

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO MULTITESTE PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO AO DESGASTE EM MICROESCALA

Icaro Carginin Pesamosca, icaro.pesamosca@gmail.com¹

Carlos Roberto Cauduro, crcauduro@ctism.ufsm.br²

Leonardo Nabaes Romano, romano@ufsm.br³

Cristiano José Scheuer, cristiano.scheuer@ufsm.br¹

¹ Grupo de Tecnologia e Mecânica dos Materiais, UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

² Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

³ Grupo Projeto de Sistemas Técnicos, UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

Resumo. *Existem diversos equipamentos para avaliar o desempenho ao desgaste por abrasão em microescala. Esses equipamentos podem ser amplamente classificados em duas configurações: esfera fixa e esfera livre. Devido às suas características construtivas, esses dispositivos possuem funcionalidades que muitas vezes não atendem aos requisitos de uso. Com base nessas limitações, o objetivo desta pesquisa é desenvolver um equipamento multiteste para avaliar o desgaste por abrasão em microescala nas configurações esfera fixa e livre. A metodologia de projeto utilizada para o desenvolvimento do equipamento foi o método de Pahl e Beitz. O conceito de equipamento desenvolvido inclui recursos que permitem o controle remoto da execução do teste, e o comando/medição das variáveis de entrada e saída. A interface de programação do equipamento consiste em uma tela touch-screen de 4,3 polegadas interfaceada a uma plataforma Arduino, que permite a fácil programação, controle e aquisição de dados de teste. O conceito de equipamento gerado contempla os requisitos apontados pelos usuários, com a vantagem adicional de ter um custo bastante inferior aos equipamentos comerciais. Portanto, pode-se inferir que o resultado desta pesquisa permitiu o avanço no estado da arte dos dispositivos de microabrasão, fornecendo um equipamento multiteste multifuncional de baixo custo para a comunidade científica.*

Palavras chave: *Ensaio de desgaste por microabrasão; Ball-cratering; Desenvolvimento de produtos.*

Abstract. *There are several equipment for assessing the microscale abrasion wear performance. These equipment's can be broadly classified into two configurations: fixed-and-free-ball cratering tester. Due to its constructive characteristics, these devices have functionalities that often do not satisfy the users' requirements. Based on these limitations, the purpose of this research is to develop a multi-test equipment to assess the microscale abrasion wear by fixed-and-free-ball configuration. The design methodology used for the equipment development corresponds the Pahl and Beitz method. The developed equipment concept includes features that enable the remote control of the test running, and the input and output variables command/measurement. The equipment's programming interface consists of a 4.3-inch touch-screen interfaced to an Arduino platform, which allows the easy test data programming, control and acquisition. The generated equipment concept contemplates the pointed users' requirements, with the additional advantage of having a quite lower cost that commercial testers. Therefore it can be inferred that this research results allowed the advance in the micro-abrasion devices state-of-the-art, providing a low cost multifunctional multi-test equipment to the scientific community.*

Keywords: *Micro-abrasion wear test; Ball-cratering; Product development.*

1. INTRODUÇÃO

Uma demanda recorrente do segmento industrial constitui a redução de custos de manutenção e lucro cessante causados pelas avarias produzidas por fenômenos tribológicos em componentes de máquinas. Tais fenômenos causam a redução da produtividade, em virtude das paradas necessárias para manutenção/substituição de peças que sofrem falhas em operação. Devido às distintas condições de emprego destes componentes e aos fatores ambientais, diferentes modos de desgaste podem operar; sendo que o desgaste abrasivo é responsável por cerca de 50% das falhas relacionadas aos fatores tribológicos (Eyre, 1991).

Para simular em escala laboratorial os danos promovidos por desgaste em materiais de engenharia, emprega-se um equipamento denominado tribômetro. Para a investigação de cada modo de desgaste (adesão, abrasão, erosão, etc.) existe uma configuração construtiva diferente de tribômetro. Dentre as diversas configurações de instrumentos para simular o mecanismo de abrasão, os tribômetros de microabrasão são utilizados com o intuito de estabelecer condições de desgaste por abrasão em microescala, mecanismo este muito comum em operações de fabricação (ferramentas de usinagem e conformação). Para realizar este ensaio, existem duas configurações distintas de equipamento: esfera rotativa livre (Figura 1a) e esfera rotativa fixa (Figura 1b) (Cozza *et al.*, 2014). No equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa livre, a esfera encontra-se apoiada ao eixo motor, enquanto na outra configuração, a esfera está fixa sobre o eixo motor. A configuração construtiva do 1º equipamento faz com que a esfera gire em sentido oposto ao eixo,

apresentando um movimento conjugado de rotação e translação, sendo este último decorrente do fato da esfera estar somente apoiada sobre o eixo. Já no 2º equipamento, a esfera gira no mesmo sentido do eixo motor, apresentando a mesma velocidade angular. No 1º caso, a carga aplicada é menor, pois seu valor é determinado pela combinação entre a massa da esfera e inclinação da mesa de fixação da amostra; promovendo a microabrasão em cargas inferiores a 1 N. Já na 2ª configuração, a carga é aplicada externamente ao sistema tribológico, permitindo que valores superiores de força sejam aplicados (usualmente superiores a 1 N). A execução de ambos ensaios é regida pela norma BS EN 1071-6 (2016).

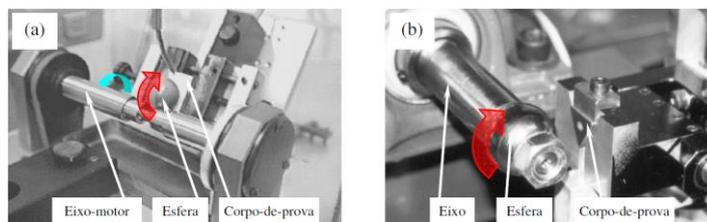


Figura 1. Conceitos de equipamentos de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa: (a) livre; e (b) fixa (Cozza *et al.*, 2015).

Dessa forma, havendo a necessidade de simular ambas as condições de ensaio, dois equipamentos distintos devem ser adquiridos, o que encarece a realização da caracterização. Somado à isso, devido às características construtivas e tecnologias empregadas na construção de tais equipamentos, estes muitas vezes apresentam funcionalidades que não contemplam as necessidades dos seus usuários. Baseando-se nestas limitações, este trabalho teve como propósito desenvolver e validar um equipamento multifuncional que realize ambos os ensaios em um único banco de testes, e que atenda às limitações dos equipamentos existentes. Neste contexto, a partir do levantamento das necessidades pertinentes aos usuários e às especificações de ensaio, foi sintetizado um conjunto de informações que possibilitaram o desenvolvimento de uma concepção de equipamento multiensaios multifuncional de baixo custo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de projeto aqui empregada para guiar as atividades vinculadas ao desenvolvimento do equipamento corresponde ao método de Pahl e Beitz (1996). O procedimento proposto visa à estruturação de um problema de projeto em etapas, as quais guiam de forma cronológica o desenvolvimento das atividades vinculadas. Como informações iniciais tem-se os requisitos dos usuários e de uso, os quais são convertidos em especificações detalhadas que permitem a proposição de concepções de produto que atendam às necessidades dos seus usuários. O método segmenta a macrofase de projeção (etapa do desenvolvimento de produto que envolve a elaboração do seu projeto e do plano de manufatura) em quatro fases: projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado.

