

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CAROLINE ALVES NOGUEIRA

**EFEITO DA MATÉRIA-PRIMA NA REOLOGIA E VISCOSIDADE DA PASTA
DE DETERGENTE**

SÃO CARLOS

2020

CAROLINE ALVES NOGUEIRA

**EFEITO DA MATÉRIA-PRIMA NA REOLOGIA E VISCOSIDADE DA PASTA
DE DETERGENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Paula Ferreira Palhares

SÃO CARLOS

2020

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 14 de dezembro de 2020 perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Paula Ferreira Palhares, DEQ/UFSCar.

Orientador: Vicenti Almeida Dalmazzo, UNILEVER.

Convidada: Profa. Dra. Rosineide Gomes da Silva Cruz, DEQ/UFSCar.

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Paulo Waldir Tardioli, DEQ/UFSCar.

“A ciência pode nos divertir e fascinar, mas é a engenharia que muda o mundo.”

Isaac Asimov

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo o estudo da reologia, viscosidade e custo do detergente em pó frente a troca de uma matéria-prima. A construção do perfil reológico teve como finalidade a verificação da compatibilidade da nova fórmula aos equipamentos já existentes na planta, pois não existe interesse em gastos com aquisição de bombas e outros utensílios importantes para o deslocamento da mistura de detergente para a torre de secagem. Investigou-se se a nova matéria-prima permite uma redução de viscosidade, viabilizando a diminuição de água na fórmula e possibilitando a economia de gás de secagem. Já a análise de custo foi realizada para verificar se a troca da matéria-prima seria realizável financeiramente. Para as medidas de viscosidade utilizou-se um viscosímetro rotativo, mantendo-se a temperatura constante assim como velocidade de rotação. Foi verificada uma redução de viscosidade significativa apenas para a matéria-prima 1 (decorrente de uma redução de água na fórmula de até 7 %) e não significativa para a matéria-prima 2, a qual foi considerada inadequada para continuar no projeto. Após essa verificação, a amostra atual contendo teor de água padrão assim como a amostra contendo a matéria-prima 1, porém, contendo teor de água 7% abaixo da padrão, foram submetidas a uma análise em um reômetro capilar, onde, foi gerada uma curva reológica para cada amostra. Constatou-se que ambas apresentaram comportamento semelhante quanto reologia e viscosidade, sendo assim, a matéria-prima 1 foi considerada adequada para substituição da matéria-prima atual. Já o custo de fórmula foi calculado a partir dos preços, da pureza e porcentagem de dosagem dos ingredientes, e o custo de gás de secagem foi calculado através dos dados de processo existentes para a umidade padrão. Utilizando-se a proporção de gás de secagem utilizada para secar a pasta a partir dos dados de processo, chegou-se ao valor estimado de gás para a nova umidade. A partir desses cálculos, foi estimada uma economia de aproximadamente 10 % em relação aos valores atuais de fórmula e de gás de secagem. Portanto, o presente estudo proporciona embasamento para que o projeto de troca de matéria-prima siga para as fases de implementação.

Palavras-chave: Reologia. Viscosidade. Economia de gás. Perfil reológico. Análise de custo.

ABSTRACT

The present work aimed to study the rheology, viscosity and cost of powder detergent when changing a raw material. The construction of the rheological profile was aimed at verifying the compatibility of the new formula with the equipment already existing at the plant, as there is no interest in spending on the acquisition of pumps and other important tools to move the detergent mixture to the drying tower. It was investigated whether the new raw material allows a reduction in viscosity, enabling the reduction of water in the formula and enabling the saving of drying gas. The cost analysis was performed to verify if the exchange of the raw material would be financially feasible. For the viscosity measurements, a rotary viscometer was used, keeping the temperature constant as well as the rotation speed. A significant viscosity reduction was verified only for raw material 1 (due to a water reduction in the formula of up to 7%) and not significant for raw material 2, which was considered inadequate to continue in the project. After this verification, the current sample containing standard water content as well as the sample containing raw material 1, however, containing water content 7% below the standard, were subjected to an analysis on a capillary rheometer, where, a rheological curve for each sample. It was found that both showed similar behavior in terms of rheology and viscosity, therefore, raw material 1 was considered adequate to replace the current raw material. The formula cost was calculated based on the prices, purity and percentage of dosage of the ingredients, and the drying gas cost was calculated using the existing process data for the standard humidity. Using the proportion of drying gas used to dry the paste from the process data, the estimated gas value for the new humidity was reached. From these calculations, savings of approximately 10% were estimated in relation to the current values of formula and drying gas. Therefore, the present study provides the basis for the raw material exchange project to proceed to the implementation phases.

Keywords: Rheology. Viscosity. Gas savings. Rheological profile. Cost analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Fluxograma simplificado da produção de detergente em pó.	6
Figura 2.2.	Representação gráfica da tensão de cisalhamento.	10
Figura 2.3.	Classificação reológica.	13
Figura 2.4.	Curvas reológicas.	15
Figura 2.5.	Bomba helicoidal.	17
Figura 2.6.	Funcionamento de uma bomba de pistão.	18
Figura 3.1.	Reator de mistura.	19
Figura 3.2.	Frascos para homogeneidade.	20
Figura 3.3.	Peneira para teste de aglomerados.	21
Figura 3.4.	Analisador de umidade de halogênio.	22
Figura 3.5.	Representação de um viscosímetro de rotação.	24
Figura 3.6.	Funcionamento de um reômetro capilar.	25
Figura 4.1.	Curva reológica para a fórmula atual com umidade padrão.	33
Figura 4.2.	Curva reológica para fórmula 1 contendo 7% de redução na umidade.	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1.	Descritivo de equipamentos e correntes.	7
Quadro 4.1.	Resultados das observações visuais na etapa de preparação de amostra.	27
Quadro 4.2.	Resultados para homogeneidade.	28
Quadro 4.3.	Resultados para formação de aglomerados.	29
Quadro 4.4.	Resultados para umidade.	30
Quadro 4.5.	Resultados para densidade aparente.	30
Quadro 4.6.	Resultados para viscosidade.	31
Quadro 4.7.	Resultados para viscosidade variando-se a umidade.	32
Quadro 4.8.	Resultados para custo de fórmula.	35
Quadro 4.9.	Varição de custos de gás de secagem.	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos propostos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Detergente em pó	2
2.2. Processo de produção de detergente em pó	4
2.3. Viscosidade	8
2.4. Tensão de cisalhamento	10
2.5. Velocidade de deformação ou cisalhamento	11
2.6. Reologia	11
2.7. Classificação reológica dos fluidos	13
2.8. Bombas	16
2.9. Bombas de deslocamento positivo	16
2.10. Bombas helicoidais	17
2.11. Bomba de pistão	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1. Materiais	19
3.2. Equipamentos	19
3.3. Procedimento experimental	19
3.3.1. Preparação das amostras de detergente em planta piloto	19
3.3.2. Teste de homogeneidade	20
3.3.3. Teste de aglomerados	21
3.3.4. Análise de umidade	22
3.3.5. Densidade aparente	23
3.3.5.1. Procedimento de cálculo	24
3.3.6. Viscosidade	24
3.3.7. Reologia	25
3.3.8. Custo	26
3.3.9. Custo de fórmula	26
3.3.9. Custo de gás	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. Preparação das amostras em planta piloto	27
4.2. Teste de Homogeneidade	28
4.3. Teste de Aglomerados	29
4.4. Análise de umidade	30
4.5. Densidade aparente	31
4.6. Viscosidade	32
4.7. Reologia	33
4.8. Custo	35
4.8.1. Custo de fórmula	35
4.8.2. Custo de gás de secagem	36
5. CONCLUSÃO	37
6. BIBLIOGRAFIA	37

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O detergente em pó está presente na vida de muitas famílias ao redor do mundo, é um produto indispensável para a higienização de roupas e tecidos, portanto, os volumes comercializados são enormes, chegando a cerca de 5 kg per capita em um ano apenas no Brasil (G1, site do G1, 2011).

Esse produto de higiene doméstica tão comum pode se dividir em duas classes principais, os enzimáticos e os não enzimáticos. Os detergentes enzimáticos costumam utilizar não somente a ação dos detergentes propriamente ditos como ferramenta de limpeza, eles contam também com o incremento de enzimas que removem sujeiras específicas através das reações enzimáticas. Apesar de apresentar um poder de limpeza inferior ao enzimático o detergente sem enzimas é o mais utilizado devido ao seu baixo custo.

Sabe-se que para os consumidores o custo é uma variável muito importante, no entanto as empresas se preocupam muito com a qualidade do detergente produzido. Os principais parâmetros considerados pelas indústrias para a garantia dessa qualidade são: fluidez, umidade, granulometria, compressibilidade, cor, odor, empedramento e eficiência na limpeza dos tecidos. Tais parâmetros garantem a qualidade do produto e acabam fazendo diferença no momento da escolha da marca.

