



XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção
São Paulo, 21 a 23 de Setembro de 2016

AValiação de Falhas em Tubulações de CPVC para Sistemas Hidráulicos Prediais de Água Quente por Tomografia Computadorizada de Raios X¹

TANINAGA, Simone N. (1); SOWMY, Daniel S. (2); SCABBIA, Andre Luiz G. (3)

(1) IPT, e-mail: simonen@ipt.br; (2) IPT / POLI-USP, e-mail: dss@ipt.br; (3) IPT, e-mail: scabbia@ipt.br

RESUMO

Atualmente as tubulações de CPVC são amplamente utilizadas em sistemas hidráulicos prediais de água quente. Sua boa resistência química e à altas temperaturas, bem como a facilidade de instalação são algumas das características que motivam a sua utilização. Como qualquer componente dos sistemas hidráulicos prediais, as tubulações de CPVC estão sujeitas a falhas que podem ter origens diversas. Para a determinação das causas de falhas destas tubulações, existem diversas técnicas e ensaios, destrutivos e não destrutivos. Entre os não destrutivos está a tomografia computadorizada por absorção de raios X (TCRX) que nos últimos anos tem sido utilizada na avaliação dimensional, geométrica e da qualidade de materiais, também é uma alternativa para análise de falhas. Este artigo, que possui caráter exploratório, após apresentar a revisão bibliográfica das atuais técnicas utilizadas na investigação da origem de falhas de tubulações de CPVC, expõe resultados de análises de corpos de prova de tubulações de CPVC submetidos à tomografia computadorizada de raios X. Os corpos de prova foram preparados com falhas conhecidas, simulando erros de instalação e armazenamento. Espera-se com este estudo aumentar o conhecimento sobre uso da TCRX aplicada na investigação de falhas em tubulações de CPVC, identificando suas limitações e vantagens.

Palavras-chave: Tubos e conexões. CPVC. Falhas. Tomografia computadorizada

ABSTRACT

Nowadays CPVC pipes are widely used in hot water systems in building installations. Its good chemical resistance and high temperatures as well as the ease installation are some of the features that motivate their use. Like any building installations component, hot water systems CPVC pipes and fittings are subject to failures that have different origins. To determine the cause of failure of these pipes, there are several techniques and tests, destructive and non-destructive. Computed tomography X-ray which in recent years has been used in the dimensional, geometric evaluation and quality materials, is also an alternative to failure analysis of CPVC pipes. This article, which has exploratory character, after presenting a literature review of current techniques used in the investigation of the origin of CPVC piping failures, exposes results of CPVC joints submitted to computed tomography X-ray. The samples were prepared with known failures caused by poor installation procedure and improper storage. It is hoped that this study increase the knowledge of the use of computed tomography X-ray applied to the failure investigation in CPVC pipes, identifying limitations and advantages.

¹ TANINAGA, Simone N.; SOWMY, Daniel S.; SCABBIA, Andre Luiz G. Avaliação de falhas em tubulações de CPVC para sistemas hidráulicos prediais de água quente por método não destrutivo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

Keywords: Pipes and fittings. CPVC. Failures. Computed Tomography.

1 INTRODUÇÃO

O policloreto de vinila clorado (CPVC) é um dos mais importantes polímeros utilizados em tubos e conexões na atualidade. O CPVC é produzido pela pós-cloração do policloreto de vinila (PVC) e oferece uma mistura de resistência a produtos químicos e intempéries, resistência mecânica e baixo custo de instalação para diversas aplicações, incluindo aplicações em altas temperaturas. (MERAH, 2008)

Como qualquer componente dos sistemas hidráulicos prediais, os tubos e conexões de CPVC para água quente estão sujeitos a falhas que podem ter origens diversas.

Para a determinação das causas de falhas destas tubulações, existem diversas técnicas e ensaios, destrutivos e não destrutivos, cuja aplicabilidade depende de cada caso a ser analisado.

A tomografia computadorizada por absorção de raios X (TCRX) – técnica originalmente concebida para realização de diagnósticos médicos – nos últimos anos tem sido utilizada na avaliação dimensional, geométrica e da qualidade de materiais, também é uma alternativa para análise de falhas não destrutiva de tubulações de CPVC.

Este artigo, que possui caráter exploratório, após apresentar a revisão bibliográfica das atuais técnicas e ensaios utilizados na investigação da origem de falhas de tubulações de CPVC, expõe resultados de análises de corpos de prova de juntas de CPVC submetidos à tomografia computadorizada de raios X. Os corpos de prova foram preparados com falhas conhecidas, simulando erros de instalação e armazenamento.

Espera-se com este estudo, aumentar o conhecimento do uso da TCRX aplicada na investigação de falhas em tubulações de CPVC, identificando suas limitações, vantagens e desvantagens.

2 TUBULAÇÕES DE CPVC PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS PREDIAIS DE ÁGUA QUENTE

Os tubos de CPVC são produzidos através do processo de extrusão e as conexões são moldadas por injeção. No Brasil, devem atender aos critérios estabelecidos pela Norma Brasileira ABNT NBR 15884:2010, e são fabricados nos diâmetros de 15 mm a 114 mm, e SDR² igual a 11. Devem ser projetados para uma vida útil de 50 anos para uma pressão máxima de serviço (estática + sobrepressão) de 900 kPa.

A execução das juntas entre os tubos e conexões de CPVC deve ser realizada por meio de adesivo específico para CPVC, que provoca um processo de soldagem a frio. Segundo Ebnesajjad (2008), neste processo, as áreas a serem unidas são amolecidas por meio de um solvente (ou mistura

² SDR (standard dimension ratio) é a relação diâmetro/espessura

de solventes) presente no adesivo que dissolve o polímero a temperatura ambiente. Quando isto ocorre, a cadeia polimérica ganha uma significativa liberdade para se movimentar e se emaranha com outras cadeias igualmente dissolvidas do outro componente a ser unido. Após um determinado período (tempo de cura), o solvente se evapora, e então as cadeias poliméricas perdem a sua mobilidade. Este processo deixa uma massa sólida (resina) de cadeias poliméricas emaranhadas, que constitui a solda.

Para que a soldagem ocorra adequadamente deve existir uma interferência entre o diâmetro externo do tubo e o diâmetro interno da conexão, promovendo desta forma uma pressão entre as superfícies que serão unidas. Caso encaixe entre o tubo e a conexão esteja com folga, a soldagem não ocorrerá.

