

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO – MTA**

**TECNOLOGIA DE MOAGEM DE CANA – APERFEIÇOAMENTO COM O USO DE
ROLOS DE ALTA CAPACIDADE DE DRENAGEM**

CLÁUDIO CÉSAR PRUDENTE DE OLIVEIRA

**Sertãozinho - SP
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO – MTA**

**TECNOLOGIA DE MOAGEM DE CANA – APERFEIÇOAMENTO COM O USO DE
ROLOS DE ALTA CAPACIDADE DE DRENAGEM**

CLÁUDIO CÉSAR PRUDENTE DE OLIVEIRA

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação MTA em Gestão Industrial do Setor Sucroenergético.

Aluno: Cláudio César Prudente de Oliveira

Orientador: Prof. Dimas Alfredo Barros Cavalcanti

**Sertãozinho - SP
2016**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, nosso criador, que me conduziu para o desenvolvimento e entendimento deste trabalho, e também à minha esposa Carla e meu filho Gabriel, que sempre me apoiaram e acreditam nos meus ideais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial ao Professor Dimas Alfredo Barros Cavalcanti, orientador dedicado que com sabedoria soube dirigir-me os passos e os pensamentos para o alcance de meus objetivos.

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma doaram um pouco de si para que a conclusão deste trabalho se tornasse possível: Marcelo Contó, Francisco Gabriel Granja Heilmann, Anderson Alirio Sesso, Hugo Henrique Schimidt e Juliana De Biase.

A minha esposa Carla e meu filho Gabriel por todo apoio e também por compreender que minha ausência nos sábados de curso e nos momentos de estudos era por uma boa causa: meu crescimento profissional. Aos meus pais e sogros. Todos não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Ao professor e coordenador do curso do MTA, Octávio Antonio Valsechi, pelo convívio, pelo apoio, pela compreensão e pela amizade.

A todos os professores do curso do MTA que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta monografia. Aos amigos e colegas, pelo incentivo e apoio constantes.

Aos alunos de minha classe do MTA, por todo esse período de convivência e muitas trocas de experiências.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
4. EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE MOAGEM.....	13
5. HISTÓRICO DO ROLO LOTUS	18
6. PROCESSO DE MOAGEM.....	20
7. REABSORÇÃO: UM LIMITADOR DO PROCESSO DE MOAGEM	22
7.1. Modelo volumétrico de moagem	23
7.2. Índice de reabsorção - definição e mecanismo	25
7.3. Critérios que afetam o índice de reabsorção.....	29
7.3.1. Nível de compactação aplicado na moenda	29
7.3.2. Nível de compactação aplicado na moenda – relação de enchimento	29
7.3.3. Nível de compactação X extração da moenda	30
7.3.4. Rugosidade superficial dos rolos	31
7.3.5. Velocidade de operação da moenda	32
7.3.6. Capacidade de drenagem e taxa de embebição	32
7.3.7. Regulagem das moendas	33
7.3.8. Passo e ângulo dos frisos dos rolos	33
7.3.9. Nível de preparo da cana, variedade da cana e teor de impurezas.....	34
8. CONTROLE DA REABSORÇÃO	35
8.1. Recursos para minimizar a reabsorção.....	35
8.2. Operação com cargas hidráulicas adequadas	35
8.3. Manutenção da solda tipo chapisco	36
8.4. Utilização de critérios de regulagem adequados.....	36
8.5. Equipamentos que auxiliam na redução da reabsorção	36
8.5.1. Moenda com dispositivo para controle da reabsorção.....	36
8.5.2. Moenda de dois rolos – Walker (Austrália)	37
8.5.3. Rolos de moenda com camisas perfuradas.....	38
9. HISTÓRICO DAS ALTERAÇÕES NO PROCESSO FABRICAÇÃO	39
9.1. Novos métodos para determinar condições de esforços e tensões	39
9.2. Otimização da distribuição e quantidade de furos.....	40
9.3. Funcionamento das camisas de alta drenagem.....	41

10. AVALIAÇÕES DE RESULTADOS FINANCEIROS	44
11. CONCLUSÃO.....	48
12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Comparativo entre sistemas.....	17
Figura 2. Comparativo entre sistemas.....	24
Figura 3. Reabsorção - Curva de pressão típica dos pinos.....	26
Figura 4. Formação da bolsa de caldo e distribuição das pressões no rolo.....	28
Figura 5. Diagrama de fatores da reabsorção.....	28
Figura 6. Solda tipo chapisco.....	31
Figura 7. Aplicação da solda tipo chapisco.....	32
Figura 8. Frisos e solda dos rolos.....	34
Figura 9. Moenda com dispositivo de controle de reabsorção.....	36
Figura 10. Moenda com dispositivo de controle de reabsorção.....	37
Figura 11. Moenda de dois rolos.....	37
Figura 12. Rolos de moenda com camisas perfuradas.....	38
Figura 13. Distribuição do fluxo.....	38
Figura 14. Rolos de moenda com camisas perfuradas.....	38
Figura 15. Análise através de elementos finitos.....	40
Figura 16. Análise através de elementos finitos.....	40
Figura 17. Distribuição e quantidade de furos.....	40
Figura 18. Escoamento do caldo.....	41
Figura 19. Distribuição dos furos.....	41
Figura 20. Detalhe das furações.....	42
Figura 21. Sistema de drenagem.....	42
Figura 22. Operação do sistema de alta drenagem.....	43

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Extração de Brix do primeiro terno.....	23
Equação 2. Extração de Brix.....	23
Equação 3. Densidade do bagaço.....	24

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Relação entre compactação e reabsorção.....	30
Gráfico 2. Resultados experimentais.....	31
Gráfico 3. Ganho em capacidade de moagem.....	46
Gráfico 4. Ganho em capacidade de extração.....	46
Gráfico 5. Redução da umidade final.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Custos de manutenção Camisa Perfurada x Convencional	44
Tabela 2. Ganho em capacidade de moagem.....	44
Tabela 3. Ganho em cogeração de energia	45
Tabela 4. Ganho em extração.	45
Tabela 5. Comparativo de desempenho	46

RESUMO

Um dos principais propósitos do rolo Lotus é auxiliar a drenagem do caldo extraído da região superior da camada de bagaço. Essa ineficiência no processo gera grande prejuízo financeiro para todo o setor sucroenergético mundial. O objetivo deste trabalho foi pesquisar as evoluções ocorridas no rolo Lotus desde sua criação por Jean Bouvet – que tinha como grande preocupação a reabsorção do caldo já extraído, uma vez que ainda no momento do processo de esmagamento, esse caldo retornava para o colchão da cana já esmagada com sacarose ainda em seu conteúdo e posteriormente com estudos e implementações de processos ocorridos, novos materiais, alterações geométricas, incorporações de novos conceitos, eliminação de conceitos equivocados, ou adaptações nos projetos originais pelas principais empresas fornecedoras de componentes de moenda e por técnicos e consultores especializados do mercado. Foi realizada análise crítica da evolução do processo de moagem no Brasil e no mundo, inclusive, no caso da implementação do Rolo Lotus, que objetivou eliminar o fenômeno da reabsorção do caldo em processo de moagem, visto como componente limitador do processo de extração em moagem por contato entre rolos de moenda. Com base nos estudos realizados e analisando resultados obtidos e testados em algumas plantas industriais que utilizam, por exemplo, Rolos de Alta Capacidade de Drenagem, podemos constatar que sua implementação está ofertando excelentes resultados, como sensível ampliação nos volumes de cana processada, ampliação na extração da sacarose contida nas células abertas e otimização da umidade do bagaço, aportando assim valor agregado ao sistema de extração de caldo de cana por contato. E, por fim, observa-se também o benefício da economia de combustível da própria caldeira, fatores que somados proporcionaram ganhos substanciais em todas as frentes de processo: etanol, açúcar, energia elétrica, etc. Pode-se então destacar os altos índices de satisfação e a soma da eficiência e produtividade geral dos resultados do processo de esmagamento da cana de açúcar, com maior lucratividade ao negócio de geração de energia limpa e renovável.

Palavras-chave: Setor Sucroenergético; Extração; “Rolo Lotus”, Moagem; Reabsorção.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as evoluções ocorridas no projeto do Rolo Lotus, que foi concebido para auxiliar a drenagem do caldo extraído da região superior da camada de bagaço.

Este trabalho faz ponderações relacionadas ao processo de moagem e ao sempre presente fenômeno de reabsorção, fato esse que limita a capacidade de extração das moendas. A intensidade com que a reabsorção ocorre não está relacionada apenas à capacidade de drenagem da moenda, mas sim a uma combinação de fatores relacionados ao processo de moagem.

Além disso, este trabalho faz uma análise da viabilidade econômica, visto que os custos de instalação de um Rolo Lotus são superiores aos rolos tradicionais, porém, em contrapartida, existe principalmente a expectativa de aumento de moagem e redução na umidade final do bagaço em pelo menos dois pontos percentuais.

2. OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa foi analisar a viabilidade técnica e econômica para a implementação dos Rolos Lotus nos ternos de moendas, principalmente no primeiro terno que tem como objetivo o aumento da capacidade de moagem, e no sexto terno que tem como objetivo a redução da umidade final do bagaço, tendo em vista todas as mudanças técnicas ocorridas desde sua concepção original em 1980, até os tempos atuais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A busca nos bancos de dados foi realizada utilizando as palavras-chave “setor sucroenergético”, “extração”, “Rolo Lotus”, “moagem”, “reabsorção”; terminologias comuns em português em sites como Única, Stab, Udop; seminários, palestras do setor sucroenergético e livros técnicos de autores como Émile Hugot e Peter Rein, além de Bibliotecas Digitais.

4. EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE MOAGEM

Por muito tempo, o processo de moagem por contato foi utilizado quase exclusivamente para a extração do caldo da cana-de-açúcar. Grande desenvolvedora de tecnologias, a África do Sul foi um dos países que mais fortemente investiram no processo de desenvolvimento de extração por difusão, nas décadas de 60 e 70. Esse investimento tecnológico foi baseado no processo já existente da beterraba. Comercialmente, pouquíssimas opções se destacam para o processamento da cana-de-açúcar. Atualmente, o setor continua apenas com estas duas alternativas comerciais para o processo de extração: moagem e difusão.

Praticamente, pouco se investiu no desenvolvimento de algum outro processo diferente dos atualmente disponíveis, como o caso do LPE (*Low Pressure Extraction* da Voith, no Brasil na década de 80) ou como o caso do sistema de extração hidrodinâmico proposto por Maxime Rivière (*Ilha La Réunion* na década de 80). No Brasil, na década de 90, o Centro de Tecnologia Coopersucar investiu até a fase de protótipo, interrompendo a continuidade do projeto quando da necessidade de uma unidade de demonstração comercial. No desenvolvimento de novas tecnologias ou no aperfeiçoamento das existentes, além da busca ou da melhoria do desempenho, um ponto comum em todas é o esforço para diminuir o investimento inicial, reduzir os custos de manutenção e de operação e minimizar o consumo de energia.

No Brasil, a maior evolução ocorreu um pouco mais adiante e com um foco diferente, experimentamos em nosso país grande evolução no processo de moagem, iniciada na década de 1970. Esta evolução focou sua meta em processamento de grandes escalas de moagem, ou seja, operamos nossas safras em grandes capacidades. Sem perdermos a atenção no desenvolvimento geral de processos, focamos também estudos de desenvolvimento em extração do caldo de cana. Neste processo de evolução, tivemos o Centro de Tecnologia Coopersucar como grande timoneiro tecnológico, incrementando estudos contando sempre com o apoio de consultorias da Austrália, África do Sul e Havaí. No plano do desenvolvimento tecnológico, também contamos com grande dose de colaboração de destacados consultores brasileiros, no que concerne a tecnologia da extração de caldo por moagem, buscou-se inclusive nos dias de hoje a otimização dos processos de moagem.

