



Pós Graduação Lato Sensu

Engenharia de Movimentação de
Fluidos e Equipamentos Industriais



Água



Mel

Fundamentos da Mecânica dos Fluidos

Micelli R. Camargo

Fundamentos da Mecânica dos Fluidos

**Da Física do Escoamento ao Dimensionamento de
Sistemas Industriais**

Micelli Rodrigues Camargo

São Paulo, 18 de Fevereiro de 2026

Direitos autorais e edição

© 2026 Micelli Rodrigues Camargo. 1ª edição. São Paulo, Brasil.

Editor/Selo: Edição do Autor (Micelli Camargo) • Engenharia & Cia – Publicações Técnicas.

Esse material foi elaborado para apoio aos alunos da Pós-Graduação Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução por quaisquer meios sem autorização do detentor dos direitos, exceto nos casos previstos em lei.



Créditos

- ✓ Capa e projeto gráfico: Micelli R. Camargo
- ✓ Revisão técnica: Micelli R. Camargo
- ✓ Diagramação: Micelli R. Camargo

Índice:

APRESENTAÇÃO	9
ORGANIZAÇÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO	10
APOIO INSTITUCIONAL	11
OBJETIVOS	11
1. PROPRIEDADES DOS FLUIDOS	12
1.1. Conceito técnico de fluido	12
1.1.1. A Hipótese do Fluido Como Contínuo	12
1.1.2. O Princípio da Aderência	13
1.1.3. A Experiência das Duas Placas	13
1.1.4. Definição de Fluido	14
1.2. Lei de Newton da Viscosidade	15
1.3. Massa Específica (ρ):	16
1.4. Peso Específico (γ):	17
1.5. Gravidade Específica (SG) ou Densidade Relativa:	17
1.6. Viscosidade Dinâmica (μ) ou absoluta:	17
1.7. Viscosidade Cinemática (ν) ou Viscosidade Relativa:	18
1.8. Viscosidade Aparente	18
1.9. Tipos de Fluidos	19
1.9.1. Conceitos Fundamentais:	19
1.9.1.1. Reologia	19
1.9.1.2. Deformação por Cisalhamento	19
1.9.1.3. Taxa de Deformação	20
1.9.1.4. Taxa de Cisalhamento	20
1.9.1.5. Gradiente de Velocidades	21
1.9.2. Fluidos newtonianos	21
1.9.3. Fluidos não-newtonianos	22
1.9.3.1. Pseudoplásticos (Shear Thinning)	23
1.9.3.2. Dilatantes (Shear Thickening)	24
1.9.3.3. Fluidos Plásticos (com Tensão de Escoamento)	26
1.9.3.4. Fluidos Tixotrópicos	27
1.9.3.5. Fluidos Reopéticos	29
1.9.3.6. Fluidos Viscoelásticos	30
1.10. Tensão superficial	32
1.10.1. Pressão Capilar (Lei de Laplace)	33
1.10.2. Capilaridade	33

2. Estática dos Fluidos	36
2.1. Conceito de Pressão (p)	36
2.1.1. Unidades Adicionais	36
2.1.2. Equivalências	37
2.2. Pressão Absoluta (pabs)	37
2.3. Pressão Atmosférica	37
2.3.1. Dependência com a Altitude	38
2.3.2. Fórmula Prática para Engenharia	38
2.3.3. Formas Simplificadas	38
2.3.4. Importância Prática	38
2.4. Pressão Relativa ou Pressão Efetiva	39
2.5. Escala de Pressão: Absoluta versus Efetiva	39
2.6. Princípio de Stevin (Pressão Hidrostática)	40
2.7. Carga de Pressão (h)	41
2.7.1. Influência da Altura do Manômetro na Leitura	42
2.8. Vasos comunicantes	43
2.8.1. Aplicações Práticas	44
2.9. Medidores de Pressão Tradicionais	44
2.9.1. Piezômetro	45
2.9.2. Manômetro em U	45
2.9.3. Manômetro de Bourdon	47
3. Cinemática dos Fluidos	49
3.1. Perfil de Velocidades	49
3.2. Escoamento Unidimensional ou Uniforme na Seção	49
3.3. Velocidade Média	50
3.4. Escoamento em Regime Permanente	51
3.5. Regime Não-Permanente ou Regime Transitório	52
3.6. Escoamento Laminar	52
3.7. Escoamento Turbulento	53
3.8. Escoamento de Transição	54
3.9. O Número de Reynolds (Re)	55
3.10. Número de Mach	56
3.11. Escoamento Incompressível	57
3.12. Escoamento Compressível	58
3.13. Vazão Volumétrica (Q):	59
3.14. Vazão mássica ou em massa (m)	60

3.15.	Sistemas e Volume de Controle	61
3.16.	Equação da Continuidade e a Lei da Conservação da Massa	62
3.17.	Conceito de Jato Livre	63
3.18.	Reservatório de Grandes Dimensões	63
4.	A Equação da Energia.....	64
4.1.	Energia Mecânica do Fluido (E) associadas aos líquidos	64
4.1.1.	Energia Potencial (E_{pot})	65
4.1.2.	Energia Cinética (E_{cin})	65
4.1.3.	Energia de Pressão (E_{pr})	65
4.2.	Altura de Energia (H).....	66
4.2.1.	Altura de Energia Potencial (H_{pot}).....	66
4.2.2.	Altura de Energia Cinética (H_{cin})	66
4.2.3.	Altura de Energia de Pressão (H_{pr}).....	66
4.3.	Apresentando a Equação da Energia.....	66
4.3.1.	Fluido Ideal e a Equação de Bernoulli	67
4.3.2.	Equação de Bernoulli na presença de uma Bomba	67
4.3.3.	Conceito de Perda de Carga.....	68
4.3.4.	Equação da Energia para Líquidos Reais	69
4.3.5.	Aplicação da Equação da Energia	69
4.4.	Equação da Energia Aplicada aos Gases	70
4.4.1.	Energia Mecânica em Gases	70
4.4.2.	Equação da Energia para Gases	70
4.5.	Potência Hidráulica (P_h)	71
4.6.	Rendimento da máquina (η_m).....	72
4.7.	Potência de Eixo (P_e)	72
5.	Cálculo de Perda de Carga	73
5.1.	Classificação de Condutos	73
5.1.1.	Conduto Forçado.....	73
5.1.2.	Conduto Livre	73
5.2.	Raio Hidráulico	73
5.3.	Diâmetro Hidráulico (D_H)	74
5.4.	Camada Limite	74
5.5.	Camada Limite em Condutos Forçados.....	75
5.6.	Rugosidade Uniforme (ε) e a Rugosidade Equivalente (K).....	75
5.7.	Rugosidade Relativa	76
5.8.	Classificação das Perdas de Carga	76

5.9. Perda de Carga Distribuída (Hd)	76
5.9.1. Método da Equação de Darcy-Weisbach	77
5.9.2. Obtendo o fator f	78
5.9.2.1. Escoamento Laminar	78
5.9.2.2. Escoamento Turbulento	79
5.9.2.2.1. Diagrama de Moody-Rouse	79
5.9.2.2.2. Equação de Colebrook-White	80
5.9.2.2.3. Equação de Swamee e Jain	81
5.9.3. Método das Fórmulas Empíricas	82
5.9.4. Método da Carga de Pressão por Comprimento de Tubo	82
5.10. Cálculo de Perda de Carga Localizada (HL)	83
5.10.1. Método de Cálculo pelo Comprimento Equivalente	84
5.10.2. Método de Cálculo Pelo Coeficiente k_s	85
5.11. Perda de Carga por Aceleração e Desaceleração em Bombas Alternativas	86
6. MODELOS MATEMÁTICOS PARA FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS	88
6.1. Introdução	88
6.2. Modelo da Lei da Potência (Ostwald-de Waele)	88
6.2.1. Viscosidade Aparente	88
6.2.2. Taxa de Cisalhamento na Parede do Tubo	89
6.2.3. Número de Reynolds Generalizado	89
6.3. Modelo de Bingham	90
6.3.1. Viscosidade aparente	90
6.3.2. Taxa de cisalhamento na parede	90
6.3.3. Gradiente de Pressão em Regime Laminar	91
6.3.4. Região de Núcleo (Plug Flow)	91
6.3.5. Número Hedstrom	91
6.3.6. Determinação do Fator de Atrito	92
6.3.7. Condição para Existência de Escoamento	92
6.3.8. Considerações sobre o Regime Turbulento	92
6.4. Modelo de Herschel-Bulkley	92
6.4.1. Viscosidade Aparente	93
6.4.2. Taxa de Cisalhamento na Parede	93
6.4.3. Número de Reynolds Generalizado	93
6.4.4. Determinação do Fator de Atrito (Regime Laminar)	94
6.4.5. Considerações sobre o Regime Turbulento	94
6.5. Considerações Finais	95