3 PRINCIPAIS CAUSAS DE FALHAS EM TUBULAÇÕES DE CPVC

Como quaisquer componentes dos sistemas hidráulicos prediais, as tubulações para água quente, sejam elas de material plástico ou metálico estão sujeitas à falhas.

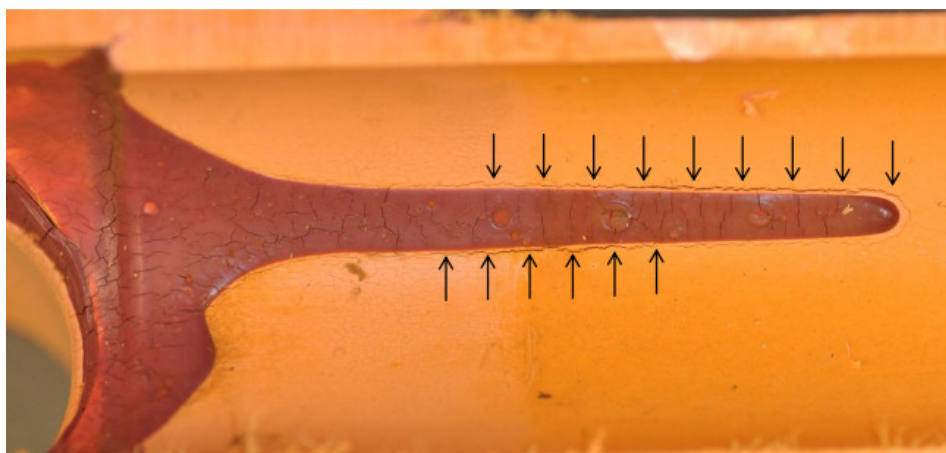
A experiência oriunda das investigações de falhas tem mostrado que, como qualquer outro produto plástico, um grande número de falhas não ocorre no tubo propriamente dito, mas nas suas juntas (FARSHAD, 2006).

Falhas ocasionais podem ser causadas por inúmeros fatores, entretanto, a instalação inadequada é geralmente a causa mais comum quando ocorre uma falha em tubulações de CPVC. (PRIDDY, 2013). Ainda de acordo com este autor e Passamaneck (2010), as causas mais frequentes de falhas em tubulações de CPVC devido às práticas inadequadas de instalação são:

- Aplicação de adesivo em excesso: o excesso de adesivo pode causar o enfraquecimento das paredes do tubo. O adesivo aplicado em excesso pode escorrer para o interior do tubo ou conexão, favorecendo a ocorrência de *stress cracking*³ em seu entorno (ver Figura 1);

³ Segundo Priddy (2012), o *stress cracking* (fissuramento sob tensão) é um mecanismo de falha que ocorre quando tubos e conexões de CPVC sob tensão absorvem determinados contaminantes químicos que aumentam a mobilidade das cadeias poliméricas, permitindo que o seu emaranhamento se desfça, o que reduz sua resistência e fragiliza local de ocorrência.

Figura 1 – Fissuras devido ao *stress cracking* ao redor do excesso de adesivo na superfície interna do CPVC



Fonte: Pfaendtner (2014)

- Aplicação de adesivo insuficiente: A aplicação insuficiente de adesivo pode gerar vazios nas áreas de contato entre o tubo e a conexão, que resultarão em vazamentos;
- Uso de adesivo não aprovado pelo fabricante do tubo: esta prática pode resultar em junta não unida adequadamente, podendo gerar vazamentos ou separação dos tubos e conexão;
- Inserção inadequada do tubo na conexão: um desalinhamento pode resultar em espessuras do adesivo diferenciadas ao longo da circunferência do tubo, que pode dificultar a adesão das áreas onde a espessura do adesivo for muito fina. A insuficiente inserção do tubo na conexão ou um tubo cortado fora de esquadro, pode reduzir a área de adesão resultando em uma menor resistência mecânica da junta;
- Utilização de suportes inadequados / espaçamento entre os suportes inadequados: a utilização de suportes inadequados podem impedir expansão térmica dos tubos de CPVC, gerando a ocorrência de rupturas na região dos suportes.

4 ENSAIOS PARA INVESTIGAÇÃO DE FALHAS EM TUBULAÇÕES PLÁSTICAS

Kirker (2012) afirma que uma investigação das causas de falha em tubulações em CPVC requer conhecimento único e, dependendo do caso, de métodos de análises especializados tais como: análise do material através de microscópio e várias técnicas de análises químicas (cromatografia gasosa / espectrometria de massa, espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) etc.).

Segundo Hayes et al. (2011) deve-se realizar um exame cuidadoso do tubo e eventuais rupturas pois esta análise geralmente identificará um modo particular de falha e auxiliará na determinação de sua causa raiz. Afirma ainda que a fractografia é uma técnica muito utilizada por metalurgistas e engenheiros forenses para caracterizar a fabricação, esforços solicitantes e histórico ambiental da área fraturada.

A Tabela 1 apresenta as principais causas de falhas em tubulações de CPVC devido a instalação deficiente e respectivos métodos - na sua maioria destrutivos - geralmente utilizados para realização de diagnósticos.

Tabela 1 – Principais causas de falhas em tubulações de CPVC devido instalação inadequada e métodos de ensaio geralmente utilizados para diagnóstico

Causa raiz da falha	Ensaio
Excesso de adesivo	Corte e inspeção
Adesivo insuficiente	Corte e inspeção
Abraçadeiras inadequadas	Inspeção no local
Espaçamento das abraçadeiras inadequado	Inspeção no local
Abraçadeiras muito apertadas	Verificação da ovalização / marca das abraçadeiras no tubo
Instalação não permite a expansão térmica das tubulações	Inspeção no local
Tubos não alinhados	Inspeção no local
Inserção do tubo na conexão não suficiente	Corte e inspeção
Tubos com rebarba	Corte e inspeção
Tubos não chanfrados	Corte e inspeção
Tubos cortados fora de esquadro	Corte e inspeção

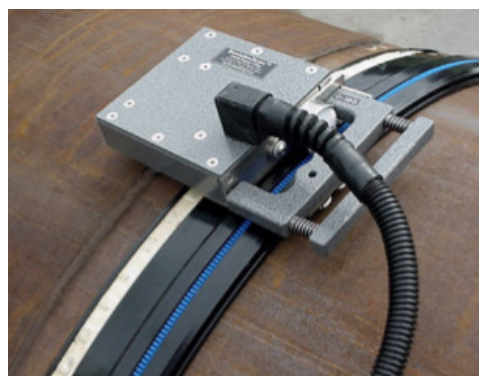
Fonte: adaptado de Priddy (2013)

De acordo com Andreucci (2013), os métodos não destrutivos mais frequentes para a verificação de juntas soldadas são a radiografia e o ultrassom. A radiografia é um método que se baseia na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada, sendo que esta absorção depende de diferenças de densidade e espessura do material ou até mesmo diferenças de composição (vide Figura 2). Segundo este autor, a tomografia também pode ser considerada como um método não destrutivo porém sua aplicação é limitada em função da aplicação restrita a peças pequenas.

