

MAURO PEDROZO PIRES

PROPOSTA DE MÉTODO DE INSPEÇÃO DE SEGURANÇA
EM VASOS DE PRESSÃO PARA MÁQUINAS DE FABRICAÇÃO
DE PAPEL COMPLEMENTAR AOS REQUISITOS DA NR 13

São Paulo

2012

MAURO PEDROZO PIRES

PROPOSTA DE MÉTODO DE INSPEÇÃO DE SEGURANÇA
EM VASOS DE PRESSÃO PARA MÁQUINAS DE FABRICAÇÃO
DE PAPEL COMPLEMENTAR AOS REQUISITOS DA NR 13

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Especialista em Engenharia de
Segurança do Trabalho

São Paulo

2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Pires, Mauro Pedrozo

**Proposta de método de inspeção de segurança em vasos de pressão para máquinas de fabricação de papel complementar aos requisitos da NR 13 / M.P. Pires. -- São Paulo, 2012
45 p.**

Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Segurança de equipamentos 2. Inspeção de vasos de pressão I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II. t.

DEDICATÓRIA

À minha esposa, Ivani Montemagni Segala, cujo amor, dedicação e apoio, permitem o meu desenvolvimento profissional, e a minha felicidade pessoal.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas de trabalho da Voith, companheiros em todos os momentos, pelo suporte na realização deste trabalho.

RESUMO

Procurou-se neste trabalho, o desenvolvimento de meios alternativos e complementares de inspeção de cilindros secadores para máquinas de fabricação de papel, reunindo conceitos adquiridos ao longo de minha carreira profissional na área da qualidade, buscando aplicá-los em projetos de prevenção de acidentes de trabalho. No Brasil, a norma regulamentadora NR 13, define os requisitos mínimos de inspeção de vasos de pressão. O estudo da NR 13 e sua aplicação na inspeção de cilindros secadores de ferro fundido, normalmente empregado nas máquinas de fabricação de papel, revelou a existência de situações não contempladas por esta norma, tais como falhas ocultas nos materiais. Em função dos fluidos contidos nestes vasos, em conjunto com a pressão e temperatura de trabalho, esses equipamentos podem representar um grande perigo aos seus operadores, sendo necessário o emprego de uma série de controles, para minimizar o risco de acidentes, que normalmente nestes casos são de grandes proporções, com perdas de grande número de vidas e também grandes perdas materiais. O estudo aqui apresentado propõe o emprego de técnicas de inspeção por ultrassom, conjugada com gamagrafia, para detecção de falhas ocultas nos componentes de ferro fundido cinzento que constituem os cilindros secadores para máquinas de fabricação de papel.

Palavras-chaves: Segurança de equipamentos, Inspeção de vasos de pressão, cilindros secadores, inspeção por ultrassom.

ABSTRACT

The objective of this study was the development of alternative and complementary inspection for drying cylinders for paper manufacturing machines, bringing together concepts obtained throughout my career within the quality field, seeking to apply them in projects to prevent work accidents. In Brazil, the regulatory norm NR 13, defines the minimum requirements for inspection of pressure vessels. The study of NR 13 and its application in the inspection of dryer cylinder made of cast iron, usually used in paper manufacturing machines, showed the existence of situations not covered by this standard, such as hidden faults in materials. According to the fluid contained in these vessels, in combination with pressure and working temperature, such equipment can represent a great danger to their operators, necessitating the use of a series of controls to minimize the risk of accidents that normally in these cases, are in large proportions, with large losses of lives and major material losses. The study presented here proposes the use of ultrasonic inspection techniques, combined with gammagraphy for the detection of hidden faults in cast iron components that make up the drying cylinders for paper manufacturing machines.

Keywords: Equipment safety, inspection of pressure vessels, drying cylinders, ultrasonic inspection.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVO	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1	HISTÓRIA DA INSPEÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO.....	15
2.2	TECNOLOGIA ATUAL DE FABRICAÇÃO DE PAPEL TISSUE.....	17
2.2.1	O cilindro secador.....	18
2.3	NORMA REGULAMENTADORA NR 13.....	20
2.3.1	Classificação conforme NR 13 anexo IV.....	20
2.3.2	Requisitos de inspeção conforme NR 13.....	21
2.3.1.1	Inspeção inicial.....	21
2.3.1.2	Inspeção periódica.....	21
2.3.3	Análise dos requisitos de inspeção e teste conforme NR 13.....	22
2.4	REQUISITOS DE INSPEÇÃO DE FABRICANTES.....	22
2.5	MÉTODOS COMPLEMENTARES DE INSPEÇÃO E TESTE.....	23
2.5.1	Emissão Acústica.....	23
2.5.2	Ultrassom.....	24
2.6	LEVANTAMENTO DE DADOS.....	26
2.6.1	Dados históricos dos acidentes.....	26
2.6.2	Análise do histórico de acidentes.....	29
2.7	ESTUDO DA ORIGEM DAS FALHAS.....	29
2.7.1	Falhas originadas devido ao processo de fundição.....	29
2.7.2	Falhas originadas devido à geometria da peça.....	29
2.7.3	Análise da origem das falhas.....	30
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE INSPEÇÃO.....	31
3.1.1	Ensaio por ultrassom.....	31
3.1.2	Parametrização inicial do sistema de ultrassom.....	31
3.1.3	Sistema de inspeção por ultrassom - fase 1.....	33
3.1.3.1	Desenvolvimento do sistema mecânico.....	33
3.1.3.2	Desenvolvimento do meio de acoplamento do cabeçote.....	34
3.1.3.3	Seleção do equipamento de ultrassom.....	34

3.1.3.4	Avaliação do sistema de inspeção por ultrassom - Fase 1.....	35
3.1.4	Sistema de inspeção por ultrassom - fase 2.....	36
3.1.4.1	Desenvolvimento do sistema mecânico.....	37
3.1.4.2	Desenvolvimento do meio de acoplamento do cabeçote.....	38
3.1.4.3	Seleção do equipamento de ultrassom.....	38
3.1.4.4	Avaliação do sistema de inspeção por ultrassom - Fase 2.....	39
3.2	ENSAIO RADIOGRÁFICO.....	40
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1	ENSAIO POR ULTRASSOM.....	41
4.2	ENSAIO RADIOGRÁFICO.....	41
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	42
5.	CONCLUSÕES.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática da máquina de papel tissue.....	17
Figura 2 - Máquina de papel tissue.....	18
Figura 3 - Cilindro secador.....	19
Figura 4 - Cilindro secador em corte.....	19
Figura 5 - Cabeçote em região sem falha = 100 % de eco de fundo.....	25
Figura 6 - Cabeçote em região com falha = 20 % de eco de fundo.....	25
Figura 7 - Acidente com máquina de papel	26
Figura 8 - Acidente com máquina de papel.....	27
Figura 9 - Acidente com máquina de papel.....	29
Figura 10 - Resultado do ensaio por reflexão do eco de fundo.....	32
Figura 11 - Resultado do ensaio por reflexão do eco de defeito.....	32
Figura 12 - Representação esquemática do sistema de ultrassom fase 1....	34
Figura 13 - Visualização de inspeção por ultrassom em C-Scan.....	35
Figura 14 - Sistema de ultrassom fase 1.....	36
Figura 15 - Representação esquemática do sistema de ultrassom fase 2....	37
Figura 16 - Representação do dispositivo de acoplamento do cabeçote.....	38
Figura 17 - Sistema de ultrassom fase 2.....	39
Figura 18 - Ensaio por ultrassom.....	40
Figura 19 - Ensaio radiográfico.....	40
Figura 20 - Visualização de inspeção por ultrassom do cilindro Projeto A....	41
Figura 21 - Visualização da localização da falha no cilindro Projeto A.....	42
Figura 22 - Filme radiográfico evidenciando o rechupe no cilindro Projeto A.	43
Figura 23 - Corte do material na posição do rechupe no cilindro Projeto A....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Prazos de inspeção para empresas sem serviço de inspeção.....	21
Tabela 2 - Plano de inspeção para cilindros secadores.....	21
Tabela 3 - Plano de inspeção para cilindros secadores da Voith.....	22
Tabela 4 - Estatísticas de falhas em cilindros secadores.....	27
Tabela 5 - Estatísticas de falhas em componentes de cilindros secadores....	28
Tabela 6 - Estatísticas de origem das falhas de cilindros secadores.....	28

1. INTRODUÇÃO

Os insumos, produtos químicos e petroquímicos que o homem utiliza nas indústrias como matéria prima ou para obtenção de energia, normalmente não são encontrados na natureza na forma que podem ser consumidos ou utilizados. Para chegar às suas características de consumo, o produto que o homem explorou e extraiu da natureza precisa sofrer na indústria uma série de processamentos, transformações e estocagem até a sua utilização. Na indústria, o processamento e estocagem de muitos produtos são feitos a pressões maiores ou menores que a atmosférica. Dessa maneira, são empregados recipientes fechados e com resistência para suportar pressões no seu corpo, assim como temperaturas que extrapolam o ambiente. Esses equipamentos, denominados “vasos de pressão”, por operarem normalmente sujeitos a pressão e/ou temperaturas elevadas, são considerados equipamentos de alto risco, por conterem grande quantidade de energia acumulada no seu interior.

