

underflow. Já as partículas mais finas e menos densas são arrastadas para o centro do equipamento, onde forma-se um movimento em espiral ascendente e estas saem por um orifício denominado *overflow*. As vazões do *underflow* e *overflow* são obtidas pelo diâmetro dos mesmos e pela pressão em que o equipamento é submetido para operar.

O projeto de um hidrociclone define o diâmetro da seção cilíndrica do mesmo, o qual usualmente varia de 2 a 12 polegadas. Em geral, mas nem sempre, quanto maior for esse diâmetro maior será o diâmetro de corte para o equipamento, relação que pode ser observada na Tabela 3.1 (BRICE, 2006):

Tabela 3.1 - Relação entre diâmetro do cilindro de um hidrociclone com sua capacidade em galões por minuto, pressão de alimentação e diâmetro de corte.

Diâmetro do cilindro	4"	5"	10"
Capacidade (gpm)	50-75	70-80	400-500
Pressão de alimentação (psi)	32-40	32-40	20-30
Diâmetro de corte (μm)	15-20	20-25	30-40

Vários hidrociclones em paralelo são utilizados para atender o volume de circulação de lama de perfuração, bem como, um volume extra se necessário. Esses equipamentos podem ser dispostos na vertical ou quase na horizontal, a depender dos parâmetros do projeto e conveniência. A geometria interna de um hidrociclone também tem papel importante na eficiência da operação. O tamanho e o ângulo da seção cônica e o diâmetro da abertura do *underflow* influenciam fundamentalmente na eficiência da separação. A eficiência desses equipamentos pode ser medida de diferentes maneiras, mas sempre o propósito de um hidrociclone é descartar o máximo possível de sólidos com a mínima perda de fluido (BRICE, 2006).

Os desareidores são utilizados principalmente nas fases iniciais do poço para remover as grandes quantidades de sólidos associadas com as altas taxas de penetração nas fases de grande diâmetro. Comumente, os desareidores são operados com carga de 35 psi e a linha de *overflow* é direcionada para o compartimento seguinte em um ângulo de 45°, a fim de se evitar vácuo excessivo na cabeça, empurrando os sólidos para o *overflow* e reduzindo a eficiência dos hidrociclones. Quando o fluido contém aditivos caros tais como barita e polímeros, os desareidores são operados de maneira não contínua, pois do contrário boa parte destes materiais seria descartada juntamente com os sólidos de perfuração (PETROBRAS, 2008).

Os dessiltadores são instalados na seqüência dos desareidores e o *overflow* desses equipamentos é o próprio fluido de perfuração recuperado o qual retornará ao poço depois de devidamente condicionado. O condicionamento do fluido é feito a fim de se alcançar determinados níveis de certas propriedades como densidade e viscosidade.

Os dessiltadores são operados com carga de 35 psi e estão sempre presentes em maior quantidade que os desareidores, visto que sua capacidade individual de operação é inferior à destes. Operando desareidores antes dos dessiltadores, reduz-se sobremaneira a quantidade de sólidos na entrada destes melhorando assim a eficiência de remoção de sólidos. Se a taxa de penetração da broca é baixa ou a quantidade de sólidos gerados é pequena, os desareidores podem então ser desligados (economia de energia e manutenção) e os dessiltadores podem ser utilizados para processar a carga de sólidos na faixa de areia e silte (PETROBRAS, 2008).

3.1.3 *Mud Cleaner*

Uma peneira vibratória de alto desempenho (tela fina - 200 a 400#) é instalada logo abaixo dos hidrociclones, esse conjunto de equipamentos (hidrociclones + peneira) é denominado *Mud Cleaner* (Figura 3.1).



Figura 3.1 - *Mud Cleaner*.

Os *Mud Cleaners* foram desenvolvidos no início dos anos 70 para remover as partículas finas dos fluidos de perfuração adensados sem uma perda excessiva de barita e fluido, recuperando aditivos e líquidos para o sistema ativo de circulação. A capacidade de processamento desse conjunto de equipamentos vai de 400 a 600 gpm e está limitada à capacidade e habilidade da tela fina de descartar os sólidos. Tal habilidade, por sua vez, está ligada à amplitude e tipo de vibração da peneira. No *Mud Cleaner*, os sólidos retidos na tela

finos são enviados às centrífugas decantadoras, equipamento final do sistema de controle de sólidos. Enquanto que o filtrado do *Mud Cleaner*, ou seja, os sólidos remanescentes, incluindo a maioria da barita do fluido adensado, retornam para o sistema ativo (PETROBRAS, 2008).

3.1.4 Centrífuga decantadora

No sistema de controle de sólidos, após o *Mud Cleaner* têm-se as centrífugas decantadoras, as quais têm por finalidade recuperar ainda mais o fluido de perfuração aderido aos cascalhos e assim desempenham um papel importante na limpeza dos sólidos de perfuração. Uma centrífuga decantadora, como o nome já diz, decanta ou remove líquido livre de sólidos. Esse equipamento consiste de uma rosca transportadora dentro de um tambor rotativo, os quais operam sob o princípio de submeter o fluido processado a altas forças centrífugas acelerando a taxa de sedimentação dos sólidos. A Figura 3.2 ilustra o processo descrito (PETROBRAS, 2008).

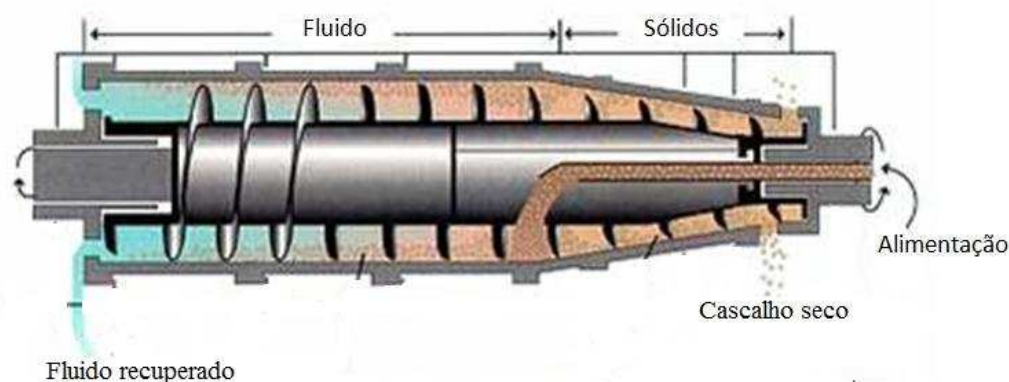


Figura 3.2 - Centrífuga decantadora.

O tambor rotativo gera a alta força centrífuga no interior do equipamento promovendo a separação sólido-líquido. O líquido livre de sólidos é direcionado para a porção terminal da centrífuga e coletados por transbordo por meio de comportas. Os sólidos sedimentam contra a parede interna do tambor rotativo formando uma camada. Estes sólidos são direcionados para fora do equipamento por uma rosca transportadora. A centrífuga decantadora tem grande importância na recuperação do fluido proveniente do secador de cascalho, uma vez que esse material contém ainda grande teor de sólidos, os quais são então removidos nesse tipo de equipamento.

3.1.5 Secador de cascalho

A centrífuga decantadora é o equipamento final na cadeia de controle de sólidos em sondas de perfuração, no entanto, com a crescente restrição ambiental para o descarte de

resíduos e efluentes oriundos da perfuração de poços de petróleo, houve a necessidade da criação de uma alternativa técnica-econômica visando à redução do volume de descarte. A introdução do secador de cascalho é uma tentativa de atender aos parâmetros ambientais regulamentares de descarte de resíduos.

É bom salientar que tal equipamento não faz parte da linha de ataque ao controle de sólidos no fluido de perfuração e, portanto, não tem influência na eficiência global de remoção de sólidos de um determinado sistema de separação. Trata-se de um equipamento que tem o objetivo de reduzir o volume de resíduos gerados e de recuperar boa parte da fração líquida que seria descartada juntamente com os sólidos separados ainda bastante molhados (PETROBRAS, 2008).

O secador de cascalho (Figura 3.3) é na verdade uma centrífuga vertical filtrante. O resíduo que se deseja tratar (~12% de fluido em massa) é alimentado na porção superior do equipamento e cai em um compartimento composto de um tronco cônico rotativo dotado de aletas raspadoras. O resíduo adquire então um movimento rotativo – de 800 a 1200 rpm – e é arremessado contra uma tela de 10 a 30 mesh, também em movimento rotativo, e que impede a passagem dos sólidos mais grosseiros.



Figura 3.3 - Secador de cascalho.

O fluido recuperado com grande porcentagem de sólidos é estocado em um tanque de espera para posterior processamento em centrífugas decantadoras. A torta formada sobre a superfície interna da tela é raspada pelas aletas presas ao cone rotativo, desta forma os sólidos são direcionados para a parte inferior do equipamento. Esse procedimento ocorre pelo fato de que a tela e o cone giram com uma pequena defasagem: o cone gira uma volta a mais a cada volta da tela. O cascalho seco é transportado até um compartimento de armazenamento e

posteriormente segue para a disposição final de acordo com o tratamento proposto (PETROBRAS, 2008).

Um fato importante na operação de secagem do cascalho é que, quando o regime estacionário é atingido, o equipamento promove a formação de uma torta que acaba retraindo partículas muito mais finas do que a abertura da tela poderia reter nominalmente. Logo, como regra básica de funcionamento, deve-se deixar o sistema de secagem operando em sistema fechado até que a torta adequada seja formada e os sólidos fiquem bem secos (porcentagem em massa de fluido no cascalho inferior a 5%).

3.1.6 Fluido recuperado no secador de cascalho

O fluido recuperado no secador ainda contém um alto teor de sólidos (45% em massa) e é então submetido a geralmente duas centrífugas decantadoras, operando em paralelo, dimensionadas e preparadas para processar fluidos com grande quantidade de sólidos. O *overflow* das centrífugas decantadoras que processam o fluido recuperado no secador é direcionado para o sistema ativo de circulação juntamente com o fluido recuperado no *Mud Cleaner* enquanto que o *underflow* (sólidos separados) é levado para um compartimento de armazenamento para posterior disposição final juntamente com os sólidos processados no secador de cascalho.

Todo o sistema de controle de sólidos descrito é de suma importância no processo de perfuração de poços de petróleo e gás, uma vez que a lama de perfuração pode ser considerada como a “força vital do poço”, principalmente para poços de grande profundidade. Portanto é bastante clara a necessidade de se recuperar de forma eficaz e eficiente o fluido de perfuração. Além disso, o processo de controle de sólidos é essencial na adequação dos resíduos de perfuração às leis ambientais vigentes e cada vez mais restritas (PETROBRAS, 2008).

3.2 Amostragem

A primeira etapa no trabalho de amostragem da lama de perfuração consistiu na investigação do processo de controle de sólidos em sondas de perfuração de petróleo e gás. Para isso, foi realizada uma visita a duas sondas de perfuração em campos de petróleo da PETROBRAS no estado da Bahia, onde foi acompanhado todo o percurso do fluido de perfuração o qual é processado em um circuito fechado.

O sistema de controle de sólidos é constituído sequencialmente por peneiras vibratórias, tanques de decantação, conjunto de hidrociclones (desareiaadores e dessiltadores) e

Cleaner, o *underflow* dos hidrociclones é processado em uma peneira de tela fina e os sólidos retidos nessa peneira seguem para o secador de cascalho, juntamente com os sólidos retidos nas peneiras primárias. No secador de cascalho, equipamento o fluido recuperado é processado em uma outra centrífuga decantadora e o cascalho seco está pronto para ser descartado.

Na segunda etapa do processo de amostragem, a lama de perfuração foi então coletada em diversos pontos do sistema de controle de sólidos, os quais foram determinados com o intuito de se obter informações essenciais na investigação dos principais equipamentos desse processo. As amostras são provenientes de cinco diferentes sondas de petróleo e gás onde foram amostradas lamas de perfuração nas correntes de entrada e saída das peneiras primárias, dessiltadores e secador de cascalho. No entanto, a amostragem em campo é muitas vezes dificultada pelo restrito acesso às correntes de lama, equipamentos e tanques, por isso, em algumas sondas certos pontos de amostragem não puderam ser alcançados. Em cada uma das cinco sondas visitadas foi possível amostrar as seguintes correntes de lama de perfuração:

- Sonda 1: entrada das peneiras primárias, fluido recuperado no *Mud Cleaner*, alimentação e sólidos na saída do secador.
- Sonda 2: *overflow*, *underflow* e alimentação do dessiltador, fluido recuperado, alimentação e sólidos na saída do secador.
- Sonda 3: fluido reserva, fluido puro, *overflow*, *underflow* e alimentação do dessiltador, fluido recuperado, alimentação e sólidos na saída do secador.
- Sonda 4: fluido reserva, fluido puro, fluido recuperado, alimentação e sólidos na saída do secador.
- Sonda 5: *overflow*, *underflow* e alimentação do dessiltador, fluido recuperado, alimentação e sólidos na saída do secador.

O fluido reserva é o fluido de perfuração novo, isto é, que ainda não foi utilizado e recuperado. O fluido puro é o fluido de perfuração recuperado e condicionado que será utilizado na perfuração.

3.3 Fluido de perfuração utilizado

Em todas as sondas onde foram coletadas amostras o fluido de perfuração, então utilizado, era basicamente o mesmo, sendo um fluido não aquoso sintético a base de n-parafina. A Tabela 3.2 indica tanto as condições de operação quanto as principais características do fluido de perfuração no momento em que as amostras foram coletadas.

Tabela 3.2 – Condições de operação das sondas e características do fluido de perfuração.

	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
Fase	3	2	2	2	2
Litologia	folhelho	folhelho	folhelho	folhelho	folhelho
Diâmetro da broca (in)	8 1/5	8 1/5	8 1/5	8 1/5	8 1/5
Profundidade do poço (m)	2272	1619	1282	610	1480
Vazão de fluido (gpm)	430	400	400	360	400
Tipo de fluido	n-parafina	n-parafina	n-parafina	n-parafina	n-parafina
Peso específico do fluido (ppg)	9,6	9,9	9,5	9,3	9,5
L 600 (Pa)	29	42	54	64	51
L 300 (Pa)	18	26	34	41	32
L 200 (Pa)	13	20	24	33	24
L 100 (Pa)	9	14	17	23	16
L 6 (Pa)	4	6	7	10	7
L 3 (Pa)	3	6	7	9	6
GI \ GF (Pa)	6 / 10	7 / 13	9 / 15	10 / 12	10 / 15
Salinidade (mg/l)	273	158	117	-	120
Sólidos (%)	12	18	12	3	10
Água (%)	24	30	40	49	40
Fase orgânica (%)	64	52	48	48	50
Razão sintético / água	70 / 30	63 / 37	54 / 46	50 / 50	55 / 45
Viscosidade plástica (Pa.s)	0,023	0,033	0,040	0,049	0,039
Limite de escoamento (Pa)	7	10	15	17	13

Dos dados razão sintético/água informados pelos operadores de cada sonda (Tabela 3.2), verifica-se que em todas elas o fluido utilizado é uma emulsão inversa de água em fase orgânica, ou seja, a fase contínua é constituída por n-parafina.

