante 3 min para cada região indicada na figura ($T_{8/5}$ = taxa de resfriamento entre as temperaturas de 800 e 500 °C; U_m = tensão média de soldagem e I_m = corrente média de soldagem - gás de proteção Ar + 15%CO₂)

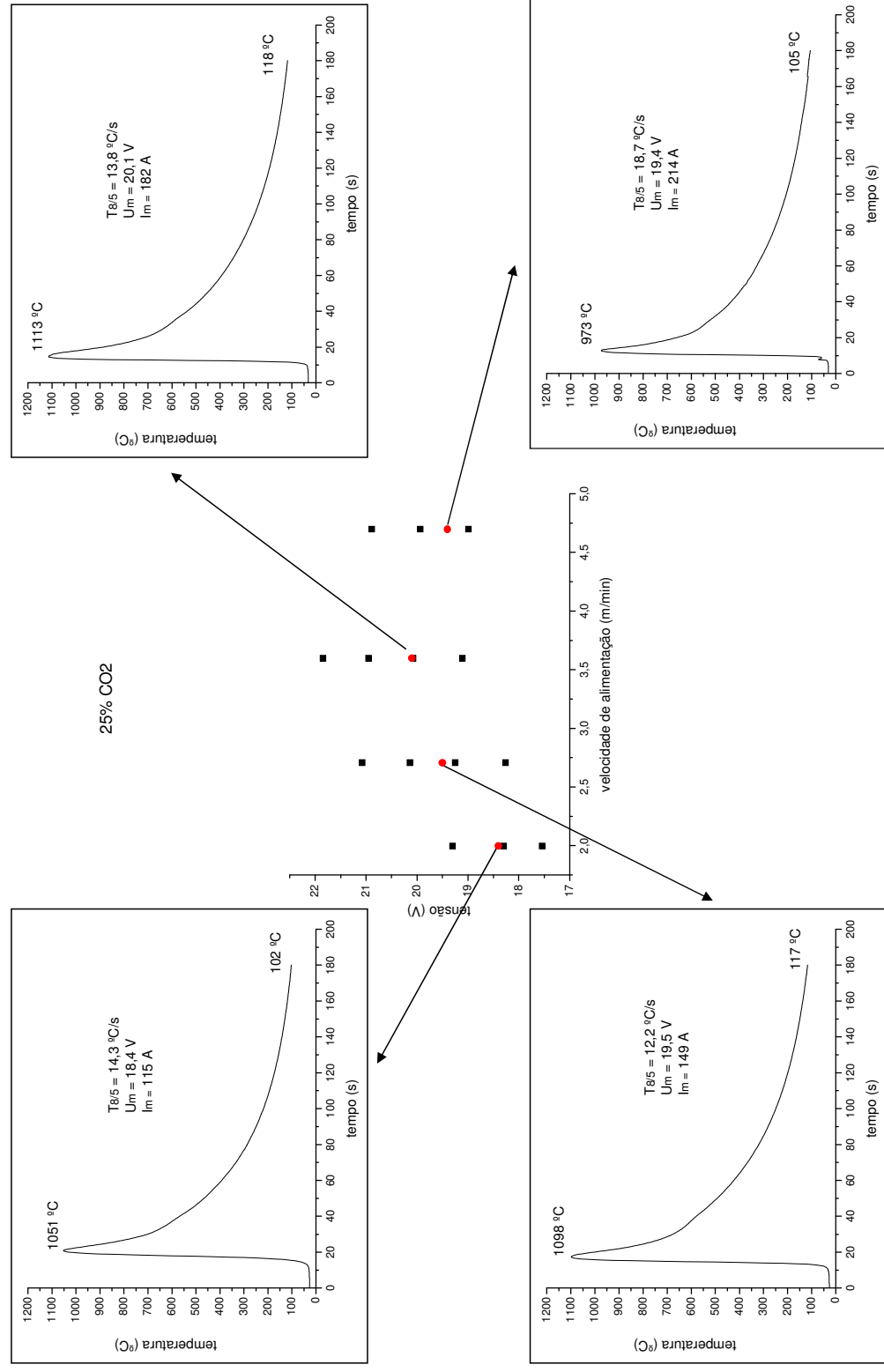
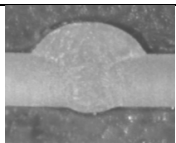
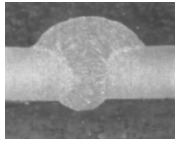
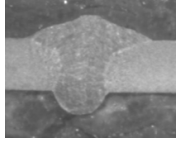
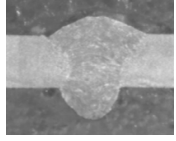
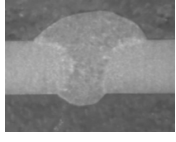
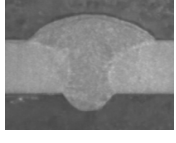
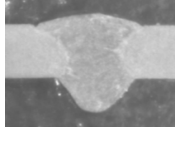
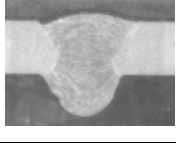


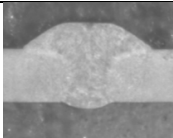
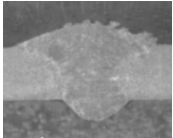
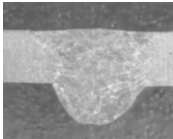
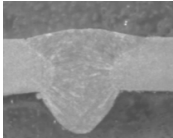
Figura 11.6 – Ciclos térmicos de soldagem medidos durante 3 min para cada região indicada na figura ($T_{8/5}$ = taxa de resfriamento entre as temperaturas de 800 e 500 °C; U_m = tensão média de soldagem e I_m = corrente média de soldagem - gás de proteção Ar + 25%CO₂)

Tabela 11.1 – Taxa de resfriamento entre 800 e 500 °C (T8/5) em função da regulagem dos parâmetros dentro da faixa operacional de trabalho para cada gás de proteção nas soldagens por curto-circuito

Gás de proteção	Tensão média de soldagem (V)	Corrente média de soldagem (A)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Energia de Soldagem* (J/mm)	T8/5 (°C/s)	Perfil da seção transversal do cordão
Ar+8%CO ₂	16,8	106	20	538	17,6	
Ar+8%CO ₂	16,3	133	27	503	19,7	
Ar+8%CO ₂	17,1	176	36	520	14,8	
Ar+8%CO ₂	17,1	198	47	466	21,3	
Ar+15%CO ₂	16,6	104	20	535	13,9	
Ar+15%CO ₂	17,4	145	28	566	15,7	
Ar+15%CO ₂	17,9	179	36	561	18,2	
Ar+15%CO ₂	18,3	209	48	505	19,3	

(*) Calculado conforme mostrado no Capítulo VIII.

Tabela 11.1 – Continuação

Gás de proteção	Tensão média de soldagem (V)	Corrente média de soldagem (A)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Energia de Soldagem* (J/mm)	T8/5 (°C/s)	Perfil da seção transversal do cordão
Ar+25%CO ₂	18,4	114	20	655	14,3	
Ar+25%CO ₂	19,5	149	27	699	12,2	
Ar+25%CO ₂	20,1	181	36	629	13,2	
Ar+25%CO ₂	19,4	213	47	549	18,7	

(*) Calculado conforme mostrado no Capítulo VIII.

Para verificar a influência do tipo de gás sobre o ciclo térmico, traçou-se a Fig. 11.7. Pode-se observar uma tendência de aumento da energia de soldagem com o teor de CO₂ no gás de proteção, fato não ocorrido para o aumento de corrente. Porém, uma maior energia de soldagem em si não pode ser relacionada com maior calor imposto de uma forma direta, pois se precisa conhecer o rendimento térmico, que é influenciado pelo gás de proteção e parâmetros de soldagem (fatores muitas vezes negligenciados). Entretanto, verificou-se na Tab. 11.1 que o aumento de CO₂ demandou maior tensão média para operar de forma estável em termos de regularidade de transferência, o que fez a energia se tornar maior. Também, é aceito na literatura que o aumento do teor de CO₂ aumenta a capacidade de troca de calor, razão mais provável pela demanda de maior tensão. Sendo assim, e considerando que os comprimentos de arco (que devem afetar de forma direta o rendimento térmico) entre as soldagens com diferentes gases foram aproximadamente os mesmos, pode-se assumir que apesar da energia ser maior para os gases mais ricos em CO₂, o rendimento térmico permaneça o mesmo, o que faz com que o calor imposto aumente proporcionalmente com a

energia. De um maior calor imposto se espera menor velocidade de resfriamento. Justificando assim, os dados da Fig. 11.7 (cientes que existe a influência de outros fatores, como a geometria do cordão, que justifica não total correlação entre energia de soldagem e taxa de resfriamento). Assim, em termos práticos, a utilização de gás de proteção com maior teor de CO_2 leva a velocidades de resfriamento menores.

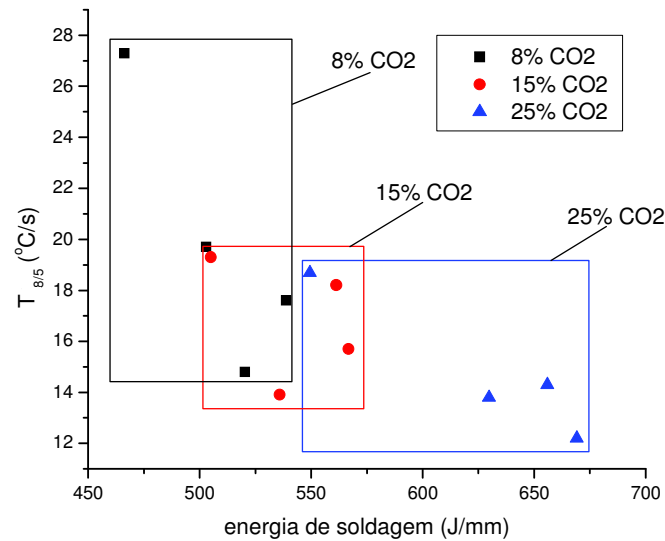


Figura 11.7 – Taxa de resfriamento em função da energia de soldagem para os 3 gases de proteção testados (os quatro pontos de cada gás são em relação às velocidades de alimentação/correntes e as áreas delimitadas pelos retângulos são apenas para facilitar a visualização, não podendo se interpolar os pontos dentro delas)

CAPÍTULO XII

DISCUSSÃO GERAL

O objetivo do trabalho foi o levantamento de mapas operacionais de transferência metálica, tomando como uma das premissas se manter os cordões com o mesmo volume, permitindo eliminar esta variável na análise. Como justificado anteriormente, esta abordagem garante uma comparação mais fiel e um caráter mais prático, já que em soldagem, independente dos parâmetros, o soldador tenta realizar um cordão com um dado volume compatível com o chanfro a ser preenchido.

As regiões de estabilidade operacional de transferência, levantadas para curto-circuito e goticular são reproduzidas, respectivamente, nas Figs. 12.1 e 12.2 (originalmente Figs. 4.6 e 4.11 – Capítulo IV). Uma primeira análise pode ser feita quanto aos limites inferiores e superiores das referidas regiões (limite superior e inferior das tensões de trabalho). Para transferência por curto-circuito (Fig. 12.1), verifica-se que a utilização de gases de proteção com maiores teores de CO_2 requerem regulagens de tensão um pouco mais altas para que o processo opere dentro da região de estabilidade operacional (maior tensão para o mesmo comprimento de arco, devido à maior capacidade de troca de calor do CO_2). Observa-se também que o efeito do CO_2 foi mais pronunciado de 15% para 25% do que de 8% para 15% (nesta última, o limite inferior da região nem sofreu influência). Para transferência goticular (Fig. 12.2), observa-se o mesmo comportamento, mas apenas para o limite superior, resultado compatível com os de curto-circuito quando a variação de CO_2 foi a mesma (de 8% para 15%). Como $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ não é muito adequado para soldagem com transferência goticular, não foi possível verificar se o comportamento para curto-circuito se repetiria em toda a faixa. Mas, quando utilizado a proteção com adição de 5% O_2 , a faixa de tensão de trabalho assume

valor similar ao de quando se utiliza 8% CO_2 (apenas uma pequena redução no limite superior da tensão). De uma forma geral, pode-se dizer que o efeito do gás de proteção é mais efetivo sobre o limite superior das regiões, onde os arcos têm maior comprimento (para baixos comprimentos de arcos pode-se supor haver um efeito maior dos vapores metálicos).

Analisando agora a influência do tipo de gás na delimitação das regiões de estabilidade pela velocidade de alimentação (limites na vertical), destaca-se que o limite inferior refere-se:

- a) Para transferência por curto-circuito, à velocidade de alimentação que alcança a corrente definida como de limite inferior para faixa operacional (105 A);
- b) Para transferência goticular, à velocidade de alimentação que faz a corrente ultrapassar a corrente de transição globular-goticular;

Já o limite superior, refere-se:

- a) Para transferência por curto-circuito, à velocidade de alimentação que alcança a corrente definida como de limite superior para faixa operacional (210 A);
- b) Para transferência goticular, à velocidade de alimentação para atingir 400 A (valor arbitrário).

Para transferência por curto-circuito (Fig.12.1), que utilizam apenas CO_2 na mistura com Ar para o gás de proteção, não se nota efeito do gás de proteção sobre os valores limítrofes da região operacional. Para a transferência goticular (Fig. 12.2) quando usando gases com adição de CO_2 , também não há influência da composição do gás. Porém, ao se analisar o uso do gás com 5% O_2 , as velocidades de alimentação que definem os limites da região são ampliados (atinge-se a corrente de transição com menor valor de corrente e com velocidade de alimentação menor e alcança-se 400 A com maior velocidade de alimentação).

Em relação à alteração da região de estabilidade operacional em consequência de mudanças nos parâmetros de soldagem (DBCP e indutância), o aumento na DBCP provocou a diminuição dos valores de tensão da faixa de tensão da região de estabilidade operacional quando se trabalhando no modo de transferência por curto-circuito. Ou seja, em relação à região levantada, se for utilizada uma DBCP maior, deve-se diminuir os valores de tensão para manter o processo funcionando dentro da região de estabilidade operacional. Ao contrário do modo por curto-circuito, trabalhando no modo goticular, a variação da DBCP não produziu mudanças significativas nos valores de tensão da região de estabilidade operacional, ou seja, pelo menos dentro da faixa de DBCP experimentada, alterações na DBCP mantêm a faixa de valores de tensão invariável.

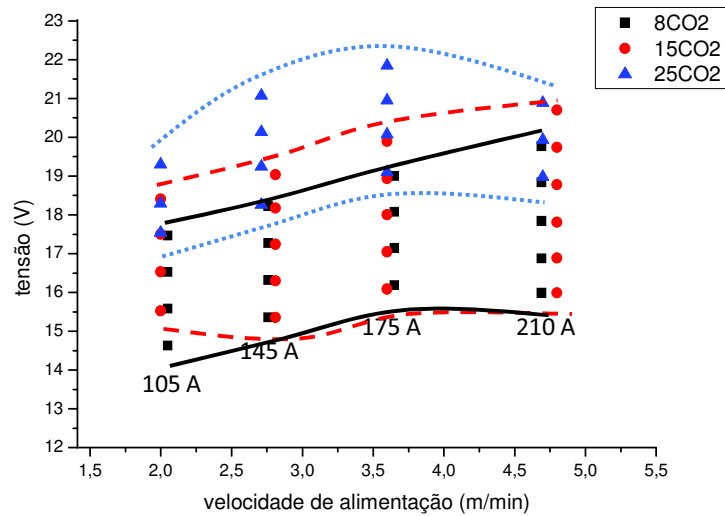


Figura 12.1 – Regiões de estabilidade operacional para o modo curto-circuito para o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e utilizando DBCP de 12 mm na polaridade CC+

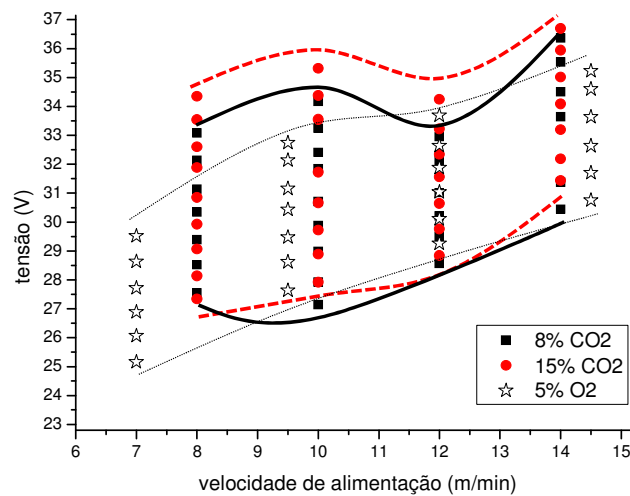


Figura 12.2 – Região de estabilidade operacional para o modo goticular para o arame ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e utilizando DBCP de 18 mm na polaridade CC+

A Fig. 12.3 (originalmente Figs. 5.7 e 5.9 – Capítulo V) mostra os valores de corrente de soldagem dentro das regiões de estabilidade operacional para diferentes DBCPs utilizadas e mantendo-se a velocidade de alimentação constante (curvas de isoconsumo). Em uma primeira análise desta figura, pode se verificar que em transferência por curto-circuito a variação da tensão não afetou significativamente a corrente, enquanto em transferência goticular a variação da corrente é evidente. Sabe-se que a variação da corrente devido à

variação da tensão está ligada à mudança no comprimento energizado do eletrodo. Maiores comprimentos de arco (maior tensão) equivalem a menores valores de comprimento energizado (para uma mesma DBCP) e para manter o consumo constante (a velocidade de alimentação não varia) a corrente aumenta. Tal comportamento pode ser observado quando em transferência gótica. Acredita-se que esse efeito não aparece em transferência por curto-circuito, pois as mudanças no comprimento de arco devido à alteração da tensão são muito pequenas pela própria característica de arcos curtos com esse tipo de transferência. Esta hipótese é corroborada pela verificação da variação da tensão quando a DBCP é aumentada de 12 para 16 mm em transferência por curto-circuito, tornando o comprimento energizado de eletrodo e arco maiores (aumento do comprimento do arco e de eletrodo energizado devido ao aumento na DBCP foi discutido no item 5.1 – Capítulo V).

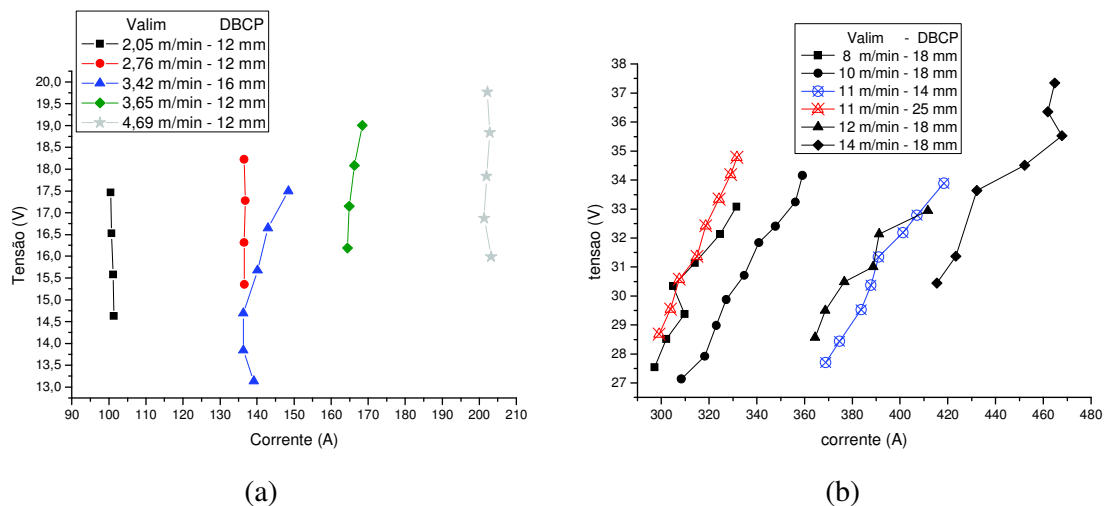


Figura 12.3 – Consequência da variação da tensão sobre a corrente para diferentes DBCPs com o processo operando em (a) por curto-circuito e em (b) em gótica utilizando como gás de proteção Ar + 8%CO₂ em ambos os tipos de transferência

A variação na indutância da fonte não altera a posição e a dimensão da região de estabilidade em curto-circuito (não tem sentido a análise em gótica), apesar de que a sua mudança alterar a regularidade da transferência. Como consequência deste comportamento, deve-se primeiro encontrar os valores de tensão que propiciam transferências estáveis e, depois, ajustar o efeito indutivo da fonte para refinar a estabilidade do processo.

As regiões de estabilidade operacional levantadas (em soldagens de cordão sobre chapa) quando aplicadas em juntas reais se mostraram poder depender da geometria junta. No

caso de transferência por curto-circuito, a região de estabilidade operacional levantada se mostrou adequada para soldagens também em junta em I com folga de 1,5 mm. Talvez, por que este tipo de junta seja semelhante à soldagem de cordão sobre chapa. Já para o caso de transferência goticular, onde se utilizou juntas de topo com chanfro em Y, a região de estabilidade operacional levantada se apresentou inadequada sob certos aspectos. Neste caso, ocorreram mordeduras para soldagem com parâmetros mesmo dentro da região de estabilidade, mas estas deixaram de existir abaixo da região, indicando que, para este tipo de junta, o arco estava alto mesmo dentro da região de estabilidade. Por isto, sugere-se que, para soldagens com este tipo de junta, a região de estabilidade operacional deveria ter os valores de tensão de soldagem do limite superior da região um pouco menores do que os valores limitantes da região originalmente levantada.

Em relação ao rendimento de deposição do processo, em ambos os tipos de transferência, soldagens utilizando arcos muito curtos (abaixo da região de estabilidade operacional) fazem diminuir o rendimento, devido à ocorrência de curtos-circuitos forçados. Já arcos mais longos não afetam o rendimento para curto-circuito, porém diminuem o rendimento quando operando em transferência goticular. Mas este efeito contraditório em relação ao tipo de transferência está ligado aos gases de proteção. Em transferência goticular, o aumento do teor de CO_2 provoca efeito de repulsão da gota e essa repulsão provoca o arremesso da gota para fora da poça de fusão originando os respingos. O efeito não atinge o rendimento em transferência por curto-circuito, pois a transferência se dá por contato, apesar do efeito de repulsão ocorrer.

A análise da intensidade de radiação emitida pelo arco em ambos os tipos de transferência mostrou depender proporcionalmente da corrente de soldagem e, principalmente, do comprimento de arco. Acredita-se que o aumento da corrente faça crescer a taxa de ionização do gás (maior quantidade de ionização e relaxação por unidade de tempo) e, assim, a intensidade de radiação percebida pelo espectrômetro (quantificada pelo número de fótons que atingem a CCD por segundo). O aumento do comprimento de arco, por outro lado, teria o efeito de aumentar a superfície de emissão de radiação (aumento do tamanho da fonte de radiação).

A medição do ciclo térmico de soldagem, realizada em testes com transferência por curto-circuito e dentro da região de estabilidade operacional, mostrou a dependência do mesmo para com a geometria do cordão. Para maiores velocidades de alimentação (conseqüentemente mais altas corrente de soldagem), a velocidade de resfriamento foi maior,

para energias de soldagem similares (mesmo volume de cordão). Uma hipótese que pode ser levantada é que como a penetração na raiz do cordão aumentava de volume com o aumento da corrente, a área de troca de calor do cordão com o meio também aumentava, reduzindo o calor que se dissipa para dentro da chapa.

