

# Preparação de Superfície para Medição de Tensões Residuais em Soldagem por DRX

Andrii Mishchenko<sup>1</sup>, Bruno José de Oliveira<sup>2</sup>, Américo Scotti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia, MG, Brasil.

Recebido: 04 Jul., 2016

Aceito: 16 Dez., 2016.

E-mails: asmwelder@gmail.com (AM),

brunooliveira7@gmail.com (BJO),

ascotti@mecanica.ufu.br (AS)

**Resumo:** A característica típica do método de medição das tensões por Difração de Raio X (DRX) é que as medições ocorrem numa camada superficial. As chapas de aço vêm com superfícies alteradas (tensões residuais ou rugosidades inerentes ao material) por processos de laminação, limpeza (jateamento, esmerilhagem) e até por corrosão. Por isto, a preparação da superfície previamente à medição das tensões residuais é essencial, apesar de nem sempre ser observada ou haver procedimentos padronizados. A recomendação geral é remover uma camada micrométrica para não mascarar as tensões causadas pela soldagem. Neste trabalho, foi avaliado o uso de um processo eletrolítico portátil e mecanizado, para remoção de material em superfícies de chapas de aço ANBT 1020 e AISI 304. Estudou-se composições químicas para soluções eletrolíticas e a influência da corrente sobre a quantidade de material removido, tempo de remoção e temperatura durante o processo. Como resultado, encontrou-se soluções químicas e parâmetros não austeros que permitiram a remoção de cerca de 300 µm em um tempo razoável. Uma maior corrente reduz o tempo de remoção, mas aumenta o consumo da solução e temperatura da peça (que, por efeito colateral, poderia chegar a alterar a microestrutura ou gerar tensões térmicas). Além disso, foi demonstrado a influência dos parâmetros de remoção sobre a operacionalidade do processo.

**Palavras-chave:** Remoção eletrolítica; Medições de tensões residuais; Difração de Raios X.

## Surface Preparation for XRD Residual Stress Measurements

**Abstract:** A characteristic feature of the X Ray Diffraction (XRD) method for stress determination is that measurements occur at a thin surface layer. Steel sheets come with surfaces modified by lamination, cleaning (sandblasting, grinding) and even corrosion, which induce residual stresses or roughness inherent to the material. Therefore, surface preparation prior to the residual stress measurement is essential, although no standard procedure seems to be available. A general recommendation is to remove a thin layer so that only residual stresses related to the welding process will be measured. In this study, the use of portable electrolytic equipment was evaluated for mechanized surface material removal. Chemical compositions of electrolytic solutions and the influence of current on the removed material, removal time and temperature during the process were studied. As a result, a suitable chemical solution for electroetching of low carbon steel was developed and a set of “soft” parameters that allowed the removal of about 300 µm in a reasonable time was found. Higher currents reduce the removal time, yet increasing the consumption of the solution and plate temperature (which could adversely alter the microstructure or generate thermal stresses). Furthermore, the influence of these parameters on the operability of the process was demonstrated.

**Key-words:** Electrolytic removal; Residual stress measurement; X-Ray diffraction.

## 1. Introdução

Além de custos adicionais de fabricação, a tensão residual tem sido causa de alguns desastres tecnológicos. Segundo o Lancaster [1] o colapso de um vaso de pressão com amônia na África do Sul em 1973 aconteceu por causa das tensões residuais induzidas por uma solda de reparo. Este caso é um exemplo de que prever ou quantificar tensões residuais torna-se imperativo para construções metálicas de alta responsabilidade.

A norma AWS [2] define tensões residuais como aquelas que estão presentes numa junta soldada e/ou material de base que não estão submetidos aos esforços externos e/ou gradientes térmicos. Segundo Scotti [3], as tensões térmicas que não foram aliviadas,



seja por deformações microscópicas (na forma de acomodações) ou macroscopicamente (na forma de distorções na geometria do componente), permanecem presas como tensões residuais. A predição das tensões residuais por métodos numéricos ganhou atenção dos engenheiros por ter baixo custo e ser relativamente rápidos. Como apontam De e Debroy [4], os métodos numéricos têm mostrado resultados bastante promissórios em soldagem, porém a simulação numérica muitas vezes apresenta resultados antagônicos e sempre uma validação experimental deve ser feita. Isto seria um motivo para se saber medir corretamente as tensões.

Segundo Rossini et al. [5], os métodos não destrutivos para medição de tensões ganharam atenção dos usuários, não apenas por deixar o material intacto, mas também por causa da mobilidade do equipamento e rapidez de medição. Como justificam Lachmann et al. [6] dentre essas técnicas, a medição de tensões residuais por Difração de Raio X (DRX) está sendo bastante utilizada, tanto em pesquisa como no meio industrial. Entretanto, ainda não há procedimentos bem fundamentados para sua aplicação, especialmente quando se trata de preparação da peça para medição.

A técnica de DRX exige uma preparação especial da superfície da peça para que os resultados de medição não estejam mascarados por tensões devido aos processos prévios de fabricação. Cullity [7] determina rugosidade e tensões residuais devido a processos prévios de fabricação como dois principais parâmetros da superfície da peça que podem afetar a qualidade de medição. Li et al. [8] avaliaram o efeito da rugosidade da superfície de uma peça de aço inoxidável sobre os resultados da medição das tensões residuais por difração de Raio X. Segundo seus resultados, há pouca influência da rugosidade sobre os resultados de medição quando o valor da rugosidade  $R_a$  não supera a profundidade da penetração do Raio X. Para a potência de Raio X utilizada por autores uma rugosidade superior a 10  $\mu\text{m}$  ia interferir nos resultados de medição. Ott e Lohe [9] estudaram o efeito de rugosidade da superfície sobre o deslocamento do pico de Bragg, que é diretamente relacionado com o resultado de medição das tensões residuais. Foi observado que quanto maior o grau de rugosidade da peça, menor o deslocamento do pico e, por consequência, maior erro de medição.

É recomendado eliminar tensões residuais preexistentes para que as mesmas não mascarem os resultados de medição (i.e, medir só as tensões originadas pela soldagem). Por exemplo, Prevey [10] e Fitzpatrick et al. [11], recomendam utilizar o polimento eletrolítico para retirar a camada com tensões residuais devido aos processos prévios de fabricação. A própria norma ASTM [12] na seção 8.5 recomenda retirar no mínimo 0,25 mm, no caso das superfícies tratadas com jato de areia ou esmerilhadas.

