

## MANUTENÇÃO E INSPEÇÃO EM VASOS DE PRESSÃO – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

**MARTINS, Alef Gonçalves**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA – alefgoncalves-martins@hotmail.com

**BRANDÃO, Sérgio Mateus**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA.- sergio.brandao@unievangelica.edu.br

**RODRIGUES, Rosemberg Fortes Nunes**

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA – rosemberg.rodrigues@unievangelica.edu.br

### Resumo

Vasos de pressão são elementos de suma importância utilizados nas indústrias de petróleo, química, petroquímica, farmacêutica, entre outras, servindo como reatores ou tanques de armazenagem. O trabalho aqui apresentado tem como objetivo realizar uma revisão sistemática a respeito da manutenção e inspeção dos vasos de pressão. Esta revisão está baseada principalmente na norma regulamentadora brasileira NR13 e no Código Americano ASME VIII, além de ter empregado como base de dados principal de pesquisa a *Science Direct*, buscando os termos, ou seja, a *string* de pesquisa que foi definido a partir das palavras-chave deste estudo traduzidas para o inglês: i) *pressure vessels*; ii) *boilers*; iii) *maintenance*; iv) *inspection*. Foram considerados um período de pesquisa dos últimos dez anos. Como resultados, a pesquisa inicial encontrou um total de 3737 materiais de pesquisa. Ao final do aperfeiçoamento da *string* de pesquisa e da aplicação de quatro filtros foram selecionados seis artigos científicos, todos publicados em língua inglesa e com qualidade B1 ou acima. No qual mencionam manutenção em vasos de pressão, caldeiras e tubos utilizados pelas caldeiras, um desses artigos científicos contem a importância da manutenção dos tubos, onde tem como estudo um grande problema que é a corrosão nas tubulações, teste no ANSYS com estudos em elementos finitos, a importância da manutenção, tanto para a economia e meio ambiente.

**Palavras-chave:** Vasos de Pressão; Sustentabilidade; Segurança; Teste Hidrostático.

### Abstract

Pressure vessels are extremely important elements used in the oil, chemical, petrochemical, pharmaceutical industries, among others, serving as reactors or storage tanks. The work presented here aims to carry out a systematic review regarding the maintenance and inspection of pressure vessels. This review is based mainly on the Brazilian regulatory standard NR13 and the American Code ASME VIII, in addition to using Science Direct as the main research database, searching for the terms, that is, the search string that was defined from the words of this study translated into English: i) *pressure vessels*; ii) *boilers*; iii) *maintenance*; iv) *inspection*. A research period of the past ten years was considered. As a result, the initial search found a total of 3737 research materials. At the end of the improvement of the search string and the application of four filters, six scientific articles were selected, all published in English and with B1 quality or above. In which they mention maintenance in pressure vessels, boilers and tubes used by the boilers, one of these scientific articles contains the importance of maintaining the tubes, where the study is a major problem that is corrosion in the pipes, test at ANSYS with studies on finite elements, the importance of maintenance, both for the economy and the environment.

## 1. INTRODUÇÃO

O termo “vasos de pressão” é dado a todos os recipientes que são pressurizados, mesmo de pequenas dimensões. Durante seu projeto e etapas de fabricação, montagem e teste deve-se ter cuidados extremamente especiais por se tratar de um equipamento altamente importante para continuidade de um processo e porque uma falha pode ocasionar perdas materiais e humanas, além de litígios caros e prolongados [1].

Uma das técnicas mais utilizadas para a confirmação da estanqueidade e integridade dos vasos de pressão é o teste hidrostático. Em geral, o teste consiste na pressurização do vaso com um líquido, até um nível de pressão estabelecido com base nas condições de projeto e tem por principal finalidade a detenção de possíveis vazamentos, falhas, trincas em soldas, roscas ou ligações flageladas [2].

Por isso hoje, o teste hidrostático é realizado no término da fabricação ou reparo no vaso de pressão. O TH (teste hidrostático) tem como objetivo, analisar a integridade e a ausência de vazamentos, servindo como um atestado de conformidade, que define a responsabilidade do fabricante no caso de falhas futuras do equipamento [2].

Sendo um dos equipamentos mais importante na indústria do petróleo, refinarias, petroquímicas, químicas, hospitalares entre outras, fazem parte de uma cadeia continua formada por diversos equipamentos, que trabalham submetidos a rigorosas condições operacionais por meses, sem paradas, por isso a importância de manter a inspeção e manutenção em dia deste equipamento, pois as falhas do mesmo, pode ocasionar acidentes de grandes proporções, com percas materiais, ambientais e até mesmo, vidas humanas [8].

Devidos a grandes acidentes graves que ocorreram no século XX, principalmente nos Estados Unidos, houve a necessidade de criar códigos com critérios rigorosos e seguros para projetos, fabricação e inspeção de vasos de pressão, para que houvesse a diminuição de acidentes [3].

Cada código adota critérios e metodologias próprias, sendo que no Brasil os mais adotados são os americanos ASME Seção VIII Divisão 1 e Divisão 2 [1]. A Norma Regulamentadora NR-13 define as exigências de projeto, construção e instalação que precisam ser atendidas para operação de vasos de pressão no Brasil. A NR-13 também permite a utilização de tecnologias mais avançadas para o dimensionamento de vasos de pressão [1, 2].

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão sistemática a fim de aprofundar o conhecimento relacionado ao processo de Manutenção e Inspeção em Vasos de Pressão, analisando o material bibliográfico e as principais publicações técnico científicas correspondentes e as respectivas normas aplicáveis na execução deste processo.

## 2. Referencial Teórico

### 2.1. Vasos de Pressão

Em todos os vasos de pressão existe um elemento estanque e externo que contém o fluido pressurizado denominada parede de pressão. Esta parede pode ser simples ou múltipla e pode assumir vários formatos. A parede de pressão de um vaso é composta basicamente pelo casco do vaso e os tampos de fechamento [2, 3].

Cascos e tampos dos vasos têm o formato de uma superfície de revolução, sendo as formas mais comuns: cilíndricas, esféricas, elípticas cônicas ou combinações de algumas dessas formas. Outros elementos importantes nos projetos de vasos de pressão, são as aberturas para instalações de bocais, conexões com tubulações, suportes para sustentação do vaso e manômetros. Genericamente o termo vasos de pressão designa qualquer recipiente estanque, independente de dimensões, tipo, finalidade ou formato, que seja capaz de conter fluidos pressurizados [1].

Numa abordagem mais adequada ao contexto deste trabalho, os vasos de pressão devem ser encarados como equipamentos industriais, capazes de resistir com segurança a uma determinada pressão onde materiais sólidos ou fluidos sofrem transformações físicas e/ou químicas. O código ASME – *Boiler and Pressure Vessel Code* (2004), define os vasos de pressão como sendo todos os reservatórios, de qualquer tipo, dimensões ou finalidade, não sujeitos à chama, que contenham qualquer fluido em pressão manométrica igual ou superior a  $1,02\text{kgf/cm}^2$  ou submetidos à pressão externa [3].

No âmbito das indústrias de processo, dentre as quais destacam-se as indústrias de petróleo, química, petroquímica, farmacêutica e de alimentos, os vasos de pressão constituem os equipamentos mais

importantes. Possuem elevado custo unitário e podem representar até 60% do custo total de materiais e equipamentos de uma unidade de processo, sendo os itens de maior tamanho e peso [1].

## 2.2 Classificação dos vasos de Pressão

De acordo com as finalidades a que se destinam, os vasos de pressão são classificados da seguinte maneira [1]:

- Vasos sujeitos à chama: incluem as caldeiras e os fornos;
- Vasos não sujeitos à chama: vasos de armazenamento e de acumulação, torres de destilação fracionada, retificação e absorção, reatores diversos, esferas de armazenamento de gases e trocadores de calor, incluindo trocadores propriamente ditos, aquecedores, resfriadores, condensadores, revedores e resfriadores a ar [1].
- Autoclave

## 2.3 Aplicações dos Vasos de Pressão

Os vasos de pressão destinam-se fundamentalmente a três aplicações básicas:

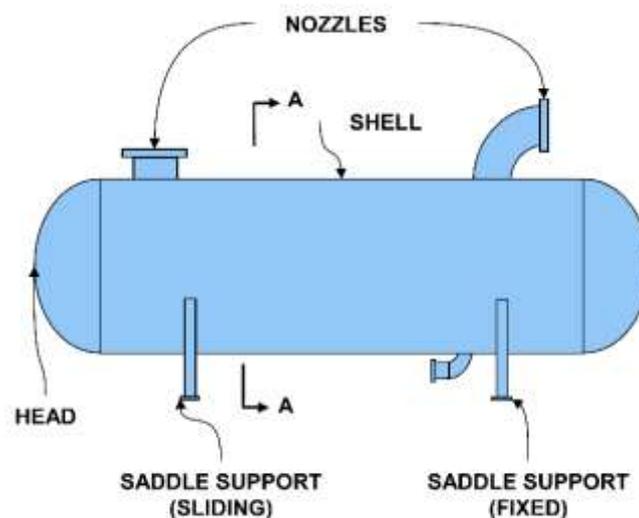
- Armazenamento de gases sob pressão;
- Processamento de gases e líquidos;
- Acumulação intermediária de gases e líquidos em processos industriais.

