Unisanta Science and Technology, **2016, 6, July**
Published Online 2016 Vol.5 N°1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Análise da Falha na Tubulação de um Permutador de Calor gerada pela Atuação de uma válvula de Segurança

Nestor Ferreira Carvalho[1], Sergio Figueiredo Pereira[1] e Willy Ank de Morais [1,2]

UNISANTA[1] – Universidade Santa Cecília – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEMec
Rua Oswaldo Cruz, 266- Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

INSPEBRAS [2] - Inspeção e Controle de Qualidade – Departamento Técnico - DETEC
Av do Trabalhador, 1146 - Praia Grande, SP, Brasil- CEP: 11725-000

E-mail*:* willyank@unisanta.br
Received may, 2015

Resumo: Com o intuito de garantir a segurança das pessoas, meio ambiente e o patrimônio das empresas, os vasos de pressão e caldeiras devem ser protegidos por válvulas de segurança, cuja função é evitar que o equipamento seja pressurizado acima da pressão de segurança do projeto. A escolha do melhor local para instalação dessas válvulas deve levar em consideração, além dos itens usuais de projeto, os esforços gerados quando da abertura dessas válvulas. Esse artigo apresenta uma análise da fratura de uma destas válvulas, com o propósito de determinar as causas básicas da falha e introduzir medidas de mitigação para melhoria da confiabilidade no funcionamento da válvula. A análise foi realizada com o apoio de literaturas sobre fractografia e fadiga.

Palavras chave: Fadiga; Válvula de Segurança; Suporte para tubulações; Análise de falhas; Fratura em tubulação.

Failure Analysis of the Pipe used in a Heat Exchanger generated by the acting of a Safety valve

Abstract: In order to ensure the safety of people, environment and assets of companies, pressure vessels and boilers should be protected by safety valves, whose function is to prevent the machine is pressurized above the security design pressure. Choosing the best location for installation of these valves must consider, besides the usual items of design, the stresses generated when the opening of these valves. This paper analyzes the fracture of one of these valves, with the purpose of determining the root causes of failure and to introduce mitigation measures to improve valve functioning reliability. The analysis was conducted with the support of literature on fractography and fatigue.

Keywords: Fatigue; Safety Valve; Support for pipeline; Failure analysis; Pipe fracture.

1. Introdução

Vasos de pressão, caldeiras, fornos e tubulações são equipamentos usados em empresas de todos os ramos de atividade para armazenar, processar e transferir fluidos sob pressão interna ou externa. Para atendimento das exigências legais esses equipamentos devem ser protegidos com dispositivo automático para evitar que o equipamento protegido seja pressurizado acima da pressão de projeto [1].

Válvulas de segurança são dispositivos de proteção automáticos, adotados na indústria desde 1682, com o

Copyright © 2016 ISESC.

propósito de evitar vazamentos causados por aumento da pressão operacional, em equipamentos e/ou tubulações que trabalham sob pressão [2]. Atualmente, essas válvulas são calibradas para abrirem na Pressão Máxima de Trabalho Admissível ou PMTA do equipamento protegido, com uma vazão suficiente para garantir que a pressão interna do vaso protegido não ultrapasse a um certo percentual de segurança da PMTA. A norma aplicável do *American Petroleum Institute* (API) [3] exige que essas válvulas devem fechar automaticamente quando a pressão diminuir a um valor 10% abaixo da pressão de abertura.

Na grande maioria das aplicações o dispositivo preferido são válvulas de segurança com mola que abrem numa pressão determinada para aliviar a pressão sobre uma vazão calculada. Essas válvulas são chamadas de válvulas de segurança ou simplesmente de *PSV* (*Pressure Safety Valve*). Quando a tubulação de descarga da válvula de segurança (*PSV*) é pressurizada a abertura da válvula é dificultada. Essa pressão atuante na tubulação de descarga da válvula é chamada de contra pressão.

