

Jarbas Renato Bortolini

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DA LATERAL DE CESTOS
PARA LAVADORAS DE ROUPAS DE EIXO VERTICAL,
UTILIZANDO ABORDAGEM MULTI-OBJETIVO**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Orientador:
Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc.

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Bortolini, Jarbas Renato

Otimização estrutural da lateral de cestos para lavadoras de roupas de eixo vertical, utilizando abordagem multi-objetivo / Jarbas Renato Bortolini ; orientador, Eduardo Alberto Fancello - Florianópolis, SC, 2014. 120 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Otimização multiobjetivo. 3. Dimensionamento estrutural. 4. Análise numérica por elementos finitos e sistemas multicorpos. 5. Cesto de lavadoras de roupas de eixo vertical. I. Fancello, Eduardo Alberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Jarbas Renato Bortolini

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DA LATERAL DE CESTOS
PARA LAVADORAS DE ROUPAS DE EIXO VERTICAL,
UTILIZANDO ABORDAGEM MULTI-OBJETIVO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 27 de fevereiro de 2014.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Eduardo Alberto Fancello, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. José Carlos C. Pereira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. André Ogliari, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rodrigo de Souza Vieira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Aos meus pais, Renato e Tereza, pelo exemplo, esforço e apoio incondicional. À minha irmã, Nancy, pelo jeito admirável e carinhoso. Ao meu sobrinho e irmão, André, pelas lições.

AGRADECIMENTOS

Sobretudo, a DEUS, que tem abençoado cada passo da minha vida, me fortalecendo na saúde e na fé. Pela capacitação física, psíquica, mental e intelectual na conquista de cada um dos meus projetos. Pela sua força que me compele a seguir em frente.

Ao orientador, Prof. Eduardo A. Fancello, pela compreensão, ajuda, dedicação, orientação e amizade. Pela atenção ao transmitir seus preciosos conhecimentos, e cujo apoio me fortaleceu a chegar até aqui.

À minha mãe, por todo o amor e carinho dedicados e pela fé transmitida.

Ao meu Pai, pelo esforço e pelo inegável legado da virtude da retidão e da justiça.

À minha irmã e sobrinho, pelo incentivo e torcida.

À minha Família, pelos ensinamentos e estímulo para alcançar meus objetivos, dando-me total liberdade na busca de meus caminhos. Pela compreensão das ausências e pela confraternização de momentos, mesmo pequenos e simples, mas especiais.

Aos meus amigos pelas influências positivas, incentivos e por entender as ausências, cujas agradáveis companhias lastimei a falta.

Aos colegas da área de SBD, em especial ao amigo Alexandre L. Marangoni, pela ajuda incansável com as simulações estruturais e, sem dúvida, pelas enriquecedoras discussões.

Aos colegas Rafael O. Cechinel e José "Lopes" Correia pela auxílio com os experimentos e modelos virtuais.

À WHIRLPOOL Latin America pela oportunidade de realizar este trabalho, bem como pelo suporte necessário para a sua conclusão.

Ao POSMEC/UFSC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Catarina, que representado por todos os docentes, professores e funcionários, tem buscado incentivar e fomentar, mesmo que de modo economicamente limitado, o desenvolvimento neste país.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a construção deste trabalho.

"Feliz o homem que se compadece e empresta,
que regula suas ações pela justiça. Nada jamais o
há de abalar."

(Salmo 111)

RESUMO

O objetivo do trabalho consiste na aplicação de técnicas de otimização multiobjetivo a um estudo de redução de custo do cesto de lavadora de roupas de eixo vertical por meio da redução de massa. Como este componente possui função mecânica nas operações de lavagem, faz-se necessário um estudo de dimensionamento estrutural que avalie tal proposta, utilizando como ferramenta de análise a modelagem virtual por elementos finitos. Os resultados estruturais são confrontados com dados experimentais retirados de testes realizados com a técnica da extensometria, de forma a qualificar o modelo em uso. Como o cesto possui interface com a roupa durante as etapas de lavagem, as alterações que se fizerem necessárias em sua geometria para atender à função estrutural poderão gerar impactos no desempenho de lavagem. Assim, utilizando conhecimentos experimentais que integram ao estudo uma melhoria do desempenho de lavagem, parte-se de um esboço de geometria capaz de integrar três elementos: redução de custo, manutenção da integridade mecânica e aumento da eficiência de lavagem. Utilizando algoritmos genéticos elitistas para a determinação do conjunto ótimo de solução, usualmente denominado fronteira de Pareto, chega-se a uma geometria de lateral capaz de reduzir a espessura da parede da lateral do cesto, e que gera uma melhoria de desempenho de lavagem, dentro de critérios aceitáveis para tensão e deformação mecânica. Como conclusão, foi possível, mediante o uso combinado de conhecimento adquirido em estudos industriais e de ferramentas de análise e síntese, realizar modificações de projeto que simultaneamente reduziram custo e melhoraram a qualidade de um componente do produto, atualmente em linha no mercado, incentivando o uso desta abordagem no contexto industrial.

Palavras-chave: otimização multiobjetivo, dimensionamento estrutural, extensometria, análise numérica por elementos finitos, cesto para lavadora de roupas de eixo vertical.

ABSTRACT

The purpose of this study consists in introducing the multi objective optimization techniques to achieve cost reduction in vertical axes washer basket, considering mass reduction. As the washer basket has the mechanical functionality during the washing stages, a mechanical structural dimensioning must be done, performed virtually by finite element method (FEM). The structural results calculated by finite element analysis (FEA) tool are compared with experimental data, collected by extensometry tests in order to qualify the virtual model of FEA. Moreover, as the washer basket has contact with the clothes during the washing stages, any changes applied in basket wrapper profile which are necessary in its own geometry, to attend the structural functionality, can generate washing performance impact, for better or worse. Thus, from experimental background to improve the washing performance, make a draft proposal of basket wrapper geometric profile capable of integrating the three main objectives: cost reduction, mechanical structural maintenance and washing performance improvement. Using elitist genetic algorithms to determine the solution optimal set, usually called Pareto frontier, achieve a wrapper basket geometry profile capable of reducing the basket wrapper wall thickness, including the washing performance improvement regarding the acceptable structural criteria for stress and strain. As a conclusion, it was possible, combining use of knowledge gained by industrial studies, and tools of analysis and synthesis, to perform design modifications that simultaneously reduce costs and improve the quality of a product component, currently available in the market, encouraging the use of this approach in the industrial context.

Key-words: multi-objective optimization, structural dimensioning, strain gauge, finite element analysis, vertical axes washer basket.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de uma lavadora de eixo vertical.....	26
Figura 2 – Desenho ilustrativo de uma lavadora de eixo horizontal.	27
Figura 3 – Cesto fabricado com aço inoxidável para lavadoras de eixo vertical.....	29
Figura 4 - Cesto de aço inoxidável de lavadora de roupa de eixo vertical. (a) cesto com suas partes. (b) detalhe dos furos e calotas da lateral.....	41
Figura 5 – Desenho ilustrativo de uma lavadora de roupas de eixo vertical.....	42
Figura 6 - Modelagem da mancalização ou apoio.....	48
Figura 7 - Detalhe da folga entre cesto e tanque.	49
Figura 8 - Modelagem completa do cesto e suas interfaces.	50
Figura 9 - Formas de deformação da lateral do cesto. (a) deflexão. (b) expansão. (c) ovalização. (d) estufamento.	54
Figura 10 - Modelo geométrico da simulação.....	54
Figura 11 - Malha uniforme da lateral, com elementos de casca quadriláteros.....	55
Figura 12 - Detalhe do submodelo do furo da lateral.....	56
Figura 13 - Malha uniforme do fundo, com elementos de casca quadriláteros.....	56
Figura 14 - Malha uniforme do anel de balanceamento, com elementos de casca quadrilátero plano, com nó em cada vértice.	57
Figura 15 - Malha uniforme do suporte do cesto, com elementos sólidos tetraédricos.....	57
Figura 16 - Detalhamento do conjunto transmissão, com seus subcomponentes.....	58
Figura 17 - Elemento rigid spider entre anel de balanceamento e lateral do cesto.....	59
Figura 18 - Junção por elemento rigid spider.....	60
Figura 19 - Representação dos apoios, montados no conjunto transmissão.....	61
Figura 20 - Modelagem de uma máquina de lavar em MBS.....	62
Figura 21 - Lateral de um cesto inoxidável existente.....	65
Figura 22 - Tensões circunferenciais σ_h	66
Figura 23 - (a) extensômetro montado na superfície externa da lateral. (b) carga distribuída e desbalanceadora montada na superfície interna da lateral.....	66
Figura 24 - (a) regiões de colagem dos extensômetros. (b) detalhe do extensômetro.	67
Figura 25 - Tecnologia de transmissão dinâmica por sistema wireless.....	68

Figura 26 - Diagrama de planejamento do experimento.	70
Figura 27 - Análise gráfica das tensões na lateral, na direção circunferencial (θ).....	71
Figura 28 - Diagrama de planejamento da simulação numérica.	72
Figura 29 - Modelo geral da sollicitação sobre a lateral do cesto.	77
Figura 30 - Exemplo de um padrão geométrico em forma de nervura ondulada.....	78
Figura 31 - Padrão geométrico genérico do perfil da lateral.....	79
Figura 32 - (a) função objetivo desempenho de lavagem. (b) função objetivo custo de fabricação.....	84
Figura 33 - Gráfico Scatter entre as funções objetivo desempenho de lavagem versus custo de fabricação.	86
Figura 34 - Modelo estrutural numérico de uma das configurações simuladas.	89
Figura 35 - Árvore de amostragem aplicada a análise estrutural.	89
Figura 36 - Representação gráfica da deflexão radial em relação as variáveis: (a) espessura da lateral e profundidade da nervura, (b) profundidade e inclinação da nervura, (c) espessura da lateral e inclinação da nervura.	90
Figura 37 - Gráfico Scatter entre as funções objetivo deflexão radial versus custo de matéria-prima.....	92
Figura 38 - Gráfico Scatter entre as funções objetivo tensão circunferencial versus deflexão radial.....	93
Figura 39 – Quantidade de carga desbalanceadora em função da carga seca.....	104
Figura 40 – Posição vertical (altura) da carga desbalanceadora.	105
Figura 41. – Modelos de rosetas de extensômetros elétricos de resistência.....	107
Figura 42. – Ponte de Wheatstone.	109
Figura 43. – (a) ponte completa de Wheatstone. (b) meia ponte de Wheatstone. (c) um quarto de ponte de Wheatstone.....	110
Figura 44. – Modelos de rosetas de extensômetros elétricos de resistência.....	111
Figura 45 - modelo geral de um processo.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo de dados experimentais versus simulados.....	73
Tabela 2 - Indicadores de custo e as variáveis que os determinam.	80
Tabela 3 - Correlação dos comportamentos físicos com as variáveis dimensionais.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADAMS - Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems
CAD - Computer Aided Design
CAE - Computer Aided Engineering
DOE - Design of Experiments
FAC - Fadiga de Alto Ciclo
FEA - Finite Element Analysis
FEM - Finite Element Method
MBS - Multibody System
MOGA - Multi-objective Genetic Algorithm
MSE - Measurement System Evaluation
NSGA - Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
OVAT - One Variable at Time

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DAS LAVADORAS DE ROUPAS	25
1.2. OBJETIVO E MOTIVAÇÃO.....	28
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	30
1.4. METODOLOGIA DE PROJETO.....	31
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1. ESTUDOS GERAIS SOBRE LAVADORAS DE ROUPAS	33
2.2. METODOLOGIA DA OTIMIZAÇÃO	34
2.2.1. Otimização Multiobjetivo.....	34
2.2.2. Conceitos de Solução	35
2.2.3. Métodos de Solução	36
3 CARACTERIZAÇÃO DOS CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO ENVOLVIDOS NO DIMENSIONAMENTO DOS CESTOS DAS LAVADORAS DE ROUPAS DE EIXO VERTICAL.....	41
3.1. FUNÇÕES E ETAPA CRÍTICA DE OPERAÇÃO	41
3.2. DETALHAMENTO DOS CARREGAMENTOS, APOIOS E RESTRICÇÕES DURANTE A ETAPA DE CENTRIFUGAÇÃO	45
3.2.1. Carregamentos	46
3.2.2. Apoios	48
3.2.3. Restrições.....	49
3.3. VARIÁVEIS DE DIMENSIONAMENTO MECÂNICO	51
4 CONSTRUÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL NUMÉRICO PARA O CESTO DE LAVADORA DE ROUPAS DE EIXO VERTICAL.....	53
4.1. MODELAMENTO GEOMÉTRICO	54
4.2. MALHA.....	55
4.2.1. Lateral do Cesto.....	55
4.2.1.1. Submodelo da lateral	55
4.2.2. Fundo do Cesto	56
4.2.3. Anel de Balanceamento	57

4.2.4. Suporte do Cesto.....	57
4.2.5. Conjunto Transmissão	58
4.3. INTERFACES / CONTATOS.....	58
4.3.1. Contato Lateral - Anel de balanceamento	59
4.3.2. Contato Lateral - Fundo	59
4.3.3. Contato Fundo - Suporte.....	59
4.3.4. Contato Suporte - Conjunto transmissão	59
4.4. CARGA DISTRIBUÍDA.....	60
4.5. CARGA DESBALANCEADORA (CONCENTRADA)	60
4.6. APOIOS (MANCALIZAÇÃO).....	61
4.7. SIMULAÇÃO QUASI-ESTÁTICA.....	61
4.8. ANÁLISE DINÂMICA EM SISTEMA MULTICORPOS	62
4.9. LIMITAÇÕES DO MODELO	63
5 MODELAGEM EXPERIMENTAL PELA TÉCNICA DA	
EXTENSOMETRIA	65
5.1. MONTAGEM DO EXPERIMENTO.....	65
5.1.1. Posicionamento dos extensômetros na lateral	65
5.1.2. Tecnologia de Medição.....	68
5.2. PLANEJAMENTO DA ESTRATÉGIA DO EXPERIMENTO.....	68
5.3. COMPARATIVO DOS VALORES EXPERIMENTAIS COM OS DA	
SIMULAÇÃO NUMÉRICA	71
5.3.1. Simulação Numérica.....	71
6 CONSTRUÇÃO DO PROJETO DE OTIMIZAÇÃO DA	
LATERAL DO CESTO.....	75
6.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO.....	75
6.2. DEFINIÇÃO GERAL DO PADRÃO GEOMÉTRICO DA LATERAL.....	76
6.2.1. Estudo do comportamento estrutural (resistência mecânica).....	76
6.2.2. Estudo do comportamento do desempenho de lavagem	77
6.2.3. Escolha do padrão geométrico da lateral.....	78
6.3. DEFINIÇÃO DOS PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO.....	79

7 SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO DA LATERAL DO CESTO.....	83
7.1. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO 1 - MAXIMIZAR O DESEMPENHO DE LAVAGEM RESTRITO A CUSTO DE FABRICAÇÃO	83
7.2. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO 2 - MINIMIZAR O CUSTO DE MATÉRIA-PRIMA RESTRITO A RESISTÊNCIA MECÂNICA	87
8 RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	95
8.1. CONCLUSÕES	95
8.2. CONTRIBUIÇÕES	96
8.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE A – Caracterização da Carga de Consumidor (Load Characterization).....	103
APÊNDICE B – Técnica Experimental da Extensometria.....	107
APÊNDICE C – Resumo da Técnica Experimental DOE (Design of Experiments).....	113
APÊNDICE D – Limite de Fadiga	119

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DAS LAVADORAS DE ROUPAS

Desde que a sociedade começou a trocar as tarefas de casa por cargos assalariados, e levando-se em conta a abertura de mercados que propiciou o êxodo das pessoas para os grandes centros, a rotina de “cuidar do lar” se tornou uma atividade secundária, porém totalmente necessária.

Dentro do contexto das atividades do lar, a lavagem de roupas sempre se mostrou uma das mais onerosas, tanto pelo tempo quanto pelos esforços físicos necessários, uma vez que as lavadoras de roupas automáticas são um produto bastante recente.

Ainda que o processo de lavagem de roupas já tivesse se tornado uma operação industrial, encadeada pelo desenvolvimento das lavanderias comerciais, a atividade sempre se mostrou dispendiosa, tanto do ponto de vista temporal como do ponto de vista econômico. Os primeiros sistemas de lavagem reproduziam o movimento das mãos humanas, sendo as roupas introduzidas uma de cada vez, o que, além de trazer baixa eficiência, deixava os donos de tais estabelecimentos bastante insatisfeitos.

Com isto, houve a criação de um moderno sistema de lavagem, em que as roupas ficavam submersas em um insumo líquido (detergente) e eram agitadas em solução. Assim, as roupas ficavam de molho na solução com o detergente e, posteriormente, eram introduzidas em um sistema mecânico de torção para a extração da água. O uso de máquinas com este sistema é datado de 1767, tendo sido Jacob Christian Schäffern seu inventor (TÜRKY, 1992).

Com a invenção da eletricidade, vários equipamentos receberam novas tecnologias, inclusive as máquinas de lavar. No início do século XIX surgiu, no mercado, a primeira lavadora de eixo horizontal com cesto rotativo, que era comandado por um motor elétrico (TÜRKY, 1992).

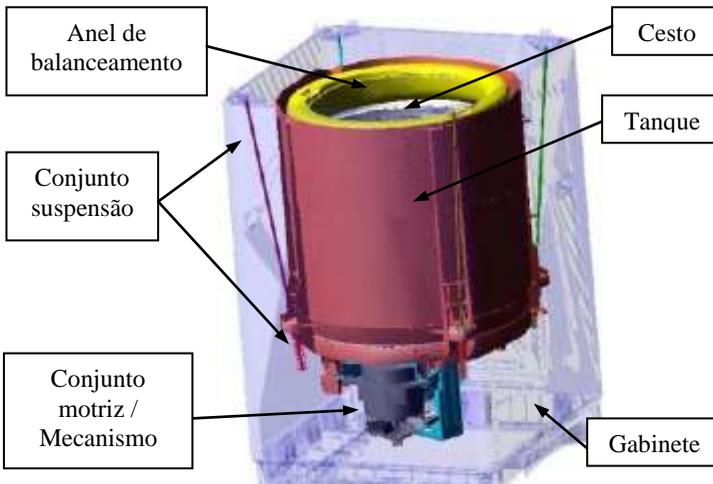
Essas inovações aplicadas às lavadoras comerciais, visando a melhoria de produtividade e desempenho, desencadearam o nascimento da indústria de lavadoras domésticas.

Com base nesta crescente demanda, abriu-se um mercado bastante promissor, vislumbrado por várias empresas. Neste panorama, houve desenvolvimentos que culminaram no que encontramos hoje, a lavadora de eixo vertical, ou *top loader* (Figura 1), e a lavadora de eixo

horizontal ou *front loader* (Figura 2), sendo a primeira culturalmente utilizada na América Central, América do Sul e países asiáticos, e a segunda na América do Norte e Europa.

A Figura 1 mostra esquematicamente o conceito de uma lavadora de eixo vertical.

Figura 1 – Desenho esquemático de uma lavadora de eixo vertical.

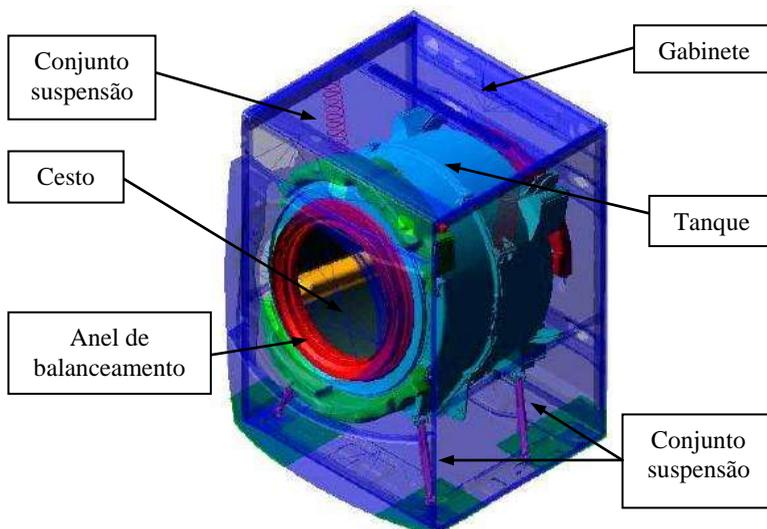


As lavadoras de eixo vertical, ou *top loader*, possuem esta definição por terem o eixo de rotação do cesto na posição vertical. Normalmente, como este conceito de lavadora opera em rotações mais baixas durante o ciclo de centrifugação, as roupas entregues após o ciclo de lavagem se encontram mais úmidas, quando comparadas às lavadoras de eixo horizontal. De forma geral, a escolha por este conceito se deve principalmente à questão cultural, além do fato de tais lavadoras permitirem o abastecimento da roupa de modo mais fácil e possuírem maior capacidade. Entretanto, para a maioria dos mercados existem argumentos técnicos e econômicos que explicam a adesão, como, por exemplo, o custo mais reduzido e as condições climáticas com temperaturas mais altas, que fazem com que não seja necessário que as roupas estejam extremamente secas após o ciclo de lavagem.

Já as lavadoras de eixo horizontal (Figura 2), também chamadas de *front loader*, operam com o eixo de rotação na horizontal, sendo mais atrativas nos mercados da América do Norte e Europa, principalmente pelas baixas temperaturas, uma vez que, por operarem com rotações

mais elevadas na centrifugação, entregam roupas mais secas, demandando um menor consumo de energia pelas secadoras, que são aparelhos amplamente difundidos em regiões que apresentam características climáticas semelhantes às dos países norte-americanos e europeus.

Figura 2 – Desenho ilustrativo de uma lavadora de eixo horizontal.



De forma geral, as funções principais das lavadoras são lavar e secar as roupas. Os atributos, para ambos os tipos de lavadoras, ocorrem em três fases durante o ciclo de lavagem, sendo elas: *molho* (lavagem química – ação química dos insumos sobre a sujeira), *agitação* (lavagem mecânica – ação de esfregar a roupa) e *centrifugação* (drenagem – ação de retirada da água da roupa).

No caso da etapa de *agitação*, a lavagem mecânica ocorre de maneira diferente dentre os tipos de lavadoras. No caso das de eixo vertical (Figura 1) a lavagem é feita pela oscilação do agitador (ou *impeller*) em relação ao eixo vertical. Já nas lavadoras de eixo horizontal (Figura 2), a lavagem ocorre devido ao movimento alternado e lento do cesto em relação ao eixo horizontal.

Atualmente, no Brasil, quando é medida a presença dos eletrodomésticos nos lares da população, verifica-se que refrigeradores e fogões estão presentes, respectivamente, em 93 e 98% das casas dos

brasileiros. No entanto, para as lavadoras de roupas o panorama é bastante diferente, perfazendo um valor de 44%¹. Um dos argumentos é norteado pelas leis referentes aos bens de consumo, que não tratam as lavadoras de roupas como bens necessários para o cidadão, onerando-as com uma tributação de 400% quando comparadas aos fogões, por exemplo.

Com base neste panorama, um dos caminhos vislumbrados pelos fabricantes é reduzir o custo do produto de modo que sejam garantidos os mesmos requisitos de projeto e qualidade.

Cada vez mais, o grande desafio está em atender exigências e expectativas do consumidor por produtos de alta qualidade, de baixo custo, inovadores e sustentáveis. Diante de um mercado de grande competitividade, principalmente com a chegada das grandes marcas asiáticas, as empresas precisam utilizar métodos, processos e ferramentas mais eficientes, o que as direcionam a investir cada vez mais em setores de tecnologia, disponibilizando ferramentas e metodologias que reduzam o tempo de desenvolvimento, assegurando, assim, um retorno rápido dos investimentos.

