

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – SEM

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Título do Trabalho:

REVISÃO DE TIPOS DE “HOLDERS” E PROPOSTA DE UMA SOLUÇÃO
CONSTRUTIVA PARA MEDIÇÃO DE PERMEABILIDADE EM CORPOS
POLIMÉRICOS

Aluno: Adriano Trevelin Françoso
Orientação: Profa. Dra. Zilda de Castro

São Carlos
2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – SEM

REVISÃO DE TIPOS DE “HOLDERS” E PROPOSTA DE UMA SOLUÇÃO
CONSTRUTIVA PARA MEDIÇÃO DE PERMEABILIDADE EM CORPOS
POLIMÉRICOS

Aluno: Adriano Trevelin Françoso
Orientação: Profa. Dra. Zilda de Castro

Trabalho de conclusão de curso
ao Departamento de Engenharia
Mecânica da Escola de
Engenharia de São Carlos
(EESC), como parte dos requisitos
para conclusão do curso de
Graduação em Engenharia
Mecânica na Universidade de São
Paulo - USP.

São Carlos
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F825r Françoso, Adriano Trevelin
 REVISÃO DE TIPOS DE "HOLDERS" E PROPOSTA DE UMA
SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA MEDIÇÃO DE PERMEABILIDADE EM
CORPOS POLIMÉRICOS / Adriano Trevelin Françoso;
orientadora Zilda de Castro Silveira. São Carlos, 2013.

 Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2013.

 1. permeabilidade. 2. corpos porosos. 3. polímeros.
4. holder. I. Título.]

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato (a): Adriano Trevelin Franco


Título: Desenho de tipo de "holders" e proposta de uma solução construtiva para medição de permeabilidade em corpos poliméricos.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Assouado José de Carvalho

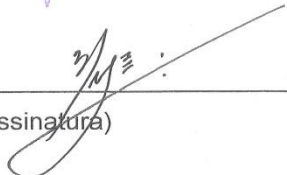
Nota atribuída: 10,0 (Dez)



(assinatura)

Prof. Eng. me. Matheus Stosly de Freitas

Nota atribuída: 10,0 (Dez)




(assinatura)

Prof. a. Dra. Zilda de C. Silveira

(orientador(a))

Nota atribuída: 10,0 (Dez)



(assinatura)

Média: 10,0 (Dez)

Resultado: Aprovado

Data: 09/12/2013

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM NÃO Visto do orientador 

Resumo

Françoso, A.T. – **Revisão de tipos de “holders” e proposta de uma solução construtiva para medição de permeabilidade de corpos poliméricos.** Trabalho de Conclusão de Curso, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 103p.

Neste trabalho é apresentada uma revisão sobre diferentes concepções e aplicações de “holders” utilizados para medição de características de fluidos, com aplicação em diferentes áreas da engenharia e geologia. O termo “holder” ou núcleo descreve um conjunto de componentes ou um dispositivo, que tem como objetivo alojar de forma hermética corpos de prova porosos. A partir de conjuntos de amostras de corpos-de-prova podem ser realizadas medições, para estimativa de propriedades físicas, como coeficientes da permeabilidade viscosa e inercial, que descrevem a relação entre a porosidade de um corpo e sua interação com um meio fluídico. Grande parte dos equipamentos de medição de corpos porosos apresenta um elevado custo de construção, manutenção e operação, seja para garantir uma estabilização robusta do escoamento do fluido ou para realizar em um elevado número de medições em pequenos intervalos de tempo. Desta forma, com base nesta revisão é proposta uma solução construtiva para um permeâmetro de baixo custo, com duas versões de fabricação: usinagem convencional e manufatura aditiva.

Palavras-chave: *permeabilidade; corpos porosos; polímeros; holder.*

Agradecimentos,

Agradeço, primeiramente, a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade e capacidade de concluir mais esta etapa em minha vida;

Agradeço à minha família, principalmente aos meus avós que sempre estiveram comigo e me ajudaram a chegar aonde cheguei;

Agradeço à minha namorada Raquel pela paciência e apoio nos momentos mais difíceis;

Aos meus companheiros de universidade pelo apoio e amizade sincera (Alex Roger, Denys Eduardo, Douglas Martins, Lucas Yoshida, Marlon Saveri e Maurício Cardoso);

Agradeço à amiga e professora Dra. Zilda de Castro Silveira pelos ensinamentos e orientações;

Agradeço à Universidade de São Paulo pelos recursos, infraestrutura e oportunidades oferecidas.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	Objetivo do trabalho.....	14
2.	DIVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1.	Polímeros Industriais	15
2.1.1.	ABS	18
2.1.2.	Poliamidas (Nylons).....	19
2.1.3.	Elastômeros.....	22
2.2.	Considerações sobre Manufatura Aditiva	24
2.2.1.	Processos de Fotopolimerização.....	28
2.2.2.	Processos baseado em fusão.....	30
2.2.3.	Processos de laminação de camadas	31
2.2.4.	Processos de impressão	31
2.2.5.	Processo de sinterização/fusão de pó	33
3.	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	38
3.1.	Permeabilidade em Corpos Porosos	38
3.1.1.	Introdução.....	38
3.1.2.	História	39
3.1.3.	Principais Aplicações.....	41
3.2.	Medidas de Porosidade e Permeabilidade de um corpo ...	50
3.2.1.	Medições de Vazios através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	51
3.2.2.	Medições de Porosidade através de Intrusão por Mercúrio	52
3.2.3.	Medidas da Permeabilidade de um corpo	55
4.	REVISÃO DA TÉCNICA	64
4.1.	Permeâmetro para a medição da permeabilidade de solos saturados e não saturados	64
4.2.	Permeâmetro de escoamento permanente para medição da quantidade de água em solos.....	70
4.3.	Permeâmetro para medição de permeabilidade em concreto e argamassas	72
4.4.	Permeâmetro de Parede Rígida	75
4.5.	Permeâmetro de Parede Flexível	79
4.6.	Permeâmetro para a medição de permeabilidade e difusividade: Patente Americana.....	80

5.	PROPOSTA DE UM PERMEÂMETRO PARA CORPOS DE PROVA POLIMÉRICOS	84
5.1.	Proposta de um projeto conceitual de um permeâmetro de baixo custo	86
5.2.	Configuração do Holder	88
5.3.	Montagem do banco de Permeabilidade	90
6.	CONCLUSÃO	93
7.	REFERÊNCIAS	94
8.	ANEXOS.....	98
8.1.	ANEXO 1 – NORMA ABNT (12912/1993)	98
8.2.	ANEXO 2 – Desenhos da Solução Construtiva	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Reação geral da síntese de Poliamida (Mckeen, 2012).....	20
Figura 2.2 – Estrutura química do Nylon 12 (Mckeen, 2012).....	21
Figura 2.3 – Monômeros utilizados para a síntese de elastômeros fluorados (Mckeen, 2012).....	24
Figura 2.4 – Áreas de aplicações da manufatura aditiva (Wohlers, 2012)...	27
Figura 2.5 – Interseção entre os tipos de materiais e os processos de Manufatura Aditiva (Inforçatti, 2012).	28
Figura 2.6 - Esquema do processo de estereolitografia (Power <i>et al.</i> , 2007).....	29
Figura 2.7 – Representação esquemática do processo de modelagem por deposição de fundidos (FDM) (Power <i>et al.</i> , 2007).....	30
Figura 3.1 – Dispositivo para medição de permeabilidade	38
Figura 3.2 – Esquema do experimento de Darcy.....	40
Figura 3.3 – Aplicação do estudo da permeabilidade dos solos	42
Figura 3.4 – Fenômeno da umidade ascendente.....	43
Figura 3.6 – Embalagem – Ambiente de interações	49
Figura 3.7 – Comparação entre embalagens plásticas a vácuo. Imagem da esquerda – Polímero DuPont Surlyn. Imagem da Direita: Polímero Convencional (Ashley, 1985).	50
Figura 3.8 – Mercúrio em contato com um sólido poroso, na qual θ é o ângulo de contato e D é o diâmetro do poro (Webb, 1997).	53
Figura 3.9 – Curva típica de uma análise de Intrusão por Mercúrio [1].....	54
Figura 3.10 – Representação da curva de Intrusão por Mercúrio em função da Variação do Volume para um incremento de Pressão (Webb, 1997).	55
Figura 3.11 – Equipamento experimental de Darcy (Amix, 1960).....	56
Figura 3.12 – Desenho esquemático do equipamento experimental de Darcy (Amix, 1960).....	57
Figura 3.13 – Representação do fluxo horizontal (Amix, 1960).	59
Figura 3.14 – Tipos de fluxo Vertical (Amix, 1960).	60
Figura 3.15 – Sistema de Fluxo Radial (Amix, 1960).....	61
Figura 4.1: (a) base; (b) detalhes da base com as respectivas saídas; (c) célula de ensaio; (d) esquema de base com a peça intercambiável e <i>top-cap</i> (Guimarães, 2008).....	65
Figura 4.2 - Base e peça intercambiável com o disco de alta entrada de ar colada (Guimarães, 2008).	66
Figura 4.3 – Parte inferior da peça intercambiável com os furos guias (Guimarães, 2008).....	67

Figura 4.4 – Peça intercambiável com câmara espiralada (Guimarães, 2008).....	67
Figura 4.5 – Vista inferior da peça intercambiável (Guimarães, 2008).	68
Figura 4.6 – Detalhes do <i>top-cap</i> (Guimarães, 2008).....	69
Figura 4.7 – Anel e pedra porosa de alta entrada de ar colados no <i>top-cap</i> (Guimarães, 2008).....	69
Figura 4.8 – Configuração Geral do Permeâmetro de Fluxo Permanente (Dias, 2012).....	70
Figura 4.9 – Configuração do Permeâmetro com pressurização no topo do corpo de prova e em ensaio transiente (Dias, 2012).	71
Figura 4.10 – Desenho esquemático do permeâmetro e detalhamento da câmara de vácuo. Na qual: a) Bomba de Vácuo; b) Câmara de Vácuo; c) Mostrador de pressão digital; d) Transdutor de pressão digital; e) Placa aquisitora de dados (data-logger); f) Válvula solenoide; g) Computador (Sentone, 2011).	73
Figura 4.11 – Gráfico que mostra o perfil do ensaio de permeabilidade através do método de decaimento por vácuo (Sentone, 2011).	74
Figura 4.12 – a) Permeâmetro. No qual: 1) Porta amostras para argamassas; 2) Porta amostras para concreto; 3) Manômetro com filtro; 4) Medidor de temperatura; 5) Display de medida de pressão; 6) Bolhometro. b) Esquema do funcionamento do permeâmetro (Sentone, 2011).....	74
Figura 4.13 – Permeâmetro do tipo molde de compactação com parede rígida (Olandoski, 2013).....	75
Figura 4.14 – Permeâmetro de Parede Rígida tipo célula de Adensamento (Olandoski, 2013).....	76
Figura 4.15 – Permeâmetro de Parede Rígida com Controle da Tensão Vertical (Olandoski, 2013).....	77
Figura 4.16 – Permeâmetro de Parede Rígida Tipo Tubo Amostrador (Olandoski, 2013).....	78
Figura 4.17 – Permeâmetro sem contato com a parede rígida e o corpo de prova (Olandoski, 2013).....	79
Figura 4.18 – Representação Esquemática da Montagem do método de vazão constante (Olandoski, 2013).....	80
Figura 4.19 – Holder patenteado para medição de permeabilidade e difusividade (Bismarck et al, 2010).	81
Figura 5.1 – Esquema do banco de permeabilidade proposto (Vasquez, 1999).....	88
Figura 5.3 – Montagem geral do Banco de Permeabilidade	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Nomes Comerciais, Características e Aplicações típicas para alguns materiais plásticos (Callister, 2001).....	16
Tabela 2.1 Continuação.....	17
Tabela 2.2 – Monômeros utilizados para a criação dos específicos Nylons (Mckeen, 2012).	20
Figura 2.8 – Representação esquemática do processo de impressão 3-D (Power <i>et al.</i> , 2007).....	32
Figura 2.9 – Representação esquemática de um mecanismo de sinterização e fusão de pó à Laser (Power <i>et al.</i> , 2007)	34
Figura 2.10 – Representação esquemática do processo de deposição de metais (Power <i>et al.</i> , 2007).....	36
Figura 3.5 – Permeâmetro para ensaios de permeabilidade em solos.....	45
Tabela 5.1 – Estudo comparativo dos Permeômetros estudados.....	85
Tabela 5.2 – Vantagens e Desvantagens dos Permeômetros de Parede Rígida e Flexível.....	86
Figura 5.2 – Vista em corte do Holder empregado na solução construtiva...	89

1. INTRODUÇÃO

O estudo de meios porosos constitui uma área de pesquisa da mecânica dos fluidos, com diversas aplicações nas áreas de engenharia de petróleo, geologia e mais recentemente em componentes obtidos a partir do estudo de MEMS (Sistemas micro eletromecânicos), desenvolvimento e otimização de dispositivos biomédicos, manufatura aditiva, com aplicações nas áreas de tecnologia e saúde. Portanto, a medida dos coeficientes de permeabilidade para diferentes configurações de porosidades, materiais e fluido são fundamentais para a avaliação de escoamentos de fluidos e sua interação com o meio de interesse.

A solução e o comportamento do transporte das substâncias de baixo peso molecular através de materiais poliméricos é um tópico de interesse em muitos campos da ciência e tecnologia. A importância e relevância de tal comportamento tem se tornado mais aparente nos anos atuais, principalmente com o aumento do uso de materiais poliméricos para diversas aplicações e com o desenvolvimento acelerado de sistemas de separação por membrana. Estas podem ser: regiões altamente impermeáveis, seletivamente permeáveis ou ainda barreiras de filmes (Rogers, 1985).

A propriedade física denominada permeabilidade de um corpo está diretamente relacionada às configurações geométricas dos poros e ao regime de escoamento do fluido. Portanto, sua medição pode fornecer informações sobre macro e micro estruturas do meio poroso, em específico de materiais poliméricos. Sendo assim, podem-se inferir sobre as diferenças de permeabilidade com relação às descontinuidades, saturação, reações, deteriorações ou qualquer tipo de fenômeno de transformação da estrutura porosa dos materiais estudados, desde rochas até polímeros.

Nos processos de fabricação de manufatura aditiva, a permeabilidade pode fornecer estudos sobre estruturas geométricas dos protótipos rápidos desenvolvidos para as mais diversas aplicações, como por exemplo: engenharia tecidual, componentes industriais, mineração, indústria petrolífera, entre outros.

Apesar da relativa simplicidade em geometrias de “holders” utilizados em permeâmetros, sua função de projeto é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados acerca de propriedades de meios porosos. Normalmente, as medições de meios porosos em empresas e centros de pesquisa são feitas com equipamentos extremamente robustos, aos quais são acoplados sistemas computacionais para controle de posicionamento do corpo-de-prova, estabilização do regime de escoamento e monitoramento em tempo real do ensaio de permeabilidade. Essas características tornam os preços de compra e custo de manutenção elevada, para essa categoria de “permeâmetros”.

Portanto, neste trabalho é feito em uma primeira etapa um levantamento do estado da técnica de projetos de permeâmetros e “holders” e uma breve discussão sobre as soluções implementadas. A partir deste estudo é proposta uma solução construtiva de um permeâmetro “portátil” e um núcleo de medição de permeabilidade, cujo objetivo é minimizar o custo de fabricação e montagem.

1.1. Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão técnica de permeâmetros e “holders” e propor uma solução construtiva de um permeâmetro de baixo custo, portátil e que possa permitir repetibilidade e confiabilidade nos ensaios de corpos porosos poliméricos.

2. DIVISÃO DA LITERATURA

2.1. Polímeros Industriais

Há muitos diferentes materiais poliméricos que são familiares para nós e apresentam uma ampla variedade de aplicações. Isso inclui plásticos, elastômeros (ou borrachas), fibras, revestimentos, adesivos, espumas e filmes. Dependendo destas propriedades, um polímero em particular pode ser usado em duas ou mais categorias de aplicação. Por exemplo, um plástico, se reticulado (em rede) e utilizado acima da temperatura de transição vítrea, pode formar um elastômero satisfatório. Ou, um material fibroso pode ser usado como um plástico se não sofrer deformação em seus filamentos.

Possivelmente um enorme número de diferentes materiais poliméricos está classificado como plástico. Polietileno, polipropileno, poli cloreto de vinil, poliestireno e os flúor-carbonos, epóxis, fenólicos e poliésteres podem ser todos classificados como plásticos.

Eles possuem uma ampla variedade de combinações de propriedades. Alguns plásticos são muito rígidos e frágeis; outros são flexíveis, exibindo ambas as deformações, elástica e plástica, quando sujeitos a tensão, e algumas vezes experimentam uma deformação considerável antes da fratura.

Polímeros colocados dentro desta classificação podem ter algum grau de cristalinidade, e todas as estruturas e configurações moleculares são possíveis (linear, ramificada, isostática, etc.). Materiais plásticos podem ser tanto termoplásticos como termo fixos; de fato, esta é a maneira na qual eles são sub-classificados. Os nomes comerciais, características e típicas aplicações para alguns plásticos são dados na Tabela 2.1.

Tipo de Material	Nomes Comerciais	Maiores características	Aplicações Típicas
		Termoplásticos	
Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)	Abson Cycolac Kralastic Lustran Novodur Tybrene	Conhecido por sua resistência e dureza, resistente a distorção por aquecimento; boas propriedades elétricas; inflamável e solúvel em alguns solventes orgânicos	Revestimentos de refrigeradores, equipamentos de jardinagem, brinquedos, dispositivos de segurança em rodovias
Acrílico (Polimetil metacrilato)	Acrylite Diakon Lucite Plexiglas	Conhecido por sua transmissão luminosa e resistência à desintegração; apresenta razoáveis propriedades mecânicas	Lentes, gabinetes de aeronaves transparentes, equipamentos de iluminação e sinais ao ar livre
Fluor-Carbonos (PTFE ou TFE)	Teflon Floun Halar Halon Hostaflon TF	Quimicamente inerte em quase todos os ambientes, excelentes propriedades elétricas; baixo coeficiente de atrito; pode ser usado a 260 °C; relativamente frágil e com ruins propriedades em contato com fluxos frios.	Selos anticorrosivos, tubos e válvulas químicas, rolamentos, revestimentos anti-aderentes, elementos eletrônicos de alta temperatura de trabalho
Poliâmidas (Nylons)	Nylon Durethan Herox Nomex Ultramid Zytel	Boa resistência mecânica, resistência à abrasão, e dureza; baixo coeficiente de atrito; absorve água e alguns outros líquidos	Rolamentos, engrenagens, cames, buchas, alavancas, revestimento de fios e cabos
Polycarbonatos	Baylon Iupilon Lexan Makrolon Merlon Nuclon	Estabilidade dimensional; baixa absorção de água; transparente; muito boa resistência ao impacto e ductilidade; não conhecido como resistente químico	Capacetes de segurança, lentes, globos de iluminação, base para filme fotográfico
Polietileno	Alathon Alkathene Ethron Fortiflex Hi-fax Petrothene Rigidex Zendel	Resistência Química, e isolante elétrico; duro e com coeficiente de atrito relativamente baixo; baixa resistência e ruim resistência à desintegração	Garrafas flexíveis, brinquedos, copos, partes de bateria, bandejas para gelo, filmes para embrulhar materiais

Tabela 2.1 Nomes Comerciais, Características e Aplicações típicas para alguns materiais plásticos (Callister, 2001).

Polipropileno	Bexphane Herculon Meraklon Moplen Poly-pro Pro-fax Propathene	Resistente à distorção por aquecimento; excelentes propriedades elétricas e resistência à fadiga; quimicamente inerte, relativamente inexpandível; ruim resistência à radiação UV	Garrafas esterilizadas, filmes para acondicionamento, gabinetes de TV, bagagens
Poliestireno	Carinex Celatron Hostyren Lustrex Styron Vestron	Excelentes propriedades elétricas e claridade ótica; boa estabilidade térmica e dimensional; relativamente inexpandível	Telhas, armazenadores de bateria, brinquedos, painéis luminosos internos, carcaças de eletrodomésticos
Vinila	Darvic Exon Geon Pee Vee Cee Pliovic Saran Tygon	Baixo custo, materiais de propósitos gerais; normalmente rígido, mas pode ser feito flexível com a adição de plastificantes; frequentemente copolimerizado; suscetível à distorção devido ao aquecimento	Revestimentos de pisos, canos, isolamento de cabos, mangueiras de jardim e gravações fonográficas
Poliéster (PET ou PETE)	Celanar Crastin Dacron Hylar Melinex Mylar Terylen	Um dos mais resistentes filmes plásticos, excelente resistência à fadiga e à ruptura, e resistência à humidade, ácidos, graxas, óleos e solventes	Fitas de gravação magnética, vestuário, cabos de pneus automotivos, recipiente para bebidas
Polímeros Termo-fixos			
Epóxis	Araldite Epikote Epon Epi-rez Lekutherm Nepoxide	Excelente combinação de propriedades mecânicas e resistência à corrosão; estabilidade dimensional; boa adesão; relativamente inexpandível, boas propriedades elétricas	Modelagens elétricas, pias, adesivos, revestimentos de proteção, usado com fibra de vidro laminada
Fenólicos	Baquelite Amberol Arofen Durite Resinox	Excelente estabilidade térmica acima de 150°C; pode ser combinado com um enorme número de resinas, enchimentos, etc.; inexpandível	Revestimento de motores, telefones, auto distribuidores, luminárias elétricas
Poliésteres	Aropol Baygal Derakane Laguval Laminac Selectron	Excelentes propriedades elétricas e baixo custo; pode ser formulado para uso local ou em alta temperatura; frequentemente reforçado por fibras	Capacetes, barcos de fibra de vidro, componentes de copos de veículos, cadeiras, ventiladores

Tabela 2.1 Continuação

Muitos plásticos exibem propriedades especialmente conhecidas. Para aplicações nas quais a transparência ótica é crítica, poliestireno e poli metil metacrilato são especialmente bem adequados; porém, para isto é necessário que o material seja altamente amorfo ou, se semicristalino, ter cristais muito pequenos. Os flúor-carbonos têm um baixo coeficiente de atrito e são extremamente resistentes ao ataque por agentes químicos, mesmo que em altas temperaturas relativamente. Eles são usados como revestimentos de painéis antiaderentes, em rolamentos e buchas, e em componentes eletrônicos sujeitos às altas temperaturas.

2.1.1. ABS

Um dos importantes termoplásticos de engenharia com um maior uso no mercado é o ABS, o qual representa uma resina contendo acrilonitrila, butadieno e estireno. O ABS possui alta resistência ao impacto, alta temperatura de deflexão ao calor devido ao poliestireno que, junto com o termoplástico nylon, marca a fronteira do preço e desempenho entre os materiais comuns no dia-a-dia e os termoplásticos de engenharia.

Os usos do ABS incluem aplicações automotivas, produtos de consumo incluindo pequenas e grandes aplicações, e em máquinas comerciais e telecomunicações em que a boa resistência ao impacto aliada ao custo moderado são requeridos (Fried, 2003).

Os componentes do polímero apresentam diferentes composições e coexistem separadas cuja compatibilidade é controlada pela sua estrutura e microestrutura química. Em todos os modelos químicos de ABS, a fase contínua (matriz) consiste no copolímero de estireno (ou alquilestireno) e acrilonitrila (SAN). Um elastômero baseado no butadieno forma a fase dispersa.

Através do balanceamento destes três componentes, obtêm-se excelentes relações custo/desempenho, tornando-os capazes de atender grande variedade de mercado.

Devido à elevada energia de coesão e do parâmetro de solubilidade da poliacrilamida $[28,7 \text{ (MJ/m}^3)^{1/2}]$, aumentando-se a concentração deste ocorrerá uma melhora nas propriedades térmicas e químicas do ABS

resultante. Por outro lado, esta melhoria virá em detrimento da processabilidade. Assim, o teor de acrilonitrila nos polímeros comerciais gira em torno de 20-30%.

A rigidez molecular do poliestireno proveniente do anel benzênico pendente à cadeia principal é responsável pelo módulo de flexão do ABS. Entretanto, o estireno sofre reação de cloração, hidrogenação, nitratação e sulfonação com relativa facilidade. Os efeitos destas reações são a degradação e descoloração, sendo este um dos motivos da dificuldade em se produzir ABS anti-chama através de aditivos clorados. Finalmente temos o butadieno que exerce uma forte influência na resistência ao impacto do ABS.

Para se conseguir produtos de alto impacto há a necessidade de se incorporar ao redor de 20% de borracha nitrílica reticulada. Essa reticulação reduz a compatibilidade entre SAN e a borracha.

Sendo Amorfo, o ABS apresenta baixa contração durante o resfriamento no molde (0,5-0,7%), e boa estabilidade dimensional apesar desta ser ligeiramente afetada pela absorção de água.

As principais propriedades do ABS são: médio-alta resistência ao impacto, médio-alta resistência térmica, alta rigidez, excelente estabilidade dimensional, baixa contração de moldagem, baixa absorção de umidade, brilho superficial e boas propriedades dielétricas. Resinas ABS são incompatíveis com ácidos, solventes halogenados e aromáticos, cetonas, gasolina e são compatíveis com álcoois, sais e bases, quando estes estão em baixas concentrações (Wiley, 2011).

2.1.2. Poliamidas (Nylons)

Poliamidas de alto peso molecular são normalmente conhecidas como nylon. As poliamidas são polímeros cristalinos tipicamente produzidos pela condensação de um diácido e uma diamina. Há vários tipos e cada tipo é normalmente designado por um número, como no caso do nylon 66 ou poliamida 66 (PA66). Os sufixos numéricos referem-se ao número de átomos de carbono presentes na estrutura molecular da amina e do ácido, respectivamente (ou é utilizado um único sufixo se o grupo amina e o ácido fazem parte da mesma molécula).