Uma alta contra pressão aliada, ou não, a uma vazão do fluído na entrada da válvula, inferior à sua capacidade de alívio vai levar à válvula a entrar em um processo cíclico de abertura e fechamento, que pode ocorrer de forma muito rápida. Esta condição produz um batimento entre o disco e a sede do bocal da válvula gerando um fenômeno conhecido como *chattering* (batimento). Caso a tubulação não esteja suportada adequadamente a mesma vibra intensamente enquanto a ocorrência perdurar, submetendo a tubulação, a válvula e seus periféricos a uma condição de fadiga mecânica [4].

A propagação da trinca de fadiga ocorre em três estágios: iniciação, propagação e fratura, que estão representados na Figura 1.

Macroscopicamente a fratura por fadiga pode ser confundida com uma fratura frágil, porque em ambos os casos a superfície é plana e perpendicular às tensões atuantes e sem indícios de escoamento. Entretanto são fraturas muito diferentes:

- na fadiga, uma superfície plana, perpendicular à máxima tensão normal aplicada no instante de geração da fadiga, geralmente caracteriza a parte inicial da fratura;
- na região de início dos danos por fadiga, é costumeiro observar-se inúmeras trincas de fadiga iniciadas, separadas entre si por degraus conhecidos como marcas de catraca (*racthed marks*);
- as marcas de catraca, normalmente visíveis à vista desarmada, diminuem em quantidade à medida que as trincas propagantes coalescem entre si tornando-se poucas ou até mesmo uma única trinca de fadiga propagante;
- marcas de praia (*beach marks*), é uma das características da fadiga, que pode ser observada a olho nu e costumam ser o primeiro item a ser identificado na fratura por fadiga;
- as marcas de praia representam o crescimento da trinca por fadiga quando o material foi submetido a ciclos de carga variados ao longo da propagação das trincas por fadiga;
- O final da fratura ocorre quando a seção remanescente do material não suporta mais a carga submetida. Essa etapa final da fratura pode ter características de fratura

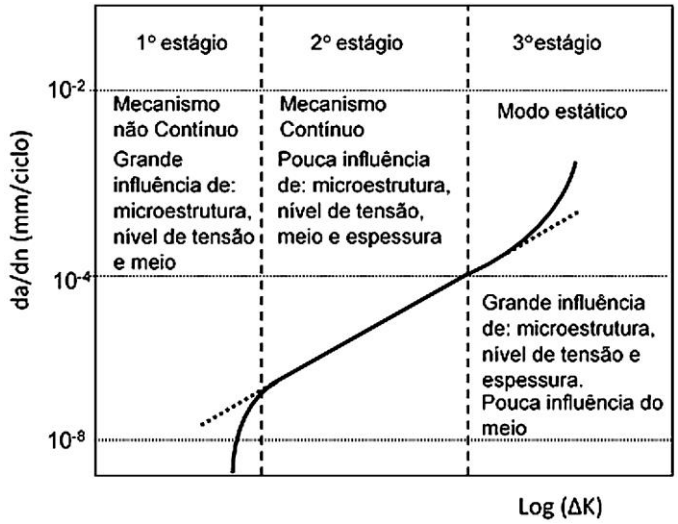


Figura 1. Curva típica do crescimento de trinca por fadiga - adaptada do Metals Handbook [5].

Copyright © 2016 ISESC

- dúctil ou frágil, dependendo do nível de tensão aplicado; ductilidade e tenacidade do material; e da temperatura do meio.

Dentre as características morfológicas de uma superfície de fratura por fadiga, as marcas de praia são das mais relevantes ao seu estudo desta forma de falha, pois a sua configuração não só indica uma variação nos ciclos de carregamento em fadiga, mas também os pontos de início da trinca, a influência de concentradores de tensão, o tipo de carregamento e o nível de tensões.

