

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ELY CARLOS NUNES

MARCO ANTÔNIO NUNES DA SILVEIRA

**ESTUDO DO APROVEITAMENTO DA PALHA
DE CAFÉ COMO COMBUSTÍVEL NOS
FORNOS DE SECAGEM**

VITÓRIA

2004

ELY CARLOS NUNES
MARCO ANTÔNIO NUNES DA SILVEIRA

ESTUDO DO APROVEITAMENTO DA PALHA DE CAFÉ COMO COMBUSTÍVEL NOS FORNOS DE SECAGEM

Projeto de graduação apresentado ao corpo docente do curso de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Profº Msº Sergio Leite Lopes

VITÓRIA

2004

ELY CARLOS NUNES
MARCO ANTÔNIO NUNES DA SILVEIRA

ESTUDO DO APROVEITAMENTO DA PALHA DE CAFÉ COMO COMBUSTÍVEL NOS FORNOS DE SECAGEM

COMISSÃO EXAMINADORA

Profº Orientador Sergio Leite Lopes

Profº

Profº

Vitória, _____ de _____ de _____

Agradecimentos

Aos Pais, familiares e amigos por estarem sempre ao nosso lado.

A todos aqueles que nos ajudaram e colaboraram contribuindo na realização deste projeto.

A empresa CAFFEE pelo apoio e abertura de suas instalações para experimentos.

A Equipe Técnica do Laboratório Ensaios Destrutivos da Engenharia Civil.

Ao Professor Sergio Leite pela orientação prestada durante todo o projeto.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 01 - Armazenagem de lenha e Fornalha do secador	11
Figura 02 - Café Arábica	13
Figura 03 - Corte longitudinal do fruto	14
Figura 04 - Biomassa cultivada com a finalidade de produção de energia	19
Figura 05 - Extração de eucalipto	20
Figura 06 - Obstrução da grelha	25
Figura 07 - Fuso para alimentação	26
Figura 08 - Alimentador com disco perfurado	27
Figura 09 - Queima Inadequada	28
Figura 10 - Alimentador com disco perfurado e manta térmica	28
Figura 11 - Alimentador com manta térmica rígida	30
Figura 12 - Raspador	30
Figura 13 - Alimentador de rolos	31
Figura 14 - Palha compactada a frio	33
Figura 15 - Palha compactada com aquecimento	33
Figura 16 - Detalhe da palha em contato com a umidade	34
Figura 17 - Palha homogeneizada com umidade	35
Figura 18 - Palha compactada com umidade residual	35
Figura 19 - Amostra sem adição de umidade	36
Figura 20 - Amostra compactada na prensa metalográfica	36
Figura 21 - Matriz e embolo para compactação	38
Figura 22 - Prensa com dispositivo adaptado	38
Figura 23 - Representação da matriz	39
Figura 24 - Representação dos esforços na parede da matriz	40
Figura 25 - Matriz dimensionada	41
Figura 26 - Ruptura da matriz	43
Figura 27 - Gráfico da resistência da fibra de vidro	45
Figura 28 - Matriz reforçada com fibra de vidro	45
Figura 29 - Representação do esforço na matriz reforçada	46
Figura 30 - Material obtido após compactação	49
Figura 31 - Medidas de deformação da palha	50

	6
Figura 32 - Gráfico de deformação da palha_____	51
Figura 33 - Compactação com carga de 20 Toneladas_____	52
Figura 34 - Aumento do volume durante a queima_____	55
Figura 35 - Briquete de palha durante a queima_____	56
Figura 36 - Prensa extrusora de pistão mecânico_____	58
Figura 37 - Peletizadora_____	59
Figura 38 - Unidade de briquetagem de biomassa_____	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes do café arábica em base seca_____	15
Tabela 2 - Quantidade de nutrientes por tonelada de resíduo do processamento agroindustrial do café (em kg)_____	16
Tabela 3 - Matriz energética da Acesita_____	22
Tabela 4 - Avaliação dos resultados obtidos_____	37
Tabela 5 - Carga Aplicada X Consistência do material_____	49
Tabela 6 - Deformação X Carga_____	51
Tabela 7 - Comparativo de custo_____	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Substituição da madeira pela palha de café	11
1.2 A importância do cultivo do café para a economia do Espírito Santo	12
1.3 Caracterização do Fruto do Café e da Palha como um resíduo produzido no Processo de beneficiamento	13
1.4 Potencialidade de uso de resíduos e subprodutos do processamento agroindustrial do café	16
2 OBJETIVO	18
3 BIOMASSA	19
3.1 Biomassa como fonte de energia	19
3.2 Potencialidades da biomassa	20
3.3 Utilização da biomassa na indústria siderúrgica	21
4 METODOLOGIA	23
4.1 Levantamento de campo	23
4.2 Propostas iniciais	24
4.2.1 Desenvolvimento de um alimentador	24
4.2.2 Compactação da palha	32
4.3 Experimentos Realizados	32
4.3.1 Utilização de Prensa de embutimento de amostra metalográfica	32
4.3.2 Desenvolvimento de matrizes para testes	37
4.3.3 Prensagem	48
4.4 Queima do material prensado	53
5 ANALISE DOS EXPERIMENTOS	57
6 SISTEMAS DE COMPACTAÇÃO	57
7 CONCLUSÃO	60
8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

RESUMO

Visando o aproveitamento da palha de café como combustível nos fornos de secagem o presente trabalho analisa possíveis soluções para utilização deste material.

Inicialmente foi proposto o desenvolvimento de alimentadores para condicionamento e fornecimento gradual de palha para queima.

A compactação surgiu como uma forma mais adequada para este fim, exigindo a realização de experimentos para obtenção de informações sobre a aglomeração da palha e sua posterior queima.

Os equipamentos existentes para prensagem e uma pequena análise de custo também são apresentados.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente é atribuída uma grande importância às energias renováveis. Espera-se delas uma contribuição significativa para a solução de muitos dos problemas atuais e futuros. As energias alternativas devem substituir as energias convencionais como petróleo, carvão mineral e gás natural, evitar um aumento de gases com efeito de estufa na atmosfera e perspectivar novas alternativas de rendimento na agricultura. A realização de uma política de energia que proteja os recursos e o ambiente exige, no entanto, uma análise profunda das possibilidades, efeitos e custos de uma substituição das energias comerciais. Os critérios de avaliação das energias renováveis são entre outros, a situação de tecnologia, as potencialidades para uma substituição das energias não renováveis, valorização energética e os custos e compatibilidade ambiental.

Processos físicos, termoquímicos e biológicos de conversão de biomassa (resíduos de madeira e agro-industriais) permitem transformá-la em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos para a produção de energia térmica, mecânica ou elétrica. Resíduos agrícolas e florestais, como por exemplo palha e resíduos lenhosos, serão submetidos a um pré- tratamento (fracionamento ou briquetagem) que visa otimizar o processo de combustão subsequente.

Países europeus buscam alternativas energéticas nos resíduos de madeira e de carvão vegetal como o briquete (pó de serragem e de cascas vegetais compactados), para substituir a energia de fontes poluentes, é grande o interesse destes países em estreitar a cooperação técnica e científica com o Brasil, devido às altas taxas cobradas pela emissão de poluentes provenientes da energia convencional.

As 200 milhões de toneladas de biomassa produzidas anualmente, e não utilizadas no Brasil, colocam o país em lugar privilegiado para a exportação de briquetes. Só em resíduos de madeira, provenientes do processamento industrial e da exploração florestal sustentável, são cerca de 50 milhões de toneladas/ano.

É tal o valor dos resíduos como fonte de energia, que trinta quilos de briquetes seriam suficientes para iluminar uma residência que consome 100 kWh/mês de

eletricidade hidráulica e apenas setenta por cento da biomassa vegetal produzidas no país abasteceriam as cerca de 40 milhões de residências brasileiras.

1.1 Substituição da madeira pela palha de café

O presente estudo surgiu da necessidade do aproveitamento dos resíduos resultantes do processo de beneficiamento do café, principalmente durante seu processo de secagem, onde atualmente utiliza-se como combustível madeira.

O processo de secagem atual utiliza lenha de forma bastante rudimentar, exigindo uma grande quantidade de combustível, fazendo com que o produtor realize cultivo extra de madeira ou adquira lenha, procedimento que eleva os custos de produção.



Figura 1 – Armazenagem de lenha e fornalha do secador, Cortesia CAFFEE

No beneficiamento é produzida grande quantidade de palha proveniente da casca (conhecida como pergaminho), material sem nenhum valor para o produtor, que apresenta uma série de inconvenientes. Apesar de ser um material de origem orgânica(biomassa), quando em contato com o meio

ambiente é de difícil degradação além de gerar um ambiente propício para a proliferação de pragas que prejudicam a cultura, existindo legislação específica que impede o descarte desse material em áreas impróprias. Esse material quando armazenado em grandes pilhas à céu aberto em contato com umidade apresenta risco de iniciar combustão espontânea, obrigando o produtor a estocar adequadamente.

A palha pode ser utilizada como combustível em substituição a lenha, pois como toda biomassa, possui um bom potencial para geração de energia durante seu processo de combustão. Devido aos problemas de manuseio e alimentação nos fornos de secagem, exige a necessidade do desenvolvimento de alimentadores específicos ou processos de beneficiamento que tornem possível sua combustão de forma eficiente, com economia de combustível e com o mínimo de emissão de poluentes.

1.2 O Café Arábica no Espírito Santo.

A cafeicultura no Estado do Espírito Santo é a mais importante atividade agrícola estadual, ocupando mais de 500 mil hectares, com números superiores a 1 bilhão de cafeeiros implantados, estando presente na maioria dos municípios capixabas gerando mais de 153 mil postos diretos de trabalho em 56 mil propriedades rurais. A safra cafeeira 99/00 atingiu patamares superiores a 6,2 milhões de sacas (60Kg) beneficiadas, sendo cerca de 2,2 milhões de café arábica, produzido em regiões de montanha, permitindo que o estado se mantenha, isoladamente, como segundo produtor nacional de café.

Dessa produção, 90% do café produzido atualmente utiliza a técnica de descasque por via seca. O processo de secagem pode ser natural ou artificial, sendo a secagem natural a mais utilizada.

Depois da secagem, o café é encaminhado para a etapa de limpeza na qual os grãos são separados de impurezas (pedras, terra, falhas, restos de galhos, etc.) através de peneiras vibratórias. O café limpo sofre então o descasque, que separa as casca dos grãos. O café descascado é selecionado, embalado e enviado para indústrias de torrefação e de fabricação de café solúvel.



Figura 2 - Café arábica

1.3 Caracterização do Fruto do Café e da Palha como um resíduo produzido no seu Processo de beneficiamento.

O fruto do café tem o aspecto externo de uma cereja. Um corte longitudinal do fruto (esquema 1A da figura 3) mostra as diferentes camadas celulares. Observa-se que a polpa que é a parte externa do fruto é constituída pelo epicarpo (exocarpo) e por parte do mesocarpo (mesocarpio). A coloração da parte externa depende da variedade do café e do estado de maturação e varia de verde a vermelho, tendendo a várias tonalidades de vermelho escuro, violeta e negro. O mesocarpo encontra-se protegido pelo epicarpo é constituído por uma capa grossa de tecido esponjoso de aproximadamente 5 mm de espessura, rica em açúcares e mucilagem que envolve as duas faces do grão de forma independente.

Os grãos estão revestidos por uma dupla membrana: a primeira camada conhecida como pergaminho, de cor amarelo claro e de consistência dura e frágil, a segunda, muito mais fina que a anterior, fica aderida ao grão (albume).

Esta camada é uma película prateada (tegumento seminal). Na base dos grãos sobre a face interna, se encontra o cotilédone (embrião).

A observação microscópica do corte longitudinal do fruto mostra o detalhe de cada uma das estruturas mencionadas anteriormente (Esquema 1B, figura 3). Este corte permite observar que a polpa não é constituída somente pelo epicarpo e pelo mesocarpo mas por outras três camadas de tecido celular: células justapostas, células longitudinais do esclerênquima e células transversais do esclerênquima. A película prateada por sua vez é constituída por três camadas: epiderme, capa média e células comprimidas. No grão pode se observar uma reserva de tecido parenquimoso denso.

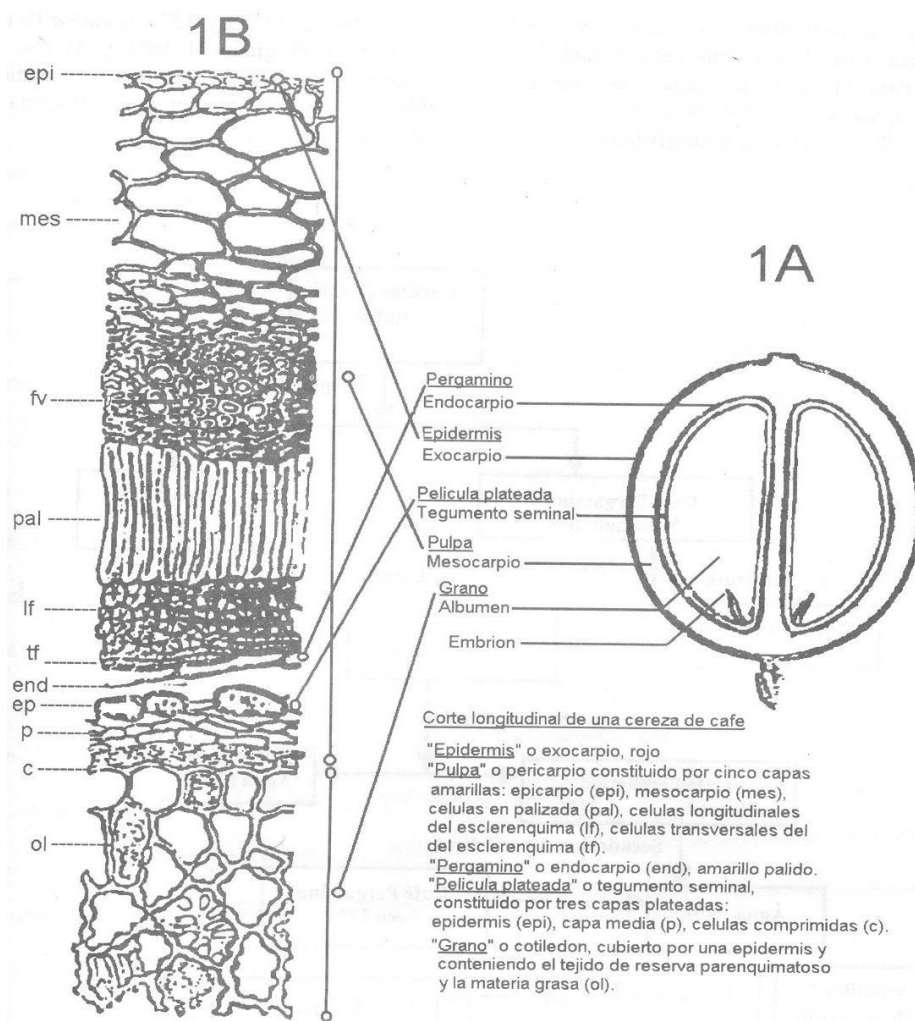


Figura 3 – Corte longitudinal do fruto

O material em estudo que   referido como “palha de café”, na verdade compreende a segunda casca do fruto, situada entre o mesocarpo (polpa do

café) e a tegumento seminal (película fina e prateada que envolve o grão), essa película é conhecida como pergaminho.