7. INTRODUÇÃO AOS ESCOAMENTOS TRANSITÓRIOS	96
7.1. Conceito de Escoamento Transitório	96
7.2. Principais Fenômenos Transitórios	96
7.2.1. Golpe de Ariete (Water Hammer)	96
7.2.2. Separação e Colapso de Coluna	97
7.3. Fórmula de Joukowski	97
7.4. Considerações Finais	98
8. ANEXO	102
8.1. Escoamento por Gravidade – Instalação Sem Bomba	102
8.2. Escoamento por Gravidade: Aproximação Empírica para Água – Fórmula de Hazen–Williams ...	104
8.3. Linhas de Energia e Linha Piezométrica	105
8.3.1. Conceito de carga total	105
8.3.2. Linha Piezométrica – HGL (Hydraulic Grade Line)	105
8.3.3. Linha de Energia – EGL (Energy Grade Line)	106
8.3.4. Como as linhas se comportam em um sistema real	106
8.3.5. Linha Piezométrica e Perfil do Terreno	107
8.4. Tubo de Pitot e Pitot–Estático	107
8.4.1. Princípio Físico	108
8.4.2. Tubo de Pitot	108
8.4.3. Tubo de Pitot–Estático	108
8.4.4. Aplicação na Determinação da Vazão	109
8.4.5. Aplicação com Sondas Eletrônicas	109
8.5. Medição de Vazão com uso da Equação de Bernoulli	109
8.5.1. Ideia física	110
8.5.2. Desenvolvimento Geral	110
8.5.3. Medidor Venturi	111
8.5.4. Placa de Orifício	111
8.6. Tabelas	112
8.6.1. Pressão Atmosférica em Função da Altitude	112
8.6.2. Pressão de Vapor da Água	112
8.6.3. Rugosidade Equivalente	113
8.6.4. Perda de Carga Localizada	114
9. Bibliografia	100
9.1. Bibliografia Básica	100
9.2. Bibliografia Complementar	100

Sobre o Autor e Coordenador do Curso

Formação Acadêmica

Micelli Camargo é Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Mestre em Ciência pela Universidade de São Paulo (USP/IPEN) na área de Tecnologia Nuclear, com especialização em Didática do Ensino Superior (Uniderp) e MBA Executivo em Marketing (FGV).



Experiência Profissional

Possui mais de 20 anos de experiência profissional, sendo 16 no setor de bombas e equipamentos industriais. Atuou como consultor e instrutor técnico em empresas de referência, como OMEL, Vallair e Embraseal, nas áreas de vendas técnicas, aplicação de equipamentos e treinamentos.

Atuação como Professor e Coordenador de Curso

Com mais **de 25 anos de experiência docente**, lecionou Engenharia Mecânica em universidades de São Paulo. Atualmente dedica-se a cursos técnicos e treinamentos especializados para engenheiros e profissionais da indústria e à coordenação do curso de [Pós Graduação Lato Sensu Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais](#), até então, inédita no Brasil

Engenharia & Cia

Em 2016, fundou o canal Engenharia & Cia, que hoje conta com mais de 50.000 inscritos no YouTube e 130.000 no Linked In. Desde então, já treinou mais de 1.200 alunos em cursos presenciais e online, além de desenvolver materiais técnicos e softwares exclusivos, como a Calculadora de Dimensionamento de Bombas.

Missão Profissional

Combinando teoria sólida, prática de campo e experiência docente, Micelli Camargo dedica-se a transformar conhecimento técnico em aprendizado acessível e aplicável, contribuindo para a formação e atualização de engenheiros, técnicos e profissionais da indústria.

 contato@engenhariaecia.com

 www.engenhariaecia.com

WhatsApp: +55 11 95696 7808

APRESENTAÇÃO

A **Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais** foi concebida com um objetivo muito claro: formar profissionais capazes de compreender, analisar, dimensionar e operar sistemas reais de movimentação de fluidos na indústria.

Diferentemente de programas tradicionais, o foco do curso não está na teoria pela teoria, mas na **aplicação prática dos conceitos**, conectando fundamentos físicos à realidade de campo, envolvendo tubulações, bombas, compressores, medições, perdas, transientes e comportamento reológico.

Dentro dessa estrutura, cada disciplina foi pensada como parte de uma sequência lógica de construção de conhecimento, e é exatamente nesse ponto que entra a disciplina **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**.

Ela tem como objetivo estabelecer a base física e matemática necessária para o entendimento e posterior de dimensionamento de sistemas industriais de movimentação de fluidos.

Diferentemente de abordagens puramente teóricas, o foco deste material está na compreensão física dos fenômenos de escoamento e na modelagem matemática aplicada ao contexto de engenharia industrial.

A disciplina busca consolidar os fundamentos que sustentam o cálculo de perda de carga, potência hidráulica, regime de escoamento e comportamento reológico de fluidos newtonianos e não-newtonianos.

Ao longo do curso, são desenvolvidos os conceitos essenciais que permitirão, em etapa posterior, o dimensionamento adequado de tubulações, seleção de bombas e análise de sistemas reais.

A proposta didática privilegia:

- interpretação física antes da formalização matemática;
- abordagem integral em detrimento de formulações diferenciais complexas;
- aplicação direta à engenharia de movimentação de fluidos;
- rigor conceitual sem aprofundamento desnecessário em teoria avançada.

ORGANIZAÇÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO

Este Programa de Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais nasce como resultado de anos de atuação profissional, pesquisa aplicada e prática de campo, aliado a um convênio de cooperação acadêmica e institucional entre organizações de referência nas áreas de engenharia, educação superior e pesquisa científica.

O curso conta como uma parceria acadêmica e institucional estruturada, envolvendo as seguintes entidades, com atribuições claramente definidas:

- **Engenharia e Cia Educacional:**

Empresa especializada em treinamentos técnicos, cursos, softwares e consultoria em engenharia mecânica e industrial, com foco em bombas, equipamentos industriais e sistemas de movimentação de fluidos.

É a responsável pela concepção técnica do curso, definição da grade curricular, coordenação dos conteúdos e orientação prática, assegurando o alinhamento do programa com as demandas reais da indústria.



- **Instituto Sendtko de Ensino Superior:**

é a instituição parceira responsável pela coordenação institucional e intermediação dos trâmites acadêmicos junto à instituição certificadora.

O Instituto Sendtko possui experiência na estruturação de programas de pós-graduação lato sensu reconhecidos pelo MEC.



- **Faculdade de Governança, Engenharia e Educação de São Paulo (FGE-SP):**

é a instituição de ensino superior responsável pelo registro, autorização e certificação do curso junto ao **Ministério da Educação (MEC)**, assegurando a regularidade acadêmica, a validade nacional do diploma e o cumprimento das exigências legais do ensino superior brasileiro.



- **STAR:**

A **Science, Tecnology and Advance Reseach Institute** é instituição de pesquisa e ensino tecnológico registrada nos Estados Unidos que possibilita ao aluno a participação em um Programa de Pós-Bacharelado (Post-Baccalaureate Program), estruturado para o desenvolvimento de projetos técnicos aplicados, construção de portfólio profissional e ampliação da experiência internacional, obtendo assim uma segunda certificação, válida nos Estados Unidos da América.



APOIO INSTITUCIONAL

A Pós-Graduação em Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais conta também com o apoio institucional de empresas atuantes no setor, reforçando seu caráter aplicado, alinhado às demandas reais da indústria e às práticas de campo.

Entre elas:

- **OMEL Bombas e Compressores:**

é uma empresa pioneira no Brasil no campo da tecnologia de bombeamento e controle de fluidos. Genuinamente nacional atuando desde 1952 no mercado e reconhecida pela tecnologia em projetos e qualidade de fabricação de bombas e sistemas especiais para as mais diversas aplicações.

Entre os produtos oferecidos estão bombas centrífugas, bombas de vácuo, bombas dosadoras, sopradores tipo "roots", compressores de anel líquido, rotâmetros, sistemas de Vácuo e válvulas de mangote.



- **Vallair Bombas, Compressores, Instrumentação e Válvulas.**

é uma empresa especializada em bombas de deslocamento positivo, tais como bombas pneumáticas, bombas peristálticas e bombas dosadoras, instrumentos pneumáticos e acessórios para estes produtos.

Também faz parte do escopo de fornecimento da Vallair, produtos e soluções de bombeamento específicos para o setor de energia, petróleo e saneamento, através da distribuição exclusiva de sopradores, bombas centrífugas e dosadoras, bombas de vácuo, válvulas de mangote e rotâmetros da **OMEL**.



OBJETIVOS

Fornecer ao aluno a base conceitual e matemática necessária para compreender e modelar o escoamento de fluidos em sistemas industriais, preparando-o para o dimensionamento hidráulico e seleção de equipamentos.