Figura 2 – Radiografia digital – inspeção em campo



(a) Técnica de radiografia digital direta em uma solda de tubulação



(b) A placa digitalizadora gira ao redor da solda por um guia fixo no tubo



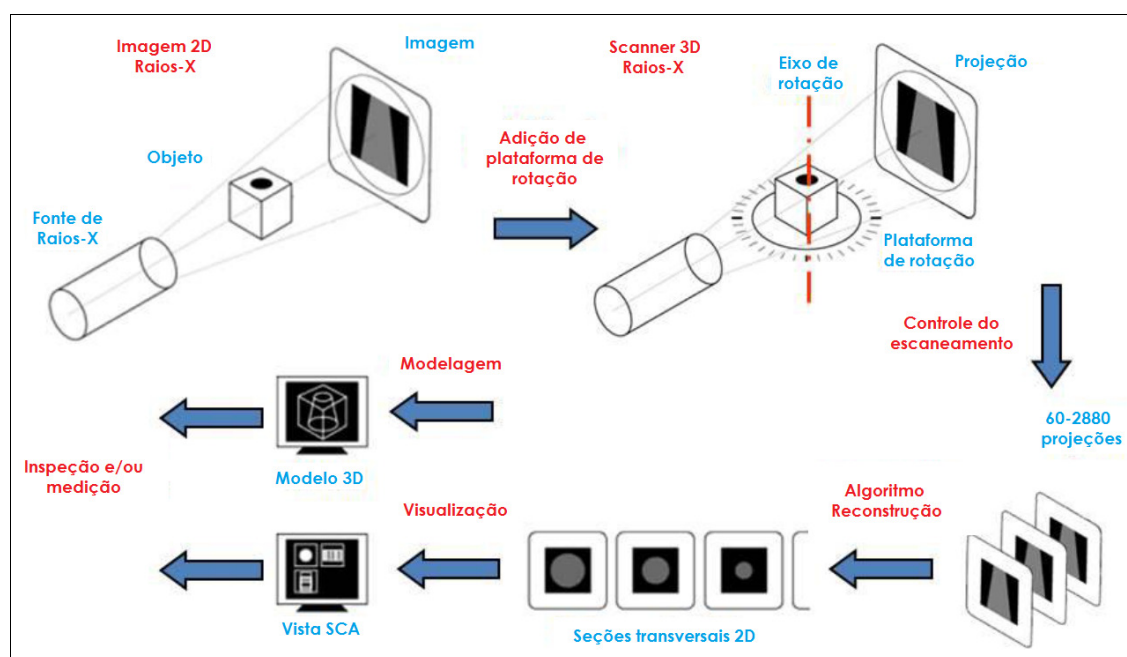
(c) Arquivo eletrônico gerado pela radiografia digital

Fonte: Andreucci (2013)

Ito et al. (2013) afirmam que a radiografia de raios X é um método não destrutivo amplamente utilizado, permitindo a obtenção de informações sobre o tamanho da falha e sua posição dentro do item analisado, porém apresenta um ponto fraco em relação a determinação de espessuras pois as imagens geradas são bidimensionais. Sobre a TCRX, os autores afirmam que não é adequada para a detecção de fissuras de tubos em campo porque o equipamento tem grandes dimensões, entretanto ressaltam que este método permite a determinação de dimensões sem a perda de qualidade das informações devido a reestruturação da imagem tomográfica.

De acordo com Silva (2013), em um sistema de TCRX, a amostra inspecionada é rotacionada sob radiação emitida por uma fonte de raios X. A distribuição de intensidade da radiação, após atravessar o objeto, é determinada por meio de um detector e digitalmente armazenada como uma projeção 2D. As projeções resultantes da rotação completa da amostra definem a entrada do algoritmo matemático usado para construir um volume que representa a amostra interna e externamente. A Figura 3 apresenta a visão geral deste processo.

Figura 3 – Visão geral do processo de medição por TCRX

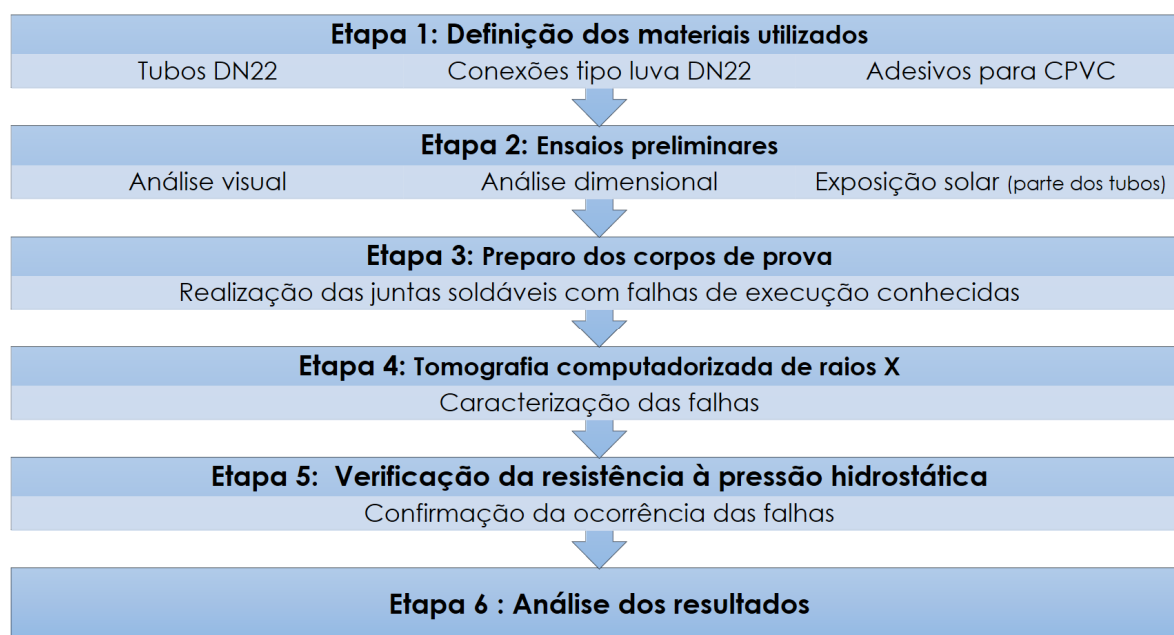


Fonte: Malcom, Liu e Lifton (2013)