Com o conhecimento das particularidades do fruto e realizando uma avaliação percentual dos macrocomponentes da cereja do café, verifica-se que após o processamento somente 6% em peso do fruto fresco é utilizado para a preparação da bebida, os 94% restantes, são constituídos por água e por subprodutos do processo e que na maioria dos casos se transforma em uma fonte de contaminação para o meio ambiente. Observa-se que durante o processo de beneficiamento a úmido do café são gerados os seguintes subprodutos: a polpa que constitui 39% em peso de fruto fresco e mucilagem representando 22%.

De acordo com balanços realizados expressos em base seca mostram que a polpa constitui 28,7 % da matéria seca que resta, a mucilagem a 4,9 % e a segunda casca (o pergaminho) 11,9 %, por fim o grão que corresponde a 55,4%.

De acordo com pesquisas realizadas esta distribuição em base seca, varia ligeiramente entre as variedades de café. Para o caso do café arábica (*Coffea Arábica*), variedade em estudo, a polpa representa de 26,5 % a 29,6%, a mucilagem de 13,7% a 7,5% e a casca (pergaminho) de 10% a 11,2% e o grão de 50% a 51,7% .Visto que esta variação é influenciada pelas condições climáticas e pelos tratos culturais aplicados em cada cultivo.

Verifica-se claramente que a casca de café é um dos resíduos secos gerados em maior quantidade, justificando o desenvolvimento de um método que torne possível o aproveitamento desse resíduo.

TABELA 1
COMPONENTES DO CAFÉ ARÁBICA EM BASE SECA

Componentes	Variação
Polpa	26,5% à 29,6%
Mucilagem	13,7 à 7,5%
Casca	10% à 11,2%
Grão	50% à 51,7%

Fonte: Elaborado a partir VASCO, Jaime Zuluaga (1999)

1.4 Potencialidade de uso de resíduos e subprodutos do processamento agroindustrial do café

Principais utilizações dos subprodutos e resíduos:

Combustível: Com um poder calorífico de 3.500Kcal/Kg as cascas de café podem permitir autonomia energética a uma instalação para fins diversos. A transformação de casca em carvão reduz os custos. No Quênia, briquetes de cascas de café são comercializados para uso local e exportação para a Europa. A borra úmida tem o mesmo poder calórico de cascas, requerendo secagem prévia ate apresentar 33% de umidade.

Adubo orgânico: As cascas são adicionadas diretamente ao solo ou mediante compostagem (pisoteamento e mistura com esterco em currais ou esparramação como cama nos galpões de criação de aves). Podem ainda ser enriquecidas com misturas de minerais e adubos químicos. A borra do solúvel apresenta alguns inconvenientes nesse uso, devido ao alto índice de acidez, além da propensão á impermeabilidade do solo.

TABELA 2
QUANTIDADE DE NUTRIENTES POR TONELADA DE RESÍDUO DO
PROCESSAMENTO AGROINDUSTRIAL DO CAFÉ (EM KG)

Nutrientes	Casca de café	Borra de solúvel
Nitrogênio	17,5	32
Fósforo	1,4	-----
Potássio	37,4	-----
Cálcio	4,2	15
Magnésio	1,2	10
Enxofre	1,5	-----

Fonte: Elaborado a partir de MALAVOLTA e COURY (1967) e MUZILLI (1982).

Tendo como referência o volume total de cascas gerado pela safra de 34,5 milhões de cascas obtidas em 1998/99, as quantidades de nutrientes seriam

de: 36 mil ton. de nitrogênio; 2,9 mil t de fósforo; 77,4 mil de t de potássio; 8,7 mil t de cálcio; 2,5 mil t de magnésio e 2 mil t de enxofre. Na produção de solúvel em 1998, o conteúdo de nitrogênio presente na borra foi de 120 mil t; 56 mil t de cálcio e 37 mil t de magnésio.

Ração de animais: A presença de cafeína e taninos nas cascas requer ensilagem previa ou peletização, podendo ser fornecida desde que não ultrapasse 20% no total de ração, pois o gosto amargo afeta a palatabilidade, além do elevado teor de lignina. A utilização fica limitada de transporte. A borra apresenta baixa capacidade nutricional e elevado teor de lignina, o que também restringe essa utilização.

Meio de Cultura e Pectina: a partir da mucilagem da polpa do café é possível cultivar fungos e leveduras comestíveis. O teor de pectina na mucilagem compara-se ao dos citrus, tradicional matéria-prima na obtenção industrial desse produto para fins alimentares e farmacêuticos.

Aguardente e álcool anidro: é possível obter-se aguardente dentro de padrões comerciais a partir da casca de café cereja na proporção de 3,2 litros para cada 765 litros de café cereja ou 2,1 litro por saca beneficiada. Na obtenção de 1 litro de álcool preparam-se licores e perfumes. Esses rendimentos podem ser significativamente melhorados, caso a casca de café cereja passe por etapas previa de prensagem.

Gás metano: a colocação em biodigestores de mistura de 30Kg de polpa parcialmente decomposta com 18 litros de água e 2 Kg de esterco gera cerca de 670 litros de gás. O gás metano pode ter diversas utilizações até o aquecimento de água.

Vinagre: o conteúdo de açúcares de polpa permite sua utilização em fermentação acética que resultam em um tipo de vinagre claro, com aroma de pêra e paladar que lembra whisky envelhecido.

Bateria Elétrica: a polpa moída pode ser utilizada na confecção de baterias elétricas para rádios, telefones e campainhas, não se dispondo de maiores informações sobre as características elétricas da mesma.

Papel: a mistura de papel branco reciclado com cascas e borra de café (como corante) permite a obtenção de um tipo de papel para fins mais nobres (agendas, cartões, papeis especiais para presentes, etc...).

Óleos essenciais: Obtidos a partir do café beneficiado, o óleo pode ser utilizado como veículo aromatizante, desde que o produto seja estabilizado e protegido de oxidação.

A gama de possibilidade de utilização dos subprodutos e resíduos do café é elevada. Muitos dos usos ainda não passaram de fase experimental. Os usos mais comuns têm sido como adubo orgânico e combustível. Usos pouco comuns requerem maior desenvolvimento tecnológico. Não se dispõe de avaliação quantitativa do uso no Brasil.

2 OBJETIVO

Encontrar soluções adequadas seja através de pesquisas, estudos realizados, proposição de dispositivos ou outros meios que tornem possível o aproveitamento da palha de café como combustível em fornos de secagem ou fornos em geral, reduzindo a emissão de poluentes e objetivando melhoria de eficiência, pela substituição da madeira (ou outros combustíveis) pela palha de café.

Beneficiar a palha para que possa ser manuseada, transportada de forma a facilitar sua utilização.

Realizar teste de queima para avaliar: a manutenção da chama e do comportamento do material, e verificar se a queima ocorrerá de forma gradual e completa.

Divulgar viabilidade da utilização da biomassa como uma rica fonte energética, renovável e limpa.

3. BIOMASSA

3.1 Biomassa como fonte de energia

Como biomassa designa-se, em geral, a massa total de matéria orgânica que se acumula num espaço vital. Desta maneira pertencem à biomassa todas as plantas e todos os animais incluindo os seus resíduos bem como, num sentido mais amplo, as matérias orgânicas transformadas como resíduos de indústria transformadora da madeira e indústria alimentar. Num sentido energético tem que se distinguir entre biomassa que é cultivada com a finalidade de produção de energia (plantas energéticas) e biomassa que abrange todos os resíduos orgânicos provenientes de outras atividades.



Figura 4 - biomassa cultivada com a finalidade de produção de energia

As propriedades físicas mais importantes da biomassa sólida são a percentagem de umidade e a densidade energética. A baixa densidade energética de biomassa sólida em comparação com o petróleo e o carvão mineral origina custos elevados de transporte e armazenamento. O desenvolvimento contínuo de técnicas para aumentar a concentração de

energia (por exemplo briquetagem) ampliará o espectro de utilização da biomassa na transformação energética. A percentagem de umidade influencia significativamente a qualidade de combustão e o poder calorífico da biomassa. Por exemplo, o poder calorífico da madeira duplica se for reduzido o teor em água da madeira de 50 % (madeira em pé) para 20 % (a madeira depois de 2 anos de secagem ao ar). Em comparação com petróleo, que tem um poder calorífico de **42 MJ/kg** a madeira seca ao ar somente atinge um terço deste poder calorífico, **14 MJ/kg**. Para igual percentagem de umidade os poderes caloríficos dos diferentes biocombustíveis sólidos não se distinguem entre si significativamente.

3.2 Potencialidades da biomassa

O aproveitamento e o desenvolvimento de bioenergia depende da oferta disponível. A exploração de madeira fornece, além de madeira comercial, também biomassa. A combustão direta de biomassa, especialmente de madeira, é a forma mais antiga de produção de energia. Os processos de combustão que se usam atualmente possuem um nível técnico bastante sofisticado e as instalações de combustão unem uma alta eficiência com um grande conforto de regulação. As desvantagens significativas dos biocombustíveis sólidos são a baixa densidade energética, o manejo mais complicado e as características energéticas heterogêneas.



Figura 5 – Extração de Eucalipto

Em geral, a biomassa é extraída em áreas de produção extensa para depois ser concentrada nos locais de combustão, o que exige um grande esforço logístico em relação à colheita, transporte e armazenamento. Mas é possível minimizar estes impedimentos através de uma preparação própria dos biocombustíveis. A estrutura física da madeira e palha é importante para o comportamento na combustão e depende das formas de preparação prévia, tais como moer, fracionar e densificar. Uma densificação e briquetagem de serradura e palha facilitam o transporte, o armazenamento e a dosagem do combustível. Tanto pellets/briquetes, como estilhas de madeira e palha fracionada, podem ser queimadas em fornalhas automáticas. Por outro lado, o processamento da biomassa também consome energia e envolve custos. As características especiais dos biocombustíveis sólidos tais como baixa densidade energética, grande percentagem de substâncias voláteis (80 % do peso), diferentes quantidades de cinza (0,3 % - 5,3 % do peso) bem como o comportamento de fusão das cinzas, exigem uma adaptação da técnica de combustão aos combustíveis de biomassa.

3.3 A utilização da biomassa na Indústria Siderúrgica

A indústria siderúrgica planta cada vez mais florestas, das quais extrai a energia que alimenta a produção. Sendo que no Brasil esse processo ainda é lento, com relação ao potencial do país para produzir energia limpa. Está atrás de países com área bem menor, clima severo e desenvolvimento tecnológico inferior. As empresas instaladas em solo brasileiro demonstram interesse crescente na renovação de sua matriz energética, a maioria com o objetivo de melhorar a qualidade do produto e reduzir custos e impacto ambiental.

A utilização de energia limpa, sobretudo aquela proveniente da biomassa (o carvão vegetal é um exemplo), pode reduzir em até 40% a emissão de dióxido de carbono (CO₂) no ar. O interesse por essas fontes de energia faz com que a indústria de produtos vegetais movimente, nos dias de hoje, um valor quase 20 vezes maior que o da indústria de minério de ferro. São US\$ 300 bilhões por ano em comércio transoceânico ante US\$ 16 bilhões do minério.

Entretanto, os números mostram a fraca posição do Brasil, bem abaixo de seu potencial. O país tem ótimas condições ambientais e mais de 30 anos de desenvolvimento da tecnologia de produção de energia limpa, mas apenas 1% de participação no comércio transoceânico. Enquanto o Canadá exporta de US\$ 60 bilhões a US\$ 70 bilhões por ano em produtos vegetais, valor equivalente ao Produto Interno Bruto (PIB) de Minas Gerais, o Brasil exporta US\$ 3 bilhões. A comparação com a pequena e fria Finlândia mostra um cenário ainda mais desigual. Naquele país, uma floresta leva até cem anos para crescer. No Brasil, ao contrário, são necessários sete anos ou menos, dependendo das condições do ambiente e da tecnologia empregada. No entanto, a indústria de produtos florestais representa um terço da economia finlandesa. A produção da Finlândia no setor chega a ser sete vezes superior à brasileira.

O combustível vegetal ainda tem participação reduzida na geração de energia da Acesita, se comparado com a energia elétrica.

TABELA 3
MATRIZ ENERGÉTICA DA ACESITA

Tipos	Percentual	Energia Gerada (GigaJoules)
Energia elétrica	33,7%	7,2 milhões
Coque	23,9%	5,1 milhões
Carvão Vegetal	13,5%	2,8 milhões
Finos de carvão vegetal	9,6%	2 milhões
Outras fontes	19,3%	4 milhões

O carvão vegetal granulado, obtido em florestas mantidas pela empresa, responde por 13,5% da matriz energética, ou 2,8 milhões de gigajoules. Os finos de carvão vegetal representam 9,6%, ou 2 milhões de gigajoules. A energia elétrica, por sua vez, ocupa a primeira posição, com 33,7% da matriz energética, ou 7,2 milhões de gigajoules. Logo em seguida vem o coque, com 5,1 milhões de gigajoules (23,9%). Outras fontes de energia utilizadas pela Acesita são os gases do ar (4,8%), o óleo combustível (1,7%) e o óleo diesel (0,5%).