3.4 Concentrações

As lamas de perfuração são caracterizadas pela concentração volumétrica e mássica de fase orgânica, água, e sólidos. No caso de lamas de perfuração, a determinação precisa desses parâmetros só é possível utilizando um equipamento próprio para esse fim chamado Retorta. Dois tipos de retorta são usuais em sondas de perfuração, a retorta de 10 ml, para correntes com elevado teor de fluido, e a retorta de 50 ml, para correntes com alto teor de sólidos.

Esse equipamento é um pequeno forno que é aquecido eletricamente e controlado por um termostato que corta a corrente elétrica quando a temperatura chega a aproximadamente 500 °C, valor especificado pelo Instituto Americano de Petróleo (API). A retorta de 50 ml é composta por uma câmara de amostragem de 50 ml, câmara de destilação contendo um filtro para retenção dos sólidos e condensador. Alguns instrumentos simples são também fornecidos

para auxiliar no procedimento e limpeza do equipamento. A amostra é aquecida até aproximadamente 500°C e os vapores de água e fase orgânica são condensados e coletados em um recipiente, o volume coletado é então utilizado nos cálculos das concentrações.

No presente trabalho, para os ensaios de concentração foi utilizada retorta de 50 ml, segundo o procedimento estabelecido pelo Instituto Americano de Petróleo (API) na RP 13B-2. Foram analisados teores de sólidos, água e fase orgânica, em base volumétrica e mássica. Sendo a massa específica da água igual a 1,00 g/cm³ e da fase orgânica 0,73 g/cm³, as Equações de 3.1 a 3.6 descrevem os cálculos feitos neste procedimento. Nos cálculos, A representa o volume de água coletado em cm³, F o volume da fase orgânica coletada em cm³, M a massa de lama em gramas utilizada no ensaio e V o volume total amostrado.

1. Concentração volumétrica (%):

$$C_{v.água} = \frac{A}{V} 100 \quad (3.1)$$

$$C_{v.faseorgânica} = \frac{F}{V} 100 \quad (3.2)$$

$$C_{v.sólidos} = 100 - C_{v.água} - C_{v.faseorgânica} \quad (3.3)$$

2. Concentração mássica (%):

$$C_{w.água} = \frac{1,00 A}{M} 100 \quad (3.4)$$

$$C_{w.faseorgânica} = \frac{0,73 F}{M} 100 \quad (3.5)$$

$$C_{w.sólidos} = 100 - C_{w.água} - C_{w.faseorgânica} \quad (3.6)$$

3.5 Massa específica dos sólidos

Existem diversas maneiras de se determinar a densidade de um material sólido, dentre elas está a picnometria a gás hélio. O picnômetro de gás determina o volume verdadeiro de um sólido, mesmo que poroso, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido. Normalmente utiliza-se hélio porque este gás, além de inerte, penetra facilmente nos poros (acessíveis) da amostra, devido ao pequeno tamanho dos seus átomos, permitindo, assim, determinar o volume do sólido com mais rigor.

O picnômetro a hélio é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos (por calibração prévia): a câmara onde se coloca a amostra e a câmara de expansão, ligadas por

uma válvula (válvula de expansão). Antes de iniciar a análise propriamente dita, a amostra, colocada na respectiva câmara, é sujeita a um processo de degaseificação que consiste em repetidas purgas com hélio, para remoção de impurezas e umidade que eventualmente possa conter. Depois de levado todo o sistema à pressão atmosférica (14,7 psi), isola-se a câmara de expansão, fechando a válvula de expansão e pressuriza-se a câmara que contém a amostra até uma pressão $P1$ (cerca de 20 psi). Seguidamente, a válvula de expansão é aberta e, em consequência, ocorre um abaixamento de pressão para $P2$. Admitindo comportamento ideal do hélio, o volume do sólido pode ser calculado a partir das Equações 3.7 e 3.8:

$$P1 (V_a - V_s) = P2 (V_a - V_s + V_e) \quad (3.7)$$

Onde,

$$V_s = V_a - \frac{V_e}{\frac{P1}{P2} - 1} \quad (3.8)$$

Em que:

V_a - volume da câmara de amostragem;

V_e - volume da câmara de expansão;

V_s - volume de sólidos.

A massa específica é automaticamente calculada pelo equipamento, através da relação entre a massa do sólido (introduzida no equipamento como dado de entrada) e o volume derivado da Equação 3.8. A principal vantagem deste método reside na sua capacidade para medir apenas o volume do material, ou seja, descontar o volume dos poros ao volume total da amostra (a menos que estes sejam fechados ou inacessíveis ao gás). Além disso, esse método também permite, em princípio, medir o volume de sólidos com qualquer teor de umidade.

A massa específica dos sólidos foi determinada com o uso do picnômetro AccuPyc modelo 1330, foi utilizada a câmara de amostragem de 3,5 cm³ de volume e para cada ensaio foram tiradas cinco medidas de massa específica e realizadas dez purgas. Para a limpeza dos sólidos foi utilizada extração com solvente álcool isopropílico em extratores Soxhlet e estes foram secos em estufa a 120°C por 24h, com o intuito de eliminar a umidade.

3.6 Reologia da lama de perfuração

O reômetro utilizado nos ensaios de reologia deste trabalho é o reômetro coaxial

Brookfield modelo *R/S Plus*, para uso desse equipamento uma alíquota de 45 ml da amostra é necessária e os dados são obtidos instantaneamente com o uso do *software* Rheo3000. O reômetro fornece dados de tensão cisalhante, viscosidade aparente, temperatura e tixotropia para uma dada faixa de taxa de deformação. Nos ensaios foram utilizados *spindle* coaxial de 40 mm (CC-40) e banho termostático ligado a uma jaqueta de aquecimento para manter a temperatura do material analisado a 45°C. O fluido foi mantido a essa temperatura durante os ensaios de reologia na tentativa de reproduzir as condições de operação encontradas no campo, uma vez que a lama que retorna do poço chega à superfície a aproximadamente 45°C.

Os ensaios de reologia foram realizados com as amostras das sondas, 1, 2, 3, 4 e 5 no intervalo de taxa de deformação entre 0 e 2100 s⁻¹ com ciclo crescente durante cinco minutos, à temperatura média de 45°C e cisalhamento prévio durante 60 segundos à taxa de 1021 s⁻¹. O cisalhamento prévio é necessário para quebrar as estruturas internas da lama de perfuração (gel), e foi realizado à taxa de cisalhamento e tempo de ensaio semelhantes aos utilizados em campo (API, 2005). Os dados dos reogramas foram ajustados segundo os modelos reológicos de Bingham, Power Law, Herschel-Bulkley e Robertson-Stiff, cujas equações e parâmetros foram descritos anteriormente. O procedimento acima permite também acompanhar a variação da viscosidade aparente da lama de perfuração com o aumento da taxa de deformação no intervalo de 0 a 2100 s⁻¹.

Existem três maneiras de se analisar o comportamento tixotrópico de um fluido, são elas:

1. *Análise da variação da viscosidade aparente em função do tempo de cisalhamento a uma taxa de deformação constante.* Foram mantidas constantes taxas de deformação em 100, 300, 1000 e 1500 s⁻¹ durante 1800 s, afim de que um valor estacionário fosse atingido. Os ensaios foram realizados com as amostras do *underflow* e do *overflow* do hidrociclone da sonda 3. Os valores de taxa de deformação foram escolhidos aleatoriamente dentro do intervalo estudado e o tempo de cisalhamento foi definido com o intuito de se atingir um estado estacionário.

2. *Rampas com aumento e diminuição da taxa de deformação.* A variação da taxa de deformação foi de 0 a 2100 s⁻¹ em 5 min e de 2100 a 0 s⁻¹ em 5 min. Os ensaios foram realizados com as amostras das sondas 3 e 4.

3. *Aferição da tensão crítica a uma determinada taxa de deformação para diferentes tempos de descanso.* Essa metodologia foi aplicada a três amostras da sonda 3 (fluido puro, alimentação e *overflow* do dessiltador). Inicialmente as amostras foram submetidas à taxa de deformação de 1021 s⁻¹ durante 60 s afim de quebrar completamente a estrutura gel. Em

seguida a amostra foi mantida em repouso por certo tempo, ao final desse período a amostra foi submetida a taxa de deformação de 1021 s^{-1} durante 10 s, nesse intervalo de tempo foram lidos cinco valores de tensão cisalhante sendo o primeiro ponto a tensão máxima atingida, que está diretamente ligada à estrutura gel do material. Em seguida a amostra foi novamente submetida a tensão de 1021 s^{-1} durante 60 s, para garantir a quebra de toda a estrutura interna do material (API, 2005), e então mantida em repouso novamente por um período de tempo maior. Os tempos de repouso adotados foram: 0, 10, 30, 60, 180, 300, 420 e 540 segundos.

Os ensaios segundo a primeira metodologia foram refeitos, porém submentendo primeiramente as amostras a um cisalhamento prévio à taxa de deformação de 1021 s^{-1} durante 60 segundos. Desta forma é possível verificar a quebra da estrutura gel das amostras e consequente inibição da histerese típica de curvas de fluxo de fluidos tixotrópicos.

Métodos de regressão não linear foram utilizados no ajuste dos dados de tensão *versus* taxa de deformação e o modelo que melhor descreve o comportamento reológico das lamas de perfuração amostradas foi determinado com base no número de parâmetros do modelo, nos valores do quadrado do coeficiente de correlação, na análise dos resíduos e na literatura.

3.7 Granulometria dos sólidos de perfuração

Para os ensaios de granulometria foi necessário separar os sólidos do fluido, o que foi possível através de extração com solvente álcool isopropílico em extratores Soxhlet e secagem dos sólidos em estufa a $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 72h. A distribuição granulométrica dos sólidos foi determinada com uso da técnica de difração de raio laser. Foi utilizado um banho ultrassônico durante 4 minutos a fim de se inibir a aglomeração das partículas, o índice de refração adotado para o material foi o da sílica e álcool isopropílico PA foi utilizado como dispersante para evitar qualquer interação das partículas com o meio.

Foram analisadas as distribuições acumulada e de frequência para cada amostra. As distribuições acumulativas foram ajustadas segundo os modelos de distribuição Rosin-Rammler-Bennet (RRB), Sigmóide e Gates-Gaudim-Schumann (GGS), cujas equações e significados dos parâmetros foram descritos anteriormente. Os dados de distribuição acumulativa foram ajustados por meio de regressão não linear e o modelo que melhor descreve a granulometria dos sólidos foi determinado a partir da comparação do quadrado do coeficiente de correlação e da análise dos resíduos.

3.8 Secador de cascalho

O secador de cascalho é um tipo de centrífuga vertical de tela na qual o fluxo de lama de perfuração através do equipamento é controlado para se obter uma ótima separação sólido-líquido. A Figura 3.5 mostra o fluxo de material através da centrífuga, um estudo deste esboço permite uma compreensão clara do funcionamento da unidade.

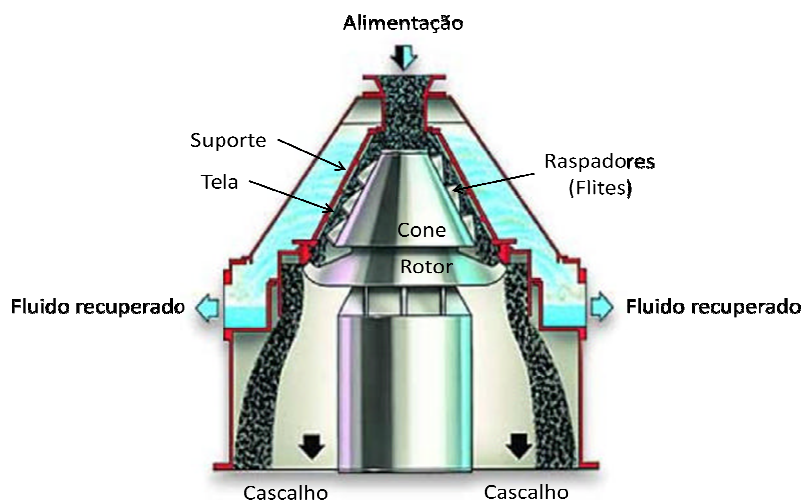


Figura 3.5 - Fluxo de material e estrutura do secador de cascalho.

Os sólidos tratados pelas peneiras são transportados até o secador de cascalho através de diferentes sistemas que incluem alimentação por gravidade, transferência por bomba a vácuo com funil rotativo, transporte pneumático e roscas transportadoras. Assim que a alimentação é introduzida no secador, ela é imediatamente acelerada pela rotação do cone e raspadores, a lama é, então, direcionada para a superfície da tela, onde ocorre a separação sólido-líquido pela ação centrífuga. Os raspadores criam também uma ação rotacional que além de promover a separação, previne o entupimento da tela direcionando os sólidos secos para a parte inferior do equipamento. Tal processo de separação pode ser otimizado pela mudança na vazão de cascalho que é alimentado na centrífuga, pelo ajuste da distância entre os raspadores e a tela, o que se faz movendo o cone na vertical, ou ainda alterando a abertura da tela, sendo as mais comumente utilizadas de 10 ou 20 mesh, 254 e 508 μm respectivamente.

Devido às altas forças G criadas pelo grande diâmetro do cone que gira com elevada rotação, a separação sólido-líquido ocorre instantaneamente conforme a lama entra em contato com a superfície da tela de alta capacidade, produzindo um descarte de sólidos seco e recuperando fluido de perfuração. A taxa de fluxo sobre a tela é controlada pela diferença de

velocidade entre o cone e a tela, sendo que os raspadores giram uma volta a mais a cada volta da tela e cada 75 rotações dos raspadores correspondem a 74 rotações do rotor, e também pela ação das aletas raspadoras, as quais movem os sólidos na direção do local de descarte. Os cascalhos são descarregados por gravidade na parte inferior do equipamento e podem ser recolhidos logo após o secador ou transportados até determinado local por roscas transportadoras. O fluido que atravessa a tela é bombeado até uma centrífuga decantadora e retorna em seguida ao processo.

Na concepção do secador de cascalho adaptado a indústria petrolífera, foi feito um esforço para melhorar os procedimentos de manutenção comparados com outros tipos de centrífugas. Todas as peças que normalmente sofrem desgaste são facilmente acessíveis a partir do topo da máquina, as correias podem ser facilmente trocadas sem retirar o conjunto de engrenagem e este por sua vez pode ser removido com pouco esforço. A centrífuga é projetada para o serviço de alta velocidade com particular cuidado para assegurar o seu funcionamento sem vibração. Cada elemento que compõem o conjunto de rotação é individualmente equilibrado de modo que todas as peças são completamente permutáveis sem comprometer o equilíbrio de todo o conjunto. A função da caixa de engrenagem é proporcionar uma diferença de velocidade entre o cone e a tela (M-I SWACO, 2001).