A alta qualidade dos detergentes em pó aliada com o grande crescimento populacional e econômico colaboram com o aumento dos números relacionados ao consumo. O mercado global de detergentes lava-roupas movimentou em 2019 cerca de US\$ 64,9 bilhões, registrando queda de 0,7% em relação a 2014, quando as vendas superaram os US\$ 65 bilhões. A estimativa é que, em 2024, as vendas atinjam US\$ 74 bilhões, representando um crescimento de 15,1% no período e 2,9% ao ano até lá. A China lidera o ranking dos países em vendas da categoria, com quase US\$ 10 bilhões, seguida pelos Estados Unidos e Índia. O Brasil ocupa a quinta posição, com vendas que atingiram US\$ 2,6 bilhões (HouseholdInnovation, site do HouseholdInnovation, 2020).

Muito por conta da desvalorização do dólar, o desempenho brasileiro foi o pior dos 10 maiores mercados, com retração de 31%, entre 2014, quando as vendas atingiram US\$ 3,766 bilhões, e 2019. A previsão, entretanto, é que o faturamento apresente crescimento

de 13,3% até 2024, para atingir US\$ 2,9 bilhões, sendo que os melhores desempenhos são esperados para os detergentes líquidos (58,2%) e detergentes líquidos concentrados (37,5%) (HouseholdInnovation, site do HouseholdInnovation, 2020).

A Unilever detém a maior fatia do mercado de lava-roupas no país, sendo que em detergentes concentrados sua participação supera os 65%. Entre as empresas nacionais, a Química Amparo ocupa a segunda posição em detergentes em pó, seguida da JBS-Friboi (HouseholdInnovation, site do HouseholdInnovation, 2020).

Com volumes tão altos qualquer troca de matéria-prima e/ou melhoria de processo traz um retorno financeiro extremamente atrativo para as grandes produtoras. Assim sendo, para essas grandes empresas torna-se um ciclo inevitável a otimização do processo como um todo, assim como a busca quase que incessante por melhores preços e condições de processamento que permitam diminuir gastos de fórmula e energia inerentes à produção. E é nesse contexto que o presente trabalho foi desenvolvido.

1.2. Objetivos propostos

O objetivo desse estudo foi verificar a possibilidade de substituição da matéria-prima utilizada por uma nova, para melhoria do processo como um todo e dos custos de fórmula e de energia. Para isso estudou-se a viscosidade e reologia da nova fórmula em comparação com a fórmula atual, pois existe um interesse da diminuição de água a partir da diminuição da viscosidade da mistura, culminando com a redução de gás de secagem. Como os gastos com novos equipamentos não são interessantes, o estudo do perfil reológico se faz importante, já que é a partir dele que se poderá afirmar que o conjunto de bombas e utensílios importantes para o deslocamento da pasta de detergente do reator de mistura onde acontecem as reações para a torre de secarem, serão adequados no caso da implantação desta mudança.

Para esse estudo foram realizadas análises de viscosidade nas amostras de detergente antes do processo de secagem, com o objetivo de avaliar a redução da viscosidade da fórmula com a nova matéria-prima. Um estudo reológico comparativo foi realizado com o intuito de se verificar a semelhança entre a nova e a atual formulação. Essas serão as duas principais análises a serem discutidas nesse trabalho. Além disso, em paralelo, análises de custo foram realizadas para garantir uma implementação financeiramente segura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica a ser apresentada a seguir reúne informações importantes para a compreensão do processo de produção de detergente em pó e também para entendimento das variáveis a serem analisadas nesse trabalho.

2.1 Detergente em pó

Os detergentes são substâncias inorgânicas ou orgânicas que apresentam a propriedade de reduzir a tensão superficial da água, favorecendo o seu espalhamento e emudecimento das superfícies, promovendo um contato mais íntimo entre a água e o objeto a ser limpo (CASTRO, 2009).

Os tensoativos que são os principais responsáveis por essa redução de tensão são compostos constituídos de uma longa cadeia carbônica, sensivelmente insolúvel em água (hidrofóbica), porém, solúvel em óleos e gorduras, acompanhadas de um maior ou menor grupo de átomos com poderosa atração pela água (CASTRO, 2009).

Nos últimos 30 anos, os detergentes domésticos, dos mais destacados países industriais, experimentaram um rápido desenvolvimento e mudaram de composição consideravelmente. Além dos tensoativos que desempenharam um grande papel neste desenvolvimento, a inclusão de diversos aditivos contribuiu para aumentar desempenho dos detergentes, inclusive de seu poder de branqueamento. Além dos tensoativos, os detergentes podem conter os seguintes aditivos (CASTRO, 2009):

Agentes modificadores de espuma: Embora a espuma não seja indispensável para a comprovação da eficiência de um detergente, muitos produtos têm sua ação aumentada devido à espuma. Além disso, a presença de espuma é muitas vezes tomada como indicação da existência do detergente na água de lavagem. Por isso, um produto bem formulado deve ter uma espuma firme que desapareça juntamente com o detergente na lavagem. Outro ponto importante é relacionado com o uso do detergente em máquinas de lavar: Produtos que formam grande quantidade de espuma podem causar transbordamento ou a necessidade de reduzir a carga, diminuindo a produtividade do equipamento. Neste caso, a formulação deve procurar reduzir a espuma sem afetar a detergência do produto. (CASTRO, 2009).

Agentes coadjuvantes: Os detergentes sintéticos puros não são eficientes para remover sujeira argilosa. Para corrigir este inconveniente, bem como fornecer um pH adequado da

água e anular a presença de íons metálicos (cálcio, ferro, cobre, etc..) adiciona-se certos sais alcalinos como, por exemplo: tripolifosfato de sódio, fosfato trissódico, pirofosfato de sódio, carbonato de sódio. Deve ser considerado que existe uma tendência atual para formulações de detergentes contendo níveis mais baixos de fosfatos, em função dos efeitos adversos causados por esses compostos ao meio ambiente. A substituição completa dos fosfatos por outro componente ainda não foi viabilizada, pois os produtos alternativos testados apresentam custos mais elevados e menor eficiência. (CASTRO, 2009).

Agentes removedores de manchas: Esse tipo de agente pode agir por oxidação, redução ou ação enzimática. Entre esses, o mais empregado em fórmulas específicas com ação alvejante é o percarbonato de sódio, que em solução aquosa se decompõe em peróxido de hidrogênio. Atualmente existe uma tendência da inclusão de diversos tipos de enzimas (proteases, lipases, amilases e celulases) na formulação dos detergentes, para que esses sejam capazes de dissolver manchas mais específicas (CASTRO, 2009).

Agentes de suspensão: São compostos que impedem a reposição da sujeira no tecido ou mesmo evitam que a sujeira removida de uma peça seja transferida para as demais. Isto pode ser alcançado através do uso de estabilizantes coloidais, como por exemplo, os derivados de celulose (sal sódico de carboxi-metil-celulose, hidroetilcelulose, metilcelulose). Em geral, a quantidade desses derivados de celulose na formulação de detergentes depende do grau de polimerização e do grau de substituição da molécula. (CASTRO, 2009).

Silicatos: Conferem aos detergentes melhores propriedades de armazenamento, combatem a corrosão nas máquinas de lavar e mantêm em suspensão as sujeiras de natureza argilosa. Podem ser empregados diversos tipos de silicatos de sódio, contendo diferentes massas de sílica (SiO_2) e óxido de sódio (Na_2O) (CASTRO, 2009).

Agentes modificadores do pó: Incluem-se uma série de agentes específicos que podem ser adicionados a uma formulação para conferir ou melhorar alguma propriedade, por exemplo, é muito comum o uso de corantes com a finalidade de melhorar o aspecto do pó (CASTRO, 2009).

Branqueadores óticos: São substâncias que quando depositadas sobre os tecidos, recebendo radiação de luz ultra violeta (geralmente invisível), emitem luz visível na região azul-violeta. Isto mascara o amarelado dos tecidos, dando mais brilho, pois aumenta a quantidade de luz visível emitida. Os branqueadores óticos são, normalmente, adicionados

em concentrações de 0,1 até 1,0% e o tipo de branqueador depende do tipo de fibra dos tecidos (CASTRO, 2009).

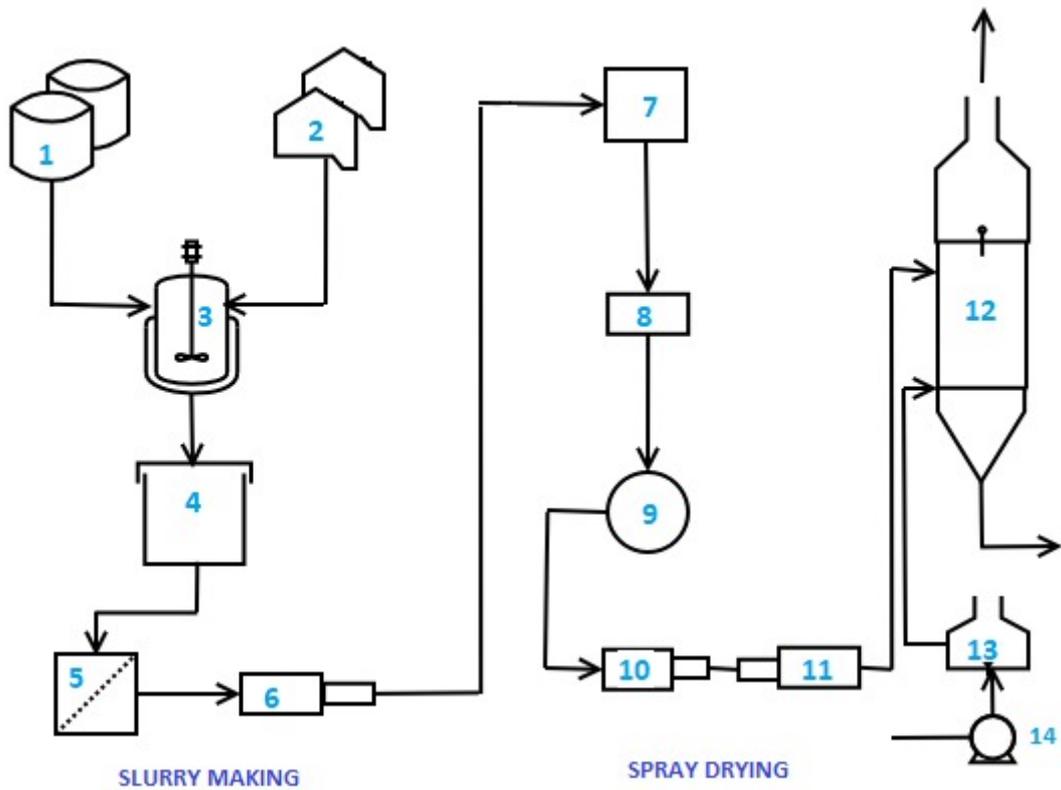
2.2. Processo de produção de detergente em pó

