

ESTUDO DE CASO: INFLUÊNCIA DO PROLONGAMENTO DO CORDÃO DE SOLDA GMAW (MIG/MAG) NA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO DO CONTORNO DA REGIÃO SOLDADA EM ESTRUTURAS TUBULARES SUJEITAS À FLEXÃO

DOI: 10.15552/2236-0158/abenge.v34n2p31-44

João Cláudio Ferreira Soares,¹ Frederico Nicolau Cesarino²

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso desenvolvido numa indústria do Polo Industrial de Manaus (PIM), no segmento de motocicletas. A pesquisa aborda a problemática da concentração de tensões no contorno do cordão de solda em ponto de solicitação mecânica de flexão em estrutura tubular soldada. Pesquisou-se como melhorar a resistência à fadiga do contorno da região soldada em tubos sujeitos à flexão; buscou-se investigar se o prolongamento do cordão de solda distribui as tensões concentradas no contorno do cordão de solda; investigou-se e caracterizou-se o processo de soldagem GMAW (MIG/MAG) e a análise experimental de tensões através da extensometria; estudou-se a viabilidade de aplicação do prolongamento do cordão de solda no projeto e na fabricação da estrutura tubular objeto de estudo, apresentando-se os resultados obtidos nos testes. Constatou-se, através da análise instrumental (extensometria), que, para o caso em estudo, havia significativa concentração de tensão, acima do limite de projeto, no contorno do cordão de soldagem em condições de prolongamento mínimo, o que ocasionou a quebra do tubo principal da junta “Y” na estrutura tubular, durante teste de resistência com carga máxima de projeto. O processo de fabricação indicou uma diferença significativa nos prolongamentos de cordão, ocorrendo de forma ocasional, não existindo padrão definido. Por meio dos testes, ficou estabelecida uma relação inversa entre os comprimentos dos prolongamentos e as tensões encontradas na região da quebra, sendo verificado que, ao se aumentar o prolongamento, as tensões nos contornos eram reduzidas a níveis menores do que os limites máximos de projeto. Estabeleceu-se um padrão de 10mm de prolongamento para o caso em estudo, e construiu-se uma amostra protótipo para avaliar operacionalmente a aplicação no processo produtivo. A análise experimental de tensões através da extensometria mostrou-se ferramenta técnica eficiente e fundamental para demonstrar o comportamento das estruturas diante das solicitações mecânicas às quais estão sujeitos diversos pontos da estrutura.

Palavras-chave: Soldagem GMAW (MIG/MAG); extensometria; *strain gages*; análise experimental de tensões; prolongamento do cordão de soldagem.

1 Professor Msc. Eng.; engmecanica.manaus@ulbra.br e claudio.ueabm@gmail.com

2 Professor Msc.; fredcesarino@hotmail.com

ABSTRACT

CASE STUDY: THE INFLUENCE OF THE EXTENSION OF WELDING CORD GMAW (MIG / MAG) IN THE STRESS DISTRIBUTION OF CONTOUR OF THE WELDED REGION IN TUBULAR STRUCTURES SUBJECTED TO BENDING

This paper presents a case study developed in industry of Manaus Industrial Pole (PIM), in the motorcycle segment. The research addresses the problem of stress concentration on the boundary of the weld – point bending mechanical stress in welded tubular structure. Researched how to improve the fatigue resistance of the boundary of the welded tubes subject to bending; investigated whether the prolongation of the weld distributes the stresses concentrated in the contour of the weld; investigated and characterized the process of GMAW (MIG/MAG) and experimental analysis of stresses through the gage; studied the feasibility of the extension of the weld in the design and manufacture of the tubular object of study, and presents the results obtained in the tests. Found by instrumental analysis (gage) which for this particular case there is significant stress concentration above the limit of design, the outline of the cord in conditions of welding minimum extension, which caused breakage of the main tube joint “ Y “ tubular structure during the endurance test with maximum design load. The manufacturing process indicated a significant difference in the prolongations cord occurring on an occasional basis, with no set pattern. Through testing it was established an inverse relationship between the extensions of greetings and tensions found in the region of the break, and found that the increasing tensions in the extension contours were reduced to levels below the maximum project. Established a standard 10mm extension for the case study and built a prototype to evaluate operationally sample application in the production process. The experimental analysis of stresses through the gage proved efficient technical and fundamental tool to demonstrate the behavior of the structures on the mechanical stresses to which they are subjected various points of the structure.

Keywords: Welding GMAW (MIG/MAG); extensometry; strain gages; experimental stress analysis; extension cord welding.

INTRODUÇÃO

No contexto atual da dinâmica das indústrias de transformação, surgem problemas que necessitam de rápida, simples e eficiente intervenção, com o objetivo de melhorar a qualidade e minimizar os custos de falhas, principalmente para preservar a imagem do produto ou empresa. Para cada problema encontrado, há sempre mais de uma alternativa de solução. Pela dinâmica e especificidade de cada processo e produto, deve-se realizar uma análise instrumental que apresente dados consistentes capazes de demonstrar os pontos que necessitam melhorias. Os processos de soldagem são importantíssimos para a construção mecânica de estruturas sujeitas a diversos tipos de solicitações mecânicas. Este trabalho apresenta um estudo de caso que se desenvolveu dentro de uma multinacional japonesa, no segmento de duas rodas, com planta no Polo Industrial de Manaus (PIM). A problemática

aborda, mais especificamente, o projeto e a fabricação de estruturas tubulares obtidas por processo de soldagem GMAW (MIG/MAG), submetidas a solicitações mecânicas de flexão. O ciclo repetitivo de flexão dessas estruturas pode promover a fadiga localizada junto às regiões soldadas, particularmente no contorno do cordão de solda. A ação da tensão localizada nessas regiões, mesmo que abaixo do limite de resistência do material, combinada com o ciclo repetitivo de trabalho (flexão), pode promover a fadiga prematura no contorno do cordão de solda, gerando microtrincas que se propagam até causar a quebra da estrutura.

O objetivo geral da pesquisa foi investigar se, em estruturas soldadas sujeitas à flexão, o prolongamento do cordão de solda distribui as tensões concentradas no contorno do mesmo. Estudou-se a viabilidade de aplicação do prolongamento do cordão de solda no projeto e na fabricação da estrutura

tubular objeto de estudo; e são apresentados, ao final, os resultados obtidos nos testes.

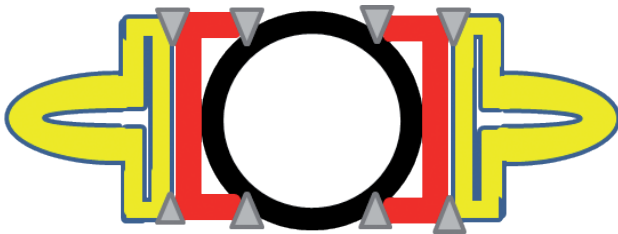
EXTENSOMETRIA

A extensometria é ferramenta técnica eficiente e fundamental na análise experimental de tensões para demonstrar o comportamento das estruturas diante das solicitações mecânicas às quais estão sujeitos diversos pontos da estrutura. Essa análise é eficaz para identificar pontos críticos em projetos, permitindo ao projetista aplicar melhorias a fim de aumentar a qualidade (HOLLISTER, 1967).

