

Aplicação de um projeto de experimentos (DOE) na soldagem de tubos de zircaloy-4

Helder Antônio da Silva (FEG) - heldersilva@inb.gov.br
Messias Borges da Silva (USP) - messias@dequi.eel.usp.br



Resumo

Nas usinas nucleares que utilizam reatores Pressurized Water Reactor (PWR), uma das etapas essenciais ao seu funcionamento é a produção do elemento combustível que, entre outros processos, envolve a soldagem a ponto do Zircaloy-4. Neste trabalho, utilizou-se o Projeto de Experimentos (DOE - Design of Experiments) para estudar a influência das variáveis independentes Força do Eletrodo e Intensidade de Corrente sobre as variáveis de resposta Resistência da Solda, traduzida pela força de tração, e a Espessura de Parede da Solda. Os resultados indicaram que a Força do Eletrodo exerce maior influência na variável resposta do que na Intensidade de Corrente e que o DOE é uma ferramenta poderosa para o melhor entendimento do comportamento do processo e como ajuda ao experimentalista na tomada de decisão, além de apresentar resultados satisfatórios com relação ao tempo da qualificação e propiciar melhoria no processo de soldagem a ponto, devido à obtenção de parâmetros otimizados para esse processo.

Palavras-chave: DOE, nuclear, soldagem e tubos and zircaloy-4.

APPLICATION AT THE DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE) IN WELDING PROCESS FOR ZIRCALOY-4 TUBES

Abstract

The nuclear area is known for its technological development and the rigor applied in the safety aspects of its activities. One of such standards has a provision that requires the qualification of special processes, such as welding, for instance. Notwithstanding, the qualification cost of the resistance tack welding process for zircaloy-4 tubes is a high one, due to the cost of the raw material and the welding process itself. In order to bring down the cost and time involved, and also to enhance the reliability of the qualification process with a view to improving the production process involving tack welding of FA components, a design of experiments (DOE) approach was developed for tack welding of zircaloy-4 tubes. The DOE has presented satisfactory results in relation to reduction of the qualification time requirement, in addition to providing an improvement to the tack welding process, due to the determination of optimized process parameters.

Keywords: DOE, nuclear, welding, tubes and Zircaloy-4.

1. INTRODUÇÃO

A área nuclear é conhecida pelo seu desenvolvimento tecnológico e pelo seu rigor nas questões de segurança envolvendo suas atividades. Uma das normas dessa área possui um requisito que exige a qualificação de processos especiais, e um desses é o processo de soldagem. Porém, o custo da qualificação do processo soldagem a ponto por resistência dos tubos de zircaloy-4 é elevado, devido ao preço da matéria-prima e do próprio processo de soldagem.

Com os objetivos de reduzir o custo e o tempo e, ainda, aumentar a confiabilidade do processo de qualificação com vistas à melhoria do processo de soldagem a ponto, foi utilizado o DOE para esse processo de soldagem dos tubos de zircaloy-4.

A Metodologia de Planejamento e Análise de Experimentos, ou simplesmente Projeto de Experimentos (DOE), é uma ferramenta poderosa para a melhoria da qualidade e produtividade que, nos últimos anos, vêm sendo cada vez mais aplicada na indústria brasileira, em boa parte alavancada pela implantação da Estratégia Seis Sigma, principalmente pelas indústrias automobilísticas.

O DOE foi desenvolvido na década de 1920 pelo Sir R. A. Fisher, na Rothamsted Agricultural Field Research Station, em Londres, Reino Unido (ROWLANDS, 2003). Depois de Fisher ter introduzido a técnica e demonstrado o seu uso na agricultura, muitas pesquisas e desenvolvimento do DOE foram realizados, principalmente, na indústria química (ROWLANDS, 2003). Fisher sistematicamente introduziu pensamentos e princípios estatísticos dentro da investigação do planejamento de experimentos, incluindo o conceito de planejamento fatorial e a análise da variância. Apesar de as aplicações de planejamento estatístico na indústria terem começado em 1930, essa metodologia se tornou mais conhecida por volta de 1951, através do estudo sobre superfície de resposta, desenvolvido por Box e Wilson (MONTGOMERY, 2005).

Técnicas de planejamento de experimentos vêm sendo utilizadas como uma ferramenta para verificar o funcionamento de sistemas ou processos produtivos, permitindo a melhorias destes, como a redução na variabilidade e conformidade próximas do resultado desejado, além de diminuição no tempo de processo e, conseqüentemente, nos custos operacionais. A utilização de planejamentos experimentais que estejam embasados em fundamentos estatísticos proporciona aos pesquisadores a obtenção de um número máximo de informações do sistema em estudo, a partir de um número mínimo de experimentos (NETO; BRUNS; SCARMINIO, 2007).

Para Rodrigues e Iemma (2005), "o planejamento experimental, baseado nos fundamentos estatísticos, é sem dúvida alguma uma ferramenta poderosa para se chegar às condições otimizadas de um processo, desenvolvimento da formulação de produtos dentro das especificações desejadas ou simplesmente para avaliar efeitos ou impactos que os fatores têm nas respostas desejadas". Como referências adicionais, podem-se citar trabalhos como os de Güley et al. (2006), Wu et al. (2005), Vijian e Arunachalam (2007) e Rosa et al. (2008).

Taguchi et al. (2005) relataram que o conteúdo do tradicional projeto de experimento consiste primariamente de caminhos para expressar a variação individual e caminhos para separar tais variações. Estas incluem blocos para separar diferença condicional, aleatorização da experimentação, repetição de experimentos, distribuição e teste de significância, entre outros. Assim, o DOE será considerado uma técnica-chave para o desenvolvimento de produtos e processos robustos no século XXI (ROWLANDS, 2003).