A faixa de variação de pressões e de temperatura de trabalho dos vasos de pressão é muito extensa. Existem vasos de pressão trabalhando desde o vácuo absoluto até cerca de 4.000 Kg/cm^2 e desde próximo do zero absoluto até temperaturas da ordem de $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Os vasos de pressão podem ter grandes dimensões e pesos, havendo alguns com mais de 60 m de comprimento e outros com mais de 200 t de peso.

Para garantir a operação segura e isenta de acidentes, é necessário um programa de inspeções de segurança, com a finalidade de detectar preventivamente algum indicio de problema nos vasos de pressão, que podem desencadear uma falha e consequente, um acidente, normalmente de grandes proporções devidos às altas pressões e temperaturas de trabalho a que são submetidos esses equipamentos.

Na indústria de papel e celulose, encontramos vários tipos de vasos de pressão, entre eles os cilindros secadores, parte integrante das máquinas de fabricação de papel, responsável pela secagem da folha de papel. Os cilindros secadores são aquecidos por meio de vapor, sendo dessa forma considerados vasos de pressão, com uma particularidade especial, já que não são estáticos, são vasos de pressão

rotativos, sujeitos dessa forma a vários tipos de esforços além da pressão interna de vapor de água.

No Brasil, a inspeção de vasos de pressão em geral, deve seguir as definições da norma regulamentadora NR 13, porém verificou-se que a aplicação somente dos seus requisitos na inspeção de cilindros secadores, pode não ser o suficiente para garantir a segurança desses equipamentos, devido a falhas internas nos materiais que formam os cilindros secadores. Os cilindros secadores são fabricados a partir de componentes de ferro fundido cinzento, devido a suas ótimas características de transmissão de calor, durabilidade e baixo custo, porém também apresentam aspectos negativos, seu processo de obtenção por fundição é suscetível a falhas internas, tais como rechupes e poros, dificilmente detectáveis nos ensaios obrigatórios definidos pela NR 13.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver ensaios complementadores aos definidos pela NR 13, a serem realizados nas inspeções iniciais e periódicas de cilindros secadores de máquinas para fabricação de papel, garantindo dessa forma, que falhas ocultas tais como, poros, rechupes e trincas, sejam detectadas previamente, antes de desencadearem uma falha crítica e consequentemente acidentes de trabalho, normalmente de grandes proporções devido às grandes dimensões, pressão e temperaturas de operação.

1.2 JUSTIFICATIVA

Cilindros secadores são componentes fundamentais na produção de papel. Devido a suas características de construção, operação e manutenção/inspeção, ao longo dos anos têm acontecido diversas falhas e acidentes com cilindros secadores, muitas vezes resultando em grande número de vítimas fatais, grandes perdas materiais, levando a prolongadas paradas de produção para reconstrução dos maquinários, dessa forma, a prevenção de riscos acidentes com cilindros secadores passa a ser muito importante.

Devido às consequências de uma falha ou acidente com cilindros secadores, algumas empresas têm investido fortemente em inspeção, como forma de prevenção de grandes acidentes, mas mesmo assim, todo ano acontecem acidentes que envolvem cilindros secadores. A média anual é de 1,2 cilindros secadores posto fora de operação por diversos motivos: falhas nas tampas ou na camisa, incêndio na máquina de papel e até explosões, infelizmente com vítimas.

Para melhorar o processo de inspeção de cilindros secadores e diminuir a taxa anual de acidentes, esse estudo procura definir meios de inspeção complementares, aos definidos pela NR 13.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 HISTÓRIA DA INSPEÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO

A história da inspeção de equipamentos está atrelada a alguns eventos que mudaram os rumos da produção industrial, resultando em demandas cada vez maiores de produção e respectivo desempenho dos materiais e equipamentos.

- Revolução Industrial: desenvolvimento de caldeiras, das máquinas a vapor, da siderurgia, usinagem dos metais, equipamentos para indústria têxtil, transporte ferroviário e naval a vapor
- Primeira Guerra Mundial: aumentaram muito a demanda por produtos químicos em geral, particularmente os derivados de petróleo.
- Segunda Guerra Mundial: novos equipamentos foram criados e aprimorados, como o caso do motor diesel e o emprego da aviação como arma de guerra.

Em paralelo ao aprimoramento dos materiais, processos e equipamentos, desenvolveu-se o processo de inspeção de equipamentos, em especial a inspeção de vasos de pressão.

Nos primórdios a inspeção de equipamentos utilizava técnicas muito primitivas que iam pouco além da inspeção visual e teste de martelo. A inspeção deixou de apenas fiscalizar o cumprimento dos códigos de projeto passando a exercer também o controle de deterioração dos equipamentos, área de ação que mais a caracteriza atualmente. Foram introduzidas técnicas de inspeção menos primitivas, como por exemplo, o uso de calibres pinça, calibre de inspetor, micrometros de profundidade e líquido penetrante.

No Brasil a inspeção de equipamentos chegou na década de 50, quando o país implantou a sua primeira refinaria, em Mataripe, na Bahia. Com as refinarias em operação no Brasil, chegou a necessidade da inspeção, já que

nossas refinarias eram modernas e operavam continuamente, incluindo novos processos como o craqueamento térmico, tratamentos de gasolina, de querosene, de GLP e outros processos.

Em termos pioneiros no Brasil, a inspeção de equipamentos recebeu um excelente impulso quando o Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) foi criado. E com ele uma importante comissão técnica, a Comissão de Refinação e foi dentro dela que foi criada a Subcomissão de Inspeção por volta de 1959.

A Subcomissão de Inspeção alcançou maioria em 1963 passando a ser a Comissão de Inspeção de Equipamentos, como existe até hoje. Esta Comissão deu um grande impulso à inspeção de equipamentos no país. O crescimento do país exigiu a criação de novas refinarias e a indústria petroquímica teve um grande impulso no mundo, e o Brasil não ficou atrás. Novas unidades foram construídas no sul, no sudeste e no nordeste, portanto requerendo muito mais inspeção.

Em 1970 foi criada a Portaria número 20 do DNHST (Departamento Nacional de Higiene e Segurança do Trabalho) que começou a revolucionar esse segmento. A Portaria era modesta e focalizava somente as caldeiras. Poucos anos depois, em 1978, a Portaria 20 foi substituída pela norma regulamentadora NR 13, que era mais ampla, incluindo os vasos de pressão, revisada novamente em 2008, para correção de linguagem, introduzindo mudanças de conteúdo pouco relevantes.

2.2 TECNOLOGIA ATUAL DE FABRICAÇÃO DE PAPEL TISSUE

O início da produção do papel ocorreu na China por volta do século II, quando o papel era produzido de forma artesanal, a partir de fibras de árvores e trapos de tecidos cozidos e esmagados. A massa resultante era espalhada sobre uma peneira com moldura de bambu e um pano esticado e submetida ao sol para um processo natural de secagem.

Em meados do século XVII, os holandeses começaram a aplicar a força hidráulica para mover grandes pedras que, movidas umas contra as outras, melhor preparavam as fibras para a produção de papel.