Dentre as inúmeras bibliografias existentes, o *Metals Handbook* [5], faz uma relação entre esses fatores e a superfície da fratura, como pode ser observado na Figura 2. Assim, com base na teoria descritiva do mecanismo de formação e evolução da fadiga e utilizando-se de técnicas experimentais, este trabalho teve como objetivo identificar o mecanismo de falha de uma válvula de segurança industrial, as causas da mesma e medidas de mitigação desta falha.

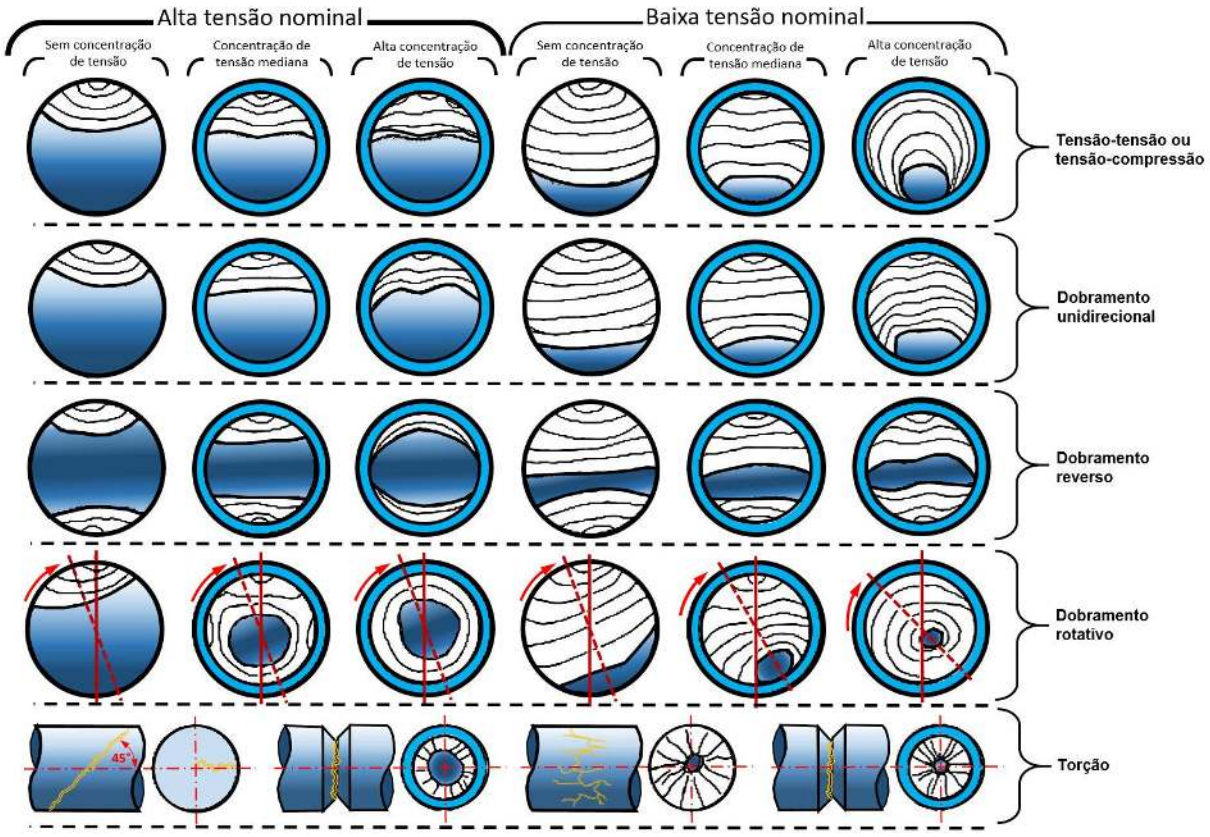


Figura 2. Relação entre os principais fatores que influenciam na fratura por fadiga com a morfologia da superfície da fratura gerada. Adaptado de [5].

Copyright © 2016 ISESC

2. Material e Métodos

A Figura 3 mostra a foto do local, após o vazamento ocorrido em uma área industrial e a Figura 4 um esquema simplificado da tubulação, bem como o local da ruptura.