CAPÍTULO XIII

CONCLUSÕES

O objetivo de se construir mapas operacionais para soldagem MIG/MAG diferenciados dos mapas convencionais de transferência metálica, ou seja, de aplicação prática para não somente prever transferência metálica, mas também auxiliar usuários na seleção de parâmetros e prever as características operacionais resultantes, foi atingido. De uma forma global, para as condições (arame, gases de proteção, posição de soldagem, ângulos da tocha, regulagem de indutância, etc.) e parâmetros de soldagem (faixa de corrente e DBCP típicas de soldagem por curto-circuito e goticular) utilizados neste trabalho, pode-se concluir que:

- Os critérios e metodologia utilizados para definir os limites (a faixa) de velocidade de alimentação e tensão para criar os mapas operacionais de transferência se mostraram eficientes na determinação das regiões de estabilidade operacional;
- É possível, através destes mapas operacionais, regular a velocidade de soldagem e tensão para se obter os modos de transferência desejados e de forma regular;
- É possível, através dos mecanismos de verificação destes mapas operacionais, identificar as consequências sobre o acabamento e geometria do cordão, rendimento de deposição, emissão luminosa quando se operando fora da região de estabilidade operacional;
- É possível verificar a influência da variação da velocidade de alimentação e gás de proteção sobre o ciclo térmico de soldagem em transferência por curto-circuito dentro da região de estabilidade operacional;
- É possível, nesses mapas operacionais, perceber as alterações nas regulagens de parâmetros necessárias para ainda se continuar trabalhando em condições de estabilidade

operacional quando se aumenta ou se reduz duas das mais importantes variáveis do processo, a indutância (fator indutivo das fontes) e a distância bico de contato-peça (DBCP);

De uma forma mais específica e suplementar, conclui-se ainda que;

- a) Gases de proteção à base de argônio com teores de CO_2 variando entre 8 a 25% exigem que a região de estabilidade operacional de transferência por curto-circuito trabalhe com maiores valores de tensão de soldagem (arcos com aproximadamente mesmo comprimento), efeito mais pronunciado quando se altera de 15 para 25%. Para transferência goticular e teores de CO_2 variando só entre 8 a 15%, também exigem que a região de estabilidade operacional trabalhe com valores de tensão de soldagem pouco maiores (arcos com aproximadamente mesmo comprimento). A troca de CO_2 por 5% O_2 faz com que a região de estabilidade operacional de transferência goticular trabalhe com menores valores de tensão de soldagem para arcos com aproximadamente mesmo comprimento, efeito mais pronunciado sobre o limite superior das regiões;
- b) O gás de proteção de $\text{Ar} + 5\% \text{O}_2$ faz com que a corrente de transição fique menor do que em misturas com CO_2 ;
- c) Mudanças na regulagem da tensão dentro da região de estabilidade operacional de transferência por curto-circuito não alteram significativamente a corrente média de soldagem para uma dada velocidade de alimentação;
- d) Já mudanças na regulagem da tensão dentro da região de estabilidade operacional de transferência goticular alteram a corrente média de soldagem. Esta aumenta com o aumento da tensão de soldagem, para uma dada velocidade de alimentação;
- e) Os mecanismos para previsão da alteração da posição da região de estabilidade operacional frente a variações na DBCP mostraram que se trabalhando no modo goticular a mudança na DBCP não altera a faixa de tensões e velocidade de alimentação que caracteriza a região de estabilidade, mas em curto-circuito esta região opera em uma faixa de tensões de soldagem menores quando a DBCP é aumentada;
- f) Os mecanismos para previsão da alteração da posição da região de estabilidade operacional frente a variações na indutância (ou fator indutivo, para fontes eletrônicas), mostraram que a variação da indutância não altera a faixa de tensões e

velocidade de alimentação que caracteriza a região de estabilidade, pelo menos para as condições da fonte utilizadas;

- g) Com a regulagem de soldagens dentro das regiões de estabilidade operacional, os cordões têm melhores acabamentos superficiais, com perfis e largura mais regulares e penetração mais uniforme, garantindo-se a penetração total nas juntas. Proporciona também o rendimento de deposição mais alto, indicando o menor nível de respingos;
- h) Variações no ponto de trabalho dentro da região de estabilidade operacional dos mapas no sentido de aumentar a velocidade de alimentação (conseqüentemente a corrente), mesmo mantendo-se o mesmo volume de cordão com a compensação pela regulagem proporcional da velocidade de soldagem, pioram o acabamento superficial, aumentam a penetração, a ocorrência de mordeduras e diminuem o rendimento (aumento da geração de respingos) de deposição, exceto para transferência goticular, para qual modo de transferência não há efeito da corrente sobre a geração de respingos;
- i) Para regulagem de soldagens acima da região de estabilidade operacional, o acabamento piora, apresentando cordões menos lisos, com mordeduras e maior tendência de colapso da poça, mas o rendimento de deposição se mantém alto (baixo nível de respingos);
- j) Para regulagem de soldagens abaixo da região de estabilidade operacional, ocorreram irregularidades geométricas na largura, reforço e no perfil do cordão. O acabamento apresenta-se não homogêneo com mordeduras, exceto com transferência goticular em que o acabamento do cordão não piora. No geral, o rendimento de deposição é menor (maior geração de respingos);
- k) A intensidade de radiação não tem vinculação com as regiões de estabilidade operacional dos mapas, mas sim com o comprimento do arco. Quando se aumenta progressivamente a tensão, a emissão luminosa no espectro medido neste trabalho aumenta, ou seja, abaixo da região se emite pouco, na região se emite de forma intermediária e acima se emite mais radiação luminosa;
- l) Dentro das regiões, o aumento da velocidade de alimentação (proporcionalmente à corrente) não influi muito na quantidade radiação emitida (leve tendência de aumento), pelo menos quando se mantém constante o volume do cordão durante a variação do valor de regulagem da velocidade de alimentação (razão constante entre velocidade de alimentação e velocidade de soldagem);

- m) Dentro das regiões, o aumento da velocidade de alimentação (proporcionalmente a corrente) quando se manteve constante o volume do cordão, cria uma tendência de aumento na taxa de resfriamento (resfriamento mais rápido);
- n) A utilização de gás de proteção com maior teor de CO₂ leva a velocidades de resfriamento menores.

CAPÍTULO XIV

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Verificar a possibilidade de utilização do “Critério para Estabilidade de Transferência em MIG/MAG com Curto-Circuito” para previsão e/ou monitoramento de problemas com o acabamento e perfil do cordão (penetração, largura, reforço, etc.) e geração de respingos. Dependendo dos valores do índice (que pode ser calculado automaticamente e imediatamente após a soldagem), pode-se parar a produção em virtude de um indicativo de perda de conformidade do cordão;
2. Verificar a influência do gás de proteção na geração de respingos através do ensaio proposto pelo Laprosolda/UFU, onde se pode avaliar de forma sistemática o alcance e tamanho dos mesmos. Este estudo tornaria o mapa mais completo ao prever geração de respingos. Por exemplo, dependendo do caso, respingos longe do cordão não seriam (ou seriam) tão problemáticos, em virtude da pequena dimensão da peça a ser soldada;
3. Utilizar a metodologia para levantar mapas operacionais para outros tipos e diâmetros de arame, assim como em outras posições de soldagem e/ou juntas (ângulo e de topo), com objetivo de verificar a influência destas condições sobre a região de estabilidade operacional de cada tipo de mapa de transferência. Isto acrescentaria aos mapas mecanismos de previsão de alterações nas condições de soldagem (tensão, corrente, indutância, DBCP, etc.) em função, por exemplo, da mudança da soldagem na posição plana para posição horizontal;
4. Verificar a real influência dos parâmetros de soldagem sobre a radiação emitida pelo arco, com objetivo de se desenvolver equipamentos mais eficientes na diminuição dos

efeitos causados por esta radiação nos seres humanos. Para isto, deve se utilizar uma metodologia que permita manter o arco sempre com o mesmo comprimento.

CAPÍTULO XV

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFARO, S. C. A.; CARVALHO, G. C. MATOS, M. S. A Spectrometry Based Sensor for Weld Defect Tracking. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, Volume 10, nº 2, p. 79-84, Abr/Jun 2005.

ANSI-MC 96.1. ISA. Temperature Measurement Thermocouples. 1982

AQUSA, K.; YAMAUCHI, N. apud STENBACKA, N.; PERSON, K. A. Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**. Volume 68, nº 11, p. 41-47, Nov. 1989.

ARAÚJO, D. B. Metodologia para Uso de Simulação Física no Estudo da ZAC e na Obtenção de Diagramas CCT para Soldagem. 2008. 104 f. Dissertação – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG.

ASM HANDBOOK. **Welding, Brazing and Soldering**. ASM, 1993. Volume 6.

BAIXO, C. E. I.; DUTRA, J. C. Influência da Taxa de Variação da Corrente na Regularidade em Soldagem MIG/MAG por Curto Circuito. In: XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1995, Caxias do Sul/RS. **Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1995. p. 903-920.

BAIXO, C. E. I.; DUTRA, J. C. O Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG Através de Projetor e de Tratamentos Oscilográficos de Tensão e Corrente. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1989, São Paulo/SP. **Anais do XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1989. p. 193-209.

BAIXO, C. E. I.; DUTRA, J. C. Processo MIG/MAG: Metodologia para Determinação de Relações Paramétricas Tensão/Corrente para Transferência por Curto-Circuito. In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1991, Recife/PE. **Anais do XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1991. p. 265-283.

BARBOSA, J. C. P. **Análise por Meio de Espectroscopia de Emissão Óptica das Espécies Ativas em Nitretação Iônica e Gaiola Catódica**. 2007. 94 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

BEBIANO, D. F. V. **Monitoração e Localização de Efeitos na Soldagem TIG Utilizando Técnicas de Espectrometria**. 2008. 123 f. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília.

BERTULANI, C. A. O Efeito Hall Quântico. Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/teaching/hall/hall.html>>. Acesso em: 2 fev. 2010.

CHAKRAVARTI, A. P.; THIBAU, R.; BALA, S. R. Cooling Characteristics of Bead-on-Plate Welds. **Metal Construction**, p. 178-183, 1985.

DUTRA, J. C. MIG/MAG – Transferência Metálica por Curto-Circuito – Fontes de Soldagem versus Gases do Arco. **Soldagem e Inspeção**. São Paulo, Volume 13, nº 1, p.019-024, Jan/Mar 2008.

DUTRA, J. C.; BAIXO, C. E. I.; OLLÉ, L. F.; GOHR JÚNIOR, R. Instrumentação para Estudo da Transferência Metálica em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito. In: XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1995, Caxias do Sul/RS. **Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1995. p. 867-888.

FERREIRA FILHO, D.; FERRARESI, V. A. Influência do tipo de gás de proteção e da distância bico de contato-peça na transferência metálica do modo curto-circuito. In: XXXII CONSOLDA, 2006, Belo Horizonte - MG. **Anais do XXXII CONSOLDA**, 2006. CD ROM.

FIGUEIRÊDO, F. V.; KOBAYASHI, Y. Verificação da Ocorrência de Pterígeo em Trabalhadores que Exercem Atividades em Ambientes de Soldagem. In: XXXIII CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 13, 2007, Caxias do Sul - RS. **Anais do XXXIII Congresso Nacional de Soldagem**. CD ROM.

FIGUEIREDO, K. M. **Mapeamento dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem MIG de Alumínio**, 2000. 75 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FONSECA, A. F.; AVELAR, R. C.; MODENESI, P. J. Efeito de Variações nas Características de Arames na Soldagem GMAW por Curto-Circuito. In: XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1996, Blumenau/SC. **Anais do XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1996. p. 187-196.

GOMES, E. B. **Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito Aplicado ao Processo Eletrodo Tubular Através da Metodologia Taguchi**, 2006. 99 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

HAIDAR, J.; LOWKE, J. J. Effect of CO₂ Shielding Gas on Metal Droplet Formation in Arc Welding. **IEEE Transactions on Plasma Science**. Volume 25, nº 5, p. 931-936, Oct 1997.

HEALD, P. R.; MADIGAN, R. B.; SIEWERT, T. A. LIU, S. Mapping the Droplet Transfer Modes for an ER100S-1 GMAW Electrode. **Welding Journal**. Welding Research Supplement, Volume 73, nº 2, p. 38s-44s, Feb 1994.

HERMANS, M. J. M.; DEN OUDEN, G. Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**. Welding Research Supplement, Volume 78, nº 4, p. 137-141, Apr 1999.

IOPE Instrumentos de Precisão Ltda. Termometria: Conceito e Aplicação. Disponível em <http://iope.com.br/index_port.htm>. Acesso em: 7 jan 2009.

JACOBSEN, N. Monopulse Investigation of Drop Detachment in Pulsed Gas Metal Arc Welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**, nº 25, p. 783-797, 1992.

KANG, M. J.; RHEE, S. A Study on the Development of the Arc Stability Index Using Multiple Regression Analysis in the Short-Circuit Transfer Region of Gas Metal Arc Welding. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, Volume 215, nº 2, p. 195-205, 2001.

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

KOBAYASHI, Y.; ANASTÁCIO, A. C. S. A.; NARDI, C. Estudo da Influência da Variação da Corrente de Curto-Circuito, Através da Indutância, sobre as Características Geométricas e Rendimento Real de Deposição. In: 3º COBEF, 2005, Joinville - SC. **Anais do 3º Congresso Brasileiro de Fabricação**. CD-ROM.

LARSON, N.E.; MEREDITH W.F. Shielding Gas Selection Manual, Union Carbide Industrial Gases Technology Corp., 1990.

LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part II – Control of Metal Transfer. **Welding Journal**. Welding Research Supplement, Volume 37, nº 9, p. 418 - 425, Sep 1958a

LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part I – Control of Electrode Melting Rate. **Welding Journal**. Welding Research Supplement, Volume 37, nº 8, p. 343-353, Aug 1958b.

LIN, Q.; LI, X.; SIMPSON, S. W. Metal Transfer Measurements in Gas Metal Arc Welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**. nº 34, p. 347-353, 2001.

LINCOLN ELECTRIC. Surface Tension Transfer[®] (STT[®]). Disponível em: <<http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/nx220.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2007.

LIU, S.; SIEWERT, T. A.; LAN, H. G. Metal Transfer Mode in Gas Metal Arc Welding. In: 2ND INT. CONF. ON RECENT TRENDS IN WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY, 1989, Gatlinburg, Tennessee, USA, Proc. of 2nd Int. Conf. on Recent Trends in Welding Science and Technology, p. 475-479.

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

MENDONÇA, D. S.; ALFARO, S. C. A.; BORGES, G. A. Utilização da Espectroscopia Óptica de Emissão para Monitoração e Controle da Temperatura da Soldagem GTAW. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. São Paulo, Volume 3, nº 3, p.1-6, Jan/Mar 2007.

MITA, T.; SAKABE, A.; YOKOO, T. Quantitative Estimates of Arc Stability for CO₂ gas Shielded Arc Welding. **Welding International**., nº 2, p.152-159, 1988.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. Introdução à Metalurgia da Soldagem. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

NASCIMENTO, A. S.; BATISTA, M. A.; NASCIMENTO, V. C.; SCOTTI, A. Avaliação dos Métodos de Cálculo de Potência Elétrica em Soldagem a Arco e as Consequências sobre as Previsões Geométricas, Térmicas e Metalúrgicas da Junta. **Soldagem e Inspeção**. São Paulo, Volume 12, nº 2, p.97-106, Abr/Jun 2007

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

NATIONAL INSTRUMENTS. Data Sheet C Series Analog Input Modules. Disponível em <http://www.ni.com/pdf/products/us/c_series_ai.pdf>. Acesso em: 27 dez 2009b.

NORRISH, J. **Advanced Welding Process**. 1. ed. London: IOP Publishing Ltd, 1992, 375p.

PELLERIN, N.; ZIELINSKA, S.; PELLERIN, S.; VALENSI, F.; MUSIOL, K.; DE IZARRA, CH.; BRIAND, F.; RICHARD, F. Experimental Investigations of the Arc MIG-MAG Welding. PLASMA 2005: Int. Conf. on Research and Applications of Plasmas; 3rd German-Polish Conf.on Plasma Diagnostics for Fusion and Applications; 5th French-Polish Seminar on Thermal Plasma in Space and Laboratory, Volume 812, 2006, p. 80-87.

PONOMAREV, V.; AL-ERHAYEM, O.; APPS, R.L.; LINDBERG, B. **Arc Welding Process Statistical Analysis**: Methodical Approaches, Analysis Conceptions, Experiences. Helsingor: The European Institute for the Joining of Materials, 1997, 158p.

PONOMAREV, V.; SCOTTI, A.; NORRISH, J; LUCAS, W. Metal Transfer Modes in MIG/MAG (GMAW) Welding: Contributions to a New IIW Classification. IIW Doc. XII-1960-09, 2009.

POORHAYDARI, K.; PATCHETT, B. M.; IVEY, D. G. Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness. **Welding Journal**. Welding Research Supplement, p. 149-155, Oct 2005.

REIS, R. P.; SCOTTI, A. Fundamentos e Prática da Soldagem a Plasma. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2007. 147p.

RESENDE, A. A.; KEOCHEGUERIAN, F.; VILARINHO, L. O. Influência dos Teores de CO₂ e O₂ na Corrente de Transição Globular-Goticular Utilizando Misturas a Base de Argônio Durante a Soldagem GMAW de Arame ER70S-6. **Soldagem & Inspeção**, Volume 14, nº 1, p. 26-35, Jan/Mar 2009.

RHEE, S.; KANNATEY-ASIBU JR., E. Observation of Metal Transfer during Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**. Welding Research Supplement, Volume 71, nº 10, p. 381-386, Oct 1992.

ROCA, S. A.; FALS, H. C.; FERNÁNDEZ, J. B.; ADÁN, F. S. Application of U versus I Diagrams for Process Stability Evaluation in Gas Metal Arc Welding in Short Circuit Transfer Mode. **Soldagem & Inspeção**, Volume 10, nº 2, p. 85-91, Abr/Jun 2005.

ROCA, S. A.; FALS, H. C.; FERNÁNDEZ, J. B.; MACÍAS, E. J.; ADÁN, F. S. New Stability Index for Short Circuit Transfer Mode in GMAW Process Using Acoustic Emission Signals. **Science and Technology of Welding and Joining**, Volume 12, nº 5, p. 460-466, 2007.

ROSSI, M. L.; VILARINHO, L. O. Medição de Radiação UV-Visível durante a Soldagem a Arco visando Questões de Segurança e Saúde do Trabalho. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, Volume 13, nº 4, p. 296-303, Out/Dez 2008.

SCHABERLE, F. A.; SILVA, N. C. Introdução à Física da Radioterapia. Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Física. Disponível em: <http://www.fsc.ufsc.br/~canzian/introtrt/efeitos.html>. Acesso em: 21 Fev 2010.

SCOTTI, A. Mapping the Transfer Modes for Stainless Steel GMAW. **J. of Science and Technology of Welding and Joining**. Institute of Materials Publ, UK, Volume 5, Nº 4, p.227-234, 2000.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2008. 284p.

SILVA, A. V.; MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. Uma Avaliação da Transferência por Curto-Circuito GMAW. In: XX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1994, Contagem/MG. **Anais do XX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1994. p. 593-607.

SILVA, H. R.; FERRARESI, V. A. Influência dos Parâmetros de Soldagem MIG de Alumínio na Qualidade do Cordão de Solda. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, Volume 8, nº 1, p. 39-45, Mar 2003.

SOUZA, D.; REZENDE, A. A.; SCOTTI, A. Um Modelo Qualitativo para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, Volume 14, nº 3, p. 192-198, Jul/Set 2009.

SPECTRAL PRODUCTS. SM242 Hand-held CCD Spectrometer. Disponível em <<http://www.spectralproducts.com/catalog/pdf/SM242.pdf>>. Acesso em: 28 dez 2009a.

STENBACKA, N.; PERSSON, K. A. Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**. Volume 68, nº 11, p. 41-47, Nov. 1989.

SUBAN, M.; TUSEK, J. Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used. **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 119, p. 185-192, 2001.

SUBAN, M.; TUSEK, J. Methods for the Determination of Arc Stability. **Journal of Materials Processing Technology**, Volume 143, p. 430-437, 2003.

TALKINGTON, B. S., **Variable Polarity Gas Metal Arc Welding**. Dissertação de Mestrado, The Ohio State University. 1998. 113p.

TBI INDUSTRIES. MIG/MAG Automáticas. Disponível em < http://www.tbi-brasil.com/Produtos/MIG_Classic_AUT_br.pdf>. Acesso em: 26 dez 2009.

TENG, T. K. Introdução à Cromoterapia. Disponível em: <<http://somostodosum.ig.com.br/conteudo/conteudo.asp?id=01283>>. Acesso em: 21 Fev 2010.

USHIO, M.; IKEUCHI, K.; TANAKA, M.; SETO, T. Effects of Shielding Gas on Metal Transfer. **Welding International**. Volume 9, nº 6, p. 36-40, 1995.

VILARINHO, L. O. **Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem MIG Sinérgica de Alumínio**. 2000. 111 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG.

ZIELINSKA, S.; PELLERIN, S.; DZIERZEGA, K.; MUSIOL, K.; IZARRA, DE CH.; BRIAND, F. Gas Influence on the Arc Shape in MIG-MAG Welding. **The European Physical Journal Applied Physics**, Volume 43, nº 1, p. 111-122, Sep 2008.

ANEXO I

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA DE ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO PARA DETERMINAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TRANSFERÊNCIA NO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Manual de Utilização do Programa de Análise de Curto-Circuito para
Determinação da Estabilidade de Transferência no Processo de Soldagem
MIG/MAG**

**Daniel Souza
Marcelo Lemos Rossi
Gabriel Maradei Carneiro de Rezende
Louriel Oliveira Vilarinho
Américo Scotti**

Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU 13/2009

**Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de
Processos de Soldagem - LAPROSOLDA/UFU**



Maio de 2009

Manual de Utilização do Programa de Análise de Curto-Circuito para Determinação da Estabilidade de Transferência no Processo de Soldagem MIG/MAG

Objetivo:

Calcular os parâmetros para possibilitar a análise e determinação da estabilidade da transferência metálica por curto-circuito no Processo de Soldagem MIG/MAG.

1 - Introdução

A análise da estabilidade da transferência metálica por curto-circuito proposta pelo Grupo Laprosolda usa do seguinte postulado:

A melhor condição de soldagem por curto-circuito não é aquela que necessariamente vai resultar em um maior rendimento de deposição ou menor oscilação dos sinais elétricos, mas sim aquela que proporciona uma maior regularidade de transferência e com a transferência dominada pela tensão superficial.

O critério para quantificar a Estabilidade de Transferência em MIG/MAG com curto-circuito no processo de soldagem MIG/MAG se baseia na premissa de que a estabilidade da transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto, assim como com o fato de que cada gota ao se destacar tenha um volume apropriado para ter havido a ação da tensão superficial para se obter a transferência.

Assim, esse Critério tem de satisfazer dois parâmetros, a saber:

1) Índice Vilarinho de Regularidade¹ da Transferência por Curto-circuito, cujo símbolo é IVcc: o meio para determinar o IVcc é através dos coeficientes de variação dos tempos de curto-circuito (tcc) e de arco aberto (tab).

2) Faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito (que garantiria uma transferência dominada pela tensão superficial), cujo símbolo é ΔF_{cc} : o meio para determinar ΔF_{cc} é pela faixa de frequências máxima e mínima calculada, a partir da Velocidade de Alimentação do arame, seu diâmetro e densidade, para atingir o tamanho de gota para uma transferência adequada (para arames de 1,2 mm de diâmetro, tem se assumido

¹ - e não de Estabilidade

que as gotas calculadas devam ter diâmetros de 1,1 a 1,25 do diâmetro do arame, mas estes valores demandam maiores investigações).

O Índice Vilarinho de Regularidade é apresentado pela Equação 1. Acredita-se que se os tempos em curto-circuito e em arco aberto forem sempre constantes, a transferência está no mais alto grau de regularidade. Assim, quanto menor o valor do IV_{cc}, mais regular é a transferência.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{tab}}{t_{ab}} \quad (1).$$

onde σ_{tcc} = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito; σ_{tab} = desvio padrão da média do tempo de arco aberto, t_{cc} = média do tempo de curto-circuito; t_{ab} = média do tempo de arco aberto.

Para calcular os índices IV_{cc} e ΔF_{cc} foi desenvolvido um programa computacional, trabalhando com duas seqüências de dados, onde uma delas é a corrente e a outra a tensão, ambos adquiridos por um sistema de aquisição de dados com uma única frequência de aquisição durante todo o processo de aquisição.

2 – Os Fundamentos do Programa

2.1 - Alimentação do programa

As seqüências de dados de tensão e corrente instantâneas devem se encontradas em forma de colunas em um arquivo com caracteres do tipo ASCII (arquivos do tipo “.txt” ou similares), sendo o separador de dezenas o elemento “.” (ponto) e as colunas separadas por tabulação (tabs).

2.2 – Dados de Resposta

O usuário deverá inicialmente informar uma tensão de referência, onde abaixo dela será considerado curto-circuito, e um intervalo amostral, onde serão realizadas as análises. É importante que o mesmo analise visualmente antes todo o oscilograma, para avaliar possíveis falhas e determinar a amostra a analisar. Para amostras grandes, maior do que 6 segundos, é aconselhável repartir a amostra em comprimentos de 3 a 5 s, para avaliar a variação dos índices ao longo da solda.

Utilizando a tensão de referência, o programa calculará dentro do intervalo amostral:

- o tempo médio de duração dos curtos-circuitos e o desvio padrão;

- a média do tempo de arco aberto e o desvio padrão;
- o tempo médio entre os curtos-circuitos e o desvio padrão;
- a quantidade de curtos-circuitos;
- a frequência de curtos-circuitos;
- o índice de regularidade IVcc;
- a regularidade do tempo de curto-circuito;
- a regularidade do tempo de arco aberto;
- a tensão média e RMS da amostra;
- a corrente média e RMS da amostra;
- a média das correntes de curto-circuito e o desvio padrão delas;
- taxa média de subida de corrente e o desvio padrão;
- taxa média de descida de corrente e o desvio padrão;
- verifica se a quantidade de curtos-circuitos do intervalo amostral são representativos (pode representar uma população, ou seja uma repetição de padrões) utilizando o erro do tipo I através da função de densidade populacional de t-student com uma certeza de α (que pode ser definida pelo o usuário).

O programa permite ainda que se excluam curtos-circuitos incipientes, ou seja, aqueles que apresentam como curtos, mas pelo baixo tempo não caracterizam como transferência. A definição de tempo mínimo para ser considerado como incipiente é meio subjetiva. Aconselha-se, se for o caso, assumir o valor de 2 ms e olhar o histograma na pré-análise e definir se precisa ou não redefinir este tempo.

2.3 - Cálculos feitos pelo programa

Tempo médio de duração dos curtos-circuitos:

O programa é capaz de encontrar os tempos que inicia e o que termina o curto-circuito e de guardar a diferença entre esses valores em um vetor para calcular a média e o desvio padrão dos valores encontrados.

Tempo médio de arco aberto:

É a diferença de tempo entre o início de um curto-circuito até o início do próximo, expressos pela média e o desvio padrão dos tempos encontrados.

Tempo médio entre os curtos-circuitos:

É a diferença de tempo entre o fim de um curto-circuito e o começo do próximo, expressos pela média e o desvio padrão dos tempos encontrados.

Quantidade de curtos-circuitos e Frequência:

O programa conta quantos curtos-circuitos foram encontrados e divide esse valor pelo intervalo da amostra para obter a frequência que os curtos-circuitos ocorrem.

Índice de regularidade IVcc:

$$\frac{\text{desvio padrão do tempo de curto}}{\text{tempo médio de curto}} + \frac{\text{desvio padrão do tempo de arco aberto}}{\text{tempo médio de arco aberto}}$$

Regularidade do tempo de curto-circuito:

$$\frac{\text{desvio padrão do tempo de curto}}{\text{tempo médio de curto}}$$

Regularidade do tempo de arco aberto:

$$\frac{\text{desvio padrão do tempo de arco aberto}}{\text{tempo médio de arco aberto}}$$

Tensão média da amostra e tensão RMS da amostra:

É a média aritmética e RMS de todos os valores de tensão na amostra.

