

2 Revisão bibliográfica

2.1. Aspectos conceituais relacionados à reologia

Embora o conhecimento da reologia por Newton e Hooke date do século XVII, foi somente em 1929, quando a Sociedade de Reologia foi fundada e o comportamento mecânico de materiais industriais como a borracha, o plástico, cerâmicas e tintas passou a ser do interesse da física, mecânica e da matemática, que surgiu a necessidade do estudo da reologia (Tanner, 1988).

A etimologia da palavra reologia, inicialmente definida por E. C. Bingham em 1929 como estudo da deformação e fluxo da matéria [Blair (1969); Barnes *et al* (1989)], é derivada dos vocabulários gregos *rheo* = deformação e *logia* = ciência ou estudo. Portanto, reologia é a ciência que estuda como a matéria se deforma ou escoar quando está submetida a esforços originados por forças externas (Vliet & Lyklema, 2005).

Segundo Blair (1969), a deformação de um corpo pode ser dividida em dois tipos: deformação espontânea e reversível, conhecida como elasticidade; e deformação irreversível, conhecida como fluxo ou escoamento.

Apesar da maioria das teorias de reologia, quantitativas ou qualitativas, tratar o fenômeno da deformação como reversível, a irreversibilidade é geralmente encontrada. Às vezes, as propriedades reológicas de uma substância sofrem mudanças consideráveis com o tempo ou com uma deformação prolongada, seja o fenômeno reversível ou irreversível [Machado (2002); Castro (2007)].

Segundo Bird *et al* (1977), a reologia clássica considera dois materiais como ideais: o sólido elástico e o líquido ou fluido viscoso. Os sólidos ideais são materiais com forma definida que, quando deformados por uma força externa dentro de certos limites, retornam a sua forma e dimensões originais, após a remoção dessa força. Os fluidos ideais, tais como líquidos e gases, tendem a escoar de forma irreversível, uma vez que a energia requerida para a deformação é

dissipada sob forma de calor e não é mais recuperada pela remoção da força exercida.

Na reologia dos sólidos, a deformação elástica é o parâmetro mais importante ao passo que na reologia dos fluidos o parâmetro de maior interesse deve ser a viscosidade (Diaz *et al*, 2004). No entanto, certos materiais não podem ser diferenciados em sólidos ou fluidos com clareza, de modo que a propriedade reológica de interesse nestes casos é a viscoelasticidade.

A referida dificuldade de classificação de alguns materiais como sólidos ou fluidos também é retratada por Barnes *et al* (1989). Segundo tais autores, se um amplo intervalo de tensões e tempo for aplicado durante um ensaio para a determinação das propriedades reológicas de diferentes materiais, poderão ser observados sólidos comportando-se como líquidos e líquidos comportando-se como sólidos. Tal fato possibilita a inclusão de um mesmo material em mais de uma categoria, dependendo das condições experimentais.

Segundo Mothé (2009), na prática, a reologia está preocupada com materiais cujas propriedades do escoamento são mais complicadas do que as de um fluido simples ou um sólido elástico ideal, embora possa ser observado que um material com um comportamento simples, sob uma restrita variação da condição de ensaio, pode exibir um comportamento muito mais complexo sob outras condições.

Um fenômeno importante ligado ao escoamento é a existência de um limite de escoamento. Alguns materiais que escoam rapidamente sob uma determinada tensão de cisalhamento não escoarão totalmente se essa tensão for reduzida a um valor abaixo do limite de escoamento.

A existência desse valor residual para a tensão de cisalhamento, o qual deve ser excedido para que o material apresente um comportamento viscoso, foi idealizado por Bingham (1922), sendo conhecido por viscoplasticidade.

Após análises experimentais das relações entre tensão e deformação de diversos solos, Vyalov (1986) concluiu que o modelo reológico viscoplástico descrevia adequadamente o comportamento dos solos sobre um estado permanente de tensão.

Como as corridas de massa são caracterizadas por movimentos rápidos nos quais os materiais comportam-se como fluidos altamente viscosos (e.g. Guidicini & Nieble, 1984), os solos, durante este tipo de movimento, seriam classificados

como fluidos viscoplásticos, justificando assim o seu estudo por meio de um embasamento reológico.

2.1.1. Tensão, deformação e viscosidade

Conforme ressaltado anteriormente, a reologia dos fluidos está relacionada a um sistema de forças que faz com os mesmos escoem. Portanto, para a compreensão deste fenômeno, há a necessidade de se estudar o conceito de tensão, deformação e, por fim, de viscosidade (Castro, 2007).

2.1.1.1. Tensão

Segundo Bretas & D'Ávila (2000), quando um fluido está em movimento, vários tipos de forças atuam sobre ele. Essas forças surgem devido ao seu movimento, à ação da gravidade, aos gradientes de pressão e às interações entre as moléculas do fluido.

Quando esta força é considerada atuando em uma determinada área, tem-se definido o conceito de tensão, cuja formulação matemática é expressa pela Equação 1.

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1)$$

Uma definição mais rigorosa de tensão envolve a notação vetorial, obtida através da associação da força a uma direção. Segundo Rocha (2002), associando-se um escalar a uma direção (\hat{n}) obtém-se um vetor (\vec{F}), e associando-se um vetor a uma direção obtém um tensor ($\vec{\bar{t}}$).

Fox & McDonald (1998) enunciam que a descrição completa do estado de tensões em um ponto só pode ser obtida através da especificação das tensões que atuam em três planos que são perpendiculares entre si e contém o referido ponto. Assim, em coordenadas cartesianas, o tensor tensão tem nove componentes, usualmente escritas na forma matricial.

Conforme ilustra a Figura 1, σ_{ii} representa uma tensão normal atuante no plano perpendicular à direção \hat{i} , ao passo que τ_{ij} representa a tensão cisalhante

atuante no plano perpendicular à \hat{i} na direção \hat{j} . Embora o tensor apresente nove componentes, devido a propriedades de simetria ($\tau_{ij}=\tau_{ji}$), o estado de tensões em um corpo estará determinado conhecendo-se apenas seis de seus componentes: três tensões normais e três tensões cisalhantes.