Alguns materiais plásticos e os monômeros utilizados para confeccioná-los são apresentados na Tabela 2.2. E a reação geral é mostrada na Figura 2.1. O grupo ácido ($-COOH$) reage com o grupo amina ($-NH_2$) para formar a amida. A molécula de água é desprendida conforme há a formação do polímero nylon. As propriedades dos polímeros são determinadas pelos monômeros R_1 e R_2 presentes nas cadeias poliméricas. Por exemplo, no nylon 6,6, $R_1=6C$ e $R_2=4C$ são alcanos, mas este último apresenta dois carbonos devido ao ácido carboxílico do diácido e isto designa o número da cadeia.

Todas as poliamidas tendem a absorver umidade, o que afeta suas propriedades. Propriedades essas que são classificadas tanto secas como molhadas (DAM) ou condicionadas (usualmente na posição de equilíbrio, ou seja, com 50% de umidade (UR) a 23 graus Celsius). A água absorvida tende a agir como um plastificante e pode ter efeito significativo nas propriedades plásticas (Mckeen, 2012).

Tipo de Poliamida/ Nylon	Monômeros usados na reação de obtenção
Nylon 6	Caprolactama
Nylon 11	Ácido Aminoundecano
Nylon 12	Ácido Aminolaurico
Nylon 66	Ácido Adípico e a diamina 1,6-Hexametileno
Nylon 610	Ácido Sebácico e a diamina 1,6-Hexametileno
Nylon 612	Ácido 1,12-dodecanodioico e a diamina 1,6-Hexametileno
Nylon 666	Copolímero com base no Nylon 6 e no Nylon 66
Nylon 46	Ácido Adípico e 1,4-Diaminobutano
Nylon Amorfo	TPA (ácido tereftálico) e a diamina trimetil hexametileno
PPA (Polifitalamida)	Qualquer diamina e IPA (ácido isoftálico) e/ou TPA

Tabela 2.2 – Monômeros utilizados para a criação dos específicos Nylons (Mckeen, 2012).

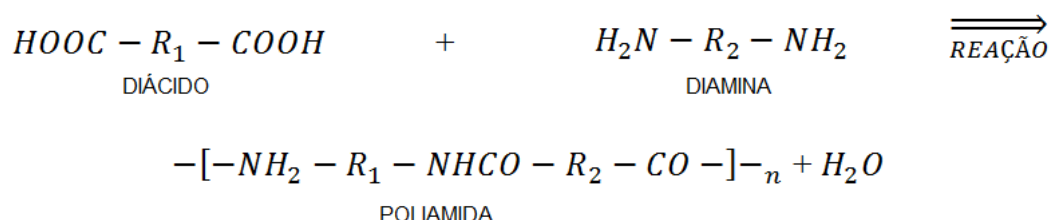


Figura 2.1 – Reação geral da síntese de Poliamida (Mckeen, 2012).

2.1.3.1 Poliamida 12 (Nylon 12)

Nylon 12 apresenta apenas um monômero, o ácido amino láurico. Este monômero possui o grupo amina necessário para a reação em uma das pontas de sua cadeia e o grupo ácido na outra. A polimerização produz a poliamida contendo 12 átomos de carbono entre dois átomos de nitrogênio dos dois grupos amida. A estrutura é mostrada na Figura 2.2.

As propriedades das poliamidas semicristalinas são determinadas pela concentração dos grupos amida nas macromoléculas. A Poliamida 12 apresenta a mais baixa concentração do grupo amida de todas as poliamidas comercialmente utilizadas e deste modo apresenta substancialmente as seguintes características:

- Menor índice de absorção de umidade (~2%): Partes constituídas de Nylon 12 mostram a maior estabilidade dimensional dentro das condições de mudança de umidade;

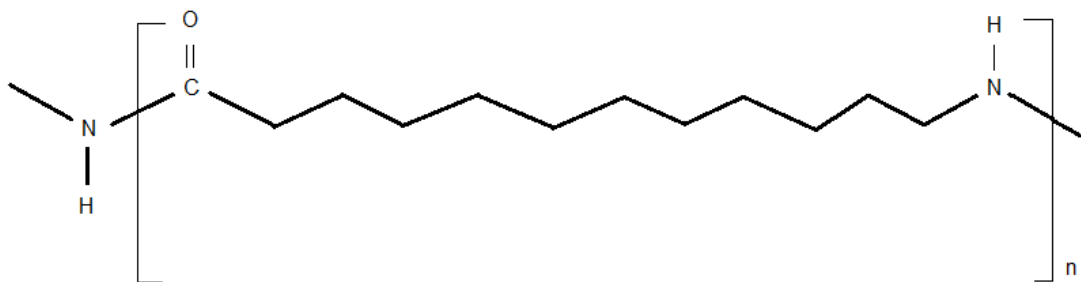


Figura 2.2 – Estrutura química do Nylon 12 (Mckeen, 2012).

- Excepcionais resistências ao impacto e ao impacto do corpo entalhado, mesmo em temperaturas muito abaixo do ponto de congelamento;
- De boa a excelente resistência contra graxas, óleos, combustíveis, fluidos hidráulicos, solventes variados, soluções salinas, e outros químicos;
- Alta resistência à tensão de tração, incluindo partes metais encapsuladas por injeção de molde ou embutidas;
- Excelente resistência à abrasão;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Apresenta propriedades de amortecimento de ruídos e vibração;
- Boa resistência à fadiga dentro de um carregamento cíclico de alta frequência;

- Alta processabilidade;
- Poliamida de preço elevado;
- Apresenta as mais baixas força e resistência a calor de qualquer poliamida genérica não modificável;

Nomes de fabricação e de mercado: Arkema Rilsan A, SEM – Grivory, Grilamid, Exopack, Dartek (Mckeen, 2012).

2.1.3. Elastômeros

Um elastômero é um polímero com a propriedade de “elasticidade”, geralmente tendo um módulo de Young notadamente baixo e uma alta tensão de escoamento comparado a outros materiais, além de ser geralmente trocado pelo nome borracha. Elastômeros são polímeros amorfos que estão acima da temperatura de transição vítrea, o que traz a possibilidade de haver o movimento dos segmentos e, portanto, espera-se que eles apresentem alta permeabilidade. Na temperatura ambiente as borrachas são relativamente macias e deformáveis. Eles são utilizados inicialmente para selos, adesivos e partes flexíveis moldadas. Os elastômeros podem ser termofixos (o que requer vulcanização, uma forma de reticulação) ou termoplásticos, conhecido como elastômero termoplástico ou TPE.

Os TPEs apresentam duas grandes vantagens em relação ao elastômero convencional termofixo (vulcanizado): são fáceis e rápidos de se processar. Outras vantagens dos TPEs são a possibilidade de reciclagem dos rejeitos, baixos gastos energéticos de processamento e disponibilidade de construção padronizada de corpos de prova com grau uniforme (o que não é geralmente possível nos termofixos).

Os TPEs são moldados ou extrudados por meio da utilização dos equipamentos padrões para processamento de plásticos em ciclos de tempo consideravelmente mais curtos que aqueles requeridos para modelagem de compressão ou transferência de borrachas convencionais.

Eles são obtidos pela copolimerização de dois ou mais monômeros utilizando tanto técnicas de polimerização em bloco como grafitação. Um dos monômeros desenvolve a parte rígida ou cristalina, os quais são

segmentos que funcionam como componentes termicamente estáveis (estes amolecem e fluem sob cisalhamento, tal como o imposto pela reticulação química entre as cadeias poliméricas de uma borracha convencional termo fixa); o outro monômero desenvolve o segmento macio, ou amorfo, o qual contribui para as características elásticas. As propriedades físicas e químicas podem ser controladas variando a proporção dos monômeros e o comprimento dos segmentos rígidos e macios. Técnicas de blocagem criam moléculas de cadeias longas com várias sequências, ou blocos de segmentos duros e macios. Os métodos de grafitização envolvem a junção de uma cadeia polimérica em outra como uma ramificação (Mckeen, 2012). As propriedades que são afetadas por cada fase podem ser generalizadas:

“Fase dura” – Propriedades plásticas:

1. Temperatura de processamento;
2. Temperatura de uso contínuo;
3. Resistência à tração;
4. Resistência ao cisalhamento;
5. Resistência química;
6. Aderência a tintas, adesivos e substratos altamente moldáveis.

“Fase Macia” – Propriedades elastoméricas:

1. Baixos limites de temperaturas de serviço;
2. Dureza;
3. Flexibilidade;
4. Tensão e compressão definidas.

2.1.4.1 Elastômeros fluorados (Viton)

Um elastômero fluorado é uma borracha sintética baseada na ligação flúor-carbono com características especiais. Quando comparado com a maioria dos outros elastômeros, ele apresenta uma ampla resistência química e um desempenho superior, especialmente em aplicações com altas temperaturas em diferentes meios. Os elastômeros fluorados são categorizados pela norma ASTM D1418 & ISO 1629 e designados por FKM. Os quatro principais monômeros utilizados para sintetizar os elastômeros fluorados são mostrados na Figura 2.3.

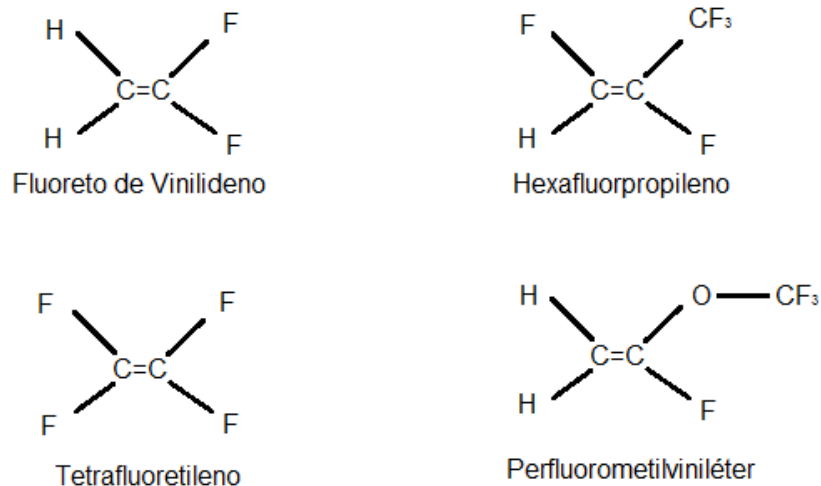


Figura 2.3 – Monômeros utilizados para a síntese de elastômeros fluorados (Mckeen, 2012).

O teor de flúor é um importante parâmetro em cada elastômero fluorado e é frequentemente registrado em suas fichas de dados. O grau mais comum de teor de flúor varia entre 66 e 70%. Geralmente um maior teor de flúor representa uma maior resistência química.

Um dos tipos de elastômeros fluorados é conhecido comercialmente como Viton GF, os quais são tetra polímeros flúor carbonados compostos por TFE (Tetrafluoretileno), VF2 (Fluoreto de Vinilideno), HFP (Hexafluorpropileno) e pequenas quantidades de um monômero curado localmente. A presença deste monômero permite a cura do peróxido do composto, o qual apresenta normalmente 70% de flúor. Como a maioria dos vários tipos de FKM em suas resistências aos fluidos, o composto Viton GF oferece uma melhor resistência à água, vapor e ácidos (Mckeen, 2012).

2.2. Considerações sobre Manufatura Aditiva

Há muitos anos discute-se o termo Prototipagem Rápida (PR) na indústria de manufatura. Após a sua definição na metade dos anos 80, uma série de tecnologias foram descritas a partir da PR, o que permitiu de uma maneira rápida e automatizada construir protótipos de produtos nos estágios iniciais do desenvolvimento do projeto. Um objeto sólido tridimensional é formado a

partir da deposição sequencial de camadas planas de materiais, combinando uma variedade de diferentes técnicas para tal feito.

O termo manufatura aditiva é definido pela ASTM (American Society for Testing and Materials) como: o processo de junção de materiais para produzir objetos a partir de dados 3D, usualmente através do empilhamento de camadas, como oposição às metodologias de extração de materiais de bloco. São seus sinônimos: Fabricação aditiva, Processos aditivos, Técnicas aditivas, Manufatura por Adição de Camadas, Manufatura de Camadas ou Fabricação de Forma Livre.

Observa-se que a tecnologia atual aplicada vai muito além do simples conceito de prototipagem. A PR tem se desenvolvido de forma fundamentalmente incremental com a introdução de tecnologias chave. A cura por fotopolimerização é um dos princípios vistos nas primeiras máquinas. A primeira máquina comercial de PR, a Stereolithography Apparatus (SLA) foi comercializada em 1988. (Luo, 2002)

Outros processos de PR foram se desenvolvendo posteriormente, como a sinterização seletiva a laser (SLS); modelagem por fusão e deposição (FDM) desenvolvida pela Stratasys e laminação por folhas (LOM) desenvolvida pela Helisys. Em função do excesso de material utilizado no processo, o LOM não é mais usual, em contra partida as outras tecnologias ainda são utilizadas. Em 1993, foi incluída a deposição baseada em partícula e a impressora 3-D licenciada pelo MIT.

Ao longo desses anos, o conhecimento e a experiência têm impulsionado o que se vislumbra como a “indústria de impressão tridimensional”, a qual visa desenvolver impressoras com capacidade 3D, para aplicações com custos reduzidos e nas mais diversas áreas. Inicialmente as tecnologias de PR tinham como objetivo a prototipagem de modelos em escala produtiva, o que incluiria, ao desenvolverem-se, novas soluções construtivas e a manufatura direta para itens de consumo.

Características como controle de velocidade de eixos em deslocamento, propriedades dos materiais e precisão dimensional têm apresentado certa queda em melhorias na grande parte das tecnologias comerciais, o que gera abertura e observação da pesquisa em PR. As máquinas voltadas a PR

tendem a ter uma redução no seu custo de aquisição devido ao aumento do interesse das indústrias e centros de pesquisa, o que intensifica também a faixa de aplicações da tecnologia. O reconhecimento da indústria destas tecnologias é evidente pelo desenvolvimento de padrões através da ASTM e ISO. O termo Manufatura Aditiva (MA, dentro da indústria de Manufatura) e Impressão 3D para o público em geral (usuários) são frutos do reconhecimento das tecnologias de PR. (Campbell, 2012) (Gibson, 2010).

Os processos que envolvem técnicas de prototipagem rápida foram definidos pela ASTM (American Society for Testing and Materials) como Manufatura Aditiva (Gibson, 2010). Com isso, a tecnologia de Manufatura Aditiva permite que o usuário não necessite fazer o planejamento convencional de um processo de fabricação, pois um modelo é gerado a partir de um sistema tridimensional (CAD) e fabricado diretamente. A Manufatura Aditiva envolve a manufatura de peças complexas, através da adição de material, camada por camada, a partir de um modelo CAD (Wohlers, 2012).

O termo “projeto” em Manufatura Aditiva abrange todos os conjuntos de projetos de todas as áreas, como projeto Industrial, projeto Técnico de Engenharia Mecânica, projeto de um Bem de Consumo ou projeto de Moda (Fashion Design) e pode ser entendido com projeto de Produto.

Atualmente há um crescimento do conceito e aplicação da Manufatura Aditiva e esta vem sendo aplicada nas mais diversas áreas conforme mostra a Figura 2.4 a seguir: (Wohlers, 2012).

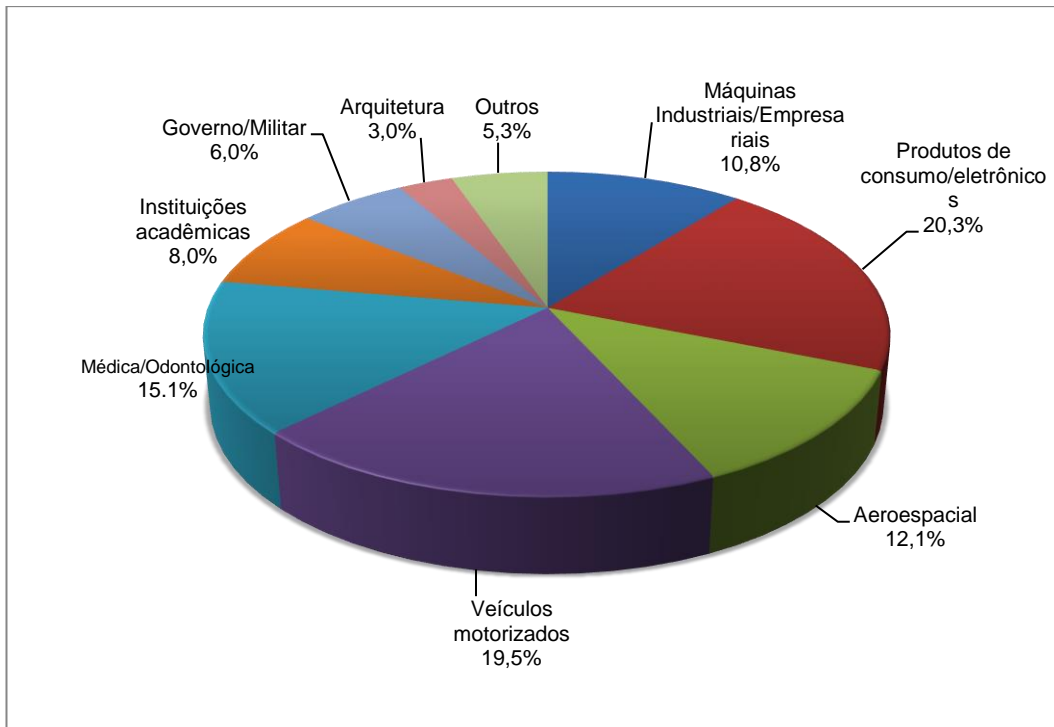


Figura 2.4 – Áreas de aplicações da manufatura aditiva (Wohlers, 2012).

A Manufatura Aditiva apresenta uma grande diversidade de processos. Uma das formas de classificar esses processos é a partir da consideração de manufatura e matéria-prima. A Figura 2.5 mostra as intersecções entre os processos de MA e as disponíveis famílias de materiais.

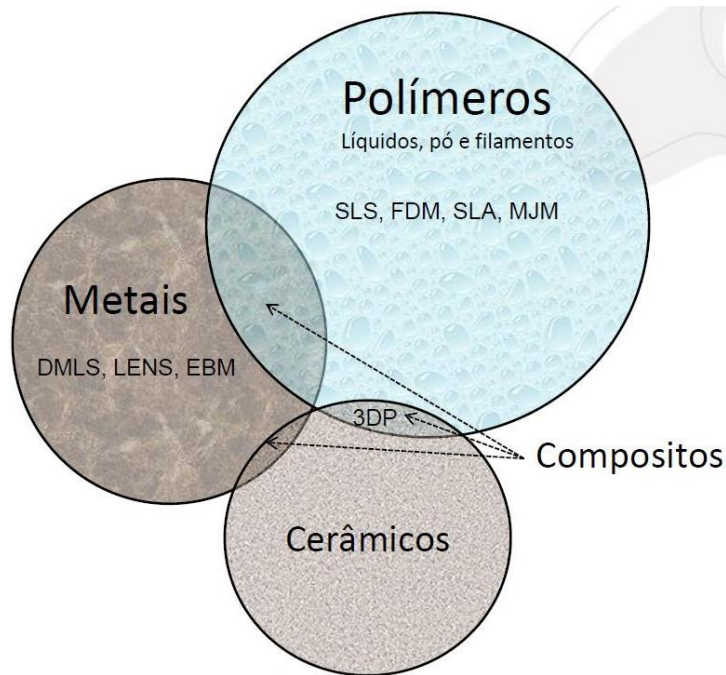


Figura 2.5 – Interseção entre os tipos de materiais e os processos de Manufatura Aditiva (Inforçatti, 2012).

A natureza da matéria prima é responsável pela classificação dos processos que envolvem a Manufatura Aditiva, como mostrado na sequência a seguir: (Luo, 2002) (Gibson, 2010).

- Resinas fotossensíveis (acrílicas e elastoméricas);
- Materiais sólidos (termoplásticos, madeira, papel e acrílico);
- Materiais em pó (cerâmico, plástico, metal e elastômeros).

A Indústria e os Centros de Pesquisa utilizam alguns processos de Manufatura Aditiva, os quais serão mostrados a seguir:

2.2.1. Processos de Fotopolimerização

A polimerização de uma resina foto curável, a qual se solidifica devido à irradiação eletromagnética, é conhecida como o processo de fotopolimerização. Estando dentro da faixa do espectro ultravioleta a grande maioria dos polímeros comerciais é curável.

2.2.1.1 Processos de cura por ponto

A estereolitografia é a terminologia mais usada para o processo de cura por ponto em foto polímeros. Neste processo as peças são construídas ponto a ponto, linha por linha, camada por camada numa cuba de resina líquida foto curável, como mostra a Figura 2.6.

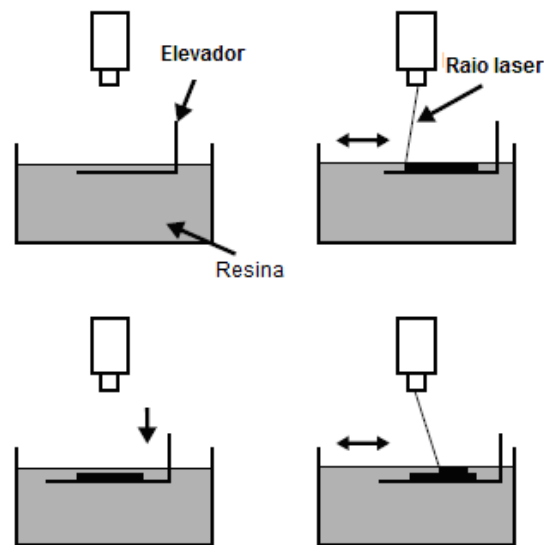


Figura 2.6 - Esquema do processo de estereolitografia (Power *et al.*, 2007).

Através de um mecanismo de recobrimento, uma fina camada é formada no topo inicialmente. Na superfície da resina líquida há o desenho da seção transversal da camada através de um raio laser focado precisamente. A resina é curada por toda a trajetória feita pelo *laser*, criando uma camada sólida que fica aderida na plataforma. Através de um sistema de movimentação, a plataforma é deslocada para um nível inferior e uma nova camada é feita sobre a camada recém-formada. Um exemplo comercial desta tecnologia é a *iPro™ 9000 XL* da empresa *3-D Systems Corporation*.

2.2.1.2 Processos de cura por camada

Um dos problemas da cura usando uma fonte de energia por ponto é a sua limitação de velocidade e para superar este fato foi desenvolvido um processo no qual há a utilização de projetores DLP que curam camadas inteiras em um único passo. Alguns exemplos comerciais desta tecnologia

são: o *ULTRA²* da empresa *EnvisionTEC GmbH*, a *V-Flash* e a *ZBuilder® Ultra* da empresa *3-D Systems Corporation*.

2.2.2. Processos baseado em fusão

O processo baseado em fusão de filamento (FMD) é uma técnica de Manufatura Aditiva na qual se utiliza normalmente um termoplástico. O processo FDM utiliza um cabeçote de fusão, que se movimenta na direção X e Y. A partir desse cabeçote aquecido, se desloca um filamento de material, que é extrudado em estado semi-amolecido por um bico injetor. De acordo com a geometria da peça há a deposição deste material sobre um substrato. Após a deposição, a camada se solidifica devido à condução térmica, conforme nota-se na Figura 2.7.

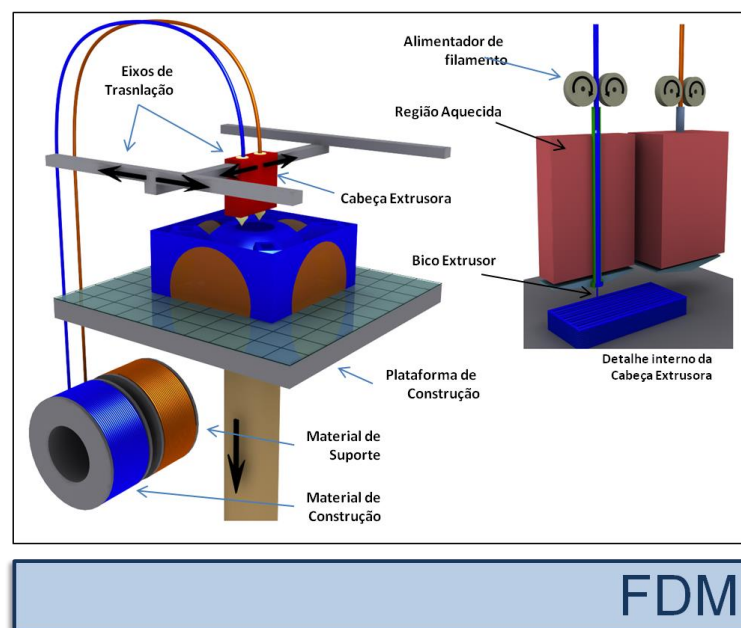


Figura 2.7 – Representação esquemática do processo de modelagem por deposição de fundidos (FDM) (Power *et al.*, 2007).

Uma enorme variedade de materiais para construção de peças é apta ao trabalho neste tipo de Manufatura Aditiva, tendo como exemplo: ABS, poliamida, elastômeros, poli olefinas, poliamidas e polifenilsulfonas. Materiais biocompatíveis, como a poli- ϵ -caprolactona, apresentam uso

atualmente para aplicações em engenharia teciduais. Um exemplo comercial desta tecnologia é a *FORTUS 900mc* da empresa *Stratasys Ltd.*

2.2.3. Processos de laminação de camadas

A LOM (Manufatura Laminar de Camadas) foi uma das primeiras técnicas de Manufatura Aditiva a serem comercializadas. Esta técnica consiste na laminação camada por camada de folhas de material, sendo que cada folha representa um corte de seção transversal da peça. A partir deste princípio, muitos outros processos foram feitos e nestes as alterações se remetiam em mudar o material empregado nas lâminas ou camadas, ou de que forma é realizada a junção das partes (camadas), que pode ser utilizando-se cola ou solda dependendo do material.