Entretanto, não há uma concordância entre os autores de quanto seria necessário retirar da camada superficial para eliminar o efeito de tensões residuais devido ao processamento prévio. Por exemplo, Gou et al. [13] e Hilson et al. [14] avaliaram as tensões residuais in situ em tubos de alta resistência soldados a arco. Os autores comentam que antes de se fazer a medição de tensões residuais foi feito um polimento eletrolítico e uma camada de 0,1 mm de espessura foi retirada. Rai et al. [15] consideram a remoção de uma camada de 0,02 mm como suficiente para eliminar o efeito de filme de óxidos. Brown et al. [16] e Tsuji et al. [17] usaram polimento eletrolítico para preparar a superfície antes das medições de tensões residuais, porém a espessura da camada removida não foi especificada. Harati et al. [18] estudaram a influência de tensões residuais sobre a resistência à fadiga de chapa de aço de alta resistência soldados a arco. Porém, Harati et al. [18] não fizeram polimento eletrolítico nos locais de medição e mediram as tensões residuais nas peças como recebidas do estaleiro.

Assumindo-se como essencial a remoção de uma camada superficial antes da medição por DRX, percebe-se uma falta de procedimento padrão ou confiável para preparação da superfície. Não foram encontradas recomendações sistemáticas para remoção de camada superficial, como, por exemplo, a solução eletrolítica, parâmetros de remoção e dados da influência da espessura removida sobre a medição. Entretanto, antes de se estudar o efeito da espessura removida sobre a qualidade da medição, é necessário se desenvolver um método de remoção que seja rápido, seguro e econômico.

Deste modo, o objetivo deste trabalho é explorar a utilização de um processo eletrolítico, através da proposição e avaliação de soluções eletrolíticas e da parametrização do processo, para remoção de uma camada alvo de 250  $\mu\text{m}$  da superfície de chapas metálicas. Considera-se a etapa de preparação da superfície antes de medição por DRX como importante para obter resultados confiáveis.

## 2. Metodologia, Equipamentos e Insumos

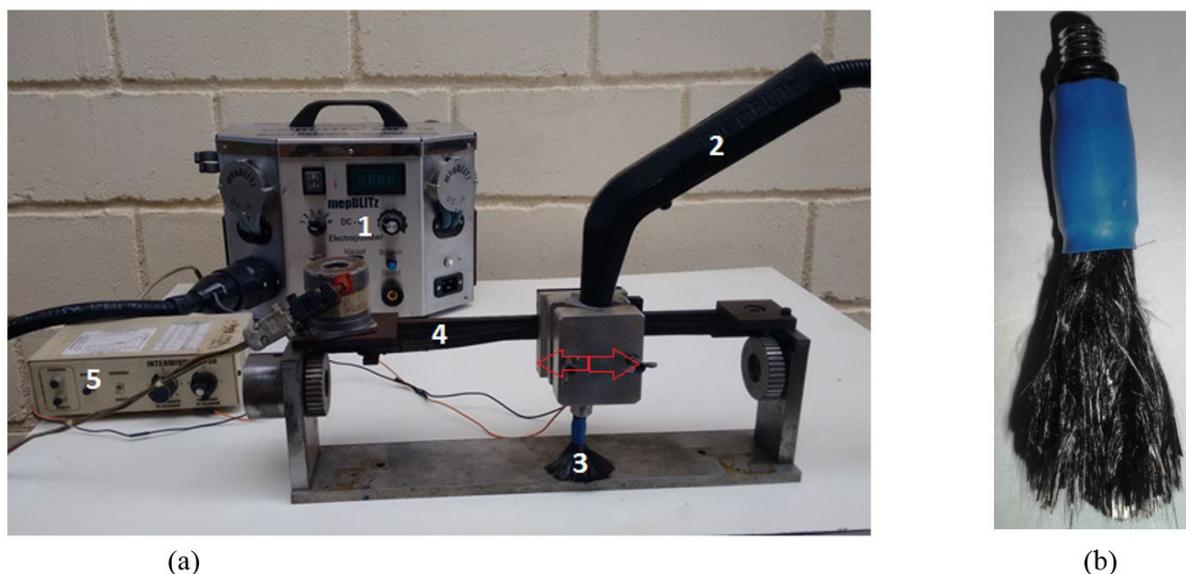
Como parâmetros de remoção eletroquímica, pode-se regular corrente, velocidade de deslocamento do eletrodo, vazão e composição do fluido eletrolítico, distância entre a ponta do eletrodo e a superfície da chapa e tempo de remoção. Manteve-se constantes esses parâmetros para se estudar o efeito da corrente, exceto a vazão da solução eletrolítica, que tem de ser aumentada de acordo com o valor da corrente, para evitar secagem do meio eletrolítico. A espessura alvo foi definida como 0,25 mm (250  $\mu\text{m}$ ), baseando-se na recomendação da seção 8.5 da norma ASTM [12], que prevê a remoção desta espessura antes de medição para eliminar o efeito de superfície encruada (superfície levemente tratada com jato de areia ou esmerilhamento). Portanto, estabeleceu-se este valor como critério, ou seja, quando a espessura de material removido atingisse 250  $\mu\text{m}$ , o ataque eletrolítico seria encerrado.

O efeito da sequência de remoção (contínua ou por estágio) também foi alvo da metodologia. Conjuntamente, procurou-se avaliar o desempenho de três soluções eletrolíticas, sendo uma a solução padrão fornecida pelo fabricante (destinada à limpeza do aço inoxidável) e as outras elaboradas e preparadas para os testes com aço ABNT 1020.

