



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo do escoamento de sólidos a granel em silos – caso da estilha

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Autor

Alexandre Correia Pires

Orientadores

Professor Doutor José Carlos Miranda Góis

Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes

Júri

Presidente	Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor José Carlos Miranda Góis Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes
Vogais	Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



**Aberta Nova,
Sociedade Agro-
Florestal S.A.**

Coimbra, Fevereiro, 2015

Agradecimentos

Ao orientador Professor José Carlos Miranda Góis e Professor António Manuel Gameiro Lopes pela constante procura do saber, compreensão e profissionalismo. Por todos os conhecimentos transmitidos bem como toda a disponibilidade e interesse demonstrado em diversas naturezas.

À Aberta Nova, Sociedade Agro-Florestal e ao Engenheiro Pedro Caels pela proposta de trabalho e pronta colaboração e atenção.

Aos meus Pais e família, à educação que me transmitiram, e à oportunidade de formação que, com sacrifício me proporcionaram. Ao apoio e amparo, que nunca deixaram de estar presentes.

À Bárbara por todas as palavras de incentivo e superação, à sua presença incondicional.

Estou imensamente grato a todos, que direta ou indiretamente contribuíram para o alcance deste objetivo pessoal.

Resumo

Devido ao aumento preocupante dos gases com efeito de estufa, a União Europeia tem vindo a colocar aos Estados Membros metas cada vez mais restritivas no consumo de energia por fontes não renováveis. Devido à necessidade de meios de produção de energia alternativos, o uso da biomassa florestal é uma solução em crescente procura. Neste contexto, a gaseificação de biomassa apresenta-se como uma excelente alternativa, transformando através de processos termoquímicos a biomassa em gases combustíveis que, depois de limpos, alimentam um motor de combustão interna, permitindo gerar simultaneamente eletricidade e calor.

Este trabalho analisa o funcionamento de uma unidade piloto de gaseificação de biomassa florestal, de pinho e eucalipto, em forma de estilha, e desenvolve um estudo sobre o escoamento da estilha de biomassa na tremonha de alimentação do gaseificador. São analisadas as dificuldades que ocorrem com o escoamento de materiais a granel, discutidos os ensaios experimentais adotados para caracterizar este tipo de materiais, a sua aplicabilidade ao caso da estilha, e são ainda analisadas as soluções preconizadas para a mitigação de bloqueios no escoamento deste tipo de materiais. É efetuado um estudo experimental ao escoamento da estilha de biomassa para diferentes inclinações das paredes da tremonha. É estudado também o efeito da humidade da estilha no escoamento e as potencialidades da injeção radial de um gás na mitigação de bloqueios ao escoamento. Os resultados preliminares mostram que a estilha, quando húmida, escoar tanto melhor quanto menor o seu tamanho, e que, para um ângulo inferior a 40° das paredes da tremonha com a vertical, o aumento do tamanho da estilha favorece o escoamento, evidenciando assim a preponderância da ação do peso em relação ao atrito de escorregamento. O ângulo de 40° afigura-se como sendo um valor crítico na mudança do escoamento da estilha, justificando futura investigação em torno deste valor para estudar a influência das diversas variáveis no escoamento.

Palavras-chave: Biomassa, Gaseificação, Tremonha, Escoamento, Estilha.

Abstract

The greenhouse gases increasing has been pushed, the European Union to set more restrictive targets to the State Members on the energy consumption of non-renewable sources. The forest biomass is a solution between the renewable sources and is increasing. Thus, the gasification of biomass is an excellent alternative transforming biomass into synthetic fuel through thermochemical processes, after a cleaning process can feed an internal combustion engine, to assure simultaneously production of electricity and heat.

This study analyses the functioning of a pilot plant of forest biomass gasification, feeded with pine and eucalyptus chips, and carry out a study about the flow of wood chips inside the feed hopper of the gasifier. The problems concerned with the flow of bulk materials are reviewed, and discussed the experimental tests adopted to characterize these materials and its applicability to the case of wood chips and are also analyzed the solutions to mitigate blockages in the flow of this kind of materials. An experimental study on the flow of wood chips for different slopes of the walls of the hopper is performed. It is also investigated the effect of moisture on the flow of wood in the hopper chips and the potential of the radial gas injection to mitigate flow blockages.

Preliminary results show that the wood chips, when wet, flow better the smaller sizes and for an angle less than 40° between hopper walls and the vertical the size increasing of the wood chips favors flow, showing that weight has higher effect than sliding friction. The angle 40° described above seams critical on flow change, justifying further research around this value to study the influence of the variables on the flow of wood chips.

Keywords Biomass, Gasification, Hopper, Flow, Wood Chips.

Índice

Índice de figuras	vi
Índice de tabelas	viii
Simbologia.....	ix
Siglas e acrónimos	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Organização da dissertação.....	6
2. ESCOAMENTO DE SÓLIDOS A GRANEL	7
2.1. Tipos de escoamento.....	9
2.1.1. Escoamento de massa	9
2.1.2. Escoamento de funil	10
2.1.3. Escoamento ampliado.....	10
2.2. Problemas de escoamento	11
2.2.1. Obstrução em tubo.....	12
2.2.2. Obstruções em abóbada.....	12
2.2.3. Segregação.....	12
2.2.4. Tempo de armazenamento.....	13
2.3. Parâmetros que afetam o escoamento	13
2.3.1. Função de escoamento.....	14
2.3.2. Caracterização numérica da fluidez.....	17
3. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SÓLIDOS A GRANEL	21
3.1. Fundamentos.....	21
3.2. Determinação das propriedades físicas dos sólidos a granel	22
4. CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DA BIOMASSA	28
5. MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA SIMULAR O ESCOAMENTO DA ESTILHA NUMA TREMONHA.....	32
5.1. Variáveis a estudar.....	33
5.1.1. Abertura de descarga	33
5.1.2. Inclinação da tremonha com a vertical	34
5.1.3. Condições da biomassa.....	34
5.1.4. Tamanho da biomassa	35
5.2. Procedimento dos ensaios de escoamento	36
5.3. Procedimento dos ensaios de desobstrução do escoamento por injeção de gás ...	38
5.3.1. Condições de desobstrução recorrendo a injeção de gás.....	38
6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	41
7. CONCLUSÕES	47
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
Apêndice A CARACTERIZAÇÃO DO GASEIFICADOR	52
Apêndice B MECANISMOS DE QUEBRA DE OBSTRUÇÃO EM ABÓBADA	55
Apêndice C PROTOCOLO DE ENSAIO DO ESCOAMENTO DA ESTILHA.....	58

Apêndice D ILUSTRAÇÕES DE RESULTADOS ADICIONAIS DOS TESTES DE ESCOAMENTO DE ESTILHA.....	59
Anexo A TESTE DE COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	62
Anexo B CÍRCULO DE MOHR.....	63

Índice de figuras

Figura 1.1. Consumo de energia a partir da biomassa de 2006 a 2013 nos Estados Unidos da América (Stravista, 2015).....	2
Figura 1.2. Esquema do princípio da montagem experimental de gaseificação e produção de energia elétrica (Pedrosa, 2013).....	3
Figura 1.3. Esquema de gaseificador de leito fixo concorrente (Andrade, 2007).	4
Figura 2.1. Tipos de escoamento.	8
Figura 2.2. Regimes de escoamento para determinar o ângulo da tremonha com a vertical (Roberts, 1994).	9
Figura 2.3. Tipos de obstruções.....	11
Figura 2.4. Tensões ao alterar a abertura de descarga da tremonha (Janike, 1964).	15
Figura 2.5. Função de escoamento.	16
Figura 2.6. Função de escoamento em função do tempo.....	17
Figura 2.7. Caracterização da fluidez (Schulze, 2011).....	18
Figura 2.8. Caracterização da fluidez com o tempo (Schulze, 2011).....	19
Figura 2.9. Gráfico de cálculo de fator de escoamento (Chase, 2004).....	20
Figura 3.1. Célula de corte de Janike (Chase, 2004).	23
Figura 3.2. Gráfico do procedimento do teste de corte (Shulze, 2011).	23
Figura 3.3. Gráfico do ponto de escoamento estável. (Shulze, 2011).	24
Figura 3.4. Gráfico do ponto de escoamento estável com o aumento do tempo de armazenamento (Shulze, 2011).	25
Figura 3.5. Teste de determinação do atrito na parede (Chase 2004).	26
Figura 3.6. Determinação do ângulo de atrito da parede (Chase, 2004).	26
Figura 4.1. Exemplo do funcionamento de um estilhador de facas.....	29
Figura 4.2. Exemplo do tamanho da estilha.	29
Figura 4.3. Exemplo do tamanho da estilha de menor dimensão.....	30
Figura 5.1. Montagem experimental do aparato de análise do escoamento da estilha.....	32
Figura 5.2. Representação da abertura de descarga da tremonha (mm).	33
Figura 5.3. Representação do ângulo da tremonha com a vertical, com a tremonha carregada.....	34
Figura 5.4. Exemplo do comprimento da estilha.....	35
Figura 5.5. Exemplo de teste de escoamento da tremonha.....	36
Figura 5.6. Alterações efetuadas nas placas da tremonha (mm).	39
Figura 5.7. Alterações efetuadas nas placas da tremonha (mm).	39
Figura 6.1. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para uma abertura de descarga de 280 mm.	41
Figura 6.2. Tipos Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para uma abertura de descarga de 200 mm. ...	42
Figura 6.3. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para uma abertura de descarga de 140 mm.	42
Figura 6.4. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 280 mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha seca.....	43

Figura 6.5. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 200 mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha seca.	44
Figura 6.6. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 140 mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha seca.	44
Figura 6.7. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 280 mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha húmida.	45
Figura 6.8. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 200 mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha húmida.	45
Figura 6.9. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 140mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha húmida.	46
Figura AP-A.1. Exemplo de um gaseificador downdraft (Gbgasified, 2012).	53
Figura AP-B.1. Exemplo de aplicação de um reservatório pneumático (Ermap, 2010).	55
Figura AP-B.2. Injetor pneumático (Dynamic air inc, 2010).	56
Figura AP-B.3. Disposição exemplo de uma caixa de fluidização (Ermap, 2010).	57
Figura AP-D.1. Variação do caudal mássico de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha seca.	59
Figura AP-D.2. Variação do número de intervenções no escoamento de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha seca.	59
Figura AP-D.3. Variação da dificuldade visual do escoamento de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha seca.	60
Figura AP-D.4. Variação do caudal mássico de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha humedecida.	60
Figura AP-D.5. Variação do número de intervenções no escoamento de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha humedecida.	61
Figura AP-D.6. Variação da dificuldade visual do escoamento de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha humedecida.	61
Figura AN-A.1. Teste de compressão uniaxial (Schulze, 2011).	62
Figura AN-B.1. Tensões presentes numa amostra de um sólido granular (Chase, 2004). ...	63
Figura AN-B.2. Representação da tensão principal superior e da tensão principal inferior (Schulze, 2011).	64
Figura AN-B.3. Círculo de Mohr que é tangente à linha e intersesta a origem (Chase, 2004).	64

Índice de tabelas

Tabela 1.1. Dimensão típica da biomassa para diferentes tipos de gaseificadores. (Milne, T. et al. , 1988 apud Pedrosa, P., 2013).	5
Tabela 3.1. Classificação do produto segundo a norma Australiana AS-3774.	27
Tabela 4.1. Composição elementar mássica média (1 e 2 (Oliveira, 2008 apud Pedrosa, 2013) e 3 Diniz, 2008 apud Pedrosa, 2013.)	31
Tabela 5.1. Exemplo de dados medidos e retirados dos ensaios de escoamento.	37
Tabela AP-A.1. Composição do gás de síntese para diferentes agentes de gaseificação (Lora, et al. 2012.....	53
Tabela AP-A.2. Influência da pressão de operação do gaseificador no gás gerado. (Andrade, 2007 apud Pedrosa, 2013)	54
Tabela AP-A.3. Teor de alcatrão por tipo de gaseificador Andrade, 2007 apud Pedrosa, 2013).....	54

Simbologia

ϕ_w – Ângulo de atrito da parede	°
ϕ_i – Ângulo de atrito interno	°
ϕ_e – Ângulo efetivo de atrito interno	°
μ – Coeficiente de atrito	
ff – Fator de escoamento da tremonha	
F_S – Força de corte	N
F_N – Força normal	N
FF – Função de escoamento	
FF_t – Função de escoamento em função do tempo	
α – Inclinação da tremonha com a vertical	°
t – Tempo de armazenamento	s
σ_c – Tensão de cedência não confinada	Pa
σ_1 – Tensão de consolidação	Pa
τ_w – Tensão de corte da parede	Pa
τ_{pre} – Tensão de corte em estado de escoamento estável	Pa
σ_w – Tensão normal da parede	Pa
σ_{sh} – Tensão normal de corte	Pa
σ_{pre} – Tensão normal em estado de escoamento estável	Pa

Siglas e acrónimos

ASTM – American Society for Testing and Materials

WPMPS – Working Party on the Mechanics of Particulate Solids

NMP – Nemátodo da madeira do pinheiro

UE – União Europeia

GEE – Gases de efeito estufa

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A biomassa florestal como fonte de energia está em crescimento, tanto na Península Ibérica como em países que procuram baixar a produção de gases de efeito de estufa (GEE). As metas estabelecidas pela União Europeia, relativamente à dependência energética face ao exterior, são responsáveis pelo aumento desta procura, ainda que, a baixa considerável no preço do petróleo atual, face a um passado muito recente, volte a animar o consumo em países importadores desta fonte de energia. Apoiada sobretudo na Diretiva 2009/28/CE, a produção de energia assente no consumo de biomassa florestal assume especial relevância no quadro da sustentabilidade ambiental e desenvolvimento regional (World Wide Found For Nature, 2011). Um dos objetivos desta Diretiva passa pela meta, até 2020, de 20% da energia da UE ser renovável (sendo 50% desta bio-energia). Mesmo fora da Europa, tem-se assistido ao aumento no consumo de biomassa para produção de energia térmica e elétrica. No caso dos Estados Unidos da América (EUA), nos últimos oito anos tem havido um crescimento aproximadamente uniforme na produção de energia a partir de biomassa, conforme mostra a Figura 1.1. As metas propostas por tratados, como o Protocolo de Quioto, entre outros, faz com que seja cada vez maior, a aposta em combustíveis que permitam uma redução das emissões de GEE.

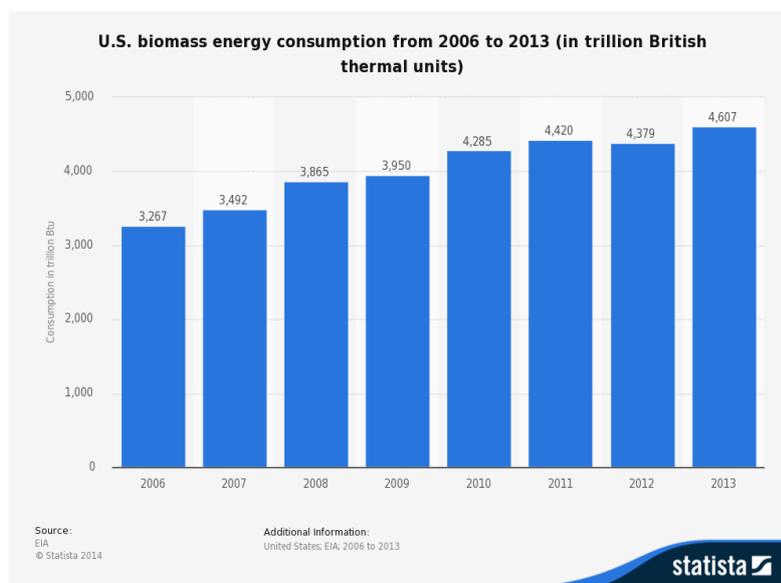


Figura 1.1. Consumo de energia a partir da biomassa de 2006 a 2013 nos Estados Unidos da América (Stravista, 2015).

Com a Diretiva 2001/77/EC a biomassa florestal passou a ser considerada uma fração biodegradável de produtos e resíduos da agricultura, das florestas e das indústrias conexas. Assim, a biomassa passível de ser utilizada para produção de energia pode ser de três tipos, dependendo da sua proveniência: direta, indireta e recuperada, respetivamente, resíduos da floresta, madeira processada e produtos de madeira reciclada pós consumo.

A Aberta Nova Sociedade Agro-Florestal S.A. é uma empresa da região do Alentejo, que está orientada para a instalação e desenvolvimento de um conjunto de infraestruturas para a produção, transformação e valorização das matérias-primas locais de uma forma sustentável (Pedrosa, 2013). Neste quadro construiu uma unidade piloto de gaseificação de biomassa florestal, assente no aproveitamento de pinho e eucalipto, que constitui atualmente a floresta da herdade da Aberta Nova. Esta unidade piloto de gaseificação está composta por um gaseificador que tem como objetivo a produção de gases combustíveis para alimentar um motor de combustão interna para produção de eletricidade e calor. O projeto encontra-se em fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento e nele tem vindo a colaborar o Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

A gaseificação é um processo de conversão de combustíveis líquidos ou sólidos em combustíveis gasosos, por meio de reações termoquímicas. As reações podem envolver vapor e ar, ou oxigénio em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão). Muito embora a gaseificação de biomassa seja um processo antigo (Milne, T.,

et al., 1988), hoje em dia, há um interesse acrescido pelas razões anteriormente referidas. A transformação da biomassa num gás combustível limpo e de elevado poder calorífico oferece uma enorme versatilidade para a sua conversão em várias formas de energia. Entre as vantagens apontadas à gaseificação de biomassa estão a grande eficiência térmica (60% a 90%); uma energia limpa, já que as cinzas permanecem no gaseificador, diminuindo assim a emissão de partículas para a atmosfera, que ocorreria se a conversão de energia da biomassa se processasse por combustão direta. Contudo, o processo apresenta ainda algumas desvantagens: a técnica é muito complexa, o que obriga a cuidados especiais; a biomassa deverá ser limpa, sem a presença de terra e outros elementos que prejudicam o processo de gaseificação; o alcatrão libertado no processo de gaseificação, quando não totalmente eliminado, pode limitar a eficiência; a presença de condensados ácidos, devido ao enxofre na composição da biomassa; a heterogeneidade da biomassa e os custos com o destorroamento e redução da humidade. No Apêndice A é feita uma caracterização mais aprofundada do processo de gaseificação.

A Figura 1.2 descreve de forma simplificada a montagem do sistema de gaseificação e produção de energia elétrica da unidade piloto instalada na herdade da Aberta Nova - Sociedade Agro-florestal, S.A..

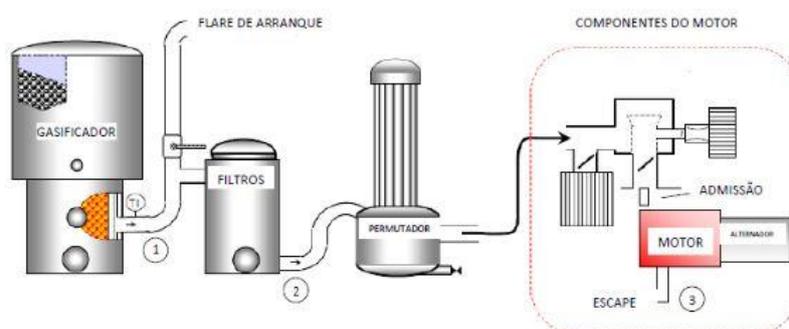


Figura 1.2. Esquema do princípio da montagem experimental de gaseificação e produção de energia elétrica (Pedrosa, 2013).

