



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO VITOR DA SILVEIRA NUNES

**DESENVOLVIMENTO DE MOLDE PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES E
ANÁLISE DE BIOMASSAS**

FORTALEZA

2019

JOÃO VITOR DA SILVEIRA NUNES

DESENVOLVIMENTO DE MOLDE PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES
E ANÁLISE DE BIOMASSAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria
Alexsandra de Sousa Rios.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- N925d Nunes, João Vitor da Silveira.
Desenvolvimento de molde para produção de briquetes e análise de biomassas / João Vitor da Silveira Nunes. – 2019.
105 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Profa. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios.
1. Briquete. 2. Molde de briquetagem. 3. Resíduos agrícolas. 4. Análise de elementos finitos. 5. Análise estatística. I. Título.

CDD 620.1

JOÃO VITOR DA SILVEIRA NUNES

DESENVOLVIMENTO DE MOLDE PARA PRODUÇÃO DE BRIQUES
E ANÁLISE DE BIOMASSAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em: 31/05/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Maria Alexsandra de Sousa Rios (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Tassio Lessa do Nascimento
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

À minha professora e orientadora Prof.^a Dr.^a Maria Aleksandra de Sousa Rios, que me orientou não só neste trabalho, mas ao longo da graduação, por todo o apoio e ensinamentos repassados tanto academicamente quanto profissionalmente.

Ao LARBIO – Laboratório de Referências em Biocombustíveis, sediado no NUTEC – Fundação Núcleo de Tecnologia do Estado do Ceará, por me abrigar em toda a parte experimental desta pesquisa.

Aos amigos do NUTEC e LARBIO: Chastry, Rosali, Erick, Raul, Thierry, Lucas e Daniel, que foram essenciais na execução deste trabalho, seja através da solução de dúvidas, auxiliando com as análises, bem como me acompanhando durante a pesquisa.

Aos colegas pesquisadores do GRINTEQUI: Kevyn, Mariana, Tauzer e Saulo e ao técnico do Laboratório da Engenharia Mecânica, Sr. Bonfim Rodrigues Campos, pela sua consultoria na fabricação dos moldes e pelo seu trabalho de tornearia.

Aos professores Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues e Dr. Francisco Ilson da Silva Júnior e aos alunos Arrais Neto e Gabriel Laureano por tirarem algumas dúvidas de elementos finitos e sobre o software ANSYS.

Aos colegas da empresa Ceará Steel onde estagiei: Benedito, Moacir, Saulo, Luíz, Paulo, Viunei, e Fátima por me repassarem vários conhecimentos de orçamento, relacionamento com fornecedores e projeto mecânico que utilizei na realização deste trabalho.

Ao Me. Paulo Hebert França Maia Júnior e ao Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire que me cederam o molde do LAFFER para que pudesse ser utilizado como base do molde briquetador, e a todos que ajudaram diretamente ou indiretamente na fabricação dos moldes e na produção dos briquetes.

A Indústria Mais Alho Temperos Eireli por fornecer as amostras de casca de alho que foram utilizadas como matéria prima nos experimentos, a Embrapa Fortaleza na pessoa do analista Adriano Lincoln Albuquerque Mattos por auxiliar no tritramento do material, e ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFC por fornecerem as peneiras utilizadas na separação granulométrica da biomassa

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela enorme paciência que Ele tem comigo, e a Nossa Senhora, por estar junto a mim nas horas mais difíceis.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), na pessoa do seu Magnífico Reitor, Prof. Dr. Henry de Holanda Campos.

Ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, na pessoa da sua coordenadora Prof.^a Dr.^a Maria Alexsandra de Sousa Rios, e do seu vice coordenador, Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues.

Aos meus pais Fernandes e Virgínia, por toda a paciência, apoio e sabedoria que me deram todos os dias, e ao meu irmão Pedro, por toda a companhia, rivalidade e amizade que me proporcionou nesses anos.

À minha família, avós, tios e primos, em especial a minha vó Lurdinha, por ter sido a pessoa mais carinhosa e menos egoísta que conheci, que sempre me incentivou a ser “um bom menino”.

Aos amigos de graduação Radmila, Fábio, Kevyn, Ivo, Iago, Camila, Dayse, Bené, Neto, Wanderson, Ásafe, Laís, Helaine, Wendrio, Daniel, Caio Falcão, Rerison, Raiane, Cecília, Jakson, Thiaguinho, Tito e Marcelo, que me acompanharam ao longo da faculdade varando noites, estudando por conta própria, ou apenas saindo para se divertir após uma prova ou um dia cansativo. Sem vocês essa jornada teria sido bem menos prazerosa.

A todos os professores que me ajudaram ao longo da minha trajetória, em especial ao professor Daniel Nicolas, que lecionou inglês durante o ensino médio, pelos seus ensinamentos e apoio durante o período do vestibular.

Aos funcionários da coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, em especial ao Fernando Antônio, uma pessoa muito dedicada e sempre solícita, e a Raimunda, uma senhora sempre prestativa e esforçada.

Ao programa Jovens Talentos para a Ciência, financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, que me concedeu bolsa em determinado período da graduação quando iniciei as pesquisas, ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - PIBIC - UFC, pela concessão de bolsa que me permitiu fazer parte dos experimentos desta pesquisa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ pelo fomento à pesquisa.

A todos os que de alguma forma contribuíram com a realização deste trabalho.

“I don't know the answer.
Sometimes, life is like this dark tunnel.
You can't always see light at the end of the tunnel,
but if you just keep moving,
you will come to a better place”

Aaron Ehasz

RESUMO

Há um contexto brasileiro de forte dependência energética da biomassa. Entretanto há pouca diversificação de matéria prima e o país possui vários resíduos agrícolas subaproveitados. Desse modo este trabalho buscou desenvolver um protótipo de molde para briquetagem em escala de bancada com baixo custo, para que assim viabilizasse a pesquisa de outros materiais para briquetagem, além de analisar como a pressão de compactação afeta a qualidade dos briquetes produzidos e testar algumas alternativas de resíduos agrícolas encontrados no estado do Ceará. Foram produzidos dois protótipos diferentes para carga de 10 ton. Um deles atendeu aos objetivos buscados, sendo possível fabricar em torno mecânico, com fator de segurança para carregamento estático é de 1,7811, e com um custo estimado de R\$2.693,20 para o molde de aço inox SAE 304, e de R\$2.032,50 para o molde em aço carbono SAE 1020 e 1045 (valores de janeiro de 2019, sem considerar os impostos sobre produtos e serviços). Em seguida foi analisado a influência da pressão de compactação no poder calorífico superior (PCS) em briquetes de cana de açúcar. Partindo-se de 12,7MPa, o PCS só variou significativamente ao chegar ao valor de 38,3MPa, variando de 15,757 até 15,962 MJ/kg (aumento de 1,3%), tendo assim pouca variação com a pressão. Em contrapartida a densidade e consequentemente a densidade energética foram bastante sensíveis a variação de pressão. Entre os mesmos intervalos de pressão a densidade variou de 148,0004 até 213,0537 g/m³ (variação de cerca de 44%), e a densidade energética variou de 2.332 até 3.401 MJ/m³ (variação de cerca de 46%). Dos resíduos agrícolas analisados, a casca de milho não foi possível de ser briquetada no molde de compactação, mesmo em mistura ao bagaço de cana. O briquete de casca de alho mesmo em mistura com o bagaço de cana, com um PCS de 13.6864 MJ/kg para apenas a casca de alho e de 14,7188 MJ/kg em mistura, não teve vantagens o bastante para justificar sua utilização em briquetes, embora poderia ser aproveitada para briquetagem em mistura com materiais de maior potencial energético. A casca de arroz foi possível de briquetar em mistura com o bagaço de cana e mostrou várias vantagens após a briquetagem, como menor teor de cinzas e maior teor de voláteis se comparado a casca de arroz *in natura*, apresentando PCS de 15,0444 MJ/kg.

Palavras-chave: briquete, molde de briquetagem, resíduos agrícolas, análise de elementos finitos, análise estatística.

ABSTRACT

There is a Brazilian context of strong energy dependence on biomass. However, there is little diversification of raw material and the country has several underutilized agricultural wastes. Thereby, this work aimed to develop a low-cost prototype die for briquetting at bench scale, in order to enable the research of other materials for briquetting, besides analyzing how the compression pressure affects the quality of the briquettes produced and to test some alternatives of agricultural residues found in Ceará. Two different prototypes were produced for 10 ton load. One of them met the objectives required, being possible to manufacture on a metal lathe, with safety factor for static load of 1.7811, and an estimated cost of R\$2.693,20 for the SAE 304 stainless steel die, and R\$2.032,50 for the die using SAE 1020 and 1045 carbon steel (prices relative to January 2019, without considering taxes on products and services). Then the influence of compaction pressure on the high calorific value (HCV) of sugarcane bagasse briquettes was analyzed. Starting from 12.7MPa, the HCV only varied significantly reaching the value of 38.3MPa, varying from 15,757 to 15,962 MJ/kg (increase of 1.3%), thus having little variation with the pressure. In contrast, the density and consequently the energy density were very sensitive to the variation of pressure. Between the same pressure ranges the density varied from 148,0004 to 213,0537 g/m³ (variation of about 44%), and the energy density varied from 2,332 to 3,401 MJ/m³ (variation of about 46%). Of the agricultural wastes analyzed, the maize straw could not be briquetted in the compaction die, even in a blend with sugarcane bagasse. The garlic skin briquette even when blended with sugarcane bagasse did not have enough advantages to justify its briquetting, presenting a HCV of 13.6864 MJ/kg for garlic skin only and 14.7188 MJ/kg in mixture, although it could be used for briquetting blended with materials of greater energy potential. The rice husk was possible to briquette in blend with the sugarcane bagasse and showed several advantages after briquetting, such as lower ash content and higher volatile matter when compared to *in natura* rice husk, presenting HCV of 15.0444 MJ/kg.

Keywords: briquette, briquetting press die, agricultural residues, finite elements analysis, statistical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tensões normais (σ) e de cisalhamento (τ) num elemento tridimensional.....	20
Figura 2 - Tensão x deformação para um material dúctil (A) e frágil (B)	20
Figura 3 - Elementos tetraédrico e hexaédrico utilizados nas malhas de elementos finitos.....	24
Figura 4 – Malha de 10mm aplicada numa peça	24
Figura 5 - Tensões obtidas numa peça utilizando uma simulação estática de elementos finitos	24
Figura 6 - Comparação entre malhas de 10mm (A) e 1mm (B) numa mesma peça	25
Figura 7 - Gráfico de convergência da tensão de von mises	26
Figura 8 - Briquetadeira para laboratório de pesquisa Lippel modelo LB32	33
Figura 9 - Esboço inicial para o molde caixa/gaveta.....	34
Figura 10 - Prensa Hidráulica Marcon modelo MPH15.....	34
Figura 11 - Esquema da montagem das tres partes quem compõem o molde.....	35
Figura 12 - Molde caixa/gaveta após a solda	36
Figura 13 - Pistão ao lado da parte superior com tubo de 25mm de diâmetro	36
Figura 14 - Posicionamento do molde caixa/gaveta na prensa (A, B e C).....	37
Figura 15 - Montagem das peças do molde caixa/gaveta.....	38
Figura 16 - Mostra a localização da força (A) e fixação (B) na simulação da gaveta.....	38
Figura 17 - Análise estática na peça Gaveta do molde caixa/gaveta p/ malha de 4mm (A e B) com indicação da região com concentração de tensão (seta vermelha)	40
Figura 18 - Mostra o local de aplicação da força (A) e da fixação (B) na Base do molde caixa/gaveta	41
Figura 19 - Análise estática na peça Base do molde caixa/gaveta p/ a malha de 6mm (A e B) com indicação da região com concentração de tensão (seta vermelha)	42
Figura 20 - Mostram a deformação sofrida pelo tubo de Ø25mm (A, B e C).....	44
Figura 21- Mostra o esforço causado pela falta de precisão da solda e do corte a plasma	45
Figura 22- Briquete de bagaço de cana (A) e de casca de castanha de caju (B)	46
Figura 23 - Peças desenvolvidas pelo LAFFER para extração de óleo de sementes de maracujá	47
Figura 24 - Posicionamento do molde cilindrico desevolvido pelo LAFFER numa prensa hidráulica	47
Figura 25 - Desenho das tridimensionais das peças base (A), pistão (B) e tubo (C) do molde cilíndrico no SolidWorks.....	48

Figura 26 - Sequência de encaixe do molde cilíndrico (A e B).....	49
Figura 27- Explica a modificação do encaixe do tubo e pistão de cilíndrico para cônico	49
Figura 28- Molde cilíndrico fabricado em aço inox 304	50
Figura 29 - Mostra a folga entre o pistão e o tubo da ordem de milésimos de milímetro	50
Figura 30- Etapas para a utilização do molde cilíndrico	51
Figura 31 - Briquetes de casca de castanha de caju produzidos no molde de inox (A, B e C)	52
Figura 32- Mostra o local de aplicação da força (A) e da fixação (B) na Base do molde cilíndrico	53
Figura 33 - Análise estática na peça Base do molde cilíndrico p/ malha de 4mm (A e B com indicação da região com concentração de tensão (seta vermelha).....	55
Figura 34- Mostra o local de aplicação de força (A) e fixação (B) da peça Pistão do molde cilíndrico.....	56
Figura 35- Simulação estática da peça Pistão do molde cilíndrico p/ uma malha de 2mm (A e B com indicação da região com concentração de tensão (seta vermelha).....	57
Figura 36- Mostra as áreas do tubo e base que sofreriam carga durante a compactação do briquete	58
Figura 37- Mostra a área onde a força será aplicada e a área que será fixada.....	59
Figura 38- Peça Tubo do molde cilíndrico em simulação com malha de 4mm (A e B) com indicação da região com concentração de tensão (seta vermelha).....	60
Figura 39 - Briquete de cana de açúcar 1mm – 7.5 ton (38,2 MPa). Amostra com cerca de 5g para teste de PCS (A e B).....	66
Figura 40 - Briquete de cana de açúcar 1mm – 7,5 ton (38,2 MPa), cortado em pedaços de 1g para teste de PCS (A e B).....	66
Figura 41 - Briquete de cana de açúcar 1mm – 7,5 ton (38,2 MPa). Amostra com cerca de 30g utilizada para teste de densidade aparente (A e B).....	67
Figura 42 - Fluxograma com as etapas para analisar se um ou mais grupos de amostras são estatisticamente diferentes.....	68
Figura 43 - Casca de alho in natura 4mm (A), Casca de Arroz in natura 1mm (B) e Bagaço de cana in natura 1mm (C)	76
Figura 44 - Briquete de casca de alho, Briquete de alho/cana e Briquete de arroz/cana.....	77
Figura 45 - Briquete de palha de milho e bagaço de cana (A e B).....	78
Figura A 1- Briquete de palha de milho e bagaço de cana (A e B).....	92
Figura A 2- Desenho da peça Encaixe de Baixo do molde caixa/gaveta	93

Figura A 3- Desenho da peça Gaveta do molde caixa/gaveta	94
Figura A 4- Desenho da peça Lateral do molde caixa/gaveta	95
Figura A 5- Desenho da peça Topo (tubo 25mm de diâmetro) do molde caixa/gaveta	96
Figura A 6- Desenho da peça Topo 2 (tubo de 50mm de diâmetro) do molde caixa/gaveta ...	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão de von mises x malha para a peça Gaveta do molde caixa/gaveta	39
Gráfico 2 - Tensão de von mises x malha para a peça Base do molde caixa/gaveta.....	42
Gráfico 3 - Tensão de von mises x malha para a peça Base do molde cilíndrico	54
Gráfico 4 - Tensão de von mises x malha para a peça Pistão do molde cilíndrico	57
Gráfico 5 - Tensão de von mises x malha	60
Gráfico 6 - Box plot (mediana e quartis) para PCS <i>versus</i> pressão aplicada (A) e densidade <i>versus</i> pressão aplicada (B)	70
Gráfico 7 - Box plot (mediana e quartis) dos dados de umidade (A), voláteis (B) e cinzas (C)	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Apresenta a norma, fórmula e informações sobre cada teste da Análise Imediata	27
Tabela 2 - Resultados da tensão de von mises para a peça Gaveta do molde caixa/gaveta	39
Tabela 3 - Resultados da tensão de von mises para a peça Base do molde caixa/gaveta	41
Tabela 4 - Resultados da tensão de von mises para a peça Base do molde cilíndrico	54
Tabela 5 - Resultados da tensão de von mises para a peça Pistão do molde cilíndrico	56
Tabela 6 - Resultados da tensão de von mises para a peça Tubo do molde cilíndrico	59
Tabela 7- Características das manutenções mais comuns do molde cilíndrico	61
Tabela 8 - Estimativa de custo para o molde cilíndrico em aço inox	62
Tabela 9 - Estimativa de custo para o molde cilíndrico em aço 1020 e 1045	63
Tabela 10 - Resultados de média e desvio padrão amostral para o teste de PCS	69
Tabela 11 - Resultados de média e desvio padrão amostral para a densidade aparente	69
Tabela 12 - Análise de Normalidade para os dados de PCS	71
Tabela 13 - Análise de Independência para os dados de PCS	71
Tabela 14- Análise de Homogeneidade para os dados de PCS	71
Tabela 15 - Análise de Normalidade para os dados de densidade	72
Tabela 16 - Análise de Independência para os dados de densidade	72
Tabela 17 - Análise de Homogeneidade para os dados de densidade	72
Tabela 18 - Análise de Variância para os dados de PCS	72
Tabela 19 - Análise de Variância para os dados de densidade	73
Tabela 20 - Análise de Tukey para os dados de PCS	73
Tabela 21 - Análise de Tukey para os dados de densidade aparente	73
Tabela 22 - Densidade energética para cada faixa de pressão	74
Tabela 23 - Para o material <i>in natura</i> , valores de média e desvio padrão amostral para umidade, voláteis e cinzas, e resultado do teste de carbono fixo e PCS	78
Tabela 24 - Para o material briquetado, valores de média e desvio padrão amostral para umidade, voláteis e cinzas, e resultado do teste de carbono fixo e PCS	79
Tabela 25 - Análise de Normalidade para os dados da análise imediata	81
Tabela 26 - Análise de Independência para os dados da análise imediata	82
Tabela 27 - Análise de Homogeneidade para os dados da análise imediata	82
Tabela 28 - Análise de Anova para os grupos de dados de umidade	82
Tabela 29 - Análise de Kruskal-Wallis para os grupos de dados de voláteis e cinzas	83
Tabela 30 - Testes de comparação de médias envolvendo o briquete de alho e de cana/alho	83

Tabela 31 - Testes de comparação de médias envolvendo o briquete de arroz/cana	84
Tabela B 1 - Resultados dos testes de PCS para cada faixa de pressão	98
Tabela B 2 - Resultados dos testes de densidade aparente para cada faixa de pressão	99
Tabela B 3 - Resultados da análise imediata e PCS para a casca de alho	100
Tabela B 4 - Resultados da análise imediata e PCS para a casca de arroz.....	101
Tabela B 5 - Resultados da análise imediata e PCS para o bagaço de cana.....	102
Tabela B 6 - Resultados da análise imediata e PCS para o briquete de alho.....	103
Tabela B 7 - Resultados da análise imediata e PCS para o briquete de alho/cana	104
Tabela B 8 - Resultados da análise imediata e PCS para o briquete de arroz/cana.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

σ'	Tensão de Von Mises
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
FAE	Finite Elements Analysis
GINTEQUI	Grupo de Inovações Tecnológicas e Especialidades Químicas
LAFFER	Laboratório de Filmes Finos e Energias Renováveis
LARBIO	Laboratório de Referência em Biocombustíveis Professor Expedito José de Sá Parente
NBR	Normas técnicas da ABNT
NUTEC	Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará
PCS	Poder Calorífico Superior
Sig.	Significância estatística
Sy	Limite de Escoamento (Yield Strength)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 Projeto de Máquinas	19
3.1.1 Deformação e Tensão	19
3.1.2 Limite ou Resistência de Escoamento	20
3.1.3 Tensão de von mises.....	21
3.1.4 Fator de segurança	22
3.1.5 Método de elementos finitos	22
3.1.6 Estudo de convergência de malha	25
3.2 Biomassa e Briquetagem	26
3.2.1 Análise imediata	26
3.2.2 Poder Calorífico.....	28
3.2.3 Briquetes.....	28
3.7 Análise estatística	29
3.3.1 Testes paramétricos	29
3.3.2 Testes Não Paramétricos	30
3.3.3 Teste de Normalidade.....	30
3.3.4 Teste de Qui Quadrado	30
3.3.5 Teste de Levene	31
3.3.6 Anova para um fator	31
3.3.7 Teste de Tukey.....	32
3.3.8 Teste de Kruskal-Wallis	32
3.3.9 Teste de Mann-Whitney	32
4. DESENVOLVIMENTO.....	33
4.1 – Protótipo 1 – Modelo caixa/gaveta	33
4.1.1 Materiais e Métodos	33
4.1.2 Resultados e Discussão.....	37
4.1.2.1 Estudo de Convergência para a chapa da gaveta.....	38
4.1.2.2 Estudo de Convergência para a Base.....	40

4.1.2.3 Problemas do molde caixa/gaveta	43
4.2 Protótipo 2 – Modelo Cilíndrico.....	47
4.2.1 Materiais e Métodos	47
4.2.2 Resultados e Discussão.....	52
4.2.2.1 Estudo de convergência de malha para a Base do molde cilíndrico.....	53
4.2.2.2 Estudo de convergência de malha para o Pistão do molde cilíndrico	55
4.2.2.3 Estudo de convergência de malha para o Tubo do molde cilíndrico.....	58
4.2.2.4 Indicações de manutenção para o molde cilíndrico.....	61
4.2.2.5 Estimativa de custo para o molde cilíndrico.....	62
4.3 Análise Densidade e PCS x Pressão de briquetagem	64
4.3.1 Materiais e Métodos	64
4.3.2 Resultados e Discussão.....	69
4.3.2.1 Condições para executar o Anova – PCS e Densidade	71
4.3.2.2 Teste de Anova – PCS e Densidade	72
4.3.2.3 Teste de Tukey – PCS e Densidade.....	73
4.4 Resíduos Orgânicos com potencial para briquetagem.....	75
4.4.1 Materiais e Métodos	75
4.4.2 Resultados e Discussão.....	77
4.4.2.1 Condições para executar o Anova –Resíduos Orgânicos para Briquetagem.....	81
4.4.2.2 Teste de Anova e Kruskal-Wallis –Resíduos Orgânicos para Briquetagem	82
4.4.2.3 Teste de Tukey e de Mann-Whitney –Resíduos Orgânicos para Briquetagem.....	83
4.4.2.4 Análise para o Briquete de Alho	84
4.4.2.5 Análise Briquete de Alho/Cana	84
4.4.2.6 Análise para o Briquete de Arroz/ Cana.....	85
5. CONCLUSÃO.....	87
REFERÊNCIAS	88
APÊNDICE	92
APÊNDICE B.....	98

1 INTRODUÇÃO

No mundo em geral há uma preocupação por fontes alternativas de energia. No Brasil, especialmente, há um destaque para a biomassa. Segundo o balanço energético nacional sobre os dados de 2017, 17% da matriz energética advém de cana de açúcar, 8% de lenha e carvão vegetal, e 6,5% de outras biomassas que incluem por exemplo casca de arroz, capim-elefante e óleos vegetais. Entretanto, há pouca diversificação das fontes de biomassa, além de um foco muito grande em fontes de biomassa como a cana de açúcar e a lenha que geram impactos negativos no ecossistema.

Uma das desvantagens da expansão canavieira é a pressão indireta que ela causa sobre o desmatamento da Amazônia, pois acaba empurrando outras culturas e a pecuária para outras localidades (FILHO, 2009).

A produção da lenha por sua vez acaba contribuindo para o desmatamento e o avanço sobre matas nativas, isso sem contar os desmatamentos ilegais que possuem menor preço que a lenha de origem certificada (GENTIL, 2008).

Assim, torna-se necessário buscar outras fontes de biomassa de modo a garantir a sustentabilidade do setor de bioenergia (FILHO, 2009). Uma das alternativas de biomassa sólida para a lenha e o carvão é o briquete, que consiste em um ou mais materiais orgânicos aglomerados por meio de um processo de compactação (RODRIGUES, 2000). É um material que possui várias vantagens em relação a lenha e carvão, além da possibilidade de aproveitar resíduos orgânicos que em sua maioria são subutilizados, por exemplo para produção de adubos, ou descartados em aterros sanitários (BARROS, 2012).

O briquete pode ter como matéria prima diferentes resíduos agrícolas e restos da indústria madeireira. Há inclusive pesquisas de briquetagem com descartes de papelão (BARROS, 2013). É preciso encontrar quais resíduos agrícolas possuem potencial para briquetagem. Entretanto, a diversidade de fontes de biomassa para briquetagem pesquisadas ainda é muito pequena. E um dos motivos pode ser a questão dos equipamentos para briquetagem.

Há poucas briquetadeiras disponíveis no Brasil, tanto para uso comercial como para pesquisa. Foram encontrados modelos para produção comercial vendidos pelas empresas BioMax, Lippel, Adriano Equipamentos, Green Peças e Colepó, mas grande parte dos aparelhos são fabricados sob encomenda, ou são importados. E devido ao tamanho ocupado e a quantidade de material que elas consomem, as briquetadeiras comerciais não são adequadas para uso em laboratório.

No campo de briquetadeiras para pesquisa a situação é ainda mais complicada. Nos trabalhos analisados observou-se o uso dos modelos da marca Lippel, que possuem um custo muito elevado, ou eram elaborados moldes de fabricação própria, e não foram achados detalhes sobre esses moldes. Logo torna-se crucial a elaboração e divulgação de projetos de briquetadeiras para laboratório, de modo a facilitar nos laboratórios brasileiros a pesquisa de resíduos orgânicos viáveis para a briquetagem.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um molde para produção de briquetes de baixo custo e analisar a qualidade dos briquetes produzidos.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Desenvolver um molde para produção de briquetes com baixo custo e em escala de bancada.
- b) Realizar análises com bagaço de cana de açúcar para verificar a influência da pressão aplicada no poder calorífico superior e densidade aparente do briquete.
- c) Analisar briquetes de casca de arroz, casca de alho e palha de milho, se necessário em mistura com bagaço de cana para facilitar a briquetagem, e verificar quais apresentam potencial para produção de briquetes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Projeto de Máquinas

Um projeto de máquinas requer, entre outras variáveis, que execute suas atividades de modo confiável e seguro. O principal objetivo de um projeto pode ser resumido nas seguintes etapas:

- Dimensionar as peças, levando em conta força e movimento
- Escolher os materiais que serão utilizados
- Escolher os processos de fabricação adequados

Desse modo é essencial que sejam calculadas as tensões e esforços que cada peça sofrerá durante sua atividade.

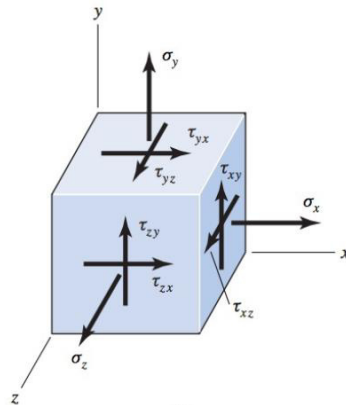
Essencialmente, uma máquina deve envolver movimento. No caso desse movimento ser lento e ter aceleração desprezível, podem ser realizadas apenas análises estáticas. Se esse movimento tiver uma velocidade considerável, já se torna necessário analisar os esforços que a inércia das peças causa (NORTON, 2013).

3.1.1 Deformação e Tensão

As máquinas durante seu funcionamento sofrem esforços, sejam de tração, compressão ou cisalhamento. Esses esforços geram tensão e deformação ao longo de vários pontos das peças (CALLISTER, 2002). Cada elemento infinitesimal de uma peça pode sofrer tensões diferentes.