1.2. OBJETIVO E MOTIVAÇÃO

O objetivo do presente trabalho consiste na redução de custo da lateral do cesto de aço inoxidável (Figura 3) da lavadora de eixo vertical ou *top loader*, utilizada no mercado brasileiro. Este tipo de lavadora responde pela grande maioria das lavadoras comercializadas nesse segmento.

A redução de custo é vislumbrada pela redução da espessura da lateral do cesto, já que reduções no diâmetro e na altura do mesmo impactam no seu volume útil, o qual deve ser respeitado. Neste caso, estudos de dimensionamento mecânico estrutural devem ser aplicados ao cesto em aço inoxidável. A priori, como a redução da espessura da lateral impacta na rigidez, o que aumenta as deflexões do cesto durante sua operação, um estudo de alteração da geometria da lateral deverá ser avaliada para que restrições estruturais sejam garantidas. A partir desta premissa, impactos em desempenho de lavagem também devem estar contemplados nas análises.

¹ Fonte IBGE PNAD 2010

Figura 3 – Cesto fabricado com aço inoxidável para lavadoras de eixo vertical.



Atualmente, a utilização de cestos em material polimérico (homopolímero) ocorre em grande escala, o que se deve ao baixo custo. Entretanto, a abordagem do trabalho com cesto em aço inoxidável se torna mais interessante, visto que o material apresenta maior durabilidade, requinte e beleza, agregando valor ao produto. De qualquer forma, um estudo semelhante ao presente pode ser aplicado, posteriormente, a cestos construídos com material polimérico.

A motivação deste trabalho decorre, principalmente, da exigência cada vez maior, por parte dos consumidores, de produtos com qualidade superior, *design* inovador, alto desempenho e durabilidade, alavancando assim a necessidade de produtos mais competitivos e processos mais enxutos. Neste contexto, as etapas de desenvolvimento de produto vêm passando por mudanças drásticas no que tange a migração da cultura tradicionalista, baseada no conceito de tentativa-e-erro e composta por inúmeros ciclos de design-construção-teste, para uma metodologia de uso de ferramentas CAD/CAE que, através da geração de modelos de simulação permite realizar etapas de estudo e otimização, reduzindo, assim, a quantidade de protótipos físicos, retrabalho e falhas de projeto, aumentando, conseqüentemente, a qualidade e desempenho dos produtos.

O mercado brasileiro não é diferente no que diz respeito às lavadoras de roupas. Os custos envolvidos, durante as etapas de desenvolvimento de produto, estão atrelados aos recursos empregados, ao uso de componentes otimizados e, ainda, a materiais mais baratos. Neste cenário, as ferramentas computacionais têm se mostrado cruciais para o conhecimento do produto, uma vez que permitem otimizar componentes, prever e corrigir falhas e reduzir, ou até mesmo suprimir, a necessidade de protótipos reais.

No presente trabalho foram utilizados modelos matemáticos numéricos para o dimensionamento estrutural do *cesto inoxidável*, como pode ser visto na Figura 3. Esses modelos foram confrontados com análises experimentais baseadas na técnica da *extensometria*.

Como ferramenta de dimensionamento estrutural, utiliza-se a técnica de elementos finitos, assim como ferramentas auxiliares para geração de malha, sendo elas, respectivamente, os códigos comerciais ANSYS Mechanical APDL e HYPERMESH. No caso da aplicação das ferramentas de otimização multiobjetivo, faz-se uso do código comercial ModeFrontier.

O objetivo técnico deste estudo consiste em encontrar uma geometria de lateral de cesto de lavadora capaz de reduzir a massa e satisfazer critérios de rigidez mecânica da lateral, de desempenho de lavagem, de custo de fabricação, assim como de deformações e tensões mecânicas.

Como se trata de um trabalho industrial desenvolvido junto à empresa WHIRLPOOL Latin America, informações relevantes estão devidamente suprimidas, de forma a garantir proteção tecnológica.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho aborda o tema da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução. Contextualização do problema, descrevendo a evolução e importância das lavadoras no contexto atual, além de explicitar a motivação e objetivo do estudo.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica. Apresenta resumidamente estudos relacionados ao dimensionamento das lavadoras de roupas, considerando o desempenho dinâmico durante a centrifugação. Além disso, aborda-se a metodologia de otimização multiobjetivo, mencionando conceitualização, formulação de problemas e técnicas de solução comumente utilizadas.

Capítulo 3: Caracterização dos Carregamentos e Condições de Contorno Envolvidos no Dimensionamento dos Cestos de Lavadoras de Roupas de Eixo Vertical. Aqui, são descritas as condições de contorno envolvidas e os carregamentos que o cesto de lavadora de roupas de eixo vertical sofre durante a etapa mais crítica de operação, a centrifugação. São abordadas também as variáveis envolvidas no dimensionamento mecânico do componente.

Capítulo 4: Construção do Modelo Estrutural Numérico para o Cesto de Lavadora de Roupas de Eixo Vertical. Considerando a simulação numérica como critério de dimensionamento mecânico,

descreve-se o modelamento geométrico, com os carregamentos, apoios e tipo de malha adotados, abordando as limitações intrínsecas ao modelo no que se refere à representatividade em relação ao componente real.

Capítulo 5: Modelagem Experimental pela Técnica da Extensometria. Neste capítulo, é feita a explanação da aplicação da extensometria em um cesto de lavadoras, já comercializado, de forma a explicar os níveis de deformações e tensões mecânicas oriundos da etapa de centrifugação.

Capítulo 6: Construção do Projeto de Otimização da Lateral do Cesto. Neste, descreve-se a construção do projeto de otimização multiobjetivo, considerando a separação em dois problemas, de forma a facilitar a convergência e a tomada de decisão sobre o conjunto ótimo de soluções.

Capítulo 7: Solução dos Problemas de Otimização da Lateral do Cesto. São apresentadas as definições dos modelos de otimização adotados, suas funções objetivo, as variáveis de projeto, suas restrições, os parâmetros de convergência do algoritmo e a escolha da solução frente ao conjunto ótimo de soluções definido pela fronteira de Pareto.

Capítulo 8: Resultados e Conclusões. Conclusão sobre os resultados obtidos, sugerindo ideias e melhorias para futuros trabalhos.

1.4. METODOLOGIA DE PROJETO

Como trata-se de um trabalho relacionado a aplicação de modelos teóricos, em um projeto industrial, o uso de uma metodologia de projeto satisfatória garante que a seleção, o planejamento, a execução e a entrega sejam realizadas de forma consistente. Desta forma os passos pertinentes ao desenvolvimento do trabalho podem ser expressos pela seguinte metodologia de projeto:

1º) Identificação da oportunidade, através da factibilidade de implementação do projeto quando comparada ao retorno do investimento;

2º) Mapeamento dos custos e investimentos necessários para a alteração da lateral do cesto;

3º) Entendimento dos fenômenos físicos envolvidos no componente, durante todo o ciclo de funcionamento, bem como da caracterização das condições de contorno associadas;

4º) Construção do modelo de dimensionamento numérico, capaz de calcular os níveis de tensão, deformação e deslocamento do componente.

da técnica da extensometria, de forma a avaliar o modelo em uso;

5º) Correlacionar o modelamento numérico com o real através

6º) Construção do Projeto de Otimização da Lateral do Cesto;

7º) Solução dos Problemas de Otimização da Lateral do Cesto;

8º) Avaliação dos resultados para viabilização técnica do trabalho;

9º) Análise financeira detalhada, a partir da solução encontrada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ESTUDOS GERAIS SOBRE LAVADORAS DE ROUPAS

A partir da invenção da máquina de lavar roupas, em meados do século XVIII, vem ocorrendo um processo contínuo de desenvolvimento na área de lavadoras.

As referências publicadas, relacionadas às lavadoras de roupas, contemplam análises que levam em consideração o desempenho dinâmico e estão atreladas aos conceitos de sistemas de suspensão e de balanceamento, diferentemente do que é tratado neste trabalho. Obviamente, o interesse pelo comportamento dinâmico é totalmente justificado, visto que é na etapa da centrifugação que os maiores carregamentos mecânicos ocorrem, podendo ser minimizados por meio do uso de sistemas de suspensão e balanceamento mais eficientes. Assim, considera-se, neste trabalho, a utilização de sistemas de suspensão e balanceamento usados nas plataformas presentes, visto que são os mais adequados dentro do panorama atual de custo e qualidade.

No entanto, a quantidade de trabalhos publicados relacionados ao dimensionamento puramente mecânico das lavadoras de roupas é altamente restrita, devido, principalmente, ao protecionismo tecnológico defendido pelos fabricantes. Diante disto, a revisão bibliográfica aqui tratada, aborda os estudos publicados sobre lavadoras de roupas, relatando conceitos atuais sobre sistemas de suspensão e balanceamento, que possibilitaram quantificar analítica e numericamente os carregamentos que agem sobre o cesto, tema do proposto trabalho.

É na etapa de centrifugação, para extrair a água da roupa, que o cesto gira em rotações na ordem de 600 a 1200 RPM. A carga concentrada de roupa, advinda de sua má distribuição dentro do cesto, gera as forças desbalanceadoras. Assim, para garantir estabilidade dinâmica, o *sistema de suspensão* é o responsável por minimizar a transmissão das amplitudes de vibração ao gabinete; os *sistemas de balanceamento*, por sua vez, reduzem as forças advindas do desbalanceamento, e ambos convergem para melhorar o comportamento dinâmico, reduzindo os níveis de ruído e vibração, evitando o deslocamento da lavadora. Com a crescente demanda por produtos mais eficientes, as lavadoras de roupas vêm sofrendo aumento gradativo de rotação, garantindo roupas mais secas após o ciclo de centrifugação. Isto é viabilizado à medida que novos sistemas de suspensão e balanceamento são desenvolvidos.

No caso dos *sistemas de suspensão*, os dimensionamentos atuais devem levar a projetos com custo reduzido, o que causa desafios bastante significativos. Não muito mais desafiadores que as exigências presentes ao longo da evolução que os mesmos sofreram durante o século passado, iniciada com BAGEPALLI (1987), que criou uma suspensão montada na base, chegando aos estudos mais recentes de CONRAD (1994), que apresentou as características fundamentais dos sistemas de suspensões de lavadoras de eixo vertical e horizontal, bem como a modelagem da suspensão garantindo boa correlação com o comportamento dinâmico das lavadoras estudadas.

Quanto aos *sistemas de balanceamento*, estes vêm sendo estudados com aplicação à lavadoras de roupas desde sua invenção, começando com Leblanc que, em 1916, propôs um simples sistema dinâmico de balanceamento automático, passando por ZUOXIN (1991), que descreveu o conceito do anel de *Leblanc* aplicado a lavadoras de roupas (então chamado de anel hidrocompensador), chegando aos estudos mais recentes conduzidos por: CONRAD (1994), que apresentou um novo sistema de balanceamento denominado elástico; CONRAD e SOEDEL (1998), que avaliaram o uso de anéis de balanceamento, definindo o procedimento genérico de controle de sistemas rotativos desbalanceados; e BAE (2002), que mostrou a formulação analítica de um anel hidrocompensador durante o comportamento dinâmico de uma lavadora de roupas de eixo vertical, bem como a sua validação experimental.

2.2. METODOLOGIA DA OTIMIZAÇÃO

2.2.1. Otimização Multiobjetivo

Durante a etapa de elaboração do problema de otimização, é comum deparar-se com mais de um critério a ser otimizado, ou seja, se necessita de mais de uma função objetivo que cubra todo o escopo do projeto de forma simultânea. Neste caso, trata-se de uma abordagem *multiobjetivo*. (ARORA, 2004).

É possível, ainda, que os objetivos possam ser conflitantes entre si e que o problema possa sofrer restrições. Logo, há a possibilidade de que o conceito de otimalidade utilizado em otimização mono-objetivo não seja aplicado (COELLO, 2006).

Para o problema de um único objetivo, ou mono-objetivo, tem-se como finalidade encontrar uma solução que otimize a única função objetivo. Já na abordagem de otimização multiobjetivo, é comum

interpretar a questão da mesma forma, ou seja, buscar uma solução ótima correspondente a cada uma das funções objetivos, o que é errado (DEB, 2009).

Quando se fala em otimização multiobjetivo, o conceito de otimalidade tem como base a noção aplicada por Francis Ysidro Edgeworth em 1881 e posteriormente globalizada por Vilfredo Pareto em 1896, sendo então denominada ótimo de Pareto. Vilfredo Pareto alegou que uma solução ótima deveria oferecer um equilíbrio entre as múltiplas funções objetivo, de forma que a tentativa de aprimorar o valor de uma função isoladamente resultaria na piora de uma ou das demais funções (COELLO, 2006).

Desta forma, a noção de otimalidade para otimização multiobjetivo se baseia em um conjunto de soluções que apresentam um compromisso entre seus objetivos. Um conjunto de soluções só pode ser denominado de ótimo de Pareto se, em cada solução do conjunto, não existir outra solução viável capaz de atingir o melhor valor de um dos objetivos sem que, simultaneamente, prejudique pelo menos um dos demais objetivos. Logo, o ótimo de Pareto, em geral, não fornece uma única solução, mas um conjunto de soluções.

Um modelo geral de problema de otimização multiobjetivo é definido por um conjunto de funções objetivo a serem otimizadas, podendo ser minimizadas ou maximizadas, além de um conjunto de restrições que devem ser respeitadas para que a solução seja viável. Por consequência, as restrições definem o espaço viável de projeto.

Assim, um conjunto de soluções viáveis é definido como conjunto ótimo de Pareto, formando a Fronteira de Pareto. De fato, a fronteira de Pareto é o conjunto formado sobre o contorno do espaço viável de projeto, definido simplesmente como o conjunto dos valores das funções objetivo correspondentes aos pontos viáveis. Por exemplo, no caso de duas funções objetivo, para um problema de minimização, os pontos mínimos de cada uma das funções objetivos definem os pontos limites do conjunto ótimo de Pareto, ou simplesmente fronteira de Pareto.

2.2.2. Conceitos de Solução

Quando se fala em determinar a solução de um problema de otimização multiobjetivo, sabe-se da complexidade envolvida, quando comparada à otimização mono-objetivo, devido à necessidade de encontrar o balanço entre as funções objetivo.

Desta forma, são apresentados alguns conceitos de solução relacionados à abordagem:

- Otimalidade de Pareto ou ótimo de Pareto: um ponto x^* dentro de um espaço viável S é ótimo de Pareto se, e somente se, não existe outro ponto x dentro do conjunto S , de modo que $f(x) \leq f(x^*)$, e com pelo menos uma $f_i(x) < f_i(x^*)$. De forma mais simplista - um ponto x^* dentro do espaço viável de projeto S é denominado de ótimo de Pareto se não existe outro ponto x dentro do conjunto S que reduz, pelo menos, uma função objetivo sem aumentar uma outra.

- Não-dominância e Dominância: um vetor das funções objetivo $f^* = f(x^*)$ dentro de um espaço viável de projeto Z é não-dominado se, e somente se, não existe outro vetor f dentro do conjunto Z , de modo que $f \leq f^*$, e com pelo menos uma $f_i < f_i^*$. Do contrário, f^* é dominada. O conjunto de todos os pontos não-dominados é chamado de fronteira de Pareto.

Em algoritmos numéricos a não-dominância é geralmente utilizada para subconjuntos de pontos, sendo que um ponto pode ser considerado não-dominado enquanto outros, dentro do mesmo subconjunto, podem não o ser. No caso da otimalidade de Pareto, esta considera uma condição de solução para todo o espaço de projeto, não permanecendo limitada ao espaço viável de projeto. Em algoritmos genéticos e em alguns métodos de procura randômica, estes atualizam e armazenam, em cada iteração, um conjunto discreto de potenciais pontos de solução, selecionados a partir do conjunto de soluções não-dominados.

2.2.3. Métodos de Solução

Existem variados tipos ou métodos de soluções para problemas de otimização multiobjetivo, a fim de determinar uma solução ótima de Pareto, ou um conjunto destas.

Normalmente os métodos necessitam da definição da importância de cada uma das funções objetivo, ou critérios. A partir disto, verifica-se que há variadas formas para a tomada de decisões, uma vez que diferentes informações sobre a importância dos critérios podem ser adotadas. Assim, não existe uma indicação clara sobre qual método deve-se recomendar para resolver um dado problema.

No entanto, como o projeto em estudo utiliza o código comercial modeFrontier para a resolução do problema de otimização, o

método de solução adotado é o genético, escolhido devido à natureza do problema em estudo.

Os algoritmos genéticos foram desenvolvidos entre as décadas de 60 e 70 do século passado, inspirados pela teoria evolucionista que explica a origem das espécies. Segundo essa teoria, na natureza, espécies fracas ou inaptas, dentro de seus ambientes, estão condicionadas à extinção pela seleção natural. Já as espécies fortes têm grande oportunidade de passar seus genes para futuras gerações pelo processo de reprodução. Em longo prazo, espécies que carregam a combinação correta dos genes se tornam dominantes em suas populações. Algumas vezes, durante o lento processo de evolução, mudanças aleatórias podem ocorrer nos genes e, no caso de propiciarem vantagens sobre o desafio de sobrevivência, novas espécies evoluem a partir das velhas. Porém, no caso de mudanças mal sucedidas, as espécies são eliminadas pela seleção natural.

A vantagem dos algoritmos genéticos é que eles não necessitam de informação do gradiente (método de otimização embasada no conceito geométrico do vetor gradiente de uma função), podendo ser efetivos sem necessitar de informações acerca da natureza da função. Eles se utilizam da teoria estocástica através da combinação de números aleatórios e informações de iterações anteriores para avaliar e melhorar a população (conjunto de pontos que se encontram dentro do espaço de projeto) ou grupo de potenciais soluções. Outra importante característica está na habilidade de convergir para o melhor conjunto ótimo de Pareto, ao invés de um único ponto ótimo de Pareto.

Entretanto, o método também tem seus desafios, que estão em avaliar a aptidão da solução encontrada, bem como incorporar a ideia de otimalidade de Pareto e, assim, determinar que pontos de solução potenciais devem ser selecionados - neste caso sobreviver, para a próxima iteração, ou geração. Desta forma, os algoritmos genéticos abordados no trabalho são os que já incorporam o método elitista na seleção da população ótima de Pareto.

No geral, existem diferentes algoritmos genéticos que utilizam técnicas diferenciadas para combinar, modificar e selecionar a próxima geração. Algumas dessas técnicas mais relevantes são descritas a seguir:

- ***Elitist Strategy Algorithm (MOGA)***: a maioria dos métodos de otimização genética multiobjetivo incorporam alguns filtros para evitar a perda de potenciais soluções *ótima de Pareto*. Logo, a estratégia deste método está em garantir que o conjunto de soluções ótimo sempre seja imune à seleção, sobrevivendo para as próximas gerações. Desta

forma, todas as soluções *não-dominadas* descobertas são consideradas como *elite* das soluções. Entretanto, a implementação da estratégia *elitista* não é tão simples como acontece em modelos de um único objetivo, pois necessita de um grande número de possíveis soluções *elite*.

O método pode se utilizar de duas estratégias para a implementação do *elitismo*: a manutenção das soluções elites na população ou seu devido armazenamento e reintrodução na população.

Na primeira, a aleatoriedade não garante que a solução *não-dominada* sobreviva na próxima geração. Baseado nisso, copia-se todas as soluções *não-dominadas* da população atual para a próxima geração, e preenchendo o restante desta última com soluções *dominadas* remanescentes da própria população atual. A limitação está quando o número total de soluções *não-dominadas*, somando pais e filhos, é maior que a população inicial. A forma encontrada está em remover soluções, quando alcançar a quantidade máxima da população, considerando a manutenção da diversidade da fronteira atual *não-dominada*, realizada através da escolha aleatória de duas soluções e de uma que pertença a de maior nicho.

No caso da segunda estratégia, a solução *não-dominada* (*elitista*) armazenada é atualizada a cada iteração, e uma nova solução *elitista* é criada pela remoção das soluções *elite dominadas*, agora classificadas por *dominadas*, resultantes da nova solução, o que torna computacionalmente dispendioso. Outro ponto crítico é lidar com o tamanho extremamente grande da solução armazenada, realizado através de uma técnica de "poda" abordado pelo método da média de agrupamento. De qualquer forma, o maior desafio da técnica está em reintroduzir as soluções elite na população, alcançada com a atribuição de um valor para a aptidão em cada um dos conjuntos, elite e população.

- ***Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)***: este método foi desenvolvido recentemente por DEB, sendo um algoritmo evolucionário elitista. Seus principais atributos estão relacionados à rapidez na escolha da solução *não-dominada*, com base em uma estratégia inteligente de ordenação.

A versatilidade do método está em manter a flexibilidade para diferentes naturezas de problemas. Este requer a definição de uma função objetivo para cada tarefa de otimização, onde os valores destas funções são ordenados pelos indivíduos gerados, a fim de escolher os melhores pais para a próxima geração. A primeira ordenação parcial é realizada de acordo com a *dominância de Pareto*: os pontos são

agrupados em subconjuntos chamados de *fronteiras*. Cada fronteira é composta por pontos não-dominados uns pelos outros. Dentro de cada fronteira, os pontos são ordenados dependendo de um operador que define a distância dos pontos até o "aglomerado" deles, que promove os indivíduos localizados em regiões menos povoadas do espaço de projeto. O tamanho da população original é mantida constante durante uma rodada de otimização, onde a população dos filhos mantém o mesmo tamanho. A ordenação é aplicada para unir estes dois conjuntos de pontos e a nova população é obtida extraíndo o número desejado de pontos de mais alta classificação.

Este método *elitista* emprega o armazenamento de todas as soluções *não-dominadas* descobertas, mantendo sempre fixo o tamanho da população. Esta abordagem orienta o processo de seleção na direção de uma *fronteira de Pareto* espalhada uniformemente. Além disso, o método de tratamento das restrições não faz uso de parâmetros de penalização, implementando uma modificação na definição do domínio, a fim de resolver eficientemente os problemas de restrições dos variados objetivos.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS CARREGAMENTOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO ENVOLVIDOS NO DIMENSIONAMENTO DOS CESTOS DAS LAVADORAS DE ROUPAS DE EIXO VERTICAL

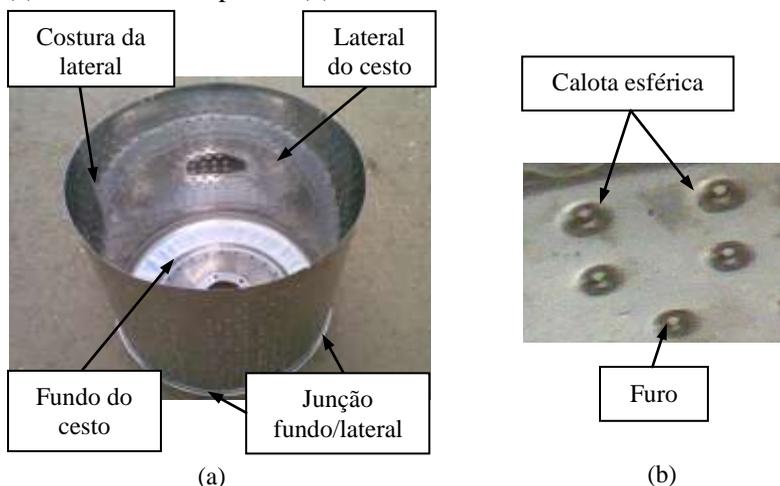
3.1. FUNÇÕES E ETAPA CRÍTICA DE OPERAÇÃO

Quando se trata de lavar roupa, as pessoas normalmente associam o efeito mecânico ao princípio de remoção da sujeira. Entretanto, como já abordado no Capítulo 1, desde a introdução do "moderno sistema de lavagem", a partir de meados do século XVIII, a remoção da sujeira ocorre em duas etapas, na *mecânica* e na *química*, visto que as variadas sujidades, encontradas no dia-a-dia, podem sofrer o processo de remoção pelo efeito químico, mecânico ou mesmo de ambos.