O gaseificador desenvolvido pertence ao tipo de leito fixo concorrente (*downdraft*), e é construído integralmente em aço inox 316 L. Os gases produzidos no gaseificador passam por um processo de lavagem e filtragem antes de passarem pelo permutador de calor. A passagem dos gases pelo permutador de calor visa baixar a temperatura para um valor próximo de 25 °C, para aumentar o caudal mássico de alimentação do motor e simultaneamente manter constante o rendimento do motor, de modo

a permitir que a rotação transmitida ao alternador seja o mais uniforme possível para a produção de eletricidade. A energia retirada no permutador de calor é usada no aquecimento de água.

O sistema está projetado para produzir 15 kWe de Potência elétrica e 30 kW de Potência térmica, em forma de água quente a 90 °C. Para alcançar estes valores de potência é necessário produzir 97 kg de gás/dia, para um funcionamento de oito horas, em plena carga. Admitiu-se uma dimensão entre 50 e 80 mm para a biomassa em forma de estilha, podendo esta apresentar-se com uma humidade até 20%.

O motor de combustão interna, é um Volvo 230 B de 2300 cm³ de cilindrada e funciona segundo o ciclo Otto, com ignição elétrica por faísca alternada. O motor está preparado para ser alimentado por gás propano ou gás de síntese proveniente do gaseificador, sendo essa mudança operada manualmente. O sistema de arrefecimento do bloco do motor é feito por intermédio de um permutador de placas para a recuperação da energia térmica, bem como um permutador de calor tubular para recuperar a energia dos gases de escape.

Os testes de funcionamento do gaseificador e do sistema de produção de eletricidade, constituído pelo motor de combustão interna e alternador revelaram-se promissores. Existem, no entanto, alguns problemas relacionados com a formação de alcatrão e cinzas bem como a alimentação da estilha à zona de pirólise, identificada na figura 1.3 pelo cone que dá acesso à zona de combustão.

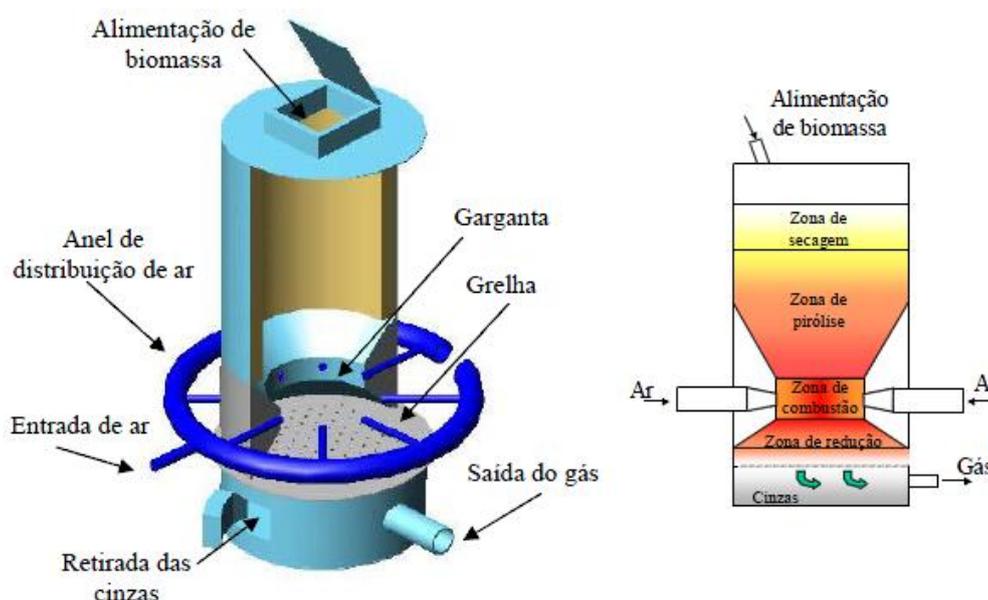


Figura 1.3. Esquema de gaseificador de leito fixo concorrente (Andrade, 2007).

Devido às irregularidades de tamanho e forma paralelepípedica da estilha o escoamento na zona de pirólise do gaseificador não é regular e ocorrem com frequência bloqueios em forma de abóboda ou o escoamento apenas da zona central, gerando um buraco em altura de forma cilíndrica, afetando ambas as situações a produção regular de gás de síntese (Figura 2.3).

Na dimensão da biomassa ótima para cada tipo de gaseificador é considerado um parâmetro muito importante, pois podem surgir problemas operacionais se, este parâmetro, não for tido em conta. A Tabela 1.1 apresenta as dimensões tipo de combustíveis para os diferentes tipos de gaseificadores.

Tabela 1.1. Dimensão típica da biomassa para diferentes tipos de gaseificadores. (Milne, T. *et al.*, 1988 *apud* Pedrosa, P., 2013).

Tipo de gaseificador	Dimensão da biomassa (cm)
Leito fixo concorrente (<i>downdraft</i>)	1 - 10
Leito fixo contracorrente (<i>updraft</i>)	0,5 - 5
Leito fixo de fluxo cruzado (<i>cross flow</i>)	1 - 10
Leito fluidizado borbulhante	< 2
Leito fluidizado circulante	< 1

Pela revisão bibliográfica e experiência já adquirida com o funcionamento do gaseificador é possível concluir que para se conseguirem bons resultados na gaseificação é necessário que a biomassa de alimentação tenha um baixo teor de humidade (< 20%), que a sua granulometria seja uniforme, disponha de um sistema capaz de aproveitar a recuperação de calor do gás antes da entrada no motor (para aquecimento de ar ou secagem de biomassa). Mesmo assim as cinzas terão entre 4 a 7% de carbono que não é convertido (Pedrosa, 2013).

1.2. Objetivos

A presente dissertação surge no âmbito do processo de desenvolvimento e aperfeiçoamento do funcionamento do gaseificador, e tem como objetivo o estudo do escoamento da estilha no interior da tremonha de alimentação do gaseificador, acima da zona de combustão, identificada na Figura 1.3.

É necessário iniciar a pesquisa pela literatura para reconhecer as bases teóricas que fundamentam a ocorrência de obstruções no escoamento de materiais a granel, e quais os parâmetros físicos que explicam o escoamento desses materiais que possam ser importantes para desenvolver este estudo, com vista a aperfeiçoar a forma da tremonha.

Importa avaliar a influência da inclinação das paredes da tremonha e da abertura do canal de descarga para maior ou menor facilidade de escoamento da estilha e na formação dos dois tipos de bloqueio atrás referidos. É importante ainda avaliar a influência do tamanho e o efeito da humidade da estilha.

Os objetivos passam ainda por analisar as soluções preconizadas para desbloquear o escoamento de materiais a granel e a possível aplicabilidade ao escoamento de estilha.

No global, com este estudo preliminar pretende-se identificar os parâmetros físicos da estilha de pinho e eucalipto e da geometria da tremonha que são mais relevantes para conduzir um estudo mais aprofundado sobre este tema.

1.3. Organização da dissertação

A dissertação está organizada em oito capítulos. No capítulo um é apresentado o processo de gaseificação construído na herdade da Aberta Nova, e enquadrado o trabalho sobre o escoamento de estilha.

No capítulo dois é efetuado um resumo literário dos processos teóricos envolvidos no escoamento de materiais sólidos a granel, bem como das tensões presentes aquando da descarga da tremonha.

No capítulo três são apresentados os fundamentos da obtenção das propriedades físicas dos sólidos a granel e o modo de determinação dessas propriedades.

No capítulo quatro, a biomassa utilizada para a alimentação do gaseificador é caracterizada e é efetuada uma avaliação sobre a biomassa a utilizar nos ensaios de escoamento.

No capítulo cinco são apresentadas todas as variáveis que foram estudadas no decorrer da execução da dissertação, bem como os procedimentos que foram utilizados para a realização dos ensaios.

No capítulo seis são apresentados os resultados dos ensaios de escoamento da estilha num tremonha.

No capítulo sete são apresentadas as conclusões e definidas algumas propostas de trabalho futuro.

No capítulo oito encontram-se as referências bibliográficas de suporte à elaboração desta dissertação.

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

2. ESCOAMENTO DE SÓLIDOS A GRANEL

Segundo Janike (1964), “o escoamento de um qualquer material realiza-se quando as pressões presentes são tais que o corte ocorre sem destruir as propriedades do produto armazenado.” As pressões presentes em silos são muito diferentes das encontradas num tanque que contém um fluido, e são dominadas por fenómenos de atrito. “No escoamento de materiais sólidos a granel poucas analogias podem ser feitas sobre o armazenamento de materiais líquidos. As pressões que se desenvolvem num sólido armazenado podem ter um impacto importante sobre o escoamento livre por gravidade a partir de um silo”, Rotter (2008).

A descarga por gravidade de um produto armazenado pode realizar-se mediante dois tipos de escoamento: escoamento de massa e escoamento de funil Figura 2.1. A diferença entre o escoamento ocorre devido a diferenças entre as propriedades físicas do produto, a geometria, e as características da superfície da tremonha.

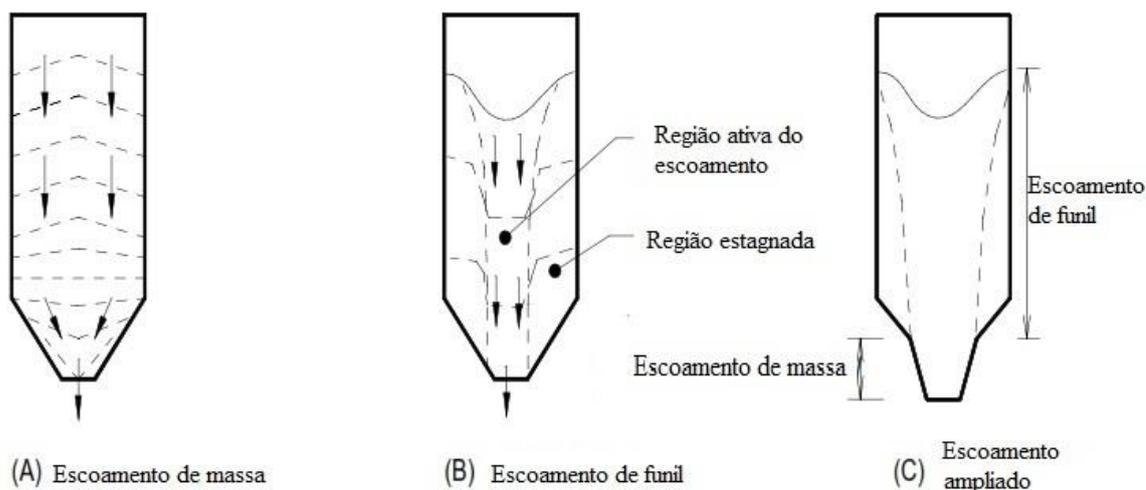


Figura 2.1. Tipos de escoamento.

“As principais diferenças entre os tipos de escoamento estão nas diferenças de movimento entre várias zonas do escoamento. Normalmente no escoamento de massa todo

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

o material sólido dentro do silo está em movimento, contudo não necessariamente à mesma velocidade. No escoamento de funil apenas o material no centro do escoamento, acima da saída da tremonha, está em movimento enquanto o material que está em contacto com as paredes se mantém estagnado.” Chase (2004).

Segundo Roberts (1994), os limites entre escoamento de massa e escoamento de funil são bem definidos. Estes limites para tremonhas cónicas dependem do ângulo da tremonha com a vertical, α (Figura 5.3), o ângulo efetivo de atrito interno, ϕ_e (ângulo em que o material desliza sobre si próprio) e do ângulo de atrito da parede, ϕ_w (ângulo necessário para haver deslizamento por gravidade, sob uma superfície de parede) (Figura 2.2).

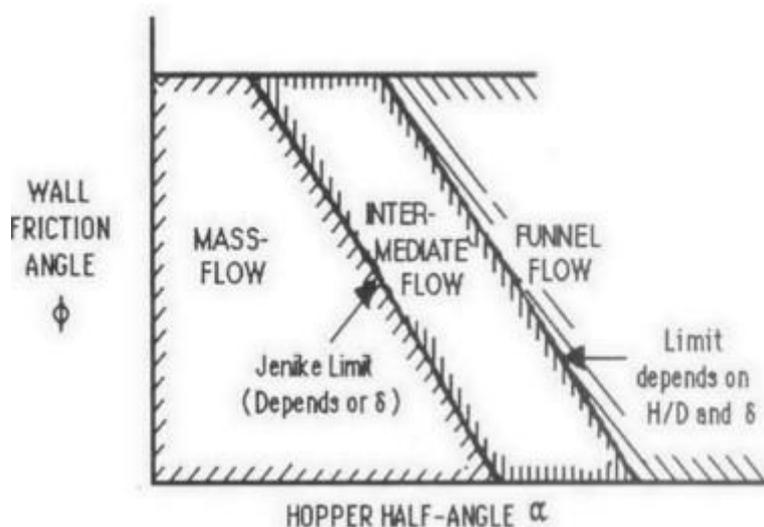


Figura 2.2. Regimes de escoamento para determinar o ângulo da tremonha com a vertical (Roberts, 1994).

2.1. Tipos de escoamento

2.1.1. Escoamento de massa

Este tipo de escoamento (A) representado na Figura 2.1 considera que todo o material está em movimento e não existem regiões estagnadas. Ocorre quando o atrito das paredes é baixo e o declive é suficientemente elevado para as partículas deslizarem sobre

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

ele. Recorre à função *first-in first-out*, dado que o material que entra no silo em primeiro lugar sai em primeiro lugar (Maynard, 2004).

Uma vantagem deste tipo de escoamento é a renovação do material armazenado, pois o tempo de permanência é idêntico para todas as partículas dentro do silo, anulando a probabilidade de deterioração do sólido a granel. A possibilidade da descarga ser apenas executada devido à força gravítica, sem a ajuda de nenhum dispositivo externo, permite a utilização de toda a capacidade de carga do silo.

2.1.2. Escoamento de funil

O escoamento de funil, (B) representado na Figura 2.1 caracteriza-se pela constituição de um canal, acima da abertura de descarga e alinhado com a saída da tremonha, ladeado por uma zona onde o material sólido a granel se mantém imóvel (região estagnada). O escoamento de funil ocorre quando o ângulo de atrito da parede da tremonha (ϕ_w , Figura 3.6) não é suficientemente acentuado e o atrito é baixo o suficiente para o material fluir. Sob estas condições, as partículas deslizam sobre elas mesmas em vez de deslizarem sobre as paredes da tremonha. Desenvolve-se assim a designada região ativa do escoamento (Maynard, 2004). Este tipo de escoamento conduz a menores capacidades de armazenamento, devido à região estagnada, que só é removida ao evacuar completamente o silo. É importante referir que o tempo de armazenamento tende a deteriorar o material sólido, e que nas regiões estagnadas poder-se-á encontrar material degradado, existindo mesmo a possibilidade de alteração das suas propriedades.

Ainda, devido à existência da região estagnada as tensões na parede vão ser menores pois “a magnitude da tensão na zona de convergência do escoamento é proporcional à distância da abertura da tremonha, bem como a dependência ao ângulo” (Janike 1964).

2.1.3. Escoamento ampliado

O escoamento ampliado (C) representado na Figura 2.1 é uma combinação dos dois tipos de escoamento anteriores, e desenvolve-se quando uma tremonha de escoamento

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

de massa é aliada a uma tremonha de escoamento de funil. O escoamento de massa é concebido para ativar o escoamento em funil, o qual é dimensionado para prevenir a formação da obstrução em tubo. Os ângulos da tremonha de escoamento de funil são inferiores aos necessários para um escoamento de massa (Maynard, 2004).

2.2. Problemas de escoamento

O tipo de obstruções normalmente encontradas no escoamento devem-se ao facto do sólido a granel atingir resistência suficiente para se suportar a si próprio, impedindo o material situado sobre ele de fluir livremente.

Os problemas de escoamento predominantes são a ocorrência da paragem do escoamento e a sua irregularidade. A paragem do escoamento deriva do aparecimento da obstrução em abóbada ou obstrução em tubo, em contrapartida o escoamento irregular acontece na altura da descarga.

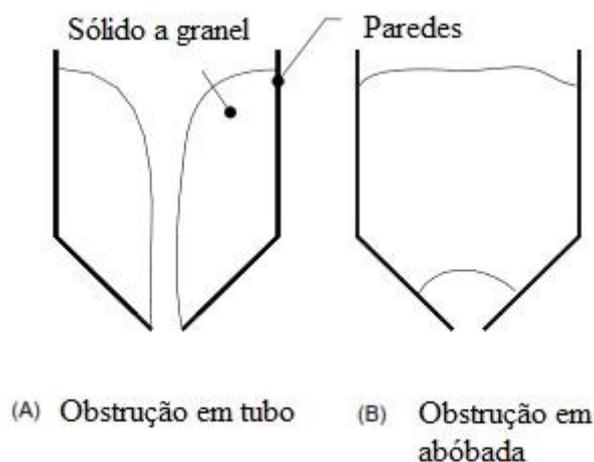


Figura 2.3. Tipos de obstruções.

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

2.2.1. Obstrução em tubo

Na Figura 2.3 (A) é ilustrada a obstrução em forma de tubo, estando normalmente presente em silos com escoamento de funil. O problema é comum quando se armazenam produtos que demonstram elevada coesão, quando o escoamento é feito apenas e diretamente acima da saída do reservatório, e quando o material restante estagna e não flui. A região estagnada é estável o suficiente para não fluir e, deixa assim, um furo cilíndrico que acompanha todo o material armazenado.

2.2.2. Obstruções em abóbada

A obstrução em abóbada (B), representada na Figura 2.3, está associada à formação de uma espécie de arco ou ponte imediatamente acima da abertura da tremonha, que impede a realização do escoamento. Este tipo de arco pode-se criar pela interligação mecânica das partículas sólidas, ou pela elevada coesão do material. Um arco de interligação mecânica ocorre quando as partículas são grandes quando comparadas com a saída da tremonha. Um arco de coesão ocorre quando uma compactação entre as partículas fá-las aderir entre si, levando a uma obstrução (Maynard, 2004).

2.2.3. Segregação

Este tipo de problema de escoamento existe quando o material sólido armazenado não tem uma granulometria bem definida e existe uma grande variação na dimensão das partículas. Normalmente as partículas de maiores dimensões dispõem-se junto às paredes do silo e as de menor dimensão no centro. Dependendo do tipo de escoamento (funil ou massa), as partículas do centro seriam descarregadas em primeiro lugar, levando a problemas de segregação.

