MARCO ANTONIO BRUJAS

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA NÃO-
UNIFORMIDADE DA ESPESSURA EM CASCAS FINAS CILÍNDRICAS
ROTATIVAS**

**São Paulo
2007**

MARCO ANTONIO BRUJAS

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA NÃO-
UNIFORMIDADE DA ESPESSURA EM CASCAS FINAS CILÍNDRICAS
ROTATIVAS**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia.**

**São Paulo
2007**

MARCO ANTONIO BRUJAS

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA NÃO-
UNIFORMIDADE DA ESPESSURA EM CASCAS FINAS CILÍNDRICAS
ROTATIVAS**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia.**

**Área de Concentração:
Estruturas e Fundações**

**Orientador:
Prof. Dr. Reyolando M. L. R. F. Brasil**

**São Paulo
2007**

FICHA CATALOGRÁFICA

Brujas, Marco Antonio

Análise numérica e experimental dos efeitos da não-uniformidade da espessura em cascas finas cilíndricas rotativas / M.A. Brujas. -- São Paulo, 2007.

103 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.

1.Cascas cilíndricas 2.Método dos elementos finitos 3.Ferro fundido cinzento I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, à
minha esposa Jacqueline e às minhas
filhas Rachel e Larissa por me
incentivarem, me apoiarem e por estarem
presentes em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Reyolando, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Ao Robson Consolato e ao José Manfrim pela confiança depositada em mim e pelo tempo que me foi disponibilizado na realização deste mestrado.

Ao Alexander Wank e ao Fred Weinhold, pelas valiosas idéias que contribuíram com alguns dos caminhos aqui percorridos.

Ao Marcelo Bergweiler por ser meu grande incentivador, além de todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

"Não é preciso ter olhos abertos para ver o sol, nem é preciso ter ouvidos afiados para ouvir o trovão. Para ser vitorioso você precisa ver o que não está visível."
(Sun Tzu)

"A sabedoria da vida não está em fazer aquilo que se gosta, mas gostar daquilo que se faz."
(Leonardo da Vinci)

RESUMO

Cascas cilíndricas circulares com uma pequena variação de espessura ao longo de seu comprimento, quando submetidas à rotação, apresentam em alguns casos, deslocamentos elásticos de sua superfície externa, tendendo a uma forma de um oval. O objetivo deste trabalho é estabelecer a relação entre a variação de espessura das cascas cilíndricas com a sua deformação devida às forças centrífugas medida durante a rotação utilizando-se dois enfoques, um experimental e outro numérico, no caso o método de elementos finitos (MEF). As cascas cilíndricas estudadas tiveram sua espessura de parede medidas por meio de aparelho de ultra-som, mas por serem fabricadas em ferro fundido cinzento, as suas lamelas de grafita atuam como refletores, o que torna a medição imprecisa. Os resultados da análise numérica encontrados se relacionam bem com os experimentais de maneira qualitativa, mas divergem na forma quantitativa. Modelos de cascas com variação de espessura imposta também foram criados e analisados usando-se o método de elementos finitos de forma a se avaliar o comportamento da casca cilíndrica sob diversas configurações de distribuição da variação da espessura. Sugere-se a pesquisa de novas tecnologias para medições por ultra-som de peças fabricadas de ferro fundido com grafita lamelar. Neste trabalho, a medição da forma oval foi feita utilizando-se sensores de proximidade do tipo “eddy-current”.

Palavras-chave: Cascas cilíndricas. Variação de espessura. Elementos finitos. Ultra-som. Ferro fundido cinzento. Análise experimental.

ABSTRACT

Circular cylindrical shells with small thickness variations along their body, when submitted to rotation, present, in some cases, elastic displacements of their outside surface induced by centrifugal forces leading to final oval like shapes. The main purpose of this study is to establish relationships between thickness variation of the cylindrical shells with their measured deformation during the rotation, due to centrifugal forces, using two approaches, one experimental and the other one numerical, in the latter case the finite element method (FEM). The studied cylindrical shells had their wall thickness measured by means of an ultrasound device. The used material is flake graphite cast iron (gray cast iron). The graphite flakes act as reflectors, what makes such measurements imprecise. The numerical results found are satisfactory in a qualitative way, but they disagree in the quantitative form. Shell models with theoretical imperfections also were created and analyzed using the finite element method in order to evaluate the behavior of the cylindrical shell under several configurations of distribution of the shell thickness variation. Further research is necessary on new technologies to measure the thickness of pieces manufactured of flake graphite cast iron. In this research, the oval shape measurements were done by means of eddy-current proximity sensors.

Keywords: Cylindrical shells. Thickness variation. Finite elements method. Ultrasound. Flake graphite cast iron. Experimental analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Segmento da máquina de fabricação de papel	14
Figura 2.1 – Máquina de fabricação de papel em 1913	17
Figura 2.2 – Moderna máquina de fabricação de papel	18
Figura 2.3 – Seções de uma típica máquina de fabricação de papel	19
Figura 2.4 – Esquema de funcionamento de uma prensa	20
Figura 2.5 – Prensas	20
Figura 2.6 – Secagem	21
Figura 2.7 – Calandra	22
Figura 2.8 – Máquina de fabricação de papel tissue	23
Figura 3.1 – Partes principais do modelo analisado	24
Figura 3.2 – Poço para fabricação de cascas cilíndricas	25
Figura 3.3 – Dispositivo para usinagem interna	26
Figura 3.4 – Balanceadeira	27
Figura 3.5 – Posicionamento dos sensores na superfície cilíndrica	27
Figura 3.6 – Sensor de movimento tipo indutivo analógico	28
Figura 3.7 – Tela com leitura do deslocamento x tempo	28
Figura 3.8 – Forma dinâmica de acordo com as leituras dos sensores centrais: frontal e traseiro	29
Figura 3.9 – Harmônicos a partir das leituras dos sensores centrais: frontal e traseiro	29
Figura 3.10 – Evolução da forma devido ao aumento da rotação	30
Figura 3.11 – Sensor de movimento tipo laser	31
Figura 3.12 – Amplitude das harmônicas medidas durante o balanceamento	31
Figura 3.13 – Comparação do 1X da relação entre os resultados da balanceadeira e medições	34
Figura 3.14 – Comparação do 2X da relação entre os resultados da balanceadeira e medições	34
Figura 3.15 – Esquema dos pontos de realização da medição da espessura	36
Figura 3.16 – Micrografia do SA 278 CL 40	36
Figura 3.17 – Variação da espessura ao longo do eixo longitudinal da casca cilíndrica	37

Figura 3.18 – Distribuição da variação da espessura na casca cilíndrica, tipo elipse	38
Figura 3.19 – Distribuição da variação da espessura na casca cilíndrica, tipo excêntrico	38
Figura 3.20 – Distribuição da variação da espessura na casca cilíndrica, tipo elipse	39
Figura 3.21 – Distribuição da variação da espessura na casca cilíndrica, tipo excêntrico	39
Figura 3.22 – Destaque de valor discrepante das medições adjacentes	40
Figura 3.23 – Seções representadas por splines	41
Figura 3.24 – Estrutura do elemento sólido.....	41
Figura 3.25 – Malha 3D composta de quadriláteros.....	42
Figura 3.26 – Representação da ligação rígida entre casca e centro do mancal.....	42
Figura 3.27 – Pontos de medição dos sensores de acordo com a rotação da casca	44
Figura 4.1 – Distribuição da variação da espessura.....	46
Figura 4.2 – Pontos de medição dos sensores de acordo com a rotação da casca..	47
Figura 4.3 – Influência da distribuição da espessura na forma ovalizada	48
Figura 4.4 – Faixa central considerada para a realização de modelo simplificado....	48
Figura 4.5 – Faixa central (larga) considerada para a realização de modelo simplificado.....	49
Figura 4.6 – Influência do aumento da quantidade de planos centrais	50
Figura 4.7 – Influência do aumento da quantidade de planos no 2X.....	51
Figura 4.8 – Influência do aumento da espessura no plano central	52
Figura 4.9 - Influência do aumento da espessura mínima.....	53
Figura 4.10 – Influência da excentricidade na forma ovalizada.....	54
Figura 4.11 – Variação da amplitude em função da velocidade	56
Figura 4.12 – Distribuição dos harmônicos de cada cilindro	58
Figura 4.13 – Comparação entre os resultados do 2X.....	59
Figura 4.14 – Forma ovalizada do cilindro número 2, a partir do MEF.....	61
Figura 4.15 – Forma ovalizada do cilindro número 15, a partir do MEF	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Variação da umidade na folha de papel	22
Tabela 3.1 – Resultados das medições à $n=11.72$ Hz	33
Tabela 3.2 – Classificação das cascas cilíndricas.....	39
Tabela 4.1 – Resultado da distribuição da espessura.....	47
Tabela 4.2 – Resultados do incremento da quantidade de planos centrais	49
Tabela 4.3 – Resultados do aumento de planos centrais para o cilindro com variação teórica	50
Tabela 4.4 – Valores utilizados para simulação da variação de espessura	51
Tabela 4.5 – Resultados da influência do aumento da espessura	52
Tabela 4.6 – Valores utilizados para simulação da variação de espessura	53
Tabela 4.7 – Resultados da influência do aumento da espessura mínima	53
Tabela 4.8 – Valores utilizados para simulação da variação de espessura	54
Tabela 4.9 – Influência da excentricidade na ovalização	55
Tabela 4.10 – Resultado da variação da velocidade.....	55
Tabela 4.11 – Harmônicos de cada cilindro	57
Tabela 4.12 – 2X das medições e do MEF	60

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.1	Objetivos e Justificativas.....	13
1.2	Escopo do trabalho	14
1.3	Plano da dissertação.....	15
2	Histórico sobre máquinas de fabricação de papel	16
2.1	História do papel	16
2.2	Máquinas de fabricação de papel	18
2.2.1	Formação	19
2.2.2	Prensas	19
2.2.3	Secagem	21
2.2.4	Final.....	21
2.2.5	Máquinas de papel Tissue.....	23
3	Metodologia	24
3.1	Obtenção dos dados experimentais.....	24
3.1.1	Descrição dos modelos físicos dos quais foram realizadas as medições.....	24
3.1.2	Processo de fabricação dos modelos.....	25
3.1.3	Medição da ovalização das cascas cilíndricas	27
3.1.4	Comparação dos resultados das medições.....	34
3.1.5	Medições da espessura das cascas cilíndricas.....	35
3.2	Método de elementos finitos (MEF)	40
3.2.1	Modelagem 3D das cascas cilíndricas	40
3.2.2	Análise por elementos finitos.....	41
3.2.3	DFT – Discrete Fourier Transform.....	44
4	Resultados e comentários	45
4.1	CrITÉrios de comparação dos resultados.....	45
4.2	Simulações de cascas cilíndricas com imperfeições impostas	45
4.2.1	Influência da distribuição da variação da espessura no plano central.....	45
4.2.2	Influência do número de planos com variação de espessura na ovalização.....	48
4.2.3	Influência da variação da espessura no plano central.....	51