Os esforços que agem numa peça podem ser divididos em forças normais e cisalhantes. Na Figura 1 abaixo temos um exemplo de como agem as tensões num elemento infinitesimal da peça. As tensões normais (σ) agem perpendiculares a face do elemento e podem ser causadas por forças normais de tração e compressão, por momentos fletores e por forças de esmagamento. Já as tensões de cisalhamento (τ) agem paralelas a face do elemento, fazendo com que dois elementos vizinhos deslizem entre si, e podem ser causadas por momentos de torção ou forças cortantes.

Figura 1 - Tensões normais (σ) e de cisalhamento (τ) num elemento tridimensional

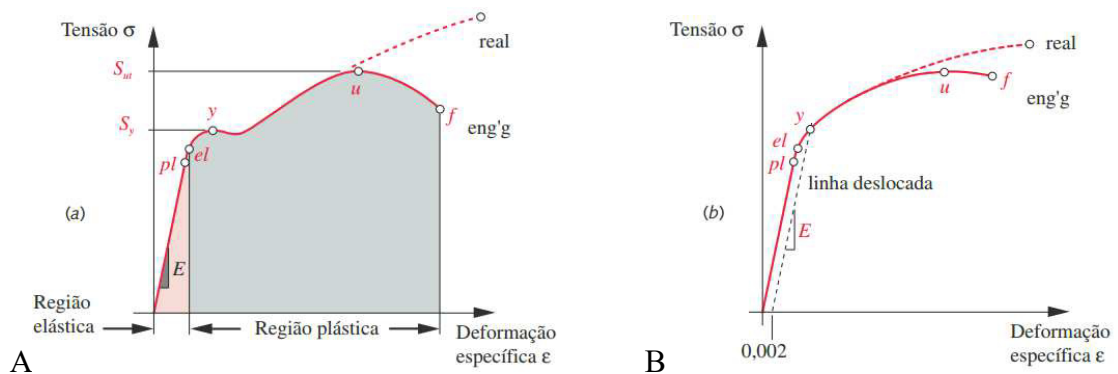


Fonte: (BUDYNAS; NISBETT, 2016)

3.1.2 Limite ou Resistência de Escoamento

O ensaio mais comum para verificar o comportamento entre tensão e deformação é o ensaio de tração. Nele, um aparelho prende o corpo de prova por duas garras e aplica uma carga de tração que aumenta gradativamente enquanto mede o deslocamento, e o corpo é alongado até a sua ruptura. Com isso é possível construir o gráfico de tensão x deformação para o material (CALLISTER, 2002). O resultado terá gráficos diferentes dependendo se o material tem natureza dúctil ou frágil, como mostra a Figura 2:

Figura 2 - Tensão x deformação para um material dúctil (A) e frágil (B)



Fonte: (NORTON, 2013), pag32

Tomando o gráfico dúctil, no início da tensão o corpo está no regime de deformação elástica (região vermelha). Nessa região a tensão (σ) e deformação (ϵ) seguem a lei de Hooke, onde $\sigma = E \cdot \epsilon$, e a inclinação (E) é o Módulo de Young ou de Elasticidade. Quando o esforço

cessa, o corpo volta naturalmente ao formato anterior. Num nível atômico os espaços inter atômicos se alteram, mas as ligações continuam as mesmas (CALLISTER, 2002).

Ao alcançar o limite de proporcionalidade (p_l), essa relação linear entre tensão e deformação não ocorre mais. A partir do limite elástico (e_l) o corpo já entra num estado de deformação plástica (região cinza), e o corpo passa a se deformar de modo permanente e não recuperável (NORTON, 2013). Num nível atômico as ligações entre os átomos são quebradas e são formadas novas ligações (CALLISTER, 2002).

No limite de escoamento (y) ocorre a **tensão de escoamento (S_y)**. A partir desse ponto o material cede mais facilmente a tensão, e a deformação aumenta consideravelmente. No limite de ruptura (u) ocorre a tensão de ruptura na tração (S_{ut}), que é a maior tensão de tração que o corpo pode suportar antes de ocorrer a ruptura (f) (NORTON, 2013).

A tensão de escoamento, dada em MPa ou kpsi, é utilizada como a tensão admissível ou tensão de trabalho ao se representar a segurança de um projeto, para assegurar que o corpo que venha a receber a carga não se deforme permanentemente (CALLISTER, 2002).

3.1.3 Tensão de von mises

Durante um ensaio de tração para obter a tensão de escoamento de um material, o corpo de prova é tracionado num aparelho por meio de um esforço normal. Logo, esse limite de escoamento leva em conta uma carga normal.

Entretanto, nem sempre isso acontece na engenharia. Um corpo pode receber os mais diversos tipos de carregamento ao mesmo tempo e em diversos eixos. Assim não seria correto comparar essas diferentes tensões com um limite de escoamento que leva em conta apenas a tensão normal de tração.

Para isso se utiliza a tensão de von mises (σ'). Levando em conta as várias tensões normais e cisalhantes em diversos eixos, calcula-se um único valor de tensão de tração uniaxial equivalente. É como se houvesse um valor de carregamento de tração que causasse no corpo a mesma tensão que todos aqueles outros carregamentos causassem (NORTON, 2013). Desse modo, a tensão de von mises pode ser comparada com o limite de escoamento presente na literatura, que costumam ser obtidos em aparelhos que realizam testes de tração.

3.1.4 Fator de segurança

O coeficiente de segurança representa a probabilidade de falha de uma estrutura e é um valor adimensional. Em geral, para um carregamento estático pode ser resumido como uma razão entre o esforço crítico para que ocorra a falha e o esforço devido as forças aplicadas na peça (NORTON, 2013).

A falha por sua vez pode ser considerada como o estado em que uma peça sofreu tal deformação que não funcionará mais adequadamente (NORTON, 2013), ou ainda que a peça perde a sua função (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

Para casos de carregamento estático em materiais pode-se considerar como critério de resistência o limite de escoamento do material **desde que seja usada com cautela, pois não é adequada para todos os casos**, como por exemplo quando há concentradores de tensão. Temos então a fórmula simplificada:

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (1)$$

Onde N é o fator de segurança, S_y é a resistência ou limite de escoamento do material (MPa), e σ' é a tensão de von mises (MPa). A resistência é uma propriedade inerente da peça, e dependem dentre outras coisas do material e dos tratamentos que possa ter passado, enquanto as tensões dependem mais de fatores como a carga aplicada e a geometria da peça (BUDYNAS; NISBETT, 2016).

Além disso, a tensão máxima do componente deve ser menor do que a resistência do material com uma certa margem para evitar qualquer incerteza ou falha rara que venha a ocorrer (BUDYNAS; NISBETT, 2016). É a chamada habitualmente de “margem de segurança”.

3.1.5 Método de elementos finitos

Em geometrias mais simples, e com poucos esforços, as tensões na peça podem ser simplesmente calculadas utilizando fórmulas de resistência de materiais. Mas para geometrias mais complexas, os cálculos seriam impraticáveis ou muito demorados, mas podendo ser resolvidos em minutos por meio do uso ferramentas computacionais. Nesse contexto a análise de elementos finitos por meio de softwares permite se calcular tensões de modo muito mais

preciso e prático do que seria possível com os métodos de análise convencional (NORTON, 2013).

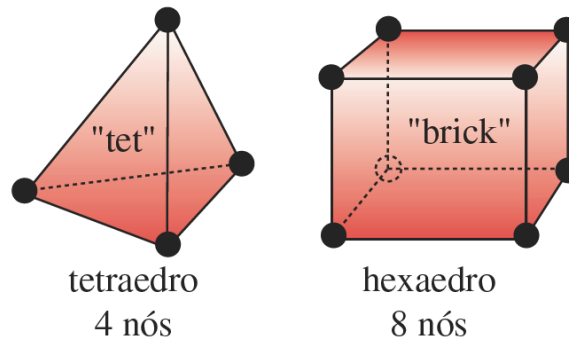
O objetivo de uma de uma análise por elementos finitos é tentar representar um comportamento em um corpo real, contínuo e de infinitos elementos, por meio de um modelo discreto e com uma quantidade limitada de elementos (TAVARES, 1998). Pode ser usada para várias análises como transferência de calor ou mecânica dos fluidos (NORTON, 2013), mas será abordado neste trabalho apenas seu uso para calcular deformações e tensões em carregamentos estáticos.

Inicialmente os softwares chamados de CAD (*Computer Aided Design*) realizavam basicamente desenhos de vistas das peças. Depois desenvolveram-se os softwares de CAE (*Computer Aided Engineering*), que já consideravam as peças como corpos sólidos, e podiam facilmente calcular informações como peso e centro de gravidade das peças. Atualmente softwares como SolidWorks, SolidEdge, Catia e Ansys já tem aliados a eles interfaces para realizar análises de elementos finitos (FEA- *Finite Elements Analysis*) (NORTON, 2013).

Entretanto deve sempre se atentar de que os resultados obtidos por esses softwares podem ser incorretos se não houver um domínio da teoria do FEA, se a análise não for bem formulada ou se a chamada malha tiver sido incorretamente aplicada (NORTON, 2013).

Uma malha pode ser definida como uma rede formada por pontos e elementos. Durante uma análise de elementos finitos é gerada uma malha sobre a peça, ou seja, ela é dividida em elementos, de modo são usadas equações diferenciais para obter os parâmetros em cada uma dessas células (SIMWIKI, 2017). No caso de análises estáticas, considera-se que os nós aplicados no material se deformam segundo a lei de Hooke, e para as chamadas simulações lineares, consideramos que a constante de rigidez não se altera. No caso de simulações não-lineares, a constante de rigidez pode variar por exemplo com a deformação do material. Ela é útil em situações específicas como grandes deformações e materiais com propriedades não lineares, como os plásticos por exemplo (SALDANHA, 2017). Comumente os softwares ainda tem a opção de alterar o tipo de elemento da malha entre tetraédrico e hexaédrico, conforme a Figura 3 abaixo:

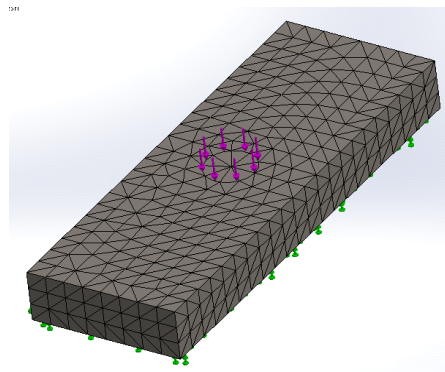
Figura 3 - Elementos tetraédrico e hexaédrico utilizados nas malhas de elementos finitos



Fonte: (NORTON, 2013)

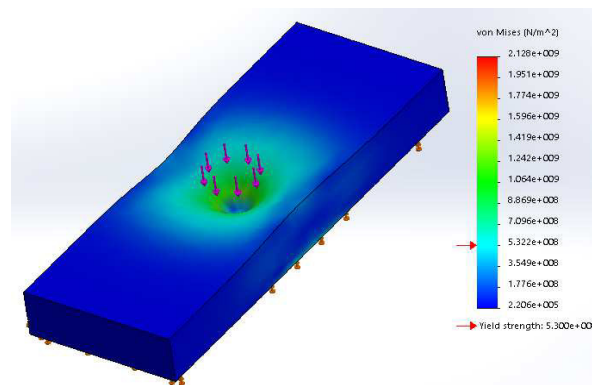
Por possuir uma maior quantidade de nós, espera-se que uma malha hexaédrica tenha mais precisão que uma malha tetraédrica, e a tetraédrica por sua vez representa melhor geometrias complexas. Temos nas Figuras 4 e 5 um exemplo de malha tetraédrica e uma simulação linear estática executada por um software de FEA:

Figura 4 – Malha de 10mm aplicada numa peça



Fonte: Autor

Figura 5 - Tensões obtidas numa peça utilizando uma simulação estática de elementos finitos



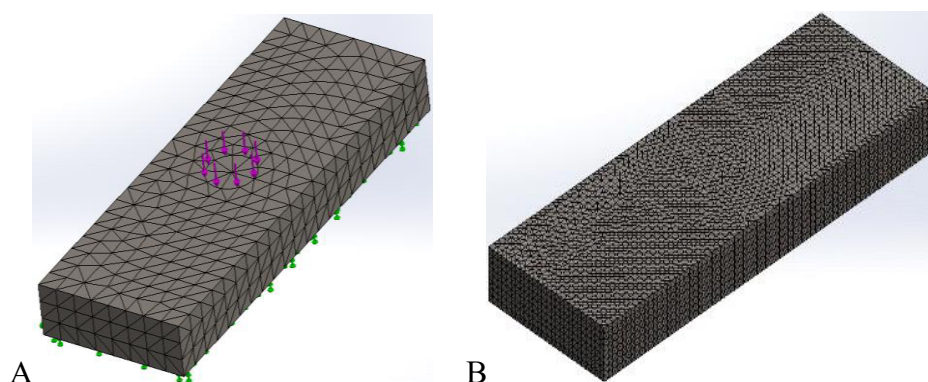
Fonte: Autor

3.1.6 Estudo de convergência de malha

Durante uma simulação de elementos finitos, a peça é dividida em vários pontos e pode-se obter uma aproximação dos valores de tensão e deformação para cada um deles. Se a malha tiver dimensões maiores, ou seja, for muito grosseira, o tempo de processamento será menor, mas os resultados serão menos precisos. Isso não é problema nas regiões onde há pouca variação das tensões, mas nas regiões onde ocorrem as tensões críticas ou há concentradores de tensão, uma malha mais refinada, com elementos de menores dimensões, se faz necessária para captar essas variações de tensão e obter resultados mais precisos (NORTON, 2013).

Tomando um exemplo simples, se a chapa de uma mesa for representada como um único elemento, ao receber uma força para baixo, todo esse elemento se comporta da mesma forma, o que está bem longe do comportamento real. Quando for dividida em dois elementos, a representação é mais precisa, mas o comportamento ainda está longe do real. Então se deve aumentar o número de elementos em que esse corpo pode ser dividido, isso é, a malha vai sendo refinada, até chegar num ponto onde em que o corpo seja formado por muitos infinitesimais elementos, e seu comportamento se aproxime do real esperado para um corpo contínuo. Na Figura 6 temos um exemplo da diferença entre uma mesma peça com malhas de diferentes graus de refinamento:

Figura 6 - Comparação entre malhas de 10mm (A) e 1mm (B) numa mesma peça

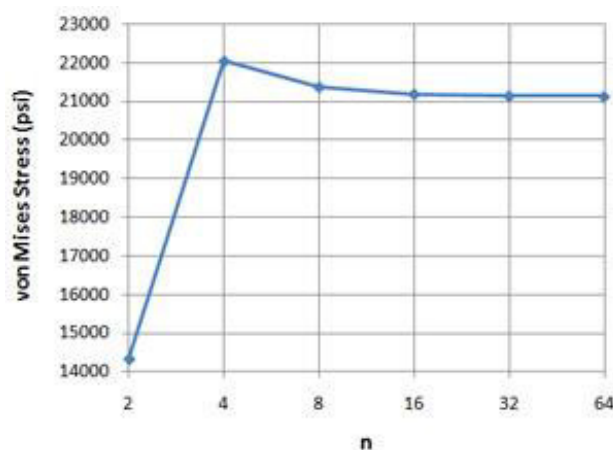


Fonte: Autor

Malhas mais refinadas costumam ter resultados mais precisos, mas ao mesmo tempo demoram mais tempo para serem calculadas. O ideal é escolher uma qualidade de malha que equilibre precisão com tempo de processamento (SUPPORT_AUTODESK, 2015).

Para executar um estudo de convergência de malha, parte-se de uma malha mais grosseira e vai se refinando a malha. Caso a malha tenha sido bem aplicada na geometria, o esperado é os resultados convergirem para um valor. Na Figura 7 é mostrado um exemplo da variação da tensão de von mises ao se aumentar a quantidade de nós de um elemento:

Figura 7 - Gráfico de convergência da tensão de von mises



Fonte: (SUPPORT_AUTODESK, 2015)

Pode se inferir que no gráfico da Figura 7, a partir de certo ponto não é necessário aumentar a quantidade de elementos, pois os resultados não terão melhora significativa, apenas terá desperdício de processamento do computador onde as simulações estão sendo executadas.

Também deve-se atentar que certas geometrias como quinas ou pontas geram áreas quase desprezíveis, e em certos casos os resultados podem ficar exagerados. Indica-se então tentar fazer alterações na geometria, como por exemplo arredondar esses pontos, para evitar estes erros.

Para os estudos deste trabalho as peças foram modeladas com o software SolidWorks 2014 e os resultados para a tensão de von mises foram obtidos por meio do software ANSYS versão 17.0.

3.2 Biomassa e Briquetagem

3.2.1 Análise imediata

É um modo de caracterizar um material baseado em quatro fatores: umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo. Neste trabalho foi utilizada uma estufa da marca De Leo para

os testes de umidade, e um forno mufla Quimis modelo 0318M24A para os testes de voláteis e de cinzas. Na Tabela 1 temos as caracterizações de cada um dos testes:

Tabela 1 - Apresenta a norma, fórmula e informações sobre cada teste da Análise Imediata

Teste	Norma	Fórmula	Observações
Teor de Umidade	ASTM D3173/2017	$TU = \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{final}}$	É fração de água presente na amostra. A amostra é pesada antes e depois de seca em estufa. Para este trabalho foi utilizada a umidade em base úmida.
Teor de Voláteis	ASTM D3175/2018	$TV = \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{final}}$	É fração da amostra composta por substâncias voláteis que não a água. Uma biomassa com alto teor de voláteis tem maior facilidade de ignição (VIEIRA <i>et al.</i> , 2013). A amostra previamente seca é pesada antes e após remover os voláteis em uma mufla. Também pode se usar uma amostra <i>in natura</i> desde que se subtraia o teor de umidade da Massa inicial.
Teor de Cinzas	ASTM D3174/2018	$TC = \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{final}}$	É fração da amostra composta por material não volátil e inorgânico. É um material mineral inerte e não consumível (OHANA, 2012). Um maior teor de cinzas não necessariamente prejudica a combustão dos briquetes, mas há indícios de que menores teores de cinzas aumentam a resistência dos briquetes (QUIRINO; BRITO, 1991). A amostra é pesada antes e após a carbonização completa em uma mufla.
Teor de Carbono Fixo	ASTM D3172/2013	$Tcf = 100\% - TU - TC - TV$	É a fração orgânica da amostra, após retirar os voláteis e umidade, mas sem passar ainda pela queima. É o maior responsável pelo poder

			calorífico (CASTRO, 2011). Pode ser calculado subtraindo as frações de umidade, cinzas e voláteis do total.
--	--	--	--

Fonte: Autor

3.2.2 Poder Calorífico

Pode ser considerado a quantidade de energia liberada pela combustão de um material. O poder calorífico superior leva em conta também a energia desprendida para a vaporização da água presente naquela amostra, enquanto o inferior não considera a energia gasta na vaporização (GENTIL, 2008). Seu valor é dado em MJ/kg. Os testes deste trabalho foram realizados segundo a norma ASTM D5865 e foi utilizada uma bomba calorimétrica IKA C-200.

3.2.3 Briquetes

O briquete consiste em um ou mais materiais orgânicos aglomerados por meio de um processo de compactação (RODRIGUES, 2000). Para sua preparação o material é previamente triturado e secado, e em seguida compactado.

Há dois tipos de prensa: as de compactação e as de parafuso. Mas ambas têm a mesma função: causam atrito entre as partículas do material, aumentando a temperatura e plastificando a lignina presente, que envolve as partículas agindo como aglomerante (BOAS, 2011).

Após sair do aparelho, a lignina se solidifica novamente, formando uma estrutura consistente. Embora haja uma falta de consenso sobre como ocorre essa aglomeração no briquete, o amolecimento da lignina durante a compactação é provavelmente o responsável por manter as partículas aderidas após a compactação (SILVA, 2007).

O indicado para se obter um briquete de qualidade é uma umidade em base úmida entre 8 e 12% (FILIPPETTO, 2008). Pouca umidade dificulta a plastificação da lignina, e muita deixa o briquete pouco consistente, quebrando-se facilmente ao ser armazenado ou transportado, além de ocasionar fissuras no briquete (BOAS, 2011).

Em relação a lenha e ao carvão o briquete possui várias vantagens: tem maior poder calorífico devido à baixa umidade e maior densidade, de modo que facilita o transporte,

manuseio e armazenagem, além de precisar de menor área de estocagem e equipamentos para queima de menor dimensão. Também gera menos cinzas, fumaça e fuligem (SILVA, 2007).

Entretanto as principais dificuldades para o desenvolvimento dessa fonte de biomassa no país têm sido o alto investimento em equipamentos, o gasto em energia, e a natureza altamente higroscópica dos briquetes, de modo que se desmancham se expostos a umidade, necessitando de mais cuidados no armazenamento e transporte (BARROS, 2013).

3.7 Análise estatística

Em todos os testes foi utilizado uma margem de confiança de 95%. Também se procurou utilizar amostras de tamanho maior ou igual a três, assim mantendo um índice de tendenciosidade próximo de um. A seguir será explicado cada um dos tipos de testes estatísticos realizados e suas características.

3.3.1 Testes paramétricos

Uma das principais divisões entre os tipos de testes estatísticos é entre os paramétricos e os não paramétricos. Os testes paramétricos necessitam que os dados trabalhados sigam uma série de condições. Caso sejam atendidas, temos uma distribuição que provavelmente (GAYA; GARLIPP, 2008):

- É simétrica;
- Possui apenas um ponto máximo;
- Esse ponto máximo localiza-se próximo a média;
- O histograma de frequências forma um “sino”, típico de uma curva normal.

As condições para uma amostra ser paramétrica são (GAYA; GARLIPP, 2008):

- **Possuir grupos com distribuição normais (Teste de Normalidade)**
- **Os dados independem entre si (Teste de Qui-Quadrado)**
- **Os grupos devem ter variância semelhante (Teste de Levene)**

Entretanto muitas vezes na prática é difícil que todas essas condições sejam satisfeitas. Se uma das condições não forem atendidas, não invalida que possa se executar um teste paramétrico como o de Anova, apenas torna o resultado menos confiável do que se todos esses parâmetros fossem satisfeitos. O que realmente invalidaria seria se nenhuma dessas suposições fossem satisfeitas (VIEIRA, 2006).

Também ressalta-se que dentre as suposições para o teste paramétrico a de normalidade é crucial para sustentar a lógica dos testes (FIELD, 2009). Realizar um teste de variância paramétrico numa amostra não normal pode induzir a erros nos resultados (VIEIRA, 2006).

Alguns exemplos de testes paramétricos são o teste de Anova, o teste de t independente e dependente e o teste de Tukey.

3.3.2 Testes Não Paramétricos

Caso nenhuma das suposições sejam satisfeitas, ou se considere que a não normalidade invalide o uso de um teste paramétrico, podem ainda ser executados os testes não paramétricos. Estes testes requerem pouquíssimas suposições dos dados. Os testes não paramétricos abordados nesse trabalho só têm como requisito que os dados sejam contínuos, ou seja, que possam ter valores quebrados (FIELD, 2009).

Alguns exemplos de testes não paramétricos são o teste de Kruskal-Wallis e o de Mann-Whitney.

3.3.3 Teste de Normalidade

O principal pré-requisito para uma amostra ser considerada paramétrica é que os dados tenham uma distribuição normal. Para este teste a distribuição que temos é comparada com uma distribuição normal modelo de mesma média e variância. Então os pontos de cada um são comparados entre si para verificar o quão significativamente diferentes os modelos são. No caso do teste ser **não significativo ($p > 0,05$)** significa que não há diferença significativa entre os modelos, então **a distribuição dos dados se aproxima de uma curva normal** (FIELD, 2009).

Alguns exemplos de testes de Normalidade são o de Shapiro-Wilk e o de Kolmogorov-Smirnov.

3.3.4 Teste de Qui Quadrado

O teste compara dois grupos de amostras, onde um seria o esperado e o outro os dados reais. Pode haver diferenças entre os grupos, então é preciso saber se essa diferença é apenas uma variação aleatória, ou se de fato há algum outro fator influenciando a amostra para

que se distancie do esperado. Para isso este teste verifica a hipótese nula, ou seja, a chance dessa variação nas frequências ser apenas um acaso (ARORA; VINAY, 2014).

O principal uso para este teste é comparar dois grupos de amostras e verificar se há uma associação entre os grupos. Um **resultado não significativo ($p > 0,05$)**, rejeita a hipótese de dependência, indicando que os dados de um grupo não afetam os de outros grupos e **são independentes** (FIELD, 2009).

3.3.5 Teste de Levene

Este teste avalia a homocedasticidade, ou seja, se dois ou mais grupos possuem variâncias semelhantes. Por exemplo, ao se comparar dois grupos 1 e 2, e os dados do grupo 1 parecem mais concentrados, e do grupo 2 parecem mais dispersos, pode se executar um teste de Levene para confirmar essa suposição (FIELD, 2009).

Um **resultado não significativo ($p > 0,05$)**, indica que **não há diferença entre as variâncias** dos grupos (FIELD, 2009).

3.3.6 Anova para um fator

É um **teste paramétrico para amostras independentes**, utilizado para verificar o quão dois ou mais grupos são diferentes. Caso o resultado **seja significativo ($p < 0,05$)**, indica que **há uma diferença entre as amostras, mas não localiza essa diferença**. Ou seja, não indica entre quais grupos esta diferença foi percebida (FIELD, 2009). Pode ser que a diferença esteja entre os grupos 1 e 2, 2 e 3, ou entre todos os grupos por exemplo.

Caso o resultado do teste de Anova não seja significativo, os grupos são praticamente iguais. Caso o teste de Anova indique uma diferença o passo seguinte é realizar um teste a posteriori ou *post hoc*, comparando as amostras dois a dois para localizar a(s) diferença(s). Utiliza-se um teste de comparação entre médias, como o teste de T de student ou o teste de Tukey (AYRES; AYRES; SANTOS, 2007).

Outra característica do teste de Anova para um fator é ser um teste robusto, ou seja, tem poucas alterações caso os dados violem suas hipóteses (FIELD, 2009).

3.3.7 Teste de Tukey

É uma sugestão de teste a posteriori para Anova, utilizado para **amostras homogêneas** (teste de Levene) e de mesmo tamanho (FIELD, 2009). Assim como o teste de t de student, compara diferença entre duas médias amostrais. No caso do resultado ser **significativo ($p < 0,05$) pode se afirmar que há uma diferença entre esses grupos.**

O teste de Tukey é mais conservador evitando o erro do tipo I (FIELD, 2009), o que é uma vantagem sobre o teste de t. O erro do tipo I é o da falsa significância. Desse modo por exemplo, pode ser que um teste de t acuse uma diferença significativa, enquanto o de Tukey não dê significativo. Então se a condição da homogeneidade for satisfeita, deve se dar preferência pelo teste de Tukey ao invés dos testes de t de student.

3.3.8 Teste de Kruskal-Wallis

Este teste seria uma alternativa **não paramétrica** ao teste de Anova para um fator (FIELD, 2009), e compara 3 ou mais **amostras independentes**, de tamanhos iguais ou não (AYRES; AYRES; SANTOS, 2007).

3.3.9 Teste de Mann-Whitney

Uma alternativa não paramétrica para a comparação de duas médias (FIELD, 2009).

O teste de Mann-Whitney é um teste **não paramétrico** para comparar **amostras independentes**, de mesmo tamanho ou diferentes (AYRES; AYRES; SANTOS, 2007). Um **resultado significativo ($p < 0,05$)** indica que **há uma diferença entre os grupos.**

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 – Protótipo 1 – Modelo caixa/gaveta

4.1.1 Materiais e Métodos

O projeto para desenvolver um protótipo de briquetagem iniciou-se em 2015. No período o Grupo de Inovações Tecnológicas e Especialidades Químicas (GRINTEQUI), necessitava iniciar as pesquisas na área de briquetes e biomassa sólida.