Todos os tipos e níveis de ingredientes usados na formulação de detergentes são escolhidos em função da disponibilidade de matérias-primas, custo, características físico-químicas, finalidade de uso, hábito do consumidor local, legislação e condições de processo. Fica claro então, que as fórmulas podem diferir de local para local, de país para país ou em função de suas aplicações e processamento. Em geral, o processo de fabricação dos detergentes consiste basicamente em duas etapas principais: manufatura do tensoativo seguida da preparação do detergente em pó em torre de secagem (CASTRO, 2009).

Para a preparação do detergente em pó as principais matérias-primas envolvidas são: ácido sulfônico, solução de soda cáustica, solução de tolueno sulfonato de sódio, solução de silicato de sódio, tripolifosfato de sódio, sulfato de sódio, carbonato de sódio, carboximetilcelulose (CMC), branqueador ótico, cloreto de sódio, perfumes e corantes. Entretanto, pode haver variações de acordo com as peculiaridades de cada produto(CASTRO, 2009).

O processo a ser estudado trata-se de uma das principais e mais conhecidas formas de produção de detergente em pó, conhecido como spray-dryer. A seguir é apresentado a partir da Figura 2.1. um fluxograma simplificado desse processo. O Quadro 2.1. apresenta um descritivo de equipamentos.

Figura 2.1. Fluxograma simplificado da produção de detergente em pó.



Fonte: Acervo próprio.

Quadro 2.1. Descritivo de equipamentos.

Equipament o	Descrição	Corrente de entrada	Corrente de saída
1	Tanque de matéria-prima	Matéria-prima líquida	Matéria-prima líquida
2	Silos de matéria-prima	Matéria-prima sólida	Matéria-prima sólida
3	Reator de mistura	Matérias-primas	Pasta de detergente
4	Tanque Pulmão	Pasta de detergente	Pasta de detergente
5	Filtro simples	Pasta de detergente	Pasta de detergente
6	Bomba de transferência helicoidal	Pasta de detergente	Pasta de detergente
7	Desaerador	Pasta de detergente	Pasta de detergente
8	Separador magnético	Pasta de detergente	Pasta de detergente
9	Moinho	Pasta de detergente	Pasta de detergente
10	Bomba helicoidal baixa pressão	Pasta de detergente	Pasta de detergente
11	Bomba de pistão alta pressão	Pasta de detergente	Pasta de detergente
12	Torre spray dryer	Pasta de detergente + ar quente	Detergente em pó + vapor de água + ar
13	Fornalha	Gás natural temperatura ambiente + ar ambiente	Gás natural quente + ar quente
14	Soprador	Ar	Ar

Fonte: Arquivo próprio.

O processo começa com a chegada das matérias-primas líquidas nos tanques e das matérias-primas sólidas nos silos. Em seguida, essas matérias-primas são encaminhadas para o reator de mistura, onde acontecerá a adição programada dos reagentes na quantidade e no tempo determinado. É nesse reator que a pasta de detergente com alto grau de umidade é formada e posteriormente reservada em um tanque pulmão. O tanque pulmão é responsável por dosar essa pasta no fluxo da fábrica para que o processo seja contínuo.

Após as etapas descritas anteriormente a pasta de detergente passa por um filtro simples, onde grumos e pedras são retidas facilitando a passagem pelo desaerador. Após a retirada de ar, a mistura segue para um filtro magnético para retenção de possíveis materiais ferrosos oriundos das estruturas de equipamentos e canos.

A pasta formada pelo detergente tem viscosidade extremamente elevada, e grande facilidade para formar grumos, portanto, é extremamente importante o trabalho do moinho antes do processo de secagem, pois ele desfaz qualquer nódulo de material formado e

prepara o produto para ser pulverizado pelos bicos da torre sem que haja entupimento. Por isso, é necessário todo o processo de separação descrito anteriormente ao moinho, já que, se houver algum material de alta dureza (como metais ou pedras) as pás do moinho podem ser danificadas.

Com a pasta livre de grumos é necessário aumentar a pressão do sistema para que seja possível forçar a passagem desse material pelos bicos presentes na torre, por isso, a utilização de duas bombas em série se faz indispensável. Nessa etapa, o detergente é bombeado até a torre que o pulveriza enquanto uma corrente de ar quente contrária passa pelas gotas, levando consigo grande parte da água presente nela, formando assim o detergente em pó, que sai na parte de baixo da torre e segue para adição de pós dosados e perfume.

2.3. Viscosidade

A viscosidade é a propriedade associada à resistência que o fluido oferece à deformação por cisalhamento. De outra maneira, pode-se dizer que a viscosidade corresponde ao atrito interno nos fluidos devido, basicamente, às interações intermoleculares, sendo, em geral, função da temperatura (LIVI, 2004).

Como dito anteriormente, a viscosidade depende da temperatura, e verificam-se efeitos opostos sobre a viscosidade de gases e de líquidos em função da variação da temperatura. Em geral, nos gases a coesão intermolecular é desprezível, resultando no fato de que a tensão cisalhante entre duas camadas do fluido em escoamento é devida à transferência de momento linear entre essas camadas. No escoamento laminar, o movimento do fluido ocorre em lâminas paralelas. Devido ao movimento molecular caótico resulta transferência de moléculas na direção transversal ao escoamento entre camadas com velocidades diferentes ou seja, ocorre transferência de momento linear entre as camadas, decorrente das colisões intermoleculares. Essa atividade molecular aumenta com o acréscimo de temperatura, de forma que a viscosidade aumenta com a temperatura nos gases. Nos líquidos, as distâncias intermoleculares e a intensidade dos movimentos das moléculas são muito menores que nos gases, de forma que a transferência de momento linear entre as camadas, devido aos movimentos moleculares, pode ser desprezada. Assim, as tensões cisalhantes e a viscosidade dependem principalmente da intensidade das forças de coesão intermolecular que diminuem com o acréscimo de temperatura, de maneira que a viscosidade dos líquidos diminui com o aumento da temperatura. Em várias equações da

mecânica dos fluidos, aparece o quociente entre a viscosidade absoluta ou dinâmica e a massa específica do fluido, sendo conveniente a definição de uma outra propriedade chamada de viscosidade cinemática do fluido, dada por (LIVI,2004):

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (1)$$

Em que:

v = Viscosidade cinemática [m²/s]

η = Viscosidade absoluta ou dinâmica [kg/m.s]

ρ = Massa específica [kg/m³]

A pasta de detergente em pó possui como característica uma viscosidade elevada, e todos os equipamentos utilizados em seu processamento devem ser preparados para isso. Portanto, uma variação muito significativa para a viscosidade pode comprometer o seu bombeamento do reator até a torre, e principalmente, dificultar a passagem da pasta pelos bicos presentes na torre de secagem. Por isso, assegurar que a viscosidade não apresente grandes variações é importante.

No caso desse trabalho, a viscosidade será responsável por definir qual matéria-prima permitirá um abaixamento da viscosidade e conseqüente diminuição do nível de água. Como se sabe, a água possui viscosidade muito menor do que a pasta de detergente, por isso é adicionada na fórmula, para que o processamento seja possível. Então, se houver uma diminuição da viscosidade da fórmula, é possível reduzir a porcentagem de água, o que faz com que se utilize menos gás de secagem.