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

2.2.4. Tempo de armazenamento

O tempo de armazenamento, para alguns materiais, é muito importante pois com o aumento do tempo de armazenamento as propriedades vão-se deteriorando. Outro fator importante é o aumento da força de coesão entre partículas, que aumenta à medida que o tempo de armazenamento cresce, aumentando assim a dificuldade de escoamento.

2.3. Parâmetros que afetam o escoamento

Para conseguir um escoamento ótimo, a abertura de descarga da tremonha deve ser suficientemente grande. Alguns fatores que influenciam o tamanho da abertura de descarga da tremonha são mencionados por Maynard (2004), que refere que para prevenir o aparecimento de obstrução de abóbada, a abertura deve ser seis a oito vezes maior que a partícula de maior tamanho, sabendo que a força de coesão entre as partículas é proporcional ao tamanho entre elas. A humidade presente no material sólido é também responsável pelo aumento da força de coesão entre partículas, no máximo de 70% até 90% de saturação.

O declive da tremonha pode ser calculado em função da força de atrito entre as partículas e a parede de escorregamento. Do teste estabelecido pela norma ASTM D6128-00, pode obter-se o valor do ângulo de atrito da parede (ϕ_w), que é uma outra forma de expressar o coeficiente de atrito (μ). A partir deste valor o declive da tremonha pode ser obtido usando o método desenvolvido por Andrew Janike em Janike (1964). Segundo o autor diversos parâmetros afetam o atrito da parede, tais como o tipo de material que constitui a parede da tremonha. Quando menor for a rugosidade inerente ao material menor será o atrito da parede, podendo ser utilizados ângulos menores da tremonha para obter escoamento de massa. O tipo de material sólido a granel e as suas propriedades, tais como a sua humidade, composição, temperatura e tamanho vão afetar o atrito da parede. A corrosão e o desgaste abrasivo provocado por certos materiais sólidos altera muitas vezes as propriedades do material da tremonha, o que leva à alteração das características do escoamento, podendo mesmo provocar a sua paragem.

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

2.3.1. Função de escoamento

Ao efetuarmos uma análise às tensões presentes em uma partícula durante descarga

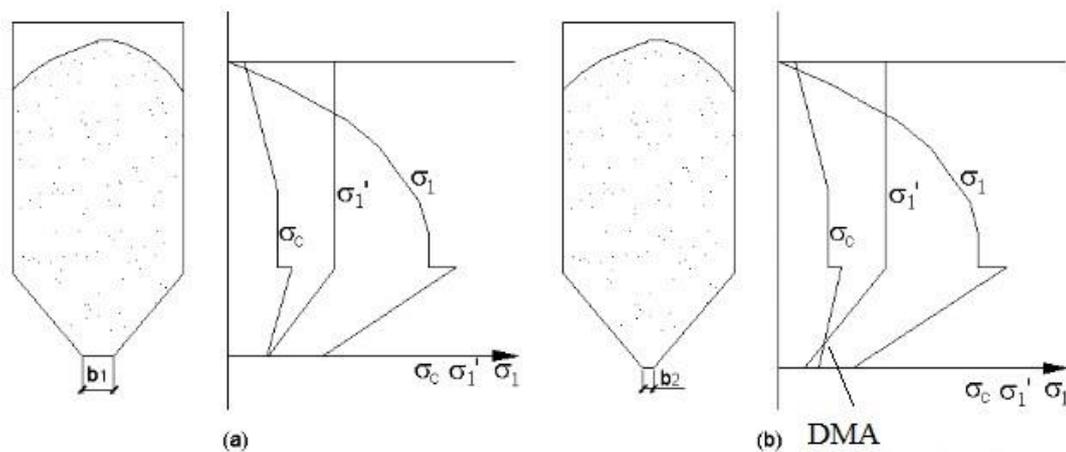


Figura 2.4 (a), observamos que à medida que o escoamento se desenrola e a partícula desce, a tensão de consolidação σ_1 aumenta. Esse aumento é devido à pressão crescente que vai sendo exercida sobre o material enquanto desce no silo. Na transição entre o corpo do silo e a tremonha ocorre um pico de pressão, e a partir desse ponto a pressão vai diminuindo até que a partícula seja descarregada. O aumento da consolidação original, também, o aumento da tensão de cedência não confinada σ_c .

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

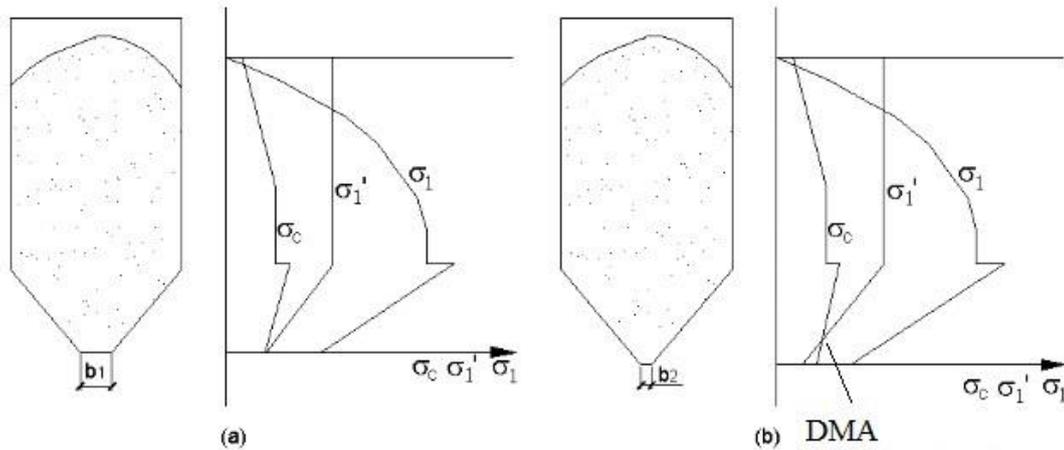


Figura 2.4. Tensões ao alterar a abertura de descarga da tremonha (Janike, 1964).

A tensão σ_1' representa a sollicitação na partícula necessária para romper um arco estável imaginário quando é sustentado pelas paredes, onde a sua intensidade depende da sua posição no escoamento.

Procedendo à alteração da abertura de b_1 para b_2

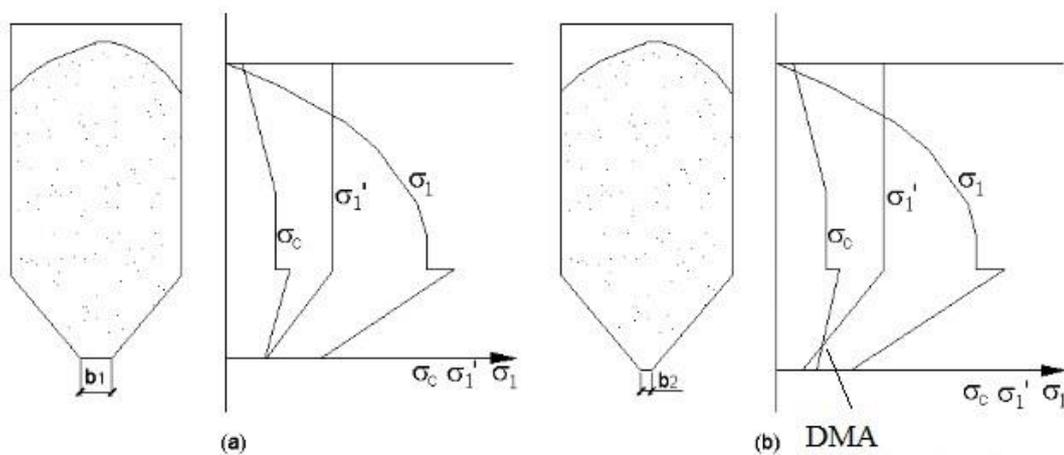


Figura 2.4 (b) mantendo todas as propriedades do silo e do material de descarga, a tensão σ_c vai intersectar a tensão σ_1' , e esse ponto é a dimensão mínima de abertura (DMA) para a não ocorrência de obstrução em abóbada.

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

Se optarmos por colocar as grandezas em função uma da outra, ou seja, a tensão σ_c em função da tensão σ_1 a curva que se obtém chama-se função do escoamento (FF). A outra variável representada no gráfico (Figura 2.5) denomina-se fator de escoamento da tremonha (ff) e representa a tensão na formação de uma abóbada. Sempre que ff está abaixo de FF as tensões são insuficientes para provocar o escoamento. Em contrapartida acima de FF as tensões encontradas ultrapassam a resistência e o escoamento ocorrerá.

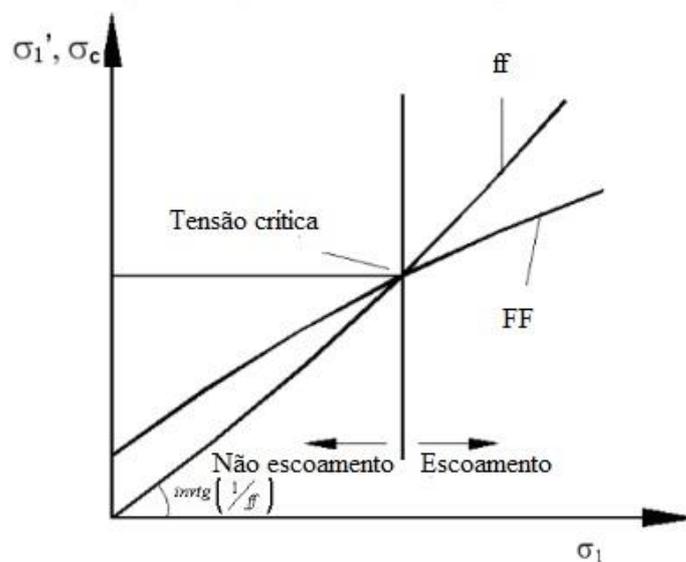


Figura 2.5. Função de escoamento.

Como já foi abordado atrás no subcapítulo 2.2.4 alguns tipos de materiais sólidos granulares aumentam sua força de coesão com o aumento do tempo de armazenamento. O tempo de armazenamento vai assim condicionar também a função de escoamento. Testes de compressão uniaxial permitem obter várias curvas FF para diferentes tempos de consolidação.

Ao colocar uma das funções de escoamento em função do tempo (FF_t) conforme o gráfico da Figura 2.6, o ponto da tensão crítica seria mais acima. Isso levaria a que a abertura da tremonha deve ser maior, de modo a prevenir a obstrução em abóbada para produtos que sofrem alterações com o tempo de armazenamento. No Anexo A é descrito a finalidade do teste de compressão uniaxial.

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

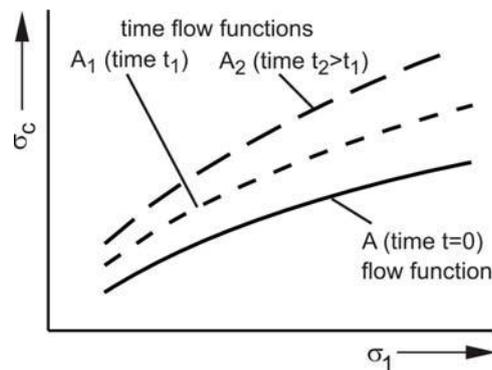


Figura 2.6. Função de escoamento em função do tempo.

2.3.2. Caracterização numérica da fluidez

A fluidez de um sólido granular depende das forças de coesão entre as partículas individuais. Entre partículas muito finas, as forças de coesão devido a efeitos de *Van der Waals* tem um papel muito importante, já em partículas com umidade, pontes líquidas formam-se entre partículas que são de igual importância. Ambas as forças de coesão descritas dependem da distância entre partículas e do tamanho das mesmas (Schulze 2011).

A fluidez é uma característica em função da tensão σ_c , dependente da tensão σ_1 e do tempo de armazenamento t . A razão entre as tensões leva a um índice que caracteriza a fluidez – função de escoamento:

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (2.1)$$

A tensão de consolidação só por si não é suficiente para descrever a fluidez de um sólido a granel em apenas um valor numérico (Schulze 2011). Contudo, este tipo de classificação foi usada por Jenike (1964), e com esta classificação estabeleceu o comportamento do escoamento:

$FF < 1$	<i>não existe escoamento</i>
$1 < FF < 2$	<i>escoamento muito aderente</i>
$2 < FF < 4$	<i>escoamento aderente</i>

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

$$\begin{aligned} 4 < FF < 10 & \text{ escoamento fácil} \\ 10 < FF & \text{ escoamento livre} \end{aligned}$$

FF é um indicador da fluidez, e quanto mais elevado for, melhor fluir o sólido a granel armazenado.

A Figura 2.7 representa a função de escoamento A e retas que representam um valor constante FF , então a fluidez de um sólido granular depende do nível da tensão de consolidação. Assim, a maioria dos sólidos granulares vão obter uma melhor fluidez quanto maior for a tensão de consolidação (Schulze, 2011).

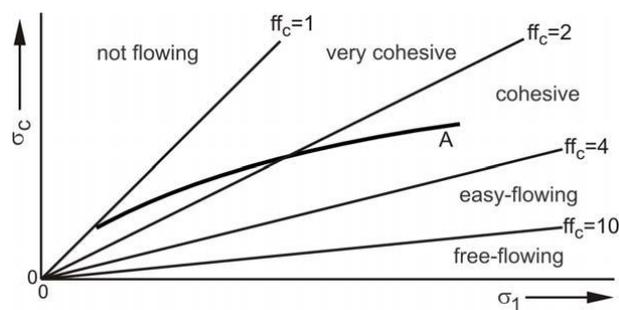


Figura 2.7. Caracterização da fluidez (Schulze, 2011).

Então para ocorrer escoamento por gravidade:

$$FF > ff \text{ ou seja } \frac{\sigma_1}{\sigma_c} > \frac{\sigma_1}{\sigma_1'} \quad (2.2)$$

Para materiais sensíveis ao tempo e armazenamento a sua fluidez vai diminuir consoante o aumento do tempo do mesmo, visto que a força de coesão entre partículas vai aumentando com o tempo.

A FF_t representa a tensão σ_c que surge depois do tempo de armazenamento após a aplicação da tensão σ_1 durante o período de tempo, t .

A partir da FF_t e a FF , apresentada na Figura 2.8 (a) abaixo, juntamente com a fronteira dos intervalos definidos da caracterização do escoamento na Figura 2.7, podemos observar que cada FF medida com σ_1 iguais, mas diferentes tempos de consolidação, vai diminuir com o tempo de consolidação como observado na Figura 2.8 (b).

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

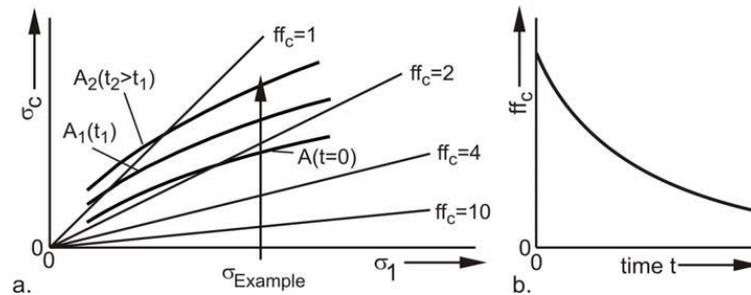


Figura 2.8. Caracterização da fluidez com o tempo (Schulze, 2011).

Outro fator importante a ter em conta no estudo da fluidez é o fator de escoamento da tremonha, ff . É uma propriedade do conjunto tremonha-sólido armazenado e depende das características de ambos. Para o cálculo deste fator é necessário conhecer o ângulo efetivo de atrito interno ϕ_e , o ângulo de atrito da parede, ϕ_w e a inclinação da tremonha, α . Janike publicou gráficos onde ff pode ser determinado para silos de diferentes geometrias (Palma, 2005). O fator de escoamento da tremonha também é um indicador da fluidez, porém quanto mais baixo o seu valor melhor é a fluidez. O que o caracteriza ff , é a relação da tensão de consolidação, σ_1 pela tensão que representa uma solitação onde um arco estável imaginário é sustentado pelas paredes da tremonha, σ_1' .

Na Figura 2.9 está representado o exemplo de um gráfico de obtenção do fator de escoamento da tremonha (ff).

Em apêndice estão informações que complementam o corpo do trabalho sobre a análise do gaseificador, a exposição de soluções de desobstrução do escoamento, o protocolo de ensaio utilizado, e são expostos resultados adicionais, que complementam as observações retiradas na conclusão.

Em anexo são apresentadas informações complementares de testes citados na dissertação, de análise de tensões no círculo de Mohr.

Escoamento de sólidos a granel

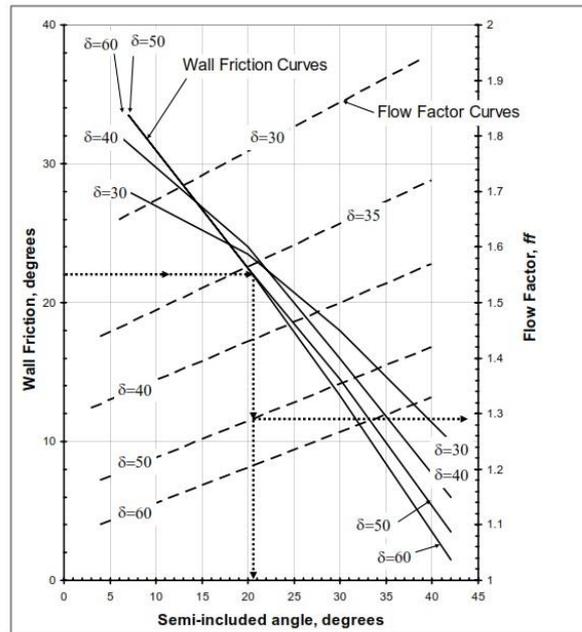


Figura 2.9. Gráfico de cálculo de fator de escoamento (Chase, 2004).

Para obter o ângulo de inclinação da parede com a vertical, a partir do gráfico é necessário conhecer o ângulo efetivo de atrito interno ϕ_e , o ângulo de atrito da parede, ϕ_w . Por exemplo, para $\phi_w = 22^\circ$ e para $\phi_e = 50^\circ$ (corresponde ao $\delta = 50^\circ$ na figura 2.9) é possível obter o valor da inclinação da tremonha $\alpha = 30,5^\circ$ e $ff = 1,19$.

3. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SÓLIDOS A GRANEL

3.1. Fundamentos

Uma das principais razões para o escoamento não se processar da forma devida são as propriedades físicas dos produtos sólidos a granel armazenados. Para determinar estas propriedades é necessário conhecer o tipo de escoamento a usar, o tipo de tremonha, sua geometria e as tensões presentes nas partículas. As principais propriedades para fins do estudo do escoamento são:

Massa volúmica aparente – ρ

Granulometria

Ângulo de atrito interno – ϕ_e

Ângulo de atrito da parede – ϕ_w

Função de escoamento – FF

Fator de escoamento da tremonha – ff

A importância de conhecer os mecanismos representativos do escoamento de sólidos a granel incitou investigadores a desenvolver pesquisas nesta área, de forma a aperfeiçoar o entendimento sobre o escoamento nas fases de carga e descarga do silo, bem como a tentar padronizar o procedimento para obtenção das suas propriedades. Grandes investigadores tais como Janike (1964), começaram por pesquisar sobre a capacidade de utilizar equipamentos mecânicos de medição das propriedades dos solos, e utilizá-los para medir as propriedades dos sólidos a granel. Janike desenvolveu grande parte da sua investigação em solos e verificou que as tensões dos materiais presentes nos silos eram de menor amplitude que nos solos. Assim, Janike desenvolveu um dispositivo que permite medir algumas das propriedades principais para o estudo do escoamento de materiais a granel. Nos anos 60 Janike publicou o seu trabalho fundamental em silos e materiais a granel, onde introduziu o dispositivo “*Janike Shear Tester*” se baseia num teste de corte direto. Foi o primeiro teste desenvolvido para o estudo de materiais sólidos granulares. A sua popularidade entre muitos investigadores resulta da capacidade de determinar a função de

escoamento FF , ângulo de atrito interno ϕ_e , ângulo de atrito da parede ϕ_w e o efeito do tempo de consolidação.