Há poucas opções de briquetadeiras para laboratório no Brasil, por exemplo o modelo LB32 da marca Lippel, mostrado na Figura 8:

Figura 8 - Briquetadeira para laboratório de pesquisa Lippel modelo LB32



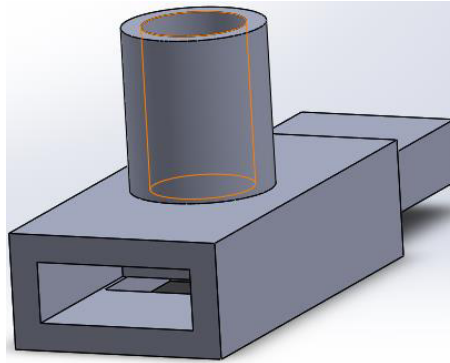
Fonte: (LIPPEL, 2019)

Outro problema encontrado foi o custo elevado das briquetadeiras para laboratório. O custo dos modelos variava entre 50 e 65 mil reais (valores para 2018). O objetivo do projeto era produzir uma briquetadeira de escala de bancada com as seguintes características:

- Tamanho reduzido
- Simples de utilizar (se possível de acionamento manual)
- Baixo custo de fabricação
- Produzir briquetes menores, com 50 ou 25mm de diâmetro e menos de 100mm de altura

Foram feitos vários esboços iniciais para a fabricação do equipamento. Decidiu-se criar um molde de aço com o seguinte esboço da Figura 9:

Figura 9 - Esboço inicial para o molde caixa/gaveta



Fonte: Autor

O molde seria acoplado a uma prensa hidráulica de 15 ton modelo MPH 15 da marca Marcon Indústria Metalúrgica Ltda, mostrado na Figura 10:

Figura 10 - Prensa Hidráulica Marcon modelo MPH15



Fonte: (MARCON, 2019)

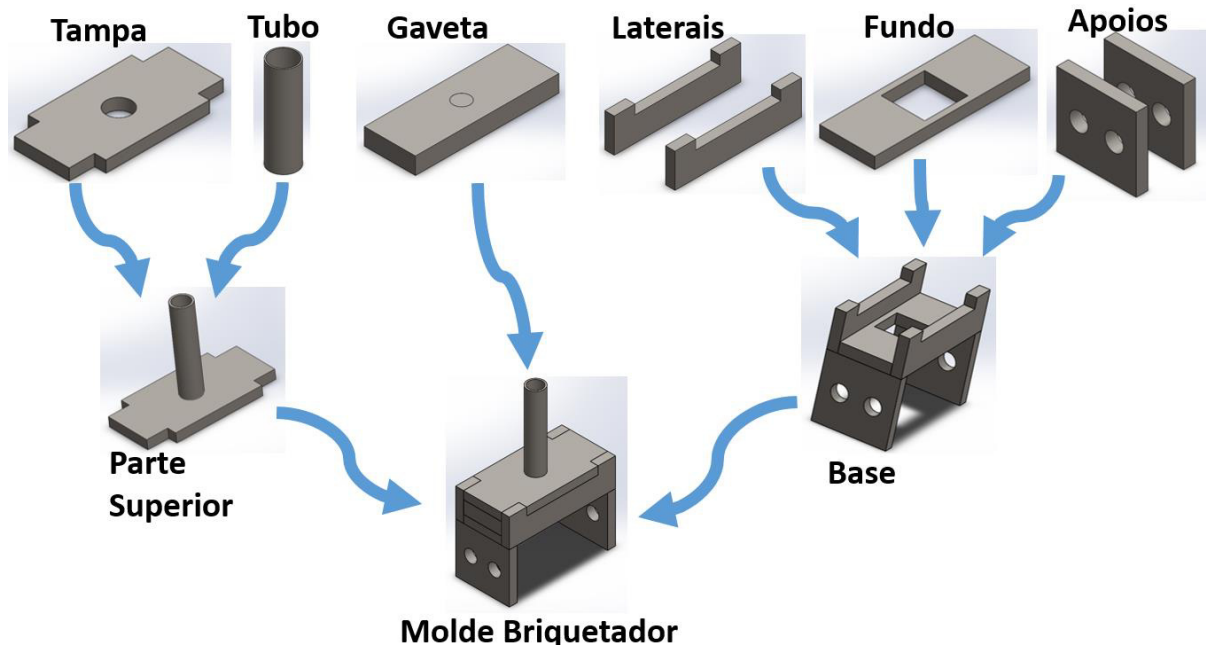
Para utilização do molde briquetador utiliza-se o seguinte procedimento:

- Encaixar a gaveta
- Colocar a matéria orgânica pela parte superior do tubo
- Colocar um cilindro fechando o tubo

- Compactar o material com o auxílio da prensa hidráulica
- Remover a pressão
- Retirar a gaveta, e o briquete cai pela parte de baixo do molde

Na Figura 11 estão apresentadas as peças que compõem o molde briquetador:

Figura 11 - Esquema da montagem das tres partes quem compõem o molde



Fonte: Autor

Com esta montagem a parte superior poderia ser cambiável, produzindo duas medidas de briquetes, com 25 e 50mm de diâmetro. Os desenhos foram feitos no software SolidWorks, e simulados no software ANSYS para a carga de 10 ton de força (100.000 N), e foi realizado um estudo de convergência de malha.

Nas chapas foi utilizado **aço SAE 1045**, que possui **limite de escoamento de 310 MPa** considerando chapas laminadas a quente (NORTON, 2013), e nos tubos foi utilizado aço ASTM A36.

A gaveta foi fabricada com uma chapa de 1" (polegada), e as demais peças foram obtidas de uma chapa de 5/8". As peças foram recortadas com corte a plasma, depois passaram por acabamento para remover as rebarbas resultantes do processo.

Em seguida as estruturas foram montadas com solda mig e pintadas com primer cinza. Também foram fabricados os pistões que compactariam o briquete com barras redondas de aço 1020 num torno mecânico. Em alguns sites com projetos semelhantes muitos relatavam um acúmulo de água durante a compactação da biomassa, então foram feitos alguns furos no

tubo para evitar a concentração de líquido. As Figuras 12 a 14 mostram as peças a fabricação das peças e sua colocação na prensa hidráulica:

Figura 12 - Molde caixa/gaveta após a solda



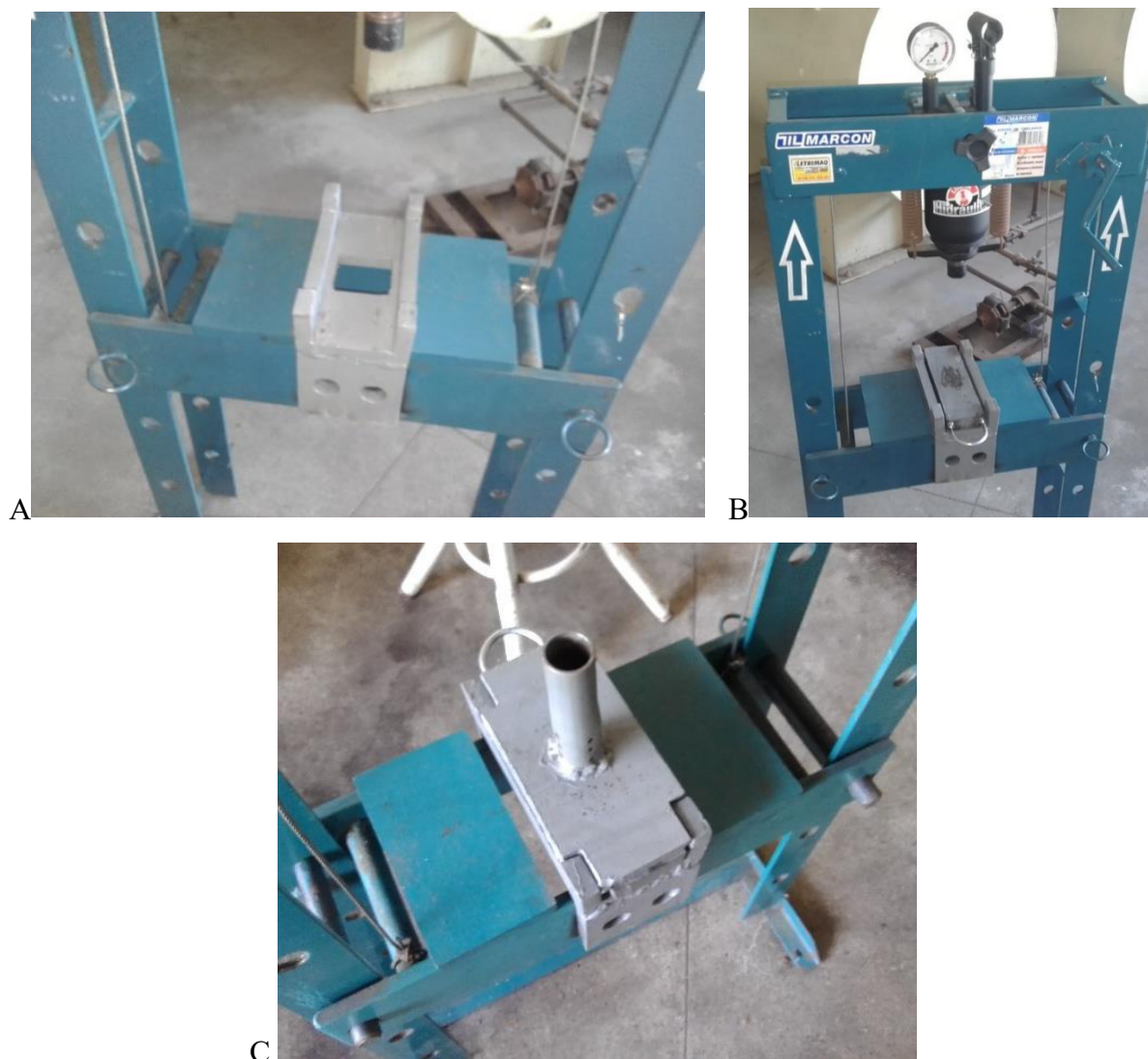
Fonte: Autor

Figura 13 - Pistão ao lado da parte superior com tubo de 25mm de diâmetro



Fonte: Autor

Figura 14 - Posicionamento do molde caixa/gaveta na prensa (A, B e C)



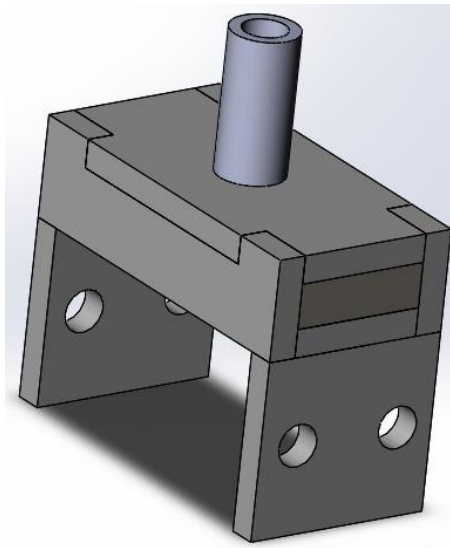
Fonte: Autor

Após a colocação do molde na prensa foram utilizados bagaço de cana *in natura* e casca de castanha de caju com umidade de cerca de 10% para realização dos testes preliminares.

4.1.2 Resultados e Discussão

No apêndice as Figuras A1 a A6 há os desenhos detalhados, medidas e pesos de cada peça que constitui o molde. O conjunto inteiro totaliza 11,750 kg. A Figura 15 apresenta o modelo em computador do molde:

Figura 15 - Montagem das peças do molde caixa/gaveta

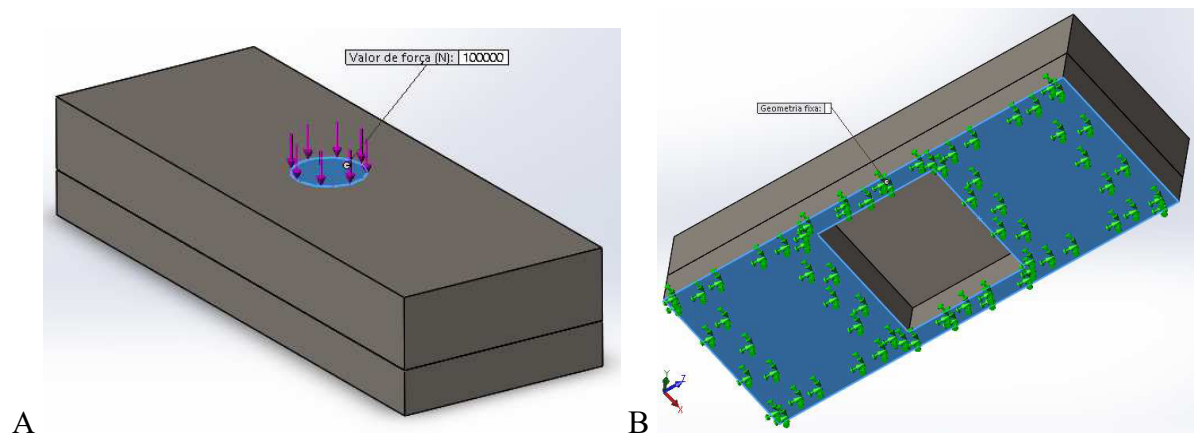


Fonte: Autor

4.1.2.1 Estudo de Convergência para a chapa da gaveta

As simulações tinham a peça da gaveta sobre a peça da base com uma carga de 100.000N (10 ton na prensa hidráulica) sobre um círculo de 25mm de diâmetro na face superior, enquanto a face inferior era fixada, conforme mostra a Figura 16:

Figura 16 - Mostra a localização da força (A) e fixação (B) na simulação da gaveta



Fonte: Autor

Para a simulação foi necessário que os nós da malha coincidisse de uma peça para outra, a melhor solução encontrada foi realizar a simulação unindo as duas peças numa peça só.

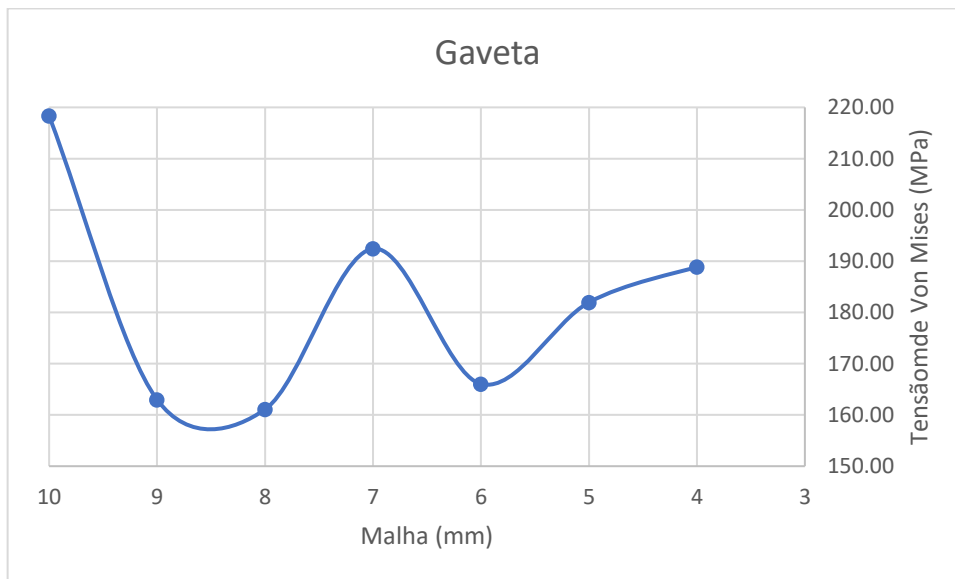
A melhor convergência observada para a **simulação linear** foi para a **malha hexaédrica**. Na Tabela 2 e no Gráfico 1 temos os resultados obtidos com o ANSYS para cada respectiva malha:

Tabela 2 - Resultados da tensão de von mises para a peça Gaveta do molde caixa/gaveta

Gaveta	
Malha mm	Tensão Von Mises (MPa)
10	218,33
9	162,98
8	161,09
7	192,43
6	166,04
5	181,96
4	188,89

Fonte: Autor

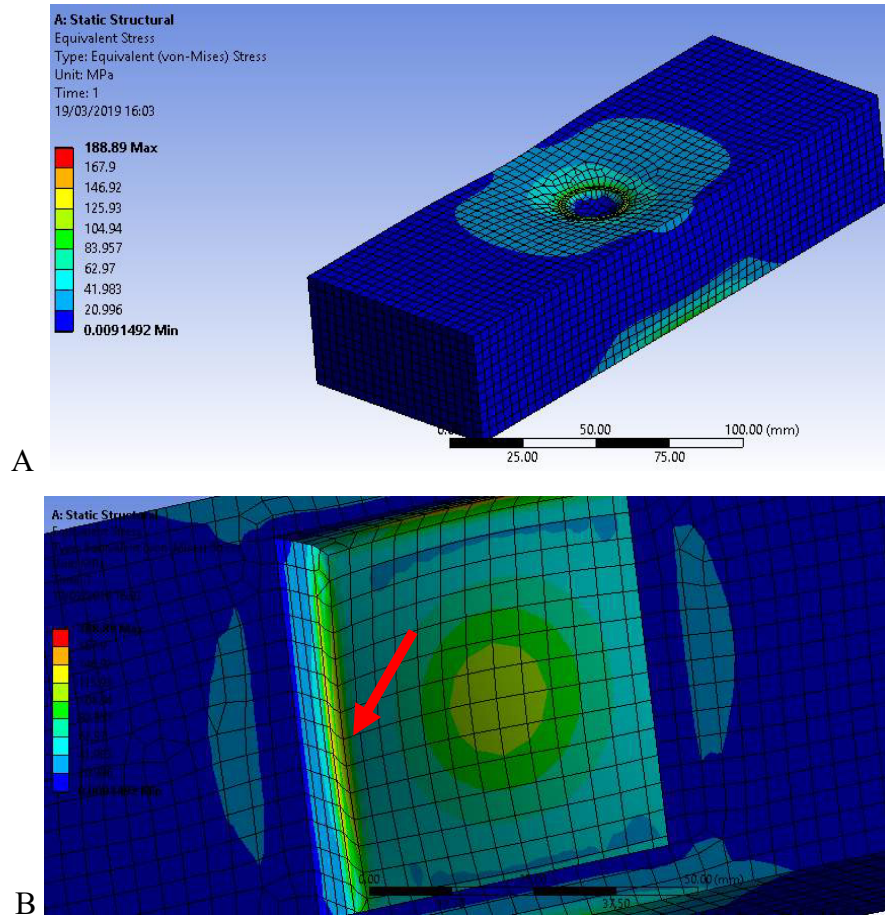
Gráfico 1 - Tensão de von mises x malha para a peça Gaveta do molde caixa/gaveta



Fonte: Autor

Os valores convergem para a tensão encontrada na malha de 4mm. Foi considerado um valor de von mises de 188,89 MPa atingido nessa malha. Desse modo, o fator de segurança foi de 1,6412. Na Figura 17 temos a análise estática da peça:

Figura 17 - Análise estática na peça Gaveta do molde caixa/gaveta p/ malha de 4mm (A e B) com indicação da região com concentração de tensão (seta vermelha)

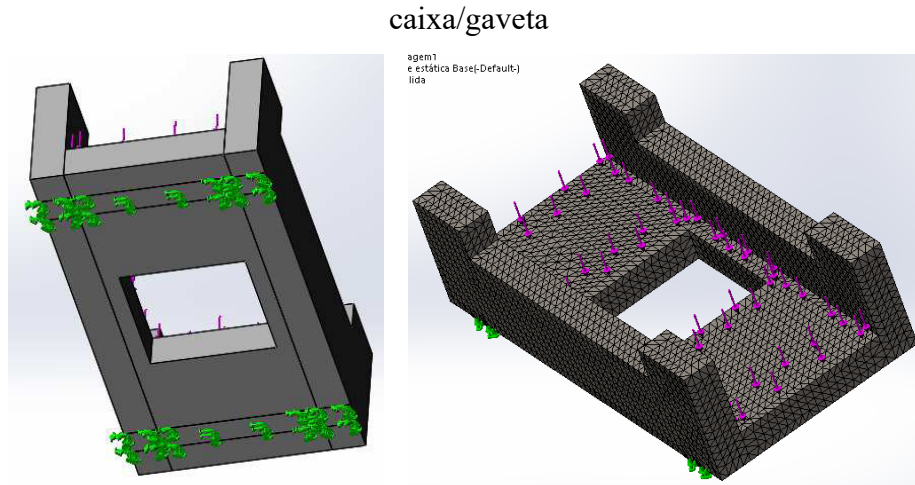


Fonte: Autor

4.1.2.2 Estudo de Convergência para a Base

Foi utilizada também 100.000N sobre a face em que a chapa da gaveta entra em contato, e foram fixadas sobre duas linhas em que a chapa de 1/2" de espessura da prensa hidráulica apoia o conjunto, como pode ser visto na Figura 18:

Figura 18 - Mostra o local de aplicação da força (A) e da fixação (B) na Base do molde



Fonte: Autor

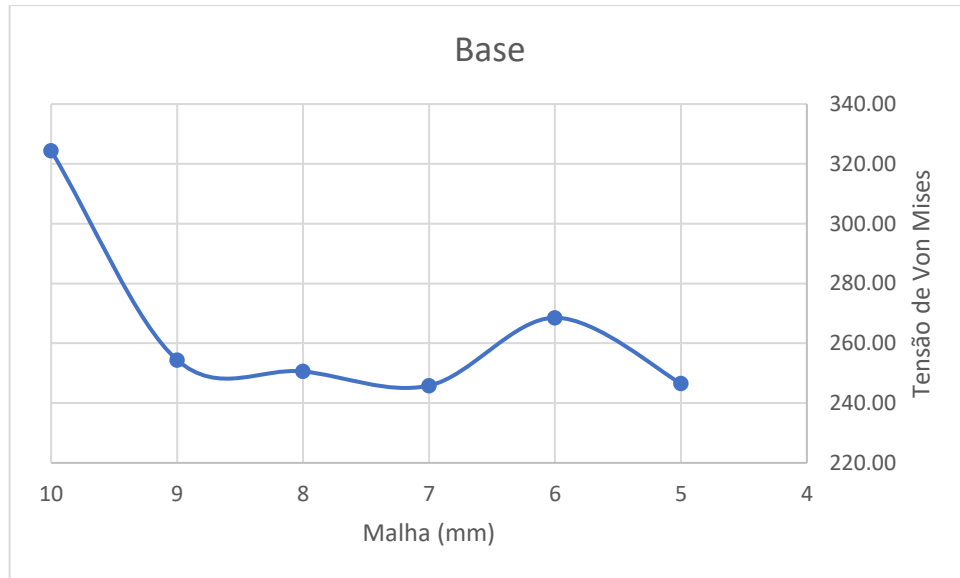
Para esta peça foi utilizada **simulação linear de malha hexaédrica**. Os valores encontrados para cada valor de malha estão apresentados na Tabela 3 e Gráfico 2:

Tabela 3 - Resultados da tensão de von mises para a peça Base do molde caixa/gaveta

Base	
Malha mm	Tensão Von Mises (MPa)
10	324,41
9	254,42
8	250,58
7	245,84
6	268,55
5	246,55

Fonte: Autor

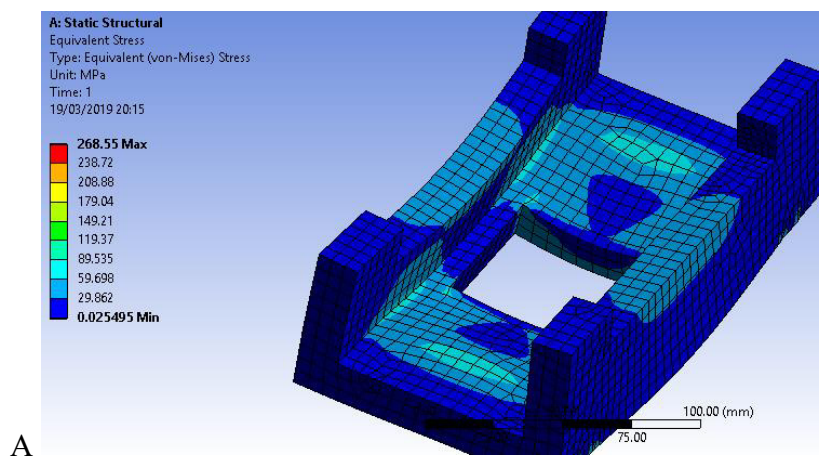
Gráfico 2 - Tensão de von mises x malha para a peça Base do molde caixa/gaveta

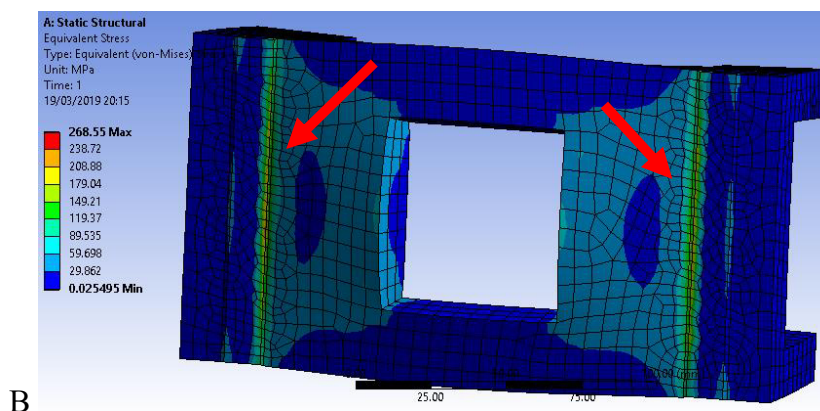


Fonte: Autor

Os valores convergem próximos de 6mm de malha. Tomando-se o valor de tensão de von mises de 268,55 MPa, temos um fator de segurança de 1,1543. A Figura 19 mostra a malha de 6mm com a simulação na peça:

Figura 19 - Análise estática na peça Base do molde caixa/gaveta p/ a malha de 6mm (A e B) com indicação da região com concentração de tensão (seta vermelha)





B

Fonte: Autor

4.1.2.3 Problemas do molde caixa/gaveta

Infelizmente com pouco tempo de uso foram percebidos vários problemas no molde. Não foi previsto que o tubo sofreria um esforço radial e furos adicionados no tubo acabaram por fragilizá-lo.

Pelo furo ter um raio muito pequeno comparado ao tubo, gerou-se comportamento semelhante ao esperado em uma trinca (NORTON, 2013). Esse tipo de descontinuidades na geometria da peça acaba por elevar a tensão no local do furo. Normalmente em carregamentos estáticos os efeitos dos concentradores de tensões são considerados apenas em materiais frágeis, pois nos materiais dúcteis, como é o caso do aço A36 utilizado no tubo, eles sofrem deformações plásticas significativas. Assim além de aliviar as tensões na vizinhança da trinca, o material consegue escoar apenas localmente, tornando as deformações e tensões residuais considerando desprezíveis em comparação com o tamanho da peça (CALLISTER, 2002; NORTON, 2013; BUDYNAS; NISBETT, 2016). Entretanto, ao lidar com cargas cíclicas ou repetidas, os materiais dúcteis se comportam como materiais frágeis, e os efeitos dos concentradores de tensão devem ser levados em conta (NORTON, 2013; BUDYNAS; NISBETT, 2016).

Assim, mesmo que nos primeiros testes a peça não tivesse apresentado escoamento, a região começou a se deformar em pouco menos de 100 ciclos, como mostra a Figura 20.