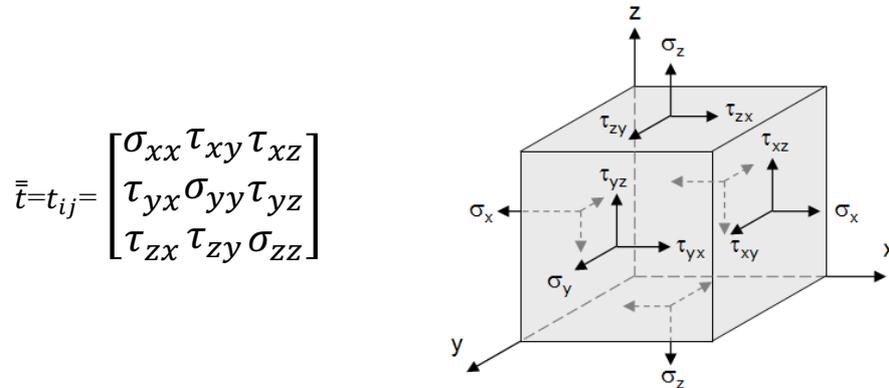


Figura 1 - Notação matricial e representação gráfica do tensor tensão

2.1.1.2. Deformação

Um corpo é dito tensionado ou deformado quando a posição relativa dos pontos em seu interior é modificada. O deslocamento de cada ponto, por sua vez, é definido através de um vetor que reflete a distância entre a sua localização inicial e final (Chou & Pagano, 1967).

Segundo Hibler (2010), o estado de deformações de um corpo exige a especificação de deformações normais, que causam uma mudança no volume do elemento, e deformações por cisalhamento, que provocam uma mudança em sua forma, conforme ilustra a Figura 2.

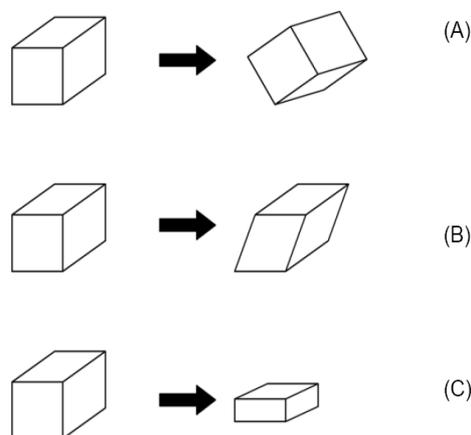


Figura 2 - Conceito de deformação: (A) rotação sem deformação; (B) deformação por cisalhamento; (C) deformação normal (Bretas & D'Ávila, 2000)

Do ponto de vista da reologia, as propriedades mecânicas de todos os materiais são descritas em termos de contribuições elásticas, viscosas e inerciais (Van Wazer *et al*, 1966).

De acordo com Machado (2002), a deformação elástica é usualmente expressa em função da força ou tensão de deformação aplicada, a qual pode ser definida de um modo elementar como deformação relativa. A deformação viscosa é expressa em função da taxa de cisalhamento, definida através da relação entre a variação da velocidade de escoamento e a distância entre camadas ou partículas discretas do fluido. A deformação inercial, por sua vez, envolve a aceleração.

No caso dos fluidos, classificados de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento aplicada, a contribuição da deformação viscosa é de fundamental importância (Fox & McDonald, 1998). Assim, conforme ressaltado por Castro (2007), a caracterização reológica destes materiais envolve a determinação da taxa de cisalhamento com o tempo ao invés da deformação absoluta do mesmo.

2.1.1.3. Viscosidade

O conceito de viscosidade, definida como a resistência ao deslizamento das moléculas do fluido devido à fricção interna, foi introduzido por Isaac Newton, em 1687, através do escoamento de fluidos colocados entre duas placas paralelas de área A , separadas por uma distância h , movimentadas por uma força F , conforme ilustra a Figura 3.

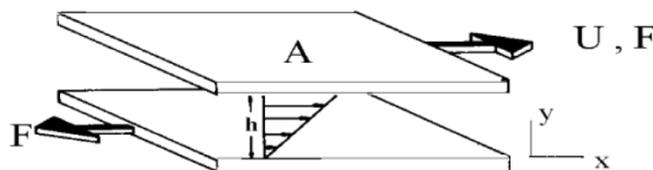


Figura 3 - Modelo de placas paralelas proposto por Newton para explicar o conceito de viscosidade (Barnes *et al*, 1969)

De acordo com o modelo proposto por Newton, a força (F) requerida por unidade de área (A) para manter uma diferença de velocidade entre as placas é

conhecida como tensão de cisalhamento, matematicamente expressa pela Equação 2.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

A taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), por sua vez, é determinada através de uma expressão matemática, Equação 3, que relaciona a diferença das velocidades entre duas partículas vizinhas ou planos vizinhos com a distância entre eles.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

Para fluidos viscosos ideais, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento, onde a constante de proporcionalidade é, por definição, a viscosidade do fluido (μ), conforme explicita a Equação 4, também conhecida como Lei de Newton para viscosidade.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

Para Barnes *et al* (1969), a viscosidade pode ser considerada a principal propriedade reológica de um fluido, pois indica sua facilidade de escoar continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa. Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor é a tensão necessária para submetê-lo a uma determinada taxa de cisalhamento constante.

Van Wazer *et al* (1966) dividem a viscosidade em diferencial e aparente. Ambos os termos são aplicados às curvas “tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento” não-lineares. Enquanto que a viscosidade diferencial é determinada através da inclinação de um dado ponto da curva, a viscosidade aparente é obtida a partir da inclinação de uma reta ligando um ponto particular da curva com a origem.

A viscosidade pode depender de seis parâmetros independentes. São eles: temperatura, pressão, taxa de cisalhamento, natureza físico-química da substância,

campo elétrico e o tempo de cisalhamento. Ao se definir a viscosidade em função de um desses parâmetros, os outros cinco devem ser mantidos constantes e bem definidos (Schramm, 1998).