A fase de projeto informacional visa estabelecer as especificações de projeto, as quais irão orientar o desenvolvimento técnico do produto. Inicia-se com a definição dos usuários do produto e do estabelecimento das suas necessidades (requisitos dos usuários). Estes requisitos são na sequência “traduzidos” para linguagem de engenharia, na forma de requisitos de projeto (características que o produto deverá possuir). Com o auxílio da ferramenta de Desdobramento da Função Qualidade (*Quality Function Deployment – QFD*), correlaciona-se os requisitos de clientes e de projeto, categorizando-os pela sua importância. Com a conversão dos requisitos de usuários em requisitos de produto, são definidas as especificações de projeto, que correspondem às diretrizes para o estabelecimento da concepção de produto.

A fase de projeto conceitual tem como propósito desdobrar a função técnica global (função principal do produto) em subfunções parciais (condições para atender à função principal), estabelecendo-se a árvore de funções do produto. Esta estrutura funcional permite a definição das funções elementares do equipamento (primeira e segunda ordem), e a proposição de princípios de solução alternativos para atender à cada uma delas, através do estabelecimento de uma matriz morfológica. A combinação dos princípios de solução para cada subfunção parcial propostos na matriz morfológica, permite gerar alternativas conceituais que atendam aos requisitos pré-estabelecidos pelos usuários. A alternativa conceitual escolhida (aquela que melhor atende às necessidades do usuário) passa a ser a solução conceitual.

Na fase de projeto preliminar, a alternativa conceitual escolhida é desenvolvida em termos da sua arquitetura, com o estabelecimento da árvore genealógica do produto. Nesta etapa são dimensionados geometricamente os componentes do produto, bem como, realizada a seleção de materiais e processos para a sua fabricação. Após estas definições, a resistência dos componentes do produto é verificada através da realização de ensaios ou simulações. A alternativa conceitual é analisada ao final desta fase, sendo julgado quanto a sua otimização através dos testes realizados.

Por fim, a fase de projeto detalhado compreende às descrições definitivas do produto (leiaute final, desenhos técnicos, etc.). Nesta fase também são definidos os fornecedores, cronograma de produção, culminado com uma análise crítica do projeto, objetivando avaliar se todas as etapas foram adequadamente cumpridas. Nesta fase também é realizada a construção do protótipo e realização de testes funcionais, de modo a fixar as especificações técnicas do equipamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Projeto Informacional

Nesta fase do projeto, buscou-se informações sobre as características que o produto deve conter, com o intuito de alcançar um melhor detalhamento da tarefa a ser cumprida. Assim, nessa etapa, fez-se uma coleta de informações a fim

de formular a lista de requisitos de projeto. Para tanto, foram avaliadas as características de equipamentos existentes, e também realizada uma pesquisa de opinião junto aos seus usuários. Assim, na Figura 2 são ilustradas as fotografias de alguns equipamentos nas configurações de ensaio esfera livre (a) e esfera fixa (b), comerciais (1) e não comerciais (2).



Figura 2. Equipamentos de micro-abrasão por esfera rotativa livre (a) e fixa (b), comerciais (1) e não comerciais (2).

O equipamento Calowear da CSM Instruments (Figura 2a-1) é parcialmente automatizado, contando com sistema para programação da rotação do eixo motor e da bomba de alimentação da solução abrasiva, e do tempo de ensaio, além de *displays* para aferição da carga e do número de ciclos. A carga é determinada manualmente pela combinação entre a massa da esfera e o ajuste da inclinação do porta-amostra. Opera sob rotações entre 10 a 3000 rpm e cargas, geralmente, entre 0,1 a 0,5 N. Opcionalmente é fornecido um sistema óptico para leitura das dimensões das calotas desgastadas e um agitador magnético para prevenir a decantação das partículas da solução abrasiva. Como principais limitações deste equipamento podem ser apontadas: leitura manual dos parâmetros de saída do ensaio; programação do ensaio por tempo de execução e não distância de rolamento (este último sendo o parâmetro tecnológico empregado para calcular a taxa e coeficiente de desgaste); não realiza leitura do coeficiente de atrito; uso de potenciômetros prejudica a precisão no ajuste dos valores reais da velocidade de rolamento e vazão do abrasivo; e custo elevado (na faixa de R\$ 60.000,00).

O equipamento ilustrado na Figura 2a-2 foi desenvolvido e fabricado por Cozza *et al.* (2014). Embora os autores não mencionem o seu custo de produção, a análise da fotografia do equipamento permite inferir que este é substancialmente baixo quando comparado ao valor do equivalente comercial. Como características operacionais desse equipamento podem ser citadas: alimentação de abrasivo por dispositivo conta-gotas e acionamento por motor elétrico de 130 W de potência. Sua grande vantagem em relação ao equipamento comercial é a possibilidade de leitura do coeficiente de atrito. Entretanto, o equipamento não permite qualquer tipo de programação remota, o porta-amostros permite a fixação somente de amostras de pequena espessura, não realiza a contagem do número de ciclos de operação, entre outras.

O equipamento Plint TE 66 da Phoenix-Tribology (Figura 2b-1), por sua vez, opera sob rotações no intervalo de 30 a 150 rpm aplicando cargas entre 0,05 a 5 N, as quais são aplicadas manualmente através de calibres com massas padronizadas. A alimentação da solução abrasiva é feita com uma bomba peristáltica à uma vazão padronizada da ordem de 60 ml/h; em conjunto com um agitador magnético. A interface do equipamento com o usuário é feita através de um controlador lógico programável interfaceado à uma tela *touch-screen*, por meio da qual é realizado o ajuste da velocidade de rotação. Dotado de motor de acionamento de 120 W. Como opcionais são fornecidos os módulos para medição da força de atrito, sistema para medição da resistência elétrica de contato (detecção de rompimento em revestimentos não condutores), e lupa com ampliações de 3 e 5 \times . Permite exportar os parâmetros de saída do ensaio por meio de conexão USB. Como suas principais desvantagens podem ser citadas a impossibilidade de variar a vazão do abrasivo, a necessidade de aplicação manual da carga, e seu elevado custo (o qual, na configuração *standard*, se aproxima de R\$ 100.000,00).

O equipamento ilustrado na Figura 2b-2 foi desenvolvido e fabricado por Santos *et al.* (2015). Este equipamento é constituído por um motor de 550 W e um inversor de frequência para controle da velocidade de rotação. A carga de ensaio é aplicada por meio de calibres. Embora o equipamento aparente ser de baixo custo, o seu conceito apresenta limitações: não mede a força normal e coeficiente de atrito, não apresenta sistema de alimentação do abrasivo, não apresenta sistema para contagem dos ciclos de operação/distância de rolamento, sistema porta-amostra de difícil manuseio, etc.

Anteriormente na Figura 1b foi mostrado o equipamento de micro-abrasão por esfera rotativa fixa modelo LFS 2010 fabricado por Cozza (2011). Neste equipamento a rotação da esfera e a aplicação da carga são assistidas por conjuntos conjugados de sistemas servo-controlado + servo-motor. Esse sistema permite a realização dos ensaios em cargas ou pressões constantes. O equipamento é instrumentado para leitura da força normal e coeficiente de atrito. Possui programação remota dos parâmetros de entrada: rotação da esfera, carga e pressão; e leitura automática dos parâmetros de saída: força normal e tangencial, e deslocamento linear do corpo de prova.