A primeira máquina para fazer papel foi inventada na França por Nicholas-Louis Robert em 1799. Pouco tempo depois, os irmãos Fourdrinier apresentaram o método de produção contínua de papel, aperfeiçoado na Inglaterra.

Desde 1857 fabrica-se papel higiênico em rolos como nós conhecemos hoje. Atualmente, 31 bilhões de rolos são vendidos por ano e 8,3 milhões de quilômetros de tiras são utilizadas diariamente em todo o mundo. A fabricação desse item de primeira necessidade é realizada em uma máquina de papel equipada com um cilindro secador.

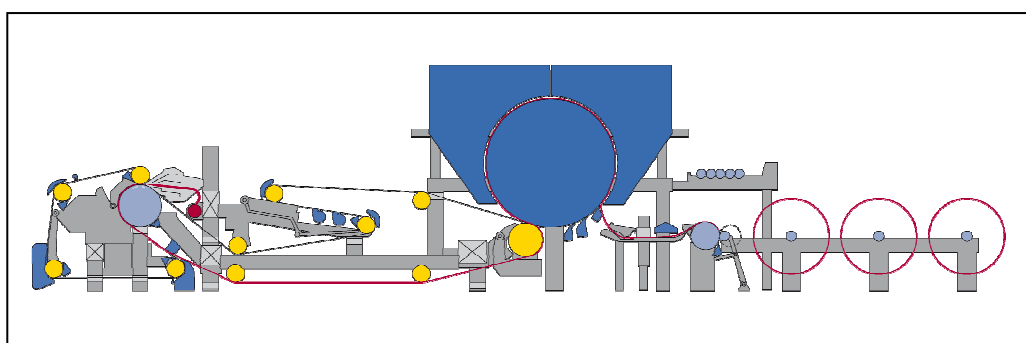


Figura 1 - Representação esquemática da máquina de papel tissue
Fonte: Voith 2011



Figura 2 - Máquina de papel tissue

Fonte: Voith 2011

2.2.1 O cilindro secador

O cilindro secador, como diz o nome, tem como função principal secar o papel por meio do calor proveniente do vapor que é insuflado em seu interior, trabalhando a temperaturas de até 180 °C. Os diâmetros desses cilindros variam de 2,40 m até 8,60 m, e as larguras chegam a mais de 7,60 m. Velocidades de 2000 m/min e peso de 200 toneladas não são incomuns para esse vaso de pressão rotativo.

Contra o cilindro secador trabalha um rolo de sucção e, às vezes, uma prensa para pressionar a folha de papel uniformemente sobre a camisa do cilindro. Sobre o secador soma-se uma capota que insufla ar quente sobre a superfície da folha, utilizando o processo de convecção para a secagem. É um equipamento preparado para submeter-se a 7.000 ciclos de aquecimento / desaquecimento completos, múltiplas retíficas, altas velocidades, pressões e aquecimentos extremos. Bastante tradicional na indústria de papel, o equipamento é regulamentado pela NR 13 no Brasil.



Figura 3 - Cilindro secador

Fonte: Voith 2011

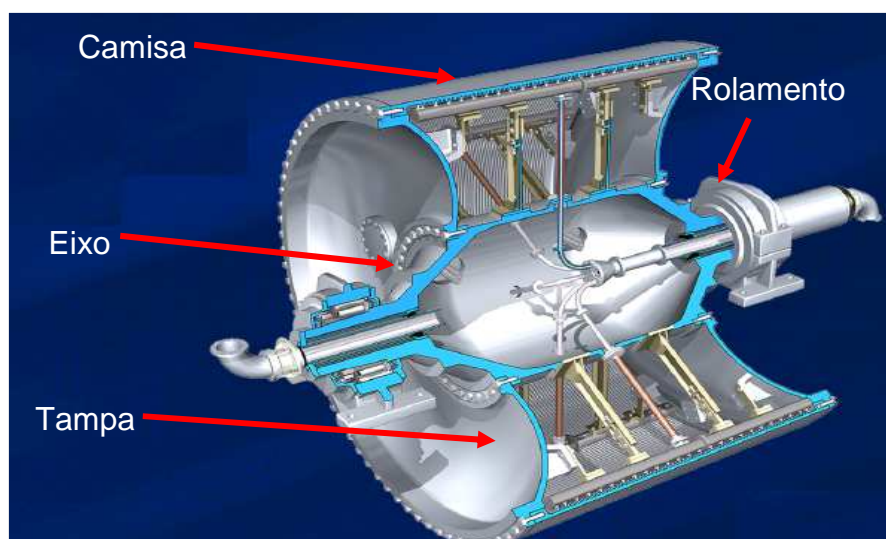


Figura 4 - Cilindro secador em corte

Fonte: Voith 2011

2.3 NORMA REGULAMENTADORA NR 13

A Norma Regulamentadora NR 13 é uma norma do Ministério do Trabalho e Emprego que tem como objetivo regulamentar a fabricação, instalação, manutenção e inspeção de caldeiras e vasos de pressão no que diz respeito à segurança das instalações e do trabalhador. A mesma tem força de lei, é uma norma compulsória, aplicada a todos os estabelecimentos que operam equipamentos sob pressão, desde grandes indústrias, plataformas, navios, até pequenos estabelecimentos, hotéis, saunas, restaurantes e hospitais, independente destes serem públicos ou privados.

Com relação ao objeto deste estudo, o cilindro secador é enquadrado na categoria de vasos de pressão, apesar de ser um caso especial, já que não é estático, sendo dessa forma sujeito a outros tipos de esforços, além da pressão interna.

2.3.1 Classificação conforme NR 13 anexo IV

Enquadrando um cilindro secador de porte médio, o que representa a maioria dos cilindros instalados no mundo, com as seguintes dimensões, largura = 3,5 m, diâmetro = 4 m, pressão de trabalho = 10 kgf/cm^2 , temperatura de trabalho = 160°C , na NR 13, chega-se a seguinte classificação e respectivos requisitos de inspeção obrigatórios:

1) Definição da Classe:

- Fluido = vapor de água } Classe C

2) Definição da Categoria:

- Volume = 176m^3
 - Pressão = $10 \text{ kgf/cm}^2 = 0,98 \text{ Mpa}$
 - P.V = 172 } Categoria I

2.3.2 Requisitos de inspeção conforme NR 13

2.3.2.1 Inspeção inicial

A inspeção de segurança inicial deve ser feita, antes de sua entrada em funcionamento, no local definitivo de instalação, devendo compreender exame externo, interno e teste hidrostático.

2.3.2.2 Inspeção periódica

A inspeção de segurança periódica, constituída por exame externo, interno e teste hidrostático, deve obedecer aos seguintes prazos máximos estabelecidos a seguir:

a) para estabelecimentos que não possuam Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos:

Tabela 1 – Prazos de inspeção para empresas sem serviço de inspeção

Categoria do Vaso	Exame Externo	Exame Interno	Teste Hidrostático
I	1 ano	3 anos	6 anos

Fonte: MTE 2011 (adaptado)

b) para estabelecimentos que possuam Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos:

Tabela 2 – Prazos de inspeção para empresas com serviço de inspeção

Categoria do Vaso	Exame Externo	Exame Interno	Teste Hidrostático
I	3 anos	6 anos	12 anos

Fonte: MTE 2011 (adaptado)

2.3.3 Análise dos requisitos de inspeção e teste conforme NR 13

Conforme apresentado, a NR 13 define apenas inspeção visual, interna e externa e teste hidrostático periódicos, não trazendo nenhum teste complementar com objetivo de avaliação da estrutura dos materiais e suas respectivas falhas internas, cabendo ao profissional habilitado, quando necessário definir esses ensaios complementares, de acordo com sua experiência e histórico de desempenho, intervenções ou acidentes sofridos pelos vasos de pressão.

2.4 REQUISITOS DE INSPEÇÃO DE FABRICANTES

A tabela a seguir mostra os ensaios e testes empregados atualmente na inspeção de fabricação de cilindros secadores pela Voith.