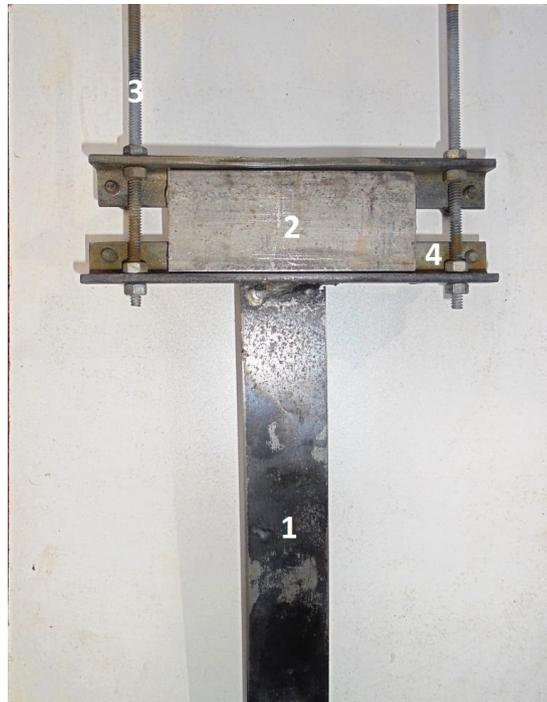
Como equipamento, utilizou-se o aparelho mepBLITZ DC-i5 da MetalScience®, que é destinado à limpeza eletrolítica de aços inoxidáveis após soldagem. O princípio físico do processo da limpeza eletrolítica pode ser encontrado na literatura, como, por exemplo, em Tegart [19]. As principais partes do aparelho mepBLITZ DC-i5 são uma fonte de alimentação elétrica e um pincel com características de eletrodo, com o qual se faz a limpeza da peça. Este pincel-eletrodo, construído de fios de fibra de carbono, é uma característica particular desse equipamento. A solução eletrolítica é bombeada continuamente a partir de um reservatório para o pincel e com vazão controlável. O contato elétrico é feito entre a ponta do pincel e a peça por meio desta solução. A limpeza da superfície é realizada através de um movimento linear manual do pincel ao longo da região do cordão de solda.

Para utilização desse equipamento com devido controle e repetitividade foi montada uma bancada experimental mecanizada (Figura 1), que consiste de um cursor com velocidades programadas de deslocamento. A bancada possibilita translação cíclica do pincel para frente e para trás, com o fornecimento contínuo do líquido eletrolítico à zona de ataque eletroquímico, simulando, assim, uma sequência controlada de passagem manual com pincel.

Na realização dos testes, foram utilizadas chapas de teste de aço ABNT 1020 e aço inoxidável austenítico AISI 304, nas dimensões uniformizadas de 105  $\times$  38  $\times$  6,35 mm. Para impedir o movimento das chapas durante o ataque eletrolítico, as chapas de teste foram fixadas num suporte (Figura 2).



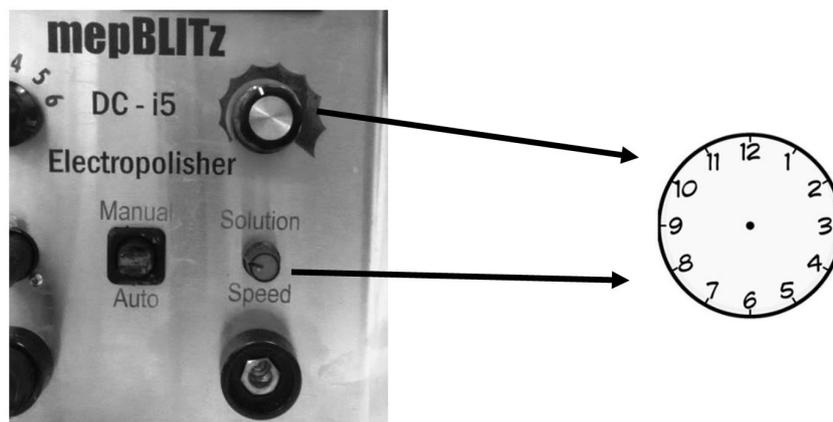
**Figura 1.** (a) Bancada experimental utilizada para fazer o ataque eletrolítico, onde 1-fonte de alimentação, 2-empunhadura, 3-pincel-eletrodo, 4-cursor para translação linear cíclico, e 5-controle do cursor (as setas indicam o possível movimento da pincel); (b) vista geral do pincel-eletrodo.



**Figura 2.** Suporte para fixação das chapas de teste durante o ataque eletrolítico, onde 1-conexão para cabo-terra, 2- chapa de teste, 3-parafuso para ajuste da largura do suporte, 4-cantoneiras para apoio da chapa.

### 3. Procedimento Experimental

O aparelho não permite regular um valor numérico da corrente e vazão da solução eletrolítica, e sim posições dos botões de regulagem (“knob”) de cada grandeza, as regulagens de corrente e vazão foram aqui referenciadas por analogia com o ponteiro de horas de um relógio analógico, como ilustra a Figura 3. Por recomendação do fabricante, as posições dos botões de corrente e vazão são correspondentes, isto é, se o botão de regulagem da corrente está posicionado em 9 horas, a posição do botão de regulagem de vazão seria 9 horas também. Entretanto, na prática (agora aplicada para remoção e não só polimento) verificou-se a necessidade de um ajuste fino da regulagem da vazão da solução durante remoção, de maneira a garantir que o pincel esteja sempre encharcado com a solução (critério qualitativo). Para tal, estimou-se a vazão volumétrica aproximada do líquido para várias posições do potenciômetro da vazão, mas não monitorou-se a vazão durante os testes.



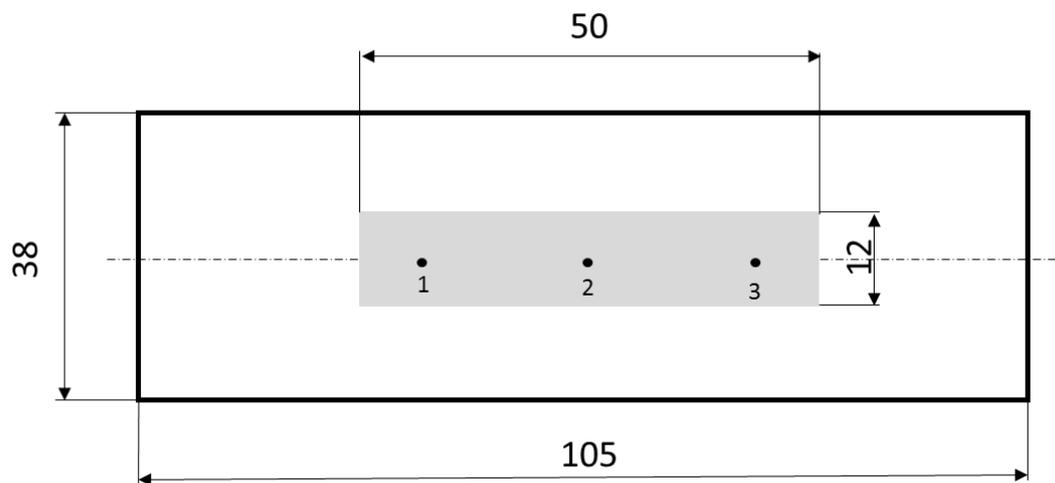
**Figura 3.** Ilustração de uma parte do painel principal do aparelho mepBLITZ DC-i5 com destaque para a regulagem dos valores da corrente e vazão da solução eletrolítica pela posições dos botões de regulagem, analogamente a um ponteiro de horas de relógio analógico.