A lubrificação do sistema é fornecida por uma bomba de circulação de óleo e para permitir um fácil acesso, tanto a bomba como o filtro de óleo são externos à máquina. Para assegurar a lubrificação adequada, a unidade de transmissão e rolamentos é acompanhada de um pressostato que garante uma boa lubrificação. O funcionamento econômico e sem problemas de qualquer equipamento de processo é dependente de fatores tais como procedimentos de manutenção e assistência geral do equipamento. Para se assegurar um bom procedimento de manutenção é necessário um bom conhecimento do funcionamento geral do equipamento. Devido à grande variedade de equipamentos do tipo centrífuga contínua, apenas pontos gerais do processo podem ser analisados. Geralmente, a mudança de umidade ou teor de fluido na alimentação, o tamanho das partículas, a taxa de alimentação e a limpeza da tela podem alterar a qualidade do produto.

3.8.1 Telas

Existem diferentes aberturas de telas, a abertura ótima é determinada por testes de campo, pois varia de acordo com o material a ser processado. As telas verticais permitem secagem eficiente e fácil deslocamento do cascalho. Alguns exemplos de abertura de tela são:

- 0,010 in (10 mesh) => 254 μ m;

- 0,015 in (15 mesh) => 381 μm ;
- 0,020 in (20 mesh) => 508 μm ;
- 0,030 in (30 mesh) => 762 μm ; e maiores para circunstâncias especiais.

A tela é suportada por uma estrutura metálica, a qual possui vida útil longa e o seu grau de desgaste, normalmente, não afeta o funcionamento da centrífuga, a menos que este cause um desequilíbrio mecânico. Na Figura 3.6 pode-se observar uma tela de 20 mesh (508 μm), sua abertura vertical e seu suporte.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.6 - Tela de 20 mesh (a), abertura vertical da tela (b) e suporte da tela (c).

3.8.2 Raspadores

Segundo o manual de operação do secador de cascalho da M-I SWACO (2001), os raspadores são fundamentais para o bom desempenho da máquina, portanto, é importante sempre manter uma folga ótima entre a tela e os raspadores, um bom grau de contorno destes e uma boa condição da sua superfície. Raspadores padrão são ajustáveis, independentes e com revestimento de carbonato de tungstênio, reduzindo o desgaste. A Figura 3.7 mostra um exemplo de raspadores utilizados nos secadores de cascalho.



Figura 3.7 - Raspadores.

O espaçamento ótimo entre a tela e os raspadores é de 0,015 in ($\sim 0,4$ mm), este valor foi determinado para diversas aplicações, no entanto, alguns materiais podem exigir valores diferentes. Uma folga excessivamente pequena pode reduzir a vida útil da tela, aumentar a sua degradação, elevar o teor de sólidos no fluido recuperado e o teor de fluido no cascalho seco. Os raspadores têm a função de manter a tela limpa e de direcionar os sólidos para a área de descarte.

3.8.3 Rotor

É muito importante verificar a condição do rotor a cada mudança de tela. Isto é necessário, pois o rotor é o membro de ligação entre o eixo de acionamento externo e o suporte da tela, e é uma das partes que está sujeita a um desgaste abrasivo pelo próprio produto. A forma do rotor, o seu funcionamento e o tratamento de sua superfície são projetados para evitar ou minimizar esse processo. Além disso, esse desgaste inerente que existe pode ser diminuído se as inspeções periódicas e os trabalhos de manutenção necessários forem realizados antes que o rotor se deteriore a um ponto onde há danos físicos ao equipamento. Um rotor severamente comprometido causará um desgaste desnecessário e perdas de outras partes da centrífuga (M-I SWACO, 2001). Na Figura 3.8 pode-se observar o rotor acoplado ao cone.



Figura 3.8 - Cone e rotor do secador de cascalho.

3.8.4 Descarga de sólidos

O compartimento de descarga vai do fundo do rotor ao fundo da base da centrífuga. Uma inspeção diária nesta parte do equipamento deve ser realizada a fim de se prevenir a formação de acúmulo de produto nesta região, tal fato levaria a uma excessiva resistência de partes móveis, o que poderia acarretar em uma sobrecarga da máquina e conseqüente desgaste no rotor.

3.8.5 Diferentes modelos da centrífuga Verti-G da M-I Swaco

Desde 1999, a Verti-G da M-I Swaco é a tecnologia referência para a recuperação de fluidos de perfuração e secagem de cascalho na indústria internacional. No entanto, tornou-se evidente as limitações de espaço na indústria petrolífera, o que não permitia a utilização desta tecnologia em todas as aplicações. O desejo de utilizar a mesma tecnologia eficiente e baixa manutenção em áreas confinadas levou a M-I Swaco a desenvolver modelos de secadores de cascalho mais compactos (SCI, 2010). A Figura 3.9 ilustra essa evolução.

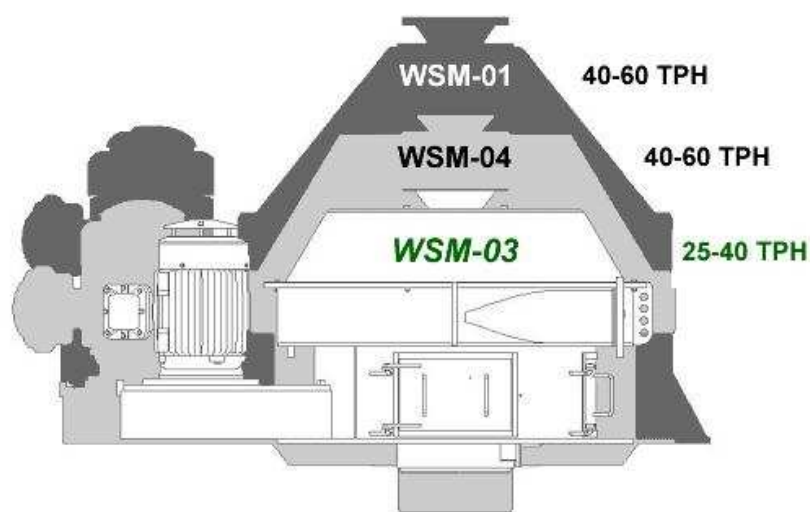


Figura 3.9 - Evolução dos modelos de secadores de cascalho da M-I Swaco.

Todos os três modelos são centrífugas verticais adaptáveis a qualquer tipo de alimentação e foram projetados para trabalhar com fluxo contínuo e proporcionar uma separação sólido-líquido ideal. No entanto, enquanto o modelo WSM-03 apresenta uma restrição quanto à capacidade (motor de 30 HP), o modelo WSM-01 possui restrição quanto ao espaço. Desta forma, o modelo mais comumente utilizado é o modelo WSM-04, que possui tanto capacidade (motor de 75 HP, assim como o WSM-01) quanto dimensões que atendem a indústria petrolífera internacional.

O modelo Verti-G 04 foi desenvolvido a partir de recomendações dos clientes da M-I Swaco e com a aplicação de nova tecnologia, as seguintes modificações de projeto foram realizadas:

- Redução do tamanho da carcaça externa, conservando os mesmo componentes internos de desgaste, com exceção do sistema de limpeza.
- Novo design do sistema de limpeza para proporcionar um melhor fluxo de ar e/ou fluido.
- Aumento das dimensões da porta de acesso para limpeza.

- Realocação do sistema de lubrificação para melhorar a proteção dos componentes externos.
- Novo projeto de efluentes para melhorar o sistema de descarte do equipamento.
- Melhor projeto de proteção contra água, inclusão de portas superiores para inspeção visual, capacidade de malha, suporte e área de efluentes.

3.8.6 Diferentes tipos de alimentação do secador de cascalho

Segundo M-I SWACO (2000), vários podem ser os tipos de alimentação de um secador de cascalho, dentre eles tem-se:

1. Bomba de vácuo com funil rotativo

- Vantagens: vácuo contínuo e com altas taxas de penetração e pode ser usada onde roscas transportadoras não podem ser instaladas.
- Desvantagens: maior necessidade de equipamentos, necessidade de maior potência devido às bombas de vácuo e maior necessidade de espaço na plataforma.

2. Rosca transportadora

- Vantagens: menor quantidade de equipamentos, portanto mais espaço disponível, maior confiabilidade que o sistema a vácuo e trabalha com altas taxas de penetração.
- Desvantagens: pode ser mais perigoso quando o sistema de segurança não é devidamente utilizado, muitas modificações na plataforma podem ser necessárias para sua instalação e se não houver uma manutenção adequada e contínua pode se desgastar rapidamente.

3. Transporte pneumático

- Vantagens: capacidade de transportar o cascalho por longas distâncias.
- Desvantagens: exige compressor de ar grande ocupando assim grande área na plataforma e grandes modificações na plataforma podem ser necessárias para sua instalação.

4. Alimentação por gravidade

- Vantagens: menor necessidade de espaço e de energia.
- Desvantagens: abastecimento descontínuo e difícil instalação.

CAPITULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos em resultado dos procedimentos descritos no capítulo anterior e que permitem caracterizar as lamas e os sólidos de perfuração amostrados, na faixa de operação em que os ensaios experimentais foram realizados, estão descritos neste capítulo. Os resultados de massa específica, reologia e granulometria apresentados são valores médios, uma vez que estes ensaios foram realizados em tréplica.

4.1 Concentrações

A partir da Tabela 4.1, que traz as concentrações volumétricas e mássicas de água, fase orgânica e sólidos nas correntes das sondas 3, 4 e 5, pode-se verificar alguns aspectos em relação à lama e sólidos de perfuração ao longo do sistema de controle de sólidos. Cabe informar que as concentrações das amostras coletadas nas sondas 1 e 2 não foram medidas, uma vez que, a retorta (equipamento utilizado para tal) ainda não havia sido adquirida quando estas amostras foram coletadas.

Os fluidos reserva e puro, amostrados nas sondas 3 e 5, apresentam pequena concentração volumétrica de sólidos (5 a 10%), esses sólidos são provavelmente aditivos e adensantes colocados no fluido de perfuração para condicioná-lo segundo propriedades características requeridas para uma boa performance do mesmo durante a operação.

Nas correntes dos hidrociclones, tanto da sonda 3 quanto da sonda 5, a alimentação e o *overflow* têm a mesma concentração em volume de sólidos e o *underflow* apresenta uma concentração um pouco superior. Esse comportamento pode ser explicado por uma pequena razão de líquido nesses hidrociclones, ou seja, a vazão de lama no *underflow* é muito pequena quando comparada às vazões da alimentação e do *overflow*.

A partir da análise das concentrações das correntes do secador de cascalho, é possível observar uma redução mássica no teor de fluido aderido ao cascalho de 87% na sonda 3 (passando de 13,83 para 1,80%), 56% na sonda 4 (passando de 9,50 para 4,22%) e 83% na sonda 5 (passando de 16,49 para 2,86%), caracterizando assim um melhor desempenho desse equipamento nas sondas 3 e 5. Nota-se nas três sondas que o fluido recuperado no secador tem ainda considerável quantidade de sólidos (14%, 22% e 18%) devido às partículas que, durante o processo de secagem do cascalho, atravessam a tela da centrífuga e são coletadas no fluido recuperado no secador.

Tabela 4.1 - Concentrações de água, fase orgânica e sólidos na lama de perfuração.

	Concentração volumétrica (%)			Concentração mássica (%)		
	água	fase orgânica	sólidos	água	fase orgânica	sólidos
Sonda 3						
Fluido reserva	32,00	59,00	9,00	27,73	36,81	35,46
Fluido puro	42,00	48,00	10,00	35,35	29,09	35,56
Alimentação dos hidrociclones	43,00	47,00	10,00	36,07	28,39	35,54
<i>Overflow</i> dos hidrociclones	43,00	47,00	10,00	35,89	28,25	35,86
<i>Underflow</i> dos hidrociclones	40,00	45,00	15,00	32,10	26,00	41,89
Saída das peneiras primárias	24,00	15,00	61,00	13,86	6,24	79,91
Alimentação do secador	28,00	32,00	40,00	16,81	13,83	69,36
Fluido recuperado no secador	40,00	46,00	14,00	32,57	26,97	40,46
Cascalho na saída do secador	17,00	4,00	79,00	10,64	1,80	87,56
Sonda 4						
Fluido reserva	43,00	48,00	9,00	37,65	35,31	27,04
Fluido puro	49,00	46,00	5,00	43,59	34,38	22,03
Saída das peneiras primárias	28,00	17,00	55,00	16,26	8,29	75,45
Alimentação do secador	30,00	22,00	48,00	15,42	9,50	75,09
Fluido recuperado no secador	40,00	38,00	22,00	27,89	22,26	49,85
Cascalho na saída do secador	19,00	7,00	74,00	13,65	4,22	82,13
Sonda 5						
Alimentação dos hidrociclones	41,00	49,00	10,00	34,40	29,60	36,0
<i>Overflow</i> dos hidrociclones	41,00	49,00	10,00	34,40	29,60	36,0
<i>Underflow</i> dos hidrociclones	37,00	45,00	18,00	23,56	27,90	48,54
Alimentação do secador	30,00	36,00	34,00	18,82	16,49	64,69
Fluido recuperado no secador	31,00	51,00	18,00	23,56	27,90	48,54
Cascalho na saída do secador	17,00	6,00	77,00	11,24	2,86	85,90

O cascalho retido nas peneiras é transportado até o secador para o procedimento de limpeza já mencionado, no entanto, verifica-se que o teor de fluido nos sólidos saindo das peneiras é inferior ao teor de fluido nos sólidos que alimentam o secador de cascalho. Esse fato é explicado pela pequena adição de fluido ao cascalho retido nas peneiras, que é feita com o intuito de facilitar o transporte do mesmo.

Nas sondas 3 e 4 a quantidade de água é maior no fluido puro em relação ao fluido reserva indicando que este foi diluído, o que significa dizer que o fluido puro contém maior quantidade de fase dispersa (água emulsionada) que o fluido reserva. Segundo SCHRAMM (2005), quanto maior a concentração volumétrica da fase dispersa maior será a viscosidade aparente da emulsão, assim, nos casos apresentados, o fluido puro deve apresentar viscosidade aparente superior à do fluido reserva.

4.2 Massa específica dos sólidos

A Tabela 4.2 mostra a massa específica em g/cm^3 dos sólidos nas diversas correntes de lama de perfuração das sondas 1, 2, 3, 4 e 5.

Tabela 4.2 - Massa específica dos sólidos nas sondas 1, 2, 3, 4 e 5.

	Massa Específica (g/cm^3)	Desvio padrão (g/cm^3)
Sonda 1		
Entrada das peneiras	2,4453	0,0007
Recuperado no <i>Mud Cleaner</i>	2,4564	0,0016
Alimentação do secador	2,5494	0,0010
Cascalho na saída do secador	2,6507	0,0020
Sonda 2		
Alimentação dos hidrociclones	2,5406	0,0009
<i>Overflow</i> dos hidrociclones	2,5541	0,0011
<i>Underflow</i> dos hidrociclones	2,6271	0,0004
Alimentação do secador	2,6259	0,0072
Fluido recuperado no secador	2,6290	0,0018
Cascalho na saída do secador	2,6271	0,0004
Sonda 3		
Alimentação dos hidrociclones	2,6199	0,0009
<i>Overflow</i> dos hidrociclones	2,6088	0,0007
<i>Underflow</i> dos hidrociclones	2,5810	0,0016
Saída das peneiras primárias	2,6379	0,0003
Alimentação do secador	2,7140	0,0008
Fluido recuperado no secador	2,7844	0,0009
Cascalho na saída do secador	2,7727	0,0009
Sonda 4		
Saída das peneiras primárias	2,6406	0,0005
Alimentação do secador	2,7872	0,0009
Fluido recuperado no secador	2,7431	0,0012
Cascalho na saída do secador	2,6212	0,0008

Continua...