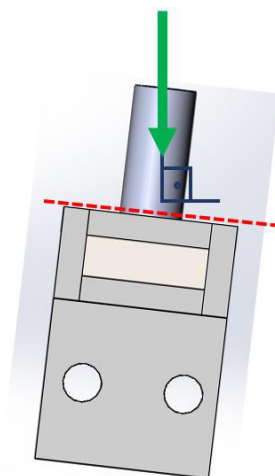
Figura 20 - Mostram a deformação sofrida pelo tubo de Ø25mm (A, B e C)



Fonte: Autor

Outro ponto percebido foi que a solda em 90° do tubo não teve precisão satisfatória. Além disso as peças cortadas no plasma também tiveram muito desvio das medidas especificadas, e assim quando a peça do topo era posicionada sobre a base, não ficava nivelada, como exemplifica a Figura 21:

Figura 21- Mostra o esforço causado pela falta de precisão da solda e do corte a plasma



Fonte: Autor

Com isso, ao aplicar a carga vertical com a prensa hidráulica, além do tubo se deformar aumentando o diâmetro, este também começou a se deformar flambando para a lateral devido à falta de precisão dos processos de fabricação.

Os furos no tubo também se mostraram desnecessários. Percebeu-se que as pequenas folgas entre o encaixe da parte superior e a gaveta já permitiam por si só a saída do excesso de umidade do material, logo uma folga da ordem de centésimos ou milésimos de milímetro já seria o bastante que o líquido gerado escoasse.

Mas o principal problema foi na saída do material. A matéria orgânica se acumulava nos furos e na folga entre o tubo e pistão, de cerca de 5mm, o que dificultava a remoção do briquete. Era necessário praticamente remover a parte superior da peça, e com auxílio de alguma barra redonda e martelo empurrar o briquete e o pistão para fora do tubo. Temos na Figura 22 alguns briquetes foram produzidos com o molde antes que o molde viesse a apresentar problemas:

Figura 22- Briquete de bagaço de cana (A) e de casca de castanha de caju (B)



Fonte: Autor

Analisando os resultados obtido com os testes e o desenvolvimento do protótipo foi possível inferir as seguintes informações sobre a fabricação de um molde de compactação:

- As peças precisam de maior precisão na fabricação para garantir o alinhamento do movimento do pistão e tubo com a prensa.
- A folga entre tubo e pistão deve ser pequena para evitar que acumule material e trave as peças;
- A parede do tubo sofre uma carga radial considerável, logo também deve ser levada em conta nas análises de carregamento estático;
- O acúmulo de água que é expulsa do material durante a compactação pode ser facilmente solucionado deixando pequenas frestas para que saia por baixo do molde;
- Devido as altas pressões que o material sofre, é interessante que o design facilite a remoção no caso do briquete ficar preso no tubo.

4.2 Protótipo 2 – Modelo Cilíndrico

4.2.1 Materiais e Métodos

O segundo protótipo foi construído com base num modelo com diâmetro interno de Ø50mm utilizado pelo Laboratório de Filmes Finos e Energias Renováveis (LAFFER), do Departamento de Engenharia Mecânica da UFC, para prensagem de sementes de maracujá para a extração de óleo. O modelo era formado por três peças: a base e tubo em aço 1045, e um pistão em aço 1020, conforme as Figuras 23 e 24:

Figura 23 - Peças desenvolvidas pelo LAFFER para extração de óleo de sementes de maracujá



Fonte: LAFFER, 2016

Figura 24 - Posicionamento do molde cilíndrico desenvolvido pelo LAFFER numa prensa hidráulica



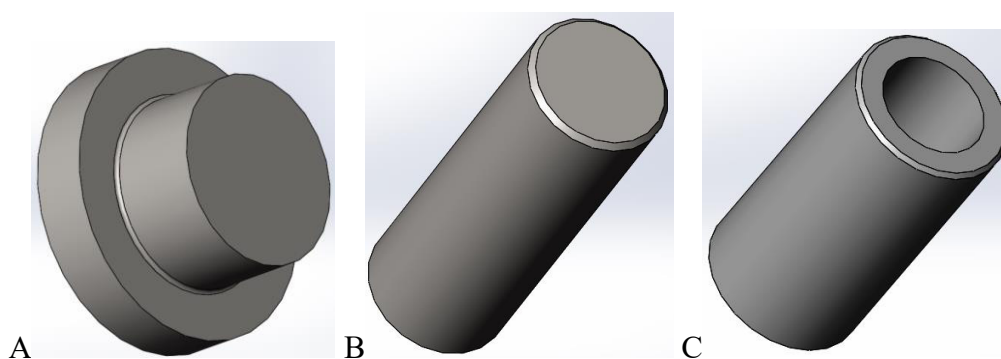
Fonte: LAFFER, 2016

A molde era simples, de fácil manuseio e poderia ser fabricado em um torno mecânico, além de poder produzir amostras pequenas de briquetes, ideal para as análises de laboratório. Seria possível produzir briquetes com uma carga de 10 ton, resultando numa pressão de compactação de até 50 MPa.

Foram encontrados na literatura alguns moldes semelhantes ao apresentado. Em SHUMA; MADYIRA, 2017 é citado o uso de um molde cilíndrico de aço de baixo carbono com diâmetro interno de 100mm utilizado junto a uma prensa hidráulica de 30 ton, alcançando até 19 MPa de compactação. Outro estudo cita o uso de um molde cilíndrico de inox com diâmetro interno de 35mm, junto a uma prensa hidráulica de bancada Marconi MA098 de 15 ton, alcançando uma pressão de até 1250 kgf/cm², cerca de 125 MPa (SILVA *et al.*, 2015), e outro também cita um molde metálico de 35mm de diâmetro acoplado a uma prensa Marcon MPH 15 para aplicar 12 ton (cerca de 125 MPa de compactação) produzindo briquetes de 20g (MASULLO *et al.*, 2018).

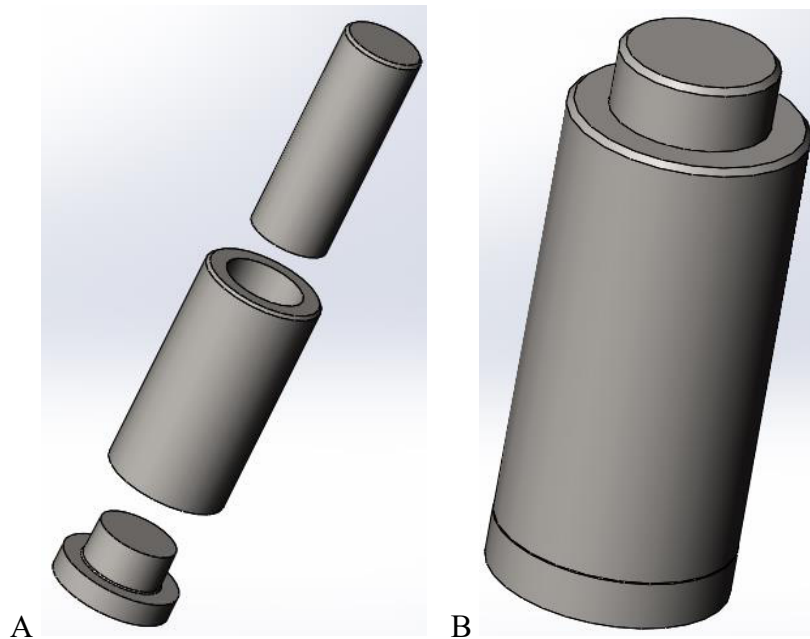
Foram feitas algumas mudanças nas dimensões do molde para se adequar a prensa hidráulica Marcon MPH 15 ton, mas mantendo o diâmetro do briquete de Ø50mm. O material foi trocado para **aço inox 304**, com **limite de escoamento de 241 MPa** considerando barras recozidas (NORTON, 2013), e foram feitas simulações estáticas no software ANSYS para a carga de 10 ton (100.000N) para assegurar a resistência do molde. As Figuras 25 a 26 mostram o esboço tridimensional das peças e a sequência de encaixe do molde:

Figura 25 - Desenho das tridimensionais das peças base (A), pistão (B) e tubo (C) do molde cilíndrico no SolidWorks



Fonte: Autor

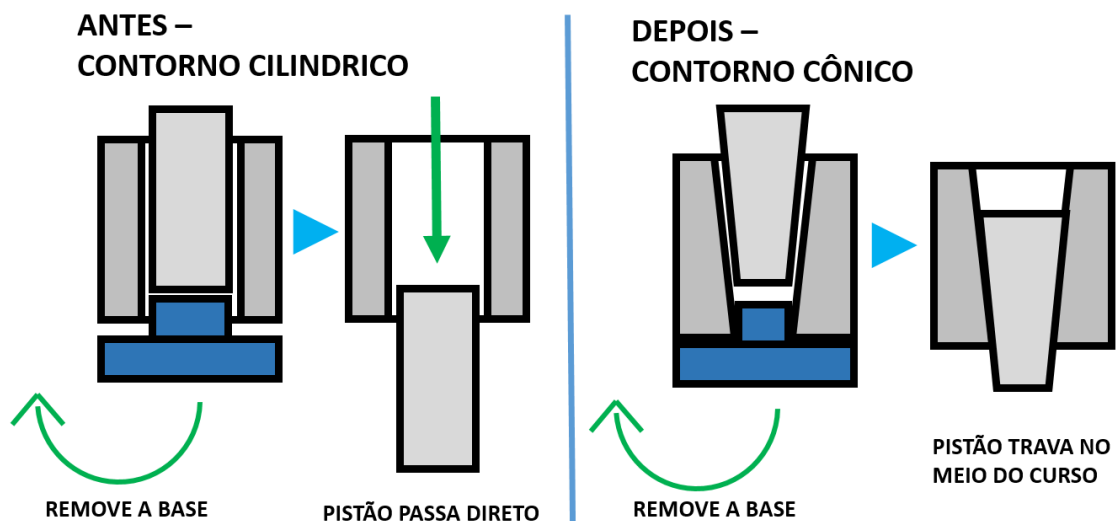
Figura 26 - Sequência de encaixe do molde cilíndrico (A e B)



Fonte: Autor

Durante a fabricação, foi sugerido deixar o pistão e tubo com um encaixe levemente cônico. Assim ao se remover a base para retirar o briquete, não haveria perigo do pistão cair. A Figura 27 apresenta a modificação:

Figura 27- Explica a modificação do encaixe do tubo e pistão de cilíndrico para cônico

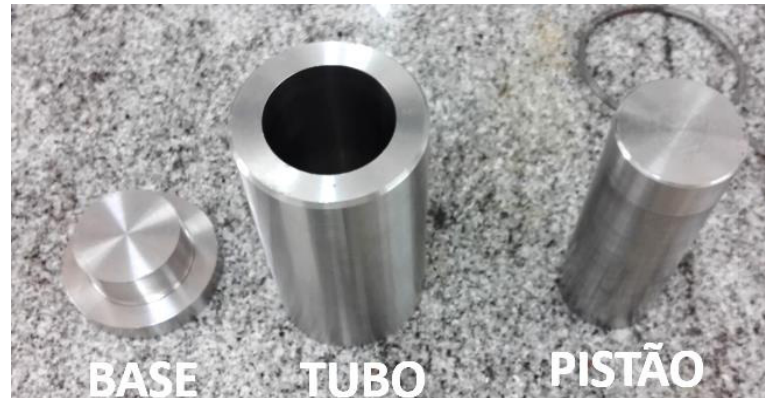


Fonte: Autor

A fabricação foi feita em torno mecânico com uma folga entre peças da ordem de milésimos de milímetro, já que com o protótipo anterior mostrou-se que pequenas frestas já

permitiriam a saída do excesso de líquido, e que com uma folga muito grande entre o pistão e o tubo poderia acumular matéria orgânica, travando as peças. As Figuras 28 e 29 mostram as peças em inox fabricadas e a folga entre as peças:

Figura 28- Molde cilíndrico fabricado em aço inox 304



Fonte: Autor

Figura 29 - Mostra a folga entre o pistão e o tubo da ordem de milésimos de milímetro



Fonte: Autor

Como o encaixe do pistão no tubo é cônico, as peças devem ser encaixadas com os lados corretos ou corre-se o risco de travar as peças. Foi feito um chanfro de 2mm para marcar os lados de cima das peças, como pode ser visto na Figura 30 anterior.

Um fator percebido durante os testes foi de que um período de prensagem maior melhorava a consistência do briquete, pois assim a lignina plastificada pelo calor do atrito da

compactação tinha mais tempo para envolver as partículas, e também as fibras tinham mais tempo para se entrelaçar preenchendo os espaços vazios e diminuindo seu volume, o que podia ser percebido na diminuição de pressão no manômetro da prensa hidráulica. BARROS, 2013 utiliza 5min de prensagem e resfriamento do briquete, e MASULLO *et al.*, 2018 e TOMELERI *et al.*, 2017 utilizam 30 segundos de compactação, então se convencionou utilizar 5 min de compactação, depois esperar 5 minutos antes de manusear o briquete. A Figura 29 está apresentado o procedimento de utilização do molde cilíndrico:

Figura 30- Etapas para a utilização do molde cilíndrico

• **Passo a passo briquetagem:**



1- preparação do material



2- fechar a parte de baixo



3- preencher com 5 a 30 g de material (depende do teste)



4- colocar o pistão e pressionar



5- posicionar o material na prensa



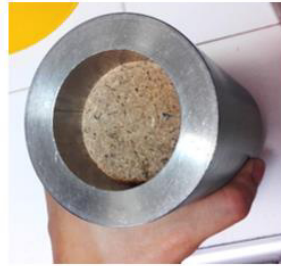
6- bombear a prensa até a pressão desejada (5 ton)



7- deixar descansando 5 min com a pressão aplicada



8- remover a base, afastar os apoios, e continuar pressionando para expelir o briquete



9- caso não tenha muito atrito com o tubo, é possível remover apenas pressionando o pistão



10- esperar alguns minutos antes de masusear o briquete

Fonte: Autor

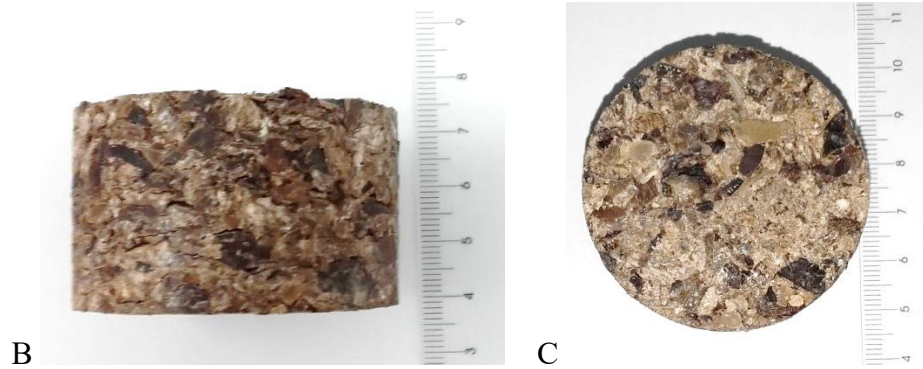
4.2.2 Resultados e Discussão

Existem aços mais resistentes e baratos que o aço inox SAE 304 que poderiam ser utilizados na fabricação do molde, como os aços SAE 1020 e 1045, mas gerariam uma camada de óxido com o tempo. Embora isso não alterasse testes como o PCS pois o óxido de ferro só reage a temperaturas altíssimas, outros testes como análise imediata ou espectrometria de massa poderiam ser contaminados.

Os testes realizados mostraram que o molde é eficiente na briquetagem e simples de utilizar. O processo dura em torno de 10 a 15min, e os briquetes produzidos foram consistentes e simples de serem removidos. Na Figura 31 temos alguns briquetes produzidos:

Figura 31 - Briquetes de casca de castanha de caju produzidos no molde de inox (A, B e C)





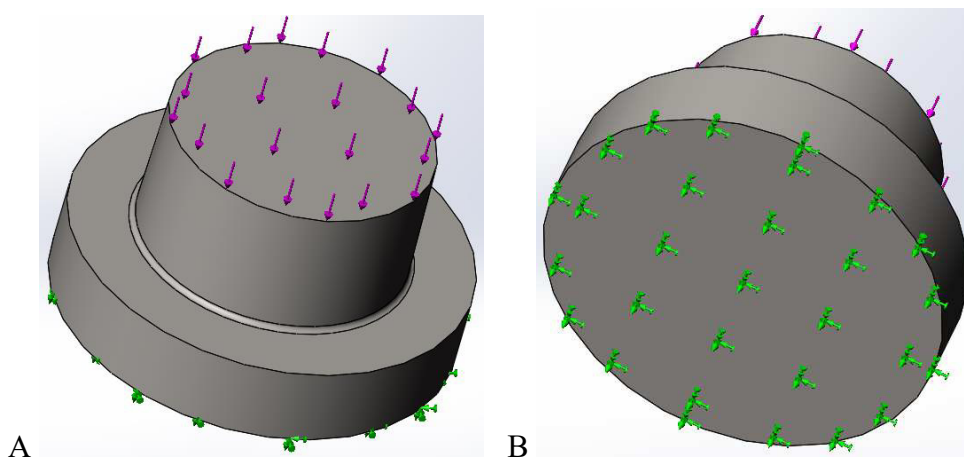
Fonte: Autor

4.2.2.1 Estudo de convergência de malha para a Base do molde cilíndrico

Tanto a base como o pistão sofreriam apenas cargas normais. Não teriam fadiga, pois, a carga é de compressão, além do número de ciclos ser muito pequeno, e os corpos não possuíam esbeltez o bastante para apresentar risco de flambagem.

Foi aplicada uma carga de 100.000N (10 ton) na face superior da base, e a face inferior foi fixada, como mostram a Figura 32:

Figura 32- Mostra o local de aplicação da força (A) e da fixação (B) na Base do molde cilíndrico



Fonte: Autor

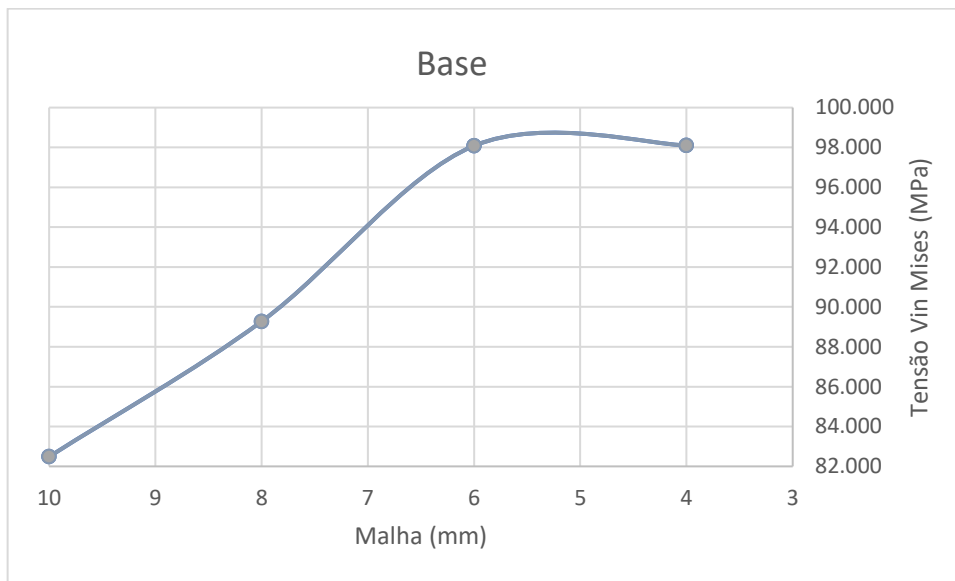
Em seguida foram realizadas simulações estáticas com diferentes malhas. A que teve melhor resultado foram as **simulações lineares** feitas com **malha hexaédrica**. Os resultados são mostrados na Tabela 4 e Gráfico 3:

Tabela 4 - Resultados da tensão de von mises para a peça Base do molde cilíndrico

Base	
Malha (mm)	Tensão Von Mises (MPa)
10	82.486
8	89.271
6	98.083
4	98.107

Fonte: Autor

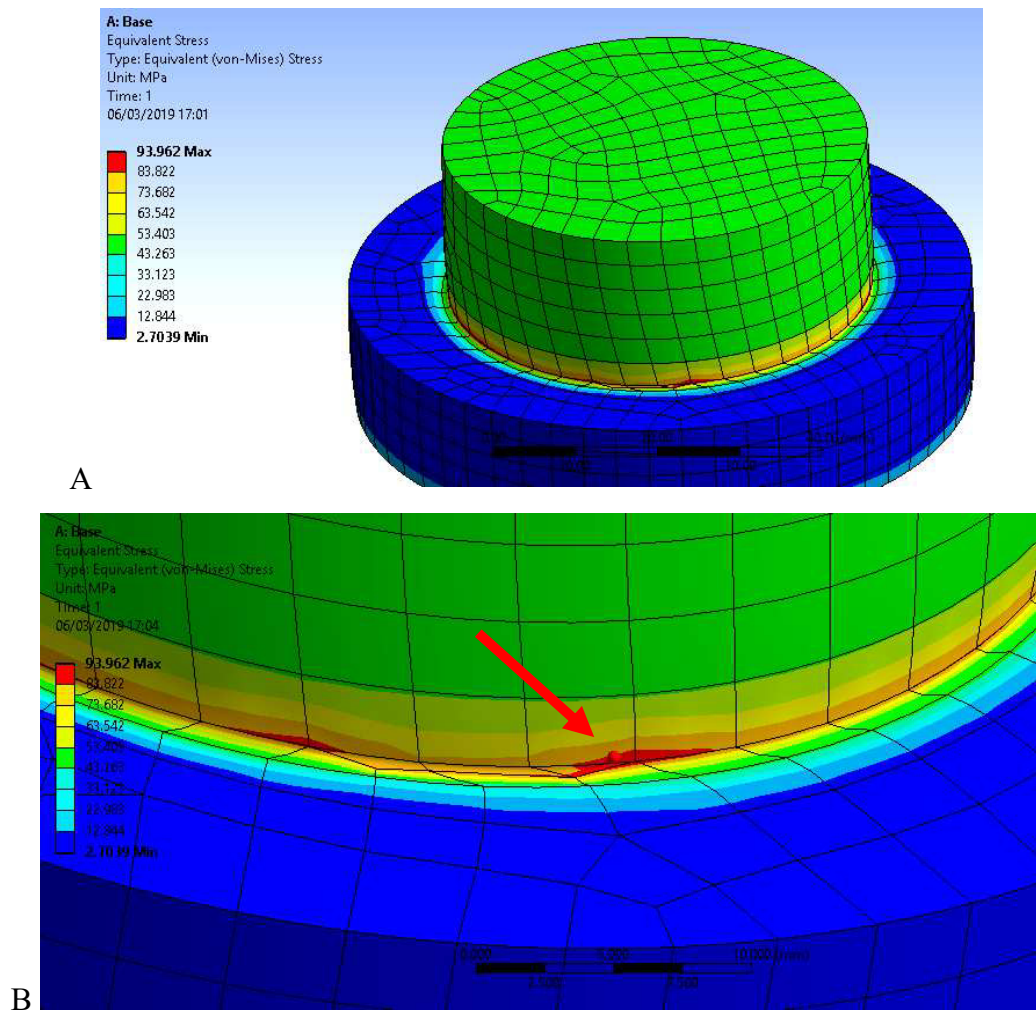
Gráfico 3 - Tensão de von mises x malha para a peça Base do molde cilíndrico



Fonte: Autor

Os valores de von mises convergiram em torno de 6 a 4mm, então no cálculo do fator de segurança será usado o valor encontrado na malha de 4mm. Considerando a tensão de von mises de 98.107 MPa encontrada na malha de 4mm, temos uma **margem de segurança para carregamento estático de 2.4565**. A Figura 33 mostra a análise estática da peça:

Figura 33 - Análise estática na peça Base do molde cilíndrico p/ malha de 4mm (A e B com indicação da região com concentração de tensão (seta vermelha))

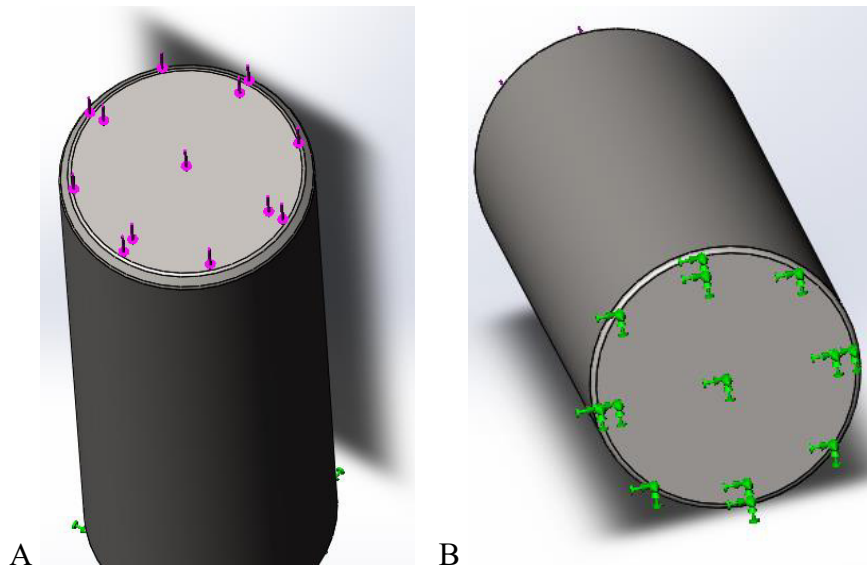


Fonte: Autor

4.2.2.2 Estudo de convergência de malha para o Pistão do molde cilíndrico

Foi aplicada uma carga de 100.000 N (10 ton) na face superior do pistão e a face inferior fixada, como mostra na Figura 34:

Figura 34- Mostra o local de aplicação de força (A) e fixação (B) da peça Pistão do molde cilíndrico



Fonte: Autor

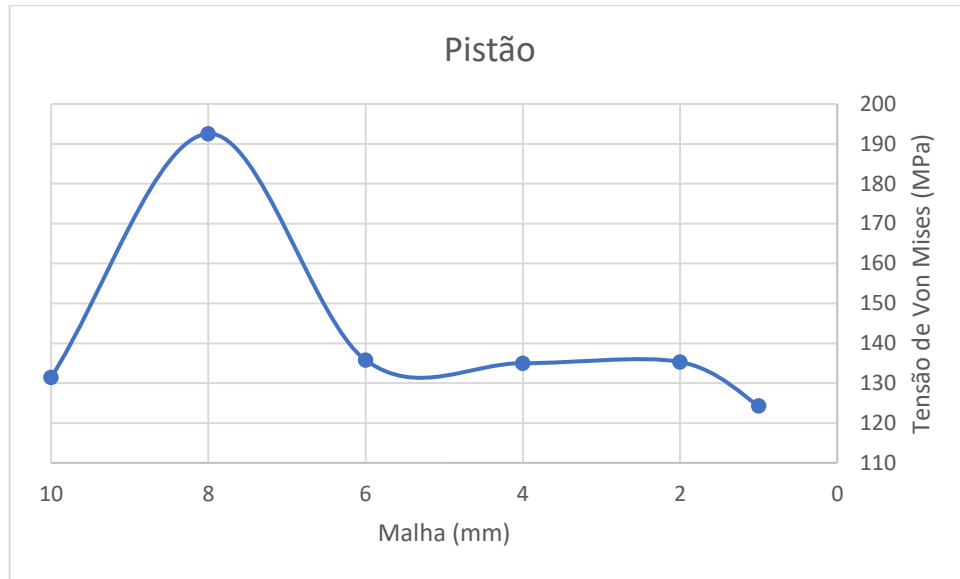
Para a **simulação linear estática** a malha com a melhor convergência foi a **malha tetraédrica**. Em seguida foi realizado um estudo de convergência de malha, mostrado na Tabela 5 e Gráfico 4:

Tabela 5 - Resultados da tensão de von mises para a peça Pistão do molde cilíndrico

Pistão	
Malha (mm)	Tensão Von Mises (MPa)
10	131,44
8	192,56
6	135,78
4	135,01
2	135,31
1	124,29