2.2.4. Processos de impressão

A impressão de partículas é um dos tipos de tecnologias de Manufatura Aditiva que estão em desenvolvimento. Esses processos podem ser classificados como: impressão direta e impressão por aglutinantes. No processo de impressão direta o material usado na peça construída é diretamente impresso através do bico de impressão. Os processos de impressão por aglutinantes envolvem a impressão seletiva de finas gotas de fluido em uma base de pó, criando uma forma de corte de seção transversal, através da adesão do pó.

2.2.4.1 Processo de impressão por aglutinante

A tecnologia básica do processo de impressão por aglutinante foi desenvolvida e patenteada por professores e alunos do *Massachusetts Institute of Technology, MIT - EUA*. Este processo foi chamado de impressão tridimensional, ou impressão 3-D. Através da deposição seletiva do aglutinante líquido por *spray* ou impressão na forma de finas gotas ocorre o processo, o qual é feito através de um cabeçote de impressão montado sobre uma base de pó, como é mostrado na Figura 2.8. Depois da deposição o aglutinante se umidifica, e através de uma reação química este

adere às partículas de pó entre elas e também com as partículas da última camada. O cabeçote contém vários bicos de injeção paralelos, possibilitando o preenchimento de uma área definida a cada impressão e normalmente estes cabeçotes são os mesmo utilizados por impressoras de jato de tinta.

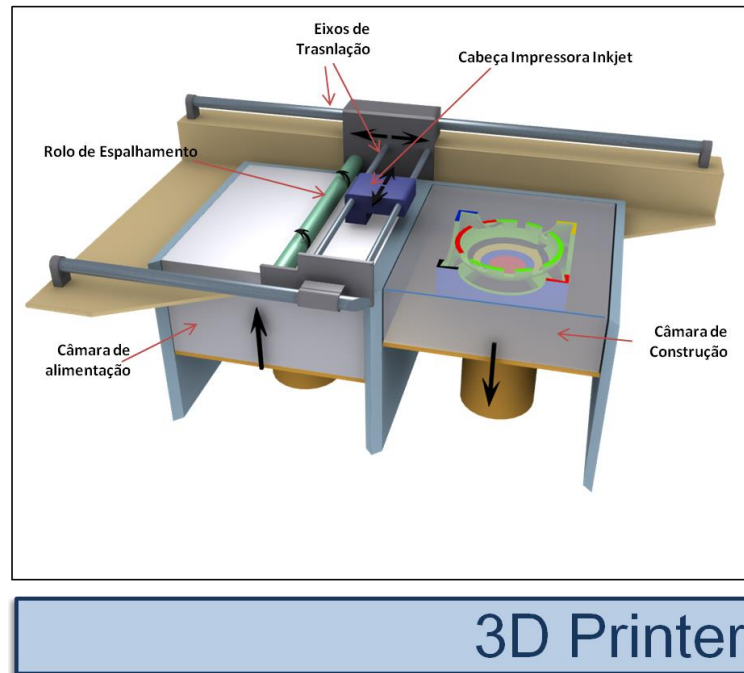


Figura 2.8 – Representação esquemática do processo de impressão 3-D (Power *et al.*, 2007).

O local onde há o pó e será gerada a peça é a área na qual o cabeçote de impressão se desloca. As áreas da base de pó, que ficam fora da geometria da peça, se mantêm soltas e servem de suporte para as outras camadas que serão impressas subsequentemente. Após a formação de uma camada, a plataforma se desloca para baixo, em uma distância pré-definida, e promove uma nova superfície de pó. O aglutinador é impresso novamente, de acordo com a seção transversal correspondente da peça. O processo inteiro ocorre em temperatura ambiente. As vantagens desta tecnologia estão relacionadas com o custo reduzido de operação e manutenção e com a facilidade de operação. A grande desvantagem deste processo é o acabamento superficial, a limitação de geometria e a resolução. Um exemplo

comercial desta tecnologia é a *ZPrinter® 850* da empresa *3-D Systems Corporation*.

2.2.4.2 Processo de impressão direta

A ação de pressionar o material de construção diretamente no formato da peça é um processo conhecido por impressão direta. Um exemplo deste processo é a *R66®PLUS* da empresa *SolidScape Inc.* que utiliza dois cabeçotes injetores de cera, no qual um deles deposita uma cera de suporte a qual servirá de sustentação para construção do protótipo, e o outro deposita uma cera de construção que será a peça final. Posteriormente, a cera de suporte é removida, obtendo assim o protótipo final conforme modelo projetado em CAD. Esse sistema possibilita um acabamento superficial de qualidade, bem como um elevado grau de precisão, porém o tempo de geração da peça é relativamente elevado.

Outro exemplo deste processo, o qual é bastante conhecido, é a *Objet Connex500™* comercializada atualmente pela empresa *Stratasys Ltd.*. Este equipamento utiliza resina fotossensível no jato com múltiplos cabeçotes. Neste processo, há a cura instantânea dos jatos de resina depositados tanto na resina do modelo quanto na de suporte através de uma luz que incide sob a camada logo após sua deposição. Desta forma, o protótipo é construído dentro do equipamento camada-a-camada. Depois de finalizado, o protótipo é retirado e o suporte da peça também é removido em uma estação de jateamento de água. As propriedades reológicas são alteradas ao longo do processo, pois a presença de vários cabeçotes de jato permite que a tecnologia gere um protótipo com vários tipos de materiais ao longo do processo de fotopolimerização.

2.2.5. Processo de sinterização/fusão de pó

A representação de um esquema de processo de sinterização a base de pó (SLS) pode ser visto na Figura 2.9. Neste processo uma fina camada de pó fundível por calor, é depositada numa plataforma de construção usando um rolo de contra rotação para seu espalhamento. Através do uso de um

aquecedor, o processo é mantido a uma temperatura elevada logo abaixo do ponto de fusão do material em pó, dentro de uma câmara fechada, na qual ocorre a sinterização, e cheia de gás inerte. Esse procedimento previne o empenamento da peça durante sua construção e minimiza a quantidade de energia requerida pelo *laser* no processo.

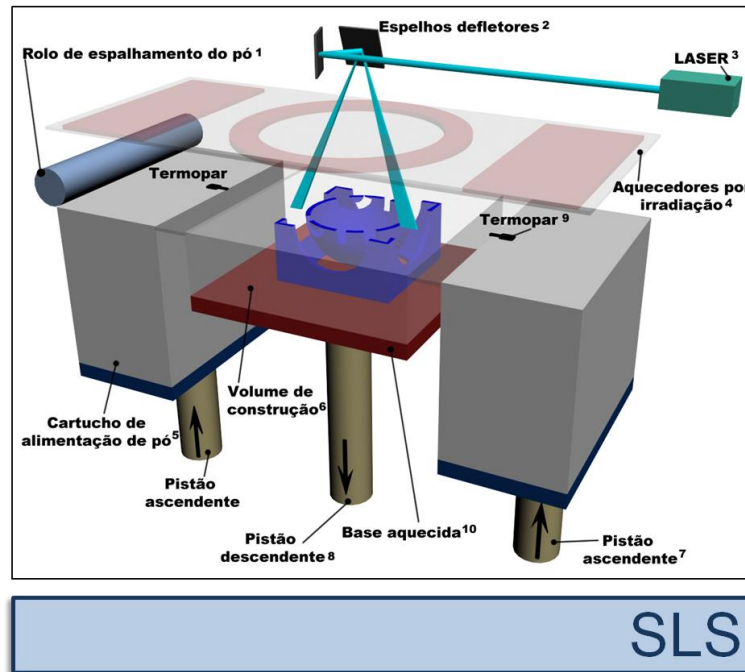


Figura 2.9 – Representação esquemática de um mecanismo de sinterização e fusão de pó à Laser (Power *et al.*, 2007).

O pó é amolecido a partir da passagem do *laser* ou feixe de elétrons, o qual é precisamente focado e direcionado para a base do material, seguindo a trajetória da seção transversal da peça. O pó no contorno está solto e funciona como suporte para camadas a serem feitas posteriormente. Após a obtenção de uma camada, a plataforma se desloca e deixa à mostra uma nova camada de pó, para a criação de uma nova camada com contorno da peça.

2.2.5.1 Processo de sinterização de polímeros à base de pó

Entre os anos 80 e 90, na Universidade do Texas em Austin nos EUA, a tecnologia básica para a fusão de polímeros à base de pó foi desenvolvida. O processo SLS foi originalmente desenvolvido para produzir protótipos de

material termoplástico em pó. Visando a fabricação de ferramentas e partes funcionais, o princípio SLS foi estendido para as cerâmicas e metais. Parâmetros importantes do processo se relacionam com: temperaturas envolvidas no processo, intensidade e precisão do laser, escaneamento e características do pó.

A versatilidade com a qual a sinterização trabalha com diferentes materiais, como cerâmicas, polímeros e até metais é a principal vantagem deste processo. A economia com limpeza de peças e tempo de construção se dá devido a não exigência de suporte externo nestes processos. A precisão e o acabamento superficial das peças sinterizadas a laser dependem da espessura da camada sinterizada, do tamanho da partícula do pó e da região de foco do laser. Um exemplo comercial desta tecnologia é a sPro™ 230 da empresa 3-D Systems.

2.2.5.2 Processo de fusão de metais à base de pó

A produção de peças utilizando a fusão de metais à base de pó está em desenvolvimento com o estudo de alguns processos. Estes métodos utilizam um rígido controle de atmosfera, fonte de alta energia e novas estratégias de escaneamento. O SLPR foi desenvolvido em Aachên na Alemanha pelo Instituto Fraunhofer de Tecnologia à Laser. Este processo foi bem sucedido aplicado a alguns tipos de metais e cerâmicas. A Fusão Seletiva à Laser, como também é conhecido, têm fornecido precisão e rugosidades superficiais abaixo de 50 µm. A EBM, traduzido como Fusão por Feixe de Elétrons, é uma nova variação nos processos de fusão de metais a laser e à base de pó. Este processo, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Tecnologia de Chalmers na Suécia, faz uso de um feixe de elétrons como fonte de calor em substituição ao laser.

Nesta técnica, um feixe de elétrons é focado em uma superfície de pequena espessura, com uma pré-distribuição de pó, dentro de uma câmara a vácuo, causando fusão localizada e re-solidificação.

Alguns benefícios do EBM, em relação ao processo a laser são: alta eficiência de conversão de energia e maior facilidade de manipulação do feixe, levando em conta a focalização e o deslocamento, resultando em uma

movimentação mais rápida. A desvantagem do EBM é que há a necessidade de criação de ambientes a vácuo e os materiais de sinterização devem ser eletricamente condutivos.

2.2.5.3 Processos de deposição de metais

O processo de deposição de metais envolve a completa deposição dos pós-metálicos e derretimento destes, através do raio laser focado de alta potência, o qual é a fonte de calor para construção de peças tridimensionais. Devido ao fato da técnica envolver completo derretimento e solidificação do material em pó em todos os pontos, conforme a Figura 2.0 ilustra, as peças resultantes apresentam alta densidade ao longo do processo. Este ponto contrasta com as peças porosas sinterizadas parcialmente, as quais são produzidas em inúmeras etapas de fusão à base de pó.

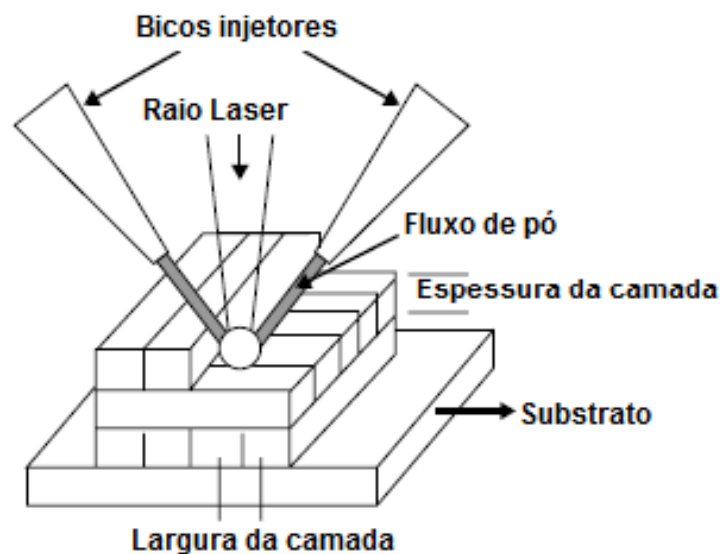


Figura 2.10 – Representação esquemática do processo de deposição de metais (Power *et al.*, 2007).

Neste processo um raio laser é diretamente focado sobre o substrato situado numa plataforma de construção movida e controlada por computador. O laser gera uma pequena massa liquefeita, a partir do material amolecido no substrato, no qual o material em pó é injetado. Esse material amolecido é solidificado após a retirada do *laser*, permitindo que um perfil de material

soldado à camada abaixo seja formado ao longo da linha de *escaneamento* do laser e, desta forma, cada camada seja formada pelo número consecutivo de caminhos sobrepostos. Este processo ocorre dentro de uma câmara de gás inerte e requer suportes para a construção de perfis sem apoio na peça. Entretanto, máquinas avançadas com cinco eixos são capazes de gerar perfis, sem apoio e sem a necessidade de estruturas de suportes.

O processo de deposição de metais não é capaz de produzir peças em plástico, porém tem a capacidade de produzir peças densas totalmente funcionais em metais e cerâmicas. Esta habilidade de produzir peças densas é a maior vantagem desta técnica, além da formação de microestruturas finas e refinadas, sendo que com ela peças com geometrias complexas e intrincadas cavidades internas, que antes não poderiam ser processadas através de técnicas convencionais, agora são produzidas. As limitações deste processo são: baixa velocidade de construção, baixa resolução e acabamento superficial em relação a outras tecnologias de Manufatura Aditiva.

3. EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste item deste trabalho apresenta-se uma introdução e desenvolvimento do conceito de permeabilidade, qual a importância de seu estudo, principais aplicações, formas de medição, histórico do equacionamento e cálculo empírico.

3.1. Permeabilidade em Corpos Porosos

3.1.1. Introdução

A passagem de pequenas moléculas através de materiais sólidos é chamada de permeação. A molécula que passa através de um sólido é chamada de permeante. A medição de quanto permeável é um meio ou quanto permeante é uma substância é conhecida por permeabilidade e as suas propriedades são importantes em muitas aplicações industriais e de pesquisa.

Esta medição é exemplificada pela Figura 3.1 a seguir para corpos porosos:

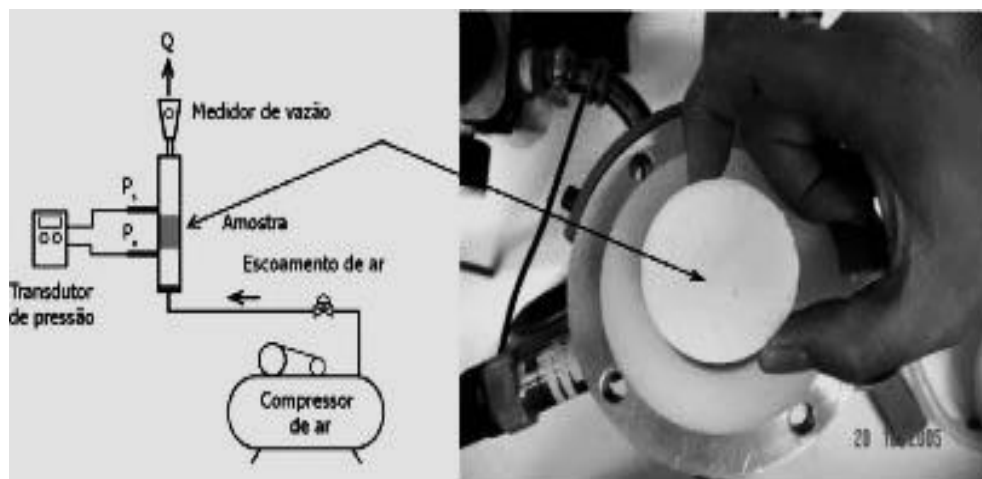


Figura 3.1 – Dispositivo para medição de permeabilidade

A permeabilidade de materiais de acondicionamento (filmes de embalagem, recipientes selados, cápsulas vedadas, etc.) precisa estar ligada com a sensibilidade do conteúdo das embalagens para cada permeante inserido em seu pacote e estar especificada nas prateleiras cotidianas. Alguns

pacotes devem ser selados de forma quase hermética, enquanto que outros podem (em alguns casos devem) ser seletivamente permeáveis. Portanto, o conhecimento dos coeficientes de permeabilidade de um meio poroso é um importante requisito de projeto. Há muitos exemplos de importância sobre as propriedades de permeabilidade, e alguns deles são citados a seguir: (McKeen, 2012).

- A pressão do ar nos pneus dos veículos deve diminuir tão lentamente quanto for possível, e por isso deve-se conhecer qual o comportamento do fluido que atravessa a barreira de borracha de forma mais lenta e qual a sua taxa de passagem;
- Embalagens de alimentos precisam reter em seu interior a umidade para prevenir que o produto desidrate e também estas precisam manter o oxigênio fora, característica esta que desacelera o apodrecimento;
- O bloqueio (não permeabilidade) do vapor de água em materiais isolados é importante para proteger seu interior da reação de corrosão;
- Utilizar materiais como barreira (não permeáveis) para peças que são usadas em contato com combustíveis e seus produtos de queima é essencial para encontrar soluções para diminuir as emissões veiculares.

3.1.2. História

A primeira menção científica da travessia da água por uma membrana (permeação) foi feita por um físico, Abbé Jean Antoine Nollet (1700-1770). Nollet selava garrafas de vinho com uma bexiga de porco e as armazenava embaixo d'água. Depois de um tempo, ele percebeu que a bexiga inchava para fora. Devido à sua curiosidade científica, ele fez novamente o experimento, mas desta vez de outra forma: ele encheu a garrafa com água e armazenou dentro de um local com vinho. O resultado foi o encolhimento da bexiga para dentro da garrafa. Esta foi a evidência do transporte (permeação) da água através da bexiga (membrana permeável) de porco

comparando uma área com grande concentração em relação à outra de baixa concentração.

O primeiro estudo de atravessamento (permeação) de um gás através de um polímero foi conduzido por Thomas Graham em 1826. Graham observou a perda em volume de uma bexiga de porco úmida inflada com dióxido de carbono. Em 1831, John Kearsley Mitchell, professor de medicina e fisiologia do Philadelphia Medical Institute, observou que balões encolhiam em diferentes taxas quando eles eram cheios com diferentes gases.

Em 1856, Henry Gaspard Phillibert Darcy (nasceu em 1803) formulou a sua lei para o transporte linear e homogêneo de água num meio poroso (essencialmente areia e camadas de cascalho). A lei de Darcy é uma importante relação básica na hidrologia. Exemplos desta aplicação incluem o escoamento da água através de um aquífero e o escoamento do óleo cru, água e gases através da rocha em reservatórios de petróleo. A lei de Darcy é uma relação entre a taxa de descarga instantânea através de um meio poroso, a viscosidade do fluido, e a queda de pressão dada numa determinada distância, lei esta que pode ser mais bem observada na Figura 3.2 seguinte:

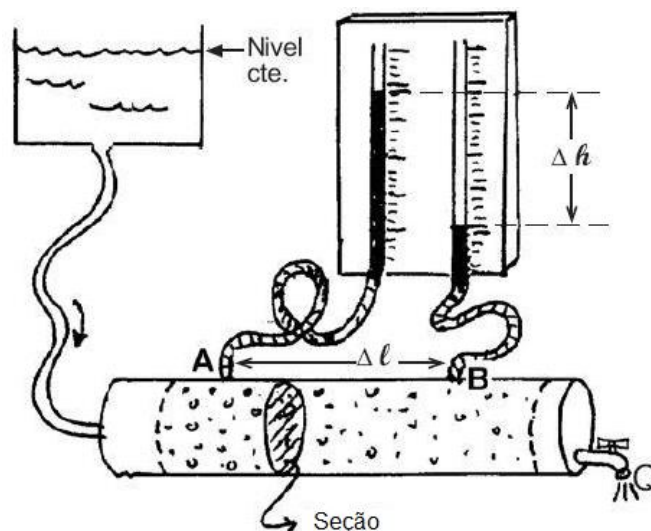


Figura 3.2 – Esquema do experimento de Darcy

Mais adiante o equacionamento de Darcy visando à medida de permeabilidade será tratado com maior detalhamento.

A teoria de atravessamento (permeação) através de materiais poliméricos não foi desenvolvida até 1866, quando Thomas Graham propôs o processo de solução-difusão, no qual ele postulou que o processo de permeação envolve a dissolução do penetrante, seguida pela transmissão da espécie dissolvida através da membrana. Outras importantes observações que Graham fez naquele momento foram as seguintes: (Mckeen, 2012).

- Travessia (permeação) do fluido era independente da pressão;
- O aumento da temperatura conduzia ao decréscimo da solubilidade do penetrante, porém fazia com que a membrana se tornasse mais permeável;
- A exposição prolongada em temperaturas elevadas afetava a capacidade de retenção da membrana;
- As diferenças na permeabilidade poderiam ser exploradas para aplicações que envolviam gases e meios de aprisionamento destes;
- A variação na espessura da membrana alterava a razão de passagem (permeação) dos fluidos, mas alterava as características de separação do polímero.

3.1.3. Principais Aplicações

A permeabilidade e, por consequência, a lei de Darcy são amplamente difundidas nos estudos (projetos geotécnicos) de barragens, hidroelétricas, filtros drenantes, fundações fossas sépticas, construções que envolvem movimentação e estabilidade de solos e a construção civil. A Figura 3.3 a seguir representa uma das aplicações da permeabilidade nos solos:

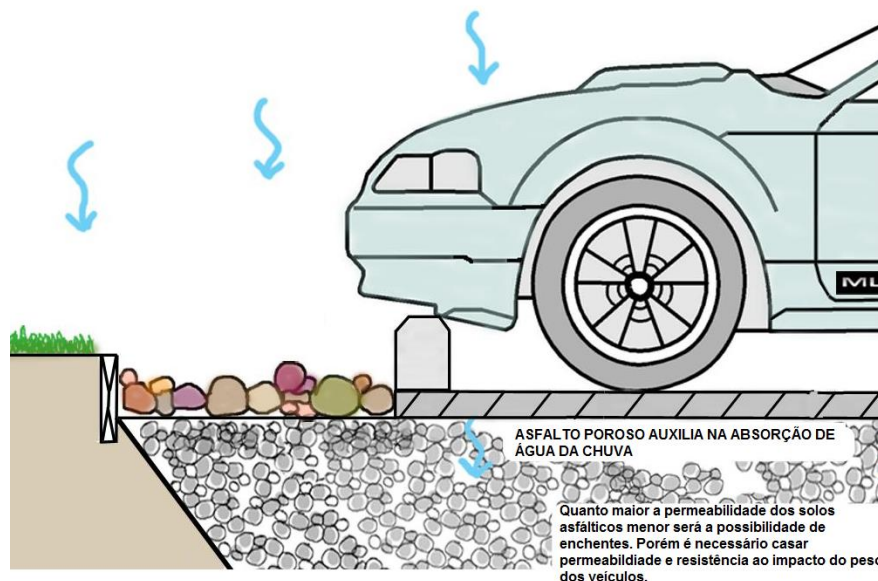


Figura 3.3 – Aplicação do estudo da permeabilidade dos solos

Mas atualmente vem ganhando corpo o estudo da permeabilidade em materiais poliméricos, embalagens plásticas e recipientes, dos quais, a avaliação da permeabilidade, permite cálculos de durabilidade e tempo de deterioração dos produtos enclausurados.

3.1.3.1 Permeabilidade em materiais de construção

É de interesse de vários ramos da ciência o estudo dos fenômenos de transporte de massa através de materiais porosos, sob diferentes óticas de aplicação, principalmente na engenharia de materiais de construção civil.

Tanto na parte estrutural (concretos e blocos) quanto nos revestimentos e acabamentos (argamassas, pisos e cerâmicas), o correto entendimento do fenômeno citado é responsável pela melhoria do processo de desenvolvimento dos mais diversos tipos de insumos utilizados na construção. Na construção civil há vários exemplos que podem ser citados quanto à aplicação desse tipo de tecnologia. Um exemplo a se tomar são os elementos de fundação, os quais devem ser confeccionados com a finalidade de se evitar o fenômeno de umidade ascendente, o qual é responsável por patologias nos elementos contidos sobre a fundação e,

portanto, devem ser quase impermeáveis. Esse fenômeno está representado na Figura 3.4.