Continuação Tabela 4.2

Sonda 5		
Alimentação dos hidrociclones	2,7764	0,0013
<i>Overflow</i> dos hidrociclones	2,7795	0,0011
<i>Underflow</i> dos hidrociclones	2,7126	0,0006
Saída das peneiras primárias	2,6075	0,0004
Alimentação do secador	2,5718	0,0007
Fluido recuperado no secador	2,5712	0,0010
Cascalho na saída do secador	2,5948	0,0011

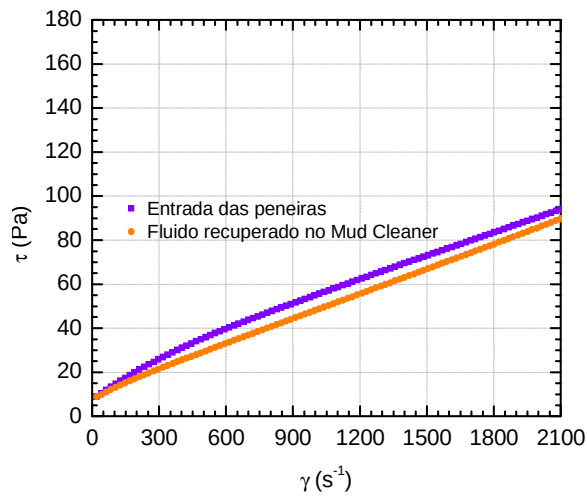
A massa específica média observada nas cinco sondas investigadas é $2,6190 \pm 0,0012 \text{ g/cm}^3$, bem próxima à da argila e está de acordo com THOMAS (2001). Nota-se também uma variação muito pequena dessa propriedade, ficando sempre entre 2,5 e 2,8 g/cm^3 , e variação menor ainda em cada sonda isolada. Tal fato permite afirmar que a massa específica dos sólidos, em cada sonda, é praticamente a mesma em todo o processo de controle de sólidos, o que implica dizer que a massa específica dos sólidos não tem papel relevante na separação sólido-sólido que ocorre no processo de controle de sólidos, no entanto, tem papel importante na separação sólido-fluido, uma vez que a massa específica dos sólidos é até quatro vezes maior que a do fluido (n-parafina).

Apesar de consideravelmente pequena, a variação observada entre as massas específicas dos sólidos nas cinco sondas analisadas pode ser um indício de diferentes composições mineralógicas das formações perfuradas.

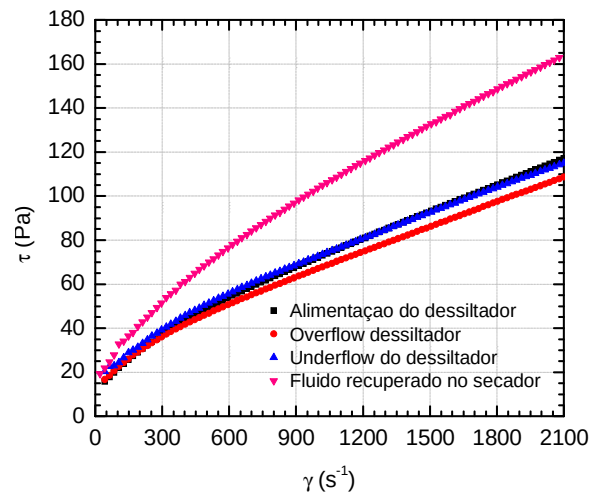
4.3 Reologia da lama de perfuração

4.3.1 Reogramas

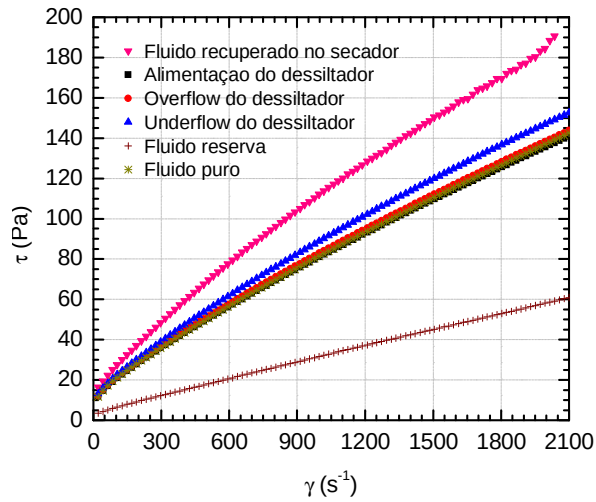
A Figura 4.1 mostra a variação da tensão de cisalhamento com a taxa de deformação dentro do intervalo de 0 a 2100 s^{-1} para as lamas de perfuração das sondas 1, 2, 3, 4 e 5. Na sonda 1, nota-se que o fluido que retorna do poço (entrada das peneiras) apresenta tensão de cisalhamento levemente superior ao fluido recuperado no *Mud Cleaner*. É possível que esse comportamento seja resultante de uma concentração maior de sólidos no fluido que retorna do poço, além de serem sólidos com diâmetros maiores que os das partículas encontradas no fluido recuperado no *Mud Cleaner*.



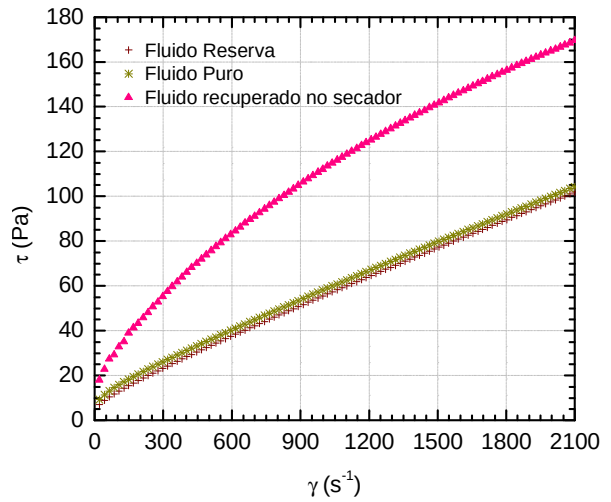
(a)



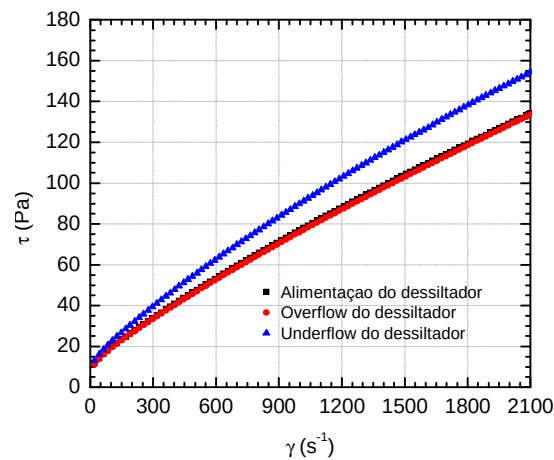
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.1 – Reogramas das sondas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5(e).

Na sonda 2, a corrente que apresentou as menores tensões cisalhantes entre as três correntes do dessiltador foi o *overflow*, corrente que apresenta menor concentração volumétrica de sólidos. Já as correntes do *underflow* e alimentação do dessiltador apresentaram comportamento bastante semelhante alcançando tensões de cisalhamento levemente superior às alcançadas pela corrente do *overflow*.

Nas sondas 2, 3 e 5, a corrente que alcançou as maiores tensões cisalhantes entre as três correntes dos hidrociclones foi o *underflow*, tal fato pode ser explicado pela maior concentração de sólidos nessa corrente em relação às outras duas. Comparando o comportamento reológico das correntes do dessiltador dessas três sondas, observa-se que, no intervalo de taxa de deformação analisado, a corrente de alimentação desse equipamento apresentou comportamento ora semelhante ao *underflow* (sonda 2) ora semelhante ao *overflow* (sonda 3 e 5). O comportamento das curvas de fluxo observado nas sondas 3 e 5 (alimentação semelhante ao *overflow*) condiz com as concentrações de sólidos destas correntes nessas duas sondas, uma vez que a concentração de sólidos no *overflow* e na alimentação dos hidrociclones é a mesma nas sondas 3 e 5.

No geral, pode-se dizer que o comportamento das correntes dos dessiltadores nas sondas 2, 3 e 5 foi bem próximo, salvo que as tensões alcançadas nas sondas 3 e 5 foram superiores às atingidas na sonda 2. Além disso, é possível afirmar que as curvas de fluxo das três correntes do dessiltador têm comportamento semelhante, sendo que a concentração de sólidos levemente superior na corrente do *underflow* em relação às demais correntes, faz com que esta alcance tensões de cisalhamento ligeiramente superiores às observadas no *overflow* desse equipamento. Além disso a alimentação pode ter um comportamento reológico intermediário entre o do *underflow* e do *overflow*.

As tensões de cisalhamento alcançados pelo fluido reserva, na sonda 3, são inferiores às alcançadas pelas demais correntes analisadas. O fluido puro, nesta sonda, apresentou comportamento próximo ao das correntes de alimentação e *overflow* do dessiltador e bastante diferente do fluido reserva. Já na sonda 4, a curva de fluxo do fluido reserva é semelhante à do fluido puro. Dos resultados de concentração, observa-se que em ambas as sondas 3 e 4 o fluido reserva foi diluído, aumentando assim a quantidade de água emulsionada e consequentemente a viscosidade da lama, fato que levaria o fluido puro a alcançar maiores tensões em relação ao fluido reserva e o que efetivamente ocorre na sonda 3. No entanto, na sonda 4, diferentemente da sonda 3, a concentração de sólidos é menor no fluido puro em relação ao fluido reserva, o que levaria a uma diminuição da viscosidade do fluido puro.

Assim, é provável que, na sonda 3, o aumento da viscosidade do fluido puro em relação ao fluido reserva devido à diluição leva à diferença de comportamento encontrada nos reogramas dessas correntes. Já na sonda 4, é possível que o aumento da viscosidade do fluido puro pela diluição do fluido reserva tenha sido amenizado pela menor concentração de sólidos no fluido puro, o que poderia levar a um comportamento de fluxo semelhante, como observado nos reogramas destas duas correntes. Além disso, observa-se que a diluição do fluido de perfuração foi maior na sonda 3 em relação a sonda 4. O percentual de água passou de 32 para 42% na sonda 3, enquanto que na sonda 4 o aumento foi de 43 para 49%.

Nas sondas 2, 3 e 4 a corrente que apresentou maior tensão cisalhantes foi o fluido recuperado no secador, alcançando tensões de 160 a quase 200 Pa à taxa de deformação de 2100 s^{-1} . Isso se explica pelo fato de que, no geral, dentre as correntes analisadas, essa é a que apresenta maior concentração volumétrica de sólidos, pois uma grande quantidade de partículas não é retida no secador de cascalho e atravessa a tela desse equipamento, juntamente com o fluido recuperado. No entanto, na sonda 3, embora as concentrações de água, fase orgânica e sólidos serem praticamente iguais no *underflow* dos dessiltadores e no fluido recuperado no secador, essa segunda corrente alcançou tensões de cisalhamento superiores em relação às alcançadas pelo *underflow* dos dessiltadores, neste caso, esse comportamento pode ser justificado pela diferença granulométrica entre as partículas presentes em cada corrente: partículas finas no *underflow* e partículas maiores no fluido recuperado no secador.

Observa-se também em todos os casos uma tensão crítica, caracterizando, assim, a lama de perfuração como fluido viscoplástico, ou seja, há sempre uma tensão mínima a ser alcançada antes que o escoamento da lama seja iniciado (CHHABRA; RICHARDSON, 1999).

4.3.2 Ajuste dos dados segundo modelos reológicos

A partir da Figura 4.2, que exemplifica o ajuste dos dados experimentais segundo os modelos reológicos de Bingham, Power Law, Herschel-Bulkley e Robertson-Stiff, pode-se observar o melhor ajuste dos modelos de três parâmetros em relação aos modelos de dois parâmetros e também o ajuste semelhante dos modelos HB e RS.

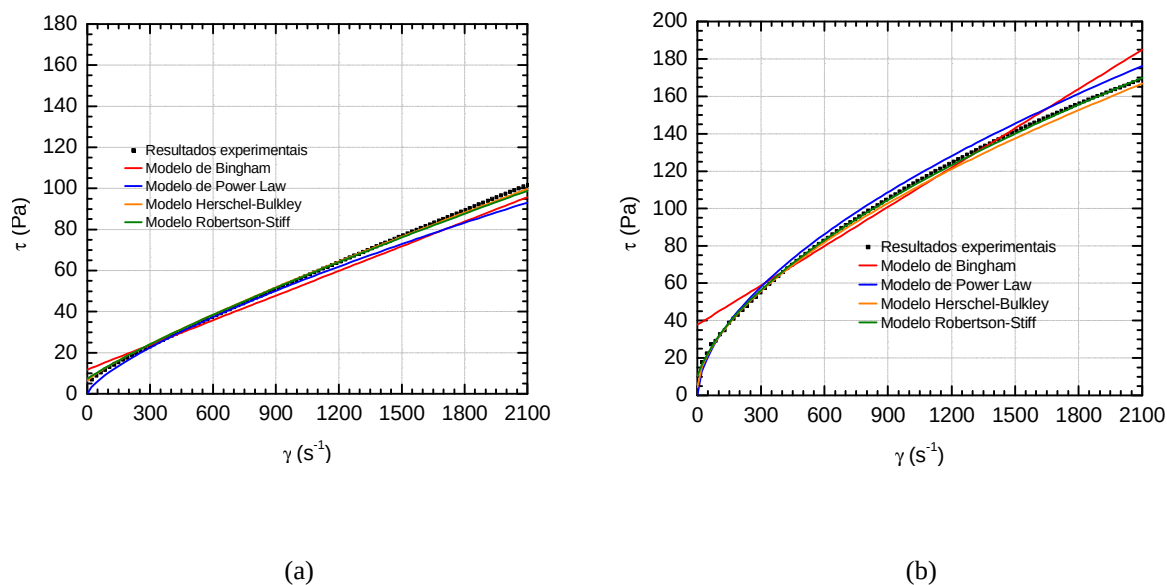


Figura 4.2 - Gráficos dos modelos reológicos em comparação com os dados experimentais do fluido reserva (a) e fluido recuperado no secador de cascalho (b) da sonda 4.

Nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 têm-se os valores dos parâmetros dos quatro modelos reológicos estudados, os desvios padrão (DP) e o quadrado do coeficiente de correlação (r^2), resultantes do ajuste dos dados de reologia das sondas 1, 2, 3, 4 e 5. No Apêndice A, as Figuras de A.1 a A.18 ilustram os gráficos de distribuição de resíduos de tais ajustes.