Ao final da disciplina, o aluno deverá ser capaz de:

- Compreender os conceitos fundamentais da mecânica dos fluidos aplicados à engenharia industrial.
- Interpretar fisicamente o comportamento do escoamento em tubulações.
- Identificar e classificar regimes de escoamento.
- Aplicar corretamente a equação da continuidade e a equação da energia.
- Calcular perdas de carga distribuídas e localizadas.
- Determinar o fator de atrito para diferentes regimes e modelos reológicos.
- Compreender o comportamento de fluidos não-newtonianos sob o ponto de vista matemático.
- Avaliar riscos associados a escoamentos transitórios.
- Reconhecer os limites de aplicação das simplificações adotadas.

1. PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

1.1. Conceito técnico de fluido

As substâncias, como ilustrado na figura seguinte podem se estar em três formas diferentes, a saber:

- Sólido que possui formato e volume definidos
- Líquido que possui formato indefinido e volume definido
- Gasoso (ou vapor) que possuem formatos e volumes indefinidos



Figura 1 - Estados físicos da matéria (Fonte: Hibbeler)

Essa classificação é importante do ponto de vista físico, porém ainda não é suficiente para aplicações em engenharia.

Mas afinal, o que é fluido?

Em termos simples, fluido é toda substância que não é sólida, ou seja, engloba líquidos, gases e vapores.

Contudo, essa definição é meramente descritiva e não permite prever o comportamento do material quando submetido a esforços mecânicos. Para a engenharia, o que importa não é apenas a forma do material, mas como ele reage quando submetido a forças.

1.1.1. A Hipótese do Fluido Como Contínuo

Antes de avançarmos, é necessário introduzir um conceito fundamental da Mecânica dos Fluidos: a hipótese do contínuo.

Embora a matéria seja formada por moléculas, na engenharia consideramos o fluido como um meio contínuo, isto é, ignoramos sua estrutura molecular e assumimos que suas propriedades (massa específica, pressão, temperatura, velocidade, etc.) estão definidas em todos os pontos do espaço.

Isso significa que:

- Podemos falar em pressão em um ponto;
- Podemos definir velocidade em um ponto;
- Podemos aplicar cálculo diferencial para descrever seu comportamento.

Essa hipótese é válida sempre que as dimensões do problema forem muito maiores que o caminho livre médio das moléculas, o que ocorre na grande maioria das aplicações industriais.

Portanto, ao estudar fluidos, tratamos o meio como um contínuo deformável.

1.1.2. O Princípio da Aderência

Antes de avançarmos no desenvolvimento, se faz necessário introduzir o princípio experimental fundamental da Mecânica dos Fluidos, o princípio da aderência.

Esse princípio descreve: "O fluido em contato com uma superfície sólida adere a ela, assumindo exatamente a mesma velocidade da superfície".

Esse princípio também é conhecido como *condição de não deslizamento* ou, do inglês, *No-slip condition*.

A consequência física desse princípio é:

- Se a superfície está parada → o fluido junto à superfície tem velocidade zero.
- Se a superfície está em movimento → o fluido junto à superfície possui a mesma velocidade da superfície.

Essa condição é observada experimentalmente para praticamente todos os fluidos em escoamentos usuais de engenharia.

Somente em escoamento moleculares, típicas de sistemas de vácuo, essa condição pode não ser rigorosamente válida. Esse tema será discutido com maior profundidade no módulo Sistemas Sujeitos a Vácuo e as Bombas de Vácuo .

A principal consequência desse princípio é que o movimento de uma superfície sólida é transmitido ao fluido camada por camada.

Não existe "deslizamento livre" entre fluido e parede. Existe interação molecular suficiente para que a velocidade seja compartilhada.

Essa observação é a base para:

- Formação de perfil de velocidades
- Existência de cisalhamento
- Surgimento dos efeitos da viscosidade

Sem o princípio da aderência, não haveria gradiente de velocidade e não poderíamos falar em tensão de cisalhamento.

1.1.3. A Experiência das Duas Placas

Considere duas placas paralelas separadas por uma pequena distância e preenchidas por um fluido. A placa inferior permanece fixa, enquanto a placa superior é submetida a uma força tangencial, passando a se mover.

Em função do princípio da aderência já discutido, o fluido em contato com cada placa assume a velocidade da respectiva superfície. Assim:

- junto à placa inferior, a velocidade do fluido é zero;
- junto à placa superior, a velocidade do fluido é igual à velocidade da placa.

Entre essas duas condições extremas estabelece-se uma variação contínua de velocidade ao longo da espessura do fluido.

Isso significa que o movimento não ocorre de maneira rígida, como aconteceria com um sólido, mas sim **por deslizamento relativo entre camadas adjacentes**.

Forma-se, portanto, um escoamento em camadas, no qual cada camada apresenta velocidade ligeiramente diferente da vizinha. Essa diferença de velocidades caracteriza uma deformação por cisalhamento.

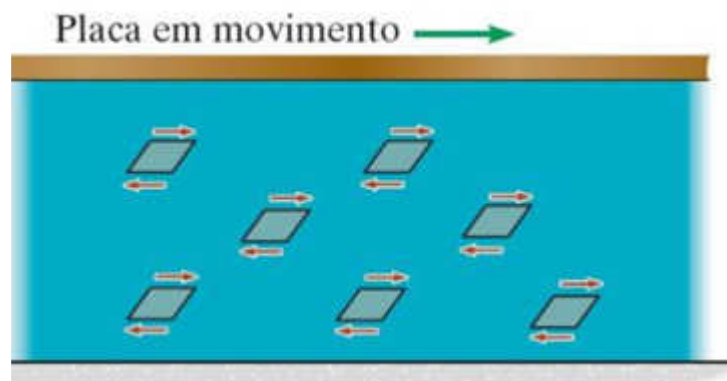


Figura 2 - Experiência das Duas Placas (Fonte: Hibbeler)

Ao aplicar uma força tangencial na placa superior, observa-se que:

A experiência evidencia o comportamento fundamental dos fluidos: ao serem submetidos a uma força tangencial, eles não atingem uma deformação fixa e param, como ocorre com muitos sólidos; ao contrário, continuam se deformando enquanto a força estiver aplicada. Essa deformação contínua é o que chamamos de escoamento.

Entretanto, o deslizamento entre camadas não ocorre livremente. O fluido desenvolve uma resistência interna ao movimento relativo entre essas camadas. Essa resistência é a manifestação física da **viscosidade**.

Quanto maior a viscosidade, maior será a resistência ao deslizamento entre as camadas, por outro lado, quanto menor, mais facilmente o fluido escoar.

A relação quantitativa entre a tensão de cisalhamento desenvolvida no fluido e a variação de velocidade entre as camadas será formalizada mais adiante por meio da **Lei de Newton da Viscosidade**, quando discutirmos os fluidos newtonianos e não-newtonianos sob o ponto de vista matemático.

É interessante observar que, após um curto intervalo inicial de aceleração, a placa superior tende a se mover com velocidade constante. Isso ocorre porque a resistência viscosa do fluido cresce até equilibrar a força aplicada. Quando essa condição de equilíbrio é atingida, a resultante das forças se torna nula e o sistema passa a operar em regime permanente.

Esse detalhe reforça a interpretação da viscosidade como uma resistência ao cisalhamento entre camadas do fluido, e não como uma simples força externa isolada.

1.1.4. Definição de Fluido

A análise da experiência das duas placas permite identificar a característica mecânica essencial que distingue fluidos de sólidos.

Quando submetido a uma força tangencial, o fluido não apresenta uma deformação finita e estática. Em vez disso, ele entra em deformação contínua, manifestada pelo deslizamento relativo entre camadas. E mesmo que removida a força, a deformação é permanente.

Diferentemente de muitos sólidos, que podem sustentar uma tensão de cisalhamento sem escoar, o fluido não resiste a tensões de cisalhamento estáticas: qualquer tensão tangencial aplicada, por menor que seja, produz deformação contínua ao longo do tempo.

Podemos então estabelecer a seguinte definição técnica:

Fluido é um meio contínuo que não resiste a tensões de cisalhamento estáticas e que se deforma continuamente quando submetido a uma força tangencial.

Essa definição é baseada em comportamento mecânico, e não apenas na forma física da substância. Ela é compatível com:

- a hipótese do contínuo,
- o princípio da aderência,
- o escoamento em camadas observado na experiência das duas placas,
- e o conceito de viscosidade que será formalizado adiante.

1.2. Lei de Newton da Viscosidade

A análise da experiência das duas placas permite observar que, ao aplicar uma força tangencial na placa superior, o fluido entra em deformação contínua, escoando em camadas.

Experimentalmente, verifica-se que a força necessária para manter a placa em movimento depende de três fatores principais:

- da área da placa (A);
- da velocidade relativa entre as placas (U);
- da distância entre elas (e).