Com a finalidade de avaliar a exatidão e a precisão dos resultados obtidos pelo dispositivo de Janike, o grupo “*Working Party on the Mechanics of Particulate Solids*” (WPMPS) realizou vários ensaios com o dispositivo. Após análise pormenorizada pelo grupo, foi executado um novo procedimento para a operação com o dispositivo, que tem o nome de “*Standard Shear Testing Technique for Particulate Solids Using Janike Shear Cell*” (1989).

3.2. Determinação das propriedades físicas dos sólidos a granel

Para a maioria dos sólidos a granel a determinação das propriedades físicas dos produtos armazenados cabe a testes de corte. Como referido em 3.1 o equipamento de teste de corte direto, proposto por Janike, é um dos mais versáteis e é utilizado por muitos investigadores. Existem no entanto muitos outros tipos de dispositivos de corte (Vifoe e Salmén, 2007; Johanson, 1992 e Schulze, 2011); contudo neste trabalho, será destacado apenas o dispositivo de Janike.

A célula de corte de Janike é composta por um anel inferior (anel de molde), um anel do mesmo diâmetro superior (anel superior) e uma tampa. A tampa é carregada no centro com uma força normal, F_N . A parte superior da célula de teste é deslocada horizontalmente contra a parte inferior fixa por uma haste acionada electromecanicamente. A força é feita num suporte que está fixo à tampa. Devido ao deslocamento do anel superior e da tampa em relação ao anel inferior o sólido granular sofre uma deformação de corte, onde a força de corte, F_S é medida. A Figura 3.1 mostra a célula de corte de Janike.

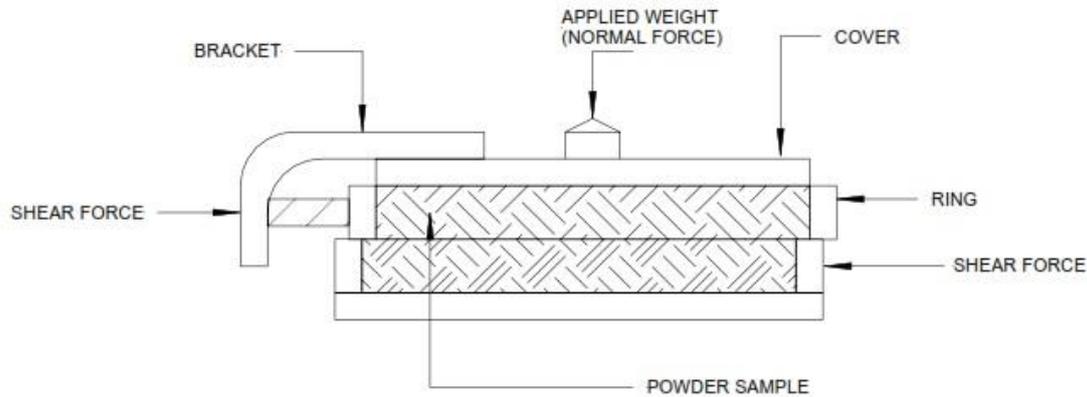


Figura 3.1. Célula de corte de Janike (Chase, 2004).

No decorrer do teste à tensão de corte, esta aumenta à medida que o tempo aumenta, como é possível observar na Figura 3.2. Quando a tensão de corte τ_{pre} , atinge determinado valor, que é função da tensão normal σ_{pre} , esta torna-se constante. A deformação do produto a granel armazenado, com σ_{pre} e τ_{pre} constantes denominar-se-á estado de escoamento estável (“*steady-state flow*”). Quando este estado é alcançado diz-se que a amostra está criticamente consolidada. No processo de pré-corte (“*preshear*”) a amostra encontra-se num estado de consolidação definido. Assim que o estado de escoamento estável é alcançado, os valores de σ_{pre} e τ_{pre} formam então o ponto de pré-corte (“*preshear point*”), na Figura 3.2.

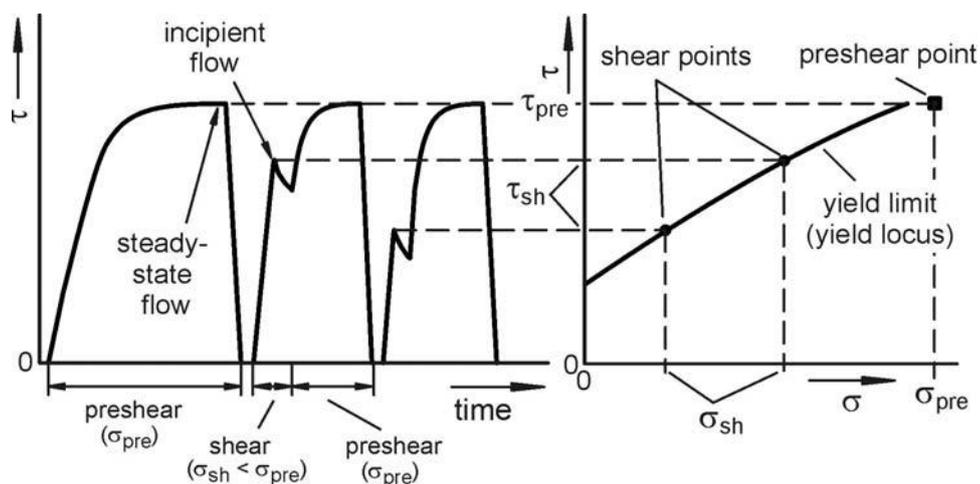


Figura 3.2. Gráfico do procedimento do teste de corte (Shulze, 2011).

No decorrer do ensaio, depois da amostra alcançar o valor de pré-corte, é efetuado o corte, reduzindo a tensão normal $\sigma_{sh} < \sigma_{pre}$. A tensão de corte sobe rapidamente até se iniciar o escorregamento, o início do escoamento (“*incipiente flow*”) como é

forma entre a linha de escorregamento e o eixo das tensões σ é o ângulo efetivo de atrito interno ϕ_e .

Caso sejam esperadas influências de temperatura, humidade e tempo de armazenamento é necessário que os testes de corte sejam executados de acordo com essas condições.

Para a execução dos testes, tendo em conta o tempo de armazenamento, pode utilizar-se a mesma a célula de corte de Janike combinada com o tempo de consolidação. Após obter o estado de escoamento estável e pré-corte, a amostra é armazenada durante um determinado tempo t sob a tensão normal $\sigma = \sigma_1$. De seguida o processo de corte é igual ao descrito acima. Conforme supracitado, os produtos com aumento do tempo de armazenamento aumentam a força de coesão, então a resistência ao corte aumenta. Assim, a linha de escorregamento com o tempo está acima (Figura 3.4) do lugar da linha de escorregamento observado na Figura 3.3.

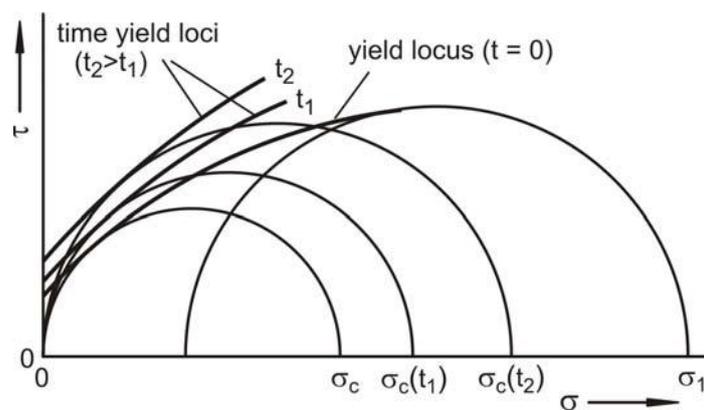


Figura 3.4. Gráfico do ponto de escoamento estável com o aumento do tempo de armazenamento (Shulze, 2011).

O atrito do sólido granular com a parede do silo, conhecido como atrito na parede, pode ser determinado também recorrendo ao dispositivo de Janike (Figura 3.5). O coeficiente de atrito de parede ou o ângulo de atrito na parede, respetivamente, é importante para a conceção de silo. Para tal o anel inferior é substituído por uma superfície do material da tremonha. A tensão de corte da parede, τ_w , necessária para efetuar o escorregamento sobre a amostra de material da tremonha é medida diferentes tensões normais da parede σ_w .

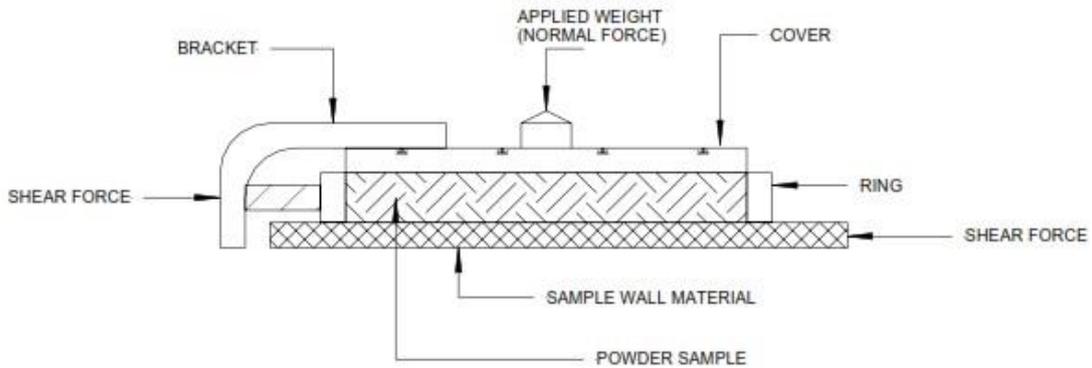


Figura 3.5. Teste de determinação do atrito na parede (Chase 2004).

Colocando os valores retirados no teste, representado graficamente, a tensão de corte da parede vs tensão normal da parede, unindo os pontos vamos obter a linha de escorregamento da parede. O ângulo de atrito da parede, ϕ_w é obtido através do ângulo entre a linha de escorregamento da parede e o eixo da tensão normal da parede, Figura 3.6.

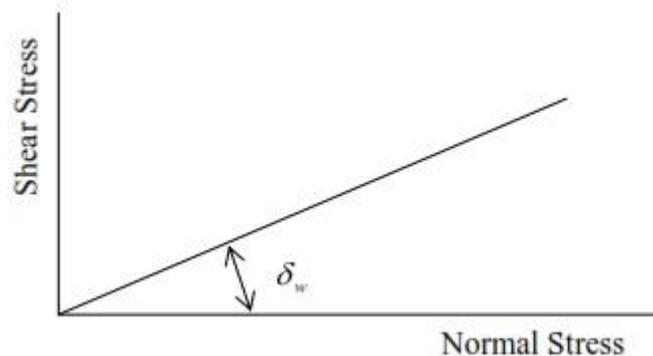


Figura 3.6. Determinação do ângulo de atrito da parede (Chase, 2004).

É também determinado pela relação:

$$\phi_w = \arctan\left(\frac{\tau_w}{\sigma_w}\right) = \arctan(\mu) \quad (3.1)$$

Este teste tem como objetivo ensaiar vários materiais a fim de aferir o mais apropriado para as características do escoamento.

O tipo de escoamento no silo está diretamente relacionado com a dimensão das partículas, pois estas podem ou não formar uma obstrução ao escoamento. As partículas mais finas são responsáveis pelo escoamento ativo, enquanto as partículas de maior dimensão são

agentes passivos. Por consequência as partículas de maior tamanho são as predispostas a se agruparem junto da boca de descarga.

A norma australiana AS-3774 classifica os produtos mediante cinco tipos de diâmetro de partículas.

Tabela 3.1. Classificação do produto segundo a norma Australiana AS-3774.

Classificação do produto armazenado	Diâmetro das partículas sólidas
Pó	Menores que 0,15 mm
Grão fino	Menores que 3 mm
Grão grosso	Menores que 12 mm
Granular	Maiores que 12 mm
Irregular	Fibras, fibras alongadas e outros.

Face às características do material sólido objeto de estudo, os testes atrás descritos afiguram-se difíceis de produzir resultados consistentes para diferentes amostras, dada a irregularidade de tamanhos e forma paralelepípedica da estilha.

4. CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DA BIOMASSA

A central de biomassa instalada na herdade da Aberta Nova Sociedade Agro-Florestal S.A tem como objetivo o aproveitamento de resíduos da atividade florestal, tal como a ramagem ou a madeira afetada pelo nemátode da madeira do pinheiro¹. As espécies de madeira mais consumidas são o eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e o pinheiro bravo (*Pinus pinaster*).

Os resíduos da atividade florestal são estilhadas num destroçador calibrado para granulometrias pré-definidas. No centro de processamento da biomassa, os resíduos da atividade florestal são transportados para o tambor do destroçador através de um tapete rolante e do movimento dos rolos, da qual se ilustra na Figura 4.1.

O destroçador é movido por um motor de combustão interna, que fornece ao tambor capacidade para a produção da estilha. O destroçador está regulado para produzir estilha com tamanho calibrado. No estudo efetuado foram usadas duas amostras de estilha (de pinho): a primeira com dimensões compreendidas entre 50 e 80 mm de comprimento, 20 e 50 mm de largura e 10 a 20 mm de altura, como ilustra a Figura 4.2, a segunda com uma granulometria mais reduzida, com dimensões compreendidas entre 30 e 50 mm de comprimento, 20 e 50 mm de largura e 5 a 15 mm de altura como ilustra a Figura 4.3.

¹ O Nemátodo da Madeira do Pinheiro (NMP), cujo nome científico é *Bursaphelenchus xylophilus*, é um verme microscópico causador da doença da murchidão dos pinheiros. Este organismo é classificado de quarentena pela legislação Comunitária, o que significa que os Estados Membros que sejam afetados são obrigados a adotar medidas específicas para o seu controlo e erradicação (Forestis, 2009).

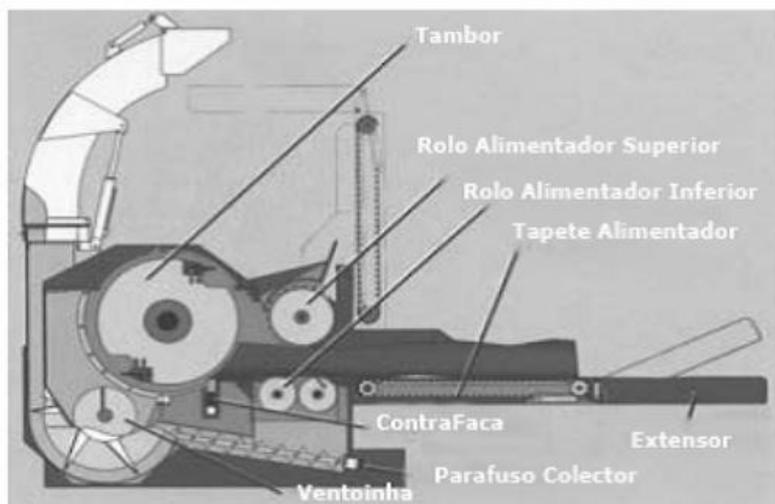


Figura 4.1. Exemplo do funcionamento de um destroçador de facas.



Figura 4.2. Exemplo do tamanho da estilha.



Figura 4.3. Exemplo do tamanho da estilha de menor dimensão.

Tanto o pinheiro bravo, como eucalipto apresentam grande variação nas suas propriedades mecânicas em função da idade da árvore. A massa volúmica do pinheiro bravo varia entre os 450 e 760 kg/m³, segundo Cachim *et al.* (2012). A massa volúmica do eucalipto é, em média, para a humidade de equilíbrio de 12 %, de 850 kg/m³, e 700 -800 segundo a norma NP EN 350-2 (Almeida, 2006 *apud* Pedrosa, 2013).

A massa volúmica aparente das amostras de estilha (de pinho) usada no estudo foi medida com um recipiente metálico com dimensões de 315 mm de comprimento, 180 mm de largura e 290 mm de altura. Para efetuar a medição o recipiente foi preenchido até à superfície livre, sem efetuar compactação e posteriormente pesado, sendo depois medido o peso do recipiente vazio. Foram executados três ensaios, obtendo-se um valor médio de 210,73 kg/m³ com um desvio padrão de 3,74 kg/m³.

Relativamente à composição química das duas espécies de biomassa mais consumidas, dados bibliográficos para estas espécies no território nacional, mostram que não existem diferenças significativas entre elas (Oliveira, 2008 *apud* Pedrosa, 2013).

A madeira é constituída essencialmente, por compostos estruturais e compostos não estruturais. Os componentes estruturais são responsáveis pelas propriedades mecânicas e são compostos por celulose, hemicelulose e a lenhina. Os componentes não estruturais são compostos por matéria do tipo orgânico ou inorgânico como as cinzas (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Composição elementar mássica média 1 e 2 (Oliveira, 2008 *apud* Pedrosa, 2013) e 3 Diniz, 2008 *apud* Pedrosa, 2013).

Elemento químico	Valores médios (1)	Eucallpto (2)	Pinho (3)
	(%)		
Carbono	50,0	49,0	51,8
Hidrogénio	6,0	5,9	6,3
Oxigénio	42,0	44,9	41,3
Enxofre	Vestígios	0,02	Vestígios
Azoto	1,0	0,1	0,1
Cinzas	1,0	nd	0,5

nd – Não disponível.

Dentre os contaminantes associados à biomassa e que são prejudiciais ao processo de gaseificação e produção de um gás de sintético de qualidade estão o sulfeto de hidrogénio (H_2S), a amónia (NH_3), metais e alcatrão.

5. MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA SIMULAR O ESCOAMENTO DA ESTILHA NUMA TREMONHA

Para estudar o escoamento da estilha numa tremonha foi contruída uma montagem experimental, com capacidade de alteração facilitada da inclinação das paredes e da abertura de descarga, e permitir uma fácil visualização do escoamento no interior da tremonha, baseada em Barletta e Poletto, 2013. A construção foi realizada recorrendo a duas placas de acrílico transparente (frontal e traseira) e duas placas de dimensões 400 x 300 mm, do mesmo material usado para a construção do gaseificador – inox 316 L (Figura 5.1). As placas de inox estão fixas ao acrílico através de quatro grampos de fixação, permitindo rapidamente a alteração da abertura de descarga e do ângulo das paredes com a vertical.