2.2. Classificação dos modelos reológicos

Os fluidos dividem-se em ideais e reais. Os ideais são os que possuem viscosidade igual a zero e são hipotéticos. Num escoamento ideal não existem tensões cisalhantes [Correia (2006); Mothé (2007)]. Os fluidos reais são divididos em newtonianos e não-newtonianos, sendo estes últimos divididos em três classes: os independentes do tempo, os dependentes do tempo, e os viscoelásticos, conforme sintetizado na Figura 4.

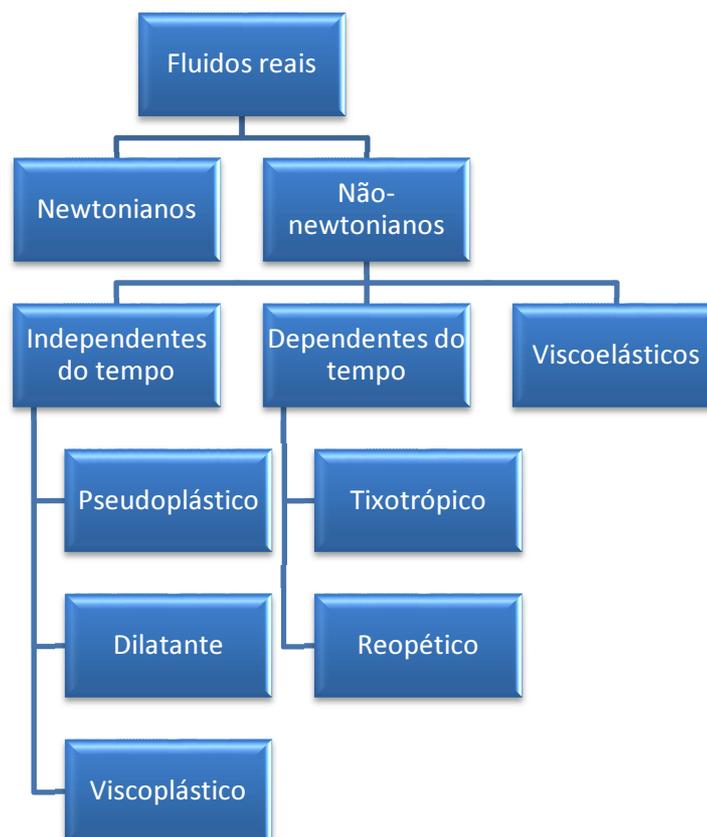


Figura 4 - Esquema da classificação dos fluidos reais (Adaptado de Mothé, 2007)

2.2.1. Fluidos Newtonianos

De acordo com Tanner (1988), os fluidos newtonianos são aqueles cuja viscosidade, denominada viscosidade absoluta, é afetada apenas pela temperatura e pressão, não apresentando variações com aumento da taxa ou tensão cisalhante.

A curva de escoamento de um fluido newtoniano é uma linha reta que passa através da origem e tem uma inclinação cujo inverso é igual ao coeficiente de viscosidade. Dessa maneira, para um fluido Newtoniano, uma determinação experimental simples, isto é, um ensaio que mede apenas um dos parâmetros reológicos é suficiente para a caracterização do seu comportamento reológico (Vliet & Lyklema, 2005).

2.2.2. Fluidos não-Newtonianos

A Lei de Newton para viscosidade, expressa pela (4, se restringe para um determinado número de fluidos, pois existem materiais que, sob escoamento dirigido por cisalhamento, apresentam comportamento distinto do previsto por Newton.

Segundo Vliet & Lyklema (2005), um fluido é dito não-newtoniano quando a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento não é linear. Neste caso, uma viscosidade, denominada viscosidade aparente, é obtida para cada taxa de cisalhamento considerada.

Estes fluidos, em geral, encontram-se divididos em três grupos, classificados de acordo com o seu comportamento:

- fluidos independentes do tempo - são aqueles cuja viscosidade depende somente da taxa de cisalhamento;
- fluidos dependentes do tempo - a viscosidade depende não só da taxa, mas também do tempo de cisalhamento;
- fluidos viscoelásticos - apresentam características tanto de sólidos (elasticidade) quanto de líquidos (viscosidade) e exibem uma recuperação elástica parcial após a deformação.

Os fluidos independentes do tempo são subdivididos em: pseudoplásticos, dilatantes e binghamianos [Van Wazer *et al* (1966); Tanner (1988); Fox &

McDonald (1998); Machado (2002); Vliet & Lyklema (2005)], conforme apresentado na Figura 5.

- Fluidos pseudoplásticos - caracterizam-se pela diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação. Geralmente, começam a escoar sob a ação de tensões de cisalhamento infinitesimais, não havendo a presença de uma tensão residual. No entanto, alguns fluidos podem apresentar uma tensão inicial, a partir da qual o comportamento reológico passa a ser semelhante ao dos pseudoplásticos (Toneli *et al*, 2005). De acordo com Vidal-Bezerra (2000), esse comportamento pode ser explicado pela modificação da estrutura de cadeias longas de moléculas. Com o aumento do gradiente de velocidade, essas cadeias tendem a se alinhar paralelamente às linhas de corrente, diminuindo a resistência ao escoamento.
- Fluidos dilatantes - apresentam um comportamento contrário aos fluidos pseudoplásticos. Neste caso, a viscosidade aparente cresce com o aumento da taxa de deformação. Conforme descrito por Machado (2002), a dilatância nos líquidos é muito rara, no entanto, este tipo de comportamento pode ser evidenciado em suspensões altamente concentradas, cujas partículas constituintes são irregulares e não se orientam facilmente.
- Fluidos viscoplásticos ou binghamianos - fluidos que se comportam como sólido até que uma tensão mínima, chamada de tensão de escoamento, seja excedida; em seguida, a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento torna-se linear. Na maioria das vezes esses fluidos são dispersões que podem formar uma rede interpartículas mantida por forças ligantes em repouso. Essas forças restringem mudanças de posição dos elementos, resultando em um material de caráter sólido com alta viscosidade. As forças externas, se menores do que aquelas que formam a rede, deformam elasticamente o material sólido. Somente quando as forças externas são grandes o suficiente para superar as forças de ligação entre as partículas é que a estrutura entra em colapso. Quando isso acontece, os elementos podem mudar de posição irreversivelmente, isto é, o sólido se transforma em um líquido (Bird *et al*, 1983).