PROBLEMÁTICA

Este estudo de caso trata de um problema específico de concentração de tensão no contorno do cordão de solda, em uma estrutura tubular, em um ponto de união em “Y”, no qual dois tubos laterais encontram um tubo principal. Os pontos dessa união recebem uma placa reforço que é soldada antes da adesão dos tubos laterais. Os dois tubos laterais são conformados no ponto de união com o reforço para obter uma geometria plana no contato com o reforço.

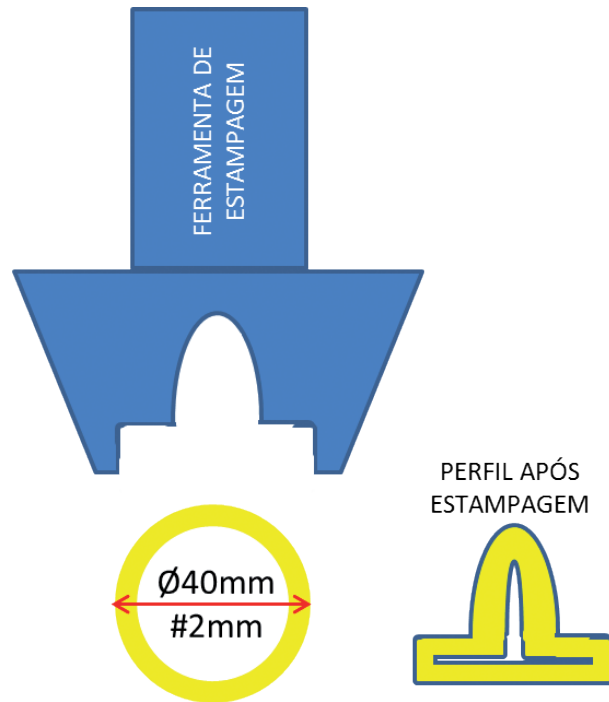
Figura 1: Esquema da junta soldada em corte: tubo principal (preto); placa reforço (vermelho); tubos laterais (amarelo); e cordão de solda (cinza).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os tubos laterais são de 40mm, com espessura de 2mm, sendo conformados na região de contato com o reforço a fim de melhorar a fixação da junta soldada.

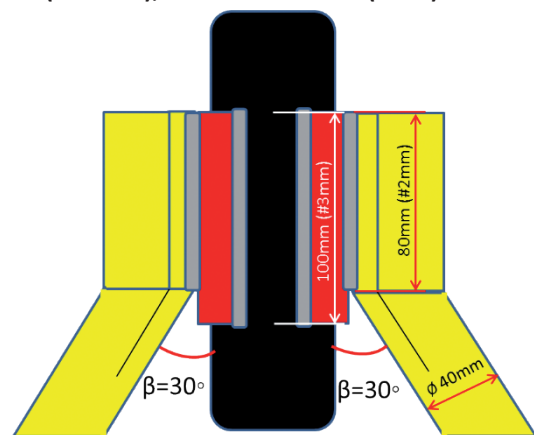
Figura 2: Esquema da ferramenta de estampagem do tubo lateral e moldagem.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 3, a vista superior da junta “Y” soldada com as dimensões do reforço de 100mm e os ângulos dos tubos laterais. Verifica-se a posição dos cordões de solda (cor cinza), unindo o reforço ao tubo principal e os tubos laterais ao reforço.

Figura 3: Esquema da junta soldada na vista superior: tubo principal (preto); placa reforço (vermelho); tubo lateral (amarelo); e cordão de solda (cinza).

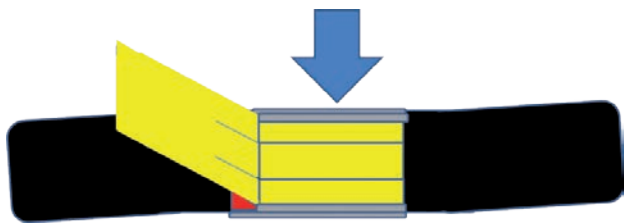


Fonte: Elaborado pelos autores.

O tubo principal da junta é o de maior solicitação mecânica, pois a absorção de energia mecânica nos tubos laterais é transmitida ao ponto de união com o tubo principal. A Figura 4, de forma teórica,

representa a aplicação de uma força concentrada para ilustrar o mecanismo de serviço da junta.

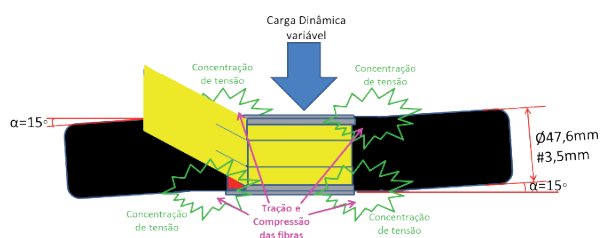
Figura 4: Esquema da aplicação de carga na estrutura (vista frontal em corte e vista lateral direita respectivamente).



Fonte: Elaborado pelos autores.

De forma ainda mais detalhada, a Figura 5 demonstra os pontos de concentração de tensão na junta e as solicitações mecânicas de tração e compressão às quais as fibras do material são submetidas.

Figura 5: Esquema do funcionamento da junta em serviço.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O material empregado, tanto no tubo principal como nos reforços e tubos laterais, é o aço estrutural ao carbono DIN ST52-3 (0,22% de carbono, limite de escoamento de 355MPa e ruptura 490 a 630MPa, alongamento mínimo de 22%, Módulo de Elasticidade $E=200\text{GPa}$, equivalente aos ASTM A572-50 e SM490A); o processo de soldagem é o GMAW (MIG/MAG) semiautomático, arame de 1,0 mm, corrente entre 160 e 220 A, tensão de 24~30 V, gás de proteção 100% Co₂.

Apesar de o limite de escoamento do material utilizado ser de 355MPa, está estabelecida no projeto da estrutura uma tensão admissível de no máximo 216MPa. É importante ressaltar que as tensões aplicadas são de cargas dinâmicas variáveis, bem mais difíceis de prever o comportamento e os picos de tensão por um modo de uso mais severo. A quan-

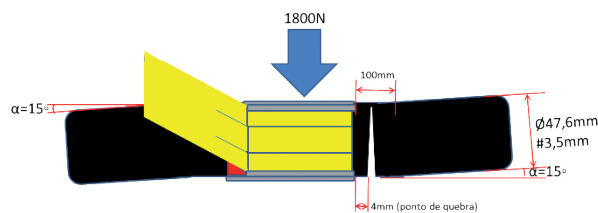
tificação real das tensões aplicadas à junta só pode ser obtida, nesse caso, através de instrumentação.