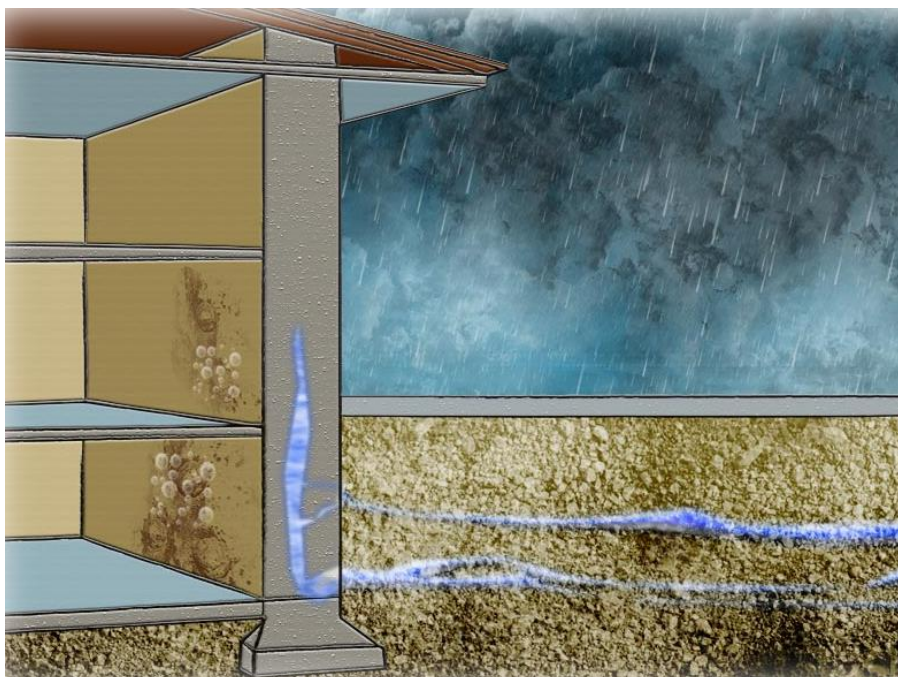


Figura 3.4 – Fenômeno da umidade ascendente

Em relação ao comportamento referente à permeabilidade das argamassas de revestimento, leva-se em conta que estas devem possuir características mistas: a umidade externa não pode entrar carregando agentes deletérios que possam eventualmente causar danos, ao mesmo tempo, o excesso de umidade contida no interior de paredes e elementos estruturais precisa conseguir migrar para fora através da última camada de revestimento. Outro exemplo é o processo de saída de vapor de água durante a ocorrência do processo de cura no processamento de concretos refratários. Este escape de vapor ocorre de forma aguda chegando a provocar explosões nos elementos de concreto e isso ocorre em função da temperatura de secagem e do tempo de exposição (Cardoso, 2004). A permeabilidade se torna determinante em casos nos quais concretos são expostos a altas temperaturas, como situações de incêndio, pois esta pode medir o grau de deterioração do material, já que em situações extremas como as citadas, as águas livres contidas nos poros acabam por exercer elevadas pressões de

vapor responsáveis por lascamentos explosivos (spalling) (Kalifa; Menneveau; Quenard, 2000).

3.1.3.2 Permeabilidade em solos

Resistência a cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade são as principais propriedades de comportamento dos solos.

Uma das características mais importantes é a permeabilidade, pois esta interfere em grande número de problemas de Engenharia, como os seguintes: drenagem, recalques por adensamento, percolação pelas fundações e através de barragens de terra, e outros (Vargas, 1978). A permeabilidade é também conhecida por condutividade hidráulica na literatura, e os valores medidos a partir desta propriedade nos solos são tratados e identificados por coeficiente de condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade.

Os ensaios realizados no estudo do fluxo de diferentes líquidos em materiais porosos como os solos são realizados em campo e/ou em laboratório, visando à determinação das condutividades hidráulicas, conforme apresentado na Figura 3.5.

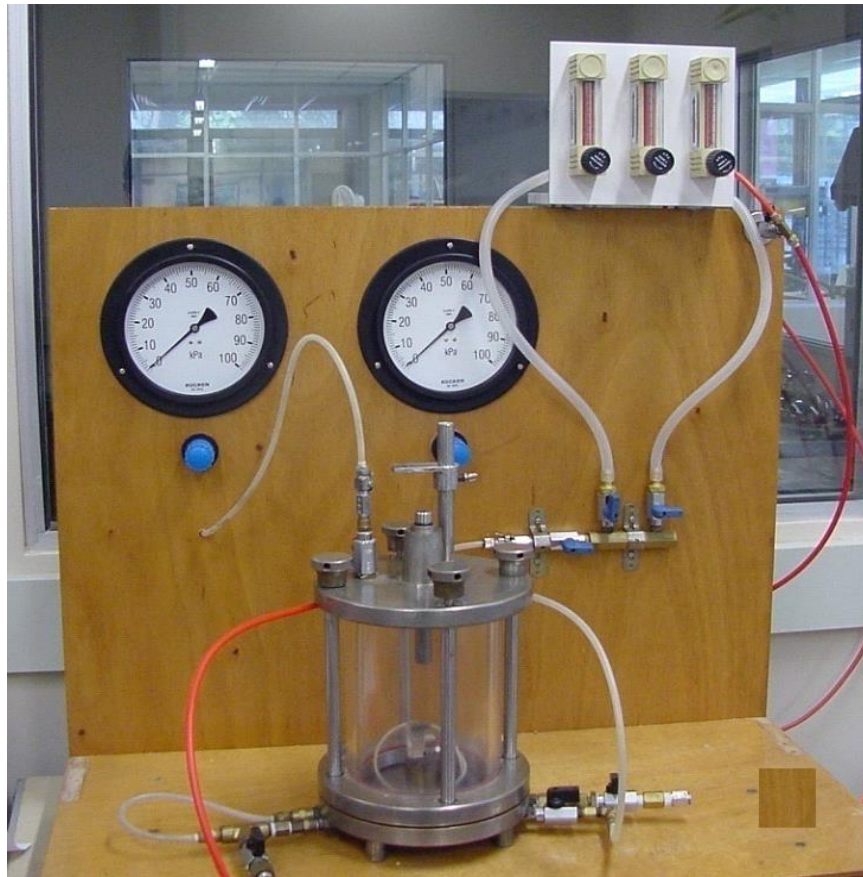


Figura 3.5 – Permeômetro para ensaios de permeabilidade em solos

Os dois tipos de permeômetros utilizados nos ensaios realizados em laboratório são, geralmente, os de parede rígida e os de parede flexível. Os mais utilizados até o início da década de 80 eram os permeômetros de parede rígida, período no qual se reconheceu que nos ensaios em solos argilosos o fluxo lateral podia influenciar significativamente nos resultados, particularmente quando estes solos eram permeados e havia a contração do material por tratar-se de líquidos orgânicos. A partir disso motivou-se o desenvolvimento do ensaio de condutividade hidráulica em permeômetro de parede flexível. Frequentemente os permeômetros de parede flexível são os especificados para os ensaios de permeabilidade em materiais argilosos, pois há uma redução nos tempos de execução devido à utilização de contrapressão na fase de saturação do material. As barreiras horizontais impermeáveis são utilizadas para minimizar a infiltração de água para o interior de maciços de resíduos (barreiras de

cobertura) ou para controlar a liberação de efluente líquido do resíduo (barreiras de base ou fundo). A condutividade hidráulica destas barreiras deve ser baixa e permanecer nesta condição por longos períodos de tempo (Heineck, 2002).

As principais barreiras impermeáveis são: solo argiloso compactado, argila natural e de materiais sintéticos. A condutividade hidráulica K deve ser inferior a 10^{-6} ou 10^{-7} cm/s para o maciço que compões essas barreiras e este deve estar isento de trincas, perfurações, falhas, fraturas etc. (Piedade Junior, 2003).

Os solos argilosos são o principal material para barreiras de contenção de resíduos. Geralmente estas barreiras são constituídas de revestimento fundo e taludes de aterros sanitários e lagoas de tratamento de chorume (Moevenian; Yasrobi, 2008).

A literatura internacional indica um interesse crescente no entendimento dos mecanismos de condutividade hidráulica de solos argilosos, tendo em vista a percolação de lixiviados em aterros sanitários (Castilhos Junior, 2003).

3.1.3.3 Permeabilidade em embalagens Plásticas

A indústria de embalagens de alimentos é um dos lugares no qual requer o desempenho de embalagens de materiais selecionados, especialmente em termos de fronteiras requeridas. A capacidade das modernas lojas de varejo, tal como supermercados, de oferecer e distribuir uma ampla seleção de produtos depende da preservação da qualidade destes. Para este fim a função do material da embalagem é multivariada e inclui a proteção acima da requerida tanto nas prateleiras das lojas quanto em casa, promoção do produto através do *design* gráfico atrativo e a capacidade de distribuir o produto de forma satisfatória. A proteção do produto deve levar em conta os fatores que surge durante o armazenamento, distribuição, venda e armazenamento pessoal.

Através da combinação de *design* e seleção de material, as embalagens de gêneros alimentícios devem prover um ambiente o qual estabilize o sistema usado para preservar o produto e manter uma barreira efetiva e adequada contra as influências deteriorativas externas. Dentro do escopo das

embalagens plásticas há um número de processos que se prestam a produção de recipientes, como um exemplo de processo de conformação plástica, a injeção e moldagem por sopro, para tubos, garrafas e latas.

Os materiais plásticos também podem ser combinados juntos para processos como laminação, extrusão de camadas ou coextrusão para formar estruturas com multicamadas as quais podem ser sub-sequencialmente formadas dentro de bolsas flexíveis, colares, tubos ou recipientes com desenhos profundos.

A escolha de materiais plásticos adequados para conversão a partir de tais processos é ampla e por isso a seleção de um material particular para uma dada aplicação será feita como resultado da consideração das propriedades físicas, processabilidade, propriedades de fronteira e custo. Em casos onde a fronteira para um número de agentes é requerida é improvável que um único polímero seja satisfatório, conseqüentemente, um número de diferentes polímeros em combinação frequentemente serão empregados quando suas propriedades individuais podem ser um benefício no fornecimento da proteção requerida ao elemento. Esta capacidade de combinar polímeros oferece escopo adicional ao número de materiais que estão disponíveis para embalagens e permite a manipulação das propriedades de fronteira para se adequar às exigências dos produtos.

Os requisitos das embalagens de sistemas biológicos tais como os gêneros alimentícios e farmacêuticos são mais diversos e complexos do que aqueles relacionados aos outros produtos. As principais funções das embalagens são manter, apresentar e armazenar o produto. A proteção do produto pode ser considerada como sendo a taxa de mudança da qualidade e isto inclui mudanças físicas (danos físicos durante armazenamento ou transporte, perda de consistência ou crocância, perda de aparência e apelo de vendas) e organolépticas (perda de sabor, coloração, odor).

Com isso a taxa de deterioração de um produto está relacionada com a composição, fatores de processamento e fatores ambientais, os quais, por sua vez, são afetados por agentes diretos e indiretos. Um agente direto conduz ao imediato apodrecimento do alimento (término de gosto ou cor) e conduz ao fim da validade. O agente indireto traz outras mudanças

(amolecimento ou endurecimento) no produto o qual não necessariamente torna-se inútil. Alguns destes agentes são listados abaixo:

- Agentes diretos: Físicos, bioquímicos e microbiológicos;
- Agentes indiretos: Tempo, temperatura, umidade, luminosidade, gases e pressão.

A maioria dos sistemas alimentícios são misturas complexas de vários componentes e elementos, e em quase todos os casos geralmente há a deterioração por todas as três formas de ataque direto. Estes fatores agem independentemente e em conjunção com cada outro, mas um deles frequentemente determina a validade do produto antes dos outros fatores se tornarem críticos. Alguns mecanismos de deterioração continuarão durante um longo período de tempo na taxa governada pelas características do produto, pelas condições ambientais e nos dados estágios de extensão da deterioração, sendo detectadas por um grau de estrago tal como uma perda de sabor ou odor, mudança na aparência ou forma (descoloração, amolecimento de produtos frescos ou endurecimentos de pós) e neste período de tempo a validade terá sido alcançada. Isso carrega uma relação de significância dos termos tais como “melhor comer/usar antes de”, “comer por” ou “use dentro de [número de dias] dias” os quais são requisitos em várias embalagens.

Assim a embalagem deve proteger o produto contra os riscos físicos e a influência de ambientes atmosféricos, tal como chuva, vapor d’água gases e odores. Esta também pode ser lembrada como meio para a emissão de aromas dos produtos no ambiente, os quais podem ser necessários, como no caso do café. Portanto, são exigidos materiais que ajam como barreiras entre o ambiente externo e a atmosfera interna da embalagem, com o intuito de manter a qualidade do alimento.

O *design* de uma embalagem necessita com frequência de um espaço acima do produto. Uma importante variável na medida das fronteiras ou cálculos de validade de produtos embalados é a razão de área de superfície. As interações, as quais são ilustradas na Figura 3.6, incluem:

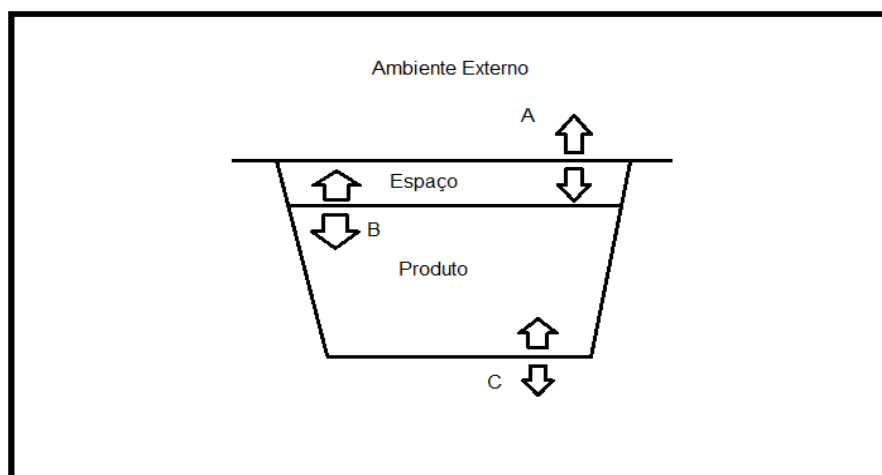


Figura 3.6 – Embalagem – Ambiente de interações

- (A) Interações entre o espaço e o ambiente externo através da permeabilidade da embalagem;
- (B) Interações entre o ambiente interno (espaço) e o produto
- (C) Interações entre o produto a o ambiente externo através da permeabilidade da parede da embalagem.

Os materiais são primeiramente selecionados pelas suas resistências aos gases, vapores e odores. Os materiais mais seletivos irão depender de outras propriedades exigidas, tais como resistência à violação, aparência e custo. Dos gases, oxigênio, dióxido de carbono, nitrogênio e dióxido de enxofre são os de principal interesse no embalamento; e entre os vapores o principal é o vapor d'água. Na questão de odores, é importante que o produto seja permeável ou não ao ser aromático, possuir essência de óleos, e perfumes. Em alguns casos a permeabilidade contra líquidos, tais como água, álcool, óleos e graxas podem ser exigidos, já em casos de produtos sólidos é importante barrar gorduras e estragos gerais feitos por sujeiras. Muitos produtos exigem membranas permeáveis ou não para protegê-los contra a contaminação por bactérias e o crescimento de bolores. Finalmente, há casos onde é necessário ser permeável ou não no contato com comprimentos de onda luminosos e outras radiações.

Uma consideração global das estruturas das embalagens inclui a combinação de materiais para corpos de recipientes e, se apropriado, para qualquer pacote ou embalagem. Os materiais plásticos usados contribuirão

para a melhora da qualidade da embalagem através de suas características físicas e propriedades de permeabilidade, como se observa no exemplo da Figura 3.7 a seguir: (Ashley, 1985).



Figura 3.7 – Comparação entre embalagens plásticas a vácuo. Imagem da esquerda – Polímero DuPont Surlyn. Imagem da Direita: Polímero Convencional (Ashley, 1985).

3.2. Medidas de Porosidade e Permeabilidade de um corpo

A medição da permeabilidade dos materiais apresenta algumas técnicas quando relacionadas às amostras com espessura muito fina e podem ser citadas como se segue: reconstrução e análise de imagens, medidas de condutividade elétrica, incidência por radiação e métodos de fotoacústica, que por sua vez requerem instrumentações e controles específicos (Vasques, 1999). Através do modelo de Darcy, o princípio da queda de pressão é uma técnica razoavelmente simples e que se adequa às amostras com pequena espessura. O processo de medição da queda de pressão experimental consiste, basicamente, da coleta de valores de pressão antes e depois da amostra, a partir da ocorrência do escoamento do fluido de teste. Uma das propriedades físicas fundamentais para elementos de trabalho com matriz porosa é sua permeabilidade. O controle da porosidade de um meio permite que um fluido escoe com maior ou menor facilidade, sendo a condutividade designada pelo termo permeabilidade, seja para um fluido

Newtoniano ou não-Newtoniano. Fisicamente, a permeabilidade é o resultado de uma interação mecânica complexa que ocorre entre o fluido e as paredes dos poros, gerando uma transformação de energia no sistema. A partir da referência da norma ISO 4022:1987, o método baseado no princípio de queda de pressão é adequado para medir a permeabilidade em amostras com pequena espessura.

3.2.1. Medições de Vazios através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A verificação da existência e concentração de vazios é permitida através da observação e caracterização da microestrutura de um material, além de se poder analisar sua forma, distribuição dos vazios, homogeneidade e tamanho dos grãos e eventuais defeitos de usinagem. O desempenho do produto depende desta caracterização, a qual auxilia na análise qualitativa deste desempenho. O microscópio eletrônico de varredura é um instrumento que permite observar e caracterizar materiais orgânicos, inorgânicos, e principalmente superfícies em uma escala bem definida. Para examinar as superfícies de um material é necessário irradiar a amostra com um feixe de elétrons, e como não são condutoras é necessária a deposição de uma fina camada de ouro que são rastreadas pelo feixe inserido, que é refletido e coletado, obtendo-se uma imagem que representa as características da superfície em questão.

A utilização da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é utilizada, principalmente para a análise morfológica e qualitativa dos poros. As análises das imagens resultantes desse tipo de medição geram a observação da distribuição homogênea dos poros e morfologia, principalmente relacionada à aplicação da tensão uniaxial de pré-forma (tensão de consolidação). Entretanto, para dimensões nanométricas, tem-se um comprometimento da resolução e precisão da medida, uma vez que depende do delineamento da forma, que é feita manualmente com o auxílio de *softwares*. Outra característica desse tipo de medição consiste no fato de que, não se pode diferenciar porosidade aberta da fechada. A porosidade fechada neste caso apresenta importância para a caracterização de um

material, quanto ao estudo das propriedades mecânicas e térmicas, pois o torna menos resistente mecanicamente e mais isolante, características indesejáveis no projeto e operação de materiais porosos com aplicação solicitante. Cabe ressaltar, que a porosidade expressa a quantidade total de vazios no volume, porém para uma mesma quantidade de vazios, a permeabilidade pode ser diferente em dois materiais. Essa condição ocorre em função, de como esses vazios são distribuídos no volume, se estão ou não conectados entre si, ou seja, poros abertos ou fechados.

3.2.2. Medições de Porosidade através de Intrusão por Mercúrio

O mercúrio é utilizado para determinação da porosidade de materiais como líquido de intrusão, e algumas características importantes sobre esse elemento são apresentadas abaixo, as quais justificam tal propriedade:

- Não molha a maioria dos materiais. O seu ângulo (entre 112 e 142 graus) de contato é elevado (molhabilidade) para os diferentes materiais;
- Apresenta alta tensão superficial;
- Apresenta baixa reatividade química com a maioria dos materiais em temperatura ambiente.

Quando o mercúrio é colocado em contato com uma amostra porosa este não é capaz de penetrar os poros. Há a necessidade da aplicação de uma força externa que supere a tensão superficial do mercúrio para que isso ocorra, além da necessidade de superar o ângulo de contato entre o material e o mercúrio, como mostra a Figura 3.8 abaixo (Webb, 1997):

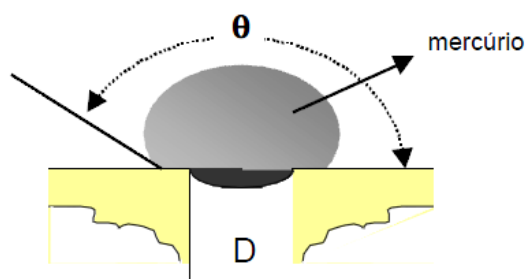


Figura 3.8 – Mercúrio em contato com um sólido poroso, na qual θ é o ângulo de contato e D é o diâmetro do poro (Webb, 1997).

A técnica de intrusão por Mercúrio caracteriza a porosidade de um material através da aplicação de vários níveis de pressão em uma amostra imersa em mercúrio. A pressão necessária para introduzir o mercúrio dentro dos poros da amostra é inversamente proporcional ao tamanho dos poros. Este método de intrusão de Mercúrio baseia-se na lei de capilaridade que governa a penetração do líquido dentro de pequenos poros, a qual é expressa pela equação de Washburn:

$$D = \frac{-4*\gamma*\cos\theta}{P} \quad (3.1)$$

Sendo: D o diâmetro dos poros; P a pressão aplicada; γ a tensão superficial do mercúrio e θ o ângulo de contato entre o mercúrio e a amostra. O volume de Mercúrio (V) que penetra nos poros é medido diretamente como função da pressão aplicada. A relação P - V é a única informação para a caracterização dos poros do material [1].

Durante a aplicação do método de intrusão de Mercúrio ocorre a medição da pressão imposta sob o mercúrio, o qual exerce pressão sobre a amostra, a partir do volume de mercúrio que penetra a amostra nessa pressão. A representação típica de uma curva que mostra o processo de intrusão é dada na Figura 3.9 a seguir:

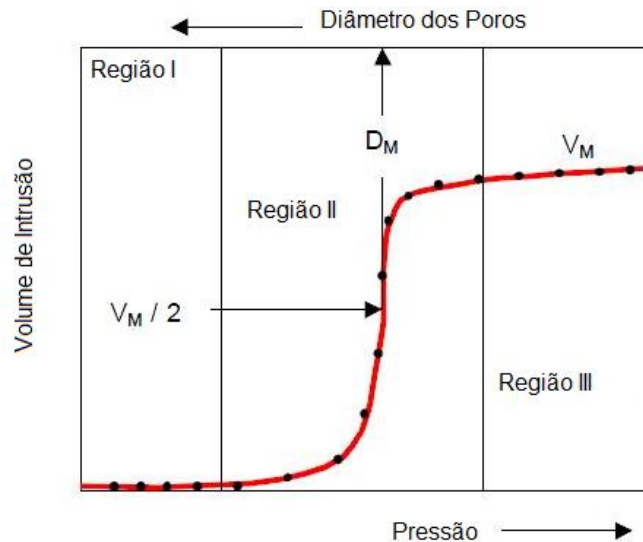


Figura 3.9 – Curva típica de uma análise de Intrusão por Mercúrio [1].

Conforme a pressão aumenta e não há a existência de poros de tamanho que satisfaçam a equação (3.1) não há a intrusão e por consequência o volume de intrusão permanece igual a zero (Região I). Quando o valor de pressão é suficiente para preencher os poros de um determinado tamanho ocorre a penetração do mercúrio e por sua vez há variação no volume de intrusão (Região II). Após o preenchimento dos poros com mercúrio e não havendo mais poros que satisfaçam a equação (3.1), há o término da penetração do mercúrio e atinge-se o nível de pressão máxima para a intrusão (Região III).

O valor V_m na Figura 3.9 representa o máximo volume de intrusão e determina o volume dos poros abertos da amostra, enquanto que o valor $V_{m/2}$ indica o tamanho médio dos poros.

A curva para determinação do diâmetro dos poros também pode ser feita em função da variação do Volume para um incremento de Pressão. Desta forma, observa-se esta representação na Figura 3.10 abaixo (Webb, 1997):

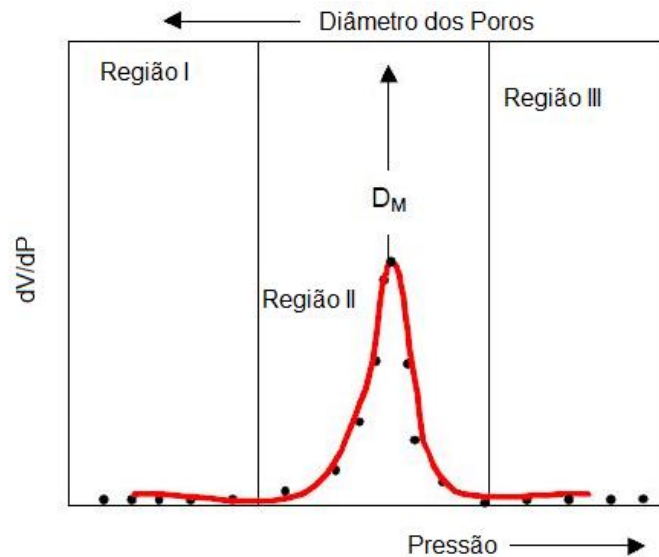


Figura 3.10 – Representação da curva de Intrusão por Mercúrio em função da Variação do Volume para um incremento de Pressão (Webb, 1997).

3.2.3. Medidas da Permeabilidade de um corpo

A permeabilidade é a descrição da habilidade de um corpo para conduzir fluidos em seu interior. É uma propriedade do meio poroso e mede a capacidade deste meio transmitir fluidos. Para tanto, as medidas de permeabilidade refletem a condutividade de um fluido em um material em particular, representando também o poder de resistência que o meio poroso oferece ao fluxo de fluidos.

Muitas tentativas se desenrolaram com o passar dos anos com o objetivo de se descobrir a maneira correta dos cálculos de permeabilidade, e entre essas tentativas tem-se a mais efetiva delas: a Lei de Darcy. Juntamente com o Equacionamento de Forchheimer, são dois dos estudos mais utilizados relacionados à pesquisa de condutividade hidráulica.

3.2.3.1 – A Lei de Darcy

Em 1856, Henry Darcy investigou o fluxo de água através de filtros de areia para processos de purificação de água. Seus resultados se dão essencialmente pela equação (3.2):

$$Q = K * A * \left(\frac{h_1 - h_2}{L}\right) \quad (3.2)$$

Na qual Q representa a taxa de fluxo, A e L são, respectivamente, a área da seção transversal do tubo e seu comprimento, $h_1 - h_2$ representa a diferença de altura conforme a Figura 3.12 e K é a constante de proporcionalidade considerada como uma propriedade característica do filtro de areia.

Nas Figuras 3.11 e 3.12 a seguir apresentam-se o equipamento experimental utilizado por Henry Darcy (Amix, 1960).