Tabela 3 - Plano de inspeção para cilindros secadores da Voith

Ensaios e Testes	Componentes				
	Camisa	Tampa	Eixo	Parafuso	Cilindro (conjunto)
Ensaios Mecânicos	X	X	X	X	
Composição Química	X	X	X	X	
Dureza	X	X	X	X	
Metalografia	X				
Inspeção Dimensional	X	X	X	X	X
Inspeção Visual	X	X	X		X
Partículas Magnéticas		X		X	
Teste Hidrostático					X

Fonte: Voith 2011 (adaptado)

2.5 MÉTODOS COMPLEMENTARES DE INSPEÇÃO E TESTE

2.5.1 Emissão Acústica

A inspeção de vasos de pressão por emissão acústica está baseada na detecção de ruídos que são emitidos durante a propagação de falhas em materiais quando os equipamentos são submetidos a esforços, por exemplo pressão interna, sendo classificados como ensaios que monitoram as estruturas em tempo real.

Por ser um método qualitativo o ensaio de emissão acústica não fornece as dimensões das descontinuidades, parâmetro fundamental para a disciplina Mecânica da Fratura, uma vez que só fornece indicações de descontinuidades ativas durante o carregamento das estruturas. As dimensões das descontinuidades são fornecidas por outros métodos de ensaios não destrutivos.

O método de inspeção com a técnica de emissão acústica é capaz de detectar, crescimento de trincas e vazamentos em equipamentos submetidos à pressão interna, detectando dessa forma prematuramente falhas em estruturas permitindo a monitoração constante e em tempo real de estruturas industriais.

A princípio, os cilindros secadores poderiam ser examinados com o método de Emissão Acústica, porém a sua construção com juntas parafusadas, limita sua aplicação, devido à interferência das juntas que podem gerar falsas indicações de falhas. Outra limitação da técnica é a aplicação apenas em cilindros montados, devido à necessidade de pressurização do conjunto para realização do teste, não sendo possível o emprego desta metodologia pelos fabricantes de cilindros secadores no ensaio preliminar das partes que compõem os cilindros.

2.5.2 Ultrassom

A inspeção por ultrassom é baseada na propagação e reflexão de ondas acústicas dentro dos materiais. A existência de falhas ou descontinuidades no material das peças, causa reflexão da onda acústica que retorna até a sua fonte geradora quando o obstáculo estiver numa posição normal (perpendicular) em relação ao feixe incidente.

O pulso ultra-sônico é transmitido para o material através de um transdutor especial, usualmente denominado de cabeçote. Os pulsos ultrassônicos refletidos por uma descontinuidade, ou pela superfície oposta da peça (ecos de fundo), são captados pelo transdutor, convertidos em sinais eletrônicos e mostrados na tela plana de cristal líquido do aparelho.

As descontinuidades se tornam visíveis na tela de cristal líquido sob a forma de um ecograma produzido por um sinal eletrônico (sinal do eco x tempo). Além deste tipo de apresentação, o qual é o mais comum, existem outros métodos mais sofisticados tais como o que mostra toda uma seção da peça com todas as suas relativas descontinuidades.

Geralmente, as dimensões reais de uma descontinuidade interna podem ser estimadas com uma razoável precisão através da altura dos ecos refletidos, fornecendo meios para que a peça possa ser aceita, ou rejeitada, baseando-se nos critérios de aceitação da norma aplicável. As maiores aplicações deste ensaio são os ensaios em soldas, laminados, forjados, fundidos, materiais compostos, medição de espessura, corrosão, etc.

Sua aplicação na inspeção de componentes dos cilindros secadores é viável desde que seja realizado um cuidadoso estudo para escolha do equipamento, transdutores e procedimentos de ensaio, para que se obtenha o nível de sensibilidade requerido e a correta interpretação do resultado. Devido às características da estrutura dos ferros fundidos cinzentos, fortemente atenuante de ondas sonoras, habitualmente é utilizada a técnica de avaliação do eco de fundo.

Para melhor entendimento do conceito eco de fundo, a seqüência de figuras a seguir representa o procedimento de ensaio, mostrando a relação entre material, falhas e resposta do aparelho de ultrassom.

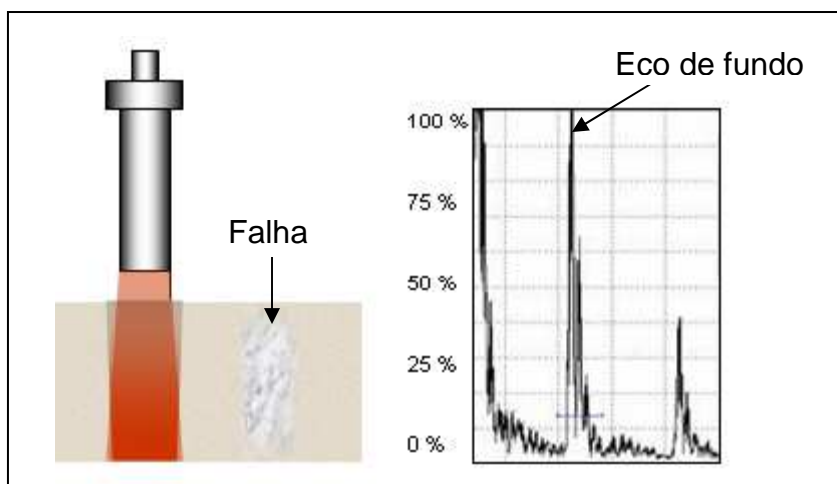


Figura 5 - cabeçote em região sem falha = 100 % de eco de fundo

Fonte: arquivo pessoal

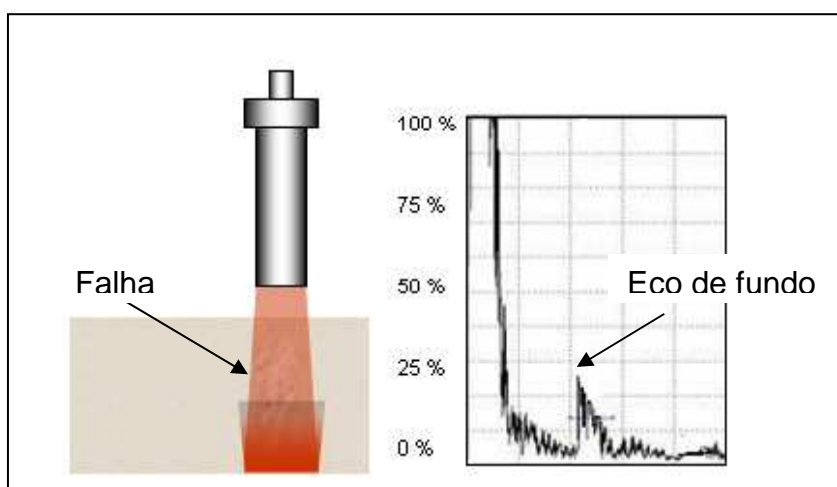


Figura 6 - cabeçote em região com falha = 20 % de eco de fundo

Fonte: arquivo pessoal

A falha no material absorve o som emitido pelo cabeçote, não retornando o sinal para aparelho, que interpreta que naquela região existe uma descontinuidade no material.

2.6 LEVANTAMENTO DE DADOS

Com objetivo de melhor conhecer o histórico de acidentes e suas respectivas causas, foi realizado um levantamento de dados. Os dados coletados foram analisados com a finalidade de definir quais foram as principais causas das falhas, bem como levantamento dos possíveis meios alternativos de inspeção e ensaio para detecção preventiva das mesmas.

2.6.1 Dados históricos dos acidentes

A média anual é de 1,2 cilindros secadores posto fora de operação por diversos motivos: trincas nas tampas e ou na camisa, incêndio na máquina de papel e até explosões, infelizmente com vítimas. A lista de incidentes organizada pela Tappi (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) nos Estados Unidos desde 1970 e atualizada até 2006 mostra uma maior incidência de falhas na América do Norte, com predominância de falhas na camisa dos cilindros, originadas a partir de defeitos de material e também acidentes com impactos contra a camisa dos cilindros. (Tappi 2011)



Figura 7 - Acidente com máquina de papel tissue

Fonte: Tappi 2011

A tabela a seguir mostra a quantidade de cilindros secadores instalados de 1970 a 2006, bem como o número de falhas ocorridas.