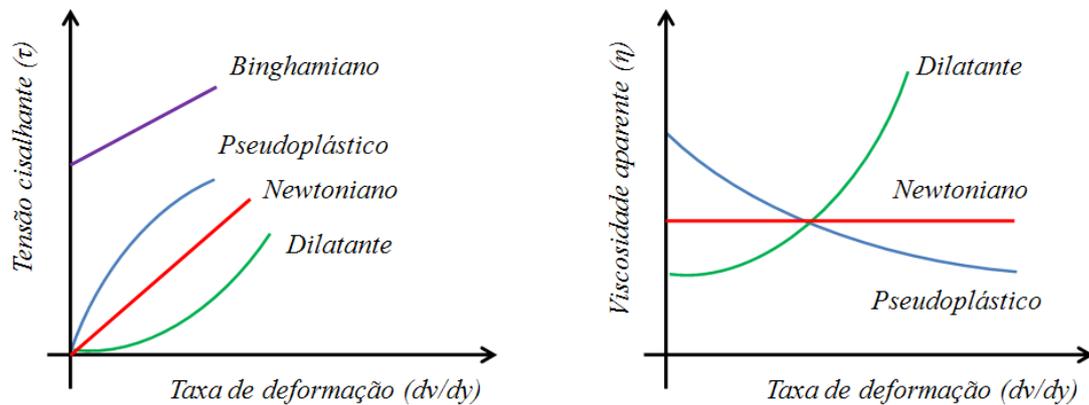


Figura 5 - Comportamento reológico dos fluidos independentes do tempo
(Adaptado de Fox & McDonald, 1998)

Diversas relações empíricas têm sido desenvolvidas para estabelecer um modelo matemático que melhor represente as relações observadas entre a tensão e a taxa de cisalhamento para fluidos independentes do tempo. Algumas destas equações estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Equações, modelos e parâmetros reológicos para fluidos não-newtonianos independentes do tempo (Adaptado de Machado, 2002)

Modelo	Equação	Parâmetros
Newton	$\tau = \mu \dot{\gamma}$	μ -viscosidade absoluta $\dot{\gamma}$ -taxa de cisalhamento
Bingham	$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_o$	η -viscosidade aparente τ_o -tensão de escoamento $\dot{\gamma}$ -taxa de cisalhamento
Ostwald	$\tau = K \dot{\gamma}^n$	K -índice de consistência n -índice de comportamento $\dot{\gamma}$ -taxa de cisalhamento
Herschell-Buckley	$\tau = K \dot{\gamma}^n + \tau_o$	K -índice de consistência n -índice de comportamento $\dot{\gamma}$ -taxa de cisalhamento τ_o -tensão de escoamento

Os fluidos dependentes do tempo são subdivididos em: reopéticos e tixotrópicos [Van Wazer *et al* (1966); Tanner (1988); Fox & McDonald (1998); Machado (2002); Vliet & Lyklema (2005)].

- Fluidos tixotrópicos - a tensão de cisalhamento, ou viscosidade diminui com o tempo de aplicação de uma taxa de cisalhamento devido à ocorrência de mudanças reversíveis na microestrutura do fluido.

Geralmente, na ausência do cisalhamento, a estrutura é reconstruída e o sistema volta a adquirir sua viscosidade inicial (Cussot *et al*, 2002a). Segundo Correia (2006), a curva de tixotropia é similar à da pseudoplasticidade uma vez que a viscosidade aparente diminui à medida que a taxa de deformação aumenta. Difere dela, porém, quando a viscosidade aparente não depende só da taxa de cisalhamento, mas também do tempo.

- Fluidos reopéticos - são semelhantes a fluidos dilatantes, sendo caracterizados por um aumento na viscosidade relacionado com o tempo de duração do cisalhamento. Quando deixados em repouso atingem baixos níveis de viscosidade. Segundo Mothé (2009), a reopexia é um espessamento dependente do tempo.

De acordo com Van Wazer *et al* (1966) o escoamento pseudoplástico (sem limite de escoamento) resulta de um comportamento tixotrópico imediatamente concluído (exibindo um intervalo de tempo infinitamente curto para ir do valor de viscosidade inicial para um valor de viscosidade limite final), enquanto que o escoamento dilatante resulta do comportamento reopético também imediatamente concluído.

Em uma análise inicial, os fluidos viscoplásticos poderiam ser considerados com um comportamento tixotrópico, uma vez que apresentam uma “viscosidade infinita” até que seja superada a tensão de escoamento, quando essa viscosidade diminui e o material começa a fluir (Cussot *et al*, 2002b).

No entanto, Tanner (1988) distingue bem os dois comportamentos através da introdução do termo “corpo falso”. Segundo este autor, o verdadeiro material tixotrópico se rompe completamente sob a influência de altas tensões de cisalhamento e se comporta como um líquido, mesmo após a retirada da tensão aplicada, até que se atinja o tempo necessário para a reestruturação do material. Por outro lado, os materiais de “corpo falso” não perdem suas propriedades sólidas por completo e ainda podem exibir uma tensão de escoamento, embora ela possa ser reduzida.

2.3. Medição das propriedades reológicas

Para fluidos newtonianos a viscosidade é obtida através de uma única medida de tensão de cisalhamento e a correspondente taxa de deformação. Porém uma única medida não é suficiente para identificar um fluido como newtoniano. São necessários vários dados de tensão de cisalhamento e as correspondentes taxas de deformação, para então avaliar o comportamento de um fluido e adotar um modelo reológico (Vidal-Bezzerá, 2000).