4.2.4	Influência da variação da espessura no plano central, com o aumento da espessura mínima	52
4.2.5	Influência da distribuição da variação da espessura do tipo excêntrica ..	54
4.2.6	Influência da velocidade na amplitude da ovalização da casca cilíndrica	55
4.3	Resultados dos modelos do MEF realizados a partir das medições da variação da espessura	57
5	Conclusões	62
6	Continuidade do trabalho	64
7	REFERÊNCIAS	65
	Apêndice 1 - Distribuição da variação de espessura ao longo da superfície interna do cilindro.	67
	Apêndice 2 – Gráficos da forma dinâmica da casca cilíndrica.	79
	Apêndice 3 – Gráficos do primeiro e segundo harmônicos obtidos das medições da balanceadeira.....	86
	Anexo 1 – Especificação do sensor de corrente indutiva	98
	Anexo 2 – Especificação do equipamento de medição de espessura por ultra-som	100

1 Introdução

1.1 Objetivos e Justificativas

As imperfeições relacionadas ao processo de manufatura de um equipamento são características inerentes a qualquer componente mecânico. Em particular, na indústria de fabricação de papel, equipamentos cilíndricos para condução da folha durante e após a sua formação são largamente utilizados, sendo que os de maiores dimensões são os chamados cilindros secadores (vide figura 1.1), responsáveis por parte da remoção de água da folha por meio de transmissão de calor durante a operação da máquina de fabricação de papel. Com o avanço de técnicas de fabricação e operação de tais equipamentos neste tipo de indústria, mais e mais as velocidades de produção de papel foram incrementadas, tornando os equipamentos rotativos mais sensíveis às imperfeições remanescentes do processo de manufatura. Assim, recentemente, alguns desses equipamentos passaram a apresentar deformações excessivas em sua superfície cilíndrica, de magnitude maior para equipamentos similares e que aumentavam com o incremento da rotação, sugerindo a influência de forças centrífugas.

Na tentativa de se avaliar melhor as variações encontradas e as suas causas, medições da forma dinâmica que a superfície cilíndrica assumia durante a rotação foram realizadas em trinta e seis cilindros de um mesmo projeto. Adicionalmente foram realizadas medições da variação da espessura de sua casca cilíndrica por intermédio de equipamento de ultra-som, ao longo de toda a superfície do equipamento.

Os resultados indicaram que dinamicamente o equipamento assumia uma forma ovalizada que se desenvolvia à medida que a rotação do cilindro aumentava, retornando a sua forma original após cessar o movimento de giro, o que indicava uma deformação elástica. As medições de espessura apresentaram uma distribuição de massa não uniforme ao longo da casca cilíndrica, assumindo na maioria dos casos uma distribuição elíptica e excêntrica.

O objetivo deste trabalho é estabelecer a relação da variação da espessura da superfície cilíndrica com a forma ovalizada que surge devido ao aumento da rotação, fazendo uso crítico de métodos numéricos e experimentais.

Cilindros secadores

Figura 1.1 – Segmento da máquina de fabricação de papel

1.2 Escopo do trabalho

Dentro da filosofia atual do que se caracteriza como um mestrado, encara-se este trabalho como uma análise, o mais completa possível, de um problema tecnológico importante na engenharia mecânica, em especial na área de estruturas.

Não se pretende re-apresentar ou utilizar os fundamentos teóricos da mecânica das cascas, em seus aspectos estáticos e dinâmicos, sendo o leitor remetido aos trabalhos clássicos de Novoshilov [1], Timoshenko [2] e Flügge [3].

Na análise por elementos finitos da cascas aqui consideradas foi utilizado o software comercial ANSYS. Não se pretende re-apresentar ou utilizar os fundamentos teóricos da aplicação deste método às cascas, sendo neste caso o leitor remetido a publicações como Bischoff [4].

1.3 Plano da dissertação

No capítulo 2 é dada uma visão geral da história do processo de fabricação de papel, sua origem e princípios utilizados. Posteriormente são apresentados os principais avanços tecnológicos que ocorreram, além dos principais tipos de máquinas de fabricação de papel existentes, com uma breve descrição das partes que compõe esses equipamentos assim como do processo que a polpa de celulose sofre até a formação da folha de papel.

No capítulo 3 tem-se a descrição da metodologia utilizada na realização deste trabalho, iniciando-se com uma visão geral das partes principais que compõe os modelos que foram estudados, assim como o seu processo de fabricação, com considerações sobre as possíveis causas da variação de espessura das cascas cilíndricas. Na seqüência, é descrito como foram realizadas as medições da forma ovalizada e os resultados encontrados. Posteriormente foi apresentada a forma como a variação de espessura das cascas foram medidas, as imprecisões do processo utilizado e as correções que foram adotadas. No final do capítulo é descrita a forma como foram realizados os modelos de elementos finitos com a aplicação das condições de contorno.

No capítulo 4 são apresentados diversos modelos numéricos de cascas cilíndricas com variação de espessura imposta, além da comparação desses resultados com os modelos baseados nas medições de espessura.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões das análises realizadas.

No capítulo 6 são sugeridos temas para futuras pesquisas.

2 Histórico sobre máquinas de fabricação de papel

Dado que a pesquisa aqui realizada teve como base as medições realizadas em componentes de máquinas de fabricação de papel, neste capítulo faremos uma breve descrição da história do papel, obtida de ABTCP [5], assim como a evolução tecnológica em sua fabricação e os tipos principais de máquinas existentes.

2.1 História do papel

Antes da criação do papel, o material mais utilizado para escrita foi o pergaminho constituído de pele de animais. No antigo Egito utilizavam-se o talo da planta papiro. Sua fabricação era feita cortando-se o talo em tiras e colocado-as transversalmente umas sobre as outras, formando camadas que após serem batidas com martelos de madeira, adquiriam uma espessura uniforme.

O papel foi fabricado pela primeira vez na China em 105 D.C. por Ts' Ai Lun, um alto funcionário da corte do imperador Chien-Ch' u, da dinastia Han (206 A.C. a 202 D.C.). Ele fragmentou em uma tina com água, cascas de amoreira, pedaços de bambu, redes de pescar e roupas velhas, de forma a obter uma solução ou pasta formada por água e fibras. Nessa pasta formada, ele submergiu uma fôrma de madeira revestida de um fino tecido feito de seda, que após a sua retirada da tina e tendo a água escoada, deixava sobre a tela uma fina folha que era removida e estendida sobre uma mesa. As folhas eram posteriormente prensadas e colocadas sobre muros para que secassem. Os princípios desse método desenvolvido por Ts' Ai Lun são os mesmos aplicados até hoje nas modernas máquinas de fabricação de papel.

Posteriormente no século VIII, os chineses foram derrotados pelos árabes e dentre prisioneiros que foram feitos, estavam fabricantes de papel que acabaram por transmitir o conhecimento a eles. Os árabes o produziam, comercializavam-no, e o

transportavam da Ásia pelo norte da África, e partir de Alexandria, Trípoli e Tunísia, faziam-no chegar à Espanha, e em seguida à França.

Desde aquele tempo o processo sofreu diversas melhorias, principalmente relacionadas ao processo de produção da matéria-prima (pasta), mas a forma de se fabricar continuava manual até que em 1798 teve êxito a invenção, segundo a qual foi possível fabricar papel em uma máquina de folha contínua. Inventada pelo francês Nicolas Louis Robert que, por dificuldades financeiras e técnicas, não conseguiu desenvolvê-la e cedeu sua patente aos irmãos Fourdrinier, que a obtiveram juntamente com a Maquinaria Hall, de Dartford (Inglaterra). Com isso surgiu a máquina de papel Fourdrinier, que foi a primeira máquina de folha contínua de que se tem notícia.

Daquela época aos dias atuais, a máquina de fabricação de papel passou por diversas melhorias e avanços tecnológicos, vide figuras 2.1 e 2.2, mas a despeito disso a forma como o papel é fabricado continua a mesma desde os tempos de Ts' Ai Lun, ou seja, para se fabricar papel a folha deve ser desaguada, prensada e seca.

Figura 2.1 – Máquina de fabricação de papel em 1913

Figura 2.2 – Moderna máquina de fabricação de papel

2.2 Máquinas de fabricação de papel

Existem vários tipos de máquinas de fabricação de papel que podem ser classificadas de acordo com o tipo de papel que produzem, conforme Gullichsen [6] e Gullichsen [7]. De uma maneira geral essas máquinas consistem de quatro seções principais através da qual a polpa de celulose é desaguada e transformada em folha de papel, pronta para ser fracionada.

Os principais tipos de máquinas podem ser classificadas em:

- máquina de fabricação de papel para escrever e imprimir (papel branco);
- máquina de fabricação de papel para embalagem (papel marrom);
- máquina de papel para higiene e limpeza (papel tissue);
- máquina desaguadora de celulose.

Esta última não visa à produção de papel, mas sim a fabricação de celulose para suprir empresas que somente produzem papel, mas não beneficiam a madeira para a produção da polpa para fabricar papel.

A figura 2.3 apresenta um layout de uma máquina típica de fabricação de papel para embalagem, com a indicação de suas partes principais.

Figura 2.3 – Seções de uma típica máquina de fabricação de papel

Cada seção possui um sistema de telas ou feltros que proporcionam inicialmente o desaguamento da polpa e que também conduzem a folha até que a mesma tenha rigidez suficiente para que possa ser tracionada sem que rompa. A função de cada seção será descrita nos capítulos que se seguem.

2.2.1 Formação

Nesta seção a polpa é despejada por meio de um equipamento conhecido por “caixa de entrada” sobre uma tela circulante que permite o primeiro desaguamento da polpa tanto por ação da aceleração da gravidade como por meio de sucção mecânica através de rolos especializados que efetuam essa função.

2.2.2 Prensas

A seção das prensas promove o desaguamento da folha por meio de compressão mecânica, vide figura 2.4, e sucção por vácuo realizado por rolos especiais, podendo ou não agirem simultaneamente conforme o tipo do equipamento que será utilizado. Nas prensas, a folha de papel recém-formada passa por entre dois rolos, provocando o desaguamento a medida que são comprimidos.

Figura 2.4 – Esquema de funcionamento de uma prensa

Normalmente a folha é comprimida em mais de uma prensa (sistema com dois rolos), conforme mostrado na figura 2.5.