Tabela 4 – Estatísticas de falhas em cilindros secadores

Local	Secadores Instalados	Falhas Ocorridas	% de Falhas
África	25	01	4,00
Ásia	258	05	1,94
Europa	506	24	4,74
America Latina	110	06	5,45
Oriente Médio	23	00	0,00
America do Norte	251	27	10,76
Total	1173	63	5,37

Fonte: Tappi 2011



Figura 8 - Acidente com máquina de papel

Fonte: Tappi 2011

A tabela a seguir mostra o detalhamento da origem das falhas ocorridas, evidenciando uma maior incidência de ocorrências nas camisas dos cilindros.

Tabela 5 – Estatísticas de falhas em componentes de cilindros secadores

Origem das Falhas	Ocorrências	%
Falha na Tampa	25	39,68
Falha na Camisa	30	47,62
Outros	08	12,70
Total	63	100,00

Fonte: Tappi 2011

A seguir, um detalhamento do tipo das falhas ocorridas nas camisas dos cilindros secadores, evidenciando um maior número de falhas de material.

Tabela 6 – Estatísticas de origem das falhas de cilindros secadores

Tipo de Falha da Camisa	Ocorrências	%
Projeto	10	33,33
Falha de material	12	40,00
Impactos	08	26,67
Total	30	100,00

Fonte: Tappi 2011



Figura 9 - Acidente com máquina de papel

Fonte: O Papel, 2008

2.6.2 Análise do histórico de acidentes

Conforme apresentado, existe uma maior incidência de falhas nos cilindros secadores, originadas a partir de falhas de material da camisa. Partindo da premissa que todos os vasos de pressão, incluindo cilindros secadores são submetidos a inspeções iniciais e periódicas conforme a legislação vigente em cada país de instalação, conclui-se que essas inspeções não foram capazes de detectar falhas ocultas nos componentes, podendo no caso de existência de falhas de material, poros, trincas, rechupes, etc., as mesmas permanecerem ocultas e inertes ou evoluírem, devido aos esforços cíclicos que os cilindros são submetidos, tais como rotação, compressão, pressão interna e variação de temperatura, vindo a causar acidentes, como vazamentos de vapor ou mesmo explosões.

2.7 ESTUDO DA ORIGEM DAS FALHAS

2.7.1 Falhas originadas devido ao processo de fundição

As camisas dos cilindros secadores são normalmente produzidas de ferro fundido cinzento, material que devido ao processo de obtenção, pode contar falhas internas não detectáveis em ensaios de superfície ou inspeção visual.

Algumas características das peças influenciam negativamente para formação de falhas internas nas peças de ferro fundido cinzento, entre elas e mais relevante neste caso, é a geometria da peça, devido a formato das camisas dos cilindros secadores.

2.7.2 Falhas originadas devido à geometria da peça

Peças com grandes áreas plano paralelas ou com grandes variações de espessura apresentam uma baixa fundibilidade, sendo dessa forma suscetíveis à formação de falhas internas como poros e rechupes, devido ao processo de resfriamento do material no molde. O resfriamento ocorre sempre do lado externo para o interno das peças, desencadeando a ocorrência de zonas quentes e problemas de alimentação de material fundido, o que resulta em vazios dentro da peça final.

2.7.3 Análise da origem das falhas

Recursos como uso de massalotes ou diferentes sistemas de alimentação do material fundido, podem minimizar o problema da baixa fundibilidade das camisas, porém não resolve 100 % dos problemas, sendo esta uma preocupação constante dos fabricantes, comprovado pelas estáticas apresentadas neste estudo que comprovam serem as falhas nas camisas dos cilindros secadores as maiores causadoras de falhas nos mesmos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE INSPEÇÃO

Conforme apresentado, os ensaios habituais empregados na inspeção inicial e periódica das camisas dos cilindros secadores definidos no Brasil pela NR 13, não são suficientes para detecção das falhas internas do material, que podem comprometer a resistência estrutural dos mesmos, sendo necessário o desenvolvimento de métodos alternativos e complementares para garantir a qualidade do material e evitar acidentes de trabalho de grandes proporções, como explosões de cilindros secadores em máquinas de fabricação de papel.

3.1.1 Ensaio por ultrassom

O ensaio por ultrassom é um ensaio volumétrico da peça, que tem por objetivo detectar descontinuidades internas no material, tais como poros, rechupes, trincas, etc. Devido à característica da estrutura do ferro fundido cinzento, formada por lamelas, conceitualmente é considerado um material com grande dificuldade para execução de ensaio por ultrassom, já que sua estrutura dissipa o som emitido pelo cabeçote, dificultando a análise dos resultados.

3.1.2 Parametrização inicial do sistema de ultrassom

Para melhor conhecer a resposta do material empregado na construção das camisas dos cilindros secadores e desenvolvimento do sistema para ensaio por ultrassom, o estudo foi iniciado com um bloco fabricado com o mesmo material das camisas. Neste bloco foram feitos 6 furos de diâmetro de 5 mm e 4 furos de diâmetro 3 mm, com objetivo de simular descontinuidades no material do bloco, como se fossem rechupes.

O bloco foi ensaiado com cabeçote normal (ortogonal) de baixa frequência (1 MHz), própria para ensaio de matérias com alta atenuação sônica como o ferro fundido cinzento.

A figura 10 representa o resultado do ensaio com o aparelho de ultrassom parametrizado para captar os ecos de fundo, mostrando em amarelo as regiões isentas de falhas e em verde/azul as áreas onde existem as falhas introduzidas no material por meio dos furos de 3 e 5 mm.

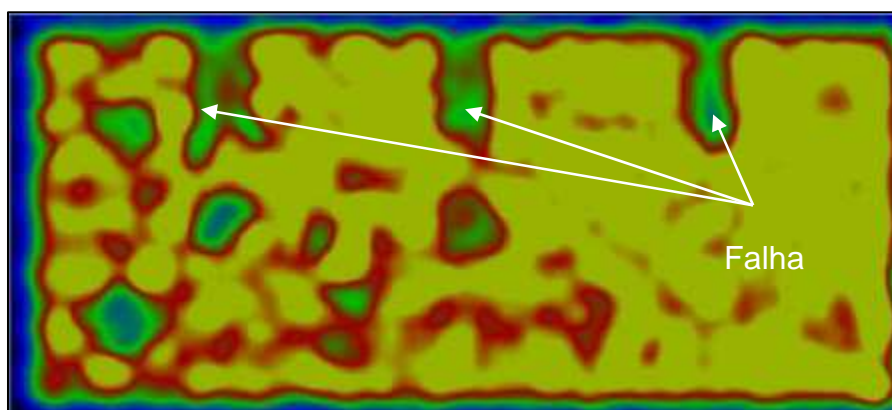


Figura 10 - Resultado do ensaio por reflexão do eco de fundo

Fonte: arquivo pessoal

No segundo ensaio, utilizando o mesmo cabeçote, porém com o aparelho de ultrassom parametrizado para captar os ecos de falha, foi encontrado o resultado conforme figura 11, aparecendo em amarelo as falhas introduzidas no material por meio dos furos de 3 e 5 mm e em azul/verde as regiões isentas de falhas.

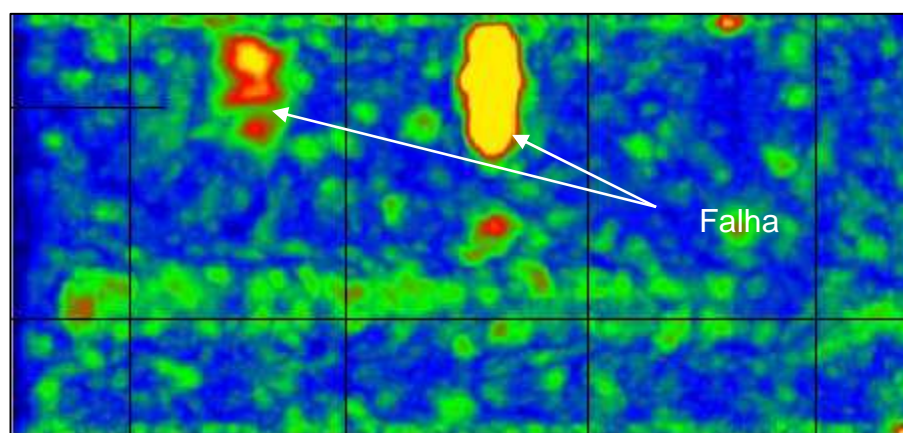


Figura 11 - Resultado do ensaio por reflexão do eco de defeito

Fonte: arquivo pessoal

Os resultados apresentados nos indicam que a melhor parametrização do aparelho de ultrassom é captando os ecos de fundo, já que foi o ensaio que mostrou com melhor nitidez e clareza as falhas introduzidas no material por meio dos furos de 3 e 5 mm.