A primeira das aplicações justifica-se pela necessidade de armazenar em pequeno volume grandes quantidades de produtos, já que o armazenamento de gases no estado gasoso é economicamente inviável. A segunda aplicação é uma exigência da termodinâmica (carregamento de fluido mássico a fim de transporta energia), já que numerosos processos envolvendo transformações físicas e reações químicas precisam ser efetuados em ambientes pressurizados. A terceira é uma necessidade das indústrias para realização dos processos de forma mais simples e competitiva, evitando desperdício de energia com compressões e descompressões desnecessárias, estabilizando a operação e compensando variações transitórias de vazão e nível [1].

## 2.4 Principais Componentes de um Vaso de Pressão

Os principais componentes de um vaso de pressão são dispostos a seguir [1]. A Figura 1 traz o desenho de um vaso de pressão com seus componentes principais [14].

Figura 1: Vasos de pressão e seus componentes principais.



Fonte: [14].

- **O corpo (*shell*)** – Também chamado de Casco ou Costado, pode ser cilíndrico (forma mais comum), esférico, cônico ou uma combinação destas geometrias;
- **Os Tampos (*head*)** - Podem ser dos tipos semi-elípticos, torisféricos, semi-esféricos, cônicos, torocônicos e planos;
- **Bocais (*nozzels*)** – Aberturas feitas no costado para ligação com tubulações de entrada e saída de produto, instalação de válvulas, instrumentos, drenos e respiros;
- **Peças internas** – Grades, bandejas, distribuidores, defletores, distribuidores de névoa, etc;
- **Acessórios externos** – Suportes, reforços de vácuo, anéis de suporte do isolamento térmico, chapas de ligação, cantoneiras entre outros.

## 2.5 Projeto de Vasos de Pressão

Os códigos de projeto estabelecem regras para o projeto e fabricação dos vasos de pressão, apresentando critérios de dimensionamento, fabricação, materiais a serem utilizados e exigências de testes e inspeção. Periodicamente são revisados e atualizados, incorporando novos tópicos e alterações em função do avanço tecnológico [5].

Embora cada código adote critérios e metodologias próprias, a filosofia geral está baseada na limitação das tensões atuantes nas principais partes do equipamento a frações de uma propriedade de resistência mecânica do material, como o limite de escoamento, limite de resistência ou a deformação por fluência [2, 3].

Os primeiros códigos baseavam-se em modelos geométricos bastante simples, associados a elevados coeficientes de segurança e só se aproximavam das condições reais nas áreas do equipamento afastadas de mudanças geométricas, onde não há atuação de tensões secundárias nem concentração de tensões. A espessura de parede era calculada para suportar a máxima tensão atuante e exigia-se que o material possuísse ductilidade suficiente para acomodar tensões mais elevadas geradas em descontinuidades ou regiões de alteração geométrica. Essa é a filosofia da Divisão 1 do código ASME seção VIII, o mais utilizado no Brasil para projeto de vasos de pressão [2, 3].

Os avanços nas teorias de análise de tensões e os conceitos da mecânica da fratura permitiram a adoção de uma nova abordagem para o projeto de vasos de pressão. Em oposição ao projeto convencional e suas soluções extremamente conservadoras, surge à abordagem do projeto alternativo, onde uma rigorosa e criteriosa análise de tensões faz-se necessária para permitir a adoção de maiores tensões de projeto. Essa abordagem considera em seus cálculos as geometrias e carregamentos não-convencionais, de tal forma que o dimensionamento seja dependente da análise e classificação das tensões atuantes em comparação com valores admissíveis [5]. As divisões 2 e 3 da seção VIII do código ASME adotam o projeto alternativo.

## 2.6 Normas

### 2.6.1 Norma ASME Seção VIII Divisão 1

ASME é uma sociedade de engenheiros que define normas técnicas para equipamentos mecânicos. Uma das principais normas da ASME é a *Boiler and Pressure Vessel Code* (BPVC), que fornece regras para o projeto, fabricação e inspeção de caldeiras e vasos de pressão. A Seção VIII da norma *Boiler and Pressure Vessel Code* (BPVC) contém as seguintes divisões: i) Divisão 1 - Regras para construção de vasos de pressão; ii) Divisão 2 - Regras alternativas para construção de vasos de pressão; iii) Divisão 3 - Regras alternativas para a construção de vasos de alta pressão [2, 3, 15].

A Divisão 1 da norma ASME Seção VIII foi criada em 1925. A norma ASME Seção VIII Divisão 1 é limitada a vasos para pressão interna ou externa submetidos a uma pressão total menor ou igual a 3000 psi (aproximadamente 20 MPa) e com diâmetro interno maior ou igual a 6 in (152 mm). A Divisão 1 utiliza o critério de falha da Tensão Principal Máxima ou Critério de Rankine onde  $E \cdot S = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)$  e não pode ser utilizado quando for necessária a análise de fadiga [2, 3, 15].

Tabela 1 – Critérios para determinação de tensões admissíveis no código ASME seção VIII Divisão 1

Código de Projeto	Abaixo da faixa de fluência	Acima da faixa de fluência
ASME VIII – Divisão 1	$S_r / 3,5$ (na temperatura de projeto)	100% da tensão média que provoca uma velocidade de deformação de 0,01% em 1000h;
	$(2/3) S_y$ (na temperatura de projeto)	67% da tensão média que provoca ruptura após 100.000h; 80% da tensão mínima que provoca ruptura após 100.000h.

Fonte – [14].

### 2.6.2 ASME Seção VIII – Divisão 2

A Divisão 2 aborda o chamado projeto alternativo para vasos de pressão. Esta divisão estabelece regras mais severas para a seleção de materiais e métodos de cálculos para a análise de tensões, permitindo a redução dos coeficientes de segurança e, conseqüentemente, aumento das tensões admissíveis. Para tal, são exigidas melhorias geométricas para restrição dos pontos de concentração de tensões, aumentam-se as exigências quanto à qualificação dos procedimentos de soldagem, à eficiência da junta soldada e à extensão da inspeção. Na Divisão 2 não há limites para a pressão de projeto do vaso [7].

Os possíveis critérios para estabelecimento das tensões admissíveis nesta divisão estão mostrados na tabela 2.

Tabela 2 – Critérios para determinação de tensões admissíveis no código ASME seção VIII Divisão 2.

Código de Projeto	Abaixo da faixa de fluência	Acima da faixa de fluência
ASME VIII – Divisão 2	$S_r / 2,4$ (na temperatura de projeto) $(2/3) S_y$ (na temperatura de projeto)	Até 2007 não existiam critérios para a região de comportamento à fluência. Em 2007 passam a existir critérios semelhantes aos da divisão 1.

Fonte – [3].

### 2.6.3 ASME Seção VIII – Divisão 3

A Divisão 3 da seção VIII do código ASME está voltada para equipamentos projetados para operar em pressões superiores a 703 kgf/cm<sup>2</sup>. Muito parecida com a Divisão 2, diferencia-se pelo maior rigor na análise e classificação das tensões e avaliação de fadiga [2]. A utilização de materiais ainda está restrita a poucas especificações e, adicionalmente, podem ser realizadas avaliações de mecânica da fratura e projetos utilizando tensões residuais favoráveis devida à deformação plástica nas paredes como, por exemplo, a auto fretagem. (DONATO, 2007<sup>a</sup>) [4 ,8].

## 2.6.4 Norma Regulamentadora 13

A Norma Regulamentadora 13, cujo título é Caldeiras e Vasos de Pressão, estabelece todos os requisitos técnicos e legais relativos à instalação, operação e manutenção de caldeiras, vasos de pressão, tanque acima de 20 mil litros com diâmetro acima de 3 metros que armazena fluido combustível e tubulações, de modo a se prevenir a ocorrência de acidentes de trabalho. Esta norma foi desenvolvida pelo Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil [4].