Algumas organizações do setor nuclear mundial vêm utilizando o DOE, principalmente as organizações que dominam a tecnologia do ciclo do elemento combustível nuclear; para obtenção de melhorias dos seus processos e produtos, mas as publicações relacionadas a esses assuntos ainda ficam circunscritas aos ambientes de P&D, sem uma divulgação mais ampla.

No Brasil, a Indústrias Nucleares do Brasil S. A. (INB) é a organização responsável pelo ciclo do elemento combustível nuclear, ou seja, é a responsável pela produção do elemento combustível nuclear, desde a mineração do urânio até a montagem do elemento combustível propriamente dito. E é nesta última fase, a da montagem do elemento combustível, que o DOE encontra as melhores situações para a sua aplicação.

Um experimento é um procedimento no qual alterações propositalmente são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possam avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões dessas alterações (WERKEMA, 1996).

O processo, ou sistema, pode ser representado pelo modelo mostrado na Figura 1. Pode-se visualizar, nessa figura, o processo como uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas ou outros recursos que transformam algumas entradas (em geral material) em uma saída que tem uma ou mais variáveis-resposta observadas. Algumas das variáveis de processo são controláveis, sendo outras não-controláveis (MONTGOMERY, 2005).

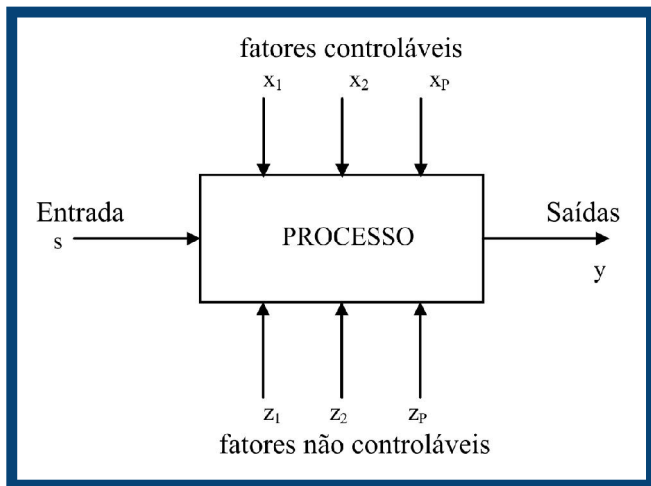


Figura 1 - Modelo geral de um processo ou sistema.

Fonte: MONTGOMERY, 2005.

Os objetivos do experimento para processos podem incluir:

1. Determinação de quais variáveis x mais influencia a resposta y (MONTGOMERY, 2005).
2. Determinação de intervalos de valores para os itens de verificação associados aos fatores controláveis x 's, de modo a obter cada item de controle centrado no valor nominal desejado e com uma variabilidade pequena em torno desse valor.
3. Determinação de intervalos de valores para os itens de verificação associados aos fatores controláveis x 's, as quais minimizam as ações dos fatores não-controláveis z 's sobre os itens de controle do processo (WERKEMA, 1996).

De acordo com Montgomery (1999), métodos de planejamento de experimentos são úteis também em atividades de projeto de engenharia, em que novos produtos sejam desenvolvidos e aqueles já existentes sejam melhorados.

Para usar a metodologia de planejamento de experimentos, é necessário que todos os envolvidos no experimento tenham compreensão qualitativa de como os dados serão analisados. Para tanto, deve-se elaborar um procedimento, podendo utilizar as diretrizes descritas a seguir, propostas por Montgomery (2005):

1. Primeiramente, deve-se reconhecer e relatar o problema. Na prática, geralmente é difícil perceber que existe um problema que exige experimentos planejados, de forma que pode não ser fácil obter um relato do problema, claro e aceito por todos. Usualmente, é importante solicitar entradas de todas as partes envolvidas - engenharia, qualidade, operadores etc. Um relato cla-

ro do problema e dos objetivos do experimento costuma contribuir substancialmente para uma melhor compreensão do processo e para uma eventual solução do problema.

1. Feitos o reconhecimento e o relato do problema, devem-se escolher os fatores e seus níveis. A pessoa que conduz o experimento deve escolher os fatores que devem variar, os intervalos sobre os quais esses fatores variarão e os níveis específicos nos quais cada rodada será feita. É importante investigar todos os fatores que possam influenciar as respostas do processo e evitar considerações de experiências passadas, particularmente nos estágios iniciais do experimento ou quando o processo não está ainda amadurecido. Quando o objetivo é a varredura dos fatores ou caracterização do processo, é geralmente melhor manter baixo o número de níveis de fatores.
1. Após a definição dos fatores e níveis, deve-se selecionar a variável-resposta. Na seleção da variável-resposta, o experimentador deve ter certeza de que aquela variável realmente fornece informação sobre o processo. Respostas múltiplas não são raras.
1. Se os três primeiros passos descritos anteriormente forem executados corretamente, a escolha do planejamento experimental será relativamente fácil. A escolha do tipo de planejamento envolve consideração sobre o tamanho da amostra (número de replicações), seleção de uma ordem adequada de rodadas para as tentativas experimentais e se a formação de blocos ou outras restrições de aleatorização estão envolvidas.
1. O quinto passo será a realização do experimento. Na execução do experimento, é de grande importância monitorar o processo, para assegurar que tudo esteja sendo feito conforme o planejamento. O planejamento do início ao fim do experimento é crucial para o sucesso da qualificação do processo.
1. Encerrada a execução do experimento, deve-se realizar a análise dos dados. Se o experimento foi planejado corretamente e realizado conforme o planejado, então os métodos estatísticos exigidos para a análise não será complexo. Vários pacotes estatísticos estão disponíveis para ajudar a análise dos dados além dos métodos gráficos que facilitam a interpretação dos dados.
1. Finalizando o procedimento para o planejamento de um experimento, devem-se elaborar as conclusões e recomendações. Uma vez analisados os dados, o experimento deve propiciar conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um plano de ação para a tomada de decisão a respeito do processo estudado.