Corrente média da amostra e corrente RMS da amostra:

É a média aritmética e RMS de todos os valores de corrente na amostra.

Média das correntes de pico:

É a média dos valores de corrente máxima devido aos curtos-circuitos.

Taxa média de subida e descida de corrente:

Para subida, é a derivada entre ponto em que a corrente instantânea ultrapassa a corrente média até atingir 70% do valor máximo do pico de corrente, para cada curto-circuito detectado. Para descida, é a derivada entre ponto do pico de corrente até que a corrente instantânea atinja 30% do valor máximo do pico de corrente, para cada curto-circuito detectado.

Verifica se a quantidade de curtos-circuitos do intervalo amostral são representativos:

Se ativada a função, o programa calcula o valor do t-student com um α definido pelo o usuário e o grau de liberdade igual à quantidade de curtos-circuitos menos um (Quantidadecurto-1), então ele encontra a quantidade mínima de curto-circuito sendo:

$$(\text{quantidade mínima de curto - circuito}) = \left(\frac{(T - \text{student}) \times (\text{desvio padrão dos curtos - circuitos})}{\Delta t_{\text{de aquisição de dados}}} \right)^2$$

3. Utilizando o Programa

ATENÇÃO: Esse programa utiliza funções do MatLab® que foram integradas à plataforma na versão 2007b. Sendo assim plataformas com versões anteriores do MatLab®2007b não funcionarão corretamente.

Para iniciar o programa deve-se ter aberto o MatLab. Em sua barra de ferramenta clique em “Abrir”, destacado na figura abaixo, ou através do atalho “Ctrl+O”.



Figura 1: Abrindo o programa

Na caixa de dialogo que aparecer, o usuário deverá localizar o programa e então abri-lo. Após isso o Editor irá aparecer mostrando o código fonte do programa então o usuário deverá executá-lo através do botão “Run”, indicado na figura abaixo, ou pela tecla de atalho “F5”.



Figura 2: Executando o programa

Devido ao funcionamento do MatLab, o programa deverá está no diretório de operações do MatLab (Current Directory) que pode ser escolhido pelo o usuário. Caso o programa não esteja no diretório de operações do MatLab, ao executar o programa pelos passos acima o MatLab irá informar uma mensagem de erro semelhante a indicada logo abaixo, onde o usuário deverá escolher a primeira opção “Change Directory” e o programa irá se iniciar.

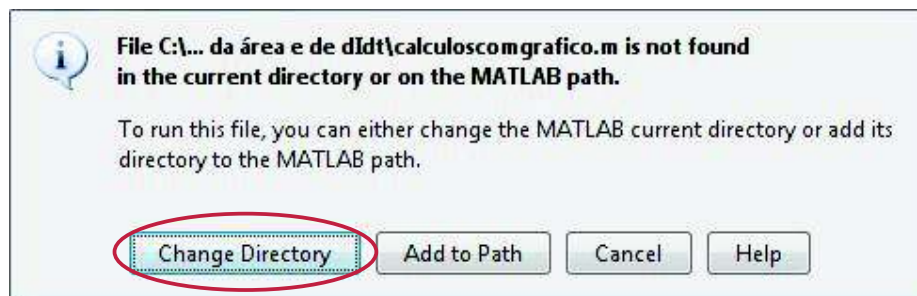


Figura 3: Erro devido o programa não estar na pasta de operações do MatLab

Uma vez aberto o programa, deve-se seguir passos 1 a 12 mostrados a seguir.

Informe abaixo o Arquivo para análise

1 Digite o caminho do arquivo ou clique em "Procurar Arquivo" 2 Procurar Arquivo

Colunas dos Dados

3 Corrente 4 Tensão

Intervalos de Tempo (s)

5 Tempo Inicial (s) 6 Tempo Final (s)

Dados da Aquisição

7 Tensão de curto (V)

8 Frequência de aquisição (Hz)

Verificar o número de amostras

9 ☐ Utilizar o Erro do Tipo I

10 α 0.05

11 Pré-Análise

12

Figura 4: Tela inicial do programa

1. Campo que deve conter o caminho e o nome completo do arquivo a ser analisado
2. Botão para procurar o arquivo a ser analisado
3. Campo numérico para indicar qual coluna é a coluna da Corrente
4. Campo numérico para indicar qual coluna é a coluna da Tensão
5. Campo numérico para indicar o tempo, em segundos, que deve iniciar a análise
6. Campo numérico para indicar o tempo, em segundos, que deve parar a análise
7. Campo numérico para indicar qual a tensão de referência, em volts, para considerar curto-circuito
8. Campo numérico para indicar qual a frequência de aquisição, em Hertz, que foi utilizada
9. Campo que deve ser marcado se quiser verificar se o número de curtos-circuitos utilizados é uma amostra válida utilizando o “erro do tipo I”
10. Se marcado o campo 9, deve-se indicar qual o valor de α que deve ser utilizado (padrão = 0,05)
11. Botão para carregar o arquivo na memória e iniciar a análise
12. Histograma da pré-análise

Digite o caminho e o nome completo do arquivo a ser analisado no campo 1 ou utilize o botão 2 para abrir uma caixa de procura para encontrar o arquivo desejado. Depois deve ser

informado nos campos 3 e 4 o intervalo de tempo para a análise e a tensão de referência e frequência de aquisição nos campos 5 e 6.

Caso queira utilizar o “erro do tipo I” para verificar se o número de curtos circuitos são o suficiente para caracterizar a amostra.

Após indicar ao programa todos os dados necessários para a análise, deve-se apertar o botão 11 e esperar os cálculos do programa e a apresentação do histograma no campo 12.

ATENÇÃO: Se o usuário alterar algum dos campos acima citados depois de ter feito a pré-análise, o usuário deverá apertar novamente o botão 11 para que o programa adquira os novos parâmetros informados antes de ele fazer a análise final.

Em seguida o programa irá apresentar outros elementos que permitirão remover alguns curtos-circuitos e realizar a análise final.

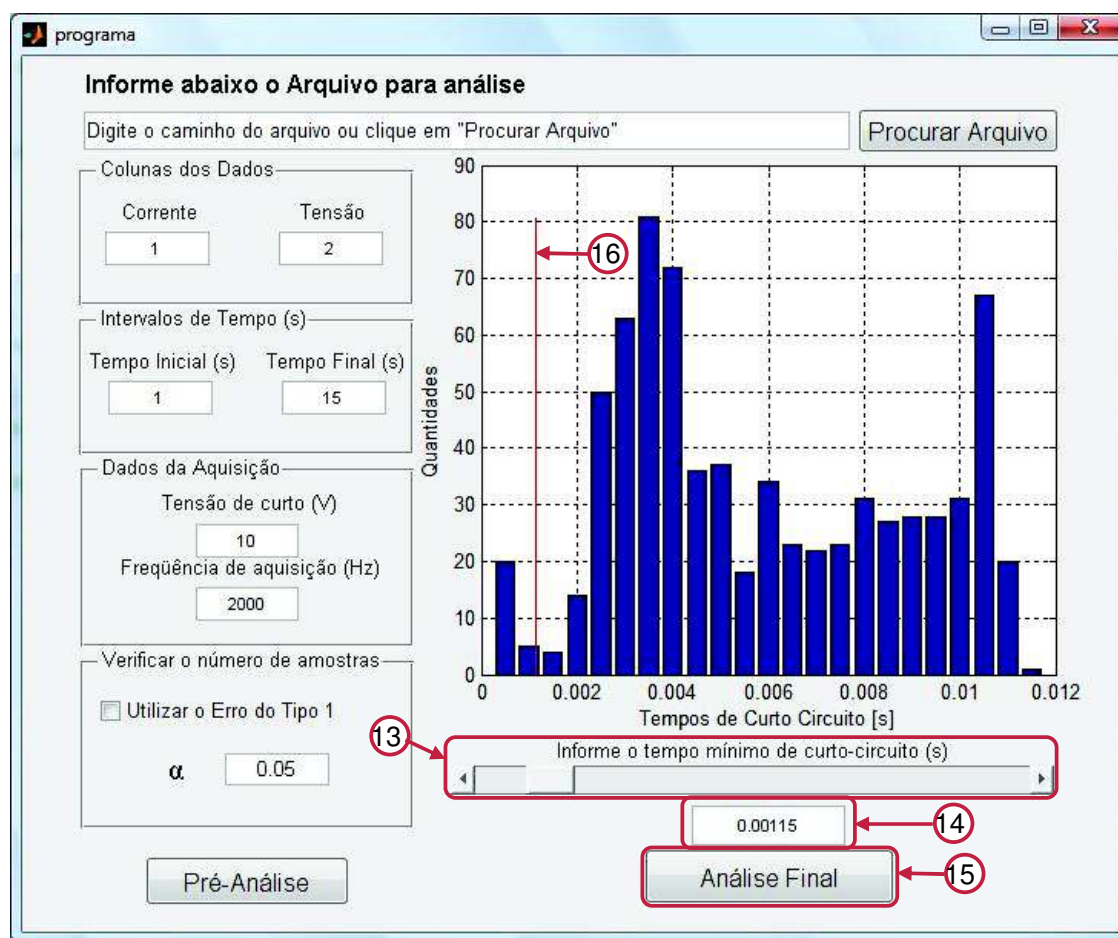


Figura 5: Programa preparado para a análise final.

13. Barra de rolagem para a escolha do tempo mínimo de curto-circuito abaixo do qual o programa descarta os curtos-circuitos (curtos incipientes)
14. Campo numérico para indicar qual o tempo mínimo de curto-circuito abaixo do qual o programa descarta os curtos-circuitos
15. Botão para realizar a análise final
16. Linha para indicar no histograma onde está o tempo mínimo de curto-circuito abaixo do qual o programa descarta os curtos-circuitos

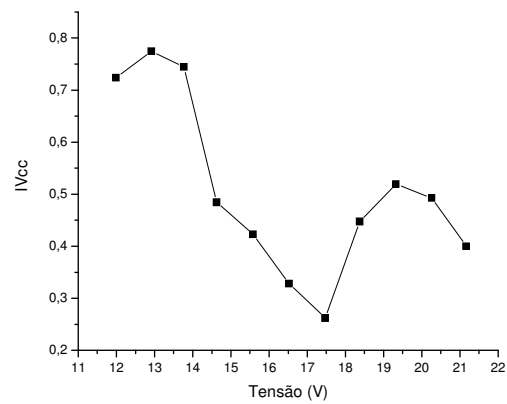
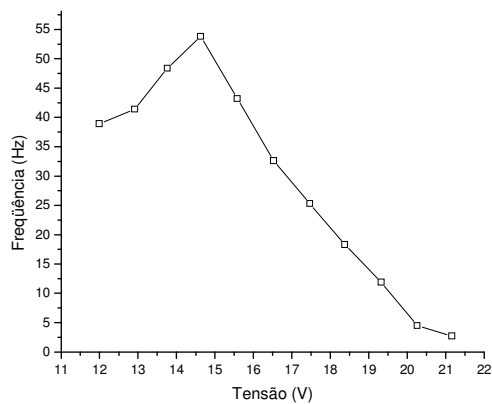
Para remover alguns curtos circuitos o usuário deve utilizar a barra de rolagem, item 13, ou informar o tempo mínimo no campo 14 e então apertar o botão 15 para obter a resposta final. A linha 16 é uma indicativa visual para a escolha do tempo mínimo de curto-circuito.

As respostas fornecidas pelo programa serão indicadas no “Command Windows” do MatLab.

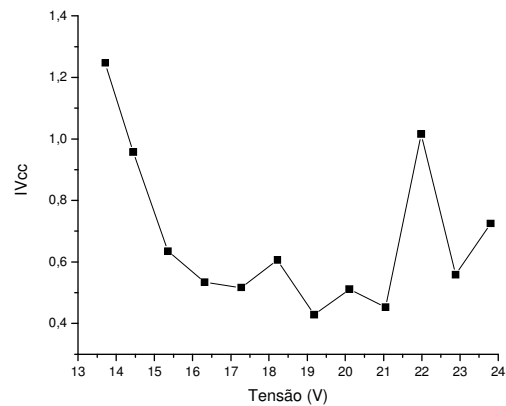
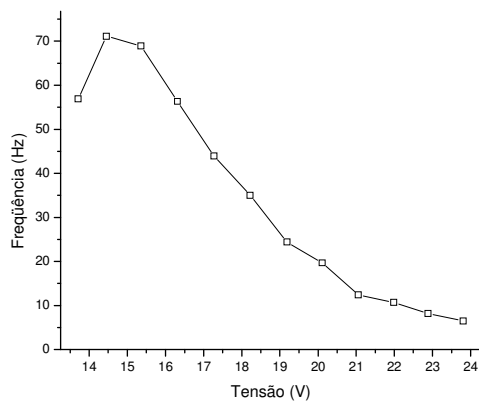
ATENÇÃO: Caso o usuário queira adicionar ou remover curtos-circuitos apenas alterando os campos 13 e 14, ele precisará apenas de apertar novamente o botão 15, sem a necessidade de apertar o botão 11. Porém, se o usuário alterara os campos de 1 a 8 ele deve utilizar o botão 11 para que o programa possa recarregar os novos parâmetros e então ajustar novamente os campos 13 e 14 para a análise final.

APÊNDICE I

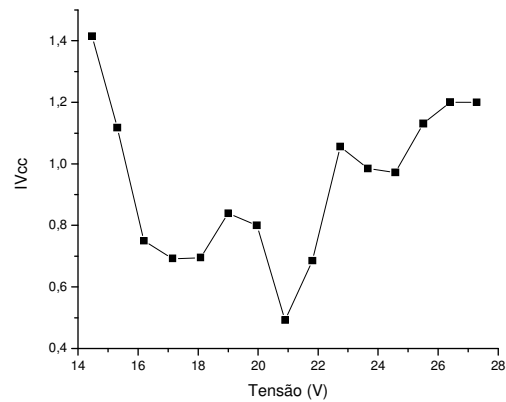
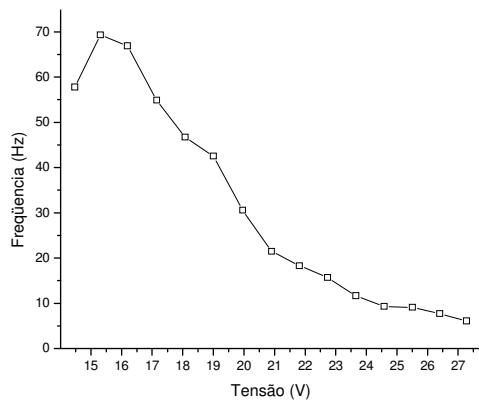
GRÁFICOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DA FAIXA DE TENSÃO REGULAR COM PROCESSO OPERANDO EM CURTO-CIRCUITO



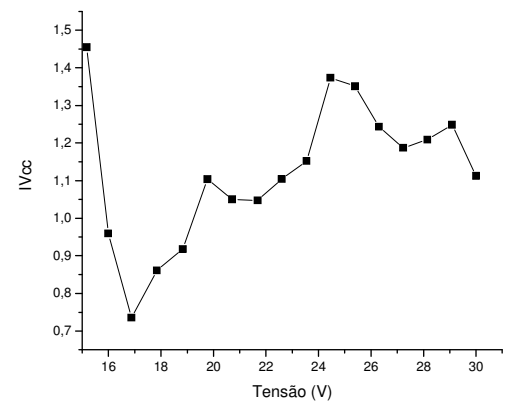
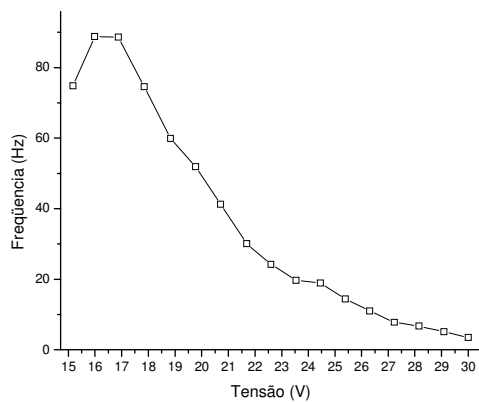
Ar + 8%CO₂ – Valim = 2,05 m/min



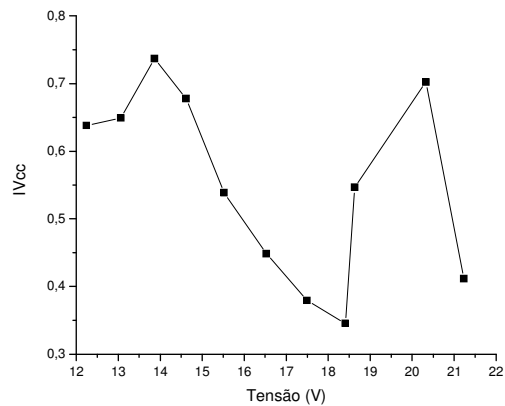
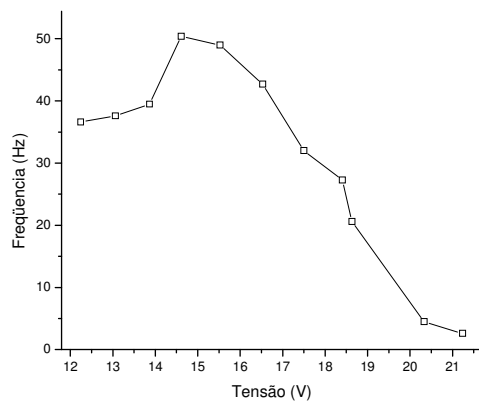
Ar + 8%CO₂ – Valim = 2,76 m/min



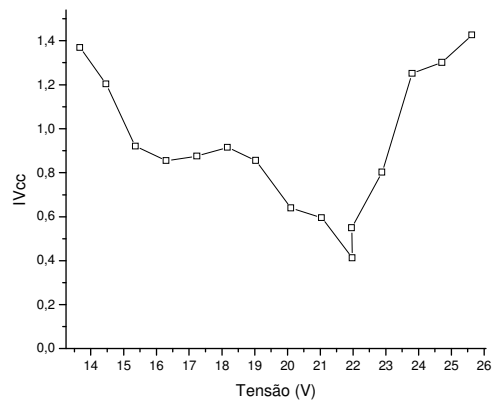
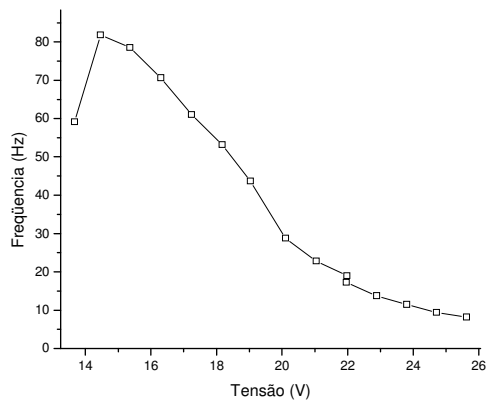
Ar + 8%CO₂ – Valim = 3,65 m/min



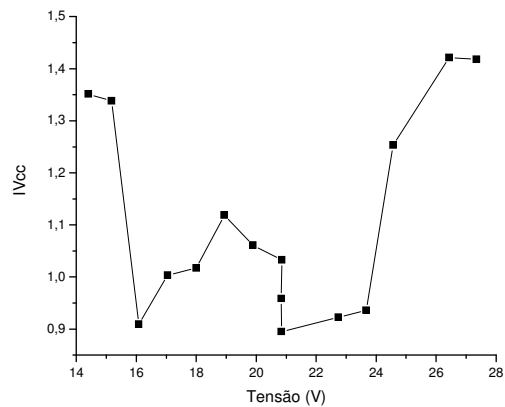
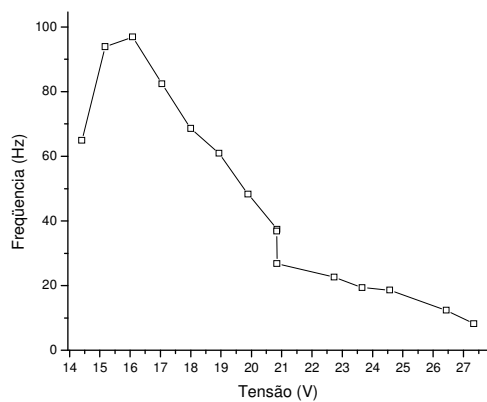
Ar + 8%CO₂ – Valim = 4,69 m/min



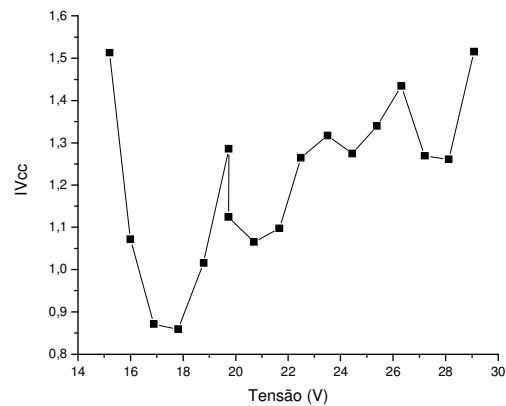
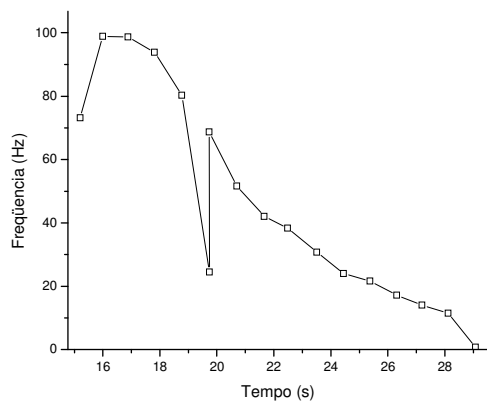
Ar + 15%CO₂ – Valim = 2,00 m/min



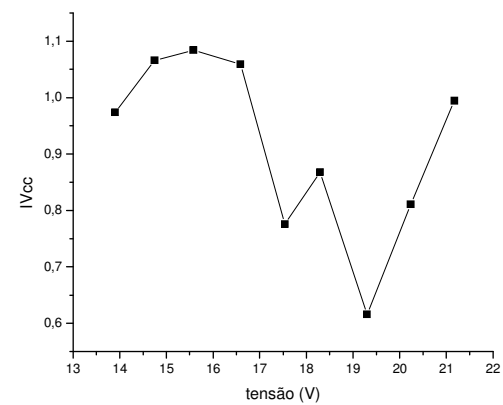
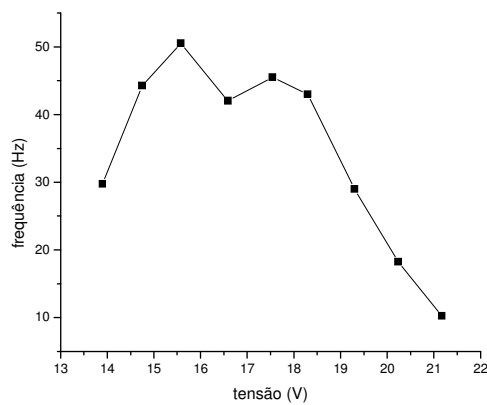
Ar + 15%CO₂ – Valim = 2,81 m/min



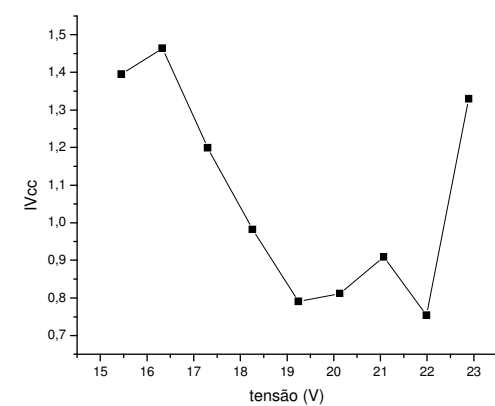
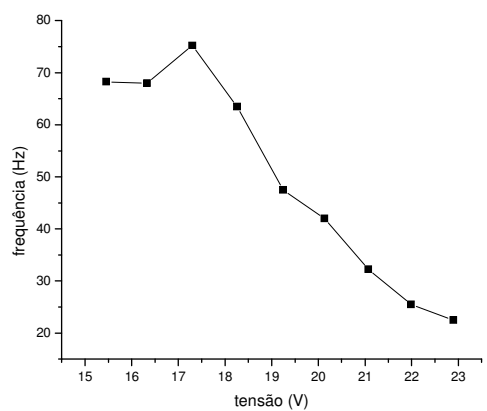
Ar + 15%CO₂ – Valim = 3,60 m/min



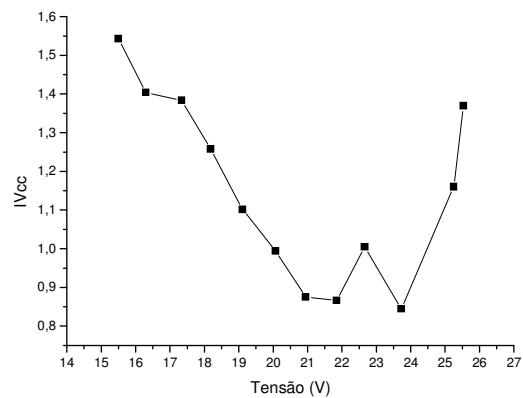
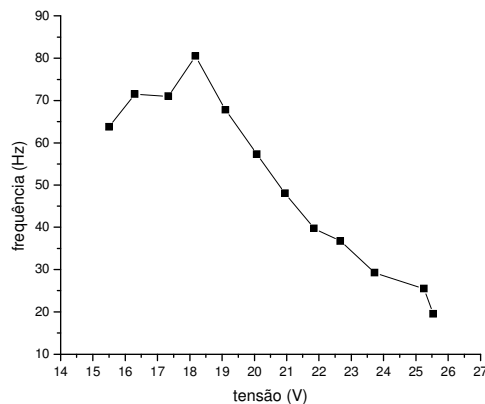
Ar + 15%CO₂ – Valim = 4,80 m/min