Para viabilizar a aplicação do questionário junto aos usuários do equipamento, foi necessário inicialmente definir quem seriam os “clientes” potenciais do projeto. Neste sentido, estes foram classificados em clientes diretos e indiretos. Como clientes diretos, incluíram-se aqueles que eventualmente obteriam benefícios diretos com o desenvolvimento do equipamento e a tecnologia, correspondendo às empresas fabricantes de dispositivos científicos. Os clientes indiretos são aqueles que, de alguma forma e em determinado momento, podem se beneficiar com o uso do equipamento, constituindo neste caso o público acadêmico e empresas que utilizam tal equipamento para caracterizar os seus produtos.

Após a definição dos potenciais clientes diretos e indiretos, buscou-se definir os requisitos de usuário para o iniciar o desenvolvimento do equipamento. Para ponderar a importância das características dos equipamentos, foi realizado um diagnóstico quantitativo destas junto aos potenciais clientes do projeto utilizando um questionário enviado via correio eletrônico. É importante frisar que a pesquisa foi dirigida somente à profissionais dentro do território nacional. A pesquisa

foi realizada durante o quarto bimestre do ano de 2017, e elaborada em duas etapas: i) avaliação do grau de importância das funções existentes nos equipamentos comerciais e não comerciais; e ii) indicar características adicionais que deseja que equipamento possua. Para selecionar os respondentes, a pesquisa buscou inicialmente por autores que tiveram publicações, orientações e projetos relacionados ao tema microabrasão. Em um segundo momento, a pesquisa buscou por usuários na área de engenharia. Posteriormente, a pesquisa também foi enviada à pessoal de empresas que produzem/fornecem microabrasômetros. Somando-se os três grupos, foram enviados ao total 38 questionários. Dos 38 questionários enviados, 22 foram respondidos, perfazendo uma percentual de participação de aproximadamente 58%.

Na Figura 3 é ilustrado o resultado da pesquisa de opinião realizada. De acordo com o resultado do questionário, as características mais importantes do equipamento correspondem à automação da programação e leitura dos parâmetros de ensaio, e o custo. De menor importância foi apontada a robustez. Apresentar dimensões reduzidas, possuir ambas as configurações de ensaio em um único banco de testes, e fácil operação foram classificadas como características de importância intermediária. Além destas, também foram sugeridas as seguintes funções: aplicação automatizada da carga de ensaio e leitura “in-loco” das dimensões da calota desgastada. Com base nessas informações, foram definidos os requisitos dos usuários do equipamento os quais foram classificados em requisitos básicos, técnicos e de atratividade.

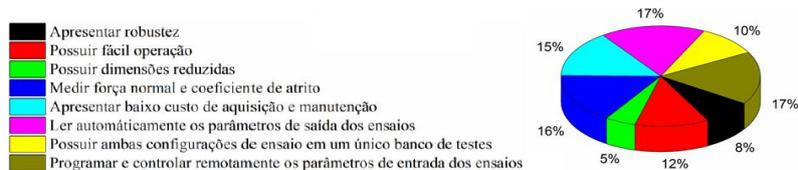


Figura 3. Quantificação da importância das características do equipamento.

Os requisitos de usuários foram traduzidos em requisitos do produto utilizando uma linguagem de engenharia, considerando-se a subsequente definição das especificações para o equipamento. Estes requisitos foram lançados na casa da qualidade (Figura 4), sendo nas suas linhas alocados os requisitos de usuários e nas colunas os de projeto.

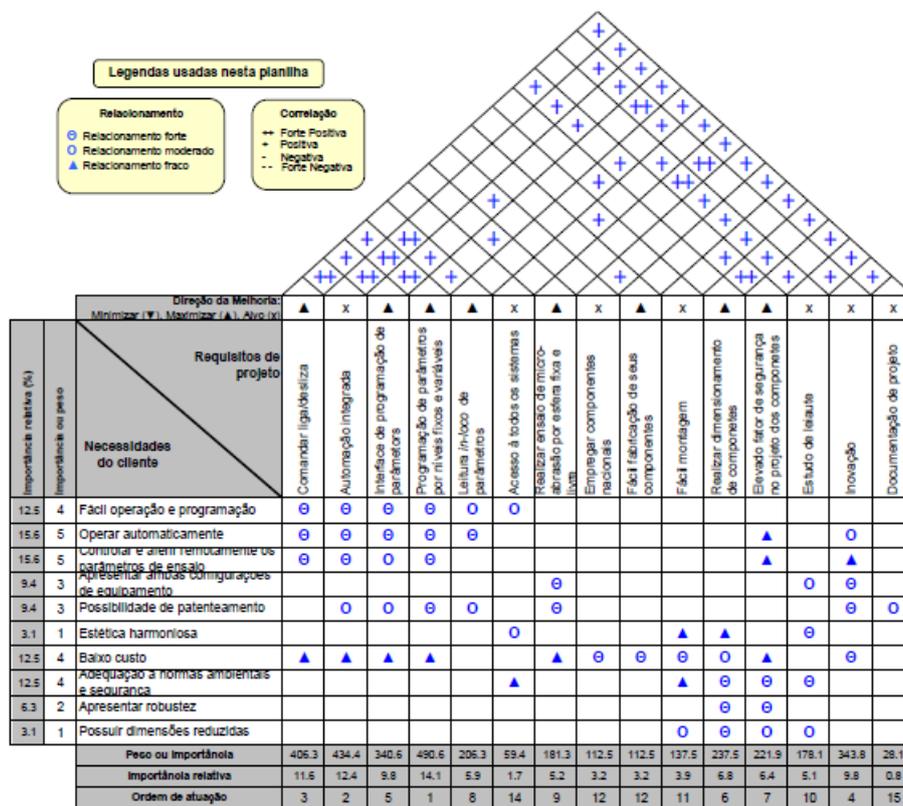


Figura 4. Casa da qualidade para o equipamento.

Os requisitos de usuários foram classificados através de um fator de importância (vide coluna à esquerda da sua descrição), definido considerando-se os percentis atribuídos nos questionários aplicados. A inter-relação entre os requisitos (usuários e projeto) foi ranqueada como relacionamento forte (⊕), moderado (○) e fraco (⊗). A correlação entre os requisitos foi definida como fortemente positiva (++), positiva (+), negativa (-) e fortemente negativa (--). Assim, os pesos de cada requisito de projeto foram estabelecidos multiplicando-se o fator de correlação com o fator de importância de cada requisito de usuário; somando-se os valores resultantes e obtendo-se o grau de prioridade para cada um. Esse procedimento permite definir a ordem de valoração de cada requisito de projeto e, conseqüentemente, a sua importância. A partir desta classificação, cada requisito de projeto foi traduzido em uma especificação de projeto para o

equipamento a ser desenvolvido. Esta especificação constitui uma característica que o equipamento deverá possuir, e a sua determinação norteia o desenvolvimento das fases subsequentes do projeto. A apresentação destas especificações de projeto é realizada na Tabela 1, seguindo o ordenamento prévio dos requisitos estabelecido através da casa da qualidade.

Tabela 1. Especificações de projeto para o equipamento.