Apesar do ciclo completo da lavagem de roupa ser composto por três fases: *molho*, *agitação* e *centrifugação* - a etapa de lavagem propriamente dita, contempla apenas a fase de *molho* e *agitação*, que é onde ocorre a remoção química e mecânica, respectivamente, já a *centrifugação* é a etapa de extração da água.

Para a análise dos carregamentos que atuam sobre o cesto, é necessário primeiramente entender fisicamente sua operação e função dentro do sistema de lavagem, além da sua interface com os demais componentes.

Figura 4 - Cesto de aço inoxidável de lavadora de roupa de eixo vertical. (a) cesto com suas partes. (b) detalhe dos furos e calotas da lateral.



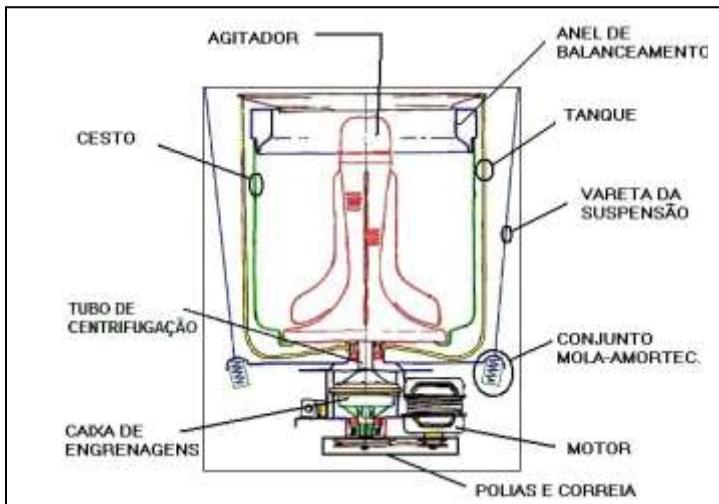
O cesto é composto, especificamente, por duas partes, a *lateral* e o *fundo*, que são unidos pelo processo de rebordamento, como pode ser visto na Figura 4-a pelo detalhe "junção do fundo com a lateral".

Como a lateral é fabricada a partir de uma chapa de aço inoxidável, esta sofre o processo de conformação por calandra para atingir a geometria cilíndrica (tubo). Em seguida, as suas extremidades são costuradas pelo processo de dobra, denominado crimpagem, sem utilizar qualquer processo de soldagem. A lateral possui, distribuída ao longo de sua superfície interna, calotas esféricas e furos estampados, de dentro para fora. Na Figura 4-b é possível verificar que os furos estão localizados no centro das calotas, sendo os furos necessários para o escoamento da água durante a centrifugação. Nesta etapa, as calotas são responsáveis por evitar que a roupa tampe os furos devido à força centrífuga, impedindo o escoamento da água.

No caso do fundo (Figura 4-a), este também é fabricado a partir de uma chapa de aço inoxidável que, através do processo de estampagem, adquire uma geometria próxima à de um prato, o que proporciona alta rigidez à flexão. O fundo também possui furos para garantir a entrada e saída de água ao longo do ciclo de lavagem.

É através do *cesto* que a roupa é acondicionada dentro da lavadora. Logo, o cesto é o componente responsável por sustentar a roupa e garantir que estas passarão pelas etapas de lavagem.

Figura 5 – Desenho ilustrativo de uma lavadora de roupas de eixo vertical.



A Figura 5 apresenta um desenho esquemático e detalhado de uma lavadora *de roupas de eixo vertical* mostrando como o cesto, que está inserido no conjunto, interage com os demais componentes durante as fases do ciclo de lavagem.

Fisicamente, o *cesto* é aparafusado sobre um *suporte* que está diretamente conectado ao *tubo de centrifugação*. O *tubo de centrifugação* faz parte do *sistema de transmissão*, e garante o movimento de rotação ao *cesto*, somente para a etapa da centrifugação. Toda a mancalização do conjunto ocorre no *sistema de transmissão*, caracterizando um rotor, neste caso o *cesto*, em balanço. O *sistema de transmissão* é responsável também pela rotação do *agitador*, que está totalmente desacoplado do *cesto*. O eixo conectado ao *agitador* é montado dentro do *tubo de centrifugação*, de forma a entregar uma rotação diferente deste último, devido a *caixa de engrenagens*.

Ao verificar a Figura 5, percebe-se que o anel de balanceamento está conectado à extremidade superior do cesto, sendo este um sistema de balanceamento do conjunto durante a centrifugação, de forma a reduzir as forças de desbalanceamento resultantes do rearranjo desordenado da roupa ocorrido na etapa predecessora, a agitação. Pela Figura 5, é possível ainda verificar que em volta do cesto existe um componente denominado *tanque*, sendo ele responsável por armazenar a água. Este também opera como uma estrutura principal do conjunto que se denomina "unidade de lavagem". A ele fica conectado todo o *sistema de transmissão* (motor e redutor). Normalmente, é um componente desconhecido pela maioria das pessoas, pois só é possível visualizá-lo ao desmontar uma máquina. Inclusive, é a ele que o *sistema de suspensão* (conj. mola-amortecedor e vareta de suspensão) está conectado, interligando-o ao *gabinete*.

O *gabinete* opera como a estrutura geral da máquina de lavar, uma vez que recebe todos os carregamentos vindos da "unidade de lavagem", através do *sistema de suspensão*.

É o *sistema de suspensão* que tem o papel de amortecer as forças de desbalanceamento advindas do cesto durante a etapa de centrifugação, para garantir que o gabinete se mantenha estável e não se desloque ou "caminhe".

Agora, para a análise dos carregamentos sobre o cesto, oriundos de cada fase de lavagem, é necessário entender em que condições de operação o mesmo funciona para realizar as suas funções, e quais

impactos tais condições propiciam sobre este componente. Assim, segue uma explicação sucinta das fases que compõem o ciclo de lavagem:

- *Molho*: fase da lavagem responsável pela remoção química, na qual ocorre a reação dos insumos (detergente) com as sujidades. Nesta etapa, como o nome sugere, o cesto fica parado com água dentro e com os insumos diluídos nela, onde entram em contato com as roupas, que ficam submersas nesta solução. Como as matérias-primas utilizadas na lateral e fundo do cesto são inertes quimicamente aos insumos e aos produtos de limpeza relacionados, os carregamentos mecânicos que o componente cesto recebe nesta etapa são desprezíveis, quando comparados às outras fases;

- *Agitação*: fase da lavagem responsável pela remoção mecânica e desprendimento da sujidade.

Esta etapa é posterior ao molho, mantendo as mesmas condições de contorno da anterior, como quantidade de água e insumos. No entanto, mesmo mantendo o cesto parado, a diferença está em adicionar o movimento rotacional alternado do *agitador* ou *impeler* (ver Figura 5), de forma a esfregar a roupa contra o agitador, contra o cesto, e mesmo contra as outras roupas, garantindo a remoção da sujidade pelo efeito mecânico.

Como a roupa está imersa na água, há facilidade daquela se locomover dentro do cesto. Assim, os carregamentos mecânicos sobre o cesto, oriundos desta etapa podem também ser desconsiderados, quando comparados aos esforços advindos da etapa a seguir, a centrifugação;

- *Centrifugação*: fase da lavagem responsável pela extração da água, para garantir que a roupa saia o menos úmida possível.

Como já descrito, esta etapa não possui a função de remoção da sujidade, mas tem um papel extremamente importante ao qual normalmente o usuário não se atém. É a partir deste princípio que é possível tirar a roupa limpa e quase seca. O processo de centrifugação garante umidade residual entre 60 e 50%, a fim de auxiliar na secagem, reduzindo tempo de exposição ao ar-livre ou mesmo em secadoras.

Para a extração da água, como o nome da fase diz, utiliza-se o efeito da força centrífuga para extrair a água da roupa. Assim, o cesto gira a uma rotação em torno de 750 RPM, sofrendo carregamentos devido a seu próprio peso e ao da roupa, que

probabilisticamente não garante uma distribuição de massa igualitária por todo o perímetro.

Logo, é na etapa da *centrifugação* que se tem a condição mais crítica de carregamento mecânico sobre o cesto, uma vez que às forças de rotação se soma o desbalanceamento decorrente da aleatoriedade da distribuição da roupa.

A etapa de centrifugação possui dois regimes de operação, um relacionado ao transiente (rotação variando de 0 a 750 RPM) e o outro relacionado ao permanente (rotação de 750 RPM). É no segundo regime que o exposto trabalho se atém, uma vez que os maiores esforços sobre a lateral do cesto ocorrem pelas forças centrífugas, quadraticamente dependentes da rotação.

Diferentemente do que se pensa, os ruídos de choque que ocorrem durante o regime transiente não estão relacionados ao cesto se deslocando em relação ao tanque. Tais ruídos são decorrentes do choque de toda a unidade de lavagem (cesto, agitador, tanque e sistema de transmissão) contra o gabinete. Logo, os maiores carregamentos sobre a lateral do cesto ocorrem no regime permanente, mesmo que no transiente haja condições de choque da unidade de lavagem com o gabinete, pois este último é dimensionado para sofrer as maiores deformações, amenizando os carregamentos de impacto para os demais componentes. Observa-se ainda que o conjunto suspensão é dimensionado para suportar ambos os regimes, reduzindo as amplitudes de deslocamento do conjunto, quando da passagem pelas frequências naturais do sistema. Obviamente, o conjunto suspensão possui característica física capaz de amortecer as excitações em ambos os regimes.

Demais detalhes sobre os regimes são apontados no Capítulo 4, no qual é abordada a utilização de um sistema multicorpos (MBS, multi-body system) para a majoração dos carregamentos devido às acelerações envolvidas, sejam elas no transiente ou no permanente.

3.2. DETALHAMENTO DOS CARREGAMENTOS, APOIOS E RESTRIÇÕES DURANTE A ETAPA DE CENTRIFUGAÇÃO

A etapa de centrifugação pode utilizar rotações na ordem de 600 a 1200 RPM, dependendo do tipo de equipamento. No caso das lavadoras de eixo vertical, tema do estudo, as velocidades operam numa faixa mais baixa e reduzida, de 600 a 750 RPM. Já as lavadoras de roupas de eixo horizontal, em função de sua construção, são capazes de

operar na faixa de rotações superiores, entregando roupas mais secas ao final da etapa. De qualquer forma, o aumento de rotação não traz apenas benefícios, visto que em maiores rotações as forças inerciais acabam estirando as fibras do tecido ou da malha com maior intensidade, o que pode resultar na redução de vida dessas fibras ou mesmo gerar um aspecto visual de maior desgaste. Especificamente para este trabalho, como se trata de um tamanho específico de lavadoras de eixo vertical, a rotação alcançada na centrifugação é de aproximadamente 750 RPM.

Toda máquina de lavar tem uma especificação máxima de carga (roupa) que pode ser inserida na máquina. Este limite não está somente associado ao tamanho da máquina, à capacidade de roupa e à resistência mecânica do equipamento, mas também a outros aspectos importantes que a máquina é projetada para cumprir, entre os quais:

- Desempenho de lavagem (quão efetiva é a remoção da sujidade);
- Consumo de água;
- Consumo de energia;
- Umidade residual (% de água na roupa).

Assim, o limite de carga (roupa) informado na máquina, seja ele de 6, 8 ou 10kg, não está associado somente ao volume físico do cesto, mas também à garantia dos requisitos destacados acima. Esses valores são definidos por norma e auditados periodicamente pelo **Inmetro**. A carga limite informada no equipamento se baseia em *carga seca*, ou seja, carga com umidade residual nula.

3.2.1. Carregamentos

Como já informado, as máquinas têm especificado um limite de carga, ou massa de roupa seca, com o qual podem operar de modo que seja garantido que atendam aos requisitos estipulados. No entanto, essa massa não é a massa real distribuída sobre o cesto durante a centrifugação.

Quando a máquina inicia o processo de enchimento de água, para executar o ciclo de lavagem, molho e agitação, a roupa absorve parte da água. Ao iniciar a etapa de centrifugação, a água é então drenada, mas parte da mesma fica absorvida pela roupa. De acordo com análises experimentais, essa água absorvida representa em média, como massa, o mesmo valor da roupa. Em outras palavras, no caso de 10 kg de roupa seca, há um carregamento total de 20kg no início da centrifugação.

Esta carga vai exercer uma força centrífuga sobre a parede da lateral do cesto quando em rotação. Assim, para a análise dos carregamentos, dependendo do posicionamento das cargas, é importante classificá-las segundo as respostas que elas podem gerar ao sistema. Desta forma, elas são diferenciadas por:

- **Carga distribuída:** é a porção de carga que fica distribuída radialmente ao longo do perímetro do cesto, sem gerar nenhuma componente de carga assimétrica, mantendo o sistema balanceado radialmente;

- **Carga concentrada (desbalanceadora):** é a porção de carga que fica concentrada em uma região radial do cesto, quando não há outra porção capaz de balanceá-la, gerando assim uma força de desbalanceamento.

Como já mencionado, é na fase da agitação que a carga é deslocada dentro do cesto, sendo que o movimento desta ocorre aleatoriamente, o que probabilisticamente garante um arranjo desordenado da roupa ao longo do perímetro do cesto. Com base em dados estatísticos, há a previsibilidade de que a maioria das etapas de agitação entreguem um carregamento desbalanceado, em menor ou maior grau, para a centrifugação.

Obviamente, como a água vai sendo drenada durante o processo de centrifugação, devido à força centrífuga, a massa de carga (roupa) distribuída e concentrada vai diminuindo, reduzindo assim as forças centrífugas sobre o conjunto. Apesar disso, tanto os testes experimentais como as modelagens analíticas e numéricas não consideram esta premissa, mantendo a força centrífuga constante ao longo do ciclo de centrifugação. Esta ponderação se baseia na condição de que no início do regime permanente da centrifugação, a massa é relativamente próxima da máxima.

Ainda, pela própria característica física, as posições das roupas dentro do cesto, sejam elas radiais e na altura, sofrem pequenos deslocamentos com a drenagem da água ao longo da etapa de centrifugação, mas eles podem ser desconsiderados devido às pequenas variações que podem causar para os carregamentos.

Embora se tenha identificado os tipos de carregamentos, é necessário entender como estes se distribuem dentro dos ciclos de lavagem, uma vez que isto se torna imprescindível para factibilizar os testes experimentais, e mesmo as modelagens analíticas e numéricas.

Baseado nisso, foram realizados estudos para diferentes quantidades de cargas secas, a fim de entender o percentual de ocorrência de cada uma, bem como suas magnitudes. Estes estudos estão

detalhadamente explicados no **Apêndice A - Caracterização da Carga de Consumidor (Load Characterization)**.

Assim, a partir da capacidade de carga das máquinas, ou seja, de roupa seca, se tem definido os percentuais de ambas as cargas, *distribuída* e *concentrada*. Além disso, os estudos puderam elucidar também a altura média que as cargas *distribuídas* e *concentradas* acabam atingindo dentro do cesto, podendo reproduzir com previsão as condições limite de roupa seca para dado tamanho de máquina.

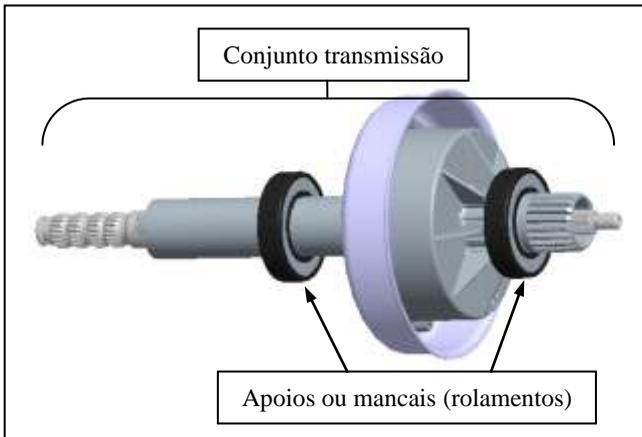
Isto possibilita um direcionamento racional da quantidade de amostras dentro dos testes de confiabilidade do componente, seja para etapas de desenvolvimento ou de validação do produto. Com isso, é alcançada expressiva redução no tempo de execução dos testes, pois foca-se à condição mais crítica de operação.

3.2.2. Apoios

Como já comentado no início deste Capítulo, o cesto opera como uma carga em balanço, já que as *mancalizações* ou *apoios* são feitos na parte inferior, abaixo do *suporte*, junto ao *tubo de centrifugação* e *caixa de engrenagens*, que formam o *conjunto transmissão*.

Na Figura 6 tem-se uma modelagem deste conjunto mostrando os componentes relacionados à *mancalização* do cesto, realizada a partir de mancais de rolamento. Estes mancais suportam forças radiais, advindas das cargas desbalanceadoras.

Figura 6 - Modelagem da mancalização ou apoio.



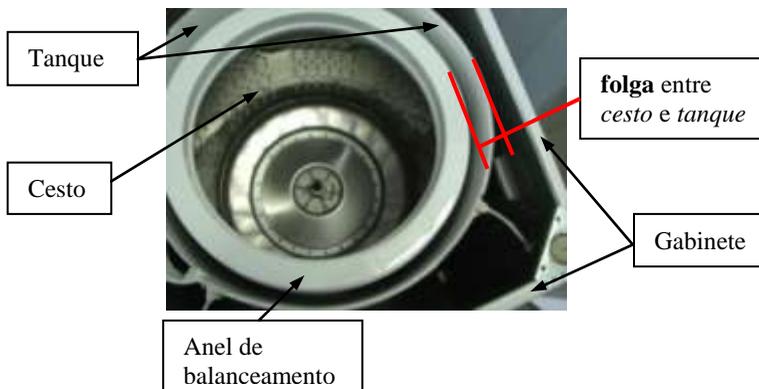
O dimensionamento dos mancais de rolamentos necessita dos carregamentos advindos da operação, que são mapeados pelo estudo de *caracterização da carga de consumidor* comentado anteriormente, garantindo resultados menos superestimados.

3.2.3. Restrições

Como comentado anteriormente, o *tanque* se situa ao redor do cesto. Na Figura 7, tem-se uma vista superior da *unidade de lavagem*, montada no *gabinete*, ilustrando a posição do cesto em relação ao tanque.

Durante o projeto da *unidade de lavagem*, o dimensionamento dinâmico considera uma **folga** entre o *cesto* que gira e o *tanque* que fica parado, conforme pode ser visto na Figura 7. Isto porque o cesto opera em balanço e, quando as cargas de roupas ficam distribuídas assimetricamente no interior do cesto em rotação, são geradas forças desbalanceadoras, que defletem radialmente o mesmo na direção do tanque, reduzindo a folga.

Figura 7 - Detalhe da folga entre cesto e tanque.

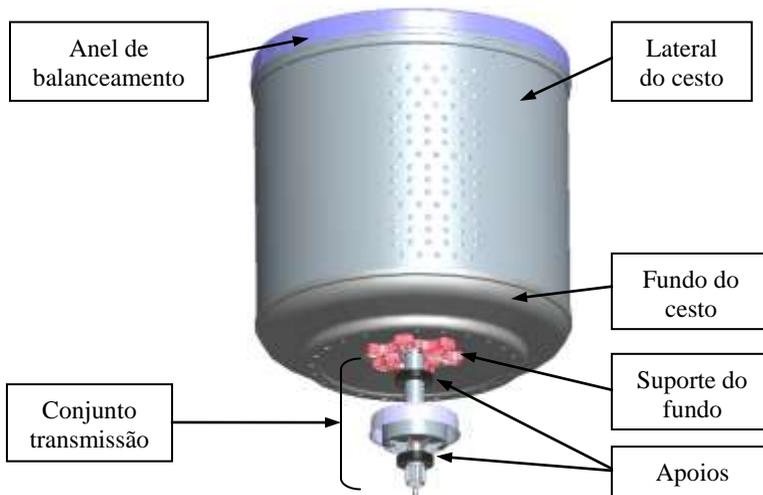


Assim, para o dimensionamento da lateral do cesto, deve-se levar em consideração o limite de deflexão do cesto, de forma a não tocar no tanque. Como o anel de balanceamento fica na extremidade do cesto, devido ao conceito geométrico, é ele que acaba tocando no tanque, quando as deflexões ultrapassam o limite da folga. Isto se torna crítico, já que esta ocorrência gera desgaste do próprio anel de balanceamento, levando-o à falha, o que conseqüentemente culmina na

perda da estabilidade dinâmica do conjunto, convergindo para o colapso da máquina.

Quando são analisadas as deformações do cesto decorrentes das forças de desbalanceamento, verifica-se que o conjunto como um todo contribui para a deflexão total do cesto. Pela Figura 8 tem-se modelado geometricamente o cesto completo, mostrando as interfaces deste com os demais componentes, incluindo a *mancalização*.

Figura 8 - Modelagem completa do cesto e suas interfaces.



Assim, há quatro principais contribuidores para a deflexão do conjunto cesto, sendo eles:

- deflexão da lateral do cesto;
- deflexão do fundo do cesto;
- deflexão do suporte;
- deflexão do tubo de centrifugação;

Dado que este projeto considera a otimização do cesto, o *suporte* e o *tubo de centrifugação* se mantêm os mesmos. Assim, os níveis de deformação destes dois componentes devem manter a mesma magnitude.

Ainda, como já explicado no objetivo do trabalho, o estudo de otimização do cesto ocorre somente por meio da redução da espessura da *lateral*, mas já é considerado no contexto do trabalho uma nova geometria para o *fundo* do cesto, com base em um material polimérico

injetado e não a partir de uma chapa de aço inoxidável, como utilizado no projeto atual. Assim, a premissa para as análises de deformação do cesto considera que a nova proposta de fundo tenha a mesma rigidez, e conseqüentemente o mesmo valor de deformação apresentado pelo projeto atual do fundo.

De qualquer forma, cabe também a qualquer uma das propostas geométricas otimizadas da lateral alcançar valores de deformação semelhantes aos verificados pela lateral atual.

Portanto, a restrição estabelecida para o dimensionamento do *cesto* considera a deflexão radial total do conjunto, que deve manter o mesmo nível do projeto atual.

3.3. VARIÁVEIS DE DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

No caso do dimensionamento estrutural do cesto, tanto para os carregamentos estáticos quanto cíclicos a que este componente está submetido, deve-se prever que não haja escoamento do material. Assim, as deformações relacionadas às condições críticas (cargas desbalanceadoras) de operação durante a centrifugação, que foram comentadas anteriormente, devem ser resultantes da condição elástica e não plástica. Logo, o componente retorna à condição nominal assim que as forças cessam.

Baseado nesta premissa, as ferramentas de dimensionamento, sejam elas analíticas, semi-analíticas ou numéricas, devem considerar somente o regime elástico. Então, as variáveis a serem quantificáveis para este dimensionamento, com base no modelo elástico linear e em suas restrições, são:

- Tensões mecânicas;
- Deformações mecânicas;
- Deslocamentos;

Logo, os próximos capítulos, que abordam o dimensionamento e otimização do cesto, devem considerar os níveis de tensões e deformações mecânicas ao longo de toda a lateral, de forma a garantir os critérios de aprovação.