A união de elementos estruturais por soldagem por si só pode gerar concentradores de tensão capazes de amplificar as forças aplicadas. Isso porque a solda, mesmo isenta de defeitos, altera a microestrutura do material e acrescenta-lhe outros planos de escoamento antes inexistentes, ou seja, cria uma descontinuidade estrutural admissível. As estruturas soldadas submetidas a carregamentos dinâmicos devem ser avaliadas e testadas em sua resistência, antes de serem submetidas a uso, mesmo quando os cálculos teóricos garantem a resistência adequada. Isso, principalmente, quando falhas em serviço podem ser fatais e causar grandes prejuízos.

Condições de ocorrência

No mês de fevereiro de 2012, durante a realização de testes de rotina, para avaliar a resistência à fadiga das estruturas tubulares soldadas (citadas no tópico anterior), foi evidenciada a quebra, no ponto de união soldado em “Y” do tubo principal com os tubos laterais, na parte dianteira, iniciando na parte inferior a, aproximadamente, 4mm do cordão de solda do reforço. O problema ocorreu após 19.775 ciclos dos 250.000 necessários para aprovação da resistência à fadiga. Considera-se, nesse caso, uma quebra prematura. No ciclo do teste de resistência, a junta “Y” da estrutura é solicitada mecanicamente com uma força de aproximadamente 1.800N.

Figura 6: Esquema da condição de ocorrência de quebra.



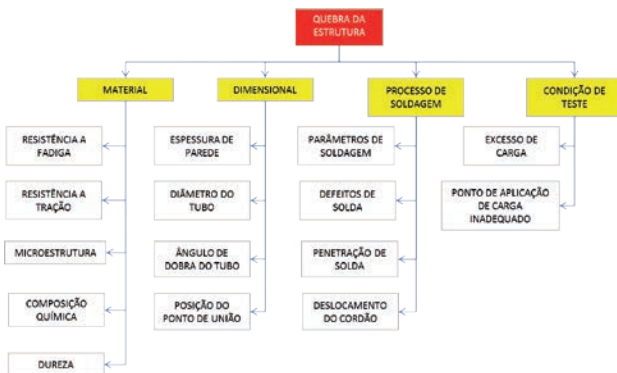
Fonte: Elaborado pelos autores.

Esclarecimento das causas

Para definir as causas e seus mecanismos, foram analisados os principais aspectos que envolvem o projeto, a fabricação e as condições de teste. Dessa forma, para facilitar o entendimento e a visualização

dos pontos relacionados ao problema, foi criado um FTA (*Failure Tree Analyse*), através de um *brainstorming* com especialistas. O objetivo foi sistematizar a análise e verificar cada ponto levantado, sua influência no problema e a relação de causa e efeito.

Figura 7: FTA das prováveis causas.

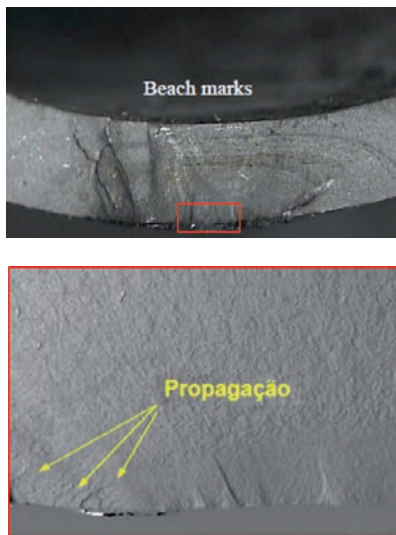


Fonte: Elaborado pelos autores.

Análise da fratura

Abaixo, a Figura 8 indica detalhe da região de início da ruptura. Observa-se que a superfície da peça apresenta aspecto de fratura instantânea, e a propagação aspecto de fratura por esforço cíclico, caracterizando fadiga mecânica.

Figura 8: Região de início da fratura.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Através da análise da região da fratura, fica caracterizado, por meio das deformações observadas na região, que a quebra ocorreu inicialmente por fadiga, resultado de solicitação variável, propagou-se de forma lenta, até tomar uma proporção que com-

promettesse a resistência e, então, finaliza com uma ruptura instantânea.

A fadiga é considerada prematura, pois, como foi mencionado, ocorreu com 19.775 ciclos dos 250.000 que o projeto admite, ou seja, aproximadamente 8% da vida útil prevista. Nesse caso, as condições de sobrecarga que causam fratura frágil podem ser desconsideradas.

A solda, por si só, caso não seja bem posicionada, pode concentrar tensões resultantes de solicitações de flexão. A ruptura por fadiga é responsável pela maior parte das falhas que ocorrem em serviço, e essa é uma consideração muito importante no projeto de diversos tipos de estruturas soldadas.

A trinca de fadiga tende a se iniciar em descontinuidades capazes de gerar concentrações de tensões; cordões de solda produzem, na maioria das vezes, concentrações de tensões, principalmente no contorno do cordão, capazes de reduzir, em alguns casos e para estruturas com trabalho cíclico, o limite de fadiga da junta.

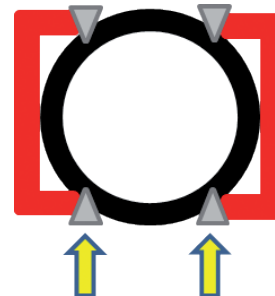
Como foi mencionado, a quebra ocorreu a 4mm da solda do reforço com o tubo principal, região termicamente afetada pela soldagem e considerada contorno do cordão.

Apesar de considerar necessária a análise das características do material, como dureza e resistência ao escoamento e à ruptura, a investigação das causas concentra-se em avaliar os aspectos de concentração de tensão e suas origens.

PROCESSO DE SOLDAGEM

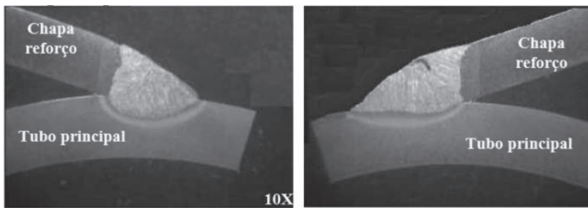
Não foram verificadas falhas ou defeitos de soldagem na peça de ocorrência, conforme avaliação visual, dimensional e macrografia abaixo.

Figura 9: Pontos de soldagem avaliados (inferior direito e esquerdo).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 10: Corpo de prova – Detalhe do caldeamento próximo à região de quebra.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os cordões de solda avaliados não apresentaram excesso de penetração, mordedura, trincas, porosidades ou qualquer outro tipo de descontinuidade.

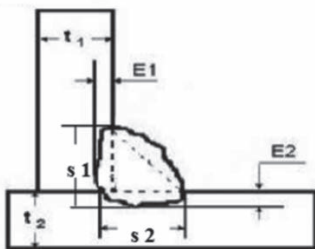
Quadro 1: Resultado da avaliação dimensional do caldeamento da solda.

CALDEAMENTO DO TUBO PRINCIPAL COM A PLACA REFORÇO

Item	Espessura (t)				Profundidade da Penetração (E)				Largura da penetração (s)			
	Tubo principal		Placa reforço		Tubo principal		Placa reforço		Tubo principal		Placa reforço	
Especificado	3,5mm (+10%)		3,0mm (+10%)		0,4mm (min)				3,5mm (min)		3,0mm (min)	
Região	inf. esq.	inf. dir.	inf. esq.	inf. dir.	inf. esq.	inf. dir.	inf. esq.	inf. dir.	inf. esq.	inf. dir.	inf. esq.	inf. dir.
Encontrado	3,6	3,6	3,1	3,2	0,6	1,2	0,5	0,4	4,1	6,8	3,0	3,2
Laudo	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 11: Esquema das características de caldeamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

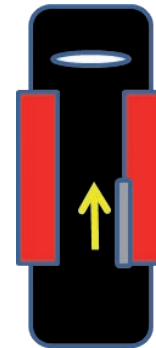
Da mesma forma, não há qualquer falha de penetração do arame de solda.

Anormalidade no prolongamento

Foram verificadas diferenças nas terminações dos cordões de solda das peças em processo, com variação de 5 a 17mm. Posteriormente, foram comparadas com a peça de ocorrência, outra do mesmo lote e uma peça aprovada no teste de resistência, encontrando-se diferença de 0 a 17mm. Não há definição em Padrão de Operação para prolongamento da terminação do cordão.

A soldagem é realizada de forma manual, sendo que o soldador puxa o cordão, conforme demonstrado na Figura 12, na direção da quebra.

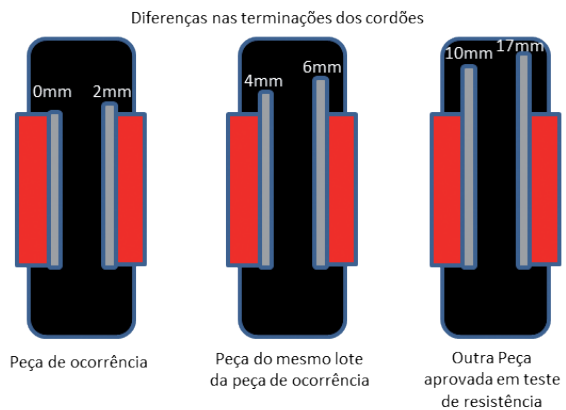
Figura 12: Representação do sentido de soldagem da placa reforço no tubo principal (de trás para frente, em direção ao ponto de quebra).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na análise do processo manual de soldagem (*in loco*), foi percebida uma variação nas terminações dos cordões de solda. Não estava definido ou estabelecido em Padrão de Operação nenhum prolongamento. Contudo, observaram-se diferenças significativas nas peças em processo. Após realizar-se uma avaliação utilizando a peça de ocorrência, peça do mesmo lote e uma peça aprovada no teste de resistência, foram verificadas as diferenças esquematizadas na Figura 13. A variação no prolongamento chegou a 17mm. Em processo, não havia variação menor que 5mm.

Figura 13: Representação das diferentes condições encontradas nas terminações dos cordões.



Fonte: Elaborado pelos autores.

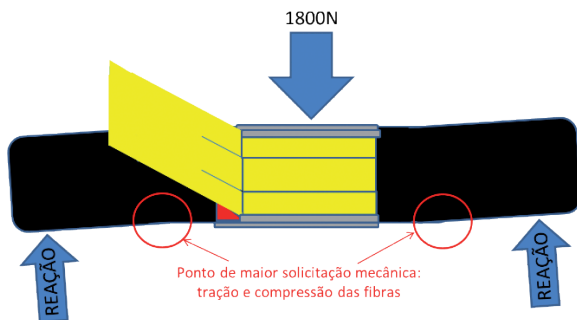
CONDIÇÕES DE TESTE

Carga: o teste de ciclagem foi avaliado quanto à sua criticidade e foi considerado dentro do padrão estabelecido, considerando-se a carga máxima

de projeto, que é de 1.800N, especificamente para essa junta com duas reações de apoio. O teste avalia a resistência da junta à fadiga, com 250.000 ciclos, sendo aplicado numa velocidade de 30 ciclos por minuto, de forma ininterrupta, em temperatura ambiente entre 25~30°C.

Ponto de aplicação de carga: o ponto de aplicação de carga está na união dos tubos laterais com o tubo principal, exatamente onde a junta é solicitada. Verifica-se que os pontos de maior solicitação mecânica estão nas regiões entre o reforço e a dobra do tubo principal, onde as fibras são tracionadas e comprimidas em cada ciclo, existindo uma deformação elástica do material, sendo visível a flexão do tubo principal. Ressalta-se que o teste é aplicado com frequência, de forma amostral, e outras juntas do mesmo projeto atenderam à carga e ao tipo de solicitação.

Figura 14: Representação da aplicação de força e reações com os pontos de maior solicitação mecânica.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Dessa forma, não foi encontrada nenhuma anormalidade no teste aplicado à peça de ocorrência que veio a quebrar prematuramente, com 19.775 ciclos, 8% do valor de teste.

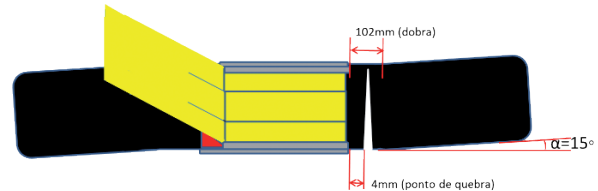
ANÁLISE DOS DEMAIS FATORES

Foram avaliados outros fatores considerados importantes, com base no FTA estabelecido na problemática, porém, não foram encontradas alterações fora dos padrões que pudessem ser relacionadas às causas. Contudo, os autores possuem todos os testes e evidências que comprovam a análise.

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES NAS CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA

Durante a análise do processo de soldagem, foram verificadas diferenças nos prolongamentos dos cordões de solda das peças em processo. Posteriormente, essas diferenças foram comparadas à peça de ocorrência, e, da mesma forma, a outras peças aprovadas em teste de resistência. A análise de especialistas apontou que, devido à proximidade do término do cordão com a dobra do tubo, sobre a região poderia incidir grande concentração de tensão, capaz de superar os valores tolerados pelo projeto e deformar o material acima dos limites de escoamento, causando pequenas trincas que, ao propagarem-se, chegariam a um limite crítico, causando, consequentemente, a quebra. Contudo, a teoria aceita por especialistas deveria ser comprovada através de um teste que demonstrasse essa concentração de tensão.

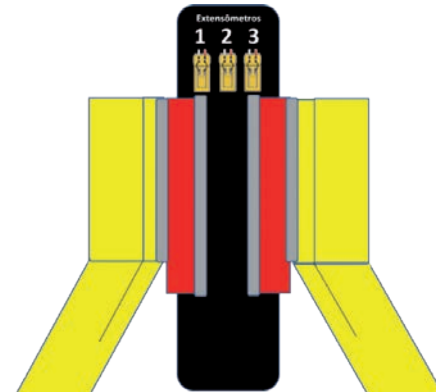
Figura 15: Representação da proximidade do contorno do cordão com a dobra do tubo principal e o local da quebra.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para realização da análise experimental de tensões, foi utilizado o ensaio de extensometria, a fim de avaliar a influência dos prolongamentos na concentração de tensão na região da quebra.

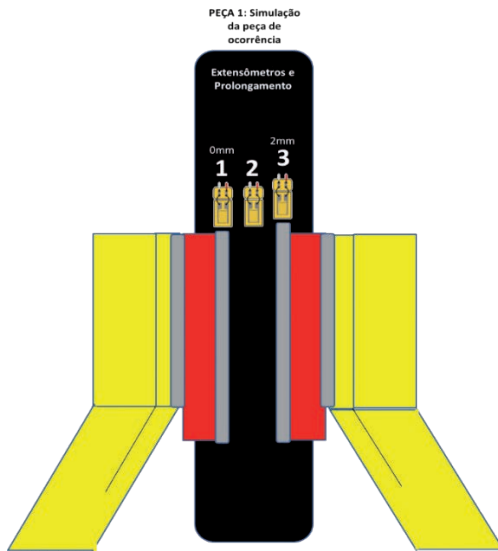
Figura 16: Esquema da posição dos extensômetros na parte inferior da junta.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O esquema da Figura 16 apresenta o método de aplicação dos extensômetros nas peças, sendo dois sensores no contorno dos cordões e um no meio, para comparar com região próxima, de mesma distância da dobra, porém, sem influência do contorno da solda. Os extensômetros, fixados à peça através de um adesivo, sofrem a mesma microdeformação da peça e variam sua resistência elétrica utilizando a propriedade dos condutores, pois sofrem variação da resistência conforme o alongamento ou a compressão. Os extensômetros são ligados a um receptor eletrônico que relaciona a grandeza elétrica (resistência) à grandeza física, que, no caso, é pressão (Força sobre área, MPa ou N/mm²). Obrigatoriamente, devem ser fixados no sentido da solitação (tração ou compressão das fibras do material). Três peças foram fabricadas, simulando as condições de prolongamento encontradas na análise.

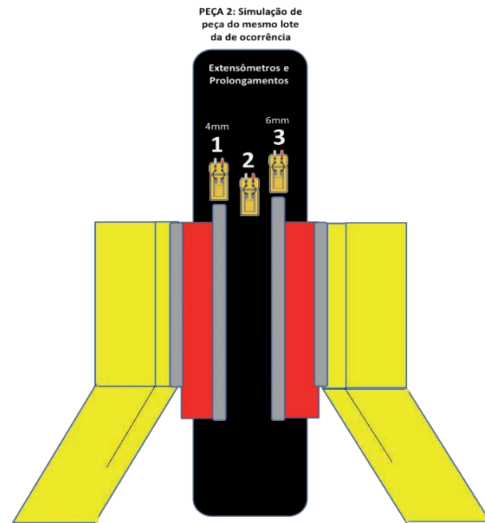
Figura 17: Esquema da Peça de simulação 1, nas condições da peça de ocorrência.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 17 apresenta o esquema da parte inferior em relação à aplicação de carga, com prolongamentos de 0 e 2mm, de acordo com a condição encontrada na peça de ocorrência. Extensômetros elétricos foram colocados nas posições 1 (0mm), 2 (sem cordão) e 3 (2mm), a fim de medir a microdeformação na região do contorno e relacioná-la com a força aplicada sobre a região (pressão em MPa).

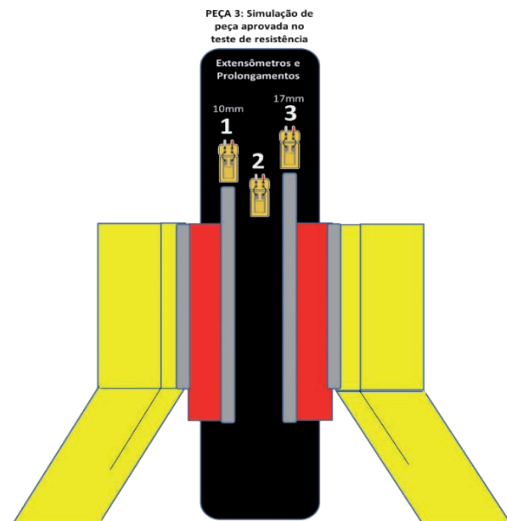
Figura 18: Esquema da Peça de simulação 2, nas condições encontradas em peça do mesmo lote da peça de ocorrência.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 18 apresenta o esquema da parte inferior em relação à aplicação de carga, com prolongamentos de 4 e 6mm, de acordo com a condição encontrada em peças do mesmo lote da peça de ocorrência. Extensômetros elétricos foram colocados nas posições 1 (4mm), 2 (sem cordão) e 3 (6mm), a fim de medir a microdeformação na região do contorno e relacioná-la com a força aplicada sobre a região (pressão em MPa).

Figura 19: Esquema da Peça de simulação 3, nas condições de peças aprovadas no teste de resistência.

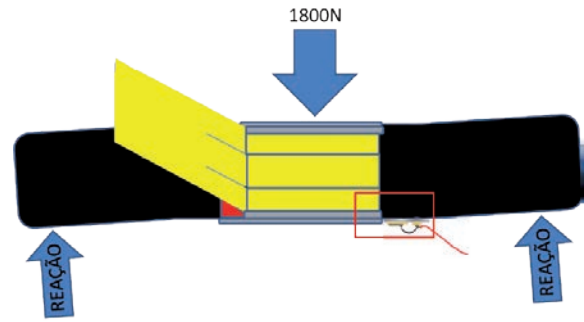


Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 19 apresenta o esquema da parte inferior em relação à aplicação de carga, com prolongamentos de 10 e 17mm, de acordo com a condição encontrada em peças aprovadas no teste de resistência. Extensômetros elétricos foram colocados nas posições 1 (10mm), 2 (sem cordão) e 3 (17mm), a fim de medir a microdeformação na região do contorno e relacioná-la com a força aplicada sobre a região (pressão em MPa).

A Figura 20 apresenta, de forma esquemática, a posição do extensômetro na vista lateral da junta.

Figura 20: Esquema da posição do extensômetro na vista lateral da junta.



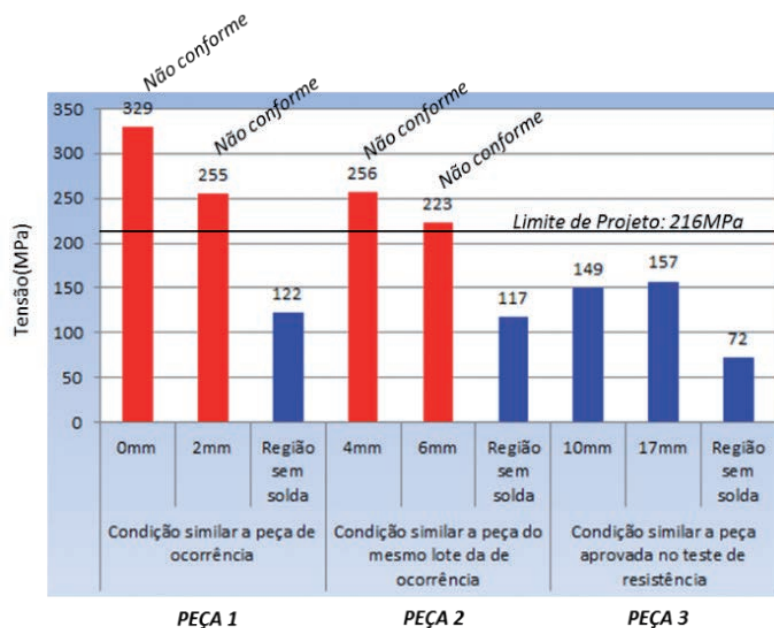
Fonte: Elaborado pelos autores.

Quadro 2: Resultados do teste de resistência.

PEÇA	Prolongamento do cordão de solda	Posição do extensômetro	Tensão máx. (MPa)		Laudo
			Projeto	Encontrada (Teste)	
1	0mm	1	216	329	RUIM
	Região sem solda	2		122	BOM
	2mm	3		255	RUIM
2	4mm	1		256	RUIM
	Região sem solda	2		117	BOM
	6mm	3		223	RUIM
3	10mm	1		149	BOM
	Região sem solda	2		72	BOM
	17mm	3		157	BOM

Fonte: Elaborado pelos autores.

Gráfico 1: Resultado do teste de resistência nas condições de ocorrência.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Verifica-se que as condições de 0, 2, 4 e 6mm de prolongamento apresentaram tensão máxima acima do limite de projeto, que é de 216MPa. A Peça 1 apresentou quebra na região inferior da junta após 21.565 ciclos, e a Peça 2 apresentou quebra após 51.680 ciclos. A Peça 3 suportou o teste de resistência após 250.000 ciclos. As peças 1 e 2 sofreram quebra com característica similar à da peça de ocorrência, ou seja, 4mm de distância do reforço. Apesar de o limite de escoamento do aço estrutural ao carbono DIN ST52-3 (especificado pelo fabricante, baseado em norma) ser de 355MPa, está estabelecida no projeto da estrutura uma tensão admissível de, no máximo, 216MPa, isso provavelmente devido à aplicação de coeficiente de segurança, principalmente por tratar-se de união dos elementos por soldagem; ou pode ter sido estabelecido experimentalmente – o projetista japonês não revela (trata-se de “*know-how*”) como foi especificada a tensão máxima de projeto. Contudo, através do experimento realizado, o valor estabelecido de 216MPa é totalmente consistente e adequado à realidade.

A análise experimental de tensões utilizando extensometria evidenciou a concentração de tensão no contorno do cordão de solda nas condições de reduzido prolongamento (2, 4 e 6mm) ou prolongamento inexistente (0mm). O teste mostra ainda que, na região sem solda, mesmo que seja ponto próximo a 0mm, não há concentração de tensão, tendo como fator decisivo o contorno do cordão. A Peça 3 apresentou uma condição mais favorável de distribuição da tensão no contorno do cordão, tendo limites máximos abaixo do limite de projeto.

Conclui-se que a causa da quebra na peça de ocorrência, após 19.775 ciclos, ocorreu devido à concentração de tensão causada pela inexistência de prolongamento do cordão de solda em região de tração e compressão das fibras.

PROPOSTA DE MELHORIA

Prolongamento do cordão de solda

A quebra ocorreu na parte inferior da junta, próximo ao contorno das terminações dos dois cor-

dões de solda que unem os reforços ao tubo principal, seccionando, assim, de baixo para cima, o tubo principal. Não foi verificado nenhum problema de subdimensionamento ou sobrecarga, até porque o problema foi detectado em teste de resistência em laboratório. Na etapa de análise do processo de soldagem, foi verificada uma diferença significativa e casual nas terminações das peças em processo, o que alavancou a hipótese de influência no problema. Ao checar as peças, percebeu-se a diferença da peça de ocorrência para as demais e, imediatamente, constatou-se a necessidade de realizar testes que evidenciassem a influência dessas diferenças e pudessem relacioná-las ao problema de quebra ocorrido. Os testes de extensometria comprovaram as hipóteses de influência na diferença de prolongamento e mostraram que o prolongamento ou a falta dele influenciavam na concentração ou não das tensões. Pelo teste, a inexistência de prolongamento, caso particular estudado, concentra as tensões no contorno da terminação do cordão de solda, e, em contraposto, um prolongamento a partir de 10mm distribui as tensões, no nível de projeto, eliminando o problema. Dessa forma, a proposta foi exatamente aproveitar o processo de soldagem e aplicar prolongamentos de 10mm nos dois cordões da parte inferior da junta, que unem o reforço ao tubo principal.

TESTES COM PROTÓTIPOS

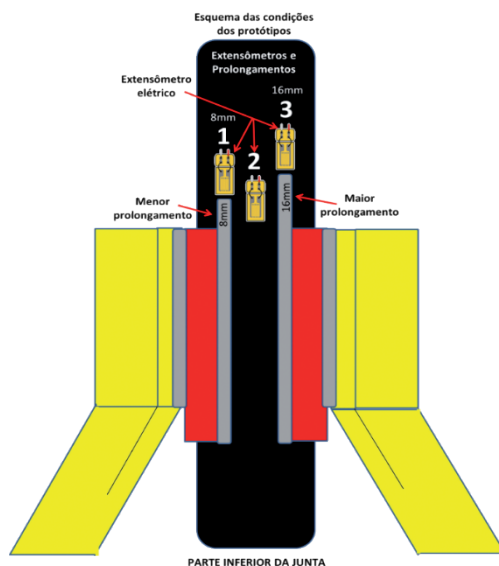
De acordo com o que foi verificado no dimensional dos prolongamentos de 100 peças do *try out* realizado nas mesmas condições de processo, foram analisadas cada combinação de prolongamento e estabelecidos critérios que avaliassem várias condições, entre elas: menor prolongamento, maior prolongamento, maior amplitude entre os menores, maior amplitude entre os maiores e maior frequência. Dessa forma, foram selecionadas, dentre a amostra protótipo (100 peças) 7 peças (peças 10, 13, 16, 19, 30, 67 e 71), ou seja, 7% estão representando as condições de prolongamento da amostra.