A *PSV* estava instalada em uma tubulação de 1pol., conhecida como *nipple* (nomenclatura usada na indústria para tubulações com diâmetro inferior a 2 pol.), derivada de uma linha de 8 pol. na saída do carretel de um permutador de calor.

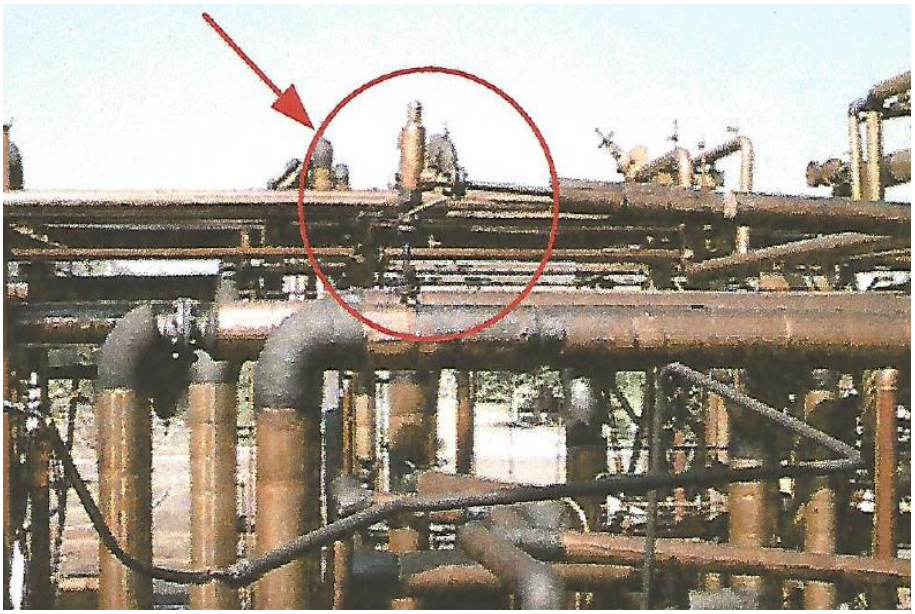


Figura 3. Foto do local onde a PSV está instalada. As tubulações de entrada e descarga da PSV, apesar de possuírem um revestimento térmico, não possuem suporte nesse trecho.

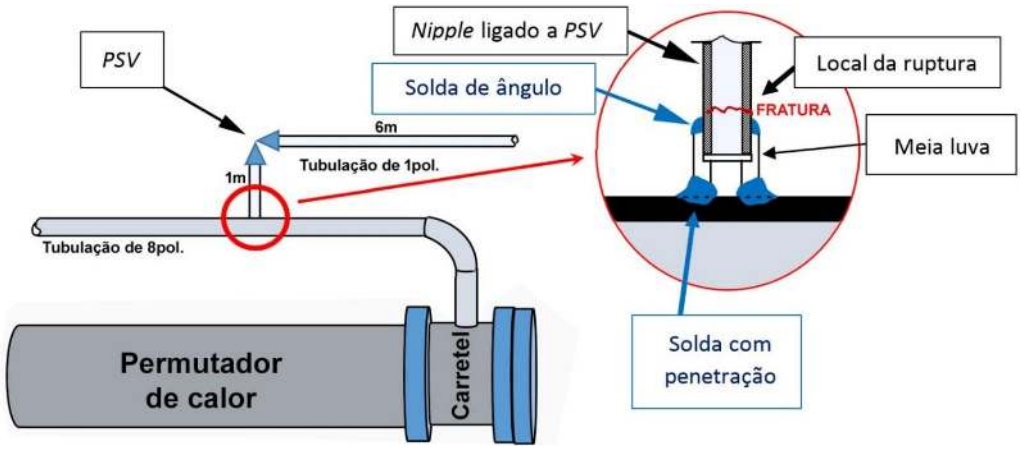


Figura 4. Esquema simplificado da instalação, mostrando o detalhe da união entre o niple de 1pol. ligado a PSV e a linha principal de 8pol.