Quanto à teoria de falha para a lateral, é utilizada a *tensão circunferencial* para o carregamento *estático*, comparada à tensão admissível do material. No caso de carregamento dinâmico se aborda o modelo de *tensão-número de ciclos* em regime de fadiga de alto ciclo, com correção do limite de fadiga.

4 CONSTRUÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL NUMÉRICO PARA O CESTO DE LAVADORA DE ROUPAS DE EIXO VERTICAL

Como comentado no objetivo do trabalho, o dimensionamento mecânico numérico é o método utilizado para análise da redução da espessura da lateral. Logo, este capítulo descreve a modelamento virtual, considerando os componentes que compõe o cesto, a geração da malha, a introdução dos carregamentos e a definição das condições de contorno, de forma a garantir que a simulação seja uma representação física significativa.

Quanto à abordagem do modelo estrutural numérico, esta é baseada no Método de Elementos Finitos (FEM - Finite Element Method). Toda a geração de malha e pré-processamento, que inclui a construção de carregamentos e condições de contorno, são realizados no código comercial HYPERMESH. Entretanto, como plataforma de resolução numérica e pós-processamento, se utiliza do código comercial ANSYS Mechanical APDL para avaliação dos níveis de deformações e tensões mecânicas, além dos deslocamentos radiais resultantes ocorridos no cesto.

Para a simulação estrutural do cesto, é realizada uma análise *quasi-estática*, pois é considerado que ele opera em regime permanente de rotação, com carregamentos associados às forças inerciais relativas à rotação de centrifugação. Admitindo que a etapa de centrifugação se repete ao longo de cada ciclo de lavagem, é utilizada uma análise de fadiga baseada em tensões para verificação de falha por fadiga. Este assunto é descrito no Capítulo 7 e utiliza os resultados das tensões obtidos nas simulações.

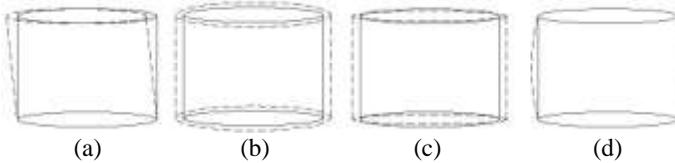
Como comentado no Capítulo 3, há fatores ligados diretamente à deformação do conjunto cesto, sendo eles relacionados aos componentes que o compõem, como lateral, fundo, suporte e tubo de centrifugação. No caso específico da lateral, como tema de estudo, as deformações envolvidas estão associadas a diferentes formatos que o mesmo assume (Figura 9), resultantes da:

- a) deflexão (tombamento) da lateral, devido à carga desbalanceadora e operação em balanço;
- b) expansão do diâmetro da lateral, devido à massa própria e carga distribuída;
- c) ovalização do diâmetro da lateral, devido à carga desbalanceadora;

d) flexão da lateral na região da carga distribuída, e mais localizada na região de carga desbalanceadora.

Dessa forma, há uma série de fatores que devem ser considerados na construção do modelo numérico, detalhados a seguir.

Figura 9 - Formas de deformação da lateral do cesto. (a) deflexão. (b) expansão. (c) ovalização. (d) estufamento.

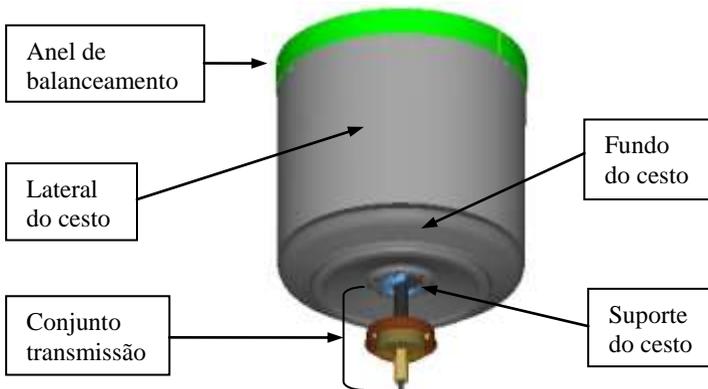


4.1. MODELAMENTO GEOMÉTRICO

Para a simulação numérico-estrutural da lateral do cesto, é necessário garantir que as condições de contorno e carregamentos sejam reproduzidas convenientemente no modelo.

Acerca dos componentes que fazem parte do modelamento, o *anel de balanceamento*, *fundo do cesto*, *suporte do cesto* e *conjunto transmissão* se tornam necessários (Figura 10). Os demais componentes que formam a cadeia completa entre cesto e tanque são desconsiderados, uma vez que introduzem maior rigidez mecânica nas direções dos carregamentos, quando comparados aos utilizados na simulação.

Figura 10 - Modelo geométrico da simulação.



No caso do *conjunto transmissão*, este contempla toda a caixa de redução, onde os mancais são montados, sendo um na parte superior do tubo de centrifugação e o outro, inferior, na caixa de engrenagens, estando detalhadamente explicado e ilustrado no item 4.2, referente à geração de malha.

4.2. MALHA

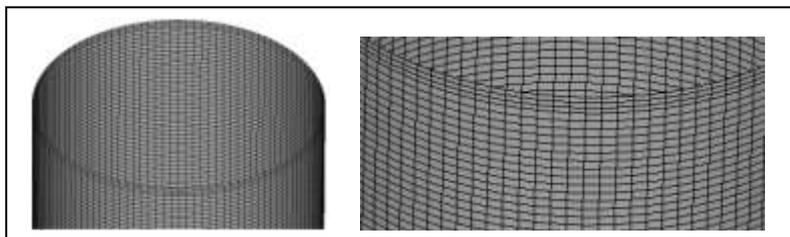
No caso da geração da malha, considerações diferenciadas devem ser feitas para cada componente, em virtude da geometria, carregamentos e condições de contorno envolvidas.

4.2.1. Lateral do Cesto

Para a lateral, por possuir espessura menor que 10% do raio médio, se adota o modelo de cascas.

Neste caso, Figura 11, o componente é modelado como um cilindro em superfície, no qual o raio é determinado pela superfície média. A malha utiliza elemento de casca quadrilátero de quatro nós.

Figura 11 - Malha uniforme da lateral, com elementos de casca quadriláteros.



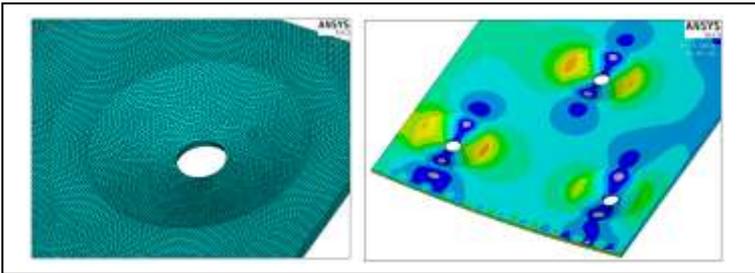
Como os níveis de deformação da lateral são superiores ao valor da espessura, opta-se por utilizar a formulação que contempla grandes deslocamentos. A utilização deste tipo de solução aumenta significativamente o tempo de processamento, pois torna o problema não linear.

4.2.1.1. Submodelo da lateral

Como comentado no Capítulo 3, a lateral do cesto possui furações para escoamento da água durante a centrifugação. No entanto,

como os furos estão localizados em regiões específicas, uma malha refinada em toda a lateral, para garantir acuracidade nos valores de tensão, não é uma solução viável devido ao custo de cálculo envolvido. Assim, é possível utilizar uma ferramenta de criação de um modelo local ou submodelo que permite delinear um contorno ao redor da região que se deseja refinar, sendo realizada uma modelagem em separado com um refinamento da malha, de forma a resultar em uma solução de tensão acurada.

Figura 12 - Detalhe do submodelo do furo da lateral.



A partir da resolução do modelo completo, são utilizadas soluções de deslocamento na região do contorno para extrapolar ao submodelo e, então, determinar uma distribuição de tensão mais precisa nesta região.

4.2.2. Fundo do Cesto

No caso do fundo do cesto, por se tratar também de uma chapa relativamente fina, são utilizados elementos de casca de quatro nós, assim como a lateral.

Figura 13 - Malha uniforme do fundo, com elementos de casca quadriláteros.



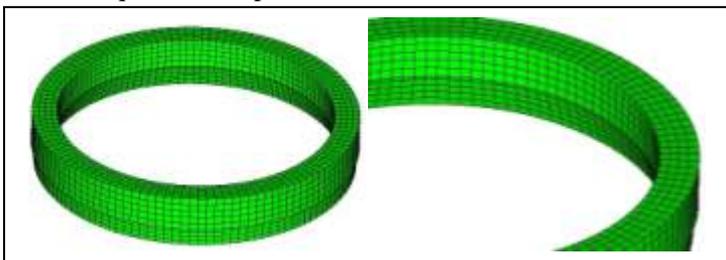
De modo semelhante à lateral, o fundo também possui furações para escoamento da água, e é incorporado no submodelo na geração da malha.

4.2.3. Anel de Balanceamento

O anel de balanceamento é uma peça plástica com cavidades internas para a movimentação de uma solução líquida, que fisicamente auxilia na estabilização do conjunto durante a etapa de centrifugação, se opondo vetorialmente as cargas desbalanceadoras.

Este componente também é gerado com elemento de casca quadrilátero plano de 4 nós.

Figura 14 - Malha uniforme do anel de balanceamento, com elementos de casca quadrilátero plano, com nó em cada vértice.



4.2.4. Suporte do Cesto

O suporte do cesto é uma peça maciça, sendo que para a sua discretização foram usados elementos volumétricos, em particular tetraedro de 10 nós.

Figura 15 - Malha uniforme do suporte do cesto, com elementos sólidos tetraédricos.

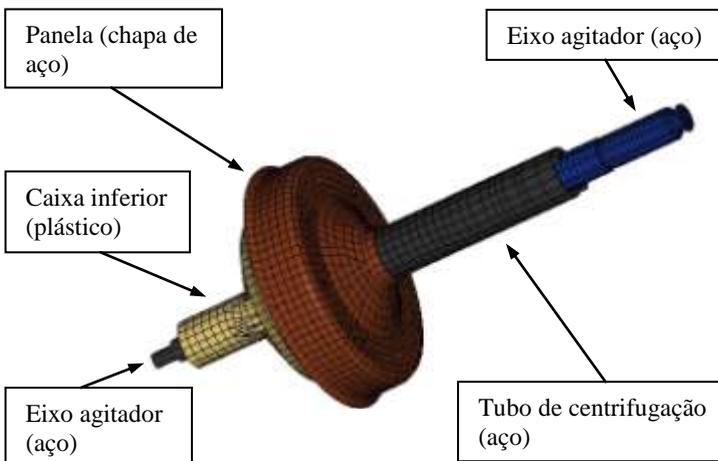


4.2.5. Conjunto Transmissão

Quando analisado, o conjunto transmissão é composto por subcomponentes, conforme detalhado na Figura 16.

No caso da operação de centrifugação, não há nenhum movimento relativo entre eles, nem com os demais componentes do conjunto cesto. No entanto, o eixo agitador tem interface com a caixa inferior e o tubo de centrifugação, através de buchas posicionadas na mesma região que os apoios (mancais), comentados no item 4.6.

Figura 16 - Detalhamento do conjunto transmissão, com seus subcomponentes.



Todos os subcomponentes, exceto pelos eixos, foram discretizados com elementos de casca quadriláteros. Os eixos, devido à sua geometria, foram discretizados com elementos volumétricos, em particular, de formato prismático de 6 nós, pois permitem degenerações quando usados em regiões irregulares, além de realçar as deformações.

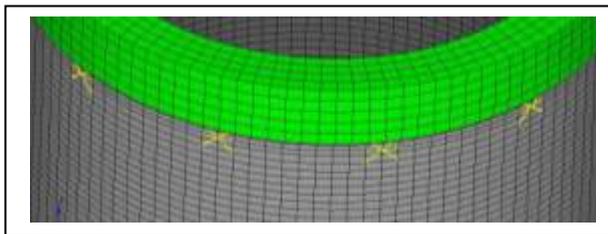
4.3. INTERFACES / CONTATOS

As geometrias geradas para cada componente são independentes umas das outras, sendo vinculadas na montagem mediante condições de interface tratadas no código de elementos finitos como *contatos*.

4.3.1. Contato Lateral - Anel de balanceamento

A montagem do anel de balanceamento na lateral ocorre através de parafusos equidistantes ao longo da circunferência de união. Dessa forma, para a simulação, a união é realizada a partir de elementos rígidos que se vinculam aos nós da vizinhança do parafuso. Este tipo de arranjo é denominado de *rigid spider*.

Figura 17 - Elemento rigid spider entre anel de balanceamento e lateral do cesto.



4.3.2. Contato Lateral - Fundo

Neste caso se considera que a interface entre lateral e fundo é realizada por um contato bilinear que penaliza os movimentos relativos entre os nós vizinhos de ambas as peças. Esse tipo de contato é denominado, no código, de colado, e desconsidera folgas ou interferências, eliminando-as quando existirem.

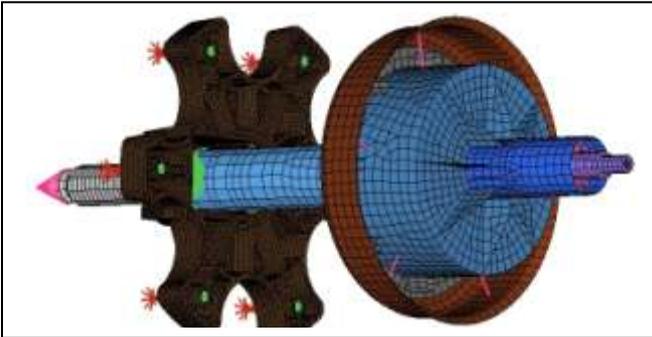
4.3.3. Contato Fundo - Suporte

Assim como a junção do anel de balanceamento com a lateral, a conexão entre suporte e fundo utiliza o elemento *rigid spider*, simulando a união por parafusos.

4.3.4. Contato Suporte - Conjunto transmissão

Como estes componentes representam a rigidez, a abordagem de utilizar elemento *rigid spider* se torna indicada. Logo, toda a junção dos subelementos do conjunto transmissão, juntamente com o suporte, se utiliza desta abordagem.

Figura 18 - Junção por elemento rigid spider.



4.4. CARGA DISTRIBUÍDA

As cargas distribuídas nada mais são do que cargas de roupas perimetralmente distribuídas ao longo da lateral do cesto, como já comentado. A partir desta importante consideração, é necessário definir corretamente as propriedades desta carga distribuída, na forma de densidade e rigidez.

Existem ensaios experimentais para reproduzir os carregamentos de roupas, utilizando para isto um tipo de elastômero.

Este carregamento consiste em um cilindro de parede espessa, que tem seu diâmetro externo em contato com o diâmetro interno da lateral, sendo que sua posição vertical em relação ao cesto é baseada nos estudos de caracterização de carga de consumidor, do Apêndice A.

Para a geração da malha deste volume, se considera um mapeamento uniforme, com elementos volumétricos hexaédricos de 8 nós.

4.5. CARGA DESBALANCEADORA (CONCENTRADA)

No caso da carga desbalanceadora, que também é constituída por roupas, sendo geometricamente definida, esta é posicionada a partir dos estudos de caracterização de carga de consumidor, relatados pelo Apêndice A.

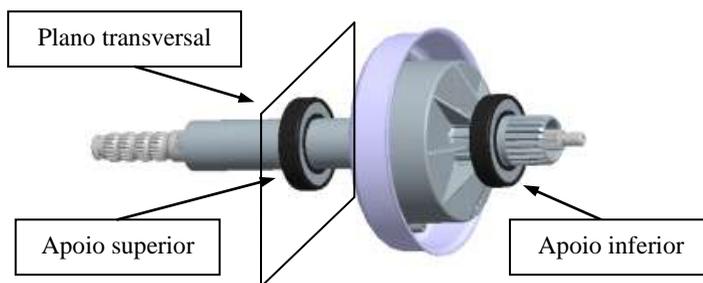
Esse carregamento também necessita de uma definição correta das propriedades mecânicas, como densidade e rigidez. Neste caso, é utilizado outro material para simular, devido a testes anteriores que comprovaram sua efetividade, mas que não pode ser aqui divulgado por razão de sigilo industrial.

Quanto à geração da malha, se considera também um mapeamento uniforme de elementos volumétricos hexaédricos de 8 nós.

4.6. APOIOS (MANCALIZAÇÃO)

É por meio dos apoios, representados pelos mancais de rolamento, que se tem a interface entre o conjunto estático (gabinete, tanque e demais suportes) e o conjunto dinâmico, neste caso o conjunto cesto, já detalhado. Os apoios são responsáveis por garantir a rotação de centrifugação, mesmo sob carregamentos. A magnitude dos carregamentos está limitada ao tamanho do mancal, definido através de dimensionamento específico.

Figura 19 - Representação dos apoios, montados no conjunto transmissão.



Na Figura 19, tem-se a representação dos *apoios* ou *mancais de rolamentos*, estando configurados conforme operam, sendo:

- apoio inferior: fixo, não permitindo deslocamentos ou rotações em relação aos eixos cartesianos tridimensionais;
- apoio superior: limita os deslocamentos no plano transversal ao eixo.

4.7. SIMULAÇÃO QUASI-ESTÁTICA

Como já comentado no Capítulo 3, o foco da simulação estrutural é somente na etapa da centrifugação em que a rotação atinge o regime permanente. Assim, a simulação estrutural quasi-estática, realizada pela análise em Elementos Finitos (FEA), considera a condição estacionária de rotação do cesto. Dessa forma, os maiores

carregamentos acontecem na máxima rotação (regime permanente) e são resultantes do efeito inercial da massa do cesto.

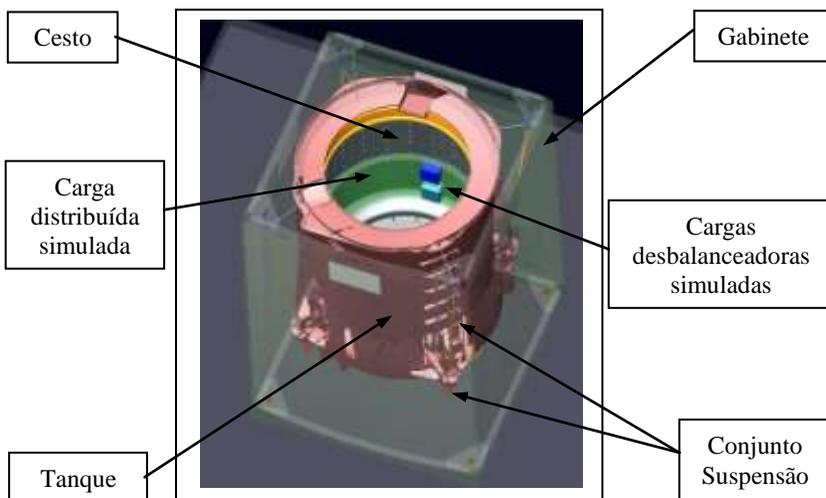
Estas forças centrífugas são incorporadas à análise estrutural através de cargas inerciais. No caso do código ANSYS, as propriedades de densidade são informadas pelo usuário, e o próprio programa calcula as massas e aplica suas respectivas forças inerciais diretamente aos nós dos elementos, na direção radial (r), em relação às coordenadas cilíndricas globais (r, θ, z) do modelo.

4.8. ANÁLISE DINÂMICA EM SISTEMA MULTICORPOS

Como a unidade de lavagem é montada sobre um sistema de suspensão, com carregamentos externos advindos das cargas desbalanceadoras em rotação, tem-se um sistema dinâmico de vibração forçada com excitação harmônica. Logo, acelerações são introduzidas ao conjunto cesto, mesmo durante o regime permanente de rotação, e são devidamente mensuradas a partir de um sistema multicorpos (MBS - multibody system) realizado pelo código comercial ADAMS.

Esse tipo de modelo considera corpos rígidos, conectados entre si por juntas e apoios (flexíveis e rígidos), restringindo o movimento relativo entre eles em diferentes direções.

Figura 20 - Modelagem de uma máquina de lavar em MBS.



Os carregamentos externos são aplicados aos centros de gravidade dos componentes, e a solução do sistema decorre da integração temporal (discreta) das equações de movimento do sistema. As informações da geometria, assim como da malha de Elementos Finitos, são transferidas ao ADAMS, que procede com a simulação da etapa de centrifugação até atingir o regime permanente, gerando uma distribuição de acelerações.

Finalmente, essa distribuição de acelerações é transferida aos elementos gerados pela malha do ANSYS. Nesse processo de cálculo dinâmico no ADAMS, são calculadas também as forças restauradoras do anel de balanceamento, que tem a função de minimizar ou anular, dependendo da magnitude das forças desbalanceadoras, as cargas de roupas não uniformemente distribuídas ao longo do volume útil do cesto. Ainda nessa etapa de cálculos de forças, são avaliados os carregamentos resultantes sobre os mancais, atuando como uma verificação de convergência do modelo, indicando efetivo balanceamento (funcionamento eficiente do anel). Isto é matematicamente traduzido em determinar as forças de balanceamento geradas pelo anel, contrárias às geradas pelas cargas desbalanceadoras, e que são transmitidas pela cadeia de componentes até os apoios, equilibrando o sistema dinamicamente.

Como comentado anteriormente, a análise em MBS é realizada até atingir o regime permanente. Mesmo neste regime, como toda a unidade de lavagem está montada sobre um sistema de suspensão distribuído em quatro posições ao longo do perímetro, tem-se que à excitação harmônica criada pelo cesto em rotação gera acelerações diferenciadas nas três direções, dependendo da posição que a carga desbalanceadora se encontra ao longo de uma volta. Desta forma, para determinar qual é a pior condição de aceleração durante uma rotação completa do cesto, baseado em inferência estatística, são realizadas doze simulações estruturais em Elementos Finitos (FEA), simetricamente espaçadas no tempo, dentro do período de uma volta do cesto. Esse ciclo de análises se repete para cada carregamento, condição de contorno ou geometria alterada.

4.9. LIMITAÇÕES DO MODELO

Considerando o modelo numérico detalhado neste Capítulo em relação ao componente físico e da dinâmica de operação, entende-se que há limitações no dimensionamento da lateral. Dentre elas, se destacam:

- tensões residuais de conformação dos furos da lateral: o modelo não considera incremento de tensão devido ao estampo das calotas e das furações;
- costura de fechamento da lateral por conformação: não contemplada a costura de fechamento, considerando um cilindro de revolução com espessura constante em todo o perímetro;
- junção da lateral com o fundo por conformação: não contemplado o rebordamento da lateral no fundo;
- erros de forma (geometria) e posição: não incorporados os erros de batimento, circularidade etc.

5 MODELAGEM EXPERIMENTAL PELA TÉCNICA DA EXTENSOMETRIA

Neste Capítulo, são descritos os procedimentos executados para a análise experimental via técnica da extensometria, com o intuito de avaliar a acuracidade do modelo numérico quanto aos resultados de deformações e, conseqüentemente, de tensões mecânicas, que direcionarão os estudos de otimização mecânica da lateral do cesto. Detalhes sobre a técnica da extensometria são comentados no **Apêndice B – Técnica Experimental da Extensometria**.

5.1. MONTAGEM DO EXPERIMENTO

Com o objetivo de comparar resultados, foram utilizados extensômetros de deformação para instrumentar a lateral de um cesto existente de lavadora de roupas de eixo vertical.

5.1.1. Posicionamento dos extensômetros na lateral

No caso da lateral do cesto (Figura 21), durante a centrifugação, esta sofre basicamente dois tipos de carregamentos, estando eles associados a:

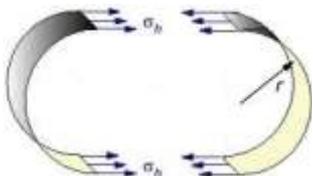
- forças inerciais devido à própria massa da lateral em rotação;
- pressão interna gerada pela centrifugação das cargas de roupas;

Figura 21 - Lateral de um cesto inoxidável existente.