Em relação aos vasos de pressão, a NR 13 dá ênfase aos seguintes tópicos:

- a) Conceito de vaso de pressão para fins de inspeção;
- b) Descrição do profissional habilitado para realizar inspeção;
- c) Situações de risco grave e eminente;
- d) Documentações referentes ao equipamento;
- e) Inspeções de segurança;
- f) Teste hidrostático;
- g) Placas de identificação;
- h) Cuidados na instalação.

Há também um Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão, que serve de instrumento estratégico de informação e esclarecimento para todos os profissionais que laboram para a prevenção de acidentes com caldeiras e vasos de pressão e para a melhoria das condições de trabalho [4].

## 2.7 Testes, avaliações e prevenções

### 2.7.1 Avaliação da integridade estrutural

A Avaliação da Integridade Estrutural são atividades que analisam a deterioração da estrutura e analisa a possibilidade de continuar funcionando de forma segura e requer um conjunto de ações e conhecimentos que consistem em [2]:

- Conhecimento do mecanismo de dano e do comportamento do material;
- Conhecimento da condição de operação passada e futura;
- Identificação do mecanismo de dano, detecção e quantificação dos defeitos por Ensaio Não-Destrutivo (ENDs);
- Propriedades dos materiais envolvidos e influência do meio ambiente.
- Análise de tensões;
- Análise de resistência.

Após aplicação das abordagens descritas, obtém-se a situação da condição atual de um equipamento, podendo ser [2]:

- Operar e estabelecer período para nova inspeção;
- Operar, mas diminuir a solicitação;
- Não operar, adequando-se através de reparo ou substituição.

Portanto, há a necessidade de se conhecer e adotar metodologias adequadas que possam avaliar com segurança, e sem conservadorismo excessivo, a criticidade desses defeitos na integridade estrutural dos equipamentos, a norma API-579 [8] é um dos principais documentos que apresentam estas metodologias [2]

A norma API-579 "*Recommended Practice for Fitness for Service*" é uma metodologia que busca desenvolver uma avaliação de adequação-ao-uso do equipamento para determinar se, mesmo apresentando descontinuidades, ele poderá operar com segurança durante certo período de tempo, onde apresenta como avaliar a integridade de equipamentos quando submetidos [2]:

- À possibilidade de ocorrerem falhas frágeis;
- À perda uniforme e localizada de espessura;

- À desvio de forma;
- À trincas, fluência e fadiga.

Os métodos de avaliação usados na API-579 usam um ou mais dos métodos de aceitação descritos [2]:

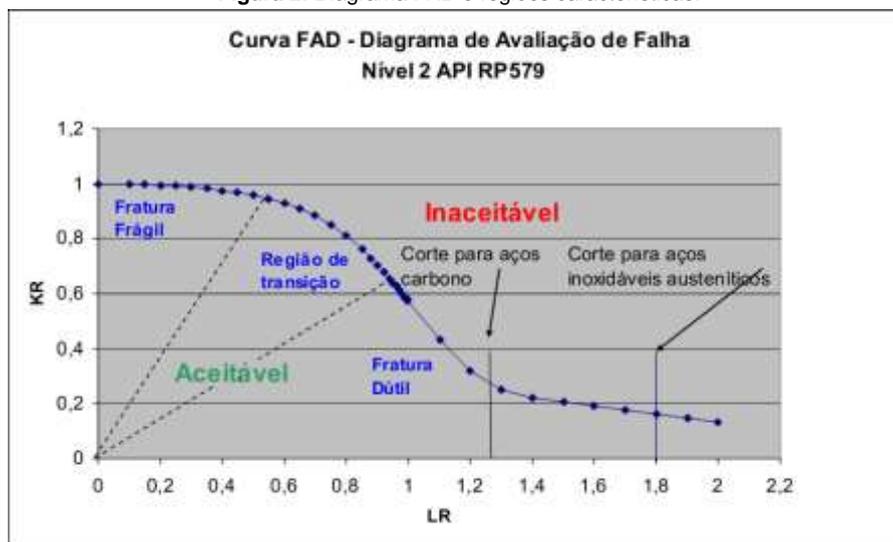
- Tensão ou Valor de Tensão Admissível, baseado no cálculo de tensões resultantes de diferentes condições de carregamento e comparando-se as tensões calculadas com um valor admissível;
- Diagrama de aceitação da falha, FAD, que é usado para tratar componentes que tem defeito tipo trinca, onde são usadas duas avaliações limite, a falha frágil (a partir da ponta da trinca) ou colapso plástico (que considera o esgotamento da plasticidade da seção reduzida);
- RSF, *remaining strength factor* ou fator de resistência remanescente, é a razão entre a resistência a falha determinadas para o elemento com defeito e o elemento sem defeito [10].

### 2.7.2 Diagrama FAD (*Failure Assessment Diagram*)

O diagrama FAD é uma ferramenta que nos permite a avaliação de componentes com defeitos a fim de se definir se estes defeitos são aceitáveis ou não. Este método consiste na construção de um gráfico no qual são representados dois parâmetros. O primeiro é o  $K_R$ , que mede o risco da fratura através da mecânica da fratura linear elástica e tem sua forma como a razão entre a intensidade de tensões na região de uma descontinuidade e a tenacidade do material. O outro parâmetro é o  $L_R$ , que mede o risco de ocorrer um colapso plástico e este é a razão entre a tensão localizada na região da descontinuidade e a tensão de colapso do material [2, 10].

Na Figura 2, está representado um diagrama FAD. A curva atualmente aplicada deste diagrama utiliza valores de  $L_R$  um pouco superiores a 1, onde considera o encruamento dos materiais.

Figura 2: Diagrama FAD e regiões características.



Fonte- [3].

Os valores de  $K_R$  e  $L_R$  são coordenadas do diagrama, para determinar o tipo de fratura ou sua segurança é feita uma reta da origem até o ponto. Caso este ponto esteja abaixo da curva, a distância entre a curva e o ponto é considerado a segurança do equipamento, caso esteja fora da curva, o ponto em que a reta cruzar a curva indica o tipo de mecanismo de colapso [2, 9].

### 2.7.3 Ocasões de Aplicação de Testes Hidrostáticos

Em geral, THs são aplicados, por exigência do código de projeto, ao término da fabricação do equipamento e após a realização de reparos ou alterações em que houver realização de soldagem.

Dependendo da legislação do país, também são aplicados periodicamente como meio para aferição de integridade e atendimento de requisição legal [2].

Está prevista na NR-13 situações em que o TH periódico pode ser dispensado por razões técnicas, onde destaca-se, a influência prejudicial do teste sobre defeitos subcríticos. Porém esta norma não estabelece um critério objetivo para caracterizar o defeito subcrítico, gerando grande polêmica entre os profissionais da área de inspeção de equipamentos. Verifica-se que, embora seja permitida a não realização do TH quando houver a possibilidade de propagação subcrítica de defeitos, os profissionais não costumam fazer uso desta permissão, exatamente por não saber o que considerar como defeito subcrítico, já que a maioria, se não todas as estruturas e equipamentos, possuem defeitos, que caso não se comportem de forma crítica, comportar-se-ão de maneira subcrítica. PEREIRA (2004) [2, 9].

Salienta-se que os THs periódicos não possuem qualquer função estrutural, já que todas as deformações e rearranjos de tensões ocorreram no TH de fábrica. Novas deformações ocorreriam apenas caso o TH periódico fosse realizado em pressões superiores às do TH de fábrica, não sendo isto uma prática recomendável. DONATO (2007) [2, 7].