N.º	Especificação	Objetivo	Sensor	Saída indesejada	Observações
1	Programação de parâmetros em níveis fixos e variáveis	Possibilitar variação dos parâmetros durante a execução dos ensaio	Funcionamento do equipamento	Impossibilidade de variação dos parâmetros durante ensaio	Variáveis linearmente ou em patamares
2	Automação integrada	Evitar que o operador opere o equipamento durante o processo	Julgamento	Operação manual de qualquer parâmetro durante o processo	Código aberto (software)
3	Comandar liga/desliga	Automação e menor grau de ação humana no equipamento	Julgamento	Manipulação do equipamento e regulagens manuais durante o processamento	
4	Inovação	Depositar patente com o novo equipamento	Depósito de patente e ganho com <i>royalties</i>	Inviabilização de patente	
5	Interface de programação de parâmetros	Facilitar processo de programação de ciclos	Julgamento	Não haver pessoas apenas que saibam programar os ciclos de processamento	Controle de carga, distância e velocidade de rolamento e vazão do abrasivo
6	Realizar dimensionamento de componentes	Evitar problemas de falha por falta de dimensionamento ou incorretos	Funcionamento do equipamento	Falha e/ou alteração do projeto	Primar pela combinação adequada entre resistência/massa e custo
7	Elevado fator de segurança no projeto dos componentes	Evitar problemas com dimensionamento de componentes	Funcionamento adequado	Acidentes e paradas para modificação de projeto	
8	Leitura <i>in-loco</i> dos parâmetros	Automação da leitura dos parâmetros tecnológicos durante execução do ensaio	Valores dos parâmetros tecnológicos do ensaio	Necessidade do operador ler manualmente os parâmetros tecnológicos do ensaio	Ler valores de carga, coeficiente de atrito, vazão do abrasivo, distância e velocidade de rolamento
9	Realizar ensaio de micro-abrasão por esfera fixa e livre	Possibilitar a realização de ambos os ensaios em uma mesma bancada de testes	Funcionamento do equipamento	Necessidade de dois equipamentos distintos para realizar cada um dos ensaios	
10	Estudo de leiaute	Ocupar menor área útil possível	Área disponível para o equipamento	Leiaute ruim e falta de espaço	
11	Fácil montagem	Facilitar montagem e favorecer manutenção	Julgamento	Montagem inviável e difícil acesso para manutenção	Preferencialmente
12	Fácil fabricação de seus componentes	Facilitar a fabricação dos componentes do equipamento, reduzindo custo e tempo de produção.	Julgamento	Fabricação complexa dos componentes do equipamento	Reduzir ao máximo a necessidade de operações de soldagem, usinagem, etc.
13	Empregar componentes nacionais	Evitar importações e longos prazos de entrega, bem como maior custo dos componentes	Custo e prazo de entrega	Elevados custos com importações e atraso na entrega dos componentes	Há equipamentos somente importados - ter reserva
14	Acesso à todos os sistemas	Facilitar limpeza e manutenção do equipamento	Julgamento	Limpeza dificultada e difícil acesso a manutenção aos componentes	
15	Documentação de projeto	Ter o projeto e processos de fabrico e montagem documentados para comercialização	Documentação	Perda de histórico de projeto, fabricação e montagem	Registrar as principais dificuldades enfrentadas

3.2 Projeto Conceitual

Após definição das especificações de projeto para o equipamento, a etapa seguinte constitui a análise detalhada da sua macrofunção e o desmembramento desta em sub-funções, gerando-se a “árvore de funções” do equipamento (Figura 5). O estabelecimento das funções parciais foi realizado baseando-se na experiência da equipe de projeto com a utilização de equipamentos similares, na análise funcional dos equipamentos existentes e nas necessidades apontadas pelos usuários.

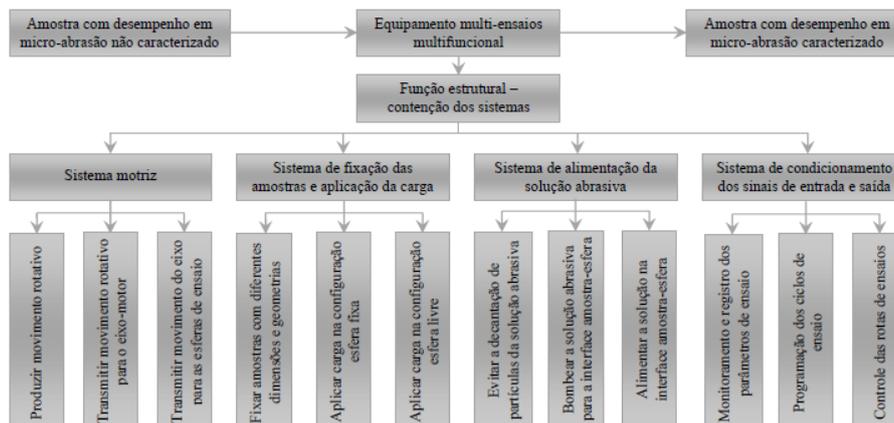


Figura 5. Estrutura funcional do equipamento.

Seguindo-se a estrutura funcional proposta para o equipamento com a sua segmentação em sistemas, foram geradas matrizes morfológicas para seleção das melhores alternativas para cada uma das funções propostas. Em um primeiro momento, foram reunidas as soluções propostas para as funções parciais de primeira e segunda ordem (Tabela 2). Posteriormente, foi feita uma comparação entre os princípios de solução escolhidos, empregando uma matriz de avaliação (Tabela 3 – próxima página). O preenchimento da matriz de avaliação foi realizado utilizando-se escores entre 0 e 100 para cada um dos requisitos de produto listados na primeira coluna. Os escores foram multiplicados pelos pesos dos critérios determinados pela matriz QFD, somados segundo as colunas, e normalizados para facilitar a comparação. Os princípios de solução mais adequados, do ponto de vista dos requisitos do usuário relacionados, são destacados em vermelho na última linha.

Tabela 2. Matriz morfológica e alternativas de construção.

Funções parciais de 1ª ordem	Funções parciais de 2ª ordem	A	B	C	Alt. 1	Alt. 2
Função estrutural	Sustentar os sistemas	Estrutura em perfis de aço	Estrutura em perfis de alumínio	Estrutura em perfis de polímeros	B	A
	Possibilitar movimentação	Alças	Rodízios	Olhais	A	B
	Possibilitar desmontagem	Perfis ligados por uniões parafusadas	Perfis ligados por encaixe	Perfis ligados por conectores universais	C	A
Sistema de fixação das amostras e aplicação da carga	Fixar amostras com diferentes dimensões e geometrias	Mandril	Morsa	Grampo ajustável	B	C
	Aplicar carga na configuração esfera fixa	Calibres com massas padrão	Eletroímãs	Motor de passo e fuso de esferas	C	B
	Aplicar carga na configuração esfera livre	Peso da esfera e inclinação do porta-amostras	Eletroímãs	Motor de passo e fuso de esferas	A	C
Sistema de alimentação da solução abrasiva	Evitar a decantação de partículas da solução abrasiva	Agitador magnético	Agitador mecânico	Agitador manual	A	B
	Bombear a solução abrasiva para a interface amostra-esfera	Bomba dosadora peristáltica programável	Bomba dosadora peristáltica não programável	Bomba de aquário	A	C
	Alimentar a solução na interface amostra-esfera	Mangueiras	Tubos metálicos	Tubos de plástico	A	C
Sistema de condicionamento dos sinais de entrada e saída	Monitoramento e registro dos parâmetros de ensaio	National Instruments LabVIEW®	Microsoft Visual Basic@Arduino	Arduino	C	B
	Programação dos ciclos de ensaio	Display LCD + Teclado matricial	Computador externo	HMI display com tela <i>touch screen</i>	C	B
	Controle das rotas de ensaios	National Instruments LabVIEW®	Arduino	Microsoft Visual Basic@Arduino	B	C

É importante destacar que os princípios de solução propostos para atender às funções parciais do equipamento resultam de um extensivo trabalho de pesquisa, incluindo as informações levantadas durante a fase de projeto informacional do mesmo, do contato com fornecedores de componentes, de catálogos técnicos e de discussões entre os membros da equipe de projeto. As alternativas incompatíveis com os requisitos de cliente não foram consideradas.