Mesmo que esses carregamentos se sobreponham durante a etapa de centrifugação, ambos geram tensões (σ_h) e deformações circunferenciais (Figura 22) que geram um aumento do diâmetro da lateral.

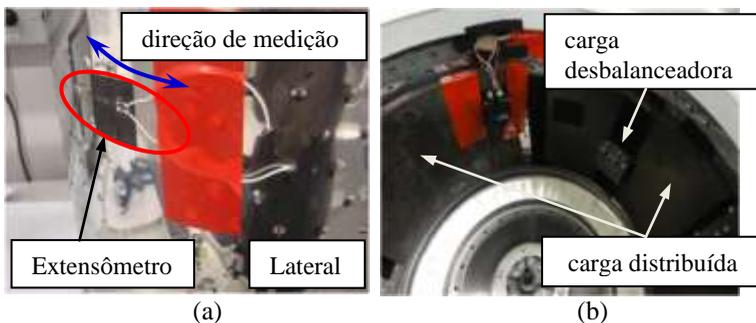
Figura 22 - Tensões circunferenciais σ_h .



Com base em conhecimentos derivados de aplicações semelhantes e de dimensionamentos relacionados à natureza dos carregamentos, sabe-se que esta direção de tensão é a mais crítica para a falha (TIMOSHENKO, 1959; TIMOSHENKO, 1977; SHIGLEY, 2004). Logo, o posicionamento dos extensômetros deve obedecer a direção circunferencial, garantindo que a deformação capturada pelo transdutor esteja relacionada com as verificadas no modelo numérico.

A lateral do cesto possui furações distribuídas de modo equidistante, responsáveis pela extração da água durante a centrifugação. Esses furos acumulam tensão residual, o que torna tais regiões mais suscetíveis a falha. Logo, optou-se por colar os extensômetros suficientemente distante dos furos, de forma que não sofressem perturbações ou influências devido a estes concentradores de tensão, conforme pode ser visualizado na Figura 23 - a.

Figura 23 - (a) extensômetro montado na superfície externa da lateral. (b) carga distribuída e desbalanceadora montada na superfície interna da lateral.



Os extensômetros são colados na superfície externa da lateral, já que na interna são montadas as cargas distribuídas e desbalanceadoras, simulando o carregamento de roupa (Figura 23 - b). Além disso, esta tratativa garante que as cargas distribuídas não apliquem uma pressão adicional sobre os transdutores, gerando deformações sobre o mesmo e contribuindo equivocadamente para as medições realizadas pelos extensômetros.

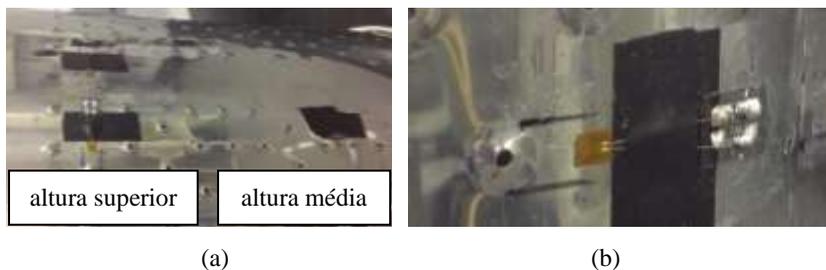
No Apêndice B, relativo à técnica da extensometria, são abordados também os tipos de extensômetros. Nesta aplicação se optou pelo tipo simples, que mede a deformação em uma única direção, devido a:

- limitação de espaço na região definida de medição (entre furos);
- restrição na capacidade de medição simultânea (apenas um canal);
- restrição de ponte de wheatstone;

Para assegurar uma verificação robusta com o modelo numérico, se instrumentou mais de uma região da lateral, conforme descrito abaixo, representadas na Figura 24:

- 1º) direção circunferencial na altura superior da lateral, em fase com a carga desbalanceadora;
- 2º) direção circunferencial na altura média da lateral, em fase com a carga desbalanceadora;
- 3º) direção circunferencial na altura superior da lateral, defasada de 90° com a posição angular da carga desbalanceadora;
- 4º) direção circunferencial na altura média da lateral, defasada de 90° com a posição angular da carga desbalanceadora.

Figura 24 - (a) regiões de colagem dos extensômetros. (b) detalhe do extensômetro.



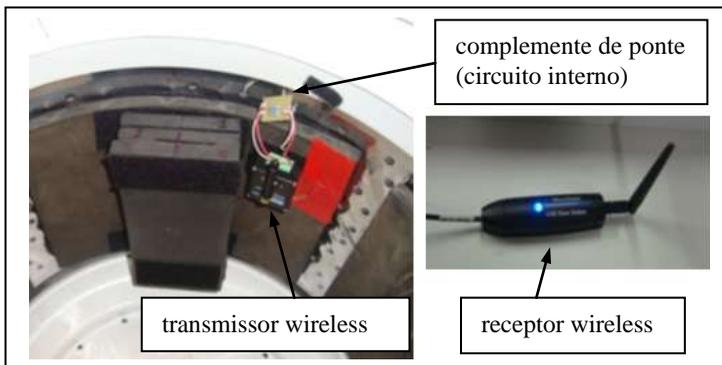
Quanto à costura da lateral, como abordado no Capítulo 3, a mesma não está sendo analisada neste trabalho. Assim, as posições de medições utilizadas estão distantes desta região, de forma a não sofrerem influências.

5.1.2. Tecnologia de Medição

Como se trata de extensômetros unidirecionais, a ponte de wheatstone deve ser configurada para operar com um quarto de ponte, em que apenas uma resistência, a do extensômetro, sofrerá deformações. Detalhes sobre a ponte de wheatstone também são explicados no Apêndice B.

Como o cesto opera em movimento, foi utilizada tecnologia wireless, que não utiliza cabos para a transmissão dos valores medidos pelos extensômetros, conforme Figura 25.

Figura 25 - Tecnologia de transmissão dinâmica por sistema wireless.



5.2. PLANEJAMENTO DA ESTRATÉGIA DO EXPERIMENTO

Para o planejamento do experimento, a estratégia adequada deve garantir que os modelos físicos experimentados sejam correlatos com os simulados.

Dessa forma, com base na física de funcionamento do componente, foram levantadas três *variáveis* ou *fatores* que influenciam diretamente a forma e as magnitudes das deformações da lateral, como já abordado no Capítulo 4.

Assim, as variáveis exploradas no experimento foram:

- Quantidade de carga distribuída [kg];
- Quantidade de carga concentrada (desbalanceadora) [kg];
- Ângulo/defasagem da carga concentrada em relação ao extensômetro [graus];

A definição das amplitudes de cargas, tanto para as distribuídas como para as concentradas, se baseou nos dados do estudo de *caracterização da carga de consumidor*, descrito no Apêndice A.

Para a determinação da estratégia do conjunto de testes, recorreu-se a uma técnica usada para explorar maiores ganhos de conhecimento no experimento, chamada de técnica DOE (Design of Experiments), que está sumarizada no Apêndice C.

A técnica DOE tem por objetivo auxiliar no planejamento do experimento, com base em conhecimentos teóricos e práticos sobre as variáveis de entrada (chamadas aqui de *fatores*) que influenciam nas respostas. E, somada às análises estatísticas, ponderar os *efeitos* desses fatores e as *interações* entre eles.

A partir disto, foi feita uma análise minuciosa do modelo físico da lateral do cesto sob o aspecto das tensões e deformações mecânicas, baseadas nos carregamentos (cargas distribuídas, cargas concentradas e rotação) e suas condições de contorno (apoio e dimensões), para avaliar se alguma variável não controlada no experimento, chamada aqui de *ruído*, poderia comprometer os resultados, levando a uma interpretação equivocada.

Para a estratégia de execução dos testes, foi acrescentado o método estatístico da *randomização*, convergindo para o diagrama ou *árvore de amostragem* da Figura 26.

De forma à auxiliar a interpretação do diagrama, tem-se as seguintes explicações:

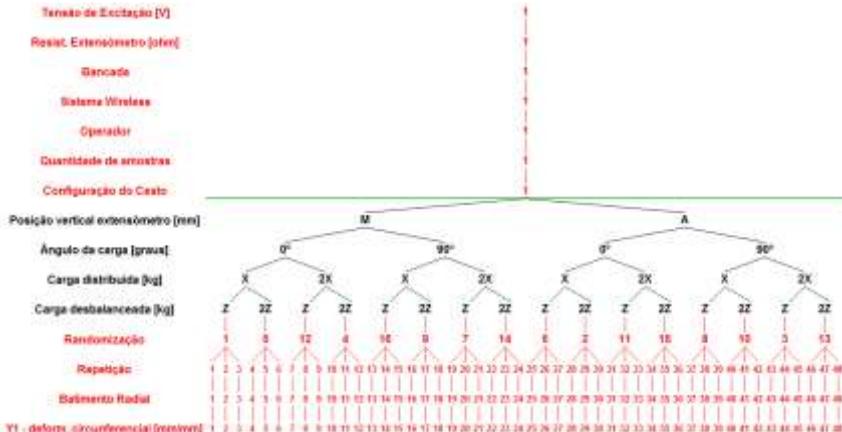
1º) Os atributos em vermelho determinam a "estrutura da unidade";

2º) Os atributos acima da linha verde são definidos como constantes, ou seja, não alteram ao longo do experimento. Esta linha verde é denominada de linha de restrição, pois limita as constantes acima dela;

3º) Os atributos em preto determinam a "estrutura do experimento", pois são formados pelas *variáveis* ou *fatores*. Logo, trata-se de um projeto de experimento *fatorial completo* com 4 *fatores*, tendo cada um deles 2 *níveis*, no qual todas as possíveis combinações ou

tratamentos são ensaiados. Sendo assim representado matematicamente por 2^4 , constituindo um total de 16 *tratamentos* ou *ensaios*.

Figura 26 - Diagrama de planejamento do experimento.



4º) Os atributos em vermelho, abaixo dos fatores (em preto), representam:

- Randomização: os tratamentos executados são aleatórios, e a aplicação deste método estatístico garante que todos os tratamentos realizados tenham a possibilidade de ser afetados igualmente pelo(s) ruído(s);
- Repetição: as medições são repetidas três vezes para assegurar uma maior robustez na leitura da medida, realizada pelo pesquisador, e assegurar que a medição seja capaz de capturar a variação (MSE). Na prática, a análise estatística utiliza a média das 3 medições;
- Batimento Radial²: por se tratar de um fator com efeito significativo sobre a deformação, mas que não pode ser variado por ser intrínseco ao processo de fabricação do cesto, é tratado como ruído. Assim, a medição deste fator antes da realização de cada tratamento está associada à avaliação de efeito e interação durante a análise estatística;

² O batimento radial é um desvio de forma, classificado pela tolerância de movimentação e sendo definido como um campo de tolerância determinado por dois círculos concêntricos, medidos em um plano perpendicular ao eixo de rotação considerado (GUIMARÃES, 1999).

- Y - deformação [mm/mm]: trata da medição da deformação em cada uma das repetições de cada tratamento.

5.3. COMPARATIVO DOS VALORES EXPERIMENTAIS COM OS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

No caso da simulação numérica, a resolução do sistema de equações gera a solução em todos os nós da malha, chegando a um mapeamento completo das deformações, seja nas três direções do sistema de coordenadas global ou em relação às direções principais, ou, ainda, para um valor equivalente (von Mises). Já no caso da experimentação, se tem os valores de deformação somente na região onde o extensômetro está instalado, limitado ainda à direção em que este foi aplicado, sendo neste caso a direção circunferencial da lateral.

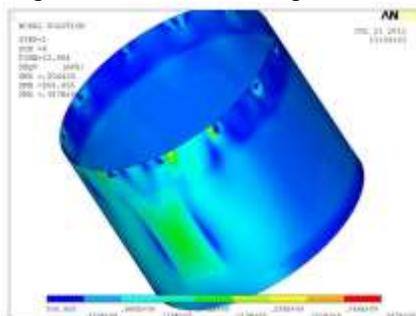
Assim, a posição dos nós e a direção onde os valores de deformação do modelo numérico são lidos devem coincidir com as da técnica experimental.

No caso da lateral, por se tratar de um cilindro, o *sistema de coordenadas cilíndricas* (r, θ, z) é o que melhor expressa os valores de deformação e tensão mecânica, pois é na direção circunferencial (θ) que ocorrem, obviamente, as tensões circunferenciais.

5.3.1. Simulação Numérica

Como a modelagem numérica engloba toda a lateral do cesto, tem-se a resposta da distribuição das deformações ao longo de todo o componente. Dessa forma, cada rodada de simulação ocorre somente quando se tem diferentes valores de cargas desbalanceadoras e cargas distribuídas, indiferente quanto à posição em que se deseja avaliar o valor da deformação, como necessário no caso dos experimentos.

Figura 27 - Análise gráfica das tensões na lateral, na direção



Na Figura 27 temos a distribuição das deformações capturadas no código comercial ANSYS, de toda a lateral do cesto, na direção circunferencial (θ).

Assim, a estratégia utilizada para as simulações fica condicionada às variáveis, carga distribuída e carga desbalanceadora, representadas no diagrama da Figura 28.

Figura 28 - Diagrama de planejamento da simulação numérica.



Neste diagrama, ilustra-se que para todas as simulações, aqui referenciadas pelos tratamentos de 1 a 4, os únicos fatores que se alteraram foram os valores de carga distribuída e carga desbalanceadora, sendo que os demais, acima da linha verde, se mantiveram constantes.

Considerando os tratamentos definidos no diagrama acima, e comparando as suas respostas de deformação circunferencial com as dos testes experimentais, chega-se a variações da ordem de 18 a 27%, sendo os menores valores encontrados no modelo numérico. A Tabela 1 mostra percentualmente as razões, entre os valores simulados e os coletados experimentalmente, dos 16 tratamentos experimentais randomizados (média das três repetições da Figura 26) em relação às mesmas regiões da lateral no modelo simulado.

Tabela 1 – Comparativo de dados experimentais versus simulados.

Randomização	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
razão [%] (simul./exper.)	19	21	26	20	22	23	27	27	24	21	18	19	25	27	20	24

As diferenças encontradas dos valores experimentais em relação aos simulados são factíveis, visto que o modelo numérico possui limitações, conforme explicitado no item 4.9 do Capítulo 4. Logo, tem-se definida uma modelagem numérica do cesto, capaz de representar com relativa assertividade alterações que forem propostas para que a lateral atinja os objetivos.

6 CONSTRUÇÃO DO PROJETO DE OTIMIZAÇÃO DA LATERAL DO CESTO

6.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Para a solução de problemas de otimização multiobjetivo, existem duas abordagens gerais. Uma delas está em combinar as funções objetivo em uma única função composta, em que o problema se torna mono-objetivo, de forma a possibilitar a utilização de métodos de solução mais simples, como o da soma ponderada, entre outros. No entanto, a dificuldade está na definição precisa e exata dos pesos dados a cada um dos objetivos que compõem a função composta, mesmo que se tenha domínio do problema. Isto porque pequenas perturbações nos pesos podem resultar em soluções bastante divergentes. Por este motivo e outros, durante a etapa de tomada de decisão, prefere-se um conjunto de soluções resultantes de múltiplos objetivos.

A outra abordagem está em determinar um conjunto de soluções ótimo ou um subconjunto representativo. Um conjunto *ótimo de Pareto* é um conjunto de soluções que são não-dominadas, umas em relação às outras. Desta forma, quando se parte de uma solução para outra, há sempre uma penalização de alguma das funções objetivo envolvidas no problema. Um conjunto de solução ótimo é muitas vezes preferido em casos práticos, pois permite a escolha conveniente com base em outras variáveis não consideradas no processo numérico (ARORA, 2004).

A partir dos modelos genéticos apresentados, adota-se o uso do NSGA (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm), por se apresentar na literatura como um algoritmo elitista e rápido, quando comparado aos demais. Por fim, ao comparar os métodos genéticos dentro do projeto em questão, a velocidade se tornou o único fator decisivo.

O objetivo do presente estudo é otimizar a lateral do cesto em relação ao aspecto do custo. Para isto, são avaliados dois indicadores econômicos, que entram como funções objetivo:

- custo da matéria-prima;
- custo de transformação (fabricação).

A partir destes indicadores, as análises econômicas que entregariam menores custos envolvem a redução da espessura da lateral.

No entanto, quando se avalia o comportamento mecânico do componente durante os regimes de operação, a abordagem com redução de espessura necessita de uma nova geometria de lateral, a fim de sustentar as funções pelas quais a mesma é responsável.

Além disso, o perfil e disposição de uma nova geometria impactam diretamente o custo de transformação, já que utiliza processo de estampagem como etapa de fabricação.

Não menos importante, com a introdução de uma nova geometria deve-se entender os efeitos sobre o desempenho de lavagem, pois o cesto possui interface com a etapa de agitação e desempenha um papel preponderante na interação com a lavagem mecânica.

Frente a todas essas variáveis que interagem, a utilização de uma ferramenta de otimização se torna fundamental para a entrega de uma espessura menor da lateral, respeitando as restrições estruturais, de desempenho de lavagem e econômicas.

6.2. DEFINIÇÃO GERAL DO PADRÃO GEOMÉTRICO DA LATERAL

Para a definição de um padrão geométrico da lateral devem ser levados em consideração os seguintes comportamentos físicos:

- estrutural: trata-se do dimensionamento mecânico, a fim de respeitar os limites de deformação e tensão mecânica;
- de desempenho de lavagem: trata-se de atender os critérios de desempenho sem gerar efeitos colaterais.

6.2.1. Estudo do comportamento estrutural (resistência mecânica)

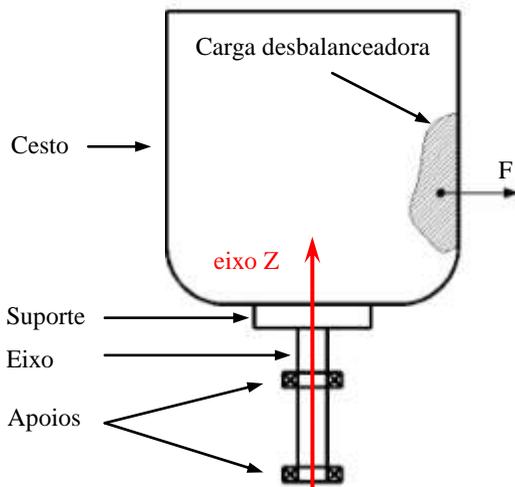
Com a redução da espessura, as deformações aumentam quando comparadas com as obtidas na condição atual de fabricação. Assim, é necessário convergir para um padrão geométrico capaz de atender níveis de deformação próximos ao da geometria atual.

Partindo de um modelo de dimensionamento estrutural que considera as deformações e deslocamentos é necessário aumentar a rigidez da lateral para conseguir atingir o objetivo.

Dessa forma, para manter os mesmos níveis de deformação do cesto atual, utiliza-se uma solução que permite um aumento da rigidez à flexão, da lateral, conforme mostrado esquematicamente no modo de deformação da Figura 9 - d. O desenho ilustrado pela Figura 29 representa a condição de carregamento que gera este tipo de deformação.

A solução neste caso corresponde ao uso de nervuras na parede, cuja geometria deverá ser ajustada para assegurar um desempenho estrutural adequado.

Figura 29 - Modelo geral da solicitação sobre a lateral do cesto.



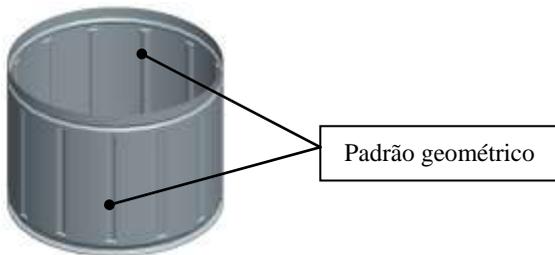
6.2.2. Estudo do comportamento do desempenho de lavagem

O desempenho da lavagem, como comentado no Capítulo 3, depende exclusivamente de duas fases, a de *molho* e a de *agitação*, em que ocorrem a lavagem química e a mecânica, respectivamente.

Especificamente na fase de agitação, em que o agitador realiza movimento alternado, força-se a roupa a deslizar sobre a superfície interna da lateral do cesto, uma vez que este último se encontra travado para a rotação, estando em movimento somente na etapa de centrifugação.

Este movimento relativo da roupa sobre a lateral do cesto, durante a agitação, pode sofrer mais ou menos resistência, dependendo da geometria que a lateral possui. Atualmente, a lateral possui uma geometria lisa com furos, sendo que a proposta de uma nervura ondulada como padrão geométrico (Figura 30), utilizada nos tanques convencionais das lavanderias domésticas, seria uma alternativa que certamente permitiria um aumento no desempenho de lavagem.

Figura 30 - Exemplo de um padrão geométrico em forma de nervura ondulada.



Uma vez que o critério de desempenho depende de outras grandezas envolvidas, como consumo de energia, elevação de temperatura e umidade residual, este estudo se concentra, especificamente, no quesito remoção da sujeira.

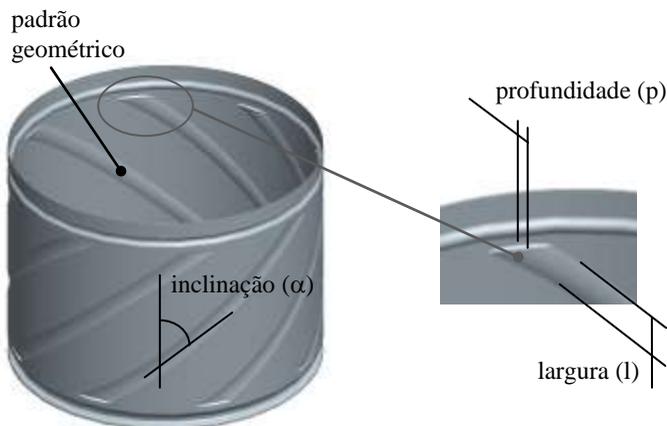
Discorrendo um pouco sobre a métrica de desempenho de lavagem, esta considera a capacidade que a máquina, neste caso o cesto, possui de remover a sujeira. Esta medição é percentual, pois é feita uma comparação a uma máquina de lavar padrão que utiliza ciclos de lavagem e temperatura controlados, e pode ser superior a 100%, o que define que a nova máquina ou ciclo de lavagem é mais eficiente que o padrão. A comparação é realizada com tiras de tecido padronizadas, impregnadas com sujidades padrão, produzidas em laboratório internacional controlado. Assim, ao final do ciclo de lavagem no cesto em estudo, as tiras padronizadas são avaliadas quanto à espectrofotometria (ATKINS, 2006; GORE, 2000), que mede a energia absorvida por uma amostra ao incidir um feixe de luz ultravioleta. Logo, quanto maior a remoção da sujeira, menos energia é absorvida pela amostra, resultando em uma medição de energia radiante maior.

Dessa forma, torna-se necessário experimentar os efeitos atribuídos aos variados tipos de padrões geométricos, que são definidos por sua disposição e dimensões, de forma a entender como interagem em relação à grandeza sujidade, mencionada acima.

6.2.3. Escolha do padrão geométrico da lateral

Com base em testes de desempenho de lavagem e em aspectos estruturais e fabris, propõe-se neste trabalho um padrão geométrico próximo ao do mostrado anteriormente, representado na Figura 31.

Figura 31 - Padrão geométrico genérico do perfil da lateral.