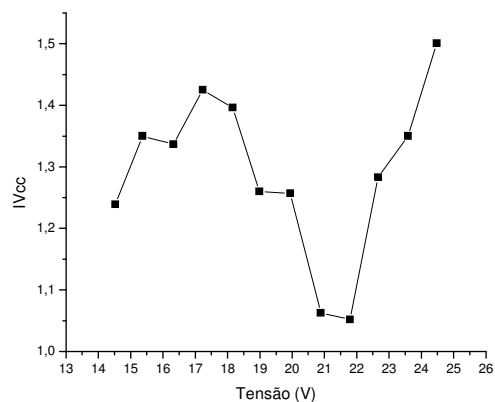
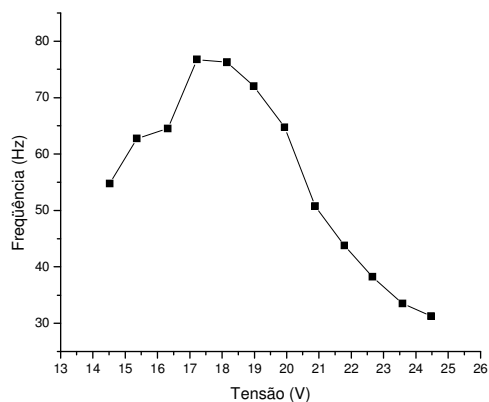
Ar + 25%CO₂ – Valim = 2,00 m/min



Ar + 25%CO₂ – Valim = 2,71 m/min



Ar + 25%CO₂ – Valim = 3,60 m/min



Ar + 25%CO₂ – Valim = 4,70 m/min

Figura 1.1 – Valores de frequência de curtos-circuitos medida e índice de regularidade calculado para os testes de varredura visual da faixa de tensão de operação no modo de transferência por curto-circuito utilizando DBCP de 12 mm

APÊNDICE II

TABELAS DE VALORES DE REGULAGEM DOS PARÂMETROS E RESPOSTA DOS SINAIS ELÉTRICOS PARA AS SOLDAGENS EM JUNTAS

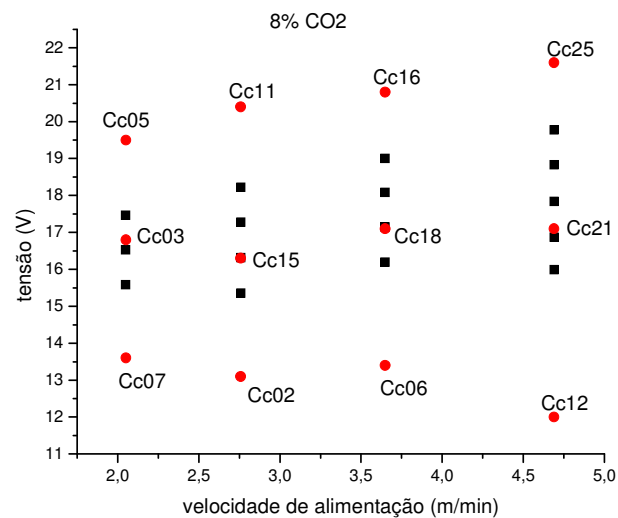


Figura II.1 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação ao mapa de transferência levantado (pontos quadrados).
Transferência por curto-circuito com proteção de Ar + 8%CO₂

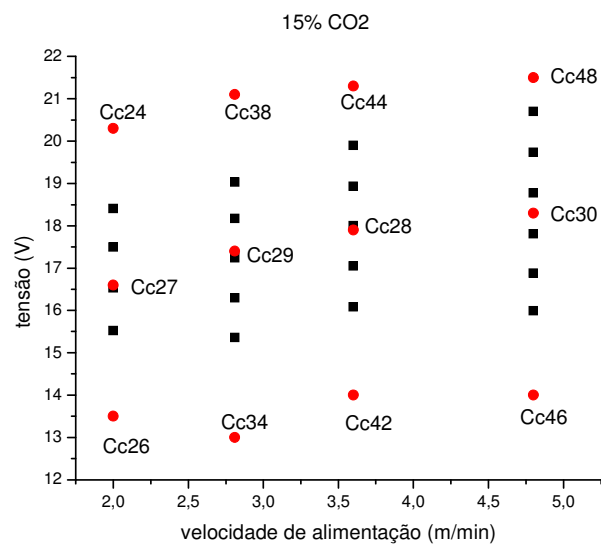


Figura II.2 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação ao mapa de transferência levantado (pontos quadrados).
Transferência por curto-circuito com proteção de Ar + 15%CO₂

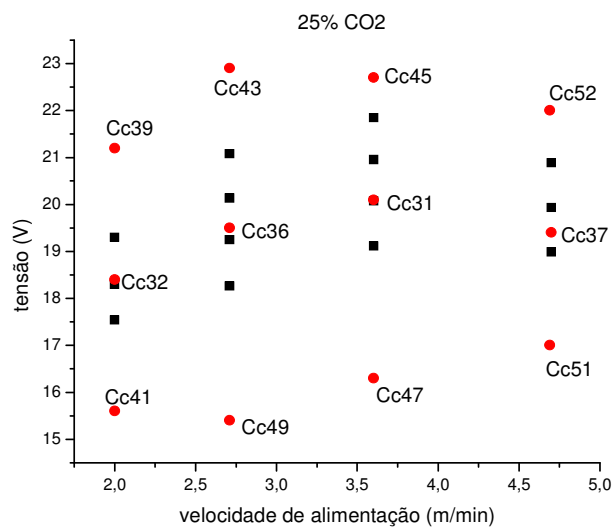


Figura II.3 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação ao mapa de transferência levantado (pontos quadrados).
Transferência por curto-circuito com proteção de Ar + 25%CO₂

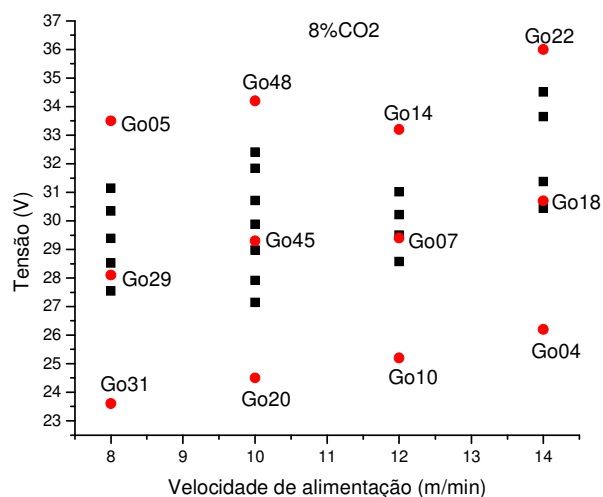


Figura II.4 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação ao mapa de transferência levantado (pontos quadrados).
Transferência no modo goticular com proteção de Ar + 8%CO₂

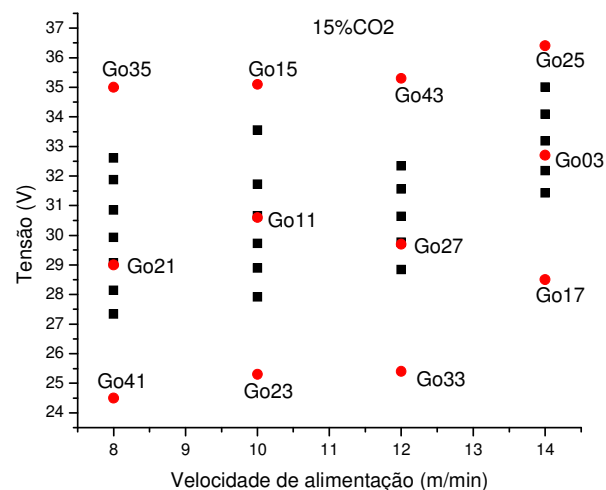


Figura II.5 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação ao mapa de transferência levantado (pontos quadrados).
Transferência no modo goticular com proteção de Ar + 15%CO₂

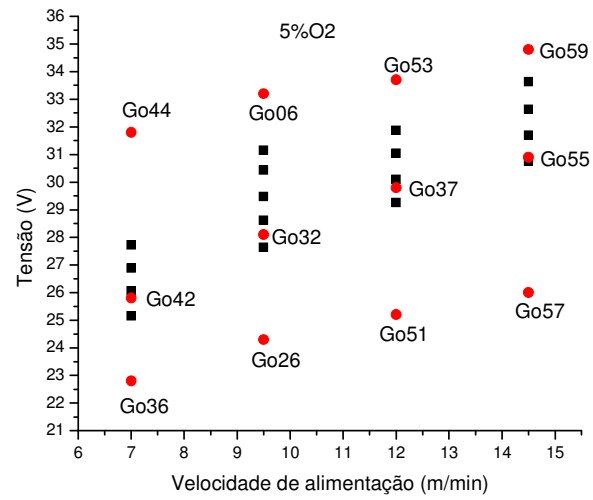


Figura II.6 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação ao mapa de transferência levantado (pontos quadrados). Transferência no modo goticular com proteção de Ar + 5%O₂

Tabela II.1 – Valores de regulação dos parâmetros e resposta dos sinais elétricos para soldagem em juntas com o processo operando em curto-circuito, para verificação da influência na geometria e acabamento do cordão, rendimento de deposição e ciclo térmico

Código do teste	Tensão de regulação (V)	Velocidade de alimentação (m/min)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Gás de proteção	Tensão média de soldagem (V)	Corrente média de soldagem (A)
Cc05	21,0	2,05	20	Ar+8%CO ₂	19,5	103
Cc03	18,0	2,05	20	Ar+8%CO ₂	16,8	106
Cc07	14,5	2,05	20	Ar+8%CO ₂	13,6	109
Cc11	22,0	2,76	27	Ar+8%CO ₂	20,4	139
Cc15	17,7	2,76	27	Ar+8%CO ₂	16,3	133
Cc02	14,0	2,76	27	Ar+8%CO ₂	13,1	144
Cc16	22,5	3,65	36	Ar+8%CO ₂	20,8	173
Cc18	18,5	3,65	36	Ar+8%CO ₂	17,1	176
Cc06	15,0	3,65	36	Ar+8%CO ₂	13,4	180
Cc25	23,5	4,69	47	Ar+8%CO ₂	21,6	203
Cc21	19,0	4,69	47	Ar+8%CO ₂	17,1	198
Cc12	14,5	4,69	47	Ar+8%CO ₂	12,0	196
Cc24	22,0	2,00	20	Ar+15%CO ₂	20,3	100
Cc27	18,0	2,00	20	Ar+15%CO ₂	16,6	104
Cc26	14,5	2,00	20	Ar+15%CO ₂	13,5	107
Cc38	23,0	2,81	28	Ar+15%CO ₂	Furou a chapa	
Cc29	19,0	2,81	28	Ar+15%CO ₂	17,4	145
Cc34	14,0	2,81	28	Ar+15%CO ₂	13,0	146
Cc44	24,0	3,60	36	Ar+15%CO ₂	Furou a chapa	
Cc28	19,5	3,60	36	Ar+15%CO ₂	17,9	179
Cc42	14,6	3,60	36	Ar+15%CO ₂	Furou a chapa	
Cc48	25,0	4,80	48	Ar+15%CO ₂	Furou a chapa	
Cc30	20,0	4,80	48	Ar+15%CO ₂	18,3	209
Cc46	15,0	4,80	48	Ar+15%CO ₂	Furou a chapa	
Cc39	23,0	2,00	20	Ar+25%CO ₂	21,2	103
Cc32	20,0	2,00	20	Ar+25%CO ₂	18,4	114
Cc41	17,0	2,00	20	Ar+25%CO ₂	15,6	113
Cc43	25,0	2,71	27	Ar+25%CO ₂	22,9	147
Cc36	21,3	2,71	27	Ar+25%CO ₂	19,5	149
Cc49	17,0	2,71	27	Ar+25%CO ₂	15,4	148
Cc45	26,0	3,60	36	Ar+25%CO ₂	Furou a chapa	
Cc31	22,0	3,60	36	Ar+25%CO ₂	20,1	181
Cc47	18,0	3,60	36	Ar+25%CO ₂	16,3	181
Cc52	24,0	4,69	47	Ar+25%CO ₂	Furou a chapa	
Cc37	21,3	4,69	47	Ar+25%CO ₂	19,4	213
Cc51	18,0	4,69	47	Ar+25%CO ₂	Furou a chapa	

Tabela II.2 – Valores de regulagem dos parâmetros e resposta dos sinais elétricos para soldagem em juntas com o processo operando no modo goticular, para verificação da influência na geometria e acabamento do cordão, rendimento de deposição

Código do teste	Tensão de regulagem (V)	Velocidade de alimentação (m/min)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Gás de proteção	Tensão média de soldagem (V)	Corrente média de soldagem (A)
Go05	37,0	8,00	45	Ar+8%CO ₂	33,5	337
Go29	31,0	8,00	45	Ar+8%CO ₂	28,1	284
Go31	26,0	8,00	45	Ar+8%CO ₂	23,6	269
Go48	38,0	10,00	56	Ar+8%CO ₂	34,2	407
Go45	32,5	10,00	56	Ar+8%CO ₂	29,3	358
Go20	27,0	10,00	56	Ar+8%CO ₂	24,5	303
Go14	37,0	12,00	67	Ar+8%CO ₂	33,2	421
Go07	33,0	12,00	67	Ar+8%CO ₂	29,4	390
Go10	28,0	12,00	67	Ar+8%CO ₂	25,2	353
Go22	40,0	14,00	78	Ar+8%CO ₂	36,0	493
Go18	34,0	14,00	78	Ar+8%CO ₂	30,7	434
Go04	29,0	14,00	78	Ar+8%CO ₂	26,2	418
Go35	39,0	8,00	45	Ar+15%CO ₂	35,0	329
Go21	32,0	8,00	45	Ar+15%CO ₂	29,0	301
Go41	27,0	8,00	45	Ar+15%CO ₂	24,5	271
Go15	39,0	10,00	56	Ar+15%CO ₂	35,1	394
Go11	34,0	10,00	56	Ar+15%CO ₂	30,6	358
Go23	28,0	10,00	56	Ar+15%CO ₂	25,3	312
Go43	39,0	12,00	67	Ar+15%CO ₂	35,3	422
Go27	32,9	12,00	67	Ar+15%CO ₂	29,7	398
Go33	28,0	12,00	67	Ar+15%CO ₂	25,4	344
Go25	41,0	14,00	78	Ar+15%CO ₂	36,4	469
Go03	36,5	14,00	78	Ar+15%CO ₂	32,7	437
Go17	32,0	14,00	78	Ar+15%CO ₂	28,5	415
Go44	35,0	7,00	39	Ar+5%O ₂	31,8	315
Go42	28,5	7,00	39	Ar+5%O ₂	25,8	278
Go36	25,0	7,00	39	Ar+5%O ₂	22,8	256
Go06	37,0	9,50	53	Ar+5%O ₂	33,2	405
Go32	31,5	9,50	53	Ar+5%O ₂	28,1	364
Go26	27,0	9,50	53	Ar+5%O ₂	24,3	319
Go53	38,0	12,00	67	Ar+5%O ₂	33,7	464
Go37	33,5	12,00	67	Ar+5%O ₂	29,8	411
Go51	28,0	12,00	67	Ar+5%O ₂	25,2	375
Go59	39,5	14,50	81	Ar+5%O ₂	34,8	515
Go55	34,5	14,50	81	Ar+5%O ₂	30,9	460
Go57	29,0	14,50	81	Ar+5%O ₂	26,0	423

Tabela II.3 – Valores de regulagem dos parâmetros e resposta dos sinais elétricos para soldagem em juntas com o processo operando por curto-circuito, para verificação da influência na intensidade de radiação emitida

Código do teste	Tensão de regulagem (V)	Velocidade de alimentação (m/mim)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Gás de proteção	Tensão média de soldagem (V)	Corrente média de soldagem (A)
Cc03	18,0	2,05	20	Ar+8%CO ₂	15,3	111
Cc11	22,0	2,76	27	Ar+8%CO ₂	18,7	141
Cc15	17,7	2,76	27	Ar+8%CO ₂	14,8	144
Cc02	14,0	2,76	27	Ar+8%CO ₂	11,8	149
Cc21	19,0	4,69	47	Ar+8%CO ₂	15,8	211
Cc27	18,0	2,00	20	Ar+15%CO ₂	15,3	109
Cc38	23,0	2,81	28	Ar+15%CO ₂	19,5	152
Cc29	19,0	2,81	28	Ar+15%CO ₂	15,9	151
Cc34	14,0	2,81	28	Ar+15%CO ₂	11,8	149
Cc30	20,0	4,80	48	Ar+15%CO ₂	16,6	218
Cc32	20,0	2,00	20	Ar+25%CO ₂	16,9	115
Cc43	25,0	2,71	27	Ar+25%CO ₂	21,2	137
Cc36	21,3	2,71	27	Ar+25%CO ₂	18,0	145
Cc49	17,0	2,71	27	Ar+25%CO ₂	14,2	151
Cc37	21,3	4,69	47	Ar+25%CO ₂	17,7	210

Tabela II.4 – Valores de regulagem dos parâmetros e resposta dos sinais elétricos para soldagem em juntas com o processo operando no modo goticular, para verificação da influência na intensidade de radiação emitida

Código do teste	Tensão de regulagem (V)	Velocidade de alimentação (m/mim)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Gás de proteção	Tensão média de soldagem (V)	Corrente média de soldagem (A)
Go29	31,0	8,00	45	Ar+8%CO ₂	26,0	285
Go48	38,0	10,00	56	Ar+8%CO ₂	31,6	376
Go45	32,5	10,00	56	Ar+8%CO ₂	27,1	340
Go20	27,0	10,00	56	Ar+8%CO ₂	22,3	305
Go18	34,0	14,00	78	Ar+8%CO ₂	28,2	420
Go21	32,0	8,00	45	Ar+15%CO ₂	26,8	291
Go15	39,0	10,00	56	Ar+15%CO ₂	32,5	369
Go11	34,0	10,00	56	Ar+15%CO ₂	28,3	343
Go23	28,0	10,00	56	Ar+15%CO ₂	23,2	307
Go03	36,5	14,00	78	Ar+15%CO ₂	30,7	426
Go42	28,5	7,00	39	Ar+5%O ₂	23,8	266
Go06	37,0	9,50	53	Ar+5%O ₂	30,8	372
Go32	31,5	9,50	53	Ar+5%O ₂	26,0	338
Go26	27,0	9,50	53	Ar+5%O ₂	22,4	301
Go55	34,5	14,50	81	Ar+5%O ₂	28,5	430

APÊNDICE III

ESPECTROS DE EMISSÃO E GRÁFICOS DE INTENSIDADE DE ENERGIA IRRADIADA EM FUNÇÃO DE FAIXAS DE COMPRIMENTO DE ONDA

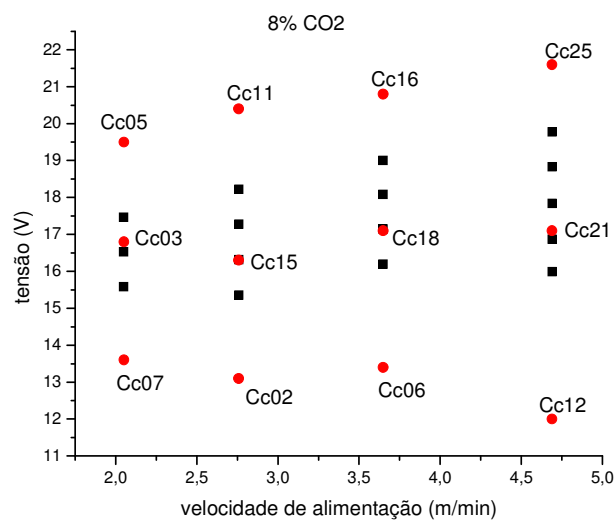


Figura II.1 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação à região de estabilidade operacional (pontos quadrados) - transferência por curto-circuito com proteção de Ar + 8%CO₂

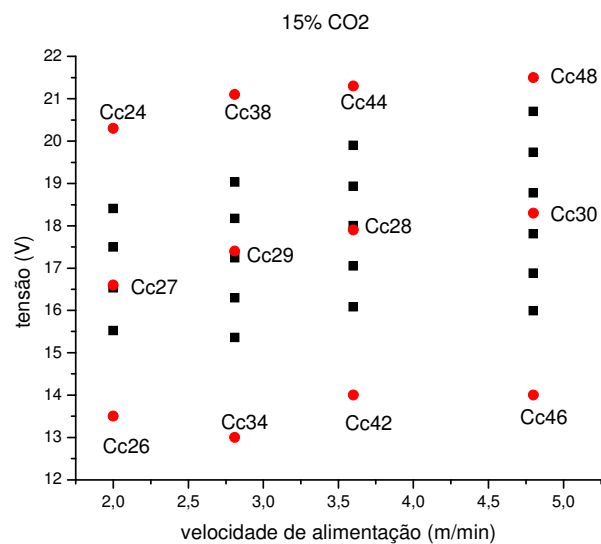


Figura II.2 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação à região de estabilidade operacional (pontos quadrados) - transferência por curto-circuito com proteção de Ar + 15%CO₂

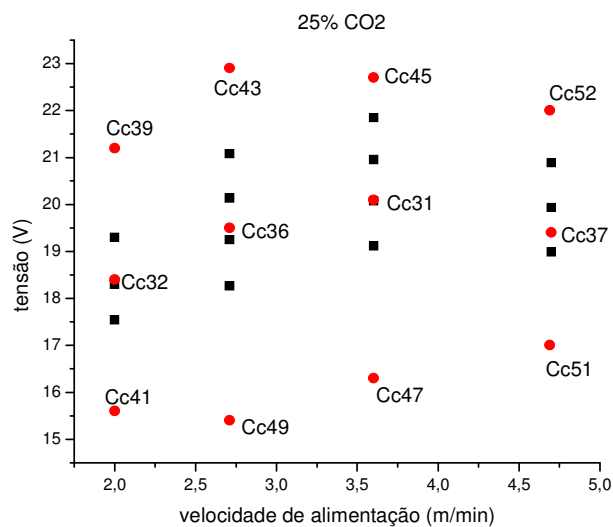


Figura II.3 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação à região de estabilidade operacional (pontos quadrados) - transferência por curto-circuito com proteção de Ar + 25%CO₂

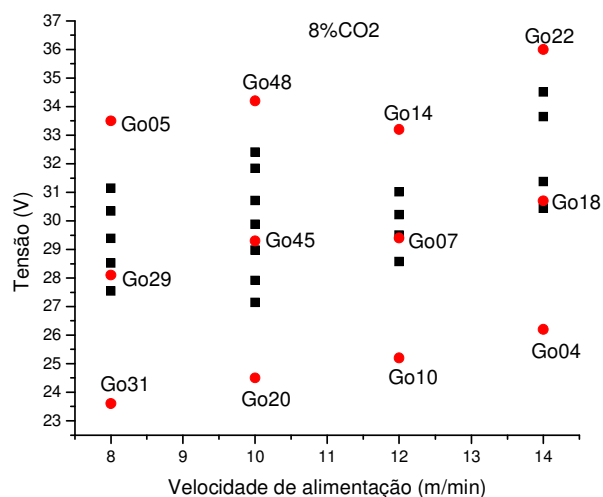


Figura II.4 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação à região de estabilidade operacional (pontos quadrados) - transferência no modo goticular com proteção de Ar + 8%CO₂

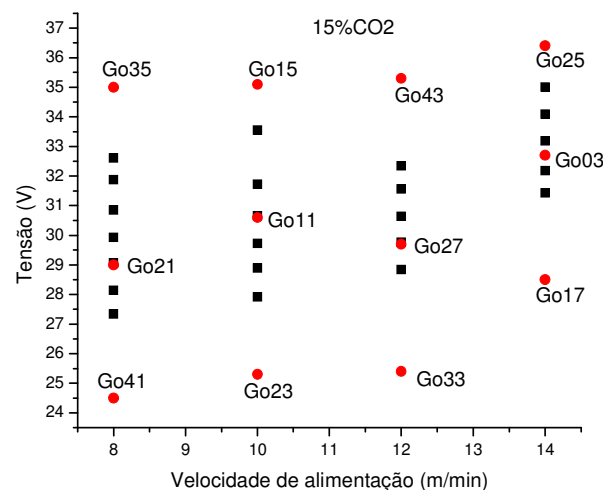


Figura II.5 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação à região de estabilidade operacional (pontos quadrados) - transferência no modo goticular com proteção de Ar + 15%CO₂