Após a seleção das alternativas propostas como princípios de solução para as funções de segunda ordem, foi efetuada a modelagem 3D do conceito de equipamento multiensaios multifuncional desenvolvido (Figura 6). A modelagem prévia do protótipo permite o ajuste preciso das dimensões dos seus componentes, minimizando erros durante a sua fabricação, ou facilitando a programação das operações de fabricação de geometrias complexas através de *software* de CAM.

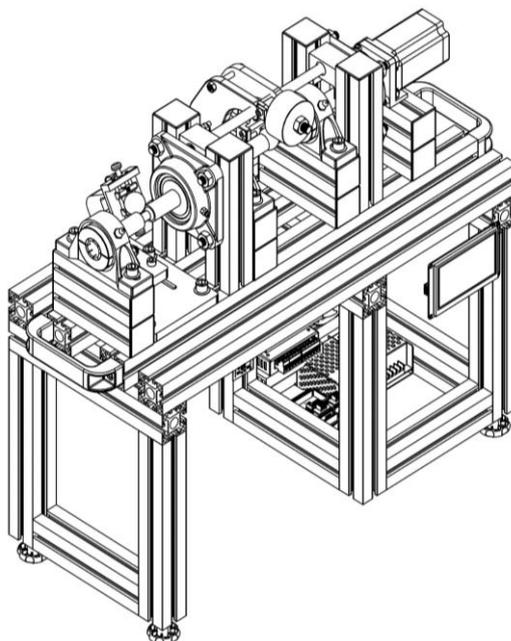


Figura 6. Conceito do equipamento desenvolvido.

Tabela 3. Matriz de avaliação para comparação e ranqueamento dos princípios de solução para o equipamento.

Funções Parciais 1ª ordem	Função estrutural				Sistema de fixação das amostras e aplicação da carga				Sistema de alimentação da solução abrasiva				Sistema de condicionamento dos sinais de entrada e saída								
	Sustentar os sistemas	Possibilitar movimentação	Possibilitar desmontagem	Fixar amostras com diferentes dimensões e geometrias	Aplicar carga na configuração esfera fixa	Aplicar carga na configuração esfera livre	Evitar a decantação de partículas da solução abrasiva	Bombear a solução abrasiva para a interface amostra-esfera	Alimentar a solução na interface amostra-esfera	Monitoramento e registro dos parâmetros de ensaio	Programação dos ciclos de ensaio	Controle das rotas de ensaios									
Funções Parciais 2ª ordem	B	A	A	B	C	A	C	B	A	C	A	C	B	A	C	B	A	C			
Princípio de solução	RP ^a	IR ^b																			
Programação de parâmetros em níveis fixos e variáveis																					
Automação integrada																					
Comandar liga/desliga																					
Inovação																					
Interface de programação de parâmetros																					
Realizar dimensionamento de componentes	50	50																			
Elevado fator de segurança no projeto dos componentes	50	50																			
Leitura <i>in- loco</i> dos parâmetros																					
Realizar ensaio de micro-abrasão por esfera fixa e livre																					
Estudo de leiaute	50	10	50	10	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		
Fácil montagem	75	10	50	25	75	50	25	50	75	25	75	50	50	75	50	75	50	75	75		
Fácil fabricação de seus componentes	50	25	50	25	50	50	25	50	75	50	75	50	75	10	75	50					
Empregar componentes nacionais																					
Acesso a todos os sistemas	50	50																			
Documentação de projeto																					
Escores normalizados	1.0	0.63	1.0	0.5	1.0	0.27	1.0	0.97	1.0	0.98	0.27	1.0	0.67	1.0	0.67	1.0	0.67	1.0	0.67	1.0	0.84

^a Requisito do produto
^b Importância relativa

3.3 Projeto Preliminar

A escolha do leiaute de um produto está relacionada com a tomada de decisões quanto às suas dimensões, materiais, quantidades e custos. Para facilitar essas escolhas é interessante conhecer em detalhes o equipamento, bem como os componentes que o compõe e a sua influência sobre o conjunto. Dessa forma, é importante organizar o produto em sistemas modulares. Partindo das vantagens da arquitetura modular que são: padronização de blocos, flexibilidade de usar o mesmo bloco em outros produtos e facilidade de manutenção quando forem detectados defeitos, optou-se por esse tipo de estrutura modular para o equipamento aqui desenvolvido. Nesse modelo cada módulo é capaz de realizar suas funções de forma completa, ou seja, os limites entre blocos são bem definidos não havendo funções compartilhadas entre eles. No equipamento desenvolvido, verificou-se a necessidade de seu desmembramento em cinco conjuntos. Com base nesta divisão, na Figura 7 é apresentada a árvore genealógica do produto.

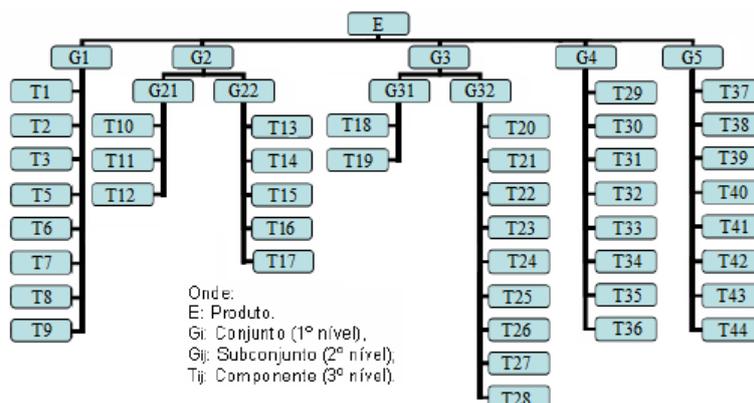


Figura 7. Árvore genealógica do equipamento desenvolvido.

Visualizada a hierarquia dos conjuntos, subconjuntos e componentes, é interessante detalhar a codificação utilizada na árvore genealógica do produto. Para isso elaborou-se a Tabela 4 que relaciona os constituintes do equipamento multiensaios multifuncional com as codificações apresentadas anteriormente na Figura 7.

Tabela 4. Especificação dos elementos constituintes do equipamento desenvolvido.

Código	Elemento
E	Equipamento multi-ensaios multifuncional
G1	Conjunto estrutural
T1	Perfis estruturais em alumínio
T2	Conectores universais
T3	Pés niveladores
T4	Carenagem
T5	Bloco para fixação da carenagem
T6	Capa de fechamento dos perfis
T7	Alça
T8	Dobradiça
T9	Parafuso e porca M2.5
G2	Conjunto do sistema motor
G21	Subconjunto de geração do movimento
T10	Motor de passo para acionamento do eixo de suporte dos contra-corpos
T11	Suporte do motor de passo
T12	Parafuso e porca M4
G22	Subconjunto de transmissão do movimento
T13	Eixo do sistema esfera fixa
T14	Eixo do sistema esfera livre
T15	Acomplamento
T16	Mancais de rolamento tipo apoio
T17	Mancais de rolamento tipo flange
G3	Conjunto de fixação das amostras e aplicação da carga
G31	Subconjunto de fixação das amostras
T18	Morsa porta-amostra do sistema esfera fixa
T19	Morsa porta-amostra do sistema esfera livre
G32	Subconjunto de aplicação da carga
T20	Guia do braço de inclinação do porta-amostra do sistema esfera livre
T21	Base suporte do braço de inclinação do porta-amostra do sistema esfera livre
T22	Braço de inclinação do porta-amostra do sistema esfera livre
T23	Braço de inclinação do porta-amostra do sistema esfera fixa
T24	Eixo pivot
T25	Contrapeso
T26	Suporte do contrapeso