A Vallourec & Mannesmann (V&M) é a única siderúrgica integrada do mundo a ter sua matriz energética focada na energia renovável da biomassa, que corresponde aproximadamente a 86% da energia total consumida. A biomassa produz ferro-gusa líquido com elevada pureza química. O país possui matriz energética intensiva em energia renovável da hidroeletricidade e da biomassa. Desde 1969, a V&M utiliza carvão vegetal em seu processo industrial, evitando, assim, a utilização de carvão mineral. Não há processo para a produção de aço menos impactante ao meio ambiente do que aquele à base de energia renovável, o emprego de energia renovável na produção de aço, baseado na utilização de biomassa plantada, é menos prejudicial ao homem e ao meio ambiente. Além disso, trata-se da rota tecnológica com maior potencial de geração e distribuição de riqueza em seu sistema integrado de produção.

Soluções alternativas, relativamente simples, como a utilização de bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e resíduo de madeira, revelam o potencial da biomassa para reduzir os custos para as empresas. Esses produtos, que de outra forma seriam descartados, são usados para gerar energia pela Koblitz, empresa especializada no fornecimento de sistemas integrados para geração e cogeração de energia. A Koblitz implanta pequenas usinas, normalmente próximas aos locais de consumo da energia produzida, que utilizam diversas fontes primárias, a exemplo da biomassa, como a eólica e o gás natural.

4 METODOLOGIA

Constatado que a palha pode ser utilizada de variadas formas, o trabalho relativo ao aproveitamento em fornos de secagem se desenvolveu seguindo os passos abaixo.

4.1 Levantamento de Campo

Visando detectar quais os entraves para a utilização da palha atualmente nos fornos de secagem, pesquisas de campo em propriedades rurais foram feitas e os seguintes itens foram observados:

- Grande quantidade de madeira armazenada para servir de combustível nos fornos de secagem.
- Elevado consumo de madeira
- Aproveitamento inadequado do calor gerado (Trocador de calor ineficiente)
- Volume elevado de palha gerado no processo
- Local específico para armazenamento da palha
- Dificuldade de aproveitamento e destinação adequada da palha.
- A palha obtida no processo sem nenhum beneficiamento torna-se difícil para queima, por ser leve e conseqüentemente ser arrastada pelo fluxo de ar .
- A queima gera a obstrução das grelhas existentes nos fornos.
- A queima direta normalmente gera grande quantidade de fumaça com baixa eficiência térmica.

4.2 Propostas Iniciais

4.2.1 Desenvolvimento de um Alimentador

Em tentativas de queima da palha sem beneficiamento foram constatados diversos inconvenientes relativos a manutenção da palha sobre o local de queima (grelha) e permanência do processo de combustão, pois para o mesmo se manter de forma eficiente ao longo do tempo é necessário que algumas condições sejam atendidas, tais como: o material deve ser depositado sobre uma grelha que possua um espaçamento adequado que permita a passagem de um fluxo de ar e ao mesmo tempo promova o escoamento dos resíduos gerados na combustão. Este espaçamento deve ser tal que os resíduos gerados não provoquem a obstrução da grelha, a perda do material depositado e conseqüentemente a extinção da chama.

Em experiências realizadas anteriormente nas quais foram utilizados a palha dispersa sobre grelha associada a combustão pulsante diversos problemas foram constatados, pois este processo faz com que altas temperatura sejam alcançadas, provocando a fusão das cinzas que promovem a obstrução da

grelha, e este material torna-se viscoso aderindo a superfície, dificultando sua remoção.



Figura 6 – Obstrução da grelha

Para solucionar os problemas apresentados, desenvolvemos algumas propostas objetivando alimentar os fornos de maneira que o combustível (palha) não se disperse, evitando o acumulo de resíduos(cinzas fundidas) e mantendo uma combustão eficiente.

Dessa forma iniciou-se o desenvolvimento de alguns dispositivos visando contornar esses inconvenientes.

O primeiro dispositivo proposto tinha como princípio de funcionamento a utilização de um fuso (figura 3), para promover a alimentação contínua da palha sobre a local da queima, esse sistema funcionaria da seguinte forma:

- a) A palha seria acondicionada em um silo cônico,
- b) Na base do silo seria instalado um fuso para transporte, com acionamento elétrico,
- c) O movimento de rotação do fuso deslocaria o material na direção axial do fuso até o local de queima (grelha).

Assim obteríamos uma queima gradual com menor geração de resíduos. Esse sistema após um estudo mais detalhado apresentou uma limitação relativa a possibilidade de obstrução do fuso, pois quanto esse material é acondicionado, apresenta uma tendência para a compactação impedindo seu deslocamento por meio das espirais do fuso, sendo esse o principal motivo para tornar esse sistema inviável.

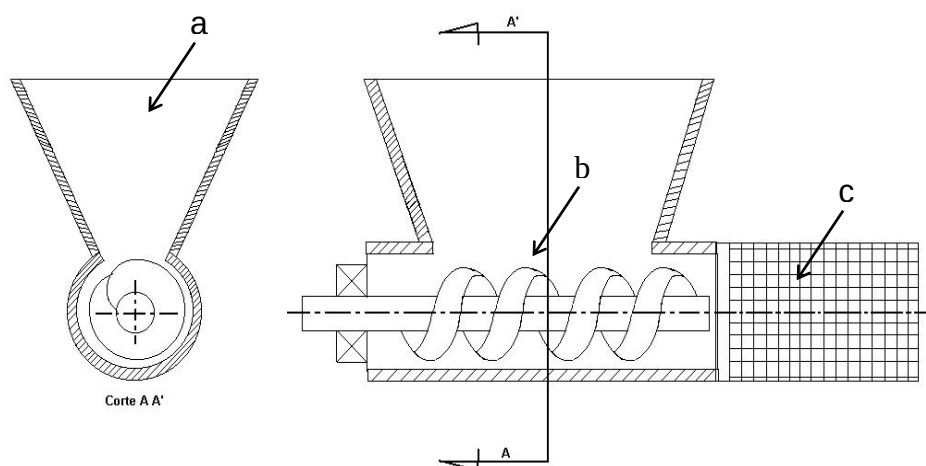


Figura 7 – Fuso para alimentação

Na tentativa de suprir as deficiências do dispositivo anterior, somados ao conhecimento de que ocorre a fusão dos resíduos da combustão durante a queima, foi idealizado um segundo sistema em que o princípio de funcionamento consistia em um disco perfurado que atuaria como uma grelha e simultaneamente permitiria a remoção das cinzas fundidas, por meio do giro do disco e de um raspador da superfície (figura 8).

- a) Utilização de um tubo onde seria acondicionado o material e por onde passaria um fluxo de ar,
- b) Disco perfurado que atuaria como uma grelha,
- c) Sistema de remoção de cinza fundida.

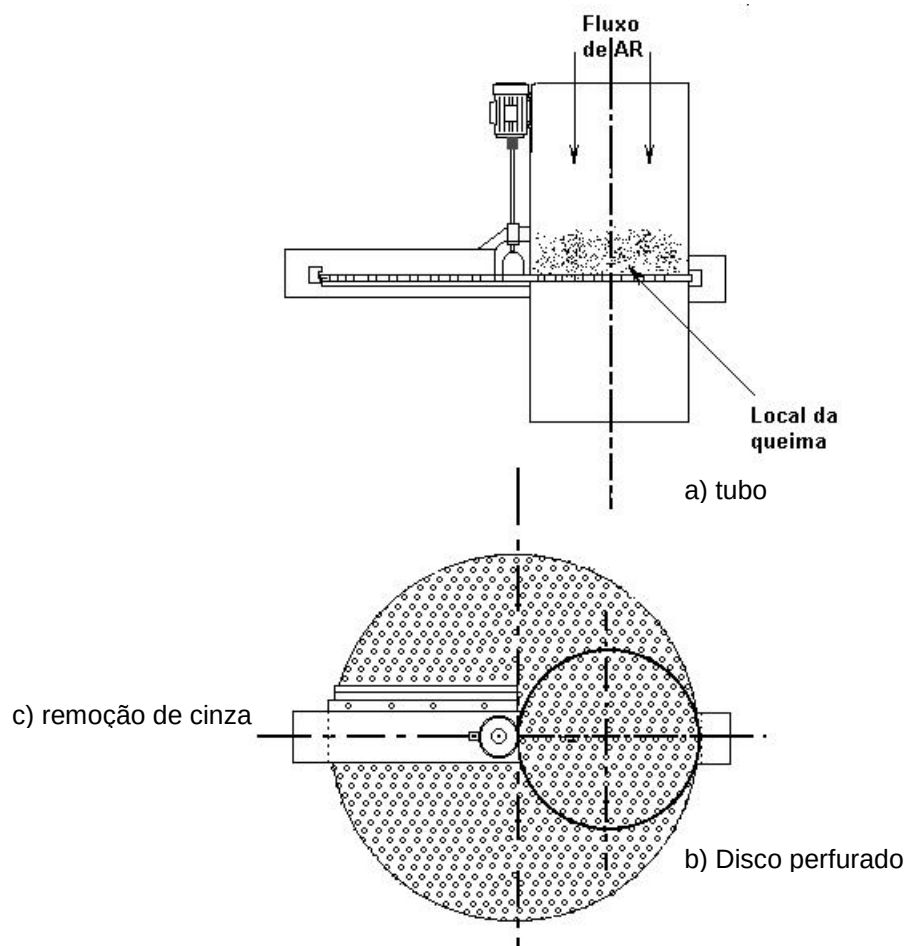


Figura 8 – Alimentador com Disco perfurado

Os principais problemas apresentados nesse dispositivo são relativos ao direcionamento do fluxo de ar através da palha, pois torna-se necessário um sistema de vedação eficiente entre o tubo e grelha para impedir a entrada de ar que poderia provocar uma frente de chama, fazendo com que a queima não seja uniforme, esse fato foi observado, como pode ser visto na figura 9.



Figura 9 - Queima inadequada.

A solução encontrada foi incorporar uma manta térmica flexível que atuaria como vedação, conforme figura 10.

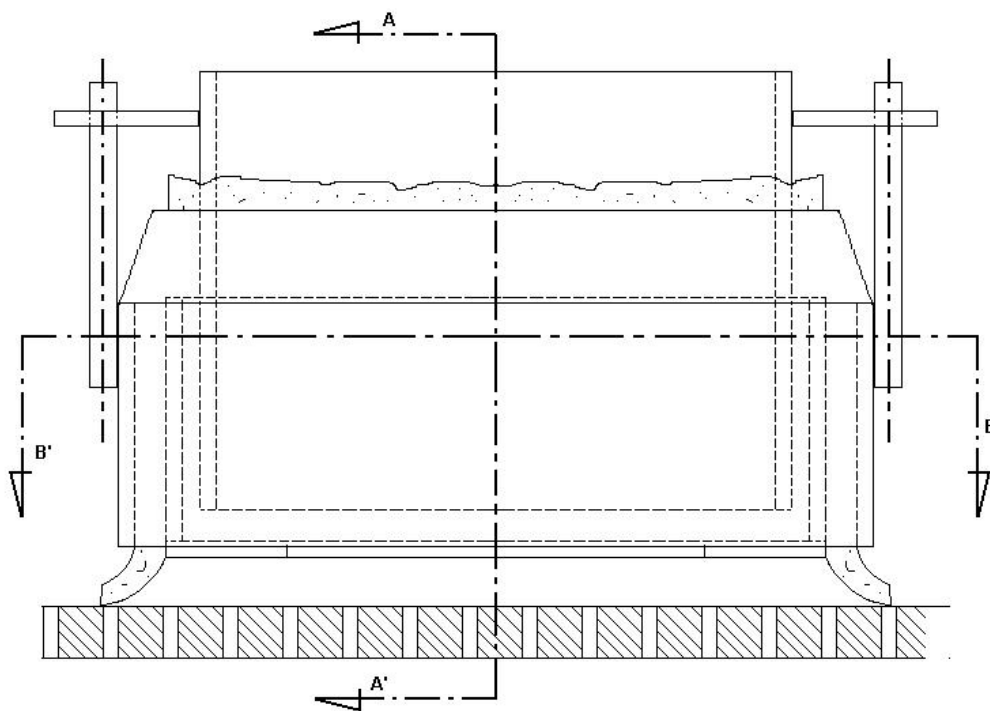


Figura 10 – Alimentador com disco perfurado e manta térmica

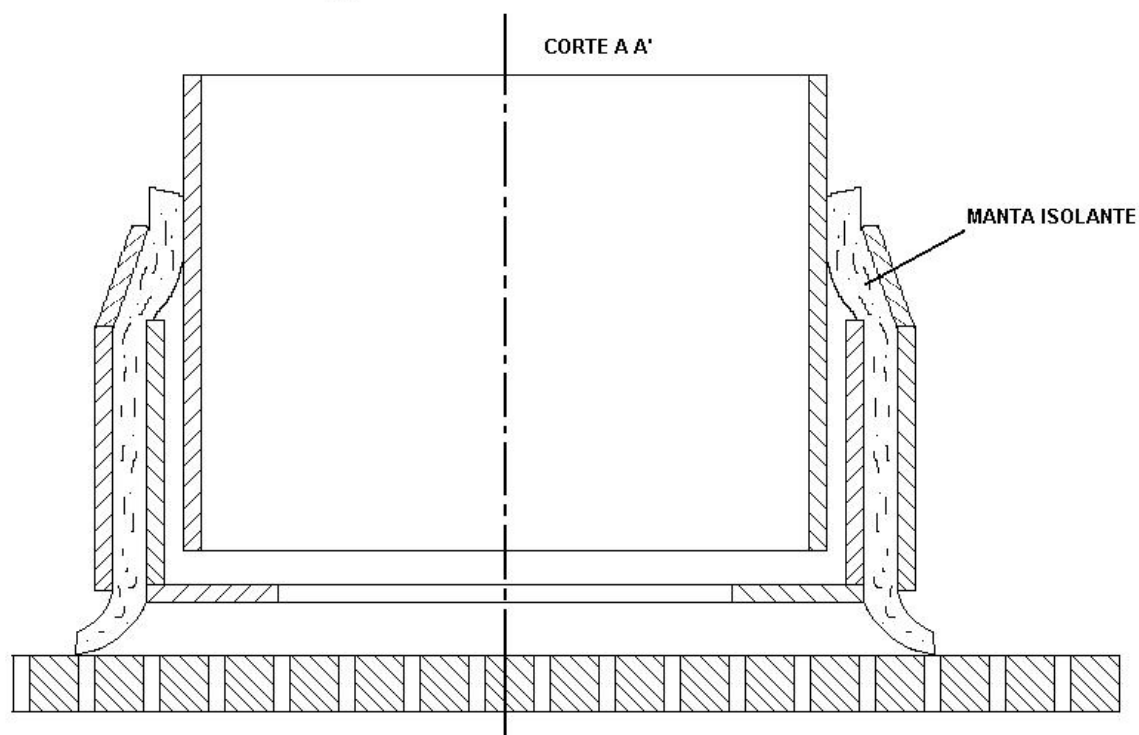


Figura 10 – corte AA'