Os modelos de dois parâmetros, Bingham e Power Law, apresentaram quadrados do coeficiente de correlação próximos de 1 e distribuição de resíduos tendenciosa em ambos os casos. Como esperado, os modelos de três parâmetros, Herschel-Bulkley e Robertson-Stiff, apresentaram quadrados do coeficiente de correlação mais próximos de 1 que os modelos de dois parâmetros. Neste caso, os valores dos coeficientes de regressão obtidos foram elevados e praticamente iguais para os dois modelos e a distribuição de resíduos foi também tendenciosa, sendo a amplitude dos resíduos do modelo HB inferior à do modelo RS. A não dispersão ou aleatoriedade dos resíduos indica que os modelos avaliados podem em algum momento estimar de forma não precisa o comportamento de fluxo da lama.

Desta forma, a escolha do modelo reológico que melhor representa o comportamento de fluxo da lama de perfuração não é possível levando em consideração somente os resultados estatístico.

Tabela 4.3 - Parâmetros estimados para os modelos reológicos de Bingham, PL, HB e RS: sondas 1 e 2.

Modelo	Parâmetros	Sonda 1		Sonda 2			
		Entrada das peneiras	Fluido rec. <i>Mud Cleaner</i>	Hidrociclones			Recup. secador
				Alimentação	<i>Overflow</i>	<i>Underflow</i>	
Bingham	τ_0 (Pa)	14,59	9,87	23,43	23,46	27,22	33,74
	DP_{τ_0}	0,37	0,08	0,59	0,49	0,54	0,07
	μ_0 (Pa.s)	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,97
	DP_n	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	r^2	0,9970	0,9999	0,9947	0,9956	0,9950	0,9930
Power Law	K (Pa.s ⁿ)	0,55	0,25	1,20	1,33	1,72	1,80
	DP_K	0,02	0,02	0,04	0,06	0,09	0,04
	n (–)	0,67	0,76	0,60	0,57	0,55	0,59
	DP_n	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00
	r^2	0,9988	0,9970	0,9986	0,9971	0,9947	0,9992
HB	τ_0 (Pa)	6,77	8,74	10,00	12,91	16,96	10,96
	DP_{τ_0}	0,19	0,11	0,31	0,37	0,73	0,24
	K (Pa.s ⁿ)	0,22	0,05	0,46	0,33	0,31	0,88
	DP_K	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,02
	n (–)	0,78	0,96	0,71	0,74	0,75	0,67
	DP_n	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
	r^2	0,9999	0,9999	0,9998	0,9997	0,9989	0,9999
RS	γ_0 (s ⁻¹)	83,06	206,65	77,40	124,23	160,01	52,12
	DP_{γ_0}	4,22	4,85	4,58	7,91	13,36	1,60
	K (Pa.s ⁿ)	0,31	0,06	0,71	0,59	0,64	1,26
	DP_K	0,01	0,00	0,02	0,03	0,05	0,01
	n (–)	0,74	0,95	0,66	0,67	0,67	0,63
	DP_n	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
	r^2	0,9998	0,9999	0,9998	0,9995	0,9990	0,9999

	Sonda 3	Sonda 4
--	---------	---------

[illegible]

Tabela 4.5 - Parâmetros estimados para os modelos reológicos de Bingham, PL, HB e RS: sonda 5.

Modelo	Parâmetros	Hidrociclones		
		Alimentação.	Overflow	Underflow
Bingham	τ_0 (Pa)	17,64	17,16	21,05
	DP_{τ_0}	0,42	0,40	0,59
	μ_0 (Pa.s)	0,06	0,06	0,07
	DP_n	0,00	0,00	0,00
	r^2	0,9982	0,9984	0,9974
Power Law	K (Pa.s ⁿ)	0,56	0,53	0,70
	DP_K	0,02	0,02	0,02
	n (-)	0,71	0,72	0,70
	DP_n	0,00	0,00	0,00
	r^2	0,9989	0,9989	0,9993
HB	τ_0 (Pa)	9,06	9,14	8,73
	DP_{τ_0}	0,08	0,05	0,15
	K (Pa.s ⁿ)	0,22	0,21	0,34
	DP_K	0,00	0,00	0,01
	n (-)	0,83	0,84	0,79
	DP_n	0,00	0,00	0,00
	r^2	0,9999	0,9999	0,9999
RS	γ_0 (Pa)	90,69	94,82	67,41
	DP_{γ_0}	1,047	1,180	1,065
	K (Pa.s ⁿ)	0,291	0,269	0,431
	DP_K	0,002	0,002	0,004
	n (-)	0,797	0,807	0,766
	DP_n	0,001	0,001	0,001
	r^2	0,9999	0,9999	0,9999

Assim, juntamente com a análise estatística dos dados, as características peculiares de cada modelo e informações da literatura, permitem afirmar que o modelo Herschel-Bulkley é o que representa melhor o fluxo de lamas de perfuração durante o processo de controle de sólidos, dentro da faixa de taxa de deformação estudada. Essa afirmação é consistente pelo fato de que esse modelo, além de alcançar valores do quadrado do coeficiente de correlação muito próximos de 1, apresenta variação não linear entre a tensão cisalhante e a taxa de

deformação e também tensão crítica - caracterizando-o como um fluido viscoplástico (CHHABRA; RICHARDSON, 1999) - ambas características nítidas nos reogramas da lama de perfuração.

Outro ponto positivo em relação ao modelo HB é que seus parâmetros são fisicamente muito bem definidos, o que não é observado para o outro modelo de três parâmetros estudado (Robertson-Stiff). Por fim e não menos importante, essa constatação é suportada por API (2006) que afirma ser o modelo HB largamente usado para descrever o comportamento reológico da maioria dos fluidos de perfuração e o que fornece melhores resultados de simulações de escoamento de fluido tanto base aquosa quanto não aquosa. Os valores de n e K obtidos para o modelo HB são semelhantes aos resultados de DUARTE (2004) para fluidos base goma xantana, os quais possuem propriedades semelhantes aos fluidos base n-parafina, confirmando assim a escolha do modelo Herschel- Bulkley como aquele que melhor representa o comportamento de lamas de perfuração de poços de petróleo e gás base n-parafina. Os valores dos parâmetros do ajuste segundo o modelo de Bingham (viscosidade plástica e tensão crítica), obtidos para o fluido reserva das sondas 3 e 4, foram comparados aos valores desses parâmetros calculados em campo. Na sonda, essas medidas são realizadas em viscosímetro (FANN 35A) a partir de dois únicos pontos (API, 2006), já para o estudo em questão os dados de taxa de deformação *versus* tensão de cisalhamento foram coletados com o uso de um reômetro (Brookfield R/S+), permitindo o uso de cem pontos para o ajuste dos dados. Não desconsiderando a eficácia de cada método, porém levando em conta a distância tecnológica desses equipamentos e métodos, observa-se que a viscosidade plástica e tensão crítica do fluido reserva nessas duas sondas estão próximas às medidas em campo. A Tabela 4.6 mostra essa comparação.

Tabela 4.6 – Comparação dos parâmetros do modelo de Bingham medidos em campo e em laboratório.

	Sonda 3		Sonda 4	
	Laboratório	Campo	Laboratório	Campo
Viscosidade plástica - μ_0 (Pa.s)	0,02	0,04	0,04	0,05
Tensão crítica - τ_0 (Pa)	7	15	12	17

4.3.3 Viscosidade aparente

A Figura 4.3 mostra os resultados de viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para o material amostrado. Observa-se maior variação da viscosidade aparente no intervalo de taxa de deformação de 0 a 900 s⁻¹ e tendência a se atingir um valor constante a taxas mais elevadas.

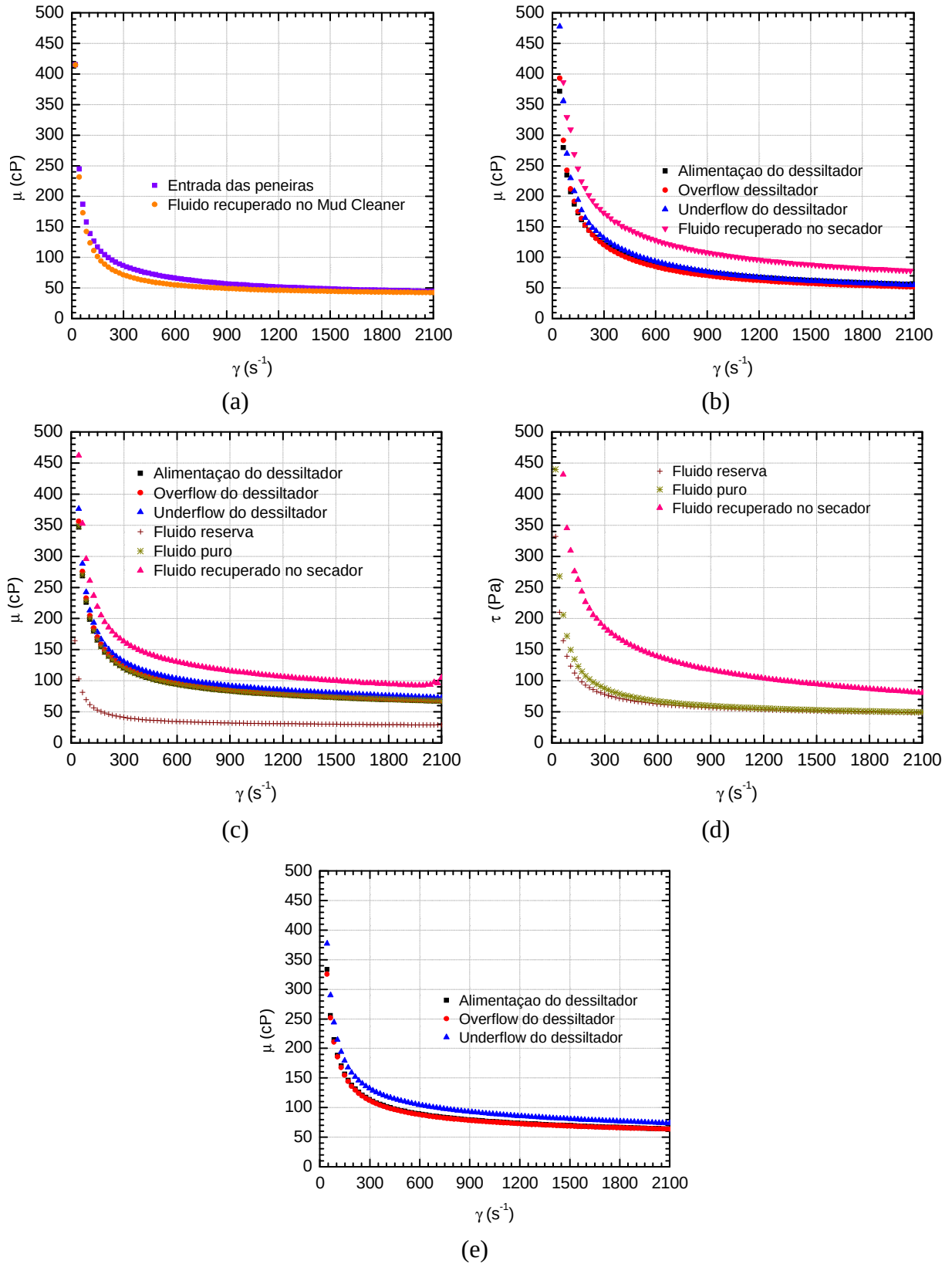


Figura 4.3 - Viscosidade aparente x taxa de deformação: sondas 1(a), 2(b), 3(c), 4(d) e 5(e).

O comportamento das três correntes do dessiltador foi semelhante nas sondas 2, 3 e 5, sendo no geral mais viscoso nas sondas 3 e 5. O fluido recuperado no secador foi o que

apresentou maior viscosidade aparente nas três sondas (2, 3 e 4) em que foi amostrado e o fluido reserva o menos viscoso nas duas sondas (3 e 4) em que foi coletado. Esse comportamento é esperado, uma vez que o fluido reserva e o fluido recuperado no secador são os que apresentam menor e maior teor de sólidos, respectivamente. À baixas tensões de cisalhamento pode-se observar que a viscosidade aparente tende a infinito, indicando a presença de tensão crítica. O decréscimo da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação é característico do comportamento pseudoplástico (CHHABRA, 2007).

Na Tabela 4.7 encontra-se a viscosidade aparente (em cP) de cada amostra à taxa de deformação de 2100 s^{-1} . A menor viscosidade aparente encontrada foi de 27,2 cP para o fluido reserva da sonda 3 e a maior foi de 80,7 cP para o fluido recuperado no secador da sonda 4.

O fluido recuperado no secador apresentou maior viscosidade aparente na sonda 4 enquanto as correntes do dessiltador apresentaram maior viscosidade aparente nas sondas 3 e 5. Nas sondas 2, 3 e 5, a viscosidade aparente do *overflow* é a menor entre as correntes do dessiltador. Na sonda 2, a viscosidade aparente da alimentação do dessiltador se aproxima à do *underflow*, enquanto que nas sondas 2 e 3 a viscosidade aparente dessa corrente assemelha-se à do *overflow*. Em todos os casos a variação da viscosidade aparente com a taxa de deformação está condizente com os reogramas discutidos anteriormente.

Tabela 4.7 - Viscosidade aparente (em cP) do material amostrado à taxa de 2100 s^{-1} .

	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 4	Sonda 5
Fluido reserva	NA	NA	27,2	46,3	NA
Fluido puro	NA	NA	60,7	46,9	NA
Entrada das peneiras	44,8	NA	NA	NA	NA
Fluido recuperado no <i>Mud Cleaner</i>	42,7	NA	NA	NA	NA
Alimentação do dessiltador	NA	55,8	66,0	NA	63,85
<i>Overflow</i> do dessiltador	NA	51,7	65,9	NA	63,57
<i>Underflow</i> do dessiltador	NA	54,7	72,2	NA	73,54
Fluido recuperado no secador	NA	78,1	74,9	80,7	NA

NA = não amostrado

4.3.4 Tixotropia

As lamas de perfuração são classificadas como fluidos dependentes do tempo, isto é, as propriedades das curvas de fluxo não dependem somente da taxa de deformação, mas também do tempo de cisalhamento. Isso ocorre porque com o decorrer do tempo de

cisalhamento as estruturas internas do fluido (estrutura gel) vão sendo quebradas alterando assim sua viscosidade aparente (CHHABRA, 2007).

O comportamento tixotrópico dos fluido de perfuração tem grande importância, uma vez que a estrutura gel formada quando o fluido entra em repouso (por exemplo em uma parada de operação) é responsável por inibir a decantação dos sólidos de perfuração, mantendo assim, mesmo quando em repouso uma concentração equilibrada de cascalho em todo o espaço anular. Ao mesmo tempo, quando a operação retorna, essa estrutura interna é facilmente quebrada e o fluido de perfuração volta a escoar com viscosidade menor. Desta forma, a tixotropia é fundamental para garantir o bom desempenho de um fluido de perfuração. A partir da Figura 4.4 pode-se observar como a viscosidade diminui com o tempo de cisalhamento – característica de um fluido tixotrópico (CHHABRA; RICHARDSON, 1999).

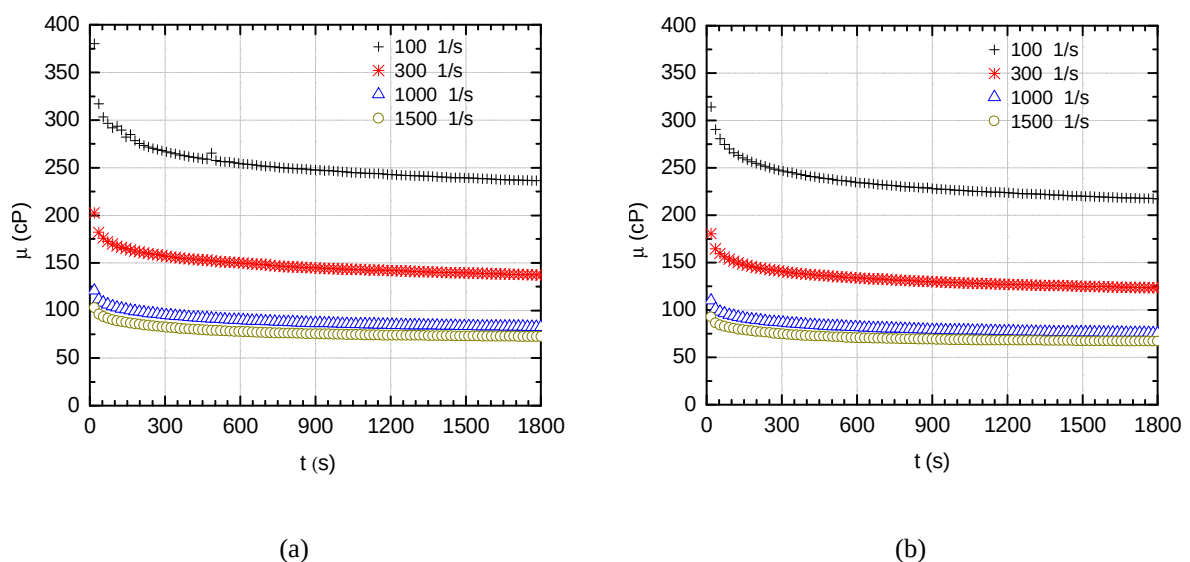


Figura 4.4 - Variação da viscosidade aparente do fluido de perfuração com o tempo de cisalhamento: *underflow* (a) e *overflow* (b) do dessiltador da sonda 3.

Nota-se que a maior variação da viscosidade ocorre até um tempo de cisalhamento de aproximadamente 600 segundos e também para taxas de deformação menores, isto é, quanto menor a taxa de deformação aplicada maior será a variação da viscosidade aparente e maior será o tempo necessário para atingir um patamar onde a viscosidade aparente seja constante (estado estacionário).

Quando a curva de escoamento de fluidos tixotrópicos é determinada em um experimento onde a taxa de deformação varia constantemente de zero até um valor máximo e instantaneamente decresce desse ponto até zero, uma histerese é obtida (CHHABRA;

RICHARDSON, 1999). Esse comportamento das lamas de perfuração pode ser observado nas Figuras 4.5 a 4.7 pelas curvas sem a quebra da estrutura gel do material (sem cisalhamento), tal comportamento representa o fluido em uma parada de operação. A histerese pode ser eliminada submetendo o fluido a um cisalhamento prévio, quebrando assim, a estrutura gel do material antes de cada ensaio de rampa, comportamento que representa o fluido em uma retomada de bomba, ou seja, em circulação. Neste caso, como também pode ser visto nas Figura 4.5 a 4.7, as curvas de fluxo crescente e decrescente praticamente se igualam.

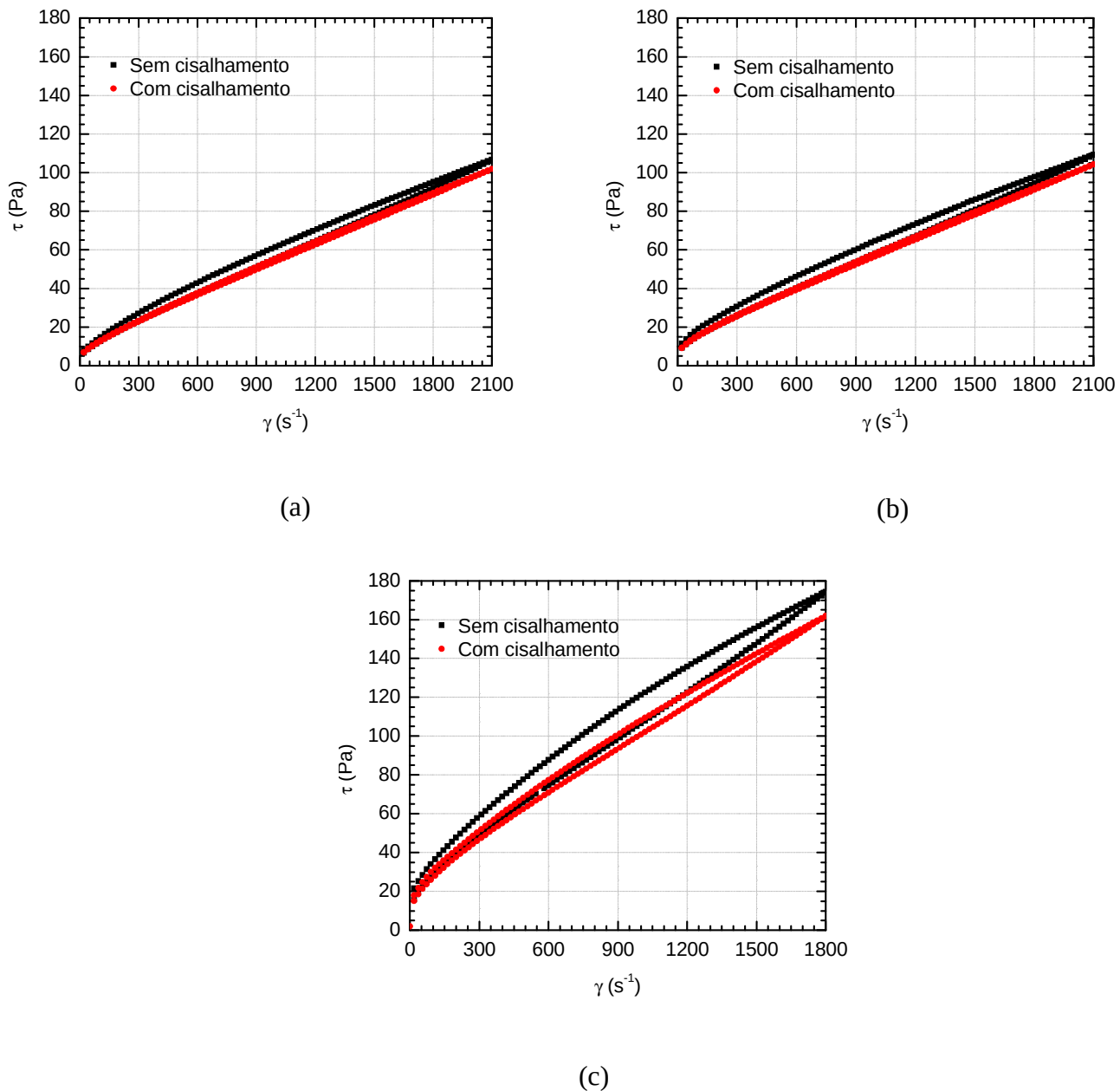


Figura 4.5 - Curva de fluxo do fluido de perfuração com e sem a quebra da estrutura gel das correntes da sonda 4: fluido reserva (a), fluido puro (b) e fluido recuperado no secador (c).

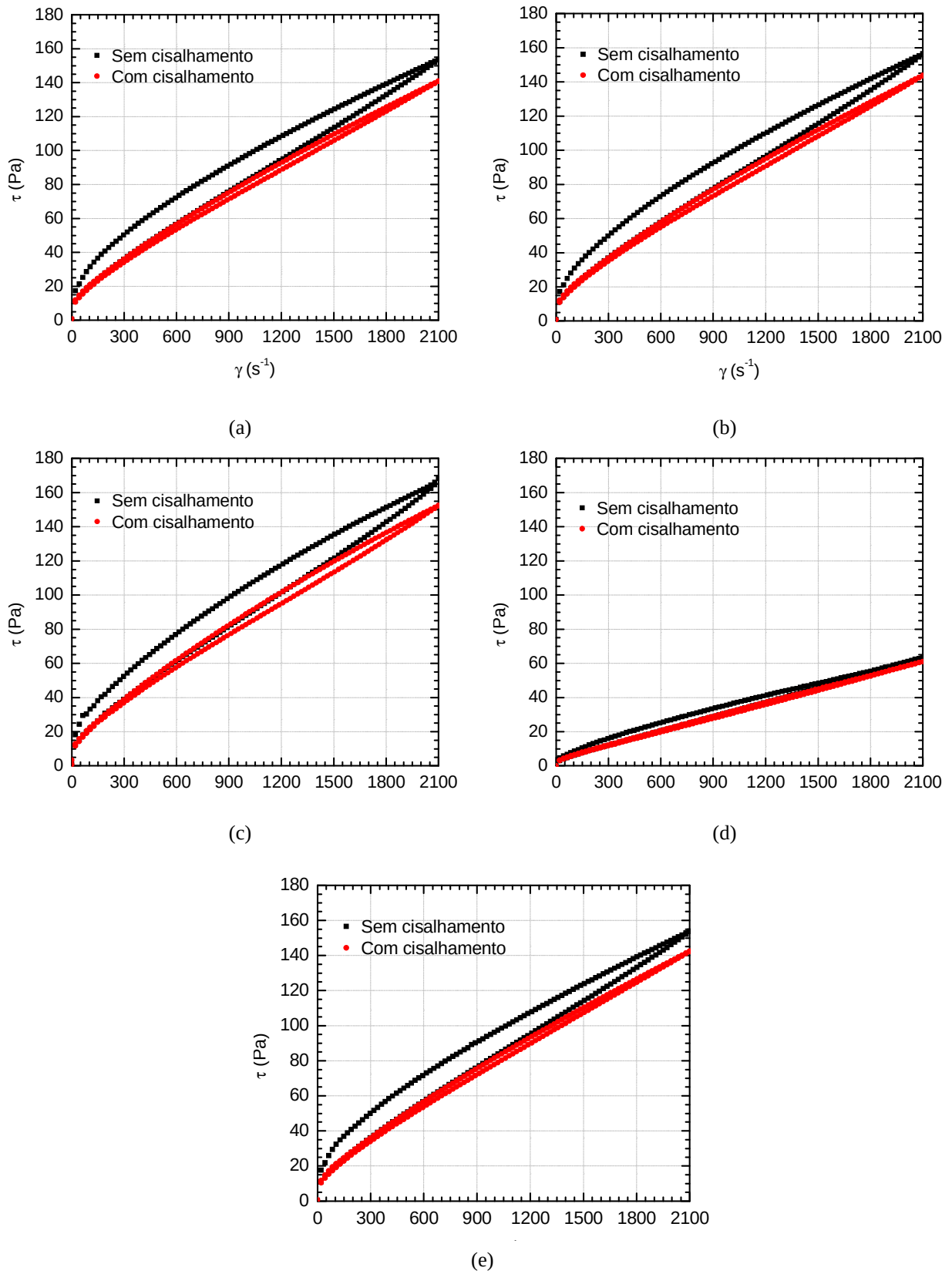


Figura 4.6 - Curva de fluxo do fluido de perfuração com e sem a quebra da estrutura gel das correntes da sonda 3: alimentação (a), *overflow* (b) e *underflow* (c) do dessiltador, fluido reserva (d) e fluido puro (e).

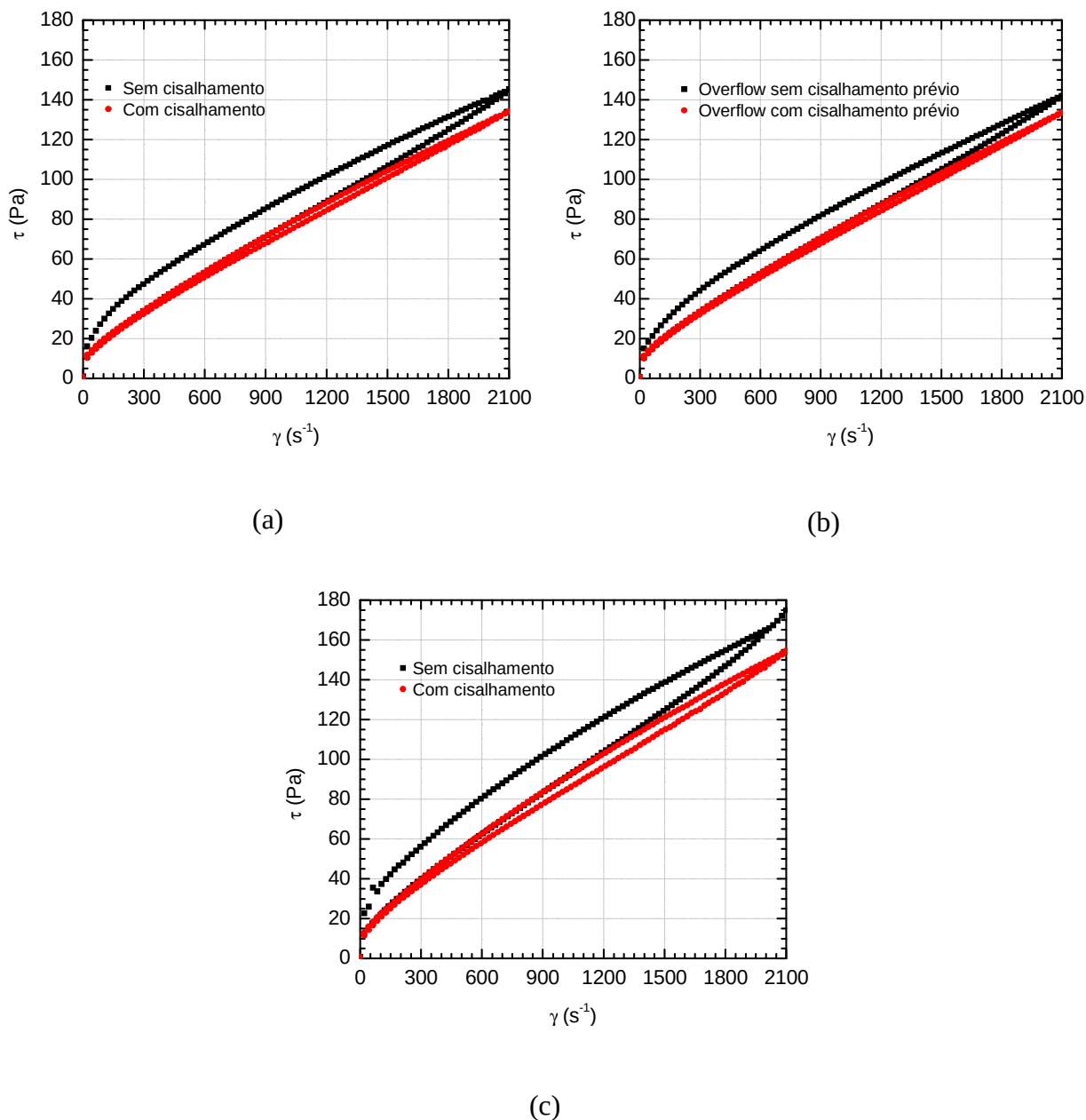


Figura 4.7 - Curva de fluxo do fluido de perfuração com e sem a quebra da estrutura gel das correntes da sonda 5: Alimentação (a), *overflow* (b) e *underflow* (c) do dessiltador.