T27	Motor de passo para acionamento do braço de inclinação do porta-amostra do sistema esfera fixa
T28	Fuso de esferas para acionamento do braço de inclinação do porta-amostra do sistema esfera livre
G4	Conjunto de alimentação da solução abrasiva
T29	Agitador magnético
T30	Reservatório de contenção da solução abrasiva
T31	Bomba dosadora peristáltica do sistema esfera fixa
T32	Bomba dosadora peristáltica do sistema esfera livre
T33	Mangueiras de alimentação do abrasivo no sistema esfera fixa
T34	Mangueiras de alimentação do abrasivo no sistema esfera livre
T35	Reservatório de coleta do abrasivo no sistema esfera fixa
T36	Reservatório de coleta do abrasivo no sistema esfera livre
G5	Conjunto de condicionamento dos sinais de entrada e saída
T37	Arduíno
T38	Fonte chavetada
T39	Extensômetro para leitura das forças normal e tangencial no sistema esfera fixa
T40	Extensômetro para leitura das forças normal e tangencial no sistema esfera livre
T41	Módulos conversores para os sensores de carga
T42	Drivers para os motores de passo de alta potência
T43	Drivers para os motores de passo de baixa potência
T44	HMI display com tela LCD

A alternativa conceitual gerada foi única, diferentemente do que é sugerido pela metodologia de projeto empregada. Isso decorre da experiência de membros da equipe de projeto com a utilização de equipamentos similares (conhecimento dos potenciais e limitações de tais equipamentos) e das informações colhidas com seus usuários na fase de projeto informacional. Assim, concentrando-se na solução das limitações das versões comerciais e não comerciais existentes, e seguindo a premissa de conter as duas configurações de ensaio em um mesmo equipamento; optou-se por gerar uma única concepção de equipamento. Dessa forma, o leiaute preliminar do equipamento desenvolvido é ilustrado na Figura 8.

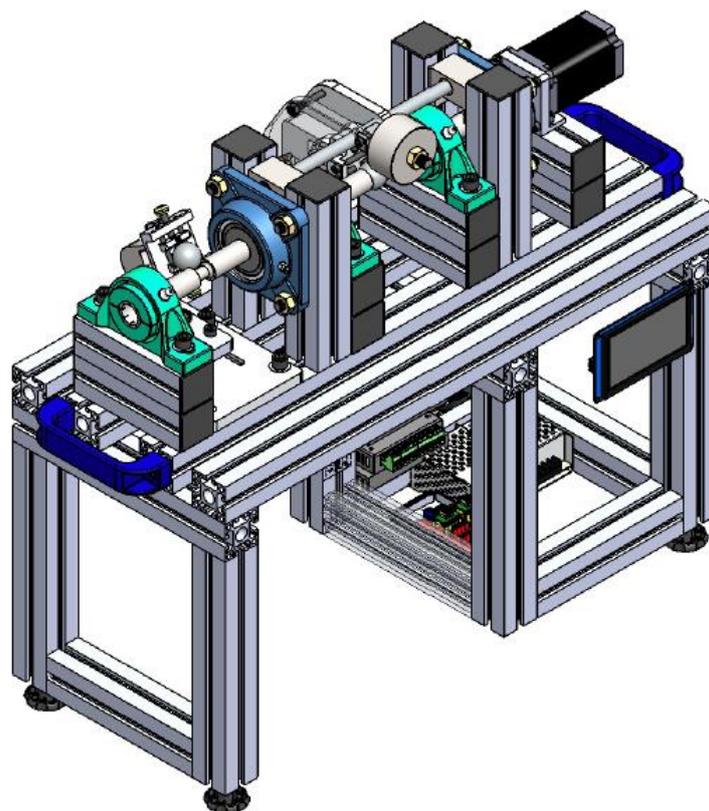


Figura 8. Leiaute preliminar do equipamento multiensaios multifuncional.

3.4 Projeto Detalhado

3.4.1 Programação dos ensaios

O comportamento ao desgaste microabrasivo dos materiais depende dos parâmetros empregados durante a execução dos ensaios, os quais podem diferir entre os materiais avaliados e a configuração de ensaio utilizado. Conforme exposto na fase projeto informacional, um dos principais requisitos da concepção de equipamento a ser desenvolvido, é que este possa ser operado remotamente, e que este realize o ajuste e leitura dos parâmetros de ensaio durante a sua execução. Ou seja, a realização do ensaio e a coleta dos seus parâmetros tecnológicos deverá ser independente do operador. Logicamente, o “start” do ensaio com a definição dos seus parâmetros de execução deverá ser realizado pelo operador, mas após estas definições iniciais, o equipamento deverá operar sem a necessidade de intervenção humana.

De modo a atender ao requisito de operação automática, uma série de parâmetros tecnológicos e eventos necessitam ser estabelecidos. Assim, programação dos ciclos de ensaio é fundamental para que este seja realizado de forma adequada e satisfatória, e os resultados da caracterização sejam confiáveis e precisos. No que se refere aos parâmetros de execução do ensaio, as variáveis a serem controladas correspondem à: carga, velocidade de rotação do contra-corpo, distância de rolamento, e vazão da solução abrasiva. Já os parâmetros de saída correspondem à evolução: da carga, do coeficiente de atrito, da velocidade de rotação do contra-corpo e da vazão da solução abrasiva todos em relação à distância de rolamento.

O emprego do HMI *display* permite a utilização de entradas e saídas digitais, bem como de portas com comunicação para qualquer *host serial*. Este controlador também permite o controle e armazenamento de distintos programas. O mesmo é dotado da função *autotuning*, a qual possibilita o auto-ajuste dos programas durante a sua execução, de modo a atender as especificações de programação do ensaio desejadas, como as rampas e patamares de aplicação de carga. Os parâmetros de saída são exportados de forma on-line para uma “nuvem”, ou através de micro-cartão SD. A tela de programação definida para o controlador de parâmetros do equipamento é apresentada de forma ilustrativa na Figura 9a. Através do acesso aos botões virtuais do HMI display, o operador do ensaio acessa os campos de inserção de valores para os seus parâmetros de execução, digitando os valores requeridos e marcando as formas de execução do ensaio (parâmetros constantes ou variáveis):

- Ensaio (seleção do tipo de ensaio; executando ambos os ensaios concomitantemente, as suas variáveis de execução serão iguais, com exceção da carga);
- Amostra (código da amostra que possibilite a sua distinção frente as demais que serão ensaiadas);
- Ensaio (informações sobre o ensaio que possibilite a sua distinção frente aos demais que serão realizados na mesma amostra);
- Distância de ensaio (em função dos valores de distância e velocidade de ensaio, o seu tempo de execução é determinado);
- Velocidade (a velocidade pode ser mantida constante ou variar durante o ensaio; a variação poderá ser com taxa contínua de acréscimo ou em patamares fixos);
- Carga (a aplicada pode ser mantida constante ou variar durante o ensaio; a variação poderá ser com taxa contínua de acréscimo ou em patamares fixos);
- Vazão (a vazão da solução abrasiva pode ser mantida constante ou variar durante o ensaio; a variação poderá ser com taxa contínua de acréscimo ou em patamares fixos);
- Confirma: armazenamento do parâmetro ou programa;
- Edita: habilita edição do valor do(s) parâmetro(s);
- Cancela: cancela informação do parâmetro ou programa;
- Volta: saída da tela de programação do HMI display;