Fonte: Autor

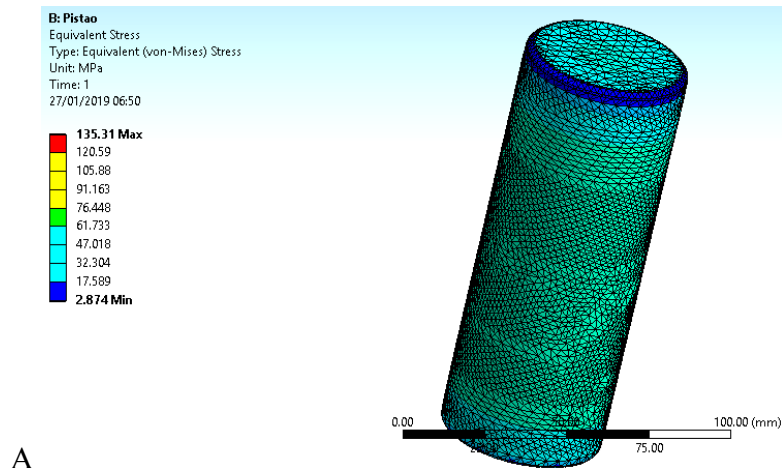
Gráfico 4 - Tensão de von mises x malha para a peça Pistão do molde cilíndrico

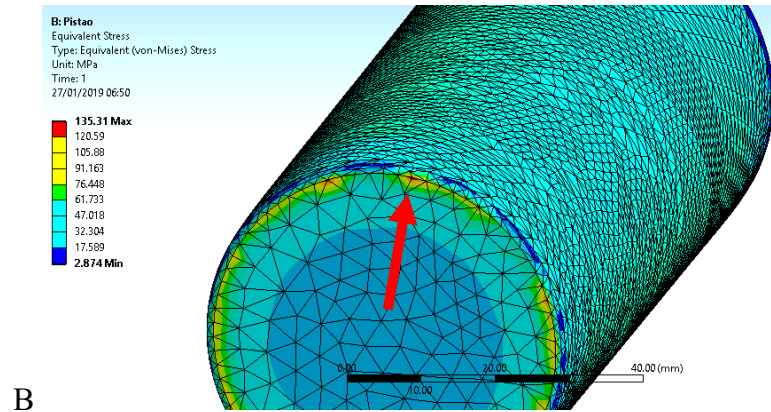


Fonte: Autor

A partir da malha de 6mm os valores começam a se estabilizar. Considerando a tensão de von mises de 135,31 MPa na malha de 2mm, o **fator de segurança para carregamento estático é de 1,7811**. A Figura 35 mostram a análise estática na peça:

Figura 35- Simulação estática da peça Pistão do molde cilíndrico p/ uma malha de 2mm (A e B com indicação da região com concentração de tensão (seta vermelha))



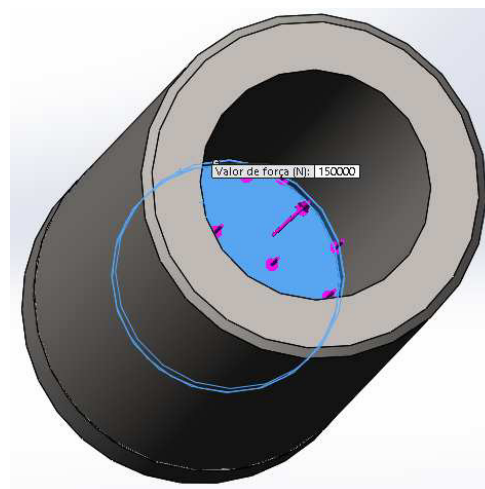


Fonte: Autor

4.2.2.3 Estudo de convergência de malha para o Tubo do molde cilíndrico

Quando o Pistão pressionasse o briquete, essa carga seria transferida para a face superior da Base e para uma área lateral na parede interna do tubo, como mostra a Figura 36:

Figura 36- Mostra as áreas do tubo e base que sofreriam carga durante a compactação do briquete



Fonte: Autor

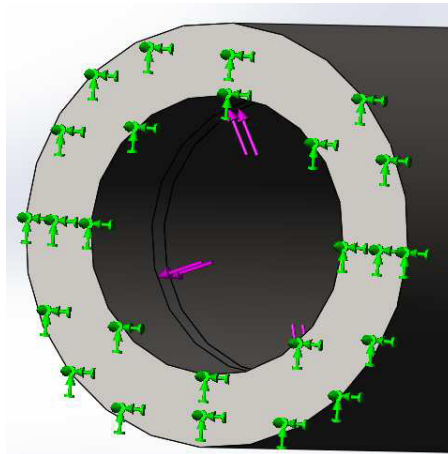
Desse modo o tubo sofreria tensões radiais na sua parede interna, como que fossem alargar o tubo. Consideraremos que os briquetes produzidos tem uma espessura mínima de 5mm, logo essa seria altura da área lateral afetada.

Para diminuir a carga que aplicaremos no tubo, vamos considerar que a força se distribui igualmente nessas áreas do Tubo e Base. Assim temos uma área circular com um diâmetro de 50mm (face superior da Base) e uma área lateral cilíndrica de altura de 5mm e

diâmetro de 50mm (na face cilíndrica interna do Tubo). Assim área lateral interna do tubo receberá cerca de 30% da força aplicada.

Desse modo foi aplicada uma carga de 30.000N (3 ton de força) numa secção interna cilíndrica de 5mm de altura, e distante 25mm do fundo do tubo, como mostra a Figura 37. A mesma figura também mostras a face inferior do tubo que foi fixada.

Figura 37- Mostra a área onde a força será aplicada e a área que será fixada



Fonte: Autor

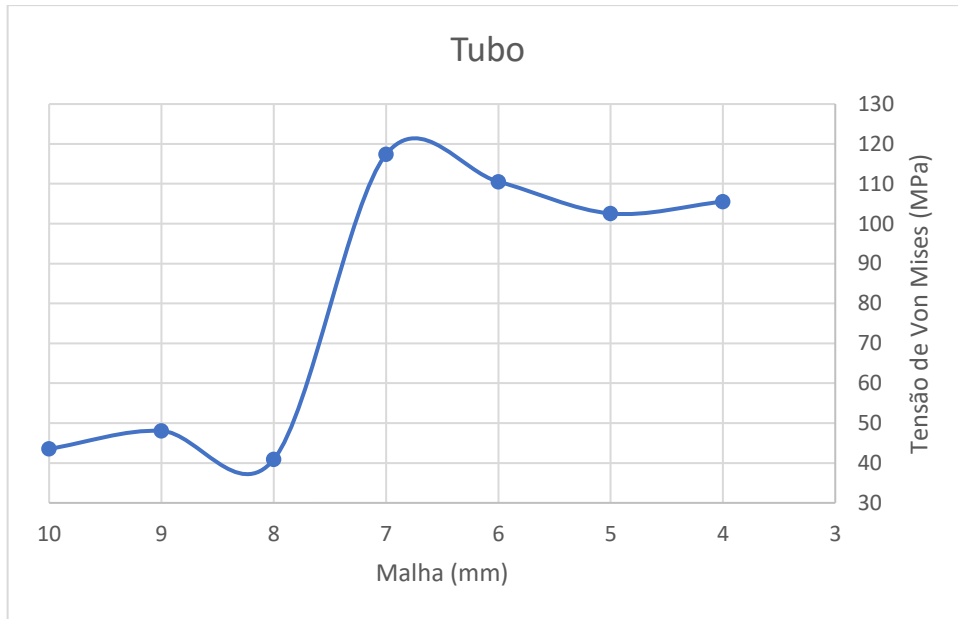
Foi então realizada uma **simulação linear** estática em **malha tetraédrica** com diferentes dimensões, e os resultados pode ser visto na Tabela 6 e Gráfico 5:

Tabela 6 - Resultados da tensão de von mises para a peça Tubo do molde cilíndrico

Tubo	
Malha (mm)	Tensão Von Mises (MPa)
10	43,545
9	48,057
8	40,908
7	117,39
6	110,54
5	102,56
4	105,54

Fonte: Autor

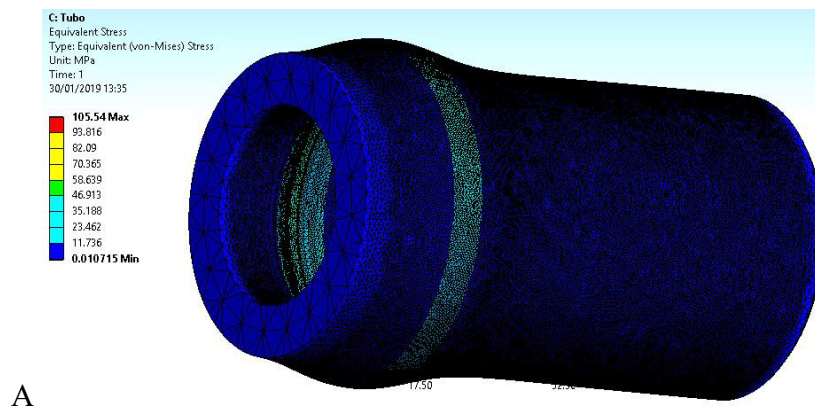
Gráfico 5 - Tensão de von mises x malha

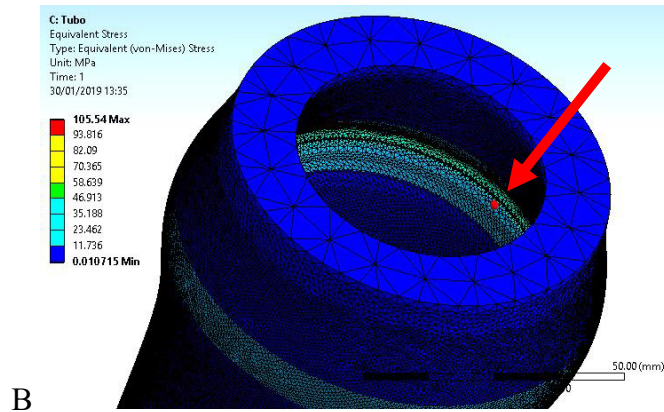


Fonte: Autor

Vemos que os valores começam a se estabilizar por volta de 6mm. Considerando a tensão de 105.54 MPa na malha de 4mm, o **fator de segurança para carregamento estático é de 2,2835**. A análise estática pode ser vista na Figura 38:

Figura 38- Peça Tubo do molde cilíndrico em simulação com malha de 4mm (A e B) com indicação da região com concentração de tensão (seta vermelha)





Fonte: Autor

4.2.2.4 Indicações de manutenção para o molde cilíndrico

Os principais cuidados durante a utilização seriam não aplicar mais do que 10 ton com a prensa hidráulica, e após cada uso limpar as peças com álcool e flanela para remover qualquer óleo que venham a contaminar outras amostras e partículas que possam se acumular entre as folgas e prender as peças.

O formato cilíndrico da peça também facilita sua manutenção, pois muitas das falhas podem ser resolvidas utilizando a própria prensa ou com o uso de um torno mecânico. Durante seu uso a peça necessitou de manutenções, mas todas foram simples de serem resolvidas. Temos na Tabela 7 o procedimento indicado para cada uma das falhas:

Tabela 7- Características das manutenções mais comuns do molde cilíndrico

Falha	Causa Provável	Procedimento de Manut.
- Peças não encaixam mais	- Carga excessiva - Quedas e pancadas nas peças	- Rotacionando a peça em um torno mecânico, usar um papel lixa para desbastar levemente os diâmetros das peças até que elas se encaixem novamente
- Peças travadas e não se separam	- Entrada de material nas frestas - Usar o tubo e pistão nos sentidos contrários - Pressionar o pistão no tubo além do necessário quando	- Não se deve martelar ou usar outros objetos duros que possam danificar a peça. - Fixe o tubo em algum apoio ou morsa. Posicione uma barra redonda de technyl ou nylon sobre peça interna travada, e martelando a barra de plástico na direção contrária ao movimento

	remover o briquete, no conjunto sem a base.	tente separar as peças. No caso da base emperrada isso resolve a maioria dos casos - Caso não solucione para o pistão, posicione-o na prensa de cabeça para baixo deixando as sapatas separadas com espaço para saída do pistão, e usando a barra de plástico como apoio pressione gradualmente o pistão até que se solte do tubo
--	---	--

Fonte: Autor

4.2.2.5 Estimativa de custo para o molde cilíndrico

Foi realizado uma estimativa do investimento necessário para o molde e a prensa hidráulica, considerando aquisição de equipamento, matéria prima, insumos e serviço de tornearia. Não foi incluído a questão de impostos sobre serviços e produtos, que pode variar dependendo da pessoa ou organização que realize as compras, além do estado brasileiro em que se encontra. Nas Tabelas 8 e 9 temos uma estimativa de custo para o molde feito em aço inox, e outra para um molde feito em aço SAE 1020 (pistão) e 1045 (tubo e base):

Tabela 8 - Estimativa de custo para o molde cilíndrico em aço inox

Molde Inox				
QTD		Fornecedor	Preço Unit (R\$)	Preço Total (R\$)
Material				
1	PRENSA MARCON 15TON	Fornecedor A	1190,00	1190,00
1	BARRA REDONDA AÇO INOX 304 Ø3"x180mm (Tubo e Base)	Fornecedor B	286,60	286,60
1	BARRA REDONDA AÇO INOX 304 Ø2"x110mm (Pistão)	Fornecedor B	70,00	70,00
Insumos				
0,05	BROCA Ø25,4mm	Fornecedor A	432,00	21,60
0,05	SERRA FITA 1"	Fornecedor C	220,00	11,00
7	PASTILHA SPMT 120408	Fornecedor D	42,00	294,00
Serviço de Tornearia (R\$20,00/h)				
	1h corte	Fornecedor G		20,00
	5 dias de usinagem	Fornecedor G		800,00
TOTAL				R\$ 2,693.20

Fonte: Autor

Tabela 9 - Estimativa de custo para o molde cilíndrico em aço 1020 e 1045

Molde Aço 1020 e 1045				
QTD		Fornecedor	Preço Unit (R\$)	Preço Total (R\$)
Material				
1	PRENSA MARCON 15TON	Fornecedor A	1.190,00	1190,00
1	BARRA REDONDA AÇO 1045 Ø3"x180mm (Tubo e Base)	Fornecedor E	84,40	84,40
1	BARRA REDONDA AÇO 1020 Ø2"x110mm (Pistão)	Fornecedor F	15,50	15,50
Insumos				
0.05	BROCA Ø25,4mm	Fornecedor A	432,00	21,60
0.05	SERRA FITA 1"	Fornecedor C	220,00	11,00
5	PASTILHA SPMT 120408	Fornecedor D	42,00	210,00
Serviço Tornearia (R\$20,00/h)				
	1h corte	Fornecedor G		20,00
	3 dias de usinagem	Fornecedor G		480,00
TOTAL				R\$ 2.032,50

Fonte: Autor

4.3 Análise Densidade e PCS x Pressão de briquetagem

4.3.1 Materiais e Métodos

Após a construção do equipamento, foi analisado como os fatores da compactação interferem na qualidade do briquete. As mudanças que podem modificar as características físicas e mecânicas do briquete são: pressão de compactação, teor de umidade, tamanho das partículas (granulometria) e temperatura (MITCHUAL; FRIMPONG-MENSAH; DARKWA, 2013). A umidade e granulometria dependiam mais do preparo da biomassa que do processo de briquetagem. A temperatura interna gerada na compactação seria complexa de aferir. Já a pressão pode ser obtida por meio da carga que a prensa hidráulica aplica no molde.

O efeito da pressão já costuma ser estudado em laboratório utilizando um conjunto de molde e êmbolo aliado a uma prensa hidráulica para verificar a eficiência dos ligantes naturais da matéria prima (DIAS *et al.*, 2012). Um estudo realizado com resíduos de papel e madeira por exemplo mostrou que nas pressões de 30 a 60 MPa os briquetes se quebravam facilmente, enquanto em pressões de 150 a 250 MPa o material era mais consistente e compacto, além de apresentar maior densidade (KERS *et al.*, 2010).

A característica energética mais importante nos briquetes é o seu poder calorífico. Já do ponto de vista logístico, uma das principais vantagens do briquete é a densidade do material, que também seria interessante analisar. Segundo VALE *et al.*, 2011 que analisa o potencial energético do pinhão manso, a briquetagem é uma alternativa para contornar a baixa densidade do combustível no caso do centro consumidor ser distante da produção da biomassa, pois facilita o transporte e a alimentação nas caldeiras, além de homogeneizar o material.

Desse modo foi avaliado como o poder calorífico superior e a densidade no briquete variam com a pressão aplicada. Foram testadas as cargas de 5 ton, 7,5 ton e 10 ton, os quais para o diâmetro do molde de Ø50mm representam respectivamente 12,7; 25,5 e 38,2 MPa de pressão.

Nos testes com diferentes materiais percebeu-se que briquetes de materiais fibrosos (como palha carnaúba, bagaço de cana e casca de coco) costumavam ter maior compactação e maior consistência que materiais não fibrosos (como casca de castanha de caju e casca de arroz). Por isso o material escolhido para realizar os testes foi o bagaço de cana de açúcar, pois numa análise inicial demonstrou ter muita sensibilidade a compactação.

Até mesmo em materiais que briquetados se desfaziam facilmente, como a casca de arroz, tornavam-se mais consistentes se briquetados em mistura com o bagaço de cana, como

se ele agisse como aglutinante. Muitos briquetes são produzidos utilizando apenas a lignina natural do material como aglutinante (SILVA *et al.*, 2015; MASULLO *et al.*, 2018), mas há trabalhos que citam aglutinantes naturais capazes de melhorar a consistência do briquete como folhas de neem ou nim trituradas (RAJASEENIVASAN *et al.*, 2016), bagaço de cana, palha e talo de carnaúba (SILVA, 2018), e estrume bovino e cladóceos (caule) de cactos esmagadas (SHUMA; MADYIRA, 2017).

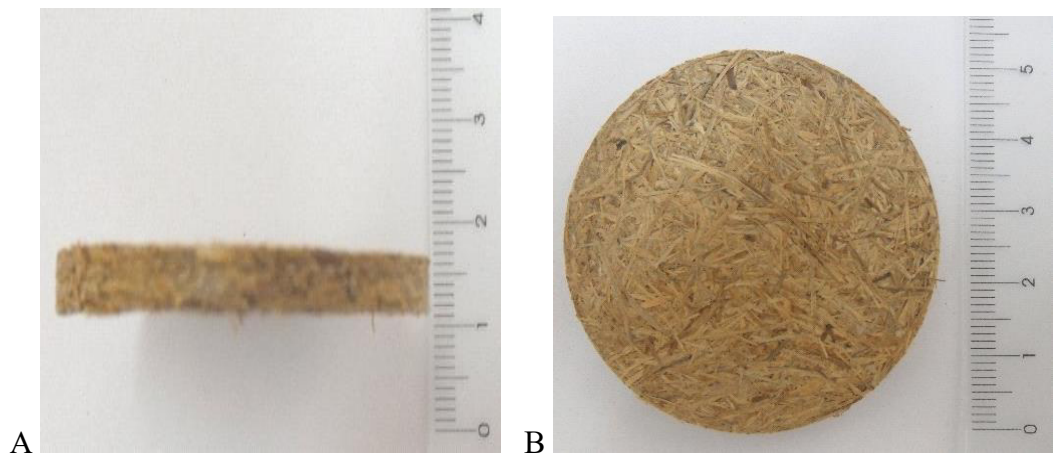
Para briquetar um material é necessário anteriormente determinar a granulometria e teor de umidade que será exigido (OHANA, 2012).

A granulometria influencia na resistência final do briquete, pois o tamanho de moagem correta produz uma quantidade suficiente de pó para preencher os vazios entre as partículas maiores, evitando que se desagreguem (OHANA, 2012). Utilizando peneiras de várias medidas foram produzidos briquetes com diferentes granulometrias. Na faixa de 10mm os briquetes não se aglomeravam bem, formando muitos espaços vazios e pontos onde o material não se unia, devido ao tamanho da matriz de apenas 50mm de diâmetro, pois a granulometria máxima do material utilizado depende do diâmetro da matriz do molde briquetador (FILIPPETTO, 2008). Ao diminuir a granulometria o briquete melhorava sua resistência, mas valores menores que 1mm acabavam se desfazendo facilmente, provavelmente devido ao molde não alcançar pressões maiores que 40 MPa. Uma menor granulometria requer maior pressão, pois é necessário alcançar maiores temperaturas (FILIPPETTO, 2008), de modo que toda a lignina presente na biomassa diminua sua viscosidade e envolva as partículas, funcionando como um aglomerante natural. Desse modo, foi escolhida a granulometria de 1mm.

O bagaço de cana foi cedido por uma indústria de aguardentes localizada no estado do Ceará. A umidade inicial da biomassa era de 51,251%. O material foi triturado, em seguida peneirado em malha de 1mm. Depois era levado a uma estufa de bancada da marca De Leo a 105°C, onde o material foi aquecido entre 3 a 5 minutos até atingir umidades de 8 a 12%.

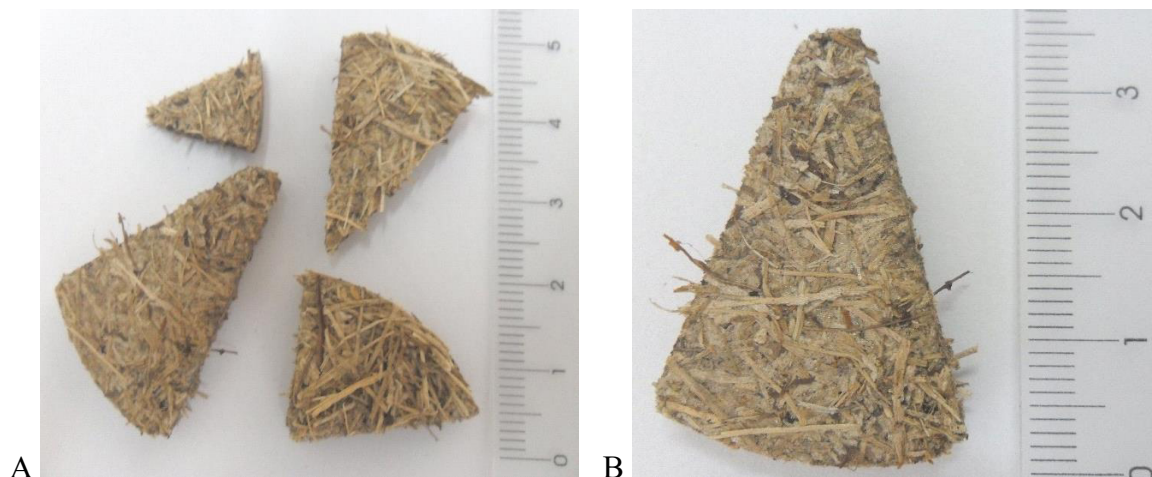
Para o PCS, produzia-se briquetes com cerca de 5g de cana de açúcar, como mostrado na Figura 39, e com o uso de uma guilhotina de mesa era partido em pedaços com cerca de 1g como mostra a Figura 40. As amostras eram pesadas numa balança analítica marte AY220 e analisadas com uma bomba calorimétrica IKA C-200 (DIN EN14918/2014).

Figura 39 - Briquete de cana de açúcar 1mm – 7.5 ton (38,2 MPa). Amostra com cerca de 5g para teste de PCS (A e B)



Fonte: Autor

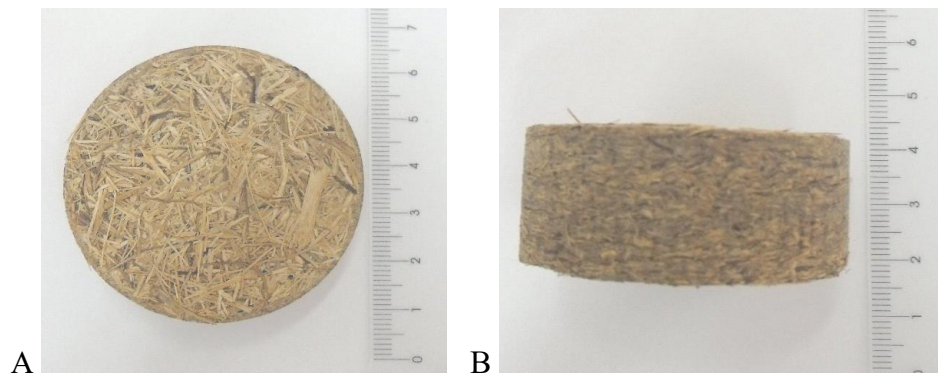
Figura 40 - Briquete de cana de açúcar 1mm – 7,5 ton (38,2 MPa), cortado em pedaços de 1g para teste de PCS (A e B)



Fonte: Autor

Para o teste de densidade foram pesadas amostras com cerca de 30g em uma balança analítica, e foram briquetadas com o molde de aço inox. Depois o briquete era pesado em uma balança analítica e sua altura e diâmetro eram medidos com um paquímetro de 0,05mm de precisão. Fazendo a razão de sua massa sobre o volume do cilindro era obtida uma densidade aparente para o briquete. A Figura 41 mostra os briquetes utilizados no teste de densidade:

Figura 41 - Briquete de cana de açúcar 1mm – 7,5 ton (38,2 MPa). Amostra com cerca de 30g utilizada para teste de densidade aparente (A e B)

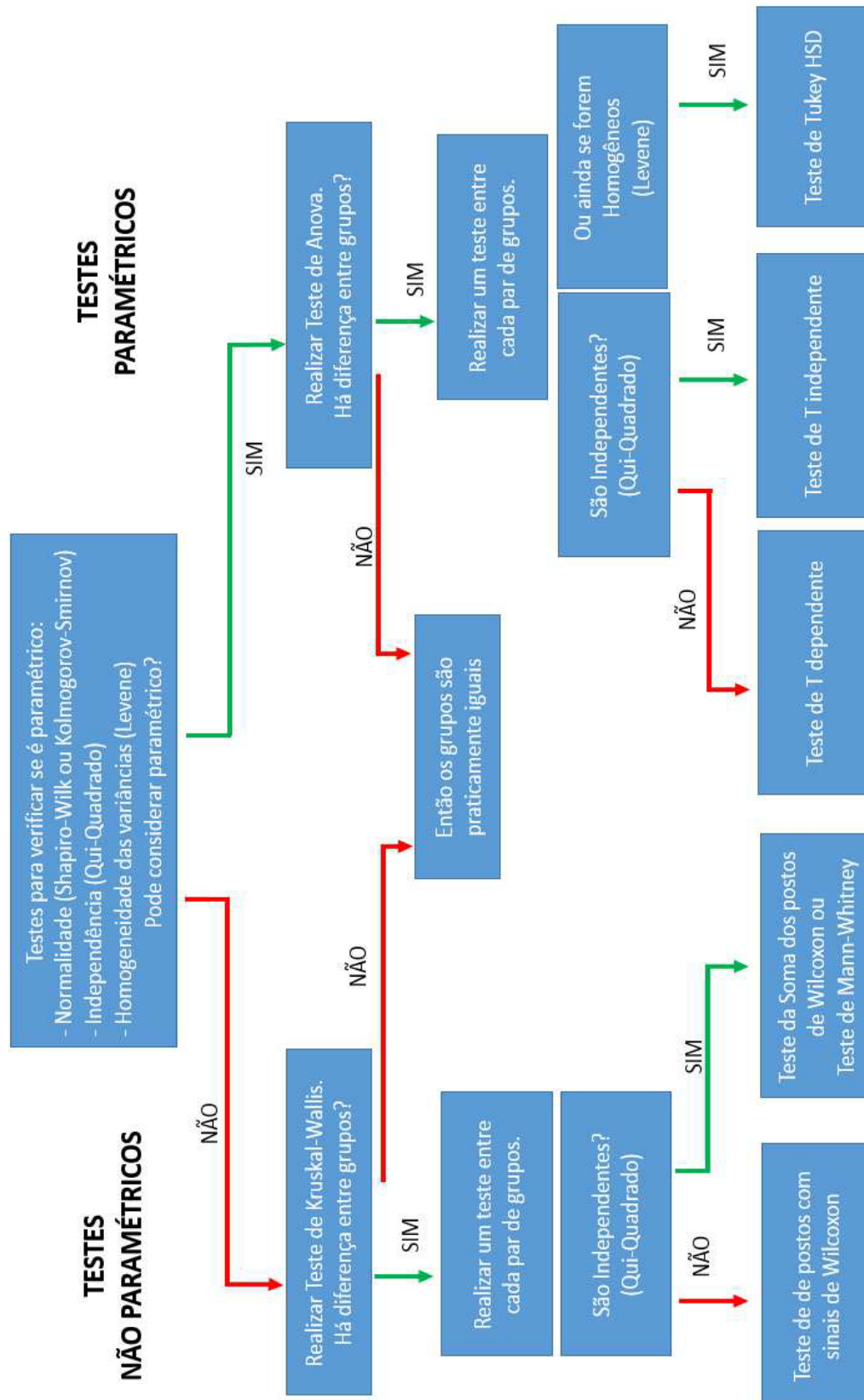


Fonte: Autor

Para o PCS foram feitos cinco testes em cada uma das três faixas de pressão, totalizando 15 amostras, e para a densidade foram três testes em cada pressão, totalizando 9 amostras.