[...] essa melhoria do desempenho pode ser mais bem expressa em termos da evolução da capacidade específica de moagem por volume de rolos utilizados no processo e da redução do consumo específico de energia na operação de moagem.

No primeiro caso, na década de 1970, a capacidade específica era da ordem de 11 tch/m³ de rolos, sendo que, nos dias atuais, essa capacidade aumentou para valores da ordem de 16 a 17 tch/m³ de rolos no processo de moagem, caracterizando um melhor aproveitamento do porte dos equipamentos utilizados, com conseqüente redução do investimento inicial e dos custos de manutenção por tonelada de cana.

Ao mesmo tempo, o consumo específico de energia foi reduzido de 17 cv/tch para 11 cv/tch, considerando apenas a operação de moagem, sendo que essa diferença pode ser contabilizada na redução de investimentos e dos custos de manutenção, ou como adicional de receita pela maior disponibilidade de energia para ser comercializada. (DELFINI, 2016)

Considerando-se todos estes pontos, inclusive com a incorporação de recursos de automação com conseqüente otimização nos controles dos processos industriais, notamos grande redução de custos e de perdas industriais com nossas Usinas desempenhando uma forte evolução nos índices de extração apurados, evoluindo de médias de 92% para patamares próximos de 97% em média, ofertando aos empresários do segmento, melhores resultados em receitas financeiras visto que se passou a verificar uma maior recuperação dos açúcares contidos na produção agrícola. Todas estas evoluções proporcionaram ao nosso país, reconhecimento mundial na excelência de produção com alta performance no processo de moagem, proporcionando ao nosso segmento sucroenergético condições de fortalecimento, otimização de ganhos de escala com redução de custos, inclusive com reforço na condição de superação de dificuldades.

Por se tratar de *commodity*, o etanol, açúcar e energia, produtos com reduzido valor agregado e que são suscetíveis a intervenções do governo, além de fatores outros, em sua produção, que fogem do controle de processo, tais como: chuvas, geadas, etc, passou a existir uma busca frenética por reduções de custos e de perdas no processo. Nessa busca de alternativas, muitos resultados em processos otimizados encontrados principalmente na África do Sul foram aproveitados em nossas Usinas.

Foram nesses momentos, principalmente a partir dos anos 80, que se buscou com muita ênfase, reduções de custos em manutenção, consumo de energia e melhoria em extração. Assim, nossa indústria passou a considerar a utilização do sistema de extração de caldo com utilização de difusores.

Mas foi a partir do ano 2000 que houve uma grande expansão na instalação de difusores, mais do que dobrando a quantidade desses equipamentos no Brasil. Diferente dos outros países onde ele vinha sendo utilizado, no Brasil, o objetivo de operar com capacidade elevada também foi perseguido para esse processo. Com os mesmos parâmetros dimensionais dos difusores utilizados no exterior, tiveram que ser submetidos a uma condição de operação com maior velocidade, reduzindo o tempo de permanência da cana no processo, afetando negativamente os níveis de extração, impedindo alcançar os mesmos valores obtidos em outros países.

A adaptação do setor a essa nova tecnologia, operando em condições de carga diferente daquelas utilizadas no exterior, não tem permitido obter os mesmos resultados de redução de custos de manutenção, porém uma boa adequação mecânica permitirá contar com esse benefício em futuro próximo. Por outro lado, os níveis de extração dos difusores, já comprometidos pela redução do tempo de permanência, também sofrem forte impacto negativo, em função da qualidade da cana, tanto com relação às impurezas minerais como vegetais, mostrando-se muito mais sensível a essas condições, quanto comparado com o processo de moagem.

Para atenuar essa condição desfavorável em relação à extração e também à capacidade, a instalação de 1 terno de moenda antes do difusor, transformando-o em difusor de bagaço, tem sido considerada, porém, nesse caso, é preciso rever se os benefícios de redução da manutenção e do consumo de energia inerentes a esse processo não acabam sendo muito reduzidos, ou até mesmo eliminados. (DELFINI, 2016)

Pondo-se a ponderar acerca da utilização de difusores de cana, existem alguns pontos que poderiam anular, em comparação a utilização de moendas, volumes de processamento e expansões de capacidades, pois no processo de difusão em seu investimento de partida, custos de manutenção bem como operação e consumo de energia ficaria em desvantagem em comparação a utilização de moendas.

Ressalta-se como fator extremamente importante no processamento da cana seja por difusor ou moenda, a logística interna da cana totalmente fornecida por processo mecanizado. Para cana colhida mecanizadamente, ocorreram possibilidades de substituição de transportadores metálicos por transportadores com correias. Esta substituição acabou permitindo redução de investimentos nos custos de consumo de energia e manutenção, eliminaram-se também os picadores no preparo da cana por desfibradores, auferindo-se grande economia de recursos financeiros.

Em contrapartida, o aumento significativo na mecanização da colheita também acabou por contribuir para o aumento das impurezas vegetais na cana, o que tem resultado em prejuízos significativos para a capacidade de processamento e para os níveis de extração, viabilizando o investimento nesse sistema. E para que

seja possível obter uma melhor utilização da biomassa para uma maior produção de energia ou como matéria-prima para outros produtos, uma das opções é trazer a biomassa junto com a cana, tornando quase obrigatória a incorporação de um processo de limpeza a seco para separação das impurezas vegetais adicionais (DELFINI, 2016).

Diversos sistemas encontram-se em desenvolvimento, implantação e operação, em diversas unidades produtoras, com resultados de eficiência bem diferentes, ressaltando o fato de não existir, atualmente, uma metodologia única para essa finalidade, que permita uma boa comparação entre as eficiências apuradas nas diversas instalações existentes. Em resumo, a tecnologia de extração encontra-se num patamar de desenvolvimento que pode ser considerado altamente satisfatório. Basta que sua operação tenha um bom controle e seja mantida dentro das condições que propiciam os resultados esperados para ela. (DELFINI, 2016).

No caminhar de todas as evoluções tecnológicas, sempre existiram oportunidades para se introduzir, seja por novas ideias, ou por outros acasos tecnológicos eventualmente não bem-sucedidos em tempos passados, que acabaram retornados em versões melhoradas e compatibilizadas, como ocorreu com as camisas de alta drenagem, que, outrora abandonadas em sua utilização no Brasil, agora retornam à utilização com resultados extraordinários em nossas Usinas.

Para este sistema de camisas perfuradas e drenadoras de caldo, excelentes benefícios constatados em sua utilização são a redução dos índices de umidade quando instalada no último terno e aumento substancial de capacidades quando instalada no primeiro terno. Faber (2014) afirma que, além destes benefícios citados anteriormente, pode-se elencar outros como: redução no efeito da reabsorção, redução na perda de açúcar no bagaço, permite maiores taxas de embebição, reduz significativamente o transbordo de caldo sobre o rolo superior, reduz deslizamento entre camisa e bagaço e aumenta a eficiência das caldeiras.

A figura abaixo ilustra a condição de drenagem do caldo extraído numa moenda convencional e numa moenda com camisa perfurada no rolo superior, que melhora as condições de drenagem e permite um melhor contato entre a cana ou o bagaço com a superfície do rolo.

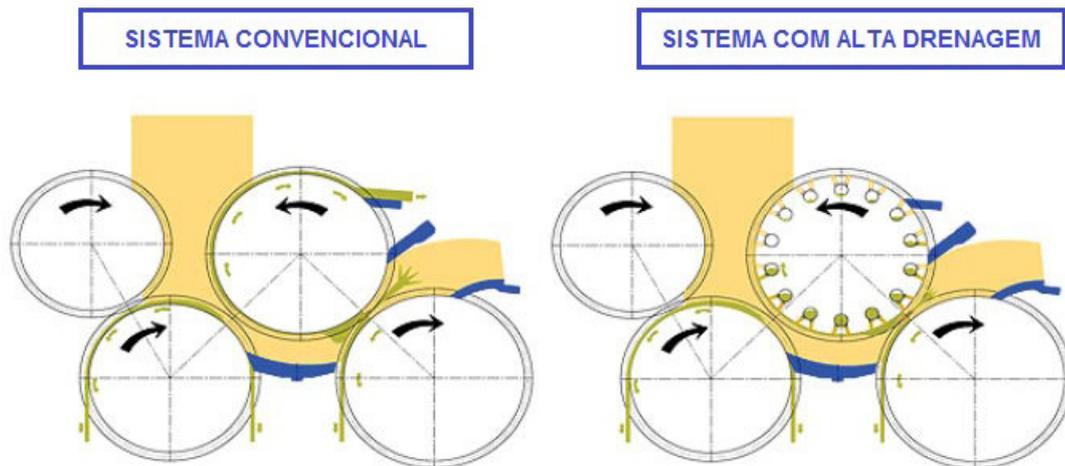


Figura 1. Comparativo entre sistemas
 Fonte: DELFINI (2016)

Porém, de nada adianta dispor de todas essas tecnologias e aperfeiçoamentos dos equipamentos e dos processos se não contar com um bom sistema de medição para controlar efetivamente a recuperação e o desempenho do processo de extração, tarefa esta que se inicia na fase de amostragem da cana e do bagaço, que, feita de maneira inadequada, leva a resultados incorretos, os quais, na maioria dos casos, não permitem visualizar condições que poderiam estar sendo tratadas, visando à melhoria da eficiência e à redução dos custos, uma vez que é no processo de extração que normalmente ocorre a maior perda industrial, e pequenos ganhos representam um grande retorno, principalmente quando se opera com margens de lucro extremamente reduzidas ou até negativas. (DELFINI, 2016).

Os próximos capítulos deste trabalho detalham a aplicação desta nova tecnologia, com seus custos adicionais, com os seus pontos fortes e fracos.

5. HISTÓRICO DO ROLO LOTUS

Para uma melhor compreensão e entendimento é necessário conhecer um pouco da história deste projeto e quais eram seus objetivos.

Jean Bouvet pôs a estudar alternativas de ampliação dos benefícios com mitigação de perdas em sistemas de extração de caldo por contato (HEILMANN, 2015).

O rolo Lotus foi inventado e instalado primeiro em Taiwan por Bouvet (1976). Ele consiste de uma camisa de aço fundido tendo uma série de furos de drenagem radiais na raiz de cada friso, espaçados a intervalos regulares ao redor da circunferência. Estes furos drenam em canais axiais ao longo da largura do rolo, sem contato com a cana que está sendo moída, descarregando do lado externo do flanco do Lotus. Plugues de aço temperado com pequenos orifícios são inseridos nas entradas dos buracos de drenagem radial para evitar a entrada das partículas maiores que podem bloquear as passagens subsequentes e resistir ao desgaste dos buracos (manter o perfil do orifício). (REIN, 2013, p. 134)

Heilmann (2015) relata que os estudos de desenvolvimento do projeto foram na década de 1970, porém tem-se no Brasil uma única patente depositada em 26 de setembro de 1985 pelo próprio Bouvet com numeração PI 8504736-8, com o título “Rolo de moenda com capacidade de moagem aumentada”.

“Refere-se esta invenção a equipamento usado na moagem e extração de caldo de cana de açúcar e semelhantes. Uma moenda convencional possui um rolo superior e no mínimo um rolo inferior associado com o mesmo. Desta forma, o colchão de cana-de-açúcar é esmagado entre eles para extrair o seu caldo. Uma quantidade substancial de caldo extraído tende a começar a embeber o colchão e é reabsorvido depois que esse colchão passa entre o rolo superior e inferior. Isso leva a intenção descrita na minha patente [...]”. (HEILMANN, 2015)

A grande preocupação de Bouvet era a reabsorção do caldo já extraído, que era rico em sacarose, pois este caldo, ainda no momento do processo de esmagamento, retorna para o colchão da cana já esmagada e caminha para os outros ternos de moenda, mantendo o bagaço ainda rico em sacarose, menciona Heilmann (2015).