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento teve como objetivo simular a execução inadequada de juntas soldáveis de CPVC e verificar como estas podem ser caracterizadas, mensuradas ou identificadas através da TCRX (ver Figura 4).

Figura 4 – Etapas do experimento realizado



Fonte: Os autores

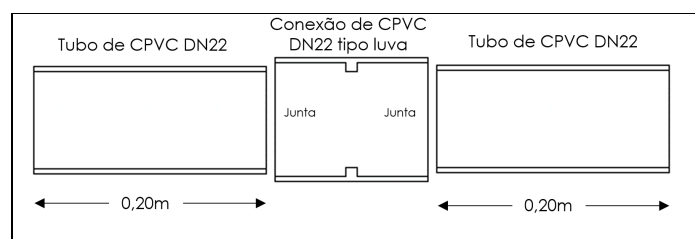
Para a realização das juntas foram utilizados tubos e conexões (tipo luva soldável) de CPVC de diâmetro externo 22 mm e adesivos para sistemas hidráulicos prediais de água quente de diversos fabricantes.

O diâmetro externo dos tubos e o diâmetro interno da bolsa das conexões devem proporcionar um “encaixe” justo, de forma que as superfícies fiquem pressionadas uma contra a outra visando favorecer o processo de soldagem química. A ocorrência de defeitos nas superfícies a serem unidas (depressões e ressaltos por exemplo), e tubos e conexões em não conformidade dimensional podem ocasionar em juntas soldáveis com desempenho inadequado. Desta forma, os tubos e conexões utilizados neste experimento foram previamente submetidos às análises visual e dimensional previstas pela Norma Brasileira ABNT NBR 15884:2010 Partes 1 e 2.

A análise dimensional dos tubos e conexões foi realizada através da TCRX (menor divisão de 0,001 mm). Em relação à análise das conexões de CPVC, a TCRX apresentou grande vantagem pelo fato de ser um método não destrutivo, facilitando a medição de características internas tais como o diâmetro interno da bolsa e a espessura de parede do fundo da bolsa.

Cada corpo de prova ensaiado consistia em uma montagem composta por 2 segmentos de tubos e uma conexão conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Montagem dos corpos de prova



Fonte: Os autores

As juntas soldadas dos corpos de prova foram executadas de forma a simular procedimentos de execução da junta inadequados conforme apresentado na Tabela 2.





Tabela 2 – Procedimento de execução inadequado aplicado no preparo dos corpos de prova

Procedimento correto segundo a ABNT NBR 15884-3:2010 (até DN54)	Procedimento de execução inadequado simulado	Procedimento aplicado no corpo de prova
Aplicação de uma fina camada uniforme, no ponta do tubo e na bolsa da conexão.	Aplicação de adesivo em excesso	Aplicação de 3 camadas de adesivo.
Aplicação de uma fina camada uniforme, no ponta do tubo e na bolsa da conexão.	Aplicação insuficiente de adesivo	Aplicação de uma fina camada aplicada de forma não uniforme, apenas na ponta do tubo.
Tubos cortados em esquadro e remoção das rebarbas.	Tubos cortados fora de esquadro e sem remoção de rebarbas	A ponta do tubo cortada fora de esquadro (aproximadamente 20 °) e as rebarbas não foram removidas.
As superfícies a serem unidas não devem ser lixadas.	Lixamento das superfícies a serem soldadas	As superfícies da ponta do tubo e da bolsa da conexão a serem unidas foram lixadas com lixa nº150.
Devem ser utilizados apenas os adesivos aprovados pelo fabricante.	Aplicação de adesivo não aprovado pelo fabricante do tubo / conexão	Utilização de adesivo não aprovado pelo fabricante do tubo ou da conexão.
Não há	Inserção insuficiente do tubo na bolsa da conexão	A ponta do tubo foi inserida até cerca de 50% da profundidade da bolsa.
Os tubos devem ser protegidos por tela de polietileno de alta densidade com negro de fumo e percentual de sombreamento de 80%	Armazenamento do tubo em área descoberta sem a proteção adequada	Tubo em exposição solar por 90 dias (irradiação solar de 1.5 GJ/m²).

Fonte: Os autores

Foram preparados 4 corpos de prova, totalizando 8 juntas que foram numeradas de 1 a 8, de acordo com o detalhamento apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Detalhamento do preparo dos corpos de prova

Corpo de prova	Preparo da junta do lado esquerdo	Preparo da junta do lado direito
<p>A</p> 	<p>Junta 1: Tubo, conexão e adesivo do mesmo fabricante. Aplicação do adesivo em excesso. Não foi aplicado o ¼ de volta.</p>	<p>Junta 2: Tubo (exposto a intempéries), conexão e adesivo do mesmo fabricante. Aplicação do adesivo em excesso.</p>
<p>B</p> 	<p>Junta 3: Tubo, conexão e adesivo do mesmo fabricante. Aplicação insuficiente de adesivo.</p>	<p>Junta 4: Tubo (exposto a intempéries), conexão e adesivo do mesmo fabricante. Aplicação insuficiente de adesivo.</p>
<p>C</p> 	<p>Junta 5: Tubo, conexão e adesivo do mesmo fabricante. Tubo cortado fora de esquadro e sem remoção de rebarbas.</p>	<p>Junta 6: Tubo, conexão e adesivo do mesmo fabricante. Superfícies do tubo e da conexão lixadas com lixa nº150</p>
<p>D</p> 	<p>Junta 7: Tubo e conexão de fabricantes diferentes, e adesivo aprovado pelo fabricante da conexão. Aplicação de pouco adesivo.</p>	<p>Junta 8: Tubo, conexão e adesivo do mesmo fabricante. Aplicação de pouco adesivo e inserção insuficiente do tubo na conexão.</p>