A diferença do padrão apresentado pela Figura 30 está na inclinação da nervura, pois quando posto totalmente na vertical, são geradas deformações circunferenciais elevadas que prejudicam a folga entre cesto e tanque. Isto foi verificado baseado em conhecimentos prévios e análises de sensibilidade realizados com os modelos numéricos.

Suas características dimensionais são definidas por: quantidade, largura, profundidade e inclinação.

Estes parâmetros serão as variáveis de projeto do modelo de otimização *estrutural* e de *desempenho de lavagem*, a fim de atingir os objetivos.

No caso específico do comportamento de *desempenho de lavagem*, os ensaios experimentais puderam gerar uma correlação entre alguns desses parâmetros dimensionais, matematicamente representados por funções polinomiais, devidamente detalhadas nos tópicos a seguir.

6.3. DEFINIÇÃO DOS PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

Conforme comentado, existem dois indicadores de custo, sendo um relacionado ao custo da matéria-prima e o outro ao processo de fabricação, e sendo eles funções de variáveis que não se relacionam entre si.

Na Tabela 2, temos as variáveis que determinam cada um destes indicadores econômicos, com base no objetivo de redução de espessura.

Para o indicador *custo da matéria-prima*, este é definido exclusivamente pelo custo da espessura da lateral, uma vez que seu preço é definido pela massa de material utilizado. Assim, com a redução da espessura há uma diminuição da massa da lateral, com consequente redução de custos.

Já no caso do indicador *custo de transformação*, o mesmo está vinculado às dimensões do padrão geométrico da lateral, sendo diretamente proporcional a essas variáveis.

Tabela 2 - Indicadores de custo e as variáveis que os determinam.

Indicador	Variáveis
Custo da matéria-prima	Espessura da lateral
Custo de fabricação	Padrão geométrico (quantidade, largura, profundidade e inclinação)

Além disso, quando se faz uma análise dos comportamentos *estrutural* e de *desempenho de lavagem*, também relativos à redução de espessura, se converge para as correlações indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Correlação dos comportamentos físicos com as variáveis dimensionais.

Comportamento Físico	Variáveis
Estrutural	Espessura da lateral e Padrão geométrico (quantidade, largura, profundidade e inclinação)
Desempenho de lavagem	Padrão geométrico (quantidade, largura, profundidade e inclinação)

Logo, com base no propósito principal de redução de custo, e pelas relações e dependências apresentadas, o estudo converge para os seguintes objetivos:

- Redução do custo da matéria-prima da lateral, que depende da redução da sua espessura;
- Redução do custo de fabricação, que é dependente das dimensões do padrão geométrico;
- Aumento da resistência mecânica, que além da dependência da espessura, está sujeito às dimensões do padrão geométrico;
- Aumento do desempenho de lavagem, que é dependente das dimensões do padrão geométrico;

Dessa forma, fica claro que as variáveis de projeto, abordados pelos objetivos, convergem para:

- Espessura da lateral;
- Padrão geométrico das nervuras: traduzido em quantidade de nervuras, largura das nervuras, profundidade das nervuras e inclinação das nervuras.

A dependência dos objetivos em relação às variáveis de projeto é descrita por funções matemáticas polinomiais, a priori, construídas por estudos econômicos e experimentais, respectivamente, em custo de matéria-prima/fabricação e desempenho de lavagem. No caso específico do comportamento estrutural, o estudo de simulação numérica, parte integrante deste trabalho, tem o objetivo de suporte na construção de uma superfície de resposta, que correlaciona as deformações da lateral do cesto com todas as variáveis de projeto descritas anteriormente.

No caso da faixa de valores, definida para cada uma das variáveis, estas dependem do espaço de projeto, determinado por suas restrições. Quando se olha especificamente para as variáveis profundidade e inclinação da nervura, estas são impactadas em suas faixas de valores devido às limitações impostas pelo processo fabril. Assim, quando se avalia as faixas permitidas para essas variáveis, em relação aos objetivos de aumento de desempenho de lavagem e redução do custo de fabricação, suas dependências são quase irrelevantes quando comparadas às demais variáveis, além de se comportarem relevantemente em relação ao objetivo de aumento de resistência mecânica.

A partir destas constatações, e de forma a simplificar a complexidade do modelo de otimização em relação ao número de variáveis, bem como de facilitar a interpretação dos resultados, o trabalho é preparado em dois problemas de otimização. Estes são executados em sequência, com a resposta do primeiro servindo de dado de entrada para o segundo, conforme descrito a seguir:

Problema de otimização 1 - maximizar o *desempenho de lavagem* restrito a *custo de fabricação*:

- Variáveis de Projeto:
 - Quantidade de nervuras (q);
 - Largura das nervuras (l).

- Funções Objetivo:
 - Custo de fabricação (q,l);
 - Desempenho de lavagem (q, l).
- Restrições:
 - Custo de fabricação (q,l) \leq custo máximo de fabricação;
 - Desempenho de lavagem (q, l) \geq desempenho mínimo.

A resolução deste problema de otimização, baseada na melhor solução encontrada, fornece valores constantes de quantidade e largura da nervura para o próximo problema de otimização.

Problema de otimização 2 - minimizar a *custo de matéria-prima* restrito a *resistência mecânica*.

- Variáveis de Projeto:
 - Espessura da lateral (e);
 - Inclinação das nervuras (α)
 - Profundidade das nervuras (p).
- Funções Objetivo:
 - Deflexão radial (e, α , p);
 - Tensão circunferencial (e, α , p);
 - Custo de matéria-prima (e).
- Restrições:
 - Deflexão radial (e, α , p) \leq deflexão máxima;
 - Tensão circunferencial (e, α , p) \leq tensão máxima;
 - Custo de matéria-prima (e) \leq custo máximo de matéria-prima.

Nesta análise, o projeto deve convergir para definição de uma espessura mínima, bem como valores de profundidade e inclinação das nervuras, capazes de atender às restrições estruturais relativas à resistência mecânica do componente.

7 SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO DA LATERAL DO CESTO

Neste Capítulo é feito o detalhamento da resolução dos problemas de otimização, apresentados no Capítulo 6.

7.1. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO 1 - MAXIMIZAR O DESEMPENHO DE LAVAGEM RESTRITO A CUSTO DE FABRICAÇÃO

Neste problema, as funções objetivo *desempenho de lavagem* e *custo de fabricação* da lateral são concorrentes, e as variáveis consideradas são a quantidade e a largura das nervuras.

Como este problema de otimização possui somente duas variáveis de projeto, ambas as funções objetivo são escritas por funções polinomiais quadráticas de duas variáveis, representadas genericamente pela seguinte expressão matemática:

$$f(x, y) = ax + by + c(xy) + dx^2 + ey^2 + k \quad (7.1)$$

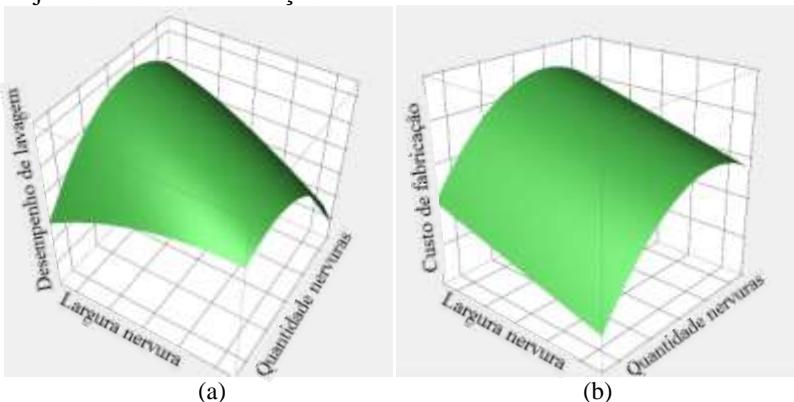
onde, f : função objetivo;
 a, b, c, d, e e k : constantes;
 x, y : variáveis do problema.

No caso da função desempenho de lavagem, como já existiam estudos preliminares relacionados à inclusão de nervuras ao longo do perímetro interno da lateral, utilizou-se destes para construir um padrão analítico de comportamento. Estes estudos produziram dados discretos a partir de um perfil de nervura muito próximo ao proposto neste trabalho, no qual se considerava as mesmas variáveis, validando assim o uso destes dados. Como estes experimentos foram realizados a partir da técnica de DOE, considerando estratégia estatística com dois fatores e três níveis, a metodologia Box-Behnken (BOX, 2005; FERREIRA, 2007) se torna adequada para a construção de uma superfície de resposta que represente continuamente tal comportamento. Assim, forma-se uma polinomial quadrática, dada pela expressão (7.1) e ilustrada no gráfico da Figura 32-a. Como explicado no item 6.3.2., os valores resultantes desta função são os percentuais de remoção de sujeira. Baseado na norma brasileira, o percentual mínimo de 88% de desempenho de lavagem considera o equipamento como classe A em eficiência.

Atualmente, os modelos de máquinas de lavar, em geral, operam acima deste valor.

Já para a função objetivo custo de fabricação, esta é diretamente dependente do investimento do estampo. Quanto mais nervuras e mais largas são elas, maior é o tamanho do ferramental, impactando em maior massa, o que converge para custos de investimento em ferramental maior. Existem, ainda, outros fatores que impactam o custo de transformação, atrelados ao desgaste da matriz de estampagem, bem como à eficiência de produção do equipamento em relação aos outros estágios de confecção do cesto. Com base nestas premissas e em cenários montados em relação a valores discretos das variáveis de projeto, uma análise de custo foi realizada para a fabricação de ferramental, bem como estudos de impactos temporais (perda ou aumento de velocidade). Desta forma, foi possível montar uma matriz de custo de fabricação em relação a tais cenários, que pôde ser traduzida por uma função polinomial quadrática, construída a partir da mesma metodologia Box-Behnken. A superfície de resposta para esta função está ilustrada na Figura 32-b.

Figura 32 - (a) função objetivo desempenho de lavagem. (b) função objetivo custo de fabricação.



Neste trabalho, as funções objetivo não são apresentadas com seus reais coeficientes devido à sigilo tecnológico, já que representam diretamente os comportamentos físicos em relação ao desempenho de lavagem e aos investimentos envolvidos. Sendo assim, nos gráficos da Figura 32, os valores dos eixos foram suprimidos para assegurar este sigilo.

As faixas de valores definidas para as variáveis de projeto devem respeitar critérios de projeto. Para este problema, as faixas atuam como restrições laterais do problema. Uma restrição é definida pela dependência geométrica entre largura e quantidade, uma vez que dependendo da largura da nervura há um número limitado de nervuras possíveis. Existe ainda a restrição devido ao processo fabril da lateral, pois nervuras muito próximas umas das outras, comprometem a sua própria geometria, devido ao estiramento excessivo do material.

No caso das restrições associadas às funções objetivo, estas entram no modelo de otimização como funções de desigualdade, definindo o espaço viável de projeto, e sendo representadas por:

- desempenho mínimo de lavagem;
- custo máximo de fabricação.

O método de solução do problema de otimização gera, primeiramente, uma população inicial, que serve como conjunto de solução inicial, a qual o algoritmo de otimização utiliza para iniciar o processo de convergência. Esta população inicial é formada por dados discretos das variáveis de projeto, geradas a partir da técnica de DOE para fatorial completo, considerando a faixa de valores definidas para as variáveis, e os níveis intermediários que elas podem assumir. A técnica de DOE combina o cruzamento de todos os possíveis valores das variáveis, definindo assim o tamanho da população.

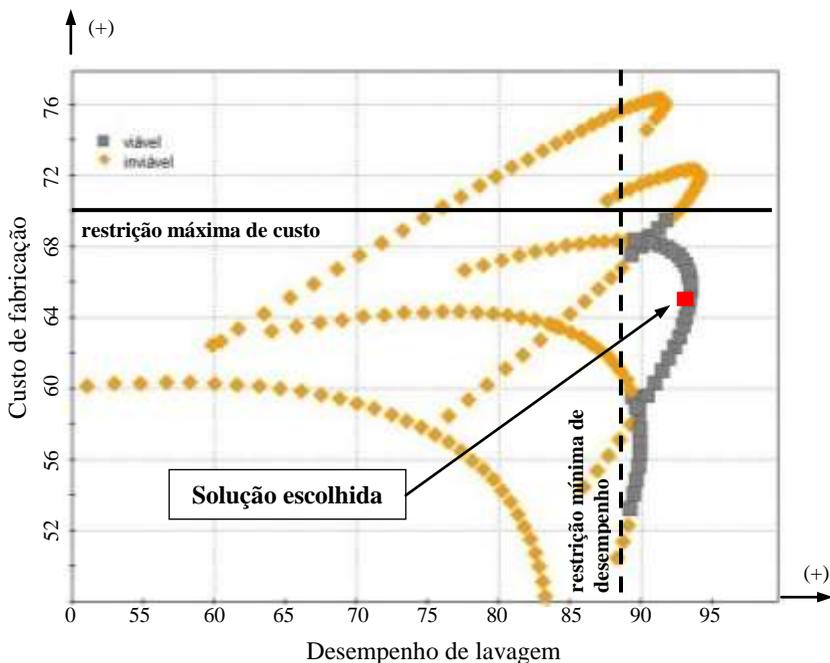
Como o algoritmo NSGA utiliza técnicas baseadas nas soluções elitistas, de acordo com a dominância de Pareto, é necessário ter as respostas calculadas das funções objetivo, geradas a partir da população inicial.

Os parâmetros de mutação e cruzamento utilizados são os pré-configurados pelo programa, sendo, respectivamente, 100 e 90%, o que de acordo com os autores do algoritmo e exemplos demonstrados pelo código comercial *modeFrontier* indicam boa convergência nos problemas em geral. Quanto ao tipo de cruzamento adotado, utilizou-se o método clássico, onde são cortadas as composições binárias de dois indivíduos em um único local aleatório, juntando os segmentos opostos de cada um deles, para então formar o novo indivíduo. O critério de convergência adotado pelo algoritmo não envolve a avaliação em relação ao grau de proximidade das respostas entre as gerações de indivíduos, como os algoritmos mais simples utilizam, mas considera o número de gerações definido.

O algoritmo converge para um conjunto de valores das duas funções, oriundos de pontos de projeto que podem ser viáveis ou inviáveis, onde os viáveis respeitam as restrições impostas ao modelo.

Como se trata de um conjunto de soluções, a utilização de ferramentas gráficas na interpretação dos resultados vem auxiliar o usuário na tomada de decisão. No gráfico da Figura 33, nota-se uma representação gráfica bidimensional de todas as soluções calculadas, em relação aos valores de *desempenho de lavagem* e *custo de fabricação*. Os pontos em cinza (■) respeitam o *espaço viável de projeto* (definido pelas restrições), enquanto os pontos em laranja (◆) não o fazem.

Figura 33 - Gráfico Scatter entre as funções objetivo desempenho de lavagem versus custo de fabricação.



Esses pontos, sejam eles viáveis ou não, são as respostas das funções objetivo, estando graficamente posicionados entre eles em relação às coordenadas formadas pelo sistema cartesiano. O eixo das abscissas corresponde ao desempenho de lavagem, enquanto o eixo das ordenadas ao custo de fabricação. Desempenho de lavagem e custo de

fabricação aumentam na direção positiva dos respectivos eixos. Os gráficos possuem seus eixos identificados pelos valores correspondentes, mas aqui devidamente suprimidos para respeitar os estudos industriais.

A possibilidade de encontrar um conjunto de soluções (em vez de uma única solução) permite avaliar os objetivos envolvidos e determinar uma solução mais adequada para o problema em estudo. Desta forma, a tomada de decisão, para definir qual solução viável é a mais significativa, leva em consideração o desempenho de lavagem, pois este é um critério relevante para o consumidor. Obviamente, mantendo o custo dentro dos limites previstos.

Sendo assim, a solução escolhida está identificada no gráfico pelo ponto em vermelho, onde atingiu-se um aumento de desempenho de lavagem de 2% em relação ao que a mesma máquina entrega com o cesto de linha atual. No que se refere ao custo de fabricação, há a necessidade de um investimento adicional em função do novo perfil geométrico da lateral, mas ficando abaixo em 10,5% do máximo permitido (restrição máxima de custo), baseado no ganho alcançado com a redução de custo prevista pelo projeto. Dentro do critério de solução viável, o ponto mais a direita poderia ter sido escolhido, mas teria um ganho percentual de desempenho de lavagem de apenas 0,2, enquanto que penalizaria o custo de produção em 3,2%, quando se compara a solução escolhida. Logo, a solução adotada representa um equilíbrio satisfatório entre desempenho de lavagem e os investimentos com custo de fabricação.

Esse ponto escolhido integra um dos pontos ótimos de Pareto, uma vez que não existe outra solução que melhore uma das funções objetivo sem prejudicar a outra. Obviamente, a tomada de decisão sobre a solução adotada deve considerar um dos pontos pertencentes a *fronteira de Pareto*, como condição de *otimalidade*.

A escolha da solução mais adequada define os valores das variáveis *quantidade* e *largura* das nervuras. Agora, estas variáveis operam como constantes dentro do problema de otimização subsequente.

7.2. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO 2 - MINIMIZAR O CUSTO DE MATÉRIA-PRIMA RESTRITO A RESISTÊNCIA MECÂNICA

Neste problema, as funções objetivo, *custo da matéria-prima* e *resistência mecânica* também concorrem quanto ao propósito, sendo as

variáveis de projeto definidas por espessura da lateral, profundidade e inclinação da nervura.

A função *custo da matéria-prima* possui somente relação linear com a espessura da lateral, sendo independente das demais. As espessuras de chapa são comercialmente padronizadas, tendo custos monetários atrelados à massa. Quando se reduz a espessura da chapa está se reduzindo sua massa, que conseqüentemente reduz os custos. Assim, graficamente, ao comparar as massas utilizadas nas laterais para cada uma das espessuras comerciais previstas, em relação ao custo por massa utilizado, verifica-se uma tendência linear de comportamento em relação aos valores monetários. Aplicando uma regressão linear (BURDEN, 2003) aos dados discretos, converge-se para uma função analítica contínua de uma única variável, sendo esta a espessura.

Já a função *resistência mecânica* está implicitamente traduzida pelas grandezas deflexão radial e tensão circunferencial. Assim, o comportamento estrutural está representado por duas funções, que não dependem somente das três variáveis associadas, mas também da largura e quantidade de nervuras. No entanto, como as duas últimas já foram abordadas no problema anterior, elas entram como constantes dentro do modelamento matemático das funções, sendo então escritas por uma relação polinomial quadrática de três variáveis e representadas matematicamente pela equação (7.2).

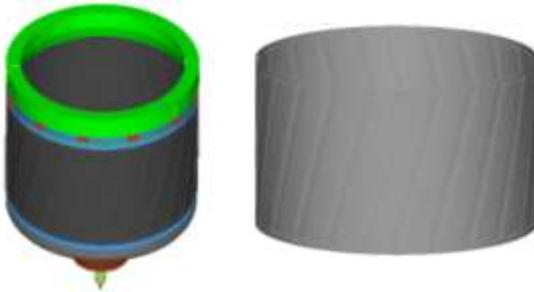
$$f(x, y, z) = ax + by + cz + d(xy) + e(xz) + f(yz) + gx^2 + hy^2 + iz^2 + k \quad (7.2)$$

onde, f : função objetivo;
 $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ e k : constantes;
 x, y, z : variáveis do problema.

No entanto, os dados utilizados para a geração destas funções não foram baseados em dados já disponíveis, mas construídos a partir de respostas das simulações numéricas estruturais, deflexão radial e tensão circunferencial, calculadas no código comercial ANSYS.

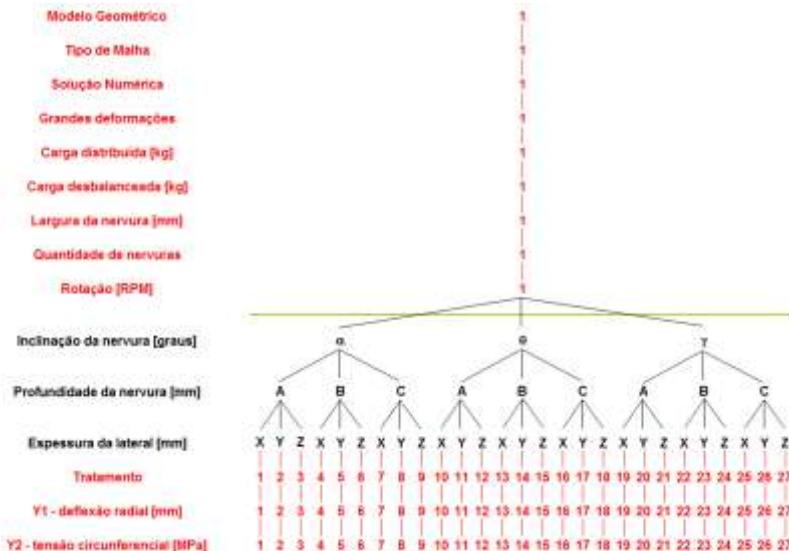
Todos os estudos de definição do modelo numérico do cesto, bem como da modelagem experimental para validação do modelo numérico, abordados nos Capítulos 4 e 5, serviram de base para a construção de um modelo numérico mais apropriado, de forma a gerar tais respostas.

Figura 34 - Modelo estrutural numérico de uma das configurações



Para a geração dessa base de dados, foram modeladas geometricamente laterais com três níveis de valores para cada uma das variáveis de projeto, resultando em 27 simulações numéricas, chegando ao modelo geométrico de um dos tratamentos da simulação apresentado pela Figura 34.

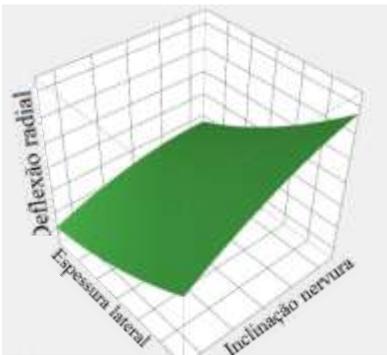
Figura 35 - Árvore de amostragem aplicada a análise estrutural.



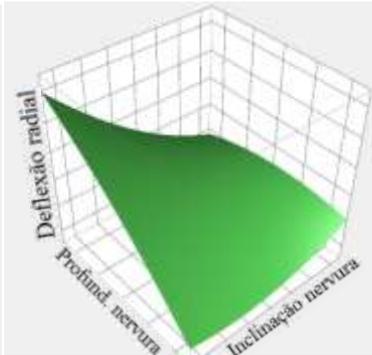
Na árvore de amostragem da Figura 35, é representado o DOE aplicado às simulações estruturais, de forma a calcular as respostas usadas na construção das superfícies de resposta de ambas as grandezas.

Os valores das variáveis, apresentados na árvore, foram propositalmente substituídos por símbolos gregos e alfabéticos, de forma a manter em sigilo os estudos. Da mesma forma, a representação matemática das funções polinomiais também não está sendo apresentada pela mesma premissa.

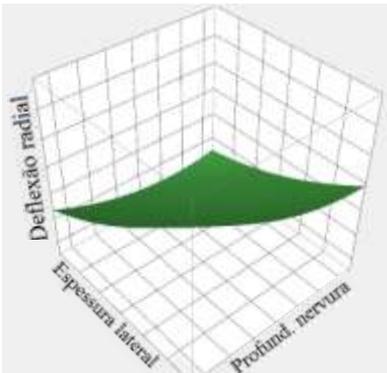
Figura 36 - Representação gráfica da deflexão radial em relação as variáveis: (a) espessura da lateral e profundidade da nervura, (b) profundidade e inclinação da nervura, (c) espessura da lateral e inclinação da nervura.