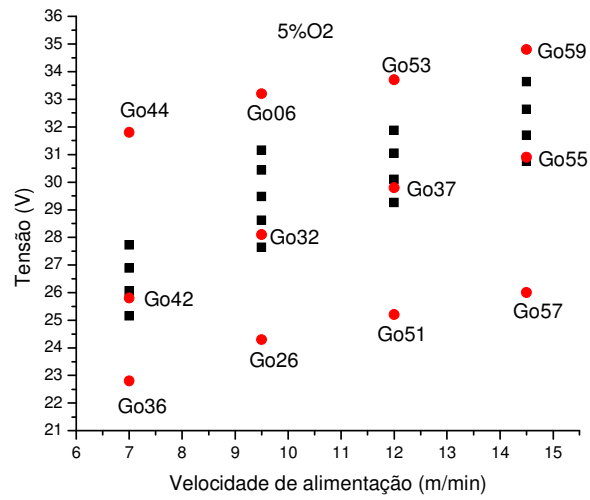
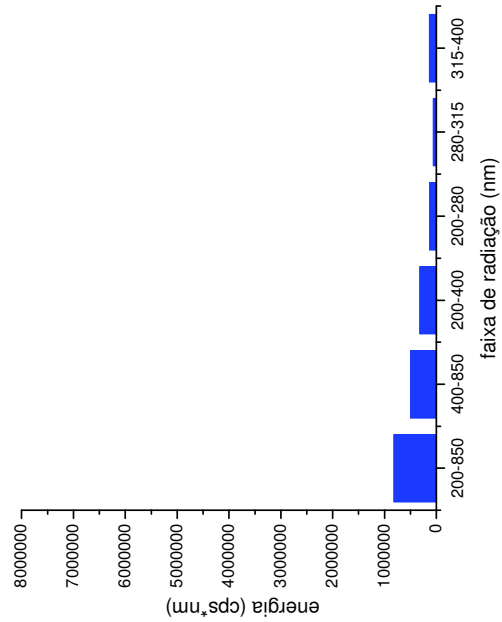
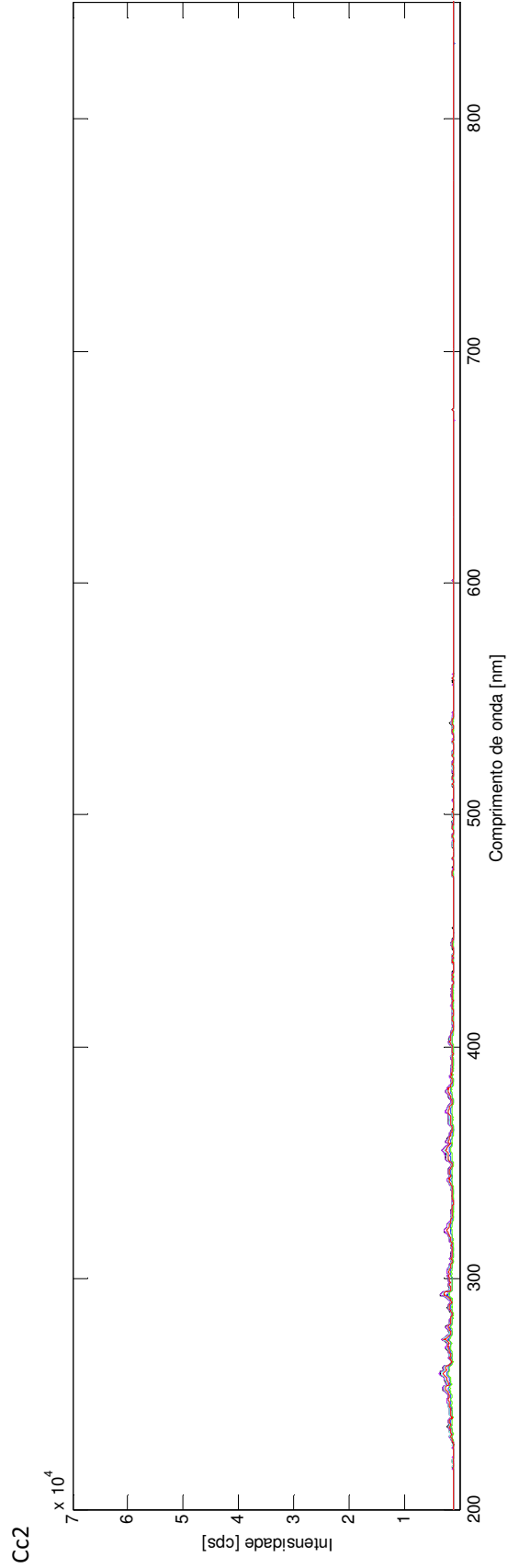


Figura II.6 – Indicação dos códigos dos testes realizados em juntas (pontos circulares) em função de sua posição em relação à região de estabilidade operacional (pontos quadrados) - transferência no modo goticular com proteção de Ar + 5%O₂

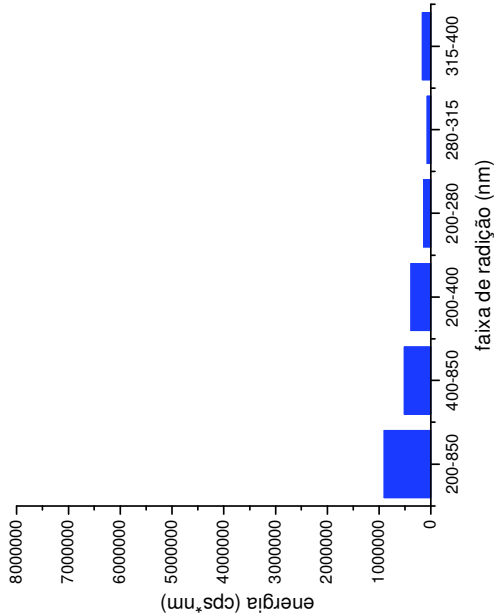
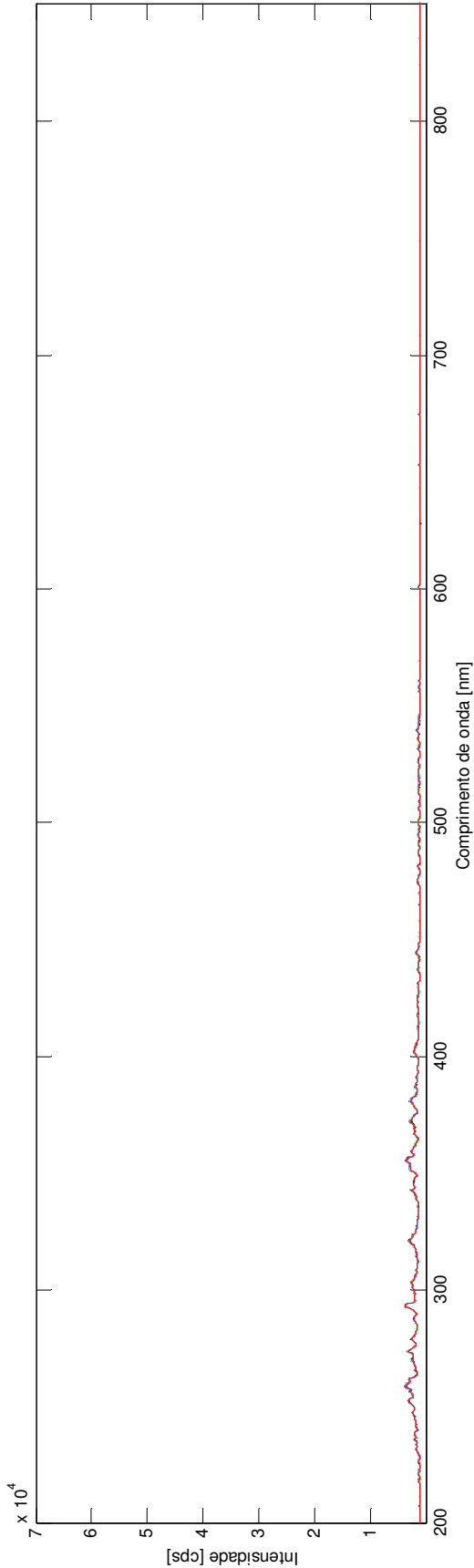


$$U_m = 11,8 \text{ V}$$

$$I_m = 149 \text{ A}$$

U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

Cc3

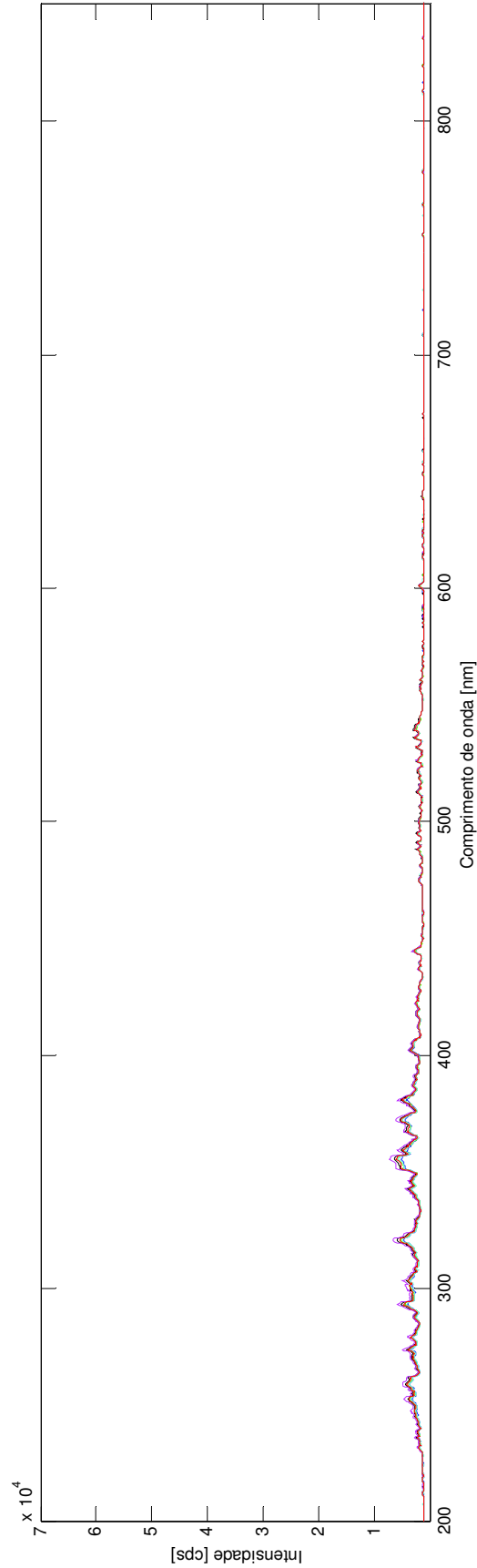


$$U_m = 15,3 \text{ V}$$

$$I_m = 111 \text{ A}$$

U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

Cc11

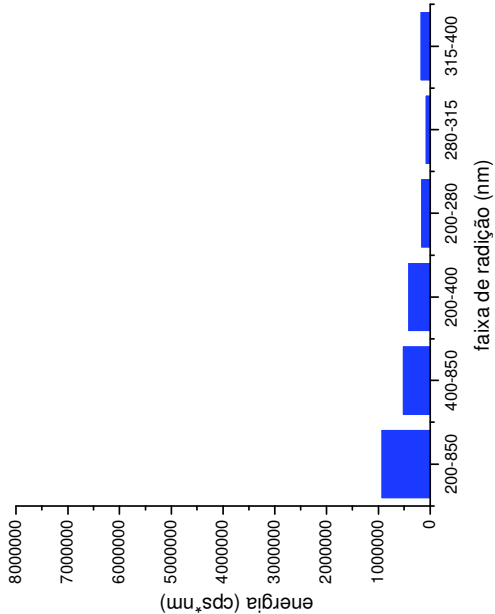
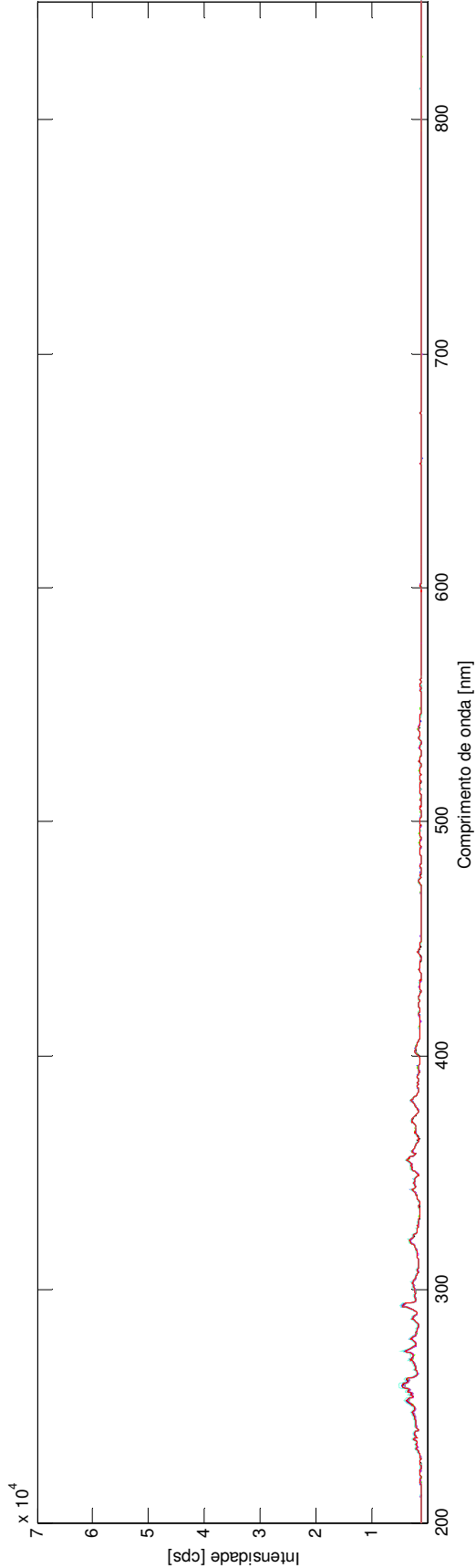


$U_m = 18,7 \text{ V}$

$I_m = 141 \text{ A}$

$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$

Cc15

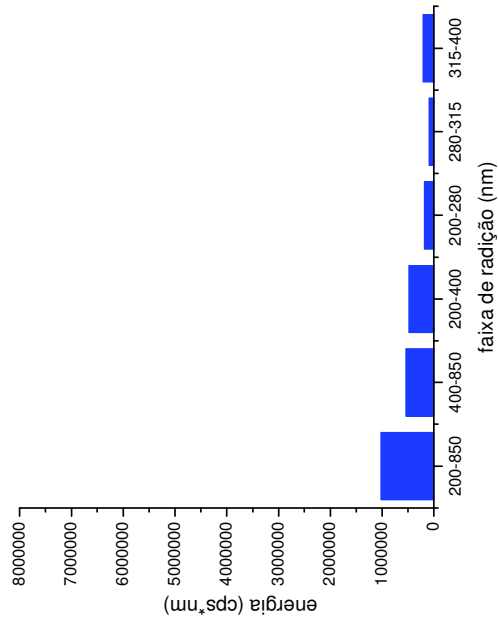
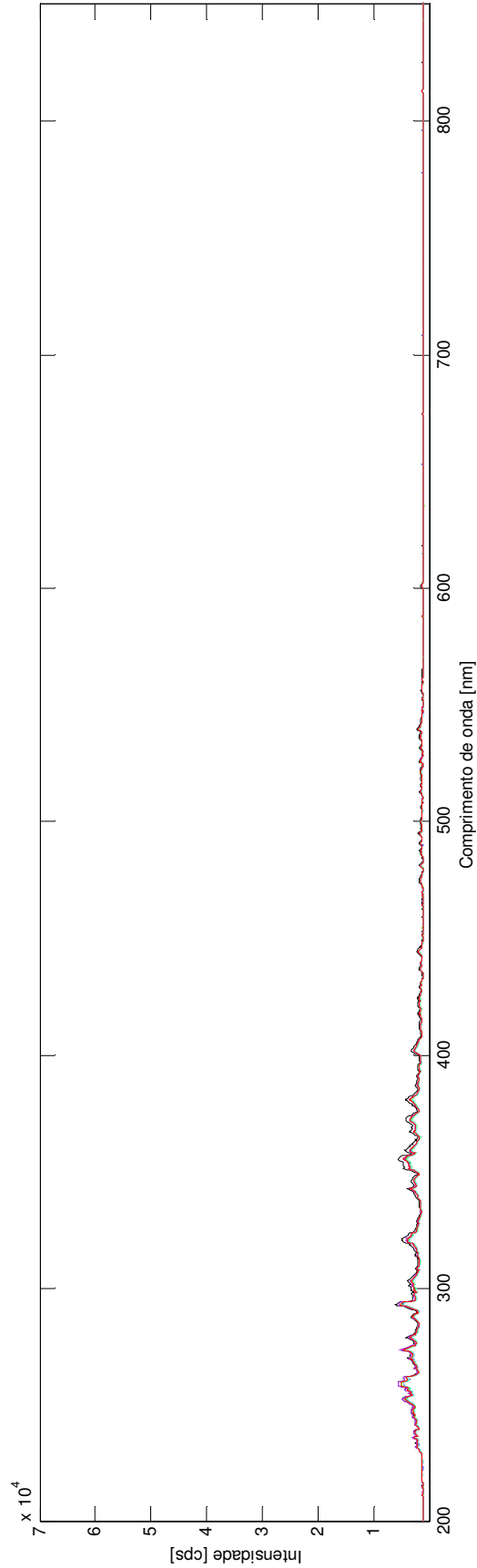


$$U_m = 14,8 \text{ V}$$

$$I_m = 144 \text{ A}$$

$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$

Cc21

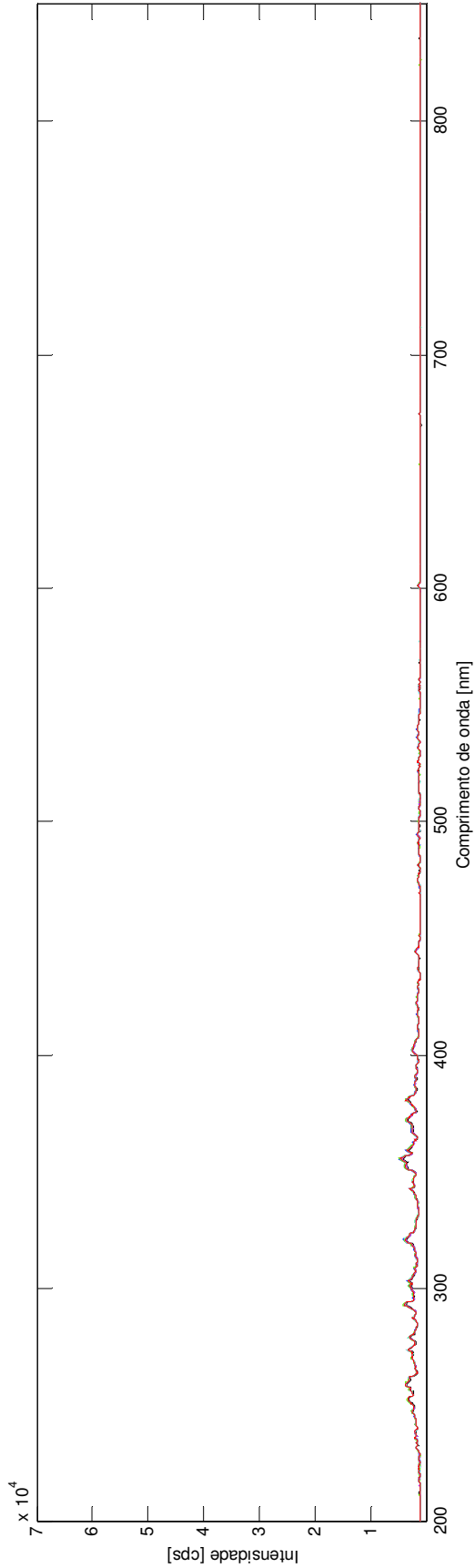


$$U_m = 15,8 \text{ V}$$

$$I_m = 211 \text{ A}$$

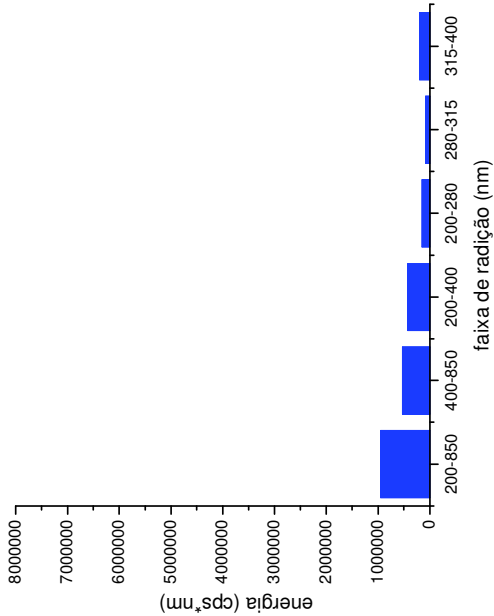
U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

Cc27

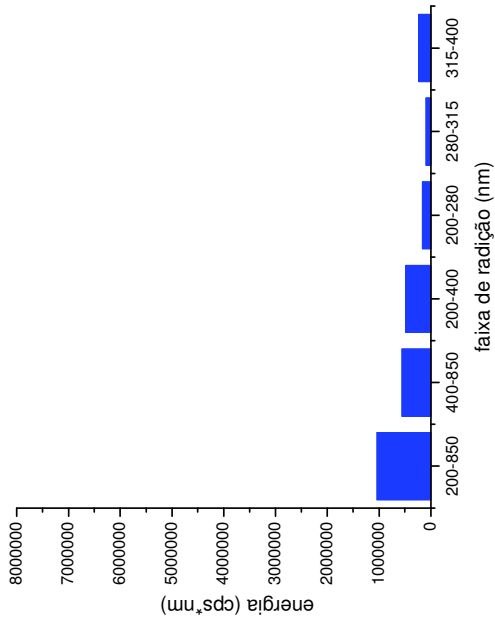
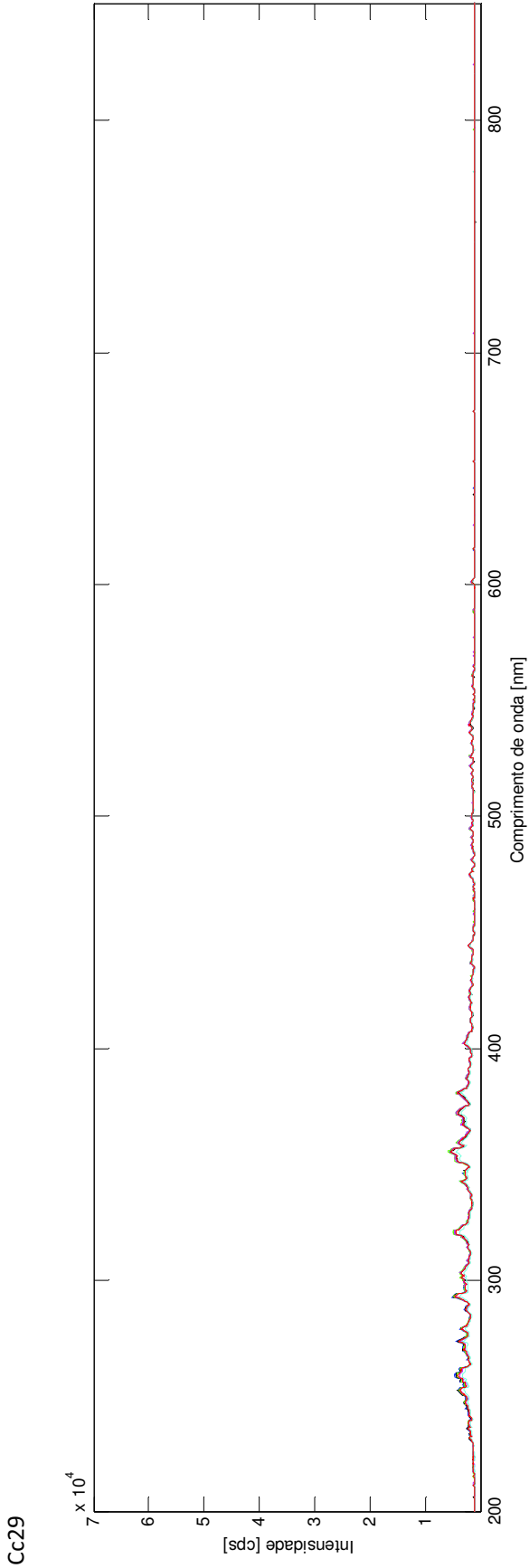


$$U_m = 15,3 \text{ V}$$

$$I_m = 109 \text{ A}$$



U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

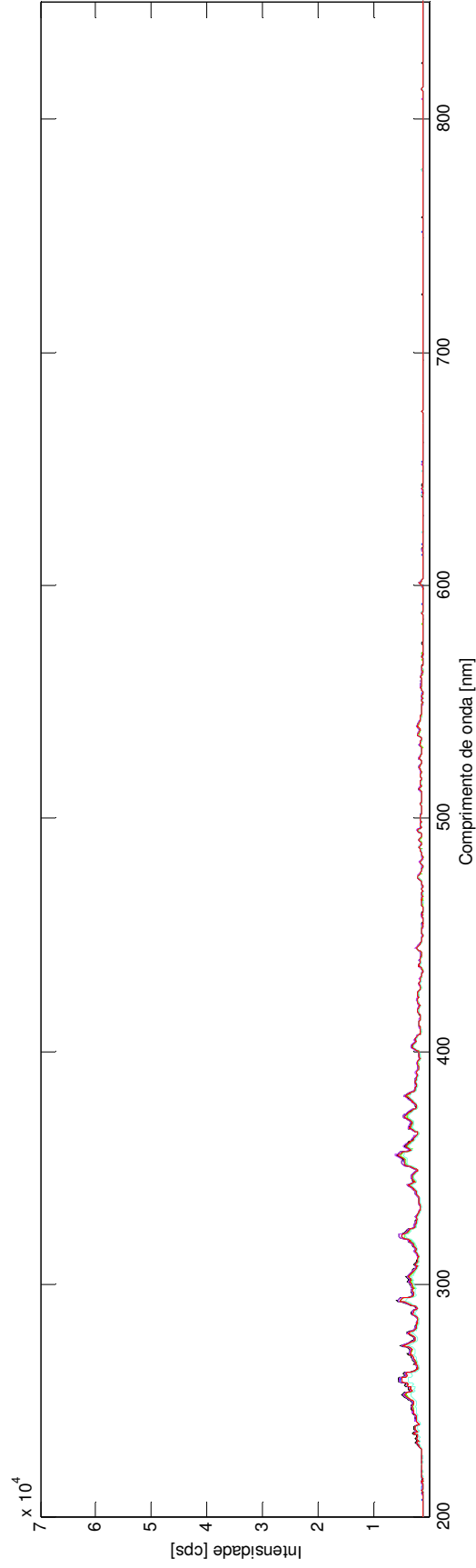


$U_m = 15,9 \text{ V}$

$I_m = 151 \text{ A}$

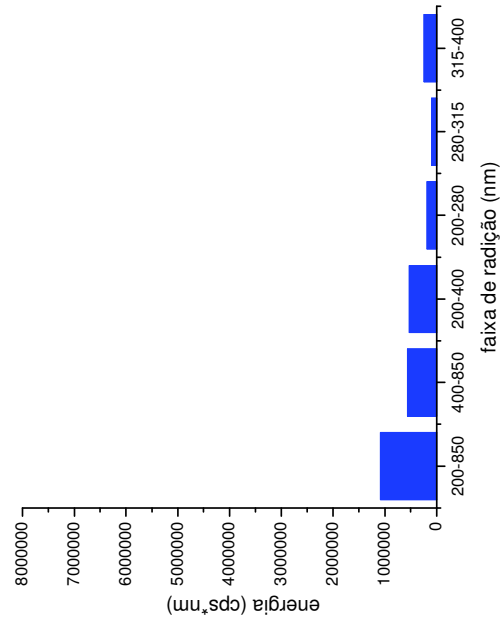
$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$