Já com a utilização do Rolo Lotus, no momento da compressão e rápida fuga do caldo de cana pelos canais de drenagem, este fenômeno de reabsorção tende a ser reduzido, pois ao invés de retornar para o colchão da cana esmagada, o caldo de cana extraído, escapa pelos furos de drenagem aumentando

a extração da sacarose da cana. Este é um dos grandes êxitos e benefícios da invenção de Bouvet, afirma Heilmann (2015).

6. PROCESSO DE MOAGEM

Separar o caldo que contém os açúcares do restante da cana é o objetivo da moagem, ou seja, separar o caldo da fibra da cana, considerando que a cana é composta basicamente de duas partes: fibra (sólidos insolúveis) e caldo (água e sólidos dissolvidos). A extração pode ser definida e medida de diferentes formas, tais como extração de pol, extração de ART, extração de Brix e extração de caldo (DELFINI, 2014).

A cana de açúcar após passar pelo sistema de preparo, onde recebe o ataque de jogos de facas e desfibradores de martelos oscilantes, expõe as células de sacarose (open cells), entra na moenda através de uma calha denominada Shute Donelly, a cana desfibrada precipita entre os rolos de moenda por gravidade. Chama-se de terno de moenda, um conjunto de rolo superior e inferior de entrada, um inferior de saída e outro de pressão que são montados e apoiados em dois castelos de moenda, que são os pilares sustentadores do terno de moenda, um quarto rolo denominado rolo de pressão tem a finalidade de adensar a cana desfibrada harmonizar e distribuir o fluxo de cana na entrada da moenda. Um tanden de moenda pode ser composto por quatro, cinco ou seis ternos de moenda, sendo que em algumas unidades existem dois e até três tanden de moendas. (HEILMANN, 2015 apud FABER, 2014)

A cana já em forma desfibrada entra através da calha Shute Donelly no primeiro terno de moenda onde será comprimido pelo rolo inferior de entrada com o rolo superior; em seguida acontece uma segunda compressão entre o rolo inferior de saída também com o rolo superior; neste primeiro embate, no primeiro terno, temos o caldo primário, relata Heilmann (2015). O bagaço proveniente desta primeira esmagada segue através da esteira entre moendas, para o segundo terno, que recebe novamente duas esmagadas (compressões) como as acontecidas anteriormente.

Este processo de moagem dito por esmagamento ocorre sucessivamente pelos próximos ternos até o ultimo terno, descreve Heilmann (2015). Ainda, o bagaço da cana restante após estes processos obtém umidade próxima de 50% e na condição favorável de combustível é possível alimentar a caldeira, onde é queimado para produção de vapor que será utilizado em todos os processos e no retro acionamento das próprias moendas.

No encaminhar da moagem, onde a cana de açúcar se transforma em bagaço, ocorre a embebição com adição de água, a extração de açúcares se faz através da lavagem da cana em moagem, onde ocorre a captura da sacarose de dentro das células abertas. Os rolos de moenda obedecem a uma posição triangular, os rolos inferiores trabalham de uma maneira fixa, ao passo que o superior oscila em movimentos de sobe e desce em função da espessura do colchão de cana que atravessa a moenda, e a contrapressão exercida pelo mesmo.

Um terno de moenda deve ser utilizado em sua eficiência plena. A eficiência de uma moenda se apoia em dois parâmetros, capacidade e extração. A capacidade está relacionada com a quantidade de cana a ser processada, e a eficiência será maior quanto maior for à extração da sacarose contida na cana e extraída pelas moendas. (HEILMANN, 2015 apud FABER, 2014)

7. REABSORÇÃO: UM LIMITADOR DO PROCESSO DE MOAGEM

Durante o processo de moagem, sempre ocorre a reabsorção, que passa a ser um dos fatores mais importantes que limitam a capacidade de extração. A força com que a reabsorção ocorre não está relacionada apenas com a capacidade de drenagem da moenda, mas sim com uma combinação de fatores relacionados ao processo de extração, conforme descreveu Delfini (2014).

No modelo de moagem simplificado acima é assumido que não ocorre absorção. O que é reabsorção?

Ao passar a cana através da moenda, assume-se que o primeiro produto extraído seja o ar. A extração de caldo, na verdade inicia-se antes que todo o ar seja removido (por exemplo, pela compressão final no rolo de saída de um terno de moenda) o bagaço é definido como estando numa condição "sem vazios".

Os componentes remanescentes então são somente fibra e caldo, os quais são ambos efetivamente incompressíveis. A densidade destes produtos pode ser medida. A da fibra seca, ρ_f é cerca de 1.530 kg/m^3 e a do caldo ρ_c está entre 1.000 e 1.030 kg/m^3 , dependendo do seu Brix e temperatura.

Na prática, fatores de reabsorção da ordem de 1,2 a 1,6 são observados em moendas bem operadas. (REIN, 2013, p. 123 e 124)

Em seu modelo, Rein (2013, p. 124) considerou que não há escorregamento horizontal da alimentação de cana em sua passagem através da moenda. O autor também ressalta que em condições de extrusão considera que não pode ser verdadeira, porque para isso precisa haver escorregamento e/ou cisalhamento do colchão de cana.

A reabsorção limita a quantidade de caldo que pode ser extraída em qualquer estágio particular de moagem. O total de reabsorção é dependente de uma série de fatores e será geralmente reduzido por:

- Superfície do rolo em condições de maior rugosidade,
- Taxa de vazão de fibra mais baixa,
- Velocidades periféricas dos rolos mais baixa,
- Menos embebição,
- Menor relação entre as aberturas de entrada/saída em trabalho (razão de moenda),
- Melhor preparo,
- Pontos de drenagem melhores (ângulos dos frisos melhores, rolo Lotus, ranhuras Messchaert, etc).

(REIN, 2013, p. 124)

Para Rein, P. (2013) todas essas medidas elencadas causam efeitos negativos na confiabilidade mecânica, vazão e/ou extração, e por isso faz-se necessária uma acomodação equilibrada desses pontos.

De acordo com Rein (2013, p.125), é possível notar, algumas vezes, ocorrências conhecidas como “esguichamento” de caldo nas regiões das aberturas de saída das moendas. Este é um efeito similar à reabsorção, embora o caldo possa ter fluido para adiante através de espaços na raiz dos frisos dos rolos ao invés de atravessar a camada de fibra. Segundo o autor, para minimizar ou até mesmo conter espirros de caldo, geralmente as mesmas medidas citadas acima podem ser consideradas para reduzir a reabsorção.

7.1. Modelo volumétrico de moagem

Rein (2013, p. 125) apud Murry e Holt (1967, p. 11-13) mostraram como o modelo volumétrico de moagem pode ser usado para modelar e/ou prever a extração ou pelo menos as alterações na extração. Para o primeiro terno, a extração de Brix $E_{bx,1}$ pode ser calculada se os três parâmetros, fator de reabsorção K , taxa de preenchimento C_F e coeficiente de embebição η_{Umb} , são conhecidos:

$$E_{Bx,1} = \frac{\eta_{Umb,1} \left(1 - \frac{k_1}{C_{F,1}} \cdot w_{F.C} \cdot \frac{\rho_C}{\rho_F} \right)}{1 - w_{F.C} \cdot \frac{\rho_C}{\rho_F}}$$

Equação 1. Extração de Brix do primeiro terno
Fonte: REIN (2013, p. 125)

Isto é um pouco mais complicado para os ternos seguinte, em função da embebição. Então para o primeiro terno:

$$E_{Bx,1} = 1 - \frac{1 + \frac{w_{RDS,Imb}}{w_{RDS,H}} \cdot w_{F,B,i} \cdot q_{Imb,i}}{\frac{1}{w_{F,B,i-1}} \cdot \frac{\rho_F}{\rho_{B,i-1}} + q_{Imb,i} \cdot \frac{\rho_F}{\rho_{Imb,i}} - 1} \cdot \eta_{Imb,i} \cdot \left(\frac{k_i}{C_{F,i}} - 1 \right)$$

Equação 2. Extração de Brix
Fonte: REIN (2013, p. 125)

Nestas equações, w_{RDS} é o teor de sólidos refratométricos (Brix), w_{FC} e w_{FB} são o teor de fibra da cana e do bagaço, respectivamente, e $q_{Imb,i}$ é a massa líquida de embebição aplicada ao terno i em relação à massa de fibra.

A densidade da cana ρ_C pode de ser considerada como sendo 1.130 Kg/m³ para a maioria das variedades de cana, e a densidade do bagaço ρ_B é calculada como a combinação de seus componentes caldo e fibra, como segue:

$$\rho_B = (1 - C_F/k) \cdot \rho_J + (C_F/k) \cdot \rho_F$$

Equação 3. Densidade do bagaço
Fonte: REIN (2013, p. 125)

Alguma interação é necessária na solução destas equações para um tandem de moenda. Um exemplo é dado por Murry e Holt (1967, p. 23:33). A utilidade deste modelo depende da confiabilidade dos valores de K e η_{imb} disponíveis (REIN, 2013, p. 125).

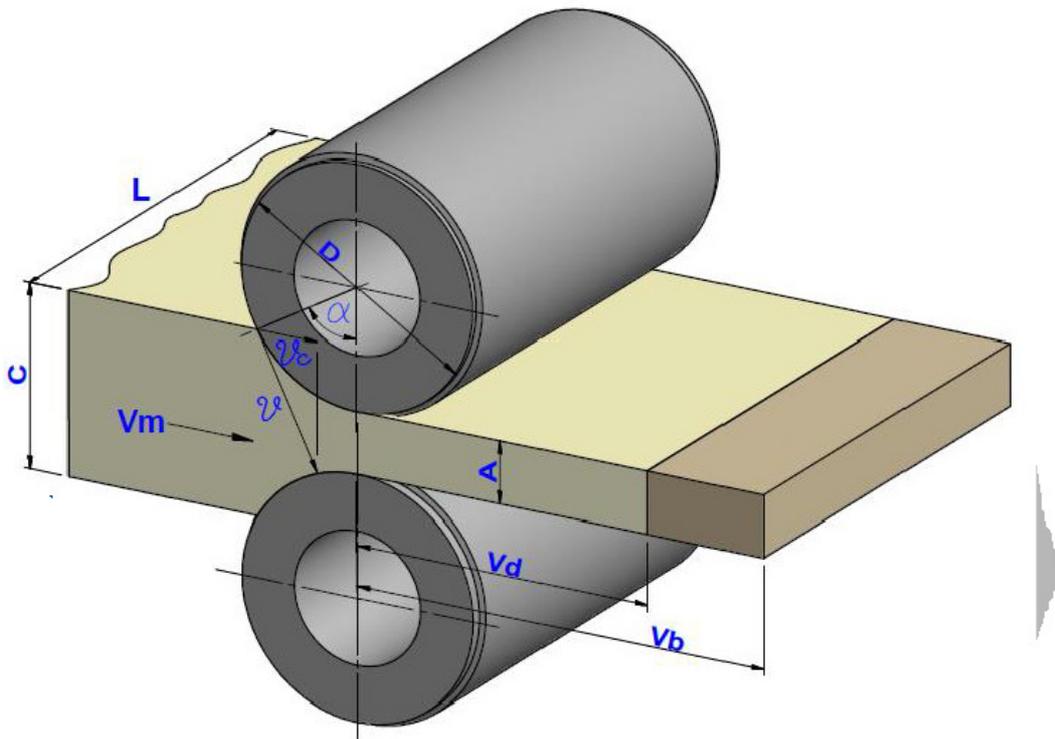


Figura 2. Comparativo entre sistemas
Fonte: REIN (2013, p. 125)

Segundo Delfini (2014):

- **Volume descrito (Vd):** Volume gerado na unidade de tempo por um par de rolos com diâmetro D e comprimento L, girando a

uma determinada velocidade ϑ , com uma abertura em trabalho A entre eles.

$$V_d = L \times A \times \vartheta$$

- **Volume de caldo extraído teórico (V_{jet}):** Diferença entre o volume sem vazios de material (V_m) entrando no par de rolos e o volume descrito pelo par de rolos (V_d).

$$V_m = V_{fibra} + V_{caldo}$$

$$V_{jet} = V_m - V_d$$

- **Volume de caldo extraído (V_{je}):** Diferença entre o volume de material (V_m) entrando no par de rolos e o volume de bagaço na saída do par de rolos (V_b).

$$V_{je} = V_m - V_b$$

$$V_b = V_d?$$

$$V_{jet} = V_{je}?$$

Portanto temos:

$$V_b > V_d$$

$$V_b/V_d = k = \text{Reabsorção}$$

$$K > 1,0$$

$$\text{Tipicamente } K = 1,40$$

$$V_b = K \times V_d$$

$$V_{je} = V_m - k \times V_d$$

$$V_{jet} = V_m - V_d$$

$$V_{je} < V_{jet}$$

7.2. Índice de reabsorção - definição e mecanismo

Mas afinal, o que é esse fenômeno denominado reabsorção e qual a sua relação com o bagaço?