A tixotropia é quantificada pela área entre a curva de fluxo crescente e decrescente dentro de um intervalo de taxa de deformação e é dependente do tempo de duração da análise, da velocidade de aumento/decrécimo da taxa de deformação e da cinemática da amostra (CHHABRA; RICHARDSON, 1999). A Tabela 4.8 mostra os valores de tixotropia obtidos nos ensaios de rampa descritos. As maiores tixotropias foram encontradas no fluido recuperado no secador e as três correntes do dessiltador apresentaram tixotropias semelhantes.

Tabela 4.8 - Tixotropia (em Pa/s) do material amostrado nas sondas 3 e 4.

	Sonda 3	Sonda 4
Fluido reserva	16229	6542
Fluido puro	5663	8134
Fluido recuperado no secador	23807	36993
<i>Underflow</i> do dessiltador	19767	NA
<i>Overflow</i> do dessiltador	19540	NA
Alimentação do dessiltador	18978	NA

NA: não amostrado

Os resultados dos ensaios que levam em conta o tempo de descanso da amostra, aplicados ao fluido puro, alimentação e *overflow* do dessiltador da sonda 3, revelam que quanto maior o tempo de descanso maior a tensão inicial alcançada e que para tempos de descanso superiores a um minuto (60s), essa tensão praticamente não é alterada. Tal fato indica que dentro de aproximadamente um minuto as estruturas internas do fluido de perfuração (estrutura gel) já voltaram ao seu estado inicial. A Figura 4.8 ilustra esse comportamento.

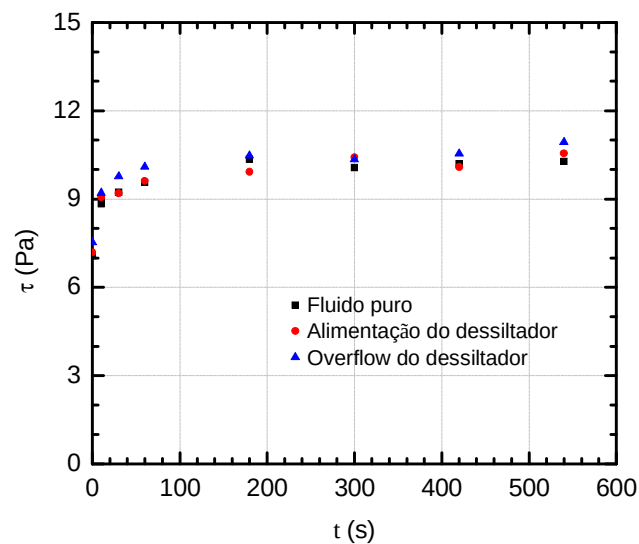
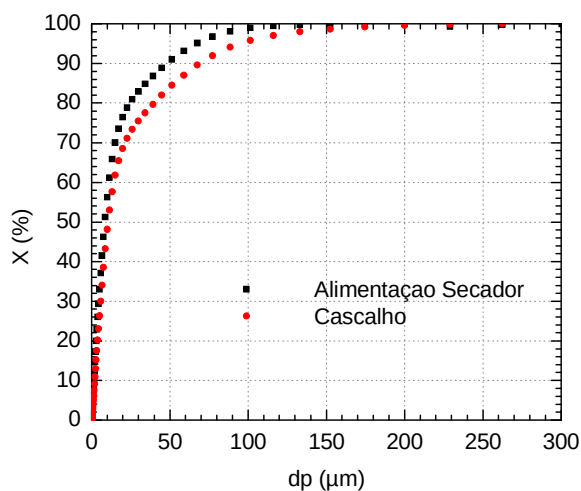


Figura 4.8 - Tensão inicial versus tempo de repouso.

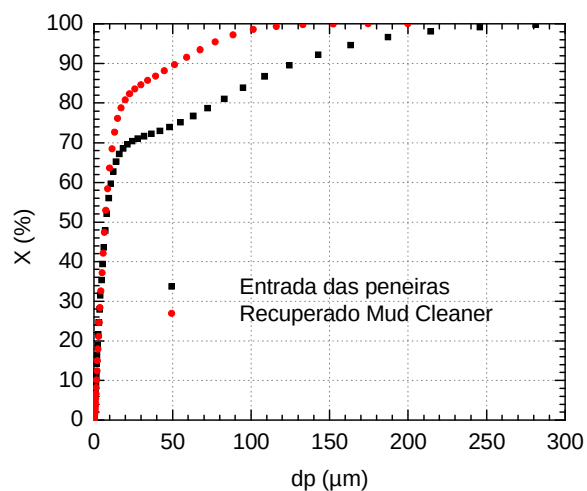
4.4 Granulometria dos sólidos de perfuração

4.4.1 Distribuição granulométrica na forma acumulativa

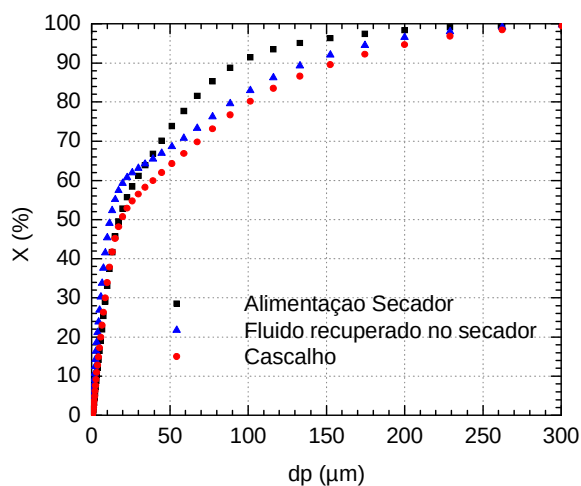
A Figura 4.9 mostra a distribuição acumulativa de tamanho dos sólidos presentes nas lamelas de perfuração coletadas nas sondas 1, 2 e 5.



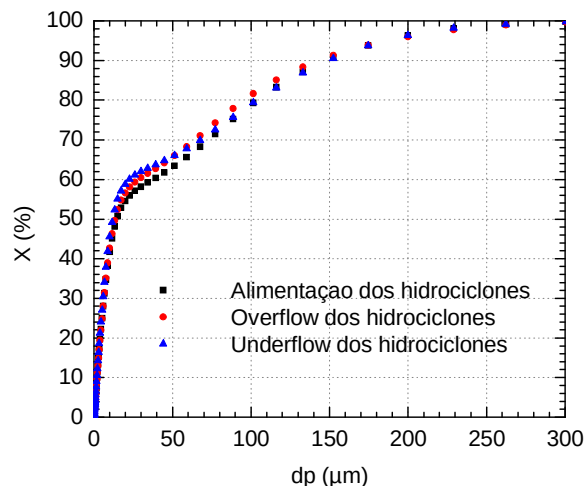
(a)



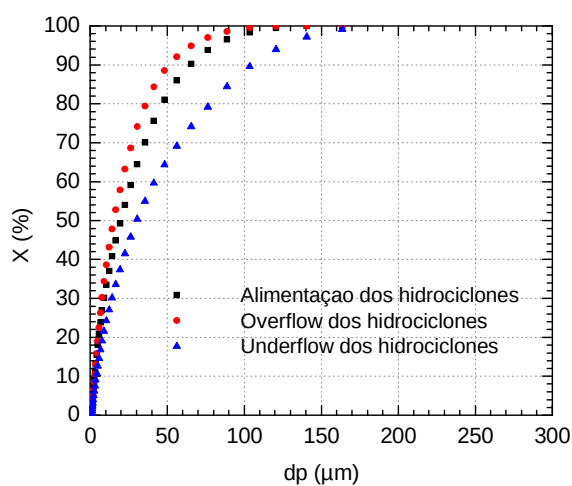
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.9 - Distribuição granulométrica acumulativa: secador de cascalho sonda 1 (a), saída do poço e fluido recuperado no *Mud Cleaner* sonda 1 (b), secador de cascalho sonda 2 (c), dessiltador sonda 2 (d) e dessiltador sonda 5 (e).

A partir da Figura 4.9 (b), nota-se que os sólidos na entrada das primárias apresentaram granulometria maior que os sólidos no fluido recuperado no *Mud Cleaner*. Enquanto 90% das partículas na alimentação das peneiras possuem diâmetro inferior a aproximadamente 135 μm a mesma porcentagem de partículas no recuperado do *Mud Cleaner* possui diâmetro inferior a 50 μm . Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, na entrada das peneiras tem-se o fluido que retorna do poço e, portanto, sólidos de perfuração de diversos tamanhos. Por outro lado, o fluido recuperado no *Mud Cleaner* é a lama que passou por todo o sistema de controle de sólidos e será novamente utilizada na perfuração, ou seja, nesse ponto os sólidos grossos foram removidos.

Nas sondas 1 e 2, entre as correntes do secador, o cascalho seco foi a corrente que apresentou sólidos com maiores diâmetros. Na sonda 1, a alimentação do secador possui 90% das partículas com diâmetro inferior a 45 μm , enquanto que na mesma sonda a corrente de cascalho possui 90% das partículas com diâmetro inferior a aproximadamente 70 μm . O mesmo comportamento ocorre na sonda 2, a alimentação do secador nesta sonda possui 80% das partículas com diâmetro inferior a aproximadamente 60 μm , enquanto que a corrente de cascalho apresenta 80% dos sólidos com diâmetro inferior a 100 μm . Esse comportamento é esperado uma vez que grande parte das partículas finas presentes na alimentação atravessam a tela de filtração do secador de cascalho e são então coletadas juntamente com o fluido recuperado, ou seja o cascalho seco tem menos partículas finas que a alimentação.

Além disso, os sólidos nas correntes do secador de cascalho da sonda 1 são mais finos que os sólidos da sonda 2. Por exemplo, as partículas com *undersize* entre 70 e 90% na primeira sonda estão entre 15 e 50 μm , na alimentação do secador, e 20 e 70 μm , no cascalho seco. Na sonda 2, para o mesmo intervalo de *undersize*, os sólidos possuem diâmetros entre 45 e 90 μm e 70 e 150 μm , na alimentação do secador e no cascalho seco, respectivamente. É provável que essa diferença seja resultado das formações rochosas, do tipo de broca de perfuração e das diferentes condições de operação destas sondas no momento em que a coleta de amostras foi realizada.

No fluido recuperado no secador, além dos sólidos de perfuração, é possível também encontrar certo teor de aditivos, como por exemplo a baritina. A distribuição acumulativa de tamanho das partículas dessa corrente sofre uma pequena inflexão entre 30 e 40 μm , é provável que este seja um ponto de divisão entre a distribuição de tamanho dos aditivos e dos sólidos provenientes da perfuração. Até diâmetros de aproximadamente 30 μm , estas partículas são um pouco mais finas que as da alimentação do secador, a partir deste ponto os sólidos da corrente de fluido recuperado apresentam comportamento entre os da alimentação e

do resíduo do secador. É possível que a presença dos aditivos seja nítida na corrente de fluido recuperado e não percebida na alimentação do secador, pelo fato da concentração desses aditivos ser maior no fluido recuperado que na alimentação.

As distribuições granulométricas dos sólidos das três correntes do dessiltador da sonda 2 apresentam comportamento inesperado: distribuição acumulativa de tamanho praticamente igual entre a alimentação, o *overflow* e o *underflow* do dessiltador. Esse fato é incomum para sólidos de um hidrociclone, uma vez que indica uma separação ineficiente. Uma pequena inclinação na curva de distribuição acumulativa dessas correntes ocorreu próximo a diâmetros de 40 μm , indicando que, assim como no fluido recuperado no secador, é provável que haja, no fluido processado no dessiltador, a presença de dois tipos de sólidos diferentes, os aditivos (mais finos) e os sólidos de perfuração (mais grossos).

No caso da sonda 5, o comportamento observado do tamanho de partículas nas correntes do dessiltador corresponde ao esperado, sendo a corrente do *overflow* com sólidos finos, a do *overflow* com sólidos grossos e a alimentação com sólidos intermediários entre os das outras duas correntes. Além disso, as partículas encontradas no dessiltador desta sonda são no geral mais finas que as partículas do dessiltador da sonda 2.

4.4.2 Ajuste dos dados segundo modelos de distribuição granulométrica acumulativa

A partir da Figura 4.10, que exemplifica o ajuste dos dados experimentais segundo os modelos de distribuição granulométrica RRB, Sigmóide e GGS. Observa-se um melhor ajuste dos dados da sonda 5 em relação à sonda 2.

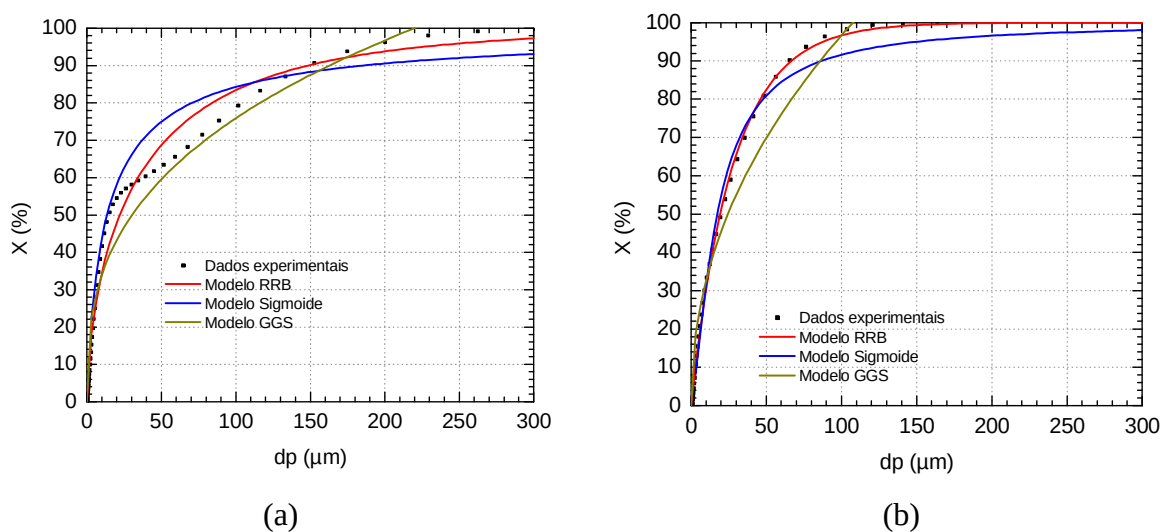


Figura 4.10 - Gráficos dos modelos de distribuição granulométrica em comparação com os dados experimentais da alimentação do dessiltador da sonda 2 (a) e da sonda 5 (b).

Os dados de distribuição granulométrica acumulativa dos sólidos das correntes de lama de perfuração das sondas 1, 2 e 5 foram ajustados segundo os modelos de Rosin-Rammler-Bennet (RRB), Sigmóide e Gates-Gaudim-Schumann (GGS), já descritos anteriormente. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.9 a 4.11. No apêndice B têm-se os gráficos de distribuição dos resíduos para tais ajustes.