Observou-se que quanto maior a área, maior a força necessária, quanto maior a velocidade, maior a força necessária e quanto maior a distância entre as placas, menor a força necessária.

Essas observações podem ser organizadas da seguinte forma:

$$F \propto A \mid F \propto U \mid F \propto e \mid F \propto \frac{1}{e} \quad (1)$$

Que combinadas, tem-se:

$$F \propto A \frac{U}{e} \quad (2)$$

Dividindo ambos os lados por A , tem-se:

$$\tau \propto \frac{U}{e} \quad (3)$$

Observa-se que a razão $\frac{U}{e}$ representa a variação de velocidade por unidade de distância, ou o gradiente de velocidade entre as camadas do fluido, conforme ilustrado a seguir:



Figura 3 - Experiência e o perfil de velocidades (Fonte: Franco Brunetti)

Academicamente, a forma mais geral é por meio de uma variação infinitesimal, ficando:

$$\tau \propto \frac{du}{dy} \quad (4)$$

Newton percebeu que a constante de proporcionalidade dependia do líquido utilizado no experimento, ou seja, uma propriedade do fluido, a qual foi dada o nome de viscosidade dinâmica.

Introduzindo essa, constante, chega-se na equação conhecida como *Lei de Newton da Viscosidade*, a seguir:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (5)$$

Sua forma simplificada, válida para filmes de fluido de pequena espessura ($e \ll L$), nos quais o perfil de velocidades pode ser considerado aproximadamente linear, pode ser utilizada como primeira aproximação e em casos específicos:

$$\tau = \mu \frac{U}{e} \quad (6)$$

Onde:

- τ → a tensão de cisalhamento, dada em Pa (Pascal)
- u → a velocidade da placa dada no SI em m/s (metros por segundos)
- e → distância entre as duas placas dada em m (metros).
- μ → viscosidade dinâmica em Pa.s
- $\frac{du}{dy}$ → gradiente de velocidades ou taxa de cisalhamento

Observação: As unidades indicadas acima referem-se às unidades correspondentes ao Sistema Internacional de Unidades (SI). Exceto quando destacado explicitamente, este será o padrão adotado em todo o material.

A interpretação física da equação:

- A tensão de cisalhamento não depende da deformação acumulada;
- Ela depende da taxa de deformação, isto é, da rapidez com que as camadas deslizam umas sobre as outras.

A constante μ representa a resistência interna do fluido ao cisalhamento e recebe o nome de **viscosidade dinâmica**.

Quanto maior o valor de μ :

- maior a tensão necessária para produzir um determinado gradiente de velocidade;
- maior a resistência ao escoamento.

1.3. Massa Específica (ρ):

Massa específica, também chamada de densidade é definida pela razão entre a massa do fluido e o volume ocupado pelo fluido, conforme a fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

Onde:

- ρ (lê-se rô) → massa específica dada em kg/m^3 (quilogramas por metros cúbicos)
- Eventualmente pode se encontrar ρ nas unidades do Sistema Técnico de unidades, em g/cm^3 (gramas por centímetros cúbicos) ($\text{g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$) mas é necessário converter para kg/m^3
- m → massa dada em kg (quilograma)
- V → volume dada em m^3 (metros cúbicos)

1.4. Peso Específico (γ):

O peso específico é definido pela razão entre o peso do fluido e o volume ocupado pelo fluido, conforme a fórmula:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (8)$$

Onde:

- γ (lê-se gama) → peso específico dado em N/m^3 (Newton por metros cúbicos)
- W → peso dado em N (Newtons)
- V → volume dada em m^3 (metros cúbicos)

Como $W = mg$, temos:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (9)$$

Onde:

- g → aceleração da gravidade, dada por $9,8 \text{ m/s}^2$ (metros por segundo ao quadrado)

1.5. Gravidade Específica (SG) ou Densidade Relativa:

Gravidade específica, também chamadas de densidade relativa ou ainda peso específico relativo é a razão entre a massa específica (ou peso específico) do fluido em questão e a massa específica do fluido de referência.

No caso dos líquidos a referência é a água à pressão atmosférica e a temperatura de 5°C que vale 1000 kg/m^3 .

Já em relação aos gases, a referência passa a ser o ar à pressão atmosférica e a temperatura de 15°C que vale $1,225 \text{ kg/m}^3$, assim temos:

$$SG_{\text{líquido}} = \frac{\rho_{\text{líquido}}}{1000} = \frac{\gamma_{\text{líquido}}}{9.800} \quad (10)$$

$$SG_{\text{gás}} = \frac{\rho_{\text{gás}}}{1,225} = \frac{\gamma_{\text{gás}}}{12,005} \quad (11)$$

1.6. Viscosidade Dinâmica (μ) ou absoluta:

Como dissemos, a identificação da propriedade viscosidade dinâmica, μ (lê-se mi), vem da experiência das duas placas, no entanto, podemos entender o seu significado físico como:

“Viscosidade é a propriedade do fluido que mede a sua maior ou menor resistência ao escoamento”, em outras palavras, “quanto maior a viscosidade, mais difícil é fazê-lo escoar.”

Sua unidade no SI é:

- **N.s/m²** (Newtons vezes segundos por metro quadrado), ou
- **Pa.s** (Pascal vezes segundos), ou
- **kg/m.s** (quilograma por metro vezes segundo)

Outra unidade bastante comum de se encontrar a viscosidade é o **cP** (centi-Poise), onde:

- 1 cP = 0,01 P = 1 mPa.s (mili Pascal vezes segundos)

Com referência, temos a viscosidade da água como 0,001 Pa.s ou 1 cP.

1.7. Viscosidade Cinemática (ν) ou Viscosidade Relativa:

É a propriedade definida pela razão entre a viscosidade dinâmica e a massa específica, normalmente, identificada com a letra grega ν (lê-se ni). Tem a seguinte fórmula:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (12)$$

Onde:

- $\nu \rightarrow$ viscosidade cinemática em m²/s
- $\rho \rightarrow$ massa específica em kg/m³
- $\mu \rightarrow$ viscosidade dinâmica em N.s/m² ou Pa.s ou kg/m.s

Sua unidade no SI é m²/s (metros quadrados por segundo). Outra unidade bastante frequente é o **cSt** (centi Stoke), onde:

- 1 cSt = 10⁻⁶ (m²/s).

Como a temperatura afeta tanto a viscosidade dinâmica como a massa específica, considerar a viscosidade cinemática em alguns casos pode ser mais apropriada.

1.8. Viscosidade Aparente

A Lei de Newton da Viscosidade não pode ser aplicada ao estudo do escoamento de todos os tipos de fluido, uma vez que, em muitos casos, a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação não permanece constante, variando conforme a intensidade do escoamento.

Nessas situações, utiliza-se o conceito de **viscosidade aparente**, definida como a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação em uma determinada condição de cisalhamento.

Trata-se, portanto, de um valor associado a um ponto específico da curva tensão $\times$ taxa de deformação, representando a resistência efetiva do material ao escoamento naquela condição particular.

Diferentemente da viscosidade dinâmica constante introduzida anteriormente, a viscosidade aparente pode variar quando a taxa de deformação se altera. Isso significa que o mesmo material pode apresentar diferentes níveis de resistência ao escoamento, dependendo da intensidade com que está sendo deformado.

Do ponto de vista da engenharia, essa distinção é fundamental. Em sistemas de movimentação de fluidos, a taxa de deformação depende da vazão, da geometria do

escoamento e das condições operacionais. Consequentemente, a resistência ao escoamento pode variar ao longo do sistema.

Assim, a viscosidade aparente não deve ser interpretada como uma propriedade fixa do material, mas como uma grandeza operacional, dependente da condição de escoamento.

Nos tópicos seguintes, será apresentada a classificação dos fluidos segundo o comportamento da relação entre tensão e taxa de deformação, permitindo compreender em quais situações a viscosidade permanece constante e em quais ela varia com o cisalhamento.

A formulação matemática adequada dependerá do tipo de fluido em escoamento, assunto que será abordado mais adiante.

1.9. Tipos de Fluidos

Com base na Lei de Newton da Viscosidade anteriormente apresentada, podemos classificar os fluidos em dois tipos:

- Fluidos newtonianos
- Fluidos não-newtonianos

Existem vários termos que são utilizados para descrever o comportamento do fluido, portanto, antes de adentrarmos nas descrições dos fluidos, se faz necessário apresentar algumas definições conceituais adicionais, a fim de evitar confusões de interpretações futuras.

1.9.1. Conceitos Fundamentais:

1.9.1.1. Reologia

Ao estudarmos a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, estamos entrando no campo da reologia.

Reologia é a área que estuda a relação entre tensão aplicada e deformação resultante nos materiais.

Na Mecânica dos Fluidos clássica, essa relação é representada pela Lei de Newton da Viscosidade, assumindo comportamento linear e viscosidade constante. Por essa razão, o termo “reologia” raramente é mencionado quando se trata apenas de fluidos newtonianos.