Os equipamentos utilizados para medir as grandezas que definem o comportamento reológico de um material são chamados de viscosímetros ou reômetros. Segundo Van Wazer et al (1966), os reômetros são instrumentos projetados para medir propriedades viscoelásticas de sólidos, semi-sólidos, e fluidos, ao passo que os viscosímetros são instrumentos de aplicação mais limitada, uma vez que medem apenas os parâmetros viscosos do fluido sob cisalhamento contínuo.

2.3.1. Viscosimetria

A viscosimetria é um segmento da mecânica dos fluidos que consiste na prática experimental de medir a resposta reológica dos fluidos, considerados puramente viscosos, onde a componente elástica pode ser desprezada. Ela consiste na medida de grandezas físicas, tais como velocidade angular, torque, ângulo de deflexão, tempo, etc., que possam ser transformadas em unidades de tensão e de taxa de cisalhamento, conseqüentemente, de viscosidade, através de equações deduzidas a partir dos princípios e leis da mecânica clássica (Machado, 2002).

Existem quatro tipos básicos de viscosímetros:

- Viscosímetro capilar - a viscosidade é medida pela velocidade de escoamento do líquido através de um capilar de vidro, sendo esta última calculada a partir do tempo de escoamento do líquido entre duas marcas feitas no viscosímetro.
- Viscosímetro de orifício - a viscosidade é medida pelo tempo que um volume fixo de líquido gasta para escoar através de um orifício existente no fundo de um recipiente.

- Viscosímetro rotacional - a viscosidade é medida pela velocidade angular de uma parte móvel separada de uma parte fixa pelo líquido. Nos viscosímetros de cilindros concêntricos, a parte fixa é, em geral, a parede do próprio recipiente cilíndrico onde está o líquido. A parte móvel pode ser no formato de palhetas ou um cilindro. Nos viscosímetros de cone-placa, um cone é girado sobre o líquido colocado entre o cone e uma placa fixa.
- Viscosímetro de esfera - a viscosidade é medida pela velocidade de queda de uma esfera dentro de um líquido colocado em um tubo vertical de vidro.

A escolha do tipo de viscosímetro a ser utilizado depende do propósito da medida e do tipo de líquido a ser investigado. O viscosímetro capilar não é adequado para líquidos não newtonianos, pois não permite variar a tensão de cisalhamento, mas é bom para líquidos newtonianos de baixa viscosidade. O viscosímetro rotacional é o mais indicado para estudar líquidos não-newtonianos. O viscosímetro de orifício é indicado nas situações onde a robustez do instrumento e a facilidade de operação são mais importantes que a precisão e a exatidão na medida, por exemplo, nas fábricas de tinta, adesivos e óleos lubrificantes.

2.3.2. Reometria

Os reômetros são os instrumentos mais amplamente utilizados para medir as propriedades reológicas dos fluidos. Tais equipamentos podem apresentar diferentes configurações, nas quais as mais comuns são: sistemas capilares e sistemas rotacionais (Klein, 1992).

Nos sistemas capilares, o fluido escoar no interior de um tubo de seção circular, devido à diferença entre as pressões de entrada e saída do mesmo, que podem ser geradas pela gravidade ou por outros meios mecânicos (Vliet & Lyklema, 2005).

Os sistemas rotacionais, por sua vez, baseiam-se na rotação de um corpo cilíndrico, cônico ou circular, imerso em um líquido, o qual experimenta uma

força de resistência viscosa quando se impõe uma velocidade rotacional ao sistema (Schramm, 1998).

De acordo com Vidal-Bezzera (2000), as principais vantagens na utilização dos reômetros rotacionais quando comparados aos capilares é que esses equipamentos permitem o uso de pequenas amostras de produtos e podem fornecer uma medida contínua da relação taxa de deformação e tensão de cisalhamento, e uma faixa mais ampla da taxa de deformação, permitindo também uma análise mais adequada de comportamentos dependentes do tempo.

De um modo geral, os equipamentos rotacionais podem ser classificados em relação à variável controlada (tensão ou deformação controlada) e em relação à geometria do sensor (cilindros coaxiais, cone-placa e placa-placa, ilustrados na Figura 6). Quando os sensores são cilíndricos e concêntricos existem ainda dois tipos de sistemas: Searle e Couette.

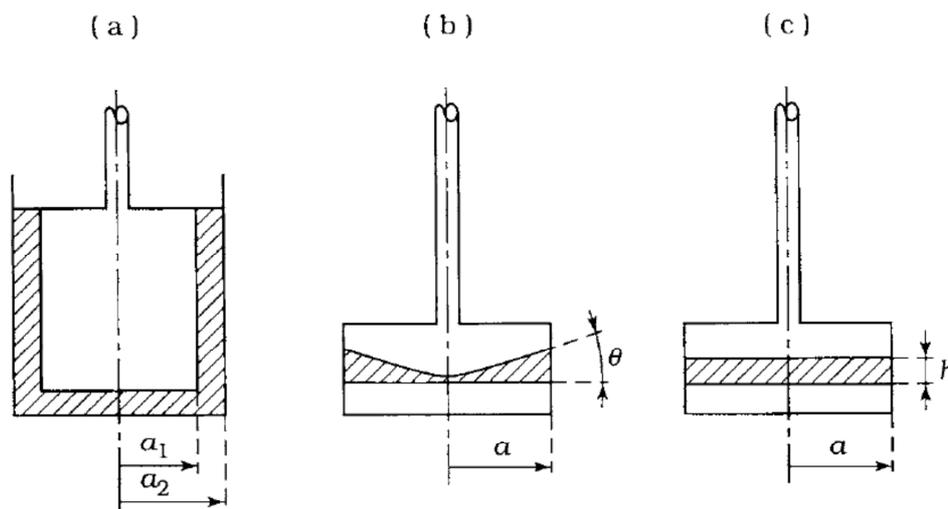


Figura 6 - Diferentes geometrias apresentadas pelos reômetros rotacionais: a) cilindros coaxiais; b) cone-placa; c) placa-placa (Vliet & Lyklema, 2005)

Nos reômetros de tensão controlada impõe-se uma tensão pré-definida e determina-se a taxa de cisalhamento resultante, já no caso dos reômetros de deformação controlada, ocorre exatamente o contrário, ou seja, uma taxa de cisalhamento é imposta e a tensão resultante é determinada.