Copyright © 2016 ISESC

A extensão do *nipple* a montante da *PSV* era de aproximadamente 1 metro, enquanto que a linha de descarga da *PSV*, também de 1pol, tinha extensão de aproximadamente 6 metros, sem fixação própria ou suporte específico. A união entre o *nipple* de 1pol. e a tubulação de 8pol. é construída por uma meia luva fixada com solda de penetração total na união com a tubulação de 8pol. e solda de ângulo, sem penetração, no *nipple* de 1pol. conforme mostrado no detalhe da Figura 5. Qualquer vibração da válvula pode transferir tensões cíclicas para esta união, sendo que foi justamente na solda com o *nipple*, região com a menor resistência da união, onde a fratura foi verificada.

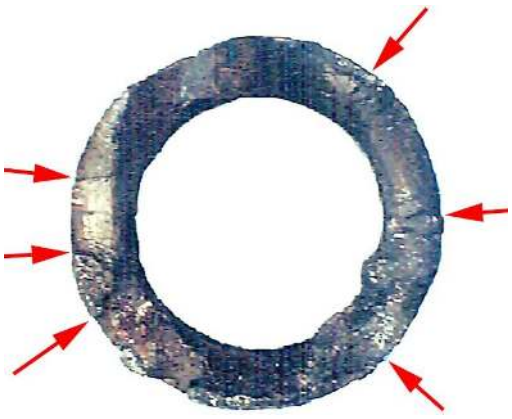
O *nipple* fraturado foi removido do local, limpado com solvente para retirada do produto vazado e realizado exame visual da superfície da fratura a olho desarmado e com o uso de lente (lupa), com até 5 vezes de aumento, nos locais onde foi importante avaliar os detalhes da fratura. A avaliação da fratura deste equipamento foi efetuada através das seguintes técnicas experimentais e/ou ensaios:

- avaliação da ocorrência pelo relato feito pelos operadores e descrição do equipamento em termos de constituição e tipo de cargas esperadas;
- a superfície de fratura foi avaliada macrofractograficamente e registrada através de fotos tiradas com câmera digital, no laboratório de metalurgia da Universidade de São Paulo;
- para confirmar as especificações do material do *nipple*, foi utilizado um analisador de ligas por XRF (fluorescência de raios x), modelo Niton XL3t;
- a microestrutura do material próximo à superfície da fratura foi avaliada com um microscópio óptico, no laboratório de metalurgia da Petrobras;
- análise microfractografica através de microscópio eletrônico de varredura (MEV), no laboratório de metalurgia da Universidade de São Paulo;
- nas regiões próximas a fratura, as superfícies interna e externa do tubo foram ensaiadas com líquido penetrante, numa extensão de até 1 polegada de distância, no laboratório de inspeção da Petrobras;
- a solda de união entre o *nipple* e a linha principal de 8pol, foi inspecionada visualmente, no laboratório de inspeção da Petrobras;
- foram realizados ensaios de dureza na região de fratura empregando-se uma máquina de dureza aferida conforme padrões do Inmetro, no laboratório de inspeção da Petrobras.

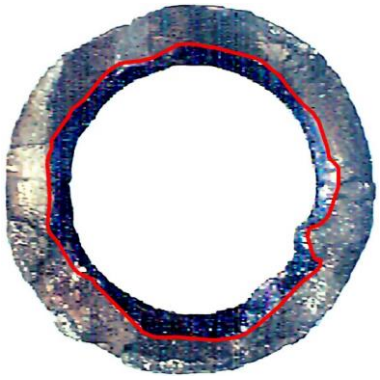
3. Resultados e Discussão

Foi relatado pelos operadores da área, que quando a válvula de segurança abriu, foi ouvido um forte barulho e observado uma vibração do sistema de tubulação onde a PSV estava instalada.