Para que durante o escoamento a posição das placas não sofra alteração, foi colocado na parte inferior das placas um varão roscado, de cada lado, garantindo assim um melhor fixação das duas placas acrílico às placas de inox.



Figura 5.1. Montagem experimental do aparato de análise do escoamento da estilha.

Muito embora a forma da tremonha de alimentação do gaseificador seja tronco cónica, a opção pela configuração quadrangular deveu-se às razões atrás referidas e ao baixo custo da montagem.

5.1. Variáveis a estudar

Tendo por finalidade estudar o tipo e a qualidade do escoamento foram definidos como variáveis a inclinação das paredes em relação à vertical, a abertura, dimensão da estilha e humidade.

5.1.1. Abertura de descarga

A abertura de descarga na unidade piloto de gaseificação tem um diâmetro 280 mm, a que corresponde uma área de $61573,4 \text{ mm}^2$. Para a realização dos testes foram definidas três aberturas diferentes: 280 mm com uma área igual a 84000 mm^2 ($A = 280 \times 300$, sendo os 300 mm a largura da placa), 200 mm de abertura com uma área de descarga de 60000 mm^2 ($A = 200 \times 300$) e uma abertura de 140 mm com uma área de 42000 mm^2 ($A = 140 \times 300$).

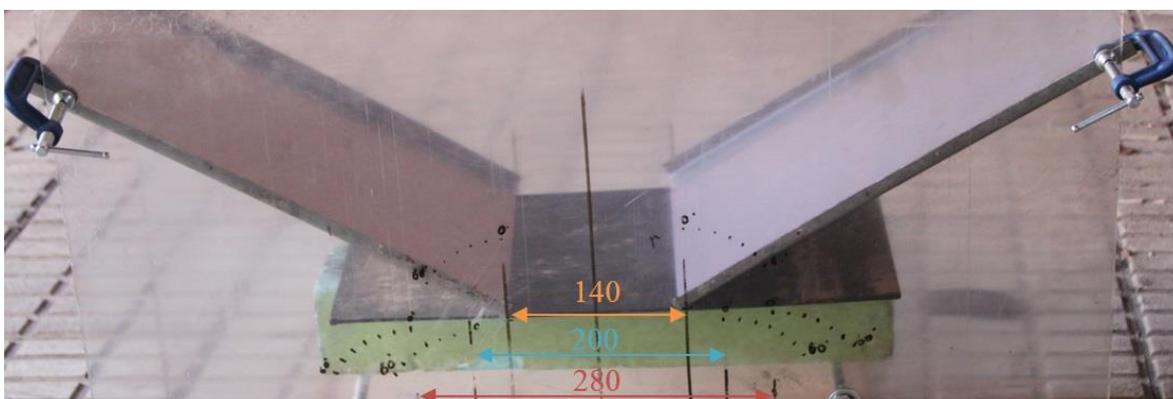


Figura 5.2. Representação da abertura de descarga da tremonha (mm).

As medidas tiveram por objetivo avaliar o comportamento do escoamento para diferentes rácios entre tamanho da estilha e abertura de descarga (Figura 5.2). Foram definidas 3 aberturas: uma semelhante à abertura do gaseificador, outra com uma área superior e outra com uma área inferior.

5.1.2. Inclinação da tremonha com a vertical

Para avaliar a fluidez do escoamento com a inclinação das paredes, foi variado o ângulo α das paredes com a vertical de 20° a 60°, conforme representado na Figura 5.3. Para cada abertura de descarga foram efetuados testes de escoamento varrendo o ângulo α de 20° a 60°.

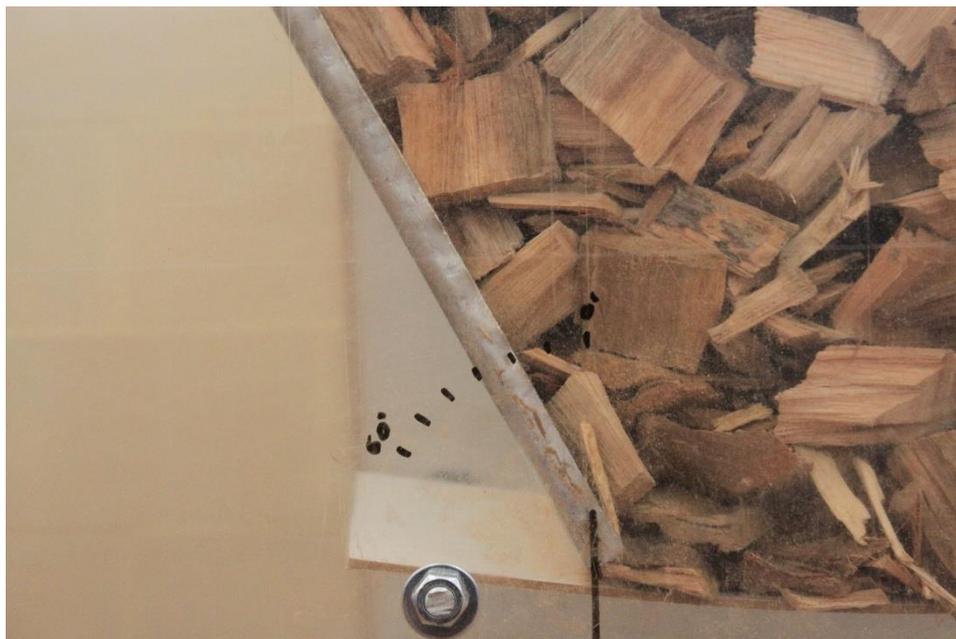


Figura 5.3. Representação do ângulo da tremonha com a vertical, com a tremonha carregada.

5.1.3. Condições da biomassa

A estilha no seu estado inicial é colocada no gaseificador com uma humidade máxima de 20% e como é posteriormente aquecida, vai libertar a sua humidade. Perante este acontecimento a atmosfera na zona de alimentação do gaseificador, acima da zona de secagem (Figura 1.3) vai ficar saturada conferindo à biomassa um aspeto molhado. Como uma parte integrante da biomassa são alcatrões e substâncias voláteis, durante o processo de gaseificação essas substâncias vão libertar-se e conferir à estilha uma maior coesão e dificuldade de escoamento. No sentido de recriar essas condições a estilha foi utilizada seca, molhada e impregnada com um óleo, para reproduzir o aumento da coesão entre as partículas associada à presença de alcatrões.

5.1.4. Tamanho da biomassa

Em condições normais a biomassa que faz parte integrante do processo de gaseificação está definida, contudo a fim de estudar a influência do tamanho da biomassa descrito no subcapítulo 5.1.1, foi estudado o impacto da variação do tamanho da estilha caudal mássico de descarga da tremonha.

Primeiramente foi estudada a estilha que realmente se usa na gaseificação que, como anteriormente descrito, tem dimensões compreendidas entre 50 e 80 mm de comprimento, 20 e 50 mm de largura e 10 a 20 mm de altura como ilustra a Figura 5.4. A estas dimensões corresponde um volume máximo de 80000 mm^3 .



Figura 5.4. Exemplo do comprimento da estilha.

Posteriormente foram efetuados ensaios com um tipo de estilha que possui uma granulometria mais reduzida. Com dimensões compreendidas entre 30 e 50 mm de comprimento, 20 e 50 mm de largura e 5 a 15 mm de altura como ilustra a Figura 4.3. A estas dimensões corresponde um volume máximo de 37500 mm^3 . A redução em volume em relação à primeira estilha é de 53,1%, o que é revelador da heterogeneidade de tamanhos.

5.2. Procedimento dos ensaios de escoamento

Os ensaios foram executados carregando a tremonha experimental com estilha para um determinado ângulo com a vertical e com uma abertura definida e foram repetidos três vezes cada sequência de ensaios, conforme o procedimento presente no Apêndice C. Para medição da massa da estilha a usar em cada ensaio, foi utilizada a balança de indicador analógico, disponível nas oficinas do DEM da FCTUC, com uma precisão de 20 gramas.



Figura 5.5. Exemplo de teste de escoamento da tremonha.

O principal indicador a medir pelos ensaios é o caudal mássico de descarga (kg/s), contudo outros fatores foram retirados para uma análise qualitativa. Por ensaio foram assumidos os seguintes parâmetros: caudal mássico de descarga; “desenvoltura” do escoamento – traduzida pela avaliação qualitativa do escoamento, segundo uma escala de 0 a 5, sendo 0 um escoamento rápido e sem problemas e 5 um escoamento extremamente difícil; o número de intervenções externas ao escoamento para desbloqueamento, sempre que se forma uma obstrução em forma de abóbada.

Em resumo, foram realizados ensaios para os dois tipos de estilha, três condições de biomassa, três aberturas diferentes de descarga e varrido cinco ângulos das paredes com a vertical. No total foram retirados 90 resultados médios. Por exemplo, para o primeiro ensaio os parâmetros usados foram definidos da seguinte forma: tipo de estilha normal; estado da estilha seca; ensaio com a abertura de descarga de 280 mm; para um ângulo de

20°. Após os ensaios executados, os dados foram compilados em forma de tabelas e posteriormente tratados graficamente. Para cada ângulo foram efetuados três ou quatro ensaios, uma situação que era definida pela ocorrência de obstruções. A medição do tempo que consta na tabela foi realizada pela observação dos vídeos registados em cada ensaio. Sabendo que a câmara de filmar usada opera segundo um registo de 25 *frames* por segundo, foi obtido o tempo, em segundos (s).

O gráfico 6.1 é o que contém o caudal mássico de descarga vs ângulo da tremonha com a vertical. Este resultado é obtido usando a média aritmética do caudal mássico de descarga, sendo apresentado também o desvio padrão.

A tabela seguinte (Tabela 5.1) é um exemplo dos dados retirados do ensaio supracitado.

Tabela 5.1. Exemplo de dados medidos e retirados dos ensaios de escoamento.

Estilha seca										
Abertura de 280 mm										
Ângulo	Teste	Intervenções para reiniciar escoamento	Dificuldade	Quantidade (kg)	Tempo (s)	Taxa (kg/s)	Média (kg/s)	DP	Media I.	Média D.
20	1	0	0	16,25	0,75	21,67	23,29	1,67	0	0
20	2	0	0	16,25	0,7	23,21				
20	3	0	0	16,25	0,65	25				
30	1	0	0	16,25	1,04	15,63	17,36	2,55	0	0,34
30	2	0	0	16,25	0,8	20,31				
30	3	0	1	16,25	1	16,25				
40	1	0	1	16,25	1,56	10,42	10,84	0,97	0	1,67
40	2	0	2	16,25	1,6	10,16				
40	3	0	2	16,25	1,36	11,95				
50	1	0	2	16,25	1,72	9,45	8,09	3,99	0,25	2,5
50	2	0	1	16,25	1,24	13,10				
50	3	1	3	16,25	3,6	4,51				
50	4	0	4	16,25	3,08	5,28				
60	1	1	4	16,25	5,28	3,08	4,83	1,35	0,25	3,75
60	2	0	3	16,25	2,8	5,80				
60	3	0	4	16,25	3,64	4,46				
60	4	0	4	16,25	2,72	5,97				

Note-se que os dados referidos na tabela anterior apenas ilustram uma linha do gráfico da Figura 6.1, neste caso a linha de cor azul.

5.3. Procedimento dos ensaios de desobstrução do escoamento por injeção de gás

De forma a avaliar a capacidade de desobstrução da abóboda por injeção de gás foi efetuado uma alteração na montagem experimental. No Apêndice B é feita uma sucinta recolha do tipo de produtos no mercado que oferecem soluções de ajuda no escoamento de materiais a granel.

5.3.1. Condições de desobstrução recorrendo a injeção de gás

De modo a permitir a injeção de gás para desobstrução da abóbada foram adaptadas as placas de inox com o propósito de criar duas injeções de gás simultâneas em posições opostas desfasadas. Os tubos de injeção, com diâmetro do tubo interno de 8 mm e exterior é de 10 mm, foram desfasados entre si de 30 mm.

O objetivo do desfasamento dos dois tubos opostos de injeção em relação ao centro geométrico da parede lateral (de 150 mm) era criar um turbilhão de gás capaz de quebrar a obstrução do escoamento. A Figura 5.6 mostra a posição do orifício de entrada do gás numa das paredes da placa inox. Mantendo o desfasamento, em cada placa foram feitos dois orifícios para duas diferentes distâncias em relação à secção de descarga, definida pelo limite da placa inox. Esses dois orifícios distavam entre si 100 mm (Figura 5.7).

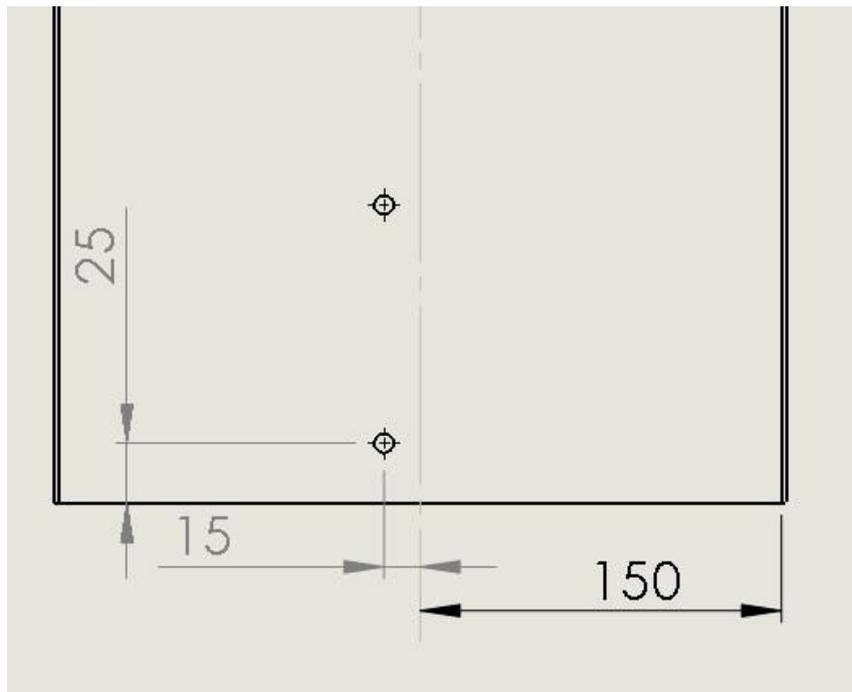


Figura 5.6. Alterações efetuadas nas placas da tremonha (mm).

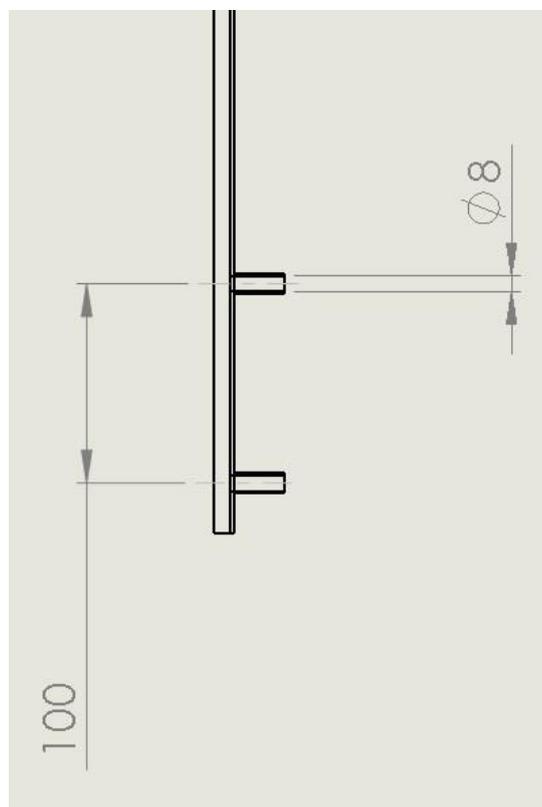


Figura 5.7. Alterações efetuadas nas placas da tremonha (mm).

Foi usada a rede de ar comprimido² e regulada a pressão até um máximo de 6,5 bar(g). A injeção de gás para desobstrução da abóbada, foi feita tanto para os dois orifícios mais próximos da descarga, como para os mais afastados.

² Considerando que se trata de um gaseificador, a escolha do gás deverá ser feita, de modo a não influenciar negativamente na qualidade e produção do gás de síntese.

6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os ensaios de escoamento de estilha numa tremonha retangular foram efetuados com estilha de pinho bravo, de dimensões referidas no capítulo anterior e para uma massa de amostra compreendida entre 16,25 e 5,22 kg. As amostras de biomassa tinham sido anteriormente secas ao ar, contendo 20 % de humidade (no máximo). O objetivo de avaliar a influência dos fatores mencionados foi o de determinar para que ângulo das paredes e abertura de descarga se registam resultados de escoamento.

As figuras 6.1 a 6.3 mostram a variação do caudal mássico de descarga de estilha com o ângulo de inclinação das paredes da tremonha em relação à vertical, para diferentes estados da estilha e aberturas da secção de descarga. A variação é descrita para o valor médio do caudal mássico de descarga, sendo apresentado os intervalos de variação.

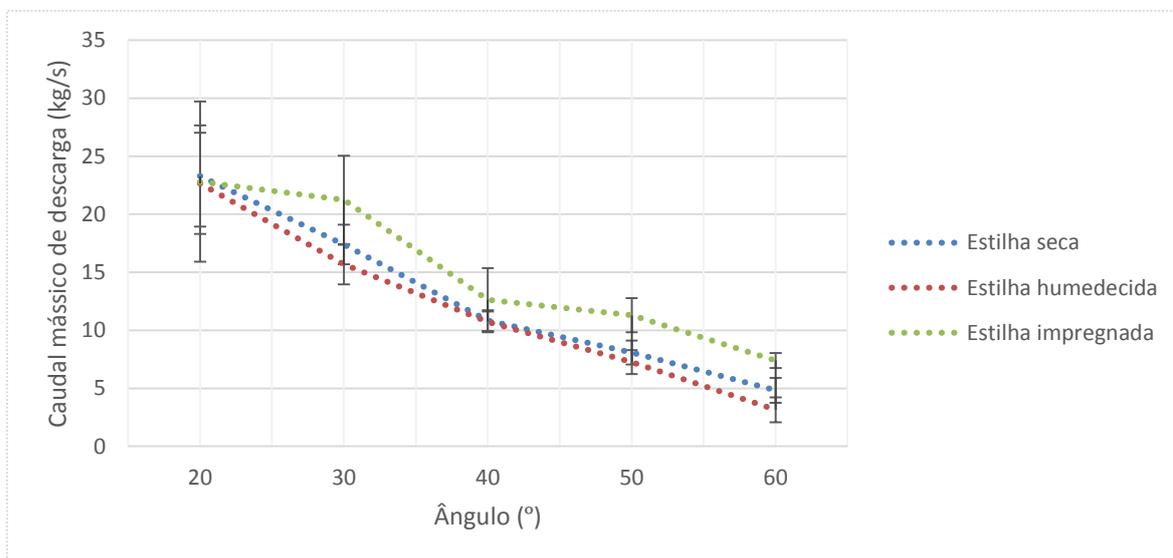


Figura 6.1. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para uma abertura de descarga de 280 mm.