#### 2.7.4 Procedimentos para a Realização de Teste Hidrostático

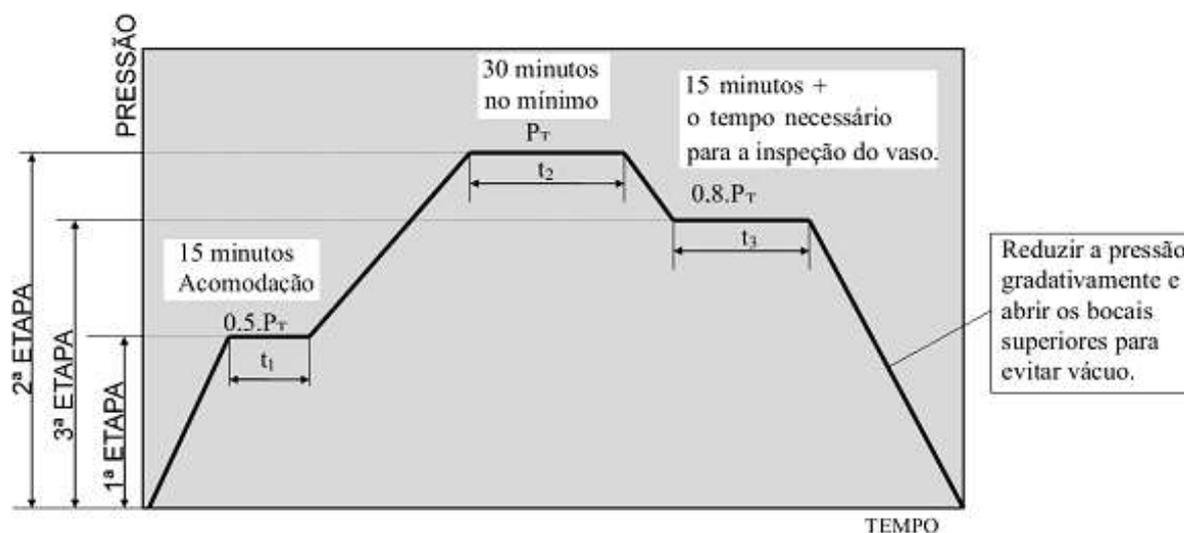
A realização de teste hidrostático é um evento perigoso, de modo que as condições de teste devem ser determinadas privilegiando a segurança do equipamento e das pessoas envolvidas, minimizando as chances de ocorrer um acidente. As duas principais variáveis a serem definidas são a pressão e a temperatura de teste [2].

Quanto ao fluido de teste, geralmente a água é utilizada, pois possui pequena compressibilidade e é facilmente acessível. Para os vasos construídos em aços inoxidáveis austeníticos ou com revestimentos desses materiais a água do teste não pode conter mais de 50 ppm de cloretos. Após o teste o vaso deve ser completamente drenado e seco [2].

A pressão de teste hidrostático deve ser medida no topo e fundo do vaso, mas a pressão que deve ser adotada como pressão de teste é o valor medido no topo do vaso. No fundo do vaso esta pressão estará adicionada à altura de carga hidráulica. Recomenda-se usar no mínimo dois manômetros aferidos para acompanhamento do teste, sendo um próximo ao sistema de pressurização de maneira a facilitar o controle da velocidade de pressurização e o outro no topo do vaso [2, 8].

A velocidade de pressurização recomendada não deve ser superior a 20% da pressão de teste  $P_{TH}$  até o primeiro patamar de 50% da  $P_{TH}$ , e após, de 5 a 10% da  $P_{TH}$  até o patamar final. A execução do teste hidrostático poderá seguir a sequência mostrada no gráfico da Figura 3 [2].

Figura 3: Curva típica para realização do teste hidrostático



Fonte: [2].

## 2.8 Falhas de vasos de pressão durante a realização de testes hidrostáticos

A execução de teste hidrostático é uma operação tensa e perigosa, e simula uma condição de carregamento mais severa que a condição de operação, o que evidentemente envolve um certo risco. Para equipamentos que já estiveram em serviço torna-se mais preocupante ainda pois o teste hidrostático avaliará apenas a estanqueidade do equipamento não revelando nenhuma informação em relação a integridade estrutural do objeto ensaiado, portanto, é recomendável o uso adicional de uma ferramenta de avaliação de integridade [2].

A literatura indica que embora sejam raras, grande parte das falhas em vasos de pressão registradas ocorreram durante a realização de testes hidrostáticos. As três principais causas de falhas frágeis durante o TH são as seguintes [2]:

- Controle de qualidade deficiente ou inexistente, que não identifica descontinuidades de tamanho crítico, capazes de propagar de modo instável durante o TH;
- Presença de tensões que não estavam previstas, como tensões residuais de soldagem;
- Fluido de teste em temperatura inferior a recomendada, que causa redução da tenacidade a fratura dos materiais usados na fabricação dos vasos.

A presença de um destes três fatores, ou a combinação deles, pode levar o vaso de pressão a falhar durante o primeiro carregamento. Houve tempos em que a grande preocupação dos engenheiros quando da realização de THs de fábrica era a ocorrência de fratura frágil dos equipamentos devido aos métodos de ENDs menos precisos na detecção de descontinuidades, das grandes espessuras e da pior qualidade dos materiais utilizados, fatores que levam os materiais a trabalhar em baixos patamares de tenacidade, elevando a probabilidade de fratura frágil. Com o avanço tecnológico, os fatores descritos acima foram substancialmente melhorados. Freire (2007) [11] afirma que a ocorrência de fratura frágil com materiais modernos tem probabilidade mais restrita, devido a maior tenacidade que estes materiais apresentam. Podem ocorrer em situações específicas sob baixas temperaturas, quando em partidas ou paradas de equipamentos são aplicadas combinações de temperatura e pressão inadequadas ou quando ocorre vazamento com resfriamento localizado [2, 10].

Uma outra situação ocorre quando se optam por realizar THs nas paradas apenas como meio de evitar falhas e vazamentos nas partidas, e selecionam pressões inferiores ao recomendado, guiados pelo objetivo de minimizar esforços. Kiefner (2000) [12], alerta que, quando excessivamente conservativo, o TH periódico pode ser um método de avaliação ineficiente, deixando que permaneçam na estrutura defeitos que seriam detectados por ENDs e que podem crescer subcriticamente, causando falhas durante serviço [2, 10, 12].

## 2.9 Entrada em serviço e degradações

Ao entrar em serviço, os vasos de pressão estarão em conformidade com o código de construção e se apresentarão dentro das margens de segurança estabelecidas. Entretanto, as condições de serviço impõem aos equipamentos degradação de diversos tipos. É possível classificá-las em [2]:

- Afinamentos: podem apresentar-se de forma generalizada ou localizada;
- Trincamentos: ocorrência de novas trincas, ou propagação de descontinuidades geradas na fabricação e não reparadas;
- Alteração de propriedades mecânicas por envelhecimento ou reação com o meio corrosivo: queda de tenacidade, limite de escoamento e limite de resistência.

Estas degradações são progressivas e irreversíveis, agravando-se com o tempo. A aplicação das mesmas condições do teste hidrostático de fabricação para o teste hidrostático periódico exigido pela NR-13, seria influenciada pelos efeitos acima citados, conforme as situações a seguir descritas [2]:

**Situação 1:** Equipamento que não apresenta mecanismos de danos significativos ao longo do tempo. Sendo aprovados no teste hidrostático ao término da fabricação, estes equipamentos não sofreram qualquer alteração geométrica, de propriedades mecânicas e possivelmente não tiveram qualquer alteração em descontinuidades remanescentes de fabricação. Um novo TH aplicado será uma mera reprodução do primeiro TH, e não provocará qualquer alteração como escoamentos ou propagações [2].

**Situação 2:** Equipamentos que sofreram afinamentos. Quando o equipamento é aprovado no TH inicial onde tensão aplicada não foi suficiente para tornar as descontinuidades críticas. A redução de espessuras de forma progressiva de acordo com a taxa corrosão atuante tenderá a incrementar os níveis de tensão na condição de operação e na condição de TH. Um novo TH, se realizado neste equipamento nas mesmas condições do inicial, resultará em uma tensão superior à tensão originalmente aplicada que poderá ser responsável tanto por uma propagação crítica, quanto por uma propagação subcrítica durante a pressurização periódica [2].

**Situação 3:** Equipamentos em que se verificaram crescimento de descontinuidades. Observa-se novamente uma situação em que um TH não mais será reproduzido. Por ação de mecanismos de danos como fadiga, fluência, corrosão sob tensão, ação do hidrogênio, etc., descontinuidades de fabricação poderão ter aumentado de dimensão. A aplicação de um novo TH no equipamento nestas novas condições poderá gerar um arredondamento da ponta da descontinuidade, uma propagação subcrítica ou mesmo uma propagação crítica [2].

**Situação 4:** Equipamentos em que surgiram novas descontinuidades tipo trinca considerando uma trinca surgida por ação dos mecanismos de danos, caímos na mesma condição do item anterior. A nova trinca surgida em serviço será submetida a uma tensão superior à tensão gerada pela condição operacional, poderão ocorrer arredondamentos, propagações subcríticas ou mesmo críticas [2].

**Situação 5:** Perda de propriedades mecânicas. Alguns mecanismos de danos relacionados a temperaturas elevadas ou ação dos meios corrosivos podem resultar em envelhecimento metalúrgico e alterações em suas propriedades mecânicas. Pode ocorrer a queda da tenacidade à fratura em alguns casos, e em outros a redução do limite de resistência e escoamento (especialmente quando ocorre a grafitização, a esferoidização da perlita ou descarbonetação), em ambos os casos, os TH's poderão gerar propagações das descontinuidades [2].