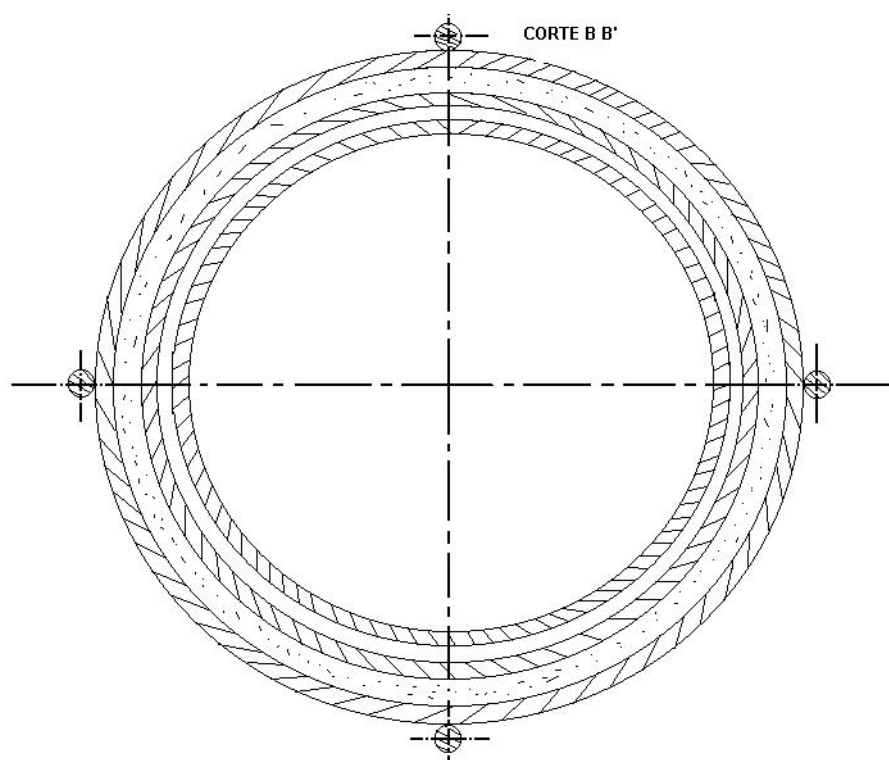


Figura 10 – corte BB'

ou utilizar manta térmica rígida, de acordo com a figura 11.

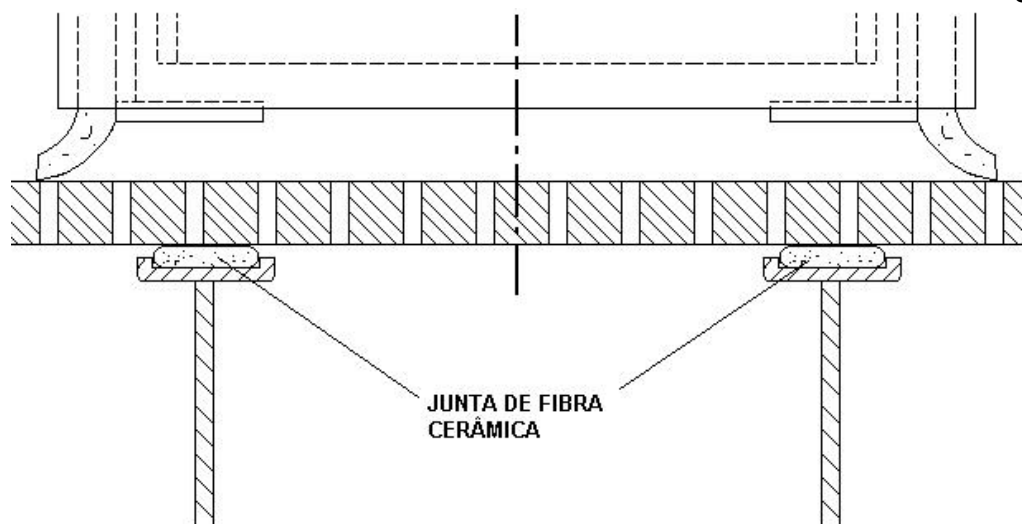


Figura 11 – Alimentador com manta térmica rígida

Estas possibilidades poderiam solucionar os problemas relativos a vedação, contudo a limpeza da superfície através do sistema de remoção de cinzas fundidas apresenta dificuldades em sua funcionalidade, pois a remoção do material exige uma raspagem para retirada do excesso e conseqüente desobstrução dos furos.

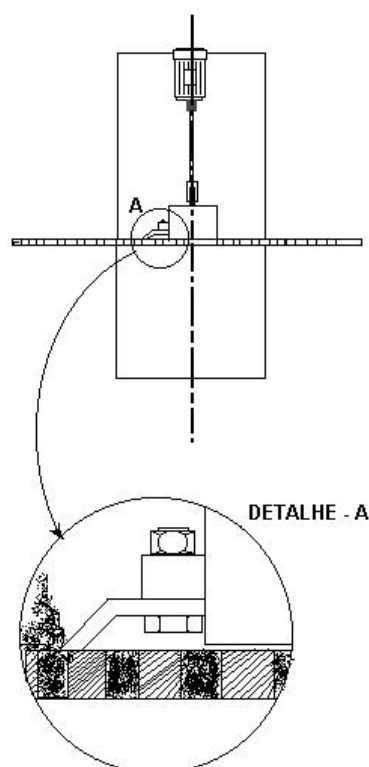


Figura 12 – Sistema de remoção de cinzas

A terceira proposta foi à utilização de rolos, para resolver o problema do entupimento da grelha. Utilizaríamos um sistema de grelha constituídas de rolos próximos que com a queima do material e conseqüente geração das cinzas fundidas seriam girados e um dispositivo de raspagem realizaria a limpeza ao longo do comprimento de acordo com a figura 13.

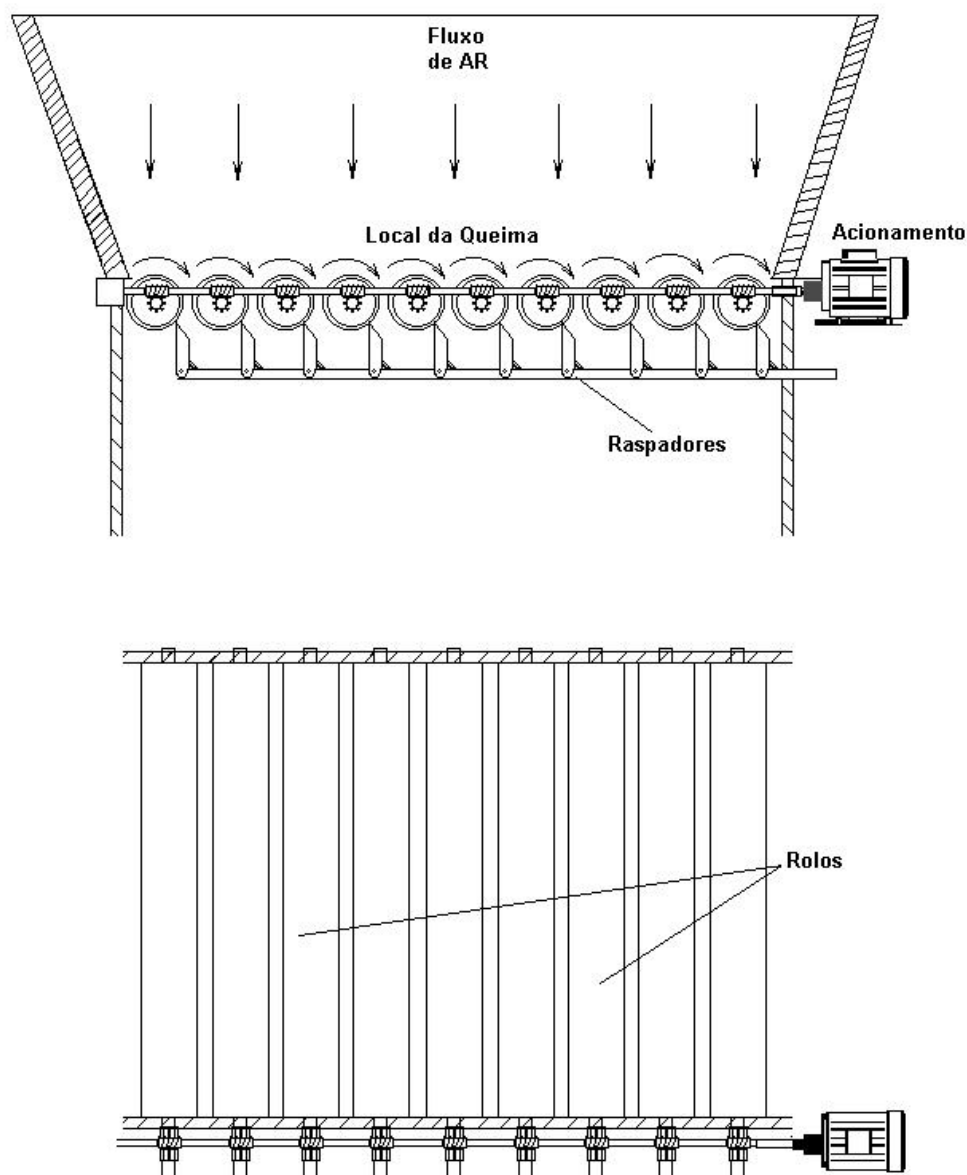


Figura 13 – Alimentador de Rolos

Os inconvenientes desta proposta foram: o acionamento dos rolos que exigiria um motor elétrico e um sistema de transmissão com componentes mecânicos para acionamento simultâneo de todos os rolos. Supomos que este sistema não seria adequado, pois os componentes estariam submetidos a condições severas de trabalho como temperatura elevada e dificuldades para lubrificação.

4.2.2 Compactação da palha

Devido aos problemas apresentados no desenvolvimento de um alimentador buscamos novas alternativas para a queima da palha nos secadores de café. Após a realização de pesquisas sobre a utilização de biomassa, verificamos que uma das formas mais eficientes para utilização da palha como combustível, seria através da sua aglomeração, assim passamos a enfocar a compactação na busca de melhores resultados.

4.3 Experimentos Realizados

4.3.1 Utilização de Prensa de embutimento de amostra metalográfica

Utilizamos a palha de café na sua forma natural sem nenhum processo de beneficiamento adicional (moagem ou adição de aglomerante).

Para o primeiro teste foi utilizado a prensa para embutimento de amostras metalográficas em baquelite, que encontra-se no laboratório de metalografia - Engenharia Mecânica da UFES.

O primeiro teste consistiu inicialmente em adicionar aproximadamente 9,23 gramas de palha no interior da prensa e em seguida aplicamos a carga para a prensagem.

Após atingido o limite de carga em torno de 4,5 Ton. aproximadamente (o marcador de carga da prensa não está indicando os valores), a carga foi aliviada e a amostra prensada foi retirada. Verificou-se uma acentuada redução de volume do material, em torno de 5 vezes em relação a quantidade inicial depositada no recipiente. O material adquiriu uma configuração semelhante à cortiça podendo ser manuseado.

A prensagem não apresentou compactação uniforme ocorrendo desprendimento de material.



Figura 14 - Palha compactada a frio

Foi realizado um segundo teste de compressão, aplicando aquecimento. Aguardando-se em torno de 10 minutos para se atingir a temperatura ideal por volta de 80° C, foi adicionado novamente 9,23 gramas no interior da prensa, aplicando se uma carga e após 20 minutos (mesmo tempo usado para a prensagem da baquelite), sendo que após os 10 minutos iniciais foi realizado um acréscimo na carga, prevendo se alguma modificação do material, mas a variação até esse momento foi mínima. Após os 10 minutos finais, a serpentina de arrefecimento da prensa foi ligada e aguardando se 10 minutos aproximadamente a 1ª amostra prensada com auxílio de calor foi retirada.



Figura 15 – Palha compactada com aquecimento

Foi Obtido um material resistente, bastante coeso, semelhante a baquelite que pode ser manipulado sem o desprendimento de nenhum material. A redução total de volume foi em torno de 5,5 vezes do volume inicial do material. Analisando esse segundo experimento, foi verificado que a pressão aplicada foi de 890 kg/cm², sendo o diâmetro da amostra de 1" (2,54 cm), e a temperatura em torno de 80°C. Um material semelhante foi obtido pelo LPF –Ibama – Laboratório de Produtos Vegetais do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis, que chegou a um material prensado a quente utilizando serragem sobre as seguintes condições: pressão de 1000Kg/ cm² e uma temperatura de 140°C. Esse material esta sendo usado como combustível conhecido como lenha ecológica com resultados satisfatórios .

Adicionando algumas gotas de água, para avaliar o efeito da umidade, diretamente sobre a palha dentro da prensa (sem homogeneizar) ficou constatado que a água atua desagregando o material, pois a superfície do material que teve contato com a umidade apresentou-se solta após a prensagem, para confirmar essa hipótese foi realizado outro teste com maior teor de umidade.



Região em
contato com
gotas d' água

Figura 16 - Detalhe da palha em contato com a umidade

Com a utilização da mesma quantidade de material seco e adicionando se 5 ml de água, essa umidade foi uniformizada (material misturado) e a prensagem do material como nos casos anteriores foi realizada. A água faz o material aumentar seu volume por ser incompressível, não sendo absorvida pela palha na compactação provocando a ruptura das fibras, dificultando a compactação,

o material obtido não apresentava nenhuma agregação, mesmo mantendo-se a pressão dos testes anteriores.



Figura 17 – Palha homogeneizada com umidade

A seguir não foi adicionada água, a umidade presente foi apenas a restante no interior da prensa devido à prensagem da amostra anterior, a amostra obtida dessa forma adquiriu uma resistência mecânica um pouco melhor, mas após alguns instantes esse material apresentou algum grau de desagregação, a palha começa lentamente a desprender-se.



Figura 18 – Palha compactada com umidade residual

Para contornar esse efeito provocado pela umidade, o interior da prensa foi secado e outro teste foi realizado. A amostra obtida adquiriu uma melhor resistência mecânica logo após a prensagem. Um teste simples de impacto

com o solo, de uma altura de aproximadamente um metro, foi realizado, após a queda a amostra manteve-se coesa.