A explicação para este relato foi a ocorrência de *chattering* na válvula de segurança que provocou vibração nas tubulações ligadas à válvula. A falha ocorreu no *nipple*, junto a zona de ligação da solda deste com a meia luva, que está mostrado em detalhe na Figura 4.



a) As setas indicam a presença de marcas de catraca (degraus), local de início das trincas de fadiga (periferia externa do tubo).



b) A linha indica o final da propagação de trinca por fadiga e início da fratura final.

Figura 5. Superfície da fratura indicando início e término da trinca de fadiga, observação a olho nu.

Copyright © 2016 ISESC

A inspeção visual da superfície da fratura mostrou uma parte plana, junto a borda externa do tubo que se estende até aproximadamente a metade da espessura, quando então a fratura muda para uma inclinação de 45o até a superfície interna. Na Figura 5 é possível observar a presença de marcas de catraca (degraus), nas regiões indicadas, além de marcas de praia crescendo em direção a superfície interna do tubo que foram melhores registradas pelas imagens obtidas com o MEV.

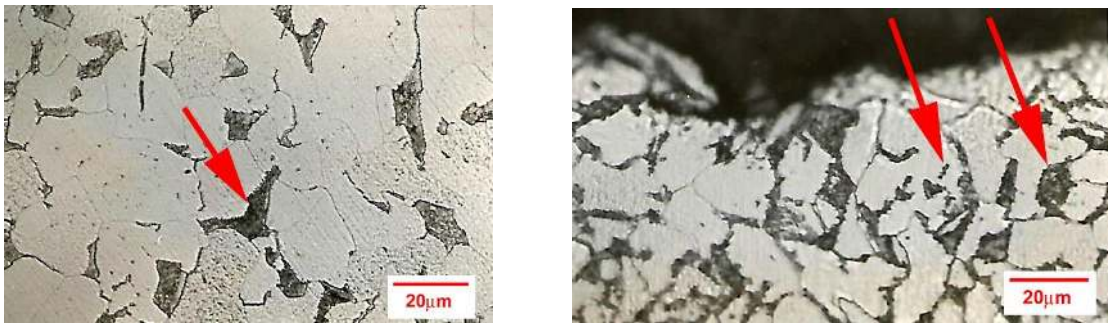
Com o equipamento de identificação de ligas, foi confirmado que o material é um aço carbono, atendendo a especificação API 5L grau B nível PSL1, conforme definido no projeto. A composição química do material, reproduzida da norma API para tubos de condução [6], pode ser observada na Tabela 1.

A microestrutura do *nipple* referentes ao metal base e a zona termicamente afetada (ZTA) da solda, foram avaliados metalograficamente, conforme apresentado na Figura 6. Observou-se uma estrutura normal, com presença de perlita em uma matriz ferrítica, sendo ainda que na ZTA foi observado um pequeno coalescimento da cementita(fig 6a).

O exame no Microscópico Eletrônico de Varredura (MEV) confirmou a presença das marcas de catraca (degraus) característicos da nucleação múltipla de trincas por fadiga, junto a superfície externa do *nipple*, no ponto de concentração de tensões oriundas da soldagem (Figura 7a). Nas proximidades observa-se também marcas de praia (Figura 7b).

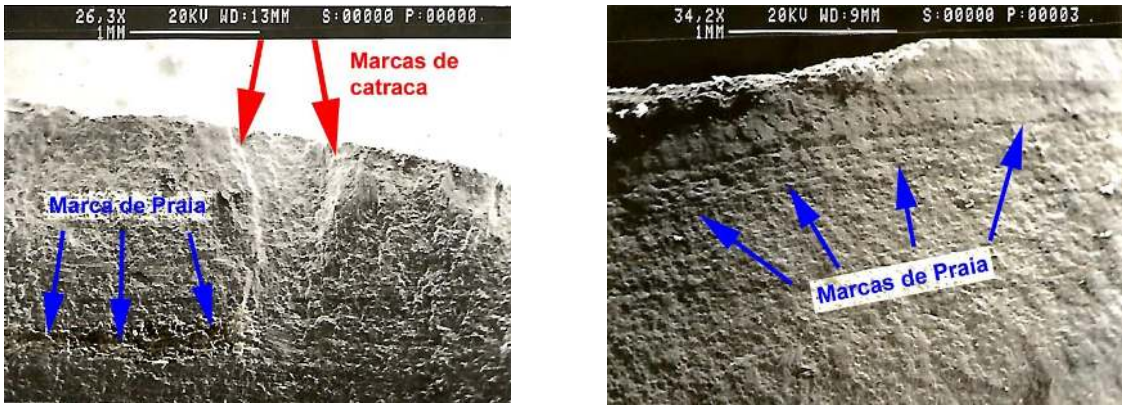
Tabela 1. Composição química do aço carbono dos tubos API 5L Gr. B PSL1 [6].