Entretanto, quando a relação entre tensão e taxa de deformação deixa de ser linear, caso dos fluidos não-newtonianos, torna-se necessário recorrer explicitamente a modelos reológicos para descrever o comportamento do fluido.

1.9.1.2. Deformação por Cisalhamento

A deformação por cisalhamento ocorre quando camadas adjacentes de um material deslizam umas sobre as outras.

Em um fluido, isso acontece quando existe diferença de velocidade entre camadas paralelas. A camada superior tende a “arrastar” a camada inferior, produzindo um deslocamento relativo.

Fisicamente, como vimos na experiência das duas placas paralelas separadas por um fluido. Ao mover a placa superior, o fluido não se desloca rigidamente como um sólido, ele se deforma internamente, camada por camada.

A deformação por cisalhamento representa, portanto, o grau de distorção angular causado por esse deslizamento relativo.

Matematicamente, tem-se:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (13)$$

Onde:

- $\Delta x \rightarrow$ deslocamento horizontal da camada superior
- $\Delta y \rightarrow$ distância entre as camadas

1.9.1.3. Taxa de Deformação

A taxa de deformação representa a rapidez com que a deformação está ocorrendo.

Se a deformação por cisalhamento mede o “quanto” o material foi distorcido, a taxa de deformação mede “quão rápido” essa distorção está acontecendo.

Em escoamentos contínuos, a taxa de deformação está associada à variação da velocidade dentro do fluido. Quanto maior for a diferença de velocidade entre camadas próximas, maior será a taxa de deformação.

Do ponto de vista físico:

- Alta taxa de deformação $\rightarrow$ camadas deslizam rapidamente umas sobre as outras.
- Baixa taxa de deformação $\rightarrow$ deslizamento mais lento entre camadas.

Matematicamente, tem-se:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (14)$$

1.9.1.4. Taxa de Cisalhamento

A taxa de cisalhamento é o caso particular da taxa de deformação quando a deformação ocorre por cisalhamento simples.

Em escoamentos típicos de engenharia, como escoamento em tubos ou entre placas paralelas, a taxa de cisalhamento é numericamente igual ao gradiente de velocidade normal à direção do escoamento.

Matematicamente:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta u}{\Delta y} \text{ ou } \dot{\gamma} = \frac{du}{dy} \text{ (notação infinitesimal)} \quad (15)$$

Onde:

- u é a velocidade do fluido na direção do escoamento;
- y é a direção perpendicular às camadas.

- Δ é a variação
- d é a representação infinitesimal.

Assim, quanto maior a variação de velocidade entre duas camadas muito próximas, maior será a taxa de cisalhamento.

Em termos práticos:

- Próximo às paredes do tubo → taxa de cisalhamento elevada.
- Próximo ao centro do tubo → taxa de cisalhamento reduzida.

1.9.1.5. Gradiente de Velocidades

O gradiente de velocidades, como identificado anteriormente, representa a variação da velocidade do fluido em função da posição.

No caso de escoamento por cisalhamento simples, o gradiente de velocidade é exatamente a taxa de cisalhamento.

Ele indica o quanto a velocidade muda entre duas camadas muito próximas.

Fisicamente, é essa diferença de velocidade que gera:

- Deformação interna;
- Tensão de cisalhamento;
- Desenvolvimento de perfis de velocidade;
- E, conseqüentemente, resistência ao escoamento.

Resumindo:

- Deformação por cisalhamento → medida da distorção angular entre camadas.
- Taxa de deformação → rapidez com que essa distorção ocorre.
- Taxa de cisalhamento → taxa de deformação no caso de cisalhamento simples.
- Gradiente de velocidade → forma matemática que expressa essa taxa no escoamento.

1.9.2. Fluidos newtonianos

Fluidos newtonianos são aqueles que obedecem à *Lei de Newton da Viscosidade*, discutida anteriormente.

Isso significa que:

- A tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento;
- A viscosidade dinâmica é constante para determinada temperatura e pressão;
- O gráfico da tensão versus taxa de deformação é uma reta que passa pela origem.

Em termos físicos, isso implica que dobrar a taxa de deformação implica dobrar a tensão de cisalhamento.

A maioria dos fluidos tratados na Mecânica dos Fluidos clássica apresenta esse comportamento.

Exemplos:

- Água

- Ar
- Óleos minerais leves
- Combustíveis líquidos
- Gases industriais

No diagrama apresentado a seguir, está representado o comportamento reológico da água e do óleo, ambos fluidos newtonianos.



Figura 4 - Diagrama Tensão x Deformação para fluidos newtonianos (Fonte: Engenharia e Cia)

Observa-se que a reta correspondente ao óleo possui maior inclinação em relação à reta da água.

Essa maior inclinação indica que, para uma mesma taxa de deformação, o óleo desenvolve uma tensão de cisalhamento maior do que a água. Em outras palavras, o óleo oferece maior resistência ao escoamento, caracterizando uma viscosidade mais elevada.

Do ponto de vista matemático, a inclinação da reta no gráfico tensão de cisalhamento versus taxa de deformação corresponde ao coeficiente angular da relação linear entre essas grandezas. Como estabelecido pela Lei de Newton da Viscosidade, esse coeficiente é exatamente a viscosidade dinâmica do fluido.

Assim, quanto maior a inclinação da reta, maior o valor da viscosidade dinâmica.

Todas as equações desenvolvidas ao longo deste módulo (continuidade, Bernoulli, Darcy-Weisbach, Reynolds etc.) assumem comportamento newtoniano.

1.9.3. Fluidos não-newtonianos

Fluidos não-newtonianos são aqueles que não obedecem à relação linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação.

Nesses casos a viscosidade deixa de ser constante, passando a depender da taxa de deformação e, em alguns casos, do tempo.

O gráfico da tensão versus taxa de deformação deixa de ser linear.

Surge então uma questão fundamental: *Se a Mecânica dos Fluidos clássica foi desenvolvida considerando fluidos newtonianos, como tratar matematicamente um fluido cujo comportamento não é linear?*

A resposta está na introdução de modelos constitutivos alternativos, que descrevem de forma mais geral a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação.

Nesses modelos, a viscosidade deixa de ser uma constante e passa a ser interpretada como uma **viscosidade aparente**, que depende das condições de escoamento.

Entretanto, os fluidos não-newtonianos não constituem um grupo homogêneo. O desvio em relação ao comportamento newtoniano pode ocorrer por mecanismos físicos distintos.

Do ponto de vista reológico, é possível classificá-los segundo a natureza dessa dependência entre tensão e deformação.

De maneira geral, os fluidos não-newtonianos podem ser classificados em:

- Fluidos generalizados newtonianos, nos quais a tensão depende apenas da taxa instantânea de deformação, porém de forma não linear;
- Fluidos dependentes do tempo, nos quais a tensão varia também com o tempo de aplicação do esforço;
- Fluidos viscoelásticos, que apresentam simultaneamente comportamento viscoso e elástico, fazendo com que a tensão dependa da história de deformação.

Essa classificação não é meramente didática. Ela reflete diferenças fundamentais na formulação matemática necessária para descrever o escoamento e no grau de complexidade envolvido na modelagem.

A seguir, serão apresentados os principais comportamentos associados a cada uma dessas categorias.

1.9.3.1. Pseudoplásticos (Shear Thinning)

Nos fluidos pseudoplásticos, a viscosidade aparente diminui à medida que a taxa de deformação, conforme representado na figura seguinte:

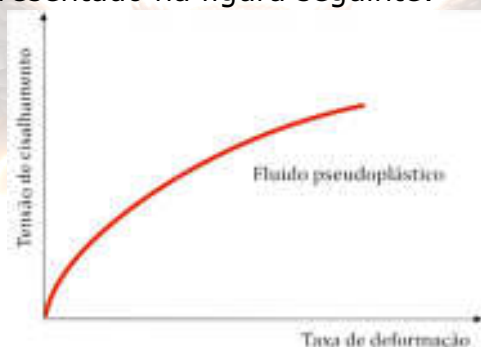


Figura 5 - Diagrama Tensão x Deformação para pseudoplástico (Fonte: Engenharia e Cia)

Isso significa que, em regime de escoamento mais intenso, como durante o bombeamento, o fluido tende a oferecer menor resistência ao escoamento do que ofereceria sob baixas taxas de cisalhamento.

Do ponto de vista matemático, a curva tensão $\times$ taxa de deformação é crescente, porém com inclinação progressivamente menor, indicando que a viscosidade aparente reduz conforme o cisalhamento aumenta.

Na prática industrial, isso traz implicações diretas no dimensionamento de sistemas hidráulicos.