Figura 2.5 – Prensas

Prensas

2.2.3 Secagem

Cilindros secadores

Figura 2.6 – Secagem

A figura 2.6 apresenta uma seção de secagem típica na qual a folha de papel é seca por meio de trocas térmicas realizadas por cilindros pressurizados com vapor saturado em pressões que variam entre 0,3 e 1,2 MPa, dependendo do tipo de papel a ser fabricado. A quantidade destes cilindros se determina de acordo com o nível de umidade requerido na folha de papel assim como a velocidade com que a folha de papel é produzida.

2.2.4 Final

Após a secagem a folha de papel pode passar por outros processos antes de ser enrolada, dependendo do tipo e finalidade do papel que está sendo fabricado, como por exemplo a aplicação de amido para melhorar a capacidade da folha de papel em receber impressão. Adicionalmente a folha pode passar por um equipamento conhecido por calandra onde a superfície do papel é alisada, vide a figura 2.7. A etapa final da fabricação é o enrolamento para posterior fracionamento.

Figura 2.7 – Calandra

Resumindo, a folha de papel desde o início de sua formação até ser enrolada tem a sua umidade reduzida em aproximadamente 97%, conforme indicado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Variação da umidade na folha de papel

	<i>Processo</i>	<i>% Umidade</i>
Formação	Gravidade/vácuo	99%→79%
Prensas	Compressão/vácuo	79%→ 49%
Secagem	Aquecimento	49%→2%

Os valores acima apresentados são somente de referência e variam conforme o tipo de papel a ser fabricado.

2.2.5 Máquinas de papel Tissue

Este tipo de máquina é voltada a fabricação de papéis de higiene e limpeza, com a mesma quantidade de seções das apresentadas nos tipos anteriores, mas com dimensões menores, vide figura 2.8.

Figura 2.8 – Máquina de fabricação de papel tissue

Como este tipo de máquina produz um papel muito mais fino, a necessidade de secagem é feita somente por meio de um cilindro central de grandes dimensões, conhecido como Yankee, que é pressurizado com vapor saturado e por intermédio das trocas térmicas realizadas entre sua superfície e o papel promovem a evaporação da água nele contida. A seção das prensas é composta por um ou dois rolos que fazem a compressão mecânica (e também promovem o desaguamento por vácuo) da folha de papel sobre a superfície do cilindro Yankee.

3 Metodologia

3.1 Obtenção dos dados experimentais

3.1.1 Descrição dos modelos físicos dos quais foram realizadas as medições

As cascas cilíndricas nas quais foram realizadas as medições são componentes de máquinas de fabricação de papel, utilizados horizontalmente com rotação em torno de seu eixo longitudinal, as quais preenchidas com vapor pressurizado em seu volume interno, promovem a transferência de calor para o papel, reduzindo a sua umidade. São compostos basicamente de três partes: casca cilíndrica propriamente dita, tampas para suporte da casca cilíndrica e pontas de eixo para apoio de todo o conjunto, veja figura 3.1.

Figura 3.1 – Partes principais do modelo analisado

As necessidades de produção determinam o tamanho da máquina de fazer papel e conseqüentemente as dimensões das cascas cilíndricas. Estas cascas são normalmente fabricadas em ferro fundido cinzento e serão o objeto deste estudo.

3.1.2 Processo de fabricação dos modelos

As cascas cilíndricas são fabricadas por meio de fundição (Pires [8]), em poço vertical, por gravidade, com a utilização de macho de areia conforme indicado na figura 3.2. O material empregado neste caso foi o SA 278 Classe 40 (ferro fundido cinzento, ou ferro fundido com grafita lamelar).

Figura 3.2 – Poço para fabricação de cascas cilíndricas

Após controles dimensionais e remoção de segmentos das extremidades, para a confecção de corpos de prova para avaliação das propriedades mecânicas e metalúrgicas, o cilindro é usinado interna e externamente em um torno horizontal.

Nesta etapa, surgem as variações de espessura tanto no sentido radial como longitudinal na casca cilíndrica. Supõe-se que elas sejam causadas devido ao processo atual de usinagem da superfície interna, que consiste da utilização de um cabeçote de usinagem que se movimenta longitudinalmente no interior da casca cilíndrica, durante o desbaste e que é apoiado nas extremidades por um varão. (figura 3.3).

Devido ao comprimento do equipamento que está sendo fabricado (≈ 10 m), o processo é realizado em duas etapas, com a ferramenta avançando em direção ao cabeçote do torno somente até a metade do comprimento máximo da camisa. Nessa fase, o varão apresenta uma deflexão por conta da pressão da ferramenta sobre a

superfície cilíndrica que possivelmente provoca uma variação longitudinal da espessura. Supõe-se também que exista variação da dureza ao longo da direção circunferencial, também contribuindo para variações de espessura naquela direção.

Figura 3.3 – Dispositivo para usinagem interna

Após a usinagem a casca tem a suas tampas e pontas de eixo montadas, passando por um processo de teste hidrostático para certificação do vaso de pressão e no final o equipamento tem a sua superfície externa retificada para garantir a cilindridade da superfície durante a operação.

Assim é importante que se destaque que a distribuição da variação da espessura não se dá simetricamente na linha média da casca cilíndrica, e sim no seu diâmetro interno.

Dimensões principais do equipamento:

- Comprimento: *10070 mm*
- Diâmetro externo: *1812 mm*
- Espessura nominal: *29 mm*
- Massa: *≈18 t*

Material da casca cilíndrica:

- SA-278 Classe 40 (especificação ASME para ferro fundido cinzento)

3.1.3 Medição da ovalização das cascas cilíndricas

Para a realização das medições de ovalização das cascas cilíndricas, foram utilizados seis sensores de movimento do tipo indutivo analógico, dispostos ao longo do comprimento do cilindro, horizontalmente, sendo um no centro e um em cada extremidade, conforme mostrado na figura 3.5. As medições foram realizadas em uma balanceadeira da marca Schenk, na qual a rotação é realizada por meio de um sistema motor-redutor que se acopla a ponta de eixo do cilindro por meio de um eixo cardan. As pontas de eixo se encontram simplesmente apoiadas em roletes, permitindo que haja na extremidade oposta ao cardan o movimento axial do equipamento, conforme figura 3.4.

Figura 3.4 – Balanceadeira

Figura 3.5 – Posicionamento dos sensores na superfície cilíndrica

Figura 3.6 – Sensor de movimento tipo indutivo analógico

O tipo de sensor utilizado (figura 3.6) é largamente empregado em posições sem contato para medições de proximidade e deslocamento. A operação dos sensores é baseada nos princípios da indução magnética o que permite medições precisas do deslocamento de superfícies metálicas. O modelo do sensor é o IA8-30GM-I3 do fabricante Pepperl e maiores detalhes podem ser encontrados no anexo 1.

Tais sensores foram conectados a uma placa conversora de sinal analógico para digital, em um PC, onde por meio de um software específico as leituras do deslocamento da superfície em relação ao sensor foram realizadas, figura 3.7.

Figura 3.7 – Tela com leitura do deslocamento x tempo

A partir da realização destas medições, as leituras foram processadas por meio de transformadas de Fourier para obtenção de diagrama polar com a indicação da

forma dinâmica do cilindro (figura 3.8) assim como a decomposição do sinal em harmônicos (figura 3.9).

Figura 3.8 – Forma dinâmica de acordo com as leituras dos sensores centrais: frontal e traseiro

Figura 3.9 – Harmônicos a partir das leituras dos sensores centrais: frontal e traseiro

As medições foram realizadas em seis rotações distintas (figura 3.10), com a coleta dos dados realizada à velocidade constante. São elas:

- 1,17 Hz
- 3,51 Hz
- 5,27 Hz
- 9,13 Hz
- 10,50 Hz
- 11,72 Hz

Figura 3.10 – Evolução da forma devido ao aumento da rotação

Como as máximas leituras registradas nos diagramas variam conforme a posição inicial do sensor, os resultados de interesse são: a diferença entre mínimo e máximo na forma geométrica medida e os valores dos picos de amplitude para cada harmônico. A tabela 3.1 apresenta os resultados das amplitudes das medições realizadas na rotação de 11,72 Hz.

A razão de se ter sensores dos dois lados da casca cilíndrica, na balanceadeira, é a de se poder determinar o nível de interferência externa ou ruído que está sendo obtido nas leituras dos sensores. Logicamente as leituras dos sensores frontais e traseiros deveriam resultar em valores idênticos, somente defasados 180 graus, mas uma pequena diferença entre estas leituras sempre se fez presente. Assim, para se quantificar essa diferença faz-se a seguinte operação:

$$Vibração = \frac{SF - ST}{2}$$

Onde SF =sensor frontal e ST =sensor traseiro, sendo que este resultado, na forma apresentada acima é subtraído do resultado das medições do sensor frontal para se

obter o deslocamento final (o que é, também, a média das duas leituras dos sensores).

Adicionalmente, a balanceadeira possui um sensor de deslocamento “laser” (figura 3.11) que fica posicionado na parte central inferior do equipamento, com o qual os sinais obtidos são processados para obtenção dos harmônicos que compõe o movimento da casca cilíndrica. Estes resultados são apresentados também na forma de gráficos (figura 3.12) onde se observa a evolução da amplitude dos harmônicos da casca cilíndrica com o aumento da velocidade.

Figura 3.11 – Sensor de movimento tipo laser

Figura 3.12 – Amplitude das harmônicas medidas durante o balanceamento

Na tabela 3.1 também estão indicados os resultados dos harmônicos de cada casca obtidos a partir do sensor laser da balanceadeira.

Tanto os resultados das medições da ovalização, obtidas com auxílio dos sensores de corrente indutiva, como os resultados obtidos pela balanceadeira foram tomados seqüencialmente um ao outro, imediatamente após o balanceamento do equipamento.

Tabela 3.1 – Resultados das medições à $n=11.72$ Hz

Cilindro	(pico-pico) [μm]				
	Medições Ovalização			Balanceamento	
	Total	1X	2X	1X	2X
1	623	60	592	88	484
2	358	119	260	78	227
3	517	86	448	101	391
4	265	78	206	76	194
5	169	10	152	75	130
6	810	58	750	60	462
7	615	84	538	64	492
8	296	90	206	93	177
9	474	76	434	69	382
10	820	152	670	91	453
11	453	46	480	47	418
12	714	20	680	27	478
13	578	112	482	72	417
14	654	110	592	92	485
15	701	102	606	54	496
16	590	22	548	29	480
17	467	126	398	103	400
18	306	52	246	76	236
19	701	110	644	86	481
20	123	54	86	15	74
21	306	92	230	99	188
22	704	50	650	40	498
23	429	106	360	63	321
24	469	48	394	36	363
25	511	22	600	36	490
26	695	120	608	87	482
27	486	114	400	94	364
28	486	124	414	83	372
29	356	68	324	16	293
30	192	54	150	54	124
31	338	42	304	20	276
32	311	120	602	74	236
33	417	76	352	59	327
34	331	58	292	39	278
35	718	126	648	91	472
36	466	60	438	33	351

3.1.4 Comparação dos resultados das medições

Com os resultados dados na tabela 3.1, correlacionamos os valores do primeiro (1X) e segundo harmônico (2X) nas figuras 3.13 e 3.14.