(a)



(b)



(c)

Para a determinação das funções polinomiais quadráticas, da deflexão radial e da tensão circunferencial, utilizou-se também a metodologia estatística de Box-Behnken. Estas funções são representadas por superfícies de respostas e são visualizadas

graficamente quando correlacionadas por duas variáveis de cada vez, como pode ser apresentado pelos gráficos da Figura 36, especificamente para a função deflexão radial.

As variáveis de projeto, profundidade e inclinação das nervuras têm sua faixa de valores limitada pelo processo fabril. No caso da variável espessura da lateral, valores abaixo de um certo limite impactam negativamente no processo de produção, estando atrelados ao desempenho de maquinário e manuseio dos cestos.

Quanto às restrições associadas às funções objetivo, estas também entram no modelo de otimização como valores limites, definindo o espaço viável de projeto, e sendo representadas por:

- deflexão radial máxima: garantir que haja uma folga resultante mínima entre tanque e cesto, sem prejudicar a operação de centrifugação, e conseqüentemente a falha do componente;

- tensão circunferencial máxima: garantir integridade estrutural, de forma que as tensões de operação não atinjam as tensões admissíveis de escoamento, considerando dimensionamento estático. A norma ASTM A240 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009) define como tensão nominal de escoamento o valor de 205 MPa, servindo de referência para a determinação de uma tensão admissível de 140 MPa, sendo esta calculada a partir de fatores de segurança usualmente praticados neste tipo de dimensionamento, de forma a garantir as variações do processo.

- limite de fadiga: garantir integridade estrutural, considerando os carregamentos cíclicos para fadiga de alto ciclo e vida infinita. Para o dimensionamento por fadiga do componente, verifica-se no **Apêndice D - Limite de Fadiga** a descrição do método de determinação do limite máximo de fadiga, através da aplicação dos devidos fatores de correção. Em função dos fatores de segurança aplicados no dimensionamento estático, quando se compara aos fatores de correção do limite de fadiga no dimensionamento por carregamento variável, a tensão admissível estática de 140 MPa é menor que a considerada pela fadiga 155 MPa. Logo, a restrição referente à tensão circunferencial será a própria utilizada para o dimensionamento estática, 140 MPa, descrito acima.

- custo máximo da matéria-prima: garantir que o custo de matéria-prima, diretamente proporcional à espessura da lateral, não ultrapasse o limite máximo estabelecido pelo projeto.

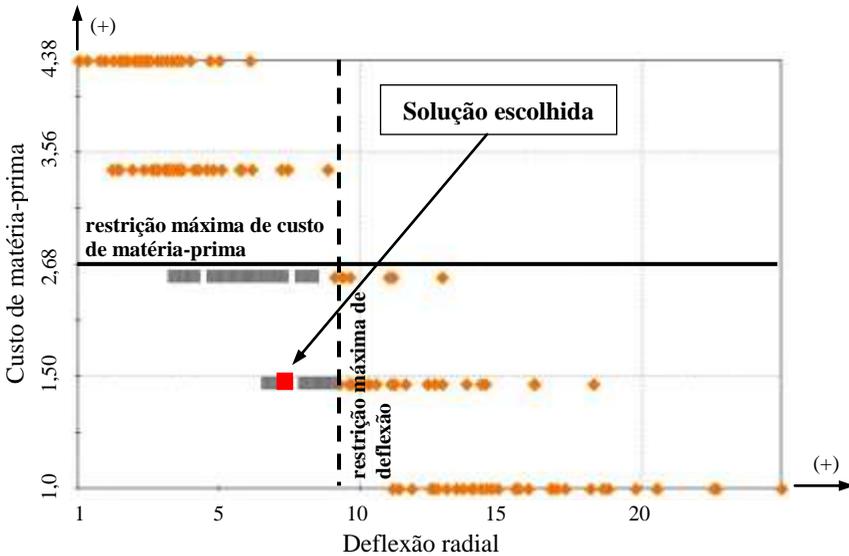
Considerando o método de solução através do algoritmo NSGA, a população inicial também foi gerada pela técnica de DOE para fatorial completo.

Assim como o problema anterior, os parâmetros de mutação e cruzamento adotados foram os mesmos, bem como o tipo de cruzamento e a quantidade de gerações. A convergência do método foi mais lenta quando comparada ao problema anterior, visto que se tem uma variável de projeto a mais e a discretização das faixas foram aumentadas, uma vez que as dependências são mais significativas para as funções objetivo que representam o modelo estrutural.

No gráfico da Figura 37, tem-se a representação do conjunto de soluções convergidas pelo algoritmo em relação aos valores de *custo de matéria-prima* e *deflexão radial*.

No eixo das abscissas é representada a grandeza custo de matéria-prima, enquanto no eixo das ordenadas é representada a deflexão radial. Ambas aumentam na direção positiva dos seus respectivos eixos. Aqui também os valores foram suprimidos em respeito aos estudos industriais.

Figura 37 - Gráfico Scatter entre as funções objetivo deflexão radial versus custo de matéria-prima.



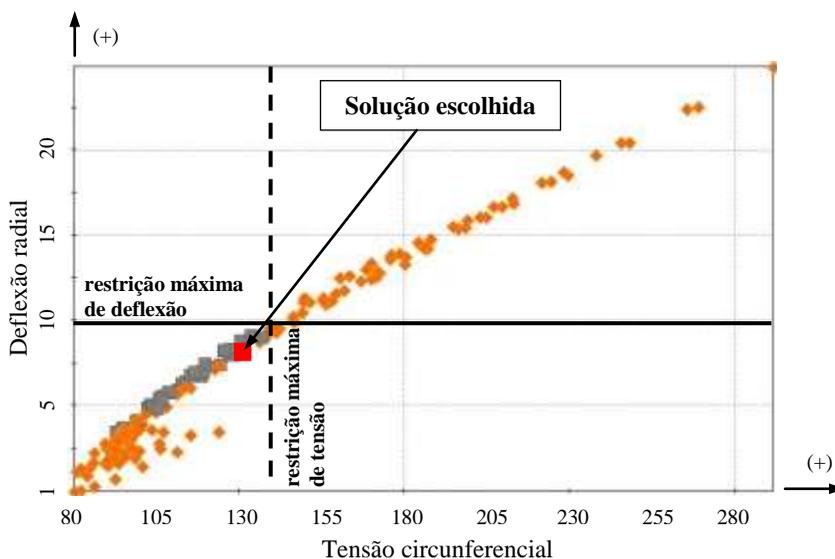
A existência de grupos discretos de soluções se deve ao fato de a variável de projeto espessura da lateral ser discreta na forma como é

comercializada, ou seja, não é factível a definição de valores fora do padrão comercial.

Olhando o conjunto de soluções, quando se compara graficamente (Figura 38) as funções objetivo *tensão circunferencial* e *deflexão radial*, os valores inferiores que se encontram fora do *espaço viável de projeto* não atendem devido à restrição de *custo da matéria-prima*, pois possuem valores de espessura acima da restrição máxima de custo da matéria prima.

Desta forma, considerando o conjunto de soluções, é escolhida uma solução única (ponto em vermelho nas Figura 37 e 38), em que se privilegia a que possui maior redução de custo de matéria-prima, uma vez que os critérios estruturais são respeitados e corroborados pelo fator de segurança aplicado.

Figura 38 - Gráfico Scatter entre as funções objetivo tensão circunferencial versus deflexão radial.



Assim, como solução final adotada, tem-se uma redução de espessura da lateral na ordem de 20%, que reflete um custo de matéria-prima na mesma proporção. Quanto à deflexão radial, para a combinação de largura, quantidade, profundidade e inclinação da

nervura, observa-se uma diminuição na ordem de 8%, aumentando a confiabilidade quanto aos desvios dimensionais oriundos da variação do processo de fabricação. No entanto, para a tensão circunferencial, há um aumento, quando comparado às simulações com o cesto atual de linha, na ordem de 16,5%, atingindo valores absolutos de 135 MPa nas regiões mais críticas, mas abaixo do limite máximo de tensão admissível do projeto (140 MPa).

Considerando o critério de solução viável, o ponto mais a esquerda no gráfico da Figura 37, e que representa um ponto mais acima no gráfico da Figura 38, quando comparado a solução escolhida, entregaria mesmo nível de redução de custo, mas com deflexão radial menor em 9%, além de um incremento em tensão na ordem de 11%, o que o posicionaria acima da tensão admissível prevista para o projeto. Assim como no problema anterior, a solução escolhida garante um equilíbrio satisfatório, neste caso entre custo de matéria-prima e dimensionamento mecânico.

8 RESULTADOS E CONCLUSÕES

8.1. CONCLUSÕES

Com a crescente disseminação das ferramentas computacionais no campo da pesquisa e desenvolvimento, a indústria vem garantindo mais assertividade nos projetos, convergindo em produtos e processos mais enxutos e robustos em um menor período de tempo.

No entanto, a utilização de ferramentas computacionais de otimização multiobjetivo é mais restrita e pouco disseminada, pois utiliza metodologias diferenciadas quando comparadas às ferramentas computacionais CAD e CAE, pois as últimas podem ou não fazer parte de um problema de otimização. Na prática, as premissas que envolvem a metodologia de otimização têm como base tratar as variáveis de saída em relação às variáveis de entrada, de forma a atingir o melhor objetivo dentro das restrições impostas ao problema. Para essa análise de otimalidade, os algoritmos estocásticos genéticos são os mais difundidos por cobrirem melhor diferentes tipos de problemas, envolvendo soluções ótimas locais e/ou globais, bem como pela facilidade de convergência.

Com a implementação da metodologia de otimização multiobjetivo em um projeto de redução de custo, a partir da modelagem virtual em programas CAD e CAE, foi possível estudar, de forma simultânea, os impactos relacionados ao desempenho de lavagem, à integridade estrutural do componente e à viabilidade econômica.

Logo, dentro da factibilidade fabril atual, é possível vislumbrar uma redução de custo da lateral do cesto, por meio da redução de sua espessura, desde que determinado perfil geométrico seja integrado ao componente. Mesmo que os modelos geométricos adotados nos estudos tenham sido modelados numericamente, houve toda uma tratativa de verificação deles, principalmente quanto à questão estrutural, por meio da experimentação pela técnica da extensometria em componentes reais.

Sabendo que os valores de tensão resultantes das simulações encontram-se abaixo dos valores medidos pela técnica experimental, entende-se que o modelo numérico é subdimensionado. No entanto, seria possível utilizar fatores de correção para mitigar com maior segurança. Embora, como dimensionamento estrutural, tenha sido utilizado o fator de segurança mencionado com o objetivo de cobrir tal divergência.

Entre outros pontos, este projeto possibilitou estudar outros fenômenos envolvidos, como é o caso do desempenho de lavagem, em relação às interações de geometrias de lateral do cesto com as roupas.

8.2. CONTRIBUIÇÕES

Entendendo-se a importância deste trabalho por sua efetividade, comprovada por meio da implementação do projeto, é natural que os conhecimentos aqui adquiridos possam ser difundidos para outros projetos, e mesmo para outros ambientes de desenvolvimento ou áreas correlatas. No item 1.4 aborda-se a metodologia de projeto utilizada para este desenvolvimento, servindo de auxílio para outros projetos.

É sabido que a metodologia de otimização multiobjetivo é pouco explorada em suas potencialidades, pois as ferramentas computacionais disponíveis são demasiadamente caras, mas ainda assim justificam tal investimento.

8.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando as investigações relacionadas ao tema estudado, é possível sugerir alguns tópicos a serem trabalhados no futuro, sendo eles:

- Estender a outros componentes de lavadoras de roupas, que são críticos economicamente, de forma a vislumbrar melhorias de custo;
- Estudar a implementação em projetos de melhoria de qualidade, uma vez que se pode convergir para componentes mais simples que garantam maior robustez ao longo de sua vida.
- Agregar modelos de confiabilidade ao dimensionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TÜRKAY, O. S.; SÜMER, I. T.; TÜGCU, A. K. **Modeling and dynamic analysis of the suspension system of a front loaded washing machines.** ASME ADVANCES IN DESIGN AUTOMATION CONFERENCE. Philadelphia, 1992, p.383-390.

BAGEPALLI, B. S. **Dynamic Modeling of Washing Machine suspension system** - ASME 11th BIENNIAL CONFERENCE OF MECHANICAL VIBRATIONS AND NOISE. Massachusetts, 1987, p.13-18.

CONRAD, D. C. **The Fundamentals of Automatic Washing Machine Design based upon Dynamic Constrains.** 1994. 261p. Thesis (Ph.D in Mechanical Engineering) - West Lafayette, School of Mechanical Engineering, Purdue University.

ZUOXIN, P. **A Study of the Vibration of a Fully Automatic Washer and The Optimizing of the Structure Parameters** - 42nd ANNUAL INTERNATIONAL APPLIANCE TECHNICAL CONFERENCE. University of Wisconsin, Madison, 1991, p.545-556.

CONRAD, D. C.; SOEDEL, W. **Auxiliary Mass Dampers.** Appliance Engineer, 1998, p.72-75.

BAE, S. ET AL. **Dynamic Analysis of an Automatic Washing Machine with a Hydraulic Balancer.** JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION. 2002, p.3-18.

DEB, Kalyanmoy. **Multi-objective Optimization Evolutionary Algorithms.** 1.ed. England: Wiley, 2009. 544p.

COELLO, Carlos A. Coello; LAMONT, Gary B. **Applications of Multi-objective Evolutionary Algorithms (Advances in Natural Computation).** 1. ed. Singapore: World Scientific, 2004. 792p.

ARORA, Jasbir S. **Introduction to Optimum Design.** 2. Ed. Iowa: Elsevier, 2004. 728p.

EHRGOTT, Matthias. **Multi-criteria Optimization.** 2. ed. New Zealand: Springer, 2005. 323p.

BARCHA, Wladimir A. M. **Estudo do Comportamento Dinâmico e do Fenômeno de Deslocamento em Lavadoras de Roupas de Eixo Vertical**. 2004. 161p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica EESC, USP – Universidade de São Paulo.

MUNHOZ, Érico de O. **Estudo em Análise Modal de Lavadora de Roupas sob Reais Condições de Contorno**. 2006. 176p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - São Carlos: Departamento de Engenharia Mecânica EESC, USP – Universidade de São Paulo.

IORIATTI, Adriano S. **Estudo da Dinâmica de Lavadoras de Eixo Vertical Utilizando Sistemas Multicorpos**. 2007. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - São Carlos: Departamento de Engenharia Mecânica EESC, USP – Universidade de São Paulo.

ZIRONDI, Micael. **Aplicação do *Thinking Process* no Ambiente de Desenvolvimento de Produtos**. 2009. 164p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP – Universidade de Campinas.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity**. 3ed. New York: McGraw-Hill International Edition, 1970. 567p.

TIMOSHENKO, S. P.; KRIEGER, S. **Theory of Plates and Shells**. 2ed. New York: McGraw-Hill International Edition, 1959. 580p.

TIMOSHENKO, Stephen P. **Resistência dos Materiais – Vol. 1**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977. 451p.

TIMOSHENKO, Stephen P. **Resistência dos Materiais – Vol. 2**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977. 518p.

VENTSEL, E.; KRAUTHAMMER, T. **Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Applications**. 1ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2001. 688p.

SHIGLEY, J.; MISCHKE, C.; BUDYNAS, R. **Mechanical Engineering Design**. 7ed. New York: McGraw-Hill Professional Edition, 2004. 960p.

WAREN, Y.; BUDYNAS, R. **ROARK's Formulas for Stress and Strain**. 6ed. New York: McGraw-Hill Professional Edition, 2001. 832p.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas – uma abordagem integrada**. 2ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2006. 931p.

HIBBELER, Russell C. **Resistência dos Materiais**. 3ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000. 701p.

CHAKRABARTY, J. **Theory of Plasticity**. 3ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006. 882p.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Metal Handbook / Vol. 01 - Properties and Selection Irons, Steels and High Performance Alloys**. 10ed. 2005. 1618p.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Metal Handbook / Vol. 19 - Fatigue and Fracture**. 10ed. 2002. 2592p.

HUGHES, Thomas J. R. **The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis**. 1ed. Mineola: Dover Publications, 2000. 682p.

COOK, Robert D.; MALKUS, David S.; PLESHA, Michael E.; WITT, Roberto J. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4ed. Wisconsin: John Wiley, 2002. 719p.

BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite Element Procedures**. 1ed. New Jersey: Pearson Education, 2006. 1037p.

RAO, Singiresu S. **Mechanical Vibrations**. 4ed. New Jersey: Pearson Education, 2004. 1078p.

GENTA, Giancarlo. **Dynamics of Rotating System**. 1ed. Torino: Springer, 1994. 658p.

PORTELA, Artur; SILVA, Arlindo. **Mecânica dos Materiais**. 1. ed. Brasília: Editora UNB, 2006. 336p.

ROSA, Edison da; ROESLER, Carlos R. de Melo. **Curso de Extensometria**. Florianópolis, 2010. 180p.

ANDOLFATO, Rodrigo P.; CAMACHO, Jefferson S.; BRITO, Gilberto A. **Extensometria Básica**. Ilha Solteira, 2004. 46p.

ANTONY, Jijo. **Design of Experiments for Engineers and Scientists**. 1ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. 165p.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. 5ed. Wisconsin: John Wiley, 2012. 752p.

MASSON, Robert L.; GUNST, Richard F.; HESS, James L. **Statistical Design and Analysis of Experiments**. 2ed. Wisconsin: John Wiley, 2003. 730p.

ATKINS, Peter; DE PAULA, Júlio. **Physical Chemistry for the Life Sciences**. 1ed. New York: Oxford University Press, 2006. 699p.

GORE, Michael. **Spectrophotometry & Spectrofluorimetry: A practical approach**. 2ed. New York: Oxford University Press, 2000. 368p.

BOX, George E. P.; HUNTER, J. Stuart; HUNTER, William G. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery**. 2ed. New Jersey: John Wiley, 2005. 664p.

FERREIRA, S. L. C.; BRUNS, R. E.; FERREIRA, H. S., MATOS, G.D. **Box - Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods**. Elsevier, 2007. 8p.

JUMP 10 Software. **Help Guide — Box-Behnken Statistical Methodology**.

BURDEN, Richard L.; DOUGLAS, J. **Análise Numérica**. 8. Ed. São Paulo: Thomson Learning, 2003. 728p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM - A240 / A240M - 09a: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet and Strip for**

Pressure Vessels and for General Applications. West Conshohocken, 2009. 13p.

PAPALAMBROS, Panos Y.; WILDE, Douglass J. **Principles of Optimal Design - Modeling and Computation.** 2. ed. England: Cambridge University Press, 2000. 416p.

SAWARAGI, Yoshikazu; NAKAYAMA, Hirotaka; TANINO, Tetsuzo. **Theory of Multi-objective Optimization.** 1. ed. USA: Academic Press, 1985. 311p.
Theory of Multiobjective Optimization_Sawaragi

GHOSH, Ashish; DEHURI, Satchidananda; GHOSH, Susmita. **Multi-objective Evolutionary Algorithms for Knowledge Discovery from Databases.** 1. ed. Poland: Springer, 2008. 159p.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS (ASM). **ASM Metals Handbook - Volume 19: Fatigue and Fracture.** 1996. 2592p.

GUIMARÃES, Vagner Alves. **Controle Dimensional e Geométrico - Uma introdução a metrologia industrial.** 1. ed. Passo Fundo: Edupf, 1999. 161p.

APÊNDICE A – Caracterização da Carga de Consumidor (Load Characterization)

A *caracterização da carga de consumidor* trata de uma clínica realizada junto aos consumidores para entender os hábitos relacionados à lavagem de roupas.

Essa abordagem não se limita a fabricantes de máquinas de lavar, mas a quaisquer fabricantes que produzem equipamentos que tenham interação direta com pessoas.

A clínica busca entender a prática frequente do consumidor em relação ao uso do equipamento, neste caso, a máquina de lavar, e traduzi-la em uma linguagem técnica por meio de uma especificação de engenharia.

Assim, é possível identificar o "costume do consumidor" em relação a algumas características intrínsecas ao processo de lavagem de roupas, que se correlacionam com atributos técnicos:

- a) Quantidade de roupa carregada (kg);
- b) Quantidade de detergente utilizado (l);
- c) Quantidade de amaciante utilizado (l);
- d) Quantidade de alvejante utilizado (l);
- e) Tipo de agitação utilizado;
- f) Tipo de enxague utilizado;
- g) Tipo de centrifugação utilizado;
- h) Tipo de roupa utilizado;
- i) Magnitude de ruído;

Entre outros...

Com base nestes estudos, é possível reproduzir os hábitos do consumidor em laboratório e entender dinamicamente como as características citadas, e mesmo outras, entregam estatisticamente as respostas para cada objetivo proposto. Neste caso, parte-se do objetivo de determinar as *cargas distribuídas*, *cargas concentradas* (*desbalanceadoras*), bem como as *alturas médias* destes carregamentos dentro do cesto.

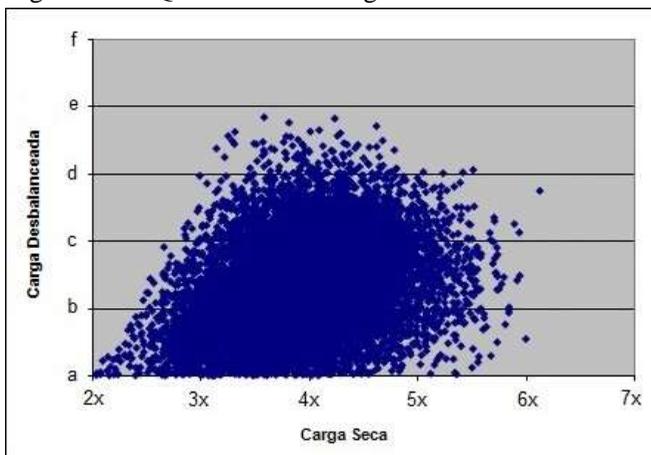
Para a reprodução dessas características em laboratório, é utilizada a *inferência estatística* para entender a quantidade de repetições dos testes, de forma a explicar a frequência da ocorrência dos eventos, tendo resultados confiáveis que possibilitem a previsão dos comportamentos futuros.

Algumas destas características estão intrinsecamente relacionadas entre si, uma vez que interagem de forma a produzir resultados diferentes, quando comparadas individualmente. Por exemplo, ao correlacionar a "quantidade de roupa carregada" com o "tipo de agitação utilizado" (frequência e amplitude circular de movimento do agitador), haverá diferenças quanto às cargas desbalanceadoras entregues ao final de cada etapa de agitação.

Além disso, estudos de laboratórios, executados e analisados através das técnicas de *planejamento de experimentos (DOE)*, são ricos para o entendimento das interações, pois explicam correlações que fisicamente não são fáceis de perceber.

A partir desta análise, incorporada ao "know-how" do fabricante na modelagem dos carregamentos e das cargas (roupas), é possível determinar *valores* ou *níveis* de cargas *distribuídas* e *concentradas* para cada tamanho de máquina, sendo estes capazes de atender os requisitos limites de forma otimizada.

Figura 39 – Quantidade de carga desbalanceadora em função da carga



Como a intenção é entender o nível de carregamento de roupa no cesto para dado tamanho de máquina, tem-se no gráfico da Figura 39 um resumo do mapeamento que correlaciona os valores de carga seca introduzidos pelo consumidor com as cargas concentradas (desbalanceadoras) resultantes, em que as últimas são as respostas geradas pela interação da carga seca com o ciclo de lavagem em determinado tamanho de máquina.