% C	% Mn	% P	% S
0,27 máx.	1,15 máx.	0,04 máx.	0,05 máx.



(a) **(b)**

Figura 6. a) microestrutura do niple, longe da solda; **b)** microsestrutura da ZTA da solda de união niple/luva. Ataque Nital a 2% e aumento ótico de 500X.



a) Marcas de catraca nas regiões iniciais da trinca de fadiga.

b) Marcas de praia ao longo do início da frente de propagação da trinca de fadiga.

Figura 7. Observações obtidas no MEV com 20 KeV, ataque com a solução de nital.

Copyright © 2016 ISESC

O ensaio com liquido penetrante não revelou descontinuidades superficiais na solda, nem na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA), onde ocorreu o início das trincas de fadiga. No ensaio de dureza empregou-se a escala Brinell padrão (esfera com diâmetro de 10mm e carga de 3000kgf) para medir a dureza do material na região próxima ao início das trincas. Os valores medidos variaram entre 180 e 190HB e são compatíveis com a microestrutura e composição química descritas para o aço API 5L B PSL1 [6].

4. Discussão

A localização da falha está vinculada à região da tubulação onde existe uma brusca redução da rigidez, além de ser um local de concentração de tensões, provocadas pela: pressão interna da linha, na solda de união do *nipple* com a meia-luva (vide Figura 4). A presença de marcas de catraca junto superfície externa do *nipple* e as marcas de praia crescendo em direção a superfície interna na região plana da fratura, associado à presença de tensões cíclicas observadas pela vibração da tubulação, são suficientes para afirmar que a trinca iniciou e desenvolveu-se por fadiga. A Figura 8 mostra um esquema representativo da fratura construído em similaridade às representações das Figuras 5 e 6.

A configuração dos elementos da fratura representados na Figura 8, pode ser associada à presença ou não de concentradores de tensão, ao tipo de carregamento e ao nível de tensões conforme descrito pela bibliografia [5]. Neste caso, a posição da origem das trincas, a forma como estas se propagaram e o tamanho e localização da região de ruptura final demonstram que a falha foi produzida em baixa tensão, sem concentração de tensão e em modo de carregamento em flexão reversa, este último provocado pela vibração da tubulação (*chattering*).

A parte final da fratura foi avaliada no MEV. Nesta região foi constatada uma superfície inclinada, com presença de bordas em ângulos não retos, similares a lábios de cisalhamento [5].

Conforme evidenciado pela microfractografia, apresentada na Figura 9, a fratura final foi dúctil, caracterizada pela presença de microcavidades dúcteis (conhecidas como *dimples*) [7].

Estas evidências indicam que a vibração da tubulação, durante ciclos de abertura e fechamento da válvula, induziu a ocorrência de fadiga por *chattering* levando o ponto de menor resistência do sistema à falha (fratura). Uma trinca de fadiga pode ser observada em 70% da falha ocorrida. O restante da superfície de fratura, 30%, deveu-se a uma fratura dúctil associada às características mecânicas do aço do tubo API 5L Gr.B PSL1 [6] e ao tipo de carregamento mecânico imposto.



a) Niple fraturado: a linha indica a mudança do tipo de fratura.

b) Esquema representativo da superfície da fratura com as respectivas frações de área.