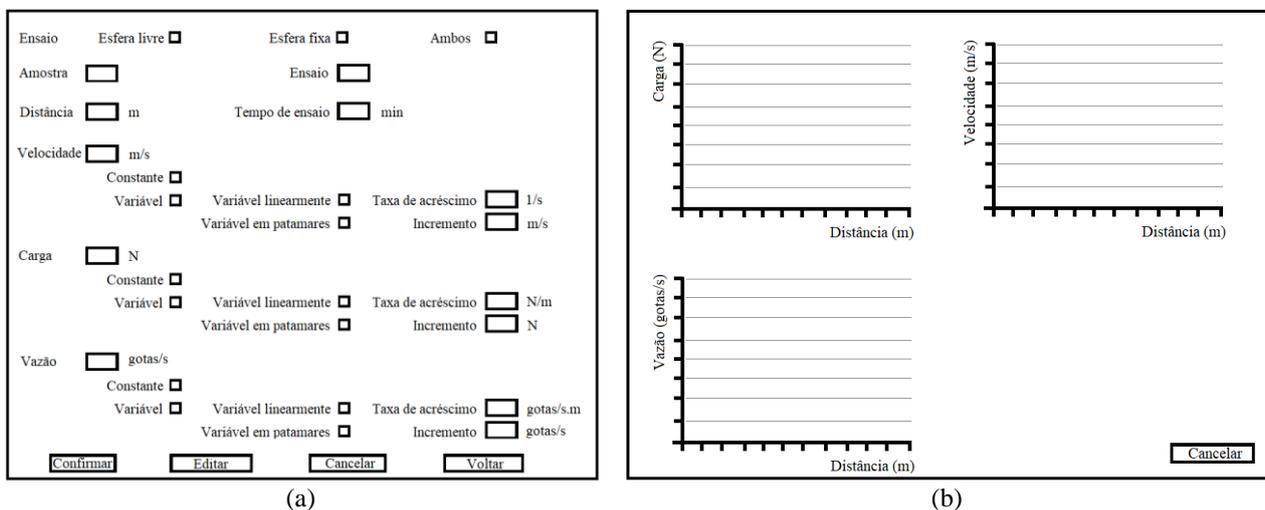


Figura 9. (a) Tela de programação e (b) tela de acompanhamento do controlador de parâmetros do equipamento.

Com o ajuste destes dados, o controlador é capaz de conduzir o ensaio proposto de forma automática sem a necessidade de intervenção do usuário. Os roteiros de execução dos ensaios (parâmetros) são salvos em função no nome da amostra e do número do ensaio; podendo utilizar os seus parâmetros para a testagem de outras amostras. Após confirmar a programação de ensaio setada, a evolução dos seus parâmetros de saída (carga, coeficiente de atrito, velocidade de rolamento e vazão da solução abrasiva) em função da distância de rolamento aparecerá na tela (Figura 9b).

3.4.2 Especificações dos componentes

Na Tabela 5 é apresentada a lista de materiais com descrição dos componentes utilizados na montagem do equipamento multiensaios multifuncional, os materiais utilizados na sua fabricação, sua codificação e uma estimativa do

seu valor de comercialização. O custo estimado de comercialização do equipamento desenvolvido é cerca de 25% do valor do equivalente comercial na configuração esfera livre, e 20% do valor do equivalente comercial esfera fixa.

Tabela 5. Lista de componentes do equipamento desenvolvido.

Designação	Código	Material	Quantidade	Unidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Equipamento multi-ensaios multifuncional	01.00.00.00	Diversos	1	-	-	-
Conjunto estrutural	01.01.00.00	Diversos	1	-	-	-
Perfis estruturais em alumínio	01.01.00.01	Alumínio	9	m	65,00	572,00
Conectores universais	01.01.00.02	Aço	36	pc	9,80	352,8
Pés niveladores	01.01.00.03	Aço e borracha	4	pc	3,00	12,00
Carenagem	01.01.00.04	ACM	2	m²	139,00	278,00
Bloco para fixação da carenagem	01.01.00.05	Acrílico	30	pc	1,66	49,80
Capa de fechamento dos perfis	01.01.00.06	Polipropileno	32	pc	1,50	48,00
Alça	01.01.00.07	Nylon	2	pc	2,50	5,00
Dobradiça	01.01.00.08	Zamac	4	pc	28,50	114,00
Parafuso e porca M2.5	01.01.00.09	Aço	20	pc	0,25	5,00
Conjunto do sistema motor	01.02.00.00	Diversos	1	-	-	-
Subconjunto de geração do movimento	01.02.01.00	Diversos	1	-	-	-
Motor de passo	01.02.01.01	Diversos	1	pc	317,67	317,67
Suporte do motor de passo	01.02.01.02	Alumínio	1	pc	158,00	158,00
Parafuso e porca M4	01.02.01.03	Aço	20	pc	0,40	8,00
Subconjunto de transmissão do movimento	01.02.02.00	Diversos	1	-	-	-
Eixo do sistema esfera fixa	01.02.02.01	Aço	1	pc	75,00	75,00
Eixo do sistema esfera livre	01.02.02.02	Aço	1	pc	75,00	75,00
Acomplamento	01.02.02.03	Alumínio	1	pc	114,00	114,00
Mancais de rolamento tipo apoio	01.02.02.04	Aço	3	pc	26,00	78,00
Mancais de rolamento tipo flange	01.02.02.05	Aço	2	pc	67,00	134,00
Conjunto de fixação das amostras e aplicação da carga	01.03.00.00	Diversos	1	-	-	-
Subconjunto de fixação das amostras	01.03.01.00	Diversos	1	-	-	-
Morsa porta-amostra do sistema esfera fixa	01.03.01.01	Alumínio	1	pc	158,00	158,00
Morsa porta-amostra do sistema esfera livre	01.03.01.02	Alumínio	1	pc	158,00	158,00
Subconjunto de aplicação da carga	01.03.02.00	Diversos	1	-	-	-
Guia do braço de inclinação do porta-amostra do sistema esfera livre	01.03.02.01	Alumínio	1	pc	158,00	158,00
Base suporte do braço de inclinação do porta-amostra do sistema esfera livre	01.03.02.02	Alumínio	1	pc	158,00	158,00
Braço de inclinação do porta-amostra do sistema esfera livre	01.03.02.03	Alumínio	1	pc	158,00	158,00
Braço de inclinação do porta-amostra do sistema esfera fixa	01.03.02.04	Alumínio	1	pc	158,00	158,00
Eixo pivot	01.03.02.05	Aço	1	pc	75,00	75,00
Contrapeso	01.03.02.06	Aço	1	pc	75,00	75,00
Suporte do contrapeso	01.03.02.07	Alumínio	1	pc	158,00	158,00
Motor de passo	01.03.02.08	Diversos	1	pc	162,11	162,11
Fuso de	01.03.02.09	Diversos	1	pc	142,37	142,37
Conjunto de alimentação da solução abrasiva	01.04.00.00	Diversos	1	-	-	-
Agitador magnético	01.04.00.01	Diversos	1	pc	1560,00	1.560,00
Reservatório de contenção da solução abrasiva	01.04.00.02	Vidro	2	pc	12,00	24,00
Bomba dosadora peristáltica do sistema esfera fixa	01.04.00.03	Diversos	1	pc	162,00	162,00
Bomba dosadora peristáltica do sistema esfera livre	01.04.00.04	Diversos	1	pc	162,00	162,00
Mangueiras de alimentação do abrasivo no sistema esfera fixa	01.04.00.05	Polímero	2	m	62,00	124,00
Reservatório de coleta do abrasivo no sistema esfera fixa	01.04.00.06	PLA	2	pc	5,00	10,00
Conjunto de condicionamento dos sinais de entrada e saída	01.04.00.00	Diversos	1	-	-	-
Extensômetro		Diversos	2	pc	35,00	70,00
Driver para motor de passo		Diversos	4	pc	111,57	446,29
Fonte chavetada		Diversos	1	pc	90,00	90,00
HMI display com tela LCD		Diversos	1	pc	390,00	390,00
Arduíno		Diversos	1	pc	49,90	49,90
Valor total dos componentes (peças e materiais) – R\$						6.871,92
Custos de produção (40% dos custos com materiais) (Groover, 2017) – R\$						2.748,77
Custos de engenharia (15% dos custos com materiais) (Groover, 2017) – R\$						1.030,79
Custos de desenvolvimento (5% dos custos com materiais) (Groover, 2017) – R\$						343,60
Custos adicionais – administração, vendas, marketing, etc. (25% dos custos com materiais) (Groover, 2017) – R\$						1.717,99
Lucro (15% dos custos com materiais) (Groover, 2017) – R\$						1.030,79
Imposto (40% dos custos do produto) (Impostômetro, 2020) – R\$						5.497,54
Valor sugerido para comercialização do equipamento – R\$						19.241,4