Sob condições experimentais cuidadosamente controladas no Instituto de Pesquisa de Açúcar e na Universidade de Queensland, na Austrália, demonstrou-se que o volume de bagaço sem espaços vazios descarregado de uma moenda de alta compressão é maior do que o volume desenvolvido no ponto final de pressionamento. Este fenômeno é descrito como reabsorção.

A relação entre o volume de bagaço sem espaços vazios e o volume desenvolvido é denominada fator de reabsorção K.

$$K = V_B / V_{esc}$$

Na prática, fatores de reabsorção da ordem de 1,2 a 1,6 são observadas em moendas bem operadas. (REIN, 2013, p. 125)

Vários pesquisadores já estudaram, mediram e discutiram os mecanismos envolvidos neste processo.

Rein (2013, p. 124) apud Crawford (1957, 1959, 1970) postulou que a pressão no bagaço atinge um pico imediatamente antes da abertura em trabalho (ponto de compressão num ângulo do rolo entre 0° e 5°) entre os dois rolos. Nesta pressão o caldo livre não consegue mais permear para trás através da fibra densamente compactada, para escapar. Deste ponto então, o caldo flui para frente através da fibra e o caldo desloca para frente através da abertura em trabalho, a uma velocidade mais alta do que a velocidade periférica do rolo.

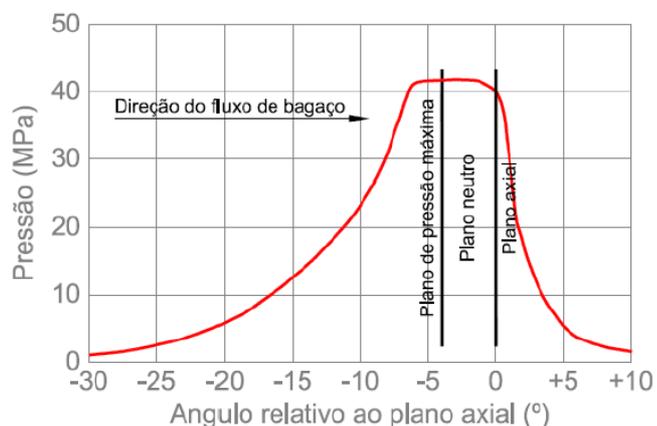


Figura 3. Reabsorção - Curva de pressão típica dos pinos
Fonte: REIN (2013, p. 124)

No gráfico é possível observar melhor este fenômeno e os momentos de pico de pressão antes do ponto de compressão:

Jenkins (1966, p. 106-107) discutiu os mecanismos possíveis envolvidos neste fenômeno. A pressão de pico é usualmente atingida a uma posição entre 3° e 7° antes do ponto de compressão. A partir daí a pressão no bagaço permanece efetivamente constante até ele ser liberado após o ponto de compressão (MURRY; HOLT, 1967, p. 63).

Isto foi confirmado por registros das pressões medidas por pinos de pressão inseridos em rolos de teste. Holt (1961) confirmou que a massa total de bagaço é extrudada sob uma condição suficiente de pressão.

O plano neutro é definido como a posição em que a velocidade média do bagaço para frente é igual a velocidade periférica do rolo plano axial. Após o plano neutro, o bagaço acelera para uma velocidade maior que a da superfície do rolo (Murry e Hold, 1967, p. 41). A pressão máxima ocorre no plano neutro (ibid:60) e não há caldo livre ou extração após esta posição (ibid:58). (REIN, 2013, p 124)

Delfini (2014) ressalta uma análise de Hugot, onde havia contradições com relação a velocidade periférica dos rolos:

Por muito tempo se acreditava que o bagaço passando entre os rolos de moenda se desloca com uma velocidade igual à periférica dos rolos que o move. A primeira edição deste manual foi baseada nesta hipótese; porém medições mais precisas demonstraram que isto não é correto. Já em 1928, Egeterem Java estabeleceu que o volume do bagaço comprimido, à medida que passa entre os rolos, é maior que o volume gerado pelos rolos. Ele encontrou muito ceticismo, pois mesmo pessoal técnico achava difícil imaginar um fluxo de material submetido a tais pressões. Mais medições cuidadosas em moendas industriais e experimentos de laboratório, particularmente aqueles de Bullock e de Murryna Austrália, demonstraram decisivamente que dificilmente há uma igualdade entre o volume de bagaço comprimido e o volume gerado pelos rolos.

(DELFINI, 2014 apud E. HUGOT, Handbook of Cane Sugar Engineering – 3rd Edition – 1986 – P. 130/132)

E durante este processo novos fatores ocorrem, como é o caso da permeabilidade da massa fibrosa:

Um novo fator entra no jogo, a permeabilidade da massa fibrosa. Esta permeabilidade é muito alta no bagaço solto mas cai abruptamente quando a pressão aumenta e se torna praticamente nula em pressões muito altas, como demonstrado por Bullock e Murry. O caldo que não foi capaz de escapar na zona de alta permeabilidade, ou baixa pressão, assim se encontra preso. Chega então à zona de pressões muito elevadas, através PQ, um material consistindo de caldo intimamente entremeado com fibra. Este material assume, sob tais pressões o estado que Linley descreveu como “semi-líquido” (Murry7); ele possui propriedades peculiares e o líquido mostra uma forte tendência de espirrar através da primeira abertura disponível, provavelmente levando consigo uma certa proporção de fibra.

(DELFINI, 2014 apud E. HUGOT, Handbook of Cane Sugar Engineering – 3rd Edition – 1986 – P. 130/132)

No gráfico abaixo é possível entender o momento exato da reabsorção:

O caldo que foi então aprisionado no interior da camada de bagaço forma uma bolsa que é bem retratada pelas faixas verticais distorcidas. Iremos agora considerar o que acontece com esta bolsa de material: quando ela chega ao plano axial OO', ela encontra à sua frente uma zona de pressões decrescente. O líquido irá então obviamente ser jogado para frente e

encontrará um bagaço relativamente seco e expandindo como uma esponja, na qual ele será imediatamente re-absorvido. Vemos aqui uma das deficiências do rude sistema de extração proporcionado pelo processo de moagem; uma enorme quantidade de energia é despendida para libertar o caldo, mas uma grande fração do caldo assim liberado é imediatamente perdido novamente por reabsorção. Esta desvantagem é um assunto da natureza dos materiais e seria muito difícil de ser superado.
 (DELFINI, 2015 apud E. HUGOT, Handbook of Cane Sugar Engineering – 3rd Edition – 1986 – P. 130/132)

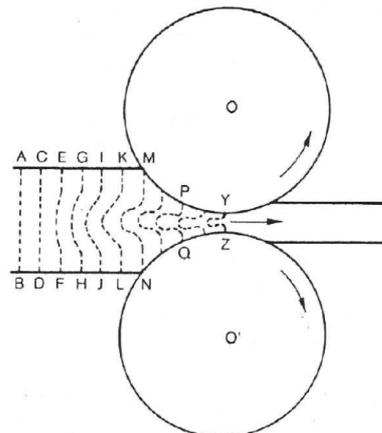


Fig. 10.13. Formation of semi-liquid pocket.

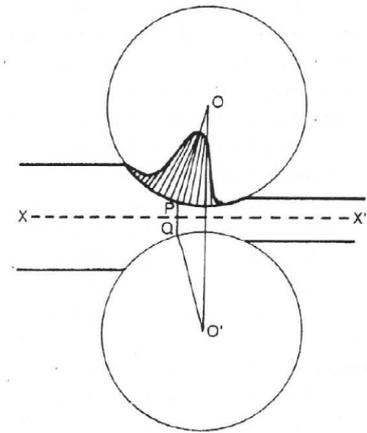


Fig. 10.14. Distribution of pressures on the roller.

Figura 4. Formação da bolsa de caldo e distribuição das pressões no rolo
 Fonte: DELFINI (2015) apud E. HUGOT, Handbook of Cane Sugar Engineering – 3rd Edition – 1986 – P. 130/132

Bouvet, em seu invento constata que a reabsorção é um dos fatores mais importantes que limitam a extração das moendas:

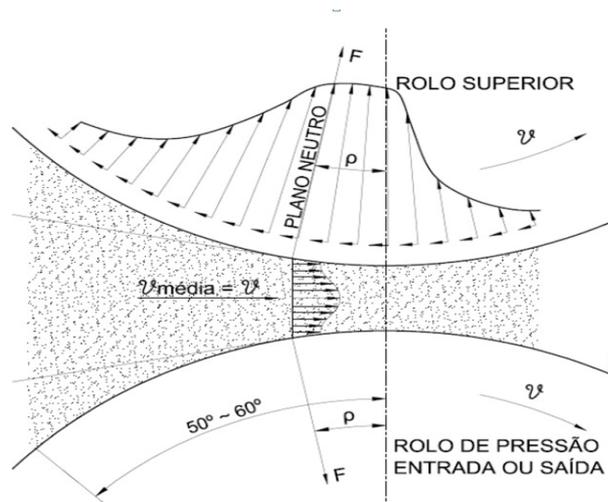


Figura 5. Diagrama de fatores da reabsorção
 Fonte: DELFINI (2014)

7.3. Critérios que afetam o índice de reabsorção

7.3.1. Nível de compactação aplicado na moenda

Conforme definido por Delfini (2014), a compactação pode ser expressa pelo Índice de Fibra (IF), definida como a relação entre o peso de fibra passando e o volume descrito pelo par de rolos na unidade de tempo; enquanto o índice de fibra é a densidade aparente da fibra atingida em qualquer ponto do processo de esmagamento:

$$IF = Q_f / Vd$$

IF = Índice de Fibra (kg de fibra / m³ de volume descrito)

Q_f = Taxa de fibra (kg de fibra / min)

Vd = volume descrito na abertura em trabalho (m³/min)

7.3.2. Nível de compactação aplicado na moenda – relação de enchimento

Delfini (2014) relaciona o enchimento com o Índice de Fibra e a densidade da fibra, afirmando que o enchimento reflete a proporção da abertura que é completamente preenchida por material sólido. O enchimento é obtido pela comparação do IF com a densidade absoluta da fibra (~1.530 kg/m³).

$$\bullet Re = IF / 1530$$

$$\bullet Re (1^{\circ} \text{ terno}) = 530 / 1530 = 0,35$$

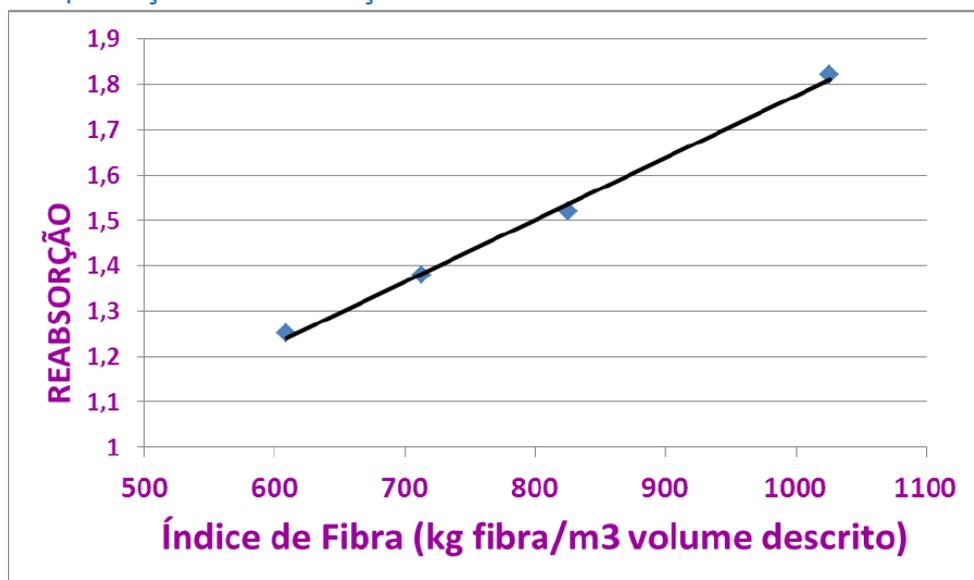
$$\bullet Re (\text{último terno}) = 880 / 1530 = 0,58$$

7.3.3. Nível de compactação X extração da moenda

O Índice de Fibra é o mais utilizado nos métodos de cálculo da regulagem das moendas, apesar da possibilidade de utilizar qualquer outro parâmetro equivalente, com o mesmo efeito ou resultado final. O Índice de Fibra a ser atingido em cada terno guarda relação com o teor de fibra a ser atingido no seu bagaço. Todavia, a ligação entre o Índice de Fibra e o teor de fibra no bagaço não é linear, devido à tendência de aumento da reabsorção com o aumento da compactação. (DELFINI, 2014).