Cc30



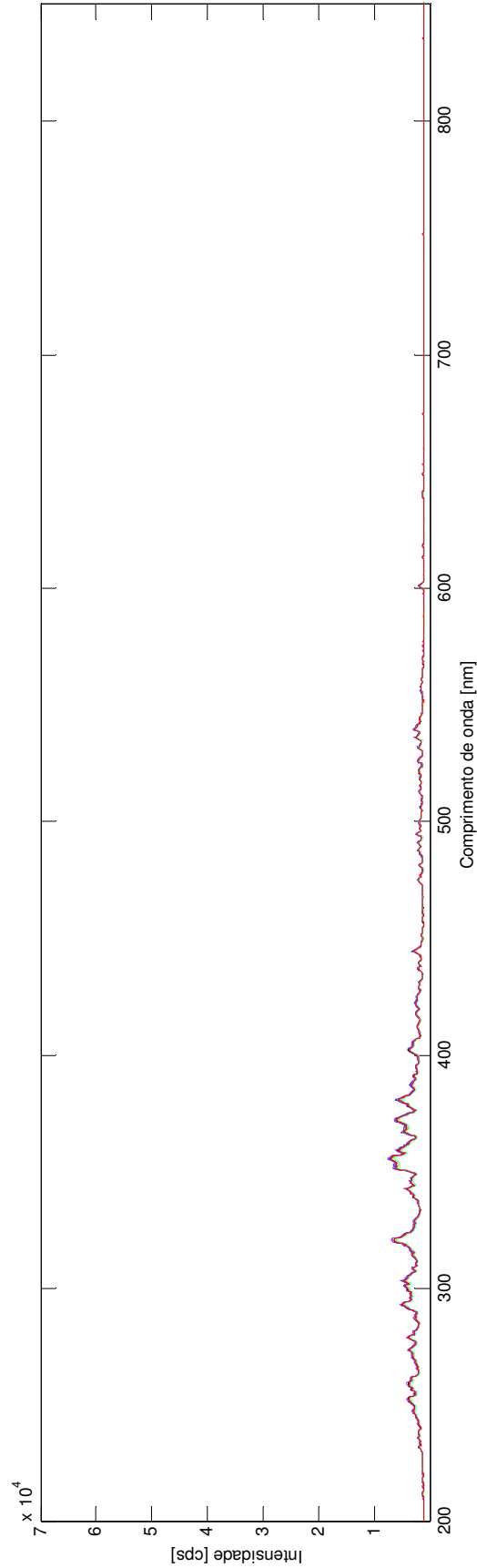
$$U_m = 16,6 \text{ V}$$

$$I_m = 218 \text{ A}$$



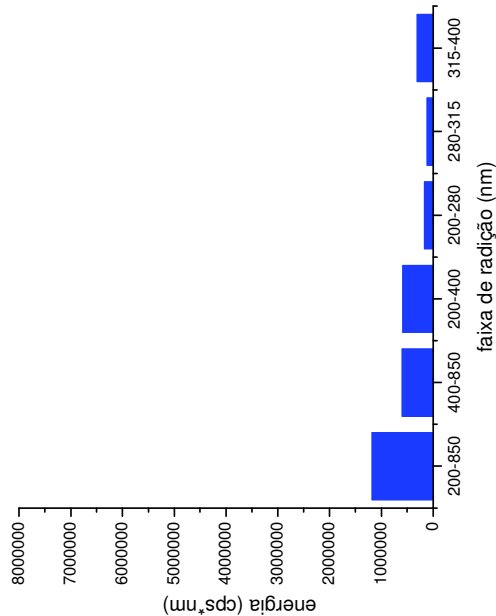
U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

Cc32



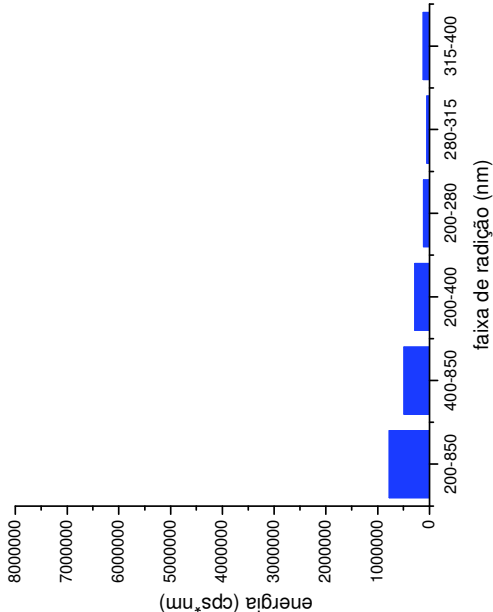
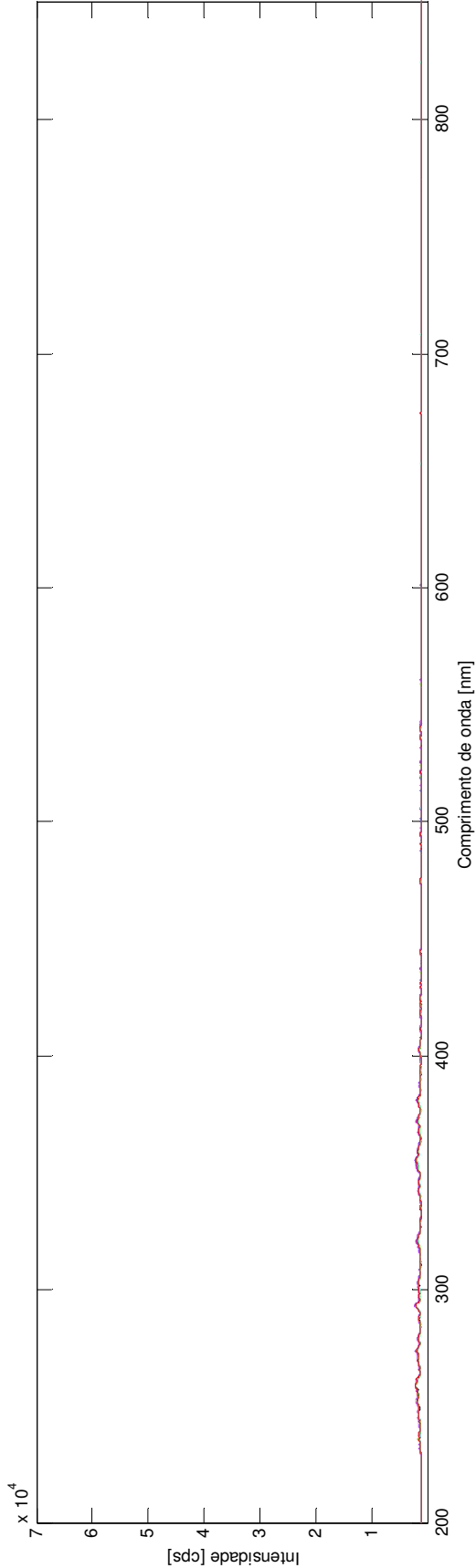
$$U_m = 16,9 \text{ V}$$

$$I_m = 115 \text{ A}$$



$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$

Cc34

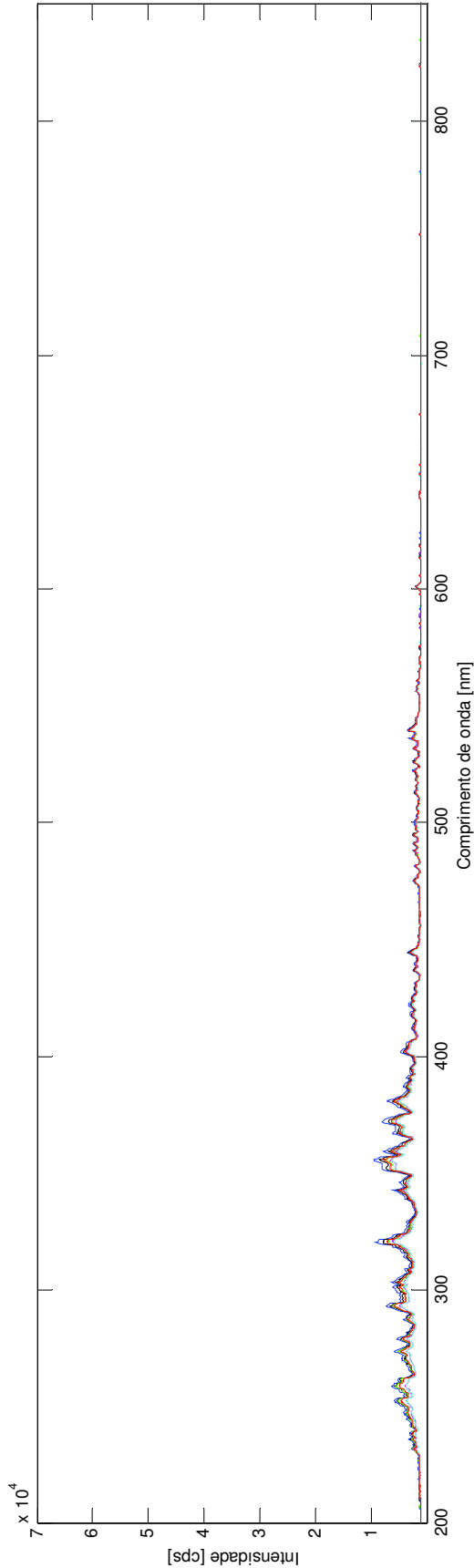


$$U_m = 11,8 \text{ V}$$

$$I_m = 149 \text{ A}$$

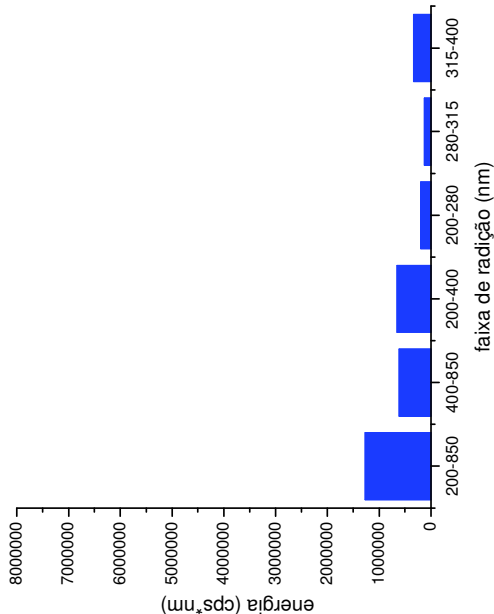
U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

Cc36



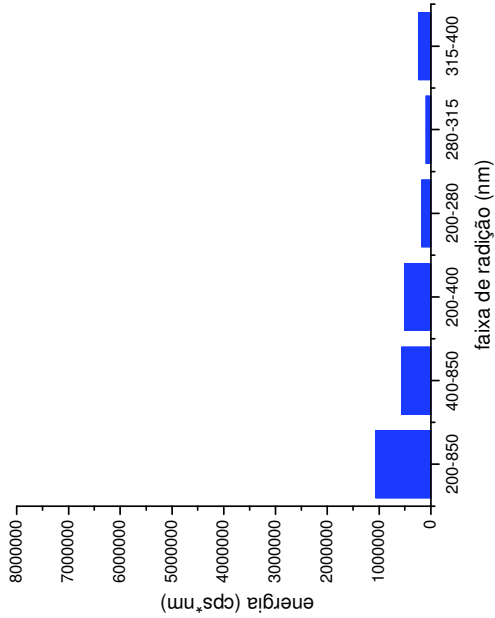
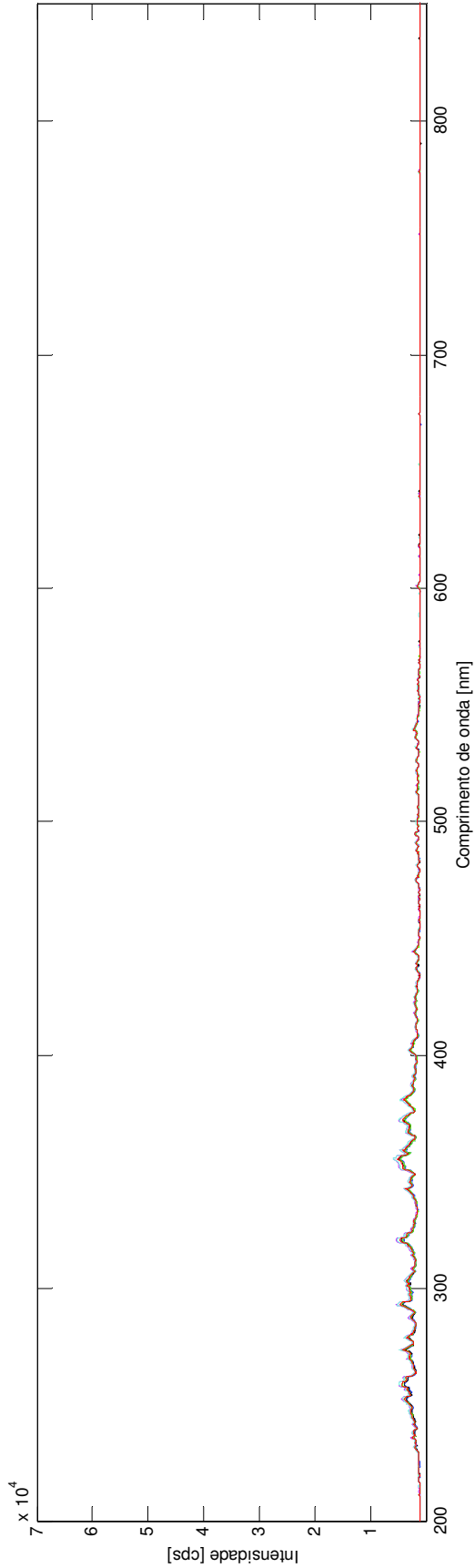
$U_m = 18,0 \text{ V}$

$I_m = 145 \text{ A}$



$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$

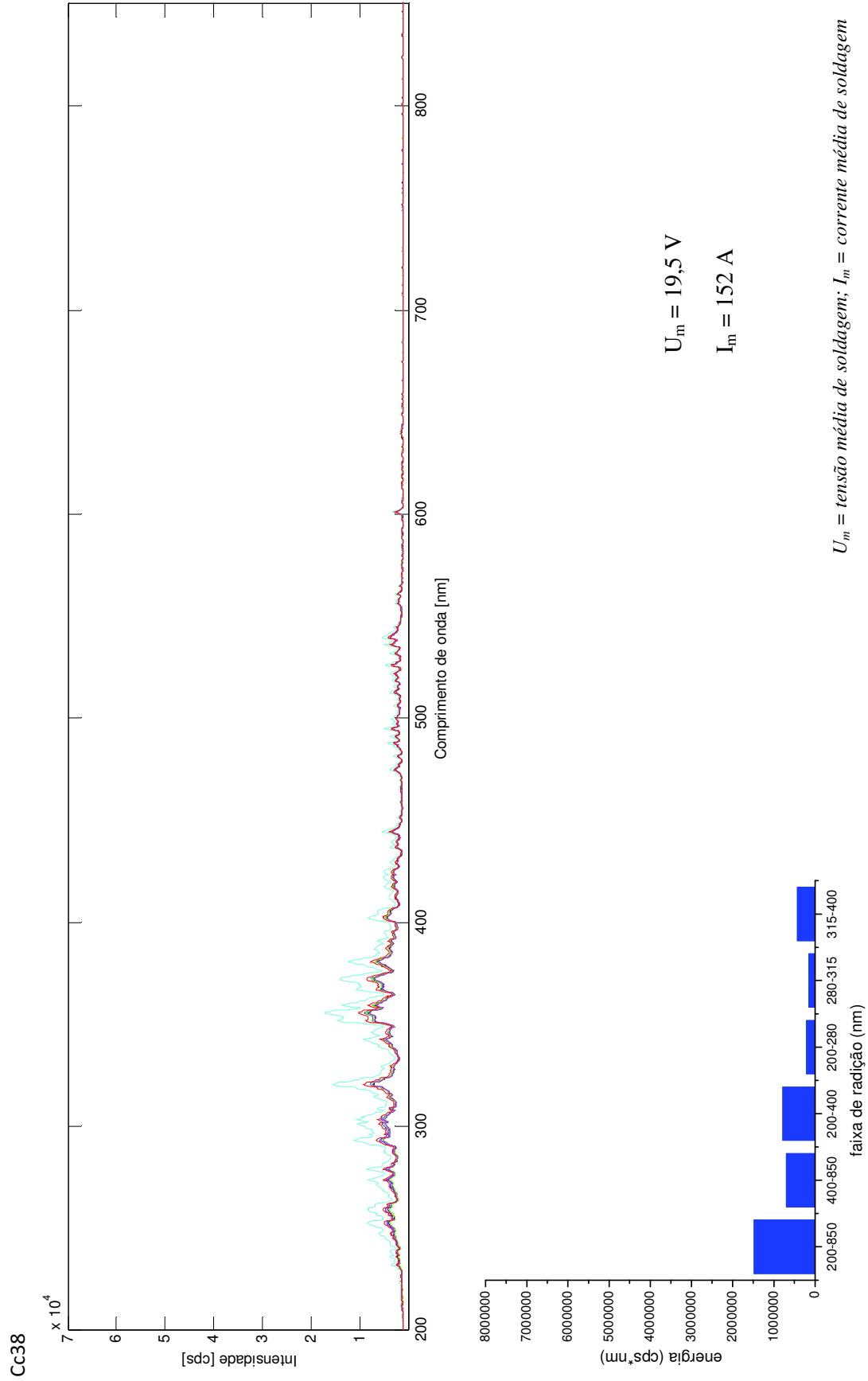
Cc37



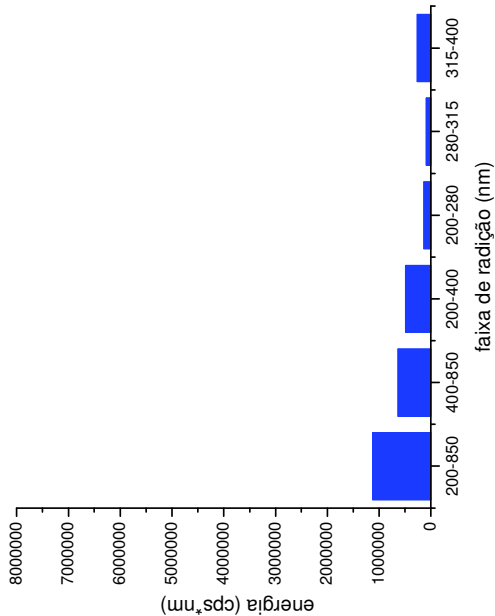
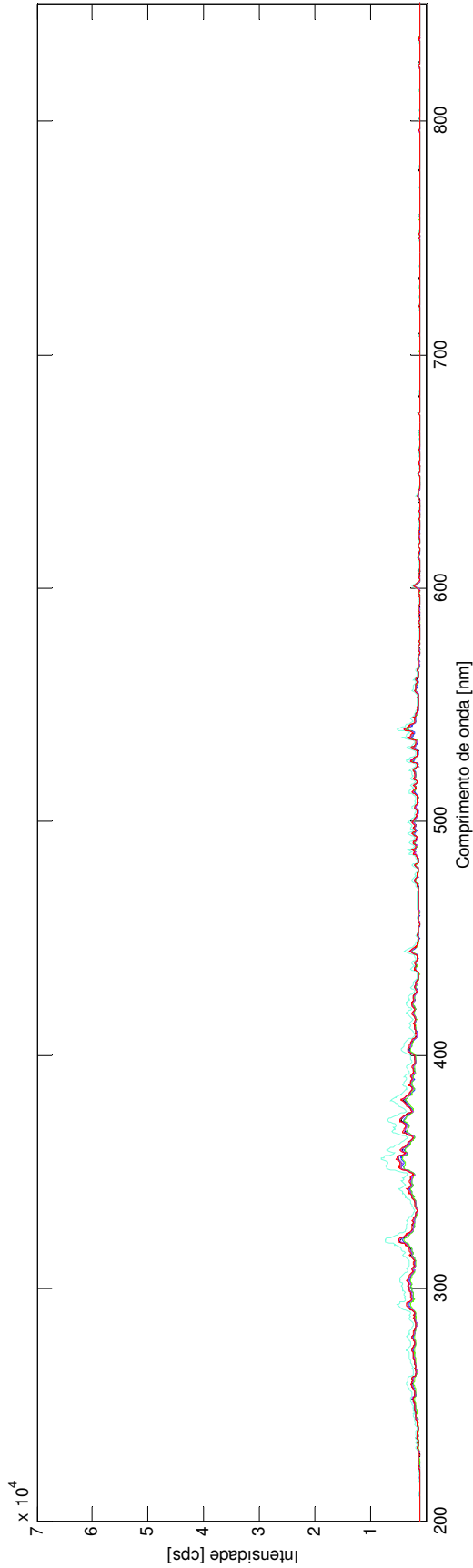
$U_m = 17,7 \text{ V}$