Durante o bombeamento, o aumento da taxa de deformação pode reduzir a perda de carga em regime permanente, diminuindo a potência requerida da bomba em comparação com um fluido newtoniano de mesma viscosidade em baixa taxa.

Entretanto, o dimensionamento não deve considerar apenas a condição de menor viscosidade aparente. Em sistemas reais, existem situações críticas como:

- Partida do sistema, quando as taxas de cisalhamento ainda são baixas e a viscosidade aparente é maior;
- Regiões de baixa velocidade na tubulação, onde o cisalhamento local é reduzido;
- Operação intermitente, que pode levar o fluido a recuperar parte de sua estrutura interna.

Nessas condições, a resistência ao escoamento pode ser significativamente maior.

Portanto, no dimensionamento de bombas, motores e tubulações, deve-se considerar:

- A faixa operacional completa de taxas de cisalhamento;
- A viscosidade aparente correspondente às condições mais críticas;
- A potência requerida na partida;
- O torque necessário no eixo da bomba.

Em muitos casos, o ponto mais severo para dimensionamento não é o regime permanente em alta vazão, mas sim a condição inicial ou de baixa taxa de deformação.

Esse é o comportamento não-newtoniano mais comum na prática industrial.

Exemplos típicos incluem:

- Tintas
- Polímeros fundidos
- Lamas industriais
- Molhos alimentícios, como ketchup
- Fluidos de perfuração

1.9.3.2. Dilatantes (Shear Thickening)

Os fluidos dilatantes apresentam comportamento oposto ao pseudoplástico. Nesses materiais, a viscosidade aparente aumenta à medida que a taxa de deformação cresce.

Isso significa que, quanto mais intensamente o fluido é submetido ao cisalhamento, maior se torna sua resistência ao escoamento.

No diagrama tensão $\times$ taxa de deformação, a curva é crescente e côncava para cima, indicando que o aumento da tensão é mais que proporcional ao aumento da taxa de deformação. Em termos matemáticos, a inclinação da curva aumenta com o cisalhamento, evidenciando o crescimento da viscosidade aparente.



Figura 6 - Diagrama Tensão x Deformação para fluidos dilatantes (Fonte: Engenharia e Cia)

Do ponto de vista físico, esse comportamento está associado à interação intensa entre partículas sólidas presentes no fluido. Em baixas taxas de deformação, as partículas conseguem se reorganizar e deslizar umas sobre as outras com relativa facilidade.

Entretanto, sob cisalhamento elevado, ocorre aumento do contato entre partículas, podendo formar estruturas transitórias mais rígidas, que elevam significativamente a resistência interna.

Na engenharia de movimentação de fluidos, esse comportamento exige atenção especial.

Em regime de baixa vazão, o fluido pode escoar com relativa facilidade. Contudo, ao aumentar a rotação da bomba ou elevar a vazão, a taxa de deformação cresce e a viscosidade aparente aumenta. Como consequência:

- A perda de carga pode crescer de forma mais que proporcional;
- A potência requerida pode aumentar abruptamente;
- O torque no eixo da bomba pode superar o previsto no dimensionamento inicial.

Isso significa que, diferentemente do caso pseudoplástico, o ponto mais crítico para dimensionamento pode ocorrer em altas vazões ou altas rotações.

Em sistemas mal dimensionados, isso pode resultar em:

- Sobrecarga do motor;
- Elevação excessiva de temperatura;
- Instabilidade operacional;
- Desarme por proteção elétrica.

Portanto, no projeto de sistemas que operam com fluidos dilatantes, é fundamental avaliar o comportamento reológico na faixa máxima de taxa de deformação prevista, garantindo que o conjunto bomba-motor suporte o aumento de resistência em regime mais severo.

Exemplos típicos incluem:

- Suspensões concentradas;
- Misturas de amido e água;
- Pastas com alto teor de sólidos;
- Certas lamas minerais altamente concentradas.

1.9.3.3. Fluidos Plásticos (com Tensão de Escoamento)

Alguns fluidos não iniciam o escoamento enquanto a tensão aplicada não ultrapassar um valor mínimo, denominado **tensão de escoamento (τ_0)**.

Abaixo desse valor, o material comporta-se como um sólido rígido, não apresentando deformação contínua.

Somente quando a tensão aplicada supera τ_0 é que o material passa a escoar. Após o início do escoamento, o comportamento pode ser aproximadamente linear, semelhante ao de um fluido newtoniano, como no caso do plástico de Bingham, ou não linear, com característica pseudoplástica, como ocorre no modelo de Casson, conforme ilustrado abaixo.

Embora possam existir casos mais complexos, como materiais que apresentam comportamento dilatante após a tensão de escoamento, tais situações são pouco frequentes na prática industrial e não serão aprofundadas neste texto.

No diagrama tensão $\times$ taxa de deformação, esse comportamento é caracterizado por uma interseção inicial no eixo da tensão. A curva não parte da origem, mas de um valor positivo de tensão.

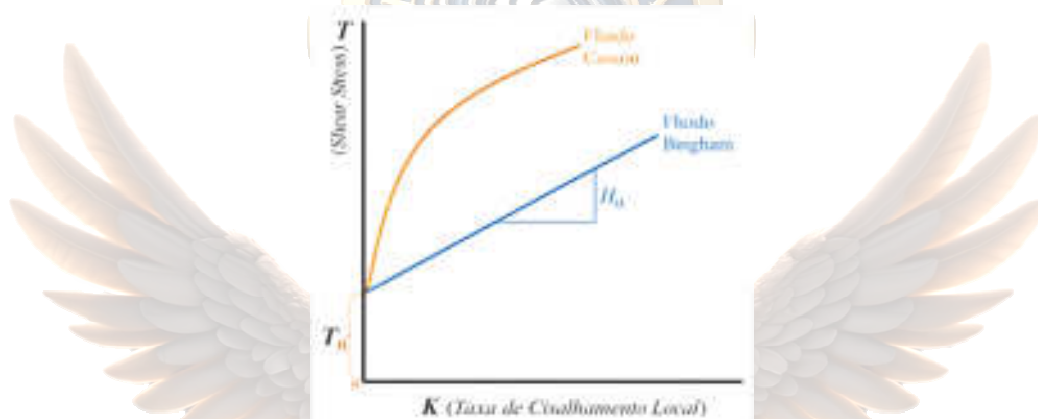


Figura 7 - Diagrama Tensão $\times$ Taxa de Cisalhamento para fluidos plásticos com tensão de escoamento (Fonte: Engenharia e Cia)

Esse tipo de comportamento é descrito, em sua forma mais simples, pelo modelo de Bingham e, de maneira mais geral, por formulações como a de Herschel-Bulkley.

A presença de tensão de escoamento está associada à existência de uma estrutura interna resistente, tais como:

- Redes de partículas
- Ligações intermoleculares
- Interações eletrostáticas
- Estruturas coloidais

Essa estrutura precisa ser rompida antes que o material passe a fluir. Enquanto essa rede interna não é vencida, o material se comporta como sólido.

As principais implicações no bombeamento e no dimensionamento, na engenharia de movimentação de fluidos, estão relacionadas ao fato de que esse comportamento é particularmente crítico na partida do sistema.

Para que o escoamento se inicie, é necessário que o gradiente de pressão imposto pela bomba seja suficiente para gerar tensões de cisalhamento superiores à tensão de escoamento ao longo da tubulação.

Isso implica:

- Maior torque no eixo da bomba na partida;
- Possível sobrecorrente, com consequente aquecimento do motor;
- Necessidade de superdimensionamento da potência instalada;
- Risco de falha caso o sistema seja dimensionado apenas para regime permanente.

Em sistemas longos ou com grandes diâmetros, pode ocorrer ainda a formação de regiões estagnadas, onde a tensão local não supera τ_0 , gerando escoamento não uniforme, especialmente em regiões próximas ao centro do tubo, onde a tensão de cisalhamento é naturalmente menor.

Diferentemente do fluido pseudoplástico, onde o ponto crítico pode estar na condição de baixa taxa de cisalhamento, nos fluidos com tensão de escoamento o principal desafio está em **garantir o início do movimento**.

Os principais exemplos industriais desse tipo de fluido são:

- Pasta de dente
- Lamas minerais
- Concreto fresco
- Pastas industriais
- Polpas altamente concentradas

Do ponto de vista do dimensionamento prático, destacam-se os seguintes pontos:

- Não basta calcular perda de carga.
- É necessário verificar se a pressão disponível supera a tensão de escoamento ao longo da linha.
- A condição de partida é frequentemente a mais severa.

1.9.3.4. Fluidos Tixotrópicos

Nos fluidos tixotrópicos, a viscosidade diminui progressivamente com o tempo quando o material é submetido a uma taxa de cisalhamento constante.

Isso significa que, mesmo mantendo-se a mesma intensidade de deformação, a resistência ao escoamento reduz ao longo do tempo.

