

Líquido penetrante em tubulações: estudo de caso na indústria química

Liquid penetrant testing in pipelines: a case study in the chemical industry

Gabriel de Santana Gomes da Silva¹

Giovanna Moraes da Silva²

Antônio Carlos Santos de Arruda³

Fernanda Laureti Thomaz Ferreira⁴

Magda Dias Gonçalves Rios⁵

RESUMO

A integridade de tubulações industriais é um fator determinante para a segurança operacional em plantas químicas, especialmente em sistemas que operam com fluidos inflamáveis e tóxicos. Nesse contexto, os Ensaios Não Destrutivos (END) são amplamente empregados para identificação de descontinuidades sem comprometer a integridade do componente. O presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicação do ensaio por líquido penetrante (LP) na inspeção de soldas em tubulações industriais, por meio de um estudo de caso realizado em área classificada. O procedimento foi conduzido conforme diretrizes estabelecidas pela ASME Section V, Artigo 6, considerando etapas de preparação da superfície, aplicação do penetrante, remoção do excesso, aplicação do revelador e inspeção visual. Foram avaliadas

¹Discente do Curso Tecnologia em Manutenção Industrial da Faculdade de Tecnologia de Osasco - FATEC Prefeito Hirant Sanazar. e-mail: gabriel.silva735@fatec.sp.gov.br

²Discente do Curso Tecnologia em Manutenção Industrial da Faculdade de Tecnologia de Osasco - FATEC Prefeito Hirant Sanazar. e-mail: giovanna.silva76@fatec.sp.gov.br

³Docente do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial da Faculdade de Tecnologia de Osasco - FATEC Prefeito Hirant Sanazar. Doutor em Materiais. e-mail: antonio.arruda@fatec.sp.gov.br

⁴Docente do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial da Faculdade de Tecnologia de Osasco - FATEC Prefeito Hirant Sanazar. Mestre em Engenharia Naval. e-mail: fernanda.ferreira01@cps.sp.gov.br

⁵Docente do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial da Faculdade de Tecnologia de Osasco - FATEC Prefeito Hirant Sanazar. Doutora em Química. e-mail: magda.rios@cps.sp.gov.br

duas juntas soldadas, sendo identificadas descontinuidades superficiais em uma das peças. Os resultados demonstram que o LP é eficaz na detecção de descontinuidades abertas à superfície, sendo recomendado como método inicial de inspeção, devendo ser aplicado em conjunto com outros ensaios, conforme exigências normativas como ASME B31.3 e API 570. Os resultados obtidos foram registrados em relatório técnico de ensaio, assegurando a rastreabilidade e a conformidade do processo de inspeção.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo. Líquido penetrante. Tubulações industriais. Indústria química. Manutenção industrial.

ABSTRACT

The integrity of industrial pipelines is a determining factor for operational safety in chemical plants, especially in systems operating with flammable and toxic fluids. In this context, Non-Destructive Testing (NDT) is widely used to identify discontinuities without compromising the integrity of the component. This work aims to analyze the application of liquid penetrant testing (LP) in the inspection of welds in industrial pipelines, through a case study carried out in a classified area. The procedure was conducted according to guidelines established by ASME Section V, Article 6, considering the steps of surface preparation, penetrant application, excess removal, developer application, and visual inspection. Two welded joints were evaluated, and surface discontinuities were identified in one of the parts. The results demonstrate that LP is effective in detecting open surface discontinuities, and is recommended as an initial inspection method, to be applied in conjunction with other tests, as required by standards such as ASME B31.3 and API 570. The results obtained were recorded in a technical test report, ensuring the traceability and conformity of the inspection process.

Keywords: Non-destructive testing. Penetrant testing. Industrial pipelines. Chemical industry. Industrial maintenance.

1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade de sistemas de tubulações industriais está diretamente relacionada à segurança operacional, à proteção ambiental e à continuidade dos processos produtivos. Em unidades da indústria química, nas quais há transporte de fluidos inflamáveis, tóxicos ou corrosivos, falhas em juntas soldadas ou conexões podem resultar em vazamentos, incêndios ou explosões, além de impactos ambientais relevantes. Nesse contexto, a inspeção sistemática dessas tubulações é exigida por normas técnicas e códigos de projeto e operação, como a

ASME B31.3 (Process Piping) e a API 570, que estabelecem critérios para avaliação da integridade e manutenção desses sistemas.

Os Ensaio Não Destrutivos (END) constituem ferramentas fundamentais nesse processo, permitindo a identificação de descontinuidades sem comprometer a integridade do componente inspecionado. Conforme Silva (2023), os END são amplamente utilizados na manutenção industrial para detecção precoce de falhas, contribuindo para a tomada de decisão técnica e para a redução de paradas não programadas. Do ponto de vista normativo, a execução desses ensaios deve seguir procedimentos padronizados, como aqueles descritos na ASME Section V, que estabelece os requisitos para aplicação e interpretação dos métodos de inspeção.

Dentre os métodos de END aplicáveis à inspeção de tubulações, o ensaio por líquido penetrante (LP) é amplamente utilizado para a detecção de descontinuidades abertas à superfície, como trincas, porosidades e falta de fusão em soldas. Segundo Andreucci (2011), o método baseia-se no princípio da capilaridade, sendo particularmente indicado para inspeções superficiais em materiais metálicos e não porosos. Sua aplicação é comum como ensaio inicial, especialmente em juntas soldadas, podendo ser complementado por métodos volumétricos, como ultrassom ou radiografia, conforme exigido pelas normas aplicáveis.

De acordo com Hou et al. (2023), o ensaio por líquido penetrante apresenta elevada sensibilidade na identificação de descontinuidades superficiais em tubulações de aço carbono, sendo frequentemente empregado como técnica de triagem em sistemas de transporte de fluidos. No entanto, sua utilização deve ser compreendida dentro de suas limitações, uma vez que o método não permite a detecção de descontinuidades internas ou subsuperficiais, sendo necessário, em muitos casos, o uso combinado com outros END.

Mesmo com o avanço de técnicas mais sofisticadas, como ultrassom phased array e métodos baseados em processamento digital de sinais, o ensaio por líquido penetrante permanece amplamente utilizado na indústria devido à sua simplicidade operacional, baixo custo e rápida aplicação em campo. Abdollahi-Mamoudan et al. (2025) destacam que métodos tradicionais continuam sendo essenciais, especialmente em inspeções iniciais e em situações nas quais a acessibilidade ou as condições operacionais limitam o uso de técnicas mais complexas.