Nos testes realizados nesse trabalho, o principal objetivo da análise estatística foi encontrar diferenças significativas entre grupos de amostras. Na Figura 42 está apresentado o fluxograma com o procedimento utilizado:

Figura 42 - Fluxograma com as etapas para analisar se um ou mais grupos de amostras são estatisticamente diferentes



4.3.2 Resultados e Discussão

Calculando a média e desvio padrão das amostras, obtemos os seguintes dados para o PCS na Tabela 10 e densidade aparente na Tabela 11:

Tabela 10 - Resultados de média e desvio padrão amostral para o teste de PCS

Briquetes de Cana de açúcar 1mm – PCS (MJ/kg)			
Média e desvio padrão amostral	2,5 ton - 12,7 MPa	5 ton - 25,5 MPa	7,5 ton - 38,2 MPa
	15,757 ± 0,056	15,908 ± 0,118	15,962 ± 0,127

Tabela 11 - Resultados de média e desvio padrão amostral para a densidade aparente

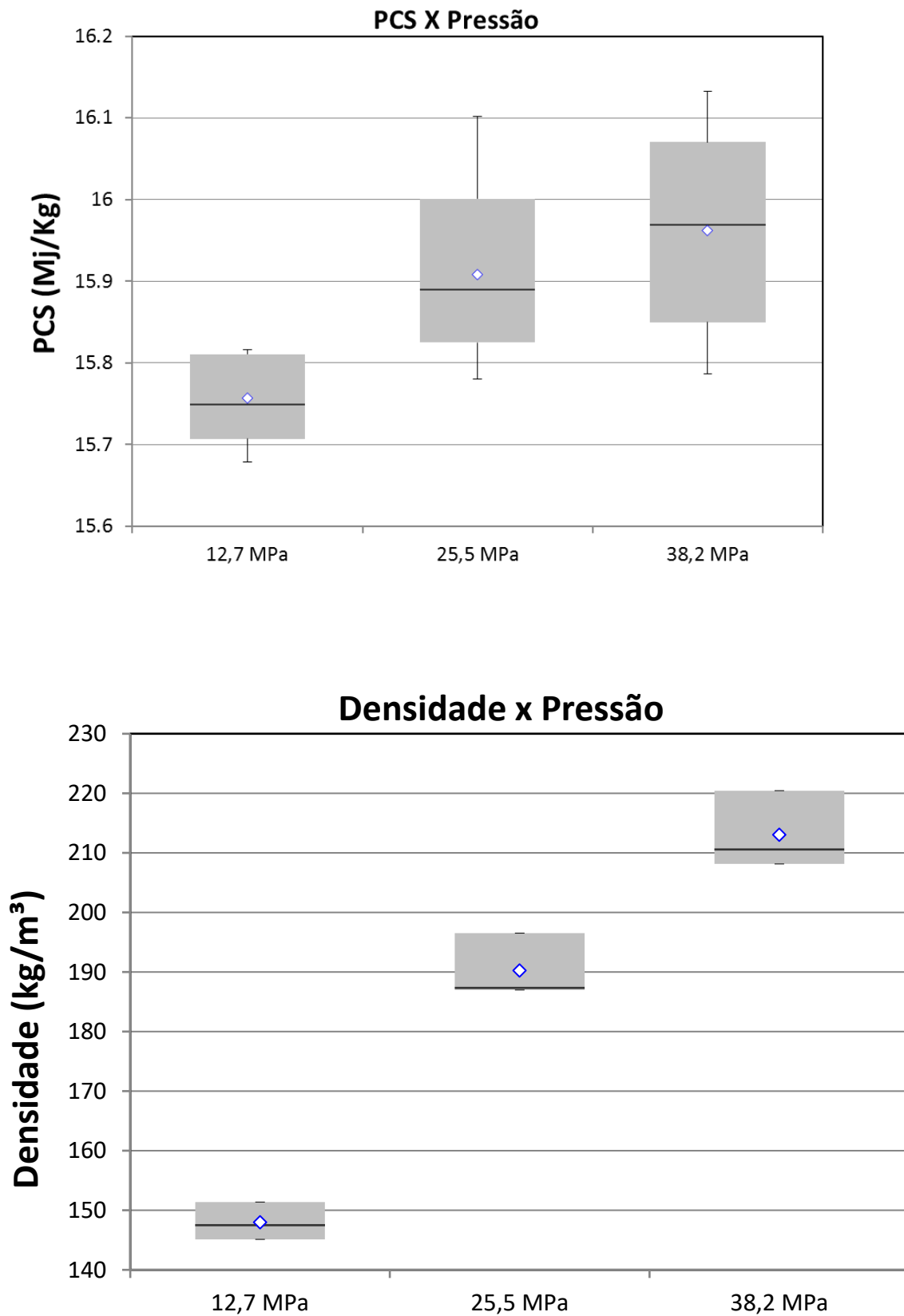
Briquetes de Cana de açúcar 1mm – Densidade Aparente (kg/m ³)			
Média e desvio padrão amostral	2,5 ton - 12,7 MPa	5 ton - 25,5 MPa	7,5 ton - 38,2 MPa
	148,0004 ± 3,1630	190,2810 ± 5,4128	213,0537 ± 6,5160

Fonte: Autor

Uma das vantagens da compactação é o aumento da densidade em relação ao material in natura. Segundo RAJASEENIVASAN *et al.*, 2016 a densidade esperada para palhas e gramíneas in natura é de 150 a 200 kg/m³, e MASULLO *et al.*, 2018 obteve uma densidade a granel para o bagaço de cana de 160 kg/m³, e após briquetagem de 780 kg/m³. Foi um valor bem acima do obtido nesse trabalho, pois o estudo utilizou pressões de compactação de cerca de 125 MPa e granulometria mesh de 40 (0,425mm), mostrando uma relação entre a granulometria e pressão de compactação com a densidade final do briquete. Como comparação com este estudo, na pressão de 38,2MPa e granulometria de 1mm, a densidade foi de 213 kg/m³.

Também foram gerados os gráficos de boxplot abaixo para os dados de PCS e densidade em cada faixa de pressão:

Gráfico 6 - Box plot (mediana e quartis) para PCS *versus* pressão aplicada (A) e densidade *versus* pressão aplicada (B)



Fonte: Autor

Inicialmente para comparar os grupos deve ser verificado se obedecem às condições para um teste paramétrico.

4.3.2.1 Condições para executar o Anova – PCS e Densidade

Para os grupos de poder calorífico de 12,7, 25.5 e 38.2 MPa foram verificados se possuíam distribuição normal (Teste de Shapiro-Wilk e Kolmogorov – Smirnov), se eram independentes (Teste de Qui-Quadrado de Pearson) e se eram homogêneos, ou seja, de variância semelhante (Teste de Levene). Os testes deste trabalho foram realizados utilizando os programas estatísticos SPSS e BioEstat. Temos as Tabelas 12 a 14 com as significâncias de cada teste e a conclusão para cada um:

Tabela 12 - Análise de Normalidade para os dados de PCS

Grupos PCS	Shapiro Wilk – Sig.	Kolmogorov-Smirnov Sig.	Conclusão
7,5 ton - 38,2 MPa	,655	,200	É normal
5 ton - 25,5 MPa	,294	,083	É normal
2,5 ton - 12,7 MPa	,988	,200	É normal

Tabela 13 - Análise de Independência para os dados de PCS

Grupos	Qui-Quadrado Pearson Sig.	Conclusão
2,5/5,0/7,5 ton	,363	É independente

Tabela 14- Análise de Homogeneidade para os dados de PCS

Grupos	Levene Sig.	Conclusão
2,5/5,0/7,5 ton	,536	É homogêneo

Fonte: Autor

Como conclusão para os valores de PCS, os três grupos tem distribuição normal, tem variâncias semelhantes e são dados independentes entre si.

Em seguida executa-se a mesma análise para os grupos de valores da densidade. A única diferença é que devido ao tamanho dos grupos ser menor (apenas uma triplicata em cada

grupo), só poderá ser executado o teste de Shapiro-Wilk para a normalidade. Temos as Tabelas 15 a 17 com as análises e conclusões:

Tabela 15 - Análise de Normalidade para os dados de densidade

Grupos Densidade	Shapiro Wilk – Sig.	Conclusão
7,5 ton - 38,2 MPa	,739	É normal
5 ton - 25,5 MPa	,062	É normal
2,5 ton - 12,7 MPa	,358	É normal

Tabela 16 - Análise de Independência para os dados de densidade

Grupos Densidade	Qui-Quadrado Pearson Sig.	Conclusão
2,5/5,0/7,5 ton	,324	É independente

Tabela 17 - Análise de Homogeneidade para os dados de densidade

Grupos Densidade	Levene Sig.	Conclusão
2,5/5,0/7,5 ton	,304	É homogêneo

Fonte: Autor

Como conclusão para os dados de densidade, os três grupos são normais, tem mesma variância e são independentes entre si. Logo, como foi explicado na revisão bibliográfica, tendo atendido aos três requisitos de um teste paramétrico, o teste de Anova pode ser aplicado (VIEIRA, 2006).

4.3.2.2 Teste de Anova – PCS e Densidade

Em seguida é aplicado o teste de Anova para os grupos de valores do PCS e densidade. Nas Tabelas 18 e 19 temos as significâncias calculadas:

Tabela 18 - Análise de Variância para os dados de PCS

Grupos PCS	Anova Sig.	Conclusão
2,5/5,0/7,5 ton	,025	Há diferença

Tabela 19 - Análise de Variância para os dados de densidade

Grupos Densidade	Anova Sig.	Conclusão
2,5/5,0/7,5 ton	<0,01	Há diferença

Fonte: Autor

Tanto para os dados de PCS como de densidade a diferença foi significativa, então o passo seguinte é realizar um teste entre cada grupo para localizar entre quais grupos houve essa diferença.

4.3.2.3 Teste de Tukey – PCS e Densidade

Foi realizado o teste de Tukey HSD, comparando dois a dois cada um dos grupos. Na Tabela 20 temos os resultados para os grupos de PCS:

Tabela 20 - Análise de Tukey para os dados de PCS

Grupos PCS	Tukey HSD Sig.	Conclusão
2,5 ton – 5,0 ton	,097	Não há diferença
5,0 ton – 7,5 ton	,708	Não há diferença
7,5 ton – 2,5 ton	,024	Há diferença

Fonte: Autor

Apenas entre os intervalos 12,7 a 38.2 MPa houve uma melhora significativa de poder calorífico, que de acordo com a Tabela 10, foi uma diferença entre médias de 0,205 MJ/kg. Na Tabela 21 são analisados os dados para densidade:

Tabela 21 - Análise de Tukey para os dados de densidade aparente

Grupos Densidade	Tukey HSD Sig.	Conclusão
2,5 ton – 5,0 ton	<0,01	Há diferença
5,0 ton – 7,5 ton	0,004	Há diferença
7,5 ton – 2,5 ton	<0,01	Há diferença

Fonte: Autor

A densidade se mostrou altamente sensível a variação de pressão, entre todos os intervalos a diferença foi significativa. De acordo com a Tabela 11, entre 12,7 e 25,5 MPa houve uma diferença de médias de 42,2806 kg/m³, entre 25,5 e 38,2 MPa uma diferença de 22,7727 kg/m³, e entre 12,7 e 38,2 MPa uma diferença de 65,0533 kg/m³. Ou seja, entre 12,7 e 38,2 MPa houve um aumento de cerca de 44% na densidade.

Mesmo que haja pouca variação no PCS ao longo dos intervalos, uma grande mudança de densidade também gera uma significativa mudança na densidade energética, obtida pelo produto entre a densidade (kg/m³) e o poder calorífico superior (MJ/kg). Na Tabela 22 temos a densidade energética utilizando as médias para cada faixa de pressão:

Tabela 22 - Densidade energética para cada faixa de pressão

Faixas de Pressão	Densidade Energética (MJ/kg)
7,5 ton - 38,2 MPa	3400,721
5 ton - 25,5 MPa	3027,066
2,5 ton - 12,7 MPa	2332,012

Fonte: Autor

Com o aumento de 12,7 MPa até 38,2 MPa, a densidade energética aumentou pouco mais de 45%.

Assim mesmo com a melhora do PCS após um grande intervalo de pressão, as maiores vantagens da compactação para o briquetem de bagaço de cana a 1mm, no intervalo de pressão utilizado, foram na questão do aumento da densidade, e por consequência na densidade energética.

4.4 Resíduos Orgânicos com potencial para briquetagem

4.4.1 Materiais e Métodos

Foram realizados testes com diferentes materiais ao longo das pesquisas, como bagaço de cana, casca de arroz e casca de castanha de caju. Então era interessante verificar quais dos materiais analisados apresentava melhor qualidade para briquetagem. Já foram realizados trabalhos semelhantes que analisaram resíduos como casca maracujá, de coco, de laranja, mandioca e de sabugo de milho (BARROS, 2012), ou ainda com restos de papel e papelão (BARROS, 2013).

A preferência foi por resíduos de agricultura produzidos na região cearense que ainda não tivessem significativa aplicação para geração de energia, ou que no cenário atual ainda fossem pouco pesquisados.

A casca de arroz já possui estudos para sua utilização na construção civil (ZUCCO, 1999), como isolante térmico (NAVROSKI *et al.*, 2010), e para queima em olarias (FERNANDES; C, 2014), mas desde 1990 tem aumentado seu uso nas termelétricas brasileiras. Das 2924 usinas existentes em 2017, doze já utilizavam casca de arroz como fonte de energia (CAVALCANTI, 2017). Entretanto há muitos locais do mundo onde esse material ainda não é aproveitado. No estudo de ARÉVALO; QUISPE; RAYMUNDO, 2017 sobre as indústrias de arroz do Peru, há um acúmulo de 9 ton de cascas por dia, e por não serem aproveitadas, muitas delas acabam sendo queimadas e despejadas nos rios, gerando problemas respiratórios nas populações de regiões como Sán Martin.

Outro material estudado foi a casca de alho, que é utilizada principalmente como adubo, e a palha de milho, utilizada para artesanato.

O bagaço de cana de açúcar foi utilizado em mistura aos outros materiais, pois nos testes realizados, mostrou-se que adicionava mais resistência ao briquete. Em comparação, no estudo de MASULLO *et al.*, 2018 briquetes com blends de palha e bagaço de cana de açúcar foram submetidos a testes de friabilidade e se constatou que a natureza fibrosa do bagaço permitia maior compactação do briquete, de modo que maiores porcentagens de bagaço na mistura favoreciam a resistência do briquete. Além disso, adições de bagaço de cana e casca de algodão em parcelas de 10 a 25% podem diminuir os custos de briquetagem, suavizar a compactação, e por diminuírem o teor de sílica de certos materiais, diminui o atrito na briquetadeira aumentando sua vida útil (GENTIL, 2008).

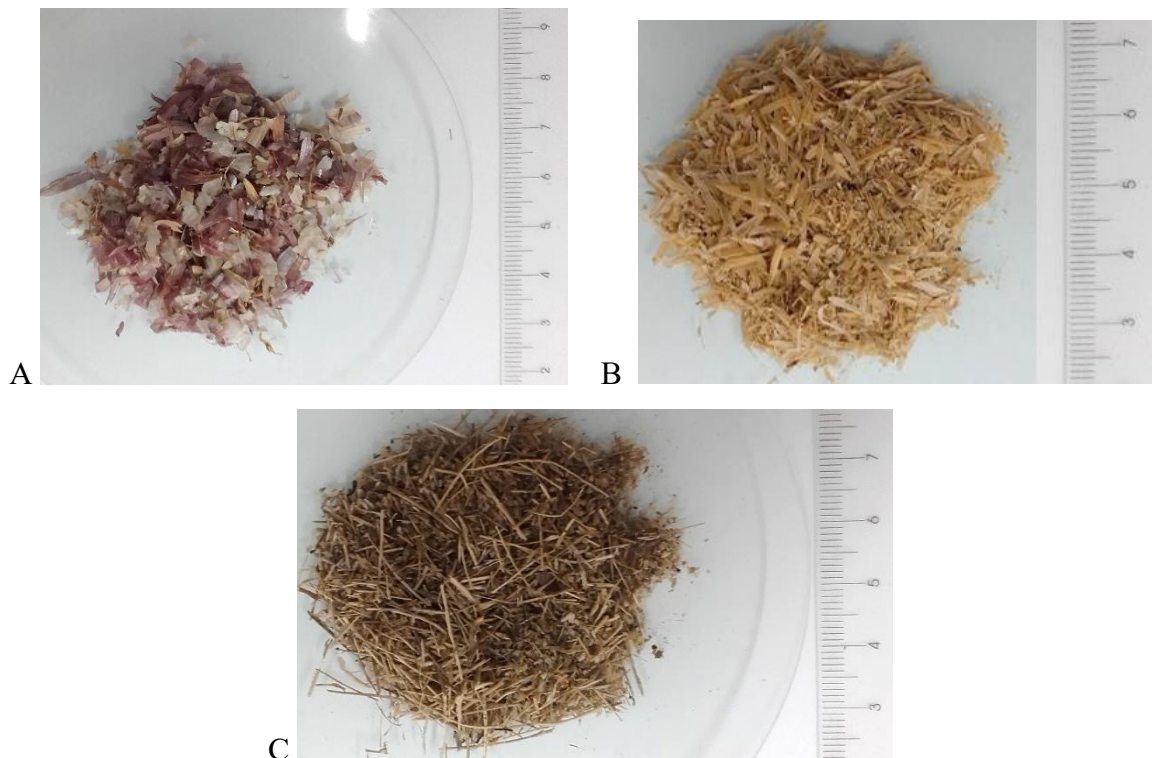
Os materiais escolhidos para análise foram: palha de milho, casca de arroz, casca de alho, e cana de açúcar (utilizada como blend).

A palha de milho não apresentou boa compactação, então não foram possíveis produzir briquetes desse material, como será mais explicado nos “Resultados e Discussão”, enquanto a casca de arroz por sua vez só foi possível de briquetar junto ao bagaço de cana.

O material foi triturado, seco em estufa da marca De Leo até a umidade entre 8 e 12%, depois as amostras foram pesadas numa balança analítica marte AY220. Os testes de umidade (ASTM 3173/2017) foram realizados na mesma estufa, os testes de cinzas (ASTM 3174/2018) e voláteis (ASTM 3175/2018) foram feitos num forno mufla Quimis modelo 0318M24, e os testes de PCS numa bomba calorimétrica ICA C-200 (DIN EN14918/2014).

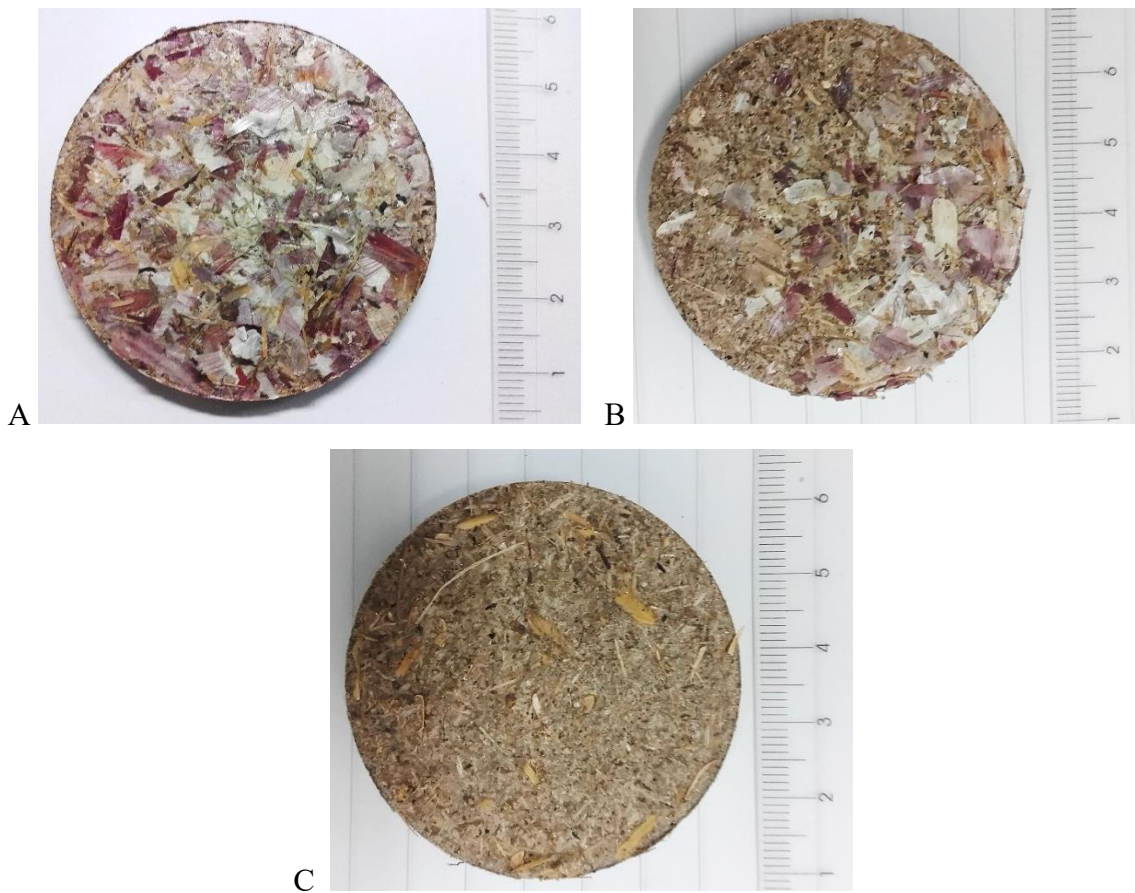
Foi realizado análise imediata (quintuplicata) e PCS (apenas um teste), nas amostras *in natura* e após a compactação para verificar se houve melhora na qualidade do material que compense sua briquetagem. Foram produzidos briquetes de casca de alho, casca de alho e bagaço de cana, e casca de arroz e bagaço de cana (blends na proporção de 50% e 50%), todos com a pressão de compactação de 25,5 MPa no molde (5 ton) utilizando o molde cilíndrico. Nas Figura 43 temos os materiais *in natura* e na Figura 44 os briquetes produzidos:

Figura 43 - Casca de alho *in natura* 4mm (A), Casca de Arroz *in natura* 1mm (B) e Bagaço de cana *in natura* 1mm (C)



Fonte: Autor

Figura 44 - Briquete de casca de alho, Briquete de alho/cana e Briquete de arroz/cana



Fonte: Autor

4.4.2 Resultados e Discussão

Como explicado anteriormente, a palha de milho não foi possível de briquetar, mesmo em mistura com bagaço de cana de açúcar. Além do material ser extremamente higroscópico, dificultando seu armazenamento, seus briquetes não se aglomeravam nem tinham consistência, mesmo em mistura com bagaço de cana, como pode ser visto na Figura 45. A casca de arroz por sua vez não foi possível de briquetar sozinha, apenas em mistura com bagaço de cana. Foram encontrados briquetes de palha de milho e casca de arroz produzidos no Brasil, então uma possibilidade é que a pressão máxima de cerca de 50 MPa (10 ton) atingida pelo molde não seja suficiente para aglomerar esses materiais.

Figura 45 - Briquete de palha de milho e bagaço de cana (A e B)



Fonte: Autor

Logo a análise seguirá com as outras biomassas. Fazendo a média e desvio padrão amostral para os dados dos três materiais *in natura* analisados obtemos a Tabela 23 com o resumo:

Tabela 23 - Para o material *in natura*, valores de média e desvio padrão amostral para umidade, voláteis e cinzas, e resultado do teste de carbono fixo e PCS

Material	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carb. Fixo (%)	PCS (MJ/kg)
Alho 4mm	11,377±0,496	70,275±1,283	7,837±0,213	10,511	13,6153
Casca de Arroz 1mm	10,227±0,948	59,456±1,141	16,713±0,127	13,553	14,3360
Cana de Açúcar 1mm	9,755±1,362	70,589±1,772	4,234±1,621	15,422	17,0760

Fonte: Autor

Na literatura foi encontrado para a casca de arroz valores de PCS de 16 MJ/kg, teor de cinzas em massa seca de 20% e umidade entre 8 e 12% (MUAZU; STEGEMANN, 2015). Comparando com o obtido nesta pesquisa, o valor de PCS de 14,3360 MJ/kg encontrado é 10,4% menor que o do artigo. O valor de umidade com os desvios de 10,227±0,948% se situa dentro do intervalo, e o valor de cinzas, calculando para base seca, já que os resultados da Tabela 23 estão em base úmida, seria de 17,067%. Logo os valores obtidos estão próximos do encontrado no artigo.