Os passos 1 a 3 são geralmente chamados de planejamento pré-experimental. Para o sucesso do experimento, é vital que os passos anteriormente descritos sejam executados tão bem quanto possível.

Este trabalho demonstra uma aplicação da metodologia de planejamento e análise de experimento para o processo de soldagem a ponto por resistência, em tubos de zircaloy-4. Trata-se de um estudo de caso em uma linha de produção do Elemento Combustível Nuclear (EC) para utilização em reatores PWR (Pressurized Water Reactor - Reator de Água Pressurizada).

2. ESTUDO DE CASO

O setor nuclear é conhecido pelo seu pioneirismo no desenvolvimento tecnológico e pelos seus severos requisitos de segurança em suas atividades e instalações, sendo este último um dos itens controlados através de normas internacionais.

No Brasil, a preocupação com a segurança das atividades do setor nuclear não é diferente dos demais países, mesmo porque o licenciamento dessas atividades depende da liberação da Agência Internacional de Energia Atômica (International Atomic Energy Agency - IAEA), órgão ligado à Organização das Nações Unidas (ONU) para assuntos envolvendo energia nuclear no mundo.

Devido a esse rígido sistema, as operações no setor nuclear brasileiro possuem normas reguladoras, desenvolvidas para garantir a qualidade e segurança dos produtos utilizados para fins de geração de energia elétrica.

Um dos requisitos normativos da área nuclear exige a qualificação de processos especiais de fabricação do Elemento Combustível Nuclear (EC), como o processo de soldagem. É devido à necessidade de cumprimento desse requisito que se faz necessária a realização de testes para comprovação do controle do processo e, conseqüentemente, a qualidade dos componentes do Elemento Combustível Nuclear. Assim, foi decidida a aplicação da metodologia de planejamento e análise de experimento para a qualificação do processo de soldagem a ponto de tubos de zircaloy, para recarga do reator de Angra 1, levando-se em consideração a redução no custo e a confiabilidade dessa metodologia.

A questão do custo para a qualificação deste processo de soldagem é um ponto importante, devido ao custo elevado dos componentes de zircaloy-4, uma vez que esse material é importado e o custo de produção, principalmente de tubos desse material, é muito elevado.

Para melhor entendimento do processo de qualificação da soldagem a ponto do tubo de zircaloy-4, é necessária uma breve explicação sobre o Elemento Combustível Nuclear e a função desses tubos na sua estrutura, bem como uma breve descrição de características importantes do zircaloy-4.

Para Silva et al. (2005), o Elemento Combustível Nuclear (EC) possui como estrutura principal o que é denominado "esqueleto". O esqueleto é formado pela junção rígida dos tubos-guia da vareta de controle às grades espaçadoras e aos bocais inferior e superior, como apresentado na Figura 2.



Figura 2 - Esqueleto do EC.

Fonte: SILVA ET AL, 2005.

O tubo-guia tem a função de ser, como o próprio nome indica, um guia para as barras de controle. Essas barras irão deslizar no interior dos tubos-guia, durante a operação no interior do reator nuclear, para controlar a radioatividade do Elemento Combustível. O tubo-guia também possui outra função: permitir a introdução de tubos de instrumentação. Esses tubos de instrumentação são responsáveis pela leitura de parâmetro de controle do reator nuclear, como temperatura, radioatividade etc.

O material normalmente utilizado como tubo-guia e tubo de revestimento é uma liga de zircônio, conhecida como zircaloy, que possui boas características mecânicas, resistência à corrosão e baixa seção de choque de absorção (SILVA et al., 2005). Atualmente, o zircaloy utilizado nos tubos do esqueleto do EC é o zircaloy-4, que consiste em uma liga de 98,23% em peso de zircônio com 1,45% de nitreto de titânio, 0,21% de ferro, 0,10% de cromo e 0,01% de háfnio.

As propriedades do zircaloy-4 podem ser melhoradas através de uma pequena adição de níquel, resul-

tando em significativa melhoria na resistência à corrosão nodular sem diminuir a resistência à corrosão uniforme e a absorção média de hidrogênio.

Para que as ligas de zircônio possam ser utilizadas em reatores nucleares, deve ser realizada uma descontaminação do háfnio, pois este possui taxa de absorção de neutro muito elevado, cerca de 600 vezes mais que o zircônio, o que é danoso para a operação do reator, pois diminui a sua radioatividade.

O zircônio encontrado na natureza possui entre 1% e 5% de háfnio, o qual terá que ser removido. O processo de remoção do háfnio é muito difícil, o que torna as ligas de zircônio para uso em reatores nucleares 10 vezes mais caras que a liga comercial.

A utilização de ligas de zircônio em reatores nucleares teve início em meados da década de 1970, sendo atualmente bastante utilizada, apesar do seu elevado custo de obtenção.

Existem ainda outras ligas à base de zircônio sendo utilizadas em reatores nucleares, como E110 na Rússia, o ZIRLO na Westinghouse (EUA) e o M5 na Framatome - ANP (França); essas ligas possuem cerca de 1% de nióbio em sua composição, o que aumenta ainda mais a resistência à corrosão.

A junção entre os tubos-guia e as grades espaçadoras se dão através da soldagem a ponto por resistência entre o tubo e a luva da grade espaçadora. Essa solda faz que o conjunto tenha maior rigidez e resistência mecânica, características importantes para o bom desempenho do Elemento Combustível em atividade no reator.

A soldagem a ponto por resistência é um método através do qual é possível soldar barras, tubos ou, mesmo, chapas, igualmente por efeito de resistência elétrica, após alinhá-los na direção do seu eixo longitudinal e mantê-los sob pressão durante a passagem de corrente elétrica (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

O princípio de funcionamento da soldagem por ponto, como é conhecida, é apresentado na Figura 3.

Verifica-se, através da Figura 3, que as chapas sobrepostas são mantidas em contato por meio de dois eletrodos de cobre, e uma corrente elétrica bastante intensa percorre o circuito elétrico, durante um curto período de tempo. A passagem dessa corrente provoca a liberação de calor na interface de contato das duas chapas, por efeito de resistência elétrica. As superfícies são, então, fundidas, e a pressão mantida entre as chapas é suficiente para formar o ponto de solda. A liberação de calor também ocorre no ponto de contato entre a chapa e o eletrodo, mas este é resfriado internamente, razão

pela qual não provoca a própria fusão e nem da chapa com a qual está em contato (NAKANO, 2005).

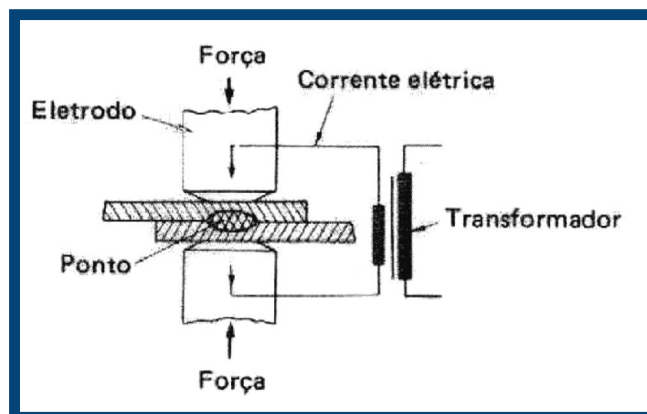


Figura 3 - Processo de soldagem por ponto.

Fonte: NAKANO, 2005.

No processo de soldagem a ponto por resistência, o calor necessário para produzir a solda é obtido através do efeito Joule, ou seja, pela resistência dos materiais à passagem da corrente elétrica. A forma em que é gerada a energia implica que não são necessários materiais consumíveis, gases de proteção e controle de movimento durante a soldagem. (NAKANO, 2005).

Embora a qualidade do ponto de solda seja um fator importante na determinação da resistência da ligação, os parâmetros dimensionais do espécime também são de grande influência. Contudo, não existe atualmente um padrão estabelecido para construção de espécime soldado a ponto, bem como critérios de aceitação e procedimentos de teste. Tal padrão poderia aproximar e correlacionar os diferentes estudos existentes. Há, sim, os procedimentos e diretrizes de organizações de padronização e procedimentos elaborados dentro dos ambientes industriais. Nestes últimos, utiliza-se a experiência interna para depois transformá-la como padrão em sua linha de produção.

Sob uma óptica metalurgista, o efeito de expulsão do material do ponto de solda não reduz necessariamente a resistência da junta. Em certos níveis de corrente elétrica e força de prensagem, a expulsão e, por conseguinte, a ocorrência de endentação na área de pressão propicia aumento na resistência do ponto sujeito à carga estática ou, mesmo, quando considerada a vida em fadiga (KIMCHI, 1984).

Efeitos indesejáveis devido à conformação mecânica durante a preparação das partes a serem soldadas também possuem a sua importância na análise da quali-

dade da ligação. Radaj e Zhang (1998) investigaram os efeitos que a presença de leves oscilações, gerados pelo processo de preparação dos materiais a serem soldados, teriam o sentido de perturbar as medições de carregamento na região do ponto. Radaj e Zhang (1998) estudaram a influência desse defeito, já que na modelagem por elementos finitos, em geral, assume-se que os materiais empregados e a geometria do modelo não possuem esse tipo de irregularidade. Os resultados indicaram variações na medida de carga em nível tal que poderiam ser desprezadas na maior parte das aplicações.

Em estudos posteriores, motivados por intensas experimentações, indicaram que a espessura das chapas do metal-base, bem como a razão entre o diâmetro e a espessura das chapas, é parâmetro importante na determinação da resistência do ponto de solda (NAKANO, 2005). Portanto, considerando o exposto anteriormente, os objetivos do experimento para este trabalho foram:

1. Encontrar qual ou quais parâmetros (fatores controláveis) possui(em) maior influência na obtenção da força de tração (resistência da solda).
2. Determinar qual o melhor ajuste do processo, considerando-se como respostas a força de tração (resistência de solda) e a espessura da parede de solda.
3. Obter modelos matemáticos para predição da força de tração e da espessura da parede de solda.

A determinação de parâmetros ótimos para a espessura de solda se faz importante pelo fato de haver na montagem peças que passem externamente e durante a operação no reator nuclear, como citado anteriormente, terão a passagem de uma barra de controle e, ou, tubos de instrumentação. Essas peças poderão ser obstruídas por uma restrição interna, impedindo a montagem ou causando riscos (arranhões) que poderão causar corrosão do EC dentro do reator em operação. No caso da resistência da solda (força de tração), seguem procedimentos de reconhecida aplicação na indústria, bem como da teoria, como visto em parágrafos anteriores.

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Para a obtenção de resultados confiáveis e ter a possibilidade de repetir o experimento, foi elaborado um procedimento contendo as fases e os objetivos a serem atingidos em cada fase. Tal procedimento foi elaborado através do levantamento de dados técnicos oriundos de documentos internos e através da experiência do pessoal

técnico envolvido no experimento, bem como da literatura acerca do assunto. Segue nos parágrafos subsequentes a descrição das fases executadas de acordo com o planejamento descrito no procedimento de experimento.

Na primeira fase do experimento, realizou-se uma verificação dos dados de qualificações anteriores, e definiram-se os objetivos do experimento. Para isso, foi convocada uma reunião entre a equipe formada por técnicos para avaliação dos dados. Ficaram definidas também nesta reunião as próximas fases do experimento.

Na segunda fase do experimento, realizou-se uma análise dos documentos de engenharia do produto (especificações e desenhos), bem como dos planos de soldagem, para definir quais seriam as variáveis de respostas. Nesse momento, foi definido com os técnicos do laboratório que seriam realizados testes de tração para verificar a resistência da solda, e definiu-se também que seriam realizadas medições na espessura da parede do tubo, para verificar se houve deformidade no interior do tubo após a operação de soldagem.

Na terceira fase, definiram-se os fatores e seus níveis. Os valores determinados para os níveis encontram-se na Tabela 1 e foram baseados nas informações do Plano de Soldagem PLS-EC-012 revisão 4. Os níveis dos fatores foram arbitrariamente chamados de máximo e mínimo.

Tabela 1 - Níveis dos fatores para soldagem a ponto

FATORES	Nível Baixo (-)	Nível Alto (+)
A – Força no eletrodo (N)	2700	3100
B – Corrente aplicada (kA)	9,4	9,8

Na quarta fase ficou definido, com base nas fases anteriores, que para a realização dos experimentos seria, então, utilizado o Planejamento Fatorial Completo 2^2 , com dois níveis; e cada fator assumiria um valor máximo e um valor mínimo, obtendo-se quatro experimentos com cinco replicatas cada um. Essa escolha é devida às condições do equipamento de soldagem que possui restrições quanto ao controle de outros fatores. Essa fase do planejamento foi executada como planejada.

Planejamentos fatoriais são frequentemente usados nos experimentos envolvendo vários fatores, em que é necessário estudar o efeito conjunto dos fatores sobre uma resposta. Entretanto, vários casos especiais do planejamento fatorial geral são importantes pelo fato de eles serem largamente empregados em trabalhos de pesquisa e devido ao fato de eles formarem a base de outros pla-

nejamientos de considerável valor prático (MONTGOMERY, 2005). Essa observação deu base para a escolha do Planejamento de Experimento 2^k como a mais adequada para o experimento em questão.

O Planejamento de Experimento 2^k fornece o menor número de corridas para as quais os k fatores podem ser estudados em um planejamento fatorial completo, sendo o Planejamento de Experimento Fatorial Completo 2^2 o primeiro dos Fatoriais Completos 2^k , tendo dois fatores e dois níveis. Esse fator foi de grande importância para a realização de um experimento e, conseqüentemente uma qualificação de processo com custo menor, devido ao menor número de testes e à operação de soldagem, que seriam executados.

Ficou definido na quanta fase que a seqüência de realização dos experimentos seria aleatória, seguindo-se a indicação de um sorteio para determinar a ordem de cada experimento, sendo esse tipo de planejamento de experimento conhecido como experimento completamente aleatorizado. Pelo fato de os níveis dos fatores realmen-

te usados no experimento serem escolhidos aleatoriamente, as conclusões alcançadas seriam válidas para população inteira de níveis dos fatores. Essa seqüência está descrita na matriz de experimentos da Tabela 2.

A partir da definição da matriz de experimentos, foi realizada a operação de soldagem dos corpos de prova e, em seguida, os corpos de prova foram encaminhados ao laboratório de materiais, onde foram executadas as medições da espessura da parede de solda e os ensaios de tração, finalizando todo o processo de experimento. Por fim, foi elaborado um relatório de qualificação do processo em que foram descritas as fases e a forma como foram executados, assim como os resultados e as análises e verificações. Parte desse relatório está descrita neste trabalho.

Os equipamentos utilizados para realização do teste de tração e medição da espessura da parede estavam calibrados, conforme exigências de normas reguladoras do setor nuclear, assim como os profissionais que realizaram os testes estavam qualificados para tal.

Tabela 2 - Matriz de experimentos

Exper.	Ordem aleatória	Força aplicada no eletrodo (N)	Corrente aplicada (kA)
1	2	3100	9,4
2	18	3100	9,4
3	4	3100	9,8
4	3	2700	9,8
5	1	2700	9,4
6	20	3100	9,8
7	14	3100	9,4
8	9	2700	9,4
9	7	2700	9,8
10	10	3100	9,4
11	6	3100	9,4
12	12	3100	9,8
13	15	2700	9,8
14	13	2700	9,4
15	19	2700	9,8
16	16	3100	9,8
17	5	2700	9,4
18	11	2700	9,8
19	8	3100	9,8
20	17	2700	9,4

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os resultados dos experimentos são mostrados na Tabela 3.

4.1. Análise dos dados

Existem excelentes softwares para execução dos cálculos estatísticos que são utilizados também para preparar e processar experimentos fatoriais 2^k ; existem também métodos especiais para executar esses cálculos manualmente. Para este trabalho, os resultados dos experimentos apresentados foram processados através do software MINITAB® versão 15.

4.2. Análise dos resultados da força de tração

Analisando os resultados da força de tração (resistência da solda), observou-se pela Figura 4ab que o fator força no eletrodo (A) é o mais significativo, ou seja, é o parâmetro que mais influencia o processo, e a corrente aplicada (B) também influencia o processo, porém com menor intensidade.

O gráfico dos efeitos apresentado na Figura 4c demonstra que para a maximização da força de tração (resistência da solda) no processo de soldagem a ponto de tubos de zircaloy-4, os níveis dos parâmetros força no eletrodo (A) e a corrente aplicada (B) devem ser ajustados no máximo, ou seja, a força no eletrodo deve ser de 3.100 N e a corrente aplicada, ser de 9,8 kA.

Tabela 3 - Resultados de força de tração e espessura de parede

Exper.	Ordem aleatória	Força aplicada no eletrodo (N)	Corrente aplicada (kA)	Resultado força de tração (N)	Resultado espessura de parede (mm)
1	2	3100	9,4	16054	2,32
2	18	3100	9,4	16093	2,23
3	4	3100	9,8	16328	2,23
4	3	2700	9,8	15985	2,23
5	1	2700	9,4	14955	2,18
6	20	3100	9,8	16475	2,27
7	14	3100	9,4	15691	2,23
8	9	2700	9,4	14976	2,21
9	7	2700	9,8	15323	2,25
10	10	3100	9,4	16328	2,23
11	6	3100	9,4	16515	2,27
12	12	3100	9,8	16353	2,22
13	15	2700	9,8	14974	2,23
14	13	2700	9,4	15299	2,22
15	19	2700	9,8	15658	2,24
16	16	3100	9,8	16696	2,26
17	5	2700	9,4	14994	2,19
18	11	2700	9,8	15789	2,22
19	8	3100	9,8	16466	2,21
20	17	2700	9,4	15249	2,17

Helder Antônio da Silva
 Messias Borges da Silva

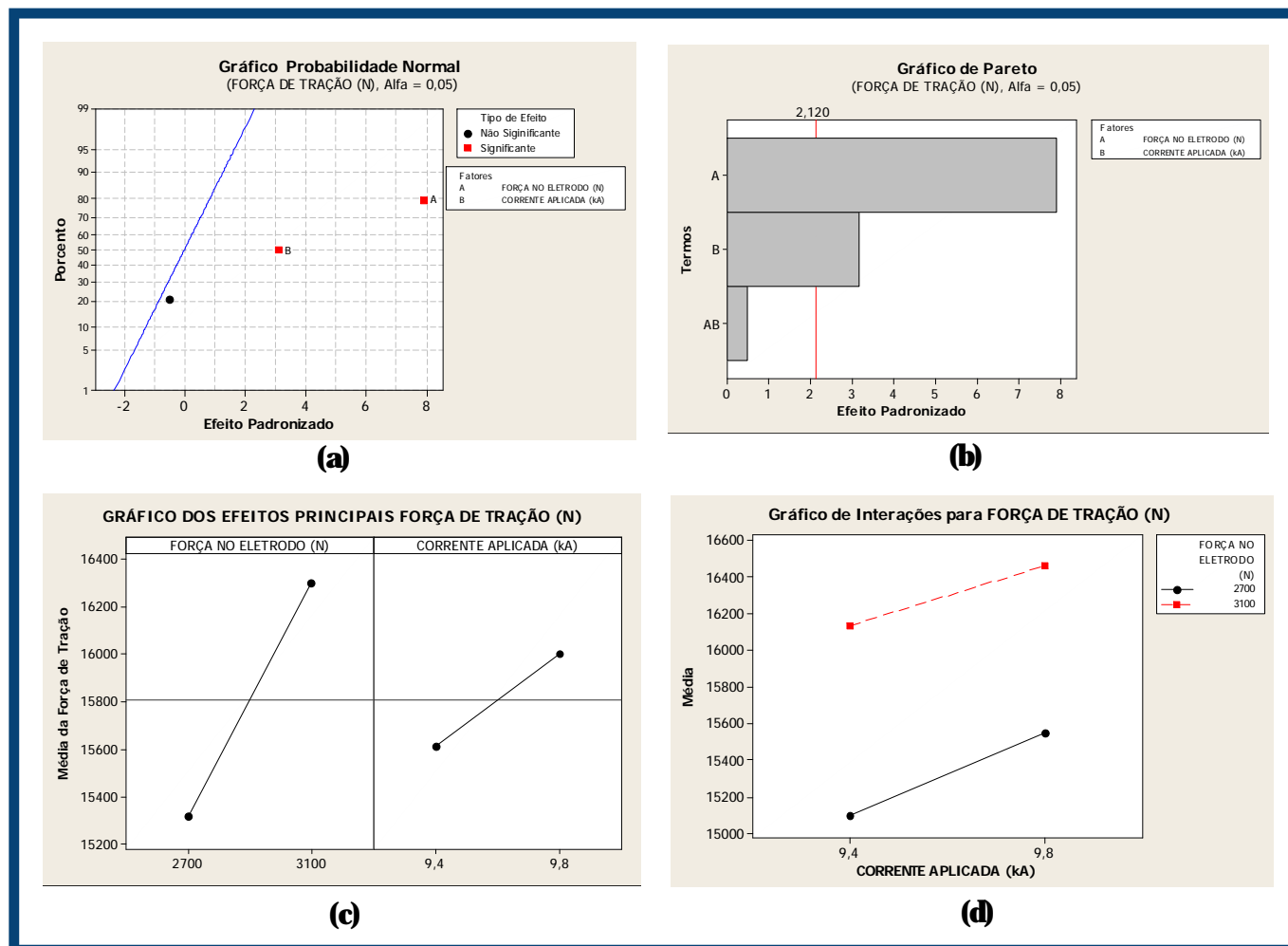


Figura 4 - Efeitos dos parâmetros na força de tração: (a) Gráfico de Probabilidade Normal, (b) Gráfico de Pareto, (c) Efeitos principais e (d) Gráfico de interações.

Através do gráfico de interações, Figura 4d, verifica-se que não há interações significativas entre os parâmetros, para obtenção da força de fração (resistência da solda). O modelo matemático utilizando variáveis escalonadas (codificadas) para predição da Força de Tração, obtido através de regressão linear múltipla, é o seguinte:

$$\hat{y} = 15811,80 + 488,80(A) + 193,60(B) - 29,90(A \times B) \quad (1)$$

em que A- é a variável codificada Força do Eletrodo e B- a variável codificada Intensidade de Corrente.

Os resultados do teste do modelo estão na Tabela 4 e indicam que o modelo se comporta muito bem para fazer predições dos valores médios da força de tração.

Os resultados encontrados são iguais aos valores médios das respostas observadas quando executados os experimentos conforme a variação dos níveis dos fatores, como apresentado na Tabela 4. Assim, pode-se dizer que o modelo matemático é capaz de prever com fidelidade os resultados da Força de Tração no processo de soldagem a ponto.

Tabela 4 - Teste e validação do modelo matemático

Experimento	Fator	Valor médio obtido da Força de Tração [N]		Valor predito pelo modelo
	Força do Eletrodo	Intensidade de Corrente		
3, 6, 12, 16 e 19	+1 (equivalente a 3100N)	+1 (equivalente a 9,8kA)	16463,6	16463,6
1, 2, 7, 10, e11	+1 (equivalente a 3100N)	-1 (equivalente a 9,4kA)	16136,2	16136,2

4.3. Análise dos resultados da espessura da parede de solda

Analisando os resultados da espessura da parede de solda, observa-se, pela Figura 5ab, que o fator força no eletrodo (A) é o mais significativo, ou seja, é o parâmetro que mais influencia o processo, e a interação (A x B) também o influencia, porém com menor intensidade.

O gráfico dos efeitos apresentado na Figura 5c demonstra que, para obtenção das respostas otimizadas da espessura da parede de solda no processo de soldagem a ponto de tubos de zircaloy-4, os níveis do parâmetro força no eletrodo (A) e a corrente aplicada (B) devem ser ajustados no máximo, ou seja, a força no eletrodo deve ser de 3.100 N e a corrente aplicada, de 9,8 kA.

Através do gráfico de interações, Figura 4d, verifica-se que há interação significativa entre os parâmetros para obtenção da espessura da parede de solda. E é devida a essa interação que os parâmetros devem permanecer no nível alto.

O modelo matemático utilizando variáveis escalonadas (codificadas) para predição da Espessura de Parede, obtido através da regressão linear múltipla, é o seguinte:

$$\hat{y} = 2,2355 + 0,02450 (A) - 0,00250 (B) - 0,01950 (A \times B) \quad (2)$$

Foi realizado um teste no modelo para validar sua capacidade de predição, e os resultados são mostrados na Tabela 5.

Os resultados encontrados são iguais aos valores médios das respostas observadas quando executados os experimentos conforme a variação dos níveis dos fatores (Tabela 5). Assim, pode-se dizer que o modelo matemático é capaz de predizer com fidelidade os resultados para a espessura da parede de solda no processo de soldagem a ponto.

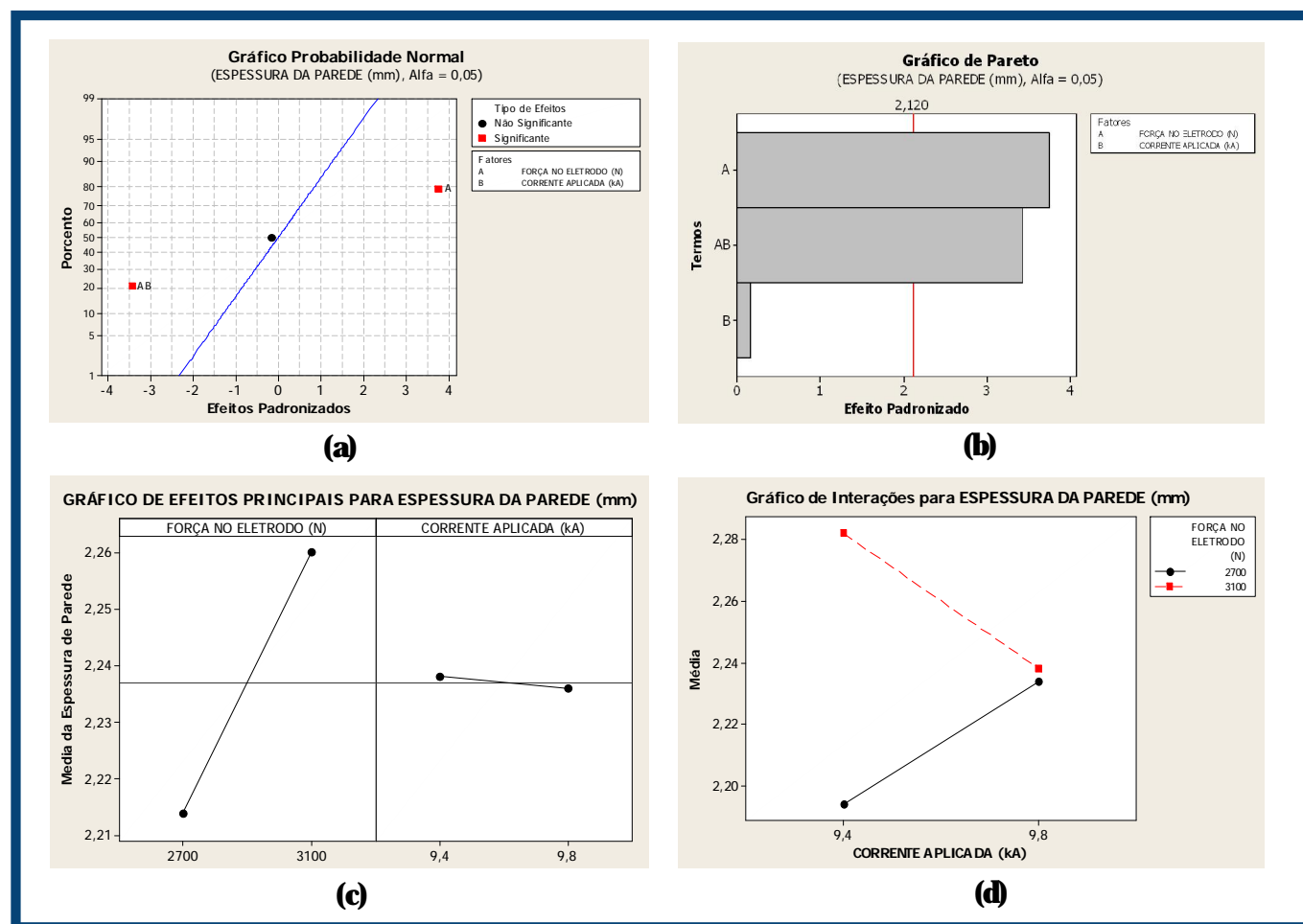


Figura 5 - Efeitos dos parâmetros na força de tração: (a) Gráfico Probabilidade Normal, (b) Gráfico de Pareto, (c) Efeitos principais e (d) Gráfico de interações.