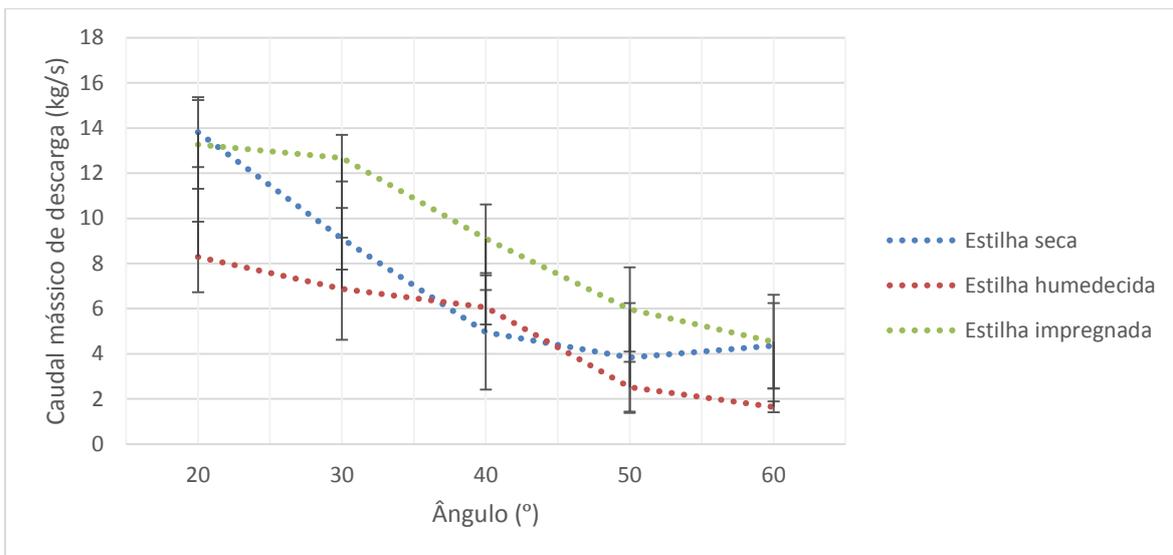


Figura 6.2. Tipos Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para uma abertura de descarga de 200 mm.

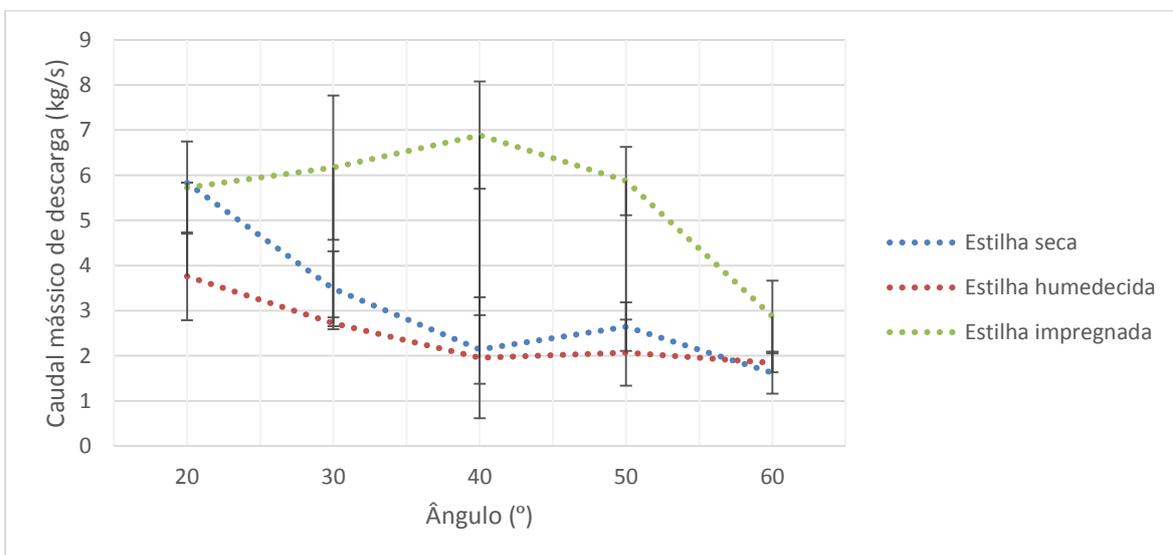


Figura 6.3. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para uma abertura de descarga de 140 mm.

Como esperado, os resultados com a estilha humedecida tem um caudal mássico inferior, para as três aberturas de descarga. O ensaio realizado, utilizando a estilha impregnada não se revelou conclusivo, pois o efeito esperado seria uma maior coesão entre o material e não a facilitação no escoamento. O elevado tamanho e irregularidade superficial

da estilha faz com que hajam poucos pontos de interação entre o material, comparativamente aquilo que acontece quando os materiais são de pequena dimensão. Assim, nos ensaios seguintes não foi realizado o ensaio para estas condições da biomassa.

Relativamente ao ângulo de inclinação das paredes mais favorável para as várias condições da estilha, é possível observar que para ângulos inferiores a 40° o caudal mássico tende a ser sempre superior. Fator que se evidencia à medida que a abertura de descarga vai diminuindo, ou seja a diferença vai aumentando utilizando as diferentes estilhas.

As figuras 6.4 a 6.6 mostram a influência do tamanho da estilha no caudal mássico de descarga, para as três secções de descarga ensaiadas.

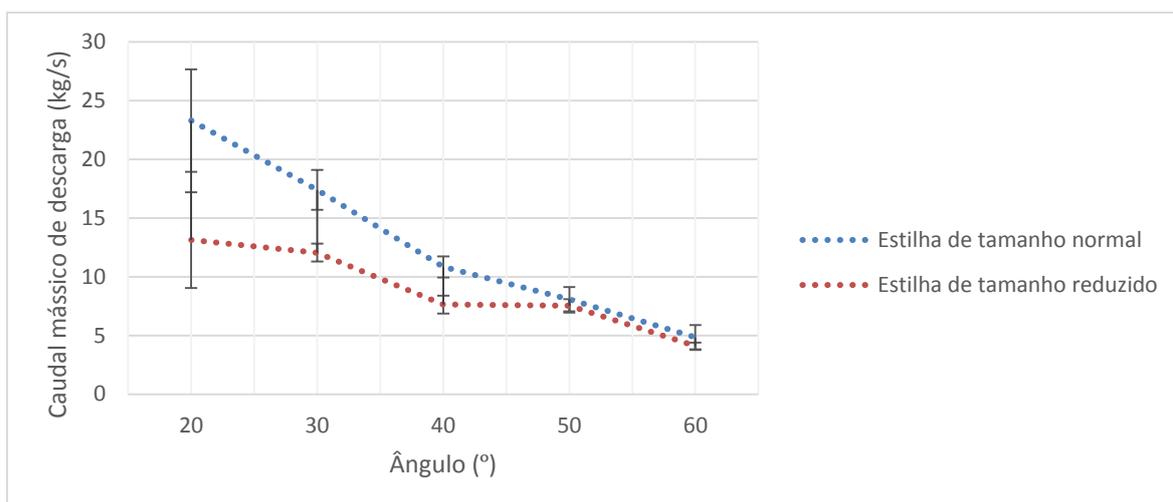


Figura 6.4. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 280 mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha seca.

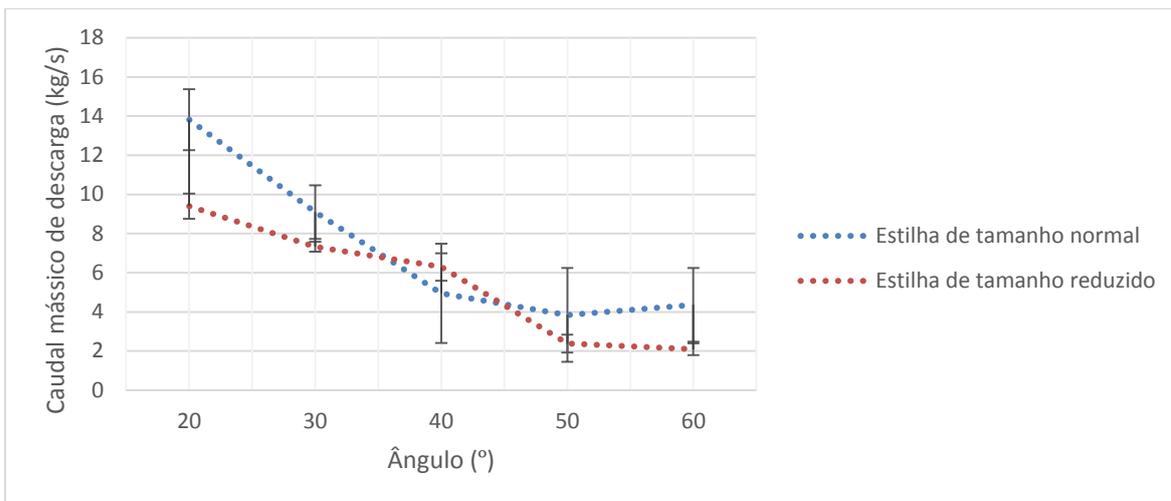


Figura 6.5. Variação do caudal mássico de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 200 mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha seca.

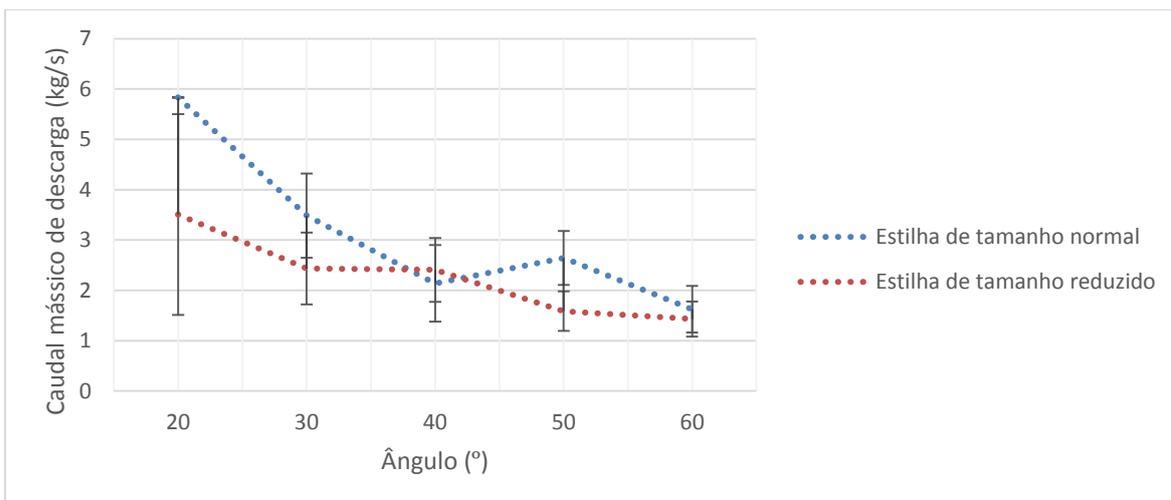


Figura 6.6. Variação do caudal mássico de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 140 mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha seca.

Analisando as variações do caudal mássico em função do tamanho da estilha considerada seca, verificamos que a redução do tamanho prejudica o escoamento, diminuindo o caudal mássico, essa tendência é bem evidente quando a abertura de descarga é maior. Para a abertura de 280 mm até ao ângulo de 50° obtemos melhor caudal mássico com a estilha normal. Para as aberturas de 200 e 140 mm essa tendência regista uma inversão para um ângulo de 40° com a vertical, para depois voltar ao normal merecendo assim um estudo mais detalhado. Embora mantendo a tendência a redução da secção de descarga

aproxima os valores de caudal mássico. Assim, podemos concluir que para ângulos menores que 40° o caudal mássico é influenciado essencialmente pela ação da gravidade, sendo as partículas maiores a que caiem com mais facilidade. O atrito entre a estilha passa a ser relevante em relação à ação da gravidade quando a abertura se aproxima de 40°.

As figuras 6.7 a 6.9 mostram, para os dois tamanhos de estilha, a influência da humidade na variação do caudal mássico com o ângulo de inclinação das paredes da tremonha para as três secções de descarga.

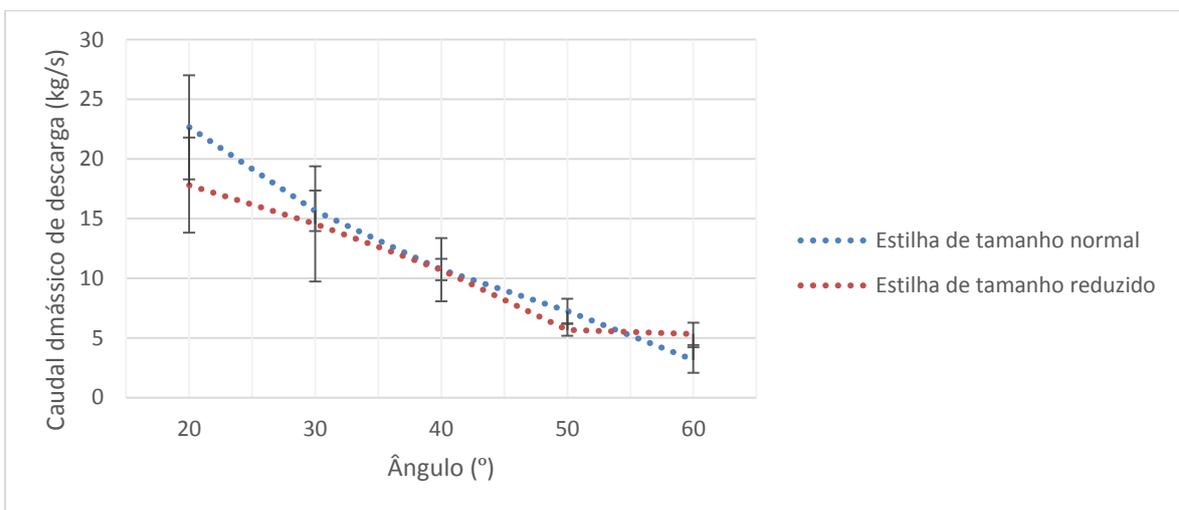


Figura 6.7. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 280 mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha húmida.

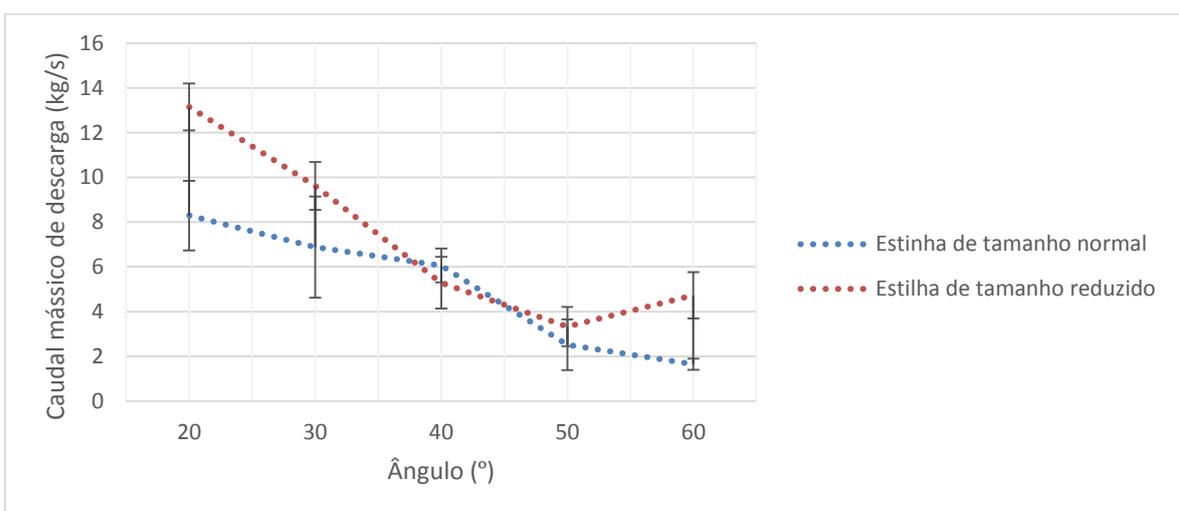


Figura 6.8. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 200 mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha húmida.

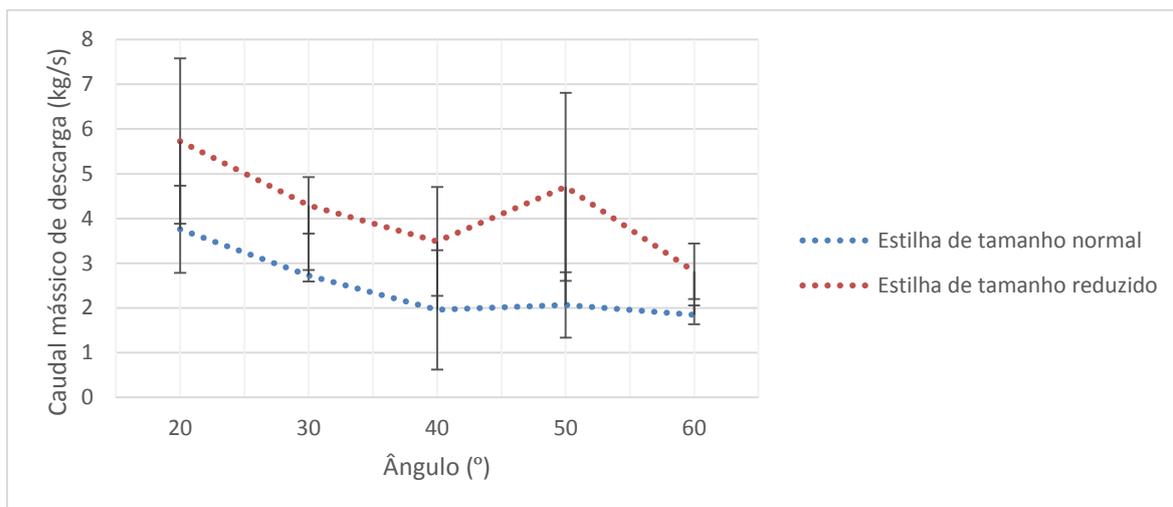


Figura 6.9. Variação do caudal máximo de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical para uma abertura de descarga de 140mm, relativamente à diferença entre o tamanho de estilha húmida.

O efeito da humidade da estilha contraria o efeito da gravidade, fazendo com que a estilha de tamanho mais pequeno seja a que proporciona maior caudal mássico.

Para abertura de descarga de 280 mm o caudal mássico é muito parecido entre os dois tipos de estilha, contudo para 200 mm de abertura de descarga o caso inverte-se. A estilha de menor dimensão proporciona caudais mássicos superiores, até se verificar uma inversão para o ângulo de 40°. Quando a estilha está húmida, a redução da secção de descarga contribui fortemente para a redução do caudal mássico com o aumento do tamanho da estilha.

Relativamente aos ensaios de desobstrução do escoamento por injeção de ar comprimido, para diferentes inclinações das paredes e secção de descarga verificou-se, em muitos casos, uma efetiva desobstrução da tremonha, observando-se uma enorme dependência da secção de descarga, do local e da direção do gás injetado em relação à abóboda. Os ensaios foram efetuados realizando uma variação da pressão em incrementos de 1 (um) bar(g), sendo que só foram verificados desobstruções à pressão máxima da rede 6,5 bar(g).