Figura 3.13 – Comparação do 1X da relação entre os resultados da balanceadeira e medições

Figura 3.14 – Comparação do 2X da relação entre os resultados da balanceadeira e medições

Na figura 3.14, observa-se uma boa correlação entre os resultados do 2X com exceção a cinco cilindros indicados na extremidade direita do gráfico (cilindros 6, 10, 12, 19 e 22), mas em contrapartida a figura 3.13 dos resultados do 1X apresenta uma dispersão maior entre os resultados, indicando apenas uma tendência de correlação entre os pontos.

Uma provável razão para essa diferença pode estar relacionada com a grandeza dos resultados dos dois harmônicos, sendo que para o 2X os resultados possuem um range de 74-570 μm e para o 1X de apenas 10-152 μm o que talvez possa indicar que para um mesmo erro de medições, os valores de menor grandeza estariam mais sujeitos à desvios.

De uma maneira geral, os resultados com o sensor da balanceadeira são inferiores aos da medição da ovalização. Possíveis causas poderiam ser:

- Sensores de corrente indutiva não serem adequados a tais medições;
- Calibração dos sensores;
- Comprimento dos cabos;
- Vibração dos suportes dos sensores.

3.1.5 Medições da espessura das cascas cilíndricas

As cascas cilíndricas após o processo de montagem e usinagem final, tiveram as suas espessuras medidas por intermédio de um aparelho de ultra-sonografia (coletor modelo DM4 e cabeçote DA0.8, ambos do fabricante Krautkramer, veja o Anexo 2 para maiores detalhes), com cabeçote específico para esse fim, de forma a se obter uma grade do cilindro planificado com o mapeamento da variação da espessura em toda a sua superfície. A casca cilíndrica foi subdivida em 20 planos ao longo de seu eixo longitudinal, sendo que em cada plano, a circunferência externa foi subdividida em 28 segmentos iguais, e em cada ponto de cruzamento das subdivisões foi

tomada a espessura daquela posição, perfazendo um total de 560 pontos. A figura 3.15 ilustra a divisão da superfície.

Figura 3.15 – Esquema dos pontos de realização da medição da espessura

Sabe-se TAPPI [9], da imprecisão na realização de medições de espessura em ferro fundido cinzento por meio de ultra-som, devido a sua estrutura metalúrgica, dado a existência de lamelas de grafita (figura 3.16) que atuam como refletores internos ao material, fornecendo leituras que divergem sensivelmente dos valores reais.

Figura 3.16 – Micrografia do SA 278 CL 40

Além disso, devido ao processo de fundição vertical de tais cascas cilíndricas, o material apresenta variação de velocidade do som ao longo de seu comprimento, o que implica que o aparelho de medição irá fornecer leituras de espessura que aumentam ao longo do comprimento do cilindro, da sua base ao seu topo (imaginando-o na posição vertical durante o processo de fundição). De forma a se

minimizar esse desvio, os dados obtidos a partir destas leituras foram corrigidos efetuando-se a medição da espessura de uma das extremidades com o auxílio de um paquímetro (sendo comparada com a leitura por ultra-som) e aplicando-se uma compensação em todos os pontos ao longo do comprimento da casca cilíndrica. A figura 3.17 (a) apresenta a distribuição da espessura ao longo do eixo longitudinal da casca (cada cor representa uma das 28 posições angulares da realização das medições de espessuras, vide figura 3.16), conforme os valores encontrados, sendo que na figura 3.17 (b), estão representadas as espessuras após a correção citada acima.

Figura 3.17 – Variação da espessura ao longo do eixo longitudinal da casca cilíndrica

Com isso supõe-se estar introduzindo erros adicionais nestas leituras, além da que já foi apresentada anteriormente. As figuras 3.18 e 3.19 ilustram alguns resultados do mapeamento do desvio da espessura de projeto associado às cores, de forma a permitir uma melhor visualização da sua distribuição:

Figura 3.18 – Distribuição da variação da espessura na casca cilíndrica, tipo elipse

Na figura 3.18 o eixo horizontal representa o sentido longitudinal da casca cilíndrica, e o vertical o seu desenvolvido ($\pi \times$ diâmetro externo). Também se observa, uma distribuição de espessuras que, neste caso, sugere uma forma elíptica na maior parte do comprimento do cilindro.

Das medições realizadas, as cascas podem ser agrupadas nos seguintes grupos principais:

- Distribuição das espessuras de aspecto **elipse** (figura 3.18 e 3.20)
- Distribuição das espessuras de aspecto **círculo excêntrico** (figura 3.19 e 3.21)

Figura 3.19 – Distribuição da variação da espessura na casca cilíndrica, tipo excêntrico

A tabela 3.2 apresenta a classificação das cascas, segundo ao aspecto da distribuição da espessura:

Tabela 3.2 – Classificação das cascas cilíndricas	
<i>Classificação</i>	<i>Número do cilindro</i>
Elipse	1/2/3/6/7/8/9/10/11/12/13/14/15/ 18/19/21/22/23/24/25/26/27/28/ 29/33/34/35
Círculo excêntrico	16/20/30/31
Outros	4/5/17/32/36

Figura 3.20 – Distribuição da variação da espessura na casca cilíndrica, tipo elipse

Figura 3.21 – Distribuição da variação da espessura na casca cilíndrica, tipo excêntrico

3.2 Método de elementos finitos (MEF)

3.2.1 Modelagem 3D das cascas cilíndricas

Como dados de entrada dos modelos, foram utilizadas as medições de espessura do capítulo 3.1.5. Além dos erros descritos anteriormente, nas medições ocorreram também algumas discrepâncias entre pontos adjacentes os quais indicavam valores irreais, tais como: 1.6, **1.3**, 1.8, tanto na direção longitudinal, como na direção circunferencial (figura 3.22), sendo que tais valores foram substituídos pelo resultado da média aritmética simples de dois pontos adjacentes em uma das direções, escolhida conforme cada caso.

1,4	1,4	1,0
1,5	1,7	1,8
1,6	1,3	1,8
1,6	1,7	1,5
1,7	1,6	1,8

Figura 3.22 – Destaque de valor discrepante das medições adjacentes

Por meio da utilização de macros foram realizadas as importações dos resultados das medições das espessuras diretamente para o software de modelamento 3D, o Autodesk Inventor, no qual para cada coluna da planilha (seção da casca cilíndrica), foram inseridos os pontos correspondentes à medição por meio de coordenadas polares, criando-se uma curva “spline” (figura 3.23), através de todos os pontos desse plano. Após todas as seções terem sido introduzidas, uma superfície foi gerada passando-a por todas as seções existentes (“loft”). Posteriormente as faces da casca cilíndrica foram projetadas longitudinalmente de forma a se ter o comprimento real da casca cilíndrica representanda por este modelo.

Figura 3.23 – Seções representadas por splines

3.2.2 Análise por elementos finitos

Com o modelo 3D pronto, a geometria foi exportada para o programa de elementos finitos ANSYS. Para a realização da análise, decidiu-se por utilizar elementos sólidos de alta ordem (20 nós – “Solid186” – figura 3.24) na tentativa de se representar a variação de espessura com razoável precisão.

O elemento é definido por 20 nós tendo três graus de liberdade (translação) por nó nas direções x, y, e z.

Figura 3.24 – Estrutura do elemento sólido

A malha 3D foi gerada utilizando recurso de “sweep” para obtenção de quadriláteros, conforme indicado na figura 3.25.

Figura 3.25 – Malha 3D composta de quadriláteros

Foi adotado o sistema de coordenadas cilíndricas com o eixo “z” sendo o eixo longitudinal (“x” radial e “y” longitudinal).

De forma a simular a influência das tampas do equipamento, que são responsáveis por suportar a casca cilíndrica, as mesmas foram modeladas por meio de ligações rígidas (“rigid links”) entre os nós existentes nas extremidades e um elemento com massa e inércia desprezíveis localizado na posição correspondente a linha de centro das pontas de eixo, limitando assim o movimento circunferencial dos nós naquela região, tal como indicado na figura 3.26.

Figura 3.26 – Representação da ligação rígida entre casca e centro do mancal

No modelo foram aplicadas condições de contorno, também no sistema de coordenadas cilíndricas, sendo que em uma extremidade o movimento foi bloqueado nas três direções, e na outra o cilindro pôde movimentar-se axialmente. Esta condição de contorno foi adotada por representar as condições nas quais o cilindro teve sua deformação dinâmica (ovalização) medida. É importante notar que a análise é estática, e assim não se procurou determinar vibrações.

A casca cilíndrica recebeu dois carregamentos: a aceleração da gravidade (inicialmente adotada na direção “y”) e a rotação em torno do eixo longitudinal “z”, o qual provoca forças centrífugas na casca.

Um ponto importante se faz necessário esclarecer com relação a análise de elementos finitos e as medições dinâmicas realizadas: as leituras feitas através da utilização de sensores de deslocamento na posição horizontal na realidade representam o deslocamento de um dado ponto externo da casca cilíndrica que naquele momento passa pela posição de leitura do sensor. Se a casca fosse um cilindro perfeito sem a influência da ação da gravidade, teríamos, por ação das forças centrífugas, a forma final de outro cilindro perfeito, apenas maior, por conta da deformação. No caso de se considerar a influência da aceleração da gravidade (ainda supondo o cilindro perfeito), tanto com ou sem rotação, obteríamos uma forma geométrica que lembra a forma de uma maçã (achatado na superfície superior e ligeiramente alongado na superfície inferior), cujo resultado pode ser demonstrado pela teoria de cascas. Neste caso, os sensores horizontais obteriam sempre a mesma leitura de deformação, não importando a posição do círculo perfeito.

Entretanto, como a casca cilíndrica em questão possui variação de sua espessura, nas direções circunferencial e longitudinal, com a aplicação da força centrífuga devido à rotação, temos que o cilindro assume uma forma ovalizada, e esta forma quando submetida a ação da gravidade, fará com que cada um de seus pontos deforme de maneira distinta dependendo da posição de seus semi-eixos com relação ao vetor aceleração da gravidade. Assim, a medição realizada por meio de sensores, na realidade, obtém deslocamentos dos pontos da elipse (dinâmica), no instante em que passam pela linha horizontal. Com isso, para a obtenção destes deslocamentos, na abordagem adotada, optamos por rotacionar o vetor aceleração

da gravidade em torno do cilindro (que em última análise simula o movimento de rotação do cilindro, mantendo-se o vetor da aceleração da gravidade na mesma direção, figura 3.27). A partir desta consideração, para cada análise efetuada com a devida rotação da gravidade, foi tomado o deslocamento radial dos pontos perpendiculares ao vetor aceleração que se encontram em pontos diametralmente opostos.

Figura 3.27 – Pontos de medição dos sensores de acordo com a rotação da casca

3.2.3 DFT – Discrete Fourier Transform

Para comparação dos resultados das medições foi utilizada a Transformada discreta de Fourier (DFT) para obter-se o valor dos harmônicos a partir das amplitudes calculadas. Assim para cada análise foi realizada a DFT com a tomada de 32 pontos ao longo de uma rotação da casca cilíndrica para se obter as amplitudes de cada harmônico.

Para referências sobre DFT, consulte-se, por exemplo, Press [10] e Chapra[11].

4 Resultados e comentários

4.1 Critérios de comparação dos resultados

A partir do plano central, na superfície externa da casca cilíndrica foram obtidos para cada simulação realizada no MEF, a diferença entre a máxima e mínima amplitude e os quatro primeiros harmônicos.

4.2 Simulações de cascas cilíndricas com imperfeições impostas

Visando avaliar a influência da variação da espessura na ovalização da casca cilíndrica durante a rotação, as simulações que se seguem foram realizadas impondo-se variações determinísticas.

4.2.1 Influência da distribuição da variação da espessura no plano central

Observa-se nas medições de espessura que diversas cascas cilíndricas possuem variações de magnitude similares entre si, mas que durante a rotação, as amplitudes da ovalização divergem enormemente. Supõe-se que seja devido a forma como a variação de espessura se distribui. Assim, foram realizadas algumas modelagens pelo MEF com uma distribuição imposta de variação de espessura conforme a função abaixo (Buelta [12]):

$$Espessura = valor_base + \Delta \cdot \sin(n \cdot \theta)$$

Onde:

$n=2 \rightarrow$ corresponde a uma distribuição elíptica da variação das espessuras, figura 4.1 (a);

$n=3 \rightarrow$ corresponde a uma distribuição com três picos da variação das espessuras, figura 4.1 (b);

$n=4 \rightarrow$ corresponde a uma distribuição com quatro picos da variação das espessuras, figura 4.1 (c);

θ =coordenada angular, $0^\circ \rightarrow 360^\circ$;

Δ =variação da espessura, adotado=0,25 mm (inicialmente);

valor_base= espessura média da casca cilíndrica, adotado=29,25 mm;

Figura 4.1 – Distribuição da variação da espessura

Para $n=2$, estes valores geram uma distribuição elíptica, com uma espessura mínima=29 mm e máxima=29,5 mm.

Nestes modelos a função acima foi aplicada apenas na região central, considerando-se nas bordas uma superfície interna sem variação, conforme figura 4.2.

Figura 4.2 – Pontos de medição dos sensores de acordo com a rotação da casca

A função foi discretizada em 32 pontos e inserida na forma de uma curva “spline” no plano central, no mesmo procedimento mencionado no item 3.2.1.

Tabela 4.1 – Resultado da distribuição da espessura

picos internos	(pico-pico) [μm]			
	1X	2X	3X	4X
2	0	471	0	1
3	1	1	167	0
4	0	0	0	55
5	0	1	0	0
6	0	2	0	0

Os resultados para 11,72 Hz estão apresentados na tabela 4.1 e figura 4.3, onde se observa que para uma mesma variação de espessura, quanto mais distribuída ela é (ou seja, maior o número de picos), menor é a amplitude resultante da casca cilíndrica durante a rotação. Como esse é um modelo com a variação de espessura imposta, as harmônicas têm os seus máximos correspondentes principalmente, ao número de picos que cada geometria interna possui, ou seja, na distribuição interna na forma oval, o máximo está no segundo harmônico (2X), na distribuição com três picos no terceiro harmônico e assim por diante.

Figura 4.3 – Influência da distribuição da espessura na forma ovalizada

4.2.2 Influência do número de planos com variação de espessura na ovalização

Fez-se inicialmente a modelagem do plano central do cilindro utilizando-se as duas faixas centrais da medição de espessura, tal como indicado na figura 4.4. Assim como descrito anteriormente no item 3.2.1, os pontos que descrevem essas coordenadas são inseridos em uma spline, considerando-se que nas extremidades da casca cilíndrica a variação da espessura seja nula.

Figura 4.4 – Faixa central considerada para a realização de modelo simplificado

Em seguida o modelo foi exportado para o software de elementos finitos no qual as condições de contorno, os carregamentos, e a malha foram inseridas e calculadas.

Posteriormente repetiu-se esta mesma operação para quatro faixas centrais, aumentando as quantidades aos pares até que todas as seções medidas da casca cilíndrica fossem englobadas, figura 4.5.

Figura 4.5 – Faixa central (larga) considerada para a realização de modelo simplificado

Os resultados obtidos demonstram que as variações são pequenas quando comparadas com o modelo completo, mas o ganho para a realização de medições de espessuras em futuros equipamentos se mostra bastante expressiva já que o tempo gasto para medição de vinte planos é bastante considerável, além de permitir um maior cuidado na sua realização, inclusive com o aumento do número de pontos circunferenciais (foram medidos vinte e oito pontos por plano). A tabela 4.2 e a figura 4.6 ilustram os resultados encontrados para a casca cilíndrica 16.

Tabela 4.2 – Resultados do incremento da quantidade de planos centrais

Quantidade de planos	(pico-pico) [μm]			
	1X	2X	3X	4X
2	176	616	35	14
4	178	511	26	11
6	163	538	29	11
8	207	638	27	11
10	193	598	31	11
12	195	540	31	11
14	174	538	30	12
16	181	543	30	12
18	181	540	30	12
20	182	538	30	12

Figura 4.6 – Influência do aumento da quantidade de planos centrais

Isso se dá pelo fato de a maior parte da distribuição da variação de espessura ocorrer numa larga faixa dos planos centrais da casca cilíndrica, conforme pode ser observado nas figuras do apêndice 1.

Realizando o mesmo procedimento para um cilindro teórico ideal com uma distribuição interna da variação da espessura em forma de elipse, obtivemos o indicado na tabela 4.3 e figura 4.7, para o qual as amplitudes do segundo harmônico (2X) resultaram em uma distribuição quadrática.

Tabela 4.3 – Resultados do aumento de planos centrais para o cilindro com variação teórica

Quantidade de planos	(pico-pico) [μm]			
	1X	2X	3X	4X
2	0	745	0	35
4	0	774	0	35
6	0	801	0	35
8	0	824	0	35
10	0	842	0	35
12	0	858	0	35
14	0	871	0	35
16	0	880	0	34
18	0	886	0	34
20	0	889	0	34

Figura 4.7 – Influência do aumento da quantidade de planos no 2X

4.2.3 Influência da variação da espessura no plano central

Neste caso, fazendo uso da forma elíptica no plano central, adotou-se uma espessura mínima fixa (29 mm) e incrementou-se o valor da espessura máxima, conforme mostrado na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores utilizados para simulação da variação de espessura

	<i>Variação da espessura</i>			
	I	II	III	IV
Mínimo	29,0	29,0	29,0	29,0
Máximo	29,5	30,0	30,5	31,0
Variação	0,5	1,0	1,5	2,0

A tabela 4.5 e a figura 4.8 indicam que a amplitude da forma ovalizada cresce de forma linear com o aumento da espessura.

Tabela 4.5 – Resultados da influência do aumento da espessura

Variação [mm]	(pico-pico) [μm]			
	1X	2X	3X	4X
0,5	0	471	0	1
1,0	0	941	0	5
1,5	0	1394	0	11
2,0	0	1835	0	19

Figura 4.8 – Influência do aumento da espessura no plano central

4.2.4 Influência da variação da espessura no plano central, com o aumento da espessura mínima

O propósito desta comparação é avaliar o quanto o aumento da espessura na região central, supondo uma distribuição em forma de elipse, influencia na ovalização da casca cilíndrica.

A tabela 4.6 apresenta os valores considerados nessa simulação.

Tabela 4.6 – Valores utilizados para simulação da variação de espessura

	<i>Variação da espessura</i>			
	I	II	III	IV
Mínimo	29,0	29,5	30,5	31,0
Máximo	29,5	30,0	31,0	31,5
Variação	0,5	0,5	0,5	0,5

Os resultados obtidos estão indicados na figura 4.9, na qual se observa que o aumento da espessura provoca uma redução da ovalização, que deve ser causada principalmente por um aumento da rigidez da casca cilíndrica na área central.

Tabela 4.7 – Resultados da influência do aumento da espessura mínima

Espessura máxima [mm]	(pico-pico) [μm]			
	1X	2X	3X	4X
29,5	0	471	0	1
30,0	0	464	0	1
30,5	0	456	0	1
31,0	0	446	0	1
31,5	0	434	0	1

Figura 4.9 - Influência do aumento da espessura mínima

4.2.5 Influência da distribuição da variação da espessura do tipo excêntrica

Nesta simulação foi adotado o deslocamento do centro do círculo interno, apenas no plano central da casca cilíndrica em incrementos de 0,5 mm, mas mantendo-se a espessura mínima de 29 mm da casca cilíndrica conforme indicado na tabela 4.8 e efetuada a análise com o software de elementos finitos. A tabela 4.9 e a figura 4.10 mostram que o aumento da excentricidade provoca um aumento linear da ovalização.

Tabela 4.8 – Valores utilizados para simulação da variação de espessura

	<i>Variação da espessura</i>			
	I	II	III	IV
Mínimo	29,0	29,0	29,0	29,0
Máximo	29,5	30,0	30,5	31,0
Variação	0,5	1,0	1,5	2,0

Figura 4.10 – Influência da excentricidade na forma ovalizada

Tabela 4.9 – Influência da excentricidade na ovalização

Variação [mm]	(pico-pico) [μm]			
	1X	2X	3X	4X
0,5	116	1	0	0
1,0	232	4	1	0
1,5	345	1	1	0
2,0	458	5	2	0

Neste caso, o primeiro harmônico é que tem maior participação na amplitude da casca cilíndrica.

4.2.6 Influência da velocidade na amplitude da ovalização da casca cilíndrica

Partindo de um cilindro com distribuição da variação de espessura de forma elíptica no plano central (espessuras mínima/máxima=29/29,5 mm) variamos a rotação para verificar o comportamento da amplitude da superfície externa da casca cilíndrica. Sabe-se que esta amplitude deve variar com o quadrado da rotação. A tabela 4.10 e a figura 4.11 indicam as rotações consideradas e os respectivos resultados obtidos.