**Situação 6:** Mudanças de geometria. Há ainda a possibilidade de mudanças de geometria pela presença de empolamentos ou reduções de espessura localizada como corrosão alveolar, pois estes são fatores que alteram os campos de tensões em torno de descontinuidades remanescentes e onde o TH periódico poderá vir a gerar propagações [2, 10, 12, 13].

### 3 Metodologia

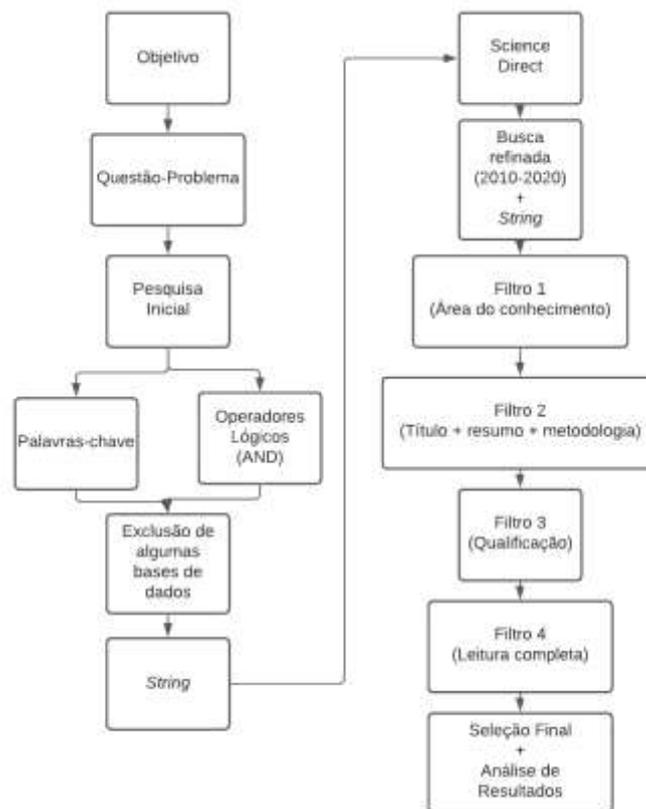
Para a criação da metodologia deste estudo de revisão sistemática foram utilizados dois trabalhos como guia, Conforto et al. (2011) e Navarro et al. (2020), ambos sofrendo modificações de acordo com as necessidades deste trabalho. Partindo do objetivo geral do trabalho, assim como da questão problema do mesmo, o próximo passo foi definir quais seriam as bases de dados utilizadas para a pesquisa necessária para continuação deste artigo de revisão sistemática. Foram consideradas inicialmente as fontes de pesquisa brasileiras Scielo, Periódicos CAPES, Google Acadêmico, mas os resultados de buscas preliminares mostraram-se insuficientes e, por este motivo, tais bases de dados foram descartadas. Em âmbito internacional foram consideradas inicialmente a *Science Direct*, a *Web of Science* e o portal Eric, ambas as bases boas no âmbito científico de pesquisas de artigos. Tendo definido as bases as quais seriam usadas, foram pré definidas as strings.

Como terceiro passo foi preciso definir qual seria a *string* de pesquisa ideal para este trabalho. Partiu-se, portanto, das palavras-chave deste estudo traduzidas para o inglês: i) *pressure vessels*; ii) *boilers*; iii) *maintenance*; iv) *inspection*. A primeira parte da pesquisa, utilizando apenas "*pressure vessels*" teve um número muito grande de resultados. Foi constatado que o motivo para tal foi a presença majoritária de artigos relacionados à medicina e outras áreas da saúde, visto que "vasos de pressão" é um assunto em comum entre a área médica e as engenharias. Para correção deste problema utilizou-se do operador lógico *AND* seguido da

segunda palavra-chave *BOILERS*. Continuando a pesquisa, encontrou-se, desta forma, que a melhor *string* para o trabalho aqui apresentado foi “*pressure vessels AND boilers AND maintenance AND inspection*”.

Após definido a *string* final, refazendo as buscas nas bases pré definidas, pode observar que o a possibilidade de personalizar as buscas não era possível em duas das bases escolhidas, optando-se então pelo Science Direct. Alguns dos motivos para seleção da base de pesquisa foi a possibilidade de personalizar as buscas, facilitando assim a organização dos artigos científicos encontrados pela plataforma, e o fato da mesma servir como base para um grande número de revistas e periódicos publicados em língua inglesa. Por fim, foram considerados elegíveis para o início da pesquisa aqui apresentada artigos publicados nos últimos dez anos, em língua inglesa e encontrados dentro da *Science Direct*. A Figura 4 ilustra o fluxograma seguido para execução da metodologia deste estudo.

Figura 4: Fluxograma da metodologia do trabalho.



Fonte: O autor.

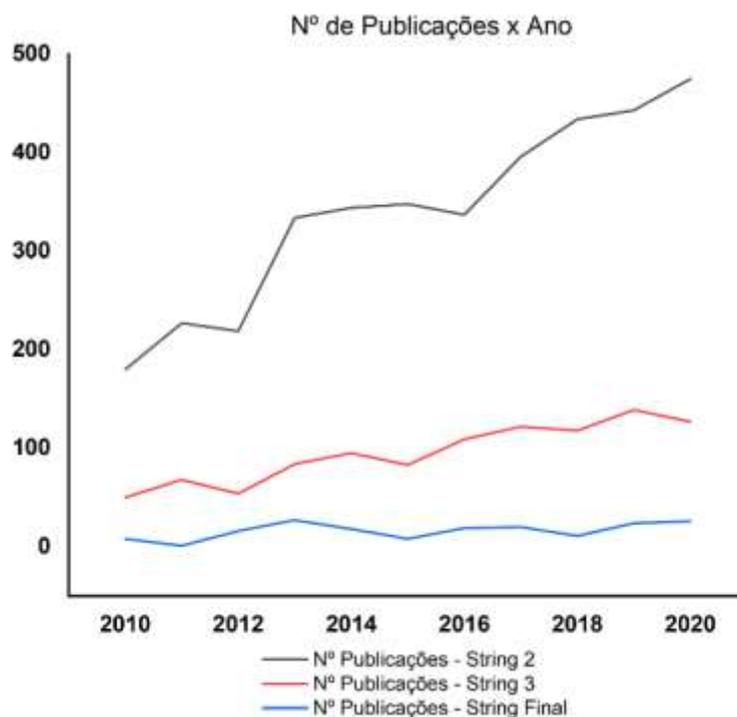
Como mostra a Figura 4, foram usados ao todo quatro filtros durante a pesquisa. O primeiro deles teve como função excluir aqueles artigos focados em áreas do conhecimento pelas quais este trabalho não se interesse, deixando apenas estudos publicados sob as áreas da Engenharia, Energia, Engenharia Química e Ciência dos Materiais. O segundo filtro teve como objetivo eliminar aqueles artigos com títulos, resumos ou metodologias rasas, não interessantes ou muito longe do foco deste estudo. O terceiro filtro levou em conta a qualidade dos artigos pesquisados (A1, B1, B2, etc.), procurando deixar aqueles considerados de melhor qualidade. Por fim, o quarto filtro levou em consideração a leitura completa dos artigos restantes, deixando aqueles que mais se assemelhavam a proposta e ao tema deste trabalho. Desta forma é possível coletar resultados.

## 4 Resultados e considerações

### 4.1 Pesquisa com *string*

Inicialmente, a pesquisa apenas com o termo “*pressure vessels*” trouxe 150558 resultados. Contudo, a maior parte destes eram da área médica ou outras de saúde, visto que o “vasos de pressão” é uma expressão em comum entre as áreas exatas e médicas. Para a *string* “*pressure vessel AND boilers*” foram encontrados 3737 resultados, o que representou aproveitamento de apenas 2,48%, visto que a justificativa para tal já foi dada. Para a *string* “*pressure vessels AND boilers AND maintenance*”, foram encontrados 1049 resultados, com taxa de aproveitamento de 28,07%. Por fim, para a *string* final “*pressure vessels AND boilers AND maintenance AND inspection*” foram encontrados 178 resultados, com taxa de aproveitamento de 18,30%. A Figura 5 ilustra o gráfico de redução de publicações encontradas ano a ano conforme o aperfeiçoamento da *string* de pesquisa.

Figura 5: Número de resultados de publicações conforme o aperfeiçoamento da *string*.