O valor real da corrente durante o processo de remoção foi monitorado por meio de um sistema A/D de aquisição, a uma taxa de 500 Hz e tempo máximo de aquisição de 150 s. Definiu-se arbitrariamente uma área de ataque para os dois materiais da chapa de teste como de 50 × 12 mm (Figura 4). A velocidade de deslocamento do pincel foi fixada no máximo permitido pelo cursor em 8,5 mm/s na ida e 7,5 mm/s na volta, o que proporcionou 9 ciclos de ida-volta por minuto para o comprimento da área de ataque. A distância entre a ponta do pincel e superfície da chapa sempre foi a mínima possível, atendendo as recomendações do fabricante, para que as pontas do pincel encostem levemente na superfície da chapa.

O monitoramento da temperatura é importante, pois ao se aquecer a peça acima de uma dada temperatura, novas tensões térmicas podem surgir e mascarar os resultados de medição. Como critério, estabeleceu-se arbitrariamente que a temperatura da chapa não pode ultrapassar 100 °C. A temperatura durante o processo foi também monitorada, utilizando-se um pirômetro óptico digital Minipa MT-350 com resolução de 1 °C. Os resultados de medição da temperatura são aproximados, pois o pirômetro não é destinado a medição da temperatura em superfícies molhadas. A medição da temperatura foi feita durante o processo de ataque próximo ao local de contato pincel-peça. Como o pincel estava em movimento durante o ataque, mediu-se a temperatura em três locais diferentes ao longo do comprimento da área atacada e uma média foi calculada.

É importante registrar que no caso de corrente baixa (em torno de 20 A), foi possível segurar a peça na mão protegida por luva de borracha depois de ataque por mais de 5 s. Já quando de corrente mais alta (acima de 30 A, por exemplo), não foi possível segurar a peça na mão protegida por muito tempo (dois ou três segundos apenas, no máximo), o que indica uma temperatura mais elevada. Embora seja um método subjetivo de estimativa da temperatura, pode-se afirmar que a temperatura da peça não passou de 60 °C. Isto é coerente, pois de acordo com Bull e Lawrence [20], pele se queima após 1 s em contato com a mão não protegida se a superfície aquecida estiver à 75 °C. De toda forma, no presente trabalho o valor da temperatura não era a preocupação principal e sim a repetitividade. Estabeleceu-se o limite de 100 °C como adequado para este processo. Durante experimentos, a temperatura da peça não ultrapassou este valor o que foi considerado como aceitável.

As medições de espessura de camada removida foram feitas utilizando-se um micrometro analógico com resolução de 0,01 mm. As medições das espessuras da chapa para quantificar a remoção se deram em três regiões escolhidas no eixo central da área de ataque (início, meio e fim, Figura 4). Antes das medições, as chapas eram previamente enxaguadas com água corrente e limpas com um neutralizador. A espessura desgastada é calculada como a diferença entre as médias das espessuras da chapa medidas antes do ataque e depois de cada série de ataque eletrolítico. Em cada ponto indicado, foram feitas três medições, totalizando 9 valores de espessura por amostra. A partir desses dados, calculou-se o Valor Médio (VM) e o Desvio Padrão (DP). Nos gráficos de resultados, a barra de erro está apresentada.



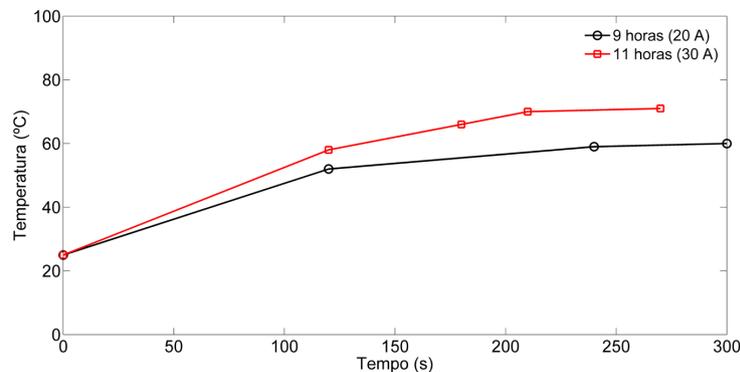
**Figura 4.** Representação esquemática da chapa de teste, onde o retângulo cinzento representa a região onde foi feito o ataque e os números 1, 2 e 3 são os pontos onde a espessura da chapa era medida.

### 3.1. Remoção das camadas superficiais em chapas de aço inoxidável

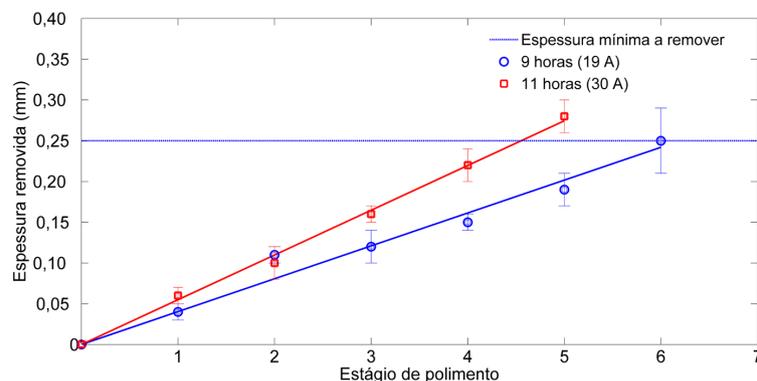
Inicialmente, foi feito um pré-teste com corrente baixa atacando uma chapa de aço AISI 304 durante 5 min, utilizando a solução eletrolítica fornecida pelo fabricante do aparelho. Após o ataque, verificou-se uma espessura removida de 40  $\mu\text{m}$ . Baseando neste resultado, foram feitas duas séries de testes, onde o fator de entrada era corrente, em nível baixo, com vazão baixa, e em nível médio, com vazão média. A resposta era a variação da espessura da chapa e temperatura da chapa. Os demais parâmetros permaneceram constantes. Em cada série, estabeleceu-se fazer 6 estágios sequenciais de remoção, sendo cada um com duração de 5 min, intercalados por limpeza das chapas de teste e medições da remoção, com tempo total de ataque de 30 min.