Tabela 4.10 – Resultado da variação da velocidade

Rotação [rad/s]	(pico-pico) [μm]			
	1X	2X	3X	4X
14,72	5	69	10	1
20,24	10	130	18	3
25,76	16	211	30	4
31,28	24	311	44	6
36,8	33	430	61	8

Algumas curvas do apêndice 3 apresentam resultados com descontinuidades ou mesmo com tendência a serem lineares, ao invés de uma curva quadrática conforme esperado. Tais casos sugerem que a curva foi obtida em condições não adequadas.

Figura 4.11 – Variação da amplitude em função da velocidade

4.3 Resultados dos modelos do MEF realizados a partir das medições da variação da espessura

A tabela 4.11 apresenta os resultados dos modelos 3D criados a partir das medições de espessura.

Tabela 4.11 – Harmônicos de cada cilindro

Cilindro	(pico-pico) [μm]			
	1X	2X	3X	4X
1	52	225	32	7
2	49	206	18	4
3	60	250	45	19
4	79	141	41	9
5	53	134	26	3
6	50	318	51	13
7	62	212	26	18
8	83	28	57	10
9	16	112	44	23
10	102	562	34	12
11	56	406	48	8
12	47	252	63	9
13	88	511	49	5
14	33	143	14	17
15	110	464	64	30
16	182	538	30	12
17	74	280	42	29
18	39	106	24	19
19	72	493	58	30
20	88	99	30	24
21	2	9	0	7
22	34	620	51	6
23	3	2	0	7
24	43	508	35	13
25	4	37	0	7
26	54	229	14	13
27	53	373	57	8
28	104	336	20	11
29	72	216	41	35
30	119	132	24	10
31	120	310	46	17
32	19	115	15	35
33	71	370	2	7
34	53	166	25	25
35	61	197	49	21
36	6	77	12	6

Após efetuar a DFT, observou-se que, de uma maneira geral, os quatro primeiros harmônicos são os que mais apresentam influência na amplitude da superfície da casca cilíndrica. A figura 4.12 mostra esta influência em termos percentuais onde claramente vemos que o segundo harmônico é o mais expressivo, salvo algumas exceções como os cilindros 8, 20, 21 e 23, nos quais algum outro harmônico é o predominante.

Figura 4.12 – Distribuição dos harmônicos de cada cilindro

Como os equipamentos foram balanceados e as simulações das cascas pelo MEF não levam em conta as correções por meio de introdução de massa, fica sem sentido fazer as comparações entre esses harmônicos (1X), salvo se for para a classificação da distribuição da espessura e do aspecto final geometria interna. A figura 4.13 e a tabela 4.12 apresentam a comparação entre o segundo harmônico (2X) do modelo do MEF e o das medições da ovalização realizadas.

Figura 4.13 – Comparação entre os resultados do 2X

Na figura 4.13 as setas vermelhas indicam os resultados da simulação por elementos finitos que ficaram próximas das medições realizadas da ovalização tanto para um ou ambos as metodologias, o que nos dá quatorze modelos ($\approx 39\%$). Fica claro que na maioria dos casos não há uma relação clara entre eles. A grande causa provável para isso são os resultados das medições de espessura feita por ultra-som, que devido a atuação das lamelas de grafita como refletoras provocam um desvio muito grande dos valores da espessura, e que somente com uma grade de medição muito maior do que a realizada, poderia minimizar este impacto, mas que em contrapartida torna o tempo de medição muito extenso, e pode inviabilizar o processo prático na tomada desses valores.

As setas amarelas indicam os cilindros descritos no capítulo 3.1.4 que possuem uma discrepância entre os resultados das medições por sensores de corrente indutiva e

os sensores da balanceadeira. Nos cilindros 10, 19 e 22 o modelo de elementos finitos se aproximou de algum dos resultados das medições do 2X.

Tabela 4.12 – 2X das medições e do MEF

Cilindro	2X (pico-pico) [μm]		
	Medições Ovalização	Balanceamento	MEF
1	592	484	225
2	260	227	206
3	448	391	250
4	206	194	141
5	152	130	134
6	750	462	318
7	538	492	212
8	206	177	28
9	434	382	112
10	670	453	562
11	480	418	406
12	680	478	252
13	482	417	511
14	592	485	143
15	606	496	464
16	548	480	538
17	398	400	280
18	246	236	106
19	644	481	493
20	86	74	99
21	230	188	9
22	650	498	620
23	360	321	2
24	394	363	508
25	600	490	37
26	608	482	229
27	400	364	373
28	414	372	336
29	324	293	216
30	150	124	132
31	304	276	310
32	272	236	115
33	352	327	370
34	292	278	166
35	648	472	197
36	438	351	77

As figuras 4.14 e 4.15 mostram os gráficos do deslocamento da superfície externa da casca cilíndrica, no modelo de elementos finitos, conforme a metodologia descrita

no capítulo 3.2.2, onde fica evidente que a simulação é eficaz na reprodução do efeito que a casca assume durante a sua rotação.

Figura 4.14 – Forma ovalizada do cilindro número 2, a partir do MEF

Figura 4.15 – Forma ovalizada do cilindro número 15, a partir do MEF

5 Conclusões

Salvo algumas exceções, os comparativos do MEF com os resultados experimentais indicam uma divergência dos resultados em termos quantitativos, cuja causa provável possa estar relacionada aos erros gerados no mapeamento da espessura, além da própria correção das medições para todos os pontos no sentido longitudinal, conforme já discutido anteriormente.

Os modelos com variação de espessura imposta deterministicamente demonstram que mais importante do que a amplitude (variação) da espessura existente no interior da casca cilíndrica, é a forma como a qual essa variação se distribui, e ela pode incrementar a ovalização da casca cilíndrica, sendo que alterando-a para uma distribuição mais uniforme da variação interna, provoca-se uma redução quase exponencial da ovalização. Também se observa que com um aumento da espessura da parede (mesmo que somente na região central) gera-se uma redução da ovalização devido ao aumento da rigidez da casca cilíndrica. Adicionalmente, os planos posicionados na região central da casca cilíndrica são os mais significativos na formação da ovalização, o que permite em análises futuras que as medições de espessura poderiam se concentrar na região central, com o incremento da quantidade de pontos circunferenciais, melhorando assim a precisão na realização do modelo de elementos finitos.

Assim, em um processo de fabricação desse tipo de equipamento, estes pontos são importantes para a minimização deste fenômeno.

Como sugestão para pesquisas futuras, há a necessidade do desenvolvimento de novas metodologias para a medição de espessura por ultra-som para o ferro fundido com grafita lamelar (ferro fundido cinzento). Adicionalmente a verificação da influência das lamelas de grafita nos resultados dos sensores de corrente indutiva se faz necessário.

Observa-se que uma variação de 0,5mm na espessura é visualmente imperceptível em uma casca cilíndrica de $\approx 1,80\text{m}$ de diâmetro, entretanto as forças de inércia são suficientes para provocar na mesma uma ovalização que é sensível durante a rotação.

6 Continuidade do trabalho

- Pesquisa sobre método de medição de espessura por ultra-som em ferro fundido cinzento.
- Pesquisa sobre método de medição de deslocamento por meio de sensores de corrente indutiva.

7 REFERÊNCIAS

- [1] NOVOZHILOV, V. V. **The theory of thin shells**. Groningen: P. Noordhoff, 1959. xvi, 376 p.
- [2] TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. **Theory of plates and shells**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1959. 580 p.
- [3] FLÜGGE, W. **Stresses in shells**. Berlin: Springer, 1960. xi, 499 p.
- [4] BISCHOFF, M. et al. Models and finite elements for thin-walled structures. In: ERWIN STEIN, R. de B.; HUGHES, T. J. R. (Ed.). **Encyclopedia of computational mechanics**. New York: John Wiley & Sons, c2004. v. 2.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. Núcleo Técnico/NIT. **História cronológica do papel**. São Paulo, c2004. Disponível em <http://www.abtcp.org.br/m3.asp?cod_pagina=642>. Acesso em: 16 dez. 2006.
- [6] GULLICHSEN, J.; PAULAPURO, H. **Papermaking, part 1: stock preparation and wet end**. US:TAPPI, 1999. 461 p. (Papermaking Science and Technology Series, book 8).
- [7] GULLICHSEN, J.; PAULAPURO, H. **Papermaking, part 2: drying**. US: TAPPI, 1999. 496 p. (Papermaking Science and Technology Series, book 9).
- [8] PIRES, A. C. **Desenvolvimento de ligas de ferro fundido cinzento para a fabricação de cilindros secadores utilizados em máquinas de produção de papel**. 2006. 18 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade São Francisco, Itatiba, São Paulo, 2006.
- [9] TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TIP 0402-16: guidelines for inspection and nondestructive examination of paper machine dryers**. US: TAPPI, 2001. 13 p.
- [10] PRESS, W. H. et al. **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. 2nd ed. Cambridge; New York: Cambridge University Press, c1992. 994 p.
- [11] CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Numerical methods for engineers**. 5th ed. Boston : McGraw-Hill Higher Education, 2006. xviii, 926 p.

- [12] BUELTA MARTINEZ, M. A. **A importância das imperfeições geométricas no projeto e fabricação de estruturas**. São Paulo: EPUSP, 1997. Texto preparado para o concurso de professor titular no Departamento de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da USP.

Apêndice 1 - Distribuição da variação de espessura ao longo da superfície interna do cilindro.

Figura A1.1 – Casca cilíndrica #1

Figura A1.2 – Casca cilíndrica #2

Figura A1.3 – Casca cilíndrica #3

Figura A1.4 – Casca cilíndrica #4

Figura A1.5 – Casca cilíndrica #5

Figura A1.6 – Casca cilíndrica #6

Figura A1.7 – Casca cilíndrica #7

Figura A1.8 – Casca cilíndrica #8

Figura A1.9 – Casca cilíndrica #9

Figura A1.10 – Casca cilíndrica #10

Figura A1.11 – Casca cilíndrica #11

Figura A1.12 – Casca cilíndrica #12

Figura A1.13 – Casca cilíndrica #13

Figura A1.14 – Casca cilíndrica #14

Figura A1.15 – Casca cilíndrica #15

Figura A1.16 – Casca cilíndrica #16

Figura A1.17 – Casca cilíndrica #17

Figura A1.18 – Casca cilíndrica #18

Figura A1.19 – Casca cilíndrica #19

Figura A1.20 – Casca cilíndrica #20

Figura A1.21 – Casca cilíndrica #21

Figura A1.22 – Casca cilíndrica #22

Figura A1.23 – Casca cilíndrica #23

Figura A1.24 – Casca cilíndrica #24

Figura A1.25 – Casca cilíndrica #25

Figura A1.26 – Casca cilíndrica #26

Figura A1.27 – Casca cilíndrica #27

Figura A1.28 – Casca cilíndrica #28

Figura A1.29 – Casca cilíndrica #29

Figura A1.30 – Casca cilíndrica #30

Figura A1.31 – Casca cilíndrica #31

Figura A1.32 – Casca cilíndrica #32

Figura A1.33 – Casca cilíndrica #33

Figura A1.34 – Casca cilíndrica #34

Figura A1.35 – Casca cilíndrica #35

Figura 36 – Casca cilíndrica #36

Apêndice 2 – Gráficos da forma dinâmica da casca cilíndrica.