Quadro 3: Condições de prolongamento das peças selecionadas para o teste.

PEÇA	PROLONGAMENTO INFERIOR (mm)		LAUDO	CRITÉRIO DE SELEÇÃO
	LADO DIR. Operador 1	LADO ESQ. Operador 2		
10	10	9	RUIM	Menor prolongamento
13	8	8	RUIM	Menor prolongamento
16	12	11	BOM	Maior frequência
19	16	14	BOM	Maior prolongamento
30	11	9	RUIM	Maior amplitude dentre os menores
67	15	13	BOM	Maior amplitude dentre os maiores
71	9	8	RUIM	Menor prolongamento

Fonte: Elaborado pelos autores.

As condições dos testes com os protótipos são as mesmas da análise experimental de tensões nas condições de ocorrência, em que três extensômetros elétricos foram fixados nos contornos das terminações dos cordões de solda das peças, conforme esquema indicado na Figura 21.

Figura 21: Esquema das condições de prolongamento das amostras (protótipos) e posição dos extensômetros nos testes.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 21 é o esquema da vista da parte inferior da junta com as condições de prolongamento. As 7 peças indicadas no Quadro 4 foram submetidas

ao teste de resistência com 250.000 ciclos, considerando a carga máxima de projeto, que é de 1.800N, especificamente para essa junta com duas reações de apoio (Figura 14). O teste avalia a resistência da junta à fadiga, sendo aplicado numa velocidade de 30 ciclos por minuto, de forma ininterrupta, em temperatura ambiente entre 25~30°C. A aplicação de carga ocorre na união dos tubos laterais com o tubo principal, na parte superior da junta. Os extensômetros fixados às peças captam as microdeformações dos contornos dos prolongamentos dos cordões de solda onde as fibras são tracionadas e comprimidas em cada ciclo, existindo uma deformação elástica do material. A microdeformação gerada pela solicitação mecânica da peça altera a resistência do sinal elétrico do extensômetro, então, o equipamento de coleta de dados faz uma relação do sinal elétrico com a força aplicada sobre aquela área em que o extensômetro está fixado.

RESULTADOS

Uma análise experimental de tensões foi desenvolvida utilizando a extensometria, a fim de avaliar as diversas condições encontradas na construção de peças no processo produtivo. Peças com prolongamentos diferentes foram submetidas ao teste de resistência com os seguintes resultados:

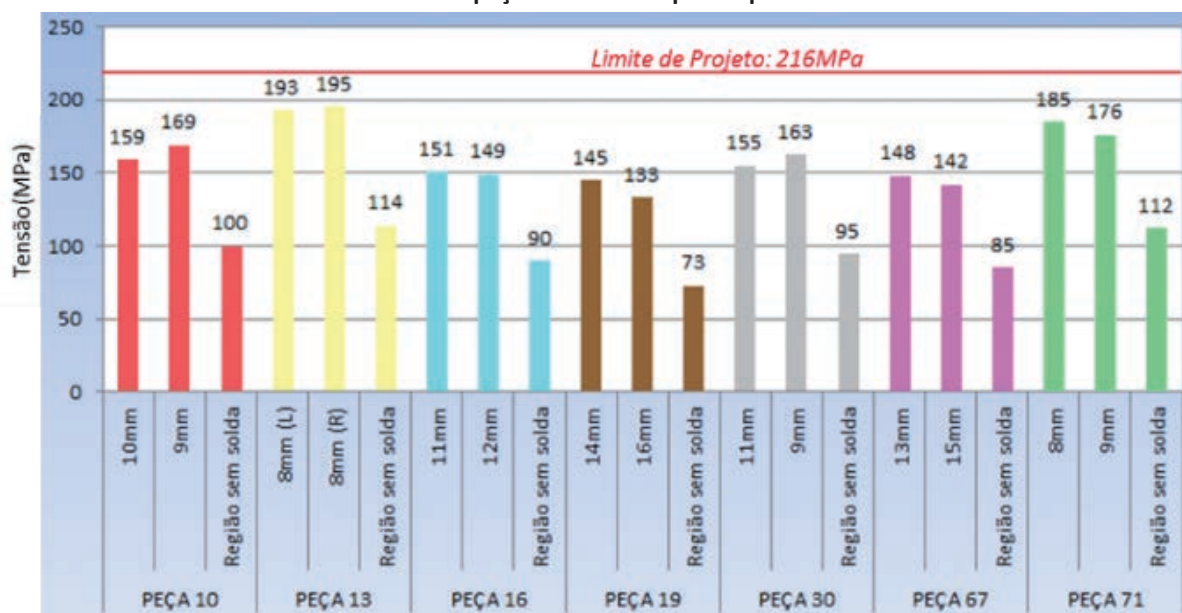
Quadro 4: Resultado do teste de resistência com peças da amostra protótipo.

PEÇA/CRITÉRIO DE SELEÇÃO		Prolongamento do cordão de solda	Posição do extensômetro	Tensão máx. (MPa)		Laudo
				Projeto	Encontrado (Teste)	
10	MENOR PROLONGAMENTO 1	10mm	1	216	159	BOM
		Região sem solda	2		100	BOM
		9mm	3		169	BOM
13	MENOR PROLONGAMENTO 2	8mm	1		193	BOM
		Região sem solda	2		114	BOM
		8mm	3		195	BOM
16	MAIOR FREQUÊNCIA	12mm	1		149	BOM
		Região sem solda	2		90	BOM
		11mm	3		151	BOM
19	MAIOR PROLONGAMENTO	16mm	1		133	BOM
		Região sem solda	2		73	BOM
		14mm	3		145	BOM
30	MAIOR AMPLITUDE DENTRE OS MENORES	11mm	1		155	BOM
		Região sem solda	2		95	BOM
		9mm	3		163	BOM
67	MAIOR AMPLITUDE DENTRE OS MAIORES	15mm	1	142	BOM	
		Região sem solda	2	85	BOM	
		13mm	3	148	BOM	
71	MENOR PROLONGAMENTO 3	9mm	1	176	BOM	
		Região sem solda	2	112	BOM	
		8mm	3	185	BOM	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Abaixo, são apresentados os dados do Quadro 4 de forma gráfica:

Gráfico 2: Resultado do teste de resistência com peças da amostra protótipo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se, inicialmente, que, em nenhuma das condições de prolongamento, houve valores de tensão acima da faixa de projeto, que é 216Mpa; mesmo os prolongamentos com 8 e 9mm, condições menores que o padrão estabelecido, de 10mm, ficaram acima do limite de projeto. Verificou-se, também, que houve uma relação de decréscimo da tensão com o aumento do prolongamento, como se verifica na sequência:

8mm=195MPa (menor prolongamento = maior tensão);
9mm=176Mpa;
10mm=159Mpa;
11mm=155Mpa;
12mm=149Mpa;
13mm=148Mpa;
14mm=145Mpa;
15mm=142Mpa;
e 16mm=133MPa.