Figura 19 – Amostra sem adição umidade

A palha logo após sua prensagem, possui uma resistência melhor do que aquele material que permanece em repouso por mais tempo, o material recupera-se após prensagem a frio e ocorre a desagregação de algumas partes. As amostras foram deixadas no laboratório expostas ao ar com o objetivo de avaliar a estabilidade ao armazenamento.



Figura 20 – Amostras compactadas na prensa metalográfica

TABELA 4
AValiação dos resultados obtidos

Pressão (Kg/cm²)	Temperatura	Umidade	Resultado
890	25°C	Sem adição	Sem resistência
890	80°C	Sem adição	Compacto
890	25°C	Na superfície	Sem resistência
890	25°C	Em todo volume	Baixa compactação
890	25°C	Sem adição	Sem resistência

4.3.2. Desenvolvimento de matrizes para teste

Objetivando maiores informações relativas a prensagem, optou-se pelo desenvolvimento de um dispositivo que permitisse a obtenção de amostras compactadas de forma mais eficiente e que ao mesmo tempo possibilitasse um controle mais preciso da carga aplicada sobre o material.

Fazendo uma avaliação da estrutura e dos equipamentos disponíveis nos laboratórios da universidade e levando em consideração que não existem equipamentos específicos para o processamento desse tipo de material, verificamos a possibilidade de realização desses experimentos utilizando equipamento disponível no laboratório de ensaios destrutivos da Engenharia Civil. Foi utilizado para esses testes o seguinte equipamento: prensa hidráulica fabricante Amsler, com capacidade máxima de carga de 200 toneladas. Esse equipamento é utilizado para ensaios de compressão em materiais utilizados na construção civil.

A limitação encontrada nessa máquina para a realização dos testes é de que todo o sistema de compressão desse equipamento foi desenvolvido para realizar testes de compactação em materiais sólidos, como a palha é um material disperso, foi necessário adaptar um dispositivo que possibilitasse o acondicionamento desse material sobre o local de compactação e que de forma simultânea tivesse a resistência suficiente para suportar os esforços que surgissem.

Inicialmente foi desenvolvida uma matriz em aço carbono e um embolo de compressão, sendo o dimensionamento realizado conforme descrito adiante.



Figura 21 – Matriz e embolo para compactação

Após a fabricação desse dispositivo e com a aprovação dos responsáveis pela operação dos equipamentos do laboratório de ensaios destrutivos da Engenharia Civil, iniciamos os testes de compactação sobre diversas condições de carga e teores diversos de mistura de palha.

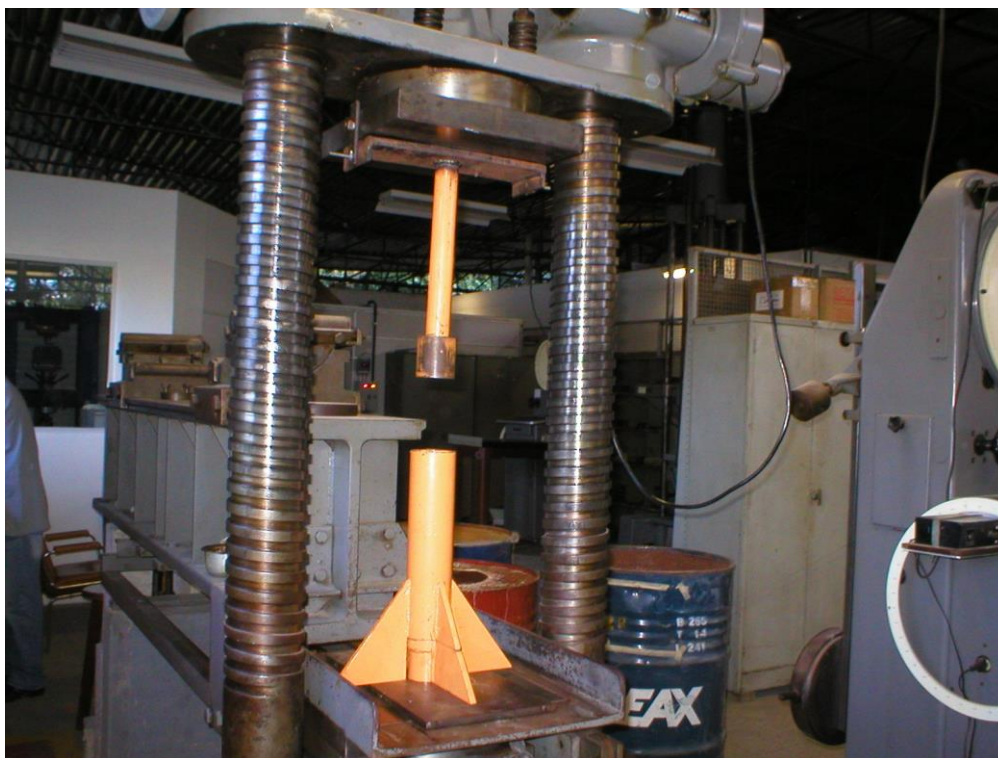


Figura 22 – Prensa com dispositivo adaptado

As dimensões da matriz projetada foram definidas com objetivo de obter um material que tornasse possível uma melhor análise das condições de queima sobre a grelha dos fornos de secagem e uma observação mais detalhada do comportamento da amostra após a prensagem e exposição à umidade natural. Nos testes anteriores ficou constatado que esse material apresenta afinidade com a umidade do ar fazendo com que o mesmo apresente uma tendência à expansão, essa característica deveria ser analisada sobre uma amostra com dimensões maiores.

A matriz projetada tem uma capacidade de compactação de 126 gramas de palha e os cálculos iniciais especificam uma carga máxima de trabalho de 30 Toneladas com segurança, mas por limitações construtivas referentes à disponibilidade de materiais para a fabricação foi fabricada uma matriz com capacidade de carga máxima de trabalho de 10 Toneladas.

Para a fabricação a matriz foi dimensionada seguindo os cálculos abaixo.

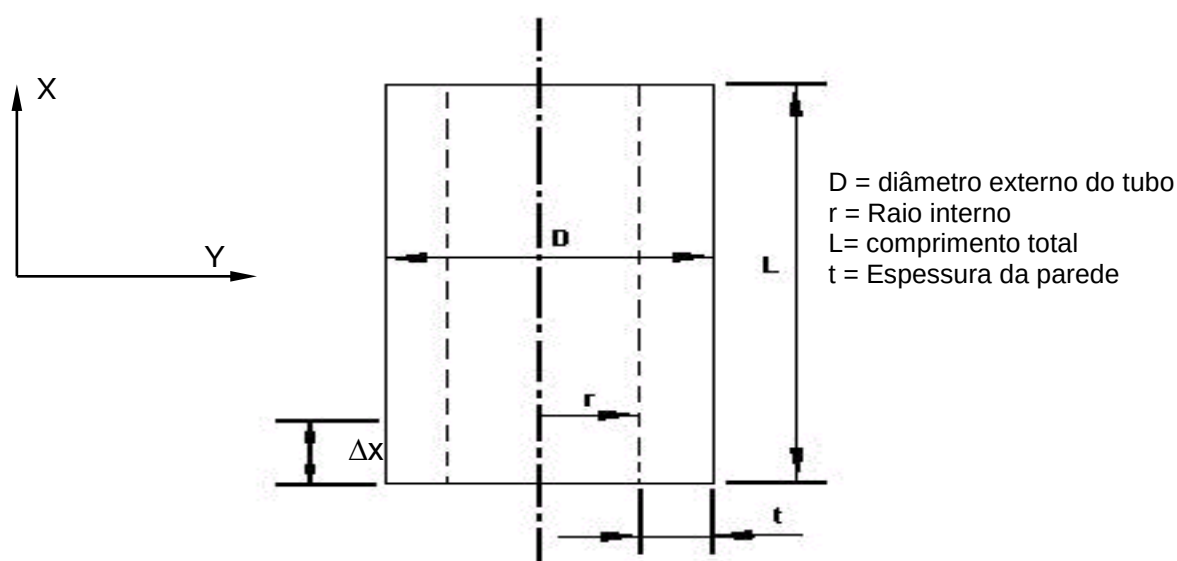


Figura 23 – Representação da matriz

O seguinte sistema de referência foi adotado para o dimensionamento do matriz de compactação.

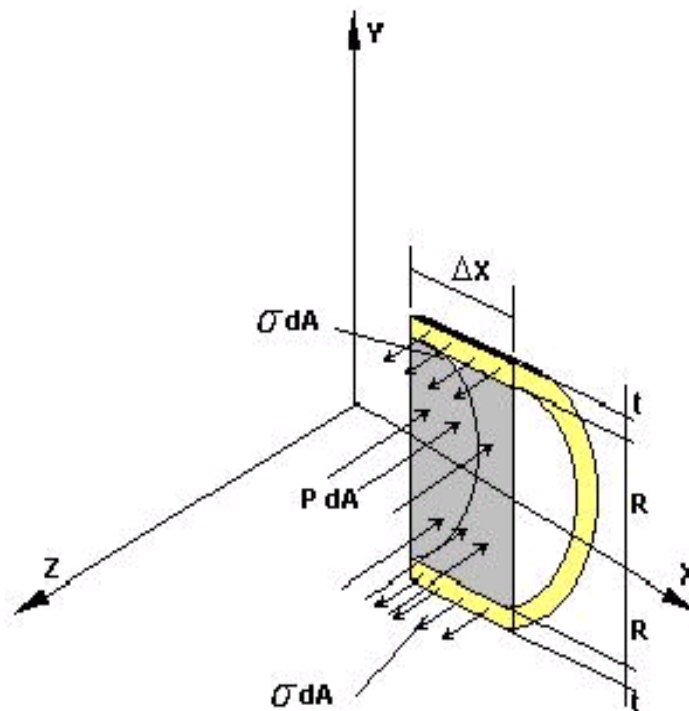


Figura 24– Representação dos esforços na parede da matriz

Para o cálculo dos esforços atuantes, foi utilizado o conceito aplicado para dimensionamento de vasos de pressão, sendo que para as condições de carga envolvidas essas considerações são as que melhor se adaptam.

Conforme descrito no sistema de referência temos:

$$\sum F_z = 0$$

$$\sigma * (2t * \Delta x) - P(2r * \Delta x) = 0$$

$$\sigma * (2t * \Delta x) = P(2r * \Delta x)$$

$$\sigma = \frac{P * r}{t}$$

$$P = \frac{F}{A} \Rightarrow P = \frac{F}{\pi * r^2}$$

$$\sigma = \frac{F}{\pi * r * t}$$

$$t = \frac{F}{\pi * r * \sigma} \Rightarrow \text{Espessura da parede da matriz}$$

Para análise inicial adotamos os seguintes parâmetros:

$$r = 15mm$$

$$\sigma = 220Mpa$$

$$F = 30Ton \Rightarrow F = 294000Newtons \Rightarrow \text{carga de projeto}$$

$$t = \frac{294000}{220 * \pi * 15} \Rightarrow t = 28,358mm$$

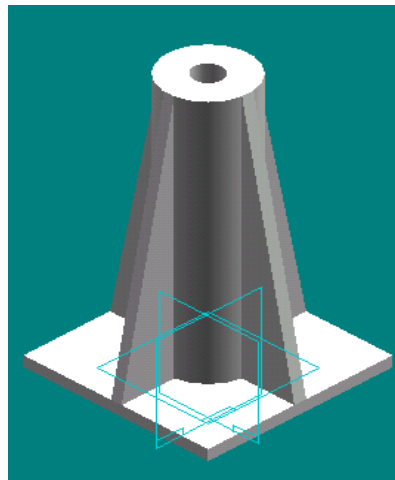


Figura 25 - Matriz dimensionada

Realizando uma análise mais detalhada do desenho obtido e levando em consideração limitações referentes a detalhes construtivos e disponibilidade de materiais e de equipamentos para a fabricação, foi utilizado para a construção um tubo de aço carbono com as seguintes características:

$$Aço = 1020$$

$$\sigma_e = 382,2Mpa$$

$$\sigma_r = 206,1Mpa$$

$$\varnothing = 63mm$$

$$t = 5,3mm$$

Utilizando a memória de cálculo anterior, foram checadas as condições de compactação que poderiam ser alcançadas em função do material usado.

Sendo:

$$t = \frac{F}{\pi * r * \sigma} \Rightarrow F = \pi * r * \sigma * t$$

$$\text{Para } \cdot \text{ tensao } \cdot \text{ de } \cdot \text{ escoamento: } \sigma_e = 206,01 \text{ Mpa}$$

$$F = \pi * 31,5 * 206,01 * 5,3$$

$$F = 108049,957 \text{ N} \Rightarrow F = 11014,266 \text{ Kg}$$

$$\text{Para } \cdot \text{ tensao } \cdot \text{ de } \cdot \text{ ruptura: } \sigma_r = 382,2 \text{ Mpa}$$

$$F = \pi * 31,5 * 382,2 * 5,3$$

$$F = 200459,655 \text{ N} \Rightarrow F = 20434,21 \text{ Kg}$$

Analisando conjuntamente a carga máxima admitida para a matriz e o gráfico de carga de compactação (figura 32), verifica-se que a ruptura do material utilizado para a fabricação ocorria no ponto em que a carga de compactação atinge um valor de aproximadamente 20 Toneladas, sendo que a partir desse ponto o material (palha) inicia o processo de aglomeração e de acordo com os testes realizados é necessária a aplicação de uma carga mais elevada. Devido a continuação dos testes com carga acima da especificada a matriz apresentou o rompimento antes da carga ideal ser atingida, justificando a necessidade do desenvolvimento de uma matriz com uma melhor resistência aos esforços envolvidos na compactação.

O rompimento da matriz de compactação ocorreu para uma carga de aproximadamente 60 Toneladas, sobre essas condições observamos o rompimento lateral do tubo. O tubo utilizado apresentava um diâmetro de 63 mm e espessura de parede de 5,3 mm.



Figura 26 – Ruptura da matriz

Realizando uma análise preliminar da falha ocorrida algumas suposições podem ser feitas, apesar dos cálculos de dimensionamento terem determinado que a falha ocorreria a partir de uma carga aproximada de 10 Toneladas, o componente resistiu a uma carga máxima de 60 Toneladas, considerando que o dimensionamento foi realizado para o limite elástico do material, e observando que para valores inferiores a carga de ruptura o material já apresentava alguns sinais de deformação plástica, demonstrando que já se apresentava, mas os testes foram mantidos visto que não tínhamos outro componente para substituição.