Os gráficos a seguir indicam a relação entre os parâmetros que influenciam na reabsorção:

Compactação X Reabsorção



Índice de Fibra X Reabsorção – 2º terno

Gráfico 1. Relação entre compactação e reabsorção

Fonte: DELFINI, 2014 apud D. S. SHANN - General Milling Notes - Technical Report N° 105 - SRI - Austrália

Compactação (Índice de Fibra) X Extração (Fibra % Bagaço)

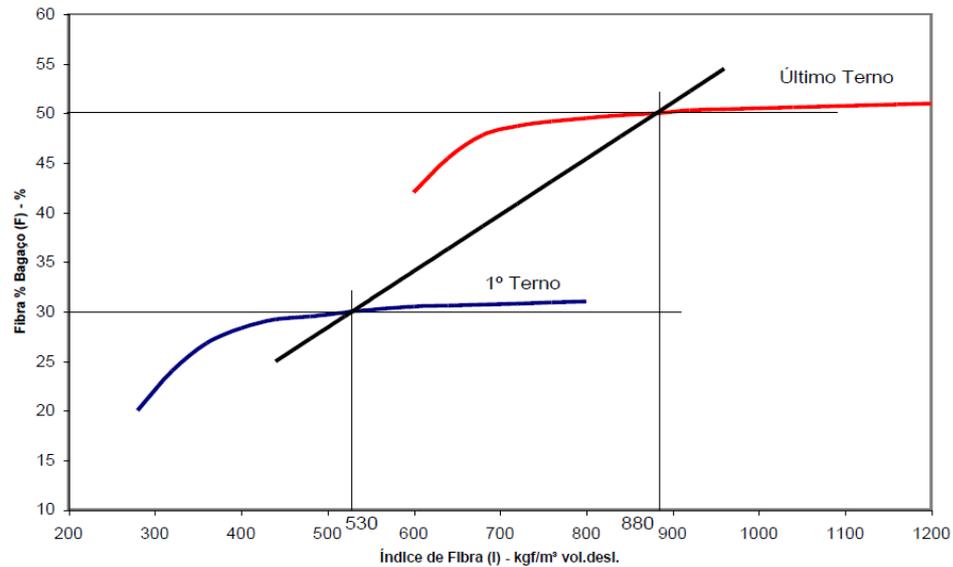


Gráfico 2. Resultados experimentais
Fonte: DELFINI, 2014 apud NOEL DEERR - Java - 1926

7.3.4. Rugosidade superficial dos rolos

Rugosidade superficial é derivada do material utilizado na camisa e das soldas aplicadas nos frisos, principalmente a solda tipo chapisco. Segundo Delfini (2014), maior rugosidade implica em uma redução da extrusão da camada de bagaço, obtendo assim uma redução da reabsorção.

Delfini (2014) ainda conclui que com menores escorregamentos, a carga aplicada na camada de bagaço pode ser mais efetiva.



Figura 6. Solda tipo chapisco
Fonte: DELFINI (2014)

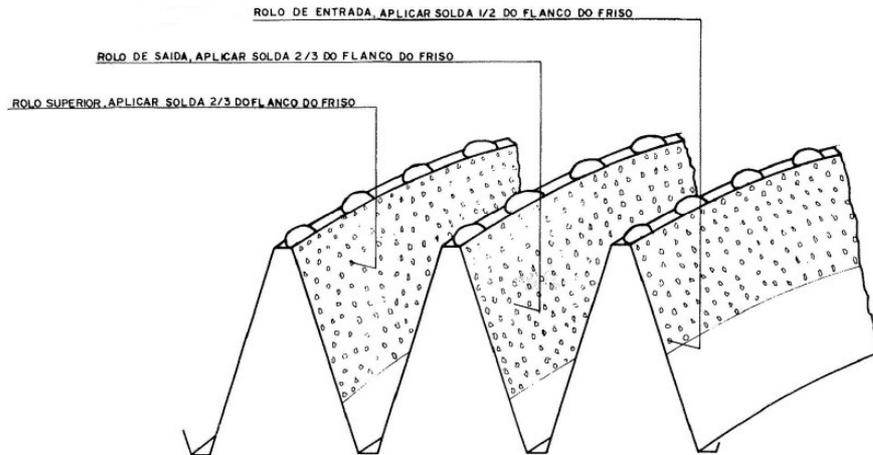


Figura 7. Aplicação da solda tipo chapisco
Fonte: DELFINI (2014)

7.3.5. Velocidade de operação da moenda

Estudos indicam que, na teoria, a velocidade de operação de uma moenda é inversamente proporcional à sua extração. E com relação a velocidade, quando maior, será proporcionado uma redução do coeficiente de atrito dinâmico e menor tempo para efetivar a drenagem do caldo.

Uma moenda em boas condições de soldagem (chapisco) reduz o efeito da velocidade no coeficiente de atrito.

A prática mostra que o tempo para efetivar essa drenagem não tem sido um fator de restrição para alcançar bons níveis de extração. (DELFINI, 2014)

7.3.6. Capacidade de drenagem e taxa de embebição

Em condições de operações normais, a capacidade de drenagem dos rolos não parece ser uma restrição. Poder-se-ia mencionar como ponto negativo a retirada do caldo já extraído em alguns pontos da moenda, como por exemplo, o caldo extraído sobre o rolo superior.

Delfini (2014) avalia que com taxas de embebição elevadas, a capacidade de drenagem não deve ser afetada, ou seja, o caldo extraído do 2º ao último terno sempre será menor que o extraído no 1º terno.

7.3.7. Regulagem das moendas

A regulagem das moendas tem influência significativa no índice de reabsorção, uma vez que na regulagem é definido o nível de compactação esperado em cada terno, fator com forte influência na reabsorção.

Durante a regulagem é possível estabelecer a proporção de caldo a ser extraído em cada abertura (relação das aberturas), assim como encontrar a relação de aberturas entrada/saída elevada que favorece a alimentação, porém sobrecarrega o trabalho de deslocamento de caldo na saída.

É necessário assegurar-se que os ternos da moenda estejam regulados para ótimo desempenho. O primeiro ponto chave a levar em consideração apreciar da teoria da moagem é que "regulagem da moenda" não é simplesmente realizar o posicionamento dos rolos, de entrada (frontal), superior e de saída (traseiro) na posição correta. Existe uma relação de compactação ótima para as aberturas em cada estágio da passagem do bagaço através do processo, incluindo, se qualquer um dos seguintes componentes estiver instalado:

- Relação entre abertura do chute Donnelly e abertura do alimentador pressão;
- Relação entre abertura do alimentador de pressão e abertura de entrada entre o rolo de entrada e o superior;
- Relação entre a abertura do chute Donnelly e a abertura entre o rolo de pressão e o rolo superior;
- Relação entre a abertura de entrada e a medida entre o rolo superior e o centro da bagaceira;
- Relação entre a abertura de entrada e abertura e saída.

(REIN, 2013, p. 147)

7.3.8. Passo e ângulo dos frisos dos rolos

Delfini (2014) relata que ensaios experimentais efetuados na Austrália não mostraram efeito significativo do passo dos frisos no índice de reabsorção. Na teoria, o ângulo dos frisos pode até causar uma certa influência em virtude à alteração da componente normal à superfície dos flancos dos frisos.

Mais adiante em seu relato, o autor diz que a variação da força normal à superfície dos flancos dos frisos implica na variação da força de atrito na superfície dos frisos, afetando as condições de extrusão do bagaço.

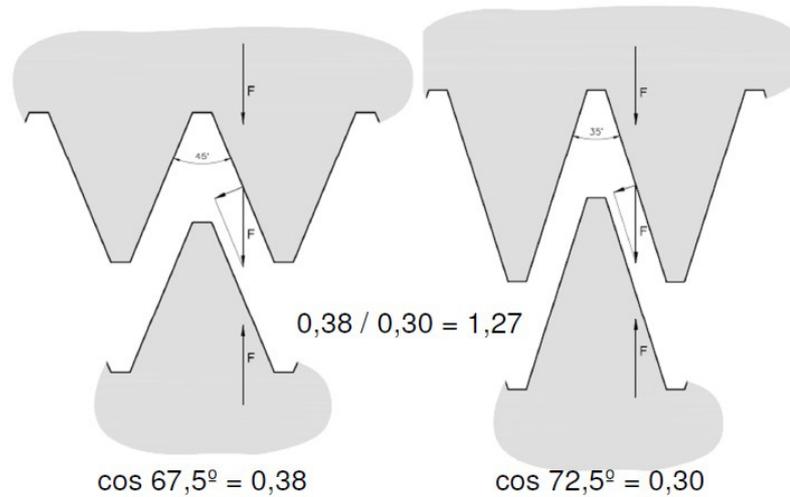


Figura 8. Frisos e solda dos rolos
Fonte: DELFINI (2014)

7.3.9. Nível de preparo da cana, variedade da cana e teor de impurezas

O nível de preparo tem influência direta na granulométrica da cana, podendo assim afetar o comportamento do material submetido à compactação.

Rein (2013, p 147) conclui que tanto para difusores quanto para moendas, o maior rompimento das células que contém açúcar resulta em maior extração e menor umidade final do bagaço. Esta melhora a extração e produz um material que queima melhor nas caldeiras.

Para Delfini (2014), outro fator importante é a variedade da cana, que apresenta estruturas fibrosas com propriedades e proporções medula/fibra diferentes e por isso deve ter efeito significativo no processo de reabsorção. As impurezas minerais e vegetais também devem afetar o índice de reabsorção levando a comportamento diferente da cana sob compactação.

8. CONTROLE DA REABSORÇÃO

8.1. Recursos para minimizar a reabsorção

Como definido anteriormente a respeito do fenômeno da reabsorção e como encontrar o seu percentual através do índice de absorção, ressaltamos que:

[...] O fator de reabsorção é uma medida da extrusão ocorrida na moenda. A extrusão começa quando a velocidade da moenda torna-se tão alta que a pressão máxima no colchão de fibra começa a mover-se antes da linha de abertura mínima dos rolos. Com esse fenômeno, a extração de caldo cai [...]. (PAYNE, 1990, p 53)

Alguns recursos e cuidados devem ser previamente realizados a fim de minimizar este fenômeno:

Os procedimentos adotados para a regulagem da moenda, apesar de baseados principalmente na quantidade de fibra que passa, devem tomar em consideração muitos fatores. Entre eles, os mais importantes são:

- resistência mecânica da moenda;
- carga hidráulica;
- frisos dos rolos; tamanho e estado;
- qualidade da cana; conteúdo de impurezas e terra;
- preparo da cana; índice de preparo;
- drenagem;
- embebição: quantidade de água e temperatura.

(PAYNE, 1990, p 53)

8.2. Operação com cargas hidráulicas adequadas

A extração de caldo aumenta com a pressão aplicada no rolo superior. A pressão aplicável, porém, se vê limitada pela resistência mecânica da moenda. Também a capacidade de alimentação decresce a pressões mais altas, enquanto que o consumo de potência aumenta substancialmente. A pressão ótima, portanto, é aquela que permite ao rolo superior flutuar na alimentação desejada. (PAYNE, 1990, p 53)

8.3. Manutenção da solda tipo chapisco

Para Delfini (2013), o chapisco é o recurso mais eficiente que se dispõe para controlar a reabsorção. Este estando em boas condições e formato adequado, torna-se também um recurso importante para alimentar a moenda e garantir a aplicação da carga (compactação) na camada de bagaço e, por último, ainda tem a função de proteger os flancos dos frisos contra o desgaste. A manutenção da solda tipo chapisco garante que esta esteja sempre em boas condições de uso.

8.4. Utilização de critérios de regulação adequados

A operação eficiente de uma seção de moagem exige a regulação das aberturas apropriadas para cada terno; controle estrito das variáveis operacionais, das quais as principais são: peso de fibra por hora, velocidade, carga hidráulica e embebição; e finalmente, boa manutenção. (PAYNE, 1990, p 51)

8.5. Equipamentos que auxiliam na redução da reabsorção

8.5.1. Moenda com dispositivo para controle da reabsorção

Moenda Fives-Lille com dispositivo de controle da reabsorção

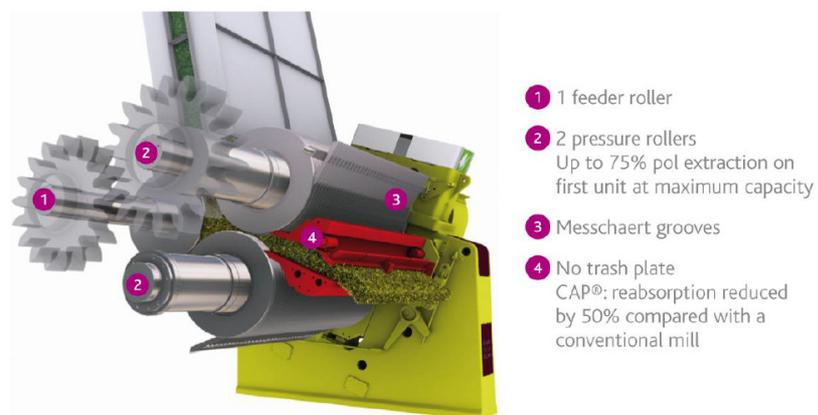


Figura 9. Moenda com dispositivo de controle de reabsorção
Fonte: DELFINI (2014)

Moenda Fives-Lille com dispositivo de controle da reabsorção

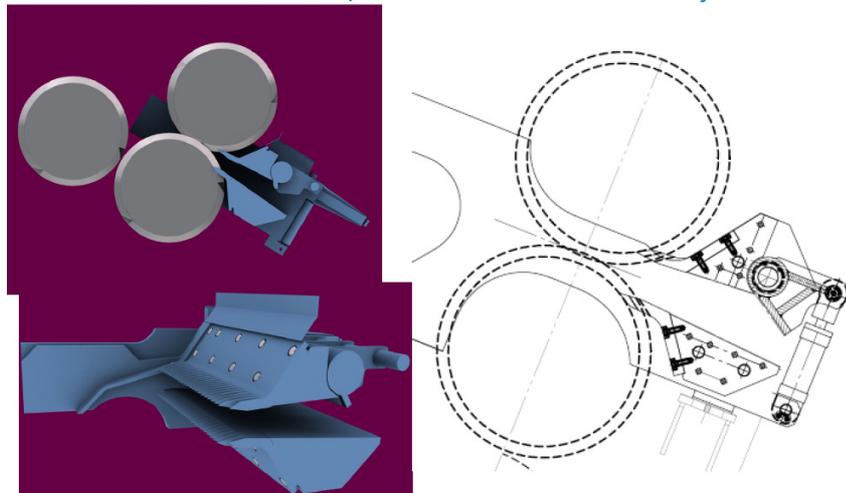


Figura 10. Moenda com dispositivo de controle de reabsorção
Fonte: DELFINI (2014)

8.5.2. Moenda de dois rolos – Walker (Austrália)

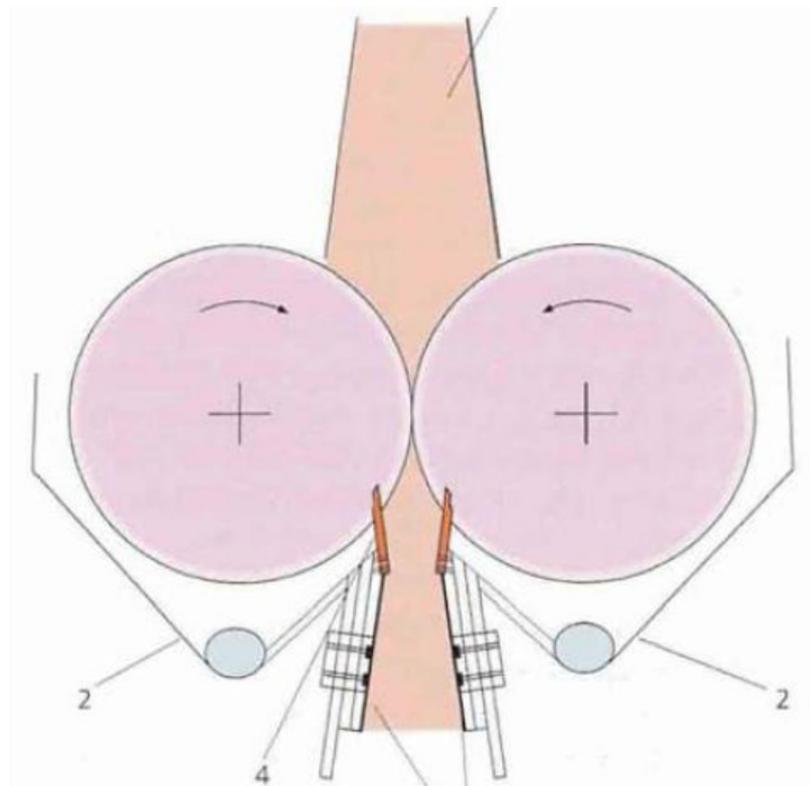


Figura 11. Moenda de dois rolos
Fonte: DELFINI (2014)

8.5.3. Rolos de moenda com camisas perfuradas

Rolos de moenda com camisas perfuradas

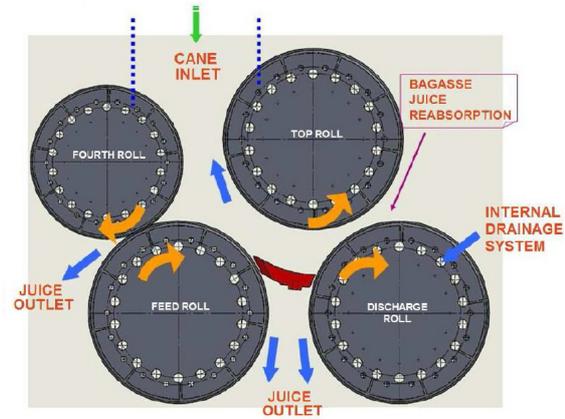


Figura 12. Rolos de moenda com camisas perfuradas
Fonte: DELFINI (2014)

Rolos de moenda com camisas perfuradas

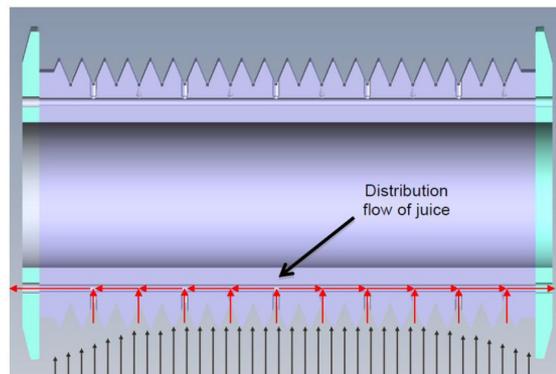


Figura 13. Distribuição do fluxo
Fonte: DELFINI (2014)

Rolos de moenda com camisas perfuradas

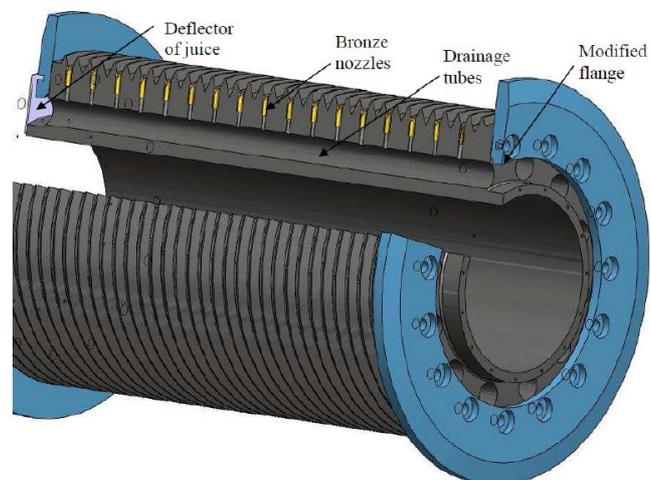


Figura 14. Rolos de moenda com camisas perfuradas
Fonte: DELFINI (2014)

9. HISTÓRICO DAS ALTERAÇÕES NO PROCESSO FABRICAÇÃO

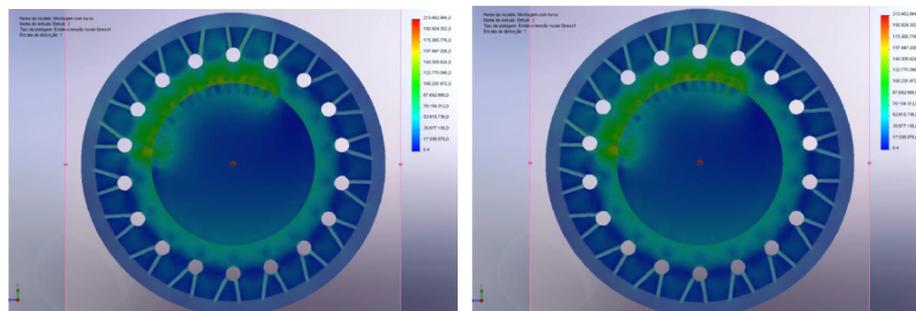
Nos primórdios, os rolos “Lotus” eram fabricados em aço fundido, com custos de fabricação e manutenção mais elevados, mas com o decorrer do tempo foram surgindo novos materiais que possibilitaram a fabricação de camisas perfuradas em ferro fundido cinzento ou nodular, com as mesmas características utilizadas anteriormente.

O desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à mecânica também proporcionou o uso de recursos melhores para estimativa dos esforços e tensões em qualquer ponto da camisa, assim como na otimização da distribuição dos furos radiais em relação ao furo longitudinal, permitindo uma maior quantidade de furos por unidade de área superficial da camisa.

Outro fator importante implementado que ajudou no melhor desempenho da drenagem foi a utilização de bocais em aço inox ou bronze, montados no fundo dos frisos, com furação cônica divergente no sentido do interior da camisa, reduzindo a possibilidade de entupimento, fator que contribuiu para a diminuição da utilização de rolos perfurados no Brasil.

9.1. Novos métodos para determinar condições de esforços e tensões

Análise através de elementos finitos:



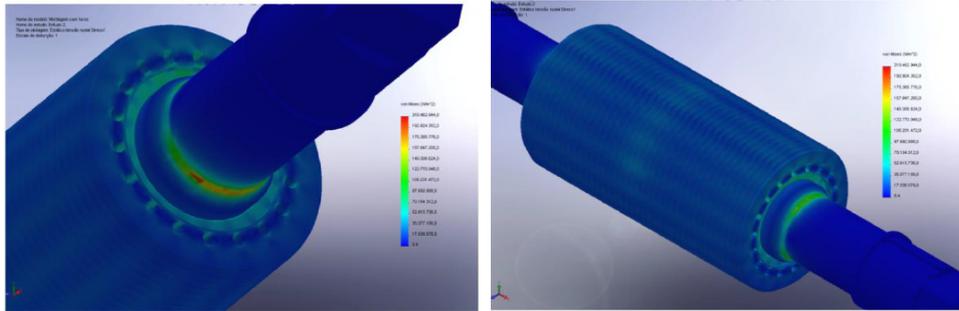


Figura 15. Análise através de elementos finitos
Fonte: FABER (2014)

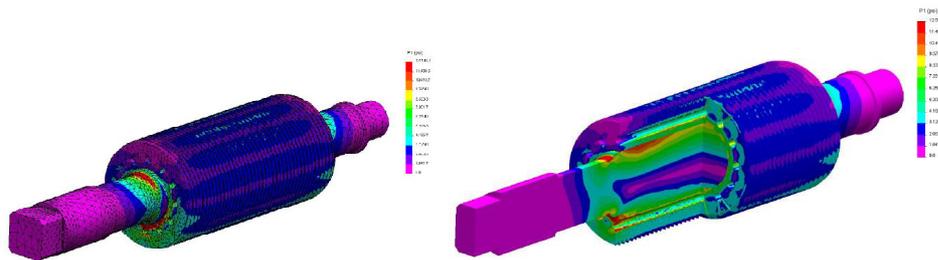


Figura 16. Análise através de elementos finitos
Fonte: DELFINI (2014)

9.2. Otimização da distribuição e quantidade de furos

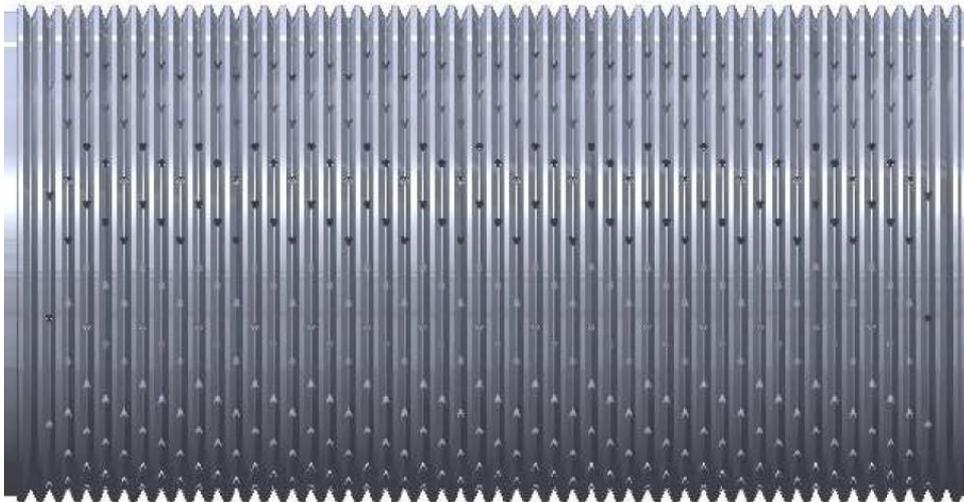


Figura 17. Distribuição e quantidade de furos
Fonte: DELFINI (2104)

Quantidade de bocais (Qb):

$$Qb = F_{fr} \times F_{long} \times q_{fr}$$

Onde:

F_{fr} = Total de fundos de friso na camisa

F_{long} = Total de furos longitudinais

q_{fr} = Quantidade de furos / fundo de friso / furo longitudinal

(DELFINI, 2014)

9.3. Funcionamento das camisas de alta drenagem

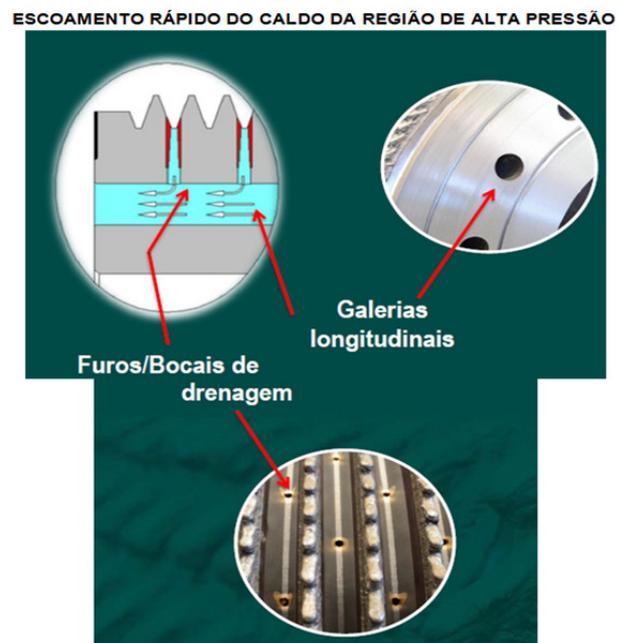


Figura 18. escoamento do caldo
Fonte: DEDINI S/A

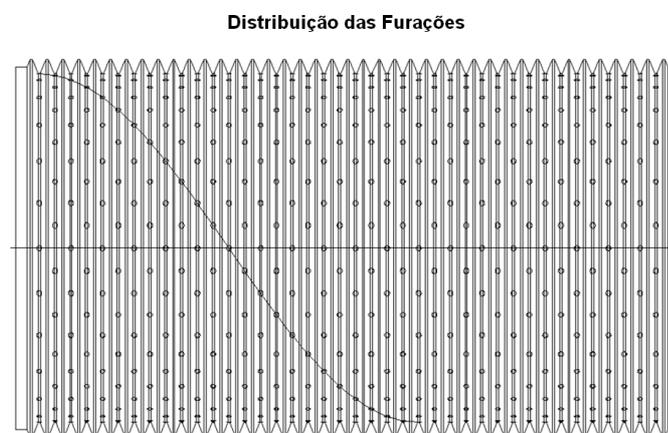


Figura 19. Distribuição dos furos
Fonte: DEDINI S/A

Detalhe típico das Furações

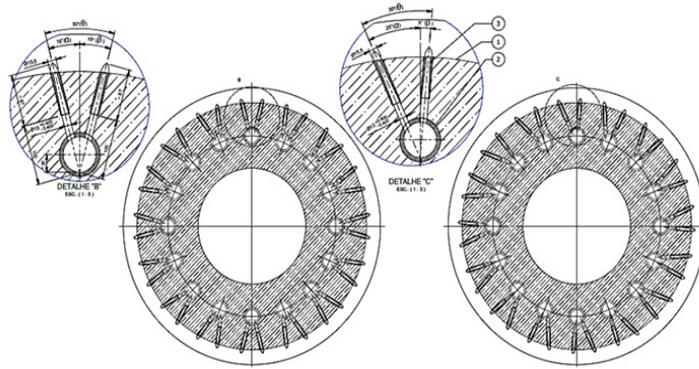


Figura 20. Detalhe das furações
Fonte: DEDINI S/A

Sistema de Drenagem - Corte mostra conexão dos furos radiais (boquilhas) e os furos passantes horizontais (galerias de drenagem)

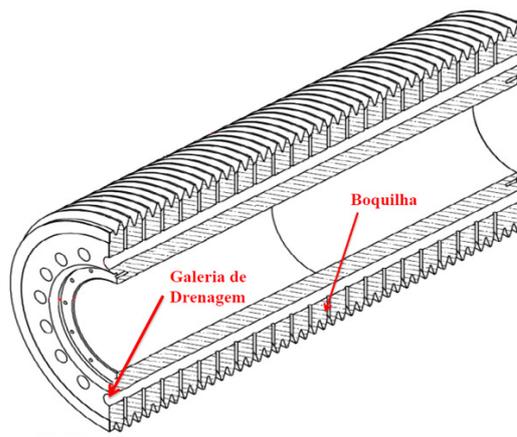


Figura 21. Sistema de drenagem
Fonte: DEDINI S/A

Sistema de Alta Drenagem em operação

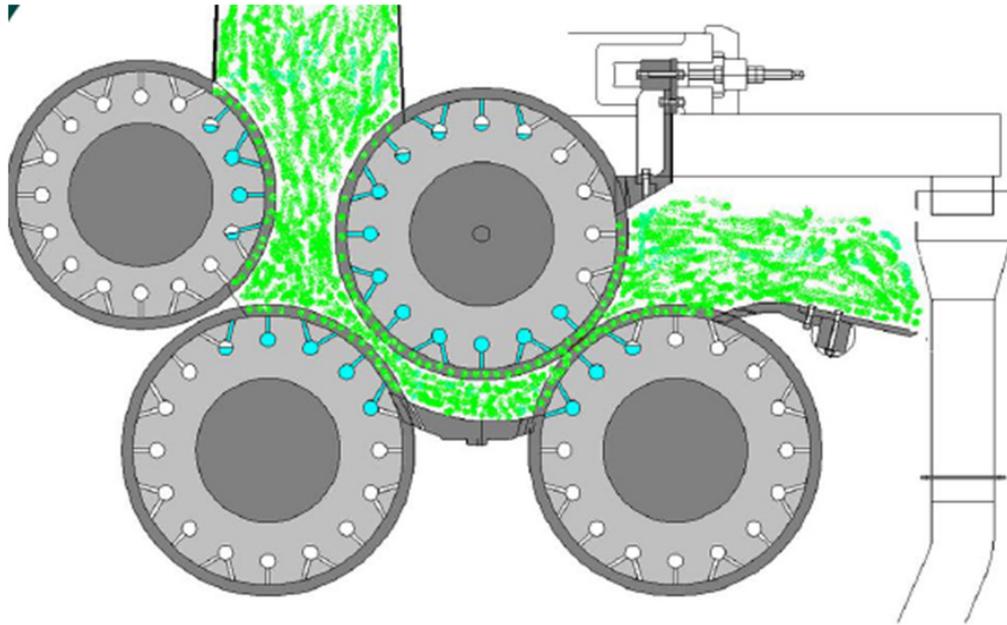


Figura 22. Operação do sistema de alta drenagem
Fonte: DEDINI S/A

10. AVALIAÇÕES DE RESULTADOS FINANCEIROS

Esta seção analisa os resultados financeiros obtidos após a implementação dos Rolos Lotus nos ternos de moendas, principalmente no primeiro e no sexto terno. Os dados apresentados nas tabelas e gráficos a seguir foram coletados em uma usina de açúcar e álcool na região de Ribeirão Preto.