Diferentemente dos fluidos pseudoplásticos, cuja viscosidade depende apenas da taxa de cisalhamento, os fluidos tixotrópicos apresentam comportamento dependente também do tempo de aplicação do esforço.

Quando o cisalhamento é interrompido, a estrutura interna do material se recompõe gradualmente, e a viscosidade retorna ao seu valor inicial. Esse comportamento pode ser representado pelos gráficos apresentados a seguir.

Em termos físicos, a tixotropia está associada à presença de uma estrutura interna que se desorganiza sob ação do cisalhamento contínuo.

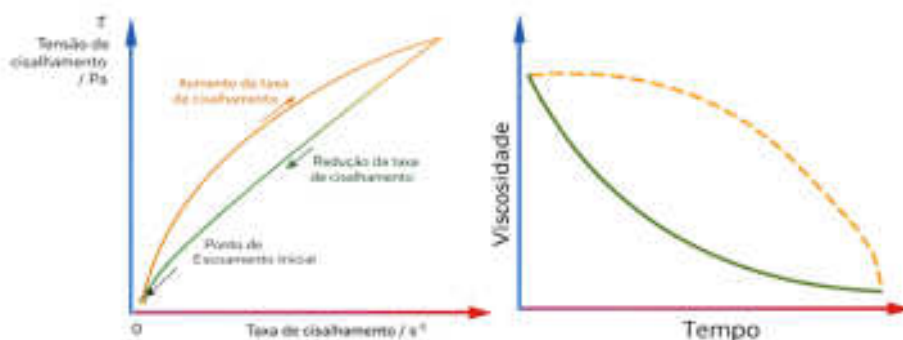


Figura 8 - Diagrama Tensão x Deformação para fluidos tixotrópicos (Fonte: Engenharia e Cia)

No gráfico à esquerda (tensão $\times$ taxa de cisalhamento), observa-se um laço de histerese. A curva correspondente ao aumento da taxa de cisalhamento apresenta valores de tensão superiores aos observados na curva de redução da taxa.

Isso significa que, durante o aumento progressivo do cisalhamento, a estrutura interna do material ainda está sendo rompida, oferecendo maior resistência ao escoamento.

Já na etapa de redução da taxa de cisalhamento, a estrutura encontra-se parcialmente degradada e não se recompõe instantaneamente. Assim, para a mesma taxa de cisalhamento, a tensão medida é menor, caracterizando a dependência temporal do material.

A área entre as curvas representa o grau de tixotropia: quanto maior essa área, maior a influência do tempo no comportamento reológico.

No gráfico à direita (viscosidade $\times$ tempo, sob taxa de cisalhamento constante), observa-se que a viscosidade diminui progressivamente ao longo do tempo até atingir um valor praticamente estável. Essa redução indica que a estrutura interna foi progressivamente desorganizada pelo esforço contínuo.

Quando o cisalhamento é interrompido, inicia-se o processo de recomposição estrutural, representado pela curva tracejada ascendente. A viscosidade aumenta gradualmente até se aproximar do valor inicial, evidenciando a recuperação parcial ou total da estrutura interna.

A interpretação prática para engenharia de movimentação de fluidos, do ponto de vista operacional:

- Na partida do sistema, quando o fluido se encontra em repouso e estruturalmente organizado, a viscosidade é mais elevada e a potência requerida é maior;
- Durante o bombeamento contínuo, a viscosidade tende a diminuir, podendo reduzir gradualmente a perda de carga e a potência exigida;
- Em sistemas com paradas frequentes, a viscosidade pode se recuperar entre ciclos, tornando a condição de partida repetidamente a mais crítica.

Portanto, em aplicações industriais com fluidos tixotrópicos, o regime permanente pode não representar a condição mais severa para dimensionamento, sendo essencial considerar o histórico operacional do sistema.

Temos uma diferença importante, enquanto o comportamento pseudoplástico depende da intensidade do cisalhamento, a tixotropia depende da duração do cisalhamento.

Ou seja:

- Pseudoplástico → dependência da taxa
- Tixotrópicos → dependência do tempo

Entre os exemplos mais comuns de fluidos tixotrópicos, podemos citar:

- Tintas
- Géis
- Argilas
- Fluidos de perfuração
- Pastas alimentícias estruturadas

Pensando em dimensionamento, deve-se considerar que a viscosidade medida em laboratório pode não representar a condição real ao longo do tempo de operação.

Em sistemas tixotrópicos, a condição mais crítica costuma ocorrer na partida após repouso prolongado.

1.9.3.5. Fluidos Reopéticos

Fluidos reopéticos apresentam comportamento inverso ao dos fluidos tixotrópicos, ou seja, sob taxa de cisalhamento constante, a viscosidade aumenta progressivamente com o tempo.

Isso significa que, mesmo mantendo-se a intensidade de deformação, a resistência ao escoamento cresce à medida que o esforço é mantido.

Enquanto na tixotropia ocorre desestruturação progressiva do material, na reopexia ocorre um processo de estruturação induzida pelo cisalhamento. Esse comportamento está representado na figura seguinte.

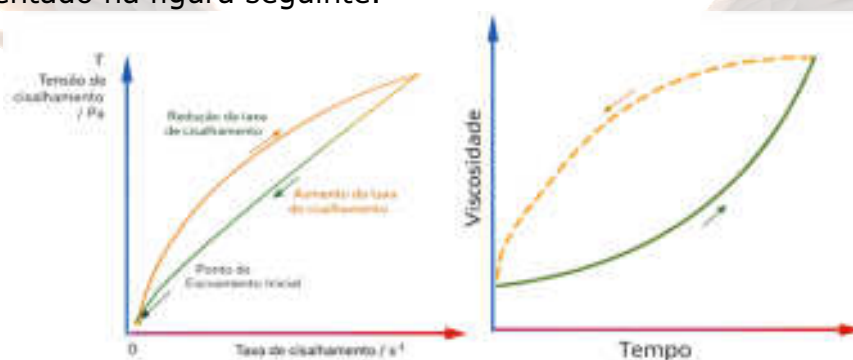


Figura 9 - Diagrama Tensão x Deformação e no tempo para fluidos reopéticos (Fonte: Engenharia e Cia)

No gráfico viscosidade × tempo, sob taxa de cisalhamento constante, observa-se:

- Viscosidade inicial relativamente baixa;
- Crescimento progressivo ao longo do tempo;
- Tendência a um valor mais elevado e estável.

Caso o cisalhamento seja interrompido, a estrutura pode relaxar gradualmente, retornando ao estado inicial.

Em ensaios do tipo tensão × taxa de cisalhamento com varredura de subida e descida, também pode surgir um laço de histerese, porém invertido em relação ao tixotrópico.

Fisicamente, a reopexia está associada à formação progressiva de estruturas internas sob ação do cisalhamento contínuo.

Com o passar do tempo:

- Partículas podem se reorganizar formando redes mais resistentes;
- O contato entre partículas aumenta;
- A resistência interna cresce;
- A viscosidade aparente aumenta.

Esse comportamento é raro quando comparado à tixotropia. Do ponto de vista prático, na engenharia de movimentação de fluidos, embora pouco frequente, o comportamento reopético pode gerar situações críticas:

- A potência requerida pode aumentar ao longo da operação;
- A perda de carga pode crescer com o tempo, mesmo com vazão constante;
- O sistema pode operar de forma estável inicialmente e tornar-se mais resistente progressivamente;
- O torque no eixo da bomba pode aumentar durante o funcionamento contínuo.

Diferentemente do fluido tixotrópico, onde a condição mais crítica costuma ocorrer na partida, no fluido reopético o regime prolongado pode se tornar mais severo do que o instante inicial.

O comportamento reopético pode ocorrer em:

- Algumas suspensões concentradas específicas;
- Certos sistemas coloidais;
- Pastas altamente estruturadas sob condições particulares.

Entretanto, trata-se de fenômeno relativamente raro em sistemas típicos de bombeamento industrial.

1.9.3.6. Fluidos Viscoelásticos

Os fluidos viscoelásticos são aqueles que apresentam simultaneamente comportamento viscoso e comportamento elástico quando submetidos a deformação.

Isso significa que, além de escoarem como um fluido viscoso comum, esses materiais também são capazes de armazenar temporariamente energia elástica, recuperando parcialmente sua forma quando o esforço é removido.

Diferentemente dos fluidos puramente viscosos, cuja tensão depende apenas da taxa de deformação instantânea, os fluidos viscoelásticos apresentam dependência da história de deformação, ou seja, possuem memória do escoamento.

Fisicamente falando, em um fluido puramente viscoso:

- A energia aplicada é dissipada integralmente na forma de calor;
- Ao remover o esforço, não ocorre recuperação da deformação.

Em um material puramente elástico:

- A energia é armazenada;
- Ao remover o esforço, ocorre recuperação total da deformação.