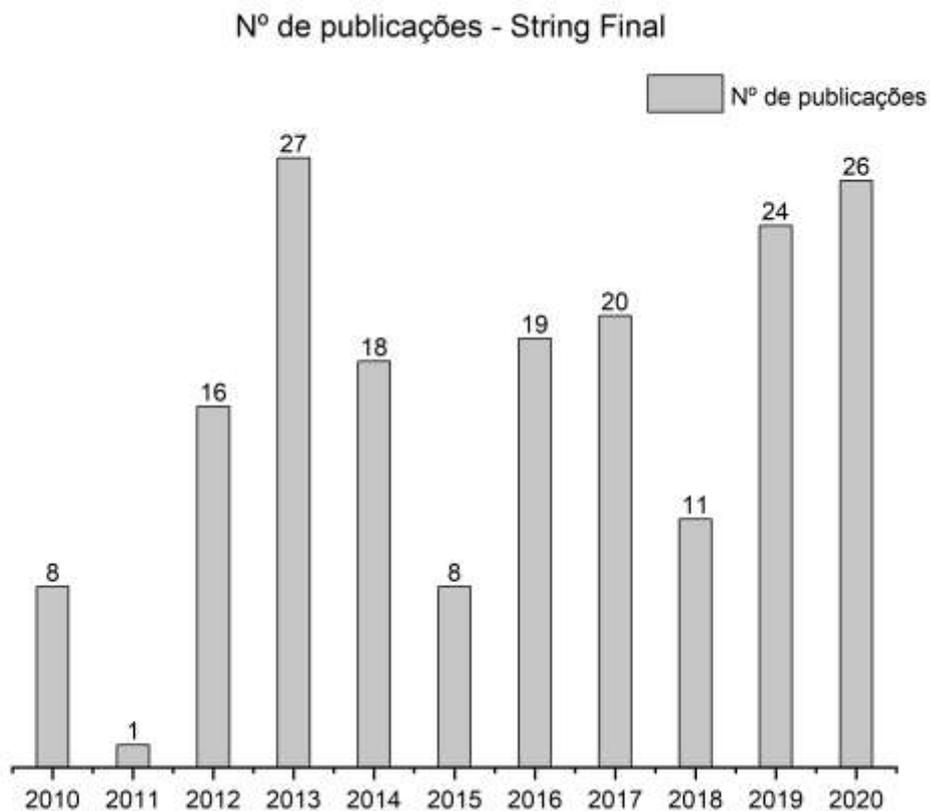
Fonte: O autor, 2020.

Pelo gráfico apresentado na Figura 5, é possível perceber que o número de publicações para a *string* 2, “*pressure vessels AND boilers*”, tem crescido nos últimos anos, mais do que dobrando entre 2010 e 2020, o que demonstra que o interesse pelo assunto é atual, o que serve de justificativa para o trabalho aqui apresentado. Dividindo o período analisado em dois ciclos de cinco anos cada, tem-se que o crescimento entre 2010 e 2015 foi de mais de 93%, enquanto entre 2015 e 2020 foi de 36%. Ou seja, apesar de ainda haver aumento ano a ano no número de publicações encontradas sobre vasos de pressão e caldeiras, há uma queda dentro deste crescimento, o que pode levar, em alguns anos, a uma redução real, fazendo com o que o gráfico aponte para baixo pela primeira vez desde 2016.

A respeito da terceira *string* e tomando como base os mesmos índices calculados para a *string* 2, entende-se que houve aumento de 154% entre 2010 e 2020, mas apenas 16,5% entre 2015 e 2020. Sobre a

quarta e última *string*, “*pressure vessels AND boilers AND maintenance AND inspection*”, a Figura 6 ilustra o comportamento individual da mesma.

Figura 6: Comportamento da *string* final ano a ano.



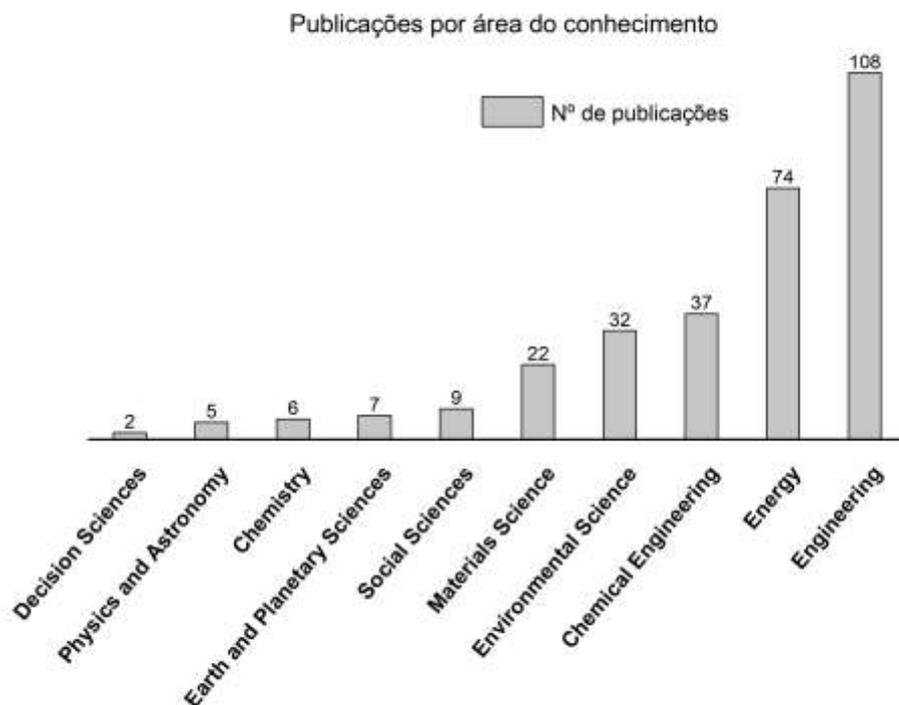
Fonte: O autor, 2020.

Analisando a Figura 6 percebe-se que gráfico que descreve o número de publicações da última *string* entre 2010 e 2020 tem comportamento de montanha russa. Há crescimento entre 2011-2013, 2015-2017 e 2018-2020, porém, há queda entre 2010-2011, 2013-2015 e 2017-2018. O ano em que mais foram feitas publicações do tipo especificado foi 2013, 27, enquanto em 2011 só um artigo do tipo foi publicado.

## 4.2 Tipificando os artigos da pesquisa

As Figuras 7 e 8 mostram os 178 artigos divididos em áreas do conhecimento em periódicos de publicações, como revistas e jornais, respectivamente.

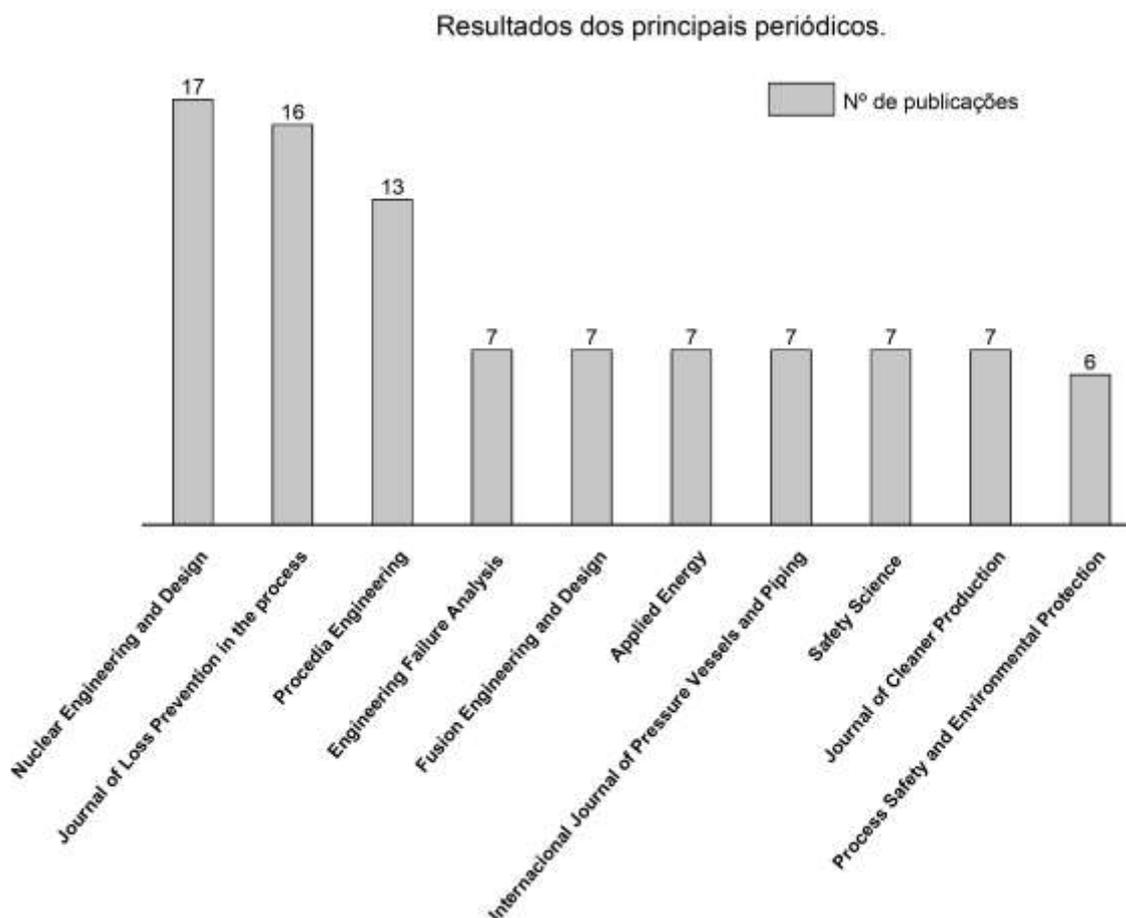
Figura 7: Artigos separados por áreas do conhecimento.