2.4. Tensão de cisalhamento

A partir da Figura 2.2. pode-se observar a força F necessária para mover a placa superior em relação à área em contato dessa placa com a substância é chamada de tensão de cisalhamento. Para chegar a uma medida específica é necessário dividir a força total necessária para o movimento através da área em contato com a substância, de acordo com a Equação (2) a seguir (ROJAS, BRICEÑO e AVENDAÑO, 2012).

$$\tau = \frac{F [N]}{A [m^2]} \quad (2)$$

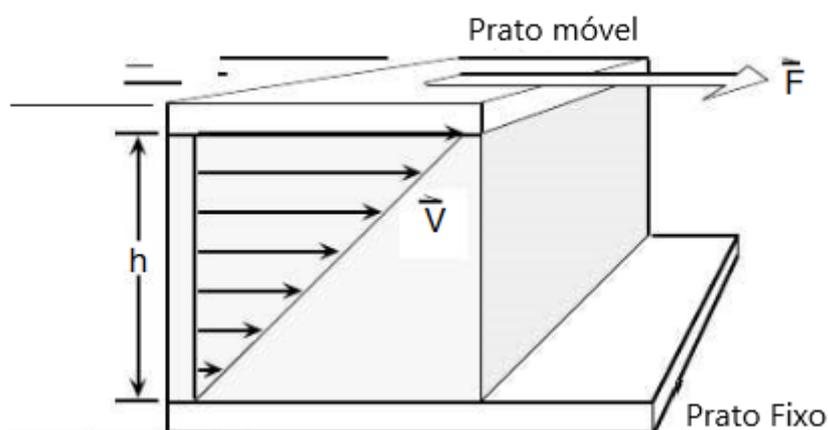
Em que:

τ = Tensão de Cisalhamento [N/m²]

F = Força aplicada [N]

A = Área de contato em relação à força aplicada [m²]

Figura 2.2 Representação gráfica da tensão de cisalhamento.



Fonte: (ROJAS, BRICEÑO e AVENDAÑO, 2012).

A tensão de cisalhamento medida pelo reômetro nos testes realizados nesse trabalho permitirá a construção da curva reológica para cada amostra. O conhecimento dessa grandeza ajuda na compreensão das curvas obtidas.

2.5. Velocidade de deformação ou cisalhamento

A força V exercida sobre o material (Figura 2.2.) está relacionada com a velocidade relativa de movimento do fluido e distância entre pratos (h). Em uma dada velocidade v , mais esforço é necessário em uma unidade de material quando os pratos estão mais perto. A medida específica deste trabalho por unidade de material é chamada deformação ou taxa de cisalhamento, e é definida como a velocidade relativa dividida pela distância entre os pratos (ROJAS, BRICEÑO e AVENDAÑO, 2012).

$$\gamma = \frac{v}{h} [s^{-1}] \quad (3)$$

Em que:

γ = Velocidade de deformação ou cisalhamento [s^{-1}]

v = Velocidade relativa [m/s]

h = Distância entre os pratos [m]

Assim como a tensão de cisalhamento é importante para as comparações dos testes realizados, a taxa de cisalhamento também é. A curva reológica é construída a partir dos dados de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento, portanto, o conhecimento dessa grandeza é indispensável para a leitura e entendimento das curvas obtidas para cada amostra.

2.6. Reologia

Reologia é a ciência do fluxo e deformação que descreve a inter-relação entre forças, deformações e tempo. É aplicável a todos os materiais, de gases a sólidos. Descreve a consistência de diferentes fluidos, geralmente através de dois componentes, viscosidade e elasticidade. É então, o ramo da física que estuda o comportamento do fluido submetido a diferentes tipos de esforços. (ROJAS, BRICEÑO e AVENDAÑO, 2012).

Para um simples líquido confinado entre duas placas paralelas (uma das quais é fixa), um deslocamento na direção x induz uma força na placa estacionária. O esforço de cisalhamento, constante no tempo, é observado apenas se a placa em movimento é movida

em velocidade dx/dt constante, o que implica uma taxa de deformação constante. A equação que descreve a reologia na hidrodinâmica (fluido newtoniano) é (ROJAS, BRICEÑO e AVENDAÑO, 2012):

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (4)$$

Em que:

τ = Tensão de cisalhamento [N/m²]

η = Viscosidade dinâmica [N/m².s]

γ = Velocidade de deformação ou cisalhamento [s⁻¹]

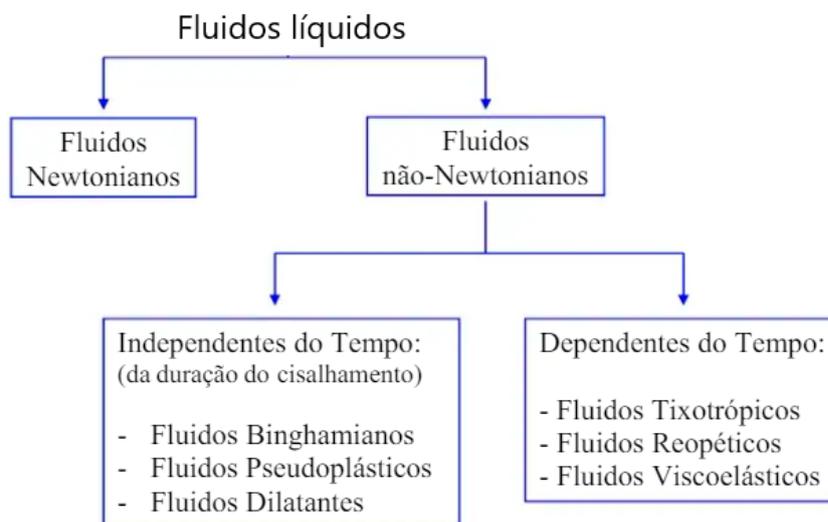
Os fluidos newtonianos, possuem viscosidade constante a uma determinada temperatura e pressão, já os fluidos não newtonianos possuem uma viscosidade que não é constante (Kawatra et al., 1996). No caso da pasta de detergente em pó tem-se uma suspensão não newtoniana.

Uma das principais grandezas a serem avaliadas nesse trabalho trata-se da reologia. A partir da análise das curvas reológicas obtidas para cada amostra será verificada a compatibilidade da fórmula contendo a nova matéria-prima com o sistema atual através de comparação com a curva obtida para a fórmula atual. Se as curvas possuem uma mesma tendência, pode-se dizer que a nova fórmula é adequada para ser processada sem que haja qualquer alteração na planta.

2.7. Classificação reológica dos fluidos

A Figura 2.3 a seguir mostra as classificações de reologia existentes para os fluidos e a Figura 2.4. os perfis característicos de tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento.

Figura 2.3. Classificação reológica.



Fonte: Adaptado de DELAVI (2011).

Os fluidos newtonianos possuem um comportamento linear, onde a viscosidade se mantém constante com a variação da taxa de cisalhamento. Esse comportamento é descrito pela Equação 4 (Kawatra et al., 1996)

Já os fluidos não newtonianos não apresentam essa relação de proporcionalidade entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento, neste caso não se pode falar em termos de viscosidade e sim em viscosidade aparente (μ_a). Existem duas classes desses fluidos, os dependentes do tempo e os independentes do tempo (Kawatra et al., 1996).

Nos pseudoplásticos tem-se a viscosidade aparente decrescendo com a taxa de deformação, portanto, a tensão de cisalhamento inicial acaba sendo maior que a necessária para manter o fluxo, isso ocorre porque parte da energia da tensão inicial é usada no rearranjo do fluido que tende a se organizar diminuindo o atrito entre as camadas acarretando no decréscimo da viscosidade aparente (Kawatra et al., 1996).

Diferentemente dos pseudoplásticos, os dilatantes tendem a apresentar o crescimento da viscosidade aparente com o aumento da tensão de cisalhamento. A explicação para tal comportamento vem da composição desses fluidos, já que, o líquido lubrificante que fica entre as partículas sólidas não consegue preencher os locais vazios por conta do aumento do volume que costuma acompanhar esse fenômeno, assim, o

contato entre essas partículas sólidas aumenta, elevando a fricção e conseqüentemente a viscosidade (Kawatra et al., 1996).

Tanto os fluidos dilatantes quanto os pseudoplásticos são descritos pela lei da potência, conforme mostra a Equação 5 (Kawatra et al., 1996).

$$\tau = k \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (5)$$

Em que:

τ = Tensão de cisalhamento

k = índice de consistência (Pa.sⁿ)

n = índice de comportamento do fluido

$\frac{du}{dy}$ = Derivada da viscosidade aparente em relação ao sentido de escoamento

O último dos fluidos que não possui dependência com o tempo é o binghamiano, que possui uma relação linear entre viscosidade aparente e tensão de cisalhamento, porém, precisam vencer a tensão inicial. São representados pela Equação 6 a seguir (Kawatra et al., 1996).

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (6)$$

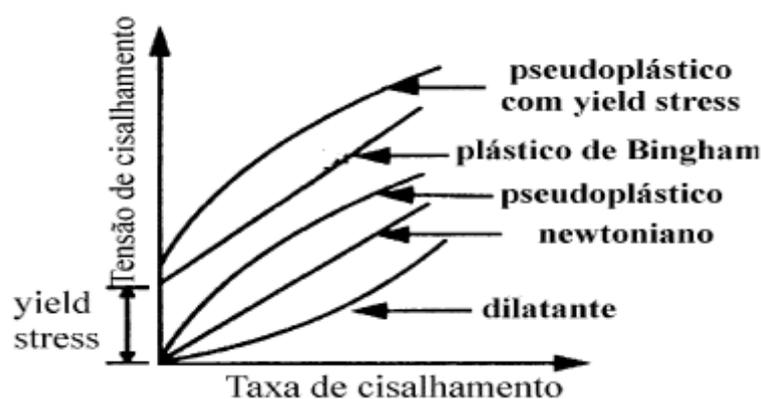
Sendo τ_0 a tensão de cisalhamento inicial.