Nos fluidos viscoelásticos ocorre uma combinação dos dois efeitos:

- Parte da energia é dissipada (comportamento viscoso);
- Parte é armazenada temporariamente (comportamento elástico);
- Pode ocorrer recuperação parcial da deformação;
- Surgem tensões normais adicionais não previstas na teoria newtoniana clássica.

O comportamento viscoelástico está ilustrado na figura seguinte:

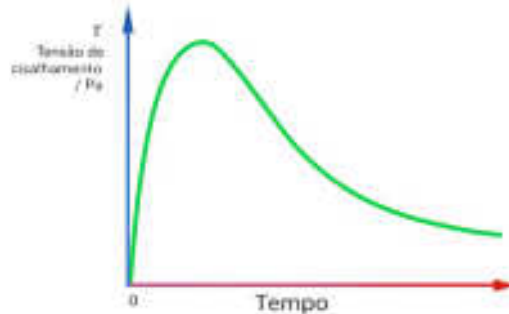


Figura 10 - Diagrama Tensão x Deformação para fluidos viscoelásticos (Fonte: Engenharia e Cia)

O gráfico apresenta a variação da **tensão** ao longo do **tempo**, após a aplicação de uma deformação inicial.

Observa-se que a curva correspondente ao material viscoelástico apresenta um aumento rápido inicial da tensão, seguido de um pico e posterior redução gradual até atingir um valor próximo ao regime estacionário.

Esse comportamento indica que:

1. Resposta inicial elástica

No instante da aplicação do esforço, o material responde de forma semelhante a um sólido elástico, desenvolvendo elevada tensão.

2. Relaxação ao longo do tempo

Com o passar do tempo, a tensão diminui progressivamente. Isso ocorre porque parte da energia armazenada inicialmente é dissipada pelo componente viscoso do material.

3. Transição para regime quase permanente

Após o período de relaxação, a tensão tende a se estabilizar, indicando que o comportamento viscoso passa a predominar.

Fisicamente o gráfico demonstra que o material não responde apenas à deformação aplicada naquele instante, mas também ao tempo durante o qual essa deformação é mantida.

Diferentemente de um fluido puramente viscoso, cuja tensão permanece constante ao longo do tempo quando a taxa de deformação é mantida constante, o material viscoelástico apresenta resposta transitória característica.

Também se diferencia de um sólido puramente elástico, que manteria tensão constante enquanto a deformação fosse mantida.

Esses fluidos são extremamente comuns em aplicações industriais, especialmente quando envolvem polímeros ou macromoléculas, onde podemos citar:

- Soluções poliméricas

- Polímeros fundidos
- Fluidos de perfuração com polímeros
- Detergentes concentrados
- Sangue
- Resinas e adesivos

Do ponto de vista prático, em sistemas de movimentação de fluidos, esse comportamento pode gerar:

- Picos de pressão durante partidas rápidas;
- Respostas transitórias após variações bruscas de vazão;
- Oscilações temporárias até estabilização do escoamento;
- Forças adicionais em componentes como válvulas e curvas.

Portanto, a análise de fluidos viscoelásticos exige atenção não apenas ao regime permanente, mas também aos efeitos transitórios decorrentes da memória do material.

Resumindo, temos:

- Pseudoplástico → depende da taxa
- Tixotrópico → depende do tempo
- Reopético → depende do tempo (inverso)
- Viscoelástico → depende da história de deformação e apresenta recuperação parcial

1.10. Tensão superficial

A tensão superficial é a propriedade associada às forças de atração intermoleculares que atuam na interface entre um líquido e outro meio (gás ou outro líquido).

No interior do fluido, as moléculas estão equilibradas por forças que atuam em todas as direções.

Na superfície livre, porém, as moléculas não possuem vizinhos acima delas, sofrendo uma resultante de forças direcionada para o interior do líquido.

Como consequência:

- A superfície do líquido tende a se comportar como uma “membrana tensionada”;
- O sistema tende a minimizar sua área superficial;
- Surgem efeitos como formação de gotas e meniscos.

Um exemplo clássico da atuação da tensão superficial é o inseto que permanece sobre a superfície da água. Nesse caso, a superfície comporta-se como uma película tensionada capaz de sustentar o peso do inseto sem que ocorra ruptura. Conforme ilustrado a seguir:



Figura 11 - Diagrama Tensão x Deformação para fluidos viscoelásticos (Fonte: Brasil Escola UOL)

Esse fenômeno ilustra que a tensão superficial pode gerar forças verticais significativas quando associada a pequenas escalas geométricas.

Matematicamente, a tensão superficial (σ) é definida como:

$$\sigma = \frac{F}{L} \quad (16)$$

Onde:

- F é a força tangencial atuando na superfície;
- L é o comprimento sobre o qual essa força atua.

Sua unidade no SI é N/m.

Do ponto de vista físico, a tensão superficial não está relacionada diretamente ao escoamento volumétrico em tubulações de grande diâmetro, mas passa a ser relevante quando:

- Existem interfaces líquido-gás;
- O diâmetro característico é pequeno;
- A pressão é muito baixa;
- Há necessidade de medições precisas de coluna líquida.

1.10.1. Pressão Capilar (Lei de Laplace)

Quando há curvatura da superfície líquida, surge uma diferença de pressão entre os dois lados da interface.

Para um menisco aproximadamente esférico:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \quad (17)$$

Onde:

- R é o raio de curvatura da interface.

Quanto menor o raio de curvatura, maior a diferença de pressão.

Esse é o fundamento físico da capilaridade.

1.10.2. Capilaridade

Capilaridade é o fenômeno de subida ou descida de um líquido em um tubo de pequeno diâmetro devido à combinação entre:

- Tensão superficial;
- Ângulo de contato;
- Peso específico do líquido.

Quando um tubo fino é inserido em um reservatório:

- Se o líquido molha a parede (como a água no vidro), ele sobe;
- Se não molha (como o mercúrio no vidro), ele desce.

A altura de subida capilar é dada por:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r} \quad (18)$$

Onde:

- σ é a tensão superficial;
- θ é o ângulo de contato;
- ρ é a densidade do fluido;
- g é aceleração da gravidade;
- r é o raio interno do tubo.

Observação importante: Quanto menor o raio do tubo, maior será o efeito da capilaridade.

Em relação a aplicação prática da capilaridade, a atenção recai sobre os **instrumentos** de medição de pressão por coluna líquida, como os piezômetros e manômetros em U, cuja leituras da pressão dependem diretamente da altura medida.

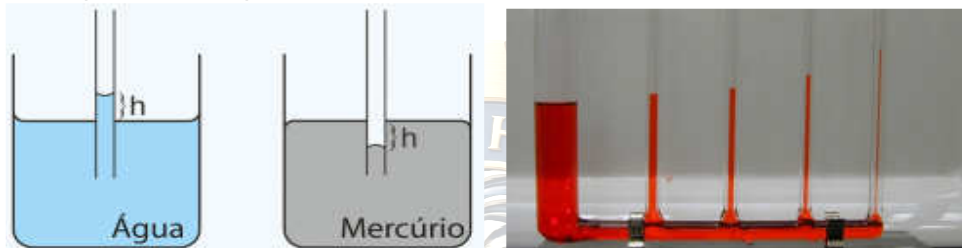


Figura 12 - Capilaridade (Fonte: Mundo Educação)

Se houver efeito capilar:

- A altura observada não corresponde apenas à pressão;
- Há um acréscimo ou decréscimo devido ao menisco;
- Surge erro sistemático na medição.

Por isso, em aplicações industriais:

- Utilizam-se diâmetros suficientemente grandes;
- Ou aplica-se correção de capilaridade;
- Ou utiliza-se fluido manométrico com comportamento mais adequado (como mercúrio).

A capilaridade também pode ter efeito significativo em **sistemas de vácuo** leve ou moderado onde as diferenças de pressão e as alturas de coluna também são pequenas, o que aumenta o erro relativo.

Além disso, em tubos de pequeno diâmetro, a pressão capilar pode ser da mesma ordem de grandeza da pressão medida. Nessas condições, podem ocorrer distorções no menisco, formação de bolhas ou até descontinuidade da coluna líquida, comprometendo a estabilidade da leitura em sistemas sensíveis.

Portanto, em sistemas de vácuo:

- O diâmetro do tubo manométrico deve ser cuidadosamente selecionado;
- A correção por capilaridade pode ser necessária;
- Em pressões muito baixas, preferem-se sensores eletrônicos.

Portanto, no contexto da engenharia de movimentação de fluidos:

- Tensão superficial não influencia diretamente o cálculo de perda de carga em tubulações convencionais;

- Torna-se relevante em fenômenos interfaciais;
- É fundamental na análise de capilaridade;
- Tem impacto prático direto na instrumentação de pressão;
- Pode gerar erro significativo em medições de baixa pressão e sistemas de vácuo.