Figura A2.1 – Casca cilíndrica #1

Figura A2.2 – Casca cilíndrica #2

Figura A2.3 – Casca cilíndrica #3

Figura A2.4 – Casca cilíndrica #4

Figura A2.5 – Casca cilíndrica #5

Figura A2.6 – Casca cilíndrica #6

Figura A2.7 – Casca cilíndrica #7

Figura A2.8 – Casca cilíndrica #8

Figura A2.9 – Casca cilíndrica #9

Figura A2.10 – Casca cilíndrica #10

Figura A2.11 – Casca cilíndrica #11

Figura A2.12 – Casca cilíndrica #12

Figura A2.13 – Casca cilíndrica #13

Figura A2.14 – Casca cilíndrica #14

Figura A2.15 – Casca cilíndrica #15

Figura A2.16 – Casca cilíndrica #16

Figura A2.17 – Casca cilíndrica #17

Figura A2.18 – Casca cilíndrica #18

Figura A2.19 – Casca cilíndrica #19

Figura A2.20 – Casca cilíndrica #20

Figura A2.21 – Casca cilíndrica #21

Figura A2.22 – Casca cilíndrica #22

Figura A2.23 – Casca cilíndrica #23

Figura A2.24 – Casca cilíndrica #24

Figura A2.25 – Casca cilíndrica #25

Figura A2.26 – Casca cilíndrica #26

Figura A2.27 – Casca cilíndrica #27

Figura A2.28 – Casca cilíndrica #28

Figura A2.29 – Casca cilíndrica #29

Figura A2.30 – Casca cilíndrica #30

Figura A2.31 – Casca cilíndrica #31

Figura A2.32 – Casca cilíndrica #32

Figura A2.33 – Casca cilíndrica #33

Figura A2.34 – Casca cilíndrica #34

Figura A2.35 – Casca cilíndrica #35

Figura A2.36 – Casca cilíndrica #36

Apêndice 3 – Gráficos do primeiro e segundo harmônicos obtidos das medições da balanceadeira.

Figura A3.1– Casca cilíndrica #1

Figura A3.2 – Casca cilíndrica #2

Figura A3.3 – Casca cilíndrica #3

Figura A3.4 – Casca cilíndrica #4

Figura A3.5 – Casca cilíndrica #5

Figura A3.6 – Casca cilíndrica #6

Figura A3.7 – Casca cilíndrica #7

Figura A3.8– Casca cilíndrica #8

Figura A3.9 – Casca cilíndrica #9

Figura A3.10 – Casca cilíndrica #10

Figura A3.11 – Casca cilíndrica #11

Figura A3.12 – Casca cilíndrica #12

Figura A3.13 – Casca cilíndrica #13

Figura A3.14 – Casca cilíndrica #14

Figura A3.15 – Casca cilíndrica #15

Figura A3.16 – Casca cilíndrica #16

Figura A3.17 – Casca cilíndrica #17

Figura A3.18 – Casca cilíndrica #18

Figura A3.19 – Casca cilíndrica #19

Figura A3.20 – Casca cilíndrica #20

Figura A3.21 – Casca cilíndrica #21

Figura A3.22 – Casca cilíndrica #22

Figura A3.23 – Casca cilíndrica #23

Figura A3.24 – Casca cilíndrica #24

Figura A3.25 – Casca cilíndrica #25

Figura A3.26 – Casca cilíndrica #26

Figura A3.27 – Casca cilíndrica #27

Figura A3.28 – Casca cilíndrica #28

Figura A3.29 – Casca cilíndrica #29

Figura A3.30 – Casca cilíndrica #30

Figura A3.31 – Casca cilíndrica #31

Figura A3.32 – Casca cilíndrica #32

Figura A3.33 – Casca cilíndrica #33

Figura A3.34 – Casca cilíndrica #34

Figura A3.35 – Casca cilíndrica #35

Figura A3.36 – Casca cilíndrica #36

Anexo 1 – Especificação do sensor de corrente indutiva

Special Application Sensors

Special Application Linear Analog Output

Linear Analog Output

- Cylindrical and surface mount
- 3-wire DC analog
- 2mm to 40mm sensing range

These inductive analog sensors provide a linear output signal proportional to sensing distance. They are reverse polarity protected and require no additional control amplifier.

Output current/sensing distance

Load Resistance

A typical calculation example for load resistance R_L : For a 24VDC supply use a load from 0 to 910Ω.

Wiring Diagrams

3-Wire DC

Cable Connection

Terminal Connection

Quick Disconnect

Note: Wiring diagrams show quick disconnect pin numbers.

V1 Type

Special Application Sensors

2mm to 8mm Sensing Range

Specifications	3-wire DC		
SENSING RANGE	2mm to 5mm	0mm to 6mm	3mm to 8mm
SHIELDED	Yes	Semi	Yes
MODEL NUMBER(S)	IA5-18GM-I3	IA6-12GM50-IU-V1	IA8-30GM-I3
OUTPUT:			
ANALOG	0-20mA	4-20mA/0-10V	0-20mA
LEAKAGE CURRENT	≤10μA	≤10μA	≤10μA
SHORT CIRCUIT AND OVERLOAD PROTECTION	Yes	Yes	Yes
REVERSE POLARITY PROTECTION	Yes	Yes	Yes
SUPPLY VOLTAGE	15-30VDC	10-30VDC	15-30VDC
LED(s)	No	No	No
CURRENT CONSUMPTION	≤8mA	≤10mA	≤8mA
REPEATABILITY	≤.08mm	≤.03mm	≤.08mm
LINEARITY	±3% of full scale	±3% of full scale	±3% of full scale
LOAD RESISTANCE	See chart	See chart	See chart
TEMPERATURE DRIFT	—	±5% (0°C to 70°C) ±10% (-20°C to 0°C)	—
STANDARDS	EN 50319	—	EN 50319
PROTECTION IEC	IP67	IP67	IP67
AMBIENT TEMPERATURE	+14°F to +158°F	+14°F to +158°F	+14°F to +158°F
HOUSING MATERIAL	Nickel-plated brass	Nickel-plated brass	Nickel-plated brass
SENSING FACE	PBT	PBT	PBT
APPROVALS General Purpose General Purpose Nonincendive	Yes	Yes	Yes
	Yes	Yes	Yes
	—	—	—
ELECTRICAL CONNECTION	2-meter cable, PVC covered, 3-conductor, #20AWG	Quick disconnect type V1	2-meter cable, PVC covered, 3-conductor, #20AWG

Special Application Linear Analog Output

Dimensions (mm)

Classic Series
IA5-18GM-I3

Classic Series
IA6-12GM50-IU-V1

Classic Series
IA8-30GM-I3

PEPPERL+FUCHS

Pepperl+Fuchs® Inc. • 1600 Enterprise Parkway • Twinsburg, Ohio 44087-2245 • www.am.pepperl-fuchs.com
Telephone (330) 486-0001 • FAX (330) 405-4710 • E-Mail: sales@us.pepperl-fuchs.com

175

Anexo 2 – Especificação do equipamento de medição de espessura por ultra-som

GE
Inspection Technologies

Ultrasonics

Krautkramer DM 4 Family

Ultrasonic Thickness Gauges – Handy, rugged and efficient

Digital | Eddy Current | Film | Testing Machines | Ultrasonics | X-ray

DM 4E, DM 4, DM 4 DL - Specifications and accessories

Standard package DM 4E or DM 4 thickness gauge, or DM 4DL thickness gauge with on-board Data Logger including: two 1.5 V AA alkaline batteries couplant operating manual	Measurement update rate 25 Hz in MHz capture mode; 4 Hz in standard measurement mode	Size 150 mm x 77 mm x 33 mm; 5.9" X 3.0" X 1.3" (H x W x D)
Operating principle Ultrasonic pulse/echo method with dual-element probes	Gain (DM 4, DM 4DL) Automatic or manual; 3 selectable levels	Weight 255 g, 9 oz. including batteries
Probe zero adjustment Automatic manual with 2-point calibration; selectable coupled / uncoupled state	Material velocity range 1000 to 9999 m/s; 33000 to 333700 inches/s	Data Logger capacity (DM 4DL) Up to 5350 readings; can be divided into a maxi- mum of 999 files (user-selectable)
V-path correction Automatic	Frequency range For probes from 0.8 to 10 MHz	Interfaces (DM 4DL) Serial RS 232C port in combination with a TGD, cable; data transfer parameters: 8 bits, 1 stop bit, 1200 / 2400 / 4800 and 9600 baud; no parity
Measuring range 0.6 mm to 500 mm (0.025" to 20" (steel) in standard mode, depending on probe, material and surface condition	Power supply Two 1.5 V AA alkaline batteries	Report printout languages (DM 4DL) German, English, French, Italian, Japanese, Russian, Spanish
Digital resolution 0.01 mm for thicknesses up to 99.99 mm; 0.1 mm for thicknesses above 99.99 mm; 0.001" or 0.01" up to 9.999 inches; 0.01" above 9.999 inches	Operating time Up to 200 hours (without backlight with alkaline batteries, depending on operating mode)	Application software (DM 4DL) UltraMATE for the transfer, storage, analysis and documentation of measurement data
Units Selectable mm or inch	Auto shut-off After 3 minutes of non-use	Other accessories Attachable rubber case and field accessory plus numerous special probes on request; probe cable; couplants; high-temperature couplant; DM 4DL data logger; on-board Scale thermal printer for mains and battery operation
Display 4-digit LCD with switchable backlight; digit height 12.7 mm / 0.5"	Storage temperature -40 °C to +60 °C; -40 °F to +140 °F (without batteries)	
	Keyboard Sealed, dustproof and watertight membrane keypad	
	Housing Impact-resistant, IP 54	

© 2005 General Electric Company. All Rights Reserved. GDT-20050411 (04/05)

GEInspectionTechnologies.com

We reserve the right to technical modifications without prior notice.

The DM 4 instrument family - thoroughly convincing.

They've got what it takes.

DM 4E, DM 4 and DM 4DL provide everything you need for ultrasonic thickness measurement - all of it weighing only 9 oz (255 grams) and packed in a small housing with just a few keys, tailored for the practical single-handed operation.

The DM 4E gauges enable you to accomplish a large number of demanding tasks, especially with remaining wall thickness measurements on components subject to wear.

They see through things.