Também é calculado a média e desvio padrão amostral para os dados das três amostras de briquete na Tabela 24:

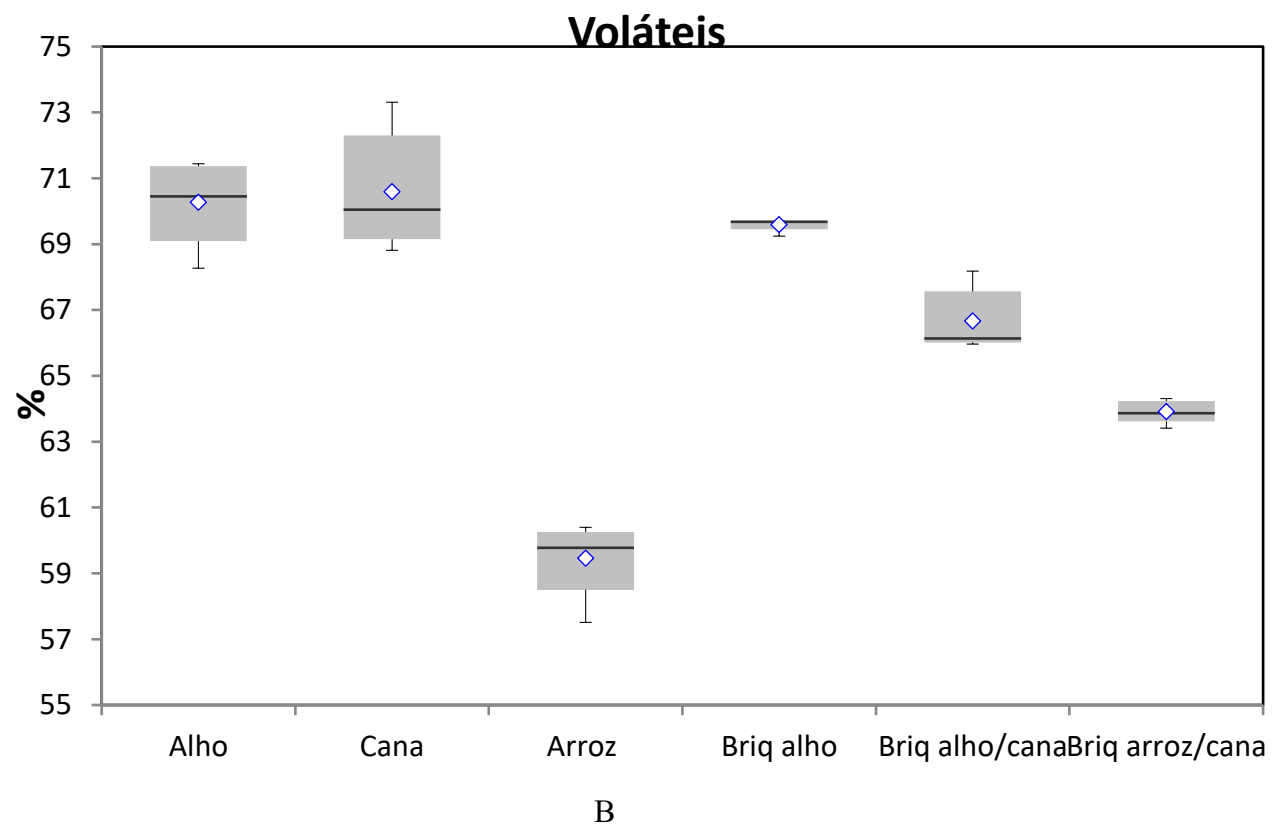
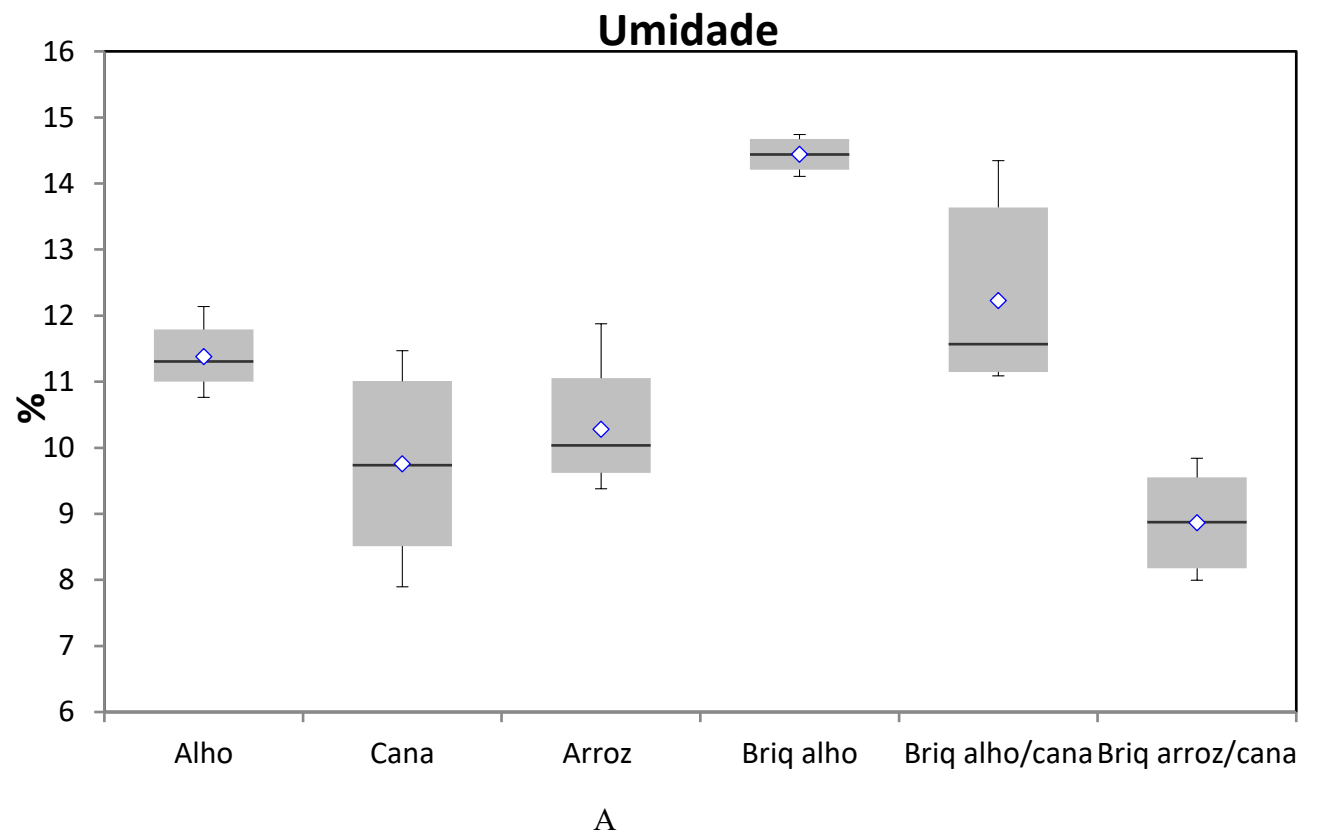
Tabela 24 - Para o material briquetado, valores de média e desvio padrão amostral para umidade, voláteis e cinzas, e resultado do teste de carbono fixo e PCS

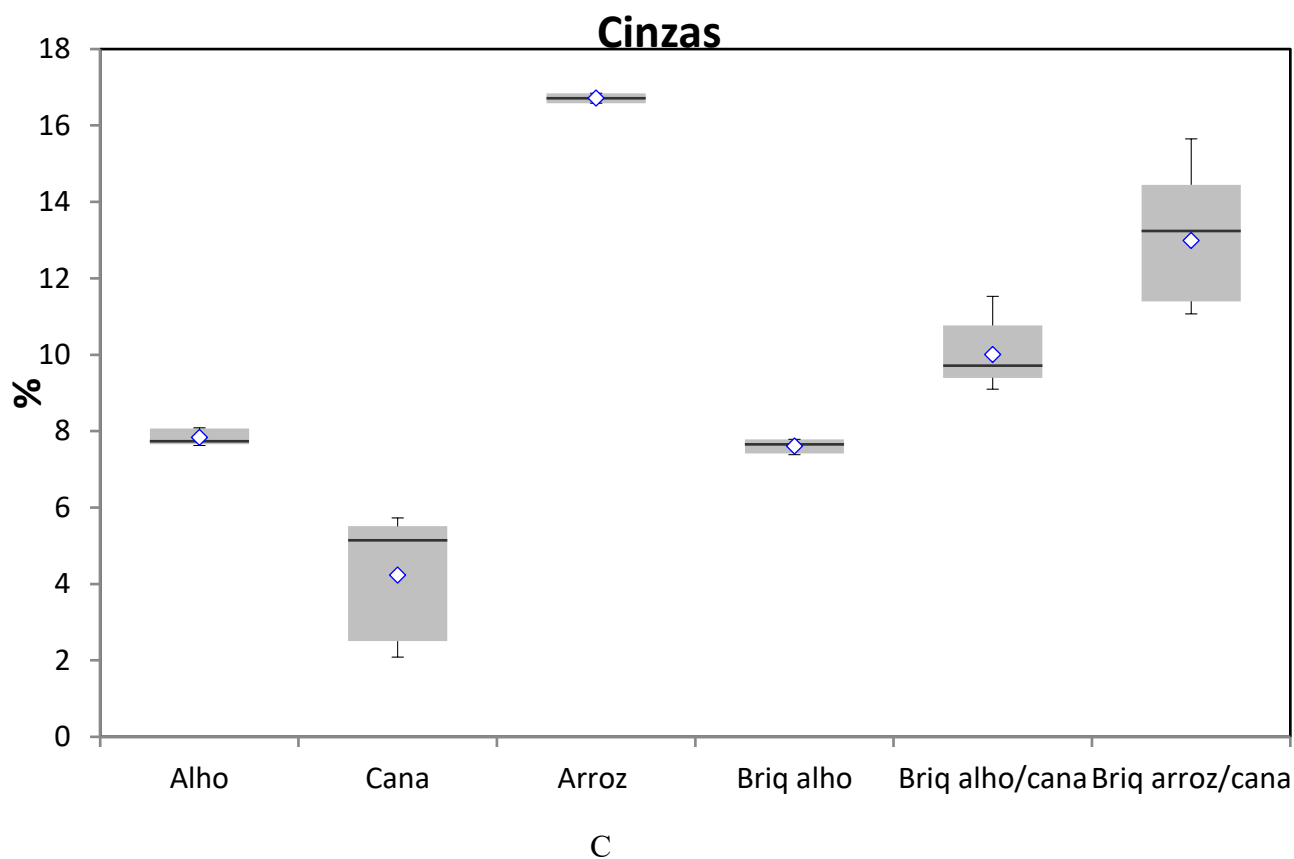
Material	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carb. Fixo (%)	PCS(MJ/kg)
Briq Alho	14.441±0.2466	69.591±0.1947	7.610±0.188	8.358	13.6864
Briq Alho-Cana	12.228±1.393	66.658±0.939	10.008±0.912	11.105	14.7188
Briq Arroz-Cana	8.865±0.729	63,911±0,345	12,986±1,766	14,238	15,0444

Como comparação da qualidade do briquete utilizaremos uma tese de 2008 que aponta que embora variem, em média os briquetes produzidos no Brasil possuem **umidade entre 8 e 10%, teor de voláteis de 81%, cinzas de 1,2%, carbono fixo de 18,8%**, e PCS de 4300 kcal/kg, que seria em torno de **18MJ/kg** (GENTIL, 2008). Todos os briquetes obtiveram teores de cinzas bem maiores que o relatado, o que pode ser devido a qualidade da biomassa obtida. Os valores de umidade do briquete de arroz/cana se situaram dentro do intervalo. Todos também obtiveram valores de voláteis, carbono fixo e PCS menores, com a ressalva de que a briquetadeira de laboratório utilizada alcança pressões na faixa de 50 MPa, enquanto uma na produção industrial as pressões podem chegar até 200 MPa (BOAS, 2011), então esses três fatores podem vir a serem maiores num processo de maior pressão e temperatura.

Por meio do Excel foram montados os gráficos boxplot para os resultados de umidade, cinzas e voláteis no Gráfico 7:

Gráfico 7 - Box plot (mediana e quartis) dos dados de umidade (A), voláteis (B) e cinzas (C)





Fonte: Autor

4.4.2.1 Condições para executar o Anova –Resíduos Orgânicos para Briquetagem

Os dados de umidades foram unidos e verificados pelos testes de teste normalidade (Teste de Shapiro-Wilk e Kolmogorov – Smirnov), independência (teste de Qui-Quadrado de Pearson) e homogeneidade (Teste de Levene), e do mesmo modo para cinzas e voláteis. Na Tabela 25 a 27 temos os testes com as respectivas significâncias e conclusões:

Tabela 25 - Análise de Normalidade para os dados da análise imediata

Grupos de Dados	Shapiro-Wilk Sig.	Kolmogorov-Smirnov Sig	Conclusão
Umidade	,077	,200	É normal
Voláteis	,031	,032	Não é normal
Cinzas	,040	,034	Não é normal

Fonte: Autor

Tabela 26 - Análise de Independência para os dados da análise imediata

Grupos de Dados	Teste de Qui-Quadrado Pearson Sig	Conclusão
Umidade	,371	É independente
Voláteis	,266	É independente
Cinzas	,371	É independente

Fonte: Autor

Tabela 27 - Análise de Homogeneidade para os dados da análise imediata

Grupos de Dados	Teste de Levene Sig.	Conclusão
Umidade	,057	É homogêneo
Voláteis	,036	Não é homogêneo
Cinzas	<0,01	Não é homogêneo

Fonte: Autor

Os dados para umidade atenderam os três requisitos, então será em seguida analisado pelo teste paramétrico de Anova.

Os dados de voláteis e cinzas não são normais nem homogêneos. Pelas considerações tomadas, apenas um resultado positivo já qualificaria os dados para um teste paramétrico. Mas o fato de os dados não serem normais pode afetar fortemente os resultados se for executado um teste paramétrico, logo esses dois fatores serão analisados por testes não paramétricos. Utilizaremos como alternativa não paramétrica ao Anova o teste de Teste de Kruskal-Wallis.

4.4.2.2 Teste de Anova e Kruskal-Wallis –Resíduos Orgânicos para Briquetagem

Em seguida é feito o teste de Anova e de Kruskal-Wallis para identificar as diferenças entre dois ou mais grupos. As Tabelas 28 e 29 mostram as significâncias obtidas:

Tabela 28 - Análise de Anova para os grupos de dados de umidade

Grupos	Teste de Anova Sig.	Conclusão
Umidade	<0,001	Há diferença

Fonte: Autor

Tabela 29 - Análise de Kruskal-Wallis para os grupos de dados de voláteis e cinzas

Grupos	Teste de Kruskal-Wallis	Conclusão
Voláteis	<0,001	Há diferença
Cinzas	<0,001	Há diferença

Fonte: Autor

Em todos os casos os testes foram altamente significativos, mas o que mais importa é entre quais grupos houve essa diferença, o que será obtido na parte seguinte ao realizar um teste de comparação de médias.

4.4.2.3 Teste de Tukey e de Mann-Whitney –Resíduos Orgânicos para Briquetagem

Nem todos os pares são interessantes de analisar, apenas os que tiverem algum material em comum. Logo os dados para os briquetes de alho por exemplo serão comparados apenas com o alho *in natura*, o briquete de alho/cana será comparado apenas com o alho e a cana *in natura*, e o briquete de arroz/cana será comparado apenas com o arroz e a cana *in natura*.

Para os dados de umidade será utilizado o teste de Tukey, que é um teste para dados paramétrico e homogêneos. Para os dados de voláteis e cinzas será utilizado o teste de Mann-Whitney, que é um teste não paramétrico para dados independentes. Temos nas Tabelas 30 e 31 os testes e as significâncias calculadas:

Tabela 30 - Testes de comparação de médias envolvendo o briquete de alho e de cana/alho

Grupos	Alho x Briq Alho	Alho x Briq Alho-Cana	Cana x Briq Alho Cana
Umidade	<0,001	0,726	0,005
Voláteis	0,1172	<0,01	<0,01
Cinzas	0,2506	<0,01	<0,01

Fonte: Autor

Tabela 31 - Testes de comparação de médias envolvendo o briquete de arroz/cana

Grupos	Arroz x Briq Arroz-Cana	Cana x Briq Arroz-Cana
Umidade	0,222	0,687
Voláteis	<0,01	<0,01
Cinzas	<0,01	<0,01

Fonte: Autor

4.4.2.4 Análise para o Briquete de Alho

Primeiramente será analisado o briquete de casca de alho contra a casca de alho *in natura*. O único fator que apresentou diferença após a briquetagem foi a umidade. Até pelo boxplot é possível perceber que os dados de voláteis e cinzas não se alteraram muito, e na umidade o briquete de alho teve uma umidade acima, com um aumento absoluto de 3,104%, o que não é uma mudança desejável.

Ainda analisando o carbono fixo, houve uma diminuição de 2,153% após a briquetagem. O único indicador que apresentou melhora foi o poder calorífico superior, que teve uma melhora de apenas 0,0711 MJ/kg.

Outro fator não muito favorável é a resistência do briquete. Mesmo tendo formado um material consistente, as camadas de casca não se aglomeraram entre si, o que dificultaria o manuseio, transporte e armazenagem, que são algumas das maiores vantagens do briquete (OHANA, 2012).

Levando em conta esses fatores o **briquete de casca de alho não mostrou vantagens significativas que justificassem seu uso para briquetagem.**

4.4.2.5 Análise Briquete de Alho/Cana

Em relação à casca de alho *in natura* os fatores que tiveram alteração significativa foram os voláteis e cinzas. A média do valor de voláteis teve uma diminuição de 3,617% e a média do valor de cinzas teve um aumento de 2,171%, o que não são mudanças desejáveis.

Com relação ao teor de carbono fixo houve um aumento de 0,594% e o poder PCS teve um aumento de 1,1035 MJ/kg. Foram alterações vantajosas, embora ainda pequenas.

Comparando-se com o bagaço de cana de açúcar *in natura*, umidade, voláteis e cinzas tiveram mudanças significativas. A umidade aumentou em 2,473%, os voláteis

diminuíram em 3,931%, e as cinzas aumentaram em 5,774%. Nenhuma dessas mudanças é desejável para um briquete de qualidade.

Outra coisa interessante para se atentar é que o esperado é que a média tanto das cinzas como dos voláteis do material briquetado pelo menos ficassem num valor intermediário entre a casca de alho e do bagaço de cana. Mas pelo contrário, enquanto as médias dos voláteis do alho e da cana eram respectivamente de 70,275% e 70,589%, o blend briquetado teve 66,658%. E enquanto as médias das cinzas para o alho e cana eram respectivamente 7,837% e 4,234%, para o blend briquetado esse valor subiu para 10,008%, maior que os dois valores iniciais. Isso indica de que algum modo a interação dessas biomassas durante a briquetagem diminuiu o teor de voláteis e aumentou o teor de cinzas, mudanças nada desejáveis para uma biomassa de qualidade.

O PCS teve uma queda de 2,3572 MJ/kg, mas já se esperava que o valor ficasse numa faixa intermediária entre o bagaço de cana de açúcar e a casca de alho.

Analisando a consistência do briquete, houve teve uma melhora em relação ao briquete apenas de casca de alho, não demonstrando fragilidade e tendo boa consistência na movimentação e manuseio. Provavelmente isso se deve as características fibrosas da cana de açúcar que foi adicionada.

Entretanto, analisando o conjunto de fatores, **a casca de alho mesmo em mistura com a cana de açúcar ainda não se mostrou um material promissor para briquetagem.**

4.4.2.6 Análise para o Briquete de Arroz/ Cana

Comparando-se com o bagaço de cana e com a casca de arroz, os fatores que tiveram diferença significativa foram voláteis e cinzas.

Com relação a casca de arroz a média dos voláteis teve um aumento de 4,455% e a média das cinzas teve uma diminuição de 3,723% após a briquetagem. O teor de carbono fixo teve um aumento de 0,685% e o PCS teve também um aumento de 0,7084%. Todas essas mudanças são positivas para a biomassa

Um dos problemas encontrados no uso de briquetes de casca de arroz é seu alto teor de cinzas. Esses alto teores podem causar maior corrosão e desgaste dos queimadores devido a abrasão (DIAS *et al.*, 2012), além de afetar negativamente o poder calorífico da biomassa (BARROS, 2013). Devido ao elevado teor dos cinzas dos briquetes de da casca de arroz, há relatos de entupimento de caldeira industriais e fogões doméstico, além do alto teor de sílica de suas cinzas causar um desgaste acelerado dos equipamentos (MUAZU; STEGEMANN, 2015).

Entretanto é relatado que materiais com menor teor de cinzas, como o sabugo de milho podem ser adicionados a casca de arroz para produzir briquetes com menores teores de cinzas (MUAZU; STEGEMANN, 2015). Desse modo, a mistura da casca de arroz com outros materiais de menor teor de cinzas, como o bagaço de cana, pode ajudar a reduzir esse valor. Comparando as Tabelas 23 e 24 o teor de cinzas da casca de arroz de 17% caiu para próximo de 13% no briquete de casca de arroz e bagaço de cana de açúcar.

Comparando com a o bagaço de cana, a média dos voláteis teve uma queda de 6,678%, e a média das cinzas teve um aumento de 8,752%. O teor de carbono fixo de teve uma queda de 1,184% e o PCS diminuiu em 2,0316%.

Num primeiro momento isso pode parecer que o briquete de arroz/cana teve uma piora em relação ao bagaço de cana. Mas se analisarmos com mais cuidado, todos esses valores ficaram numa posição intermediária entre as médias para o a casca de arroz e o bagaço de cana, o que já era esperado. Ainda mais se compararmos com as alterações que houveram no briquete de alho/cana, onde em alguns casos os valores ficaram maiores ou menores do o intervalo entre os dois materiais.

Além disso o briquete de arroz/cana teve consistência até melhor do que o de briquete de alho/cana.

Com todas essas considerações, **a casca de arroz mostrou-se um material promissor para a briquetagem**, desde que em mistura a outros materiais que deixem o briquete mais consistente e diminuam seu alto teor de cinzas.

5. CONCLUSÃO

Foi possível desenvolver um molde de briquetagem para escala de bancada de baixo custo, fácil uso e fabricação. Com algumas mudanças no modelo, mas mantendo a mesma geometria, seria possível obter pressões ainda maiores e briquetes de maior qualidade, ficando esta como uma sugestão de trabalho futuro.

Na avaliação do PCS e densidade dos briquetes *versus* pressão de compactação, dentro da faixa de até cerca de 40 MPa, o parâmetro mais sensível foi a densidade, evidenciando que algumas das maiores vantagens do briquete são manuseabilidade, transporte, armazenamento, e na densidade energética.

Resíduos agrícolas como a casca de alho, apesar de não apresentarem resultados significativos para a compactação, poderiam ser aproveitados para briquetagem em mistura com materiais de maior potencial energético. Desse modo se teria uma melhor destinação para esses resíduos que o descarte.

Dos resíduos orgânicos analisados o que apresentou maior potencial para a briquetagem foi a casca de arroz, quando misturado a outros materiais que atenuassem seu alto teor de cinzas.

REFERÊNCIAS

- ARÉVALO, J.; QUISPE, G.; RAYMUNDO, C. **Sustainable Energy Model for the production of biomass briquettes based on rice husk in low-income agricultural areas in Peru**. Energy Procedia, v. 141, p. 138–145, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217354322>>.
- ARORA, N.; VINAY, P. Application of Analysis of variance and Chi- square to study diamond industry. **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**, v. 4, n. 11, p. 1–6, 2014. Disponível em: <http://www.ijmer.com/papers/Vol4_Issue11/Version-4/A04011_04-0106.pdf>.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3172**: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. West Conshohocken, 2013.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3173**: Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, 2017.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3174**: Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. West Conshohocken, 2018.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3175**: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, 2019.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5865**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. West Conshohocken, 2013.
- AYRES, M.; AYRES, D. L.; SANTOS, A. A. S. **BioEstats - Aplicações Estatísticas nas Áreas de Ciências Bio-Médicas**, 2007. Disponível em: <<https://www.mamiraua.org.br/pt-br/downloads/programas/manual-do-bioestat/>>.
- Balanco Energético Nacional. Ano base 2017**. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 2 jan. 2019.
- Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese. Ano base 2017**. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 2 jan. 2019.
- BARROS, L. O. **Densidade Energética de Briquetes Produzidos a partir de Resíduos Agrícolas**, 2012. 37f. TCC (Graduação em Engenharia Florestal) -Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- BOAS, M. A. V. **Efeito Do Tratamento Térmico Da Madeira Para Produção De**

- Briquetes**, 2011. 65f. Dissertação (Pós Graduação em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- BARROS, V. C. C. **Briquetes produzidos com resíduos de poda urbana e embalagens cartonadas**, 2013. 44f. TCC (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CAVALCANTI, G. Casca de arroz vira eletricidade no Sul. **O Globo**, 6 jul. 2017. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/casca-de-arroz-vira-eletricidade-no-sul-21558928>>.
- DIAS, J. M. C. S., *et al.* Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **Embrapa Agroenergia**, 2012. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/952626/producao-de-briquetes-e-peletes-a-partir-de-residuos-agricolas-agroindustriais-e-florestais>>.
- FERNANDES, F. A. S.; C, ; BERGAMANN, C.P.; VALDÉS, S. J. Controle da Queima da Casca de Arroz: Otimização da Queima e Redução da Cinza Gerada. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 1785–1792, 2014.
- FIELD, A. **Descobrimo a Estatística usando o SPSS**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.
- FILHO, P. L. D. **Análise de Custos na Geração de Energia com Bagaço de Cana-de-Açúcar : um Estudo de Caso em Quatro Usinas de São Paulo**, 2009. 175f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, 2009.
- FILIPPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais : viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**, 2008. 61f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- GAYA, A.; GARLIPP, D. **Ciências do Movimento Humano: Introdução à metodologia da pesquisa**. Porto Alegre: Artmed, 2008.
- GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. 2008. Universidade de Brasília, Brasília, 2008. 156f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, 2008.
- KERS, J. *et al.* Determination of physical , mechanical and burning characteristics of polymeric waste material briquettes. **Estonian Journal of Engineering**, v. 16, n. 4, p. 307–316, 2010. Disponível em: <http://www.kirj.ee/18098/?tpl=1061&c_tpl=1064>.
- MASULLO, L. S. *et al.* Uso de Blendas Contendo Diferentes Proporções de Palha e Bagaço

de Cana-de-Açúcar para Produção de Briquete. *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 3, p. 641–654, 2018.

MITCHUAL, S. J.; FRIMPONG-MENSAH, K.; DARKWA, N. A. Effect of species, particle size and compacting pressure on relaxed density and compressive strength of fuel briquettes.

International Journal of Energy and Environmental Engineering, v. 4, n 30, p. 1–6, 2013.

MUAZU, R. I.; STEGEMANN, J. A. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. **Fuel Processing Technology**, v. 133, p. 137–145, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.022>>.

NAVROSKI, M. C. *et al.* Avaliação do isolamento térmico de três diferentes materiais usados na construção e preenchimento de paredes externas. **Ciência da Madeira**, v. 01, n. 01, p. 41–51, 2010.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OHANA, C. C. **Utilização dos resíduos do processamento de teca (*Tectona grandis* L.f.) na produção de briquetes**. 2012. 52f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índices de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – Laboratório de Produtos Florestais, Brasília, 1991 . Disponível em: <<http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/indice.pdf>>.

RAJASEENIVASAN, T. *et al.* An investigation on the performance of sawdust briquette blending with neem powder. *Alexandria Engineering Journal*, v. 55, n. 3, p. 2833–2838, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016816301818>

RODRIGUES, L. D. Uso de Briquetes Compostos para Produção de Energia no Estado do Pará. **Enc. Energ. Meio Rural** Ano 4, , 2002. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000200061&lng=en&nrm=iso>.

SALDANHA, L. **Análise linear e não linear com software de engenharia**. Disponível em: <<https://www.4ieng.com.br/single-post/Analise-linear-e-nao-linear-com-software-de-engenharia>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

SHUMA, R.; MADYIRA, D. M. Production of Loose Biomass Briquettes from Agricultural and Forestry Residues. *Procedia Manufacturing*, v. 7, p. 98–105, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916301895>>.