Os três últimos tipos de fluidos são dependentes do tempo. No caso do tixotrópico, a viscosidade decresce com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, porém quando essa aplicação é interrompida o fluido volta a ganhar viscosidade (Kawatra et al., 1996).

Os reopéticos apresentam comportamento contrário, sua viscosidade aumenta com o tempo de aplicação da tensão e volta como inicialmente não há mais tensão sendo aplicada (Kawatra et al., 1996).

O fluido classificado como viscoelástico pode apresentar características de líquidos viscosos com propriedades elásticas ou de sólidos com propriedades viscosas. Se submetidas à tensão de cisalhamento sofrem uma deformação, mas, se recuperam da deformação sofrida quando essa tensão é interrompida (Kawatra et al., 1996).

Figura 2.4. Curvas reológicas.



Fonte: Kawatra et al., 1996.

A classificação reológica nesse trabalho tem como objetivo a caracterização das pastas a serem testadas. É esperado que as duas fórmulas apresentem uma mesma classificação.

2.8. Bombas

As bombas são equipamentos indispensáveis para qualquer processo industrial. Para se projetar uma bomba, informações como viscosidade e reologia são indispensáveis, pois além de viabilizar o processo de seleção, permitem a adequação do equipamento de acordo com as características do fluido bombeado. No processo de fabricação do detergente em pó, as bombas exercem a função de transportar a pasta de detergente que acabou de ser produzido no reator de mistura até a torre de secagem. Além do transporte,

as bombas também exercem papel importante no aumento de pressão do sistema, para que a mistura passe pelos bicos da torre sem dificuldades.

As máquinas que adicionam energia a um fluido, realizando trabalho sobre o fluido, são denominadas bombas, quando o escoamento é de líquido ou pasta. Bombas e compressores consistem em um elemento rotativo (chamado de impulsor ou rotor dependendo do tipo de máquina), acionado por uma fonte de energia externa (por exemplo, um motor ou outra máquina de fluxo) para aumentar a energia cinética do escoamento. Na sequência, um elemento desacelera o fluxo, aumentando, assim, sua pressão. Essa combinação é conhecida como estágio. Uma bomba ou compressor pode consistir em vários estágios com uma só carcaça, dependendo do valor da razão de pressão requerida da máquina. Esses elementos estão contidos na carcaça ou alojamento. O eixo que transfere energia mecânica para o rotor penetra na carcaça. Um sistema de mancais e selos é necessário para minimizar as perdas (mecânicas) por atrito e prevenir vazamentos do fluido de trabalho (Fox, McDonald e Pritchard, 2017).

2.9. Bombas de deslocamento positivo

A pressão é desenvolvida em bombas de deslocamento positivo por reduções de volume causadas pelo movimento da fronteira na qual o líquido está confinado. Diferentemente das turbomáquinas, as bombas de deslocamento positivo podem desenvolver altas pressões a velocidades relativamente baixas, pois o efeito de bombeamento depende de variação de volume em vez de ação dinâmica. Bombas de deslocamento positivo são frequentemente usadas em sistemas hidráulicos com pressões de até 40 MPa. A principal vantagem da potência hidráulica é a alta densidade de potência (potência por peso de unidade ou tamanho de unidade) que pode ser obtida: para uma dada potência produzida, um sistema hidráulico pode ser mais leve e menor do que um sistema de acionamento elétrico típico (Fox, McDonald e Pritchard, 2017).

2.10. Bombas helicoidais

Como apresentado anteriormente, a pasta de detergente em pó é extremamente viscosa, sendo assim, a utilização de uma bomba adequada para se trabalhar nesse contexto explica a seleção da bomba helicoidal (Figura 2.5.).

As bombas helicoidais são rotativas de deslocamento positivo que fornecem fluxos constantes, além de impedir que o fluido volte, dispensando então a utilização de válvulas de contenção (Helitech, site da Helitech).

Figura 2.5. Bomba helicoidal.



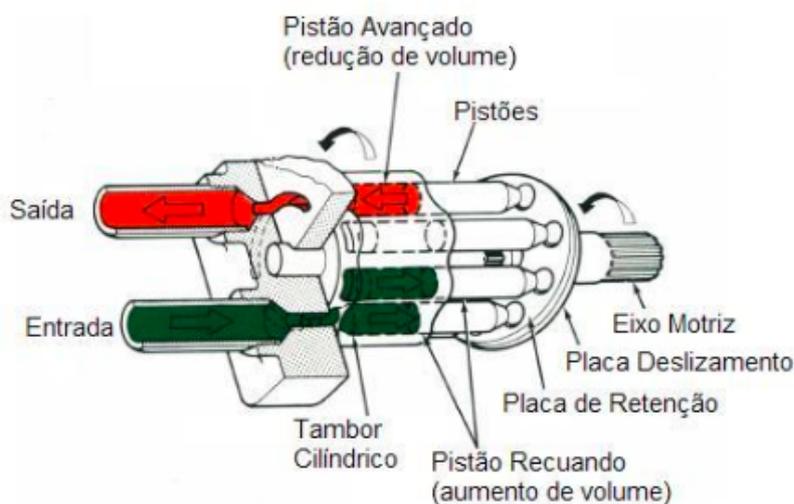
Fonte: Helitech, site da Helitech.

Esse tipo de bomba funciona a partir do princípio de parafuso, permitindo o contato do fluido com os espaços vazios entre o rotor e a carcaça. Conforme o rotor gira o fluido se movimenta de cavidade em cavidade até chegar ao seu destino final (Helitech, site da Helitech).

2.11. Bomba de pistão

Esse tipo de bomba é empregada em processos onde se deseja ganhar pressão e vazão. No caso do detergente em pasta, é necessário o ganho de pressão para o processo de pulverização pelos bicos da torre.

Figura 2.6. Funcionamento de uma bomba de pistão.



Fonte: Fox, McDonald e Pritchard, 2017.

O funcionamento de uma bomba de pistão (Figura 2.6.) envolve a movimentação de oscilação dos pistões causando diferenças de pressão permitindo então o preenchimento de câmaras da bomba com fluido que é jateado em direção ao seu destino (Fox, McDonald e Pritchard, 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Os materiais utilizados foram: Reagentes líquidos e sólidos, amostras de detergente em pasta, recipiente plástico de 400 mL, peneira metálica de abertura 1 mm, água corrente, espátula para homogeneização, picnômetro metálico.

3.2. Equipamentos

Os equipamentos utilizados foram: Reator de mistura de volume 3 L, balança semi-analítica (Marca: Gehaka, Modelo: BK8000), estufa (Marca: Thermo, Modelo: HX0056-00384), analisador de umidade de halogênio (Marca: Shimadzu, Modelo: MOC63), viscosímetro de rotação (Marca: PCE Instruments, Modelo: PCE-RVI 10), reômetro capilar (Marca: Instron, Modelo: Ceast smartrheo SR20).

3.3. Procedimento Experimental

3.3.1. Preparação das amostras de detergente em planta piloto

Todas as amostras foram preparadas em um reator de mistura de aproximadamente três litros (Figura 3.1.). A partir da carta de processos produziu-se uma amostra com os ingredientes atuais, uma amostra com a matéria-prima 1 e a outra com a matéria-prima 2. Todos os ingredientes foram devidamente pesados e adicionados no tempo correto, simulando o processo original.

A carta de processos é um documento que apresenta a ordem de adição dos ingredientes, tempo em que eles são adicionados e também a quantidade, sua intenção é recriar o processo original em escala piloto

Figura 3.1. Reator de mistura.



Fonte: Acervo próprio.

A fase de produção é importante para que sejam feitas as primeiras observações sobre as fórmulas. Nessa etapa serão avaliados o escoamento no momento de descarregar a

fórmula do reator, os resíduos grudados nas paredes e nas pás e também o aspecto geral da pasta gerada.

3.3.2. Teste de Homogeneidade

Para as duas fórmulas novas é necessário seguir alguns protocolos para que seja verificada a compatibilidade dessa nova matéria-prima frente aos outros ingredientes. A homogeneidade é uma dessas verificações. Nesse teste algumas amostras são acondicionadas em frascos que são deixados em repouso por 2 horas no ambiente enquanto as outras são deixadas em uma estufa com temperatura de 80 °C por 2 horas. O objetivo é verificar uma possível segregação e perda da homogeneidade. Em caso positivo, a fórmula não prosseguirá para os testes seguintes e então a matéria-prima em questão será descartada do projeto.

Na Figura 3.2. mostra a foto das fórmulas acondicionadas nos frascos.

Figura 3.2. Frascos para homogeneidade.



Fonte: Acervo próprio.

3.3.3. Teste de aglomerados

Nesse teste são verificados os aglomerados formados após a preparação das amostras no reator. A existência desses aglomerados dificulta o bombeamento e também a

passagem da mistura pelos bicos da torre de secagem, portanto, quanto mais aglomerados são encontrados pior é a pasta de detergente. Utiliza-se uma peneira metálica de abertura de 1 mm, conforme Figura 3.3. Uma análise visual é feita desses aglomerados para uma comparação com a fórmula atual.