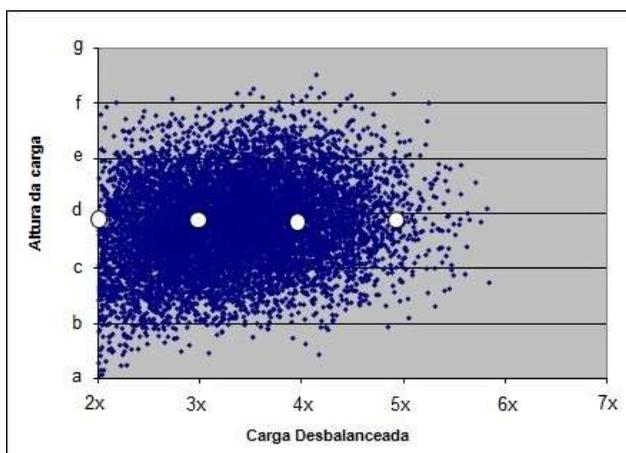
Assim, é possível determinar a quantidade de carga desbalanceadora a ser utilizada nos testes e nos modelamentos analíticos e numéricos. No entanto, o gráfico leva a duas importantes interpretações de carregamentos:

- 1º) carga desbalanceadora máxima;
- 2º) cargas desbalanceadoras mais prováveis de ocorrer.

Por exemplo, assumindo que se utiliza uma quantidade de carga seca de "5X", tem-se como carga desbalanceadora máxima na ordem de "d", mas tendo maior concentração estatística desta entre os valores "b" e "c".

Assim, com base em uma análise ponderada sobre a probabilidade da ocorrência de certas cargas desbalanceadoras, é possível dimensionar os componentes de forma otimizada.

Figura 40 – Posição vertical (altura) da carga desbalanceadora.



Dentre os respostas esperadas pela metodologia, os valores de altura das cargas desbalanceadoras são também plausíveis de serem correlacionados com as próprias cargas desbalanceadoras. Na Figura 40, tem-se o mapeamento gráfico das alturas médias das cargas desbalanceadoras em função dos valores de cargas desbalanceados alcançados durante os testes.

Assim como o Gráfico da Figura 39, este também mostra duas interpretações, sendo elas representadas por

- 1º) altura máxima da carga desbalanceadora;
- 2º) alturas mais prováveis de ocorrer.

Por se tratar de conhecimento tecnológico de domínio privado, os gráficos foram devidamente manipulados de forma a proteger as informações.

Não foram incluídos os gráficos das *cargas distribuídas*, visto que se trata da mesma lógica, uma vez que este apêndice tem como objetivo explicar a funcionalidade da clínica e como esta pôde enriquecer e direcionar os estudos de otimização.

Como conclusão, torna-se possível transcrever interpretações subjetivas em variáveis discretas, que possibilitam a utilização de técnicas de análise.

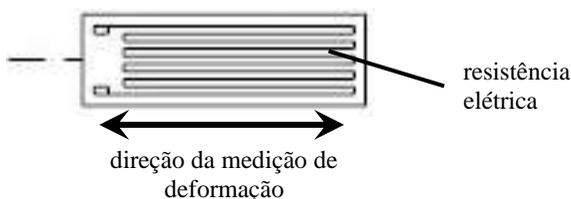
APÊNDICE B – Técnica Experimental da Extensometria

Neste apêndice, tem-se como objetivo explicar sucintamente a aplicação da técnica da extensometria para medição das deformações em uma peça física real.

A extensometria permite determinar o estado de deformação ao redor de um ponto para um determinado corpo, através das deformações nas variadas direções. Os medidores de deformação são denominados de "extensômetros" ou, do inglês, "strain-gauges", que são transdutores.

Os extensômetros são classificados em vários tipos, dependendo do fenômeno em que se baseia seu princípio de funcionamento. Na aplicação estrutural, aqui abordada, normalmente se utiliza os *extensômetros elétricos de resistência*, que se baseiam na variação da resistência elétrica de um circuito quando submetido a uma deformação. Na Figura 41., tem-se uma imagem de um extensômetro elétrico de resistência unidirecional, que mede a deformação em uma única direção, longitudinal ao seu comprimento.

Figura 41. – Modelos de rosetas de extensômetros elétricos de resistência.



Basicamente, a extensometria se embasa na medição real das deformações. Entretanto, como a variável a ser medida, a *deformação*, é uma grandeza vetorial, a posição e direção em que os extensômetros são colados na estrutura contribuem significativamente para o sucesso do experimento.

Para garantir a medição correta da deformação, os extensômetros são colados sobre a superfície da estrutura, especificamente sobre o ponto em estudo.

A colagem, por meio de adesivos, é a parte mais crítica, que pode comprometer completamente toda a aplicação, pois é necessário garantir uma região isenta de qualquer tipo de sujeira, para que não haja comprometimento da qualidade da união. De qualquer forma, o processo

de aplicação dos extensômetros é bastante delicado, exigindo qualidade, precisão e paciência.

Os extensômetros tem como características:

- alta precisão de medição;
- excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- excelente linearidade;
- medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- aplicáveis em ambientes submersos ou com atmosfera corrosiva, desde que aplicados apropriadamente;
- usados como elementos transdutores para medição de várias grandezas físicas, como força, pressão, torque, aceleração, deslocamento;
- possibilitam a utilização em locais remotos;

1. O princípio de funcionamento – relação tensão-deformação ($\sigma - \epsilon$)

Quando um carregamento externo age sobre um material, deformações causadas dentro da região elástica são proporcionais a esta força, mantendo uma relação constante entre a magnitude desta e a quantidade de deformação. De fato, o carregamento externo é equalizado por um esforço gerado internamente ao material, denominado de tensão (σ). A tensão é uma grandeza com magnitude e direção.

Para os materiais em geral, quando operam dentro do regime elástico, possuem uma relação da tensão (σ) proporcional à deformação (ϵ), explicada pela lei de Hooke, e já enunciada anteriormente:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

em que a variável E é a constante de proporcionalidade, dada pelo material e denominada *módulo de elasticidade* ou *módulo de young*.

Na realidade, os extensômetros medem apenas a variação de distância (ΔL) de dois pontos inicialmente afastados de um comprimento L , e tendo a extensão ou deformação (ϵ) dada pela relação matemática:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Entretanto, o extensômetro não mede diretamente a variação de distância, mas transforma uma deformação em uma variação

proporcional à sua resistência elétrica. A relação entre a deformação aplicada (ε) e a variação da resistência de um extensômetro é dada por:

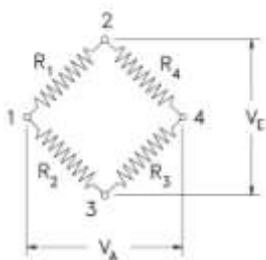
$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \varepsilon$$

onde, R_0 : resistência inicial do extensômetro;
 ΔR : variação da resistência por deformação;
 k : fator do extensômetro.

2. O princípio da medição

Para que se possa medir a variação de resistência do extensômetro, devido à deformação sofrida, é necessário empregar um circuito elétrico. Este circuito é comumente denominado de ponte de Wheatstone (Figura 42), sendo o mais preciso para pequenas medições.

Figura 42. – Ponte de Wheatstone.



A ponte é composta por quatro braços, que contêm quatro resistências, R_1 a R_4 , uma em cada braço. Quando se liga os pontos 2 e 3, denominados de nós, a uma fonte de potência com tensão definida V_E , surge uma diferença de potencial V_A , entre os nós 1 e 4, sendo o valor de V_A dependente dos quocientes entre as resistências (R_1/R_2) e (R_4/R_3).

Desta forma, temos matematicamente a seguinte equação:

$$\frac{V_A}{V_E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{(R_1/R_3) - (R_2/R_4)}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$

A ponte de Wheatstone está equilibrada quando se tem $V_A/V_E = 0$. Assim, para que a ponte esteja equilibrada é necessário respeitar:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad \text{ou} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

Considerando que uma dada ponte de Wheatstone está equilibrada, qualquer variação de resistência percebida em uma ou mais resistências da ponte provocará uma diferença de potencial V_A diferente de zero. Além disso, assumindo que a variação da resistência (ΔR_i) seja muito inferior à própria resistência (R_i), o que em geral é sempre válido, tem-se a seguinte relação:

$$\frac{V_A}{V_E} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

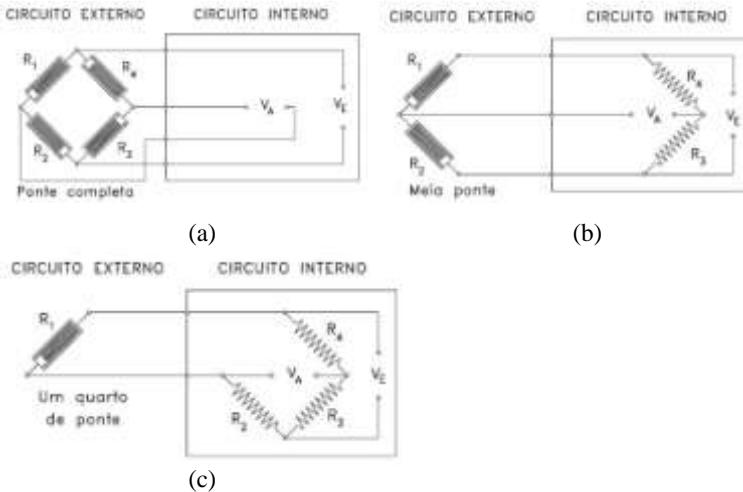
ou em termos de deformação ε ,

$$\frac{V_A}{V_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

3. Utilização das pontes de Wheatstone

As pontes podem ser utilizadas de três formas diferentes, em que os circuitos têm um, dois ou quatro extensômetros, denominados como um quarto de ponte, meia ponte ou ponte completa, respectivamente.

Figura 43. – (a) ponte completa de Wheatstone. (b) meia ponte de Wheatstone. (c) um quarto de ponte de Wheatstone.



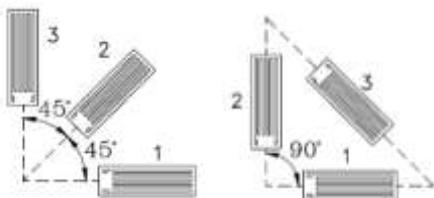
Para qualquer configuração utilizada, a ponte de wheatstone deve estar sempre completa por quatro resistências, sendo formada parcialmente ou por até quatro extensômetros, conforme explicado na Figura 43.

No circuito externo se encontram os extensômetros que serão utilizados para medir as deformações, que são nada mais que resistências. Já no circuito interno se posicionam as resistências que não sofreram nenhuma ação de deformação, sendo estas necessárias para completar a ponte.

4. Rosetas de extensômetros.

Para que a técnica de *extensometria* permita determinar o estado de deformação em torno de um ponto do corpo, são utilizados extensômetros do tipo *rosetas* (conforme Figura 44), que são um conjunto de extensômetros ligados entre si de modo a ocuparem, no ponto considerado, posições geometricamente bem definidas, e assim definir o estado de deformação neste ponto.

Figura 44. – Modelos de rosetas de extensômetros elétricos de resistência.



APÊNDICE C – Resumo da Técnica Experimental DOE (Design of Experiments)

Trata-se de uma técnica poderosa utilizada para a exploração de novos processos, produzindo aprendizados diferenciados para os processos existentes e otimizando-os para alcançar desempenho superior.

1. Introdução

Experimentos são, ainda hoje, largamente realizados por muitas empresas produtoras, com o intuito de aumentar o entendimento e criar conhecimento sobre os processos produtivos envolvidos.

Os processos de fabricação são os que frequentemente mais se interessam em explorar a relação entre as *variáveis de entrada*, ou *fatores*, com as características de desempenho alcançadas na saída, traduzidas por índices de qualidade e produtividade.

Uma das formas mais comuns, empregada atualmente por muitos engenheiros e cientistas, é a de entender como cada variável se comporta no processo. Esta abordagem é denominada de *uma variável por vez* (*one variable at time - OVAT*), em que uma só variável varia ao longo do experimento, sendo as demais fixadas. Esta abordagem depende de conjecturas, previsões, sorte, intuição e experiência para o sucesso, além de requerer muito recurso para obter uma limitada quantidade de informação sobre o processo. Normalmente, o OVAT não é confiável, é ineficiente, consome tempo e pode produzir falsas respostas otimizadas.

Os métodos estatísticos desempenham um papel importante no planejamento, condução, análise e interpretação de dados advindos dos experimentos. Quando muitas variáveis influenciam certa característica de um produto, a melhor estratégia é projetar um experimento que seja válido e confiável, para que as conclusões tomadas sejam efetivas, eficientes e econômicas.

Para cada processo em análise, algumas variáveis tem maior influência do que outras quanto aos resultados da saída. Assim, durante o planejamento do experimento, é importante entender qual conjunto de variáveis afeta mais o desempenho, de forma a determinar os melhores *níveis* ou *valores* destas variáveis, para obter, satisfatoriamente, um resultado funcional na saída.

A técnica do DOE foi desenvolvida no início da década de 1920 por Ronald Fisher, durante estudos na estação de pesquisa de agricultura

de Rothamsted, em Londres. Em sua experimentação inicial, Fisher estava preocupado em determinar os efeitos de vários fertilizantes em diferentes lotes de terra. No final, a conclusão é que não dependia apenas do fertilizante, mas também de outros fatores de cada um dos lotes de terra, como condição do solo adjacente, umidade do solo etc. Fisher usou o DOE para diferenciar o efeito do fertilizante sobre os demais. Assim, desde então, a técnica do DOE tem sido largamente aceita e utilizada no campo da agricultura e biologia. O grande potencial de aplicação do DOE nos processos de fabricação inclui:

- melhor rendimento e estabilidade do processo;
- melhores lucros e retorno de investimentos;
- redução da variação do processo;
- redução do tempo de processo de desenvolvimento;
- redução de sucata e desperdício, entre outros;

De forma geral, os experimentos envolvem uma sequência de atividades:

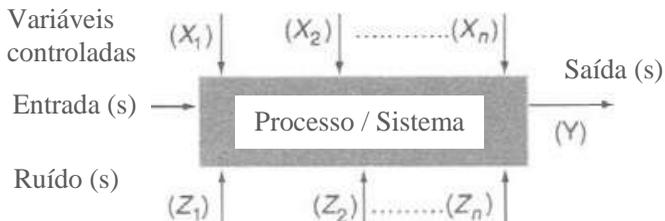
1. *Hipóteses*: uma suposição que motiva o experimento;
2. *Experimento*: uma série de testes conduzidos para investigar as hipóteses;
3. *Análise*: envolve o entendimento da natureza dos dados e análise estatística dos dados coletados do experimento;
4. *Interpretação*: entender os resultados da análise experimental;
5. *Conclusão*: implica em avaliar se as hipóteses originalmente adotadas são verdadeiras, ou não. A maioria dos experimentos são realizados para testar as hipóteses, onde muitas vezes estabelecem novas hipóteses que requerem mais experimentos.

2. Fundamentos do DOE

Para o planejamento apropriado do experimento é essencial que se tenha um bom entendimento do processo em análise (Figura 45), sendo este definido por uma transformação das *entradas* em *saídas*. As *entradas* são definidas pelos fatores ou variáveis do processo, como pessoas, materiais, métodos, ambiente, máquinas, procedimentos, etc. e as *saídas* são as características de desempenho ou qualidade.

O sucesso de qualquer projeto de experimento depende de um apropriado planejamento, escolha adequada do modelo, análise estatística dos dados e habilidades do time de trabalho.

Figura 45 - modelo geral de um processo.



No contexto do DOE, é possível se deparar com dois tipos de fatores, os qualitativos e os quantitativos. Para os quantitativos, é definida a faixa de valores que podem assumir, e como serão medidos e controlados durante o experimento (temperatura, velocidade, etc). Já os qualitativos são de natureza discreta (tipo de material, tipo de fornecedor, etc). Um fator pode ter diferentes níveis, dependendo de sua natureza, onde os qualitativos, geralmente, requerem maiores quantidades de níveis do que os quantitativos. O termo nível se refere ao valor especificado ou configuração do fator que está sendo examinado no experimento. Por exemplo, se um experimento está utilizando 3 diferentes tipos de materiais, então se pode dizer que o fator "tipo do material" possui "três" níveis.

Existem três métodos para o projeto de experimento, que podem ser utilizados, sendo a *randomização*, *replicação* e *por blocos*.

2.1. Randomização

A *randomização* é utilizada para experimentos que possuem ruídos, devido a distúrbios externos, por exemplo, a natureza física do mundo onde vivemos. A produção de uma peça metálica, envolve operações com pessoas, máquinas, medições, ambiente e outros. As máquinas são entidades que desgastam e falham, as atitudes das pessoas variam ao longo do tempo. Resumidamente, o(s) *ruído(s)* são fatores que influenciam as respostas do experimento, mas que não se consegue controlar, seja por não conhecê-lo ou pela impossibilidade de controlá-lo. Logo, ter um método de controle de processo para garantir estabilidade estatística é necessário. Assim, se acredita que um processo instável e sem randomização acarreta em resultados irrealistas e sem sentido. A *randomização* é um método de reduzir os efeitos devido a tendências ou distorções. Uma *randomização* apropriada do experimento vem auxiliar nos efeitos advindos dos ruídos, que podem

estar presentes. Em outras palavras, a *randomização* pode assegurar que todos os níveis dos fatores em estudo, tem uma chance igual de estarem sendo afetados pelo ruído.

2.2. Replicação

É um processo de execução de ensaios experimentais em uma sequencia aleatória, que significa repetições em um experimento inteiro, ou parte dele, em mais de uma condição. A replicação tem duas importantes propriedades, onde a primeira permite obter uma estimativa do erro experimental, e a segunda a de consentir uma estimativa mais precisa do efeito do fator e suas interações. Se o número de réplicas é igual a um, não é possível ter conclusões satisfatórias sobre os efeitos ou interações, podendo estes ser significantes dependendo do erro experimental. Por outro lado, se tem suficiente número de réplicas, é possivelmente seguro fazer inferências sobre os efeitos dos fatores e suas interações.

2.3. Por blocos

É um método de eliminação dos efeitos das variações irrelevantes devido ao ruído, e melhora assim a eficiência do projeto do experimento. O principal objetivo é eliminar fontes de variação não desejáveis, tais como lote-a-lote, turno-a-turno, dia-a-dia de produção. A ideia é organizar um experimento similar que rode em blocos, ou grupos. Geralmente, um bloco é um conjunto de condições experimentais relativamente homogêneas.

3. Interação de Fatores

Para grande parte dos problemas na indústria, a causa raiz destes é a interação entre os fatores, em vez dos efeitos individuais de cada fator, sobre a resposta. As interações ocorrem quando o efeito de um parâmetro de processo depende do nível de outro parâmetro. Em outras palavras, o efeito de um fator sobre a resposta é diferente em diferentes níveis de outros fatores, ou parâmetros de processo. De modo a estudar os efeitos das interações entre os parâmetros de processos, é necessário variar todos os fatores simultaneamente.

Assim, o experimento OVAT pode conduzir a uma conclusão insatisfatória e em muitos casos indicaria condições ótimas falsas.

4. Tipo de Projeto de Experimento

É largamente aceito que a maioria dos projetos de experimentos nos processos de fabricação utilizam o tipo *fatorial completo* (*full factorial*) ou *fatorial fracionado* (*fractional factorial*), em 2 ou 3 níveis para cada fator. O tipo fatorial permite a um pesquisador estudar o efeito em conjunto dos fatores, processos ou parâmetros de projeto, sobre a resposta.

4.1. Fatorial Completo (Full Factorial)

O tipo fatorial completo consiste em executar todas as possíveis combinações de níveis para todos os fatores. O número total de experimentos, ou chamados, *tratamentos*, para estudar os fatores k em dois níveis é 2^k . A aplicação com dois níveis é particularmente utilizada em estágios iniciais do trabalho experimental, especialmente quando o número de parâmetros de projeto ou processo é menor ou igual a 4. Uma das hipóteses para a utilização de fatores com 2 níveis é que a resposta é aproximadamente linear ao longo da faixa de valores, entre os fatores definidos. Assim, um experimento com 3 fatores, onde cada fator tem 2 níveis, se tem um experimento 2^3 , que significa 8 tratamentos ou ensaios a serem realizados.

4.2. Fatorial Fracionado (Fractional Factorial)

Este tipo de projeto de experimento é utilizado quando não se tem tempo, recurso e orçamento adequado para rodar um fatorial completo. Se for possível assumir que certa interação de ordem superior (terceira ordem ou superior) não é importante, ou é de baixa relevância nos efeitos sobre a resposta, a utilização do fracionado é aceitável. Assim, um projeto que deseja estudar os efeitos principais e interações com um número mínimo de experimentos, tratamentos ou ensaios, é chamado de *fatorial fracionado*. Este tipo é comumente e largamente utilizado na indústria, sendo geralmente representados na forma $2^{(k-p)}$, onde k é o número de fatores e $1/2^p$ representa a fração de um *fatorial completo* 2^k . Por exemplo, $2^{(5-2)}$ é um quarto avos da fração de um experimento *fatorial completo* de 2^5 . Isto significa que é possível estudar 5 fatores a 2 níveis cada, em apenas 8 ensaios, em vez de 32 tratamentos.

APÊNDICE D – Limite de Fadiga

Para o dimensionamento por fadiga, utilizado para carregamentos cíclicos, é necessário entender o comportamento do material em relação ao limite de fadiga e os fatores de correção deste limite em relação ao componente em análise.

1. Regime e Modelo de Falha por Fadiga

No caso do cesto, como os ciclos de carregamentos que envolvem a vida do componente, ocorrem em quantidades acima de 10^3 , se considera um regime de fadiga de alto ciclo (FAC). Desta forma, para modelos FAC, o modelo de falha mais empregado é o de *tensão-número de ciclos*. Esta abordagem apresenta melhores resultados quando se tem conhecimento das amplitudes das solicitações ao longo da vida do componente.

Assim, este modelo é baseado na tensão, buscando determinar a *resistência a fadiga* ou o *limite de fadiga* do material.

No caso da lateral do cesto, esta é fabricada em aço inoxidável do tipo ferrítico, que se trata de um aço-liga com comportamento mecânico semelhante as aços de baixo carbono. Assim, este material possui um *limite de fadiga* (em vez de *resistência a fadiga*), cuja definição é o nível de tensão abaixo do qual não ocorrem mais falhas por fadiga, podendo continuar com os ciclos de carregamentos ilimitadamente.

2. Tipos de Carregamentos

O cesto de lavadora de roupas sofre carregamentos cíclicos que ocorrem entre as etapas de lavagem e centrifugação dentro de cada ciclo, bem como entre os ciclos. No caso específico da lateral do cesto, os carregamentos alternados são de flexão e/ou normal. Ainda, quanto aos carregamentos, existem regiões onde estes podem ser de natureza *alternada* (onde as tensões sofrem alternância com carregamentos de tração e compressão) como *repetida* (em que as tensões oscilam de zero até diferentes amplitudes de variação).

3. Fatores de Correção do Limite de Fadiga

Para a montagem da curva de fadiga, é necessário determinar a resistência máxima à tração e o limite de fadiga, baseado nos cálculos

analíticos definidos pela teoria de fadiga. No entanto, estes cálculos se embasam nas amostras testadas empiricamente, que possuem determinado carregamento, geometria, dimensão, acabamento, etc.

Assim, se utiliza de fatores para corrigir o limite de fadiga, de forma a representar o componente sob carregamentos cíclicos.

Estes fatores estão relacionados ao:

- tipo de carregamento;
- tamanho do componente;
- tipo de acabamento superficial;
- temperatura de operação;
- ambiente;
- confiabilidade do componente.

Os cálculos foram embasados no material da ASM Metals Handbook (AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS, 1996).