SILVA, C. A. **Estudo Técnico-Econômico da Compactação de Resíduos Madeiros**

- para fins Energéticos**, 2007, 68f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- SILVA, C. B. D. S. **Estudo da Amêndoa de Babaçu como Matéria-Prima para Produção de Biocombustíveis**. 2018, 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- SILVA, D. A. *et al.* Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Revista Floresta**, v. 45, n. 4, p. 713–722, 2015. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/download/39700/26929>>.
- SIMWIKI. What is a Mesh? Disponível em: <<https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/preprocessing/whatisamesh.html>>. Acesso em: 10 jun. 2019.
- SUPPORT_AUTODESK. **Como realizar um estudo de convergência de malha**. 2015. Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/simulation-mechanical/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/PTB/How-to-Perform-a-Mesh-Convergence-Study.html>>.
- TAVARES, J. M. R. S. **Introdução ao Método de Elementos Finitos**. 103f. Comunicação Interna - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998. Disponível em: <https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=41092>.
- TOMELERI, J. O. P. *et al.* Caracterização Química e Energética de Epicarpo Residual do Pinhão Manso (*Jatropha curcas L.*) e Briquete Produzido. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 3, p. 942–952, 2017.
- VALE, A. T. *et al.* Potencial Energético de Biomassa e Carvão Vegetal do Epicarpo e da Torta de Pinhão Manso (*Jatropha curcas*). **CERNE**, v. 17, n. 2, p. 267–273, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010477602011000200015&script=sci_abstract&tlng=pt>.
- VIEIRA, A. C. *et al.* Caracterização da Casca de Arroz para Geração de Energia. **Engenharia Rural**, v. 3, n. 1, p. 9–20, 2013. Disponível em: <<http://e-revista.unioeste.br/index.php/variascientiaagraria/article/view/6100/6147>>.
- VIEIRA, S. **Análise de variância: Anova**. São Paulo: Atlas, 2006.
- ZUCCO, L. L. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**, 1999. 118f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Construções Rurais) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

APÊNDICE

Figura A 1- Briquete de palha de milho e bagaço de cana (A e B)

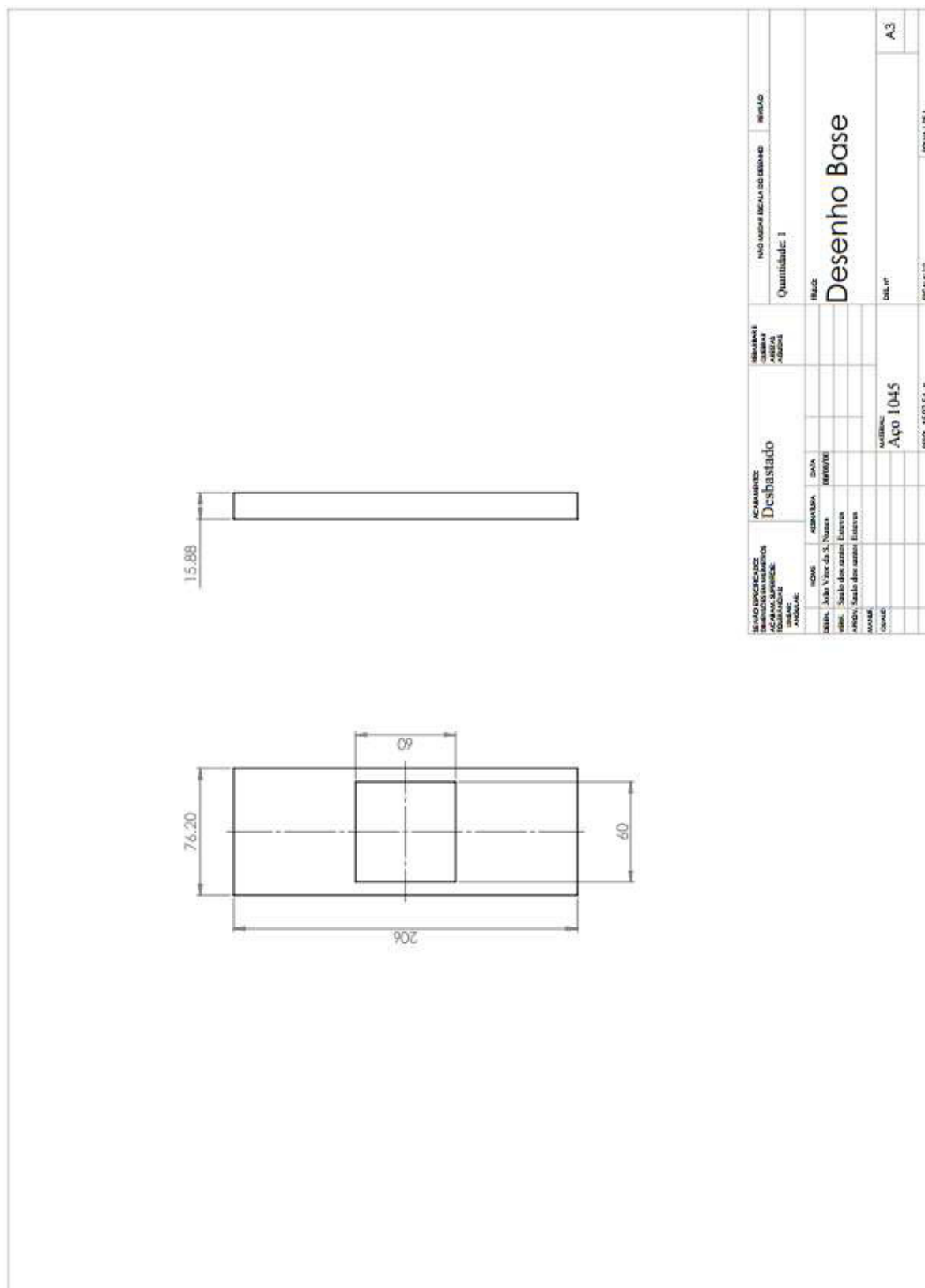


Figura A 2- Desenho da peça Encaixe de Baixo do molde caixa/gaveta

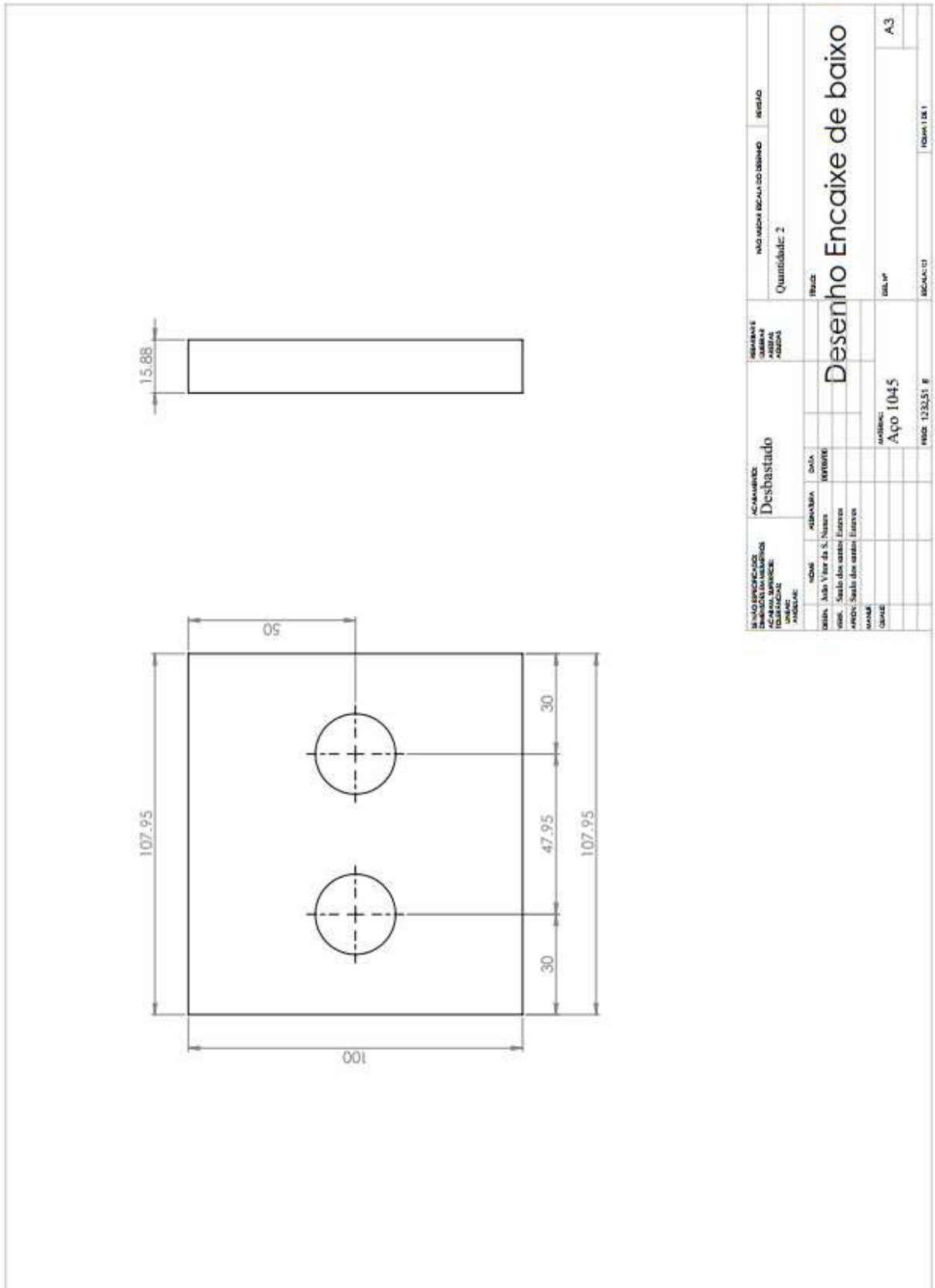


Figura A 3- Desenho da peça Gaveta do molde caixa/gaveta

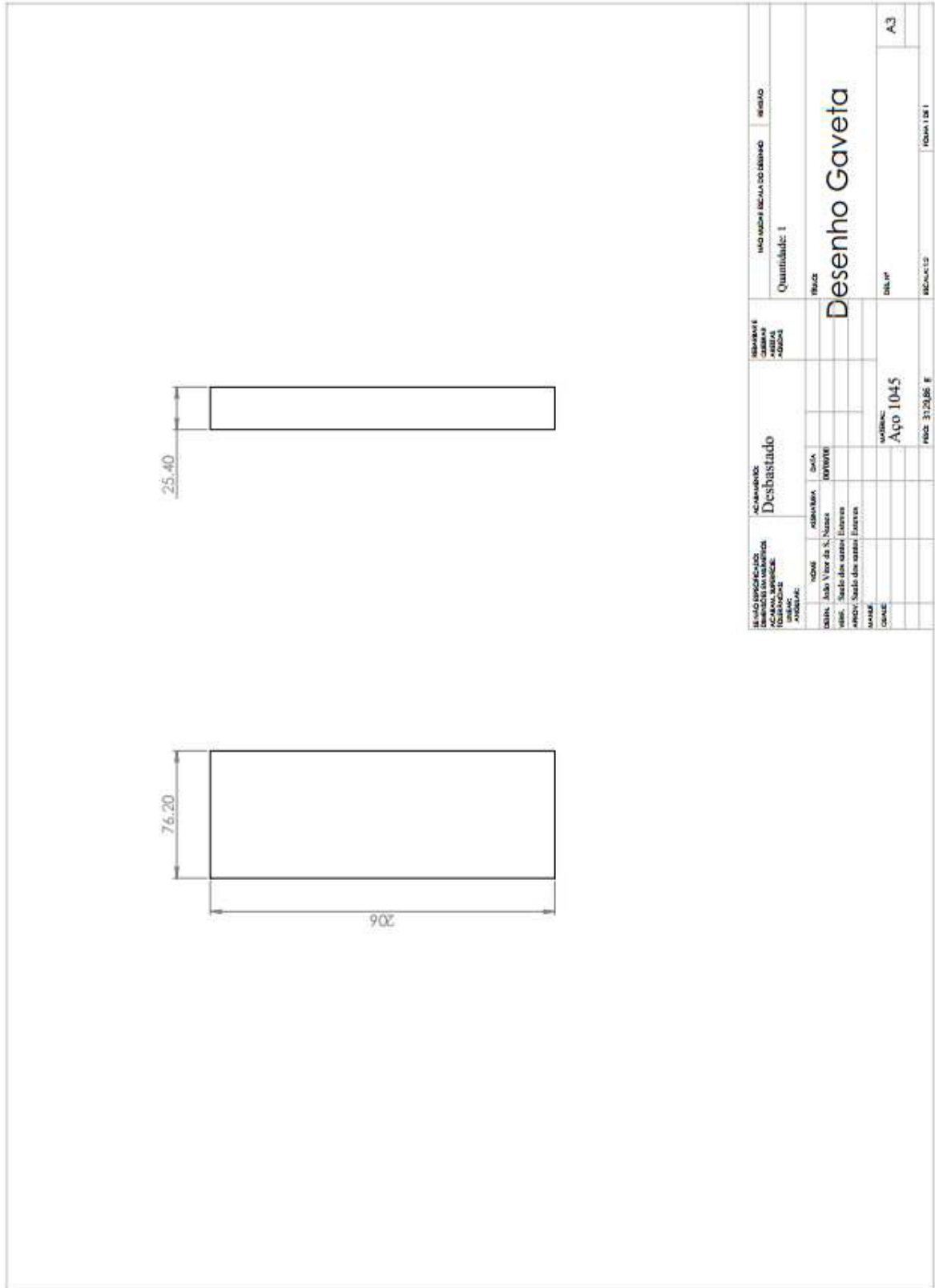


Figura A 5- Desenho da peça Topo (tubo 25mm de diâmetro) do molde caixa/gaveta

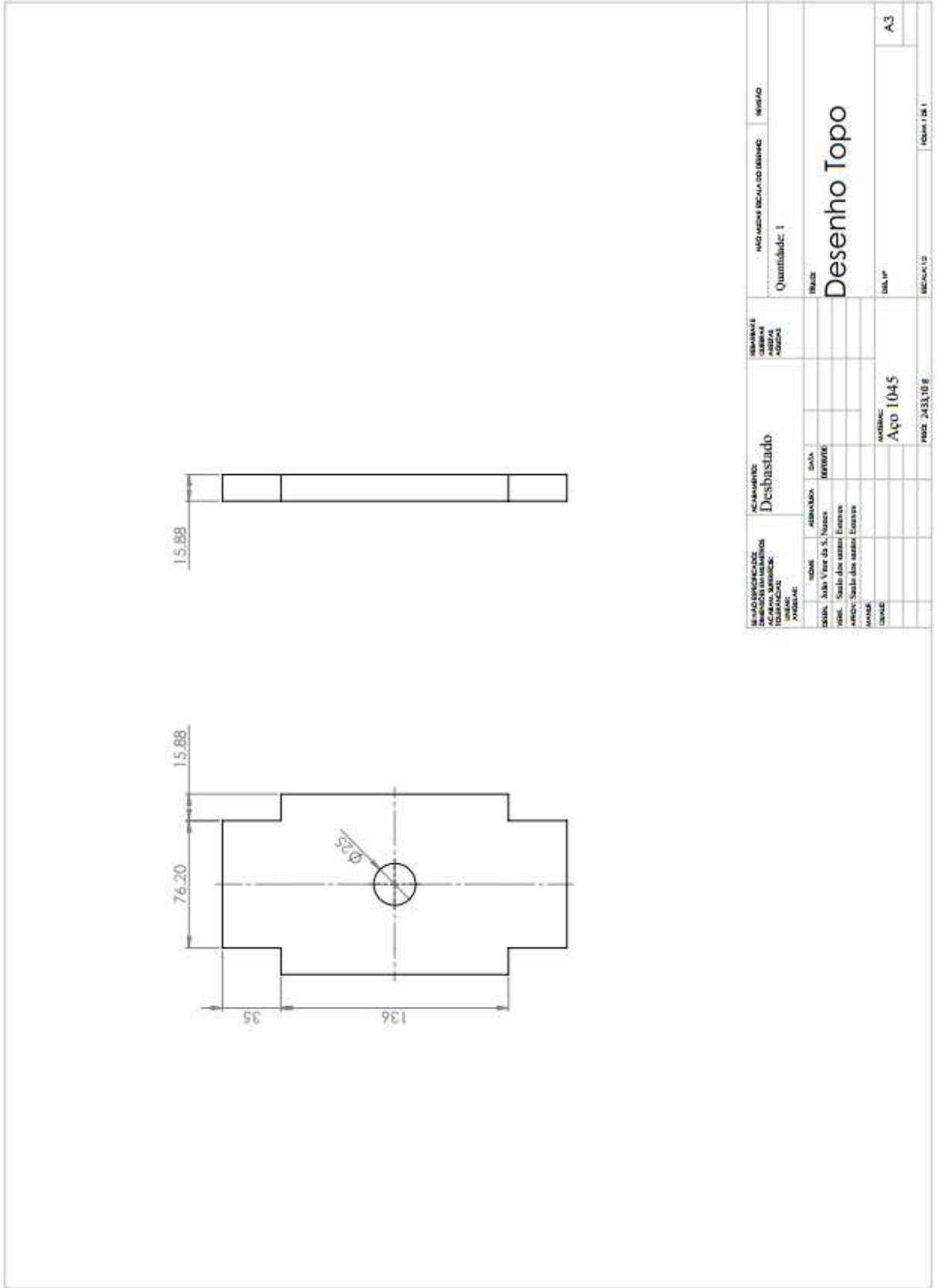
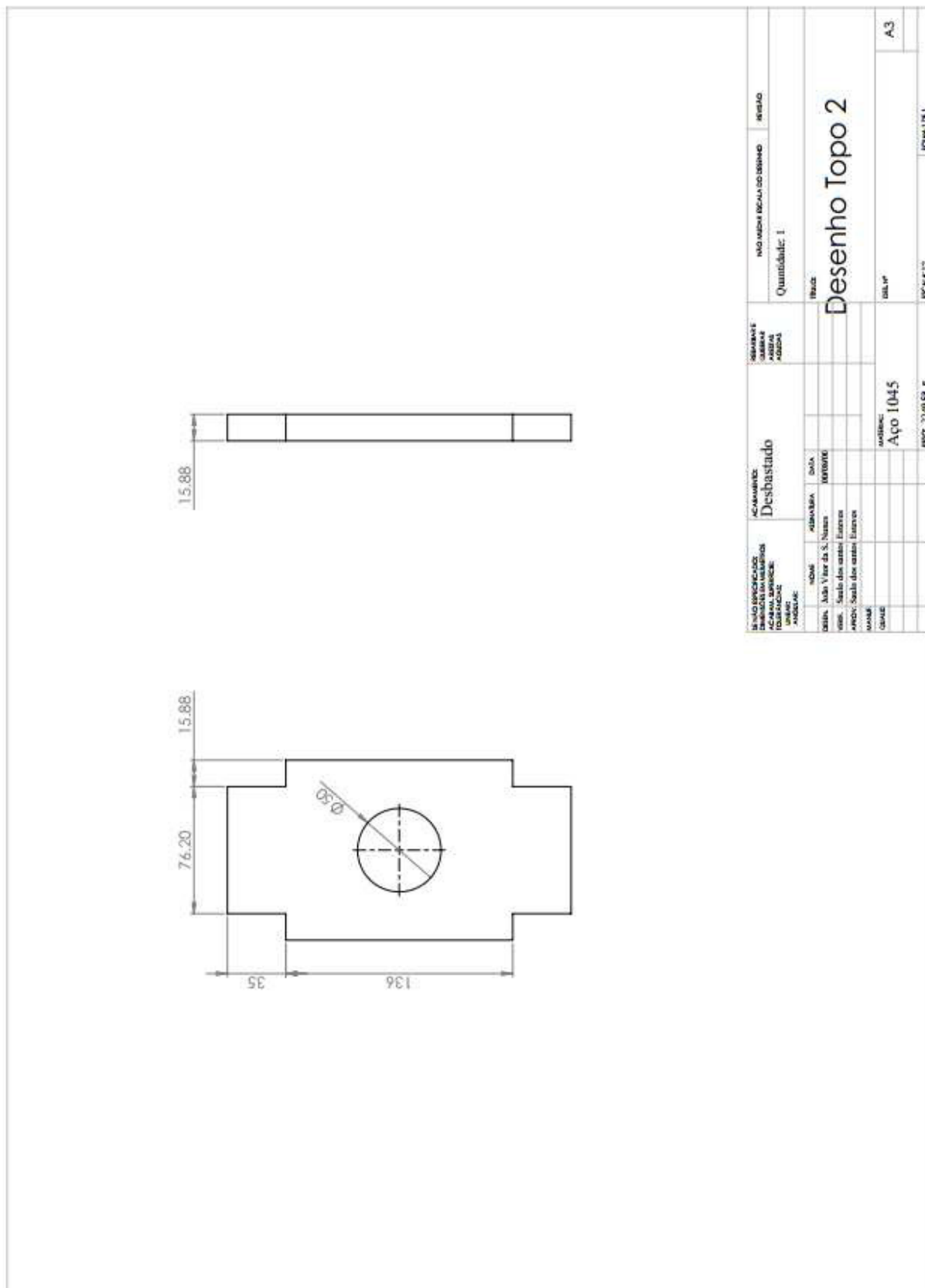


Figura A 6- Desenho da peça Topo 2 (tubo de 50mm de diâmetro) do molde caixa/gaveta



APÊNDICE B

Tabela B 1 - Resultados dos testes de PCS para cada faixa de pressão

Briquetes de Cana de açúcar 7,5 ton 1mm	
Pressão Aplicada - 38,2 MPa	
Massa(g)	Poder Calorífico (MJ/kg)
0,6776	15,787
0,9763	15,969
0,8603	15,913
0,9060	16,008
0,9838	16,132
Briquetes de Cana de açúcar 5 ton 1mm	
Pressão Aplicada – 25,5 MPa	
Massa(g)	Poder Calorífico (MJ/kg)
1,0211	16,102
0,8647	15,890
0,8958	15,870
0,8684	15,900
0,9471	15,780
Briquetes de Cana de açúcar 2,5 ton 1mm	
Pressão Aplicada – 12,7 MPa	
Massa(g)	Poder Calorífico (MJ/kg)
0,8126	15,816
0,8587	15,735
0,5463	15,749
0,5752	15,679
0,7691	15,805

Fonte: Autor

Tabela B 2 - Resultados dos testes de densidade aparente para cada faixa de pressão

Briquetes de Cana de açúcar 7,5 ton 1mm		
Pressão Aplicada - 38,2 MPa		
Massa(g)	Volume (m ³)	Densidade (kg/m ³)
29,6613	0,000142505	208,1423
30,0077	0,000142505	210,5731
31,4146	0,000142505	220,4457
Briquetes de Cana de açúcar 5 ton 1mm		
Pressão Aplicada - 25,5 MPa		
Massa(g)	Volume (m ³)	Densidade (kg/m ³)
25,1657	0,000134588	186,9833
29,9924	0,000152611	196,5279
31,2692	0,000166919	187,3319
Briquetes de Cana de açúcar 2,5 ton 1mm		
Pressão Aplicada - 12,7 MPa		
Massa(g)	Volume (m ³)	Densidade (kg/m ³)
30,6882	0,000211474	145,1158
30,4867	0,000206686	147,5026
30,2001	0,000199495	151,3828

Fonte: Autor

Tabela B 3 - Resultados da análise imediata e PCS para a casca de alho

Teste de Umidade – Casca de Alho <i>in natura</i> 4mm	
Massa(g)	Umidade (%)
0,507	11,440
0,552	12,138
0,511	10,763
0,516	11,240
0,513	11,306
Teste de Voláteis – Casca de Alho <i>in natura</i> 4mm	
Massa(g)	Voláteis (%)
1,0332	71,2978
1,0365	71,4398
1,0362	70,4504
1,0306	69,9150
1,0382	68,2700
Teste de Cinzas – Casca de Alho <i>in natura</i> 4mm	
Massa(g)	Cinzas (%)
5,0005	7,6912
5,0606	8,0445
5,1921	8,0873
5,2340	7,6251
5,1629	7,7360
Carbono Fixo – Casca de Alho <i>in natura</i> 4mm	
Carbono Fixo (%)	
10,511	
PCS – Casca de Alho <i>in natura</i> 4mm	
Massa(g)	PCS (MJ/kg)
0,5543	13,6153

Fonte: Autor

Tabela B 4 - Resultados da análise imediata e PCS para a casca de arroz

Teste de Umidade – Casca de Arroz <i>in natura</i> 1mm	
Massa(g)	Umidade (%)
5,010	11,876
4,788	10,234
4,773	10,036
4,796	9,862
4,798	9,379
Teste de Voláteis – Casca de Arroz <i>in natura</i> 1mm	
Massa(g)	Voláteis (%)
0,9942	60,1108
0,9832	59,4846
1,0080	57,5103
1,0725	60,3986
1,0041	59,7754
Teste de Cinzas – Casca de Arroz <i>in natura</i> 1mm	
Massa(g)	Cinzas (%)
5,0391	16,5843
4,8992	16,7129
4,9778	16,8368
4,8794	16,5881
5,0181	16,8450
Carbono Fixo – Casca de Arroz <i>in natura</i> 1mm	
Carbono Fixo (%)	
13,553	
PCS – Casca de Arroz <i>in natura</i> 1mm	
Massa(g)	PCS (MJ/kg)
0,5128	14,3360

Fonte: Autor

Tabela B 5 - Resultados da análise imediata e PCS para o bagaço de cana

Teste de Umidade – Bagaço de Cana <i>in natura</i> 1mm	
Massa(g)	Umidade (%)
0,497	11,469
0,493	10,548
0,493	9,736
0,493	9,128
0,494	7,895
Teste de Voláteis – Bagaço de Cana <i>in natura</i> 1mm	
Massa(g)	Voláteis (%)
1,1380	73,3117
0,9004	71,2867
0,9046	69,4844
0,9015	68,8140
0,9001	70,0472
Teste de Cinzas – Bagaço de Cana <i>in natura</i> 1mm	
Massa(g)	Cinzas (%)
2,5386	2,0878
2,5021	5,1437
2,5375	2,9202
2,5280	5,7278
2,4940	5,2927
Carbono Fixo – Bagaço de Cana <i>in natura</i> 1mm	
Carbono Fixo (%)	
15,422	
PCS – Bagaço de Cana <i>in natura</i> 1mm	
Massa(g)	PCS (MJ/kg)
0,6799	17,0760

Fonte: Autor

Tabela B 6 - Resultados da análise imediata e PCS para o briquete de alho

Teste de Umidade – Briquete de Alho	
Massa(g)	Umidade (%)
1,127	14,108
0,909	14,741
0,993	14,602
1,027	14,314
1,115	14,439
Teste de Voláteis – Briquete de Alho	
Massa(g)	Voláteis (%)
1,0070	69,6603
1,0123	69,6942
0,9074	69,6785
0,9592	69,2433
0,9647	69,6784
Teste de Cinzas – Briquete de Alho	
Massa(g)	Cinzas (%)
4,4550	7,7868
4,5752	7,6543
4,0581	7,7820
3,9114	7,4449
5,0038	7,3844
Carbono Fixo – Briquete de Alho	
Carbono Fixo (%)	8,358
Poder Calorífico Superior – Briquete de Alho	
Massa(g)	PCS (MJ/kg)
0,5351	13,6864

Fonte: Autor

Tabela B 7 - Resultados da análise imediata e PCS para o briquete de alho/cana

Teste de Umidade – Briquete Alho / Cana	
Massa(g)	Umidade (%)
0,899	11,568
0,866	12,933
0,955	14,346
0,947	11,088
1,044	11,207
Teste de Voláteis – Briquete Alho / Cana	
Massa(g)	Voláteis (%)
1,2914	65,9659
1,2917	66,0561
1,2090	66,1340
1,3313	68,1818
1,2605	66,9546
Teste de Cinzas – Briquete Alho / Cana	
Massa(g)	Cinzas (%)
4,6535	11,5290
4,6166	9,0998
4,5745	9,6929
5,2797	10,0063
4,8567	9,7144
Carbono Fixo – Briquete Alho / Cana	
Carbono Fixo (%)	
11,105	
Poder Calorífico Superior – Briquete Alho / Cana	
Massa(g)	PCS (MJ/kg)
0,5614	14,7188

Fonte: Autor

Tabela B 8 - Resultados da análise imediata e PCS para o briquete de arroz/cana

Teste de Umidade – Briquete de Arroz/Cana	
Massa(g)	Umidade (%)
0,884	9,842
0,810	9,259
0,879	8,874
0,838	7,995
0,826	8,354
Teste de Voláteis – Briquete de Arroz/Cana	
Massa(g)	Voláteis (%)
0,9134	63,8636
1,0964	63,8187
1,1095	63,4111
0,9573	64,1532
0,9628	64,3073
Teste de Cinzas – Briquete de Arroz/Cana	
Massa(g)	Cinzas (%)
4,8018	13,2388
4,7864	13,2480
4,7667	11,7293
4,7914	11,0677
4,9570	15,6486
Carbono Fixo – Briquete de Arroz/Cana	
Carbono Fixo (%)	
14,238	
Poder Calorífico Superior – Briquete de Arroz/Cana	
Massa(g)	PCS (MJ/kg)
0,5729	15,0444

Fonte: Autor