Outro fator observado para a falha acima do limite especificado nos cálculos, relaciona-se ao não conhecimento das propriedades mecânicas do material utilizado para a fabricação da matriz, visto que utilizamos materiais sucateados. O material utilizado para a fabricação da matriz sofreu uma fragilização localizada devido ao calor proveniente dos pontos de solda a ruptura ocorreu no lado oposto ao cordão de solda.

O local da ruptura foi afetado pelo deslocamento do embolo, constatamos que na região anterior ao início da falha as paredes internas da matriz apresentavam sinais de arranhamento provocado pelo atrito entre o embolo e as paredes, que teve início em um ponto onde ocorreu um possível depósito de material ou algum tipo de deformação da parte interna da matriz (empeno), causado pelo calor da solda ou pelas condições de carga.

Para contornar as dificuldades encontradas, a matriz foi redimensionada levando em consideração alguns aspectos: o material utilizado deve suportar a elevadas cargas de tração mantendo a rigidez, deve ser de fácil conformação, o custo envolvido para a produção de um protótipo deve ser baixo. De acordo com essas afirmações a solução encontrada foi a realização de um reforço externo na matriz utilizando-se fibra de vidro, que permite a obtenção de elevada resistência aliada a baixo peso e facilidade de conformação.

Devido às limitações relativas a custo e as condições de fabricação optamos em manter a mesma matriz utilizada nos ensaios anteriores, à parte que apresentou falha foi retirada e realizamos um reforço externo com fibra de vidro, visto que com esse material é possível obter variadas faixas de resistência de acordo com a relação entre a fibra e a resina utilizada, em alguns casos o limite de resistência a ruptura a tração chega a sete vezes o limite de resistência encontrado no aço conforme descrito no gráfico (figura 27).

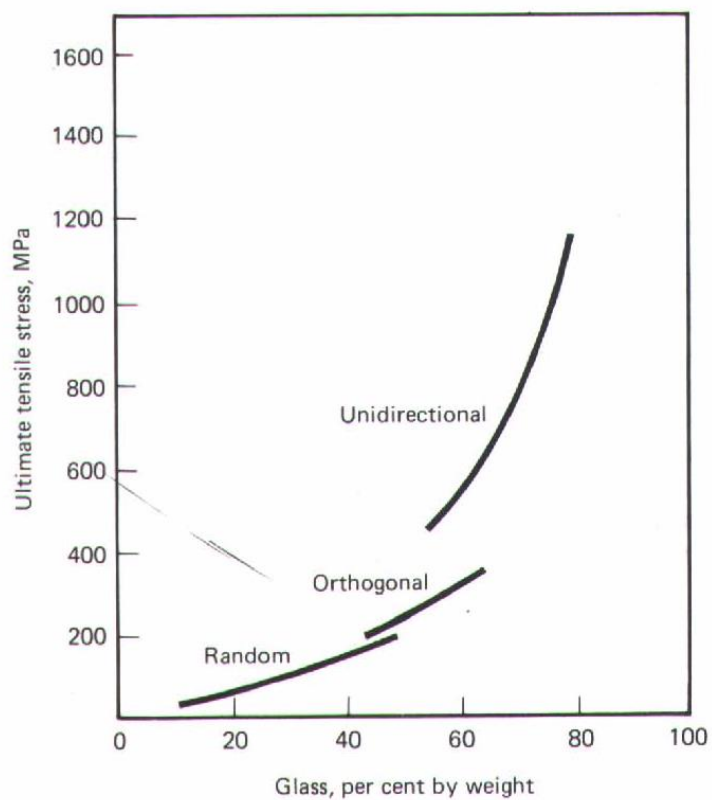


Figura 27 - Gráfico da resistência da Fibra de Vidro

Fonte: Selection and Use of Engineering Materials



Figura 28 – Matriz reforçada com fibra de vidro



Figura 28 – Vista inferior

O ganho de resistência com a utilização da fibra de vidro pode ser constatado realizando-se uma análise semelhante a que foi realizada para o dimensionamento do tubo de aço carbono, deve-se avaliar a contribuição de cada material sobre as condições de carga. Foi utilizada a hipótese de que os esforços em ambos os materiais são distribuídos uniformemente.

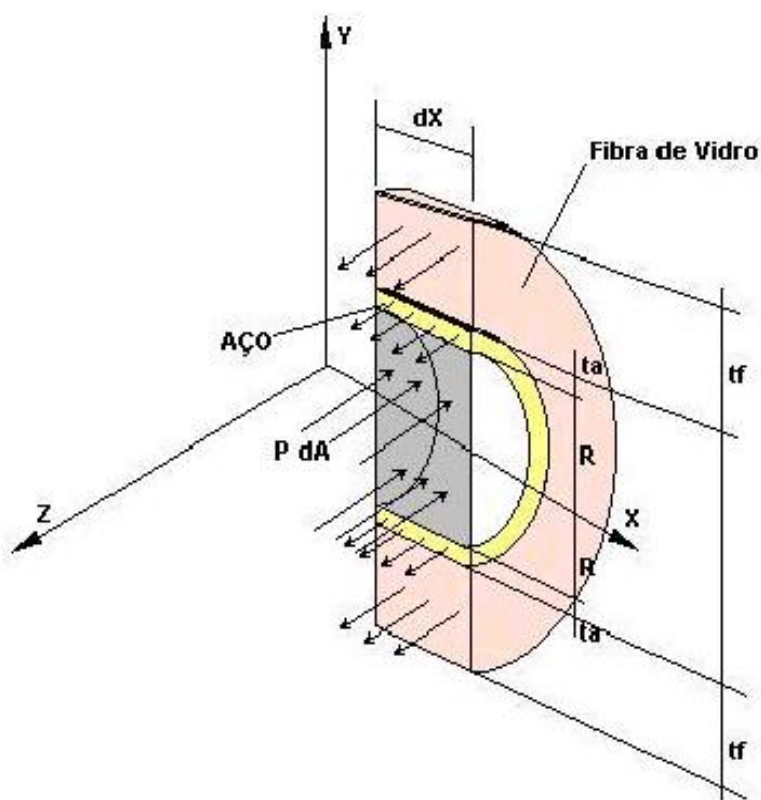


Figura 29 – Representação dos reforços da matriz reforçada

$$\Sigma F_z = 0$$

$$\sigma_a \cdot (2t_a \cdot \Delta x) - P(2r \cdot \Delta x) + \sigma_f \cdot (2t_f \cdot \Delta x) - P(2(r + t_a) \cdot \Delta x) = 0$$

$$\sigma_a \cdot t_a - P \cdot r + \sigma_f \cdot t_f - P \cdot r = 0$$

$$\sigma_a \cdot t_a + \sigma_f \cdot t_f = 2P \cdot r + P \cdot t_a$$

$$P = \frac{\sigma_a \cdot t_a + \sigma_f \cdot t_f}{2 \cdot r + t_a} \Rightarrow \text{pressao} \cdot \text{interna}$$

Considerando que a pressão interna seja dada por :

$$P = \frac{F}{A} \Rightarrow P = \frac{F}{\pi \cdot r^2}$$

$$\frac{F}{\pi \cdot r^2} = \frac{\sigma_a \cdot t_a + \sigma_f \cdot t_f}{2 \cdot r + t_a}$$

$$F = \left(\frac{\sigma_a \cdot t_a + \sigma_f \cdot t_f}{2 \cdot r + t_a} \right) \cdot (\pi \cdot r^2) \Rightarrow \text{Força} \cdot \text{aplicada}$$

Realizando os cálculos para as seguintes condições :

Aços –1020

$$\sigma_a = 137,29 \text{ Mpa}$$

$$t_a = 5,3 \text{ mm}$$

Fibra de vidro com 70% em peso de fibra presente na resina.

$$\sigma_f = 800 \text{ Mpa}$$

$$t_f = 45 \text{ mm}$$

Fazendo as substituições temos:

$$F = \left(\frac{137,29 \cdot 5,3 + 800 \cdot 45}{2 \cdot 31,5 + 5,3} \right) \cdot (\pi \cdot 31,5^2)$$

$$F = 1676267,265 \text{ Newtons} \rightarrow F = 170873,3196 \text{ Kg}$$

Houve um ganho significativo na resistência da matriz, se para essas mesmas condições tivéssemos utilizado aço teríamos:

$$F = 1676267,65 \text{Newtows}$$

$$\sigma_d = 137,29 \text{Mpa}$$

$$t = \frac{F}{\pi * r * \sigma_d} \Rightarrow t = \frac{1676267,65}{\pi * 31,5 * 137,29} \Rightarrow t = 123,379 \text{mm}$$

Tendo conhecimento que o processo de compactação da palha exige a aplicação de cargas de forma concentrada em uma matriz fechada, verificamos que para a realização de testes de compactação para cargas mais elevadas, sem o risco de ruptura, seria necessária a construção de uma matriz metálica de difícil fabricação.

Com a utilização de aço para a fabricação, a matriz se tornaria robusta (123mm de espessura de parede), além das dificuldades de fabricação que seriam enfrentadas. Utilizando fibra como reforço obtemos a uma matriz com resistência suficiente para resistir aos esforços envolvidos na compressão, para uma larga faixa de valores, muito acima do valor ideal para compactação da palha, podendo dessa forma realizar os testes com maior segurança.

4.3.3 Prensagem

Com a definição das ultimas adaptações para aprimoramento das condições de prensagem foi possível realizar uma nova série de testes com intuito de avaliar a faixa mais adequada e a carga que deve ser aplicada sobre material. O objetivo a partir desse ponto é estabelecer a carga que forneça para o material a consistência ideal para o manuseio, transporte, estocagem e utilização sobre as grelhas dos fornos de secagem de forma eficiente e evitar a utilização de valores de carga muito além da faixa que forneça as condições ideais.

Os experimentos foram inicialmente realizados com as limitações de carga fixadas pela resistência estrutural da matriz, com uma carga de 30 Toneladas obtemos um material prensado com pouca resistência e inadequado para as condições de queima previstas.

TABELA 5
CARGA APLICADA X CONSISTÊNCIA DO MATERIAL

Carga aplicada	Característica do material obtido
30 Ton	Material de pouca resistência
40 Ton	Material com pouca diferença em relação ao anterior
50 Ton	Material consistente pode ser manuseado e pouco quebradiço
55 Ton	Material consistente pode ser manuseado
60 Ton	Ocorreu o rompimento da Matriz



Figura 30 – Material obtido após compactação

Após o rompimento da matriz foi realizado seu redimensionamento. A carga foi aplicada de forma gradual e as deformações verificadas foram medidas conforme descrito na figura 31.

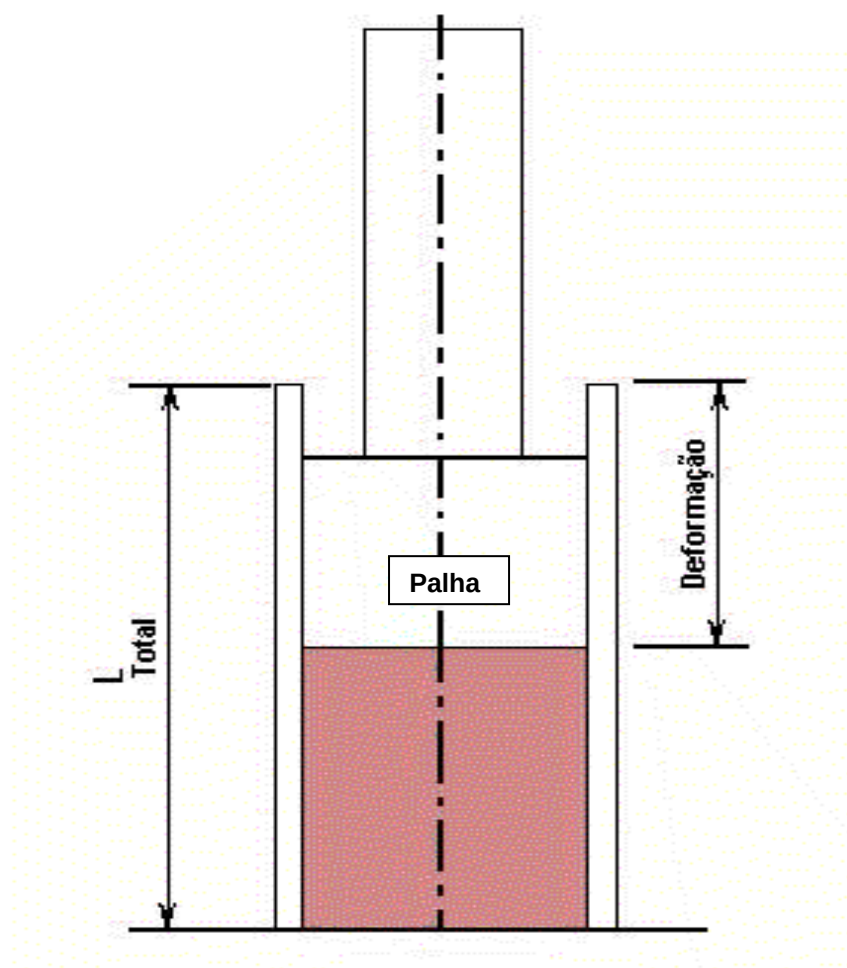


Figura 31 – Medida de deformações da palha

Os valores obtidos são mostrados na tabela 3.

TABELA 6
DEFORMAÇÃO X CARGA

DEFORMAÇÃO (m)	CARGA (Newtons)
0,121	981
0,133	1962
0,138	2943
0,145	3924
0,152	4905
0,155	6867
0,157	9810
0,161	14715
0,165	19620
0,167	29430
0,169	49050
0,172	98100
0,172	147150
0,174	196200
0,175	206010

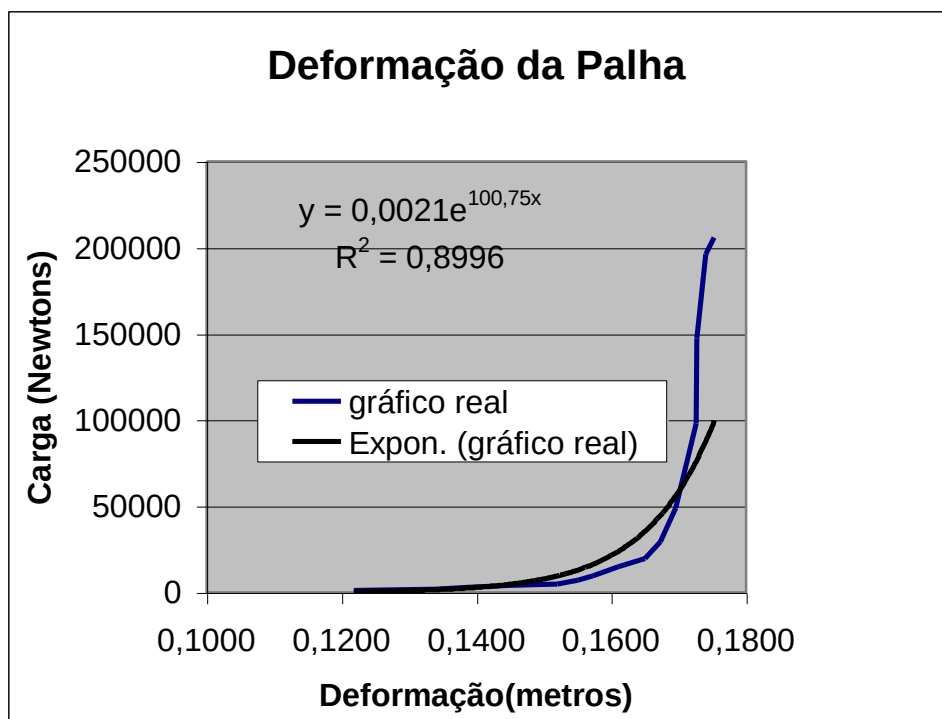


Figura 32 – Gráfico da deformação da palha

Com a definição do gráfico que descreve o comportamento da palha durante a compactação verifica-se alguns pontos relevantes referentes à linha que indica a evolução do valor da carga aplicada, conforme pode ser constatado a partir de uma carga de 20 Toneladas, não é identificada nenhuma deformação considerável, toda carga aplicada a partir desse ponto atua somente na aglomeração direta do material, ou seja passa a ocorrer a aderência das fibras, esse comportamento pode ser justificado pois todas as amostras de palha compactadas com uma carga inferior a 20 Toneladas apresentam pouca consistência conforme pode ser visto na Figura 33.



Figura 33 – Compactação com carga de 20 ton.

Um outro fator que pode ser avaliado com a análise do gráfico de deformação da palha (figura 32) diz respeito à energia total utilizada para a compactação, esse é um parâmetro importante, pois pode ser usado como variável de referência para dimensionamento de equipamentos específicos para a compactação de palha de café. Para a obtenção desse valor foi aplicada uma linha de tendência no gráfico de carga X deformação, de posse dessa linha foi obtida sua equação a partir de uma regressão exponencial, em seguida foi realizado uma integração, tendo como limites a deformação inicial e a deformação máxima observada, conforme descrito.

$$y = 0,0021 * e^{100,75x}$$

$$E_{comp} = \int_{0,1218}^{0,1753} 0,0021 * e^{100,75x} dx$$

$$u = 100,75x$$

$$du = 100,75dx$$

$$dx = \frac{du}{100,75}$$

$$E_{comp} = \frac{0,0021}{100,75} \int_{0,1218}^{0,1753} e^u du \Rightarrow 20,8436 * 10^{-6} * e^u \Rightarrow 20,8436 * 10^{-6} * e^{100,75x}$$

$$E_{comp} = 971,1131 \text{ joule} \Rightarrow E_{comp} = 0,231946 \text{ Kcal}$$

O valor obtido para a energia utilizada na compactação é de aproximadamente $E=0,23 \text{ Kcal}$, levando em consideração que a matriz utilizada para a compactação tem capacidade conter 126 grama de material, é possível fazer uma avaliação por unidade de massa .

$$E_{comp} = \frac{0,23 \text{ Kcal}}{0,126 \text{ Kg}} \rightarrow E_{comp} = 1,825 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

A energia utilizada por unidade de massa é **$E = 1,825 \text{ Kcal/kg}$** , sendo que o poder calorífico da palha é **3500 Kcal/Kg** , ou seja, a energia total utilizada para compactação da palha representa **$0,052 \%$** do poder calorífico.

4.4 Queima do material compactado

Inicialmente a análise de como se comportaria a palha compactada durante a queima foi realizada somente com a palha que foi compactada na prensa do laboratório de metalografia. Primeiro as amostras prensadas a frio foram colocadas em um forno, junto à lenha, que fornece calor para um secador de café. Interligando o forno e o cilindro onde ocorre a secagem do café, existe um duto com um ventilador que realiza a tiragem do calor do forno conduzindo-o ao cilindro, este rotativo. A palha iniciou a sua combustão rapidamente, não só na superfície externa, mas em todo o volume do material. A queima se

manteve de forma gradual e constante, até que, devido a forte sucção realizada pelo ventilador e o tamanho reduzido da amostra, o material foi levado entrando no duto de sucção.

Colocamos então a amostra, prensada a quente, no forno, a combustão também se iniciou rapidamente, mantendo-se constante e diferenciando-se da outra amostra pelo fato de a queima ocorrer, pela análise visual, da parte externa do material para a interna, ou seja, o material não se incendeia por completo como o prensado a frio.

Como a produção de amostras foi pequena devido às limitações impostas pela prensa do laboratório de metalografia, identificamos a necessidade de uma maior quantidade de testes, com o objetivo de analisar melhor a queima do material, em relação ao tamanho das amostras e resistência à sucção gerada pelo ventilador no forno. Com as novas amostras obtidas utilizando a matriz e a prensa hidráulica, e em quantidade maior, continuamos os testes de análise da queima com as mesmas condições dos testes anteriores.

Todas as amostras foram prensadas a frio, com diferença apenas na carga de prensagem e tipo de palha, melosa, misturada ou seca. Em todas elas comprovou-se que o material é resistente a sucção realizada pelo ventilador, pois em nenhuma das amostras houve desprendimento de partes durante o teste.

O comportamento em relação à queima foi similar ao da amostra de menor tamanho descrito acima, sendo que houve uma pequena variação entre as amostras de palha seca e as que continham a palha melosa. A palha melosa possui uma queima mais lenta, menos eficiente, gerando uma quantidade de fumaça maior, isto devido a maior umidade e quantidade de lignina presente.

O tamanho da amostra é um fator importante, pois logo durante o início da queima tanto da amostra de menor tamanho como da maior prensadas a frio, as amostras começam a aumentar de volume, estabilizando após alguns segundos. O material não chega a despedaçar, mas ganha vários poros ficando parecido com o material que é prensado com carga baixa e fica exposto ao ar por algumas horas (figura 33). Assim, se o tamanho da amostra prensada for muito grande, dependendo da posição que a mesma é colocada na fornalha e com o aumento de volume, esta pode se partir. Com isso

verificamos que amostras próximas ao tamanho da obtida nos testes iniciais de compactação seriam melhores para evitar este inconveniente.

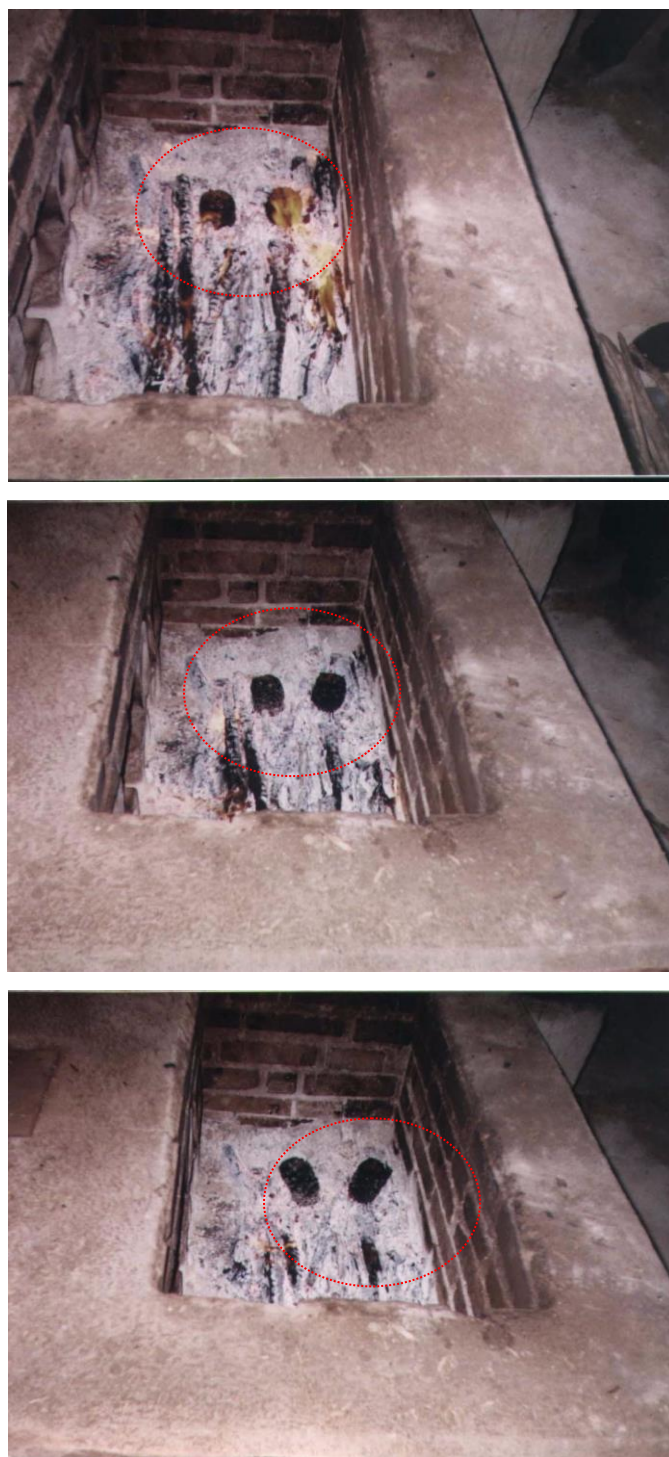


Figura 34 – Aumento de volume durante a queima

A amostra que apresentou os melhores resultados foi a realizada com prensagem a quente, esta não alterou o seu volume com a queima,

comportando-se parecida com a da madeira, mas visivelmente de forma mais eficiente, por ter maior densidade e menor umidade.

O tempo de queima completa da amostra de maior dimensão foi de aproximadamente 5 minutos.



Figura 35 – Brique de palha durante a queima

5 ANALISE DOS EXPERIMENTOS

Após a realização de todos os testes verificamos que a palha de café, sem sofrer nenhum tipo de tratamento se torna de difícil utilização como combustível, devido à dificuldade de aproveitamento direto nos fornos já que causa entupimento nas grelhas destes e além disto à sucção faz com que o material seja carregado para a tubulação.

O desenvolvimento de um alimentador se tornaria viável se a palha não possuísse um baixo poder calorífico quando dispersa.

A compactação foi a melhor solução encontrada, pois além de já existirem vários estudos nesta linha que comprovam a viabilidade de sua utilização nesta forma, pôde-se constatar que a palha adquire uma consistência alta quando prensada a quente e que a sua queima ocorre de maneira gradual e completa praticamente não gerando resíduos sólidos.

O material compactado a frio com carga baixa é uma alternativa mais barata de prensagem, já que não envolveria o gasto energético para aquecer a palha, porém sua utilização se limitaria a estar prensando e rapidamente queimando o material, sendo que desta forma o material ainda durante a queima expande e possivelmente com uma velocidade maior de tiragem ele poderia se despedaçar.

Com o aumento de carga de prensagem ganha-se uma maior consistência, mas que não chega próxima a que é conseguida com o incremento de calor, a palha também expande, mas de forma menos acentuada que a situação anterior e não se despedaça devido à tiragem de calor. Sua queima ocorre de forma satisfatória como já descrito acima.

6 SISTEMAS DE COMPACTAÇÃO.

De acordo com o resultados obtidos, pesquisas foram realizadas com o objetivo de identificar equipamentos já desenvolvidos que pudessem atender as condições para a prensagem da palha de café . As máquinas existentes no mercado são capazes de prensar diversos tipos de biomassa, sendo que

equipamentos específicos para a compactação de palha de café são desconhecidos ou pouco divulgados.

Dessa forma os princípios básicos de compactação de biomassa encontrados são descritos abaixo:

Prensa extrusora de pistão mecânico: tecnologia desenvolvida desde o princípio do século a bastante conhecida no mundo. Um pistão ligado excentricamente a um grande volante força o material a ser compactado por meio de um tronco de cone. No Rio Grande do Sul a empresa J. Mohrbach & Cia. LTDA Maquinas e Equipamentos Industriais fabrica este equipamento. Pela Figura 36 pode-se observar as características do equipamento.

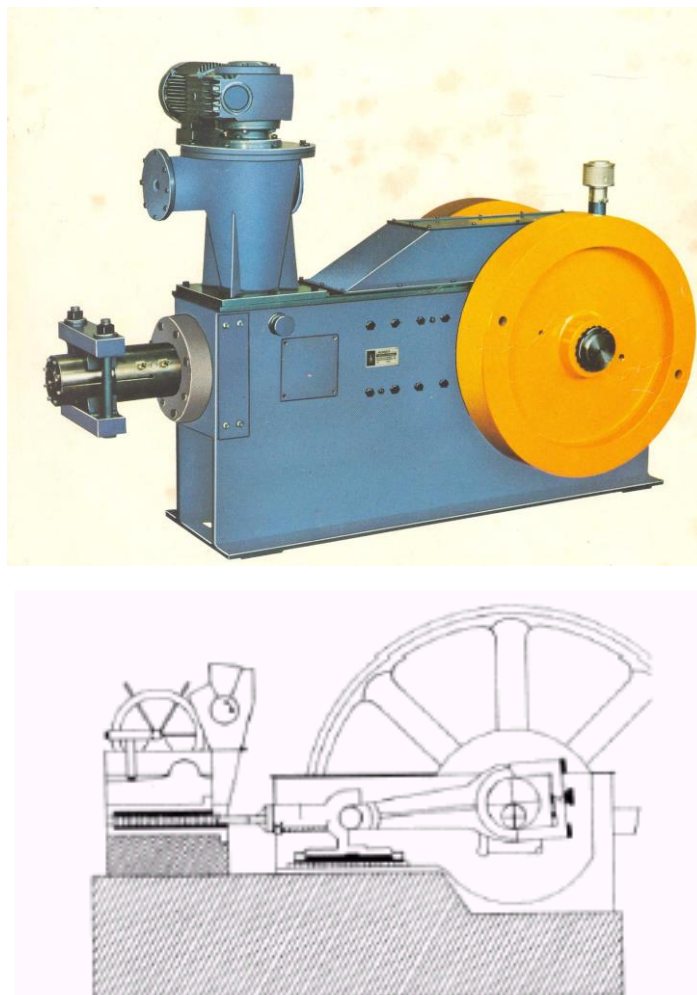


Figura36 – Prensa Extrusora de pistão mecânico

Prensa extrusora de rosca sem fim: processo muito usado para resíduos, no exterior. Apresenta excelentes resultados. Seu princípio mecânico é semelhante as marombas da indústria cerâmica. É um equipamento de fácil manutenção a de investimento favorável se comparado aos outros tipos também produzidos no exterior.