7. CONCLUSÕES

Foi efetuado um estudo ao escoamento de estilha de pinho em uma tremonha em forma quadrangular, variando o declive das paredes, a secção de descarga e o tamanho e estado superficial da estilha.

A aplicabilidade dos ensaios usados para estudar o comportamento de materiais a granel afigura-se difícil de proporcionar resultados credíveis para o tipo de material objeto de estudo, dado o elevado tamanho e forma não regular da estilha.

A montagem experimental permitiu observar as obstruções e retirar conclusões sobre a influência do tamanho e da humidade da estilha e da secção de descarga. A humidade faz com que a estilha de menor tamanho seja a que melhor se escoar no interior da tremonha. Para um ângulo das paredes da tremonha com a vertical inferior a 40°, a ação da gravidade é a principal ação para o movimento da estilha. O ângulo de 40° em relação à vertical mostrou ser um valor de charneira para a inversão de tendência, merecendo por isso um estudo mais aprofundado em torno deste valor.

Os ensaios para desobstrução da tremonha com injeção de ar comprimido revelaram-se eficazes para uma pressão da rede de 6,5 bar(g), havendo no entanto que prosseguir o estudo para identificar os pontos mais favoráveis para a injeção de um gás, que pode ser o próprio gás de síntese.

Os resultados obtidos são insuficientes para apurar claramente a influência da variação de alguns parâmetros. Assim, para prosseguir com este estudo é necessário a realização de um maior número de ensaios para obter uma maior reprodutibilidade de resultados e alargar a influência de outros parâmetros no escoamento da estilha. Entre outros, importa estudar a influência da carga da coluna de estilha no escoamento, variando os diferentes parâmetros estudados. Deverá ser tentada a pulverização da estilha por um produto que se assemelhe mais a uma resina, podendo passar pela aplicação de um *spray*. O estudo deve ser reproduzido para estilha de eucalipto e outras matérias florestais que tenham uma forte representatividade dentro dos resíduos florestais.

É necessário estudar de que forma o escoamento da estilha é influenciado pela conversão da biomassa em gás de síntese, podendo recorrer-se a um doseador de caudal, por rotação controlável, colocado a jusante da zona de combustão, assinalada na Figura 1.3.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, P., (2006), “Estudo da influência da temperatura e do tempo de prensagem nas características físicas mecânicas, de diferentes tipos de mdf aquando do seu revestimento por prensagem”, *Dissertação Mestrado em Engenharia dos Materiais Lenhocelulósicos*, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, Portugal.
- Andrade, R., (2007). “Gaseificação de biomassa: uma análise teórica e experimental”; *Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Instituto de Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Itajubá, Brasil.
- Barletta, D., e Poletto, M., (2013), “An assessment on silo design procedures for granular waddy biomass”, *The Italian Association of Chemical Engineering*, volume 32, Italy.
- Cachim, P., Lopes N., Cruz H., Branco, J., Vila Real, P., e Palma, P., (2012), “Aplicação do eurocódigo 5 na avaliação de ligações tradicionais de madeira ao fogo”, *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*.
- Cemig, (1986), “Gaseificação de biomassa”, *Companhia Energética de Minas Gerais, Divisão de Análise e Desenvolvimento Energético*.
- Chase, G. (2004), “Solid notes on hopper design”, *Solids processing course, University of Akron*.
- Diniz, D., (2008), “Produção de álcool etílico utilizando como matéria -primas resíduos florestais e agrícolas”, *Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa para obtenção de grau de Mestre em Bioenergia*.
- Dynamic air, (2010), “Vibra-jet™” - Aerador de Silo. Acedido a 20 de Janeiro de 2015, em: <http://www.dynamicair.com/products/binaerador264.html>.
- Ermap, (2010), “Etudes et realisations de manutention pneumatique - installations et composants pour le stockage et la manutention de produits en vrac”.
- Forestis (2009), “Ficha técnica - nemátodo da madeira do pinheiro”, *Associação florestal de Portugal* (2009, 22 de Junho), Acedido a 20 de Dezembro de 2014, em: http://www.forestis.pt/forestis/multimedia/File/ficha_NMP_1.pdf.
- Gbgasified, (2012), “Biomass gasifier model”, *Power and heat from biomass*. Acedido a 27 de Dezembro de 2014, em: <http://www.gbgasified.com/model.html>.

- Janike, A. W., (1964), “Storage and flow of solids”, Bulletin No. 123, University of Utah, Salt Lake City.
- Johanson, J., (1992), “The Johanson indicizer™ system vs. the Janike shear tester – new technology simplifies solids flow properties characterization”, Bulk Solids Handling, Volume 12, No. 2, United States of America.
- Lora, E., Andrade, R., Ángel J., Leite, M., Rocha, M., Sales, C., Mendonza, M., e Coral, D., (2012)., “Biocombustíveis”, Interciência, Rio de Janeiro, Brasil.
- Martin, L., Nogueira, J., Filho, D., Donzeles, S., Zanatta, F., e Santos, R., (2010), “Tensão térmica e taxa de reação em um reator para gaseificação de biomassa do tipo concorrente”, Revista Ceres volume 57, Viçosa Mar.
- Maynard, E., (2004), “Practical solutions for solving bulk solids flow problems”, Janike & Johanson Inc.
- Milne, T., McGowan, T., Mendis, M., Nostrand, B., Kjellstrom, B., Stassen, H., Cruz, I., (1988), “Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems”, Operated for the U.S. Department of Energy.
- Oliveira, E. S., (2008), “ Gaseificação da macaúba”, *Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia dos Alimentos*, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Brasil.
- Palma G., (2005), “Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$)”; *Dissertação para obtenção o grau de Mestre em Engenharia de Estruturas*, à *Escola de Engenharia de São Carlos* da Universidade de São Paulo, Brasil.
- Pedrosa P., (2013). “Estudo preliminar para o desenvolvimento de uma instalação piloto para gaseificação de biomassa florestal: análise dos tipos de gaseificadores e caracterização da biomassa”; *Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Ambiente*, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Roberts, W., (1994), “Development in silo design for the safe and efficient storage and handling of grain”, Proceedings of the 6th international working conference on stored-product protection, University of Newcastle, Australia.
- Rotter, J., (2008), “Bulk solids handling”, Blackwell Publishing Ltd, Oxford.
- Sánchez, C., Lora, E., e Gomes, E., (1997), “Tecnologias de conversão energética da biomassa”, Cortez LAB & Lora E., Manaus.
- Schulze D., (2011),” Flow Properties of powders and bulk solids”, Ostafalia University of Applied Sciences, WolfenBüttel, Germany.
- Stravista, (2015), “United States biomass energy consumption from 2006 to 2013”. Acedido a 10 de Janeiro de 2015 em: <http://www.statista.com/statistics/197215/consumption-of-biomass-in-the-us-since-2006>.
- Vifoe, S., Salmén L., (2007), “Shear/compression treatment of wood material – a way of reducing energy demand in TMO processes”, Stockholm, Sweden.

World Wide Found For Nature, (2011, Outubro), “A energia da floresta ibérica – Caracterização do mercado e quadro legal”. Acedido a 10 de Janeiro de 2015, em: <http://www.wwf.pt/>.

APÊNDICE A

Caracterização do gaseificador.

No gaseificador do tipo *downdraft*, a biomassa é alimentação pela parte superior do gaseificador e o ar é fornecido superiormente ou lateralmente. O gás produzido é direcionado para a parte inferior do gaseificador, podendo passar por regiões de alta temperatura permitindo o craqueamento do alcatrão que é arrastado pelo gás. Este tipo de gaseificador pode queimar aproximadamente até 99% do alcatrão libertado na fase da pirólise.

O processo de gaseificação ocorre em quatro etapas distintas, com diferentes temperaturas de reação associadas: secagem da biomassa (operação física), pirólise (volatilização), combustão (oxidação) e redução (gaseificação propriamente dita). Cada uma ocorre em zonas relativamente separadas dentro do reator. Na zona de secagem, a temperatura é relativamente baixa (menor que 200 °C) para evitar a decomposição da biomassa, porém suficientemente alta para eliminar sua humidade na forma de vapor (Cemig, 1986, apud Martin *et al.*, 2010). As reações de pirólise começam por volta de 200 °C, na zona logo abaixo, sendo suportadas pela energia produzida nas zonas de oxidação e redução. A decomposição térmica associada à pirólise ocorre entre 280 e 450 °C, provocando a decomposição dos carboidratos e a produção de alcatrão e ácidos leves (Sánchez *et al.*, 1997 apud Martin *et al.*, 2010). A zona de combustão, também designada por oxidação, é determinada pela posição da entrada do comburente no reator. A temperatura da zona de combustão varia entre 800 e 1200 °C, como resultado da reação exotérmica entre o carbono da matéria-prima e o oxigénio do comburente. O gás quente da zona de combustão passa, em seguida, à zona de redução. Nessa zona, deficiente em oxigénio, ocorre a formação de gases combustíveis – gás de síntese.

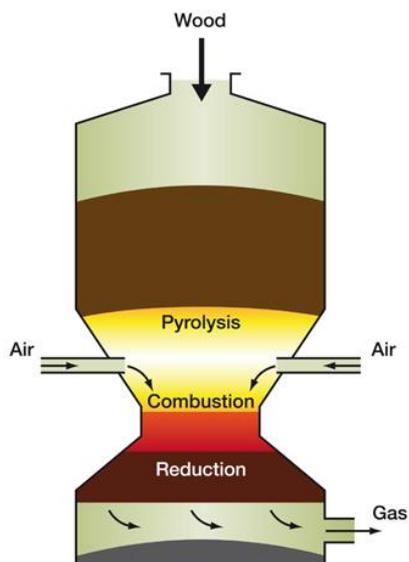


Figura AP-A.1. Exemplo de um gaseificador downdraft (Gbgasifired, 2012).

As características do gás de síntese podem variar de acordo com o agente de gaseificação e com a pressão de operação (Tabela AP-A.2 e Tabela AP-A.2).

Tabela AP-A.1. Composição do gás de síntese para diferentes agentes de gaseificação (Lora, et al. 2012)

Componente	Ar ¹	80% O ₂ + ar ¹	Vapor ¹	O ₂ + vapor ²	Aquecimento indireto ou alotérmico ³	O ₂ , Leito arrastado ⁴	Água supercrítica ⁵
CO, % em vol.	10-20	40-50	25-47	38,0	47,0	45-47	1
H ₂ , % em vol.	9-20	9-17	35-50	28,0	18,0	20-22	40
CH ₄ , % em vol.	1-8	< 1	14-25	8,6	14,9	< 0,1	10
CO ₂ , % em vol.	10-20	19-25	9-15	21,2	14,3	18-20	43
N ₂ , % em vol.	40-55	15-30	2-3	-	-	14-16	-
PCI, MJ/Nm ³ , base seca	4-6,5	7-9	12-17		16,8		

Tabela AP-A.2. Influência da pressão de operação do gaseificador no gás gerado. (Andrade, 2007 apud Pedrosa, 2013)

Tipo de gaseificador	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	PCI
	(% vol. base seca)					(MJ/Nm ³)
Atmosférico	6 – 9 (12,5)	9 – 21 (16,3)	11 – 19 (13,5)	3 – 7 (4,4)	45 – 60 (52)	3 – 6,5 (5,1)
Pressurizado	4 -15 (8,8)	10 – 19 (14,8)	14 -19 (16,8)	5 – 9 (6,7)	45 – 60 (53)	3,5 – 6,5

()-valores médios.

O gás produzido contém sempre uma variedade de partículas, como alcatrão, cinza, etc. Para que o gás possa ser utilizado num motor alternativo ou numa turbina, deve estar o mais limpo possível. A tabela A.3 mostra a influência do tipo de gaseificador no teor de alcatrão arrastado pelo gás.

Tabela AP-A.3. Teor de alcatrão por tipo de gaseificador Andrade, 2007 apud Pedrosa, 2013).

Tipo de gaseificador	Teor de alcatrão
<i>Downdraft</i>	15- 500 mg/Nm ³ / [50 – 500 mg/Nm ³]
<i>Updraft</i>	30 – 150 g/Nm ³ / [10 – 100 g/Nm ³]
Leito fluidizado	< 5 g/Nm ³ / [1 – 3 g/Nm ³]

[] – Fonte: McKendry apud ANDRADE, 2007.

APÊNDICE B

Mecanismos de quebra de obstrução em abóbada

A obstrução de escoamento de materiais a granel é um problema, e a sua resolução através de alterações de cariz geométrico é, por vezes, muito dispendiosa. As medidas mais fáceis e rápidas para tentar solucionar o problema procuram evitar a alteração da configuração da tremonha. Este apêndice aborda algumas dessas soluções propostas no mercado dos silos e acessórios auxiliares ao escoamento de materiais sólidos.

Aerador pneumático

Este tipo de solução recorre a um jato de ar que se destina a facilitar o escoamento de materiais em pó ou granulares, secos ou com humidade.

O seu funcionamento recorre à injeção de ar a partir de um reservatório, pressurizado. O reservatório está fixo à parede da tremonha, e através da sua descarga efetuada por uma electroválvula, a onda de choque gerada quebra o arco e reinicia o escoamento.

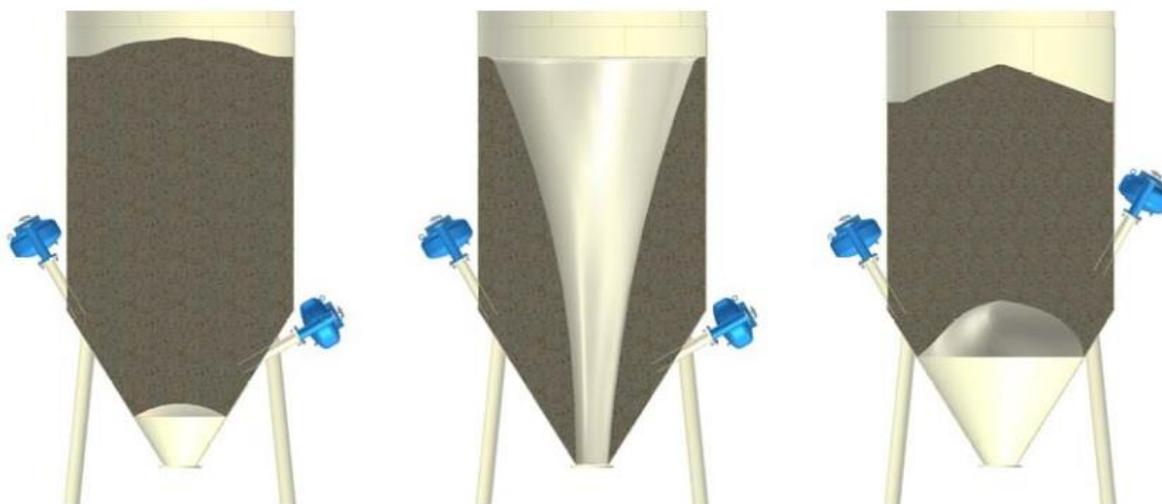


Figura AP-B.1.Exemplo de aplicação de um reservatório pneumático (Ermap, 2010).

O reservatório é de fácil aplicação, e o corpo do reservatório é resistente ao choque associado ao pulso produzido pela libertação instantânea do ar. A sua posição e direção podem ser definidas pelo sistema onde pode ser aplicado, podendo ser orientado para o exato local da obstrução.

Aerador de injeção pneumática.

Este diferente tipo de dispositivo tem a particularidade de ser pequeno em relação à tremonha, podendo por isso ser instalado em vários dispositivos, como representado na Figura AP-B.2.

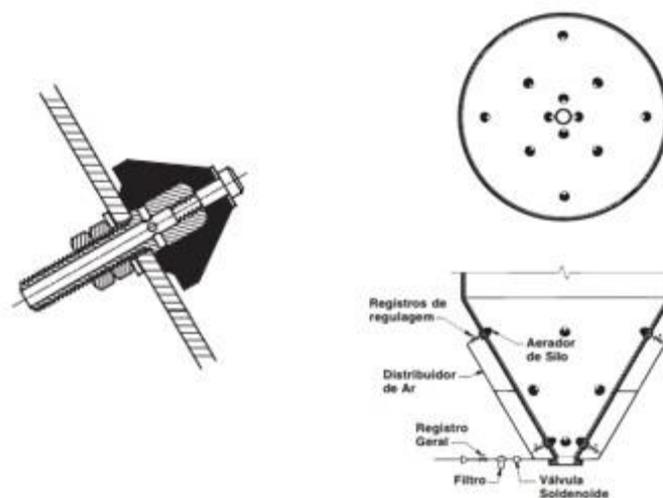


Figura AP-B.2. Injetor pneumático (Dynamic air inc, 2010).

A disposição deste tipo de injetores numa tremonha, cônica como se observa na Figura AP-B.2, pode ser uma das soluções possíveis de desobstrução do escoamento.

Caixa de fluidização

A caixa de fluidização (Figura AP-B.3), como o nome indica, destina-se produzir um leito fluidizado, ajudando assim o escoamento. Estas caixas libertam ar através de uma película porosa, para evitar a formação de obstruções. O ar é distribuído uniformemente e reparte-se entre os grãos, o que provoca um escoamento semelhante a um fluido.



Figura AP-B.3. Disposição exemplo de uma caixa de fluidização (Ermap, 2010).

APÊNDICE C

Protocolo de ensaio do escoamento da estilha.

1. Pesar a estilha a ser usada para o teste de descarga.
2. Ajustar o ângulo de abertura e abertura de descarga consoante o teste a executar.
3. Encher a tremonha com a estilha uniformemente.
4. Colocar a tremonha sobre o reservatório para receção da estilha descarregada.
5. Iniciar a máquina de filmar, e enquadrar a tremonha para correta gravação.
6. Iniciar a gravação.
7. Retirar, rapidamente, a tampa auxiliadora que impede o escoamento.
8. Após o escoamento, encerrar a gravação.
9. Retirar a tremonha do reservatório da receção da estilha.
10. Repetir por duas vezes os passos 3,4,5,6,7 e 8.
11. Descarregar os vídeos, da máquina para o computador pessoal.
12. Avaliar, e medir os ensaios.
13. Tratamento dos resultados em folha de Excel.

APÊNDICE D

Ilustrações de resultados adicionais dos testes de escoamento de estilha.