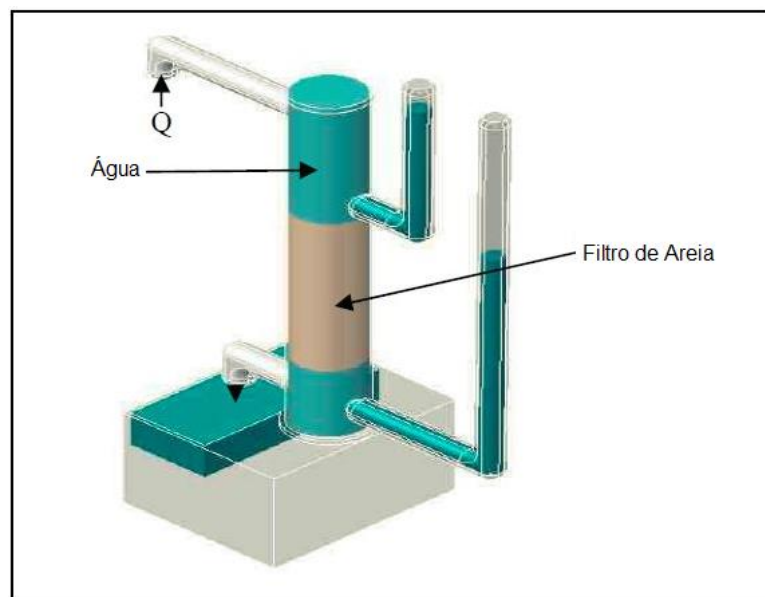


Figura 3.11 – Equipamento experimental de Darcy (Amix, 1960).

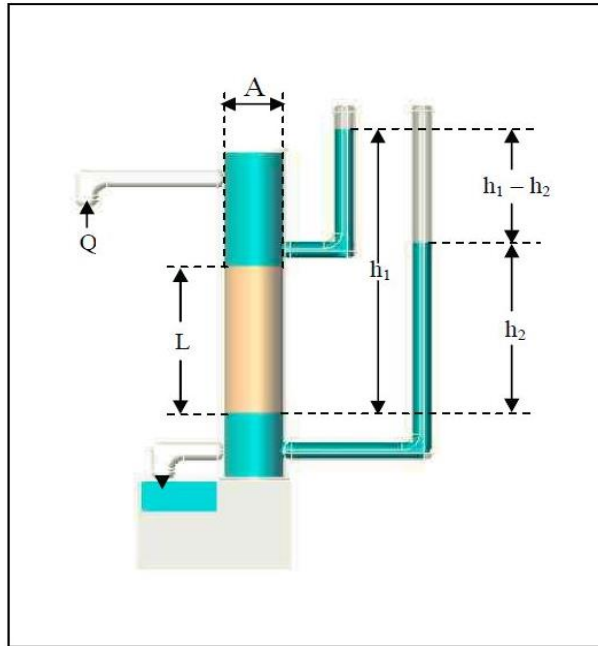


Figura 3.12 – Desenho esquemático do equipamento experimental de Darcy (Amix, 1960).

As investigações de Darcy se fizeram para o fluxo de água através de um filtro de areia, saturado com 100% de água, e depois se conseguiu comprovar que seus resultados podiam se estender a outros fluidos e que a constante de proporcionalidade K pode ser escrita como k/μ , onde μ é a viscosidade do fluido e k é uma propriedade que depende apenas do material. A forma generalizada da equação de Darcy, como se apresenta nas normas do American Petroleum Institute (API), é a seguinte (API RP 40, 1998):

$$v_s = -\frac{k}{\mu} * \left(\frac{dP}{ds} * \frac{\rho * g}{1.0133} * \frac{dz}{ds} * 10^{-6} \right) \quad (3.3)$$

Os parâmetros da equação (3) são descritos a seguir:

- s (cm) → É a distância na direção do fluxo e sempre tomada como positiva;
- v_s $\left(\frac{cm}{s} \right)$; $\left(\frac{Q}{A} \right)$ → É o fluxo volumétrico através de uma unidade de área do meio poroso por unidade de tempo ao longo do caminho s ;

- z (cm) → É a coordenada vertical que se considera positiva para baixo;
- ρ ($\frac{g}{cm^3}$) → É a densidade do fluido;
- g ($\frac{cm}{s^2}$) → É a aceleração da gravidade – 980.665 cm/s²;
- $\frac{dP}{ds}$ ($\frac{atm}{cm}$) → É o gradiente de pressão através do comprimento s ;
- μ ($\frac{g}{cm*s}$) → É a viscosidade do fluido;
- k (darcy) → É a permeabilidade do meio poroso;
- $1.0133 * 10$ ($\frac{N}{cm^2*atm}$);
- $\frac{dz}{ds}$ → Pode ser expressa como o seno do ângulo formado entre a direção de “s e a horizontal.

Os valores dentro dos parênteses na equação (3.3) podem ser interpretados como o gradiente total de pressão menos o gradiente de pressão resultante da diferença das pressões de passagem, assim, se há equilíbrio hidrostático, o valor dos parênteses será zero e não haverá fluxo.

Embora as unidades de k sejam de grau quadrático, tanto pé ao quadrado, como centímetro quadrado são demasiado grandes para serem usados em meios porosos, por isso que a indústria petrolífera utiliza o Darcy.

Fala-se de uma permeabilidade de um Darcy para um meio poroso quando apenas uma fase de fluido de viscosidade 1g/ (cm.s) que completa integralmente os poros do meio, flui através deste, com baixas condições de fluido viscoso a uma taxa de um centímetro cúbico por segundo em uma área de seção transversal de um centímetro quadrado e com baixa pressão num gradiente hidráulico equivalente a uma atmosfera por centímetro.

Fluxo viscoso significa que o ritmo do fluxo é suficientemente baixo para ser diretamente proporcional ao gradiente de pressão ou hidráulico.

A equação (3) é uma generalização útil da Lei de Darcy, porém, geralmente encontramos sistemas de fluxo muito mais simples, são eles (Amix, 1960):

- Fluxo Horizontal

Normalmente encontramos o fluxo retilíneo horizontal nos estados estáveis. A Figura 3.13 mostra um bloco de meio poroso na qual se observa o caso descrito.

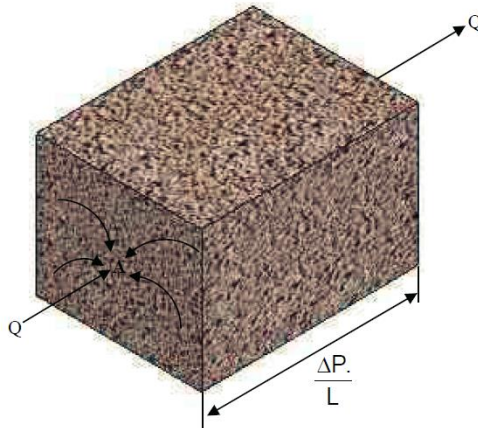


Figura 3.13 – Representação do fluxo horizontal (Amix, 1960).

Para este caso a equação de Darcy se reduz a:

$$Q' = k * A * \left(\frac{P_1 - P_2}{\mu * L} \right) \quad (3.4)$$

Na qual P_1 e P_2 são as pressões nas faces de entrada e saída da amostra da Figura 3.13, e Q' é a taxa volumétrica de fluxo na pressão média P' , representada pela equação (3.5) (AMIX, 1960):

$$P' = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (3.5)$$

- Fluxo Vertical

Há basicamente três tipos de fluxo vertical, com se observa na Figura 3.14: vertical livre para baixo, vertical com altura h medida antes do fluxo e vertical com altura h medida depois do fluxo.

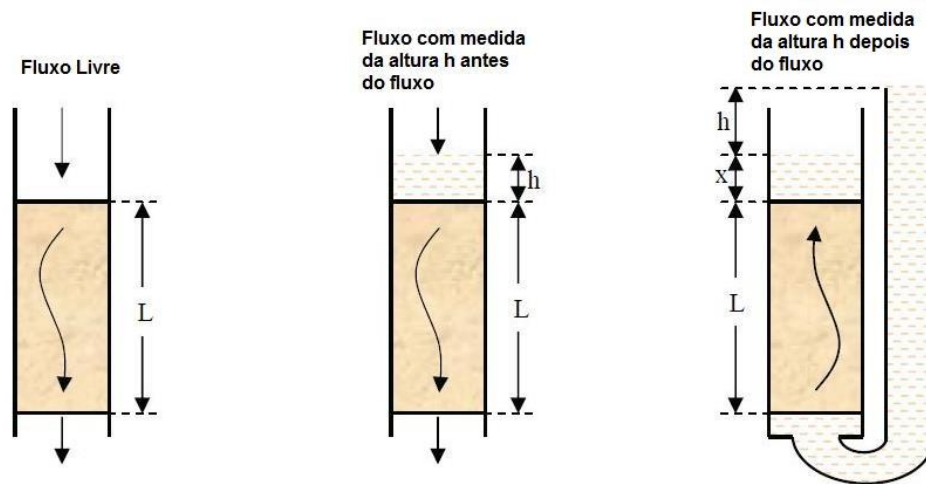


Figura 3.14 – Tipos de fluxo Vertical (Amix, 1960).

A Lei de Darcy descreve este tipo de fluxo com as seguintes variáveis e variações conforme os casos:

$$Q = k * A * \frac{\rho * g}{\mu} \quad (3.6)$$

Para o primeiro caso.

$$Q = \frac{k * A * \rho * g}{\mu} * \left(\frac{h}{L} + 1 \right) \quad (3.7)$$

Para o caso número dois, onde h representa a perda de carga de condução, ou seja, a diferença hidráulica entre a entrada e saída de fluxo.

$$Q = k * A * \frac{\rho * g * h}{\mu * L} \quad (3.8)$$

Para o terceiro caso, no qual há o fluxo vertical e a medição da altura h depois do fluxo (Amix, 1960).

- Fluxo Radial

Um sistema de fluxo radial é um sistema análogo ao fluxo de fluídos na entrada de um poço para uma região cilíndrica de drenagem. A Figura 3.15 representa a seguir o fluxo radial.

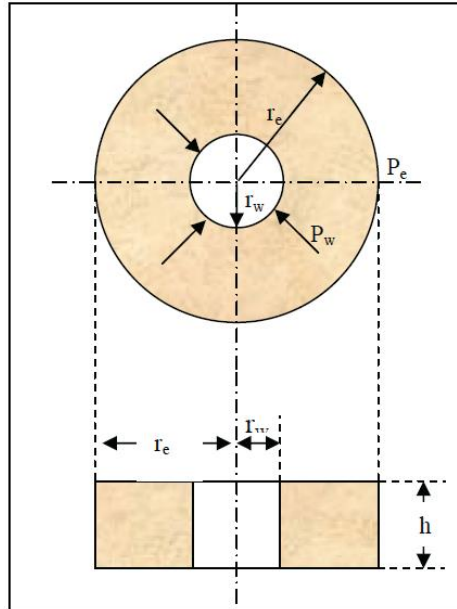


Figura 3.15 – Sistema de Fluxo Radial (Amix, 1960).

A equação apresenta o fluxo radial em um estado estável para um fluido considerado incompressível.

$$Q = \frac{2\pi * k * h * (P_e - P_w)}{\mu * \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (3.9)$$

Na qual h é a espessura do corpo de prova em cm, P_e e P_w são as pressões no limite externo e interno, respectivamente nas superfícies do poço, em atm., e r_e e r_w são os raios nos limites externo e interno respectivamente em cm.

Esta equação pode ser modificada para fluidos pouco compressíveis, como mostra a equação (3.10).

$$Q_o = \frac{2\pi * k * h * (P_e - P_w)}{\mu * \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (3.10)$$

Na qual Q_o é definido a uma pressão P_o e uma densidade ρ_o .

Para os gases ideais pode-se ter a seguinte relação, dada pela equação (3.11).

$$Q' = \frac{2\pi * k * h * (P_e - P_w)}{\mu * \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (3.11)$$

Onde Q' representa a taxa volumétrica no valor de pressão médio algébrico na pressão média P' (Amix, 1960).

$$P' = \frac{P_e + P_w}{2} \quad (3.12)$$

3.2.3.2 – Estudo de Forchheimer

Após os estudos de Darcy, surgiu Forchheimer (1901), o qual propôs a incorporação do efeito inercial na equação de Darcy, considerando uma relação quadrática para velocidades mais altas e regimes turbulentos com elevado número de Reynolds (Forchheimer, 1901). A equação (13) apresenta essa modificação:

$$\frac{dP}{ds} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (13)$$

Os parâmetros da equação (13) são descritos a seguir:

- s (cm) → É a distância na direção do fluxo e sempre tomada como positiva;
- v_s $\left(\frac{cm}{s}\right)$; $\left(\frac{Q}{A}\right)$ → É o fluxo volumétrico através de uma unidade de área do meio poroso por unidade de tempo ao longo do caminho s (Velocidade superficial do fluido na interface porosa);
- k_1 → É o coeficiente de permeabilidade viscoso (semelhante ao k da equação 3.3);
- ρ $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ → É a densidade do fluido;
- k_2 → É o coeficiente de permeabilidade inercial;
- $\frac{dP}{ds}$ $\left(\frac{atm}{cm}\right)$ → É o gradiente de pressão através do comprimento s ;

- $\mu \left(\frac{g}{cm*s}\right) \rightarrow$ É a viscosidade do fluido;

O primeiro termo da equação do lado direito representa os efeitos viscosos, como atrito, da interação fluido-sólido e o segundo termo se relaciona com os efeitos cinéticos. Há outras técnicas citadas na literatura para medir a permeabilidade de sistemas porosos, como por exemplo, análise de imagens e reconstrução, medição de condutividade elétrica e métodos fotoacústicos. Em geral, esses métodos envolvem instrumentação refinada e mão-de-obra especializada (Vasques, 1999).

3.2.3.3 – Equações de Ergun

Ergun (1952) propôs duas equações que estimam os valores de k_1 e k_2 baseados na estrutura porosa com partículas esféricas e estruturas interconectadas e poros abertos, dadas pelas equações (3.14), (3.15) e (3.16) (Salvini, 2000) (Vasques, 1999).

$$k_1 = \frac{\varepsilon_3 dp^2}{C_1(1-\varepsilon)^2} \quad (3.14)$$

$$k_2 = \frac{\varepsilon_3 dp}{C_2(1-\varepsilon)} \quad (3.15)$$

$$dp = \frac{1,5(1-\varepsilon)}{\varepsilon} d_0 \quad (3.16)$$

Nas equações de Ergun, ε representa a porosidade volumétrica, d_p o diâmetro da partícula calculado através da equação (3.16). Sendo d_0 , o diâmetro médio do poro no meio. Em materiais com configuração de estruturas celulares, como cerâmicas, o diâmetro da partícula (d_p) deve ser substituído nas equações (3.14) e (3.15) pela média dos diâmetros dos poros. As constantes C_1 e C_2 são dependentes da composição química e da estrutura do meio poroso. Para meios granulares os valores podem ser assumidos como 150 e 1,75, respectivamente.

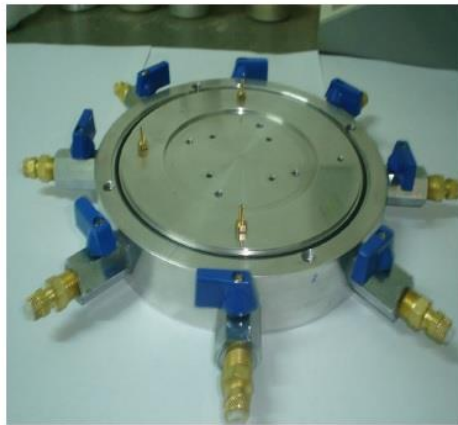
4. REVISÃO DA TÉCNICA

No presente tópico apresenta-se uma breve descrição dos mais variados mecanismos e soluções construtivas propostas para a medição de permeabilidade e dentre estes estão alguns permeômetros que apresentam holders com a capacidade de serem aplicados nos corpos poliméricos. Com isso, aplica-se o intuito deste estudo, ou seja, verificar soluções construtivas que possam embasar o estudo de um holder para materiais poliméricos porosos. Por se tratar de uma pesquisa recente, todos os permeômetros citados apresentam características próprias e por isso são analisados de forma geral a fim de gerar uma base sólida para a construção de um holder de baixo custo.

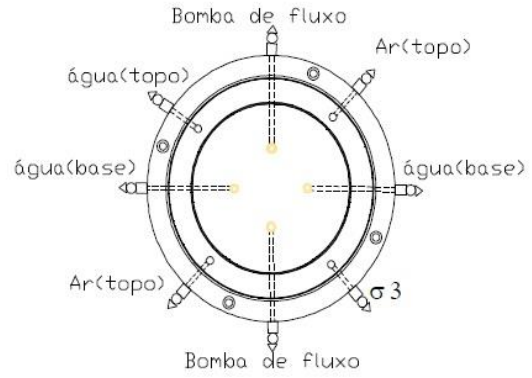
Vale ressaltar que um permeômetro, basicamente, é um aparato para fluxo semelhante ao usado no experimento de Darcy, no qual é imposta uma carga hidráulica e há a medição do fluxo de fluido (em litros por minuto, por exemplo) em estado permanente, na maioria dos casos. A partir disso, segundo o método de Darcy, variam-se a carga e a espessura da amostra e mede-se o fluxo, tendo como resultado a proporcionalidade entre o volume de saída e a carga aplicada e uma proporcionalidade inversa deste mesmo fluxo com a espessura do corpo de prova.

4.1. Permeômetro para a medição da permeabilidade de solos saturados e não saturados

Este permeômetro é constituído por um cilindro de acrílico, base e tampa de alumínio, uma peça intercambiável de latão na qual se aloja o solo poroso especial e um *top-cap* de alumínio. A Figura 4.1 mostra mais detalhes deste holder para medição de permeabilidade:



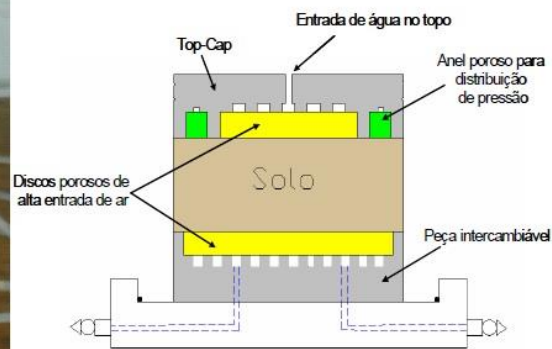
a)



b)



c)



d)

Figura 4.1: (a) base; (b) detalhes da base com as respectivas saídas; (c) célula de ensaio; (d) esquema de base com a peça intercambiável e *top-cap* (Guimarães, 2008).

Como se observa nas figuras 4.1a e 4.1b a base possui oito entradas laterais: uma para aplicação, controle e medição das pressões de água no topo; duas para aplicação e controle das pressões de água na base; duas saídas para medições das pressões de água que direcionam para a bomba de fluxo, duas entradas para aplicação e medição de ar dentro da amostra e uma entrada para aplicação de pressão na câmara (tensão confinante). Nas figuras 4.1c e 4.1d apresentam-se o permeâmetro durante o ensaio e um corte esquemático das partes constituintes da descrição anterior, respectivamente.

Na figura 4.1a observa-se que a base apresenta uma ranhura circular concêntrica com a finalidade de alojar o corpo de prova, no qual há colado um disco poroso com alta capacidade de entrada de ar por pressão, como

se observa na Figura 4.2 adiante. Através de quatro parafusos guias é feita a fixação desta peça, permitindo assim a troca de discos se necessário. Os furos são observados na Figura 4.3. Em cima de uma base com um rasgo espiral é assentado o disco poroso, de forma que os quatro furos (dois para a saída da bomba de fluxo e dois para a entrada de água) seja interconectados, gerando a possibilidade de fluxo e saturação do disco poroso através deste. A câmara espiralada pode ser observada na Figura 4.4. Os quatro canais são vedados por anéis de vedação, ligam a base à peça intercambiável e são ligados às duas entradas e às duas saídas para as entradas de água e as bombas de fluxo respectivamente. Os canais podem ser visualizados na Figura 4.5 abaixo.

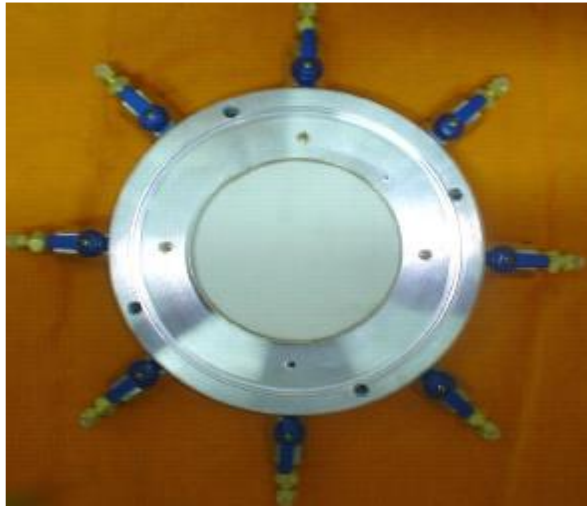


Figura 4.2 - Base e peça intercambiável com o disco de alta entrada de ar colada (Guimarães, 2008).

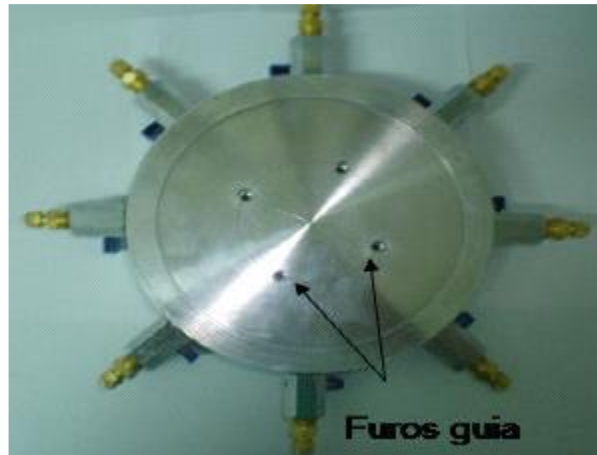


Figura 4.3 – Parte inferior da peça intercambiável com os furos guias (Guimarães, 2008).



Figura 4.4 – Peça intercambiável com câmara espiralada (Guimarães, 2008).



Figura 4.5 – Vista inferior da peça intercambiável (Guimarães, 2008).

A câmara para alojar o disco poroso de alta entrada de pressão de ar é um rebaixo presente no *top-cap*, o qual também apresenta um rebaixo anelar para alojar a pedra para distribuição da pressão de ar e uma câmara. Uma mistura de Araldite e areia grossa são utilizadas para a confecção da pedra anelar. A aplicação do fluxo e saturação da pedra porosa se dá através de uma ranhura em formato de espiral conectada ao furo central do *top-cap*, de forma que a água fica em contato com todo o disco poroso de alta entrada de pressão de ar. A pedra Anelar foi fabricada a partir de um dispositivo que permitiu a perfeita etapa de molde e extração sem danos no material. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram os detalhes da descrição acima (Guimarães, 2008).

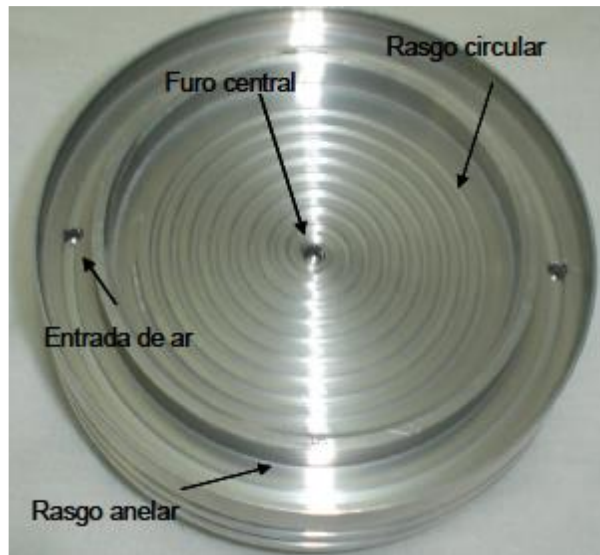


Figura 4.6 – Detalhes do *top-cap* (Guimarães, 2008).



Figura 4.7 – Anel e pedra porosa de alta entrada de ar colados no *top-cap* (Guimarães, 2008).

4.2. Permeâmetro de escoamento permanente para medição da quantidade de água em solos

O equipamento projetado por Dell'Avanzi (2004) propicia o controle das condições de contorno superior e inferior e, além disso, permite medir o conteúdo de água do solo ou sua sucção através da instalação da instrumentação necessária. A configuração geral de tal permeâmetro, bem como as designações de seus componentes pode ser vistos na Figura 4.8 a seguir:

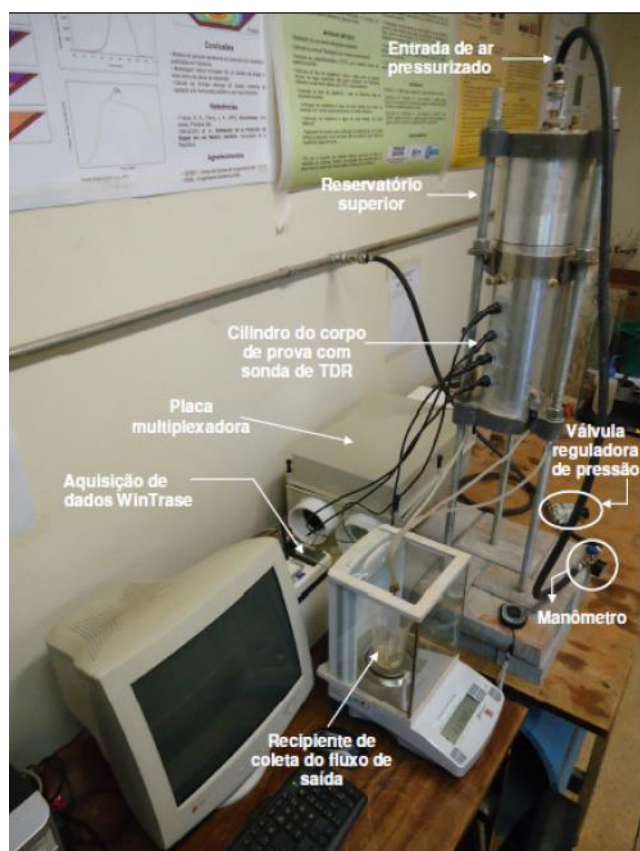


Figura 4.8 – Configuração Geral do Permeâmetro de Fluxo Permanente (Dias, 2012).