No sistema Searle o cilindro interno gira a uma velocidade definida, forçando o líquido presente no espaço entre os dois cilindros a escoar. A resistência natural do líquido resulta em um torque atuando no cilindro interno que se contrapõe ao torque motor do equipamento. Um elemento sensível ao

torque, normalmente uma mola de torção, é posicionada entre o motor e o corpo interno, e a sua deformação resulta na medida direta do torque ou da tensão cisalhante.

No sistema Couette, o cilindro externo é quem gira a uma velocidade definida, provocando um fluxo na amostra do líquido entre os dois cilindros. A resistência do líquido cisalhado transmite um torque ao cilindro interno, que é induzido a girar. Como o cilindro interno está fixo a uma mola de torção, então esta se deforma até o estado de equilíbrio. Portanto, o torque é medido justamente pela determinação do contra-torque que mantém o cilindro interno estático.

Uma vez escolhido o sistema a ser utilizado, Mothé (2009) e Correia (2006) destacam a existência de três maneiras para realizar testes reológicos: em regime permanente, em regime oscilatório e em regime transiente. Segundo as referidas autoras, tais maneiras diferenciam-se quanto ao modo de aplicação da deformação à amostra.

Em regime permanente utiliza-se a rotação contínua para aplicar uma deformação e fornecer uma taxa de deformação ou taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) constante. Quando uma taxa de cisalhamento constante é atingida, mede-se a tensão de cisalhamento (τ) correspondente e a razão $\tau / \dot{\gamma}$ fornece a viscosidade em regime permanente de cisalhamento η ($\dot{\gamma}$). Esse tipo de medida fornece informações importantes sobre tensão crítica, viscosidade, comportamentos pseudoplástico e tixotrópico e prediz como materiais se comportam em situações reais como bombeamento, agitação e extrusão.

Os testes dinâmicos, em regime oscilatório, relacionam a velocidade angular ou frequência imposta com a tensão ou deformação oscilatória resultante. Normalmente eles são realizados em um vasto intervalo de velocidades ou frequências, sendo que as amostras não são perturbadas mecanicamente nem as suas estruturas internas são rompidas, as amostras são investigadas com as estruturas em repouso.

Os ensaios transientes são realizados na faixa de viscoelasticidade linear, região onde as propriedades do material não são influenciadas pelas condições do ensaio (ex. tensão aplicada). Tal região é determinada através de testes de varredura da amplitude de tensão a uma frequência constante (Oliveira, 2010).

2.4. Reologia do concreto fresco

De acordo com Ferraris (1999), o concreto pode ser entendido como uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento). Por sua vez, a pasta de cimento não se configura como um líquido homogêneo, sendo composta por partículas (grãos de cimento) e um líquido (água).

Em uma escala macroscópica, o concreto fresco flui como um líquido (Ferraris *et al*, 2001). Assim, conforme ressaltado por Castro (2007) e Reis (2008), nada mais adequado do que buscar os conceitos da reologia, para se estudar o comportamento do concreto no estado fresco.

Segundo Banfill (2006), o modelo que melhor descreve esse comportamento é o de Bingham, ou seja, o concreto precisa de uma tensão inicial diferente de zero para que o material mude do comportamento de um sólido para o comportamento de um líquido, onde ocorre o início do escoamento.

Conforme apresentado por Vyalov (1986), o modelo reológico binghamiano também descreve adequadamente o comportamento dos solos sobre um estado permanente de tensão.

Assim, tanto os solos quanto o concreto exigem a determinação de dois parâmetros reológicos para sua completa caracterização: a viscosidade e a tensão de escoamento.

Ferraris (1999) destaca que a determinação dos dois parâmetros reológicos permite a diferenciação imediata de concretos que poderiam ser erroneamente considerados idênticos, conforme ilustrado na Figura 7, se apenas um dos parâmetros fosse determinado.

Embora necessária, a determinação dos dois parâmetros é mais difícil e os ensaios mais comuns medem apenas um parâmetro reológico. A Tabela 2 apresenta um resumo dos ensaios e equipamentos existentes para medir os parâmetros reológicos do concreto no estado fresco.

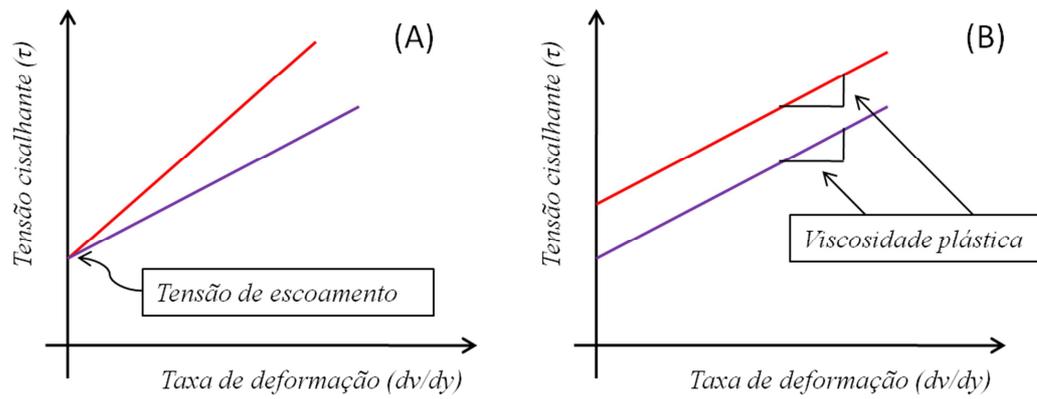
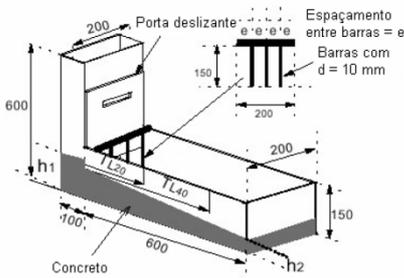