3.1.3 Sistema de inspeção por ultrassom - fase 1

3.1.3.1 Desenvolvimento do sistema mecânico

A partir da definição da configuração básica já realizada, com a seleção do cabeçote apropriado e melhor parametrização do equipamento de ultrassom ao tipo de material e falhas a serem detectadas, a próxima etapa consiste em desenvolvimento de sistema mecânico para viabilizar a coleta automática de dados.

Devido à grande dimensão das camisas dos cilindros secadores, com superfícies que podem variar de 100 a 200 metros quadrados, processos de inspeção por ultrassom manuais não seriam viáveis, sendo necessário o desenvolvimento de sistema automatizado de captação de dados.

Na definição do sistema automatizado de captação de dados foram consideradas algumas necessidades básicas, tais como:

- captação de dados deve avançar em dois eixos, circunferencial e transversal à peça, W e X respectivamente, dessa forma o cabeçote de medição pode varrer 100 % do corpo da superfície da peça.
- o cabeçote necessita um meio aquoso de contato com a peça, necessário para transmissão da onda sonora.

Com base nas necessidades identificadas, foi definido que a camisa deveria ser colocada num dispositivo de rotação, tipo roletes, utilizado normalmente em processos de soldagem automática, condição muito similar a esta aplicação. Esse dispositivo é dotado de sistema de controle de rotação, da forma que é possível ajustar a velocidade de acordo com a capacidade de captação de dados do aparelho de ultrassom.

Para o movimento de translação transversal no eixo X, foi utilizada uma régua motorizada, utilizada em processos de soldagem e corte automático, de forma que a cada rotação completa da camisa, o acionamento da régua era ligado manualmente, movimentando o cabeçote um passo equivalente ao diâmetro do cabeçote do ultrassom, garantindo assim a varredora de toda a largura da camisa.

3.1.3.2 Desenvolvimento do meio de acoplamento do cabeçote

Para resolver o obstáculo relativo à criação do meio aquoso para imersão do cabeçote, foi decidido realizar o ensaio pelo lado interno da camisa, facilitando a formação de um filme de água, suficiente para a necessidade do ensaio.

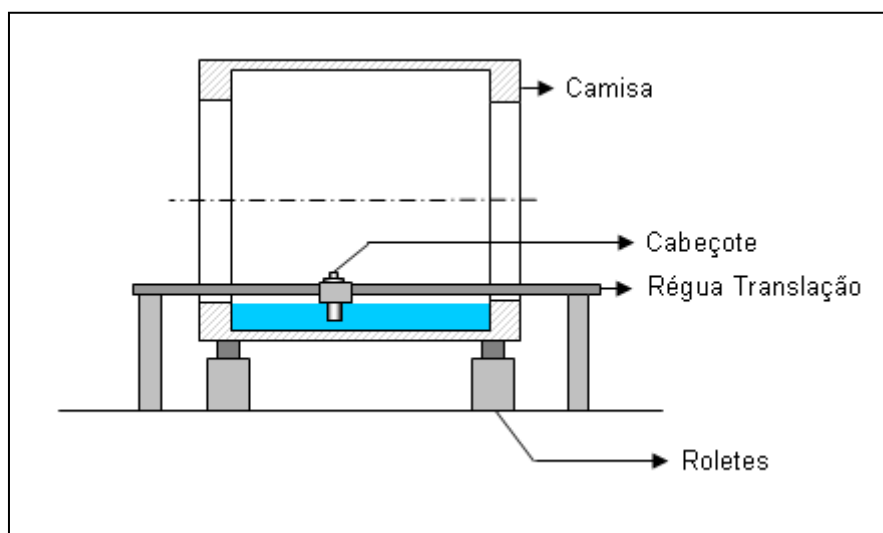


Figura 12 - Representação esquemática do sistema de ultrassom fase 1
Fonte: arquivo pessoal

3.1.3.3 Seleção do equipamento de ultrassom

O equipamento de ultrassom utilizado para processamento dos dados captados pelo cabeçote foi um aparelho da marca Krautkramer, modelo USM 25S, capaz de acumular todos os dados e armazená-los para posterior análise dos resultados por meio de um aplicativo que transforma os pulsos gerados pelo sistema de ultrassom, em uma visualização tipo C-Scan.

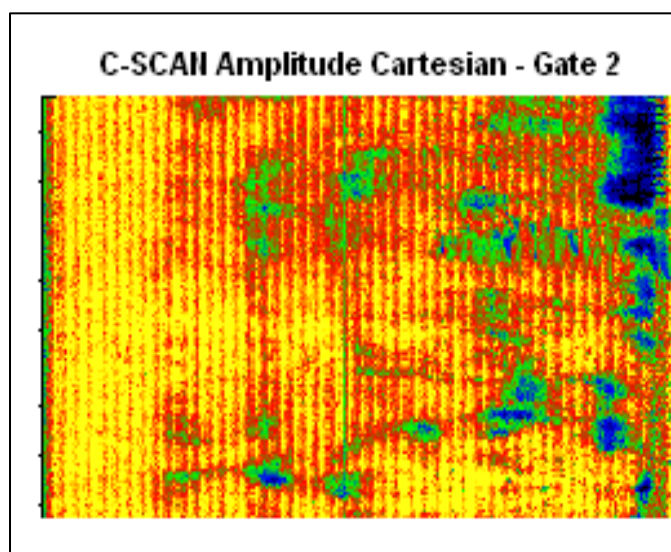


Figura 13 - Visualização de inspeção por ultrassom em C-Scan
Fonte: arquivo pessoal

3.1.3.4 Avaliação do sistema de inspeção por ultrassom - Fase 1

O sistema de inspeção por ultrassom desenvolvido na Fase 1 possibilitou um grande avanço na inspeção das camisas dos cilindros secadores, sendo possível a avaliação volumétrica do material e identificação das regiões críticas localizando as falhas existentes ocultas, porém seu uso em condições reais na inspeção de produtos em fabricação revelou as seguintes limitações:

- a técnica de inspeção por ultrassom pelo lado interno da camisa, não possibilita a inspeção na região dos flanges, área crítica do ponto de vista de incidência de falhas, devido à grande variação de espessura do material (corpo x flange).
- tempo total de inspeção muito alto, devido à baixa capacidade de captação de dados pelo aparelho de ultrassom utilizado, levando cerca de 8 horas para realização da inspeção em uma área de 100 metros quadrados, o que representa um cilindro de porte pequeno.
- devido ao processamento de dados e elaboração da visualização em C-Scan posterior ao processo de inspeção, não é possível identificar e localizar as falhas em tempo real durante o processo de inspeção, dificultando a localização das falhas e re-inspeção das áreas críticas para confirmação dos resultados.
- a inspeção pelo lado interno inviabiliza a inspeção de cilindros montados e/ou já instalados nas máquinas de fabricação de papel.



Figura 14 - Sistema de ultrassom fase 1
Fonte: Voith 2011

3.1.4 Sistema de inspeção por ultrassom - fase 2

Na definição do sistema de inspeção por ultrassom fase 2 foram consideradas as seguintes premissas de forma a resolver as deficiências apresentadas na fase 1:

- inspeção por ultrassom deveria cobrir 100 % da superfície da camisa, inclusive região dos flanges, área crítica do ponto de vista de incidência de falhas, devido à grande variação de espessura do material (corpo x flange).
- otimização do tempo total de inspeção, com objetivo de realizar a inspeção em uma área de 200 metros quadrados em no máximo em 8 horas de trabalho, o que representa o ensaio em um cilindro de grande porte.
- visualização em C-Scan em tempo real durante o processo de inspeção, facilitando a localização das falhas e re-inspeção das áreas críticas para confirmação dos resultados.
- inspeção realizada pelo lado externo, viabilizando a inspeção de cilindros montados e/ou já instalados nas máquinas de fabricação de papel.