Este tipo de permeâmetro possui três componentes principais:

- Sistema de controle de descarga;
- Reservatório inferior de coleta de água;
- Cilindro de parede rígida onde será disposto o corpo de prova poroso.

Conforme a Figura 4.9, observa-se que o permeâmetro é utilizado em configuração para análise transiente de uma função de escoamento. Ao

longo da coluna do corpo de prova poroso são medidos os perfis instantâneos de umidade através de sondas TDR. Pelo sistema de TDR, a umidade ou sucção do solo é inferida indiretamente pela determinação de propriedades dielétricas do solo, apresentando a vantagem de ser uma técnica não destrutiva. O princípio de funcionamento consiste na determinação do tempo de propagação de um sinal de alta frequência através de uma sonda inserida no solo. A velocidade de propagação será dependente das propriedades dielétricas do meio, as quais, por sua vez, dependerão do teor de umidade do solo em contato com a sonda. A velocidade de fluxo de saída é medida na base levando-se em conta o fato dos ensaios serem feitos em regime de fluxo transiente e que o caminho de pressurização se dá de cima para baixo.

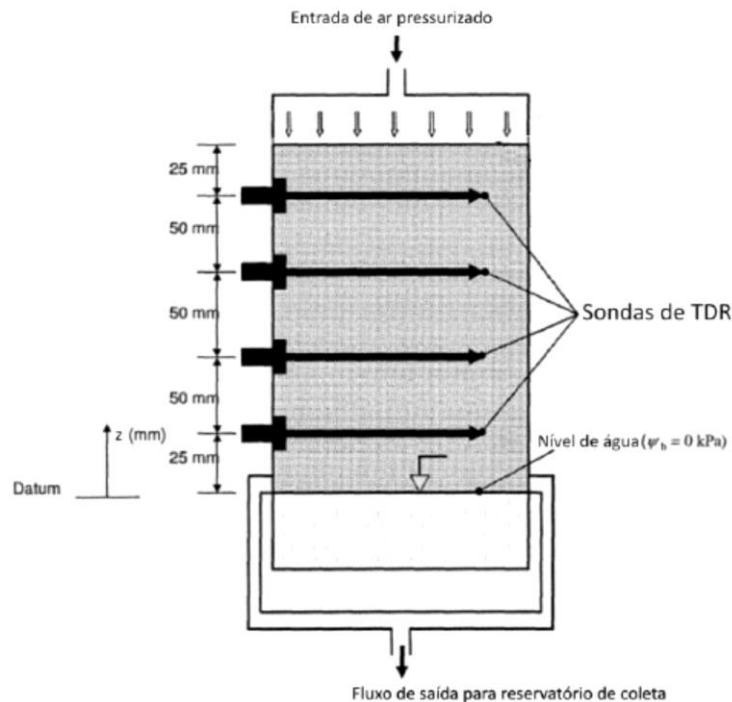


Figura 4.9 – Configuração do Permeâmetro com pressurização no topo do corpo de prova e em ensaio transiente (Dias, 2012).

Para a realização dos ensaios de permeabilidade não saturada, as seguintes condições de contorno são observadas: na região inferior: imposição de determinado valor de sucção (0 kPa) e o mesmo vale para a base do permeâmetro ($z=0$), e na parte superior, considera-se a aplicação de ar no topo da amostra ($z=L$).

O recipiente onde foi disposto o corpo de prova (Figura 4.9) consiste em um cilindro de alumínio vertical com 15 cm de diâmetro externo, 1,25 a 2,0 cm de espessura e 33 cm de altura. Esse componente possui vários pontos de entrada ao longo de sua altura, permitindo a instalação de instrumentação para determinação do perfil de umidade.

Neste permeâmetro há alterações do estudo de Dell'Avanzi visto que o presente estudo é realizado em gravidade normal e apenas com aplicação da pressão de ar (Dias, 2012).

4.3. Permeâmetro para medição de permeabilidade em concreto e argamassas

Neste trabalho, semelhantemente ao objetivo sugerido neste trabalho de conclusão de curso, visou-se um ensaio de baixo custo e fácil reprodutibilidade. O aparato foi desenvolvido pelo Prof. Dr. Mutilo Daniel de Mello Innocentini, através de projeto financiado pelo CNPq (CNPq Universal 019/2004, processo 474155/2004-8), como objetivo de medir a permeabilidade em materiais cerâmicos. Portanto, trata-se de uma réplica (o permeâmetro estudado nesta pesquisa) com a finalidade de ensaiar blocos permeáveis de concreto e com adaptações para a medição em argamassas. Desta forma, o equipamento demonstra uma versatilidade e com diferentes adaptações pode ser empregado na análise de diversos materiais porosos. Basicamente, a configuração do aparelho conta com uma bomba de vácuo ligada a uma câmara de nylon e esta fica em contato com a argamassa em uma de suas superfícies, local onde ocorre a formação de uma pressão negativa. As variações de pressão são registradas ao longo de todo o tempo de ensaio através de um transdutor que registra tudo estando ligado à câmara de vácuo. Ligada a um computador fica uma placa aquisitora (data-logger), a qual coleta os dados em tempo real e os registra com o auxílio de um software padrão do produto. Ligado ao transdutor há o visor digital de pressão, o qual fornece a informação e permite o controle através do operador que é o responsável por estabilizar as pressões em cada etapa, tanto nas condições de vácuo quanto nas condições atmosféricas. Para

evitar um fluxo contrário do ar há uma válvula solenoide que faz essa restrição, permitindo a recuperação de pressão na câmara e realizando, conforme desejado, a passagem do ar unidirecional nas faces do corpo de prova. Na Figura 4.10 é possível observar o esquema de funcionamento do equipamento, assim como as demais dimensões:

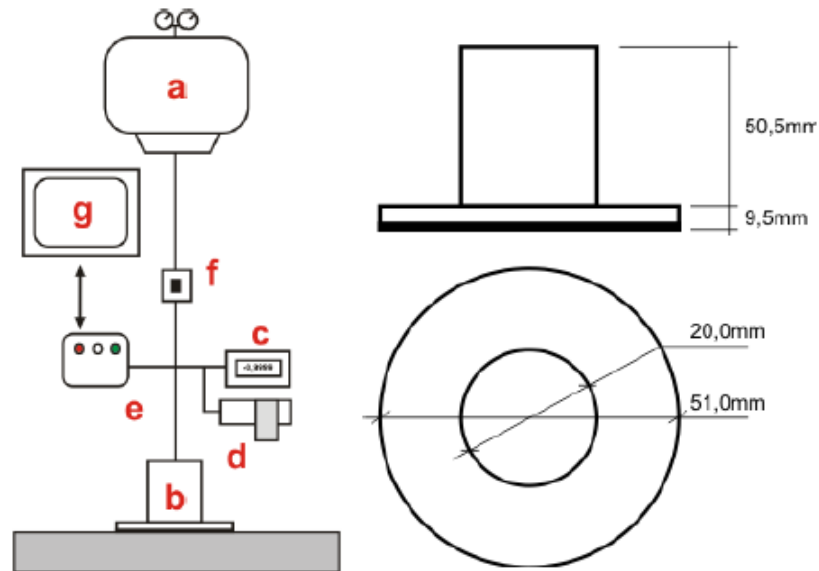


Figura 4.10 – Desenho esquemático do permeâmetro e detalhamento da câmara de vácuo. Na qual: a) Bomba de Vácuo; b) Câmara de Vácuo; c) Mostrador de pressão digital; d) Transdutor de pressão digital; e) Placa aquisitora de dados (data-logger); f) Válvula solenoide; g) Computador (Sentone, 2011).

É através do decaimento de vácuo que se realiza o típico perfil de um ensaio de permeabilidade e este pode ser observado na Figura 4.11. Há uma desaceleração em função do tempo notada na curva de variação de pressão devido à diminuição do gradiente de pressão entre o meio interno e externo da câmara de vácuo. Ou seja, à medida que o ar movimentar-se do meio de maior pressão para a área de pressão negativa a variação diminui e a força motriz, a qual impulsiona o movimento do fluido, é reduzida por consequência dos fatos.

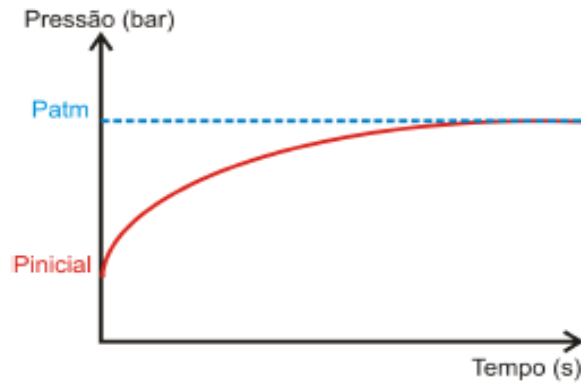


Figura 4.11 – Gráfico que mostra o perfil do ensaio de permeabilidade através do método de decaimento por vácuo (Sentone, 2011).

O tratamento dos dados dos ensaios se dá também através das equações de Forchheimer, obtendo-se então os resultados de permeabilidade para a argamassa avaliada. A Figura 4.12 ilustra os detalhes do equipamento, bem como seu esquema de funcionamento:

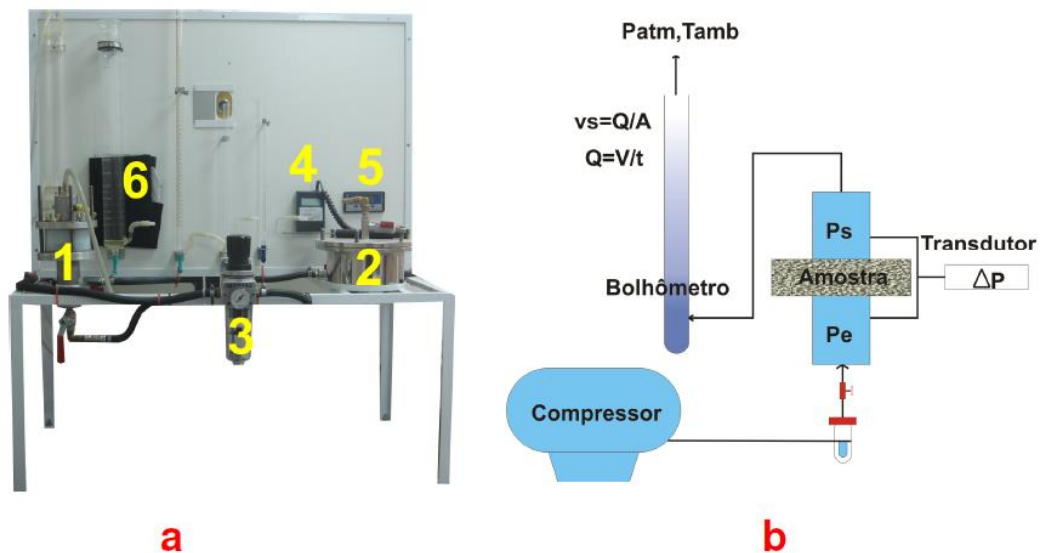


Figura 4.12 – a) Permeômetro. No qual: 1) Porta amostras para argamassas; 2) Porta amostras para concreto; 3) Manômetro com filtro; 4) Medidor de temperatura; 5) Display de medida de pressão; 6) Bolômetro. b) Esquema do funcionamento do permeômetro (Sentone, 2011).

4.4. Permeâmetro de Parede Rígida

Os tipos de materiais que constituem uma célula (tubo rígido, que no geral apresenta seção circular) de um permeâmetro de parede rígida são os mais variados e como exemplo podemos citar: vidro ou PVC (poli cloreto de vinila) alumínio, acrílico, aço niquelado, aço inox e latão niquelado. Estas células são denominadas de células de condutividade ou células de permeabilidade e nelas são alojados os corpos de prova.

Existem quatro tipos de permeâmetros de parede rígida que são os mais comumente usados: célula de adensamento, tubo amostrador, molde de compactação e os tipos onde o corpo de prova não tem contato com a parede da célula. O tipo mais comum é o de molde de compactação, no qual a amostra é compactada dentro do cilindro da própria célula de permeabilidade e em alguns casos o corpo é apenas lançado no interior do alojamento. Neste tipo de permeâmetro o corpo de prova não possui variação em seu volume e há a possibilidade de se trabalhar desde solos granulares até argilas, além de apresentar corpos porosos nas extremidades dos corpos de prova com a finalidade de se garantir um fluxo unidirecional. A Figura 4.13 ilustra esse tipo de instrumento de medição:

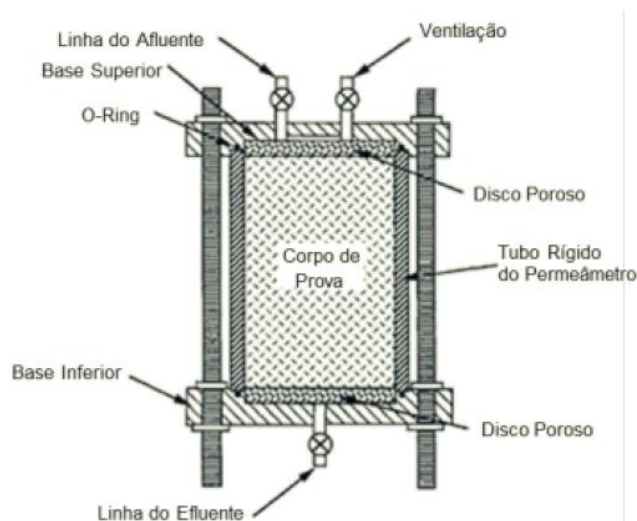


Figura 4.13 – Permeâmetro do tipo molde de compactação com parede rígida (Olandoski, 2013).

No caso do permeâmetro tipo célula de adensamento, o corpo de prova sofre a ação de uma carga axial. A taxa de adensamento (redução do número de vazios do corpo de prova devido à ação da carga axial) é uma das formas de se calcular a permeabilidade e esta é uma das formas de se utilizar este aparato, porém, neste cálculo a permeabilidade resultante é muito baixa, devido à não consideração dos efeitos de adensamento secundário, o que introduz erros e gera uma diferença de até 50%. No outro caso, o corpo de prova pode sofrer fluxo lateral, pois este é diretamente permeado e isso pode acontecer em corpos compressíveis submetidos a uma tensão abaixo de 50 kPa. Esse fenômeno de fluxo lateral normalmente ocorre em casos nos quais as tensões são muito baixas ou os corpos são muito rígidos e por esse motivo, em muitos casos, há a necessidade de um permeâmetro mais sofisticado, o qual realize o controle da tensão axial. Para evitar que o atrito do corpo de prova com a parede da célula provoque uma variação da tensão ao longo da altura da amostra, faz-se que o quociente L/D seja menor que 0,25 (quociente entre altura e diâmetro do corpo de prova), o qual é um valor geralmente utilizado em ensaios deste tipo. Em casos nos quais os corpos de prova são feitos de materiais altamente compressíveis, como o solo bentonita, o controle da tensão vertical é uma solução cabível. As Figuras 4.14 e 4.15 mostram, respectivamente, o permeâmetro do tipo célula de adensamento e o permeâmetro que permite o controle da tensão vertical aplicada à amostra:

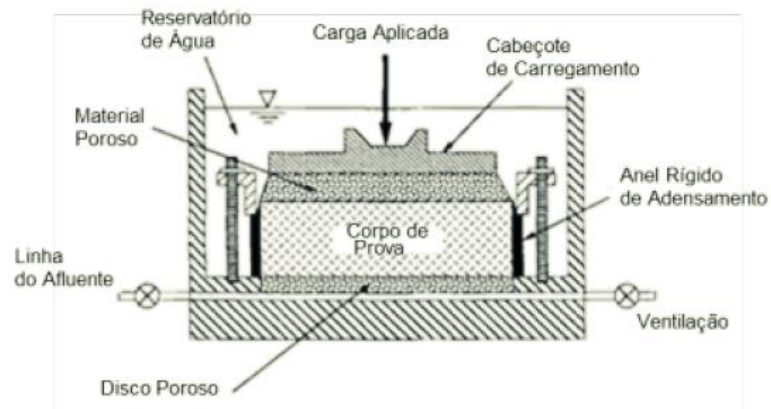


Figura 4.14 – Permeâmetro de Parede Rígida tipo célula de Adensamento (Olandoski, 2013).

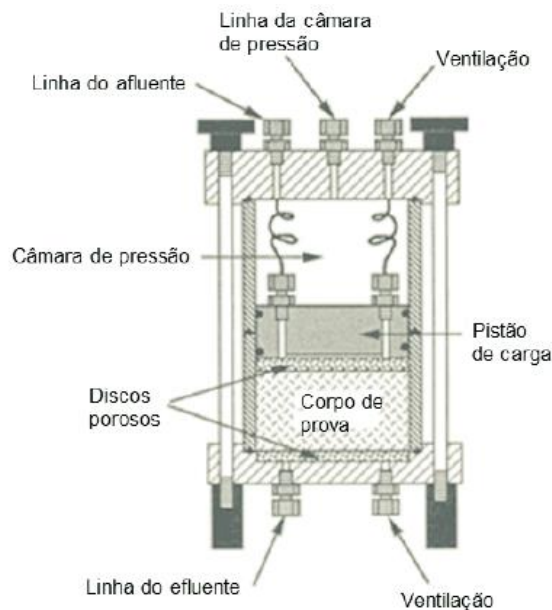


Figura 4.15 – Permeâmetro de Parede Rígida com Controle da Tensão Vertical (Olandoski, 2013).

O próximo tipo de permeâmetro apresentado é o tipo tubo amostrador, o qual apresenta amostras sem deformações, as quais são obtidas pela cravação de um tubo de parede fina no corpo de prova e muitas vezes este corpo é permeado no próprio cilindro mostrador. O risco de haver fluxo lateral é alto, principalmente em materiais rígidos, ou que contenham materiais granulares ou que ainda sejam muito duros, e, além disso, a possibilidade de fluxo lateral pode aumentar devido ao uso, em alguns casos, de tubos amostradores de parede fina com uma abertura um pouco menor que o diâmetro interno do tubo, numa tentativa de reduzir o atrito na extremidade de corte. Esta alternativa só é recomendada em casos em que os corpos de prova são feitos de materiais fáceis de amostrar e quando os tubos amostradores não apresentam os problemas vistos. A cravação anteriormente citada pode causar um efeito cisalhante gerando um remoldamento (amalgamento) do corpo de prova. A Figura 4.16 ilustra o holder de um permeâmetro de parede rígida do tipo tubo amostrador:

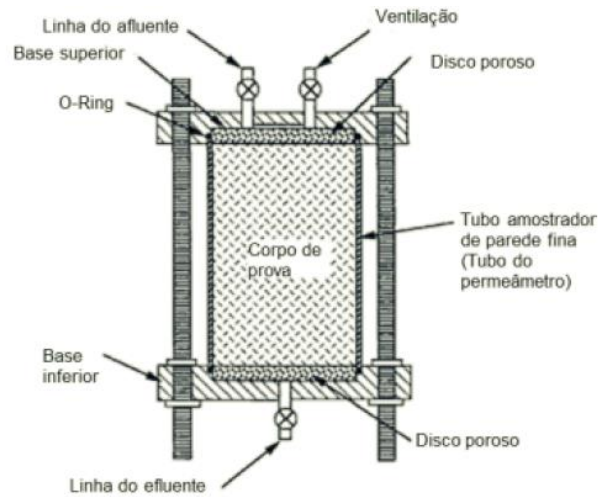


Figura 4.16 – Permeâmetro de Parede Rígida Tipo Tubo Amostrador (Olandoski, 2013).

Já no último caso citado neste trabalho tem-se o tipo no qual não há contato entre parede do permeâmetro e corpo de prova, e os espaços são preenchidos geralmente por bentonita ou outro selamento anelar, ficando entre o corpo de prova e a parede da célula, como se observa na Figura 4.17 abaixo. Devido à dificuldade de limpeza após os ensaios, este tipo de permeâmetro é útil nos casos em que há aderência entre os materiais do corpo de prova e da célula. Porém, a dificuldade maior neste método relaciona-se a verificação do selamento em cada ensaio e à moldagem, visando evitar a ocorrência de vazios entre o corpo de prova e o material desta vedação (Olandoski, 2013).

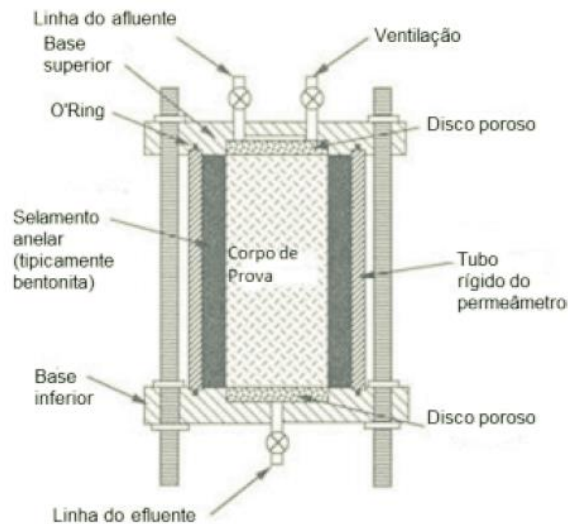


Figura 4.17 – Permeâmetro sem contato com a parede rígida e o corpo de prova (Olandoski, 2013).

4.5. Permeâmetro de Parede Flexível

Este tipo de permeâmetro é caracterizado pela movimentação de sua parede que envolve o corpo de prova acompanhando as variações de pressão e volume da célula de permeabilidade. Este tipo de comportamento auxilia nas medidas a ponto de proporcionar movimentações globais do material sem que sua porosidade se altere. Seis métodos para medição de permeabilidade através de permeâmetros com parede flexível são listados pela norma americana ASTM D5084 (2010), em materiais porosos e com permeabilidade menor que 1×10^{-6} m/s, que são os seguintes:

- Carga hidráulica constante;
- Carga decrescente e Pressão constante na linha do efluente percolado;
- Carga hidráulica decrescente e Pressão crescente na linha do efluente percolado;
- Vazão constante;
- Volume e carga constante, tipicamente com utilização de mercúrio com $k < 10^{-7}$ m/s;

- Volume constante e carga decrescente a partir da utilização de mercúrio e com pressão crescente na linha do efluente percolado (normalmente $k < 10^{-7} \text{ m/s}$).

Normalmente os seis métodos utilizam água como líquido permeante e cada método determina a forma do molde das amostras (indeformada, reconstituída, compactada e remoldada). A Figura 4.18 mostra o esquema de funcionamento do permeâmetro de vazão constante:

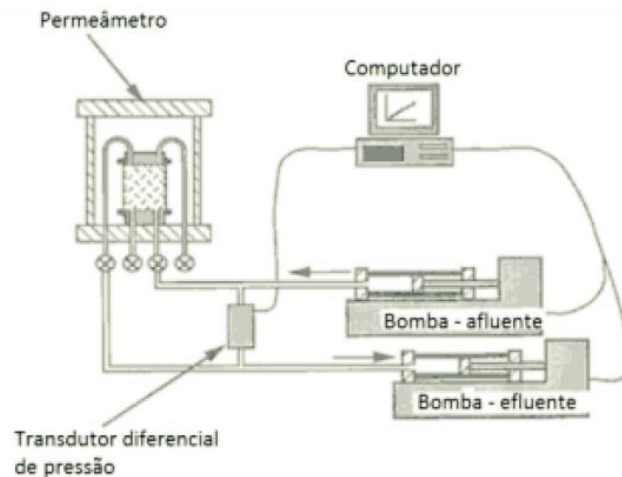


Figura 4.18 – Representação Esquemática da Montagem do método de vazão constante (Olandoski, 2013).

A duração aproximada dos ensaios para os três últimos métodos é de dois a três dias, enquanto para os três primeiros é de alguns dias a algumas semanas, frequentemente, uma semana. Este tempo depende principalmente do método adotado, do grau de saturação inicial e da condutividade hidráulica do material da amostra (ASTM D5084, 2010).

Praticamente todos os solos, com exceção dos materiais granulares, podem ser ensaiados em células de parede flexível (Olandoski, 2013).

4.6. Permeâmetro para a medição de permeabilidade e difusividade: Patente Americana

A presente invenção proporciona métodos e aparelhos para a medição tanto da permeabilidade quanto da difusividade de um sólido poroso sem a

necessidade de remover-se uma amostra sólida do aparelho. O aparelho pode ser facilmente reconfigurado com pequenos ajustes para alternarem-se entre medições de permeabilidade e difusividade.

A medição de valores através do equipamento (Figura 4.19) permite a determinação da permeabilidade, da variação, da porosidade efetiva e do comprimento real dos poros sólidos por meio de um vasto espectro de permeabilidades utilizando-se uma única parte do aparelho.

Os gases utilizados como fluidos para a determinação das propriedades são três, sendo que o primeiro gás é o nitrogênio, o segundo gás é o oxigênio e o terceiro gás também é nitrogênio. Em uma das montagens, o primeiro e o terceiro gás podem ser oxigênio e o segundo pode ser o nitrogênio. Contudo, quaisquer gases que tenham pesos moleculares próximos podem ser utilizados no aparelho. Já numa montagem alternativa, hélio e argônio podem ser utilizados. Neste caso, o primeiro e o terceiro gás podem ser o hélio e o segundo gás pode ser o argônio, ou, o primeiro e o terceiro gás podem ser o argônio e o segundo gás, o hélio.