Camisa DCAD no 1º e 6º terno

	Custos CAD	Convencional
Ano 1	550	140
Ano 2	550	140
Ano 3	550	140
Manut. Vedação	85	85
Manut. Boquilhas	90	0
TOTAL	1.825	505
DIFERENÇA		1320
CUSTO ADICIONAL		440

CAD – Camisa Alta Drenagem (Perfurada); Valores expressos em Reais
Tabela 1. Custos de manutenção Camisa Perfurada x Convencional

Calculo do Ganho em Capacidade de Moagem / Ganho de 4%		
Moagem	t	2.906.918
Moagem diária (3 Moendas)	t	50.000
Ganho em capacidade	%	4
Ganho em moagem	t	116.277
Ganho em dias	Dias	2,3
Custo diário de safra (Δ = Dia Safra - Entresafra)	R\$	190.000
Benefício total	R\$	441.852

Tabela 2. Ganho em capacidade de moagem

Dados de Entrada		Cálculo para determinação da redução na massa de bagaço para cada 1 p.p. na redução da umidade					
Moagem	2.900.000 tc						
Bagaço%Cana	28%						
Fibra do Bagaço	45%						
Brix do Bagaço	2,4%						
Umidade 1	52,6%						
Umidade 2	51,6%						
PCI Umidade 1	1.515 Mcal/tbagaço						
PCI Umidade 2	1.565 Mcal/tbagaço						
Valor do MWh	250 R\$/MWh						
		Cenário 1			Cenário 2		
		%			%		
		Kg			Kg		
		Fibra			Fibra		
		45,0%			45,9%		
		Brix			Brix		
		2,4%			2,5%		
		Umidade			Umidade		
		52,6%			51,6%		
		Massa de bagaço 1			Massa de bagaço 2		
		100,0%			100,0%		
		100 Kg			97,93 Kg		
		Bagaço%Cana 1			Bagaço%Cana 2		
		28%			27%		
Redução de água Base peso		$\frac{Kg_{\text{água}}}{Kg_{\text{bagaço}}}$	0,021				
Consumo específico para aquecer a 1°C água		$\frac{Kcal}{Kg_{\text{água}}}$	540				
Economia em energia para evaporar a água do bagaço		$\frac{Mcal}{t_{\text{bagaço}}}$	11,16				
Produção de Bagaço na Safra - Umidade 1		t	812.000				
Energia contida no bagaço (safra) - Umidade 1		$\frac{Mcal}{t_{\text{bagaço}}}$	1,23E+09				
Produção de Bagaço na Safra - Umidade 2		t	795.223				
Energia contida no bagaço (safra) - Umidade 2		$\frac{Mcal}{t_{\text{bagaço}}}$	1,25E+09				
Ganho em Energia na Safra		$\frac{Mcal}{t_{\text{bagaço}}}$	2,32E+07				
Convertendo em bagaço - Umidade 2		t	14.835				
Cogeração Líquida (Descontando auto-consumo)		MWh	5.489				
Ganho em Cogeração				R\$ 1.372.224			

Tabela 3. Ganho em cogeração de energia

Cálculo do Ganho em Extração	Unidade	Valor
Moagem	t	2.900.000
Extração média - 3 últimas safras	%	96,5
Extração com Lotus Roll	%	96,8
PCC da Cana	%	13,7
AR da Cana	%	0,9
Recuperação Industrial	%	89,9
Incremento de Extração	%	0,3
ART total	%	444.662
Ganho em ART	t	1.467
Conversão p/ sacos 50kg	t	1.258
Fator de conversão sc/UEQ	Unid.	20
UEQ's totais (açúcar)	Unid.	25.157
Valor R\$/UEQ	R\$	41,86
Benefício total	R\$	1.052.981

Tabela 4. Ganho em extração.

☒ usina A			
Indicadores de Performance	Projetado (p.p.)	Realizado (p.p.)	Ganho (R\$)
Capacidade de Moagem	-	+ 4	441.852
Extração	+ 0,3	-	-
Umidade (Ganho em E.E.)	+ 1,0	+ 1,0	1.372.224
Ganho Bruto			1.814.075
	Custo Adicional		440.000
	Ganho Líquido		1.374.075

☒ usina B			
Indicadores de Performance	Projetado (p.p.)	Realizado (p.p.)	Ganho (R\$)
Capacidade de Moagem	-	-	-
Extração	+ 0,3	+ 0,33	1.053.000
Umidade	+ 1,0	+ 3,14	2.730.000
Ganho Bruto			3.783.000
	Custo Adicional		330.000
	Ganho Líquido		3.453.000

☒ usina C			
Indicadores de Performance	Projetado (p.p.)	Realizado (p.p.)	Ganho (R\$)
Capacidade de Moagem	-	-	-
Extração	+ 0,3	-	-
Umidade	+ 1,0	+ 1,98	2.456.588
Ganho Bruto			2.456.588
	Custo Adicional		150.339
	Ganho Líquido		2.306.249

Tabela 5. Comparativo de desempenho

Os gráficos a seguir ilustram o aumento da capacidade de moagem e extração de bagaço, e a redução da umidade final do bagaço, através do uso de rolos de moenda com camisa perfurada, conforme objetivo proposto neste estudo.

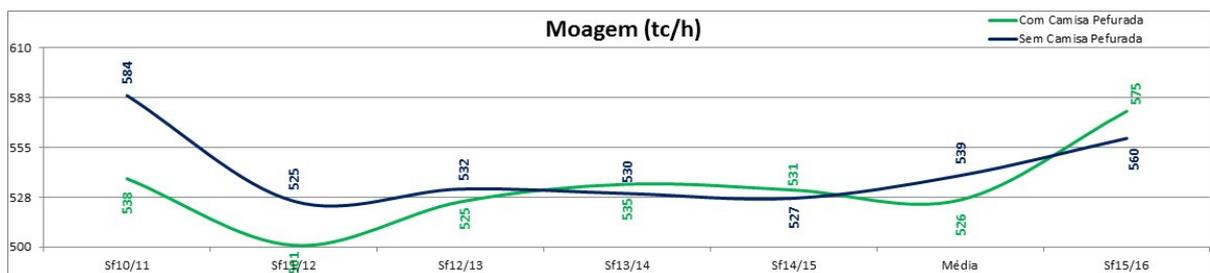


Gráfico 3. Ganho em capacidade de moagem

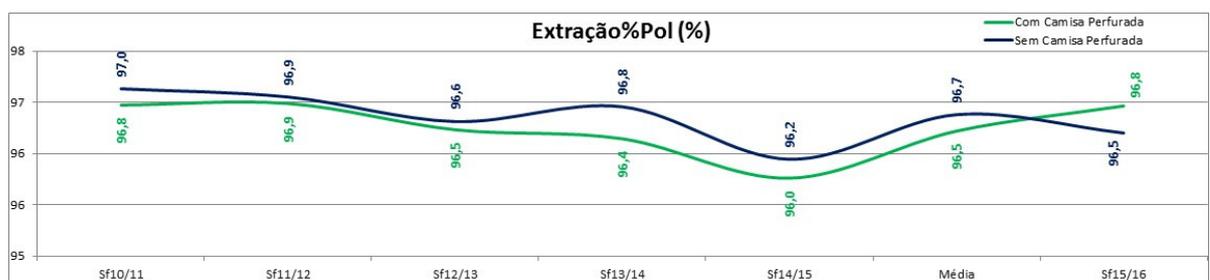


Gráfico 4. Ganho em capacidade de extração

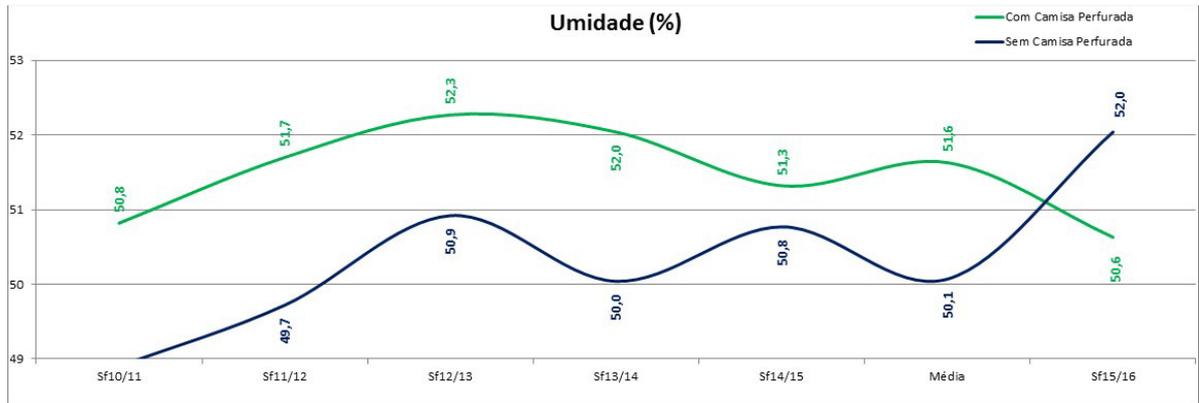


Gráfico 5. Redução da umidade final

11. CONCLUSÃO

A partir de todos os esforços dos estudiosos que empreenderam no desenvolvimento desta solução tecnológica, considerando-se suas aplicações, revisões, reavaliações e testes propriamente ditos, concluiu-se que a camisa de moenda perfurada para drenagem do caldo de cana – Lotus Roll, com os incrementos que se fizeram apropriados ao seu desenvolvimento em sua recente história, está ofertando excelentes resultados, como aumento de moagem, melhoria da extração da sacarose, redução da umidade do bagaço entre outros, aportando valor agregado ao sistema de extração de caldo de cana por contato, com utilização de rolos de moenda. Destacamos a ousadia criativa de Jean Bouvet no desenvolvimento da ideia de drenar o caldo de cana resultante do esmagamento da cana de açúcar, atinando para uma solução “óbvia” que até então muitos não haviam constatado.

Observa-se sensível ampliação nos volumes de cana processada (de 5 a 10%) (*), ampliação na extração da sacarose contida nas células abertas (considerando-se a possibilidade de aumento na embebição com água no processo de moagem), da ordem de 0,3 a 0,5% (*), otimização da umidade do bagaço (1 a 3%) (*), fator ofertante de um combustível com maior qualidade de queima. Constata-se também, pela melhoria na extração a preservação das tubulações da caldeira geradora de energia, conferindo economia e melhor desempenho em sua manutenção. E por fim, observa-se também o benefício da economia de combustível da própria caldeira, fatores que somados, proporcionaram ganhos substanciais em todas frentes de processo: etanol, açúcar, energia elétrica, etc.

Pode-se então destacar os altos índices de satisfação e a soma da eficiência e produtividade geral dos resultados do processo de esmagamento da cana de açúcar, com maior lucratividade ao negócio de geração de energia limpa e renovável.

De acordo com os testes executados e avaliados, ilustrados pelas tabelas e gráficos da seção anterior, em várias usinas diferentes, este estudo conclui que as usinas do setor sucroenergético podem aprimorar sua produtividade

* Dependendo da moagem e da bitola da Moenda; da quantidade de impurezas minerais e vegetais, taxa de embebição, etc.

aplicando o rolo Lotus em suas moendas, fazendo com que a extração, umidade e capacidade de moagem alcancem altos índices de satisfação. Naturalmente, seu rendimento maximizado poderá resultar em maior lucratividade.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002. 7 p.

DELFINI, P. T. Revisão da Moenda. In: 14^o SBA - SEMINARIO BRASILEIRO AGROINDUSTRIAL - A usina da superação, 30/10/2013, Ribeirão Preto. Disponível em: http://www.stab.org.br/seminario_14sba/04_paulo_delfini_30.pdf.

DELFINI, P. T. Rolos de moenda com camisas perfuradas: impacto no desempenho do sistema de extração. In: UDOP, 2^a Aula / Palestra Industrial, Araçatuba, 31/07/2014.

DELFINI, P. T. Eficiência e custos na extração de caldo. Disponível em: <http://sucroenergetico.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/10-eficiencia-e-custos-na-extracao-de-caldo>. Acesso em 07/05/2016.

HEILMANN, G.G. Planejamento e controle de manutenção industrial no setor Sucroenergetico – Lotus Roll – camisa de alta drenagem em extração de caldo de cana de açúcar. Piracicaba: Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba/Escola de Engenharia de Piracicaba, 2015. 65 p Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil.

REIN, P. Engenharia do Açúcar de Cana. Edição em Português. Editora Bartens, 2013. 608 p.

FABER, A. N. SADE – Sistema de Alta Drenagem e Extração Dedini. In: 15^o SBA - SEMINARIO BRASILEIRO AGROINDUSTRIAL – Usina da sobrevivência, 2014, Ribeirão Preto. Disponível em: http://www.stab.org.br/15sba/web/10_angelo_dedini.pdf. Acesso em 15/05/2016.

PAYNE, J. H. Operações unitárias na Produção de Açúcar. NBL Editora, 1990. 245 p.