Com base no quadrado do coeficiente de correlação, o modelo que melhor ajusta os dados de granulometria das sondas 1 e 2 é o modelo Sigmóide, já na sonda 5 o modelo RRB ajusta melhor a distribuição granulométrica acumulativa das partículas. Em todas as três sondas, o modelo GGS foi o que forneceu os piores ajustes.

Tabela 4.9 - Resultados do ajuste dos dados aos modelos de distribuição granulométrica acumulativa para os sólidos das correntes de lama de perfuração da sonda 1.

Sonda1		Entrada das peneiras	Fluido recuperado no <i>Mud Cleaner</i>	Alimentação do secador	Cascalho na saída do secador
RRB	n	0,62	0,99	0,94	0,88
	DP_n	0,03	0,04	0,02	0,03
	$d_{63,2}$	20,97	11,69	13,92	19,21
	$DP_{d63,2}$	1,30	0,40	0,32	0,57
	r^2	0,9842	0,9936	0,9975	0,9957
Sigmóide	n	0,93	1,42	1,37	1,28
	DP_n	0,03	0,03	0,01	0,02
	d_{50}	9,71	7,36	8,49	11,25
	DP_{d50}	0,39	0,11	0,07	0,14
	r^2	0,9928	0,9988	0,9997	0,9992
GGS	n	0,29	0,33	0,29	0,35
	DP_n	0,02	0,03	0,02	0,02
	d_{100}	195,52	97,99	154,84	135,19
	DP_{d100}	21,83	11,52	19,00	13,29
	r^2	0,9423	0,9232	0,9195	0,9425

Tabela 4.10 - Resultados do ajuste dos dados aos modelos de distribuição granulométrica acumulativa para os sólidos das correntes de lama de perfuração da sonda 2.

Sonda 2		Hidrociclones			Secador		
		Alimentação	Overflow	Underflow	Alimentação	Fluido	Cascalho
RRB	n	0,63	0,64	0,62	0,86	0,64	0,72
	DP_n	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
	$d_{63,2}$	39,50	36,15	34,94	32,96	32,13	43,92
	$DP_{d63,2}$	1,80	1,63	1,88	0,87	1,48	1,77
	r^2	0,9908	0,9910	0,9875	0,9964	0,9910	0,9924
Sigmóide	n	0,89	0,93	0,89	1,25	0,94	1,04
	DP_n	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	d_{50}	13,56	17,24	11,93	19,02	15,24	22,59
	DP_{d50}	1,27	0,62	1,12	0,36	0,52	0,72
	r^2	0,9923	0,9939	0,9917	0,9980	0,9946	0,9948
GGS	n	0,35	0,35	0,34	0,37	0,33	0,37
	DP_n	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	d_{100}	220,93	213,58	216,15	191,60	223,06	240,59
	DP_{d100}	15,89	16,66	18,08	17,23	19,27	18,89
	r^2	0,9710	0,9661	0,9631	0,9488	0,9602	0,9627

Tabela 4.11 - Resultados do ajuste dos dados aos modelos de distribuição granulométrica acumulativa para os sólidos das correntes de lama de perfuração da sonda 5.

Sonda 5		Hidrociclones		
		Alimentação	Overflow	Underflow
RRB	n	0,97	1,0451	0,93
	DP_n	0,01	0,0167	0,01
	$d_{63,2}$	28,24	22,25	44,69
	$DP_{d63,2}$	0,35	0,28	0,55
	r^2	0,9992	0,9991	0,9991
Sigmóide	n	1,37	1,50	1,30
	DP_n	0,05	0,04	0,04
	d_{50}	17,44	14,20	27,19
	DP_{d50}	0,47	0,27	0,77
	r^2	0,9959	0,9980	0,9952
GGS	n	0,47	0,44	0,52
	DP_n	0,03	0,03	0,02
	d_{100}	107,40	98,57	142,24
	DP_{d100}	6,94	8,29	6,58
	r^2	0,9698	0,9523	0,9836

Nas sondas 1 e 2, entre as correntes do secador de cascalho, os parâmetros $d_{63,2}$ e d_{50} apresentaram maior valor para o cascalho, confirmando o fato desta corrente ser a que possui partículas de maior diâmetro. O comportamento pouco comum das correntes dos hidrociclones da sonda 2 pode ser observado pelos resultados obtidos no ajuste dos dados segundo os modelos RRB e Sigmóide. Os valores dos parâmetros $d_{63,2}$ e d_{50} para essas três correntes estão relativamente próximos, sendo que o $d_{63,2}$ é maior para a alimentação dos hidrociclones e o d_{50} é maior para o *overflow*, indicando que essas curvas de distribuição acumulativa se cruzam entre *undersize* de 63 e 50%, esse comportamento também pode ser observado na Figura 4.9 (d).

4.4.3 Distribuição granulométrica na forma de frequência

A Figura 4.11 mostra a distribuição granulométrica de frequência dos sólidos de perfuração das correntes de lama de perfuração avaliadas. A presença majoritária de pelo menos dois diâmetros médios de sólidos indica que, provavelmente, durante o processo de perfuração, dois grupos distintos de partículas são gerados pela ação da broca.

As distribuições granulométricas de frequência dos sólidos das correntes do secador das sondas 1 e 2 confirmam que as partículas da sonda 1 são mais finas que as da sonda 2. Em ambos os casos, observa-se a ocorrência de dois diâmetros médios (próximo a 10 e 100 μm), no entanto, na sonda 1 a porcentagem de partículas com diâmetro médio de 10 μm é maior em relação à sonda 2, na qual a porcentagem de sólidos com diâmetro médio próximo a 100 μm é maior em relação à sonda 1. Todas as correntes das sondas 1 e 2 apresentaram distribuição bimodal, ou seja, há sempre pelo menos dois diâmetros médios distintos: um próximo a 10 μm e outro próximo a 100 μm . Em alguns casos, como na entrada das peneiras da sonda 1 e fluido recuperado no secador e sólidos nas correntes do dessiltador da sonda 2, ocorre uma pequena tendência a um terceiro diâmetro médio em torno de 0,4 μm , o qual provavelmente representaria a fração de aditivos no fluido de perfuração.

Os sólidos processados no dessiltador da sonda 5 apresentaram um único diâmetro médio, sendo o do *overflow* próximo a 20 μm , o da alimentação próximo a 30 μm e o do *underflow* próximo a 100 μm . Esse resultado está condizente com a distribuição granulométrica apresentada na Figura 4.9 (e).

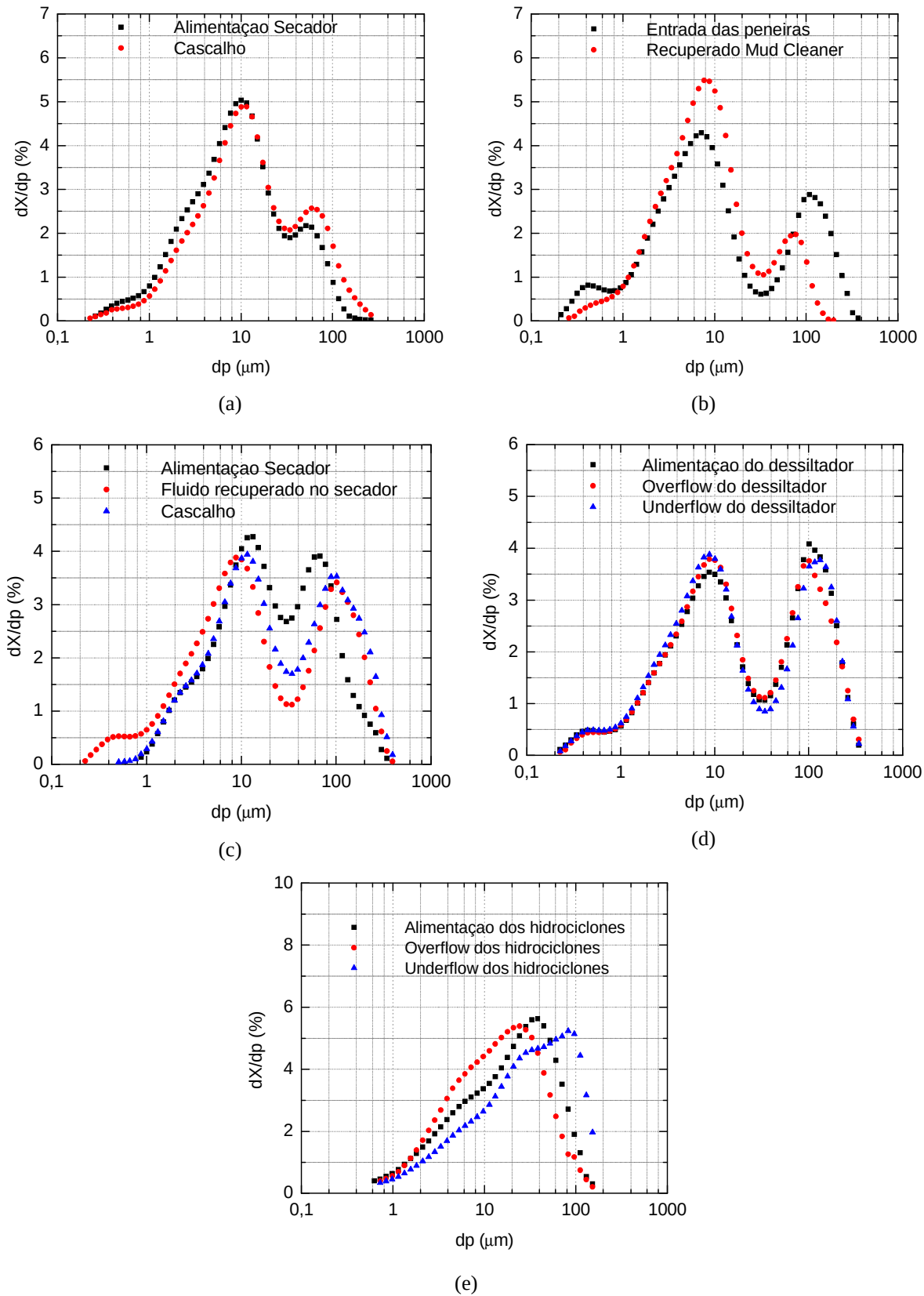


Figura 4.11 - Distribuição granulométrica de frequência: secador de cascalho sonda 1 (a), fluido que retorna do poço e fluido recuperado no *Mud Cleaner* sonda 1 (b), secador de cascalho sonda 2 (c), dessoradores sonda 2 (d) e dessoradores sonda 5 (e).

CAPITULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O objetivo de investigar a estrutura e o funcionamento da centrífuga filtrante comumente chamada de secador de cascalho foi alcançado, uma vez que este equipamento está descrito de forma clara e abrangente no presente trabalho. Da mesma maneira, o objetivo de caracterização dos sólidos e da lama de perfuração foi atingido e informações essenciais ao estudo e otimização do controle de sólidos em sondas de perfuração de petróleo e gás estão disponíveis nessa dissertação.

Os ensaios de picnometria a gás mostraram que a massa específica média dos sólidos de perfuração é de $2,6 \text{ g/cm}^3$, valores compatíveis com a literatura. Além disso, esses ensaios mostram que a massa específica dos sólidos é a mesma em todas as correntes de lama de perfuração amostradas e em todas as cinco sondas onde estas foram coletadas. Esse fato permite concluir que a massa específica das partículas não influencia na separação sólido-sólido que se dá nos equipamentos do sistema de controle de sólidos, juntamente com a separação sólido-fluido, e nesse caso, essa propriedade tem considerável influência.

Com base nos resultados de concentrações descritos nesta dissertação, pode-se afirmar que o secador de cascalho é capaz de reduzir em mais de 80% o teor de fluido no cascalho de perfuração processado nesse equipamento, sendo este de considerável importância no descarte de resíduos dentro de padrões legais. A partir dos dados de concentração de sólidos, reologia e granulometria das partículas das correntes dos hidrociclones (dessiltadores) nas sondas de perfuração, conclui-se que esses equipamentos trabalham por vezes com baixa eficiência e eficácia.

As análises do comportamento reológico das lamas de perfuração base n-parafina permitem afirmar que esse tipo de fluido é não newtoniano, pseudoplástico, viscoplástico e tixotrópico. Não-newtoniano, pois a relação entre tensão cisalhante e taxa de deformação é não-linear; pseudoplástico, pois a viscosidade varia de maneira decrescente com o aumento da taxa de deformação; viscoplástico devido à presença de tensão crítica ao escoamento e finalmente tixotrópico por sua estrutura interna que leva a uma diminuição da viscosidade com o tempo de cisalhamento para taxas de deformação constantes. Dos ensaios de reologia, pode-se observar também que a concentração de sólidos tem considerável influência no

comportamento reológico do fluido, fato que justifica a constante preocupação em manter a concentração de sólidos no interior do poço dentro de faixas aceitáveis no processo de perfuração de poços de petróleo e gás.

Dos ajustes das curvas de tensão cisalhante em função da taxa de deformação segundo modelos reológicos, conclui-se que o modelo que melhor representa as curvas de fluxo das lamas de perfuração analisadas, nas condições descritas é o modelo de três parâmetros Herschel-Bulkley.

A análise granulométrica permite afirmar que os diâmetros dos sólidos de perfuração variam de 0,2 a 300 microns e que esse conjunto de partículas possui, no geral, dois diâmetros médios - aproximadamente 10 e 100 microns. Além disso, é possível inferir a presença de aditivos de perfuração, principalmente nas correntes do dessiltador. Os resultados de granulometria dos sólidos também permitem confirmar que em alguns casos, como na sonda 2, os dessiltadores operam de maneira ineficiente. Por fim, da análise da granulometria dos sólidos de perfuração em sondas diferentes, pode-se confirmar o fato de que as condições de operação da sonda influenciam no tamanho das partículas geradas na perfuração do poço.

5.2 Sugestões

Como sugestões para continuação deste trabalho ficam propostas:

1. Composição química e mineralógica dos cascalhos:
 - Análise química e mineralógica de todos os sólidos de perfuração amostrados, as quais permitiriam a verificação do índice de refração utilizado nas análises de granulometria pela técnica de difração de raio laser e também confirmaria a presença ou não de aditivos de perfuração nas diversas correntes de lama amostradas.
2. Hidrociclonagem:
 - Cálculo de hidrociclones das famílias Bradley e Rietema nas condições de operação descritas neste trabalho e encontradas em sondas de perfuração de petróleo e gás, a fim de melhor investigar o desempenho dos dessiltadores.
3. Secador de cascalhos:
 - Execução de um planejamento experimental na Central de Tratamento de cascalhos (CTC) da PETROBRAS, em Carmópolis-SE, onde os sólidos de perfuração de diversas sondas que não possuem secador de cascalho são recebidos e processados nesse tipo de equipamento. Esse planejamento

experimental teria como variável observada o teor de fluido no cascalho seco, e seriam manipuladas as três variáveis de operação do secador de cascalho: vazão de alimentação, altura do cone e abertura da tela.

- Simulação numérica em CFD do secador de cascalho e validação da mesma com base nos resultados experimentais que seriam obtidos na CTC.
- Implementação de uma unidade piloto de secagem de cascalho de perfuração por microondas e estudo da viabilidade técnica-econômica do uso industrial dessa técnica alternativa de secagem.