3.4.3 Especificações técnicas do equipamento

Na Figura 10a é ilustrado o leiaute final do equipamento, através de uma imagem em 3D renderizada. Por sua vez, na Figura 10b é apresentada a fotografia do equipamento parcialmente montado. O conceito desenvolvido contempla recursos que possibilitam o comando remoto da operação do instrumento, e a leitura automática de parâmetros de execução dos ensaios. São exemplos destes recursos: controle e aquisição da velocidade de rotação do contra-corpo, da carga aplicada, da vazão da solução abrasiva e da distância de rolamento; cujos valores podem ser ajustados, e mantidos constantes ou alterados durante a execução dos ensaios, através da sua programação prévia. A interface de programação do equipamento com o usuário é constituída por uma tela LCD de 4,3 polegadas interfaceada à uma plataforma Arduíno, que permite a fácil programação, controle e aquisição de dados de ensaio. Como dados de entrada tem-se: carga, velocidade de rotação do contra-corpo, vazão de alimentação da solução abrasiva e distância de rolamento. Os dados de saída constituem: evolução do coeficiente de atrito, carga e vazão da solução abrasiva; todos em função da distância de rolamento.

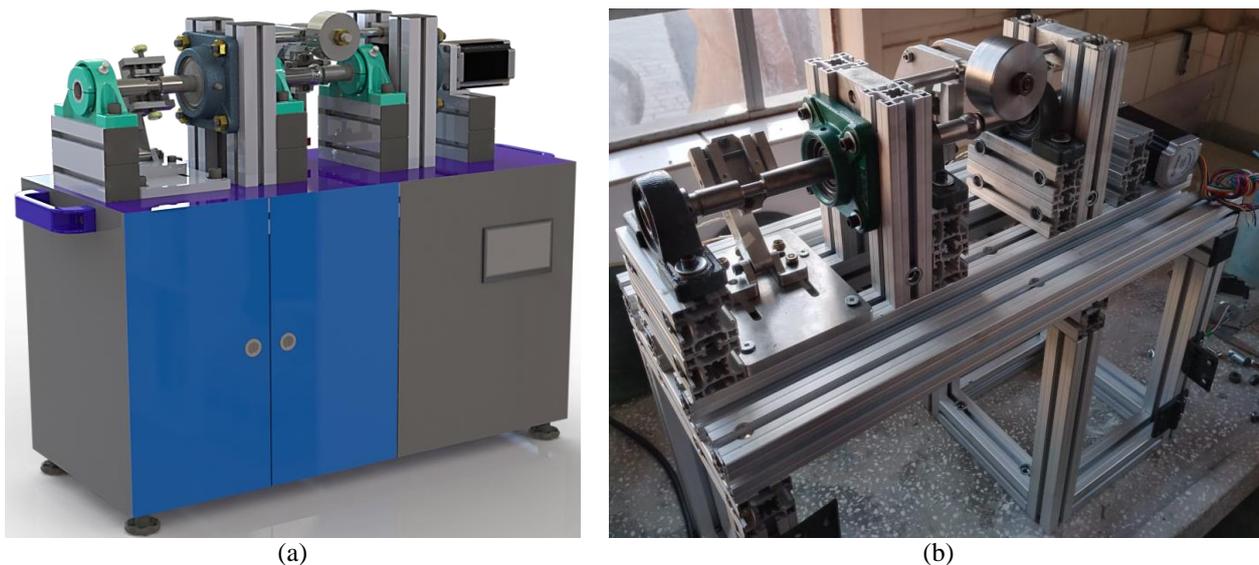


Figura 10. (a) Leiaute final e (b) fotografia do equipamento multitempos multifuncional desenvolvido.

4. CONCLUSÕES

O tribômetro construído corresponde, em resumo, a um núcleo de contenção do processo, constituído por uma estrutura montada com perfis estruturais modulares de alumínio, projetada para acomodar os sistemas acessórios que desempenham funções relativas aos ensaios: sistema motriz; sistema de fixação dos corpos de prova e aplicação da carga; sistema de alimentação da solução abrasiva; e sistema de condicionamento dos sinais de entrada e saída dos parâmetros de ensaio. Estes sistemas foram devidamente configurados para permitir a implementação de funções que tomaram possível a automatização dos ensaios: programação, monitoramento, registro e controle. A interface com o usuário se dá através de uma tela *touch-screen* de 4,3 polegadas interfaceada à uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto (Arduíno), por meio dos quais é realizada a programação, controle e aquisição de dados de execução do ensaio.

5. REFERÊNCIAS

- BS EN 1071-6: 2007: Advanced technical ceramics. Methods of test for ceramic coatings. Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-abrasion wear test.
- Cozza, R.C., 2011. “Estudo de desgaste atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante”. 327 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo.
- Cozza, R.C., Rodrigues, L.C., Schön, C.G., 2015 “Analysis of the micro-abrasive wear behavior of an iron aluminum alloy under ambient and high-temperature conditions”. *Wear*, Vol. 330-331, p. 250–260.
- Cozza, R.C., Suzuki, R.S., Schon, C.G., 2014. “Projeto, construção e validação de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre para a medição do coeficiente de atrito”. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, Vol. 11, p. 117-124.
- Eyre, T. S., 1991. “Friction and wear mechanisms of metals”. In: II Seminário Sobre Materiais Resistentes ao Desgaste, Uberlândia, ABM 1991, Anais, p.263-292.
- Groover, M.P., 2017. “Fundamentos da moderna manufatura”. 5ª ed. Vol. 1, Rio de Janeiro: Editora LTC, 2017.
- Impostômetro: 2020. Disponível em: <https://impostometro.com.br/home/relacaoprodutos>.
- Pahl, G.; Beitz, W., 1996. “Engineering design: a systematic approach”. 3rd edition. Ed. Springer Verlag.
- Santos, W.C., Neto, J.O.P., Silva, R.O., Rodriguês, G.M., Manfrinato, J.A., Dorigão, M., Rossino, L.S., 2015. “Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido”. *Matéria*, v. 20, p. 304-315.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.