$I_m = 210 \text{ A}$

$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$



Cc43

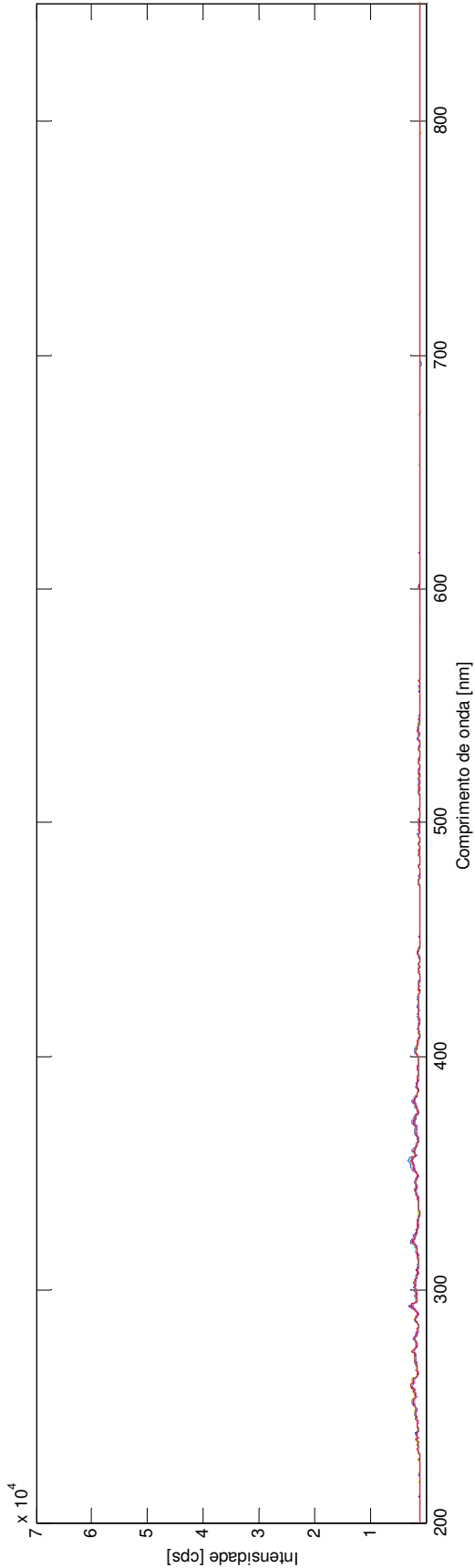


$$U_m = 21,2 \text{ V}$$

$$I_m = 137 \text{ A}$$

U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

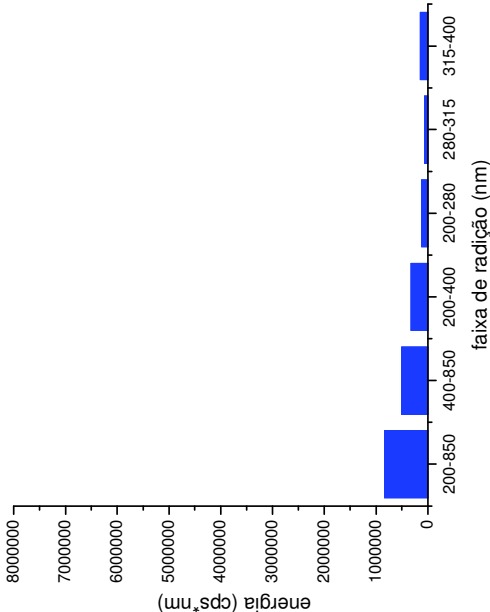
Cc49



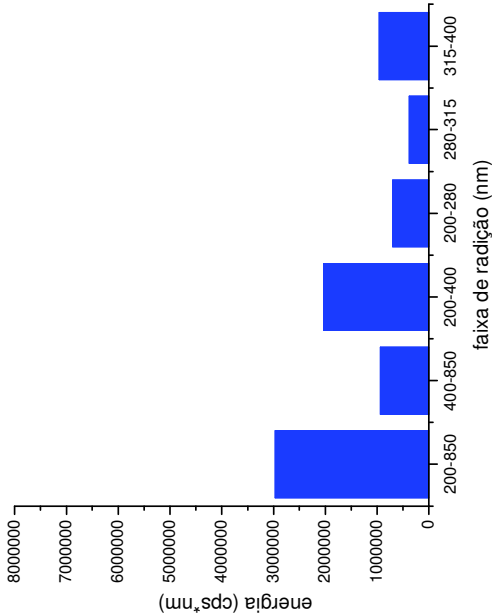
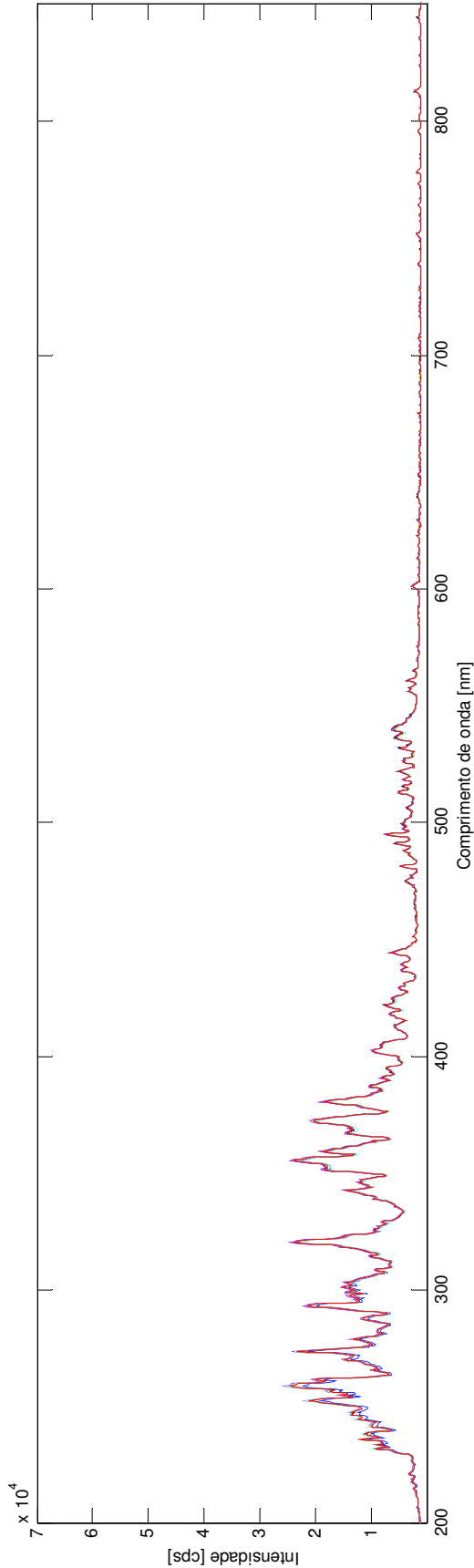
$$U_m = 14,2 \text{ V}$$

$$I_m = 151 \text{ A}$$

U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem



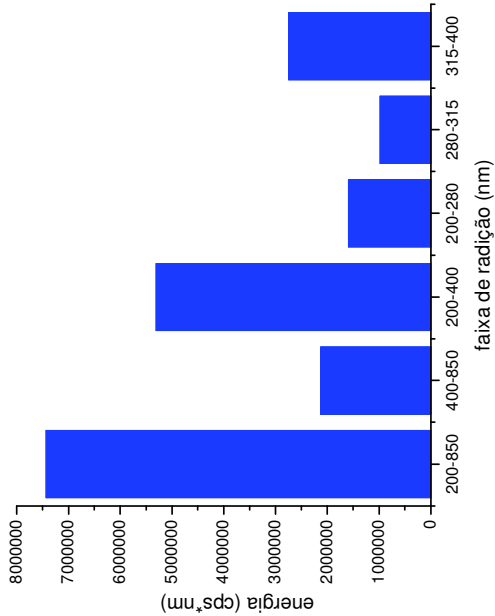
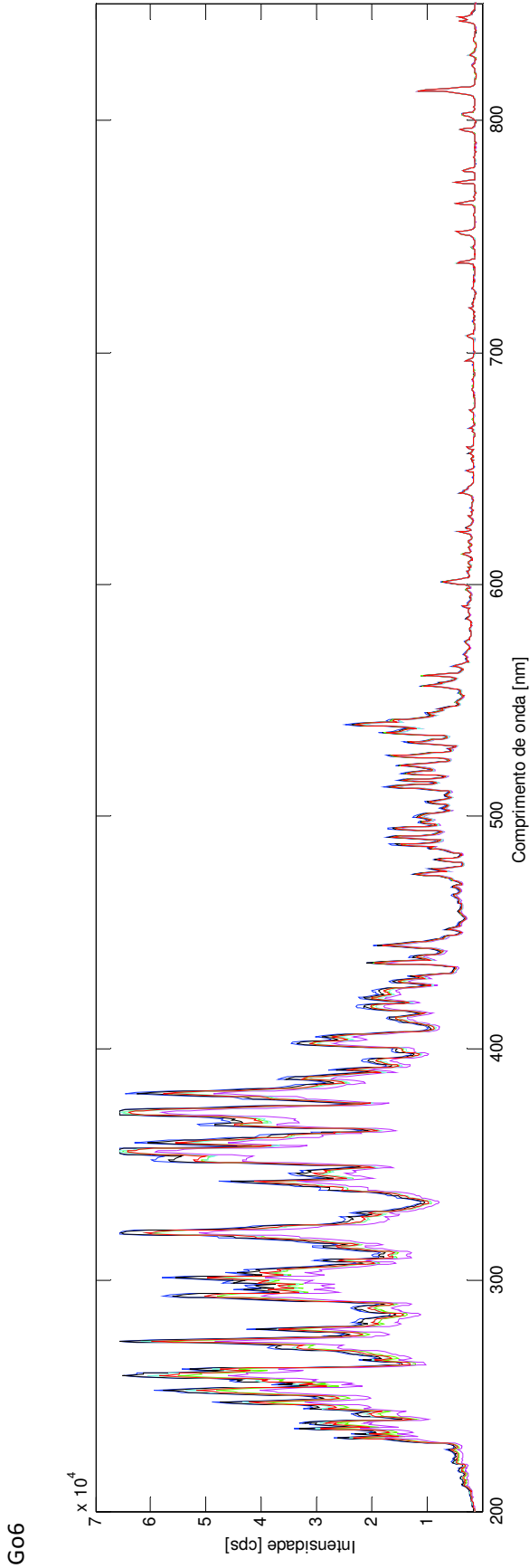
Go3



$$U_m = 30,7 \text{ V}$$

$$I_m = 426 \text{ A}$$

U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

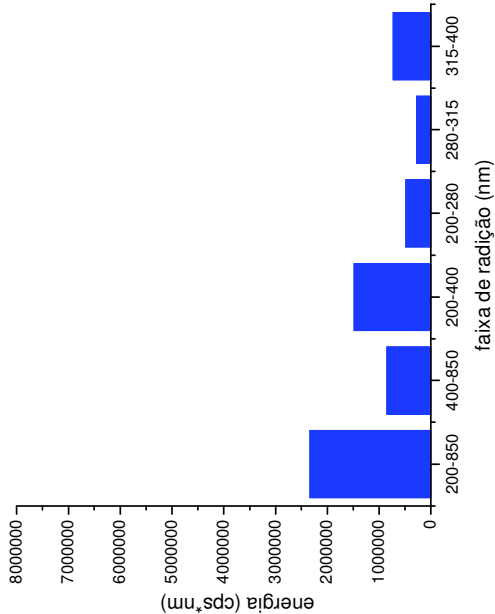
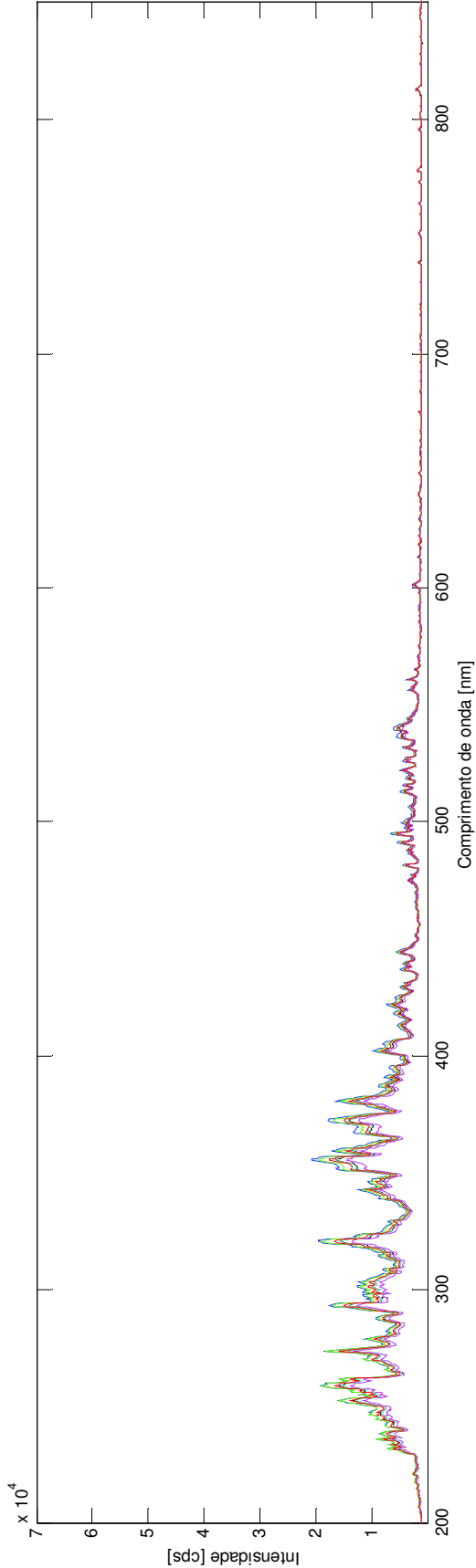


$$U_m = 30,8 \text{ V}$$

$$I_m = 372 \text{ A}$$

U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

Go11

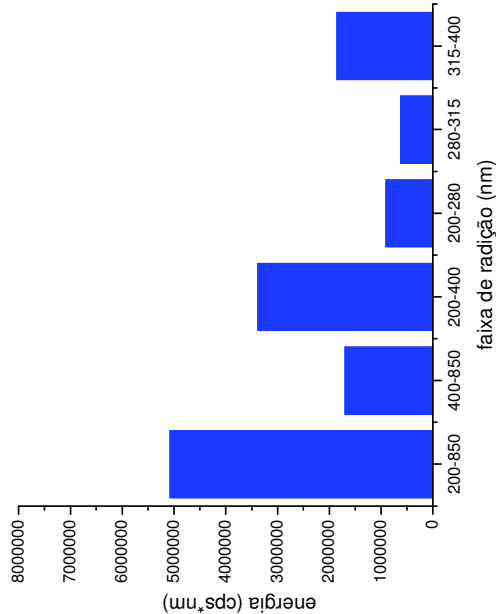
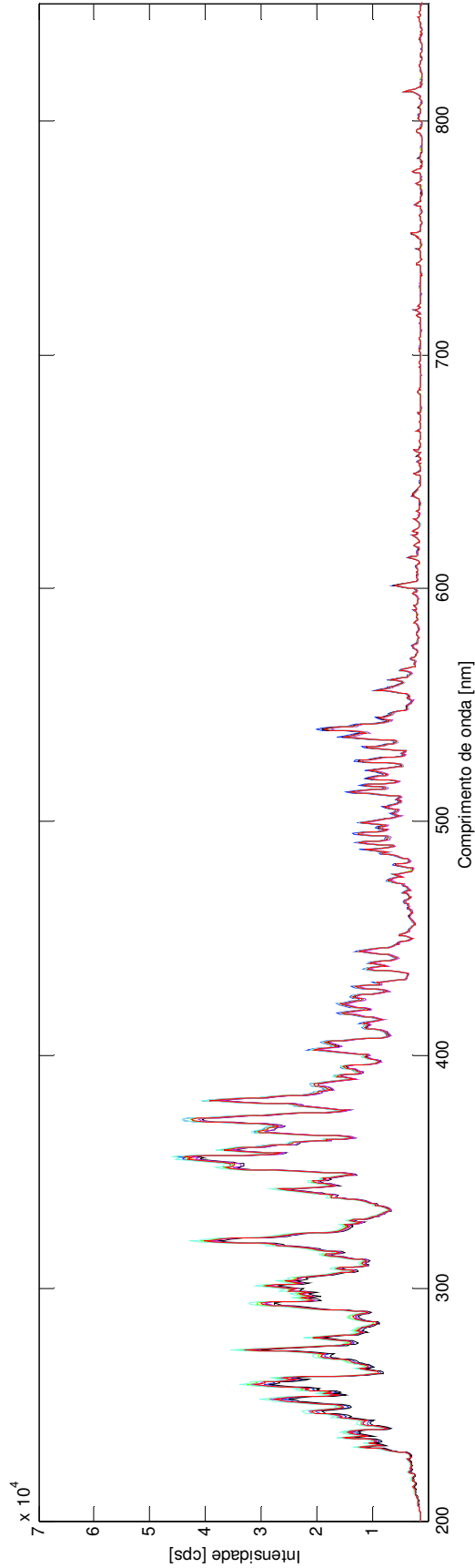


$U_m = 28,3 \text{ V}$

$I_m = 343 \text{ A}$

$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$

Go15

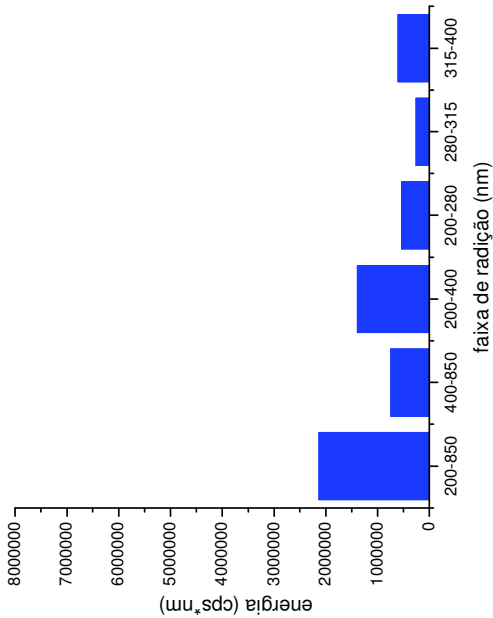
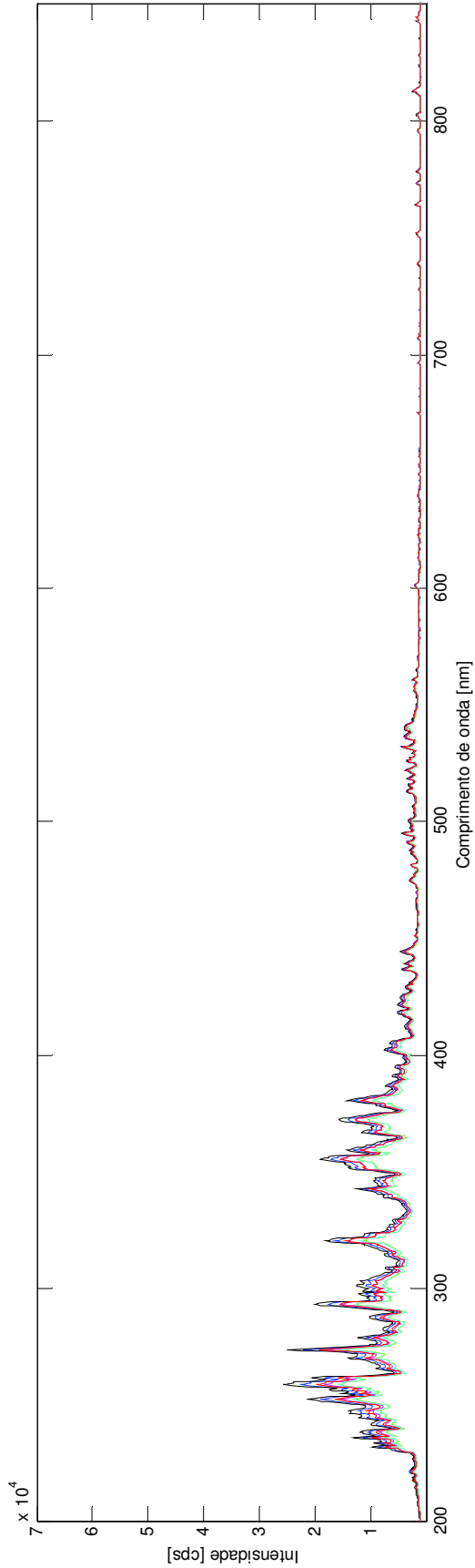


$$U_m = 32,5 \text{ V}$$

$$I_m = 369 \text{ A}$$

U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

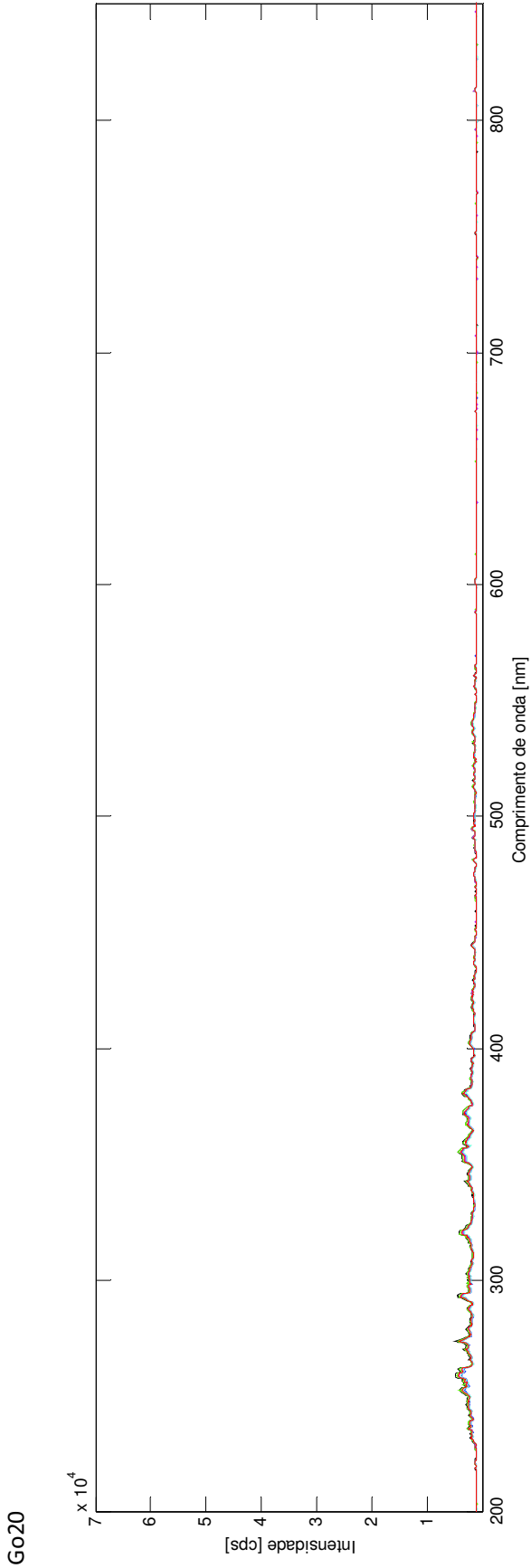
Go18



$U_m = 28,2 \text{ V}$

$I_m = 420 \text{ A}$

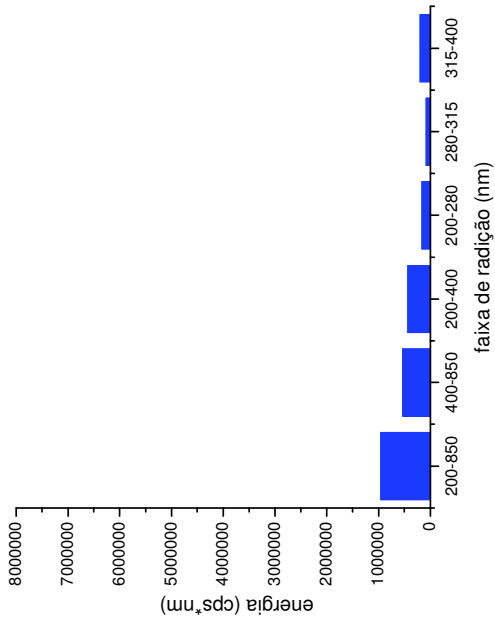
$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$



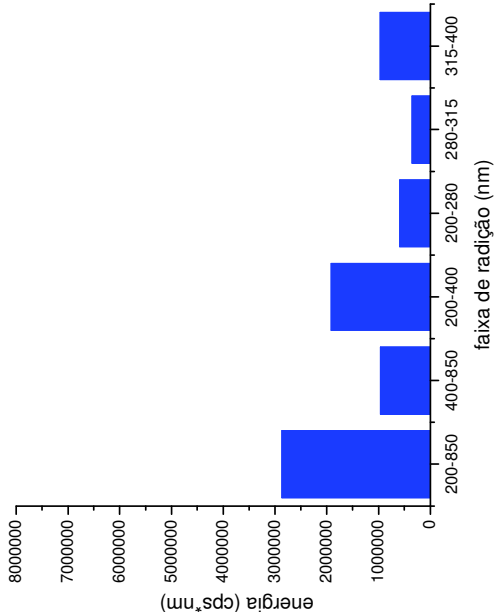
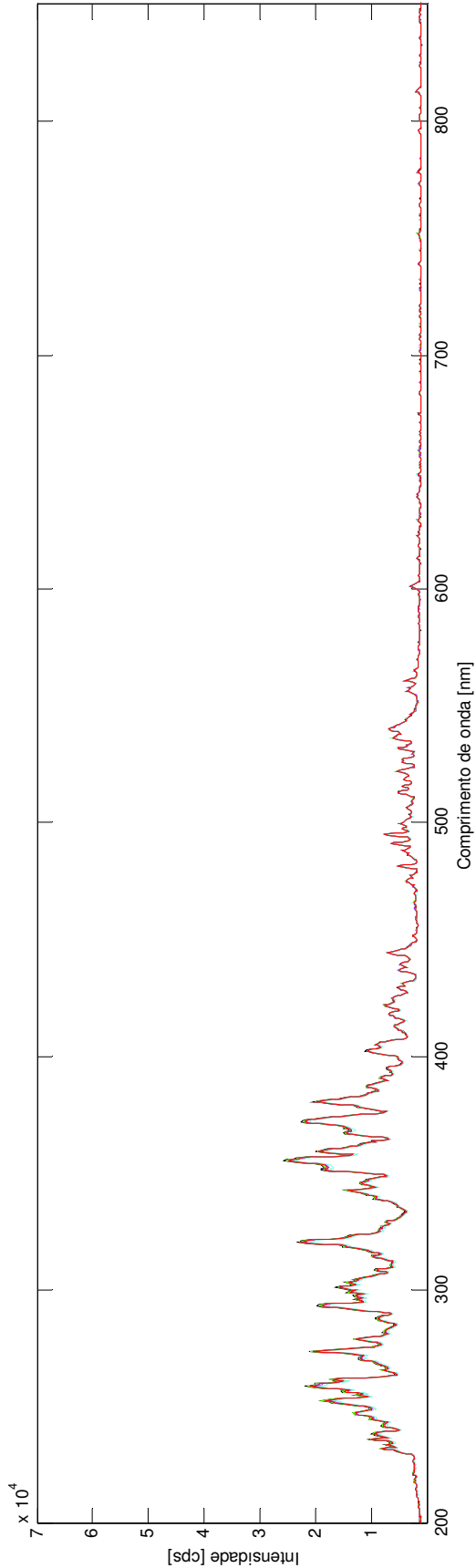
$$U_m = 22,3 \text{ V}$$

$$I_m = 305 \text{ A}$$

U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem



Go21

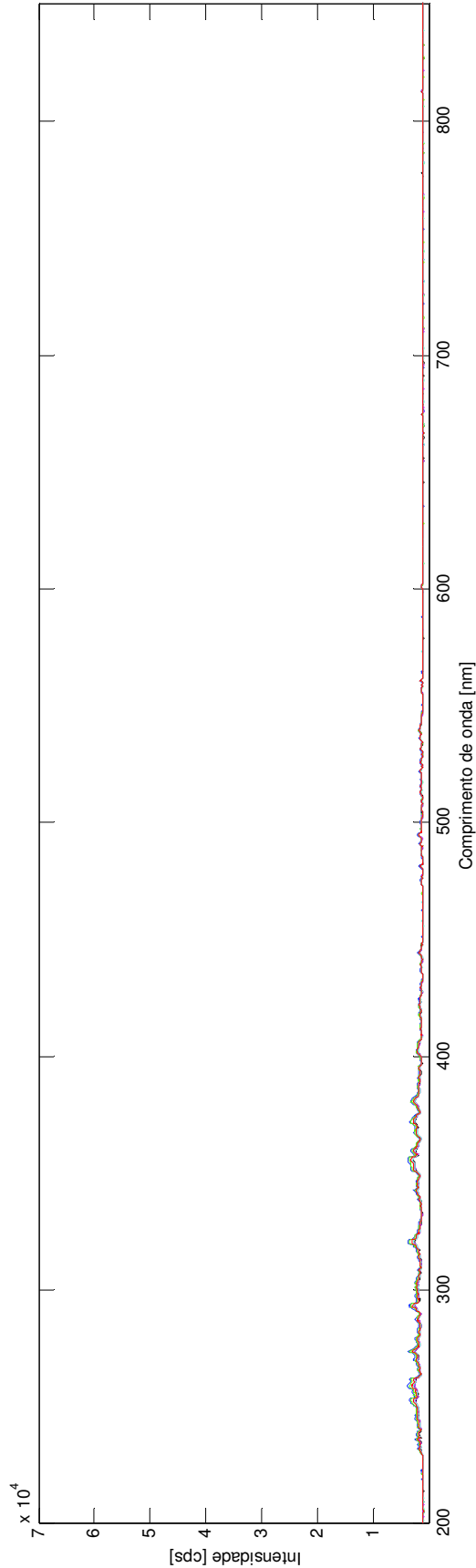


$$U_m = 26,8 \text{ V}$$

$$I_m = 291 \text{ A}$$

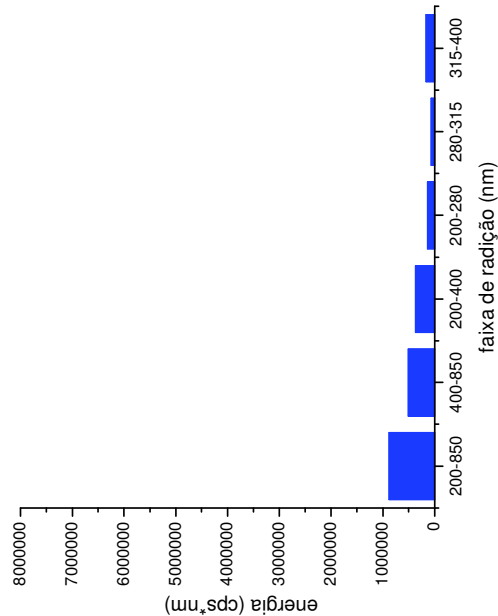
U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