Adiciona-se uma porção da amostra de modo que esta cubra a peneira por inteiro, em seguida essa peneira é colocada em água corrente por 5 s. Após isso, tiram-se as fotos para comparação.

Figura 3.3 Peneira para teste de aglomerados.



Fonte: Acervo próprio.

Espera-se que as fórmulas apresentem pouco nível de aglomerados, e que a fórmula 1 assim como a fórmula 2 sejam comparáveis à fórmula atual.

3.3.4. Análise de umidade

A umidade é uma variável que deve ser verificada, pois ela vai garantir que existe a mesma quantidade de água nas fórmulas. Como dito anteriormente, a água tem total influência no comportamento da viscosidade e reologia dos fluidos. Além disso, a verificação da água tem como objetivo a verificação do benefício de redução de viscosidade em condições parecidas, e para isso, a umidade da fórmula 1, da fórmula 2 e

da fórmula atual devem ser iguais e portanto comparáveis para o teste de viscosidade. Uma variação de no máximo 2% em relação à umidade padrão definida pela fábrica é aceitável.

Primeiramente a amostra deve ser homogênea com o auxílio de uma espátula, em seguida, a câmara de amostra deve ser aberta e em seguida tarada. Deve-se pesar cerca de 5 gramas da amostra, distribuindo de maneira uniforme pelo compartimento, posteriormente a câmara deve ser fechada para que o ciclo de secagem comece. Após aproximadamente 15 minutos o resultado aparece no visor do equipamento.

Na figura 3.4. mostra-se o equipamento utilizado.

Figura 3.4. Analisador de umidade de halogênio.



Fonte: Acervo próprio.

3.3.5. Densidade aparente

A densidade também é um fator importante para ser verificado, se houver algum valor muito diferente do padrão (valor definido pela fábrica como o adequado), problemas de processamento podem surgir. Portanto, é essencial que não haja grande mudança da densidade da pasta, senso aceitável 10 % de variação (variação definida como adequada pela fábrica) em comparação com a fórmula atual.

O maior problema de processamento que envolve a densidade está relacionado ao quanto compactado ou não esse material pode ficar. Se a densidade aumenta muito quer dizer que em um mesmo volume de controle tem-se muito mais material. Se ela diminui, significa que existe pouco material para um volume de controle. No momento em que a

pasta passa pelos bicos da torre, se a densidade for alta o ar terá mais dificuldade em secar essa gota. Em outras palavras, quanto maior a densidade maior a compactação e, portanto, maior a dificuldade do ar retirar as moléculas de água. Mas se a densidade for muito baixa, o ar quente acaba queimando a pasta. Além disso, o volume dos tanques pulmões e demais equipamentos podem ser prejudicados caso o sistema opere em produção máxima, já que, tudo foi projetado considerando uma faixa de densidade específica.

Primeiramente o picnômetro tampado deve ser pesado vazio, em seguida a amostra é despejada no picnômetro e a massa é medida para que o cálculo seja feito, de acordo com a Equação 7.

3.3.5.1. Procedimento de Cálculo

$$D_A = \frac{M}{V} \left[\frac{g}{mL} \right] \quad (7)$$

Em que,

M = massa do picnômetro cheio subtraindo-se a massa do picnômetro vazio [g]

V = Volume [mL]

3.3.6. Viscosidade

A partir das amostras preparadas em escala piloto, mediu-se a viscosidade da fórmula 1, fórmula 2 e fórmula atual. Essas medidas foram feitas na mesma temperatura de saída do reator, para que o resultado encontrado representasse o máximo possível a situação em escala industrial.

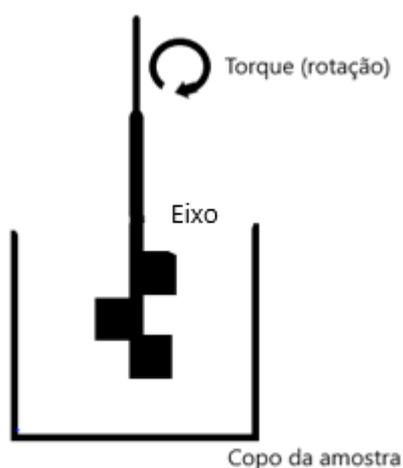
Para a obtenção dessas medidas utilizou-se um viscosímetro rotacional, que funciona a partir de um rotor girando a uma velocidade constante, esse rotor deve estar imerso no fluido a ser testado, a resistência do fluido à rotação mede a viscosidade. Esse viscosímetro é operado por uma pequena bateria.

Primeiramente, ligou-se o aquecedor de água e o aplicativo de *software* para o viscosímetro, em seguida, verificou-se o conjunto de eixos e copos adequados para a medição da viscosidade e um arquivo de configuração adequado é carregado no computador para capturar o perfil de viscosidade com a integração do *software*. Encheu-se o copo com a amostra recém produzida no reator, executou-se o arquivo de configuração no computador. Após o eixo começar a girar e captar as medidas de viscosidade,

realizaram-se mais duas vezes para cada amostra, de maneira a se obter triplicatas para cada velocidade e fórmula.

A Figura 3.5. apresenta um esquema simplificado do funcionamento de um viscosímetro de rotação.

Figura 3.5. Representação de um viscosímetro de rotação.



Fonte: Arquivo próprio.

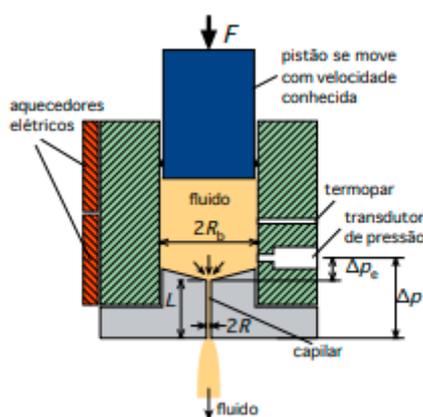
3.3.7. Reologia

Diferentemente de um viscosímetro, que só mede a viscosidade do fluido em um número limitado de condições, um reômetro é capaz de medir a viscosidade e a elasticidade de materiais não newtonianos em uma ampla variedade de condições. Algumas das propriedades mais importantes que podem ser medidas incluem a viscoelasticidade, a tensão de escoamento, a tixotropia, a viscosidade elongacional, a conformidade da fluência e o comportamento de relaxamento da tensão, além de parâmetros relevantes ao processo, como inchamento da matriz e fratura do fundido (Netzsch, site do Netzsch, 2020).

Para a realização da construção das curvas reológicas utilizou-se um reômetro capilar. Para cada amostra mediu-se a viscosidade e a tensão de cisalhamento de acordo com a variação da taxa de cisalhamento. Foram realizadas 6 análises para cada fórmula.

Nesse tipo de reômetro, uma amostra é forçada a extrudir por meio de um cilindro ou matriz de dimensões bem definidas sob alta pressão. A queda de pressão no cilindro ou na matriz é medida para fornecer dados de taxa de fluxo da pressão para o fluido, a partir dos quais a viscosidade é calculada. A temperatura e a velocidade de cisalhamento podem ser controladas de perto para simular o ambiente de processamento relevante (Netzsch, site do Netzsch, 2020).

Figura 3.6. Funcionamento de um viscosímetro capilar.



Fonte: Greo, 2015.

3.3.8. Custo

O cálculo de custo envolve o preço da fórmula final e o valor economizado com a economia de gás proporcionada no processo de secagem, decorrente da diminuição da viscosidade e redução de água na pasta de detergente.

3.3.9. Custo de fórmula

Para o custo de fórmula serão analisados todos os ingredientes, seus níveis de dosagem, pureza e preço. Para se chegar nesse valor será multiplicada a quantidade da matéria-prima em massa pela sua pureza - para que o princípio ativo seja adicionado na proporção correta - e em seguida multiplicada pelo seu preço.

3.3.10. Custo de gás

Será contabilizado o quanto de gás poderá ser economizado a partir dos dados de processo da planta. A partir desses dados tem-se uma proporção entre a umidade atual e a quantidade de gás necessária para a secagem dessa pasta, usando essa proporção, chega-se em um valor aproximado para secar a nova pasta com a nova porcentagem de água. Para esse cálculo, serão desconsiderados eventuais problemas de cinética de secagem, como por exemplo, o transporte de calor nas gotas que saem dos bicos da torre, pois essas gotas podem ter suas características mudadas devido a troca de matéria-prima. O cálculo utilizando-se a proporção será feito porque considera-se que os principais parâmetros de processo que podem atrapalhar a secagem serão mantidos constantes, tais como, viscosidade, reologia e densidade.

Assim que a quantidade de gás após redução de umidade for calculada, multiplicou-se pelo preço e verificou-se a economia feita a partir da secagem da fórmula 1 em relação a fórmula atual.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Preparação das amostras de detergente em planta piloto

As amostras foram igualmente preparadas. Foram feitas observações quanto ao escoamento na saída do reator, os resíduos nas pás e aspecto geral das pastas.

Quadro 4.1. Resultados das observações visuais na etapa de preparação de amostra.

Fórmula	Escoamento na saída	Resíduos nas pás	Aspecto geral
Atual			Normal
1			Normal
2			Normal

Fonte: Acervo próprio.

A partir da observação das amostras percebeu-se que ambas possuíam um bom escoamento na saída, pois não houve entupimentos. Quanto aos resíduos nas pás, as três amostras apresentaram resultados comparáveis, com pouco resíduo acumulado nas pás.