No contexto de tubulações industriais, especialmente em ambientes químicos agressivos, mecanismos de degradação como corrosão, fadiga térmica e danos induzidos por hidrogênio podem resultar em descontinuidades que, quando abertas à superfície, podem ser detectadas por meio do ensaio por líquido penetrante. Entretanto, conforme Quispe-Avilés

(2025), tais mecanismos não se manifestam exclusivamente na superfície, sendo necessária a utilização de métodos complementares para uma avaliação completa da integridade do sistema.

No cenário nacional, estudos aplicados demonstram a relevância do ensaio por líquido penetrante na inspeção de componentes tubulares. Leite (2024) e Duarte (2021) destacam que a confiabilidade do método está diretamente relacionada à correta execução do procedimento, incluindo preparação da superfície, controle dos tempos de ensaio e qualificação dos inspetores, conforme requisitos de certificação estabelecidos por organismos como a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI), alinhados à norma ISO 9712. De forma complementar, Abreu (2019) evidencia a aplicação prática do método na identificação de descontinuidades associadas a vazamentos em sistemas pressurizados.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicação do ensaio por líquido penetrante na inspeção de tubulações de uma indústria química, por meio de um estudo de caso realizado em área classificada, considerando os procedimentos executados, as limitações do método e sua contribuição como ferramenta de inspeção superficial no contexto da manutenção industrial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ensaios Não Destrutivos e sua importância na manutenção industrial

Os Ensaios Não Destrutivos (END) constituem um conjunto de técnicas aplicadas à avaliação da integridade de materiais e componentes industriais, permitindo a identificação de descontinuidades sem comprometer a funcionalidade do equipamento inspecionado. Esses métodos são amplamente empregados em atividades de manutenção e inspeção, especialmente em sistemas críticos, como tubulações industriais, vasos de pressão e estruturas soldadas. Segundo Silva (2023), os END desempenham papel estratégico na manutenção industrial contemporânea, pois permitem a detecção precoce de falhas e subsidiam a tomada de decisão técnica.

A aplicação dos END está diretamente associada aos conceitos de manutenção preditiva e gestão de ativos, uma vez que possibilita a identificação de descontinuidades antes que evoluam para condições inaceitáveis conforme critérios normativos. Misokefalou et al. (2022) destacam que a utilização sistemática desses métodos contribui para o aumento da confiabilidade operacional, redução de paradas não programadas e otimização dos custos de manutenção.

Além dos aspectos operacionais e econômicos, os END são amplamente utilizados para atendimento a requisitos normativos e regulatórios. Em sistemas de tubulação, por exemplo, a aplicação desses ensaios deve estar alinhada a códigos e normas como ASME B31.3 (Process Piping), API 570 (Inspeção de Tubulações) e aos procedimentos estabelecidos na ASME Section V, que define os métodos e critérios para execução dos ensaios. Em determinados casos, o contratante pode exigir critérios adicionais mais restritivos, como ocorre na indústria de óleo e gás, em que normas internas, como as normas Petrobras (ex.: N-133 e N-2370), são aplicadas em conjunto com normas internacionais, estabelecendo requisitos mais rigorosos de inspeção.

2.2 Classificação dos principais métodos de Ensaios Não Destrutivos

Os métodos de END podem ser classificados de acordo com o princípio físico empregado e o tipo de descontinuidade que se pretende detectar. Entre os métodos mais utilizados na indústria destacam-se: inspeção visual, ensaio por líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom convencional, ultrassom phased array, radiografia industrial, correntes parasitas e termografia. Cada método apresenta limitações e aplicabilidades específicas, devendo sua seleção ser realizada com base na norma técnica aplicável ao projeto, no material inspecionado, na geometria do componente, no tipo de descontinuidade esperado e nos requisitos definidos pelo contratante (Silva, 2023).

No contexto da inspeção de tubulações industriais, especialmente em ambientes químicos, é prática comum a utilização combinada de diferentes métodos de END, de forma complementar. Hou et al. (2023) destacam que métodos superficiais, como o ensaio por líquido penetrante, são frequentemente utilizados como ensaios iniciais, sendo posteriormente complementados por métodos volumétricos, como ultrassom ou radiografia, quando requerido pelas normas aplicáveis.

Do ponto de vista técnico e econômico, essa estratégia permite maior eficiência no processo de inspeção. Como o ensaio por líquido penetrante possui menor custo operacional em comparação ao ultrassom, sua aplicação inicial possibilita a identificação de descontinuidades superficiais que, caso sejam classificadas como não aceitáveis conforme norma, demandam reparo imediato. Nesses casos, evita-se a realização de ensaios mais complexos antes da correção da solda, otimizando o processo de inspeção. Conforme Kumar e Mahto (2013).

2.3 Fundamentos do ensaio por líquido penetrante

O ensaio por líquido penetrante (LP) baseia-se no princípio físico da capilaridade, no qual um líquido com baixa viscosidade e baixa tensão superficial é capaz de penetrar em descontinuidades abertas à superfície do material. Essas descontinuidades podem incluir trincas, porosidades, falta de fusão superficial e outras irregularidades associadas a processos de fabricação, especialmente soldagem. Conforme Andreucci (2011), a eficiência do método está diretamente relacionada à capacidade do penetrante em infiltrar-se nessas descontinuidades e permanecer retido até a etapa de revelação.

Após a aplicação do penetrante e o respectivo tempo de penetração, o excesso do produto é removido da superfície, mantendo-se apenas o penetrante retido nas descontinuidades. Na sequência, aplica-se o revelador, cuja função é promover a extração do penetrante contido nas descontinuidades por ação de absorção, formando indicações visíveis que podem ser interpretadas pelo inspetor. Esse procedimento está descrito de forma normatizada na ASME Section V, Artigo 6, que estabelece os requisitos para execução, controle e interpretação do ensaio por líquido penetrante.

A confiabilidade do ensaio depende diretamente do controle rigoroso dos parâmetros operacionais, incluindo preparação da superfície, tipo de penetrante utilizado, tempo de penetração, método de remoção do excesso, tipo de revelador e condições de iluminação durante a inspeção. Duarte (2021) destaca que falhas na execução dessas etapas podem resultar tanto na não detecção de descontinuidades quanto na geração de indicações falsas, comprometendo a validade do ensaio.

No caso específico de tubulações industriais, o ensaio por líquido penetrante é amplamente aplicado na inspeção de juntas soldadas, sendo eficaz na identificação de descontinuidades superficiais em materiais como aço carbono e aço inoxidável. Hou et al. (2023) ressaltam que o método apresenta elevada sensibilidade para esse tipo de aplicação, sendo frequentemente utilizado como etapa inicial de inspeção.

Entretanto, conforme exigido por normas como ASME B31.3 e API 570, o ensaio por líquido penetrante não deve ser utilizado de forma isolada na avaliação da integridade de tubulações. Em função de sua limitação à detecção de descontinuidades abertas à superfície, é prática comum sua aplicação em conjunto com outros métodos de END, como ultrassom ou radiografia, que permitem a avaliação volumétrica do material.