Na Figura 5 está apresentada a evolução da temperatura média da chapa, onde verifica-se que durante o processo de ataque eletrolítico, a temperatura da chapa não superou 75  $^{\circ}\text{C}$  para os dois níveis de corrente utilizados. Mesmo nessas temperaturas, percebe-se borbulhamento e evaporação da solução eletrolítica pelo aquecimento, devido à passagem de corrente. Caso não se tivesse aumentado proporcionalmente a vazão com aumento da corrente, a solução teria secado.

Na Figura 6 está apresentada a média da espessura do material removido. Percebe-se um comportamento linear entre o tempo de ataque e a remoção do material. Taxas de aproximadamente 8  $\mu\text{m}/\text{min}$  para corrente baixa-vazão baixa e 12  $\mu\text{m}/\text{min}$  para corrente média-vazão média foram observadas. Deste modo, apesar de não ser um aparelho destinado à remoção do material, mas sim à limpeza superficial, o mepBLITz DC-i5 mostrou ser capaz de remover progressivamente camadas de aço inoxidável AISI 304, removendo em média de 40  $\mu\text{m}$  a cada 5 min, utilizando corrente baixa-vazão baixa, e 60  $\mu\text{m}$  a cada 5 min utilizando a corrente média-vazão média. Desta forma, para remover 250  $\mu\text{m}$ , recomendadas pela norma ASTM [12], seção 8.5, um tempo de 30 (excluindo tempos mortos para limpeza e fixação das chapas) é necessário nas condições testadas.



**Figura 5.** Evolução da temperatura média da chapa de aço AISI 304 em função do tempo de ataque para dois níveis de corrente (representado na legenda pela posição do botão de regulagem e o correspondente valor médio monitorado).



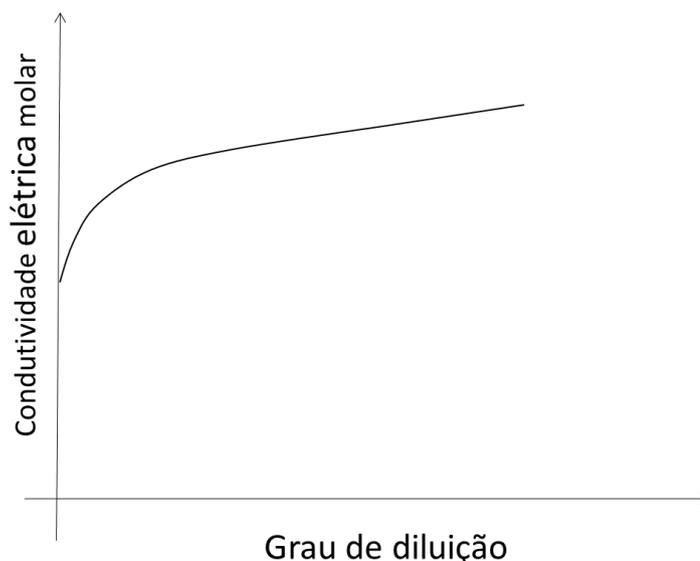
**Figura 6.** Espessura média de material removido (aço AISI 304), em função do estágio de ataque (5 min cada) para dois níveis de corrente.

### 3.2. Remoção das camadas superficiais em chapas de aço comum ao carbono

O fabricante do equipamento não possui soluções para se trabalhar com aço ao carbono. Por isso foi necessário encontrar uma solução eletrolítica para aço ABNT 1020. O sucesso da remoção das camadas superficiais no geral é definido pela composição química da solução utilizada. A norma BS EN 15305/2008 [21] recomenda utilizar eletrólitos que minimizam o ataque seletivo sobre os grãos. Prevey [10] e Hadd [22] recomendam tomar o mesmo cuidado. Como afirma Hadd o ataque preferencial dos grãos pode aumentar excessivamente a rugosidade o que pode mascarar os resultados de medição. Para evitar isso o autor recomenda reduzir o tempo de ataque para o mínimo possível. Li et al. [8] estudaram o efeito de rugosidade da superfície da peça sobre os resultados de medição das tensões residuais por difração de Raio X. Os autores relatam que a rugosidade da peça não tem influência sobre os resultados de medição desde que o valor da rugosidade não supera a profundidade de penetração de Raio X.

Neste trabalho não foi avaliada a capacidade de ataque seletivo e sua influência sobre o resultado de medição sendo este aspecto passa para o trabalho futuro. O objetivo desse trabalho seria observar o comportamento da solução proposta em relação ao ataque seletivo e rugosidade da superfície. Por outro lado, qualquer remoção de material vai introduzir relaxação das tensões residuais. Como se diz na própria norma BS EN 15305/2008 é necessário fazer a correção dos resultados de medição quando se remove uma camada de material relativamente grande. Se for necessário fazer a correção dos resultados de medição vai depender da quantidade de material removido.

A solução recomendada por Tegart [19] para ataque eletrolítico de aços de baixo carbono consiste em uma mistura de ácido sulfúrico (de 25% a 30%) e ácido ortofosforico (de 50% a 60%), diluídos em água destilada (15% a 20%). Porém, a solução dada por Tegart [19] tem uma concentração elevada de  $H_2SO_4$ , que é um ácido forte, perigoso e caro. Além disso, de acordo com Sokolovskaya [23], em eletrólitos concentrados as forças de interação entre os íons são muito grandes, o que dificulta a passagem de corrente elétrica (Figura 7). Deste modo decidiu-se reduzir a concentração original sugerida por Tegart [19] em 1,5 e 3 vezes, resultando em composições dadas na Tabela 1.