Durante toda a preparação foi observado o aspecto geral da pasta, para as três fórmulas não houve formação de aglomerados visíveis e a mistura se manteve homogênea. Portanto, as duas fórmulas contendo matérias-primas diferentes foram consideradas adequadas e aptas para a próxima etapa de testes.

4.2. Teste de Homogeneidade

No Quadro 4.2. a seguir são apresentados os resultados para a homogeneidade das amostras.

Quadro 4.2. Resultados para homogeneidade.

Fórmula	Estabilidade Ambiente por 2 hs / 80 °C por 2 hs	Resultado
Atual		Sem separação de fases
1		Sem separação de fases
2		Sem separação de fases

Fonte: Acervo próprio.

Para as três amostras tanto na condição de temperatura ambiente quanto na estufa à 80 ° C não houve separação das fases. Portanto, as fórmulas 1 e 2 estão adequadas.

4.3. Teste de aglomerados

No Quadro 4.3. a seguir apresentam-se os resultados para formação de aglomerados.

Quadro 4.3. Resultados para formação de aglomerados.

Fórmula	Formação de lumpings	Resultado
Atual		Não houve formação de aglomerados significativos
1		Não houve formação de aglomerados significativos
2		Não houve formação de aglomerados significativos

Fonte – Acervo próprio.

Percebe-se que para as três fórmulas em questão não houve formação de grumos significativos na pasta de detergente em pó. Sendo assim, as duas fórmulas com as novas matérias-primas são consideradas adequadas quanto à formação de aglomerados.

4.4. Análise de umidade

Os resultados para umidade apresentados no Quadro 4.4. a seguir serão em termos de porcentagem de água presente na fórmula depois do processo reacional no reator. É importante lembrar que a umidade padrão é a umidade definida pela fábrica como padrão utilizado atualmente.

Quadro 4.4. Resultados para umidade.

Fórmula	Varição da umidade de acordo com o valor padrão (%)	Resultado
Atual	1,49 % menor	Dentro da margem esperada
1	1,35 % menor	Dentro da margem esperada
2	1,56 % menor	Dentro da margem esperada

Fonte – Acervo próprio.

Os valores para umidade das pastas são equivalentes e se encontram dentro da margem de variação esperada. Portanto, pode-se dizer que ambas as amostras possuem mesmo nível de água e estão adequadas para a comparação dos benefícios de viscosidade.

4.5 Densidade aparente

Os resultados para densidade aparente estão apresentados no Quadro 4.5. a seguir.

Os valores de densidade padrão são os estabelecidos pela fábrica

Quadro 4.5. Resultados para densidade aparente.

Fórmulas	Varição da densidade de acordo com o valor padrão (%)	Resultado
Atual	5,64 % maior	Dentro da margem estabelecida
1	4,50 % maior	Dentro da margem estabelecida
2	5,05 % maior	Dentro da margem estabelecida

Fonte: Acervo próprio.

Para todas as fórmulas os resultados de densidade aparente da pasta de detergente estão muito próximos, dentro da margem estabelecida, portanto, são consideradas adequadas para o processo de secagem e também para o processamento como um todo.

4.6. Viscosidade

Primeiramente foram realizadas análises de viscosidade em duplicatas para cada fórmula na umidade padrão com o objetivo de se verificar algum benefício de redução de viscosidade. Os resultados são apresentados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6. Resultados para viscosidade.

Fórmula	Varição da viscosidade média em relação ao valor da fórmula atual (%)	Temperatura (°C)	Rotação (rpm)
Atual	0 %	60	2
1	42 % menor	60	2
2	1,03 % menor	60	2

Fonte: Acervo pessoal.

Apesar da grande variação entre as viscosidades das fórmulas não houve diferença observada visualmente no momento da preparação das amostras.

Verificou-se um benefício real quanto à redução de viscosidade apenas para a fórmula 1. Sendo assim, a fórmula 2 foi considerada inadequada e não prosseguiu no projeto.

Após a verificação das viscosidades iniciais das amostras foi necessário medir as viscosidades da fórmula atual e da fórmula 1 variando-se a umidade. O objetivo desse teste é verificar o quanto seria possível diminuir a água na fórmula sem que deixasse de ter o benefício de redução de viscosidade. Os resultados desse ensaio são mostrados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7. Resultados para viscosidade variando-se a umidade.

Fórmula	Umidade (%)	Varição da viscosidade média em relação ao valor da fórmula atual (%)	Temperatura (°C)	Rotação (rpm)
Atual	padrão	0 %	60	2
1	padrão	42 % menor	60	2
1	Reduzida em aproximadamente e 7 %	44% menor	60	2
1	Reduzida em aproximadamente e 13 %	179 % maior	60	2

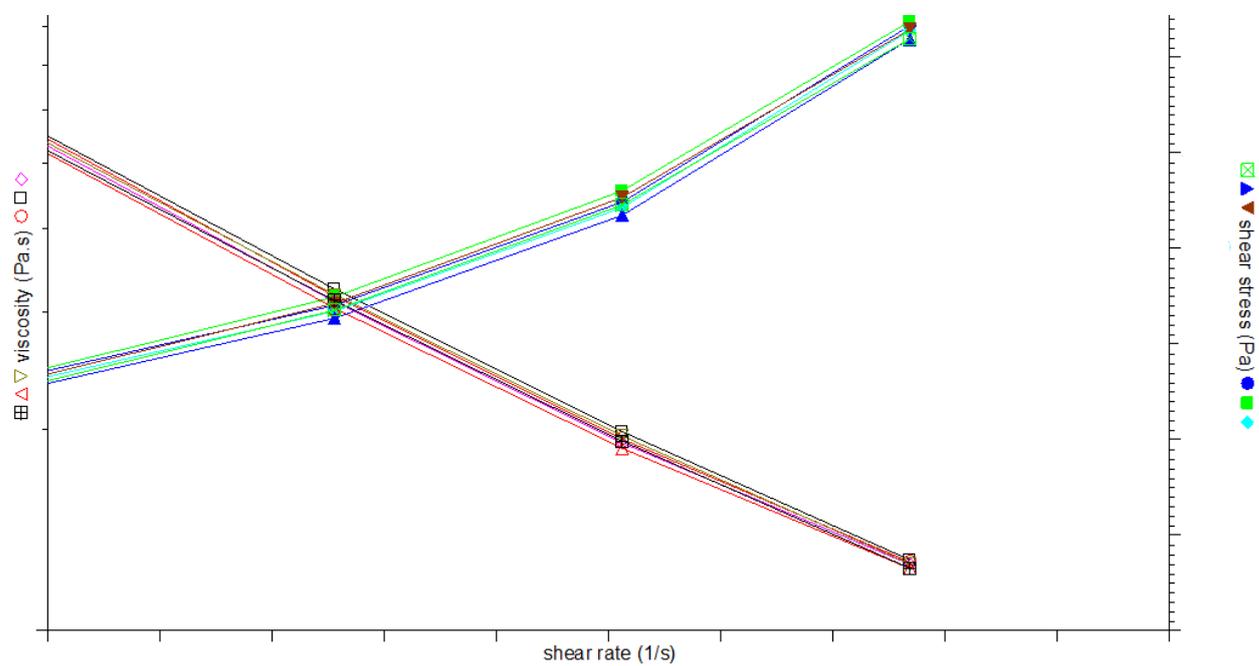
Fonte: Acervo pessoal.

A partir dos resultados obtidos conclui-se que tem-se o benefício de redução de viscosidade para a fórmula contendo a matéria-prima 1 até uma redução da umidade padrão em torno de 7%, portanto, todos os cálculos a seguir serão baseados nisso.

4.7 Reologia

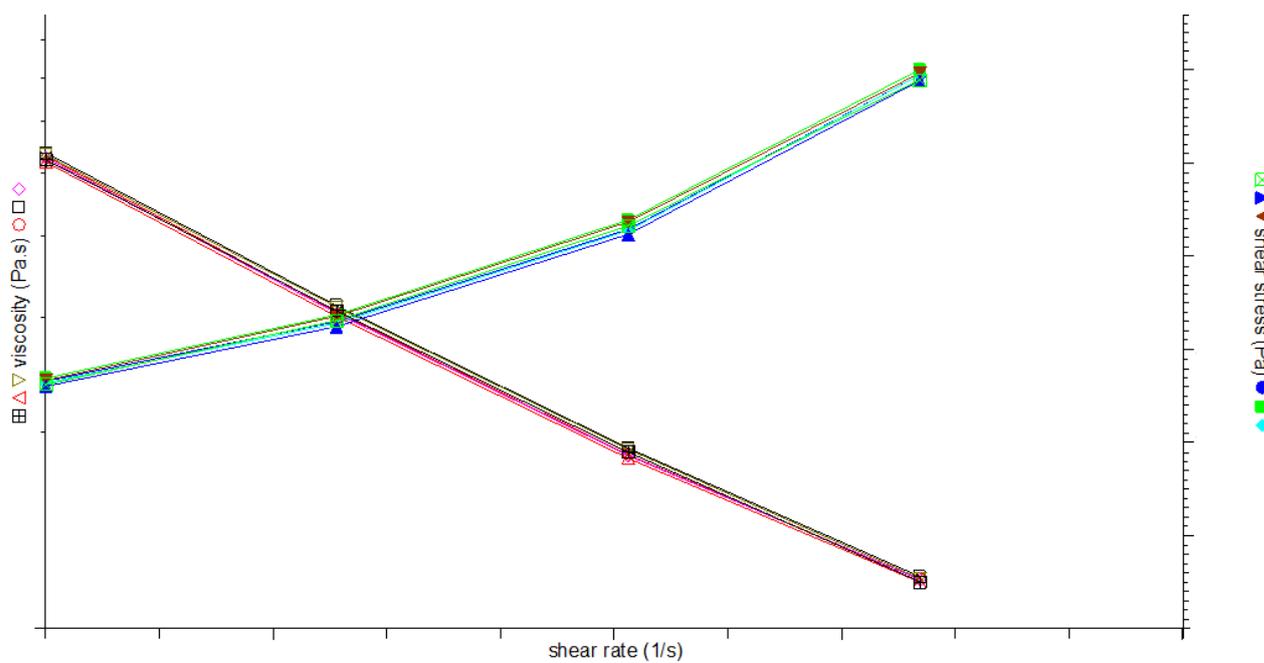
Foram analisadas pelo reômetro duas amostras. A amostra atual contendo umidade padrão e a fórmula 1 contendo 7 % de redução de umidade em relação a padrão. As figuras 4.1. e 4.2. mostram as curvas reológicas geradas pelo *software*.