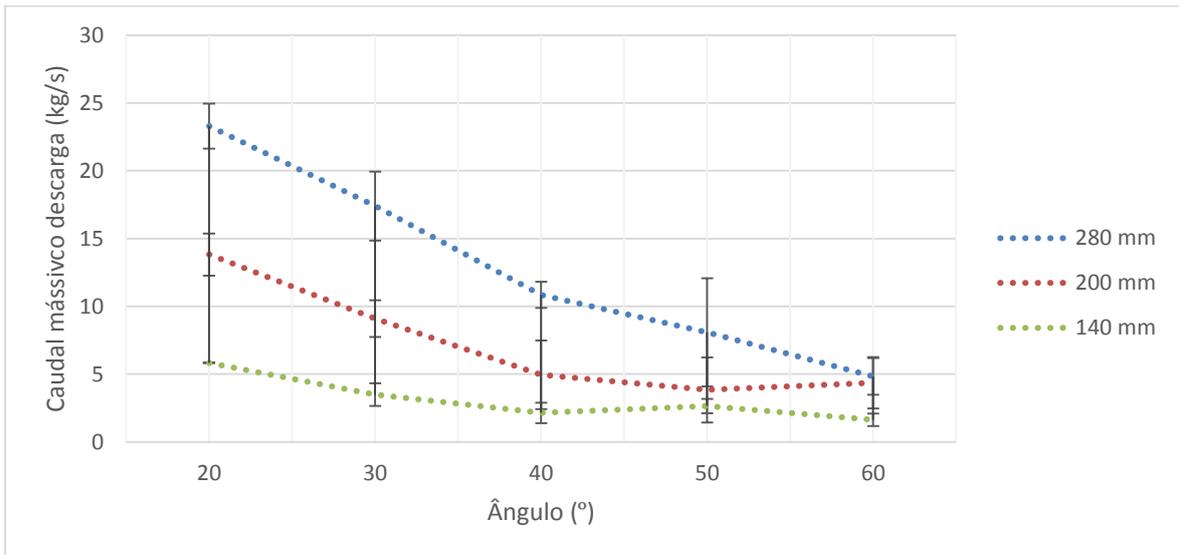


Figura AP-D.1. Variação do caudal mássico de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha seca.

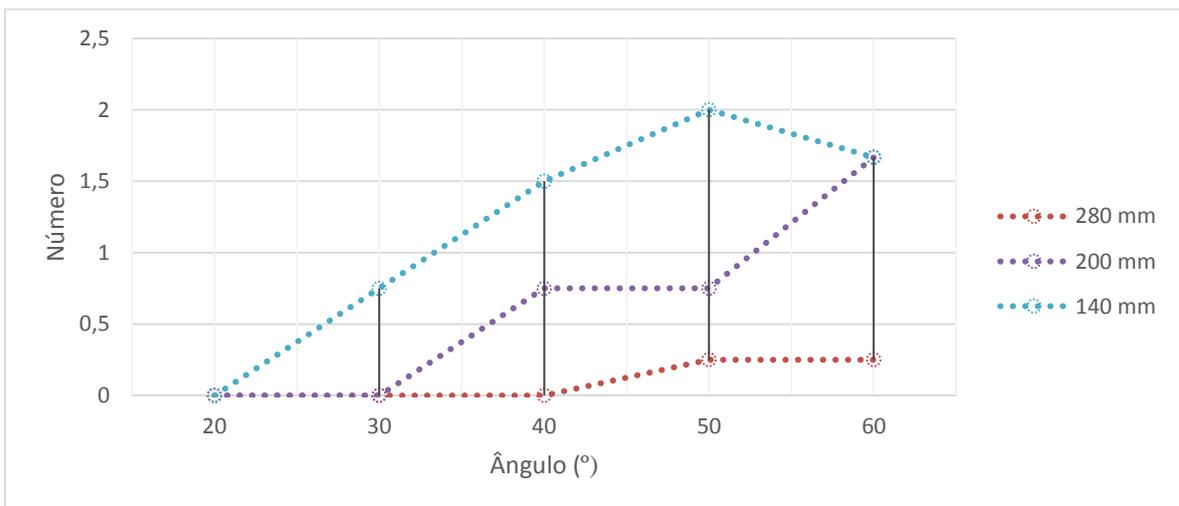


Figura AP-D.2. Variação do número de intervenções no escoamento de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha seca.

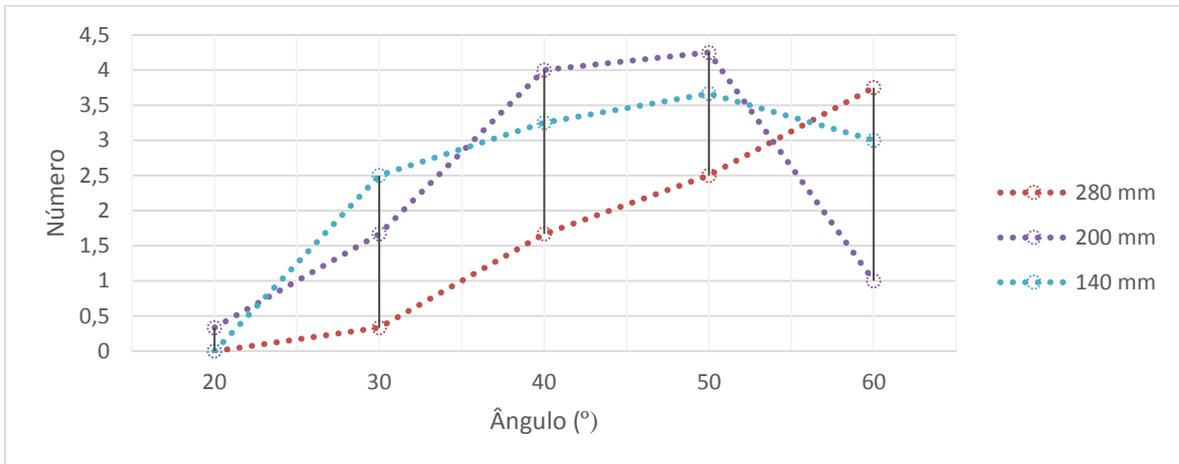


Figura AP-D.3. Variação da dificuldade visual do escoamento de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha seca.

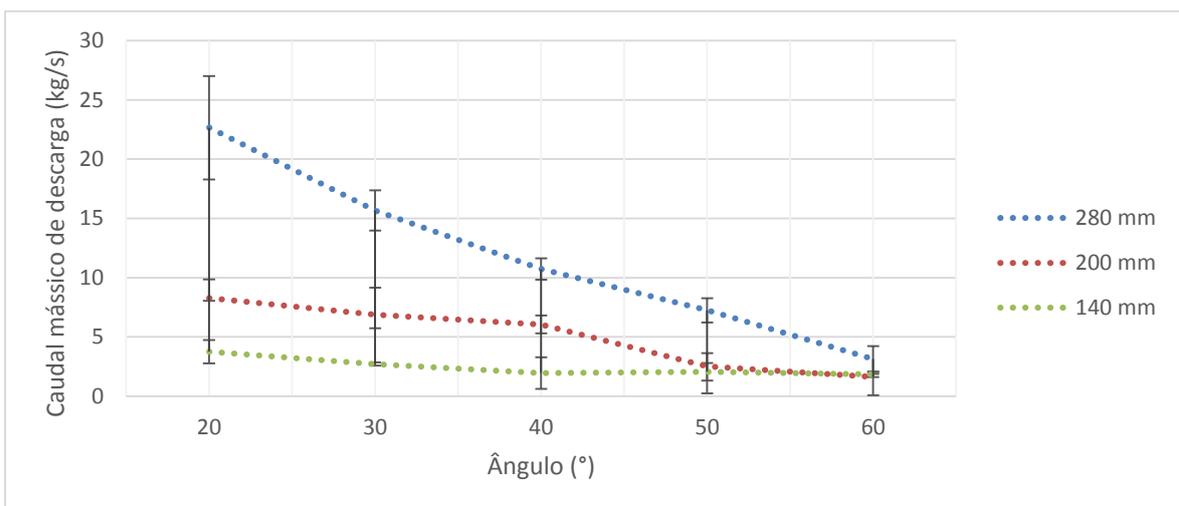


Figura AP-D.4. Variação do caudal mássico de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha humedecida.

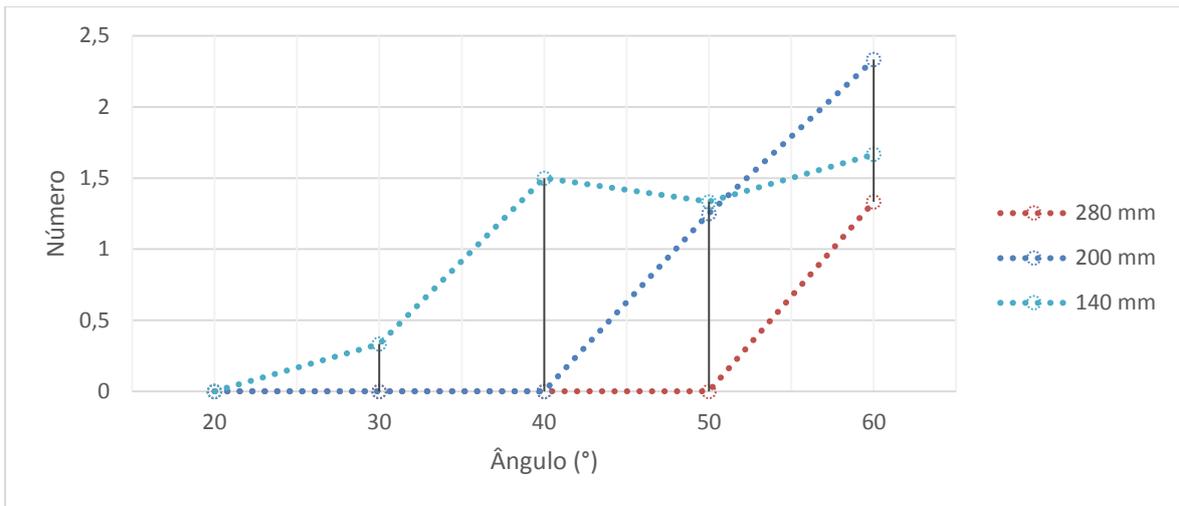


Figura AP-D.5. Variação do número de intervenções no escoamento de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha humedecida.

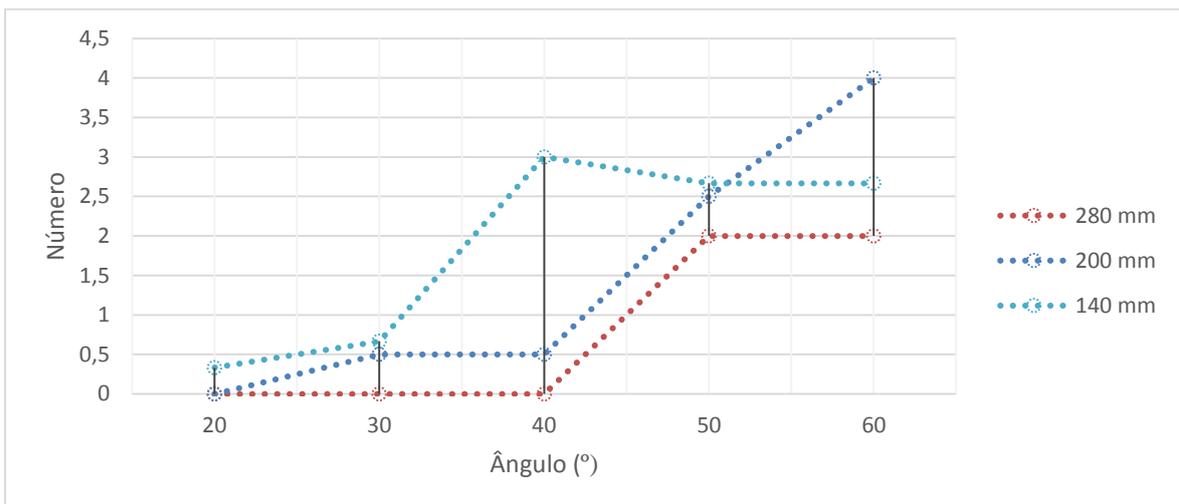


Figura AP-D.6. Variação da dificuldade visual do escoamento de descarga com o ângulo de abertura das paredes da tremonha em relação à vertical, para estilha humedecida.

ANEXO A

Teste de compressão uniaxial

O teste de compressão uniaxial tem o propósito de atribuir quantitativamente um comportamento de escoamento, atendendo às características do sólido granular.

O teste consiste em colocar um cilindro cheio com o sólido a granel e após isso ser carregado com a tensão σ_1 , na direção vertical, como se pode observar na Figura AN-A.1. Quanto maior for o volume reduzido influenciado por meio da tensão de consolidação, mais compressível é o material.

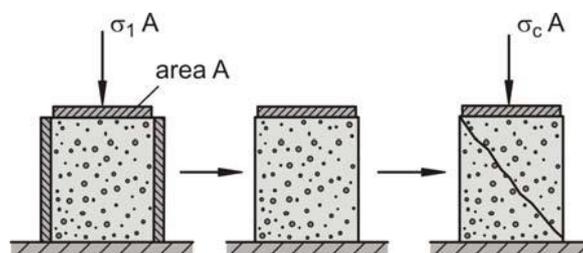


Figura AN-A.1. Teste de compressão uniaxial (Schulze,2011).

Após a consolidação é retirado o cilindro oco deixando apenas o material granular. Posteriormente o material consolidado é carregado com uma tensão de compressão vertical, aumentando gradualmente, até se verificar a falha do material. À tensão que ocorrer a falha é denominada a tensão de cedência não confinada, σ_c .

Após a realização de vários testes de compressão uniaxial, é possível retirar a função de escoamento de um determinado material a granel.

ANEXO B

Círculo de Mohr

Uma forma de observar as características de um escoamento de materiais a granel, é analisando como é que o material interage com as paredes da tremonha. Essa interação é responsável pelas tensões existentes no silo. Uma forma de verificar as tensões é recorrendo à análise de círculos de Mohr. O círculo de Mohr relaciona a tensão normal com a tensão de corte.

Dadas as tensões numa amostra de um sólido granular, é possível encontrar um ângulo (θ) de uma superfície, dentro da amostra, onde a tensão normal é máxima ou mínima e a tensão de corte é zero.

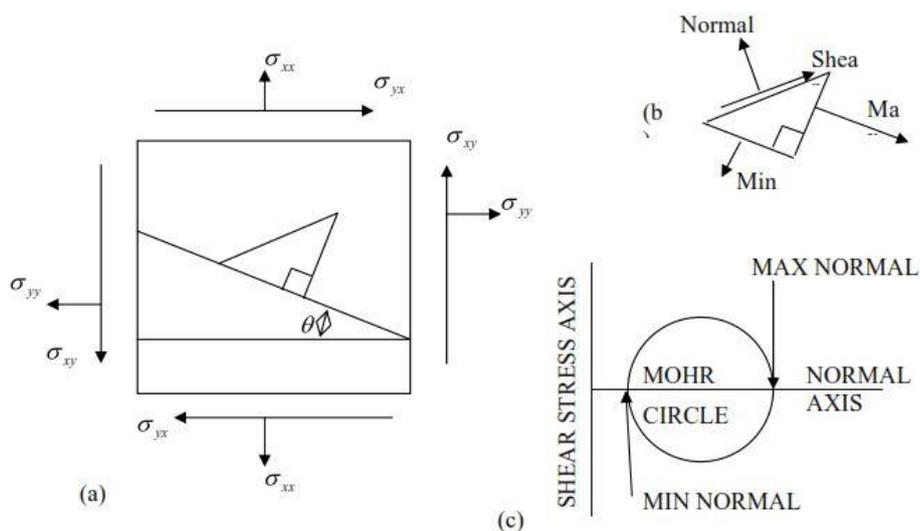


Figura AN-B.1. Tensões presentes numa amostra de um sólido granular (Chase, 2004).

Da mesma forma podemos encontrar um ângulo onde a tensão de corte é máxima ou mínima (Figura AN-B.1, (c)). Normalmente isso ocorre a 90° da tensão normal.

O círculo de Mohr representa as tensões em todos os planos com inclinações arbitrárias do ângulo θ . Como o centro está sempre localizado no eixo normal, de cada círculo obtém-se dois valores da tensão normal (σ). Ou seja cada valor é chamado de tensão principal, onde σ_1 é a tensão principal superior, e σ_2 é a tensão principal inferior (Figura AN-B.2).

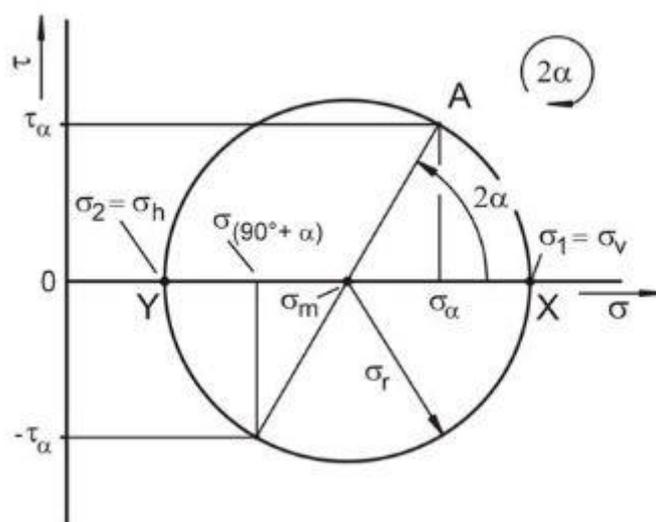


Figura AN-B.2. Representação da tensão principal superior e da tensão principal inferior (Schulze, 2011).

Para um escoamento queremos saber quanto é a tensão de corte necessária para iniciar o escoamento. Recorrendo a uma célula de teste de corte, devemos efetuar o pré-corte da amostra aplicando a carga máxima para consolidar o material (ponto crítico na curva de Janike (ponto de escorregamento). Devemos diminuir a carga e efetuar de novo os testes com o propósito de gerar pelo menos três diferentes curvas de escorregamento.

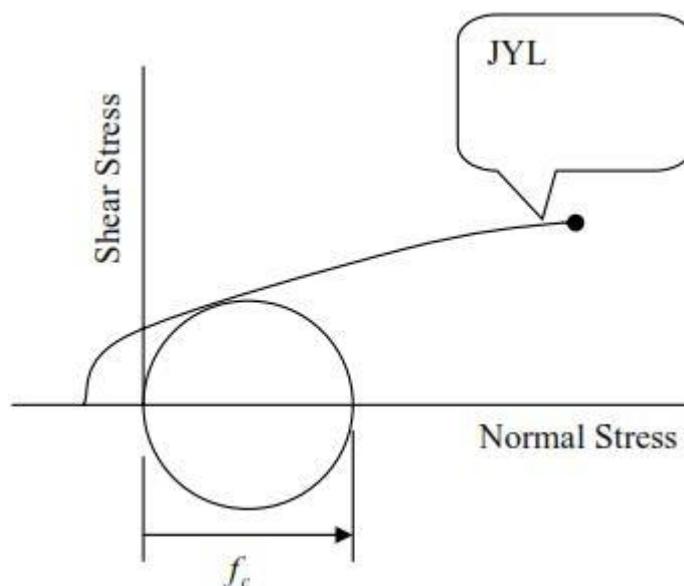


Figura AN-B.3. Círculo de Mohr que é tangente à linha e intersesta a origem (Chase, 2004).

O círculo de Mohr que intersesta a origem e é tangente à linha de escorregamento representa a tensão para iniciar o escoamento a partir da obstrução em arco (σ_1'), e o seu diâmetro é a tensão de cedência não confinada (σ_c).