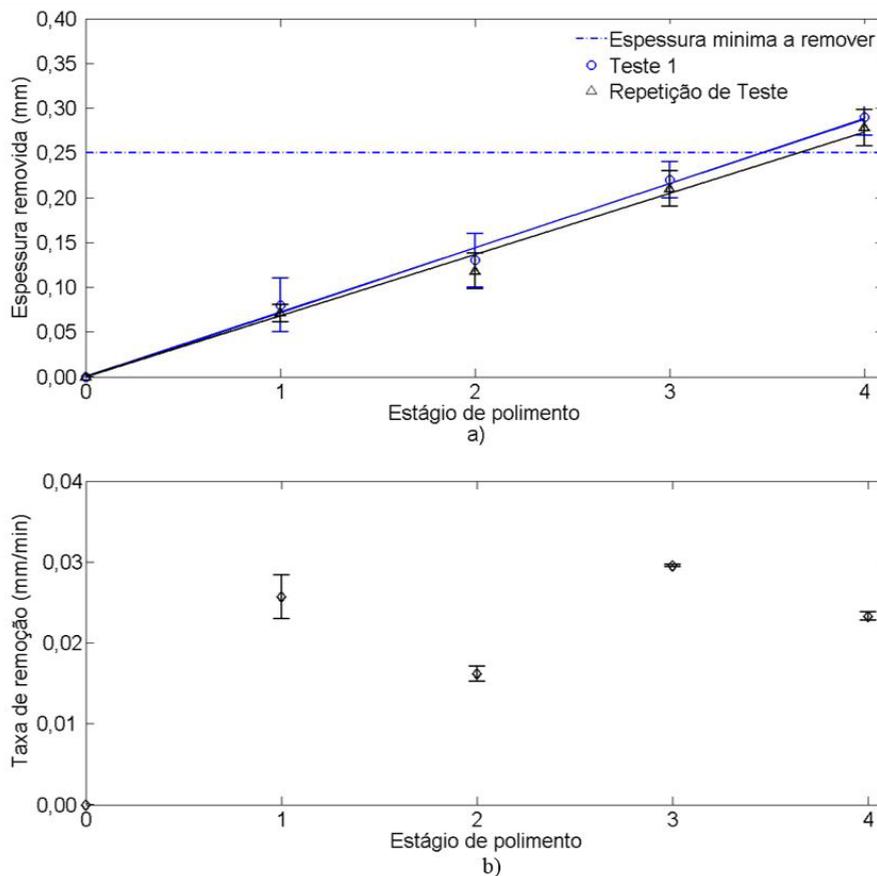
**Figura 7.** Relação entre a condutividade elétrica molar e grau de diluição para eletrólito forte, dada por Sokolovskaya [23].

**Tabela 1.** Composição química (em % de vol.) das soluções eletrolíticas utilizadas para ataque de aço ABNT 1020.

Componentes da solução	Composição original (Tegart [19])	Composição da Solução 1	Composição da Solução 2
$H_3PO_4$	50 a 60	19	38
$H_2SO_4$	27 a 30	9	18
$H_2O$	15 a 20	72	44

Para avaliar a capacidade de remoção da Solução 1 da Tabela 1 foram feitos os seguintes experimentos. Primeiro experimento consistiu em ataque da chapa de teste em 4 estágios com duração de 3 min cada, em nível baixo de corrente-vazão. Os botões de regulagem da corrente e da vazão do líquido foram posicionadas em 9 horas. No segundo experimento, a chapa foi atacada durante um único estágio contínuo sob corrente-vazão baixos, com duração de 12 min, mantendo-se a mesma regulagem de corrente e vazão do líquido. Estes dois experimentos foram repetidos por duas vezes cada para avaliar a repetitividade dos resultados. Num terceiro experimento, avaliou-se a capacidade da remoção da Solução 1 para níveis de corrente mais altos (posições do botão de regulagem 9 horas, 11 horas, 12 horas e 13 horas). O ataque neste caso foi feito durante um único estágio para cada nível de corrente com vazão aumentada e tempo reduzido proporcionalmente.

Os testes em 4 estágios de 3 min revelaram que a Solução 1 proporciona uma taxa de remoção relativamente alta (Figura 8a) e boa repetitividade. A espessura desejada pode ser removida em aproximadamente 10 min. Além disso, a taxa de remoção média por estágio (Figura 8b) permanece relativamente constante ao longo de cada estágio. O valor médio da corrente calculado a partir da amostra medida é de 21 A. O valor máximo da temperatura que foi medido no final de cada estágio não superou 50 °C.



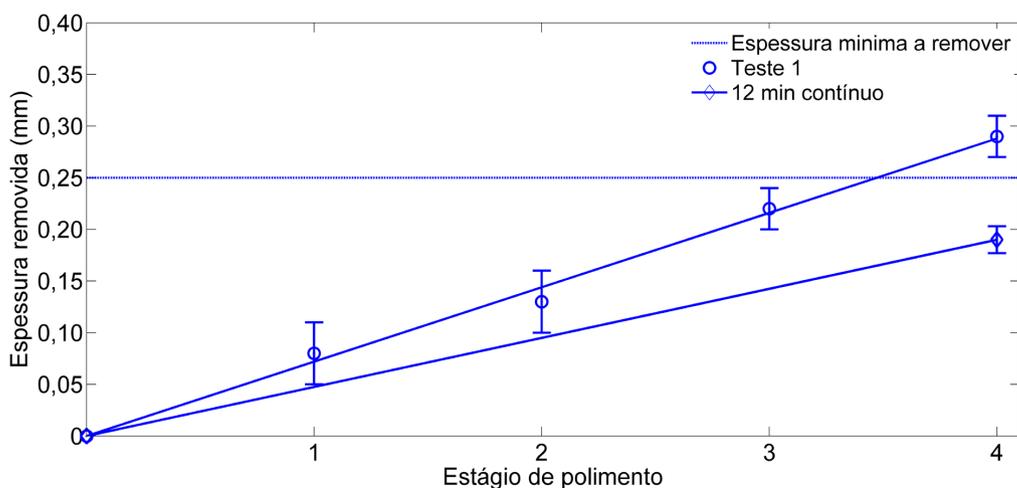
**Figura 8.** Acumulativo de espessura removida (a) e taxa de remoção média (b) em função de estágios de ataque eletrolítico para aço ao carbono, solução 1 e corrente-vazão do eletrólito regulado para 9 horas (espessura mínima a remover é de 250  $\mu\text{m}$ ).

A espessura removida durante o ataque contínuo de 12 min foi menor do que a espessura removida em 4 estágios de 3 min (Figura 9). Isto poderia acontecer devido à saturação da solução eletrolítica depois de certo período de ataque. Por outro lado, a saturação não aconteceria quando o período de ataque é dividido em estágios; a superfície lavada e neutralizada e a solução que reagiu é totalmente removida. Deste modo, o ataque da peça em vários estágios de curta duração parece ser mais eficiente do que ataque durante um único estágio.