Verificou-se também, por meio do teste do modelo, que o ajuste dos parâmetros no nível mais alto proporciona uma espessura da parede da solda menor que a combinação de outros ajustes de parâmetros.

Analisando os resultados tanto para a força de tração quanto para a espessura da parede de solda, observou-se a maior influência da força no eletrodo nesse processo de soldagem a ponto. Para otimização desse processo de soldagem a ponto, o parâmetro força no eletrodo deve ser ajustado no nível mais alto. Devido à possibilidade de haver aumento entre a stricção no interior do tubo e a interação; a corrente de solda deverá também ser ajustada no nível mais alto.

5. CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi apresentar uma aplicação do DOE para um processo de soldagem a ponto por resistência na indústria nuclear brasileira, tendo como objetivos identificar os parâmetros que mais influenciam o processo, obter o melhor ajuste dos parâmetros para otimização dos resultados do processo e, por fim, determinar os modelos matemáticos para melhor prever os resultados do processo em questão.

Os resultados obtidos através das análises realizadas apontaram que a aplicação do DOE no processo de soldagem a ponto nos tubos de zircaloy-4 foi bem-sucedida.

Verificou-se, através deste trabalho, melhoria no desempenho do processo de soldagem a ponto nos tubos de zircaloy-4, bem como redução do custo para a realização da qualificação desse processo, sendo a qualificação do processo uma exigência normativa estabelecida pelos órgãos nacionais e internacionais que regulam as atividades do setor nuclear. Os resultados foram satisfatórios, quando comparados com os de qualificações anteriores.

A melhoria da performance do processo de soldagem a ponto pôde ser evidenciada por meio de auditorias de processo realizadas durante a produção de elementos combustíveis para a Usina Nuclear de Angra 1. Já a redução do tempo da qualificação do processo de soldagem a ponto pôde ser demonstrada através da redução do número de experimentos, reduzindo, assim, a utilização de matéria-prima importada e de custo elevado.

Portanto, o DOE demonstrou ser também ferramenta muito útil e poderosa para ser aplicada no processo produtivo da indústria nuclear, devendo ser ampliado a outros processos de engenharia desse setor.

6. AGRADECIMENTOS

Ao engenheiro Adão Geraldo Dulce, pelo apoio à realização deste trabalho, assim como aos técnicos Adilson Pereira dos Santos e João Vivaldo Pereira, pela realização das soldagens dos corpos-de-prova. Ainda, aos técnicos do Laboratório de Materiais, pela realização dos ensaios de tração; ao tradutor Antônio Romero Maia da Silva, pela ajuda no abstract; e a todos os colaboradores das Indústrias Nucleares do Brasil, por, de alguma forma, terem contribuído para a realização deste trabalho. Também, ao Prof. Dr. Messias Borges Silva, da UNESP - Campus de Guaratinguetá, pela imprescindível orientação.

7. REFERÊNCIAS

- GÜLEY, V.; TEKKAYA, A.E.; SAVAS, T.; ÖZHAN, F. Influence of heat treatment and grinding conditions on surface residual stresses in the production of rollers. **Materials Science Forum**, Zurich, v. 524-525, p. 317-322, 2006.
- KIMCHI, M. Spot weld properties when welding with expulsion – A comparative study: Reduced strength does not necessarily result when resistance spot welds are made under expulsion conditions. **Welding Journal, American Welding Society**, v. 63, p. 58s-62s, fev. 1984.
- MONTGOMERY, D. C. **Applied statistic and probability for engineers**. 2nd edition. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 6th edition. Arizona: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- NAKANO, R. K. **Influência da taxa de deformação na falha de uniões por solda a ponto**. São Paulo: EDUSP, 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- NETO, B.B.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos**. Campinas, SP: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1982 (The Association for International Technical Promotion: welding engineering and its applications).
- RADAJ, D.; ZHANG, S. Weld spot force evaluation with dented sheet material. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 61, p. 673-678, 1998.
- RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. [S.l.]: Casa do Pão, 2005.

ROSA, J.L.; ROBIN, A.; SILVA, M.B.; BALDAN, C.A.; PERES, M.P. Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach. **Journal of Materials Processing Technology**, p.1-31, 2008. In press.

ROWLANDS, H.; ANTONY, F. Application of design of experiments to a spot welding process. **Assembly Automation**, v. 23, n. 3, p. 273-279, 2003.

SILVA, H. A. et al. **Manual do elemento combustível**. 1. ed. Resende, RJ: Indústrias Nucleares do Brasil S.A. – INB, 2005.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. **Taguchi's quality engineering handbook**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

VIJIAN, P.; ARUNACHALAM, V.P. Modeling and multi objective optimization of LM24 aluminium alloy squeeze cast process parameters using genetic algorithm, **Journal of Materials Processing Technology**, Coimbatore, v. 186, p. 82-86, 2007.

WERKEMA, M. C. C. **Planejamento e análise de experimentos**: como identificar, avaliar as principais variáveis influentes em um processo. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, E.E.UFMG, 1996.

WU, D.H.; CHANG, M.S. Use of Taguchi method to develop a robust design for the magnesium alloy die casting process. **Materials Science & Engineering**, Taiwan, A379, p. 366-371, 2005.