DM 4 and DM 4DL come up with a special highlight: the through-coating measurement. The metal wall thickness, for example on pipelines and tanks, is accurately and quickly measured in spite of surface coating. This applies for example to adherent paint coatings, plastic coatings, or fiber-reinforced plastic sheathings. Any time-consuming and cost-intensive removal of the coating is no longer needed!

A troublesome adjustment of the equipment can likewise be skipped. The operating mode DUAL MULTI enables an unrivalled ease of operation: calibrate DM 4, press the DUAL MULTI key, place the probe and measure without the time and expense of removing protective coatings and repainting.

In the operating mode DUAL MULTI the measurement is carried out between two successive backwall echoes from the underlying base material; the echoes from the coating are ignored.

Amazing performance with a stunning ease of use.

Field-proven functions

Don't let the fact fool you that you can manage with only four keys on the DM 4E, five on the DM 4, and with only nine on the DM 4DL. Hidden behind them are powerful functions that make your work easier.

- THK, Normal Thickness Measurement and 1-Point calibration mode displays and holds measured thickness reading until another measurement is made. Fast, 1-Point thickness calibration is performed in THK mode.

- 2-PT, Two Point Calibration allows calibration to two known thicknesses of the material to satisfy special application requirements.
- VEL, Material Sound Velocity mode enables display of the instrument's current calibrated velocity and simple calibration when a material's velocity is known.
- MIN, Minimum Capture mode with increased pulse repetition frequency; the smallest reading of the previously scanned test object is always displayed and saved.

- Backlight allows the user to select OFF, ON, or AUTOMATIC to suit inspection area lighting conditions.

- Probe Zero, Selection of the automatic probe zero adjustment for optimized gauge setting to a large number of probes and test conditions - even with measurements on hot test objects or rough surfaces. Any effects on the measurement results due to changes in the probe, such as wear or temperature variations, are avoided by the zero point correction which can also be carried out continuously during the measurement.

Data management - everything's taken care of.

Extended functions for DM 4 and DM 4DL

- DUAL MULTI Operating mode for an accurate wall thickness measurement in spite of a coated surface.

- DIF, Differential operating mode in which the measured thickness is compared with an adjustable nominal value, and the difference is displayed.

- HI/LO, Adjustable minimum/maximum limit values whose violation activates an alarm signal.

- GAIN mode allows the user to manually adjust the operating gain of the instrument by selecting automatic (AUTO), low (LO), medium (MED), or high (HI) to satisfy the application.

- Selectable receiver bandwidth to optimize the gain for each probe used.

- FTR, Band pass filter selection of LC or HI to match frequency of probe for best performance.

Flexible further processing

The DM 4DL makes the measurement data available for further processing; using our special application software, you can:

- transfer measurement data files from the gauge to the PC
- UltraMATE™ software provides color reports, histograms, copy and paste to MS-Word and EXCEL, compare files, and an auto-connect feature
- comment on and analyze measurement data, manage them in a database, and much more...

Reliable data storage with DM 4DL

With its on-board Data Logger and its interfaces the DM 4DL offers you all the possibilities of a modern documentation:

- up to 5,390 readings can be stored in the Data Logger
- Multiple files - data can be stored in 1 to 999 user selectable files
- Obstruct (OBSI) can be stored to identify inaccessible locations
- Create test reports quickly via a connected serial printer

Wherever the measurement of remaining wall thickness is called for.

Unbeatable - our probes

This great variety of applications is made possible by the large selection of probe designs which we have tailored for the DM 4 gauges.

- DIALOG Intelligent Transducers are automatically recognized by the instrument for the benefits of quick setup, best performance, and test documentation.

- High-Temperature Probe provides Stable Readings on Hot Surfaces for in-service inspection of steam and process equipment.

- General-Purpose Probes for most frequently encountered applications (i.e. process piping and equipment, tubular goods, plate, boiler tubes, pressure vessels, storage tanks, ship hulls, etc.)

- Thin Materials Probes for thin-wall, small diameter tubes and sheets, plus detection of pitting corrosion and extreme wall loss.

- High-Penetration Probes for coarse-grain or highly attenuative materials (i.e. castings, non-metals like plastics, FRP and rubber).

- Small 3 mm and 5 mm Footprint Probes to measure in the bottom of external pits, small diameter piping and tubing, and areas of limited access.

- in special applications on request: e.g. watertight, with a housing design tailored to the application, etc.

A great number of probes -
A great number of applications.

The tasks...

...of wall thickness measurements vary greatly in the individual applications. They include both components subject to wear and precision parts of all kinds – made of the most different materials. Corrosion, for example, is measured on pipelines, pressure vessels, storage tanks, materials handling systems, pumps, bridges, cranes, shipbuilding and structural steel engineering facilities. Additional precision measurements are carried out in the field, for example in the automotive industry as well as in the plastic, ceramic, and sheet metal production. Only to mention a few examples.

... and the probe range.

The large variety of applications is made possible by the vast selection of probes that we have tailored to each application case.

For example: dialog probes.

Intelligent dialog probes are automatically identified by the corresponding instruments and ensure optimum settings as well as an improved test reliability.

For example: high-temperature probes.

Our program includes special probes for thickness measurements on hot components, suitable for temperatures up to 600°C – so that your readings remain stable and accurate.

Other probes ...

- for materials showing high sound attenuation (cast materials, plastics, rubber)
- with reduced contact face and of small design for complicated geometries
- for the measurement of very small wall thicknesses and individual corrosion spots
- with integrated remote-control key for the direct storage of readings
- for special applications on request: e.g. immersion technique, shaped housings, etc.
- for use in hazardous areas

More useful informations:
Cables and connections

Cable	Code	Length
DA 231	A ... A	1.5 m
DA 233	A ... C	1.5 m
DA 235	A ... B	1.5 m
KBA 535	A ... E	1.2 m
KBA 536	A ... D	1.2 m
KBA 531 A	A ... F	1.2 m

Couplants and calibration blocks

ZG-F (2.5 kg)	Universal coupling paste	Thixotrope paste, non-drip, washable, non-corrosive, neutral in reaction; temperature range: -20°C to +100°C (4°F to +212°F); in a 2.5 kg container. Also in batches of 5 bottles, each containing 200 cm³, refillable
ZGT	Multigrade coupling paste	Medium viscosity paste, water resistant, non-corrosive, universally applicable; temperature range: -30°C to +250°C (-22°F to 482°F); in 100 g tubes.
ZGM	High-temperature coupling paste	High viscosity paste, with solid filling, specially made for wall thickness measurements on hot parts; temperature range: +200°C to +600°C (-392°F to +1112°F); in 100 g tubes.
VW	Stepped calibration block	For the function control of thickness gauges, also including certificate.

We reserve the right to technical modifications without prior notice.

© 2004 General Electric Company. All rights reserved. GUT17-00222AL (08/04)

GEInspectionTechnologies.com

DA Series Probes

... for Wall Thickness Measurement using Ultrasonics

All the facts at a glance about ...

... our thickness probes.

Probe	Order number	Meas. range in mm steel	Contact face dia. in mm	Frequency in MHz	Operating temp. in °C	Cable	Zeroing	Operating conditions Special features
For standard applications								
DA 301	56904	1.2 - 200	12.5	5	-20 - +50	DA 231	ON-Block	•
DA 311	57566	1.2 - 200	12.5	5	-20 - +60	DA 233	ON-Block	•
DA 401	58637	1.2 - 200	12.5	5	-20 - +50	DA 231	OFF-Block	•
DA 411	58857	1.2 - 200	12.5	5	-20 - +60	DA 233	OFF-Block	•
DA 451	59167	1.2 - 200	12.5	5	-20 - +50	DA 231	ON-Block	•
DA 461	59170	1.2 - 200	12.5	5	-20 - +60	DA 233	ON-Block	•
With small wall thicknesses								
DA 312	56906	0.6 - 50	7.5	10	-20 - +60	DA 235	ON-Block	•
DA 412	58638	0.6 - 50	7.5	10	-20 - +60	DA 235	OFF-Block	•
DA 462	59171	0.6 - 50	7.5	10	-20 - +60	DA 235	ON-Block	•
With very large wall thicknesses								
DA 303	56905	5 - 300	16.1	2	-20 - +60	DA 231	ON-Block	•
DA 453	58858	5 - 300	16.1	2	-20 - +60	DA 231	OFF-Block	•
DA 453	59168	5 - 300	16.1	2	-20 - +60	DA 231	ON-Block	•
With high sound attenuation								
DA 08G	66501	5 - 60	28.5	0.8	-10 - +60	DA 231	ON-Block	•
DA 408	58644	5 - 60	28.5	0.8	-10 - +60	DA 231	OFF-Block	•
DA 458	59169	5 - 60	28.5	0.8	-10 - +60	DA 231	ON-Block	•
With special requirements								
DA 312 B16	66934	0.7 - 12	3.0	10	-20 - +60	fixed 1.5 m	ON-Block	•
DA 312 B29	68120	0.7 - 12	3.0	10	-20 - +60	fixed 1.5 m	ON-Block	•
KBA 525	100058	0.6 - 25	5.0	10	-10 - +55	fixed 1.2 m	OFF-Block	•
FT 2 ED REM	100059	0.75 - 50	9.6	7.5	-10 - +55	fixed 1.2 m	OFF-Block	•
TC 960	100619	1.5 - 200	15.9	5	-10 - +55	KBA 531 A	OFF-Block	•
With high component temperatures								
DA 305	56911	4 - 60	16.0	5	10 - +600	DA 235	ON-Block	•
DA 315	57167	5 - 150	16.0	2	25 - +300	DA 233	ON-Block	•
DA 317	57168	2 - 80	12.5	5	25 - +300	DA 233	ON-Block	•
DA 319	57169	1.0 - 15	7.5	10	25 - +300	DA 233	ON-Block	•
HT 400	14774	1.2 - 250	12.7	5	10 - +530	KBA 535/536	OFF-Block	•
HT 400 A	14775	1.0 - 300	12.7	5	10 - +530	KBA 535/536	OFF-Block	•

Especially recommendable with:

- Applications including documentation (dialog probe with individual serial number, Y-path correction)
- Wall thickness measurements through paint coating (DualMulti) using the DM 4
- Measuring accuracy requirements despite angled wear of the sole (zeroing on both sides)
- Measuring and repeat accuracy requirements (linearity and temperature compensation)
- Measurements on plastics (zeroing with probe uncoupled)
- rough or curved coupling faces (zeroing with probe uncoupled)

ON-Block: Zeroing with probe uncoupled

OFF-Block: Zeroing with probe coupled

Auto-C: Automatic determination of sound velocity (special function with the DMS 21C)

TopCOAT: Determination of paint coating thickness and of wall thickness of the base material in one operating step (special function with the DMS 21C)

DualMulti: Determination of the base material's wall thickness under a paint coating by means of a multiple echo sequence (DM 4, DM 4DL, DMS 2, DMS 21C)