Figura 7 - Reologia do concreto: a) mesma tensão de escoamento e diferentes viscosidades; b) mesma viscosidade e diferentes tensões de escoamento (Adaptado de Ferraris, 1999)

Tabela 2 - Resumo dos ensaios e equipamentos existentes para medir os parâmetros reológicos do concreto no estado fresco (Adaptado de Reis, 2008)

Ensaio	Ilustração	Parâmetro
Abatimento de tronco de cone		Tensão de escoamento
Penetração (Kelly ball, Vicat, ensaio de Wigmore)		Tensão de escoamento
Viscosímetro de tubo rotativo		Tensão de escoamento

Ensaio de K-slump	 A photograph showing a K-slump test apparatus. It consists of a cylindrical metal rod with a flat base, used to measure the consistency of fresh concrete by determining the depth of the slump.	Tensão de escoamento
Consistômetro de Vê-Be	 A photograph of a Vê-Be consistency meter, a mechanical device used to measure the plastic viscosity of concrete by rotating a spindle in a sample.	Viscosidade plástica
Cone de escoamento (cone de Marsh)	 A photograph of a Marsh cone apparatus, which is a funnel-shaped device used to measure the flow time of a concrete sample under a specific load to determine its plastic viscosity.	Viscosidade plástica
Caixa L	 A technical diagram of the Caixa L apparatus. It shows a rectangular box with dimensions: height 600, length 600, and width 100. The top part has a height of 150 and a width of 200. A sliding door is labeled 'Porta deslizante'. The bottom part has a height of 150 and a width of 200. The base is labeled 'Concreto'. A detail shows 'Barras com d = 10 mm' with an 'Espaçamento entre barras = e'.	Viscosidade plástica
Aparelhagem de Orimet	 A photograph of the Orimet apparatus, a mechanical device used to measure the plastic viscosity of concrete by rotating a spindle in a sample.	Viscosidade plástica
Two point workability test	 A photograph of a yellow two-point workability test apparatus, which is used to measure the flow and spreading of concrete under a specific load.	Viscosidade e tensão de escoamento

Reômetros		Viscosidade e tensão de escoamento
Ensaio de abatimento de tronco de cone modificado		Viscosidade e tensão de escoamento

2.5. Reologia de solos

De um modo geral, a mecânica dos solos clássica assume que o solo é um material: perfeitamente plástico, quando problemas de estabilidade são analisados; pseudo-elástico, quando estimativas de deformação sob um dado carregamento são requeridas; e elasto-plástico, quando projetos são desenvolvidos (Keedwell, 1984).

Diante de tantas possibilidades, na tentativa de encontrar uma única solução para problemas práticos, a ser utilizada em cálculos de deformação e estabilidade, Keedwell (1984) propôs o estudo das propriedades reológicas do solo para que um modelo mais adequado fosse então determinado.

Segundo Vyalov (1986), a reologia dos solos pode ser entendida como um ramo da mecânica dos solos que trata de investigar não só a origem como também as mudanças dependentes do tempo provocadas no estado de tensões e deformações do solo.

Após uma análise profunda da relação entre as taxa de tensão e deformação para diversos solos, Vyalov (1986) concluiu que o modelo reológico de Bingham (viscoplástico) poderia descrever o comportamento dos solos sob estado permanente de tensões. No entanto, é válido ressaltar que tal comportamento já havia sido matematicamente proposto por Gupta & Pandya (1966).

Desde então, o comportamento viscoplástico do solo tem sido reportado em diversos estudos [Ghezzehei & Or (2001); Spira *et al* (2005); Karmakar & Kushwaha (2007); Karin & Gnanendran (2008); Abdullan (2011)].

Ghezzehei & Or (2001) estudaram as propriedades reológicas de solos com diferentes teores de umidade sob estado permanente e oscilatório de tensões. Os resultados encontrados, oriundos de ensaios realizados em um reômetro rotacional com placas paralelas apresentaram, para baixas umidades e rápidos carregamentos, um aumento na componente elástica da deformação, indicando um comportamento viscoelástico sob estado oscilatório de tensões. Ao passo que os ensaios sob um estado permanente, realizados em solos com elevadas umidades, ratificaram o comportamento viscoplástico proposto por Vyalov (1986).

Spira *et al* (2005) retrataram os benefícios obtidos com a modelagem avançada do solo, através da consideração de parâmetros viscoplásticos, na simulação numérica da interação solo-estrutura para a execução de um túnel.

Karmakar & Kushwaha (2007) desenvolveram um reômetro motorizado, apresentado na Figura 8, baseado no *vane test*, para determinar os parâmetros viscoplásticos do solo. Medidas reológicas foram executas em solos com diferentes teores de umidade e diferentes graus de compactação no intuito de analisar os seus efeitos na viscosidade e tensão de escoamento. Foi observado que a tensão de escoamento é diretamente proporcional ao grau de compactação enquanto que a viscosidade é inversamente proporcional à umidade.

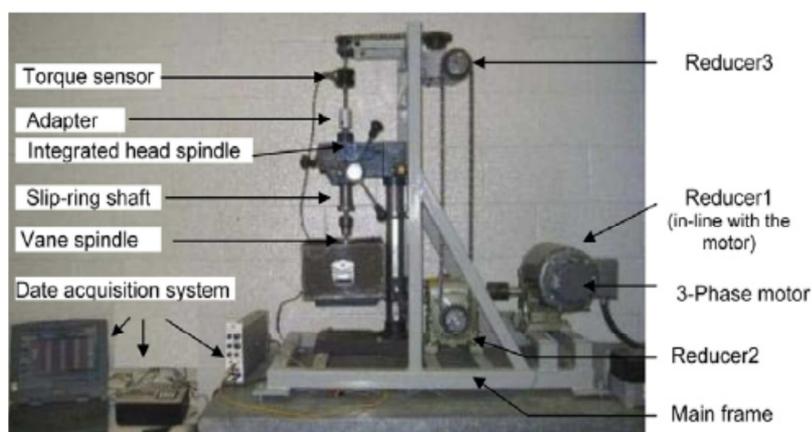


Figura 8 - Reômetro motorizado desenvolvido por Karmakar & Kushwaha (2007)

Karin & Gnanendran (2008) apresentaram uma revisão dos modelos viscoplásticos que são utilizados para modelagem dos solos quando do estudo da previsão de recalques de solos moles.