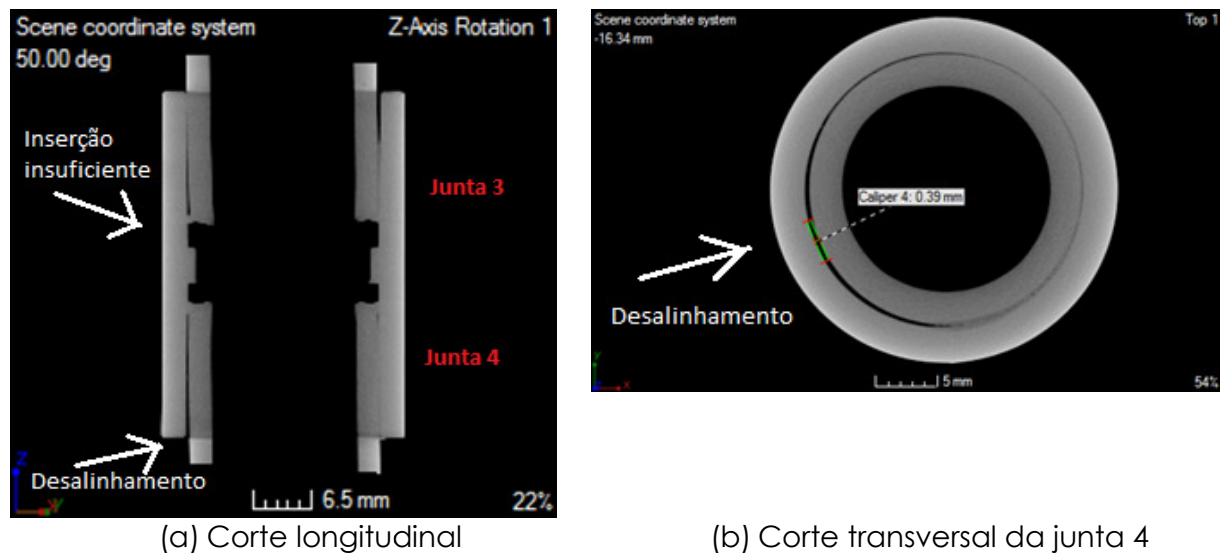
Fonte: Os autores

Após a realização das juntas, os corpos de prova foram submetidos à TCRX e depois ao ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna de curta duração conforme especificado pela Norma Brasileira ABNT NBR 15884-1:2010 (pressão hidrostática interna de 3,6 MPa, água em água, por 6 minutos em banho termoequilibrado em 82 °C) visando confirmar a ocorrência da falha.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através da TCRX foi possível identificar claramente o desalinhamento do tubo em relação à conexão e mensurar o ângulo e descentralização do tubo em relação à conexão. A inserção insuficiente do tubo na conexão (ver Figura 6) também foi identificada através da TCRX.

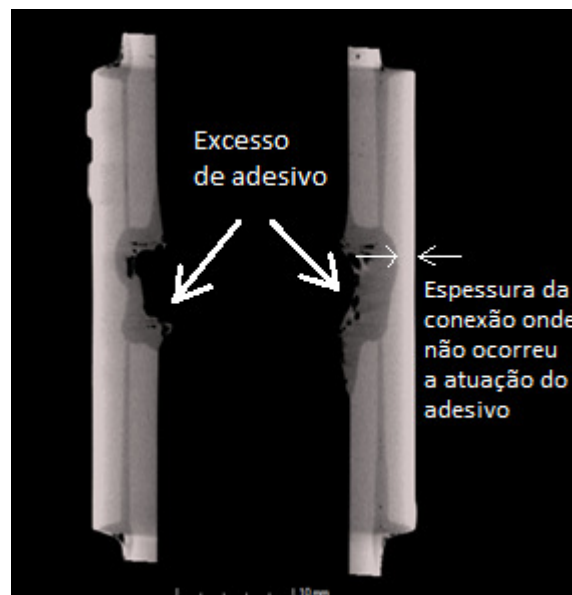
Figura 6 – Corpo de prova B - Desalinhamento do tubo, adesivo e inserção do tubo insuficientes



Fonte: Os autores

A aplicação de adesivo em quantidade maior do que a recomendada pelo fabricante foi identificada através do acúmulo de adesivo no interior da conexão como pode ser observado na Figura 7. As áreas de coloração mais escura indicam menor densidade do material e correspondem às regiões onde houve a atuação do adesivo. É possível mensurar as espessuras de parede do tubo e conexão após a atuação do adesivo.

Figura 7 – Corpo de prova A - Acúmulo de adesivo no interior da conexão



Fonte: Os autores

A Tabela 4 apresenta o resumo dos resultados das medições e informações extraídas da análise por TCRX.

Tabela 4 – Medições e informações extraídas das imagens geradas pela TCRX

Corpo de prova	Junta	(1) Desalinhamento máximo encontrado	(2) Existência de adesivo no interior da conexão?	(3) Profundidade de inserção do tubo (Pi)	(4) Presença de vazios nas áreas soldadas?
A	1	Não identificado	Sim, espessura média de adesivo de 0,58 mm na bolsa	86%	Sim, 5%
	2	Não identificado	Sim, espessura média de adesivo de 0,47 mm no batente	100%	Sim, 0,5%
B	3	4,10 °	Não	84%	Sim, 17%
	4	1,67 °	Não	88%	Sim, 11%
C	5	Não identificado	Sim, espessura média de adesivo de 0,79 mm na bolsa	83%	Sim, 3%
	6	Não identificado	Sim, espessura média de adesivo de 0,42 mm no batente	100%	Sim, 8%
D	7	Não identificado	Não	92%	Sim, 25%
	8	Não identificado	Não	56%	Sim, 35%

Fonte: Os autores

Os valores apresentados na Tabela 4 foram obtidos da seguinte forma:

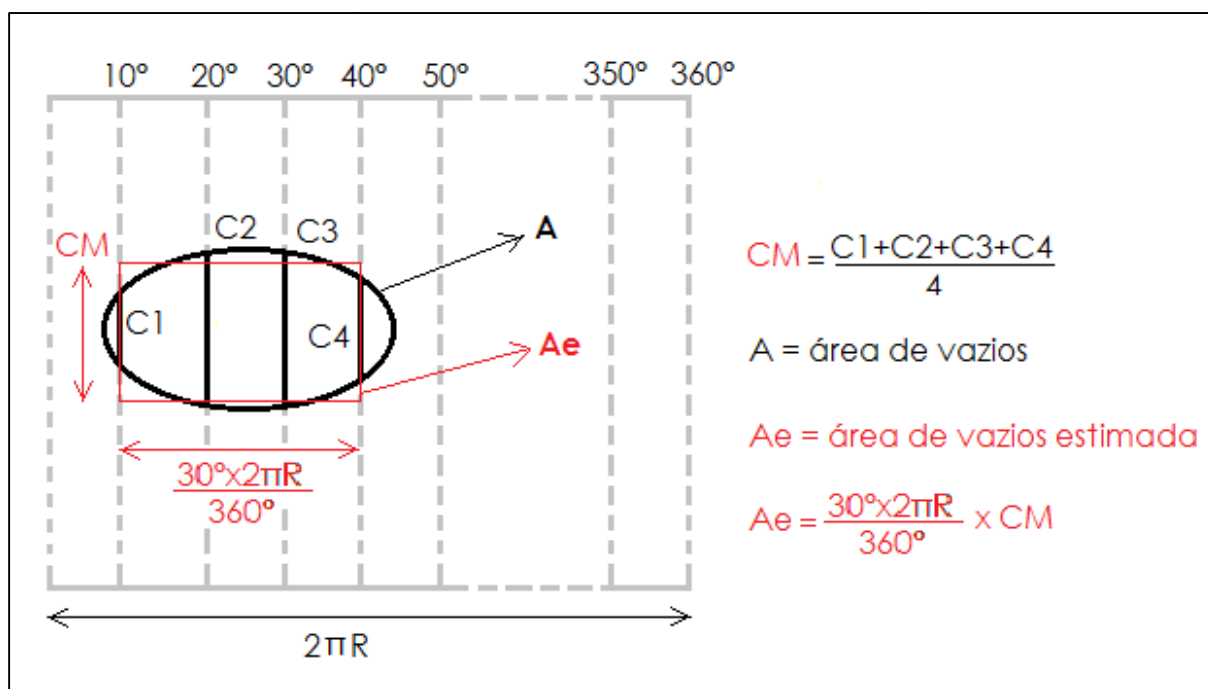
- Desalinhamento máximo (coluna 1) entre tubo e conexão: o desalinhamento foi identificado através da análise das imagens. O ângulo e a descentralização foram mensurados através da ferramenta específica do software do equipamento de TCRX;
- Existência de adesivo no interior da conexão (coluna 2): foram analisados cortes longitudinais das juntas a cada 45°. A espessura do adesivo depositado no interior da conexão foi determinada através da medição da espessura de parede total e subtraindo-se a espessura da conexão original no local do acúmulo (seja na bolsa ou no batente da conexão). O acúmulo de adesivo no interior da conexão pode resultar na fragilização do local devido ao mecanismo de fissuramento sob tensão (stress cracking);
- Profundidade de inserção do tubo na bolsa da conexão (coluna 3): Cada fabricante dimensiona sua conexão para que junta soldada seja resistente e estanque durante a sua utilização. Assim, o ideal para uma junta soldada é que o tubo seja inserido até o final da bolsa da conexão, de forma a garantir que a área soldada seja aquela inicialmente dimensionada pelo fabricante da conexão. Como a profundidade de bolsa da conexão varia conforme seu fabricante, os valores de profundidade de inserção da Tabela 4 são apresentados em percentual, conforme a fórmula a seguir:

$$P_i (\%) = \frac{P_{i45^\circ}}{P_b}$$

Onde:

- P_i é a profundidade de inserção do tubo na conexão da junta "i", em %;
 - P_{i45° é a média das profundidades de inserção do tubo na conexão da junta "i" medidas nos perfis longitudinais da junta, a cada 45 °, em mm;
 - P_b é a profundidade da bolsa da conexão da junta "i", em mm.
- Área de vazios (coluna 4): as áreas de vazios, que consistem nos locais onde não ocorreu a soldagem, foram identificadas visualmente e mensuradas por aproximação da área ocupada. Para cada área de vazios, seu comprimento longitudinal (C) foi medido em perfis longitudinais retirados a cada 10 °. Cada área de vazios foi estimada conforme a Figura 8, sendo a área total a somatória de todas elas. É importante salientar que esta aproximação foi realizada apenas para fins comparativos dos resultados deste experimento.

Figura 8 – Estimativa da área de vazios das juntas



Fonte: Os autores

Como pode ser observado na Tabela 5, nenhum dos corpos de prova resistiu ao ensaio de verificação da resistência à pressão hidrostática interna de curta duração. É importante ressaltar que a localização e formato das regiões onde a soldagem não ocorreu podem implicar em vazamentos e até mesmo no desprendimento do tubo da conexão, independentemente do tamanho de sua área.

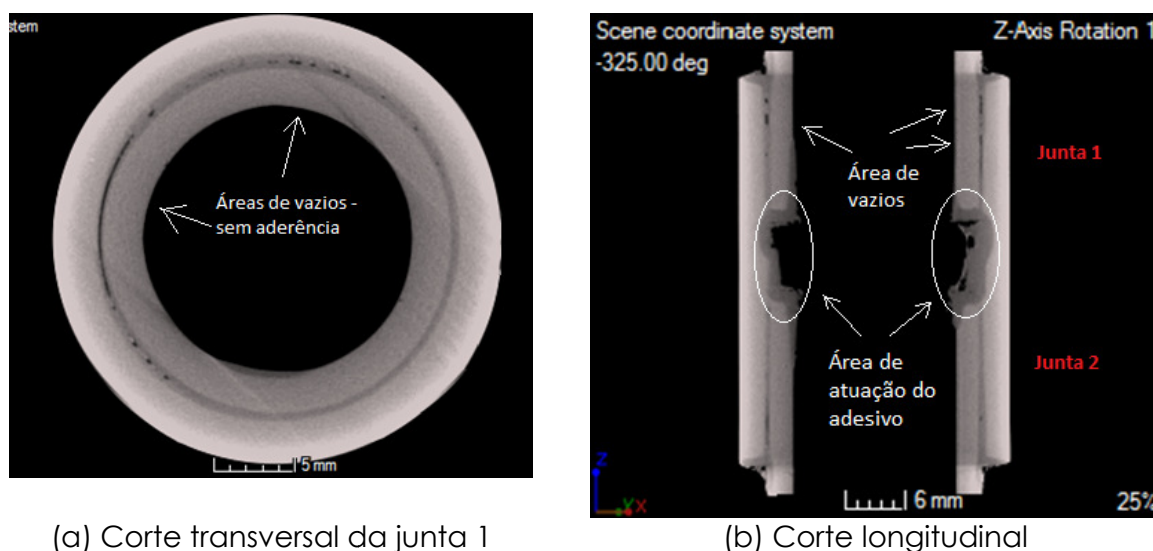
Tabela 5 – Área efetivamente soldada x resultado do ensaio de resistência à pressão hidrostática interna