Fonte: O autor.

Sobre a Figura 7, percebe-se que as principais áreas dos artigos publicados são: i) engenharia; ii) Energia; iii) Engenharia Química; iv) Ciências do Meio Ambiente; v) Ciências dos materiais. Como este trabalho não tem como foco a preocupação com o meio ambiente, mas simplesmente tratar da manutenção e inspeção de vasos de pressão e caldeiras, é dado foco nas áreas mais abrangentes e técnicas dispostas no gráfico. Entende-se também que o gráfico apresenta 302 resultados das áreas dos artigos para apenas 178 artigos, o que denota que grande parte dos estudos analisados possuem mais de uma área de atuação

Figura 8: Artigos separados por principais periódicos.



Fonte: O autor.

A Figura 8 apresenta os principais periódicos de publicação dos artigos. Citando os 3 com maiores número de publicações, *Nuclear Engineering and Design*, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* e *Procedia Engineering*, nos quais nota-se as áreas de relevância em engenharia, engenharia química, engenharia de segurança ou conhecimento de forma geral mais se interessa pelo estudo dos vasos de pressão e das caldeiras. No caso apresentado, entende-se que muito tem se falado do tema deste trabalho dentro da indústria, da engenharia nuclear e da química.

### 4.3 Resultados da aplicação dos filtros

Os gráficos das Figuras 7 e 8 também são relevantes para auxiliar na aplicação dos próximos filtros de pesquisa. O filtro 1 tem como objetivo selecionar as áreas do conhecimento que mais possuem ligação com o trabalho aqui apresentado. Pelos motivos já apresentados, foram selecionadas, de acordo com o resultado da *string* final, as áreas: i) Engenharia; ii) Energia; iii) Engenharia Química; iv) Ciências dos materiais. Aplicando este filtro, o número de publicações vai de 178 para 164, representando aproveitamento de 85,4%. O filtro 2 leva em consideração os títulos, resumos e metodologias resumidas dos 164 artigos resultantes. Deste número, sobraram 31 artigos, o que representa aproveitamento de aproximadamente 19%. O motivo para porcentagem baixa de aproveitamento vem do fato de que grande parte dos 164 artigos tratavam de trocadores de calor e

áreas afins. Foi tomada a decisão de separar os dois, vasos de pressão e trocadores de calor, pelo fato de possuírem funções bem distintas.

O filtro 3, por sua vez, tem como objetivo principal selecionar os jornais, revistas e periódicos com melhor fator de impacto. Com auxílio da plataforma Sucupira, os dez locais de publicação já citados neste artigo são organizados de acordo com o fator de impacto, como mostra a Tabela 3:

**Tabela 3** – Fator de impacto dos canais de publicação.

Periódico	Qualis Capes
Applied Energy	A1
Journal of Cleaner Production	A1
Process Safety and Environmental Protection	A2
Internacional Journal of Pressure Vessels and Piping	A2
Safety Science	A2
Nuclear Engineering and Design	B1
Journal of Loss Prevention in the Process Industries	B1
Engineering Failure Analysis	B1
Fusion Engineering and Design	-
Procedia Engineering	-

Fonte: O autor, 2020.

Cruzando as informações fornecidas pela Tabela 3 com o resultado dos filtros anteriores, obtém-se doze artigos científicos, visto que só foram considerados os jornais e revistas com fator de impacto A1 ou A2. Do filtro 2 para o filtro 3 houve aproveitamento de aproximadamente 39%. Passando os doze artigos pelo filtro 4, foram selecionados ao final seis artigos científicos, dispostos na Tabela 4. Do filtro 3 para o 4 houve aproveitamento de 50%.

**Tabela 4** – Os artigos finais selecionados e suas informações.

Nº	Título do artigo	Metodologia	Autores	Periódico	Ano	Qualis
1	Experimental investigation of a termally powered central heating circulator: Pumping characteristics	Substituição de combustíveis fósseis em caldeiras	Markides, C. N.; Gupta, A.	Applied Energy	2013	A1
2	Improving sustainability performance of heating facilities in a central boiler room by condition-based maintenance	A importância da manutenção X economia	Behzad, M. <i>et al.</i>	Journal of Cleaner Production	2018	A1
3	Comparison of API 510 pressure vessels inspection planning with API 581 risk-based inspection planning approaches	Inspeção de equipamentos e em vasos de pressão e riscos por falta de do mesmo	Shishesa z, M. R. <i>et al.</i>	Internacional Journal of Pressure Vessels and Piping	2013	A2
4	Failure assessment methodology for boiler tubes with localized external erosion defects	Estudos em tubos de vasos de pressão, manutenção e possíveis falhas	Kalu, I. E. <i>et al.</i>	Internacional Journal of Pressure Vessels and Piping	2020	A2
5	Fatigue life analysis of supercharged boiler	Análise de tensão e fadiga em um vaso de pressão de um	Zeng, Q. <i>et al.</i>	Internacional Journal of Pressure	2020	A2

	based on the design by analysis method	navio utilizando ANSYS para a análise de elementos finitos.		Vessels and Piping			
6	Requirements for developing high temperature creep life models for ageing pipework systems using power plant condition monitoring and inspection data	Estudo de plano de parada para a realização de substituição dos tubos das caldeiras	Bonetti, R. et al.	Internacional Journal of Pressure Vessels and Piping	2020	A2	

Realizando a leitura dos artigos aqui selecionados, observa-se uma massiva preocupação dos autores sobre a importância da realização das manutenções e estudos aos quais definem melhores métodos da realização do mesmo até mesmo melhores materiais para construção de tubos e caldeiras envolvendo assim técnicas para economia de custos e melhorias ao meio ambiente. Analisando trabalho realizado pelo Markides, C. N.; Gupta, A. et al.(2013) aonde tem seu ponto principal, estudos de energias renováveis para serem usadas no aquecimentos de caldeiras, assim evitando o uso de combustíveis fósseis, devido esgotamento juntamente com preocupações a saúde como ambientais, o mesmo realiza estudos na possível troca de combustíveis fosseis para energia renováveis para aquecimento de caldeiras, transformando-as em elétricas [16].

Segundo Behzad, M. et al. (2018) a importância de um plano de manutenção o qual é importante o mesmo para melhorar o desempenho da indústria, o estudo de caso do mesmo, obteve uma grande economia de consumo de gás e água, o autor descreve a suma importância da manutenção bem planejada, seguindo os códigos por eles usados, ASME, mostrando assim os benéficos para indústria, seja ele no valor econômico, como ambiental [3][17]. Com base a ênfase do artigo aqui escrito, o autor Shishesaz, M. R. et al. (2013) enfatiza que para garantir a integridade mecânica, todos os vasos de pressão devem ser inspecionados nos intervalos fornecidos em códigos de inspeção com base em uma avaliação de inspeção baseada em risco [18]. Muito se nota em falar de manutenções e inspeções em vasos de pressão, a preocupação com a vida útil do equipamento se tornou algo mais visível para a indústria, devido a fator econômico e ambiental. Neste sentido, os trabalhos aos quais foram selecionados, evidenciam o quanto e importante a realização das devidas manutenções [3][17][18].

O autor Kalu, I. E. et al.(2020), realiza um estudo em tubos, onde teve por base desenvolver uma ferramenta de tomada de decisão rápida, para assim, ajudar a priorizar a manutenção, reparo ou substituição dos tubos [19]. Seu artigo tem como parâmetro a realização de ensaios em tubos, mostrando, através de softwares, a corrosão e deformações plásticas aos quais podem ser apresentadas pelos tubos, classificando-os em mais graves a menos graves, mostrando a porcentagem em perdas de parede deformações plásticas e rupturas por excesso de pressão. Assim como o artigo do Zeng, Q. et al. (2020), foi a realização de estudos por meio do ANSYS, análise de tensão e fadiga em uma caldeira de um navio, observamos nos dois trabalhos a preocupação com a fadiga dos materiais e as possíveis prevenções de manutenção, desta forma, realizando um plano de ações nas inspeções, caldeiras e nas tubulações. O artigo do Zeng, Q. et al. (2020), relata que em seus estudos e suas simulações, apresentou resultados que podem fornecer referências para a prevenção de falhas, como proteção contra colapso de deformação plástica, proteção contra falha local, proteção contra colapso por flambagem e proteção contra falhas críticas, entre outras [19][20].

Em resumo, nota-se, que o trabalho do Bonetti, R. et al. (2020) tem por metodologia a realização de estudos para efetuar paradas e realizar manutenções em caldeiras e tubulações, sua pesquisa tem ênfase em estudar a vida útil das tubulações e caldeiras, melhorando as estimativas de vida residual do mesmo [21]. Assim como o autor Kalu, I. E. et al.(2020), pode se observar que nos dois trabalhos enfatizaram a importância de um plano de ação e um estudo para melhorar, seja a manutenção, a inspeção ou substituição de equipamentos, sem que haja uma grande perda de tempo e custo [19][21].

Contudo, durante as buscas, observou-se que a maioria dos trabalhos, tem como objetivo, um melhor plano de manutenção, estudos de materiais, estudos de fadigas, corrosões, custos e meio ambiente, tendo em destaque o trabalho do Behzad, M. et al. (2018) destacando que com um bom plano de inspeção, tem uma grande economia, seja ela de energia, consumo de combustível, e consumo de água, sendo assim um aspecto ambiental melhor. Cita em seu trabalho que o programa de manutenção com monitoramento de condição e provável solução de problemas é mais sustentável do que uma manutenção periódica [17]. Seus

estudos mostraram que o monitoramento, trouxe grandes resultados, cita-se em seu trabalho que a verificação de temperatura dos equipamentos pode revelar sinais de falhas, podendo acarretar em problemas maiores, caso não seja solucionado, assim como análise de vibrações e entre outros. Cita a suma importância de equipamentos para a inspeção, como ultrassom, osciloscópio e não apenas visuais [17].

Após estudar os trabalhos selecionados, os resultados obtidos através da leitura, observa uma grande variedade de metodologias que envolvem o tema, a manutenção dos vasos de pressão, evitando grandes problemas futuros, mostrando a suma importância, trazendo assim, economia e uma sustentabilidade ao meio ambiente, que foi um dos quesitos que teve grande ênfase nos trabalhos publicados. Mas não é algo atoa, pois estamos em uma era que o termo sustentabilidade tem sido algo de grandes discursões, e estudos para melhorar a tecnologia nas indústrias, sendo a grande questão, indústria 4.0, sendo que seu papel é englobar tecnologia e meio ambiente.

## 5 Conclusão

O presente trabalho buscou ter o melhor entendimento das normas as quais devem ser cumpridas no projeto, fabricação e manutenção de vasos de pressão, mostrando a suma importância dos cumprimentos das normas e a realização dos testes para autenticar o uso do equipamento. Observando por meio das pesquisas realizadas, notamos que a engenharia evolui, desde o século XX até os dias atuais, com a normativas criadas para melhor segurança do equipamento e os demais.

A realização dos testes em manutenção e fabricação são de suma importância para o equipamento e a realização dos mesmos deve ser periódica, com o objetivo de evitar acidentes trágicos, danos materiais e ambientais. Um dos métodos mais utilizados na inspeção, como citado no trabalho, é o TH, que mostra a possibilidade da existência de tricas e rachaduras na estrutura do equipamento.

Em relação à pesquisa, o número de publicações encontradas com a *string* final foi de 178. Passados os quatro filtros diferentes, foram selecionados os artigos com metodologia, título, resumo, temática mais semelhantes às deste estudo. Também foram qualificados os periódicos com objetivo de escolher aqueles de melhor fator de impacto. Para este estudo, apenas artigos científicos A1 ou A2 eram elegíveis. Por fim, os seis artigos finais representam 3,1% da *string* final e 0,16% da *string* 2, quando foram removidos os trabalhos relacionados à medicina.

Os artigos aos quais foram selecionados, pode -se observa, que a metodologia traz grandes estudos envolvendo melhores formas a se ter uma manutenção, trazendo assim resultados expressivos economicamente e ambiental. Mostrou que os desenvolvimentos em softwares, foi de grande importância para a realização de ensaios, cálculos e resoluções de problemas para uma melhor inspeção em vasos de pressão e seus derivados.

## Referências Bibliográficas

- [1] (TELLES, 1996) TELLES, P.C.S, **Vasos de Pressão** 1996, 2a edição, Rio de Janeiro, RJ, Livros Técnicos e Científicos.
- [2] FURINI, Adriano. **Avaliação da aplicabilidade do teste hidrostático em vasos de pressão visando a garantia da integridade**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Vale do Paraíba, 2002. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/7540764-Avaliacao-da-aplicabilidade-do-teste-hidrostatico-em-vasos-de-pressao-visando-a-garantia-da-integridade.html>>. Acesso em: 31 out. de 2020.
- [3] ASME, **Rules for Construction of Pressure Vessels**, 2002 Addenda ed., vol. Section VIII Division 1, New York: ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, 2002.
- [4] NORMA. NR-13, **Caldeiras e Vasos de Pressão**, 2014

- [5] (FALCÃO, 2002) FALCÃO, Carlos, **Apostila de projeto mecânico de vasos de pressão e trocadores de calor casco e tubos**, 2002.
- [6] (CARVALHO, 2008) CARVALHO, Nestor Ferreira de **Apostila do Curso de Inspeção e Manutenção em vasos de pressão**, Universidade Petrobras, 2008.
- [7] (DONATO, 2007a) DONATO, G.V.P, **Apostila de Vasos de pressão**, Programa de Formação Universidade Petrobras 2007.
- [8] API 579, API 579-1/ASME FFS-1, JUNE 5, 2007
- [9] PEREIRA, J. dos S. **Análise de Efeitos de Teste Hidrostático em Vasos de Pressão**, Dissertação de Mestrado Profissional, UFSC, 2004
- [10] API 510, **Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration**, NINTH EDITION, JUNE 2006
- [11] FREIRE, J.L., **Visão do Teste Hidrostático Através do Diagrama de Avaliação de Falha (FAD) com Efeito de Tempo**, artigo apresentado na COTEQ 2007.
- [12] KIEFNER, John F., MAXEY Willard A., **Benefits and limitations of Hydrostatic tests**, Presented at API's 51st Annual Pipeline Conference & Cybernetics Symposium, New Orleans, Louisiana (April 18-20, 2000).
- [13] GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 120 p.
- [14] ATRIN SANAT. **Pressure Vessels Components**. Disponível em: <<https://atrinanat.com/knowledge/pressure-vessels-components/>>. Acesso em: 01 nov. de 2020.
- [15] IECKER, T. D. **Análise de tensões em vasos de pressão através do método de elementos finitos**. Trabalho de Conclusão de Curso, CEFET/RJ, 2014.
- [16] Markides, C. N. **Experimental investigation of a termally powered central heating circulator: Pumping characteristics**. Applied Energy, 2013.
- [17] Behzad, M. **Improving sustainability performance of heating facilities in a central boiler room by condition-based maintenance**. Journal of Cleaner Production, 2018.
- [18] Shishesaz, M. R. **Comparison of API 510 pressure vessels inspection planning with API 581 risk-based inspection planning approaches**. Internacional Journal of Pressure Vessels and Piping 2013.
- [19] Kalu, I. E. **Failure assessment methodology for boiler tubes with localized external erosion defects**. Internacional Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020.
- [20] Zeng, Q. **Fatigue life analysis of supercharged boiler based on the design by analysis method**. Internacional Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020.
- [21] Bonetti, R. **Requirements for developing high temperature creep life models for ageing pipework systems using power plant condition monitoring and inspection data**. Internacional Journal of Pressure Vessels and Piping 2020.