Abdullan (2011) explicou os resultados das análises viscoplásticas, feitas em elementos finitos, para alguns problemas de geotecnia, apresentando também uma solução para problemas complexos onde as grandezas dentro do domínio do solo são dominadas por tensões de tração e apresentam mudanças bruscas na tensão de cisalhamento.

No que tange a determinação dos parâmetros reológicos de solos, diversas investigações realizadas em trabalhos voltados para o estudo de corridas de massa [O'Brien & Julien (1988); Julien & León (2000); Egashira *et al* (2001); Huang & Aode (2009); Boniello *et al* (2010)] mostraram que a viscosidade e a tensão de escoamento crescem exponencialmente com a concentração de sedimentos (C_v), conforme indicado nas Equações 5 e 6 e ilustrado nas Figuras 9 e 10.

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (5)$$

$$\tau = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (6)$$

*Onde $C_v = V_s$ (volume de sedimentos)/ V_t (volume de água mais sedimentos)

Os valores dos quatro coeficientes empíricos (α_1 , α_2 , β_1 , β_2), apresentados na Tabela 3, foram determinados por O'Brien & Julien (1988) através de retroanálises de corridas de massa ocorridas nas cidades de Aspen e Glenwood, ambas localizadas no estado do Colorado, nos Estados Unidos.

Tabela 3 - Viscosidade e tensão de escoamento como função da concentração de sedimentos (Adaptado de O'Brien & Julien, 1988)

Material	$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$		$\tau = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$	
	α_1 (Pa.s)	β_1	α_2 (Pa)	β_2
Aspen Pit 1	$3,60 \times 10^{-3}$	22,10	$1,81 \times 10^{-2}$	25,70
Aspen Pit 2	$5,38 \times 10^{-3}$	14,50	$2,72 \times 10^{-1}$	10,40
Aspen Natural Soil	$1,36 \times 10^{-4}$	28,40	$1,52 \times 10^{-2}$	18,70
Aspen Mine Fill	$1,28 \times 10^{-2}$	12,00	$4,73 \times 10^{-3}$	21,10
Aspen Natural Soil Source	$4,95 \times 10^{-5}$	27,10	$3,83 \times 10^{-3}$	19,60
Aspen Mine Source	$2,01 \times 10^{-5}$	33,10	$2,91 \times 10^{-2}$	14,30
Glenwood 1	$2,83 \times 10^{-3}$	23,00	$3,45 \times 10^{-3}$	20,10
Glenwood 2	$6,48 \times 10^{-2}$	6,20	$7,65 \times 10^{-3}$	16,90
Glenwood 3	$6,32 \times 10^{-4}$	19,90	$7,07 \times 10^{-5}$	29,80
Glenwood 4	$6,02 \times 10^{-5}$	33,10	$1,72 \times 10^{-4}$	29,50

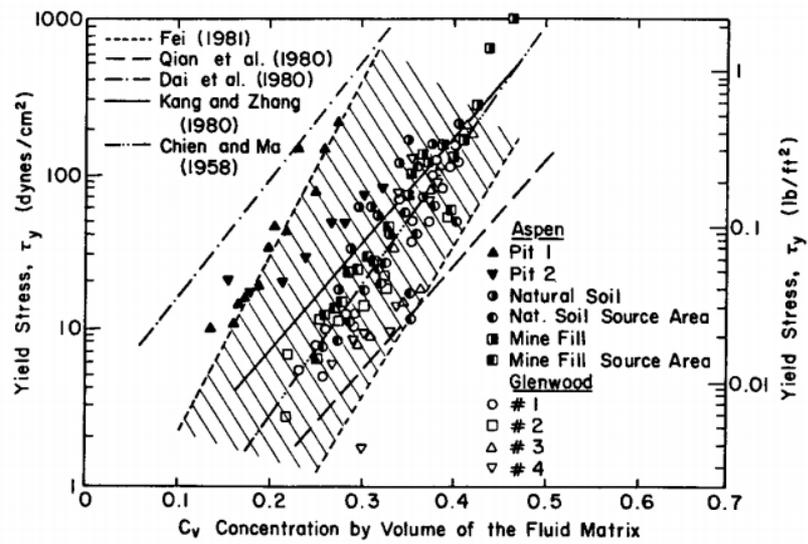


Figura 9 - Correlação entre a tensão de escoamento e a concentração de sedimentos (O'Brien & Julien, 1988)

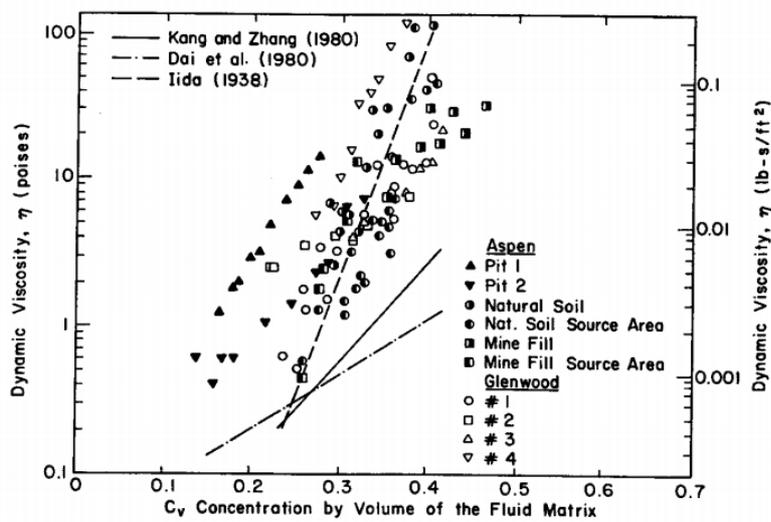


Figura 10 - Correlação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos (O'Brien & Julien, 1988)