Corpo de prova	Junta	Percentual da área efetivamente soldada	Resultado do ensaio de resistência à pressão hidrostática
A	1	81%	Tubo se desprende da conexão quando atingiu 3.040 kPa.
	2	99,5%	Sem ocorrências
B	3	67%	Tubo escapou quando atingiu 2.452 kPa.
	4	77%	Sem ocorrências
C	5	80%	Vazamento quando atingiu 2.893 kPa. Com a aplicação da pressão, o tubo apresentou desalinhamento devido à menor área de contato na face cortada fora de esquadro.
	6	92%	Sem ocorrências
D	7	67%	Sem ocorrências
	8	21%	Tubo se desprende da conexão quando atingiu 686 kPa.

Fonte: Os autores

Apesar das juntas 1 e 2 do corpo de prova A terem sido realizadas com a aplicação de adesivo em excesso, durante a pressurização houve o desprendimento do tubo da junta 1. Após a análise das imagens da tomografia, foram constatados vazios nas regiões da solda (ver Figura 9). O fato de não ter sido realizado o $\frac{1}{4}$ de volta após a aplicação do adesivo pode ter ocasionado a distribuição não uniforme do adesivo, originando áreas onde não ocorreu a solda (vazios).

Figura 9 – Corpo de prova A – Área de vazios na região da solda



(a) Corte transversal da junta 1

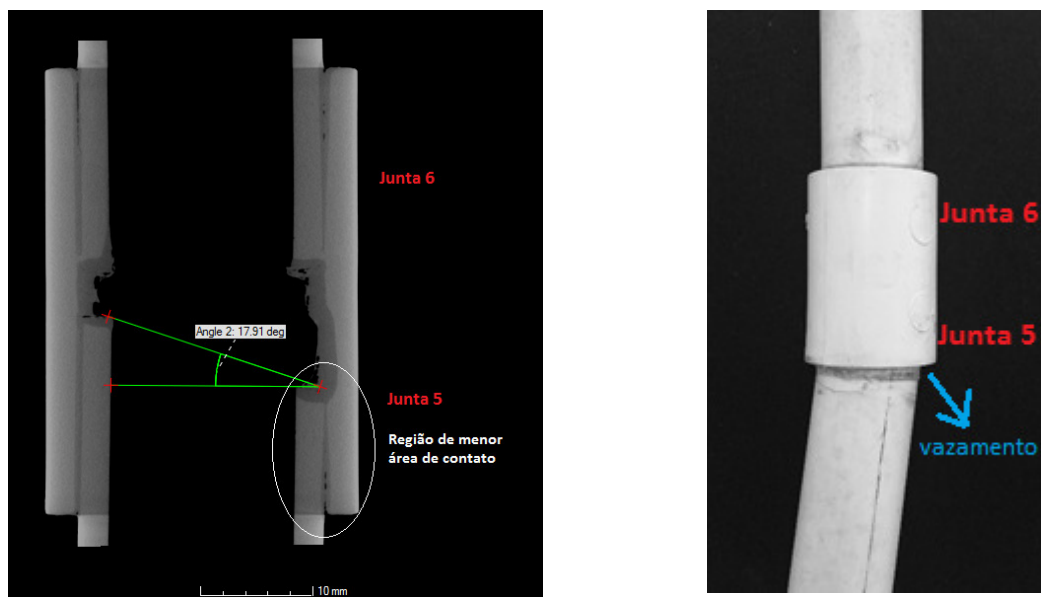
(b) Corte longitudinal

Fonte: Os autores

A junta 5 do corpo de prova C foi preparada com tubo cortado fora de esquadro sem a remoção das rebarbas (ver Figura 10a), e a junta 6 foi preparada com tubo e conexão com as superfícies lixadas. Quando da aplicação da pressão hidrostática, o tubo da junta 5 se deslocou na região de menor área de contato causando um desalinhamento e

consequentemente o vazamento (ver Figura 10b).

Figura 10 – Corpo de prova C



(a) Imagem da junta obtida por tomografia computadorizada de raios X

(b) Foto da junta após ensaio de pressão hidrostática interna

Fonte: Os autores

Não foi possível identificar diferenças entre as juntas realizadas com tubos sem exposição e tubos submetidos à exposição solar por 90 dias. Da mesma forma, não identificada pelas imagens da TCRX, diferenças nas juntas que caracterizasse o procedimento de lixamento das superfícies unidas.

7 CONCLUSÕES

A utilização da TCRX demonstrou ser uma eficiente técnica para a análise dimensional dos tubos e principalmente das conexões de CPVC, cujo método de análise tradicional é destrutivo. Neste caso, o uso da TCRX representou uma grande vantagem pois além de evitar o corte da peça, o método possibilita a medição de características dimensionais em qualquer seção longitudinal e transversal. Desta forma, representa uma técnica notável não só para avaliação dimensional convencional mas principalmente para o desenvolvimento de produtos.

Em relação à avaliação das juntas soldáveis de CPVC, foi possível identificar alguns dos erros de instalação que foram simulados nos corpos de prova ensaiados. A aplicação de adesivo em excesso foi identificada pela presença de regiões maiores e mais escuras (de menor densidade) nas regiões de soldagem. Para os adesivos ensaiados, verificou-se que quando da sua aplicação em maior quantidade, este altera a densidade das áreas de contato tornando-a menor do que a inicial (ver Figura 9b). Entretanto, neste experimento não foi objeto determinar se esta alteração de densidade reduz a resistência mecânica da junta. Através da TCRX foi possível mensurar a espessura de adesivo acumulado no interior da conexão.