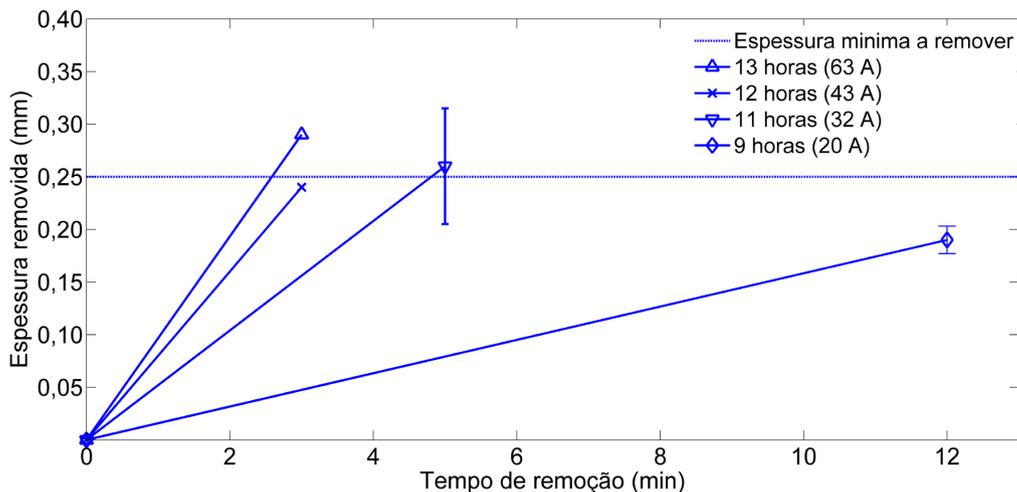
O aumento da corrente de ataque eletrolítico resultou em crescimento da espessura removida (Figura 10). Embora aumentada em comparação com o teste anterior, a temperatura não ultrapassou 70 °C em quaisquer dos níveis de corrente. A Figura 11 quantifica o quanto a taxa de remoção cresce para maiores valores de corrente, sugerindo um crescimento linear, mas com tendência de saturação para maiores correntes.

Para avaliar o efeito da concentração das soluções eletrolíticas, novos experimentos foram planejados com o uso da Solução 2 da Tabela 1, sendo que um foi com corrente baixa e outro com corrente média (posição 9 horas e 11 horas, respectivamente). A Figura 12 mostra que a Solução 2, comparativamente com os resultados com a Solução 1, não apresentou uma taxa de remoção maior. Isto se deve ao fato de que eletrólitos concentrados têm menos íons livres do que os eletrólitos mais diluídos o que dificulta a passagem de corrente e retarda a reação.

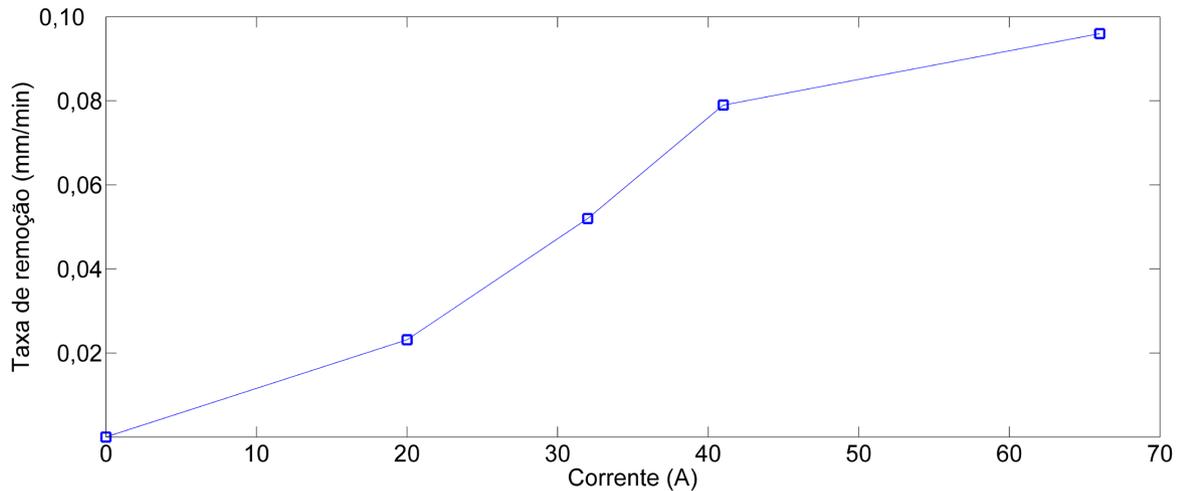
Outras informações importantes são tiradas da Figura 12. O efeito da corrente sobre o desgaste é confirmado em condições diferenciadas das com Solução 1, ou seja, maiores correntes aumentam a camada removida, mas de modo menos significativo. Confirma-se também que estágios mais longos têm menor taxa de remoção (medida pela inclinação das curvas) do que estágios mais curtos, para mesma regulagem de corrente.



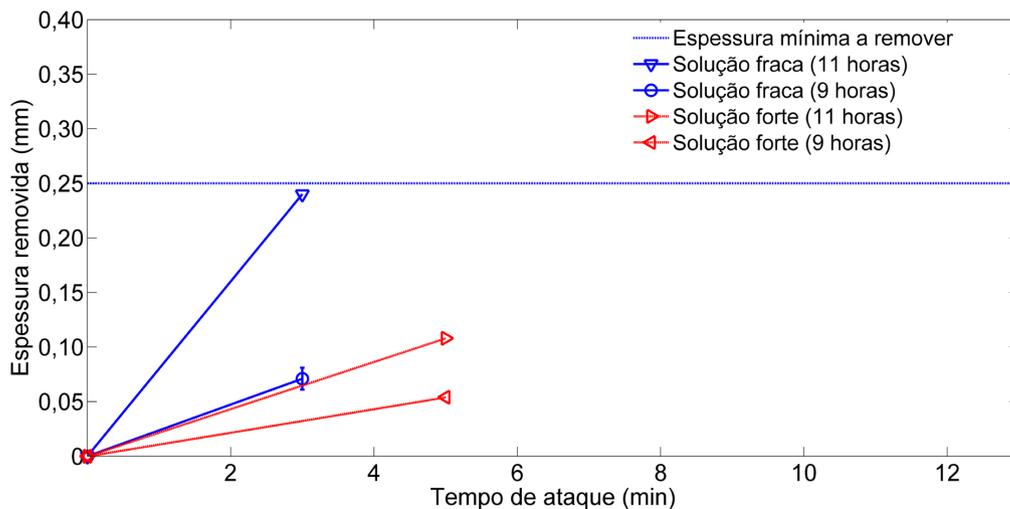
**Figura 9.** Espessura removida (acumulativo) para dois ciclos de trabalho (quatro estágios de 3 min versus único estágio de 12 min) para aço ao carbono, solução 1 e corrente-vazão do eletrólito regulado para 9 horas (espessura mínima a remover é de 250 µm).



**Figura 10.** Espessura removida para aço ao carbono e solução 1 em função do tempo de ataque para vários níveis de corrente de ataque.



**Figura 11.** Relação entre corrente de ataque eletrolítico e taxa de remoção média calculada com base na Figura 10 utilizando-se aço ao carbono e Solução 1.



**Figura 12.** Efeito da concentração da solução eletrolítica sobre a espessura removida de aço ao carbono para dois níveis de corrente (9 horas = 20 A e 11 horas = 32 A), com estágios contínuos, mas de duração variada.

#### 4. Conclusões

O processo de limpeza eletrolítica pode ser utilizado para desbaste de material da superfície da chapa de teste como etapa de preparação antes de medição das tensões residuais por DRX. Nas condições de avaliação, o processo de desbaste mostrou boa repetitividade e estabilidade. Dependendo dos parâmetros de remoção, foi possível remover uma camada de espessura alvo de 250  $\mu\text{m}$  em menos de 5 min, o que atende às recomendações da norma ASTM E2860-12 em um tempo razoavelmente curto.

A taxa de remoção média para aço AISI 304 pode ser de 8 ou até 12  $\mu\text{m}/\text{min}$ , para corrente de 19 A e 30 A, respectivamente, usando-se a solução eletrolítica indicada pelo fabricante do equipamento para polimento. Para aço ao carbono, a taxa de remoção pode chegar até 100  $\mu\text{m}/\text{min}$  para uma corrente de 65 A, usando-se uma Solução 1 proposta neste trabalho à base de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (19%) e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (9%), diluídos em água.

A rapidez de remoção da espessura desejada depende dos dois principais parâmetros de remoção, a saber, do valor da corrente e da composição química da solução eletrolítica. Porém, uma corrente maior proporciona menor

tempo necessário para remover a espessura alvo, mas aos custos de um maior consumo da solução eletrolítica. Em relação ao efeito da composição química da solução eletrolítica, pode se afirmar que solução com maior concentração de ácidos mostrou menor capacidade de remoção nas mesmas condições de teste.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU pela oportunidade para realização do trabalho. Também ao CNPq pela bolsa do projeto 149308/2014-0, FAPEMIG e CAPES, pelo fornecimento de bolsa de pesquisa e de bolsas de estudo (doutorado). Adicionalmente, gostariam de agradecer ao Grupo Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem - LAPROSOLDA pela disponibilização de equipamentos insumos.

## Referências

- [1] Lancaster J. Engineering catastrophes: causes and effects of major accidents. 3. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2005. 289 p.
- [2] American Welding Society. AWS A3.0M/A3.0:2010: standard welding terms and definition. Miami: AWS; 2010.
- [3] Scotti A. Modelos de cinco barras e de uma barra para geração de tensões térmicas na ZF, ZAC e MB durante soldagem a arco. *Soldagem e Inspeção*. 2014;19(1):82-90. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242014000100010>.
- [4] De A, Debroy T. A perspective on residual stresses in welding. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2011;16(3):204-208. <http://dx.doi.org/10.1179/136217111X12978476537783>.
- [5] Rossini NS, Dassisti M, Benyounis KY, Olabi AG. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials & Design*. 2012;35:572-588. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>.
- [6] Lachmann C, Nitschke-Pagel T, Wohlfahrt H. Non-destructive characterization of fatigue processes in cyclically loaded welded joints by the Barkhausen noise method. In: 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring; 1999. Stanford: Stanford University; 1999.
- [7] Cullity BD. Elements of X-Ray diffraction. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company; 1956. 525 p.
- [8] Li A, Ji V, Lebrun JL, Ingelbert G. Surface roughness effects on stress determination by the X-ray diffraction Method. *Experimental Techniques*. 1995;19(2):9-11. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.1995.tb00840.x>.
- [9] Ott MH, Lohe D. The influence of surface roughness on the refraction of X-rays and its effect on bragg peak positions. *Advances in X-Ray Analysis*. 2003;46:232-237.
- [10] Prevey P. X-ray diffraction residual stress techniques. Metals Park: American Society for Metals; 1986. p. 192-380. (Metal Handbook, 10).
- [11] Fitzpatrick ME, Fry AT, Holdway P, Kandil FA, Shackleton J, Suominen L. Determination of residual stresses by X-ray diffraction. *Measurement Good Practice Guide*. 2005;52(2):31-36.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM E2860-12: standard test method for residual stress measurement by X-Ray diffraction for bearing steels. West Conshohocken: ASTM; 2012.
- [13] Gou R, Zhang Y, Xu X, Sun L, Yang Y. Residual stress measurement of new and in-service X70 pipelines by X-ray diffraction method. *NDT & E International*. 2011;44(5):387-393. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.03.003>.
- [14] Hilson G, Simandjuntak S, Flewitt PEJ, Hallam KR, Pavier MJ, Smith DJ. Spatial variation of residual stresses in a welded pipe for high temperature applications. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2009;86(11):748-756. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2009.07.003>.
- [15] Rai S, Jayakumar T, Rao CB, Bhattacharya DK, Raj B. Residual stress measurement in ferritic steel tube welds using X-ray diffraction. *Science and Technology of Welding and Joining*. 1998;3(4):204-207. <http://dx.doi.org/10.1179/stw.1998.3.4.204>.
- [16] Brown TB, Dauda TA, Truman CE, Smith DJ, Memhard D, Pfeiffer W. Predictions and measurements of residual stress in repair welds in plates. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2006;83(11-12):809-818. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.08.012>.
- [17] Tsuji A, Okano S, Mochizuki M. Method of X-ray residual stress measurement for phase transformed welds. *Weld World*. 2015;59(4):577-583. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-015-0232-5>.
- [18] Harati E, Karlsson L, Svensson L-E, Dalaei K. The relative effects of residual stresses and weld toe geometry on fatigue life of weldments. *International Journal of Fatigue*. 2015;77:160-165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.03.023>.
- [19] Tegart WJ. The electrolytic and chemical polishing of metals in research and industry. London: Pergamon Press; 1956. 180 p.
- [20] Bull JP, Lawrence JC. Thermal conditions to produce skin burns. *Fire and Materials*. 1979;3(2):100-105. <http://dx.doi.org/10.1002/fam.810030208>.
- [21] British Standards Institution. BS EN 15305/2008: non-destructive testing: test method for residual stress analysis by X-ray diffraction. London: BSI.
- [22] Hadd JW. Residual stress measurement of polycrystalline silicon by X-Ray diffraction [master thesis]. Michigan: Central Michigan University Mount Pleasant; 2010.
- [23] Sokolovskaya EM. General chemistry. Moscow: Moscow University Publish; 1975. 702 p.