Verificou-se, anteriormente, na análise experimental de tensões nas condições de ocorrência, que os prolongamentos com 6mm e menores não atendem à tensão de projeto (conforme o Gráfico 1 – Resultado do teste de resistência nas condições de ocorrência). Dessa forma, a amostra protótipo atendeu à tensão máxima de projeto, contudo, estabeleceu-se que o padrão de prolongamento seria de 10mm, com uma tolerância de -2mm, ou seja, 8mm, de acordo com o que foi constatado nos testes de resistência das peças protótipos.

Devido à dificuldade operacional em se manter uma repetibilidade em torno de 10mm, criou-se uma marca de referência no tubo principal, posição na qual o prolongamento deveria chegar. Essa referência visual para a aplicação do prolongamento beneficiou tanto o soldador quanto o inspetor de processo, pois, visualmente, eles poderiam verificar o padrão mínimo de 10mm, já que esse deve cobrir a marca. Dessa forma, pode-se dizer que 100% das peças passam por uma inspeção visual, tanto do próprio soldador quanto do inspetor de processo.

Por fim, foi incluído no projeto/desenho da estrutura o prolongamento mínimo de 10mm.

Atualmente, estuda-se a possibilidade de alteração do projeto da junta na região e posição do reforço com o objetivo de não depender do prolon-

gamento do cordão para garantir tensões abaixo do limite do projeto.

CONCLUSÃO

Foi constatado, através da análise instrumental (extensometria), que, para o caso em estudo, havia significativa concentração de tensão, acima do limite de projeto, no contorno do cordão de soldagem em condições de prolongamento mínimo, o que ocasionou a quebra do tubo principal da junta “Y” na estrutura tubular durante teste de resistência com carga máxima de projeto. O processo de fabricação indicou uma diferença significativa nos prolongamentos de cordão, ocorrendo de forma ocasional, não existindo padrão definido. Através dos testes, ficou estabelecida uma relação inversa entre os cumprimentos dos prolongamentos e as tensões encontradas na região da quebra, sendo verificado que, ao se aumentar o prolongamento, as tensões nos contornos eram reduzidas a níveis menores do que os limites máximos de projeto. A fim de satisfazer as condições de projeto, estabeleceu-se um padrão de prolongamento entre 8 e 10mm, sendo que, abaixo desse limite, os prolongamentos não distribuem as tensões no nível de projeto, podendo causar a quebra da estrutura em serviço, como ocorreu com o prolongamento de 6mm no teste de resistência. Uma série de medidas de controle foram estabelecidas, a fim de manter a fabricação das peças com os prolongamentos mínimos que atendam ao padrão (10mm -2), entre elas, destacam-se a inclusão das ações no padrão de processo, *checklist* de cordões de solda, padrão visual de inspeção, desenho do produto e uma marca de referência no tubo principal, indicando até que ponto o cordão deve ser prolongado.

Os objetivos do trabalho foram alcançados, observando-se que o prolongamento foi eficiente para distribuir e reduzir as tensões concentradas no contorno do cordão de soldagem para o caso em estudo. Propõe-se que, em condições similares de projeto e solitação mecânica, a referida abordagem possa ser aplicada com sucesso, desde que realizados os estudos preliminares.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**, CRC Press, 1995.
- CARY, H. B. **Modern Welding Technology**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1979.
- CETLIN, P. R.; Silva, P. S. **Análise de fraturas**. Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1978.
- DALLY, James, W.; RILLEY, William F. **Experimental Stress Analysis**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1978.
- DALLY, James W.; RILLEY, William Fg.; McCONNELL, Kenneth.G. **Instrumentation for Engineering Measurements**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, INC, 1993.
- DRAPINSKI, J. **Elementos de soldagem**. Mc Graw-Hill, São Paulo, 1978.
- GARWOOD, S. J. **Investigation of the MV Kurdistan Casualty, Engeneering Failure Analysis**, v. 1, p. 4, 1997.
- GETMANETS, S. M.; KORINETS, J. F. **Gas-Shielded Welding (Instructions for Laboratory Work)**. Kiev (Ucrânia), Naukova Dumka, 1983.
- HOLLISTER, G. S. **Experimental Stress Analysis: Principles and methods**. New York: Cambridge University Press, 1967.
- KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS COMPANY LTD. **Strain gage Instruction Manual**. Tokio:1986.
- MARQUES, P. V. **Tecnologia da soldagem**. ESAB, Belo Horizonte, 1991.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. LTC, Rio de Janeiro, 1982.
- PERRY C. C.; LISSNER, H. R. **The Straingage Primer**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1955.
- QUITES, A. M.; Dutra, J. C. **Tecnologia da soldagem a arco voltaico**. Edeme, Florianópolis, 1979.

DADOS DOS AUTORES



João Cláudio Ferreira Soares – Graduado em Engenharia Mecânica (ULBRA-2013), possui Mestrado em Engenharia de Produção (UMinho-2012), Especialização em Engenharia de Qualidade (UGF-2009) e Tecnologia Mecânica (UEA-2006). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Produção Industrial, Projeto de Produtos, Processos e Equipamentos, Controle e Gestão de Qualidade, Análise de Falhas e Planejamento e Controle da Manutenção. Experiências profissionais mais relevantes: coordenador e professor do Curso de Engenharia Mecânica na ULBRA Manaus (atual, desde 2014); professor de Pós-Graduação no IDAAM (2014); coordenador de Grupo Técnico e Manutenção na Moto Honda da Amazônia (2013-2014); líder de projetos na Moto Honda da Amazônia (2008-2014).



Frederico Nicolau Cesarino – Doutorando em Sociedade e Cultura pela Universidade Federal do Amazonas (PPGSCA-UFAM). Mestre em Sociologia pela Universidade Federal do Amazonas. Especialista em Educação. Graduado em Engenharia Mecânica e licenciado em Matemática pela Universidade Estadual do Amazonas. Professor da Universidade Luterana do Brasil, campus Manaus. Engenheiro de Manutenção Mecânica da Eletrobras Amazonas Energia. Desenvolve pesquisas nas seguintes áreas: História do setor elétrico no Amazonas, relações trabalhistas do setor elétrico, impactos sociais e ambientais de usinas térmicas, interações entre o ambiente urbano e o ambiente rural.