Os problemas de instalação relacionados às características geométricas das juntas, tais como desalinhamento, inserção insuficiente do tubo na bolsa da conexão e o uso de tubo cortado fora de esquadro puderam ser facilmente identificadas e caracterizadas pela TCRX. As áreas onde não ocorreu a solda entre as superfícies podem ser claramente identificadas e mensuradas pela TCRX.

A identificação das regiões da junta onde não ocorreu a solda também foi bem caracterizada pela TCRX. Foi possível estimar a área efetivamente soldada das juntas por método utilizado neste experimento para mensurar as áreas de vazios (regiões onde não ocorreu a solda). Os valores estimados das áreas efetivamente soldadas de cada junta apresentaram-se coerentes com os resultados dos ensaios de resistência à pressão hidrostática interna de curta duração obtidos, ou seja, juntas com menores valores de área soldada apresentaram vazamento ou desprendimento do tubo da conexão.

As juntas realizadas com os tubos expostos à irradiação solar (1.5 GJ/m^2), o uso de adesivo não aprovado pelo fabricante dos tubos e conexões e o lixamento das superfícies a serem soldadas não foram identificadas pela TCRX neste experimento.

Concluindo, os resultados obtidos neste experimento mostram a viabilidade da utilização da TCRX para a investigação da origem de falhas em juntas soldáveis de tubulações de CPVC, possibilitando a caracterização das juntas de forma não destrutiva.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todo o apoio prestado pelo técnico Sérgio Ferraz da Silva do Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento e pela equipe do Laboratório de Micromanufatura, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

REFERÊNCIAS

AMBLER, Roger E.. CPVC: The material of choice in metal-finishing plants. **Metal Finishing**, Rickmansworth, p.24-28, ago. 1996. Bimensal.

ANDREUCCI, Ricardo. **Radiologia Industrial**. São Paulo: Andreucci, Assessoria e Serviços Técnicos Ltda, 2013. 118 p. Disponível em: <http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/Radiologia-Nov-2013_pdf_substituir.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15884-1:2010 VERSÃO CORRIGIDA:2011**: Sistemas de tubulações plásticas para instalações prediais de água quente e fria — Policloreto de vinila clorado (CPVC) Parte 1: Tubos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 26 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15884-2**: Sistemas de tubulações plásticas para instalações prediais de água quente e fria — Policloreto de vi. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 21 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15884-3**: Sistema de tubulações plásticas para instalações prediais de água quente e fria — Policloreto de vinila clorado (CPVC) Parte 3: Montagem, instalação, armazenamento e manuseio. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 13 p

EBNESAJJAD, Sina. **ADHESIVES TECHNOLOGY HANDBOOK**. 2. ed. Norwich: William Andrew, 2008. 361 p

FARSHAD, Mehdi. **Plastic Pipe Systems: Failure Investigation and Diagnosis**. EUA: Elsevier Science, 2006. 224 p.

HAYES, Michael D. et al. Challenges in Investigating Chlorinated Polyvinyl Chloride Pipe Failures. **Journal of ASTM International**. West Conshohocken, p. 1-12. nov. 2010.

ITO, Masayasu et al. APPLICABILITY OF X-RAY RADIOGRAPHY FOR INTEGRITY ASSESSMENT OF AGED PIPES IN THE JMTR. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MATERIAL TESTING REACTORS, 6., 2013, Bariloche. **Proceedings...** . Bariloche: Cnea, 2013. p. 1 - 10. Disponível em: <<http://www.invap.com.ar/ismtr/images/stories/trabajos/Ito-Paper.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2016

KIRKER, Erick. How CPVC Works and why it fails. **Claims Magazine**, New York, v. 60, n. 3, p.30-33, mar. 2012. Mensal. Disponível em: <<http://www.propertycasualty360.com/Claims-Magazine/march-2012>>. Acesso em: 02 fev. 2016

MALCOLM, Andrew A.; LIU, Tong; LIFTON, Joseph J.. Case Studies in the Use of Computed Tomography for Non-Destructive Testing, Inspection and Measurement. In: SINGAPORE INTERNATIONAL NDT CONFERENCE & EXHIBITION, 2., 2013, Singapura. **Proceedings...** .Singapura: Ndtss, 2013. p. 1 - 16. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/SINCE2013/content/papers/23_Malcolm.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2015.

MERAH, Nesar. Natural weathering effects on some properties of CPVC pipe material. **Journal of Materials Processing Technology**. Dhahran, Saudi Arabia, p. 198-201. mar. 2007.

MERAH, N.; AL-QAHTANI, T.; KHAN, Z.. Effects of strain rate and temperature on tensile properties of CPVC pipe material. **Plastics, Rubber And Composites**. [s.l.], p. 353-358. abr. 2008.

PFAENDTNER, Jeff. **Material Failures in Fire Protection Systems**. Orlando: Crane Engineering, 2014. 39 slides, color. Disponível em: <<http://www.nfpa.org/~media/files/research/research-foundation/symposia/2014-supdet/2014-papers/supdet2014pfaendtner.pdf?la=en>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

PASSAMANECK, Mark. How to Avoid CPVC System Failure. **Plumbing Systems & Design - American Society Of Plumbing Engineers**, Illinois, p.8-11, set. 2010. Mensal. Disponível em:

<<https://www.aspe.org/sites/default/files/webfm/ArchivedIssues/2010/201009/ForensicEngineering.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2015.

PRIDDY, Duane. **Why Do PVC & CPVC Pipes Occasionally Fail?** Midland: Plastic Failure Labs, [2013]. 16 p. Disponível em: <<http://www.californiasprinklerfitters.org/files/WhyCPVC-OccasFail.pdf>>. Acesso em: 1 jul. 2015.

PRIDDY, Duane; ARNOLD, Brad; BATTJES, Kevin. When CPVC pipes and fittings fail in hydronic heating systems. **Plastics Engineering**, Hoboken, v. 68, n. 4, p.24-29, abr. 2012. Mensal.

SILVA, Diogo Cesar Borges; BALDO, Christian Raffaelo. ANÁLISE DE MATERIAIS E DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS METÁLICAS UTILIZANDO TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X. In: CONGRESSO DA QUALIDADE EM METROLOGIA REDE METROLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 13., 2013, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: Remesp, Abimaq, 2013. p. 1 - 10. Disponível em: <<http://remesp.org.br/enqualab2013/arquivos/28.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2015.