Prensa hidráulica: equipamento que usa um pistão acionado hidraulicamente. O material a ser compactado é alimentado lateralmente por uma rosca sem fim. Uma peça frontal ao embolo abre a expulsa o briquete quando se atinge a pressão desejada.

Peletizadora: é um equipamento que opera pelo processo extrusivo. Seu funcionamento é mostrado na Figura 37. É o princípio dos equipamentos de produção de ração animal, onde há necessidade de injeção de vapor para aquecer a corrigir a umidade. No Brasil existem três fabricantes desse equipamento para ração. Estes equipamentos vêm sendo experimentados para compactação de resíduos com resultados razoáveis. Operando com bagaço, produz peletes de diâmetro igual a 10mmX30 a 40mm de comprimento, densidade relativa de 1,2g/cm³ a densidade a granel de 550 kg/m³.

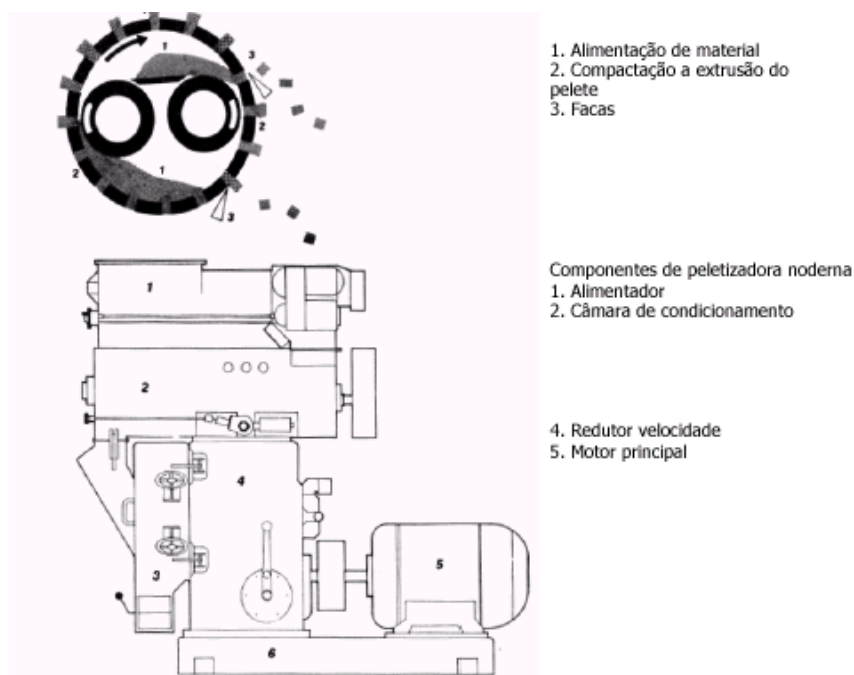


Figura 37 – Peletizadora

Enfardadeira: como o próprio nome indica, o equipamento comprime e amassa o resíduo, elevando a densidade do bagaço de cana com 20% de umidade a 500kg/m³. Não exige pré-secagem do material, o que permite a secagem posterior. No entanto, é aconselhável o enfardamento após a secagem. É um equipamento já produzido no Brasil, usado para ração e enfardamento de bagaço de cana.

É importante comparar estes processos com relação à exigência de umidade do resíduo, em função do consumo de energia na secagem. As extrusoras de rosca e de pistão mecânico trabalham com material a 10-12% de umidade. As de pistão hidráulico aceitam material com 18-20% de conteúdo de umidade. As peletizadoras trabalham com resíduos com até 20% de conteúdo de umidade, usando pressões de 80 a 320kg/cm². De qualquer maneira, a umidade que permanece no briquete após a prensagem virá a reduzir seu poder calorífico.

Excetuando-se as máquinas de enfardamento e as prensas de pistão hidráulico, as demais trabalham com altas pressões (acima de 1.000 kg/cm²), produzindo calor pela fricção da extrusão.

7 CONCLUSÃO

A utilização da palha de café como combustível nos fornos de secagem é viável nos itens em que se considera o poder calorífico da palha e densidade, superior ao da lenha utilizada atualmente, aproveitamento de um resíduo gerado no processo de beneficiamento do café, que com o passar do tempo apresenta um efeito cumulativo causando transtornos relativos a áreas para estocagem ou descarte, a produção de energia renovável, e redução da necessidade de áreas para cultivo de madeira destinada a queima.

Para que possa ser queimada de forma eficiente a palha depende do controle de fatores como o teor de umidade e carga de prensagem adequada. Este teor deve estar em uma estreita faixa. O resíduo muito seco ou com umidade elevada prejudicam o empacotamento do material, e produzem um briquete que não tem estabilidade, desfazendo-se quanto estocado ou

transportado. A carga de prensagem deve ser superior a 1736.7 Kg/cm², o que produz um briquete de densidade 0.95 g/cm³ e redução de volume em torno de 5 vezes. Este briquete é menos higroscópico e mais resistente ao apodrecimento ou à fermentação do que os resíduos na condição natural, facilitando a estocagem e mais ainda o transporte, porque amplia o raio econômico de seu aproveitamento.

O aproveitamento da palha depende do custo de seu processamento comparado ao da lenha.

Comparando o consumo de palha compactada ao da lenha, para secagem de café, temos:

O consumo médio de lenha no forno de secagem: $C_m = 45 \text{ Kg/h}$

PCI da palha compactada: $\text{PCI} = 3500 \text{ Kcal/Kg}$

PCI lenha: $\text{PCI} = 2500 \text{ Kcal/Kg}$

$V = \text{vazão}$

Quantidade de calor por hora: $Q = C_m * \text{PCI}$

$\rho = m/v$

$Q_{\text{lenha}} = 112500 \text{ Kcal/h}$

Considerando que $Q_{\text{lenha}} = Q_{\text{palha}}$, temos:

$$112500 = C_m * 3500$$

$$C_m = 32,142 \text{ Kg/h}$$

Dividindo pela densidade da palha compactada $\rho = 950 \text{ Kg/m}^3$

$$V = 0,0338 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para a lenha, temos:

$$V = 0,0542 \text{ m}^3/\text{h}$$

Levando em consideração o custo por m³ de cada combustível e considerando o custo da palha compactada igual ao custo do briquete de eucalipto existente no mercado, temos:

$$\text{Custo m}^3 \text{ briquete} = \text{R\$ } 28,00$$

$$\text{Custo m}^3 \text{ de lenha} = \text{R\$ } 25,00$$

$$\text{Valor por hora: } V_h = V * \text{Custo}$$

$$V_{h\text{palha}} = 0,965 \text{ R\$/h}$$

$$V_{h\text{lenha}} = 1,355 \text{ R\$/h}$$

TABELA 7
COMPARATIVO DE CUSTO

ITEM	LENHA	BRIQUETE
Consumo médio	45 Kg/h	32 Kg/h
Custo m ³	R\$ 25,00	R\$ 28,6
Custo por hora	R\$ 1,35	R\$ 0,97

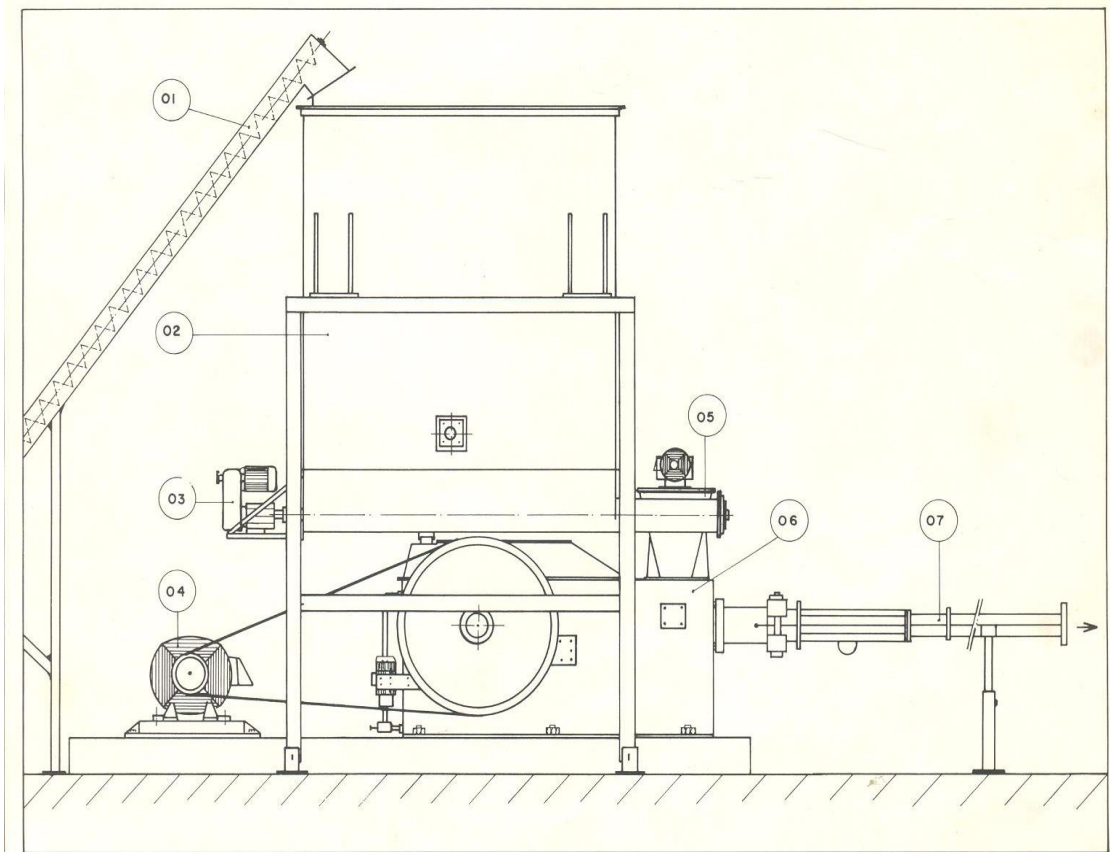
De acordo com o exposto acima o custo do briquete (m³) é superior ao da lenha, mas suas vantagens se tornam evidentes quando considerados fatores, tais como: maior densidade e poder calorífico.

Relacionando o consumo de lenha com o do briquete, devido a maior densidade deste, o consumo final de combustível é menor, reduzindo seu custo por hora. A lenha é comprada em m³ linear, ou seja, os espaços entre as unidades também são contabilizados, por outro lado o m³ de briquetes não contabiliza os espaços vazios, obtendo-se maior rentabilidade por unidade de volume.

No mercado capixaba, de acordo com o representante comercial da EUCABRAZ Produtos de Eucalipto LTDA, empresa pioneira na briquetagem resíduos de eucalipto no estado, Edu Alves Siqueira, o custo para a instalação da unidade de briquetagem gira em torno de R\$ 250 mil.

A figura ee mostra o esquema de uma unidade de briquetagem.

A compactação se tornará um processo vantajoso a partir do momento em que forem surgindo quantidades maiores de fornecedores de máquinas e serviços reduzindo o custo de compactação de biomassa em geral e/ou o desenvolvimento de equipamentos específicos para a compactação de palha de café.

**Legenda:**

- 01 Transportador de material seco
- 02 Silo de armazenagem
- 03 Transportador horizontal
- 04 Motor principal
- 05 Transportador vertical
- 06 Briquetadeira
- 07 Conductor de transporte

Figura 38 – Unidade de Briquetagem de Biomassa

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 A.W.R GARCIA, A.E.MIGUEL, V.S. NOGUEIRA, Estudo de Secagem do Café com queimadores a Gás. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 24, 1998, Poços de Caldas. Trabalhos Apresentados. Poços de Caldas: DOTYE M. Baeta Neves e Marcos F. Santos, 1998. p. 158-159.
- 2 MELO, Evair Vieira, SUNDER HUS, Adolfo Brás, FORNAZIER, Mauricio José. Indicativo para o café arábica das montanhas do Espírito Santo – Padronização e Classificação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 24, 1998, Poços de Caldas. Trabalhos Apresentados. Poços de Caldas: DOTYE M. Baeta Neves e Marcos F. Santos, 1998. p. 187.
- 3 CALDAS, Silvio F.B. MATIELLO, Viabilidade do Uso do G.L.P. Associado ao Vapor de Caldeira para Secagem de Cafés Conillon. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 26, 2000, Marília. Trabalhos Apresentados, Marília: DOTYE M. Baeta Neves e Marcos F. Santos, 2000. p. 37.
- 4 MELO, Evair Vieira. ZANDONADI, José Rubens. FORNAZIER, Mauricio José, Indicativos para a Cafeicultura do Espírito Santo, Classificação e Padronização – Safra 2000/2001. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 26, 2000, Marília. Trabalhos Apresentados, Marília: DOTYE M. Baeta Neves e Marcos F. Santos, 2000. p. 161.
- 5 VASCO, Jaime Zuluaga. Processamiento de frutos de café por via humeda y generacion de subproducto. In: SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE BIOTECNOLOGÍA NA AGROINDUSTRIA CAFEEIRA, 3, 1999, Londrina. Anais...Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 1999. p.345-348.
- 6 JOHN, Liana. Lenha ecologica é novidade do IBAMA, Campinas, 29 Abr. 2003. Disponível: www.estadao.com.br. [capturado em 10 jul. 2004].

- 7 BEER, Ferdinand P., JOHNSTON, Russel E. Resistência dos
Materiais. 3 ed. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1995. 651-656p.
- 8 CHARLES, J. A. CRANE, F.A.A. Selection and Use of Engeneering
Materials. 2 ed. Oxford: Butter Worth Heinemann, 1994. 58-61p.
- 9 METALURGIA & MATERIAIS, 2004. 547 ed.
- 10 www.athenas.com.br
- 11 www.tecnotermo.com.br