Figura 8. Esquema construído a partir da figura 4, para uma condição de baixa tensão, sem concentração de tensões e flexão reversa, com 4 pontos de nucleação das trincas

Copyright © 2016 ISESC

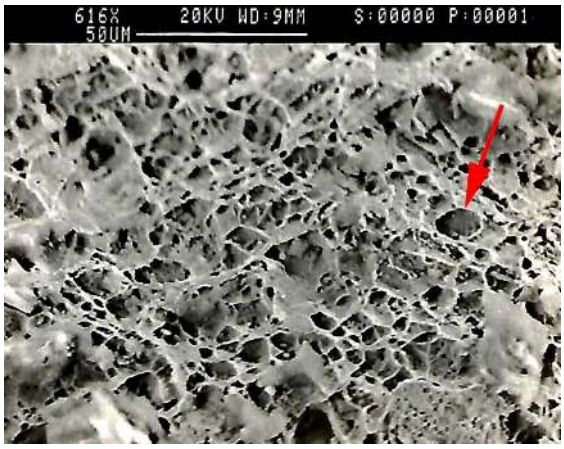


Figura 9. Fractografia microscópica da parte final da fratura, pode ser verificado a presença de cavidades hemisféricas, chamadas de *dimples*, característica da fratura dúctil.

Outra condição de criticidade é o processo de soldagem entre as tubulações que pode gerar tensões residuais e desalinhamentos que intensificam o carregamento induzido por fadiga [8]. Neste caso em particular, as operações de manutenção e reforma da linha deve ser verificada através de inspetores qualificados e seguindo um procedimento operacional adequado para minimizar a intensificação das cargas mecânicas previstas em projeto.

5. Conclusão

A fratura ocorreu no ponto de menor resistência em uma tubulação (*nipple*) de alívio de pressão, quando a mesma foi submetida a vibração, provocada pela ocorrência de *chattering* induzido por sequências cíclicas de abertura e fechamento da válvula de segurança ao controlar a pressão da tubulação principal. As análises, micro e macrográficas da fratura, confirmaram o mecanismo de fadiga provocado pela vibração da tubulação.

As trincas de fadiga tiveram seu início na superfície externa do tubo e se propagaram até que, a secção transversal do tubo, rompeu de maneira dúctil por sobre carga. A solda da união do *nipple* com a meia luva e o material das partes, não tiveram participação metalúrgica na nucleação das trincas.

Um suporte que absorva a eventual vibração da tubulação e a especificação de uma válvula de segurança, calculada para uma abertura e fechamento sem induzir *chattering* devem impedir a recorrência da falha observada.

Referências

[1] MTE, M. d. (20 de maio de 2014). NR13 – Caldeiras, vasos de pressão e tubulações – Portaria N0 594 de 28/04/2014 - item 13.3.1.

[2] Mathias, A. C. (2008). Válvulas: industriais, segurança e controle. p.2-12.

[3] API Stantard 520, e. e. (2008). Sizing, selection, and installation of pressure-relieving devices in refineries – Part I.

[4] Chabane S. et al. (2009). Vibration and chattering of conventional safety releif valve under built up back pressure. 3rd IAHR International meeting of the worgroup on cavitation and dynamic problems. Paris.

[5] Metals Handbook. (2006). Engineering Aspects of Failure and Failure Analysis. ASM International.

[6] API 5L gr B. (2007). Seamless Steel Pipe. American Petroleun Institute - API.

[7] KERLINS, V. Modes of Fracture. In: MILLS, K at al. Fractography (ASM Handbook Vol. 12). Materials Park: ASM International; 1998. 33-62.

[8] MORAIS, W.A.; SAMPAIO, G. G. Técnicas e Cuidados na Soldagem de Tubos. Siderurgia Brasil, v. 16, p. 34-38, 2015.

Copyright © 2016 ISESC