Em sistemas classificados como críticos, especialmente aqueles que transportam fluidos perigosos ou operam sob condições severas de pressão e temperatura, pode ser exigida

a realização de ensaios em 100% das juntas soldadas, conforme critérios definidos pelas normas aplicáveis ou pelo contratante. Nesses contextos, o ensaio por líquido penetrante é frequentemente empregado como ensaio inicial, assim como o ensaio visual, devido ao seu menor custo e à simplicidade dos equipamentos necessários, integrando o conjunto de inspeções destinadas à verificação da qualidade da solda e à garantia da segurança operacional do sistema.

2.4 Tipos de líquido penetrante e aplicações industriais

Os líquidos penetrantes podem ser classificados, de acordo com sua forma de detecção, em penetrantes visíveis e penetrantes fluorescentes. Os penetrantes visíveis utilizam corantes com alto contraste, geralmente na cor vermelha, sendo observados sob iluminação branca. Já os penetrantes fluorescentes requerem iluminação ultravioleta (luz negra), permitindo maior sensibilidade na detecção de descontinuidades superficiais de pequenas dimensões. A aplicação e seleção desses sistemas estão descritas na ASME Section V, Artigo 6, que estabelece os requisitos para os diferentes tipos de penetrantes e métodos de ensaio (Leite, 2024).

A escolha entre penetrante visível e fluorescente deve considerar fatores como o nível de exigência da inspeção, a criticidade do componente, as condições de iluminação do ambiente e os critérios estabelecidos pela norma aplicável. Em aplicações industriais, os penetrantes fluorescentes são geralmente utilizados quando se exige maior sensibilidade na detecção, enquanto os penetrantes visíveis são mais comuns em inspeções de campo, devido à sua praticidade operacional.

Em relação à comparação entre métodos de ensaio, o ensaio por líquido penetrante e o ensaio por partículas magnéticas não devem ser considerados métodos concorrentes, mas sim técnicas com aplicações distintas e complementares. O ensaio por partículas magnéticas é limitado a materiais ferromagnéticos, uma vez que seu funcionamento depende da magnetização da peça para a detecção e evidenciação de descontinuidades superficiais e subsuperficiais. Já o ensaio por líquido penetrante pode ser aplicado em uma ampla gama de materiais, incluindo aço inoxidável, ligas não ferrosas e outros materiais não porosos. Dessa forma, a seleção do método deve estar alinhada às características do material e aos requisitos normativos, e não a uma suposta superioridade entre técnicas (JAMES; MATHEW; SOLOMON, 2025).

A escolha do tipo de penetrante e do método de ensaio deve, portanto, considerar a norma técnica aplicável ao projeto, os requisitos do contratante, o tipo de material, o acabamento superficial e as condições operacionais da inspeção. Em sistemas industriais, especialmente na indústria química, onde há presença de contaminantes e resíduos do processo, a preparação adequada da superfície e a seleção correta dos produtos utilizados são determinantes para a confiabilidade do ensaio, conforme destacado por Duarte (2021).

2.5 Aplicação do ensaio por líquido penetrante em tubulações da indústria química

A aplicação do ensaio por líquido penetrante em tubulações da indústria química apresenta particularidades diretamente relacionadas às condições operacionais, aos materiais envolvidos e aos riscos associados aos fluidos transportados. Em sistemas que operam com substâncias inflamáveis, tóxicas ou corrosivas, a identificação de descontinuidades em juntas soldadas é fundamental para a prevenção de vazamentos e falhas operacionais. Abreu (2019) demonstra, por meio de estudo aplicado, que descontinuidades abertas à superfície em soldas podem estar diretamente associadas à ocorrência de vazamentos, reforçando a necessidade de inspeções periódicas conforme critérios estabelecidos em normas como API 570 e ASME B31.3.

No contexto de mecanismos de degradação, como danos induzidos por hidrogênio, corrosão sob tensão e fadiga térmica, é importante destacar que tais fenômenos não se manifestam exclusivamente na superfície externa da tubulação. Em muitos casos, essas degradações podem ocorrer internamente ao material ou na face interna da tubulação, não sendo detectáveis pelo ensaio por líquido penetrante. No caso do hidrogênio, por exemplo, podem ocorrer tanto poros superficiais na região da solda quanto descontinuidades internas decorrentes do aprisionamento do gás durante o processo de solidificação, sendo estas últimas detectáveis apenas por métodos volumétricos.

Dessa forma, o ensaio por líquido penetrante apresenta aplicabilidade na identificação de descontinuidades apenas quando estas se encontram abertas à superfície, seja na face externa ou, em casos específicos, na face interna da tubulação, quando acessível. Conforme Quispe-Avilés (2025), a detecção superficial é relevante principalmente quando o componente opera em meios agressivos, nos quais tanto o fluido interno quanto o ambiente externo podem atuar como agentes corrosivos, favorecendo a iniciação de descontinuidades na superfície do material.

Em função dessas limitações, a aplicação do ensaio por líquido penetrante em tubulações deve ser realizada de forma integrada a outros métodos de END. Moraes (2025) destaca que a combinação com técnicas como ultrassom ou radiografia permite uma avaliação mais completa da integridade do componente, especialmente em sistemas críticos. Essa abordagem é amplamente adotada em programas de Inspeção Baseada em Risco (Risk-Based Inspection – RBI), nos quais a seleção dos métodos de ensaio é definida em função da criticidade do equipamento, do tipo de fluido transportado e das exigências normativas, conforme diretrizes estabelecidas pela API RP 580 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2016).

Portanto, o ensaio por líquido penetrante deve ser compreendido como uma ferramenta eficaz para detecção de descontinuidades superficiais em tubulações industriais, porém limitada à sua faixa de atuação. Sua aplicação isolada não é suficiente para garantir a integridade estrutural do sistema, sendo necessária sua utilização em conjunto com outros métodos de ensaio, conforme estabelecido pelas normas técnicas e pelos requisitos do contratante.

2.6 Limitações e perspectivas do ensaio por líquido penetrante

Apesar de suas vantagens operacionais, o ensaio por líquido penetrante apresenta limitações inerentes ao seu princípio de funcionamento, que devem ser consideradas na sua aplicação em inspeções industriais. O método é restrito à detecção de descontinuidades abertas à superfície, não sendo capaz de identificar descontinuidades internas ou subsuperficiais, o que exige sua utilização em conjunto com outros métodos de Ensaios Não Destrutivos (END), como ultrassom ou radiografia. Nesse contexto, a aplicação do ensaio deve seguir os requisitos estabelecidos na ASME Section V, Article 6, que define critérios para a execução do método, incluindo preparação da superfície, aplicação do penetrante, controle do tempo de penetração, remoção do excesso, aplicação do revelador e condições adequadas de inspeção.

Além disso, a confiabilidade do ensaio está diretamente relacionada às condições da superfície inspecionada. Superfícies rugosas, porosas, oxidadas ou contaminadas podem dificultar a penetração do líquido e a formação adequada das indicações, resultando em perda de sensibilidade ou em indicações não representativas (SILVA, 2023). Dessa forma, a preparação da superfície constitui etapa crítica do procedimento, devendo ser executada conforme requisitos normativos e boas práticas de inspeção.

Outro aspecto relevante refere-se à interpretação das indicações, que depende da qualificação técnica do inspetor. Cawley (2001) destaca que a análise das indicações pode apresentar variabilidade quando não realizada por profissionais devidamente capacitados. Nesse sentido, os inspetores responsáveis pela execução e interpretação do ensaio por líquido penetrante devem ser qualificados conforme normas específicas, como a ABNT NBR ISO 9712, sendo essa qualificação, no Brasil, usualmente conduzida por organismos como a ABENDI, que certificam profissionais em diferentes níveis de competência.

Com o objetivo de reduzir a subjetividade associada à interpretação visual, estudos recentes têm proposto a integração do ensaio por líquido penetrante com tecnologias de processamento de imagem e sistemas automatizados de inspeção. Towsyfyhan et al. (2023) destacam que essas abordagens permitem maior padronização dos resultados, além de contribuir para a rastreabilidade e documentação técnica das inspeções.

Mesmo diante dessas limitações, o ensaio por líquido penetrante permanece como uma técnica amplamente utilizada na manutenção industrial, principalmente em inspeções iniciais de juntas soldadas. Sua simplicidade operacional, baixo custo e elevada sensibilidade à detecção de descontinuidades abertas à superfície justificam sua aplicação em sistemas de tubulação da indústria química, desde que empregado de forma criteriosa e em conformidade com as normas técnicas aplicáveis (MISOKEFALOU, et al., 2022).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso, de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e descritiva, tendo como foco a avaliação da eficácia do ensaio não destrutivo por líquido penetrante na inspeção de soldas em tubulações de processo de uma indústria química. O estudo de caso foi escolhido por permitir a análise detalhada de um fenômeno técnico em condições reais de operação, possibilitando a compreensão aprofundada da aplicabilidade do método no contexto industrial específico (Silva, 2023).

O ensaio foi realizado em uma indústria química do setor de fabricação de tintas, localizada no estado de São Paulo, em área classificada, caracterizada pela presença de vapores inflamáveis oriundos do manuseio de solventes orgânicos, como acetatos e hidrocarbonetos aromáticos. As tubulações avaliadas são utilizadas no transporte de solventes, água de processo e outros insumos químicos, sendo submetidas a condições operacionais que exigem elevado nível de confiabilidade e segurança.

3.1 Delimitação do estudo de caso

O estudo concentrou-se na inspeção de tubulações metálicas com juntas soldadas, instaladas em linhas de processo de uma indústria química do setor de tintas. As tubulações analisadas são compostas por aço carbono e aço inoxidável, com diâmetros nominais variando entre aproximadamente 1” e 3”, utilizadas no transporte de solventes orgânicos, água de processo e insumos químicos, como acetatos e hidrocarbonetos.

As juntas avaliadas foram executadas por processo de soldagem TIG (GTAW - Gas Tungsten Arc Welding), amplamente utilizado em tubulações industriais devido ao seu controle térmico e qualidade de acabamento superficial. As condições operacionais das linhas incluem temperaturas de trabalho na faixa de aproximadamente 25°C a 60°C, podendo variar conforme o processo produtivo, e pressão compatível com sistemas de baixa a média pressão, típicos da indústria química.

Foram selecionadas duas regiões representativas do sistema de tubulação, denominadas Peça 1 e Peça 2, ambas contendo juntas soldadas localizadas em pontos considerados críticos, como conexões flangeadas e trechos próximos a mudanças geométricas. As regiões analisadas pertencem a um sistema de tubulação da indústria química, constituído por tubos de aço carbono com diâmetro nominal aproximado de DN 50 (2”) e espessura de parede na faixa de 3,5 a 5,5 mm, compatíveis com tubulações industriais de uso geral. As juntas soldadas foram executadas pelo processo GTAW, aplicadas em componentes como conexões flangeadas e mudanças de direção, conforme observado nas peças analisadas. O sistema opera em ambiente industrial sujeito a condições típicas de processo, incluindo exposição a agentes químicos compatíveis com o segmento industrial analisado, fator que pode favorecer mecanismos de degradação superficial e processos corrosivos ao longo da vida útil do sistema. A seleção dessas regiões considerou fatores como acessibilidade para inspeção, potencial de concentração de tensões, exposição ao ambiente operacional e relevância funcional da linha.

3.2 Procedimentos normativos e condições de segurança

A execução do ensaio por líquido penetrante foi conduzida em conformidade com os requisitos estabelecidos na ASME Section V, Article 6 (Liquid Penetrant Examination), considerando os parâmetros operacionais especificados no procedimento de inspeção adotado, incluindo condições de aplicação, tempo de penetração, remoção do excesso de penetrante e processo de revelação. Foi utilizado penetrante visível tipo II, método A (removível por

solvente), aplicado em juntas soldadas de tubulações de aço carbono. O tempo de penetração adotado foi de 15 minutos, compatível com superfícies metálicas com acabamento semelhante ao avaliado, enquanto o tempo de revelação foi de aproximadamente 10 minutos antes da inspeção final. A inspeção foi realizada em condições adequadas de iluminação, conforme recomendado pela norma. O procedimento adotado contemplou as seguintes etapas principais:

- Limpeza da superfície com solvente apropriado, visando remoção de óleos, graxas e contaminantes;
- Secagem completa da superfície antes da aplicação do penetrante;
- Aplicação de penetrante visível do tipo II, método A (removível por solvente);
- Tempo de penetração de 15 minutos, definido com base na inspeção de juntas soldadas em tubulações de aço carbono, com acabamento superficial típico de processo industrial (superfície não polida), em conformidade com as recomendações da ASME Section V, Article 6, para esse tipo de material e condição superficial.
- Remoção do excesso de penetrante com pano limpo levemente umedecido com solvente removedor;
- Aplicação de revelador do tipo seco ou suspensão não aquosa;
- Tempo de revelação de aproximadamente 10 minutos antes da inspeção;
- Inspeção visual sob iluminação branca adequada, conforme requisitos normativos.

A interpretação das indicações seguiu os critérios estabelecidos na ASME Section V, Article 6, que define os requisitos para avaliação de ensaios por líquido penetrante, incluindo a classificação das indicações quanto à morfologia (lineares ou arredondadas), tamanho e característica geométrica, bem como a identificação de indicações relevantes associadas a descontinuidades superficiais. A aceitação ou rejeição foi realizada conforme os critérios especificados pela norma de projeto da tubulação, em conformidade com os limites admissíveis estabelecidos.

Por se tratar de uma área classificada, com presença de vapores inflamáveis, foram adotadas medidas de segurança específicas para execução do ensaio. Diferentemente de ensaios como radiografia industrial, o ensaio por líquido penetrante não exige isolamento de área, –entretanto, requer controle de fontes de ignição e manipulação segura de produtos químicos que poderão reagir com os materiais utilizados no ensaio por LP.

A chamada “liberação da área” consistiu na verificação prévia das condições operacionais, incluindo:

- Ausência de vazamentos ou emissões de vapores inflamáveis no ponto de inspeção;
- Condições adequadas de ventilação natural ou forçada;

- Autorização operacional para execução da atividade (permissão de trabalho);
- Verificação de que não havia atividades simultâneas que pudessem gerar ignição na região.

Não foi necessário estabelecer raio de isolamento amplo, sendo adotado apenas controle local da área de trabalho, com delimitação imediata do ponto de inspeção.

Adicionalmente, foram utilizados equipamentos compatíveis com área classificada, evitando fontes potenciais de ignição, e adotadas boas práticas de manuseio dos produtos químicos utilizados no ensaio, como penetrante, removedor e revelador.

Os Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) utilizados incluíram:

- Luvas de proteção química;
- Óculos de segurança;
- Máscara de proteção respiratória para vapores orgânicos;
- Vestimenta de proteção (avental ou capote);
- Calçados de segurança.

Essas medidas visaram minimizar a exposição dos operadores a produtos químicos e garantir a execução segura do ensaio em ambiente industrial com risco potencial de inflamabilidade.

3.3 Materiais e equipamentos utilizados

Para a realização do ensaio por líquido penetrante, foram utilizados materiais e equipamentos compatíveis com os requisitos estabelecidos na ASME Section V, Artigo 6, conforme descrito a seguir:

- Líquido penetrante visível do tipo II, método A (removível por solvente), de cor vermelha, adequado para inspeção de superfícies metálicas não porosas, conforme classificação da norma ASME;
- Revelador do tipo não aquoso (NAWD – Non-Aqueous Wet Developer), aplicado por spray, com base solvente, utilizado para evidenciar as indicações por contraste com o penetrante;
- Removedor/limpador à base de solvente orgânico, utilizado tanto para a limpeza inicial da superfície quanto para a remoção do excesso de penetrante, compatível com o sistema penetrante empregado;
- Panos não abrasivos e escovas de limpeza para preparação mecânica complementar da superfície;

- Iluminação artificial portátil com intensidade adequada para inspeção visual sob luz branca, assegurando iluminância mínima de aproximadamente 1000 lux na superfície inspecionada, em conformidade com os critérios estabelecidos pela ASME Section V, Article 6 (Liquid Penetrant Examination) e requisitos mandatórios aplicáveis à edição normativa adotada. Dispositivo fotográfico (câmera digital ou celular) para registro das indicações observadas;
- Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) compatíveis com área classificada, sendo utilizados: Luvas de proteção química de nitrila, óculos de proteção, máscara respiratória com filtros para vapores orgânicos, avental e bota de segurança.

O sistema penetrante utilizado (penetrante + removedor + revelador) foi selecionado de forma compatível entre si, conforme recomendado pelas normas e fabricantes, garantindo a eficiência do ensaio. A escolha do penetrante visível do tipo II justifica-se pela praticidade de aplicação em campo, não sendo necessária iluminação ultravioleta, o que facilita sua utilização em ambientes industriais como o avaliado neste estudo.

3.4 Etapas do ensaio por líquido penetrante

O procedimento metodológico foi estruturado em etapas sequenciais, conforme descrito a seguir:

3.4.1 Preparação da superfície

Inicialmente, realizou-se a preparação da superfície das tubulações e das regiões soldadas, com o objetivo de remover contaminantes que pudessem interferir na penetração do líquido. Essa etapa envolveu limpeza química com solvente apropriado, seguida de limpeza mecânica leve com pano não abrasivo, assegurando a remoção de graxas, óleos, resíduos de processo e oxidações superficiais, conforme recomendado por Leite (2024).

3.4.2 Aplicação do líquido penetrante

Após a limpeza e secagem da superfície, foi aplicado líquido penetrante visível do tipo II, método A, de forma uniforme sobre as regiões de interesse, garantindo a cobertura completa das juntas soldadas e áreas adjacentes. O tempo de penetração adotado foi de aproximadamente 15 a 20 minutos, compatível com a prática recomendada para materiais metálicos com acabamento superficial semelhante.

Ressalta-se que o tempo de penetração não deve ser definido de forma arbitrária, devendo seguir as recomendações estabelecidas na ASME Section V, Artigo 6, que orienta a seleção desse parâmetro em função do material, do tipo de penetrante e das condições da superfície. De modo geral, materiais metálicos com menor rugosidade superficial tendem a demandar tempos reduzidos de penetração, em virtude da maior uniformidade da superfície e da menor interferência na capilaridade do penetrante. Em contrapartida, superfícies com maior rugosidade ou com potencial para a ocorrência de descontinuidades de pequenas dimensões podem requerer tempos de penetração mais elevados, visando assegurar a adequada infiltração do líquido penetrante e maximizar a sensibilidade na detecção de descontinuidades.

O quadro 1 apresenta valores típicos de tempo de penetração recomendados para diferentes materiais, conforme práticas industriais baseadas na ASME Section V (Liquid Penetrant Examination).

Quadro 1 - Tempo de penetração recomendado em função do material

Material	Tempo de Penetração (mínimo)
Aço carbono	10 a 20 minutos
Aço inoxidável	10 a 30 minutos
Alumínio e ligas não ferrosas	5 a 15 minutos
Fundidos (superfície rugosa)	20 a 40 minutos

Fonte: Adaptado de ASME Section V, Artigo 6

3.4.3 Remoção do excesso de penetrante

Concluído o tempo de penetração, procedeu-se à remoção do excesso de penetrante presente na superfície utilizando pano limpo, seco e não abrasivo, seguido de limpeza complementar com removedor à base de solvente orgânico, compatível com o sistema penetrante utilizado (método A – removível por solvente), conforme classificação da ASME Section V, Artigo 6.

A remoção foi realizada de forma controlada, evitando a aplicação excessiva de solvente diretamente sobre a superfície, de modo a não extrair o penetrante retido no interior das descontinuidades. Conforme Duarte (2021), a utilização inadequada do removedor pode comprometer a sensibilidade do ensaio, resultando na eliminação parcial ou total das indicações.

3.4.4 Aplicação do revelador

Em seguida, aplicou-se o revelador sobre a superfície inspecionada, formando uma camada homogênea. O revelador tem a função de extrair o penetrante retido nas descontinuidades e torná-lo visível por contraste, possibilitando a identificação das indicações superficiais. Após a aplicação, aguardou-se 15 minutos conforme orientação para o aparecimento das indicações, conforme quadro 1.

3.4.5 Inspeção visual e registro dos resultados

A inspeção visual foi realizada sob iluminação branca com intensidade mínima de 1000 lux, conforme orientação para ensaios por líquido penetrante visível, garantindo contraste adequado para a identificação das indicações superficiais. A verificação da intensidade luminosa deve ser realizada por meio de luxímetro calibrado.

Durante a inspeção, as regiões soldadas foram avaliadas de forma sistemática, observando-se a presença de indicações lineares ou arredondadas, conforme critérios de classificação do ensaio. As indicações observadas foram registradas por meio de fotografias, visando garantir a rastreabilidade dos resultados e permitir análises posteriores.

Ressalta-se que, para sistemas fluorescentes (não aplicados neste estudo), a inspeção deve ser realizada sob luz ultravioleta, com intensidade mínima de aproximadamente 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, em ambiente com iluminação branca controlada. No presente caso, por tratar-se de penetrante visível, a inspeção foi conduzida exclusivamente sob luz branca.

A padronização das condições de iluminação é fundamental para reduzir a subjetividade da interpretação e aumentar a confiabilidade do ensaio, conforme discutido por CAWLEY, (2001).

3.5 Análise dos dados

A análise dos resultados foi conduzida de forma qualitativa, considerando a presença, a forma e a distribuição das indicações observadas após a aplicação do revelador. A interpretação das indicações foi realizada com base nos critérios estabelecidos na ASME Section V, Article 6, no que se refere à classificação das indicações quanto à sua forma (lineares ou arredondadas), dimensão e relevância.

A avaliação de aceitabilidade das indicações identificadas foi realizada de acordo com os critérios definidos pelas normas de projeto e inspeção de tubulações, especificamente a

ASME B31.3, aplicável a sistemas de tubulação da indústria química, e a API 570, no que se refere aos requisitos de inspeção em serviço.

As indicações observadas foram classificadas quanto à sua forma, sendo distinguidas em indicações lineares e arredondadas, conforme prática normativa. Ressalta-se que toda indicação detectada pelo ensaio por líquido penetrante corresponde a uma descontinuidade aberta à superfície. A classificação como defeito depende da comparação com os critérios de aceitabilidade definidos pela norma aplicável. Dessa forma, descontinuidades que não atendem aos critérios normativos são classificadas como defeitos, implicando na necessidade de reparo da junta soldada.

Os resultados obtidos para as peças analisadas foram avaliados individualmente, não sendo utilizada a comparação entre elas como critério de validação da eficácia do método. O ensaio por líquido penetrante demonstrou ser capaz de identificar descontinuidades superficiais nas regiões inspecionadas, conforme sua aplicação prevista.

Destaca-se que o ensaio por líquido penetrante não permite a avaliação da integridade estrutural do componente, uma vez que se limita à detecção de descontinuidades abertas à superfície, não fornecendo informações sobre profundidade ou extensão interna das descontinuidades. Assim, sua aplicação deve ser compreendida como parte de um conjunto de ensaios não destrutivos, podendo ser complementada por métodos volumétricos, conforme exigido pelas normas técnicas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

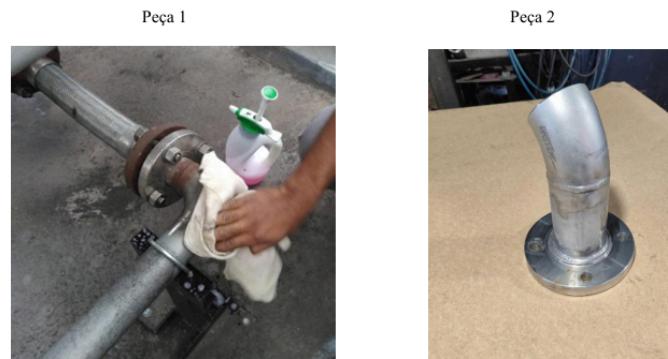
Os resultados obtidos a partir da aplicação do ensaio não destrutivo por líquido penetrante nas tubulações analisadas evidenciam a eficácia do método na detecção de descontinuidades superficiais em juntas soldadas, confirmando sua aplicabilidade em ambientes industriais críticos, como a indústria química. A análise foi conduzida separadamente para a Peça 1 e a Peça 2, considerando as diferentes condições de soldagem, acabamento superficial e comportamento das indicações ao longo das etapas do ensaio.

A etapa de preparação da superfície mostrou-se fundamental para a confiabilidade do ensaio. Conforme observado nas imagens da Peça 1 e da Peça 2, a remoção de resíduos químicos, graxas e contaminantes industriais permitiu a exposição adequada da região soldada, reduzindo a possibilidade de indicações falsas.

Esse resultado está em consonância com Duarte (2021), que destaca que superfícies contaminadas podem impedir a correta penetração do líquido, mascarando descontinuidades

reais. Leite (2024) reforça que a limpeza adequada é especialmente crítica em tubulações de indústrias químicas, onde resíduos de processo são comuns.

Figura 1 - Resultados da etapa de preparação da superfície



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

Após a aplicação do penetrante visível, observou-se uma cobertura homogênea das regiões soldadas em ambas as peças. Na Peça 1, o penetrante distribuiu-se de forma uniforme ao longo do cordão de solda e da zona termicamente afetada, enquanto na Peça 2 a aplicação evidenciou maior concentração do produto em regiões adjacentes à solda de topo.

Segundo HOU *et al.* (2023), a correta aplicação do penetrante e o respeito ao tempo de penetração são determinantes para a identificação de microfissuras e porosidades abertas à superfície, especialmente em tubulações de aço carbono e aço inoxidável. Os resultados observados indicam que o tempo de penetração adotado foi adequado para ambas as peças.

Figura 2 - Aplicação do líquido penetrante e infiltração nas discontinuidades



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

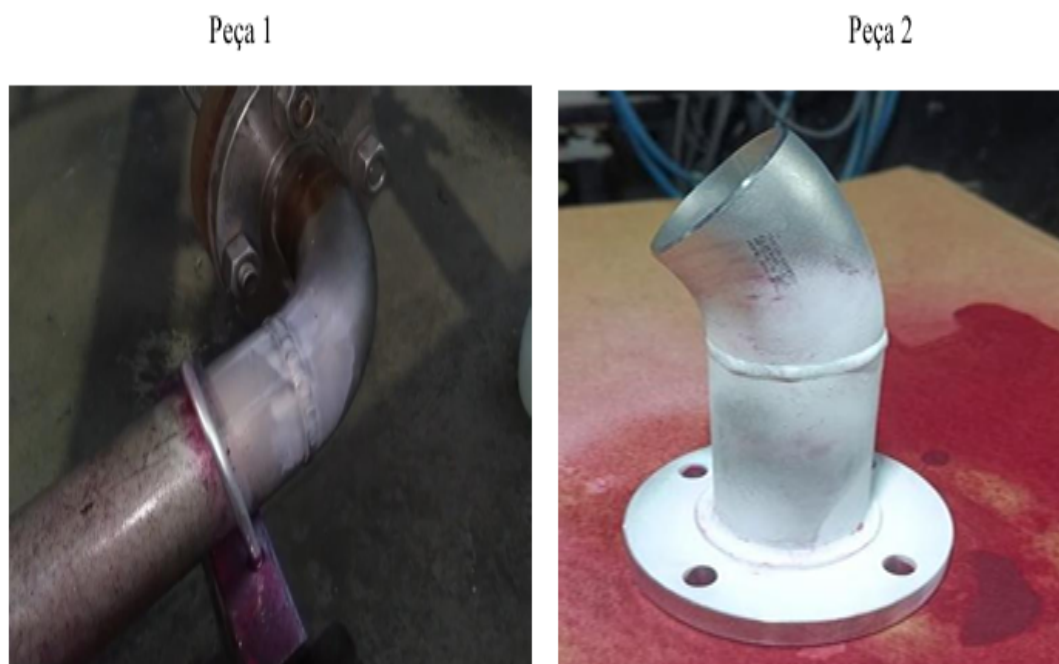
Na etapa de remoção do excesso de penetrante, verificou-se comportamento distinto entre as duas peças analisadas.

Na Peça 1, após a limpeza superficial, não foram observadas indicações remanescentes na superfície, indicando ausência de descontinuidades abertas à superfície detectáveis pelo ensaio por líquido penetrante.

Na Peça 2, mesmo após a remoção controlada do excesso de penetrante, permaneceram regiões com retenção localizada do produto, especialmente na interface entre o tubo e o flange, caracterizando a presença de indicações associadas a descontinuidades abertas à superfície.

Esse comportamento indica a possível presença de descontinuidades superficiais abertas, conforme descrito por Abreu (2019), que associa a retenção localizada do penetrante a falhas de soldagem potencialmente críticas, capazes de evoluir para vazamentos em sistemas pressurizados.

Figura 3 - Remoção do excesso de penetrante e definição das indicações



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

Na Peça 1, após o tempo de revelação, não foram observadas indicações na superfície, caracterizando ausência de descontinuidades abertas à superfície detectáveis pelo ensaio por líquido penetrante.

Na Peça 2, foram observadas indicações ao longo do cordão de solda, evidenciadas pelo contraste entre o revelador e o penetrante exsudado. As indicações apresentaram formas

lineares e arredondadas, sendo classificadas conforme os critérios estabelecidos na ASME Section V, Artigo 6, que distingue indicações de acordo com sua geometria.

De acordo com a prática normativa, indicações lineares estão associadas a descontinuidades como trincas ou falta de fusão, enquanto indicações arredondadas estão associadas, em geral, a porosidades. A avaliação da aceitabilidade dessas indicações deve ser realizada com base nos critérios definidos pela norma de projeto aplicável à tubulação, como a ASME B31.3, que estabelece limites dimensionais e critérios de aceitação para soldas.

Assim, as indicações observadas na Peça 2 caracterizam a presença de descontinuidades abertas à superfície, sendo sua classificação como defeito condicionada à verificação de conformidade com os critérios normativos. Caso as indicações não atendam aos limites estabelecidos pela norma aplicável, a junta soldada deve ser submetida a reparo ou, quando aplicável, à remoção do trecho afetado e posterior reexecução da soldagem, seguida de nova inspeção.

Figura 4 - Aplicação do revelador e aparecimento das indicações



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

A inspeção visual final foi realizada após o tempo de revelação, conforme procedimento estabelecido na ASME Section V, Artigo 6.

Na Peça 1, não foram observadas indicações na superfície após a aplicação do revelador, caracterizando ausência de descontinuidades abertas à superfície detectáveis pelo ensaio por líquido penetrante. Ressalta-se que a aceitabilidade da junta soldada não pode ser determinada exclusivamente por essa observação, devendo ser avaliada conforme os critérios estabelecidos na norma de projeto aplicável, como a ASME B31.3 ou requisitos específicos do contratante.

Na Peça 2, foram observadas indicações ao longo do cordão de solda, evidenciando a presença de descontinuidades abertas à superfície. A classificação dessas descontinuidades como aceitáveis ou não depende da verificação dos critérios dimensionais e de distribuição estabelecidos na norma aplicável. Caso tais critérios não sejam atendidos, as descontinuidades devem ser classificadas como defeitos, implicando na necessidade de reparo da solda e posterior reinspeção.

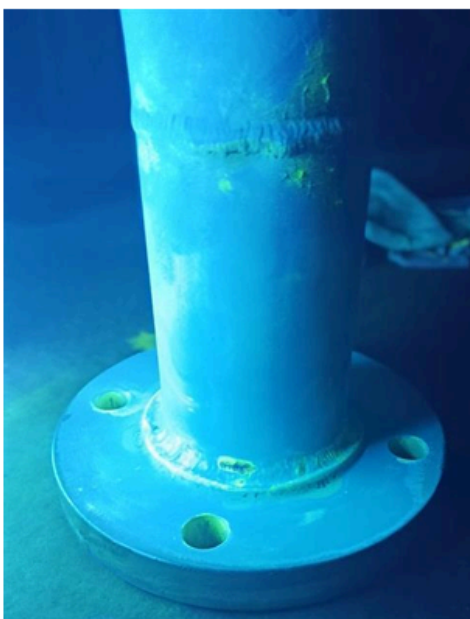
Destaca-se que o ensaio por líquido penetrante se limita à detecção de descontinuidades superficiais, não sendo possível, por meio deste método, avaliar a profundidade ou extensão interna das indicações observadas. Dessa forma, a avaliação da condição da junta soldada deve considerar, quando aplicável, a utilização de métodos complementares de ensaios não destrutivos, conforme exigido pelas normas técnicas e pelas condições operacionais do sistema.

Figura 5 - Inspeção visual final e registro das descontinuidades

Peça 1



Peça 2



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

A comparação entre as duas peças analisadas evidencia a capacidade do ensaio por líquido penetrante em discriminar condições distintas de integridade superficial em tubulações industriais. Enquanto a Peça 1 apresentou comportamento compatível com solda íntegra, a Peça 2 revelou descontinuidades que demandam intervenção corretiva, como reparo da solda ou substituição do componente.

Esses achados corroboram os estudos de Silva (2023) e Misokefalou *et al.* (2022), os quais evidenciam a relevância dos ensaios não destrutivos superficiais na tomada de decisão em estratégias de manutenção baseada em risco. Nesse contexto, a sistematização dos resultados do ensaio contribui para a rastreabilidade das inspeções e para a documentação técnica do processo, conforme discutido por Towsyfyhan *et al.* (2023).

Assim, os resultados demonstram que o ensaio por líquido penetrante é uma técnica eficaz, confiável e economicamente viável para inspeção de tubulações em indústrias químicas, especialmente quando aplicado de forma criteriosa e integrada a práticas de segurança em áreas classificadas.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu analisar a aplicação do ensaio não destrutivo por líquido penetrante na inspeção de tubulações de processo em uma indústria química, considerando sua utilização conforme procedimentos estabelecidos na ASME Section V, Artigo 6, e sua aplicação no contexto de inspeção de juntas soldadas.

Os resultados obtidos evidenciaram que, na Peça 1, não foram observadas indicações após a aplicação do revelador, caracterizando ausência de descontinuidades abertas à superfície detectáveis pelo ensaio por líquido penetrante. Na Peça 2, foram observadas indicações ao longo do cordão de solda, caracterizando a presença de descontinuidades abertas à superfície.

Ressalta-se que a classificação dessas descontinuidades como aceitáveis ou como defeitos depende dos critérios estabelecidos pelas normas de projeto e inspeção aplicáveis, como a ASME B31.3 e a API 570, bem como de eventuais requisitos adicionais definidos pelo contratante. Quando as descontinuidades não atendem aos critérios normativos, devem ser classificadas como defeitos, implicando na necessidade de reparo da solda e posterior reinspeção conforme os procedimentos aplicáveis.

A execução do ensaio demonstrou que o método é eficaz na detecção de descontinuidades superficiais, desde que aplicado conforme os parâmetros normativos e por profissionais qualificados, conforme requisitos da ABNT NBR ISO 9712. Entretanto, o ensaio por líquido penetrante apresenta limitações inerentes ao seu princípio, sendo restrito à detecção de descontinuidades abertas à superfície.

Dessa forma, em sistemas de tubulação industrial, que são tratados como sistemas pressurizados, a avaliação da integridade das juntas soldadas não deve ser realizada com base em um único método de ensaio. Conforme prática industrial e exigências normativas, o ensaio por líquido penetrante deve ser aplicado de forma complementar a outros métodos de END, como ultrassom ou radiografia, conforme definido pelos códigos aplicáveis.

Conclui-se, portanto, que o ensaio por líquido penetrante é uma ferramenta adequada para inspeção superficial de soldas em tubulações industriais, especialmente como método inicial de avaliação. Sua aplicação, quando integrada a outros ensaios e conduzida conforme normas técnicas, contribui para o controle da qualidade das juntas soldadas e para a segurança operacional dos sistemas.

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHI-MAMOUDAN, F. *et al.* Non-destructive testing and evaluation of hybrid materials. **Sensors**, Basel, v. 25, n. 12, p. 3635, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/12/3635>. Acesso em: 6 fev. 2026.

ABREU, R. S. A corrosão em tubulações de aço carbono pertencentes ao sistema STU-85 da Base Operacional Geólogo Pedro de Moura (BOGPM) – PETROBRAS/URUCU-AM: estudo de caso. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, e12345, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/BgPqZxr3fV37R7QWHXS3XWM/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 6 fev. 2026.

CALENZANI, Dayvson Mulinari; COSTA, Lucas Gomes Reis. **Avaliação de desempenho dos ensaios não destrutivos por líquido penetrante e partícula magnética em juntas soldadas**. 2022. 89 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/items/7b4835f7-a892-4a7e-9275-494765211eab/full>. Acesso em: 6 fev. 2026.

CAWLEY, P. Non-destructive testing — current capabilities and future directions. **Journal of Mechanical Engineering Science**, London, v. 215, n. 3, p. 213-223, 2001. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/146442070121500403>. Acesso em: 6 fev. 2026.

DUARTE, G. D. **O controle da qualidade em processos de produção mecânica não-seriada**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/e2f3381c-cf4c-4989-a3dc-ead1848c000a/GUILHERME%20DIAS%20DUARTE%20PME10.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2026.

HOU, Y. *et al.* Assessing the efficacy of non-destructive testing methods to detect pitting corrosion. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Oxford, v. 201, p. 104789, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/364636727_Assessing_the_efficacy_of_non-destructive_testing_methods_to_detect_pitting_corrosion. Acesso em: 6 fev. 2026.

JAMES, T.; MATHEW, A.; SOLOMON, M. Comparative effectiveness of dye penetrant testing and magnetic particle testing for surface crack detection in welded joints. 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/398346661_Comparative_Effectiveness_of_Dye_Penetrant_Testing_and_Magnetic_Particle_Testing_for_Surface_Crack_Detection_in_Welded_Joints. Acesso em: 6 fev. 2026.

KUMAR, S.; MAHTO, D. Recent trends in industrial and other engineering applications of non-destructive testing: a review. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 4, n. 9, p. 1045-1054, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/295906997_Recent_Trends_In_Industrial_And_Other_Engineering_Applications_Of_Non_Destructive_Testing_A_Review. Acesso em: 6 fev. 2026.

LEITE, Vinícius Reis. Ensaio não destrutivo: aplicação por líquido penetrante. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, v. 19, n. 2, 2013. Disponível em: <https://periodicos.unitau.br/exatas/article/view/1926>. Acesso em: 22 maio 2026.

MISOKEFALOU, E. *et al.* Non-destructive testing for quality control in automotive industry. **International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology**, v. 7, n. 1, p. 349-355, 2022. Disponível em: <https://www.ijeast.com/papers/349-355,%20Tasma0701,IJEAST.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2026.

QUISPE-AVILÉS, J. M. Analysis of cracks caused by hydrogen damage: NDT techniques including liquid penetrant testing. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 11, p.

100345, 2025. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2949908925002420>. Acesso em: 6 fev.
2026.

SILVA, M. I. Review of conventional and advanced non-destructive testing methods. **Elsevier Series in Materials Science**, Amsterdam, 2023. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642523000877>. Acesso em: 6 fev.
2026.

TOWSYFYAN, H. *et al.* Advanced non-destructive testing techniques and integration with liquid penetrant testing. 2023. Disponível em:
<https://padgrp.com/advanced-non-destructive-testing-ndt/>. Acesso em: 6 fev. 2026.