Go23



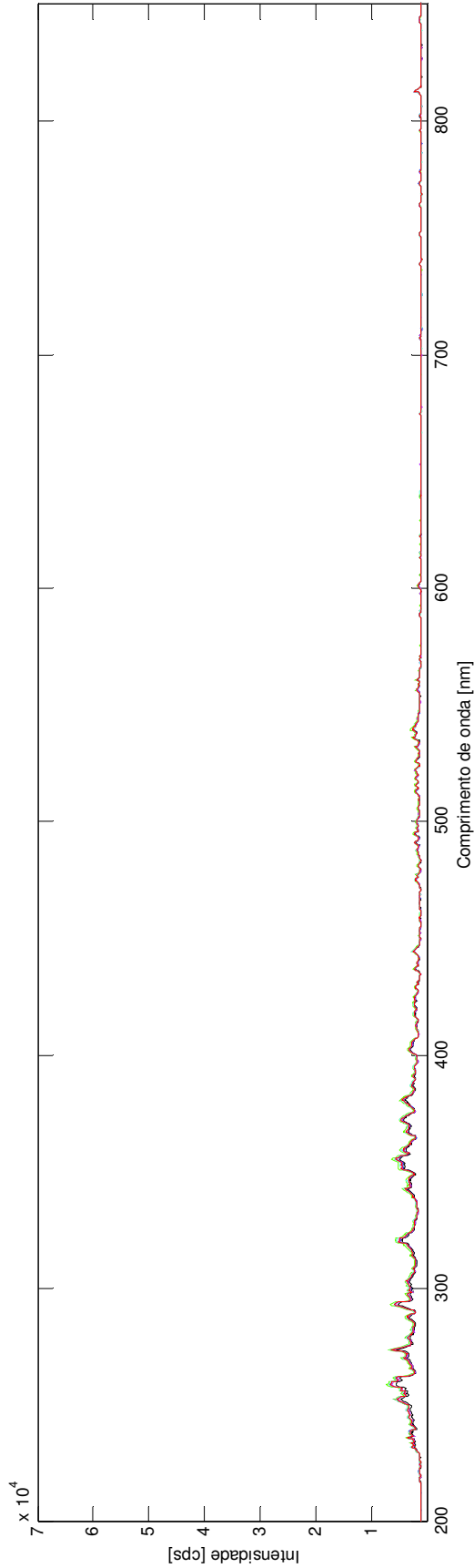
$$U_m = 23,2 \text{ V}$$

$$I_m = 307 \text{ A}$$



$$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$$

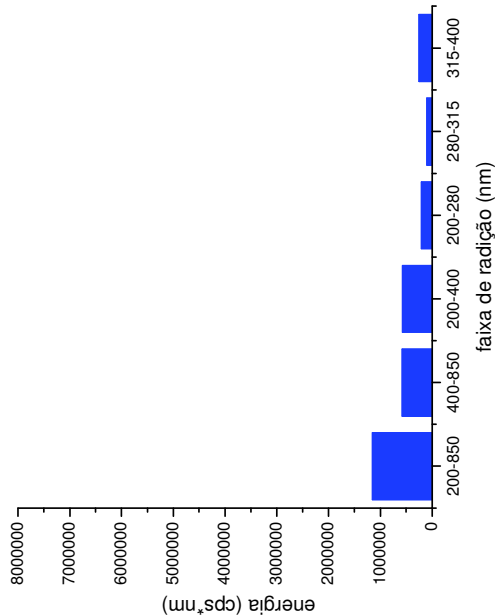
Go26



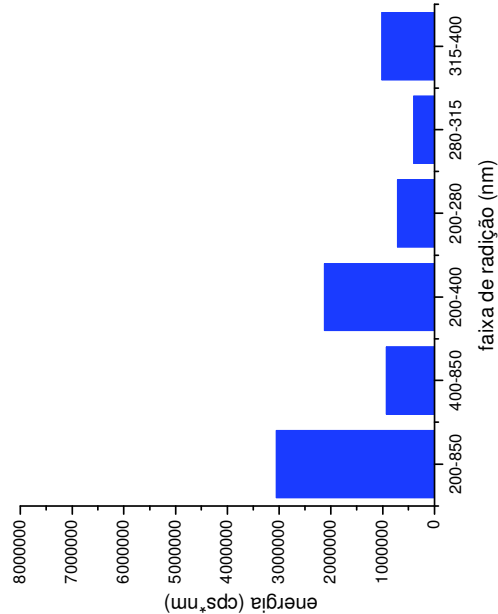
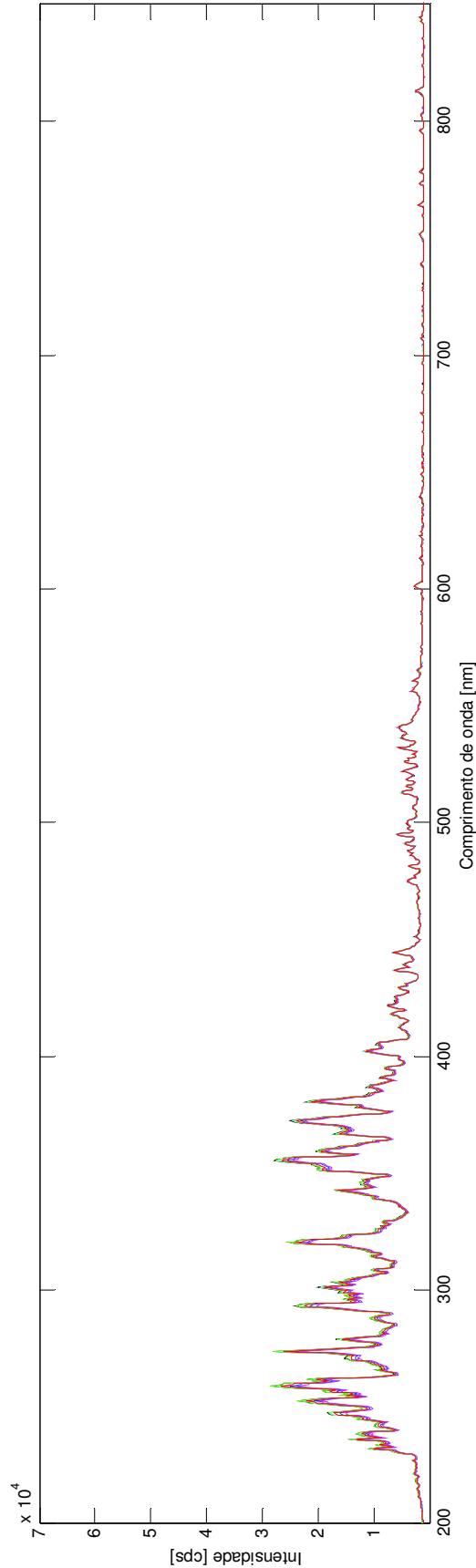
$$U_m = 22,4 \text{ V}$$

$$I_m = 301 \text{ A}$$

U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem



Go29

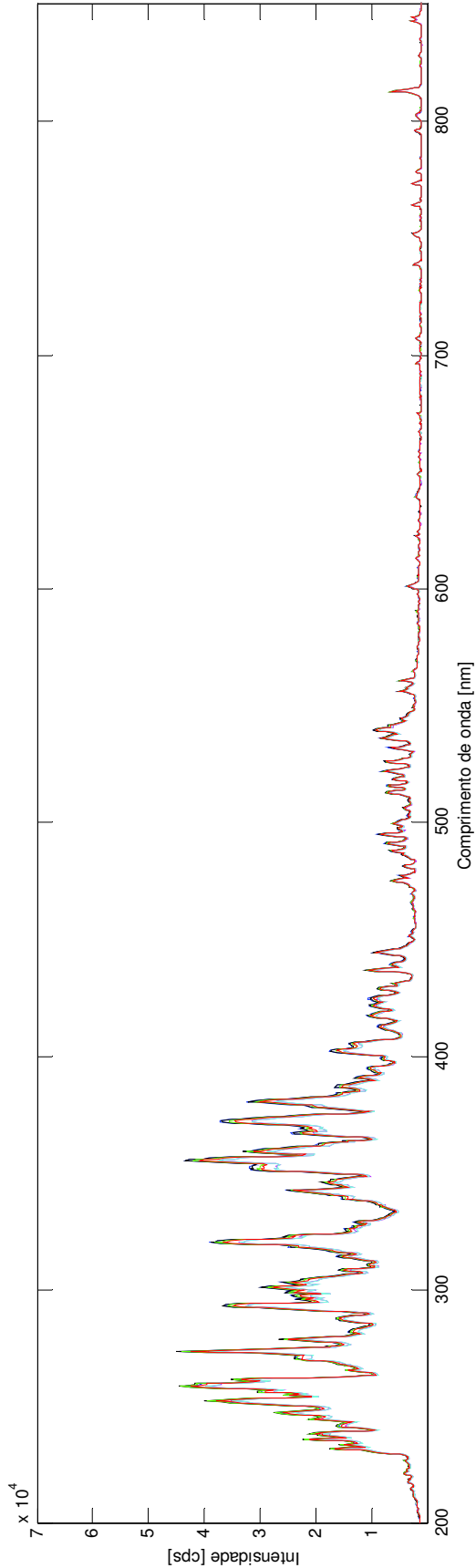


$U_m = 26,0 \text{ V}$

$I_m = 285 \text{ A}$

$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$

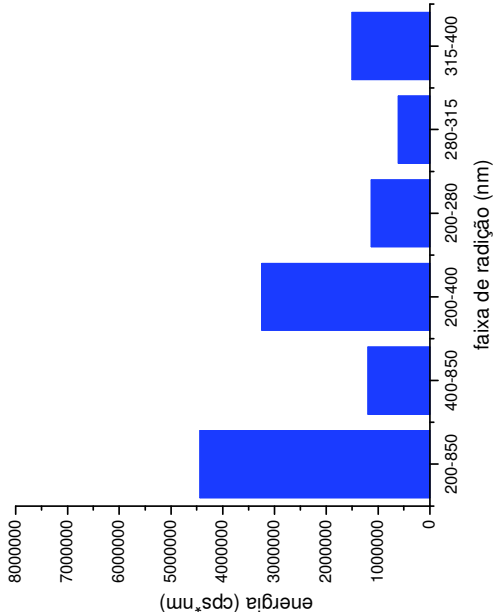
Go32



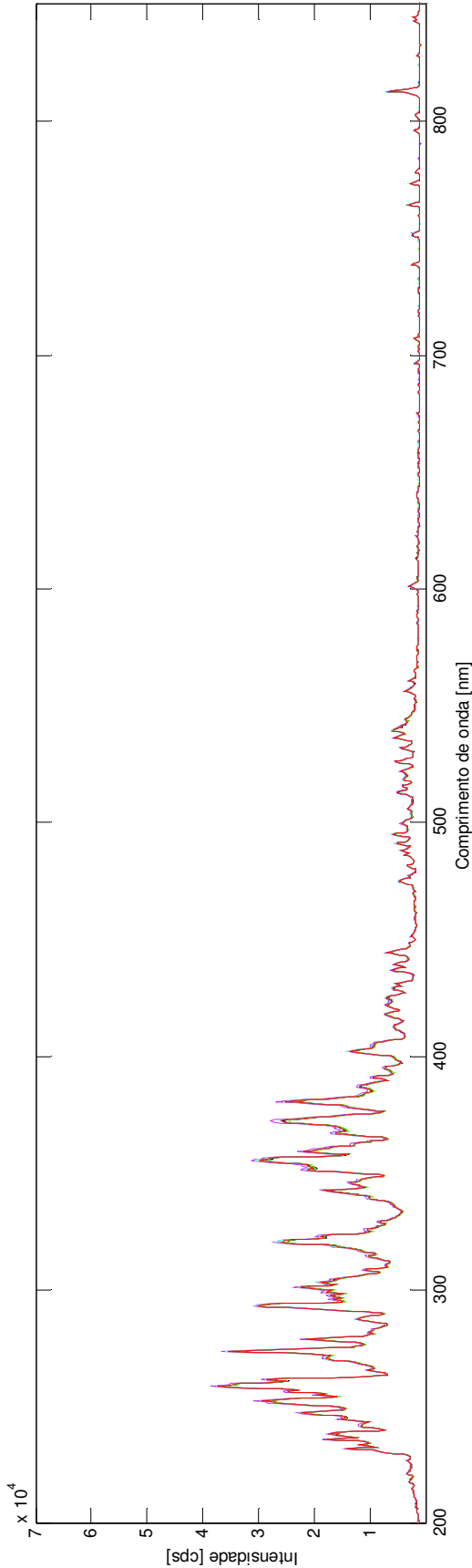
$U_m = 26,0 \text{ V}$

$I_m = 338 \text{ A}$

$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$



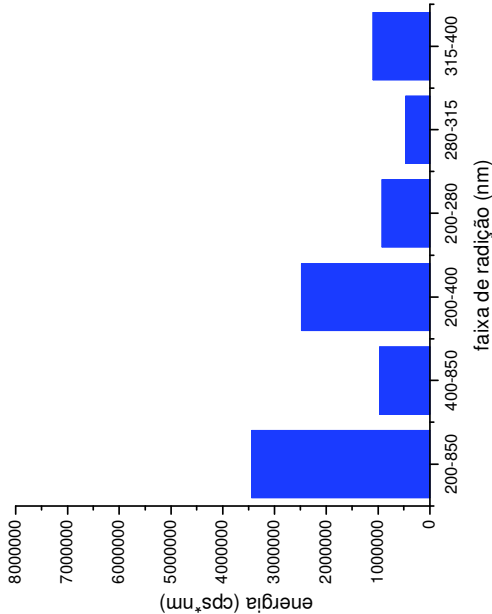
Go42



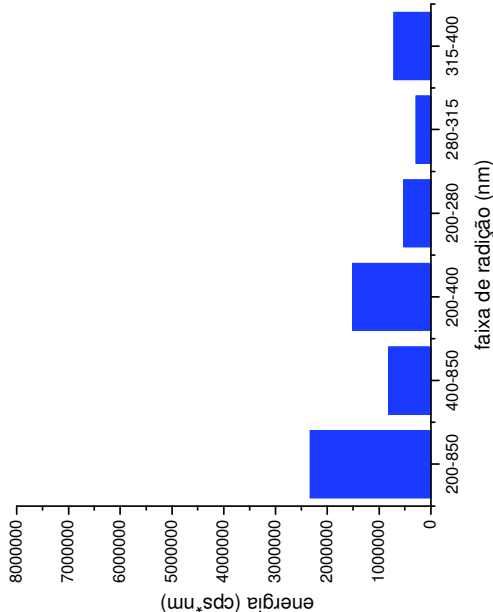
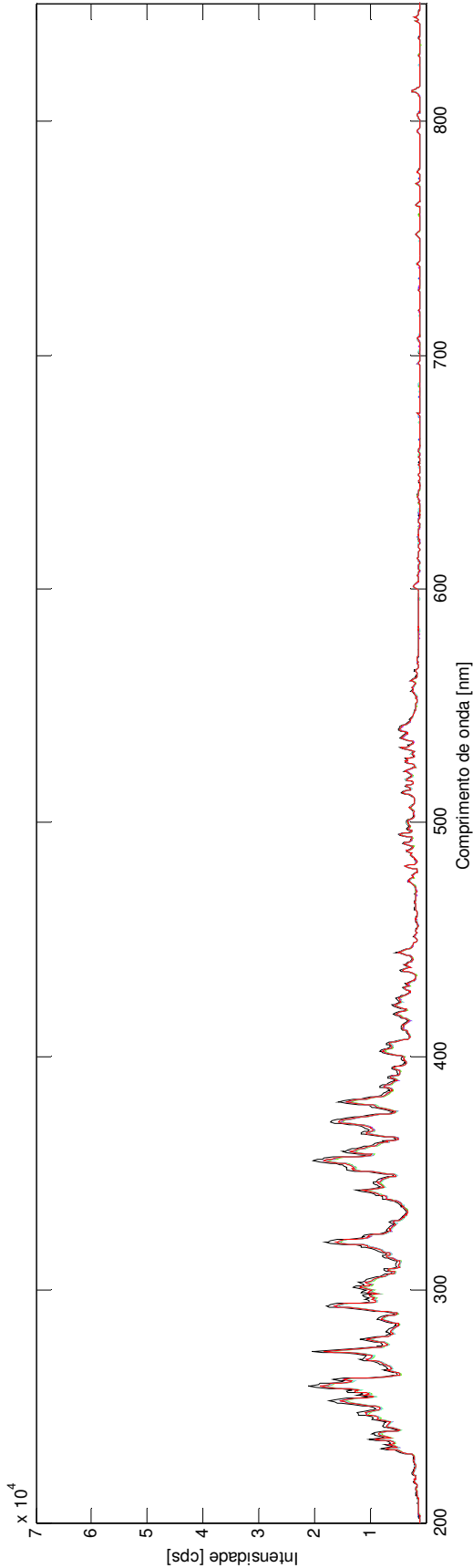
$U_m = 23,8 \text{ V}$

$I_m = 266 \text{ A}$

$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$



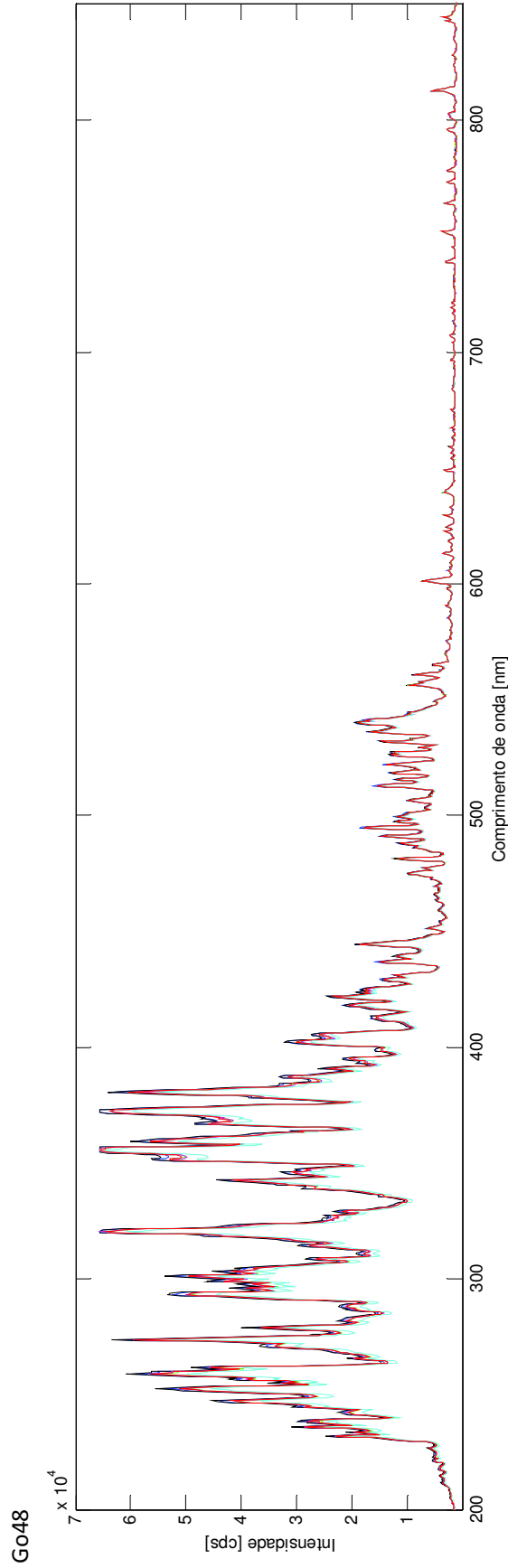
Go45



$$U_m = 27,1 \text{ V}$$

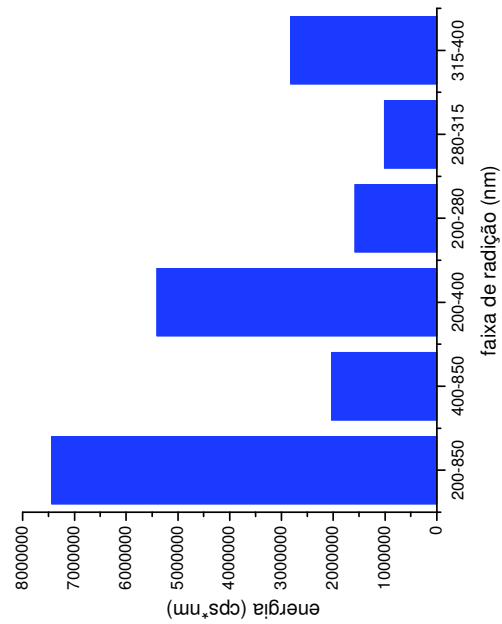
$$I_m = 340 \text{ A}$$

U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem



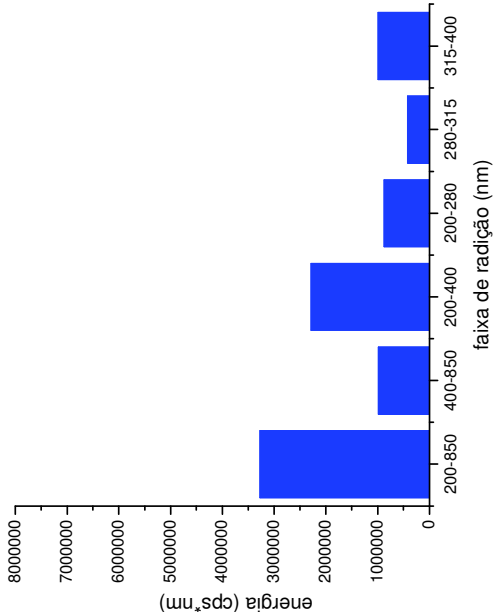
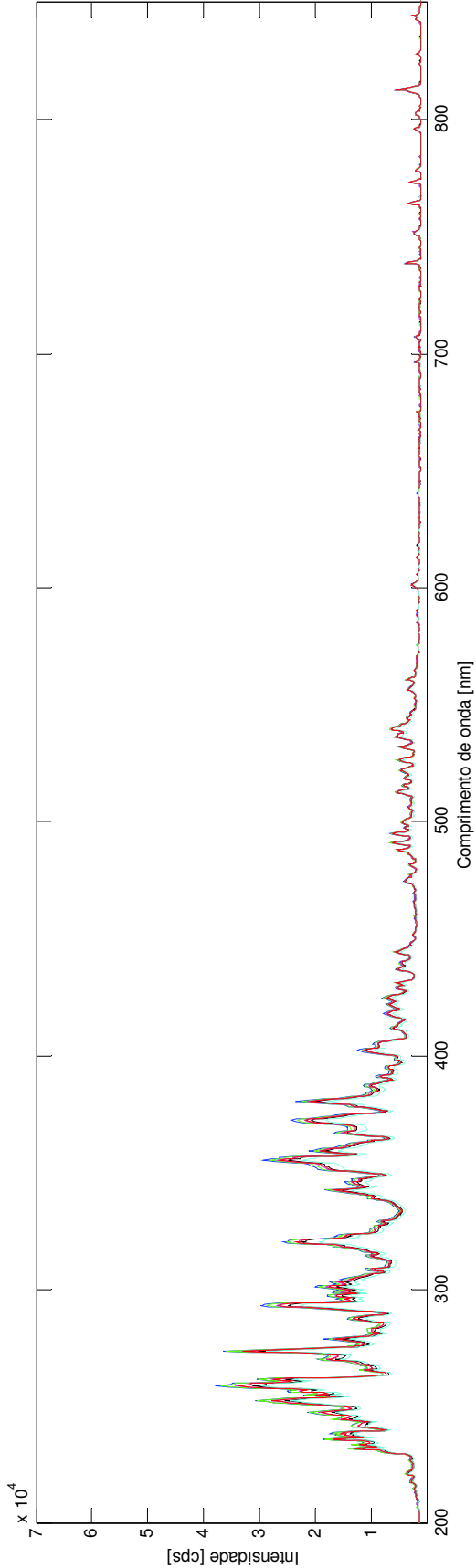
$$U_m = 31,6 \text{ V}$$

$$I_m = 376 \text{ A}$$



U_m = tensão média de soldagem; I_m = corrente média de soldagem

Go55



$U_m = 28,5 \text{ V}$

$I_m = 430 \text{ A}$

$U_m = \text{tensão média de soldagem}; I_m = \text{corrente média de soldagem}$