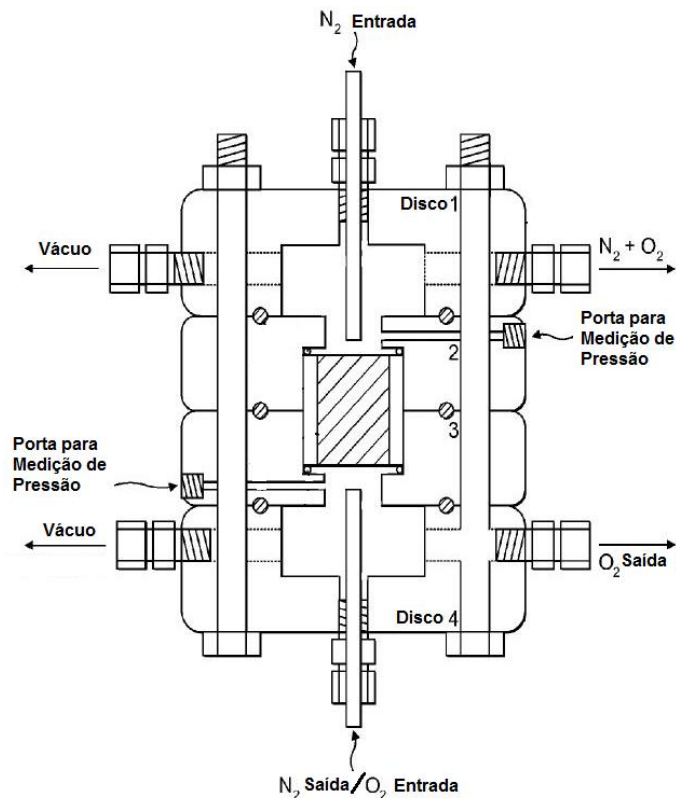


Figura 4.19 – Holder patenteado para medição de permeabilidade e difusividade (Bismarck et al, 2010).

De acordo com determinadas opções de montagem da invenção, o aparelho emprega uma técnica de aumento de pressão para a medição da permeabilidade do gás utilizando-se o primeiro gás. A pressão do gás é mantida baixa em um lado dos poros e do outro lado do material, mantém-se uma pressão mais alta e constante. O primeiro gás é coletado à medida que ele passa através dos poros do material sólido poroso migrando de um lado com uma alta pressão para o lado oposto do aparelho, o qual apresenta uma baixa pressão. A taxa de aumento da pressão é medida e utilizada para determinar a permeabilidade viscosa e os efeitos da “difusão de Knudsen” em pressões baixas são aplicados.

O aparelho pode então ser simplesmente adaptado para a medição da difusividade da amostra sólida porosa sem que esta seja removida do aparato. O modelo sólido poroso é inicialmente saturado com um terceiro gás, e um fluido com o segundo gás é aplicado numa extremidade dele. Em seqüência, o segundo gás flui de um lado da amostra para o lado oposto e o aumento da concentração deste gás é medida até que um equilíbrio seja alcançado. Essas medições são utilizadas para o cálculo da variação, porosidade efetiva e o comprimento real dos poros da amostra sólida porosa.

Nesta invenção, a câmara de amostra consiste em: um lado de passagem de fluido contendo uma entrada e uma saída; uma primeira linha de fluxo de fluido em comunicação com o lado de entrada da câmara de amostras; uma segunda linha de fluxo de fluido em comunicação com o lado de saída da câmara de amostras. O aparelho compreende ainda: uma primeira válvula disposta na primeira linha de escoamento, um meio de evacuação para evacuar a câmara de amostras, compreendendo: uma terceira linha de fluxo em comunicação com a entrada da câmara de amostras e uma bomba de vácuo; uma quarta linha de fluxo em comunicação com a saída da câmara de amostras e uma bomba de vácuo, a qual pode seletivamente evacuar a entrada e/ou a saída da câmara de amostra. Adicionalmente, o aparelho apresenta: uma segunda válvula disposta na terceira linha de fluxo, uma terceira válvula disposta na quarta linha de escoamento, uma fonte do

primeiro gás, que pode ser seletivamente colocado em comunicação de gases com a primeira linha de fluxo, através do qual o primeiro gás pode ser fornecido para a câmara de amostragem através da primeira linha de escoamento, além de medidores de pressão nas entradas e saídas de gás e um temporizador para medir a velocidade que a pressão no lado de saída da câmara de amostra aumenta (Bismarck et al, 2010).

5. PROPOSTA DE UM PERMEÂMETRO PARA CORPOS DE PROVA POLIMÉRICOS

Tendo em vista as pesquisas relacionadas à permeabilidade, permeômetros e os mais diversos holders, este trabalho propõe a criação e estudo de um permeômetro simples e de baixo custo para a medição da permeabilidade em corpos porosos poliméricos. Este tópico, portanto, mostra as etapas para criação de tal aparato, saindo desde a ideia inicial até a tentativa de construção.

A Tabela 5.1 mostra um estudo comparativo dos diversos trabalhos apresentados até o momento e que serviram de base para a proposta construtiva. Além disso, há a Tabela 5.2, a qual faz uma comparação mais refinada dos permeômetros de parede rígida e de parede flexível.

Tipo	Pressão de Atuação	Materiais do Holder	Material permeável	Fluido Penetrante	Tipo de Vedação	Esquema Construtivo
Permeâmetro para solos saturados e não saturados	0-100 kPa	Envoltório de acrílico, base e tampa de alumínio, alojamento do material poroso de latão e top-cap de alumínio	Solos e discos porosos (araldite e areia grossa)	Ar e água	Anéis de vedação	
Permeâmetro de Fluxo permanente para a medição da quantidade de água em solos	0-300 kPa	Cilindros de Alumínio e reservatório inferior de plástico	Solos	Água e ar	Anéis o'ring, fitas de vedação impermeáveis, cola de silicone e rosqueamento.	
Permeâmetro para medição de permeabilidade em concretos e argamassas	(-1,0)-0 bar	Câmara de nylon	Blocos de Concreto e Argamassas	Ar	Elastômeros	
Permeâmetro de Parede Rígida	Depende do tipo escolhido	Vidro ou PVC (policloreto de vinila) alumínio, acrílico, aço niquelado, aço inox e latão niquelado	Depende da aplicação	Depende da aplicação	Depende da aplicação	
Permeâmetro de Parede Flexível	Depende do tipo escolhido	Vidro ou PVC (policloreto de vinila) alumínio, acrílico, aço niquelado, aço inox e latão niquelado	Todos os solos, com exceção dos materiais granulares	Água	Depende da aplicação	
Permeâmetro Americano	Depende da aplicação	Núcleo de (teflon) PTFE e revestimento de resina epóxi	Meios Porosos	Gases (Oxigênio, Nitrogênio, Hélio, Argônio)	Anéis de vedação (o'ring)	

Tabela 5.1 – Estudo comparativo dos Permeâmetros estudados

TIPO DE PERMEÂMETRO	PRINCIPAIS VANTAGENS	PRINCIPAIS DESVANTAGENS
Parede rígida	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicidade de construção e operação da célula - Baixo custo da célula - Podem ser construídos permeâmetros de grandes dimensões - Ampla faixa de materiais pode ser utilizada (incluindo materiais quimicamente resistentes) - Pode ser permitida a expansão vertical. - Se desejado pode-se realizar o ensaio sem a aplicação de tensão vertical 	<ul style="list-style-type: none"> - É possível a ocorrência de fluxo no contato corpo de prova - parede. - Não há controle sobre as tensões horizontais - Se o corpo de prova contrair existirá fluxo na parede do permeâmetro - Não pode ser garantida a saturação do corpo de prova a través do parâmetro - Não se pode saturar o corpo de prova de forma convencional através da aplicação de contra pressão - O tempo de ensaio é longo no caso de materiais com baixa condutividade hidráulica
Parede flexível	<ul style="list-style-type: none"> - Pode-se saturar o corpo de prova da forma convencional através da aplicação de contra pressão - Pode-se confirmar a saturação do corpo de prova a través do parâmetro B - Pode-se controlar as tensões principais - Fluxo no contato parede - corpo de prova é improvável, mesmo com corpos de prova com superfícies rugosas - Tempo de ensaio rápido para materiais com baixo coeficiente de permeabilidade em decorrência da capacidade de saturação via contrapressão 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo do equipamento alto - Requer aplicação de pressão em três lugares (pressão de câmara, pressão na base e pressão no topo.) - Problemas de compatibilidade química da membrana com alguns líquidos químicos e poluentes - Operação da célula mais complicada. - Dificuldade de se realizar ensaios com tensões efetivas extremamente baixas. É necessário de no mínimo 14 kPa de σ', de forma de pressionar a membrana ao C.P. a fim de não haver fluxo no contato

Tabela 5.2 – Vantagens e Desvantagens dos Permeâmetros de Parede Rígida e Flexível

A partir da análise e discussão dessas tabelas iniciou-se o trabalho de construção de um mecanismo que abordasse as melhores características e ideias a fim de se obter um permeâmetro simples, porém eficaz.

5.1. Proposta de um projeto conceitual de um permeâmetro de baixo custo

A ideia inicial trata-se da construção de um permeâmetro cuja forma e materiais não exijam alto custo e que apresentem o mesmo princípio físico dos trabalhos de Darcy, ou seja, pretende-se com formas simples repetir o princípio da lei de perda de carga e medir a pressão na entrada e na saída de uma célula vedada. Baseia-se, portanto, a ideia num permeâmetro de

paredes rígidas e com uma vedação criativa, a qual não exija vácuo ou tecnologias anormais como utilizadas em aparelhos mais sofisticados.

Visando-se estes fatos, a solução encontrada leva em conta uma vedação formada por gaxetas ou anéis de vedação, juntamente com uma passagem de ar vinculada por uma rosca cônica. O princípio da rosca cônica tem a ver com a passagem de gás nos botijões de gás encontrados nas residências, os quais não devem vaziar e por isso apresentam um mecanismo simples, no entanto eficaz, de vedação.

Estas roscas funcionam da seguinte forma: o parafuso (rosca macho) deve ser cônico, com uma angulação de 2,98 graus segundo a NORMA ABNT (NBR12912) e a porca (rosca fêmea) deve ser reta e com mesmo diâmetro que o diâmetro menor da rosca cônica. Este conjunto de roscas é conhecido como rosca NPT, conforme ANEXO 1.

A seguir definiu-se que o holder seguiria o princípio de escoamento unidirecional, sendo a célula de permeabilidade fechada por flanges. Esses flanges são soldados em dois tubos dispostos verticalmente e nestes são colocados os medidores de pressão indicados para a posterior realização dos cálculos. Toda a instrumentação e aparato seguem o mesmo método, o qual é baseado no princípio de queda de pressão e é adequado para medir a permeabilidade em amostras com pequena espessura, sendo referenciado pela norma ISO 4022:1987.

A norma ISO 4022:1987 indica que essas amostras podem ter formatos cilíndricos ou retangulares, sendo que as faces devem ser necessariamente paralelas. A princípio, o estudo leva em conta duas configurações idênticas: uma delas com holder de alumínio e outra com holder de material polimérico proveniente da técnica de manufatura aditiva. A Figura 5.1 representa de forma esquemática o banco de permeabilidade proposto:

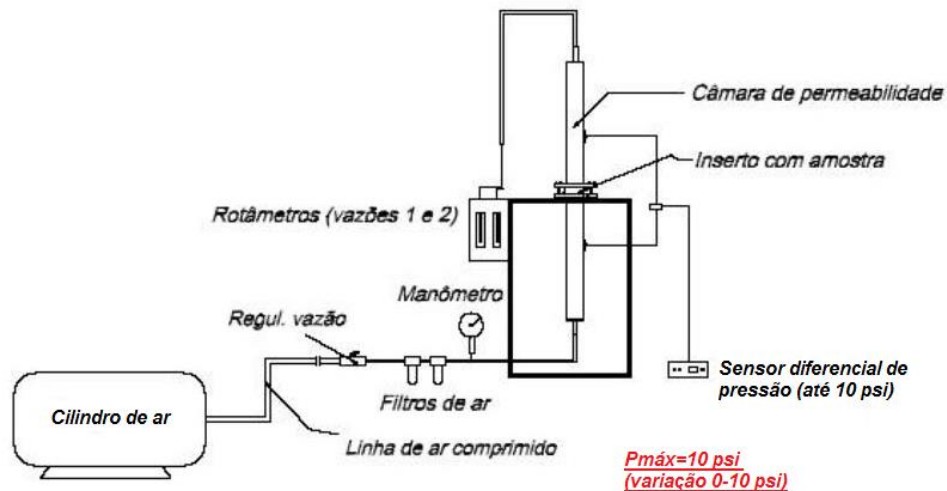


Figura 5.1 – Esquema do banco de permeabilidade proposto (Vasquez, 1999).

5.2. Configuração do Holder

O holder apresentado (vide Figura 5.2) visa manter as características de um permeâmetro de paredes rígidas e ao mesmo tempo este tenta sanar suas desvantagens, como por exemplo, a presença de uma vedação lateral para evitar este tipo de escoamento, uma entrada de ar ampla para haver maior controle da pressão, já que a área de contato do fluido com o corpo de prova é conhecida, além de diminuir a possibilidade de contração do corpo polimérico e diminuição do tempo de ensaio devido à porosidade do material polimérico.

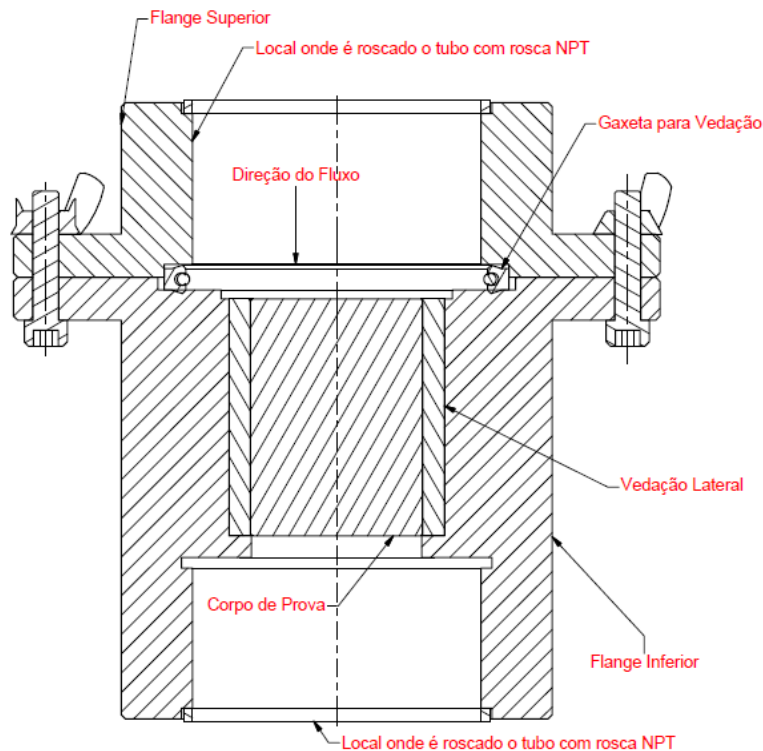


Figura 5.2 – Vista em corte do Holder empregado na solução construtiva

A proposta indica a construção de um holder de Poliamida (Nylon 12®), a partir da técnica de prototipagem rápida e um holder de alumínio. A primeira configuração é possível, pois entrada de pressão se dará por um longo tubo de alumínio e, portanto, não haverá esforço suficiente durante a passagem de fluido pelo holder, já que este passará pelo corpo de prova apenas. Com o auxílio de softwares CAD é possível determinar o peso da estrutura antes mesmo de sua construção. Para o holder de alumínio determinou-se um peso de aproximadamente 2,6 kg, enquanto que para o holder de Nylon 12 determinou-se um peso de aproximadamente 1,18 kg. Isso mostra a vantagem em se investir em um material barato e numa tecnologia promissora, como é a manufatura aditiva, o que abre margem para construções de permeâmetros em larga escala.

5.3. Montagem do banco de Permeabilidade

A partir da configuração do Holder como analisado anteriormente, definiu-se a construção de uma base de madeira e um cavalete metálico com a finalidade de sustentar o aparato e gerar maior rigidez para o banco de permeabilidade. Por tratar-se de um equipamento com a necessidade de modificações e troca constantes de tubos, sensores e mesmo os corpos de prova, há a melhoria do trabalho quando se trabalha numa base consolidada. Além disso, adotaram-se abraçadeiras para a fixação dos tubos, os quais respeitam a altura de escoamento do fluido e devem ser compridos (conforme a norma ISO 4022:1987) para a correta medição da queda de pressão. Também, foram adotadas porcas e parafusos para travamento da madeira nas superfícies metálicas.

A Figura 5.3 exibe a configuração previamente adotada em um software CAD:

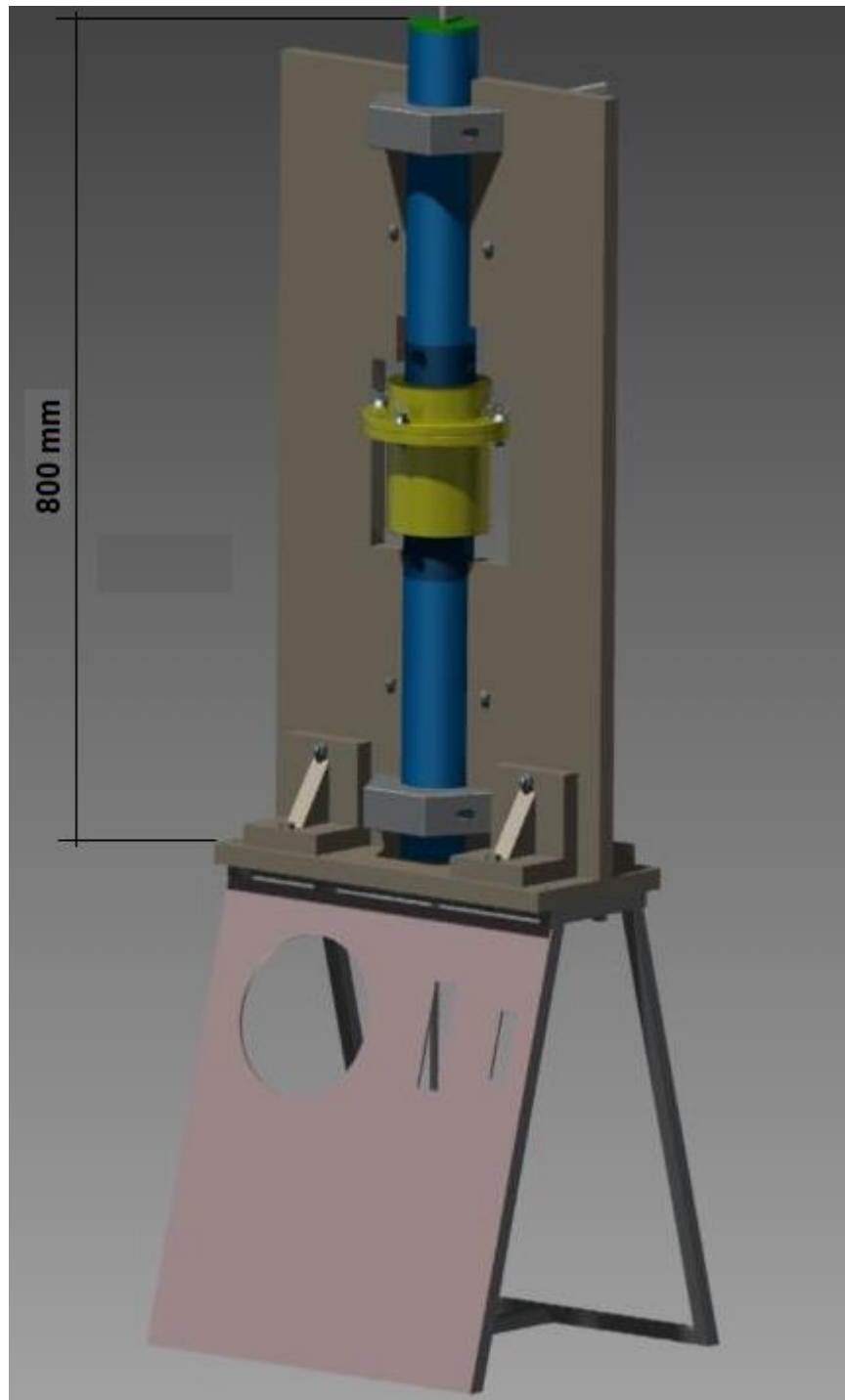


Figura 5.3 – Montagem geral do Banco de Permeabilidade

A partir da montagem estrutural há a adição dos equipamentos de medição, como por exemplo, rotâmetros (medidores de vazão de área variável), sensor de diferencial de pressão, manômetros e demais componentes necessários para a estruturação do banco, como compressor, linha de ar comprimido, regulador de vazão e os filtros de ar (vide Figura 5.1).

A sequência do trabalho consiste na medição de permeabilidade a partir da configuração construída, porém, há a necessidade de modificações e montagens que não permitiram a validação do equipamento até o prazo de entrega deste trabalho. No entanto, o trabalho é válido e gerará informações para novos trabalhos e posteriores medições, além de realizar o levantamento de várias soluções construtivas, fato este que torna a aplicação do estudo algo fundamental. Ao final, no ANEXO 2, apresentam-se os desenhos das partes construtivas do permeâmetro em questão, bem como suas cotas e especificações. Nesses desenhos há a especificação para que o material seja aço carbono, porém, devido às alterações, adequou-se a montagem para alumínio para minimizar a massa do permeâmetro.

6. CONCLUSÃO

Por meio das soluções construtivas observadas e do plano para a construção de um permeâmetro de baixo custo é possível concluir que houve grande eficácia no aprendizado e gerenciamento das ideias apresentadas, pois estas foram o cerne para a ampliação e aplicação da permeabilidade em materiais poliméricos, como se propõe. Além disso, viabilizou-se a possibilidade da construção de holders de baixo custo, como alumínio ou materiais provenientes da manufatura aditiva, já que vários holders utilizam da mesma ideia. A partir disso, a priori, pode-se constatar que, a permeabilidade é um estudo que leva em conta materiais normalmente rochosos, porém, a sua atuação está embasada em inúmeras atividades do cotidiano e por isso é importante o estudo e aplicação da medição a partir de permeômetros em novos materiais e com novas técnicas que dão ênfase em soluções construtivas simples e com baixo custo, aumentando assim a viabilidade da pesquisa.

Em suma, este trabalho atende seus objetivos e amplia o campo de visão da permeabilidade para pesquisas futuras, de forma a se tornar um grande aliado para a construção de novos mecanismos de medição com permeômetros e inserindo maior conhecimento sobre a área de estudo, na tentativa de padronizar as construções e tornar o permeâmetro uma ferramenta comum nos laboratórios de pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

American Petroleum Institute: API – *Recommended Practice for Core Analysis Procedure*, American Petroleum Institute, Dallas (1998) API RP 40, pp. 18, 20, 55.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*. D5084-10, (2010).

Amix, J. W., Bass, D. M., Whiting, R. L.: *Petroleum Reservoir Engineering – Physical Properties*. – The Agricultural and Mechanical college of Texas, 1960.

Ashley, R.J. (1985) *Permeability and Plastics Packaging*. Metal Box Ltd, Research and Development Division, Wantage, UK-1985.

Bismarck, A.; Hewitt, G.F.; Manley, K.S.S; Johson, J.W. – *Methods and Apparatus for determining the permeability and diffusivity of a porous solid* – USA -2010 – Patent number: 2010/0268488 A1;

Callister, W.D. Jr. 2001. *Fundamentals of Materials Science and Engineering* – Fifth Edition, Department of Metallurgical Engineering, The University of Utah, USA, 2001.

Campbell, I.; Bourell, D.; Gibson, I.; (2012) "*Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age*", Rapid Prototyping Journal, Vol. 18 Iss: 4, pp.255 - 258

Cardoso, F.A.; Akiyoshi, M. M.; Innocentini, M.D.; Pandolfelli, V.C. (2004) *Effect of Curing Conditions on the Properties of Ultra-low Cement Refractory Castables*. Refractories Applications and News vol. 9, n.2, pp. 12-16, 2004.

Castilhos Jr., A.B. de; Prim, E.C.C.; Oliveira, J.C. de; Matias, W.C. (2003) *Aterros Sanitários: Estudo dos mecanismos de retenção de líquidos percolados em solos argilosos*. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville, set. 2003.

Dias, C. O. 2012 – *Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados* – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia e Construção Civil, Curitiba, 2012. 227f. : il.; graf., tab.

Forchheimer, P.: *Wasserbewegung durch Boden*, Zeitz ver Deutsch ing., 45 (1901) 1781.

Fried, J.R. 2003. *Polymer science and technology* – Publishing as Prentice Hall Professional Technical Reference, One Lake Street, Upper Saddle River, NJ 07458, 2003.

Gibson, I.; Rosen, D.W.; Stucker, B. (2010) *Additive Manufacturing Technologies*. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, NY-USA, 2010.

Guimarães, Lucas Martins, 1981 - Desenvolvimento de um permeâmetro para determinação da condutividade hidráulica saturada e não saturada de solos/ Lucas Martins Guimarães. – Viçosa, MG, 2008. X, 64f:il. (algumas col.).

Heineck, K. S.; *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico dos materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis*. (2002) 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

Inforçatti Neto, P.I.; Lixandrão Filho, A. L.; Pereira, F.D.A.S; Silva, J.V.L.; Silveira, Z. C.; Bártolo, P. (2012) *Thermoplastic filament extruder head for desktop Additive Manufacturing machines*. In: Innovative developments in

Virtual and Physical Prototyping. London: Taylor & Francis Group, p. 635-638, ISBN 978-0-415-68418-7.

Kalifa, P.; Menneteau, F. D.; Quenard, D. (2000) *Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures*. Cement and Concrete Research, number 30. Elsevier Science Ltd. Amsterdam, 2000.

Luo, R.C.; Tzou, J-H; Hsieh, C-Y.; Chou, H-H. (2002) *The development of a thermal extrusion based rapid prototyping mechatronics system*. 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. V.1, Num.5-8. p. 2237-2242.

McKeen, L.W. 2012. *Permeability Properties of Plastics and Elastomers – Amsterdam Elsevier, Third Edition, WA 2012 Boston, USA – Plastics Design Library (PDL)*.

Moavenian, M.H.; Yasrobi, S.S.; (2008) *Volume change behavior of compacted clay due to organic liquids as permeant*. Applied Clay Science, v.39, p. 60-71, 2008.