Com base nas premissas estabelecidas, foram elencadas as seguintes necessidades para desenvolvimento do novo sistema:

- Desenvolvimento de sistema de acoplamento do cabeçote à peça.

- Seleção de equipamento de inspeção por ultrassom, capaz de captar o volume de dados compatível com o tempo máximo de inspeção definido de 8 horas.
- Seleção de aplicativo para visualização do resultado em C-Scan em tempo real à captação de dados.

3.1.4.1 Desenvolvimento do sistema mecânico

A automação partiu das mesmas premissas utilizadas na fase 1, a captação de dados deveria avançar em dois eixos, circunferencial e transversal à peça, W e X respectivamente, dessa forma o cabeçote de medição pode varrer 100 % da superfície da peça.

Para o giro da camisa foi utilizado o mesmo dispositivo da fase 1, um sistema de roletes, utilizado normalmente em processos de soldagem automática, condição muito similar a esta aplicação. Esse dispositivo é dotado de sistema de controle de rotação, da forma que é possível ajustar a velocidade de acordo com a capacidade de captação de dados do aparelho de ultrassom.

Para o movimento de translação transversal no eixo X, foi desenvolvida uma nova régua motorizada, controlada por pulso elétrico de um atuador, de forma que a cada rotação completa da camisa, o acionamento da régua é ativado automaticamente, movimentando o cabeçote um passo equivalente ao diâmetro do mesmo, garantindo assim a varredura de toda a largura da camisa.

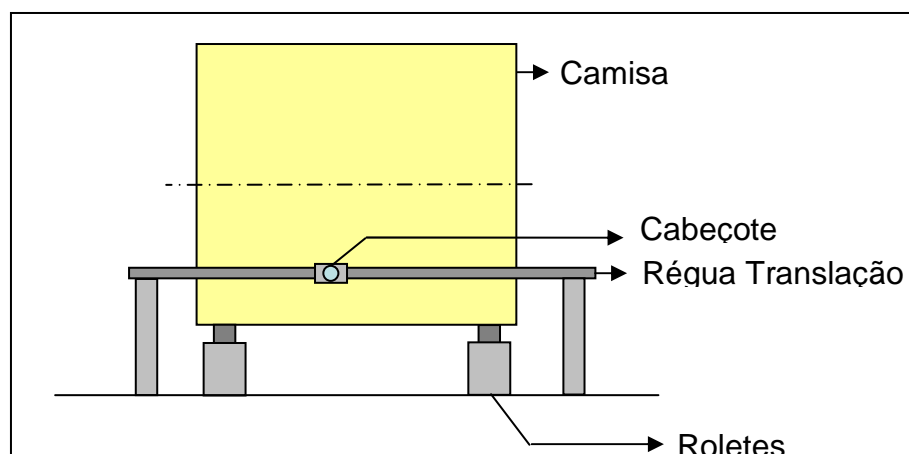


Figura 15 - Representação esquemática do sistema de ultrassom fase 2
Fonte: arquivo pessoal

Para acoplamento do cabeçote à camisa foi desenvolvido um suporte com uma câmara interna que recebe água por meio de uma mangueira conectada no abastecimento de água da empresa. Esse suporte quando em contato com a peça cria uma câmara de água, permitindo a passagem do sinal sonoro emitido pelo cabeçote à peça.

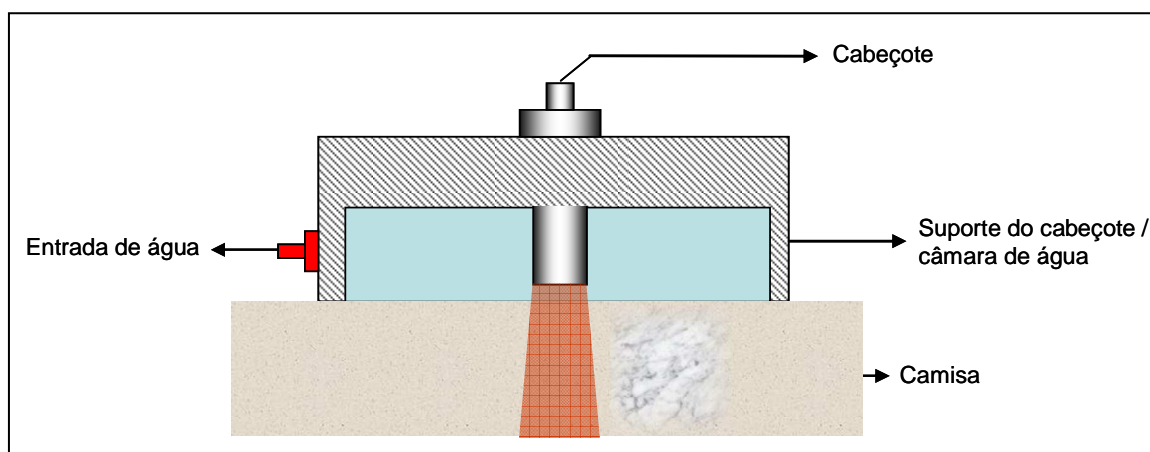


Figura 16 - Representação do dispositivo de acoplamento do cabeçote
Fonte: arquivo pessoal

3.1.4.3 Seleção do equipamento de ultrassom

A principal característica considerada na seleção do equipamento de ultrassom foi a capacidade de coleta de dados, neste caso, pulsos de som por segundos. O aparelho de ultrassom selecionado foi o USIP 40 da marca Krautkramer, que além da grande capacidade de processamento de dados, ainda conta com 5 canais de entrada para cabeçotes, tornando mais versátil para desenvolvimentos futuros com aplicação de outros tipos de cabeçote em conjunto, normais e angulares, para uma melhor avaliação do material e falhas existentes.

O aplicativo selecionado para tratamento dos dados e visualização dos resultados em C-Scan foi o Krautkramer Analysis, que permite uma adequada interface como o aparelho USIP 40.

3.1.4.4 Avaliação do sistema de inspeção por ultrassom - Fase 2

O sistema de inspeção por ultrassom desenvolvido na fase 2 possibilitou a correção das limitações anteriores, sendo possível a avaliação volumétrica de 100 % do material da camisa e identificação das regiões críticas, localizando as falhas existentes ocultas, com as seguintes vantagens:

- a técnica de inspeção por ultrassom pelo lado externo da camisa, possibilita a inspeção na região dos flanges, área crítica do ponto de vista de incidência de falhas, devido à grande variação de espessura do material (corpo x flange).
- tempo total de inspeção de 4 horas para realização da inspeção em uma área de 100 metros quadrados, o que representa um cilindro de porte pequeno.
- visualização em C-Scan em tempo real durante o processo de inspeção, facilitando a localização das falhas e re-inspeção das áreas críticas para confirmação dos resultados.
- a inspeção pelo lado externo viabiliza a inspeção de cilindros montados e/ou já instalados nas máquinas de fabricação de papel.



Figura 17 - Sistema de ultrassom fase 2
Fonte: Voith 2011

3.2 ENSAIO RADIOGRÁFICO

O ensaio por ultrassom desenvolvido, traz uma perfeita localização das falhas contidas no material das peças, falhas não detectáveis em ensaios de inspeção visual, porém apresentam uma limitação relativa à qualificação das falhas, não permitindo uma completa avaliação da falha e sua influência no desempenho da estrutura do material.

Para uma melhor avaliação das falhas detectadas pelo ensaio de ultrassom, tornam-se necessários ensaios radiográficos complementares, com o objetivo de classificar as falhas de acordo com seu tipo (poro, rechupe, trinca, etc.) e grau de intensidade. Para classificação dos resultados das radiografias, deve ser utilizada como referência, a norma ASTM-E-802, que define as classificações de falhas para ferros fundidos cinzentos.

Segue abaixo a figura 18, representando a detecção da falha pelo aparelho de ultrassom, onde as indicações em vermelho e verde representam falhas no material e a figura 19, que é o resultado da radiografia realizada, indicando claramente a existência de rechupes de grau 5, conforme ASTM-E-802.

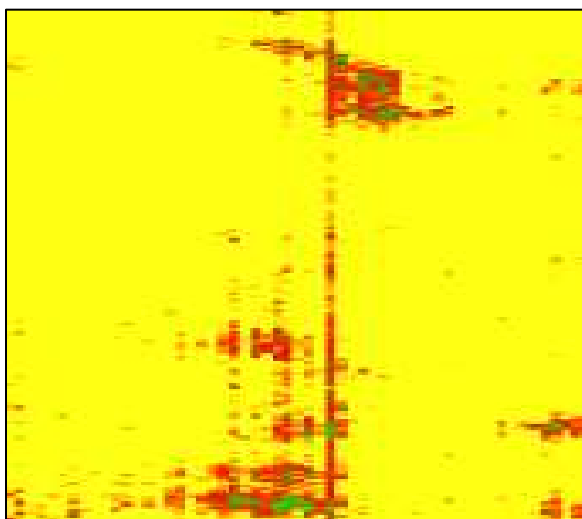


Figura 18 - Ensaio por ultrassom

Fonte: Voith 2011

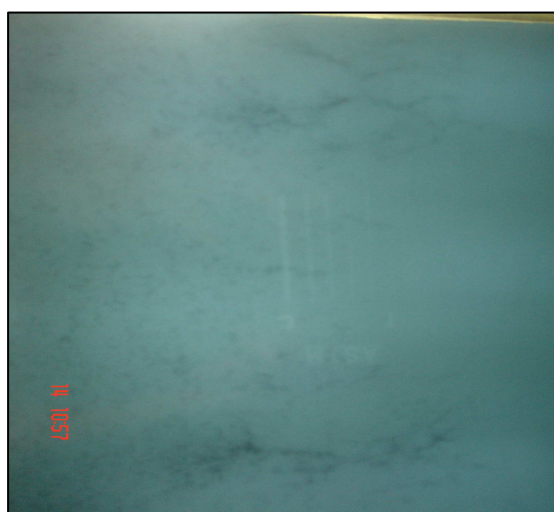


Figura 19 - Ensaio radiográfico

Fonte: Voith 2011

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIO POR ULTRASSOM

O ensaio por ultrassom da camisa de cilindro secador, referência Projeto A, utilizando o sistema desenvolvido na fase 2 deste estudo, revelou o resultado abaixo, visualizado em C-Scan:

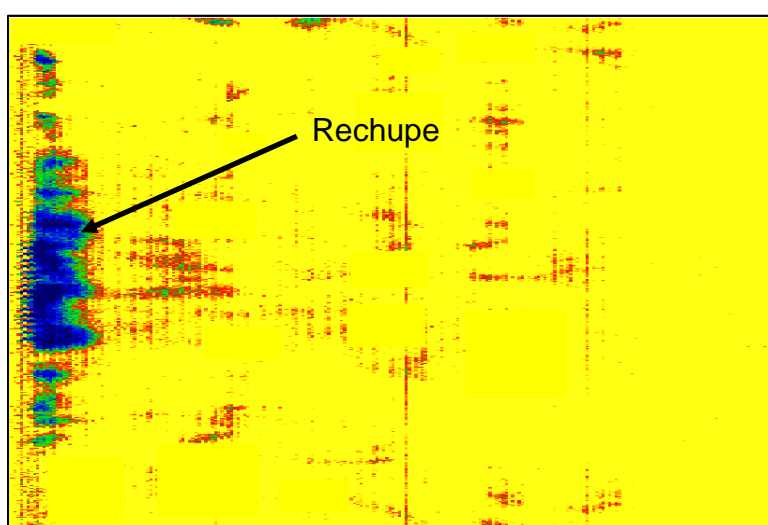


Figura 20 - Visualização de inspeção por ultrassom do cilindro Projeto A
Fonte: Voith 2011

Analizando os resultados obtidos, foi identificada a área representada em azul escuro na figura 20 como crítica, devendo ser investigada complementarmente com o ensaio radiográfico, para avaliação e classificação das falhas encontradas.

4.2 ENSAIO RADIOGRÁFICO

Com base no resultado da inspeção por ultrassom, foi definida a região indicada em amarelo na figura 21, a ser radiografada para avaliação e classificação da falha com base na norma ASTM-E-802. Para esse tipo de aplicação, a classe limite para falhas é classe 3.



Figura 21 - Visualização da localização da falha no cilindro Projeto A
Fonte: Voith 2011

O resultado do ensaio radiográfico na região das falhas indicou a existências de rechupes, classificados conforme a norma ASTM-E-802, grau 5.

Comparando os resultados encontrados do ensaio radiográfico, com os critérios de aceitação definidos pelo código ASME, para vasos de pressão construídos a partir de componentes fundidos, definimos que a falha está acima do limite estabelecido, classe 3, sendo necessário refugar esta peça.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Estando a peça refugada, foi possível cortá-la na região das falhas, para avaliação visual dos rechupes localizados pelo sistema de inspeção por ultrassom e avaliados e classificados pelo ensaio radiográfico como classe 5 conforme ASTM-E-802.

A seguir é mostrado o filme radiográfico, onde é possível visualizar as falhas, apresentando os rechupes e poros detectados pelo ensaio de ultrassom.

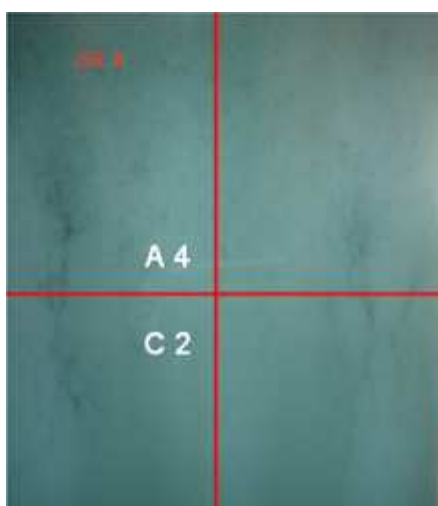


Figura 22 – Filme radiográfico evidenciando o rechupe na camisa Projeto A
Fonte: Voith 2011

Com o corte da peça e confirmação da existência das falhas detectadas pela inspeção por ultrassom, fica comprovada a funcionalidade do sistema e também o resultado positivo deste estudo, sendo adotado como ensaio padrão para todos os novos cilindros a serem fabricados pela organização.



Figura 23 – Corte do material na posição do rechupe no cilindro Projeto A
Fonte: Voith 2011

5. CONCLUSÕES

Concluindo, a adoção das práticas demonstradas neste estudo, contribuirá significativamente na redução dos índices de acidentes em máquinas para fabricação de papel envolvendo cilindros secadores. Conforme demonstrado as técnicas apresentadas são capazes de detectar falhas ocultas nas inspeções iniciais dos cilindros secadores, evitando dessa forma que componentes construídos com materiais defeituosos colocam em risco a vida dos trabalhadores e o patrimônio das empresas.

REFERÊNCIAS

A inspeção de equipamentos no Brasil - <<http://www.abende.org.br>> - Acesso em 15 Setembro 2011

Allevato, C., Williams, D - **Emission Nondestructive Evaluation of Yankee Dryers**. Tappi Press, 1992

Andreucci, Ricardo - **Ensaio por Ultrassom** - <<http://www.abende.org.br>> - Acesso em 25 Agosto 2011

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma regulamentadora 13 – Inspeção de caldeiras e vasos de pressão**. Última alteração dada pela Portaria SIT n.º 57, de 19 de junho de 2008. Disponível em: <http://portal.mte.gov.br/data/files/nr_13.pdf> - Acesso em 10 setembro 2011.

Chainho, José Antonio Pereira - **A História da Inspeção de Equipamentos**. São Paulo, 2011.

FONSECA, Marco Túlio da. **Formação de Defeitos em peças de ferro fundido cinzento e nodular**. SENAI, São Paulo, 2002.

Historia do papel - <<http://www.bracelpa.org.br>> - Acesso em 20 Agosto 2011

O papel - Dezembro 2008 - <<http://www.abtcp.org.br>> - Acesso em 20 Agosto 2011

Yankee Dryer Failures reported to TAPPI - <<http://www.tappi.org>> - Acesso em 10 Julho 2011