Figura 4.1. Curva reológica para a fórmula atual com umidade padrão.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.2. Curva reológica para a fórmula 1 contendo 7 % de redução na umidade.



Fonte: Acervo próprio.

Nas Figuras 4.1. e 4.2. as curvas verdes, azuis e marrons correspondem a curva da tensão de cisalhamento (shear stress [Pa]) em função da taxa de cisalhamento (shear rate [1/s]). Elas representam a curva reológica das amostras. É a partir dessas curvas que a classificação reológica seguida da comparação entre amostras será feita.

Já as curvas vermelhas, pretas e rosas, correspondem a curva da viscosidade (Viscosity [Pa.s]) em função da taxa de cisalhamento (shear rate [1/s]). A partir da análise dessas curvas pode-se verificar a relação da viscosidade quando se altera a taxa de cisalhamento.

Ao se analisar as curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento, percebe-se que em ambas as curvas tem-se um comportamento próximo ao de um plástico de Bingham, pois se verifica que existe uma relação linear entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, além de possuir um valor diferente de zero quando a taxa de cisalhamento é zero, assim como os fluidos dessa classe. Observa-se também, que existe um crescimento da tensão de cisalhamento com o aumento da taxa cisalhante, ou seja, existe um aumento da reação do fluido à tensão aplicada sobre ele ao se aumentar a taxa de cisalhamento.

Além disso, a curva de viscosidade em função da taxa cisalhamento são equivalentes para as duas amostras, mostrando que a fórmula 1 contendo umidade menor possui viscosidade muito semelhante a fórmula atual. Portanto, fica evidente que o comportamento reológico das duas pastas de detergente são equivalentes, sendo assim, a fórmula 1 contendo redução de 7 % de umidade pode ser processada nas mesmas condições que a fórmula atual contendo umidade padrão sem que haja investimentos em novos equipamentos e/ou estudos de engenharia para readequação.

4.8 Custo

4.8.1 Custo de fórmula

Por razões de confidencialidade no Quadro 4.8. serão apresentados apenas os valores finais em porcentagem referentes a variação do preço atual em relação ao novo preço da fórmula 1. O cálculo foi feito por variantes (Marcas diferentes de detergente em pó produzidas pela mesma empresa). Não serão divulgados preço de cada ingrediente separadamente e nem os níveis de dosagem de cada um.

Quadro 4.8. Resultados para custo de fórmula.

Varição do custo Variante 1	Varição do custo Variante 2	Varição do custo Variante 3	Soma das Variantes
0,35 % menor	0,58 % menor	0,37 % menor	0,43% menor

Fonte: Acervo próprio.

A partir da troca da matéria-prima presente na fórmula atual pela matéria-prima presente na fórmula 1 obteve-se uma economia de fórmula satisfatória, portanto, em termos de fórmula o projeto é viável e inclusive gera uma economia de 0,43% de todo custo com fórmula para a empresa em um ano.

4.8.2 Custo de gás de secagem

O Quadro 4.9. apresenta os resultados para variação em porcentagem dos custos de gás de secagem.

Baixando a umidade em aproximadamente 7 %, realizou-se uma conta para saber a proporção de gás de secagem para secar a fórmula atual com umidade padrão, em seguida, utilizando-se essa proporção, estimou-se o quanto seria necessário para secar a fórmula 1 contendo a redução de umidade, multiplicou-se pelo valor de compra do gás e calculou a variação entre as duas fórmulas por variantes.

Quadro 4.9. Variação de custos de gás de secagem.

Varição percentual Variante 1	Varição percentual Variante 2	Varição percentual Variante 3	Varição percentual do custo de gás de secagem total
0,67 % menor	0,67 % menor	0,67% menor	0,67 % menor

Fonte: Acervo próprio.

A partir dos cálculos proporcionais realizados é possível perceber que existe uma economia muito significativa. Portanto, a fórmula 1 contendo a nova matéria-prima foi aprovada e seguirá para os próximos passos de implementação de projeto.

Os próximos passos incluem a realização dos testes abordados nesse trabalho em uma escala maior, além de incluir um mapeamento mais robusto dos custos.

5. CONCLUSÃO

A utilização de uma nova matéria-prima 1 na formulação do detergente em pó mostrou-se adequada nas análises para formação de aglomerados, resíduos, densidade, umidade e homogeneidade, além de apresentar também a vantagem de redução de viscosidade da pasta de detergente. Essa fórmula viabilizou a redução da umidade em cerca de 7 % enquanto se mostrou equivalente a fórmula atual nos quesitos reologia e viscosidade. Portanto foi considerada adequada em termos de processamento e seguirá para as fases seguintes de implementação. A fórmula 1 também revelou-se mais barata, além de reduzir custos com gás de secagem pela redução da umidade na pasta.

A partir dos resultados encontrados verificou-se que a utilização de uma nova matéria-prima 2 na formulação do detergente em pó apresentou resultados adequados para as análises de formação de aglomerados, resíduos, densidade, umidade e homogeneidade. Contudo, não apresentou a vantagem de redução de viscosidade e, sendo assim, não seguiu para as demais verificações no projeto.

Então, a partir da análise de todos os dados e cálculos realizados nesse trabalho, conclui-se que a fórmula 1 contendo a nova matéria-prima possui condições de processamento semelhantes à fórmula que é atualmente produzida, não necessitando de investimentos em novos equipamentos e/ou projetos de engenharia. Dessa forma, a fórmula 1 seguirá para testes em maior escala.

6. BIBLIOGRAFIA

ATKINS, P. W.; JONES, L. Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente. 5ª edição – Porto Alegre: Bookman, 2012.

BORSATO, D.; MOREIRA, I.; GALÃO, O. F. Detergentes Naturais e Sintéticos Um Guia Técnico. 2ª edição revisada – Londrina: Eduel, 2004.

CASTRO, H. F. de. Sabões e Detergentes. Processos Químicos Industriais II. Apostila 6. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de Lorena, 2009.

DELAVI, Deyse Gonzaga Gomes. Defloculação de suspensões aquosas de argila e sua correlação com caracterizações químicas e de superfície. Dissertação (Mestrado em

Materiais Particulados) – Faculdade de Engenharias de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

FOX, McDONALD e PRITCHARD, Introdução à mecânica dos fluidos. 8ª edição. Universidade Federal Fluminense – Rio de Janeiro – LTC, 2017.

G1, Consumo de sabão cresce no Brasil, 2011. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2011/12/consumo-de-sabao-cresce-no-brasil.html>> Acessado em 30/11/2020 às 12:30 h.

Grupo de Reologia – Greo, Reometria capilar. Departamento de Engenharia Mecânica - Pontifícia Universidade Católica - julho de 2015.

Helitech, Bombas helicoidais. Disponível em: <<https://www.helitechbombas.com.br/artigos-novidades-bombas-helicoidais-tudo-sobre-bomba-helicoidal/>> Acessado em 29/10/2020 às 11:40 h.

HouseholdInnovation, Mercado de lava-roupas, 2020. Disponível em: <<https://householdinnovation.com.br/mercado-de-lava-roupas-aponta-oportunidades-para-novos-players/>> Acessado em 20/12/2020 às 15:40 h.

KAWATRA, S. K., BAKSHI, A. K. On-line measurement of viscosity and determination of flow types for mineral suspensions. International Journal of Mineral Processing, v. 47, p.275-283, 1996.

LIVI, C. P. Fundamentos de Fenômenos de Transporte. Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente. Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, 2004.

NETZSH, produtos e soluções, 2020. Disponível em <<https://www.netzsch-thermal-analysis.com/br/produtos-solucoes/reologia/reometros/#:~:text=Como%20ele%20funciona%3F,quais%20a%20viscosidade%20%C3%A9%20calculada>> Acessado em 13/11/2020 às 17:20 h.