Olandoski Neto, M. – *Validação de um permeômetro de parede flexível / Miguel Olandoski Neto*. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC - Curitiba, 2013 126f. : figs. Tabs.

Power, H., Ibanez, M.T., *Advanced Boundary Elements for Heat Transfer, Topics in Engineering*, Wit, 2007.

Rogers, C.E. 1985. *Permeation of Gases and Vapours in Polymers – Department of Macromolecular Science, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio 44106, USA, 1985*.

Salvini, V.R. et al. (2000) *Correlação entre a permeabilidade e resistência mecânica de filtros cerâmicos no sistema Al₂O₃*. **Cerâmica**. V. 46, n. 298. São Paulo. 18p. [www.scielo.br].

Sentone, D.T. – Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade superficial de revestimento de argamassa / D. T. Sentone. – São Paulo, 2011. 139 p.

Vargas, M. (1978) *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1978. 509 p.

Vasques, R.A . (1999) A simple apparatus for determining the permeability of thin-thickness porous materials by pressure-decay technique. *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, v. 14, n.4. p. 120- 123.

Webb, P.A.; Orr, C.; (1997) *Analytical Methods in Fine Particle Technology*. Micromeritics Instrument Corporation; Norcross, GAUSA, 155-191,1997.

Wiley, J. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry and Kirk-Othmer* – Published by John Wiley & Sons, Inc., Sixth ed. (2011) Volume A21, p.633, 638-648.

Wohlers, T. "*Factors to Consider When Choosing a 3D Printer* (WohlersAssociates.com, Nov/Dec 2012)". USA, Wohlers Associates.

Referências digitais

[1] - www.micromeritics.com Mercury_Porosimeter_Brochure.pdf. Acesso em 13/09/2013.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO 1 – NORMA ABNT (12912/1993)

Cópia impressa pelo Sistema CENWIN



ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas

Sede:
Rio de Janeiro
Av. Treza de Melo, 13 - 2º andar
CEP 20003-900 - Caixa Postal 1590
Rio de Janeiro - RJ
Tel.: FÁBIX (021) 210-3122
Telex: (021) 34333 ABNT - BR
Endereço Telegráfico:
NORMATECNICA

Copyright © 1993.
ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas
Printed in Brazil
Impresso no Brasil
Todos os direitos reservados

JUN 1993 | NBR 12912

Rosca NPT para tubos - Dimensões

Padronização

Origem: Projeto PB-1352/1991
CB-04 - Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos
CE-04:003.03 - Comissão de Estudo de Roscas
NBR 12912 - Pipe threads - Dimensions - Standardization
Descriptor: Thread
Esta Norma foi baseada na ANSI/ASME B 1.20.1/1983
Esta Norma substitui a PB-1352/1988
Válida a partir de 30.07.1993
Incorpora Errata Nº 1 de NOV 1995

Palavra-chave: Rosca | 5 páginas

1 Objetivo

Esta Norma padroniza as dimensões das roscas NPT cônica externa e cônica interna, para aplicação geral em tubulações e seus acessórios, com o uso de vedantes. Rosca para tubos que não utiliza vedante (rosca tipo Dryseal = vedante a seco para tubos) é definida na NBR 12630.

2 Documentos complementares

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

NBR 5876 - Terminologia e simbologia de roscas - Terminologia

NBR 12630 - Rosca NPTF e PTF para tubos - Dimensões - Padronização

3 Definições

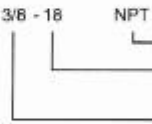
Os termos técnicos utilizados nesta Norma estão definidos na NBR 5876.

4 Condições gerais

4.1 Designação

4.1.1 A rosca, segundo esta Norma, é designada pela seqüência de algarismos e letras apresentada a seguir:

3/8 - 18 NPT



Símbolo do tipo da rosca
Quantidade de fios em 25,4 mm
Tamanho nominal da rosca
(é permitido exprimir em fração decimal; por exemplo: 0,375)

4.1.1.1 O símbolo tem o seguinte significado:

- N = "National" de American National Standard;
- P = "Pipe" - Tubo;
- T = "Taper" - Cônico.

Notas: a) Além da rosca NPT, ainda existem outras formas para utilização específica, que são as seguintes:

NPSC: onde "S" = Straight = paralelo e "C" = Coupling = acoplamento; trata-se de rosca utilizada para acoplamento de elementos de tubulações sob pressão, quando se aplicam lubrificantes ou selantes (vedantes).

NPTR: onde "R" = Railing fittings = ferroviário; trata-se de junção mecânica (sem função de vedação). As roscas internas e externas são cônicas.

NPSL: onde "L" = Lock nut; trata-se de rosca interna paralela para acoplamento à rosca destinada à fixação mecânica.

NPSM: onde "M" = Mechanical = mecânica; trata-se de rosca de acoplamento mecânico livre, destinada à conexão de elementos mecânicos.

NPSH: onde "H" = Hose = mangueira; trata-se de rosca para conexões soltas para fixação mecânica de ligações de mangueiras.

b) Todas estas roscas estão contidas na ANSI/ASME B 1.20.1.

4.1.2 No caso de rosca esquerda, devem-se acrescentar as letras "LH" ao final da designação. Por exemplo: 3/8-18 NPT-LH.

4.1.3 O sistema de tolerâncias desta rosca não contém afastamento para camada de revestimento protetor. Quando for necessário em peças roscadas o uso de revestimentos protetores, esta condição deve ser claramente identificada no produto, para que a rosca seja calibrada com ou sem revestimento, fazendo a identificação da posição do calibrador "ANTES DO REVESTIMENTO" ou "APÓS O REVESTIMENTO".

4.2 Conicidade

A conicidade das roscas é de 1:16 (o que corresponde a aproximadamente 1°47', do semi-ângulo do cone) medida em relação ao diâmetro do passo e ao longo do eixo.

4.3 Perfil

O perfil básico é definido pelo ângulo de 60°, compreendido entre os flancos do filete. Os filetes são truncados na crista e na raiz por uma linha, paralelamente à linha do diâmetro de flanco, estando as demais características conforme a Figura 1.

4.4 Vedação das juntas roscadas

4.4.1 Quando são exigidas juntas roscadas estanques, é previsto por esta Norma o uso de roscas cônicas com meios vedantes e apertadas com chave. O uso de vedantes é recomendado nos casos em que as roscas das duas peças juntadas são de diferentes origens (fabricantes) e quando não é possível estabelecer com segurança se os limites de truncamento das raízes e cristas asseguram uma interferência suficiente para proporcionar a vedação sem o uso de vedantes.

Nota: Para prevenir o engrupamento de certos materiais usados em tubulações, como aço inoxidável, o uso de vedante é recomendado, pois este age também como lubrificante.

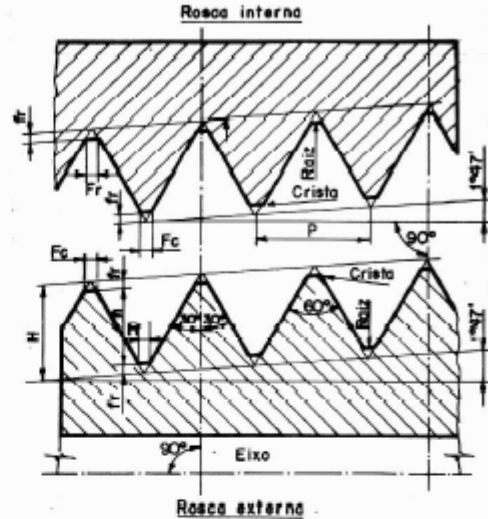
4.4.2 A vedação pode ser afetada pelo desvio de circularidade da rosca, que pode ocorrer com a junta roscada na montagem final. Isto depende do método de produção das roscas bem como da elasticidade e/ou ductilidade das peças montadas e do desempenho final da junta montada.

5 Condições específicas

5.1 Dimensões

5.1.1 Dimensões básicas

As dimensões básicas da rosca NPT são as indicadas na Figura 1 e na Tabela 1.



Rosca externa:

H = altura do triângulo básico de 60°

h = altura do filete da rosca externa

P = 1/n passo da rosca (medido paralelamente ao eixo)

n = número de filetes por 25,4 mm

f_c = altura do truncamento da crista

f_r = altura do truncamento da raiz

F_c = largura do truncamento da crista

F_r = largura do truncamento da raiz

Rosca interna:

$H = 0,866025 P$

$h = 0,8 P$

$P = \frac{25,4}{n}$ (mm)

Figura 1 - Perfil básico da rosca NPT

5.1.2 Truncamento e altura da rosca

5.1.2.1 A altura "H" do triângulo básico da rosca é:

$$H = 0,866025 P = 0,866025/n$$

Onde:

P = passo de rosca

n = fios por 25,4 mm

5.1.2.2 A profundidade básica máxima "h" da rosca truncada (ver Figura 1) é baseada nos fatores inerentes à fabricação das ferramentas de corte e ajuste do acoplamento: $h = 0,800 P = 0,800/n$.

5.1.2.3 A crista e a raiz da rosca são truncadas no mínimo $0,033 P$. A folga máxima ocorre quando os truncamentos da Tabela 1 são mínimos para as raízes e máximos para as cristas (parte esquerda da Figura 2) e ocorre interferência quando o truncamento na crista é mínimo e na raiz é máximo (parte direita da Figura 2).

5.1.3 Rosca cônica

Rosca que, segundo esta Norma, forma um acoplamento como o mostrado na Figura 3, sendo que existe contato entre os flancos.

5.1.4 Diâmetro da rosca cônica

5.1.4.1 Os diâmetros básicos da rosca cônica são determinados pelas seguintes equações:

$$E_0 = D - (0,05 D + 1,1) 1/n = D - (0,05 D + 1,1) P \text{ (mm)}$$

$$E_1 = E_0 + 0,0625 L_1$$

Tabela 1 - Limite do truncamento da raiz e da crista da rosca tipo NPT

Fios por 25,4mm	n	27	18	14	11,5	8
Passo	P	0,9408	1,4112	1,8143	2,2088	3,1750
Altura do triângulo básico	H	0,815	1,222	1,571	1,913	2,750
Altura do filete h	máx.	0,7526	1,1289	1,4514	1,7670	2,5400
	mín.	0,6271	0,9736	1,2880	1,5903	2,3558
Altura do truncamento	máx.	0,090	0,124	0,142	0,161	0,197
	Expressão $0,033 P$	mín.	0,031	0,046	0,059	0,072
f_r e f_c (mm)	Expressão	$0,096 P$	$0,088 P$	$0,078 P$	$0,073 P$	$0,062 P$
Largura equivalente de truncamento	máx.	0,105	0,144	0,163	0,185	0,229
	Expressão $0,038 P$	mín.	0,036	0,054	0,069	0,084
F_r e F_c (mm)	Expressão	$0,111 P$	$0,102 P$	$0,090 P$	$0,084 P$	$0,072 P$
Incremento no diâmetro por fio de rosca		0,059	0,088	0,113	0,138	0,198

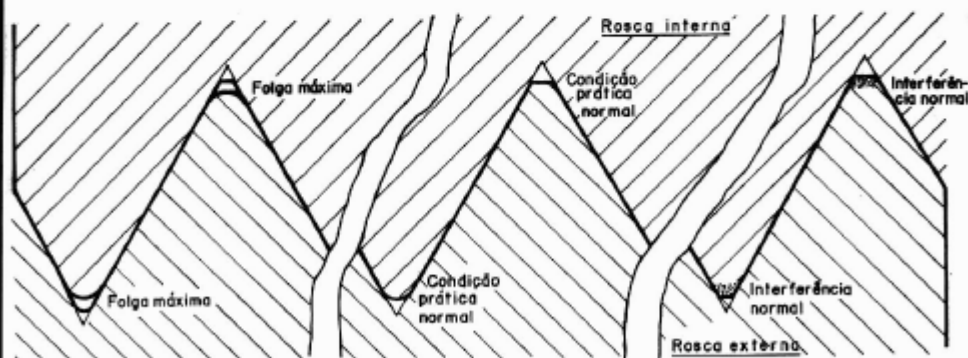


Figura 2 - Condições de interferência

5.1.4.2 Para 1/8-27NPT e 1/4-18NPT:

$$E_1 = D - (0,05 D + 0,827) P$$

Onde:

D = diâmetro externo do tubo

E_0 = diâmetro de flanco no lado menor da rosca ou na ponta do tubo

E_1 = diâmetro de flanco da rosca no plano de calibração ou no lado maior da rosca interna

L_1 = comprimento de acoplamento manual

Tabela 2 - Dimensões principais da rosca NPT

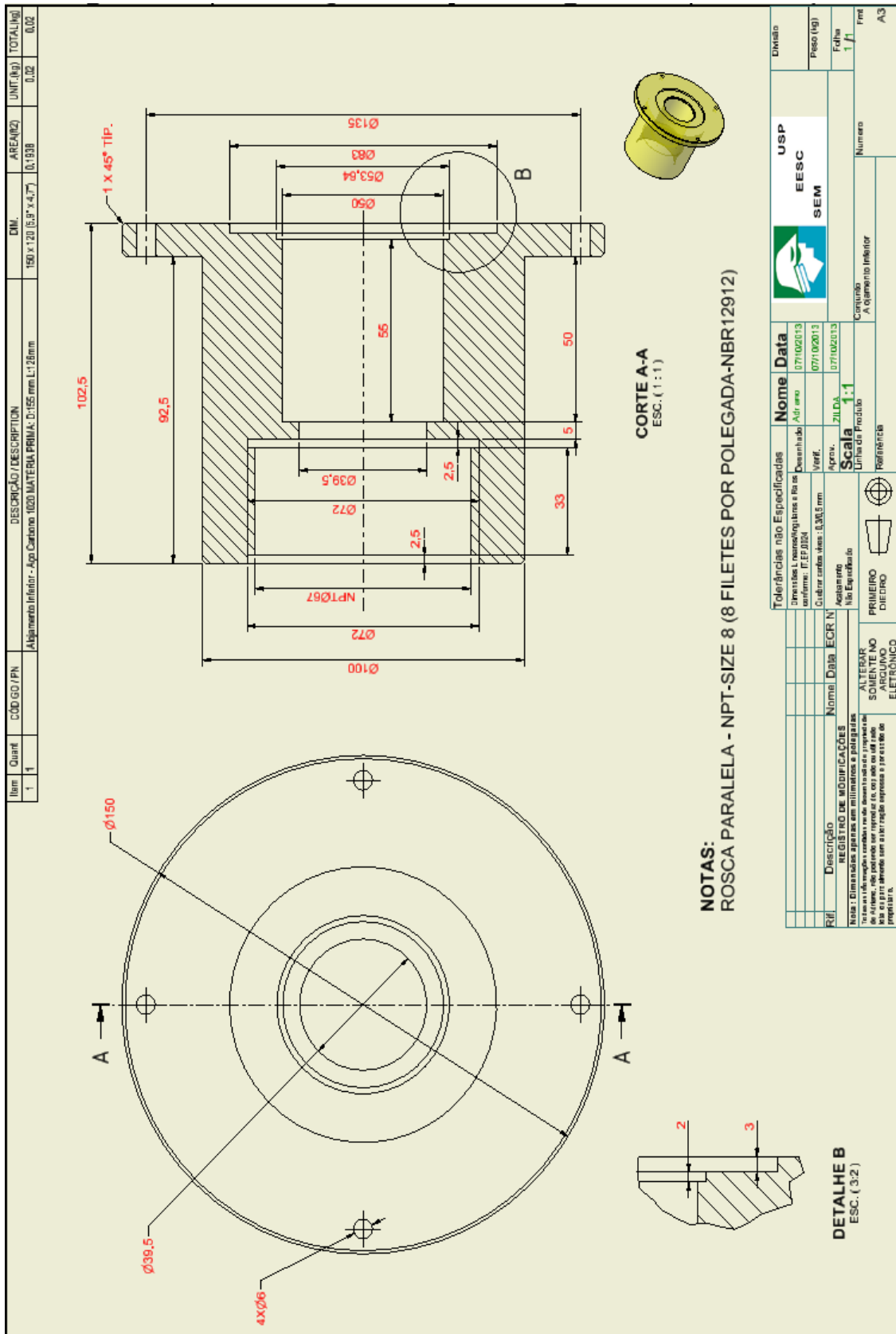
Unid.:mm

Tamanho nominal	Diâmetro externo do tubo D	Diâmetro de flanco E _s	Acoplamento manual		Rosca útil externa ⁽²⁾		Comprimento de aperto normal L ₂ - L ₁
			L ₁ ⁽¹⁾	Diâmetro E ₁ ⁽³⁾	L ₂	Diâmetro E ₂	
1/16 - 27	7,938	6,888	4,064	7,142	6,632	7,302	2,568
1/8 - 27	10,287	9,233	4,102	9,489	6,703	9,652	2,601
1/4 - 18	13,716	12,126	5,786	12,487	10,206	12,764	4,420
3/8 - 18	17,145	15,545	6,096	15,926	10,358	16,192	4,282
1/2 - 14	21,336	19,264	8,128	19,772	13,556	20,111	5,428
3/4 - 14	26,670	24,579	8,611	25,117	13,861	25,445	5,250
1 - 11,5	33,401	30,826	10,160	31,461	17,343	31,910	7,183
1 1/4 - 11,5	42,164	39,551	10,668	40,218	17,953	40,673	7,285
1 1/2 - 11,5	48,260	45,621	10,668	46,267	18,377	46,769	7,709
2 - 11,5	60,325	57,633	11,074	58,325	19,215	58,834	8,141
2 1/2 - 8	73,025	69,076	17,323	70,159	28,893	70,882	11,570
3 - 8	88,900	84,852	19,456	86,068	30,480	86,757	11,024
3 1/2 - 8	101,600	97,473	20,853	98,776	31,750	99,457	10,887
4 - 8	114,300	110,093	21,438	111,433	33,020	112,157	11,582
5 - 8	141,300	136,925	23,800	138,412	35,720	139,157	11,920
6 - 8	168,275	163,731	24,333	165,252	38,418	166,132	14,084
Tamanho nominal	Comprimento de aperto com chave		Rosca incompleta (3,47 P) V	Comprimento total L ₁	Comprimento da rosca externa completa ⁽⁴⁾		Diâmetro básico menor externo K ₀ ⁽⁵⁾
	Rosca interna L ₂	Diâmetro E ₂			L ₃	Diâmetro E ₂	
1/16 - 27	2,822	6,711	3,264	9,896	4,750	7,185	6,137
1/8 - 27	2,822	9,058	3,264	9,967	4,821	9,534	8,481
1/4 - 18	4,234	11,862	4,897	15,103	7,384	12,587	10,996
3/8 - 18	4,234	15,281	4,897	15,255	7,536	16,017	14,417
1/2 - 14	5,443	18,826	6,294	19,850	9,929	19,885	17,813
3/4 - 14	5,443	24,238	6,294	20,155	10,234	25,217	23,127
1 - 11,5	6,627	30,411	7,663	25,006	12,926	31,634	29,060
1 1/4 - 11,5	6,627	39,136	7,663	25,616	13,536	40,397	37,785
1 1/2 - 11,5	6,627	45,207	7,663	26,040	13,960	46,493	43,853
2 - 11,5	6,627	57,219	7,663	26,878	14,798	58,558	55,867
2 1/2 - 8	6,350	68,679	11,016	39,908	22,542	70,485	66,535
3 - 8	6,350	84,455	11,016	41,436	24,130	86,360	82,311
3 1/2 - 8	6,350	97,076	11,016	42,766	25,400	99,060	94,932
4 - 8	6,350	109,696	11,016	44,036	26,670	111,760	107,554
5 - 8	6,350	136,528	11,016	46,736	29,370	138,760	134,384
6 - 8	6,350	163,334	11,016	49,433	32,067	165,735	161,191

⁽¹⁾ O comprimento L₁ de acoplamento manual é igual ao comprimento do degrau do calibrador tipo anel.⁽²⁾ O diâmetro E₁ é igual ao diâmetro de flanco dos calibradores no plano de aperto manual.⁽³⁾ É o comprimento total do calibrador tipo tampão.⁽⁴⁾ O comprimento L₃ determina o início das cristas incompletas, os dois filetes (2P) seguintes têm suas raízes completas e suas cristas incompletas.⁽⁵⁾ Informação para seleção da broca para furo básico de uma rosca interna.

8.2.

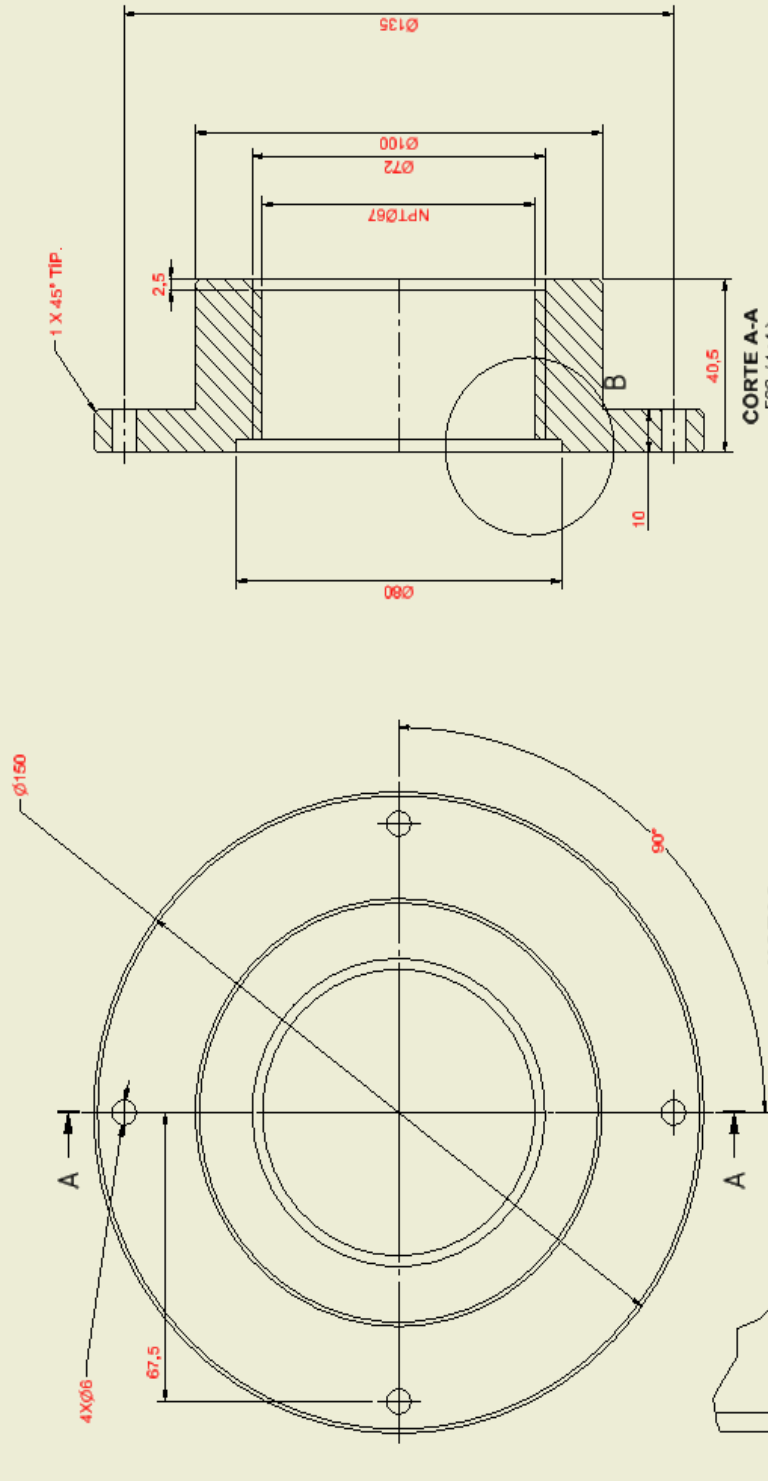
ANEXO 2 – Desenhos da Solução Construtiva



Item	Quant	COD GO / PN	DESCRICO / DESCRIPTION	DIM.	AREA(M2)	UNIT(M3)	TOTAL(M3)
1	1		Alinhamento Inferior - Ago Carbono 1020 MATERIA PRIMA-D:165 mm L:28mm	150 x 120 (5.9" x 4.7")	0,1939	0,02	0,02

Tolerâncias não Especificadas		Nome Data		Dinheiro	
Diretrizes L, normalizadas e base uniformes: F, EPD24		Adriano 07/10/2013		USP	
Quilates carbos: 0,305 mm		Verif. 07/10/2013		EESC	
Apex. 2,5		ZILDA 07/10/2013		SEM	
Escala 1:1		Unidade de Produto		Número	
Referência		Cotação		Fm	
PRIMEIRO		A. Alinhamento Inferior		1 1	
DIETRO		Número		A3	
ELETROÔNICO		Referência			

Item	Quant	COD.GD./PN	DESCRIÇÃO / DESCRIPTION	DIM.	AREA(M2)	UNIT.(kg)	TOTAL(kg)
1	1		ALINHAMENTO SUPERIOR - AÇO CARBONO 100B - MATERIA PRIMA D=155mm L=6mm			0,00	0,00



NOTAS:
 ROSCA PARALELA - NPT-SIZE 8
 (8 FILETES POR POLEGADA-NBR12912)

CORTE A-A
 ESC. (1:1)

DETALHE B
 ESC. (3:2)

Tolerâncias não Especificadas		Nome		Data		Divisão	
Dimensões L, resacas, quebras e filetes uniformes: D.E.F.004		Admissão		08/10/2013		USP	
Cotas e cotas vis: 1:0,5/0,3 mm		Verificação				EESC	
Acabamento Não Especificado		Assinatura				SEM	
PRIMEIRO DELETO		Escala 1:1		Conjunto		Folha 1 / 1	
ALTEAR SOMENTE NO ARQUIVO ELETRONICO		Rel.		Consign		Fm.	
						A3	

Base de madeira após montagem:

