

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
APLICADA E SUSTENTABILIDADE

OTIMIZAÇÃO DO MÉTODO CEMBUREAU DE ENSAIO DE
PERMEABILIDADE AO GÁS PARA MATERIAIS
CIMENTÍCIOS

Autora: Thais Carvalho dos Santos
Orientadora: DSc. Anne Neiry de Mendonça Lopes

RIO VERDE - GO
Março - 2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
APLICADA E SUSTENTABILIDADE

OTIMIZAÇÃO DO MÉTODO CEMBUREAU DE ENSAIO DE
PERMEABILIDADE AO GÁS PARA MATERIAIS
CIMENTÍCIOS

Autora: Thais Carvalho dos Santos
Orientadora: DSc. Anne Neiry de Mendonça Lopes

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

RIO VERDE - GO
Março - 2019

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

S237o Santos, Thais Carvalho Dos
Otimização do método Cembureau de ensaio de permeabilidade ao gás para materiais cimentícios / Thais Carvalho Dos Santos; orientadora DSc. Anne Neiry de Mendonça Lopes; co-orientador DSc. Michell Macedo Alves. -- Rio Verde, 2019.
107 p.

Dissertação (Mestrado em Programa de pós-graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2019.

1. Permeabilidade ao gás. 2. durabilidade. 3. concreto. 4. Cembureau. I. Lopes, DSc. Anne Neiry de Mendonça, orient. II. Alves, DSc. Michell Macedo, co-orient. III. Título.

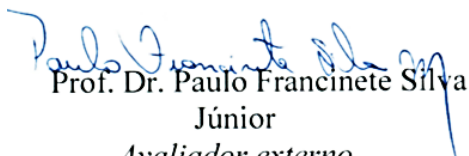
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE


**OTIMIZAÇÃO DO MÉTODO CEMBUREAU DE ENSAIO
DE PERMEABILIDADE AO GÁS PARA MATERIAIS
CIMENTÍCIOS**

Autora: Thais Carvalho dos Santos
Orientadora: Anne Neiry de Mendonça Lopes

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade –
Área de concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

APROVADA em 29 de março de 2019.


Prof. Dr. Paulo Francinete Silva
Júnior
Avaliador externo
IFG / Goiânia


Prof.ª Dr.ª Eugênia Fonseca da Silva
Avaliadora externa
UNB / Brasília


Dr.ª Anne Neiry de Mendonça Lopes
Presidente da Banca
Furnas / Goiânia

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmãos e sobrinha, principal motivo do meu empenho e força durante quaisquer dificuldades, por todo amor, apoio e pelo prazer de compartilhar a vida e mais essa conquista com vocês.

A minha orientadora e grande amiga Anne, pelas contribuições valiosas e conhecimento compartilhado, mas, principalmente por não medir esforços para me ajudar, pela confiança no meu potencial, pelo encorajamento, carinho e por ser inspiração para mim em tantos aspectos.

Agradeço profundamente também a toda a minha família, pois todos, de diversas formas, contribuíram com a minha formação e caráter e foram meu suporte ao longo da vida e do curso.

A todos os meus amigos e aos colegas de mestrado pela motivação, apoio e até mesmo pela compreensão quando em momentos de estresse ou ausência. Em especial, àqueles que estiveram mais próximos e contribuíram diretamente com o desenvolvimento do trabalho: Bianca, Bruna, Diogo, Jéssica, João Paulo, Juliana, Letícia, Macelle, Marianne, Raquel, Renan, Stephani e Talitah. Esse trabalho, apesar de individual, teria sido especialmente mais difícil sem o carinho e ajuda destas pessoas.

Agradeço também ao Instituto Federal Goiano, que viabilizou a aquisição de tanto conhecimento, e a toda equipe de professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, em especial ao coordenador do curso João Areis e meu coorientador Michell Macêdo.

À Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica de Furnas Centrais Elétricas S.A., por ceder a equipe e alguns materiais necessários para a confecção dos corpos de prova, além da infraestrutura laboratorial.

A todos os funcionários e novos amigos de Furnas, em que cada um com sua maneira contribuiu para a conclusão deste trabalho. Em especial ao Alexandre, Alcício,

Aloísio, Daiane, Edson (Jeguinho), Edson (Mão de onça), Gilberto, Jéssika, Josean, Luciana, Moacir, Renato Cabral, Sílvio e Wander pelas diversas vezes em que estiveram presentes, auxiliando com tanto carinho e sem visar nada em troca, contribuindo positivamente com o desenvolvimento desse trabalho.

A FAPEG, pela concessão de bolsa, e ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento de Furnas, pelo apoio financeiro que permitiu o desenvolvimento desta pesquisa. Aos fornecedores CIPLAN pela doação do cimento indispensável para a execução do programa experimental e Sika Brasil pela doação dos aditivos.

A Deus, acima de tudo, por ter colocado cada uma dessas pessoas em minha vida, por me guiar e proteger através dos obstáculos, por me dar forças e a convicção de que tudo daria certo ao final dessa jornada e pelos tantos sinais e bênçãos concedidas que me mantiveram firme na realização desse sonho.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Thais Carvalho dos Santos, filha de Ariosvan Costa dos Santos e Ana Maria Rocha Carvalho dos Santos, nascida em 26 de fevereiro de 1994 na cidade de Santa Helena de Goiás – GO. Concluiu o ensino médio em 2011 no Colégio da Polícia Militar de Goiás, unidade Carlos Cunha Filho, na cidade de Rio Verde – GO. Engenheira Civil pela Universidade Estadual de Goiás, Campus Henrique Santillo (Anápolis – GO), no segundo semestre de 2016. Em março de 2017, ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, nível de mestrado profissional, na linha de pesquisa de Tecnologia e Ciência dos Materiais, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde – GO. Em março de 2019, defendeu a sua dissertação, parte indispensável para a obtenção do diploma de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, sob a orientação da Dra. Anne Neiry de Mendonça Lopes.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	xiii
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Processo experimental.....	2
1.3 Mecanismos de transporte de massa em concretos	4
1.3.1 Permeabilidade ao gás	7
1.3.1.1 Fatores influentes	7
1.4 Referências bibliográficas	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. CAPÍTULO I - OTIMIZAÇÃO DO MÉTODO CEMBUREAU DE ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO GÁS PARA CONCRETOS: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL E ESTATÍSTICA	16
3.1 Introdução	17
3.2 Materiais e Métodos	19
3.2.1 Planejamento e etapas do estudo	19

3.2.2 Materiais	22
3.2.3 Preparação das amostras.....	22
3.2.4 Pré-condicionamento em estudo	23
3.2.5 Pré-condicionamento RILEM	25
3.2.6 Redistribuição da umidade	27
3.2.7 Ensaio de permeabilidade ao gás.....	28
3.3 Resultados e Discussão	31
3.3.1 Etapa 1 - Simplificação	31
3.3.2 Etapa 2 - Comparação	37
3.4 Conclusões	40
3.5 Referências Bibliográficas	42
4. CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE TRANSPORTE DE MASSA DE CONCRETOS, COM ÊNFASE AO PARÂMETRO DE PERMEABILIDADE AO GÁS	45
4.1 Introdução	46
4.2 Materiais e Métodos	47
4.2.1 Caracterização dos materiais e proporcionamento dos concretos	47
4.2.2 Moldagem e cura dos corpos de prova	49
4.2.3 Propriedades do concreto no estado endurecido	49
4.2.3.1 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade	49
4.2.3.2 Absorção por imersão total	50
4.2.3.3 Absorção por capilaridade	51
4.2.3.4 Permeabilidade à água	51
4.2.3.5 Permeabilidade ao gás.....	52
4.3 Resultados e Discussão	54
4.3.1 Propriedades mecânicas	54
4.3.2 Absorção total e por capilaridade	56
4.3.3 Permeabilidade ao gás x permeabilidade à água	58
4.4 Conclusões	62
4.5 Referências Bibliográficas	63
5. CONCLUSÃO GERAL.....	65
RECOMENDAÇÃO DE PRÉ-CONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO PARA OS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE AO GÁS	66
6. APÊNDICES	71

APÊNDICE A - Análise estatística dos resultados de permeabilidade ao gás de amostras de duas moldagens distintas.....	72
APÊNDICE B - Caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos....	73
APÊNDICE C - Resultados individuais das propriedades do concreto endurecido.....	74
APÊNDICE D - Material ilustrativo suplementar	87

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO I - OTIMIZAÇÃO DO MÉTODO CEMBUREAU DE ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO GÁS PARA CONCRETOS: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL E ESTATÍSTICA	
Tabela 1 - Proporcionamento dos concretos desenvolvidos no programa experimental	22
Tabela 2 - Descrição das condições dos procedimentos de pré-condicionamento definidos para estudo	24
Tabela 3 - Análise de variância dos resultados de permeabilidade ao gás aparente (K_i)	32
Tabela 4 - Coeficiente de permeabilidade ao gás e coeficiente de variação dos métodos de ensaio	38
Tabela 5 - Resumo dos resultados da regressão entre os métodos de ensaio de permeabilidade ao gás em estudo e o Cembureau	38
CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE TRANSPORTE DE MASSA DE CONCRETOS, COM ÊNFASE AO PARÂMETRO DE PERMEABILIDADE AO GÁS	
Tabela 1 - Traços dos concretos estudados.....	47
Tabela 2 - Características dos aditivos utilizados na dosagem.....	48
Tabela 3 - Caracterização do cimento.....	49
Tabela 4 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade nas várias idades e para os dois tipos de concreto estudados.....	54

Tabela 5 - Valores médios de absorção de água por imersão total, índice de vazios e massa específica dos concretos estudados.....	57
Tabela 6 - Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade	57
Tabela 7 - Coeficientes de permeabilidade ao gás.....	58
Tabela 8 - Coeficientes de permeabilidade à água	58
Tabela 9 - Comparação dos coeficientes de permeabilidade à água e ao gás.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
INTRODUÇÃO	
Figura 1 - Permeabilidade relativa ao gás e à água de concretos em função do grau de saturação dos poros	5
Figura 2 - Umidade relativa em diferentes profundidades e após diferentes períodos de secagem.....	8
Figura 3 - Umidade relativa em diferentes profundidades, após diferentes períodos de secagem e redistribuição de umidade por duas semanas	8
Figura 4 - Permeabilidade ao gás aos 28 dias dos concretos com diferentes teores de metacaulim de alta reatividade	10
Figura 5 - Influência do tipo de concreto na permeabilidade ao gás	11
 CAPÍTULO I - OTIMIZAÇÃO DO MÉTODO CEMBUREAU DE ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO GÁS PARA CONCRETOS: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL E ESTATÍSTICA	
Figura 1 - Esquema geral das etapas envolvidas no procedimento experimental	20
Figura 2 - Descrição esquemática da preparação para ensaio de permeabilidade ao gás	23
Figura 3 - Amostras de concreto em câmara climática.....	24
Figura 4 - Resumo esquemático do pré-condicionamento RILEM (método Cembureau)	25
Figura 5 - Amostras de concreto durante o pré-condicionamento RILEM	27

Figura 6 - Selagem a quente dos discos de concretos com (a) polipropileno e (b) bopp e (c) etapa de redistribuição em estufa	27
Figura 7 - Permeâmetro Cembureau e amostras armazenadas após ensaio de permeabilidade ao gás. (a) Suprimento de ar; (b) Regulador de pressão com manômetro; (c) Célula de ensaio com corpo de prova; (d) Medidores de fluxo; (e) Cronômetro	29
Figura 8 - Descrição esquemática da célula de permeabilidade	29
Figura 9 - Valores médios globais da permeabilidade aparente em função do tipo de concreto (a/lig) e procedimento de pré-condicionamento, com representação da variabilidade.....	32
Figura 10 - Variabilidade e valores médios globais de permeabilidade em função do tempo de redistribuição (t). A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente	35
Figura 11 - Métodos selecionados para a etapa de comparação	37
Figura 6 - Valores médios de permeabilidade aparente em função da pressão de gás ...	37

CAPÍTULO II - AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE TRANSPORTE DE MASSA DE CONCRETOS, COM ÊNFASE AO PARÂMETRO DE PERMEABILIDADE AO GÁS

Figura 1 - Avaliação das propriedades no concreto fresco. (a) (b) Abatimento de tronco de cone; (c) Determinação do teor de ar incorporado.....	48
Figura 2 - Corpos de prova durante ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade. (a) Superfície retificada; (b) Corpo de prova na prensa; (c) Corpos de prova após o rompimento.....	50
Figura 3 - Ensaio de permeabilidade à água sob pressão. (a) Adição de material selante entre o corpo de prova e as paredes da campânula;(b) Seixo colocado sobre o filtro, de modo a distribuir e orientar o fluxo de água e (c) Disposição geral dos permeômetros	51
Figura 4 - Amostras durante pré-condicionamento. (a) Câmara climática; (b) Redistribuição da umidade na estufa	53
Figura 5 - Diagrama esquemático do ensaio de permeabilidade ao gás	54
Figura 6 - Evolução da resistência à compressão em função da idade e tipo de concreto	55
Figura 7 - Evolução do módulo de elasticidade em função da idade e tipo de concreto	53

Figura 8 - Esquema demonstrativo do perfil de velocidade dos fluidos nas paredes dos poros	61
--	----

RECOMENDAÇÃO DE MÉTODO SIMPLIFICADO DE ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO GÁS

Figura 1 - Esquema da extração e impermeabilização das amostras	66
Figura 2 - Amostras de concreto em câmara climática.....	67
Figura 3 - Permeâmetro Cembureau, em que: (a) Suprimento de ar; (b) Regulador de pressão com manômetro; c) Célula de ensaio com corpo de prova; (d) Medidores de fluxo; (e) Cronômetro.....	68
Figura 4 - Célula de permeabilidade.....	69
Figura 5 - Formação da bolha de sabão	69

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo/ Sigla	Significado	Unidade de Medida
°C	Grau Celsius	-
M	Viscosidade dinâmica do gás a 20±2°C	Pa.s
Δm	Perda de massa necessária durante a pré-secagem	g
A	Seção transversal do corpo de prova	m ²
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	-
a/lig	Água /ligante	-
ANOVA	Análise de variância	-
CEB	<i>Comité Euro-internacional du Béton</i>	-
CV	Coefficiente de variação	%
DMC	Dimensão máxima característica	mm
FA/B	Cinza volante/ligante em inglês	-
g	Gramas	-
GL	Grau de liberdade	-
GPa	Gigapascal	-
h	Horas	-
K	Coefficiente de permeabilidade ao gás	m ²
kg	Quilograma	-
$K_{gás}/K_{água}$	Relação entre a permeabilidade ao gás e à água	-
K_i	Permeabilidade ao gás aparente	m ²
kN	Quilonewton	-

Símbolo/ Sigla	Significado	Unidade de Medida
L	Espessura do corpo de prova	m
m_o	Massa do corpo de prova ao final da cura	g
MC	Metacaulim impuro calcinado	-
m_d	Massa do corpo de prova seco	g
$m_{e,75}$	Massa do concreto no equilíbrio	g
MK	Metacaulim de alta reatividade	-
MPa	Megapascal	-
MQ	Média dos quadrados	-
NBR	Norma Brasileira	-
P_a	Pressão atmosférica absoluta	Bar
Pa	Pascal	-
pH	Potencial Hidrogeniônico	-
P_i	Pressão de gás	Bar
Q_i	Taxa de fluxo à pressão P_i (vazão de gás)	m^3/s
R^2	Coefficiente de Determinação	-
RIEM	Revista IBRACON de Estruturas e Materiais <i>Réunion Internationale des Laboratoires et</i>	-
RILEM	<i>Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages</i>	-
s	Segundos	-
SQ	Soma dos quadrados	-
SSS	Saturado com superfície seca	-
T	Tempo de redistribuição da umidade	dias
t_i	Tempo no qual a bolha percorreu o volume V_i	s
UR	Umidade relativa	%
V_i	Volume percorrido pela bolha no fluxômetro	mL
w/b	a/lig em inglês	-
w_e	Concentração da umidade evaporável	-
W_e	Quantidade total de água evaporável	g
$W_{e,75}$	Quantidade de água evaporável no equilíbrio	g
$w_{e,75}$	Concentração de umidade de equilíbrio	-

RESUMO

SANTOS, THAIS CARVALHO. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde - GO, março de 2019. **Otimização do método Cembureau de ensaio de permeabilidade ao gás para materiais cimentícios.** Orientadora: Dra. Anne Neiry de Mendonça Lopes. Coorientador: Dr. Michell Macedo Alves.

A permeabilidade dos fluidos no interior do concreto regula praticamente todos os mecanismos de deterioração do material e, por isso, consiste numa propriedade muito importante para a durabilidade das estruturas de concreto. O presente trabalho contextualiza-se na linha de pesquisa de tecnologia e ciência dos materiais, detendo-se principalmente ao parâmetro de permeabilidade ao gás do concreto. O método Cembureau é um método de ensaio de permeabilidade ao gás amplamente utilizado na literatura, no entanto consiste numa rotina trabalhosa que torna o ensaio moroso e pouco flexível. Logo, buscou-se definir um processo de pré-condicionamento e de ensaio simplificado, utilizando o método Cembureau como referência na comparação e validação dos resultados. O objetivo é contribuir com a popularização do parâmetro de permeabilidade ao gás e de um método de ensaio mais prático e viável, visando os inúmeros benefícios que podem ser gerados ao meio técnico e científico, incluindo a concepção de uma normativa nacional que proporcione prescrições quanto às etapas e condições para determinação de tal parâmetro. O programa experimental também envolveu ensaios de caracterização do concreto no estado fresco, bem como a determinação da absorção total e por capilaridade, permeabilidade à água, resistência à compressão e módulo de elasticidade. Para a elaboração do método de ensaio simplificado de permeabilidade ao gás, foram estabelecidas variações quanto ao processo de pré-condicionamento, ao tempo de redistribuição e à faixa de pressões utilizada durante o ensaio, para dois tipos de concreto. Por meio de análises estatísticas dos resultados, foram sugeridas simplificações referentes ao processo de pré-condicionamento (em câmara climática até a constância de massa) e ao tempo de redistribuição da umidade (de 14 para 7 dias). O procedimento simplificado ofereceu os melhores resultados em termos de precisão e variabilidade, quando comparado ao método Cembureau e, além disso, foi julgado como mais prático e flexível que o método de referência, sendo recomendado em sua substituição. Os resultados evidenciaram melhoria da qualidade do concreto com a redução da relação a/lig, tanto em relação às propriedades

de transporte de massa, quanto às propriedades mecânicas, ratificando os resultados da literatura técnica em geral. Os resultados mostraram que a permeabilidade à água e ao gás do concreto podem diferir significativamente e tratam-se de processos diferentes. Comparativamente, a utilização de gás no ensaio é de mais fácil e rápida execução e distinguiu melhor o desempenho relativo entre os dois concretos, sugerindo maior sensibilidade relativa ao ensaio. Finalmente, como principal contribuição para investigações futuras de materiais cimentícios, é feita a recomendação de um método simplificado de pré-condicionamento para ensaio de permeabilidade ao gás.

PAVAVRAS-CHAVES: Permeabilidade ao gás, durabilidade, concreto, Cembureau.

ABSTRACT

SANTOS, THAIS CARVALHO. Federal Institute Goiano – Campus Rio Verde – GO, March 2019. **Optimization of the Cembureau gas permeability test method of cementitious materials.** Advisor: DSc. Anne Neiry de Mendonça Lopes. Co-advisor: DSc. Michell Macedo Alves.

The fluids permeability inside the concrete regulates practically all the deterioration mechanisms of this material, being considered an important property about the durability of concrete structures. This study is contextualized in the research line of materials technology and science and deals mainly with the gas permeability of concrete. The Cembureau method is widely used in the literature for measuring this parameter, however it is a laborious routine that makes the test time consuming and not flexible. Therefore, we tried to define a simplified preconditioning and test procedure, using the Cembureau method as reference in the comparison and validation of the results. The objective of the study was to contribute to the popularization of the gas permeability parameter and to a more practical and sensitive test method than the water permeability test, targeting the numerous benefits that can be generated to technical and scientific community, including the origination of a national regulation that prescribes the steps and conditions for determination of gas permeability. The experimental program also involved characterization tests of the concrete in the fresh state, as well as the determination of the total absorption and by capillarity, water permeability, compressive strength and modulus of elasticity. For the development of the simplified procedure, variations were established regarding the preconditioning process, the redistribution time and the pressure range used during the test, for two types of concrete. By means of statistical analyzes of the results, simplifications were adopted regarding the preconditioning process (in climatic chamber until mass constancy) and the time of redistribution of humidity (from 14 to 7 days). The simplified procedure presented the best results of precision and variability when compared to the Cembureau method and, moreover, was judged to be more practical and flexible than the reference method and is recommended instead. The results evidenced an improvement in the quality of the concrete with the reduction of the water/binder ratio, both in relation to the mass transport properties and the mechanical properties, ratifying the results of the technical literature in general. The results showed that the permeability to water and gas to concrete can differ significantly and are different processes.

Comparatively, the use of gas in the test causes an easier and faster execution and better distinguishes the relative performance between the two concretes, suggesting a greater sensitivity regarding the test. Finally, as a main contribution of the study to future investigations of cementitious materials, a simplified method of gas permeability testing is recommended.

KEY WORDS: Gas permeability, durability, concrete, Cembureau.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

No meio técnico-científico há preocupação constante com a durabilidade do concreto armado e com a sua interação com o meio no qual a estrutura está inserida, com o objetivo de construir estruturas seguras e que atinjam ou superem a vida útil requerida. O presente trabalho contextualiza-se na linha de pesquisa de tecnologia e ciência dos materiais, detendo-se aos indicadores de durabilidade do concreto, especificamente, a permeabilidade ao gás. O estudo de tal parâmetro se justifica pelo contexto do Mestrado Profissional, visto que atua como forma de aperfeiçoamento de uma prática que pode beneficiar o meio científico, técnico e o mercado de trabalho, e ainda pela importância desse parâmetro frente à durabilidade do concreto, embora sua avaliação não seja tão popular no Brasil.

Segundo Baroghel-Bouny [1], os indicadores de durabilidade são parâmetros fundamentais para avaliação e previsão da durabilidade do material e da estrutura quanto à degradação. Estes parâmetros abrangem características relacionadas aos mecanismos de transporte de líquidos, gases e íons no interior do concreto, através de seus poros. A permeabilidade dos fluidos para o interior do concreto regula praticamente todos os mecanismos de deterioração desse material, sendo considerada uma propriedade de extrema importância para a durabilidade das estruturas de concreto armado, pois é por meio dessa que pode ocorrer a entrada de agentes agressivos e o início e progresso do fenômeno de corrosão do aço.

Os valores de permeabilidade dos concretos são relativamente baixos e, para facilitar a sua medida, existem diversos tipos de ensaios normalizados utilizando-se de fluidos de baixa viscosidade, como os gases, realizados em laboratório ou *in situ*, através de carga constante ou variável, cada qual com suas vantagens, desvantagens e

particularidades quanto aos equipamentos e tratamento dos dados [2]. No entanto, as normas brasileiras, relativamente desatualizadas em relação aos documentos internacionais, prescrevem somente a avaliação da permeabilidade do concreto à água e não há uma norma brasileira referente ao ensaio de permeabilidade ao gás, de forma a nortear pesquisas científicas e prestações de serviços.

Um dos métodos mais utilizados mundialmente para medição de permeabilidade ao gás é o método CEMBUREAU, normalizado pelo documento RILEM: TC 116-PCD [3] e utilizado como referência nesse estudo. Nesse método, previamente ao ensaio propriamente dito, as amostras de concreto devem ser submetidas a um processo moroso de pré-condicionamento para equilíbrio da umidade interna, com várias etapas inerentes ao processo. Dentro deste contexto e como forma de viabilizar o processo de ensaio para avaliação desse parâmetro, a presente pesquisa consiste no estudo de um método simplificado de pré-condicionamento e ensaio das amostras, visando sua validação por meio da comparação com o método de referência.

Dentro deste contexto, o estudo se baseia no parâmetro de permeabilidade ao gás do concreto visando contribuir com a medida desse importante indicador de durabilidade e os inúmeros benefícios que podem ser gerados a partir da determinação e validação de um pré-condicionamento mais viável e que leve, ainda, aos resultados precisos. Dessa forma, podem contribuir na concepção de uma normativa brasileira que proporcione ao meio técnico e científico prescrições quanto às etapas e condições para a determinação da permeabilidade ao gás de concretos, produto cuja verificação da qualidade, eficiência e segurança é fundamental. Sendo assim, o estudo atua como forma de enfatizar estudos e técnicas voltados para aplicação não somente no meio acadêmico e científico, mas também no mercado, visto que constitui uma oportunidade de interação entre pesquisa e demanda no meio profissional e, conseqüentemente, de eventuais modificações positivas no ambiente produtivo e otimização de um processo de ensaio importante na avaliação da durabilidade de concretos.

1.2 Processo experimental

O presente estudo foi elaborado com o intuito de verificar a eficiência da reprodução do método Cembureau de ensaio de permeabilidade ao gás, por meio de um método simplificado de pré-condicionamento desenvolvido para estudo. De modo a obter o alcance dos objetivos propostos, além do ensaio de permeabilidade ao gás, estabelecido como principal, foram executados ensaios complementares de forma a colaborar com as

análises, tais como resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, absorção capilar d'água, absorção de água por imersão e permeabilidade à água. Trata-se de uma pesquisa experimental, em que se buscou a correlação e interpretação dos resultados com maior confiabilidade, aplicando-se métodos estatísticos de avaliação dos dados coletados.

Para execução do estudo foi realizada uma pesquisa bibliográfica, em que foi feito um mapeamento sistemático da literatura visando um estado da arte de relevância sobre a permeabilidade ao gás. Além disso, a quantidade de variáveis e propriedades estudadas e a conseqüente complexidade do programa experimental faz com que seja inviável a realização de todos os ensaios simultaneamente, tornando necessária uma etapa de planejamento de ensaios muito bem definida de forma a garantir resultados consistentes.

Para evitar o acúmulo de procedimentos e o congestionamento dos equipamentos, a moldagem dos concretos foi dividida em duas partes. Na primeira moldagem, foram moldados os corpos de prova destinados à metade das condições estudadas quanto a permeabilidade ao gás, mais aqueles necessários para a execução dos ensaios complementares. Os corpos de prova moldados em segunda etapa complementam o número de amostras necessárias para atender a outra metade das condições estudadas no ensaio permeabilidade ao gás.

Apesar de utilizados corpos de prova de moldagens distintas, além de serem mantidas fixas condições como materiais, equipe e condições de moldagem e cura, tomou-se um cuidado especial para que os ensaios fossem realizados na mesma idade (o que coloca as amostras de concreto em igual condição de análise). Ademais, foi realizada uma análise estatística com os resultados de permeabilidade ao gás de amostras de concreto das duas moldagens, para uma das condições de pré-condicionamento, verificando que não houve diferença significativa entre elas (Apêndice A).

O programa experimental foi conduzido em Aparecida de Goiânia-GO, nos Laboratórios do Centro Tecnológico de Engenharia Civil da empresa Eletrobrás Furnas e está inserido nas atividades de pesquisa do Projeto P&D ANEEL intitulado "Metodologias e infraestrutura tecnológica para aperfeiçoamento das avaliações de confiabilidade e otimização de empreendimentos de energia" sob código ANEEL 0394-1504/2015. O referido projeto visa estudar os parâmetros de comportamento de estruturas civis de empreendimentos de geração de energia (Usinas Hidrelétricas e Parques Eólicos), com o intuito de subsidiar a prospecção de projetos e planos de manutenção.

1.3 Mecanismos de transporte de massa em concretos

De uma forma geral, a durabilidade dos concretos está relacionada diretamente com os mecanismos de transporte de fluidos dentro do material, pois todos os possíveis mecanismos de deterioração que podem afetar as estruturas de concreto envolvem processos de transporte gasosos ou líquidos. A dinâmica do transporte de massa é determinada essencialmente pela interação entre o fluido percolante e a estrutura porosa propriamente dita, mas a força motriz que impulsiona o fluxo de massa é diferente em cada caso, caracterizando os distintos tipos de fenômenos de transportes existentes.

Podem ocorrer basicamente três fenômenos distintos referentes ao deslocamento de fluidos [4]: difusão (deslocamento por diferença de concentração), capilaridade (resultado de movimentos capilares nos poros do concreto abertos ao meio) e permeabilidade (escoamento sob diferencial de pressão). A permeabilidade é definida como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior e através de um sólido poroso, impulsionada por um gradiente de pressão entre o material e meio. A difusão é um fenômeno de transporte de massa em nível molecular, individual e aleatório, impulsionado pela ocorrência de um gradiente de concentração e pela tendência de equalização entre dois meios [5]. Já a absorção por capilaridade é um fenômeno motivado por tensões capilares dependente da porosidade aberta e das características do fluido, mas sobretudo do diâmetro dos poros, apresentando forças de sucção capilar quanto menores forem os diâmetros dos capilares [6].

De forma geral, os fluidos percolantes podem ser classificados como gases ou líquidos e diversos equipamentos e métodos de ensaio estão disponíveis para avaliações da permeabilidade do concreto. Há muitas décadas o estudo da permeabilidade à água tem sido alvo de grande interesse para a quantificação e previsão de processos de transporte de umidade no concreto, por exemplo, no caso de estruturas submersas ou de barramento, como as barragens. No mesmo sentido, a permeabilidade ao gás pode ser representada em estruturas de concreto expostas na atmosfera, as quais devem ter uma baixa permeabilidade, de modo a evitar a carbonatação resultante da penetração do gás carbônico no seu interior. Outro exemplo é o das estruturas que confinam rejeitos radioativos e, portanto, requerem menor permeabilidade ao gás de modo a reduzir o risco de emissão de radiação. No entanto, o interesse no estudo da permeabilidade deixou de ser somente relativo à ocorrência prática do fenômeno propriamente dito e passou a ter mais relevância por fornecer indicativo da qualidade do concreto e se tratar de um parâmetro representativo em relação à durabilidade de um modo geral [7].

Pesquisas verificaram a diferença entre os valores de permeabilidade à água e ao gás quando considerada a influência do teor umidade do material. Um exemplo pode ser verificado na Figura 1, referente ao estudo de Kameche et al. [8]. Verificou-se que a permeabilidade ao gás do concreto diminui quando a saturação do concreto aumenta por causa da continuidade entre as moléculas de água, o que impede a passagem do gás. Uma tendência contrária é observada na permeabilidade à água, que é dificultada pelas bolhas de ar quando o concreto está parcialmente saturado e apresenta valores maiores de permeabilidade quanto maior o grau de saturação da rede porosa do material. Portanto, os parâmetros de permeabilidade ao gás e à água exibem comportamento diferentes quando é levada em conta a dependência da umidade.

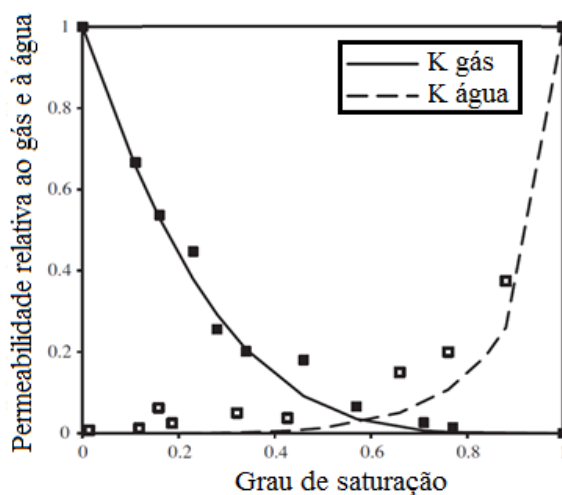


Figura 1. Permeabilidade relativa ao gás e à água de concretos em função do grau de saturação dos poros. Fonte: Adaptado de Kameche et al. [8].

Diversos autores apontam diferenças entre os parâmetros e favorecem a permeabilidade ao gás como mais atrativa na avaliação das propriedades de transporte de materiais cimentícios. Uma justificativa é o fato de que medições precisas da permeabilidade à água tornam-se lentas e mais difíceis de serem obtidas à medida que a qualidade do concreto melhora, em contraste com o ensaio de permeabilidade ao gás que, além de mais fácil de se executar e de natureza praticamente não destrutiva, requer menos tempo de ensaio e produz resultados mais reprodutíveis [9]. Abbas, Carcasses e Ollivier [10] recomendam a permeabilidade ao gás na análise das propriedades de transporte pela rapidez e facilidade de ensaio, mas também por simular de forma mais adequada o desempenho do concreto frente a alguns mecanismos de deterioração, como a carbonatação.

Diversos pesquisadores tentaram correlacionar a permeabilidade ao gás à permeabilidade à água do concreto, mas foi atestado que tal correlação não é trivial para materiais cimentícios por se tratarem de fenômenos com comportamentos diferentes, pelos processos de interação entre a água e a matriz, quando é utilizada a água como fluido. Tem-se que a estrutura dos materiais cimentícios pode mudar e vários processos físico-químicos podem ocorrer durante o ensaio de permeabilidade à água, em razão da alta reatividade da matriz sólida à água [1] [9]. Por esse motivo, fenômenos como hidratação adicional em idade precoce [11], hidratação contínua [12], auto cicatrização das fissuras [12] [13] [14] ou lixiviação, podem ocorrer em tais ensaios com longa duração. Além disso, o fenômeno de deslizamento de gás foi identificado como a principal explicação para as diferenças significativas registradas entre os coeficientes de permeabilidade à água e ao gás de concretos, mesmo quando expressos em termos de coeficiente intrínseco (que representa a permeabilidade independente do fluido percolante e representante somente da estrutura porosa).

Segundo a teoria do deslizamento de gás [15], os gases possuem velocidades finitas (maiores que zero) nas paredes dos poros, enquanto os líquidos possuem velocidades nulas devido ao atrito. Isso quer dizer que os dois fluxos causam diferentes resistências nas paredes dos poros e, conseqüentemente, o perfil de velocidade do escoamento de líquidos é diferente do perfil de velocidade do escoamento de gases num mesmo sistema de poros, em condições análogas. A resistência ao fluxo é maior quanto maior for a concentração de moléculas (caso de um líquido). Logo, devido ao fenômeno de deslizamento do gás nas paredes do meio poroso, valores maiores de coeficiente de permeabilidade intrínseco são obtidos quando os gases são utilizados como fluido.

Em um estudo da permeabilidade utilizando água e nitrogênio [16], a permeabilidade ao gás foi significativamente superior à permeabilidade à água, para todos os tipos de concreto avaliados, aumentando a diferença à medida que permeabilidade do concreto diminuía. Para o concreto mais permeável, a diferença entre os parâmetros foi de 5,6 vezes, enquanto para o menos permeável a diferença foi de cerca de 78,5 vezes. O efeito do deslizamento de gás foi usado como justificativa da diferença considerável entre os coeficientes de permeabilidade obtidos e o conceito de permeabilidade intrínseca foi vista como não relevante em materiais cimentícios (exceto para aqueles altamente permeáveis).

Considerando as dificuldades supracitadas em relação ao parâmetro de permeabilidade à água, como a interação com a estrutura porosa e a dificuldade de medida

quando em materiais pouco permeáveis, como os materiais cimentícios, e levando-se em conta, ainda, a disseminação escassa em nível nacional do ensaio de permeabilidade ao gás, esse último foi tomado como parâmetro de destaque e estudo nesse trabalho.

1.3.1 Permeabilidade ao gás

Estão disponíveis diversos métodos para determinação da permeabilidade ao gás de materiais porosos, cada um com suas vantagens e desvantagens de aplicação e particularidades quanto a equipamento, fluido percolante e tratamento dos dados. Um dos métodos de ensaio em laboratório mais consagrados na literatura é o método Cembureau, proposto pelo *Cembureau Committee*, um comitê organizado pela RILEM em 1981 com o objetivo de desenvolver um método adequado para medidas de permeabilidade em concretos. A União Internacional de Laboratórios e Peritos em Materiais de Construção, Sistemas e Estruturas (ou RILEM, sigla do nome em francês), nas recomendações do TC 116-PCD [3], especifica o pré-condicionamento das amostras, bem como o método de ensaio para medição da permeabilidade ao gás.

O método Cembureau consiste basicamente na aplicação de uma determinada pressão de gás, em regime permanente, em uma das faces de um corpo de prova do material cimentício poroso, com a consequente determinação da sua vazão de saída. O ensaio é feito com corpos de prova à umidade de $75\pm 2\%$ e temperatura $20\pm 2^\circ\text{C}$, por ser a condição mais próxima das condições de serviço das estruturas de concreto. O ensaio, que utiliza o permeâmetro Cembureau, desenvolvido por Lawrence [17] e Kollek [18], destina-se a ser adequado para concretos de composição normal, com quantidade de cimento na faixa de 200 a 450 kg/m^3 , com coeficiente de permeabilidade específico K na faixa de 10^{-14} a 10^{-19} m^2 .

Inúmeros estudos quanto à permeabilidade de materiais cimentícios têm sido realizados ao longo dos anos. São mencionadas a seguir algumas contribuições mais recentes e relevantes para o estudo de concretos.

1.3.1.1 Fatores influentes

A importância de um *teor de umidade* adequado e da etapa de *redistribuição da umidade* na avaliação da permeabilidade ao gás foi atestada por Yang et al. [19]. As Figuras 2 e 3 mostram como os gradientes de umidade são efetivamente removidos após a redistribuição de umidade por 2 (duas) semanas. Além disso, verificou-se que 3 (três) semanas de secagem (em estufa a 50°C com UR de 35%) foram suficientes para eliminar

os efeitos da umidade sobre a permeabilidade ao gás dos concretos de alto desempenho, deixando as amostras com UR entre 40 e 60%.

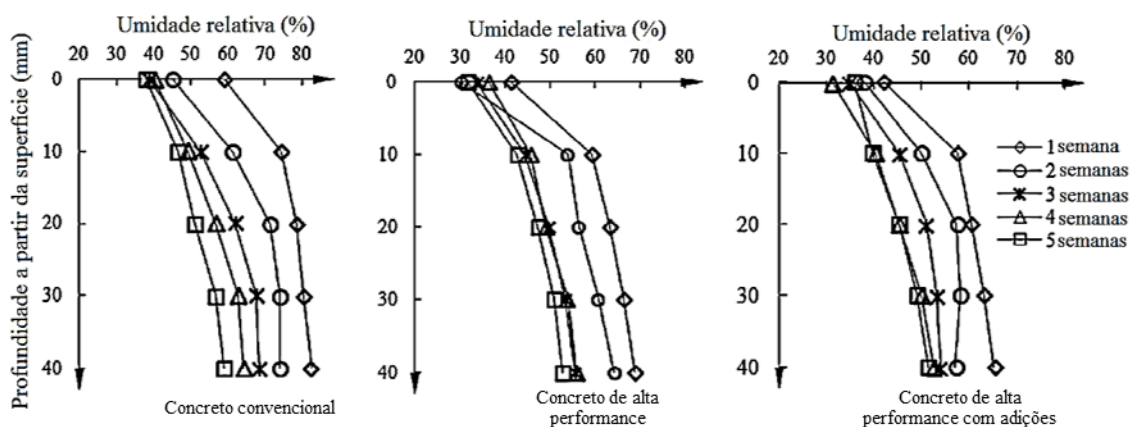


Figura 2. Umidade relativa em diferentes profundidades e após diferentes períodos de secagem. Fonte: Adaptado de Yang et al. [19].

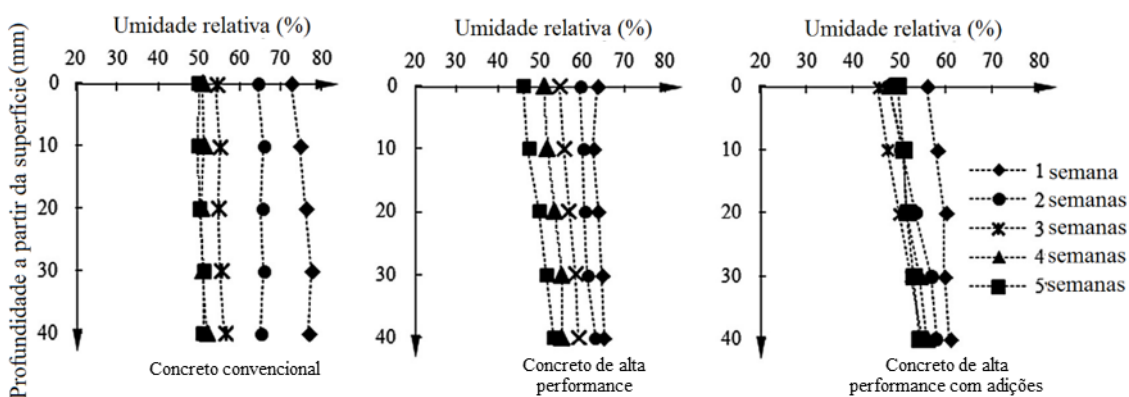


Figura 3. Umidade relativa em diferentes profundidades, após diferentes períodos de secagem e redistribuição de umidade por duas semanas. Fonte: Adaptado de Yang et al. [19].

Este estudo tinha como objetivo principal, além da influência da secagem e da etapa de redistribuição da umidade, investigar a sensibilidade do método de ensaio Autoclam na avaliação *in situ* de concretos de alto desempenho e na identificação dos níveis relativos de desempenho. No método Autoclam é feito o monitoramento da queda de pressão ao longo de um intervalo de tempo após a aplicação de uma pressão na superfície do material, diferente do método Cembureau que é caracterizado pela pressão constante (fluxo estacionário). Os resultados do estudo sugerem que, embora adequado na análise de concretos convencionais, o método Autoclam não é suficientemente sensível para quantificar e distinguir o desempenho relativo ao concreto de alto desempenho, em virtude da sua baixíssima permeabilidade, logo demanda melhorias.

Após tal constatação, buscou-se a melhoria do método Autoclam quanto à sensibilidade na medição da permeabilidade de concretos de alto desempenho por meio do estudo de duas modificações relativas ao método [20]. Uma modificação foi considerar uma área de ensaio maior e a outra consistiu na redução do volume de ar comprimido aplicado à área avaliada. A confiabilidade das modificações propostas foi investigada por meio da comparação com o método Cembureau. O método modificado com um volume reduzido de ar comprimido teve fortes correlações com o método Cembureau e foi recomendado como um método com forte potencial na avaliação *in situ* da permeabilidade ao gás de concretos de alto desempenho. Esse estudo demonstra a confiabilidade do método Cembureau e a sua relevância no meio científico, tendo em vista a sua sensibilidade na avaliação da permeabilidade e a sua utilização como referência na comparação e validação de outros métodos de ensaio.

Diversos autores verificaram como o uso de *adições minerais* no concreto podem influenciar na acessibilidade ao transporte de gás [21] [22] [23]. Heede, Gruyaert e Belie [24] estudaram concretos com alto volume de cinzas volantes devido aos benefícios econômico e ambiental do seu uso em substituição parcial ao cimento. O objetivo do estudo foi avaliar o desempenho do concreto para uso em ambiente exposto à carbonatação, no entanto, como a avaliação da resistência à corrosão induzida por carbonatação, geralmente, envolve expor o material ao CO₂, por um tempo, uma abordagem com interesse prático foi adotada na pesquisa e foram avaliados os parâmetros que regem o processo de carbonatação em vez do próprio processo. Logo, avaliou-se a suscetibilidade do material ao transporte de água e de gás utilizando métodos de ensaio representativos que estimem mais rapidamente o desempenho do concreto, como a absorção de água capilar, a absorção de água sob vácuo e a permeabilidade ao gás.

Diferentes quantidades de cinzas volantes foram utilizadas em substituição ao cimento (0%, 35%, 50% e 67%) e a maioria dos traços foram menos acessíveis à água e ao gás. A mistura com teor de ligante de 400 kg/m³, relação água/ligante de 0,4 e 50% de cinzas volantes em substituição ao cimento teve o melhor desempenho frente às propriedades estudadas, apresentando permeabilidade ao gás consideravelmente menor em relação ao concreto de referência (cerca de 78%), tanto aos 28 como aos 91 dias.

Gesoğlu *et al.* [25] estudaram a permeabilidade ao gás de concretos contendo metacaulim de alta reatividade (MK) e metacaulim impuro calcinado (MC). Na formulação dos concretos (relação a/lig = 0,40) o cimento foi substituído em 5%, 10%, 15% e 20% pelas duas adições. Os autores executaram o ensaio de permeabilidade ao gás

pelo método Cembureau ao final de 28 e 90 dias de cura das amostras secas em estufa a 105°C até a constância de massa, considerando precisão de 1%. Os resultados mostraram que todos os concretos com adição de MK e MC apresentaram permeabilidades menores que os concretos sem adições incorporadas, independentemente do teor de adição. Nesse estudo, também foi analisada a influência das *pressões de gás utilizadas* durante o ensaio.

Em geral, a permeabilidade aparente ao gás decresce com o incremento da pressão de entrada. Isso ocorre em virtude da queda de pressão ocasionada pela turbulência das moléculas [26]. Na prática, o escoamento no interior dos poros dos materiais cimentícios não ocorre de forma paralela aos poros capilares responsáveis pelo fluxo (escoamento laminar). Com o aumento da pressão de entrada e da velocidade, ocorre a tendência de aleatoriedade no movimento das moléculas do fluido percolante (escoamento molecular), que colidem com maior frequência entre si e com as paredes dos poros.

Conforme exposto na Figura 4, foram utilizadas pressões variando de 1,5 a 5,0 bar e verificou-se que o coeficiente de permeabilidade ao gás do concreto diminui na faixa de pressão de 1,5 para 3,0 bar e permanece estável até 3,5 bar, seguido pelo aumento do valor até 5,0 bar.

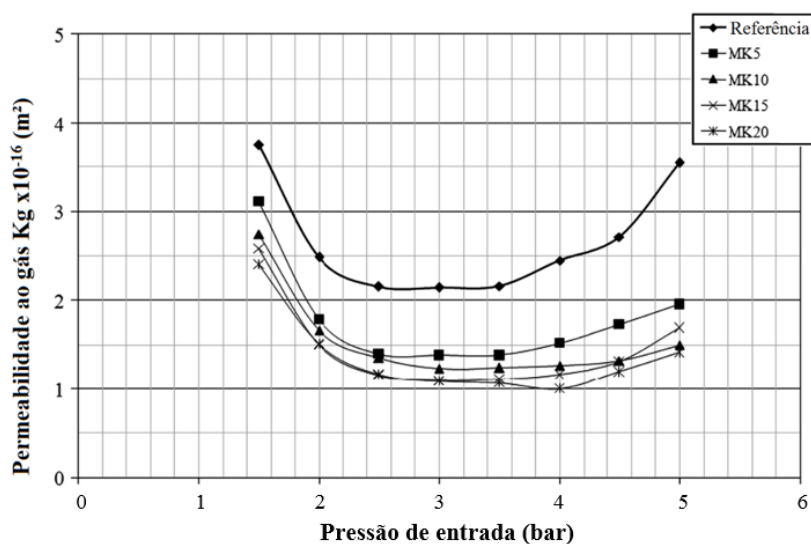


Figura 4. Permeabilidade ao gás aos 28 dias dos concretos com diferentes teores de metacaulim de alta reatividade. Fonte: Adaptado de Gesoğlu et al. [25].

Uma tendência semelhante foi observada em outro estudo Güneyisi et al. [22], em que a permeabilidade diminuiu conforme incremento de pressão até 3,5 bar, mas aumentou após a pressão de entrada de 3,5 bar. Tais resultados sugerem que a utilização de pressões a partir de 3,5 bar pode causar alterações na estrutura porosa do material ou

até nas propriedades de escoamento para pressões de gás mais elevadas e, portanto, não são recomendadas. Kollek [18], por exemplo, dentre as várias recomendações quanto à determinação da permeabilidade ao oxigênio pelo método Cembureau, salienta a importância da utilização de uma taxa de fluxo razoavelmente grande para se adequar à instrumentação simples, mas recomenda níveis de pressão entre 0,5 a 2,5 bar, apesar de pressões de baixa magnitude já serem significativas no estudo de concretos.

Além dos resultados supramencionados, pode ser observado na Figura 5 a influência da *relação água/ligante* na permeabilidade ao gás dos concretos. Por exemplo, para aqueles com mesmo teor de cinzas volantes (FA/B igual a 0% e 50%), os resultados de permeabilidade foram menores conforme redução da relação água/ligante (W/B) de 0,5 para 0,4. Isso acontece por causa da diminuição na porosidade total e na conectividade dos poros decorrente da redução da relação a/lig. Além disso, a mudança do *tempo de cura* e da *idade do concreto* (de 28 para 91 dias) também influenciou nos valores de permeabilidade. De uma forma geral, tem-se que quanto maior o teor de água no traço e quanto menor o grau de hidratação do concreto, maior será a porosidade do concreto, influenciando na permeabilidade.

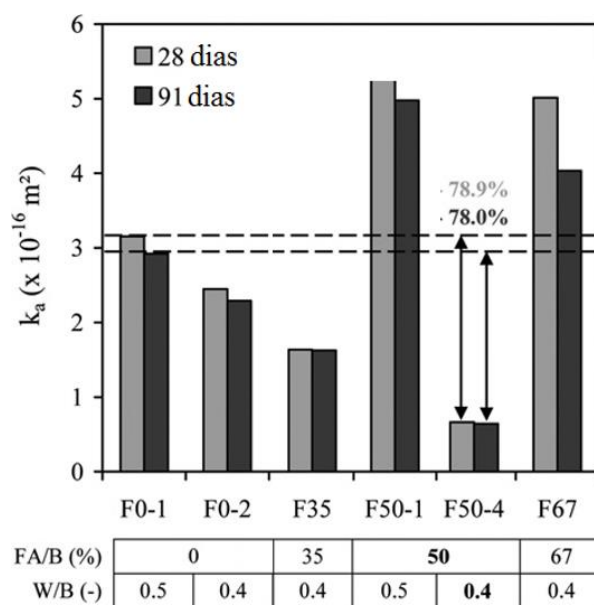


Figura 5. Influência do tipo de concreto na permeabilidade ao gás. Fonte: Adaptado de Heede, Gruyaert e Belie [24].

Medina et al. [27] estudaram o efeito da substituição parcial (20% e 25%) do *agregado* graúdo natural por resíduos de lixo cerâmico sobre a permeabilidade ao gás do concreto estrutural. A permeabilidade ao oxigênio conforme método Cembureau atestou

que a inclusão do agregado cerâmico de cerâmica sanitária reciclada modificou a distribuição do tamanho dos poros, aumentando o volume de poros capilares e reduzindo o volume de macroporos. Apesar disso, os concretos com agregados reciclados apresentaram melhor comportamento mecânico do que o concreto de referência e a permeabilidade ao O₂ e ao CO₂ foram semelhantes. Logo, a porosidade maior do concreto com resíduo reciclado não prejudicou o desempenho quanto a permeabilidade ao gás e a substituição do agregado graúdo natural por resíduos de cerâmica sanitária foi vista como promissora.

A relevância do parâmetro de permeabilidade ao gás é demonstrada no estudo de Kubissa e Glinicki [28] em que se avaliou o desempenho de concretos de proteção contra a radiação em estruturas de blindagem. Foi investigada a influência da utilização de *agregados* especiais na permeabilidade do concreto (barita, magnetita, serpentina e anfíbolito), bem como da umidade relativa interna do concreto, após dois métodos diferentes de secagem e utilizando o método Autoclam. A menor permeabilidade ao gás foi relativa ao concreto com magnetita, enquanto a maior foi daquele com serpentina.

Além disso, foi confirmada a forte influência do teor de umidade dos poros do concreto no transporte de gás, bem como da sua distribuição ao longo da estrutura porosa. A secagem a 65°C até uma UR abaixo de 65%, somada a etapa de redistribuição, foi eficaz no alcance de uma distribuição uniforme da umidade e importante para a obtenção de resultados mais precisos, com coeficientes de variação (CV) entre 13,1% e 20,7%. No processo de secagem a 105°C, a dispersão dos resultados foi maior (CV de 12,3% a 31,6%), demonstrando que altas temperaturas podem acarretar danos que influenciam na permeabilidade ao gás, como microfissuras e alterações na microestrutura do concreto, como o início da decomposição da etringita e a liberação da água fisicamente adsorvida no material.

Outros estudos também atestaram a influência da *temperatura de secagem das amostras* sobre a permeabilidade ao gás e a importância de uma temperatura de exposição que não degrade o material e, conseqüentemente, modifique as propriedades de transporte [8] [20] [29].

Em resumo, os estudos supracitados mostraram como a permeabilidade pode ser relevante na avaliação da durabilidade de concretos e na avaliação indireta de outros parâmetros, como a carbonatação. Foi visto como esse parâmetro pode sofrer influência da relação a/lig do concreto, do uso de adições, do tipo de agregado e da idade do concreto. Além disso, fatores como o teor de umidade, distribuição dessa umidade ao

longo material e a temperatura utilizada na secagem das amostras podem influenciar nos resultados e, portanto, uma atenção especial deve ser dada ao processo de pré-condicionamento das amostras.

1.4 Referências bibliográficas

- [1] BAROGHEL-BOUNY, V. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part II: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction. *Cement And Concrete Research*, v. 37, n. 3, p. 438-454, 2007.
- [2] OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte; Trad. CASCUDO, O.; CARASEK, H., In: OLLIVIER, J-P; VICHOT, A. Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [3] Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages - RILEM. TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. (RILEM Recommendation TC 116-PCD). *Materials and Structures*, v. 32, p. 174-179, 1999.
- [4] NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2ª ed. rev. atual., São Paulo: Pini, 1997. 828p. Tradução: Salvador E. Giammusso.
- [5] CALLISTER JR., WILLIAM D. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. 5ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- [6] CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras de concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo: Pini; Goiânia, GO: Editora UFG, 1997. 237p.
- [7] ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement And Concrete Composites*, v. 25, n. 2, p. 223-232, 2003.
- [8] KAMECHE, Z. A.; GHOMARI, F.; CHOINSKA, M.; KHELIDJ, A. Assessment of liquid water and gas permeabilities of partially saturated ordinary concrete. *Construction And Building Materials*, v. 65, p. 551-565, 2014.
- [9] VILLANI, C.; LOSER, R.; WEST, M. J.; DI BELLA, C.; LURA, P.; WEISS, W. J. An inter lab comparison of gas transport testing procedures: Oxygen permeability and oxygen diffusivity. *Cement And Concrete Composites*, v. 53, p. 357-366, 2014.
- [10] ABBAS, A.; CARCASSES, M.; OLLIVIER, JP. Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation. *Materials And Structures*, v. 32, n. 1, p. 3-8, 1999.
- [11] HALL, C. Barrier performance of concrete: A review of fluid transport theory. *Materials And Structures*, v. 27, n. 5, p. 291-306, 1994.
- [12] HEARN, N. Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference? *Materials and Structures*, v. 31, p. 563-567, 1998.
- [13] EDVARDESEN, C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Mater*, v. 96, p. 448-454, 1999.
- [14] HEARN, N.; DETWILER, R. J.; SFRAMELI, C. Water permeability and microstructure of three old concretes. *Cement And Concrete Research*, v. 24, n. 4, p. 633-640, 1994.
- [15] KLINKENBERG, L. J. The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases, in *Drilling and Production Practice*. New York: American Petroleum Institute, 1941, p. 200-213.

- [16] BAMFORTH, P. B. The relationship between permeability coefficients for concrete obtained using liquid and gas. Magazine of Concrete Research, v. 39, n. 138, p. 3-11, 1987.
- [17] LAWRENCE, C. D. Measurements of permeability. In: International Congress of the Chemistry of Cement, 8th, Rio de Janeiro, 1996. Anais... Rio de Janeiro, 1986, p. 29-40.
- [18] KOLLEK, J. J. The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau Method – a recommendation. Revista Materials and Structures, Paris: RILEM, v. 22, p. 335-230, 1989.
- [19] YANG, K.; BASHEER, P.A.M.; MAGEE, B.; BAI, Y. Investigation of moisture condition and Autoclam sensitivity on air permeability measurements for both normal concrete and high performance concrete. Construction And Building Materials, v. 48, p. 306-314, 2013.
- [20] YANG, K.; BASHEER, P.A.M.; BAI, Y.; MAGEE B.J.; LONG, A.E. Development of a new in situ test method to measure the air permeability of high performance concretes. Ndt & e International, v. 64, p. 30-40, 2014.
- [21] DELLINGHAUSEN, L.M.; GASTALDINI, A.L.G.; VANZIN, F.J.; VEIGA, K.K. Total shrinkage, oxygen permeability, and chloride ion penetration in concrete made with white Portland cement and blast-furnace slag. Construction And Building Materials, v. 37, p. 652-659, 2012.
- [22] GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; KARAOĞLU, S.; MERMERDAŞ, K. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. Construction And Building Materials, v. 34, p. 120-130, 2012.
- [23] ATMACA, N.; ABBAS, M. L.; ATMACA, A. Effects of nano-silica on the gas permeability, durability and mechanical properties of high-strength lightweight concrete. Construction And Building Materials, v. 147, p. 17-26, 2017.
- [24] HEEDE, P. V. D.; GRUYAERT, E.; BELIE, N. Transport properties of high-volume fly ash concrete: Capillary water sorption, water sorption under vacuum and gas permeability. Cement And Concrete Composites, v. 32, n. 10, p. 749-756, 2010.
- [25] GESOĞLU, M.; GÜNEYISI, E.; ÖZTURAN, T.; MERMERDAŞ, K. Permeability properties of concretes with high reactivity metakaolin and calcined impure kaolin. Materials And Structures, v. 47, n. 4, p. 709-728, 2013.
- [26] PEREIRA, V. M. Permeabilidade ao ar do concreto. 2011. 136 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP.
- [27] MEDINA, C.; FRÍAS, M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I.; THOMAS, C.; POLANCO, J.A. Gas permeability in concrete containing recycled ceramic sanitary ware aggregate. Construction And Building Materials, v. 37, p. 597-605, 2012.
- [28] KUBISSA, W.; GLINICKI, M. A. Influence of internal relative humidity and mix design of radiation shielding concrete on air permeability index. Construction And Building Materials, v. 147, p. 352-361, 2017.
- [29] GUI, Q.; QIN, M.; LI, K. Gas permeability and electrical conductivity of structural concretes: Impact of pore structure and pore saturation. Cement And Concrete Research, v. 89, p. 109-119, 2016.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral da pesquisa é desenvolver variações do método Cembureau de ensaio de permeabilidade ao gás, prescrito pelo TC 116-PCD da RILEM (1999), para concretos com duas classes de resistência, com o fim de propor um método de ensaio simplificado.

2.2 Específicos

- Investigar a influência da manipulação de alguns fatores, como o processo de pré-condicionamento das amostras, o tempo de redistribuição de umidade e a faixa de pressões de gás utilizadas, sobre a permeabilidade ao gás de concretos e propor simplificações;
- Comparar os resultados de permeabilidade ao gás decorrente das simplificações admitidas no estudo com os resultados obtidos pelo método Cembureau (referência), visando a possível validação do método simplificado em estudo;
- Avaliar a permeabilidade à água, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, absorção por imersão total e absorção por capilaridade dos concretos estudados; e
- Analisar comparativamente os parâmetros de permeabilidade ao gás e permeabilidade à água.

3. CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a Revista IBRACON de Estruturas e Materiais - RIEM)

OTIMIZAÇÃO DO MÉTODO CEMBUREAU DE ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO GÁS PARA CONCRETOS: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL E ESTATÍSTICA

OPTIMIZATION OF THE CEMBUREAU GAS PERMEABILITY TEST METHOD OF CONCRETES: AN EXPERIMENTAL AND STATISTICAL APPROACH

Resumo

A permeabilidade dos fluidos no interior do concreto regula praticamente todos os mecanismos de deterioração do material, sendo considerada uma propriedade muito importante para a durabilidade das estruturas de concreto. Dentro deste contexto, o estudo se baseia, especificamente, na permeabilidade ao gás, visando contribuir com a medida desse parâmetro e fornecer diretrizes para pesquisas futuras. O método Cembureau é um método amplamente utilizado na literatura para medição da permeabilidade ao gás de concretos, no entanto, consiste numa rotina trabalhosa que torna o ensaio moroso e pouco flexível. Logo, buscou-se definir um processo de pré-condicionamento e de ensaio simplificado, utilizando o método Cembureau como referência na comparação e validação dos resultados. Para tal, foram estabelecidas variações quanto ao processo de pré-condicionamento, ao tempo de redistribuição e à faixa de pressões utilizada durante o ensaio, para duas classes de resistência de concreto. O pré-condicionamento em estufa e câmara úmida foram desaconselhados. O procedimento simplificado CC50%, com secagem em câmara climática a 50°C e umidade relativa de 50%, com tempo de equalização da umidade igual a 7 dias e pressões durante o ensaio de 1,5 bar, 2,0 bar e

3,0 bar, ofereceu os melhores resultados, em termos de precisão e variabilidade, quando comparado ao método Cembureau. Além disso, o procedimento foi julgado como mais prático e flexível que o método de referência, sendo recomendado em sua substituição.

Abstract

The fluids permeability inside the concrete regulates practically all the deterioration mechanisms of this material, being considered the most important property about the durability of concrete structures. In this context this study is specifically based on the gas permeability in order to contribute to the measurement of this indicator of durability and provide guidance for future research. The Cembureau method is a widely used method in the literature for measuring the gas permeability of concrete, however it is a laborious routine that makes the test time prolonged and not flexible. Therefore, we sought to define a simplified procedure for preconditioning and test method using the Cembureau as a reference in the comparison and validation of results. For this, variations were established regarding the preconditioning process, the redistribution time and the pressure range used during the test, for two types of concrete. The impact of moisture content on gas transfer and pre-conditioning in a stove or moist chamber was noted as inadequate. The simplified procedure called CC50%, with drying in a climatic chamber at 50°C and relative humidity of 50%, with moisture equalization time equal to 7 days and pressures during the test of 1.5 bar, 2.0 bar and 3.0 bar, gave the best results of precision and variability when compared to the Cembureau method. In addition, the procedure was judged to be more practical and flexible than the reference method and is recommended instead.

Palavras-chave: *Permeabilidade ao gás, durabilidade, microestrutura, concreto, Cembureau.*

Key words: *Gas permeability, durability, microstructure, concrete, Cembureau.*

3.1 Introdução

A permeabilidade é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior e através de um sólido poroso e, portanto, está diretamente ligada à suscetibilidade do concreto ao transporte de diversos agentes de degradação [1]. Além disso, como está relacionada com as características da estrutura porosa do material, bem como ao tipo de fluido percolante, a avaliação de tal propriedade pode prover indicativo do estado de conformação das partículas e das condições microestruturais do concreto,

podendo acusar a ocorrência de fissuras, descontinuidades, reações, deteriorações, entre outras alterações no material [2] [3] [4]. Logo, atesta-se a sua relevância visto que está relacionada à durabilidade e potencial de degradação do material ao longo da sua vida útil e, ainda, devido ao seu potencial na avaliação da qualidade e de danos ao concreto.

Dada a crescente evolução no desempenho de concretos e suas permeabilidades cada vez menores, fazem-se necessários métodos sensíveis o suficiente para detectar com precisão o desempenho relativo desse produto e, nesse caso, a permeabilidade ao gás é considerada um parâmetro eficiente. Diversos autores criticam o uso da água como fluido percolante, pois o próprio fluido pode interagir com o concreto e modificar a estrutura porosa, enquanto o oxigênio, por exemplo, tem interação físico-química desprezível com materiais cimentícios [5] [6] [7]. Além disso, muitos favoreceram o uso da permeabilidade ao gás na avaliação de materiais cimentícios pela sua simplicidade, menor duração de ensaio e em virtude da dificuldade da medida de permeabilidade à água em materiais de baixíssima permeabilidade, decorrente da maior viscosidade do fluido e tamanho de molécula [8] [9] [10].

A *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages* (RILEM), nas recomendações do TC 116-PCD [11], especifica o preparo das amostras e o procedimento de medição da permeabilidade ao gás referente ao método Cembureau, um dos mais utilizados mundialmente. O método consiste na medição do fluxo de gás gerado por um gradiente de pressão e é indicado para o estudo de concretos com composição na faixa de 200 a 450 kg/m³ de cimento, com coeficientes de permeabilidade ao gás na faixa de 10⁻¹⁴ a 10⁻¹⁹ m² [5]. Nas suas prescrições, as amostras de concreto passam por várias etapas antecedentemente ao ensaio, resultando numa rotina de ensaio trabalhosa e pouco flexível.

Nesse contexto, o estudo buscou a otimização do procedimento de ensaio com base na manipulação de diversas etapas do processo e na verificação da influência dessas alterações, para análise da possibilidade de simplificação em alguma das etapas sem que haja comprometimento quanto à qualidade do ensaio e precisão dos resultados. Para tal, utilizou-se o método Cembureau como método de referência na comparação e validação dos resultados.

Alguns estudos verificaram a influência de diversas variáveis sobre a permeabilidade ao gás, como relação água/ligante [12], teor de umidade da amostra [9], regime de secagem (temperatura e duração) e etapa de redistribuição da umidade [13] [14] [15], patamares de pressão durante o ensaio [16], utilização de adições e resíduos

na produção do concreto [17] [18] [19], tipo de agregado utilizado [20], entre outras. Portanto, uma atenção especial deve ser dada quando é feita a manipulação de tais variáveis em avaliações da permeabilidade ao gás. No estudo do método otimizado, mantidas fixas as demais condições, foram estabelecidas variações quanto ao processo de pré-condicionamento, ao tempo de redistribuição e à faixa de pressões utilizada durante o ensaio, para duas classes de resistência de concreto.

A determinação de um método de ensaio de permeabilidade ao gás mais simples e viável que o método Cembureau e que forneça, ainda, resultados precisos pode gerar inúmeros benefícios ao meio técnico e científico e também colaborar com a popularização de um ensaio largamente mencionado como mais prático e sensível que o ensaio de permeabilidade à água, mas, ainda, pouco usual em nível nacional. Logo, o potencial do estudo não se restringe apenas na determinação do parâmetro, mas também, na concepção de um método simplificado que pode gerar modificações positivas no ambiente produtivo e colaborar com a elaboração de uma normativa nacional que proporcione prescrições quanto às etapas e condições para determinação da permeabilidade ao gás. Isso porque, trata-se de um parâmetro importante na avaliação da durabilidade de concretos, produto cuja verificação da qualidade, eficiência e segurança é fundamental.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Planejamento e etapas do estudo

No método Cembureau de ensaio de permeabilidade ao gás, as amostras são submetidas a um pré-condicionamento para equilíbrio da umidade interna, com várias etapas inerentes ao processo. Após a análise das prescrições do método, foram estabelecidas variações em algumas etapas com o propósito de verificar a influência dessas variações e a possibilidade de simplificação em alguma delas, de forma a recomendar um novo procedimento de ensaio mais viável e que forneça, ainda, resultados similares ao método de referência (Cembureau).

Considerando o grau de modificação das variáveis independentes e a consequente complexidade do programa experimental, foi necessário um planejamento adequado da metodologia. Para tal, o estudo foi dividido em duas etapas (Figura 1). A primeira (simplificação) envolve o procedimento de ensaio propriamente dito, em que são analisadas as variações estabelecidas em cada etapa de todo o processo e sugeridas as possíveis simplificações. A segunda etapa (comparação), que está condicionada às conclusões da primeira, objetiva a comparação dos resultados decorrentes dos métodos

em estudo com os resultados obtidos pelo método Cembureau para a determinação do método simplificado equivalente que pode ser recomendado em sua substituição.

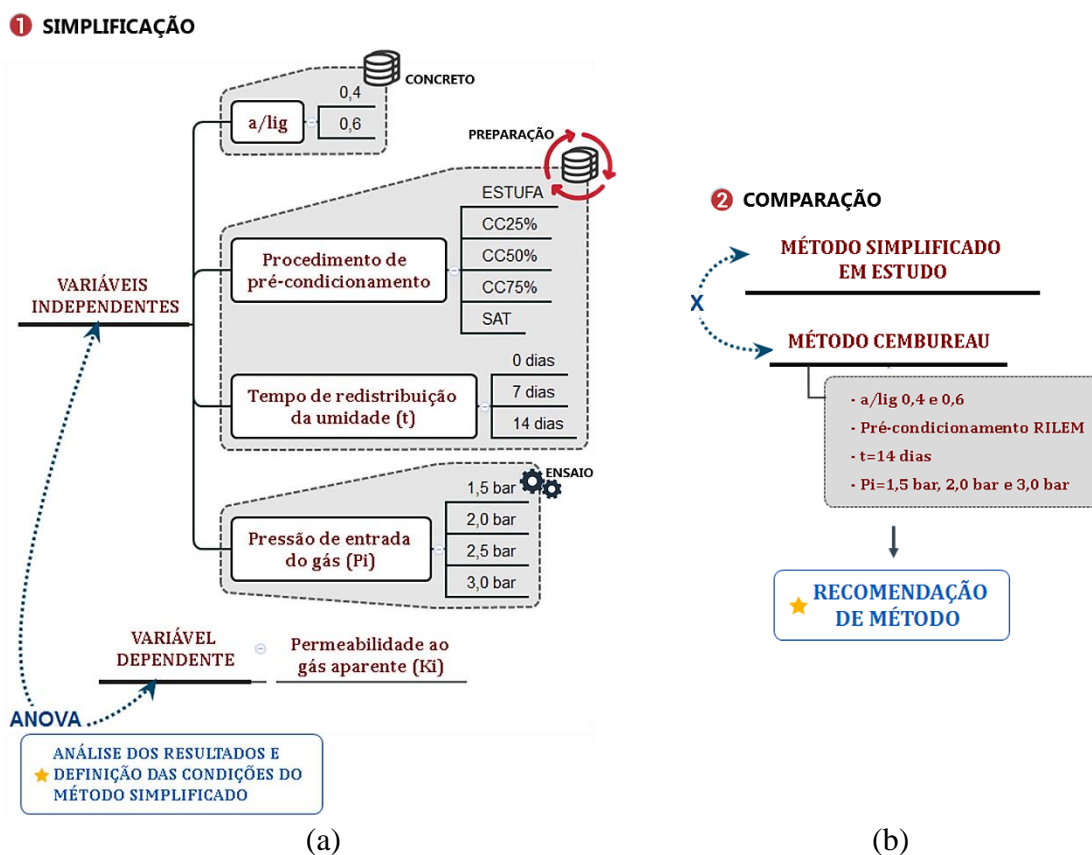


Figura 1. Esquema geral das etapas envolvidas no procedimento experimental

Etapa 1 – Simplificação

Para a primeira etapa foi considerado um planejamento fatorial completo e foram definidas como variáveis independentes: a relação água/ligante do concreto (a/lig), o procedimento de pré-condicionamento (procedimento), o tempo de redistribuição da umidade interna (t) e a pressão de gás durante o ensaio permeabilidade ao gás (P_i). A variável dependente é o coeficiente de permeabilidade ao gás aparente (K_i). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para a investigação do efeito da manipulação das variáveis independentes e de suas interações sobre a permeabilidade ao gás aparente do concreto.

Os valores de relação a/lig (0,4 e 0,6) foram definidos visando abordar no estudo concretos com distintas classes de resistência, uma com estrutura interna mais densa e compacta e outra mais usual no mercado da construção civil.

Sabe-se que o teor de umidade da amostra de concreto influencia de forma significativa o resultado de permeabilidade ao gás e depende do procedimento de pré-condicionamento no qual a amostra foi submetida, precedentemente ao ensaio. Dessa forma, definiu-se para o estudo 5 procedimentos alternativos de pré-condicionamento, com condições de exposição diferentes (temperatura e umidade relativa) e baseados em constância de massa (exposição em determinada atmosfera até a situação de equilíbrio). Tais procedimentos, relacionados na Figura 1 e explanados em detalhes no tópico 3.2.4, foram concebidos partindo-se do pressuposto de que é possível uma etapa de pré-condicionamento das amostras que não seja tão morosa como a recomendada pela RILEM [11], mas que forneça, ainda, resultados satisfatórios.

Ademais, sabe-se que além do teor de umidade da amostra, faz-se importante uma climatização interna que proporcione distribuição homogênea da água contida nos poros do concreto. O tempo de redistribuição (t) recomendado pela RILEM é de 14 dias, no mínimo. Tendo em vista a avaliação da importância de tal etapa e da influência do tempo necessário para equalização da umidade das amostras quando pré-condicionadas sob as condições alternativas desse estudo, adotou-se tempos de redistribuição de 0, 7 e 14 dias. Dessa forma, é avaliado se o tempo de redistribuição pode ser desprezado ou reduzido, para alguns dos pré-condicionamentos em avaliação.

Definiu-se para a variável pressão (P_i) os valores recomendados pela RILEM de 1,5 bar, 2,0 bar e 3,0 bar e um valor intermediário de 2,5 bar para avaliar como a permeabilidade K_i evolui conforme o incremento da pressão de gás e se os estágios podem ser simplificados.

Etapa 2 – Comparação

A partir das conclusões da primeira etapa, faz-se a análise da capacidade de reprodução do método Cembureau, tratado como referência. Os resultados selecionados (métodos em estudo) são comparados aos resultados de coeficiente de permeabilidade ao gás (K) obtidos rigorosamente conforme o método Cembureau, cujo procedimento de pré-condicionamento foi denominado como RILEM. Dessa forma, é determinada a melhor condição para o ensaio de permeabilidade ao gás, dentre os procedimentos desenvolvidos para estudo, que fornece resultados similares àqueles obtidos conforme o método Cembureau.

3.2.2 *Materiais*

O primeiro passo do estudo consistiu na seleção, quantificação, coleta e caracterização dos materiais empregados. Foram moldados corpos de prova de dimensão 15x30 cm, conforme os traços relacionados na Tabela 1, com abatimento definido de 140 ± 20 mm, para ambas as classes de concreto. A cura foi cuidadosamente estabelecida e realizada para todos os corpos de prova, uma vez que se trata de um fator influente na permeabilidade. Além dos materiais e das condições e tempo de cura, foi mantida fixa a idade para ensaio das amostras, após os 182 dias. A opção pela idade avançada visa a menor influência nos resultados, considerando a ocorrência de parte majoritária das reações de hidratação do cimento em tal idade.

Tabela 1: Proporcionalamento dos concretos desenvolvidos no programa experimental

a/lig	Consumo de cimento (kg/m ³)	Traço em massa (cimento CPV-ARI: areia natural: brita 25mm)	Teor de aditivos (% em relação à massa do cimento)		Abatimento (mm)
			Polifuncional	Superplastificante	
0,4	403	(1:2,32:2,09)	0,85	0,5	145
0,6	265	(1:3,55:3,73)	0,85	0,4	125

3.2.3 *Preparação das amostras*

Após a cura, faz-se necessária uma preparação específica das amostras, que consiste basicamente na extração dos discos de concreto e na impermeabilização de seus perímetros laterais, antes dos procedimentos de pré-condicionamento e redistribuição da umidade (Figura 2).

Na extração, são obtidas amostras com 5 cm de espessura e 15 cm de diâmetro, atendendo às tolerâncias dimensionais de ±1 mm e conforme a região de extração definida na Figura 2 (3 discos da região central, com descarte das extremidades). Tal seleção compreende a porosidade média do cilindro de concreto e, como gera 3 amostras de um mesmo corpo de prova, colabora com a utilização racional dos recursos e menor produção de resíduo. Como a RILEM [11] recomenda que para uma determinada condição estudada sejam utilizados 3 discos moldados separadamente (provenientes de corpos de prova distintos), garantiu-se que as 3 amostras extraídas de um mesmo corpo de prova fossem designadas para condições de estudo distintas, atendendo a recomendação da norma.



Figura 2. Descrição esquemática da preparação para ensaio de permeabilidade ao gás

Após a extração, procede-se à impermeabilização das superfícies circunferenciais de cada disco com resina acrílica. Tal procedimento é recomendado pela RILEM [11] como forma de evitar a formação de gradientes de umidade radiais no processo de secagem e, além disso, assegura o fluxo uniaxial de gás através dos discos durante o ensaio ao evitar o vazamento ao longo de suas laterais [13].

Na sequência, são realizados diferentes procedimentos de pré-condicionamento e de redistribuição da umidade que são detalhados nos tópicos a seguir e tem como objetivo dotar as amostras de uma concentração média de umidade, com distribuição uniforme da água evaporável ao longo do seu volume.

3.2.3.1 Pré-condicionamentos em estudo

Os procedimentos definidos para estudo são baseados na exposição da amostra em ambiente controlado (umidade relativa e temperatura definidas) até a constância de massa (variação menor que 0,05% em um intervalo de 24 horas). O objetivo é testar procedimentos mais simples que o do método Cembureau, com menor necessidade de

monitoramento e com menos etapas inerentes ao processo. Ficam definidos os procedimentos CC25%, CC50%, CC75%, ESTUFA e SAT conforme a Tabela 2. Variou-se a umidade relativa de 25% à saturada (não inferior a 95%) e a temperatura de 23 a 50°C, por meio de câmara climática, câmara úmida ou estufa com circulação de ar. A Figura 3 ilustra as amostras durante o pré-condicionamento em câmara climática.

Tabela 2: Descrição das condições dos procedimentos de pré-condicionamento definidos para estudo

Procedimento	Condição de exposição		
	UR (%)	Temperatura ($\pm 2^\circ\text{C}$)	Ambiente
CC25%	25	50	Câmara climática
CC50%	50	50	Câmara climática
CC75%	75	50	Câmara climática
ESTUFA	Ambiente	50	Estufa com circulação de ar
SAT	≥ 95	23	Câmara úmida



Figura 3. Amostras de concreto em câmara climática

O procedimento ESTUFA, em que há circulação de ar e, portanto, umidade relativa não controlada, foi determinado por ser um procedimento prático utilizado com frequência na literatura [10] [21] [22]. A temperatura máxima de exposição das amostras igual a 50°C foi adotada objetivando eliminar somente a água livre do concreto e evitar fissuras e alterações na microestrutura [13] [15] [23].

A exposição das amostras em cada ambiente ocorreu por 14 dias. Tal período foi definido para os concretos desse estudo com base em testes prévios do tempo necessário

para a constância de massa. Foi observado o prazo de 9 a 13 dias para a constância de massa e, portanto, a fim de beneficiar o planejamento da experimentação, foi fixado um tempo de exposição de 14 dias antes da posterior etapa de redistribuição da umidade.

3.2.3.2 Pré-condicionamento RILEM

No pré-condicionamento RILEM [11] (Figura 4), determina-se em uma primeira etapa a perda de massa necessária na etapa seguinte (secagem das amostras de ensaio). Primeiramente, procede-se a secagem de uma amostra ao final do período de cura, em estufa com circulação de ar (105°C), até que a diferença de massa observada entre duas leituras consecutivas, num intervalo de 24 horas, seja menor que 0,5 g.

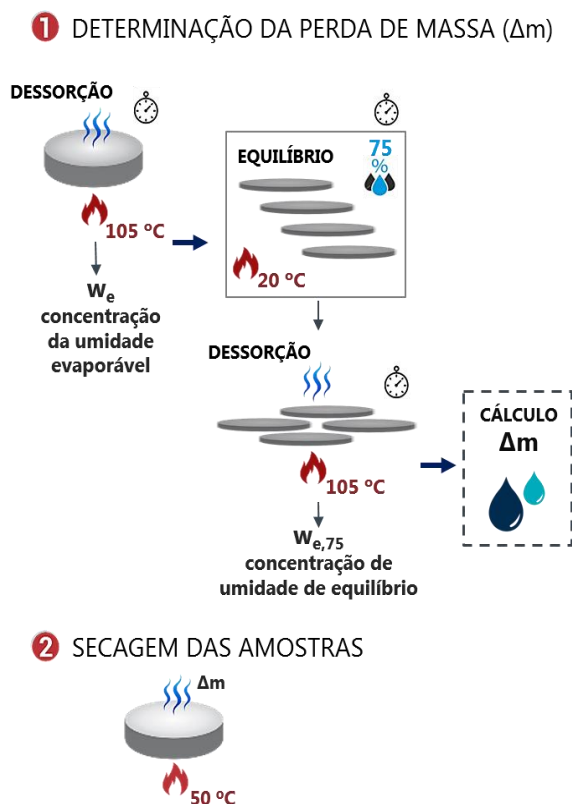


Figura 4. Resumo esquemático do pré-condicionamento RILEM (método Cembureau)

Por meio da análise da variação de massa durante a dessecção, utilizando as Equações 1 e 2, é determinada a concentração de umidade evaporável (w_e).

$$W_e = m_0 - m_d \quad (\text{Eq. 1})$$

$$w_e = \frac{W_e}{m_d} \quad (\text{Eq. 2})$$

W_e = quantidade total de umidade evaporável ao final da cura (g);

m_o = massa do corpo de prova ao final da cura (g);

m_d = massa do corpo de prova após a secagem em estufa (g); e

w_e = concentração de umidade evaporável ao final da cura.

Além disso, uma amostra mínima de 500 g do concreto estudado é cortada em fatias de ± 5 mm e exposta em ambiente com umidade relativa igual a $75 \pm 2\%$ e temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, até a condição de equilíbrio. Tal condição, em câmara climática, é obtida com precisão suficiente caso a variação de massa seja inferior a 0,1 g, num intervalo de 24 horas. Após a constância de massa, é feita novamente a dessorção da amostra (em estufa a 105°C) e a determinação da concentração de umidade de equilíbrio ($w_{e,75}$), utilizando as Equações 3 e 4. Vale lembrar que o tempo de exposição necessário até a constância de massa varia conforme a composição do concreto e, para os concretos estudados, cada um desses processos de constância de massa levou de 2 a 4 semanas.

$$W_{e,75} = m_{e,75} - m_d \quad (\text{Eq. 3})$$

$$w_{e,75} = \frac{W_{e,75}}{m_d} \quad (\text{Eq. 4})$$

$W_{e,75}$ = quantidade total de umidade no equilíbrio (g);

$m_{e,75}$ = massa do concreto no equilíbrio (g);

m_d = massa do concreto seco (g); e

$w_{e,75}$ = concentração de umidade no equilíbrio.

Finalmente é determinada a perda de massa necessária durante a secagem (Δm) para que cada amostra de ensaio esteja com 75% de UR, utilizando a Equação 5.

$$\Delta m = \left(\frac{w_e - w_{e,75}}{1 + w_e} \right) m_o \quad (\text{Eq. 5})$$

Δm = perda de massa necessária à amostra de ensaio;

w_e = concentração da umidade evaporável;

$w_{e,75}$ = concentração da umidade de equilíbrio; e

m_o = massa real da amostra de ensaio após o período de cura (g).

A perda de massa é executada com secagem acelerada em estufa ventilada (50°C), até que se obtenha $\pm 5\%$ de precisão. No presente estudo, o processo durou de 7 a 8 dias. A Figura 5 ilustra amostras de concreto na fase de equilíbrio (UR=75%) e de secagem (Δm). Posteriormente, dá-se início à etapa de redistribuição da umidade.



Figura 5. Amostras de concreto durante o pré-condicionamento RILEM

3.2.3.3 *Redistribuição de umidade*

Após cada etapa de pré-condicionamento, as amostras de concreto são envoltas em sacos impermeáveis e expostas à temperatura de 50°C (Figura 6) e, uma vez que não é possível a troca de umidade com o ambiente, a temperatura elevada acelera a redistribuição dos gradientes de umidade, colaborando para uma distribuição homogênea ao longo do corpo de prova.



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Selagem a quente dos discos de concretos com (a) polipropileno e (b) bopp e (c) etapa de redistribuição em estufa

A selagem foi realizada de acordo com Hoppe Filho [24], utilizando filme de PVC (polietileno), dois sacos plásticos de polipropileno selados à quente, seguidos por um saco BOPP metalizado (polipropileno bi-orientado com camada de alumínio), também selado à quente. Para o pré-condicionamento RILEM, segundo o método Cembureau [11], a redistribuição ocorreu por 14 dias (mínimo recomendado), enquanto o tempo de redistribuição (t) para as amostras condicionadas pelos procedimentos em estudo variou entre 0, 7 e 14 dias. Terminado o processo, as amostras embaladas são transportadas para o ambiente de realização do ensaio com pelo menos 24 horas de antecedência para o equilíbrio térmico das amostras com o ambiente (20°C).

3.2.4 Ensaio de permeabilidade ao gás

O ensaio de permeabilidade ao gás, bem como o equipamento utilizado para tal, foi similar para todos os concretos independente do pré-condicionamento e tempo de redistribuição ao qual foram submetidos. Os elementos essenciais do equipamento (Figura 7) são o suprimento de gás, o regulador de pressão, a célula de permeabilidade, o painel com medidores de vazão e o cronômetro.

O suprimento de gás é formado pelo cilindro de oxigênio equipado com reguladores de pressão do botijão e da tubulação. O regulador de pressão do sistema é composto por uma válvula de precisão, para ajuste manual da pressão de entrada, e por um manômetro digital.

A célula de permeabilidade (Figura 8) abriga a amostra de concreto. Os discos de alumínio, com suas ranhuras voltadas para a amostra, têm a função de distribuição (disco inferior) e recolhimento (disco superior) do gás. Compondo a célula, o molde de borracha e uma câmara de ar de borracha formam um sistema de vedação lateral visto que, quando inflada, a câmara faz com que o molde seja pressionado contra a superfície curva da amostra, prevenindo a permeação de oxigênio nessa região.

O painel é formado pelo bloco de distribuição de 3 vias, que contém as válvulas utilizadas para selecionar o medidor ativo correspondente, e pelos medidores de fluxo de oxigênio do tipo bolha de sabão, que cobrem uma faixa de volumes de 1 a 100 mL a fim de acomodar diferentes permeabilidades do concreto analisado. Para medição do tempo que a bolha leva para percorrer o fluxômetro, utiliza-se um cronômetro com precisão de 0,1 s. As bolhas são produzidas utilizando-se uma bexiga preenchida com água e sabão fixada na extremidade inferior dos medidores de fluxo.



Figura 7. Permeômetro Cembureau e amostras armazenadas após ensaio de permeabilidade ao gás. (a) Suprimento de ar; (b) Regulador de pressão com manômetro; (c) Célula de ensaio com corpo de prova; (d) Medidores de fluxo; (e) Cronômetro.

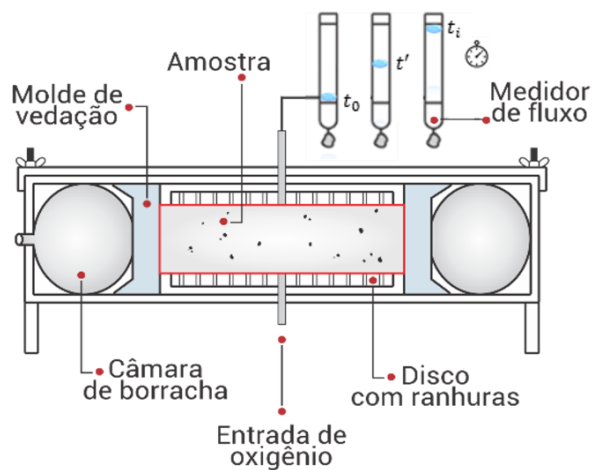


Figura 8. Descrição esquemática da célula de permeabilidade

O procedimento de ensaio, em triplicata e utilizando o oxigênio como gás percolante, obedece às recomendações da RILEM TC 116 - PCD [11] para determinação do coeficiente de permeabilidade ao gás do concreto. Precedente ao confinamento na célula do permeâmetro, as amostras são desembaladas e medidas no diâmetro (duas leituras ortogonais em cada face, totalizando quatro medidas) e na altura (quatro medidas), adotando-se a média dos valores. Posteriormente, as amostras são instaladas na célula de permeabilidade e a câmara de ar é inflada (pressão ≥ 7 bar).

Para cada estágio de pressão P_i , é fornecido oxigênio para o sistema durante 30 minutos e procede-se a primeira leitura no fluxômetro, cuidando para que a bolha de sabão percorra seu volume em tempo não inferior a 20 segundos, ou o fluxômetro é substituído por outro de maior volume. Toma-se, então, leituras provisórias da taxa de fluxo até que a diferença entre duas leituras realizadas num intervalo de 5 a 15 min seja inferior a 3% (caracterização de fluxo constante). Na sequência, tomam-se duas leituras sucessivas, adotando-se a média a ser utilizada no cálculo da taxa de fluxo de oxigênio (Q_i), conforme a Equação 6, para o estágio de pressão P_i .

$$Q_i = \frac{V_i}{t_i} \quad (\text{Eq. 6})$$

Q_i = taxa de fluxo de oxigênio, em m^3/s ;

V_i = volume percorrido pela bolha no fluxômetro;

t_i = tempo no qual a bolha percorreu o volume V_i .

O procedimento supramencionado é repetido verificando, para a mesma amostra, as taxas de fluxo para as pressões recomendadas pela RILEM [11] de 1,5 bar, 2,0 bar e 3,0 bar, e para uma pressão intermediária de 2,5 bar. Para o cálculo do coeficiente de permeabilidade aparente (K_i), foi utilizada a equação de Hagen-Poiseuille (Equação 7), a qual aborda o fluxo laminar de um fluido compressível, através de corpos porosos com pequena capilaridade, sob condições uniformes.

$$K_i = \frac{2P_a Q_i L \mu}{A(P_i^2 - P_a^2)} \quad (\text{Eq. 7})$$

K_i = coeficiente de permeabilidade ao gás na pressão i , em m^2 ;

P_a = pressão atmosférica absoluta ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$);

Q_i = taxa de fluxo de gás à pressão i , em m^3/s ;

L = espessura do corpo de prova, em m ;

μ = viscosidade dinâmica do gás a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ($\mu = 20,2 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$);

A = seção transversal do corpo de prova, em m^2 ;

P_i = pressão aplicada no ensaio, absoluta em Pa;

Para cada condição estudada, são realizadas 3 leituras (utilizando 3 amostras de concreto extraídas de corpos de prova distintos). No presente estudo, devido ao grau de modificação das variáveis, isso corresponde à execução de 378 leituras (360 dos métodos em estudo e 18 segundo o método Cembureau) e utilização de 96 amostras de concreto, visto que os diferentes estágios de pressão são aplicados sequencialmente a uma mesma amostra. Cada ensaio completo, com os incrementos de pressão de entrada, durou 2 horas, em média. O coeficiente de permeabilidade ao gás K de cada amostra corresponde à média dos valores de K_i , considerando os diferentes estágios de pressão, e o coeficiente de permeabilidade K final é obtido pela média aritmética dos três discos ensaiados. Obtidos os resultados, procedeu-se ao tratamento estatístico e posterior análise e discussão dos resultados.

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Etapa 1 – Simplificação

Após a exclusão dos valores espúrios por meio do teste de Dixon [25], os demais foram analisados utilizando o *software* Statsoft Statistica 7. Aos resultados de permeabilidade aparente aplicou-se a análise de variância (ANOVA) conjuntamente com a comparação múltipla de médias (Teste de Duncan) a 5% de significância, para verificação da influência dos fatores considerados na avaliação e da possibilidade de simplificação do tempo de redistribuição da umidade (t) e da pressão de gás (P_i), considerando a faixa de concretos (a/lig) e pré-condicionamentos (Procedimento) adotados.

A análise de variância (Tabela 3) mostrou que os efeitos individuais dos fatores principais a/lig , procedimento e t são estatisticamente significativos ao nível de confiança de 95%, evidenciando a influência de cada uma dessas variáveis independentes, quando tomadas isoladamente. O efeito principal a/lig , que diz respeito ao tipo de concreto, mostrou-se significativamente influente, indicando que o ensaio foi capaz de distinguir o desempenho entre os concretos com classes de resistência diferentes.

Observa-se na Figura 9 a faixa de valores médios globais de permeabilidade para cada relação a/lig , variando de $0,04 \times 10^{-18}$ a $2,89 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ e de $15,29 \times 10^{-18}$ a $46,09 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ para a relação a/lig igual a 0,4 e 0,6, respectivamente, tendo em vista os diferentes procedimentos.

Tabela 3: Análise de variância dos resultados de permeabilidade ao gás aparente (Ki)

Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: a/lig	37644,48	1	37644,48	78,724	0,00000	Significativo
B: Procedimento	4953,64	4	1238,41	2,589	0,03814	Significativo
C: t	9919,63	2	4959,82	10,372	0,00005	Significativo
D: Pi	3668,66	3	1222,89	2,557	0,05651	Não significativo
Interações						
A*B	6737,20	4	1684,30	3,522	0,00845	Significativo
A*C	10787,55	2	5393,78	11,279	0,00002	Significativo
B*C	26379,72	8	3297,46	6,895	0,00000	Significativo
A*D	2423,62	3	807,87	1,689	0,17069	Não significativo
B*D	622,85	12	51,90	0,108	0,99993	Não significativo
C*D	460,43	6	76,74	0,160	0,98670	Não significativo
A*B*C	25888,14	8	3236,02	6,767	0,00000	Significativo
A*B*D	753,59	12	62,80	0,131	0,99980	Não significativo
A*C*D	531,34	6	88,56	0,185	0,98067	Não significativo
B*C*D	2231,70	24	92,99	0,194	0,99999	Não significativo
A*B*C*D	2147,33	24	89,47	0,187	0,99999	Não significativo
Erro (resíduo)	90854,18	190	478,18			

Em que: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = indicação se o efeito é significativo ou não.

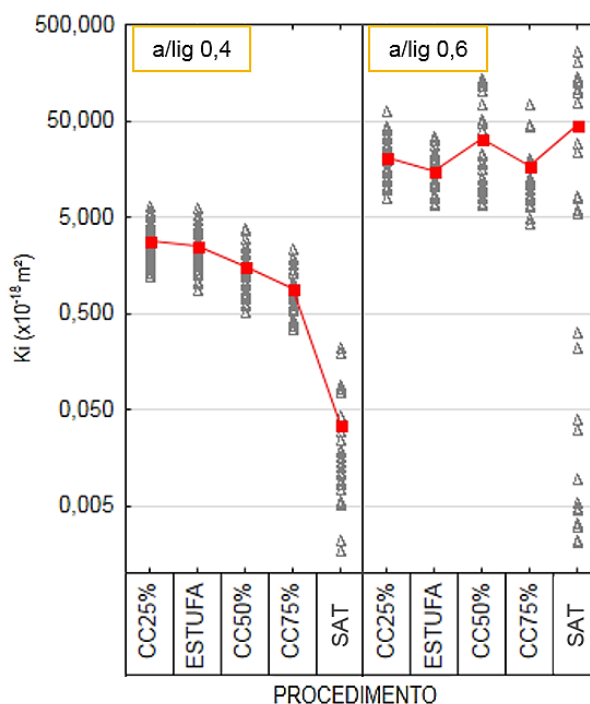


Figura 9. Valores médios globais da permeabilidade aparente em função do tipo de concreto (a/lig) e procedimento de pré-condicionamento, com representação da variabilidade

Como esperado, a permeabilidade ao oxigênio foi menor conforme menor relação a/lig. Tal tendência foi observada em estudo anterior [12] e explicada pela

diminuição na porosidade total e na conectividade dos poros dos concretos com menor relação a/lig . De fato, a permeabilidade é um parâmetro que fornece indicativo das condições microestruturais do concreto, pois depende das características de conformação das partículas e a relação a/lig é considerada o principal parâmetro controlador da porosidade do concreto e, portanto, um fator determinante na permeabilidade [1] [2] [4].

A variável procedimento de pré-condicionamento teve sua influência significativa, indicando a relevância dos teores de umidade atribuídos às amostras por cada procedimento utilizado. Estudos anteriores mostram que o processo de pré-condicionamento e o consequente teor de umidade da amostra influencia fortemente as medições de permeabilidade [9] [26] e tal análise confirma a inadequação da classificação da permeabilidade ao gás sem que se leve em conta o efeito de tal fator.

Ao observar os valores de K_i em função do procedimento (Figura 9), é aparente que a permeabilidade diminui conforme maior UR do ambiente de exposição e que a diferença entre o procedimento SAT e os demais é considerável, principalmente em relação à variabilidade. O teste de Duncan acusou diferença entre o procedimento SAT e os demais, estatisticamente iguais entre si.

Para o procedimento que envolve alto teor de UR no ambiente de exposição (SAT) e conseqüentemente maior grau de saturação das amostras condicionadas, as medidas para cada concreto são muito dispersas, com uma diferença máxima a cerca de cinco ordens de grandeza. Isso ocorre porque a medida de permeabilidade ao gás é afetada pela presença de água nos poros do material, que reduz o fluxo de oxigênio em condições de maior umidade. Como se trata de dois fluidos imiscíveis, a percolação de gás ao longo do material é reduzida pela presença de umidade, que provoca o entupimento do sistema de poros, reduzindo sua conectividade e aumentando sua tortuosidade [27] [9] [28]. Dessa forma, o alto teor de umidade impede ou torna a medida difícil de ser realizada e com dispersão de resultados considerável.

Conforme Parrott [29], para amostras com UR entre 100% e 60%, a influência da umidade na permeabilidade é significativa e os ensaios de permeabilidade ao gás nessa faixa de umidade devem ser evitados. Quando mais próximos de condições perfeitamente secas, a conectividade de poros dentro da rede porosa aumenta e quase todos os poros contribuem para o fluxo de oxigênio.

Sendo assim, como a tendência do procedimento SAT é de subestimar os valores de permeabilidade ao gás do concreto e comprometer a precisão experimental pelo alto

teor de umidade relativo ao procedimento, atesta-se a inviabilidade da sua utilização na medida prática da permeabilidade ao gás de concretos.

O procedimento ESTUFA foi tido como estatisticamente semelhante aos demais procedimentos executados em câmara climática. No entanto, como a umidade relativa em estufa com circulação de ar não é controlada, trata-se de um procedimento com pouco controle tecnológico e mais sujeito às interferências do ambiente externo que os demais. Tal procedimento pode influenciar no teor de umidade final e, conseqüentemente, na precisão dos resultados do ensaio. Logo, como a permeabilidade ao gás do concreto é vista como um parâmetro bastante sensível ao efeito da umidade e de diversas outras variáveis, recomenda-se o mais alto rigor possível no preparo das amostras e, portanto, uma referência no que diz respeito à umidade relativa do ambiente de exposição.

Com isso, o procedimento de pré-condicionamento ESTUFA é tido como não recomendável nesse estudo, apesar da sua praticidade, dos bons resultados para os concretos estudados e da sua vasta utilização na literatura, pois tal método, sem UR controlada, pode ter maior influência e comprometer a precisão em casos especiais, como na avaliação de concretos de alto desempenho ou com uso de adições.

Os demais procedimentos (CC25%, CC50% E CC75%) forneceram resultados com mesma ordem de grandeza e estatisticamente iguais (teste de Duncan). Vários autores constataram maior permeabilidade ao gás ao reduzir a umidade relativa da amostra até 65-75% e poucas alterações com a redução até cerca de 40% [30] [31]. Estudos como os de Parrott [29] e Yang et al. [32] explanam que, quando as amostras de concreto se encontram com UR entre 40 e 60%, as medidas de permeabilidade ao gás são geralmente constantes, refletindo o fato de que os efeitos da umidade foram removidos. Além disso, a secagem até que a UR esteja abaixo de 40% é considerada agressiva e não é recomendada, pois pode acarretar alteração da microestrutura da matriz da pasta, gerando microfissuras e tornando os caminhos de fluxo do gás mais conectados.

Os resultados mostram que os procedimentos em câmara climática dotaram as amostras de um teor de umidade adequado para o ensaio de permeabilidade ao gás, onde grande parte dos capilares contribui com o fluxo e ocorre pouca variação no valor de permeabilidade. Além disso, tendo em vista a tendência dos valores de K_i , que decrescem em função do incremento da pressão de entrada (P_i), presume-se que o regime de secagem adotado nos procedimentos não gerou dano importante ou alterou a microestrutura do material. Portanto, ficam selecionados os procedimentos CC25%, CC50% e CC75% para

apenas um estágio de pressão e são encontrados valores adequados de permeabilidade. Heede, Gruyaert e Belie [33] determinaram valores de permeabilidade ao gás na ordem de 10^{-16} m², utilizando pressão de 2 bar, e Yang et al. [23], utilizando 1,2 bar de pressão, avaliou concretos com permeabilidade ao gás na ordem de 10^{-17} m².

No entanto, uma simplificação quanto aos estágios de pressão não acarreta tanto efeito na praticidade do ensaio como um todo, pois reduziria sua duração numa escala de minutos, diferente das simplificações relativas ao procedimento de pré-condicionamento e tempo de redistribuição, que reduzem o processo em semanas e, portanto, são mais relevantes na viabilidade do ensaio. Além disso, a maioria dos estudos encontrados na literatura utiliza vários patamares de pressão e Kollek [5], dentre as várias recomendações quanto à determinação da permeabilidade pelo método Cembureau, recomenda o compromisso com taxa de fluxo razoavelmente grande para se adequar à instrumentação simples e a utilização de níveis de pressão entre 0,5 a 2,5 bar, apesar de pressões de baixa magnitude já serem significativas no estudo de concretos.

Güneyisi et al. [16] utilizaram pressões variando de 1,5 a 5,0 bar na avaliação de concretos com metacaulim e sílica ativa. Observou-se que, conforme se espera, o coeficiente de permeabilidade do gás tem a tendência de diminuir conforme o incremento de pressão até 3,5 bar, mas começa a aumentar após a pressão de entrada de 3,5 bar. Uma tendência semelhante foi observada em outro estudo [18]. Tais resultados sugerem que a utilização de pressões a partir de 3,5 bar pode causar alterações na estrutura porosa do material ou até nas propriedades de escoamento para pressões mais elevadas e, portanto, não são recomendadas.

Sendo assim, apesar dos resultados indicarem a possibilidade de simplificação da pressão, optou-se por recomendar o padrão de pressões conforme RILEM [11] de 1,5, 2,0 e 3,0 bar. Isso levando em conta as recomendações contidas na literatura, a influência relativamente pequena de tal simplificação na praticidade do procedimento como um todo e também como forma de colaborar positivamente com a precisão do método.

Portanto, levando em conta a análise dos resultados, ficam definidos 3 métodos de ensaio simplificados para avaliação na segunda etapa do estudo (Figura 11). São selecionados os resultados de permeabilidade ao gás (K) referentes aos procedimentos de pré-condicionamento CC25%, CC50% e CC75%, para o tempo de redistribuição de umidade igual a 7 dias e pressões de gás durante o ensaio de 1,5 bar, 2,0 bar e 3,0 bar. A fase seguinte se concentra na comparação com o método Cembureau e na avaliação da

confiabilidade dos métodos propostos, tendo em vista a recomendação daquele que se sobressai e fornece os melhores resultados em relação ao método de referência.

Método	Procedimento de pré-condicionamento	Tempo de redistribuição	Pressões de entrada
CC25%	CC25%	7 dias	1,5, 2,0 e 3,0 bar
CC50%	CC50%		
CC75%	CC75%		
X CEMBUREAU	RILEM	14 dias	

Figura 11. Métodos selecionados para a etapa de comparação

3.3.2 Etapa 2 - Comparação

A Figura 12 apresenta os valores de permeabilidade aparente (K_i) em função da pressão aplicada durante o ensaio (P_i) para cada um dos concretos estudados e métodos em avaliação, inclusive do método Cembureau. No gráfico, é possível observar a proximidade entre os resultados para os métodos utilizados e que estes foram capazes de distinguir os tipos de concreto por meio da avaliação da permeabilidade.

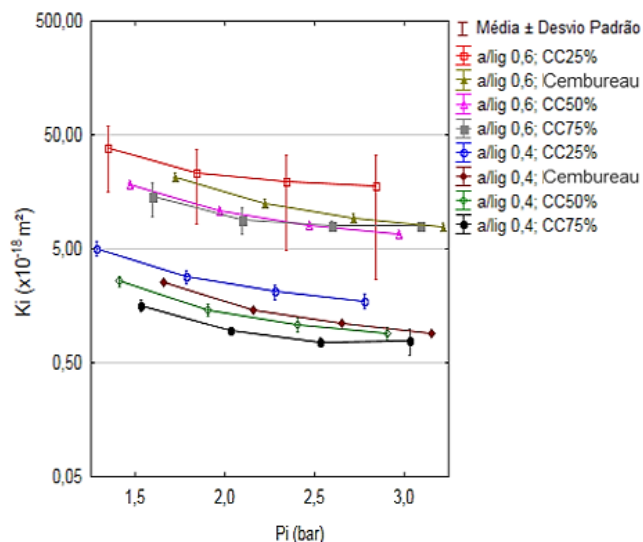


Figura 12. Valores médios de permeabilidade aparente em função da pressão de gás

A Tabela 4 apresenta os coeficientes médios (K) de permeabilidade ao gás obtidos e o respectivo coeficiente de variação (CV) para cada caso. Para ambas as relações a/lig , observa-se valores de permeabilidade ao gás K na mesma ordem de grandeza, independentemente do método de ensaio utilizado, variando de $1,1 \times 10^{-18}$ a $3,2 \times 10^{-18}$ m^2 para a relação a/lig igual a 0,4, e de $10,5 \times 10^{-18}$ a $26,2 \times 10^{-18}$ m^2 para a relação a/lig

igual a 0,6. Em comparação, as duas classes de concreto obtiveram resultados que diferem em cerca de uma ordem de magnitude.

Tabela 4: Coeficiente de permeabilidade ao gás e coeficiente de variação dos métodos de ensaio

a/lig	CC25%		CC50%		CC75%		Cembureau	
	K (10^{-18} m ²)	CV (%)	K (10^{-18} m ²)	CV (%)	K (10^{-18} m ²)	CV (%)	K (10^{-18} m ²)	CV (%)
0,4	3,2	11,4	1,7	9,3	1,1	10,4	1,6	2,7
0,6	26,2	53,8	12,0	2,1	10,5	15,8	14,0	5,9

Ao se examinar os valores dos CVs médios (Tabela 4) referentes a cada procedimento e tomando como referência os pressupostos de Pimentel Gomes [34], observa-se que a maior parte dos resultados apresenta baixa ou média dispersão, exceto para o procedimento CC25%, mais especificamente para a relação a/lig de 0,6, em que foi verificada dispersão muito alta. Os menores valores de CV se referem aos procedimentos CC50% e Cembureau.

Uma anova não apontou diferença significativa entre os métodos em estudo e o de referência e, portanto, são equivalentes do ponto de vista estatístico e fornecem resultados de permeabilidade ao gás similares. Sendo assim, com vistas ao objetivo de recomendar o método alternativo que se sobressai, foi realizada uma análise de regressão linear. Tal abordagem foi utilizada por Yang et al. [23] para comparar resultados de um ensaio alternativo aos valores de referência obtidos pelo método Cembureau. Nessa abordagem é investigado o desempenho relativo de cada método em estudo e a força das relações entre eles e o método de referência, possibilitando a recomendação do melhor método de ensaio, em termos de sensibilidade e confiabilidade. Um resumo dos resultados da análise de regressão entre os valores normalizados de K (Cembureau) e os resultados conforme métodos em estudo é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Resumo dos resultados da regressão entre os métodos de ensaio de permeabilidade ao gás em estudo e o Cembureau

Parâmetros da análise de regressão	Correlação		
	CC25% x Cembureau	CC50% x Cembureau	CC75% x Cembureau
R ²	0,9915163	0,9967062	0,9809527
Erro padrão	0,7740054	0,3748577	0,8379673
Teste F	350,6193	907,7921	154,5026
Valor-p	<0,001	<0,001	0,0011

A regressão indica relações positivas entre o método Cembureau e os demais métodos, pois os valores-p inferiores a 0,05 demonstram a relação estatisticamente significativa entre a variável independente (referência) e a variável dependente. Para todos os casos, altos valores do Coeficiente de Determinação (R^2) foram observados, indicando a confiabilidade do modelo e a forte relação entre os métodos em estudo e o Cembureau, mas a correlação mais forte corresponde ao método CC50% ($R^2 = 0,9967$).

Além da confiabilidade do modelo, é importante ter em mente o nível de precisão dos métodos, ou seja, a avaliação do erro padrão que indica a variabilidade das médias. O menor erro padrão e, portanto, a menor dispersão e maior precisão da estimativa foi relativa ao procedimento CC50%, de valor igual a 0,3749. Os valores de erro padrão para os procedimentos CC25% e CC75% foram relativamente altos.

Os membros do Comitê Técnico 116-PCD [35] investigaram a repetibilidade e a reprodutibilidade do método Cembureau em um estudo de comparação entre laboratórios. O parâmetro da permeabilidade ao gás se mostrou ser altamente sensível às variações nas propriedades do material e, conseqüentemente, uma dispersão considerável dos resultados foi encontrada. A variabilidade dos resultados é justificada tendo em vista a inevitável heterogeneidade do concreto. Foi verificada boa concordância entre os laboratórios participantes, em que a dispersão dos resultados observados entre os laboratórios esteve na mesma faixa que a dispersão dos resultados observados entre as medidas de um mesmo laboratório. A reprodutibilidade observada na faixa de 30% foi vista como aceitável em vista da alta resolução do método.

No documento de recomendações quanto ao método Cembureau de medida da permeabilidade ao gás [5], são fornecidas algumas considerações sobre a precisão do método. Dentre elas, tem-se que o coeficiente de variação obtido no estudo foi a cerca de 30%, constante para uma faixa de 13 traços de concreto distintos, considerando operador único e 10 amostras extraídas do mesmo lote de concreto.

No estudo de Kubissa e Glinicki [20], foi investigada a permeabilidade de concretos produzidos com agregados especiais para proteção contra radiação, utilizando dois procedimentos de secagem e o método Autoclam. Para a secagem das amostras na temperatura de 65°C até uma UR menor que 65%, a profundidade de 30 mm, o tempo total de secagem variou de 37 a 58 dias. Os coeficientes de variação variaram de 13,1% a 20,7%. Aït-Mokhtar et al. [36] caracterizaram quantitativamente a variabilidade de vários indicadores de durabilidade de amostras extraídas de duas construções. Inúmeros ensaios utilizando um método parecido com o método Cembureau foram realizados,

resultando num valor médio de permeabilidade igual a $5,6 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ para um dos locais investigados. O desvio padrão foi igual a $1,2 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ e o coeficiente de variação igual a 22%, valores com mesma ordem de grandeza das outras propriedades de transporte investigadas.

Em uma investigação sobre a repetibilidade e variabilidade dos resultados de permeabilidade ao gás entre dois laboratórios que utilizaram o método Autoclam [12], foram obtidos coeficiente de variação de 14,7% e 16,6%, para o Laboratório 1 e Laboratório 2, respectivamente. Os menores coeficientes de variação foram obtidos para as amostras condicionadas sob UR de 50%. Além disso, o estudo verificou que não somente o pré-condicionamento e a umidade relativa condicionante podem influenciar os resultados de permeabilidade ao gás, mas também a qualidade do condicionamento. É recomendado e ressaltada a importância de realizar o condicionamento até o equilíbrio de massa para se obter resultados representativos e com boa repetibilidade. No presente estudo, o pré-condicionamento realizado foi de 14 dias por ter sido o tempo previamente verificado como suficiente para constância de massa dos concretos estudados. Tem-se que a estrutura porosa dos concretos varia em função de diversos fatores e, portanto, para cada caso pode ser necessário um tempo diferente de secagem até o equilíbrio. Logo, assim como Villani et al. [12], recomenda-se o pré-condicionamento das amostras até a constância de massa.

Considerando os resultados dos estudos supramencionados, tem-se que uma variabilidade nos resultados é natural e esperada devido, entre outros, à variabilidade natural dos constituintes do concreto, aos erros na pesagem dos componentes e à qualidade da vibração e compactação durante a moldagem. As observações sugerem que a medição de permeabilidade ao gás segundo o método CC50% (em câmara climática com UR igual a 50% e 50°C de temperatura até constância de massa, com tempo de redistribuição 7 dias e utilizando pressões de 1,5, 2,0 e 3,0 bar) não acarreta danos a microestrutura das amostras e fornece, ainda, resultados precisos, com variabilidade adequada e valores comparáveis aos obtidos pelo método Cembureau. É, portanto, definido como método em avaliação mais apropriado nesse estudo e recomendado como alternativa ao método Cembureau de ensaio de permeabilidade ao gás de concretos.

3.4 Conclusões

Para esta pesquisa, dentre as variáveis estudadas, a relação água/ligante do concreto, o procedimento de pré-condicionamento e o tempo de redistribuição têm efeito

significativo sobre a permeabilidade ao gás do concreto. Conforme esperado, concretos com menor relação a/lig são menos permeáveis em virtude da menor porosidade e conexão entre os poros. Para as condições estudadas, os tempos de redistribuição de 7 e 14 dias têm efeitos estatisticamente iguais e, portanto, tal simplificação é adotada. Apesar dos resultados indicarem a possibilidade de simplificação da pressão, optou-se por recomendar o padrão de pressões conforme prescrições da RILEM.

Os procedimentos ESTUFA e SAT foram descartados pela dificuldade de ensaio e dispersão de resultados, quando na condição de maior umidade, e devido à umidade relativa não controlada e, conseqüentemente, menor controle tecnológico quando é executado o procedimento ESTUFA. Fortes correlações foram obtidas entre o método Cembureau e os métodos em câmara climática com UR igual 25%, 50% e 75%, a 50°C até a constância de massa, com tempo de redistribuição igual a 7 dias. Tais procedimentos, além de capazes de eliminar o efeito da umidade e de diferenciar as duas qualidades de material, não apresentaram evidência de danos na microestrutura do concreto decorrentes do regime de secagem.

Do ponto de vista estatístico, em termos de sensibilidade e confiabilidade, o método CC50% apresentou o melhor desempenho dentre os métodos investigados, com menor CV médio (5,7%), menor erro padrão (0,375) e maior R^2 (0,997), e, portanto, é recomendado nesse estudo como um método adequado para determinar a permeabilidade ao gás de concretos.

Finalmente, do ponto de vista prático, tal método é recomendado em substituição ao método Cembureau por apresentar resultados tão bons quanto e por consistir num método mais simples, com menor necessidade de monitoramento e com menos etapas inerentes ao processo. Além disso, trata-se de um processo mais flexível e de mais fácil planejamento por ser baseado no equilíbrio de massa durante o condicionamento. O método Cembureau, além de mais exaustivo por ter várias etapas inerentes ao processo, exige acompanhamento contínuo para que não ocorra perda de massa de água nem menor nem maior que o especificado, antes da etapa de redistribuição. A execução do pré-condicionamento conforme método Cembureau durou, em média, 57 dias, mesmo com algumas etapas realizadas simultaneamente. Enquanto o método CC50% teve um pré-condicionamento de 21 dias (inclusos os 7 dias de redistribuição da umidade).

Conclui-se que o procedimento simplificado validado nesse estudo é recomendado para a medição de permeabilidade ao gás, levando em conta a acurácia necessária na medida de tal parâmetro, e mais vantajoso para o meio técnico e científico

segundo o ponto de vista prático. Recomenda-se a sua aplicação em investigações futuras da qualidade de concretos de diferentes composições e outros materiais cimentícios, de forma a consolidar a viabilidade do método.

3.5 Referências bibliográficas

- [1] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. HASPARYK, N. P. (Ed. Trad.). 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.
- [2] STORMONT, J. C. In situ gas permeability measurements to delineate damage in rock salt. *International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences*, v. 34, n. 7, p. 1055-1064, 1997.
- [3] PICANDET, V.; KHELIDJ, A.; BELLEGOU, H. Crack effects on gas and water permeability of concretes. *Cement And Concrete Research*, v. 39, n. 6, p. 537-547, 2009.
- [4] SENTONE, D. T. Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade superficial de revestimento de argamassa, São Paulo, 2011, dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, 139 f.
- [5] KOLLEK, J. J. The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau Method – a recommendation. *Revista Materials and Structures*, Paris: RILEM, v. 22, p. 335-230, 1989.
- [6] HALL, Christopher. Barrier performance of concrete: A review of fluid transport theory. *Materials And Structures*, v. 27, n. 5, p. 291-306, 1994.
- [7] WU, Z.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Transport properties of concrete after drying-wetting regimes to elucidate the effects of moisture content, hysteresis and microcracking. *Cement and Concrete Research*, v. 98, p. 136-154, 2017.
- [8] BAMFORTH, P. B. The relationship between permeability coefficients for concrete obtained using liquid and gas. *Magazine Of Concrete Research*, v. 39, n. 138, p. 3-11, 1987.
- [9] ABBAS, A.; CARCASSES, M.; OLLIVIER, JP. Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation. *Materials And Structures*, v. 32, n. 1, p. 3-8, 1999.
- [10] BAROGHEL-BOUNY, V. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part II: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction. *Cement And Concrete Research*, v. 37, n. 3, p. 438-454, 2007.
- [11] Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages - RILEM. TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. (RILEM Recommendation TC 116-PCD). *Materials and Structures*, v. 32, p. 174-179, 1999.
- [12] VILLANI, C.; LOSER, R.; WEST, M. J.; DI BELLA, C.; LURA, P.; WEISS, W. J. An inter lab comparison of gas transport testing procedures: Oxygen permeability and oxygen diffusivity. *Cement And Concrete Composites*, v. 53, p. 357-366, 2014.
- [13] KAMECHE, Z. A.; GHOMARI, F.; CHOINSKA, M.; KHELIDJ, A. Assessment of liquid water and gas permeabilities of partially saturated ordinary concrete. *Construction And Building Materials*, v. 65, p. 551-565, 2014.
- [14] YANG, K.; YANG, C.; MAGEE, B.; NANUKUTTAN, S.; YE, J. Establishment of a preconditioning regime for air permeability and sorptivity of alkali-activated slag concrete. *Cement And Concrete Composites*, v. 73, p. 19-28, 2016.

- [15] GUI, Q.; QIN, M.; LI, K. Gas permeability and electrical conductivity of structural concretes: Impact of pore structure and pore saturation. *Cement And Concrete Research*, v. 89, p. 109-119, 2016.
- [16] GÜNEYİSİ, E.; GESOĞLU, M.; KARAOĞLU, S.; MERMERDAŞ, K. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Construction And Building Materials*, v. 34, p. 120-130, 2012.
- [17] MEDINA, C.; FRÍAS, M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I.; THOMAS, C.; POLANCO, J.A. Gas permeability in concrete containing recycled ceramic sanitary ware aggregate. *Construction And Building Materials*, v. 37, p.597-605, 2012.
- [18] GESOĞLU, M.; GÜNEYİSİ, E.; ÖZTURAN, T.; MERMERDAŞ, K. Permeability properties of concretes with high reactivity metakaolin and calcined impure kaolin. *Materials And Structures*, v. 47, n. 4, p. 709-728, 2013.
- [19] ATMACA, N.; ABBAS, M. L.; ATMACA, A. Effects of nano-silica on the gas permeability, durability and mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *Construction And Building Materials*, v. 147, p. 17-26, 2017.
- [20] KUBISSA, W.; GLINICKI, M. A. Influence of internal relative humidity and mix design of radiation shielding concrete on air permeability index. *Construction And Building Materials*, v. 147, p. 352-361, 2017.
- [21] CHEN, W. et al. Water retention and gas relative permeability of two industrial concretes. *Cement And Concrete Research*, v. 42, n. 7, p. 1001-1013, 2012.
- [22] AMARIO, M. Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC), Rio de Janeiro, 2015, dissertação (Mestrado) - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 242 f.
- [23] YANG, K.; BASHEER, P.A.M.; BAI, Y.; MAGEE B.J.; LONG, A.E. Development of a new in situ test method to measure the air permeability of high performance concretes. *Ndt & e International*, v. 64, p. 30-40, 2014.
- [24] HOPPE FILHO, J. Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais, Santa Maria, 2002, dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 204 f.
- [25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E178-08: Standard Practice for Dealing With Outlying Observations.: ASTM International, 2008.
- [26] CARCASSÈS, M.; ABBAS, A.; OLLIVIER, J. -P.; VERDIER, J. An optimised preconditioning procedure for gas permeability measurement. *Materials And Structures*, v. 35, n. 1, p. 22-27, 2002.
- [27] IRIYA, K.; JACOBS, F.; KNECHT, B.; WITTMANN, F.H. Cementitious backfill materials for a L/ILW repository - Investigations of gas transport properties. *Nuclear Engineering And Design*, v. 129, n. 1, p. 49-55, 1991.
- [28] ROMER, M. Effect of moisture and concrete composition on the torrent permeability measurement. *Materials And Structures*, v. 38, n. 5, p. 541-547, 2005.
- [29] PARROTT, L. J. Moisture conditioning and transport properties of concrete test specimens. *Materials And Structures*, v. 27, n. 8, p. 460-468, 1994.
- [30] OLLIVIER, J.; MASSAT, M.; PARROTT, L. Parameters influencing transport characteristics. In: *Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability*, de Edited by Kropp and Hilsdorf, p. 33-96. State of the art report by rilem technical committee TC 116- PCD, Performance of concrete as a criterion of its durability. E&FN Spon., 1995.
- [31] DINKU, A.; REINHARDT, H. W. Gas permeability coefficient of cover concrete as a performance control. *Materials And Structures*, v. 30, n. 7, p. 387-393, 1997.

- [32] YANG, K.; BASHEER, P.A.M.; MAGEE, B.; BAI, Y. Investigation of moisture condition and Autoclam sensitivity on air permeability measurements for both normal concrete and high performance concrete. *Construction And Building Materials*, v. 48, p. 306-314, 2013.
- [33] HEEDE, P. V. D; GRUYAERT, E.; BELIE, N. Transport properties of high-volume fly ash concrete: Capillary water sorption, water sorption under vacuum and gas permeability. *Cement And Concrete Composites*, v. 32, n. 10, p. 749-756, 2010.
- [34] PIMENTEL GOMES, F. Curso de estatística experimental. Ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477p.
- [35] RILEM TC 116-PCD. Concrete Durability— An Approach Towards Performance Testing. *Materials and Structures*, v. 32, p. 163–173, 1999.
- [36] AÏT-MOKHTAR, A. et al. Experimental investigation of the variability of concrete durability properties. *Cement And Concrete Research*, v. 45, p. 21-36, 2013.

4. CAPÍTULO II

(Normas de acordo com a Revista IBRACON de Estruturas e Materiais - RIEM)

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE TRANSPORTE DE MASSA DE CONCRETOS, COM ÊNFASE AO PARÂMETRO DE PERMEABILIDADE AO GÁS

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND TRANSPORT OF CONCRETE MASS, WITH EMPHASIS TO THE GAS PERMEABILITY PARAMETER

Resumo

A permeabilidade é considerada como um parâmetro de referência para as análises de durabilidade de estruturas de concreto. Agentes agressivos são conduzidos ao interior do concreto pelo transporte de fluidos através da porosidade interconectada do material. Um método simplificado para a avaliação da permeabilidade ao gás é proposto visando classificar a qualidade de concretos convencionais com relação água/ligante igual a 0,4 e 0,6. Paralelamente, o estudo foi complementado pela avaliação das propriedades mecânicas e de outras propriedades de transporte de massa. A metodologia envolveu ensaios de caracterização do concreto no estado fresco, bem como a determinação da absorção total e por capilaridade, permeabilidade à água, resistência à compressão e módulo de elasticidade, além da avaliação da permeabilidade ao gás. Os resultados evidenciaram melhoria do concreto com a redução da relação a/lig, tanto em relação às propriedades de transporte de massa, quanto em relação às propriedades mecânicas, em decorrência das importantes alterações no sistema de poros do concreto. O concreto com relação a/lig igual a 0,4 possui estrutura mais resistente e rígida e menos permeável. Comparativamente, os resultados mostraram que a permeabilidade à água e ao gás do

concreto podem diferir significativamente. A utilização de gás no ensaio, além de proporcionar uma execução mais fácil e rápida, distinguiu melhor o desempenho entre os dois concretos, sugerindo maior sensibilidade relativa ao ensaio.

Abstract

The permeability is considered as a reference parameter for the analysis of the durability of concrete structures. Aggressive agents are driven into the concrete by the fluid transport through the interconnected porosity of the material. A simplified method for gas permeability evaluation is proposed to classify the quality of conventional concretes with water/binder ratio equal to 0,4 and 0,6. At the same time, the study was complemented by the evaluation of mechanical properties and other properties of mass transport. The methodology involved the characterization tests of the concrete in the fresh state, as well as the determination of the total absorption, capillary absorption, water permeability, compressive strength and modulus of elasticity, as well as gas permeability evaluation. In general, the results showed an improvement of the concrete with the reduction of the w/b ratio both in relation to the mass transport properties and in relation to the mechanical properties of the concrete studied, due to the important changes in the concrete pore system. The concrete with a w / b ratio equal to 0.4 has a more rigid and resistant and less permeable structure. Comparatively, the results showed that the permeability to water and gas to concrete may differ significantly. The use of gas in the test, in addition to making execution easier and faster, better distinguished the quality and performance between the two concretes, suggesting a greater sensitivity regarding the test.

Palavras-chave: Permeabilidade, Absorção, Capilaridade, Resistência, Concreto.

Key words: Permeability, Absorption, Capillarity, Strength, Concrete.

4.1 Introdução

A durabilidade de concretos está diretamente relacionada aos mecanismos de transporte de fluidos ao longo de sua estrutura porosa, pois todos os possíveis mecanismos de deterioração que podem afetar as estruturas de concreto envolvem processos de transporte gasosos ou líquidos. A permeabilidade é considerada como um parâmetro de referência para as análises de durabilidade de estruturas de concreto. De forma geral, os fluidos percolantes podem ser classificados como gases ou líquidos e diversos equipamentos e métodos de ensaio estão disponíveis para avaliações dessa propriedade.

Diversos autores apontam diferenças quando a permeabilidade é medida utilizando água ou gás e, inclusive, favorecem a permeabilidade ao gás como mais atrativa na avaliação das propriedades de transporte de materiais cimentícios. Uma justificativa é o fato de que medições precisas da permeabilidade à água tornam-se lentas e mais difíceis de serem obtidas à medida que a qualidade do concreto melhora, em contraste com o ensaio de permeabilidade ao gás que, além de mais fácil de se executar e de natureza praticamente não destrutiva, requer menos tempo de ensaio e produz resultados mais reprodutíveis [1]. Além disso, processos físico-químicos podem ocorrer durante o ensaio de permeabilidade à água pelos fenômenos de interação entre a água e a matriz, quando é utilizada a água como fluido, causando a alteração da estrutura dos materiais cimentícios [1] [2].

Nesse contexto, buscou-se o estudo envolvendo as propriedades de transporte de massa no concreto e a permeabilidade foi tomada como principal parâmetro, visando a análise comparativa da utilização de água e gás como fluido percolante. Para discutir a questão de durabilidade dos concretos, complementando a verificação de seu desempenho, faz-se importante também a análise das propriedades mecânicas. Sendo assim, paralelamente, o estudo foi complementado pela avaliação da resistência à compressão e módulo de elasticidade.

4.2 Materiais e métodos

4.2.1 Caracterização dos materiais e proporcionamento dos concretos

O primeiro passo consistiu na seleção, quantificação, coleta e caracterização dos materiais empregados. Os concretos, cujos traços e propriedades no estado fresco estão especificados na Tabela 1, foram determinados para 2 níveis de resistência, representados pelas relações água/ligante (a/lig) nominais de 0,4 e 0,6.

Tabela 1: Traços dos concretos estudados

a/lig	Cimento (kg/m ³)	Traço em massa	Aditivos ¹		Propriedades do concreto no estado fresco		
			PF	SP	Abatimento (mm)	Teor de ar incorporado (%)	Massa específica (kg/m ³)
0,4	403	(1:2,32:2,09)	0,85	0,5	145	3,2	2372,6
0,6	265	(1:3,55:3,73)	0,85	0,4	125	3,4	2362,1

¹ Teor (%) em relação à massa de cimento.

Os concretos no estado fresco foram verificados quanto à consistência pelo abatimento de tronco de cone [3], teor de ar incorporado conforme método gravimétrico [4] e pela massa específica [5] (Figura 1). O abatimento requerido foi de 140 ± 20 mm e, para ambas as classes de concreto, os valores situaram-se dentro do intervalo proposto e os concretos apresentaram-se coesos e viscosos.



Figura 1. Avaliação das propriedades no concreto fresco. (a) (b) Abatimento de tronco de cone; (c) Determinação do teor de ar incorporado

Foi utilizado o cimento CPV-ARI [6], ou Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, agregado graúdo natural saturado com superfície seca (SSS) com dimensão máxima característica (DMC) de 25 mm [7], massa específica igual a $2,64 \text{ g/cm}^3$ [8] e absorção de 0,7% [8], e areia natural SSS com massa específica igual a $2,63 \text{ g/cm}^3$ [9], DMC igual a 4,75 mm, módulo de finura igual a 2,81 [7], e absorção de 0,5% [10]. De forma a obter uma trabalhabilidade adequada, foram utilizados aditivos cujas características e caracterização conforme NBR 10908:2008 [11] constam na Tabela 2.

Tabela 2: Características dos aditivos utilizados na dosagem

Nome comercial	Categoria	pH	Densidade (g/cm^3)	Sólidos Totais (%)
Sikament RM 320 CO	Polifuncional	8,68	1,193	40,45
Sika Viscocrete 6900	Superplastificante	4,74	1,108	46,19

O cimento utilizado, com massa específica e resistência à compressão aos 7 dias iguais a 3,16 g/cm³ e 35,3 MPa e óxido de cálcio (59,7%) e dióxido de silício (19,6) como compostos principais, tem suas características químicas e físico-mecânicas expostas na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização do cimento

Caracterização física e mecânica				Composição química		
Ensaio	Resultado		Componentes químicos		Teores (%)	
Massa específica	g/cm ³	3,16	Perda ao fogo		1,33	
			Resíduo insolúvel		1,76	
Área específica	cm ² /g	4040	Dióxido de silício – SiO ₂		19,57	
			Óxido de cálcio- CaO		59,70	
Finura na peneira 200	%	0,2	Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃		2,99	
			Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃		4,87	
Tempo de início de pega	h	2:35	Anidrido Sulfúrico – SO ₃		4,16	
			Óxido de magnésio – MgO		5,90	
Tempo de fim de pega	h	3:40	Óxido de Titânio – TiO ₂		0,26	
			Pentóxido de fósforo – P ₂ O ₅		0,14	
			Óxido de Manganês – Mn ₂ O ₃		0,05	
Água de consistência – Pasta	%	30,0	Alcalis Totais	Óxido de sódio – Na ₂ O		0,33
				Óxido de potássio – K ₂ O		0,95
				Equivalente alcalino		0,93
Resistência à compressão	3 dias	MPa	29,5	Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	7,07	
	7 dias	MPa	35,3			
	28 dias	MPa	42			Óxido de cálcio livre

4.2.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

Conforme prescrições da NBR 5738:2015 [12], foram moldados corpos de prova de 10x20 cm para os ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, absorção por imersão e absorção por capilaridade, e para os ensaios de permeabilidade à água e ao gás foram utilizados moldes cilíndricos de 15x30 cm. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e submetidos a cura úmida, conforme as prescrições da NBR 9479:2006 [13]. Nessas condições, foram mantidos até a idade de ensaio, exceto para as amostras sujeitas ao ensaio de permeabilidade ao gás, cujo preparo para ensaio tem mais etapas e maior duração (item 4.2.3.5) e teve início por volta dos 60 dias de idade.

4.2.3 Propriedades do concreto no estado endurecido

4.2.3.1 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

Os ensaios foram realizados em triplicata (3 amostras) segundo a NBR 5739:2007 [14] e NBR 8522:2017 [15], com corpos-de-prova cilíndricos (10x20 cm) para

cada concreto, nas idades de 3, 7, 28, 91 e 182 dias. Para tal, os corpos-de-prova tiveram a superfície do topo e base regularizados através do desgaste mecânico em retífica e, posteriormente, foram envoltos em filme plástico de polietileno, conforme Figura 2 (a).

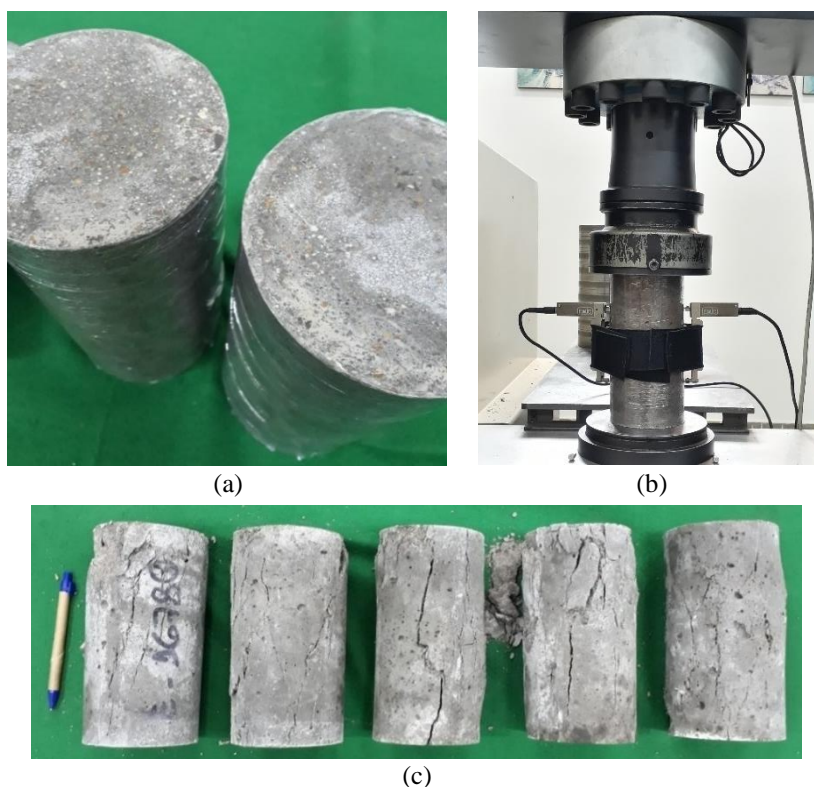


Figura 2. Corpos de prova durante ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade. (a) Superfície retificada; (b) Corpo de prova na prensa; (c) Corpos de prova após o rompimento

A máquina de ensaio utilizada é eletromecânica, microprocessada, com capacidade de até 1000 kN. A medição da força é feita através de célula de carga com indicação digital e os carregamentos e descarregamentos são controlados por *software*. No procedimento de ensaio do módulo de elasticidade, sob o plano de carregamento secante, o corpo de prova é submetido a ciclos sucessivos de carregamento e descarregamento para que sejam medidas as deformações por meio de extensômetros com resolução de 0,0001 mm e sensores independentes dispostos como mostra a Figura 2 (b). As tensões aplicadas são de 0,5 MPa (limite inferior) e a correspondente a 30% da tensão máxima (limite superior), obtida anteriormente no ensaio de resistência à compressão.

4.2.3.2 Absorção por imersão total

O ensaio de absorção por imersão dá um indicativo de volume de poros e foi realizado em triplicata aos 182 dias, seguindo as recomendações da norma NBR

9778:2005 [16], que prescreve a secagem dos corpos de prova em estufa ($105\pm 5^{\circ}\text{C}$) até massa constante, a imersão em água por 72 horas e fervura por mais 5 horas. A partir das determinações feitas e de expressões padronizadas obteve-se a absorção de água, expressa em porcentagem de água absorvida, o índice de vazios e a massa específica do concreto.

4.2.3.3 Absorção por capilaridade

O ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade foi executado aos 182 dias e conforme NBR 9779:2012 [17], que prescreve a secagem dos corpos de prova em estufa ventilada a $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 72 dias e posterior pesagem e contato com uma lâmina d'água de 5 mm por 72 horas. É determinada a massa total dos 3 corpos de prova nas idades de 3, 6, 24, 48 e 72 horas e o resultado é expresso por massa de água absorvida por área de contato do corpo de prova.

4.2.3.4 Permeabilidade à água

O coeficiente de permeabilidade à água foi obtido conforme a NBR 10786:2013 [18]. A Figura 3 ilustra o processo de preparação e execução do ensaio, que foi realizado aos 182 dias, utilizando 3 corpos de prova cilíndricos de 15x15 cm, obtidos a partir da extração da região central de corpos de prova de 15x30 cm.

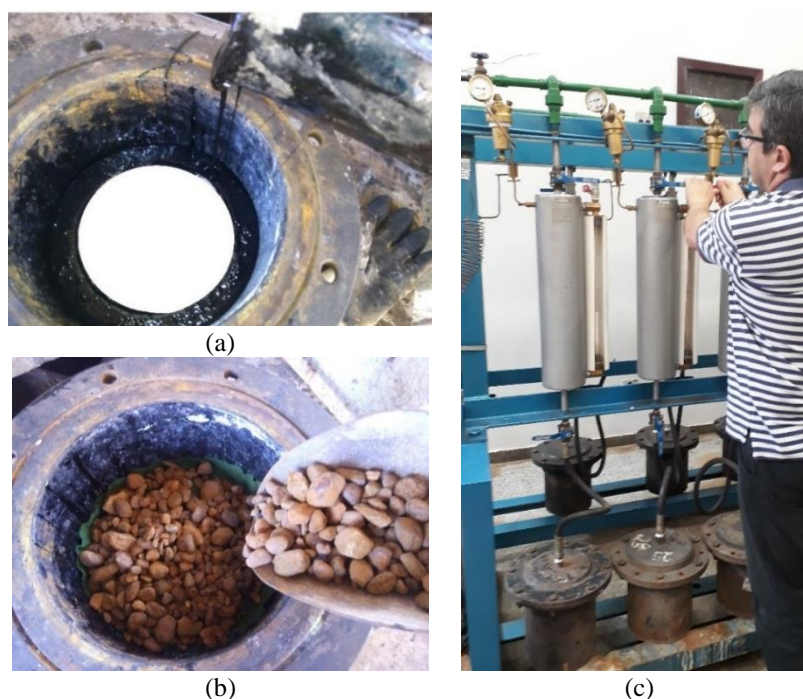


Figura 3. Ensaio de permeabilidade à água sob pressão. (a) Adição de material selante entre o corpo de prova e as paredes da câmara;(b) Seixo colocado sobre o filtro, de modo a distribuir e orientar o fluxo de água e (c) Disposição geral dos permeômetros

No ensaio, a água é forçada (aplicação de pressão no sistema) através do corpo de prova para medir a velocidade de percolação. Para determinação da permeabilidade, a vazão é determinada repetidas vezes, por vários dias, fazendo com que o ensaio completo tenha duração de cerca de 500 horas.

4.2.3.5 Permeabilidade ao gás

O ensaio de permeabilidade ao gás consiste numa etapa de preparação e pré-condicionamento das amostras para o equilíbrio da umidade interna, seguida do ensaio com aplicação de uma determinada pressão de gás em uma das faces da amostra, em regime permanente, para a determinação da sua vazão de saída. Para a realização do ensaio foi utilizado um método simplificado de pré-condicionamento, desenvolvido e validado em uma etapa anterior do presente estudo. O método foi atestado como adequado, em termos de variabilidade e precisão dos resultados, e, quando comparado ao método Cembureau [19], foi julgado como mais prático e flexível, sendo recomendado em sua substituição. O ensaio de permeabilidade ao gás propriamente dito, bem como o equipamento utilizado para tal, seguem as recomendações da RILEM [19].

a. Preparação das amostras

Após regime de cura dos corpos de prova de 15x30 cm, faz-se necessária a extração de discos de 50 ± 1 mm de espessura da região central, de forma que cada disco seja proveniente de corpos de prova distintos. Posteriormente é feita a impermeabilização lateral das amostras extraídas, de forma a evitar a formação de gradientes de umidade radiais na etapa de pré-condicionamento. Nesse estudo, foi utilizada a resina acrílica.

b. Pré-condicionamento

O procedimento simplificado de pré-condicionamento consiste na exposição das amostras em atmosfera controlada até o equilíbrio e posterior redistribuição da umidade excedente. As amostras são colocadas em câmara climática, a 50°C e umidade relativa igual a 50%, pelo tempo necessário até que seja atingida a constância de massa, adotando como critério de precisão a variação máxima de 0,05% em um intervalo de 24 horas.

Após exposição das amostras até o equilíbrio de massa, dá-se início à fase de redistribuição da umidade. Para tal, amostras são envoltas em sacos impermeáveis de forma que não haja troca de umidade com o ambiente. Foi utilizado filme de PVC (polietileno), dois sacos plásticos de polipropileno selados a quente, seguidos por um saco

BOPP metalizado (polipropileno biorientado com camada de alumínio), também selado a quente. As amostras seladas são expostas por 7 dias à temperatura de 50°C, que acelera a redistribuição dos gradientes de umidade, colaborando para uma distribuição homogênea ao longo do corpo de prova.

A Figura 4 ilustra as amostras expostas ao ambiente controlado e em fase de redistribuição. Terminado o processo, as amostras são transportadas para o ambiente de realização do ensaio com pelo menos 24 horas de antecedência ao ensaio para equilíbrio térmico das amostras com o ambiente (20°C).

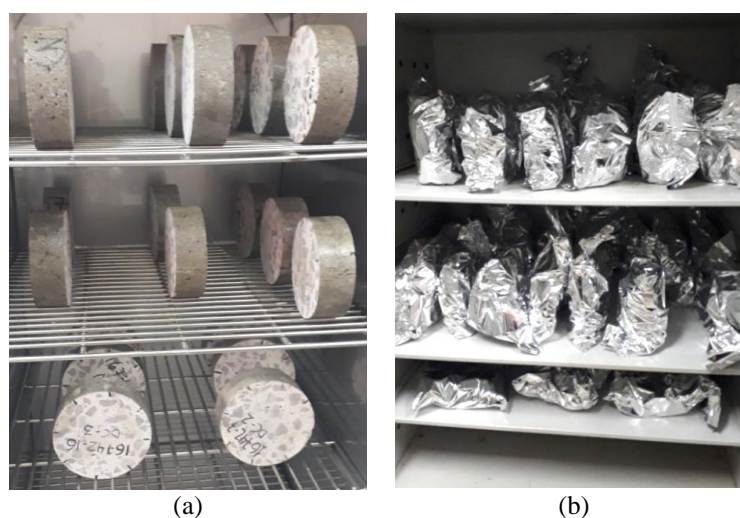


Figura 4. Amostras durante pré-condicionamento. (a) Câmara climática; (b) Redistribuição da umidade na estufa

a. Ensaio

O procedimento de ensaio obedeceu às recomendações da RILEM TC 116 - PCD [19] para determinação do coeficiente de permeabilidade ao gás do concreto, utilizando oxigênio como gás percolante e 3 discos de cada tipo de concreto extraídos de corpos de prova distintos.

As amostras são medidas no diâmetro e na altura, adotando-se a média de quatro medidas realizadas. Após a instalação da amostra na célula de pressão e caracterização de fluxo constante de gás, procede-se à leitura das taxas de fluxo de gás para as pressões recomendadas de 1,5 bar, 2,0 bar e 3,0 bar. O cálculo do coeficiente de permeabilidade aparente (K_i) é feito baseado na equação de Hagen-Poiseuille, a qual aborda o fluxo laminar de um fluido compressível através de corpos porosos com pequena capilaridade, sob condições uniformes. O coeficiente médio de permeabilidade ao gás K é determinado considerando a média aritmética dos valores obtidos para cada estágio de pressão e das

três amostras. O ensaio completo, resumido esquematicamente na Figura 5, durou cerca de 2 horas para os concretos deste estudo.

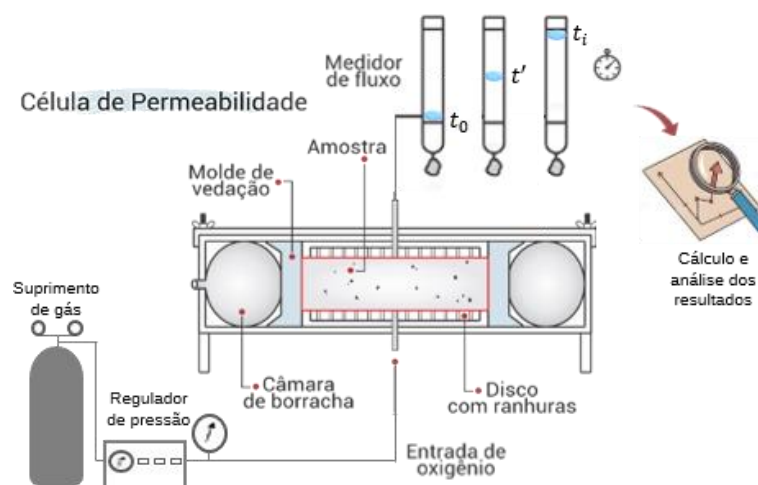


Figura 5. Diagrama esquemático do ensaio de permeabilidade ao gás

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Propriedades mecânicas

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados médios de resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos avaliados nas idades 3, 7, 28, 91 e 182 dias, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados. A Figura 6 e 7 esboçam, respectivamente, a evolução da resistência e do módulo de elasticidade ao longo do tempo, para as duas relações a/lig estudadas.

Tabela 4: Resistência à compressão e módulo de elasticidade nas várias idades e para os dois tipos de concreto estudados

a/lig	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)			Módulo de elasticidade (GPa)		
		Média	Desvio Padrão	CV (%)	Média	Desvio Padrão	CV (%)
0,4	3	40,7	2,35	5,77	32,6	0,15	0,47
	7	54,6	1,02	1,87	34,6	1,23	3,56
	28	62,0	2,54	4,09	38,2	0,21	0,55
	91	69,1	0,31	0,45	40,3	1,61	3,99
	182	63,8	5,63	8,82	35,9	0,15	0,42
0,6	3	23,1	1,26	5,44	27,1	0,29	1,06
	7	30,4	0,41	1,36	28,2	0,45	1,61
	28	34,9	1,35	3,88	32,8	1,14	3,47
	91	38,3	0,75	1,95	33,9	1,13	3,34
	182	35,5	1,09	3,06	26,9	0,05	0,19

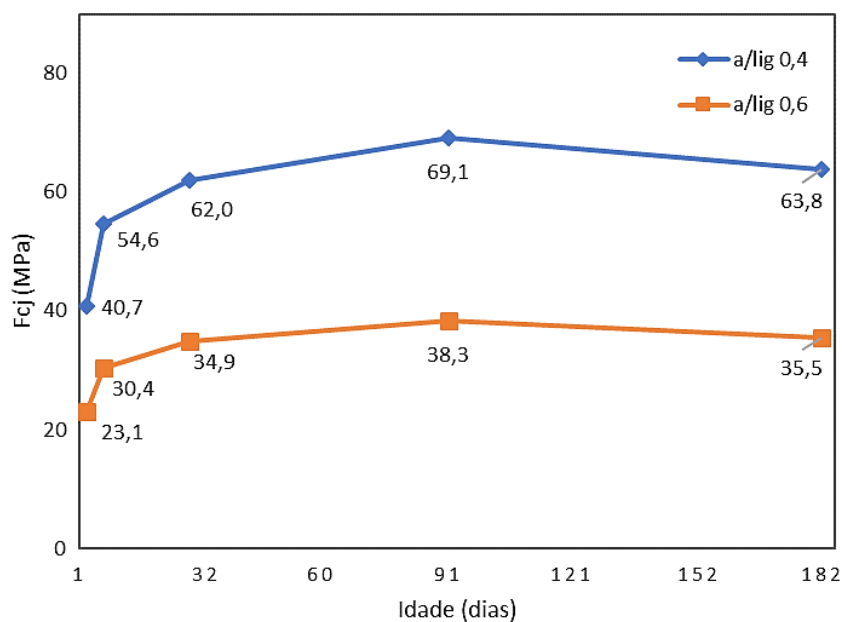


Figura 6. Evolução da resistência à compressão em função da idade e tipo de concreto

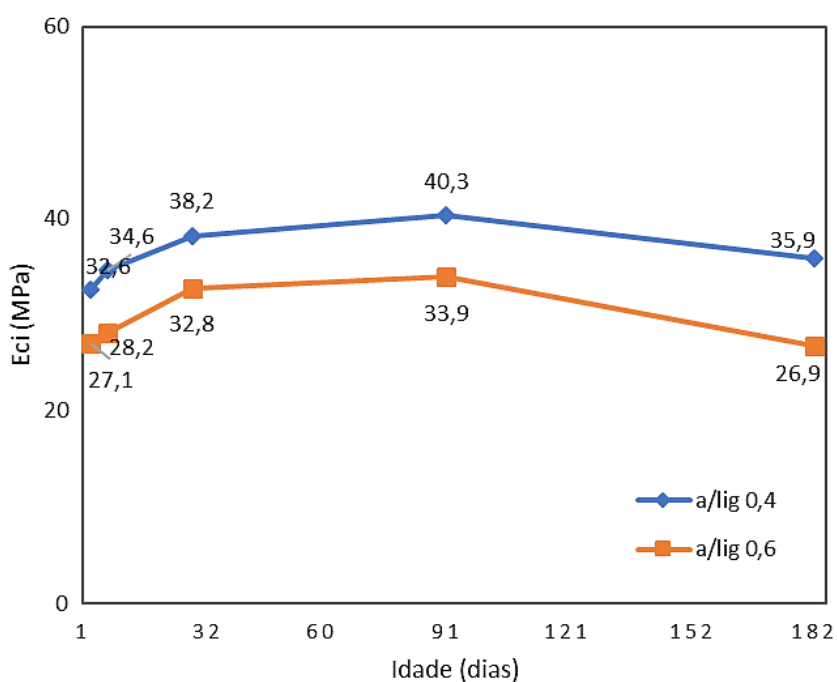


Figura 7. Evolução do módulo de elasticidade em função da idade e tipo de concreto

Os coeficientes de variação, em geral, são baixos (de 0 a 8,82%). Os resultados mostraram a influência que a relação a/lig e a idade dos concretos exercem sobre as características mecânicas. Nota-se na Tabela 4, que o concreto com relação a/lig 0,4 apresentou valores médios maiores que o concreto mais pobre, em todas as idades e para ambas as propriedades. Além disso, há tendência de crescimento dos valores médios

conforme evolução da idade dos concretos, exceto para a idade de 182 dias que, diferente do esperado, forneceu valores médios menores.

Uma investigação realizada a esse respeito identificou como a causa do comprometimento das propriedades mecânicas uma falha durante a retificação das amostras em tal idade, na qual foi utilizado o capeamento com argamassa de enxofre em vez do desgaste mecânico. O segundo método foi definido no programa experimental por se mostrar uma alternativa interessante para todos os níveis de resistência e a conduta diferente da planejada provavelmente interferiu, subestimando os resultados. Tal conclusão foi obtida a partir de ocorrências anteriores no laboratório e em outros estudos [20] [21] que foram justificadas pelo fato do capeamento com enxofre não desenvolver, na ocasião do ensaio, resistência superior à resistência do corpo de prova.

Tem-se que, no que concerne à resistência à compressão, que vários fatores influenciam a sua medida e que quanto mais baixa a relação a/lig melhor é o desempenho dos concretos por causa da menor quantidade de água na mistura, resultando em um índice de vazios reduzido no interior do concreto [22]. Observa-se na Figura 6 que o valor máximo de resistência para a relação a/lig 0,4 foi de aproximadamente 69 MPa, enquanto para a relação a/lig 0,6 foi de 38,3 MPa, aos 91 dias de idade. Houve, portanto, um incremento da resistência de cerca de 57% ao reduzir a relação a/lig de 0,6 para 0,4. Logo, os resultados no presente estudo concordam com o padrão esperado. Além disso, analisando a evolução dos valores conforme a idade, nota-se que ambos os concretos atingiram boa parte da resistência (cerca de 90% do valor máximo) já aos 28 dias de idade.

O módulo de elasticidade expressa uma medida da rigidez dos concretos e maiores valores de módulo refletem menor porosidade e estrutura mais densa e compacta do material. Assim, o comportamento esperado é de que o módulo seja maior para concretos com menores relações a/lig [22] [23]. De fato, o concreto com relação a/lig igual a 0,4 apresentou valores mais altos de módulo de elasticidade quando comparado ao concreto com a/lig igual a 0,6, com valor máximo igual a 40,3 GPa e 33,9 GPa, aos 91 dias, respectivamente. Observa-se também que a evolução da idade tende a provocar aumento no módulo de elasticidade e que ambos os concretos atingiram cerca de 96% do módulo de elasticidade já aos 28 dias de idade.

4.3.2 Absorção total e por capilaridade

A absorção total de água por imersão e o índice de vazios dos concretos são bons indicadores da porosidade aberta acessível à água desse material. Os resultados médios

desses indicadores, bem como a massa específica dos concretos, aos 182 dias, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores médios de absorção de água por imersão total, índice de vazios e massa específica dos concretos estudados

a/lig	Absorção (%)		Índice de vazios (%)		Massa específica (kg/dm ³)	
	Média (Desvio Padrão)	CV (%)	Média (Desvio Padrão)	CV (%)	Média (Desvio Padrão)	CV (%)
0,6	4,15 (0,03)	0,71	9,55 (0,07)	0,69	2,51 (0,00)	-
0,4	2,97 (0,09)	2,97	6,95 (0,19)	2,72	2,54 (0,01)	0,23

Os concretos com relação a/lig igual a 0,4 apresentaram menor absorção e menor índice de vazios quando comparados com os concretos com relação a/lig igual a 0,6. Este resultado é esperado, uma vez que a relação a/lig é determinante e considerada como o principal parâmetro controlador na porosidade do concreto [22]. Os valores de massa específica são próximos para os dois concretos estudados.

Segundo os critérios de classificação do boletim informativo nº 192 do *Comité Euro-internacional du Béton* - CEB [24], valores de absorção abaixo de 3% traduzem qualidade boa do concreto, valores entre 3% e 5% traduzem qualidade média e valores acima de 5% refletem qualidade pobre dos concretos. Nesse contexto e segundo um ponto de vista prático, o concreto com relação a/lig 0,4 apresenta boa qualidade e permeabilidade baixa, enquanto o concreto com a/lig 0,6 é classificado como de qualidade média segundo os critérios apresentados.

Na Tabela 6, encontram-se os resultados dos valores máximos do ensaio de absorção de água por capilaridade das amostras analisadas aos 182 dias. Também são expostos os resultados da altura máxima que a água atingiu no interior do corpo de prova, bem como a massa de água absorvida.

Tabela 6: Resultados médios do ensaio de absorção por capilaridade

a/lig	Altura capilar (cm)	Água absorvida (g)	Absorção por capilaridade (g/cm ²)	Desvio Padrão (g/cm ²)	CV (%)
0,6	4,03	34,28	0,44	0,08	17,95
0,4	4,43	30,80	0,39	0,04	9,76

Observa-se maior absorção relativa ao concreto com relação a/lig igual a 0,6, mas ambos os concretos apresentaram valores relativamente próximos. Analisando as

alturas de ascensão capilar, é verificado valor máximo referente ao concreto com relação a/lig 0,4. O concreto com a/lig 0,6 teve menor altura de ascensão capilar, mas apesar disso absorveu mais massa de água, indicando maior volume de poros interconectados. Esses resultados permitem a interpretação de que, conforme já era esperado, houve refinamento dos poros e redução do raio dos capilares do concreto com menor relação a/lig, gerando aumento da força de sucção e, conseqüentemente, maior altura capilar média.

O parâmetro de absorção de água por capilaridade, por si só, não fornece previsão da vida útil dos materiais cimentícios com precisão, mas, como os processos de deterioração dos concretos envolvem o transporte de fluido e íons agressivos pela rede de poros, ainda é considerado indicador da qualidade desses materiais [25]. Sendo assim, a absorvidade pode ser correlacionada com a probabilidade de degradação, pois materiais com elevados valores de absorvidade, numa mesma condição ambiental, terão maior probabilidade de serem deteriorados e terem sua vida útil reduzida. Nesse contexto, o concreto com relação a/lig 0,6, que tem absorção por capilaridade 11,5% maior que o concreto com relação a/lig 0,4, tem maior chance de deterioração e redução da vida útil, no tocante ao fluxo de massa devido à capilaridade.

4.3.3 Permeabilidade ao gás x permeabilidade à água

A permeabilidade dos fluidos no interior do concreto regula praticamente todos os mecanismos de deterioração do material e, por isso, é considerada uma propriedade extremamente importante para a durabilidade das estruturas de concreto. Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os coeficientes de permeabilidade ao gás e à água, respectivamente, dos concretos estudados, aos 182 dias.

Tabela 7: Coeficientes de permeabilidade ao gás

a/lig	Permeabilidade ao gás ($\times 10^{-18}$ m ²)	Desvio Padrão ($\times 10^{-18}$ m ²)	CV (%)
0,4	1,65	0,15	9,28
0,6	11,97	0,25	2,10

Tabela 8: Coeficientes de permeabilidade à água

a/lig	Permeabilidade à água ($\times 10^{-12}$ m/s)	Desvio Padrão ($\times 10^{-12}$ m/s)	CV (%)
0,4	2,78	0,12	4,39
0,6	5,86	0,46	7,79

Para a permeabilidade ao gás, tem-se que o concreto com a/lig 0,4 apresenta desempenho superior, com coeficiente de permeabilidade de $1,65 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, enquanto o concreto com a/lig 0,6 é mais permeável e tem coeficiente K igual a $11,97 \times 10^{-18} \text{ m}^2$. Em comparação, os diferentes tipos de concreto apresentaram resultados que diferem em cerca de uma ordem de magnitude. O melhor desempenho quanto à permeabilidade conforme menor relação a/lig é um comportamento esperado, visto que se trata de um parâmetro que depende das características de conformação das partículas e que, portanto, pode prover indicativo das condições microestruturais do concreto. De maneira geral, tem-se menor porosidade e baixa conectividade dos poros para os concretos com menor relação a/lig.

Conforme critério apontado por Zaharieva et al. [26], o coeficiente de permeabilidade ao gás de ambos os concretos tem ordem de grandeza dentro do intervalo aceito para o concreto convencional não exposto a ambientes agressivos (de 10^{-18} a 10^{-17} m^2). Já Lee, Mccarthy e Dhir [27], com relação à durabilidade, estabelecem que há três níveis de qualidade conforme os valores do coeficiente de permeabilidade ao gás K, sendo que abaixo de $10 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ o concreto é considerado bom, entre 10×10^{-17} e $30 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ é moderado e acima de 30×10^{-17} é pobre. Nesse ponto de vista, ambos os concretos são considerados bons quanto à durabilidade, isto é, de baixa permeabilidade ao gás.

Quanto à permeabilidade à água, são observados coeficientes com a mesma ordem de grandeza para ambos os concretos. O concreto com relação a/lig 0,6 teve permeabilidade à água cerca de 2 vezes maior e igual a $5,86 \times 10^{-12} \text{ m/s}$, enquanto o de a/lig 0,4 foi igual a $2,78 \times 10^{-12} \text{ m/s}$.

O *Comité Euro-internacional du Béton* (CEB) apresenta critérios para a avaliação da permeabilidade à água de concretos [24] e segundo esses critérios os concretos podem ser avaliados de baixa permeabilidade e qualidade boa quando o coeficiente é menor que 10^{-12} m/s , de qualidade e permeabilidade média quando compreendido entre 10^{-12} e 10^{-10} m/s e de permeabilidade alta (concreto pobre) quando a permeabilidade, em m/s, é maior que 10^{-10} . De acordo com esses critérios, ambos os concretos podem ser avaliados como de qualidade e permeabilidade média, por apresentarem valores de permeabilidade entre 10^{-12} e 10^{-10} m/s .

Para comparar a permeabilidade de concretos obtidos a partir de ensaios usando diferentes fluidos, é necessário definir a permeabilidade intrínseca, que teoricamente é aquela dependente somente da estrutura porosa do material. Portanto, para estabelecer relação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos com o uso de água e oxigênio, os

coeficientes de permeabilidade à água devem ser convertidos em unidades de m^2 . Para tal, utilizou-se uma abordagem realizada por Bamforth [28], que assume que, para a água, o coeficiente de permeabilidade intrínseca em unidades de m^2 é de aproximadamente 10^7 vezes o coeficiente, em unidades de m/s. Adotando essa abordagem para conversão dos valores de permeabilidade à água, ambos os coeficientes ficam na mesma unidade e são comparados, conforme exposto na Tabela 9.

Tabela 9: Comparação dos coeficientes de permeabilidade à água e ao gás

a/lig	Permeabilidade à água ($\times 10^{-18} m^2$)	Permeabilidade ao gás ($\times 10^{-18} m^2$)	$K_{gás}/K_{água}$
0,4	0,28	1,65	5,94
0,6	0,59	11,97	20,42

Neville [23] expõe que, teoricamente, o coeficiente de permeabilidade intrínseca em m^2 de um determinado concreto deve ser o mesmo independentemente de ser utilizado gás ou líquido no ensaio, ou seja, se os valores calculados do coeficiente de permeabilidade à água e ao gás representarem a verdadeira permeabilidade intrínseca do concreto, os valores devem ser semelhantes. Entretanto, na prática, os gases resultam em maior valor de coeficiente, pois os dois fluxos causam diferentes resistências nas paredes dos poros e, conseqüentemente, o perfil de velocidade do escoamento é diferente num mesmo sistema de poros, em condições análogas. De fato, foi observado na Tabela 9 valores menores de permeabilidade, na ordem de $10^{-19} m^2$, quando a água foi utilizada como fluido na determinação da permeabilidade intrínseca.

A teoria do deslizamento de gás foi identificada como a principal explicação para as diferenças significativas registradas entre os coeficientes de permeabilidade à água e ao gás para o concreto, mesmo quando expressos em termos de coeficiente intrínseco [23] [28]. Segundo essa teoria, como mostra a Figura 8, no escoamento de gases não há uma lâmina de fluido nas paredes dos poros e os gases possuem velocidades finitas (maiores que zero) nesse limite, enquanto os líquidos possuem velocidades nulas devido ao atrito [29]. Devido a esse fenômeno, valores maiores de coeficientes de permeabilidade são obtidos quando gases são utilizados como fluido.

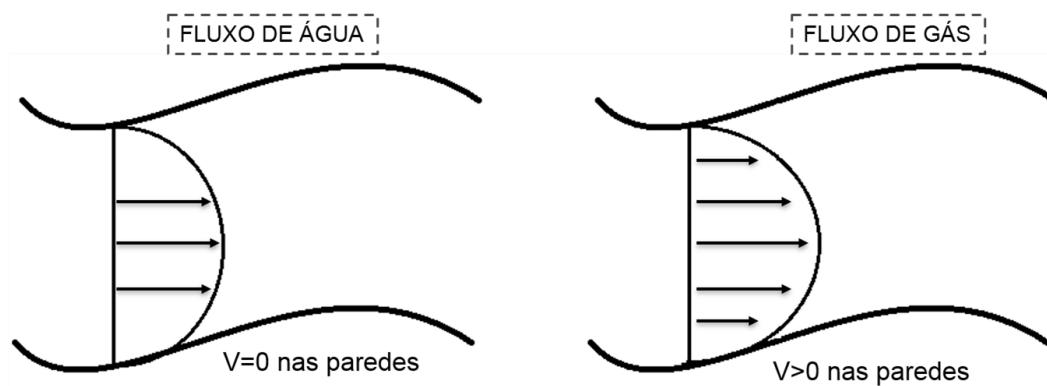


Figura 8. Esquema demonstrativo do perfil de velocidade dos fluidos nas paredes dos poros

Neville [23] afirma que a relação entre a permeabilidade ao gás e a permeabilidade à água ($K_{\text{gás}}/K_{\text{água}}$) varia de 6 até 100. Foi observado nesse estudo diferença de 20,4 para o concreto com a/lig 0,6 e 5,9 para o concreto com a/lig 0,4.

Bamforth [28] estudou quatro tipos de concreto para medir o coeficiente de permeabilidade usando água e nitrogênio e, em todos os casos, a permeabilidade ao gás foi significativamente superior à permeabilidade à água, com a diferença de 5,6 a 78,5, de modo que a diferença aumentava à medida que a permeabilidade era reduzida. Tal efeito foi explicado pelo fenômeno de deslizamento do gás. Nesse estudo foi utilizada maior faixa de concretos com permeabilidades distintas, cujos valores diferiram de 3 a 4 ordens de grandeza.

No presente estudo, observou-se tendência diferente nos resultados, com diferença maior relativa ao concreto mais permeável, com a/lig 0,6. No entanto, a pequena faixa de concretos estudada e com valores relativamente próximos de permeabilidade não permite uma análise aprofundada e a elaboração de uma justificativa confiável a esse respeito. Portanto, os presentes resultados apresentam as diferenças esperadas entre as permeabilidades, com maiores valores de permeabilidade quando utilizada a água como fluido, e relações dentro da faixa de variação esperada, apesar da tendência diferente em relação à maior diferença esperada para concretos menos permeáveis.

Ambos os parâmetros apontaram um desempenho melhor do concreto com a/lig 0,4, sendo a permeabilidade ao gás cerca de 10 vezes menor que para o concreto com a/lig 0,6. Quanto à permeabilidade à água, ainda que o parâmetro tenha acusado menor permeabilidade para o concreto com menor relação a/lig , os resultados para ambos os concretos foram próximos, na mesma ordem de grandeza, demonstrando menor sensibilidade ao distinguir a qualidade entre os dois tipos de concreto estudados.

Tem-se, portanto, que o ensaio de permeabilidade ao gás distinguiu melhor a qualidade e o desempenho entre os dois concretos e que os resultados relativamente próximos de permeabilidade à água sugerem menor sensibilidade relativa ao ensaio, conforme mencionado anteriormente por outros autores [2] [30] [28]. Além disso, a avaliação da permeabilidade ao gás foi de mais fácil e rápida execução, com resultados satisfatórios quanto à variabilidade e precisão, confirmando tal parâmetro como importante indicador da qualidade do concreto, com potencial de utilização mais corriqueiramente no meio técnico em avaliações quanto à durabilidade.

4.4 Conclusões

Os resultados evidenciaram melhoria do concreto com a redução da relação a/lig tanto em relação às propriedades de transporte de massa, quanto em relação às propriedades mecânicas dos concretos estudados, em decorrência das importantes alterações no sistema de poros do concreto. A avaliação das propriedades mecânicas fornece indicativo de que o concreto com relação água/ligante igual a 0,4 possui uma estrutura mais densa e compacta pela maior rigidez e resistência mecânica do material. Além disso, ocorreu refinamento dos poros e menor volume de poros interconectados.

Quanto à avaliação da permeabilidade, os resultados mostraram que, mesmo quando expressa em termos de coeficiente intrínseco, a permeabilidade à água e ao gás ao concreto podem diferir significativamente. A utilização de gás na investigação da durabilidade distinguiu melhor a qualidade e o desempenho entre os dois concretos, sugerindo maior sensibilidade relativa ao ensaio. Além disso, o ensaio de permeabilidade ao gás foi de mais fácil e rápida execução e forneceu bons resultados, confirmando tal parâmetro como importante indicador da qualidade do concreto, com potencial de utilização em avaliações práticas pelo meio técnico. Portanto, fica evidenciada a relevância do parâmetro e a contribuição do estudo da permeabilidade ao gás na avaliação da durabilidade do concreto.

4.5 Referências bibliográficas

- [1] VILLANI, C.; LOSER, R.; WEST, M. J.; DI BELLA, C.; LURA, P.; WEISS, W. J. An inter lab comparison of gas transport testing procedures: Oxygen permeability and oxygen diffusivity. *Cement And Concrete Composites*, v. 53, p. 357-366, 2014.
- [2] BAROGHEL-BOUNY, V. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part II: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction. *Cement And Concrete Research*, v. 37, n. 3, p. 438-454, 2007.

- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 47: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2008.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10908: Aditivos para argamassa e concreto - Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 2008.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9479: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10786: Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 2013.
- [19] Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages - RILEM. TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. (RILEM Recommendation TC 116-PCD). *Materials and Structures*, v. 32, p. 174-179, Apr 1999.
- [20] CHIES, J. A.; SILVA FILHO, L. C. P.; ROHDEN, A. B. Influência do Preparo das Bases de Corpos-de-prova de Concreto por Meio de Retífica em Comparação ao Capeamento com Argamassa de Enxofre, para Diferentes Níveis de Resistência do

- Concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. Anais... . Maceió: Ibracon, 2012. p. 1 - 17.
- [21] MEDEIROS, R.; PEREIRA, B. A.; SIPP, G.; DELFINO, T. Investigation of the influence of different surface regularization methods for cylindrical concrete specimens in axial compression tests. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 3, p. 568-591, 2017.
- [22] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. HASPARYK, N. P. (Ed. Trad.). 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.
- [23] NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2015. 912 p. Tradução: Rui Alberto Cremonini.
- [24] COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON – CEB. *Bulletin d'Information*. Paris, 1989. n.192.
- [25] GONÇALVES, J. P. *Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial*, Rio de Janeiro, 2005, tese (Doutorado)– COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 273 p.
- [26] ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement And Concrete Composites*, v. 25, n. 2, p. 223-232, 2003.
- [27] LEE, C. Y.; MCCARTHY, M. J.; DHIR, R. K. Intrinsic permeability of fly ash concrete. In: MALHOTRA, V. M. (ed). *International Conference on Durability of Concrete*, 4th, Sydney, 1997. *Proceedings*. American Concrete Institute, v.1, p. 247-266 (SP-170).
- [28] BAMFORTH, P. B. The relationship between permeability coefficients for concrete obtained using liquid and gas. *Magazine Of Concrete Research*, v. 39, n. 138, p. 3-11, 1987.
- [29] KLINKENBERG, L. J. *The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases*, in *Drilling and Production Practice*. New York: American Petroleum Institute, 1941, p. 200–213.
- [30] ABBAS, A.; CARCASSES, M.; OLLIVIER, JP. Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation. *Materials And Structures*, v. 32, n. 1, p. 3-8, 1999.

5. CONCLUSÃO GERAL

A partir do método Cembureau de ensaio de permeabilidade ao gás, foi proposta uma metodologia com simplificações quanto ao processo de pré-condicionamento e ao tempo de redistribuição da umidade das amostras. O pré-condicionamento em câmara climática, a 50°C e com umidade relativa de 50%, até a constância de massa, com posterior tempo de redistribuição da umidade de 7 dias, ofereceu os melhores resultados quando comparado ao método Cembureau e, ainda, foi julgado como mais prático e viável, sendo recomendado em sua substituição.

De forma geral, os resultados acusaram melhor qualidade do concreto com menor relação a/lig , tanto em relação às propriedades de transporte de massa, quanto às propriedades mecânicas. Comparativamente, os resultados mostraram que a permeabilidade à água e ao gás do concreto podem diferir significativamente. A utilização de gás no ensaio, além de proporcionar uma execução mais fácil e rápida, distinguiu melhor o desempenho entre os dois concretos, sugerindo maior sensibilidade relativa ao ensaio. Conclui-se que o método de ensaio de permeabilidade ao gás simplificado validado nesse estudo, fundamentado em um procedimento mais prático e acessível, é recomendado na avaliação de concretos convencionais, evidenciando a contribuição relativa ao parâmetro e a sua relevância na avaliação da durabilidade do concreto.

Este método ainda não é verificado para uma faixa considerável de composições de concreto nem para outros tipos de materiais cimentícios e, portanto, requer mais aplicações, como em argamassas e concretos de alto desempenho, de forma a consolidar o método proposto. Além disso, sugere-se para pesquisas futuras a investigação de mais tempos de redistribuição da umidade, como 3 e 5 dias, verificando se a simplificação a respeito de tal etapa é passível de aprimoramento, e o estudo quanto aos valores limites de permeabilidade ao gás de concretos para estabelecer critérios que componham uma possível normativa quanto à avaliação do parâmetro. Subsequentemente é feita a recomendação do método simplificado, principal contribuição para investigações futuras.

RECOMENDAÇÃO DE MÉTODO SIMPLIFICADO DE ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO GÁS

Material elaborado como produto da pesquisa de mestrado “Otimização do método Cembureau de ensaio de permeabilidade ao gás para materiais cimentícios” (SANTOS, 2019), inserida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano e nas atividades do Projeto P&D ANEEL (Eletrobrás Furnas) intitulado "Metodologias e infraestrutura tecnológica para aperfeiçoamento das avaliações de confiabilidade e otimização de empreendimentos de energia" sob código ANEEL 0394-1504/2015.

a. Escopo

A presente recomendação descreve um método simplificado de pré-condicionamento das amostras de concreto para a medição em laboratório da permeabilidade ao gás. O pré-condicionamento consiste em uma etapa de secagem das amostras, baseada no equilíbrio de massa em atmosfera controlada, mais uma fase subsequente de redistribuição da umidade remanescente. Tal pré-condicionamento foi atestado como prático e adequado, em termos de precisão e variabilidade. O procedimento de ensaio, bem como o equipamento utilizado para tal, seguem as recomendações do método Cembureau, normalizado pelo documento RILEM TC 116-PCD: *Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability*.

b. Amostras

É necessário um mínimo de três amostras para caracterizar um concreto no ensaio de permeabilidade ao gás. Recomenda-se a moldagem de corpos de prova de concreto de 15x30 cm e a extração da amostra de ensaio da região central, conforme ilustrado na Figura 1, que compreende a porosidade média do cilindro de concreto.

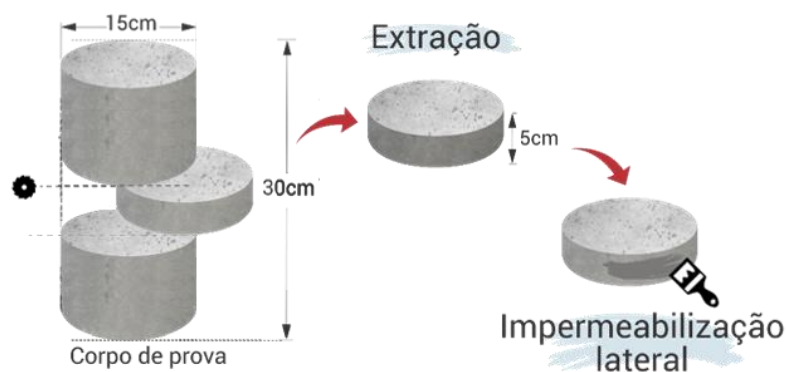


Figura 1. Esquema da extração e impermeabilização das amostras

As amostras devem ser discos com espessura de 50 ± 1 mm e diâmetro de 150 ± 1 mm, moldados separadamente (corpos de prova distintos), com idade mínima de 28 dias e curados segundo um método e duração especificados. Para comparação entre diferentes tipos de concretos, deve ser aplicado o mesmo procedimento de cura. Após a extração, procede-se à impermeabilização das superfícies circunferenciais de cada disco como forma de evitar a formação de gradientes de umidade radiais no processo de secagem e assegurar o fluxo uniaxial de gás através dos discos durante o ensaio.

c. Secagem

A secagem é acelerada a uma temperatura de 50 ± 1 °C numa câmara climática com umidade relativa de $50 \pm 2\%$, em que os discos de concreto são mantidos até que a diferença entre duas pesagens consecutivas de uma mesma amostra, em intervalo de 24 horas, seja menor que 0,05% (Equação 1), caracterizando a constância de massa.

$$\frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 < 0,05 \quad (\text{Eq. 1})$$

m_i = massa inicial (do período de 24 horas), em gramas;

m_f = massa final, em gramas;

Durante a secagem, a circulação de ar livre nas superfícies expostas dos discos de concreto deve ser assegurada, como mostrado na Figura 2. O tempo de secagem necessário pode variar em função do tipo de concreto.



Figura 2. Amostras de concreto em câmara climática

d. Redistribuição da umidade

Após a secagem, as amostras de concreto são seladas em sacos impermeáveis e armazenadas em estufa, a temperatura de 50°C. Uma vez que não é possível nenhuma troca de umidade com o ambiente, a temperatura elevada irá acelerar a redistribuição dos gradientes de umidade axial para uma distribuição homogênea da umidade remanescente ao longo da amostra. A duração recomendada para essa etapa é de 7 dias, no mínimo. Em seguida, as amostras seladas devem ser transportadas para ambiente de ensaio para que atinjam o equilíbrio térmico com o ambiente ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) pelo menos 24 horas antes da realização do ensaio de permeabilidade ao gás.

e. Equipamento

Os elementos essenciais do equipamento (Figura 3) são o suprimento de gás, o regulador de pressão, a célula de permeabilidade, o painel com medidores de vazão e o cronômetro. O suprimento de gás é formado pelo cilindro de oxigênio ou nitrogênio, equipado com reguladores de pressão do botijão e da tubulação. O regulador de pressão do sistema é composto por uma válvula de precisão, para ajuste manual da pressão de entrada, e por um manômetro digital.



Figura 3. Permeômetro Cembureau, em que: (a) Suprimento de ar; (b) Regulador de pressão com manômetro; (c) Célula de ensaio com corpo de prova; (d) Medidores de fluxo; (e) Cronômetro.

A célula de permeabilidade (Figura 4) abriga a amostra e os discos de alumínio, com suas ranhuras voltadas para a amostra, têm a função de distribuição (disco inferior) e recolhimento (disco superior) do gás. O molde de borracha e a câmara de ar formam o sistema de vedação lateral. Para medição do fluxo de gás utiliza-se um cronômetro com precisão de 0,1 s e fluxômetros do tipo bolha de sabão, que cobrem uma faixa de volumes de 1 a 100 mL, a fim de acomodar diferentes permeabilidades do concreto analisado.

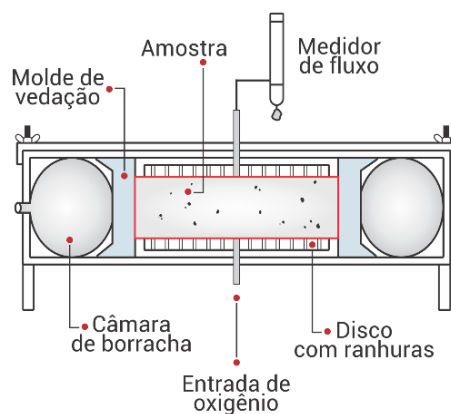


Figura 4. Célula de permeabilidade

As bolhas são produzidas utilizando uma bexiga fixada na extremidade inferior dos medidores, preenchida com uma mistura de água e sabão, conforme ilustrado na Figura 5. A bexiga é pressionada até que o nível da mistura alcance a entrada de gás do tubo, quando ocorre a formação da bolha e medição do tempo deve começar quando esta estiver na marca mais baixa do tubo calibrado, finalizando na marca mais alta, que demarca o volume final. O fluxômetro deve ser molhado 1 minuto antes da formação da bolha e o ensaio deve ser realizado em uma sala com temperatura controlada de 20 ± 2 °C, sem circulação excessiva de ar perto do equipamento.

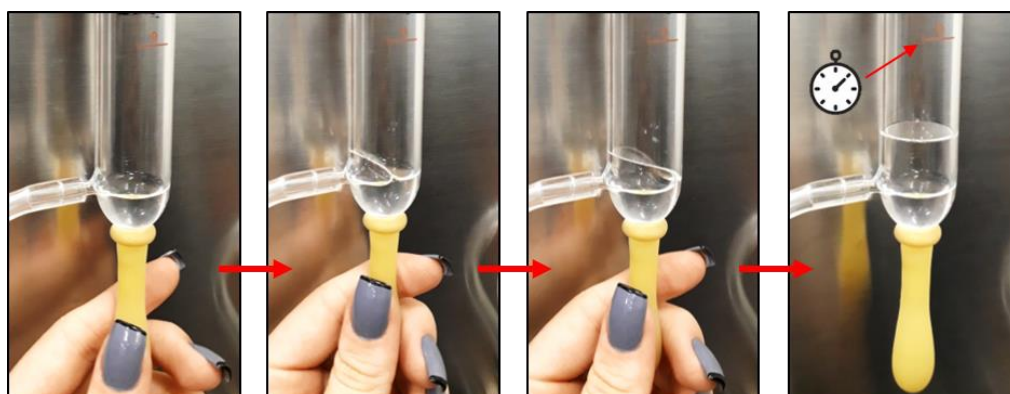


Figura 5. Formação da bolha de sabão

f. Procedimento de ensaio

Precedente ao confinamento no equipamento, as amostras são desembaladas e medidas no diâmetro (duas leituras ortogonais em cada face, totalizando quatro medidas) e na altura (quatro medidas igualmente espaçadas), adotando-se a média dos valores. Posteriormente, as amostras são instaladas na célula de permeabilidade e a câmara de ar é inflada (pressão ≥ 7 bar). Para a pressão de entrada igual a 1,5 bar, é fornecido gás para o sistema durante 30 minutos e procede-se à primeira leitura no fluxômetro, cuidando para que a bolha percorra seu volume em tempo não inferior a 20 segundos, ou o fluxômetro é substituído por outro de maior volume. Toma-se, então, leituras provisórias da taxa de fluxo até que a diferença entre duas leituras realizadas num intervalo de 5 a 15 min seja inferior a 3% (caracterização de fluxo constante). Na sequência, tomam-se duas leituras sucessivas, adotando-se a média a ser utilizada no cálculo da taxa de fluxo de oxigênio (Q_i), conforme a Equação 2, para o estágio de pressão P_i .

O procedimento supramencionado é repetido verificando, para a mesma amostra, as taxas de fluxo para as pressões de 1,5 bar, 2,0 bar e 3,0 bar. Para o cálculo do coeficiente de permeabilidade aparente (K_i), deve ser utilizada a equação de Hagen-Poiseuille (Equação 3), a qual aborda o fluxo laminar de um fluido compressível, através de corpos porosos com pequena capilaridade, sob condições uniformes.

$$Q_i = \frac{V_i}{t_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$K_i = \frac{2P_a Q_i L \mu}{A(P_i^2 - P_a^2)} \quad (\text{Eq. 3})$$

Q_i = taxa de fluxo de oxigênio, em m^3/s ;

V_i = volume percorrido pela bolha no fluxômetro;

t_i = tempo no qual a bolha percorreu o volume V_i .

K_i = coeficiente de permeabilidade ao gás na pressão i , em m^2 ;

P_a = pressão atmosférica absoluta ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$);

L = espessura do corpo de prova, em m ;

μ = viscosidade dinâmica do gás a 20 ± 2 °C ($\mu = 20,2 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$);

A = seção transversal do corpo de prova, em m^2 ;

P_i = pressão aplicada no ensaio, absoluta em Pa ;

O coeficiente de permeabilidade ao gás K de cada amostra corresponde à média dos valores de K_i , considerando os diferentes estágios de pressão, e o coeficiente de permeabilidade K final é obtido pela média aritmética dos três discos ensaiados.

6. APÊNDICES

APÊNDICE A - Análise estatística dos resultados de permeabilidade ao gás de amostras de duas moldagens distintas

Tabela 1A: ANOVA dos resultados de permeabilidade aparente ao gás das amostras condicionadas em câmara climática (50°C e UR=75%), para os tempos de redistribuição de 0 e 7 dias e todas as pressões de entrada (1,5, 2,0, 2,5 e 3,0 bar) e tipos de concreto (a/lig 0,4 e 0,6)

Fonte	SQ	GL	MQ	Teste F	Valor-p	Resultado
Efeitos principais						
A: Moldagem	0,254	1	0,254	0,0106	0,91847	Não significativo
B: a/lig	1255,826	1	1255,826	52,2928	0,00000	Significativo
C: t	231,186	1	231,186	9,6266	0,00334	Significativo
D: Pi	201,822	3	67,274	2,8013	0,05087	Não significativo
Interações						
A*B	2,425	1	2,425	0,1009	0,75218	Não significativo
A*C	83,624	1	83,624	3,4821	0,06871	Não significativo
B*C	199,309	1	199,309	8,2992	0,00610	Significativo
A*D	3,743	3	1,248	0,0519	0,98416	Não significativo
B*D	161,038	3	53,679	2,2352	0,09743	Não significativo
C*D	40,831	3	13,610	0,5667	0,63985	Não significativo
A*B*C	104,241	1	104,241	4,3405	0,04305	Significativo
A*B*D	6,956	3	2,319	0,0965	0,96153	Não significativo
A*C*D	37,927	3	12,642	0,5264	0,66643	Não significativo
B*C*D	34,583	3	11,528	0,4800	0,69784	Não significativo
A*B*C*D	39,527	3	13,176	0,5486	0,65170	Não significativo
Erro (resíduo)	1056,672	44	24,015			

Em que: SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos; Resultado = indicação se o efeito é significativo ou não.

APÊNDICE B - Caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos

Tabela 1B: Granulometria dos agregados miúdo e graúdo

Abertura da peneira (mm)	Areia natural		Brita 25 mm	
	% Retida	% Retida acumulada	% Retida	% Retida acumulada
25,4	0	0	0,4	0
19	0	0	21	21
12,5	0	0	52,8	74
9,5	0	0	15,8	90
6,3	0	0	8,1	98
4,75	0	0	1,1	99
2,34	6,2	6	0,8	100
1,18	22,3	29	0	100
0,6	28,9	57	0	100
0,3	32,1	90	0	100
0,15	9,3	99	0	100
< 0,15	1,3	100	0	100

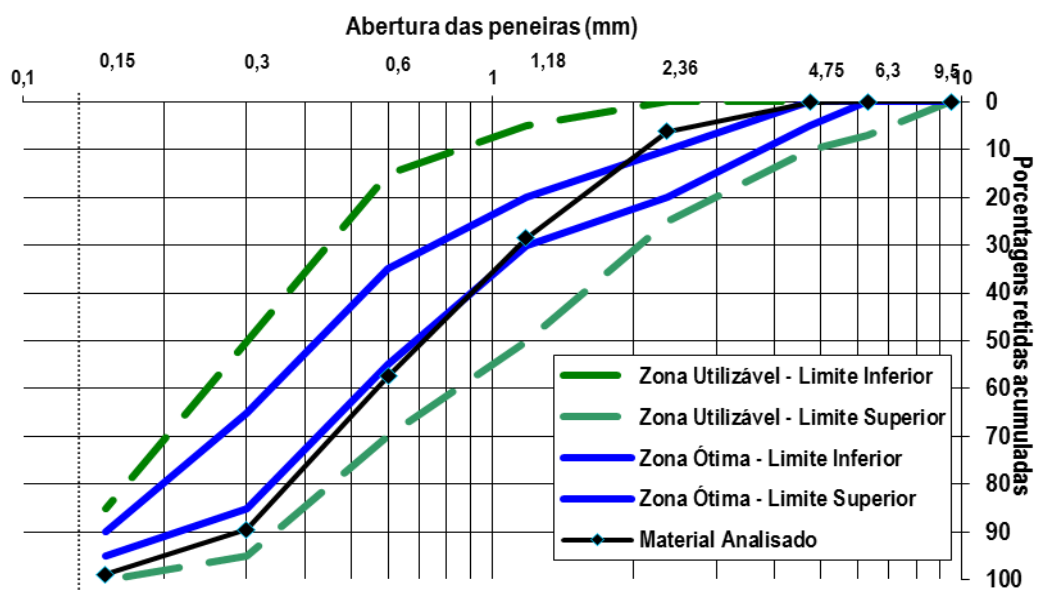


Figura 1B. Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural

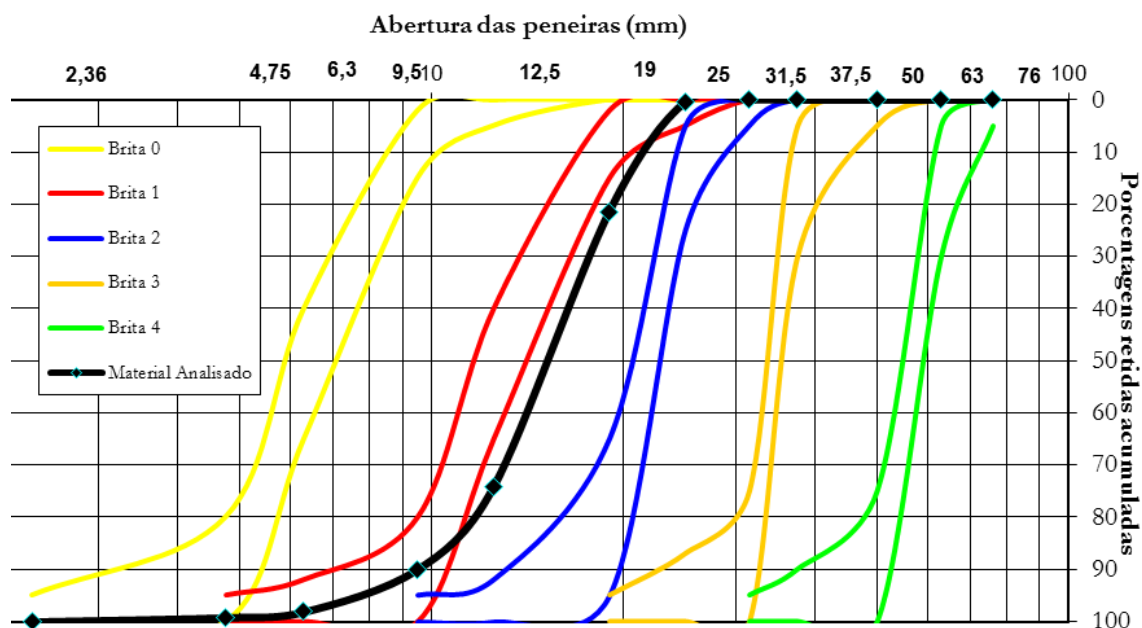


Figura 2B. Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural

Tabela 2B: Caracterização dos agregados naturais miúdo e graúdo

Ensaio realizado	Unidade	Areia Natural	Brita	Métodos de ensaios
Módulo de Finura	-	2,81	7,08	ABNT NBR NM 248:2003
Dimensão máxima característica	mm	-	25	ABNT NBR NM 248:2003
Massa específica	g/cm ³	2,63	2,64	ABNT NBR NM 52:2009
Massa unitária – estado solto	kg/m ³	-	1511,8	ABNT NM 45:2006
Índice de forma	-	-	2,3	ABNT NBR 7809:2006
Abrasão Los Angeles	(%)	-	16	ABNT NBR NM 51:2001
Absorção de água	(%)	0,5	0,7	ABNT NBR NM 30:2001
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	(%)	0,15	-	ABNT NBR 7218:2010
Teor de material pulverulento	(%)	0,67	-	ABNT NBR NM 46:2003
Teor de matéria orgânica	+/- clara	+ clara	-	ABNT NBR NM 49:2001

APÊNDICE C - Resultados individuais das propriedades do concreto endurecido

Tabela 1C: Resultados individuais de permeabilidade ao gás

a/lig	Procedimento	t (dias)	Pi (bar)	Ki (m²)
0,4	ESTUFA	0	1,5	2,55E-17
0,4	ESTUFA	0	1,5	2,98E-17
0,4	ESTUFA	0	1,5	4,12E-17
0,4	ESTUFA	7	1,5	3,69E-17
0,4	ESTUFA	7	1,5	4,68E-17
0,4	ESTUFA	7	1,5	6,13E-17
0,4	ESTUFA	14	1,5	3,74E-17
0,4	ESTUFA	14	1,5	3,97E-17
0,4	ESTUFA	14	1,5	5,33E-17
0,4	CC25%	0	1,5	3,53E-17
0,4	CC25%	0	1,5	3,82E-17
0,4	CC25%	0	1,5	3,92E-17
0,4	CC25%	7	1,5	4,39E-17
0,4	CC25%	7	1,5	4,99E-17
0,4	CC25%	7	1,5	5,77E-17
0,4	CC25%	14	1,5	5,51E-17
0,4	CC25%	14	1,5	5,71E-17
0,4	CC25%	14	1,5	6,54E-17
0,4	CC50%	0	1,5	1,59E-17
0,4	CC50%	0	1,5	1,80E-17
0,4	CC50%	0	1,5	2,18E-17
0,4	CC50%	7	1,5	2,38E-17
0,4	CC50%	7	1,5	2,47E-17
0,4	CC50%	7	1,5	2,90E-17
0,4	CC50%	14	1,5	3,56E-17
0,4	CC50%	14	1,5	3,60E-17
0,4	CC50%	14	1,5	3,82E-17
0,4	CC75%	0	1,5	6,32E-18
0,4	CC75%	0	1,5	8,69E-18
0,4	CC75%	0	1,5	9,99E-18
0,4	CC75%	7	1,5	1,43E-17
0,4	CC75%	7	1,5	1,58E-17
0,4	CC75%	7	1,5	1,80E-17
0,4	CC75%	14	1,5	1,82E-17
0,4	CC75%	14	1,5	1,87E-17
0,4	CC75%	14	1,5	2,32E-17
0,4	SAT	0	1,5	-
0,4	SAT	0	1,5	-
0,4	SAT	0	1,5	7,59E-19

a/lig	Procedimento	t (dias)	Pi (bar)	Ki (m²)
0,4	SAT	7	1,5	1,63E-19
0,4	SAT	7	1,5	8,71E-19
0,4	SAT	7	1,5	2,16E-18
0,4	SAT	14	1,5	1,83E-19
0,4	SAT	14	1,5	4,28E-19
0,4	SAT	14	1,5	8,08E-19
0,4	RILEM	14	1,5	2,45E-17
0,4	RILEM	14	1,5	2,50E-17
0,4	RILEM	14	1,5	2,63E-17
0,6	ESTUFA	0	1,5	1,81E-16
0,6	ESTUFA	0	1,5	2,03E-16
0,6	ESTUFA	0	1,5	3,14E-16
0,6	ESTUFA	7	1,5	1,85E-16
0,6	ESTUFA	7	1,5	1,88E-16
0,6	ESTUFA	7	1,5	2,16E-16
0,6	ESTUFA	14	1,5	1,96E-16
0,6	ESTUFA	14	1,5	3,41E-16
0,6	ESTUFA	14	1,5	-
0,6	CC25%	0	1,5	2,17E-16
0,6	CC25%	0	1,5	2,22E-16
0,6	CC25%	0	1,5	2,61E-16
0,6	CC25%	7	1,5	2,26E-16
0,6	CC25%	7	1,5	2,78E-16
0,6	CC25%	7	1,5	6,34E-16
0,6	CC25%	14	1,5	2,54E-16
0,6	CC25%	14	1,5	3,30E-16
0,6	CC25%	14	1,5	4,28E-16
0,6	CC50%	0	1,5	1,56E-16
0,6	CC50%	0	1,5	4,72E-16
0,6	CC50%	0	1,5	1,35E-15
0,6	CC50%	7	1,5	1,80E-16
0,6	CC50%	7	1,5	1,88E-16
0,6	CC50%	7	1,5	-
0,6	CC50%	14	1,5	2,16E-16
0,6	CC50%	14	1,5	2,23E-16
0,6	CC50%	14	1,5	8,29E-16*
0,6	CC75%	0	1,5	1,13E-16
0,6	CC75%	0	1,5	1,27E-16
0,6	CC75%	0	1,5	2,79E-15*
0,6	CC75%	7	1,5	1,11E-16
0,6	CC75%	7	1,5	1,76E-16
0,6	CC75%	7	1,5	3,49E-15*
0,6	CC75%	14	1,5	2,04E-16

a/lig	Procedimento	t (dias)	Pi (bar)	Ki (m²)
0,6	CC75%	14	1,5	7,35E-16
0,6	CC75%	14	1,5	-
0,6	SAT	0	1,5	2,14E-18
0,6	SAT	0	1,5	2,01E-15
0,6	SAT	0	1,5	2,63E-15
0,6	SAT	7	1,5	9,61E-20
0,6	SAT	7	1,5	3,96E-19
0,6	SAT	7	1,5	3,15E-18
0,6	SAT	14	1,5	7,82E-17
0,6	SAT	14	1,5	4,42E-16
0,6	SAT	14	1,5	-
0,6	RILEM	14	1,5	2,02E-16
0,6	RILEM	14	1,5	2,29E-16
0,6	RILEM	14	1,5	3,40E-15*
0,4	ESTUFA	0	2	1,43E-17
0,4	ESTUFA	0	2	1,67E-17
0,4	ESTUFA	0	2	2,44E-17
0,4	ESTUFA	7	2	2,10E-17
0,4	ESTUFA	7	2	2,62E-17
0,4	ESTUFA	7	2	3,56E-17
0,4	ESTUFA	14	2	2,19E-17
0,4	ESTUFA	14	2	2,32E-17
0,4	ESTUFA	14	2	3,37E-17
0,4	CC25%	0	2	2,03E-17
0,4	CC25%	0	2	2,19E-17
0,4	CC25%	0	2	2,24E-17
0,4	CC25%	7	2	2,49E-17
0,4	CC25%	7	2	2,82E-17
0,4	CC25%	7	2	3,28E-17
0,4	CC25%	14	2	3,06E-17
0,4	CC25%	14	2	3,21E-17
0,4	CC25%	14	2	4,13E-17
0,4	CC50%	0	2	8,68E-18
0,4	CC50%	0	2	9,83E-18
0,4	CC50%	0	2	1,22E-17
0,4	CC50%	7	2	1,34E-17
0,4	CC50%	7	2	1,40E-17
0,4	CC50%	7	2	1,64E-17
0,4	CC50%	14	2	2,04E-17
0,4	CC50%	14	2	2,06E-17
0,4	CC50%	14	2	2,14E-17
0,4	CC75%	0	2	3,99E-18
0,4	CC75%	0	2	5,24E-18

a/lig	Procedimento	t (dias)	Pi (bar)	Ki (m²)
0,4	CC75%	0	2	5,50E-18
0,4	CC75%	7	2	9,12E-18
0,4	CC75%	7	2	9,53E-18
0,4	CC75%	7	2	9,75E-18
0,4	CC75%	14	2	1,03E-17
0,4	CC75%	14	2	1,06E-17
0,4	CC75%	14	2	1,31E-17
0,4	SAT	0	2	-
0,4	SAT	0	2	-
0,4	SAT	0	2	1,92E-19
0,4	SAT	7	2	5,20E-20
0,4	SAT	7	2	2,41E-19
0,4	SAT	7	2	1,93E-18
0,4	SAT	14	2	7,28E-20
0,4	SAT	14	2	1,06E-19
0,4	SAT	14	2	1,28E-19
0,4	RILEM	14	2	1,39E-17
0,4	RILEM	14	2	1,43E-17
0,4	RILEM	14	2	1,48E-17
0,6	ESTUFA	0	2	1,04E-16
0,6	ESTUFA	0	2	1,24E-16
0,6	ESTUFA	0	2	1,88E-16
0,6	ESTUFA	7	2	1,08E-16
0,6	ESTUFA	7	2	1,08E-16
0,6	ESTUFA	7	2	1,26E-16*
0,6	ESTUFA	14	2	1,13E-16
0,6	ESTUFA	14	2	2,33E-16
0,6	ESTUFA	14	2	-
0,6	CC25%	0	2	1,25E-16
0,6	CC25%	0	2	1,28E-16
0,6	CC25%	0	2	1,62E-16
0,6	CC25%	7	2	1,30E-16
0,6	CC25%	7	2	1,62E-16
0,6	CC25%	7	2	3,99E-16
0,6	CC25%	14	2	1,52E-16
0,6	CC25%	14	2	1,94E-16
0,6	CC25%	14	2	2,86E-16
0,6	CC50%	0	2	9,66E-17
0,6	CC50%	0	2	7,38E-16
0,6	CC50%	0	2	1,01E-15
0,6	CC50%	7	2	1,05E-16
0,6	CC50%	7	2	1,10E-16
0,6	CC50%	7	2	-

a/lig	Procedimento	t (dias)	Pi (bar)	Ki (m²)
0,6	CC50%	14	2	1,24E-16
0,6	CC50%	14	2	1,30E-16
0,6	CC50%	14	2	5,99E-16*
0,6	CC75%	0	2	6,52E-17
0,6	CC75%	0	2	7,63E-17
0,6	CC75%	0	2	1,49E-15*
0,6	CC75%	7	2	7,45E-17
0,6	CC75%	7	2	1,07E-16
0,6	CC75%	7	2	1,85E-15*
0,6	CC75%	14	2	1,21E-16
0,6	CC75%	14	2	4,59E-16
0,6	CC75%	14	2	-
0,6	SAT	0	2	3,05E-19
0,6	SAT	0	2	1,23E-15
0,6	SAT	0	2	1,42E-15
0,6	SAT	7	2	4,72E-20
0,6	SAT	7	2	5,33E-20
0,6	SAT	7	2	2,10E-18*
0,6	SAT	14	2	5,52E-17
0,6	SAT	14	2	2,84E-16
0,6	SAT	14	2	-
0,6	RILEM	14	2	1,17E-16
0,6	RILEM	14	2	1,33E-16
0,6	RILEM	14	2	1,82E-15*
0,4	ESTUFA	0	2,5	1,05E-17
0,4	ESTUFA	0	2,5	1,28E-17
0,4	ESTUFA	0	2,5	1,81E-17
0,4	ESTUFA	7	2,5	1,63E-17
0,4	ESTUFA	7	2,5	1,94E-17
0,4	ESTUFA	7	2,5	2,79E-17
0,4	ESTUFA	14	2,5	1,63E-17
0,4	ESTUFA	14	2,5	1,76E-17
0,4	ESTUFA	14	2,5	2,74E-17
0,4	CC25%	0	2,5	1,48E-17
0,4	CC25%	0	2,5	1,60E-17
0,4	CC25%	0	2,5	1,65E-17
0,4	CC25%	7	2,5	1,82E-17
0,4	CC25%	7	2,5	2,09E-17
0,4	CC25%	7	2,5	2,43E-17
0,4	CC25%	14	2,5	2,27E-17
0,4	CC25%	14	2,5	2,29E-17
0,4	CC25%	14	2,5	3,82E-17*

a/lig	Procedimento	t (dias)	Pi (bar)	Ki (m²)
0,4	CC50%	0	2,5	6,21E-18
0,4	CC50%	0	2,5	7,34E-18
0,4	CC50%	0	2,5	8,79E-18
0,4	CC50%	7	2,5	9,90E-18
0,4	CC50%	7	2,5	1,03E-17
0,4	CC50%	7	2,5	1,26E-17
0,4	CC50%	14	2,5	1,29E-17
0,4	CC50%	14	2,5	1,55E-17
0,4	CC50%	14	2,5	1,57E-17
0,4	CC75%	0	2,5	3,47E-18
0,4	CC75%	0	2,5	4,09E-18
0,4	CC75%	0	2,5	4,17E-18
0,4	CC75%	7	2,5	7,13E-18
0,4	CC75%	7	2,5	7,60E-18
0,4	CC75%	7	2,5	8,32E-18
0,4	CC75%	14	2,5	7,49E-18
0,4	CC75%	14	2,5	7,69E-18
0,4	CC75%	14	2,5	9,16E-18
0,4	SAT	0	2,5	-
0,4	SAT	0	2,5	-
0,4	SAT	0	2,5	5,58E-20
0,4	SAT	7	2,5	2,18E-20
0,4	SAT	7	2,5	1,43E-19
0,4	SAT	7	2,5	2,72E-18*
0,4	SAT	14	2,5	9,06E-20
0,4	SAT	14	2,5	1,12E-19
0,4	SAT	14	2,5	2,94E-19
0,4	RILEM	14	2,5	1,04E-17
0,4	RILEM	14	2,5	1,14E-17
0,4	RILEM	14	2,5	1,14E-17
0,6	ESTUFA	0	2,5	7,98E-17
0,6	ESTUFA	0	2,5	1,05E-16
0,6	ESTUFA	0	2,5	1,47E-16
0,6	ESTUFA	7	2,5	8,03E-17
0,6	ESTUFA	7	2,5	8,10E-17
0,6	ESTUFA	7	2,5	9,43E-17*
0,6	ESTUFA	14	2,5	8,59E-17
0,6	ESTUFA	14	2,5	2,26E-16
0,6	ESTUFA	14	2,5	-
0,6	CC25%	0	2,5	9,48E-17
0,6	CC25%	0	2,5	9,58E-17
0,6	CC25%	0	2,5	1,40E-16*
0,6	CC25%	7	2,5	9,69E-17

a/lig	Procedimento	t (dias)	Pi (bar)	Ki (m²)
0,6	CC25%	7	2,5	1,22E-16
0,6	CC25%	7	2,5	3,58E-16
0,6	CC25%	14	2,5	1,19E-16
0,6	CC25%	14	2,5	1,46E-16
0,6	CC25%	14	2,5	2,64E-16
0,6	CC50%	0	2,5	8,13E-17
0,6	CC50%	0	2,5	5,20E-16
0,6	CC50%	0	2,5	1,15E-15
0,6	CC50%	7	2,5	7,91E-17
0,6	CC50%	7	2,5	8,18E-17
0,6	CC50%	7	2,5	-
0,6	CC50%	14	2,5	9,30E-17
0,6	CC50%	14	2,5	9,70E-17
0,6	CC50%	14	2,5	5,80E-16*
0,6	CC75%	0	2,5	4,90E-17
0,6	CC75%	0	2,5	6,35E-17
0,6	CC75%	0	2,5	1,05E-15*
0,6	CC75%	7	2,5	7,46E-17
0,6	CC75%	7	2,5	8,62E-17
0,6	CC75%	7	2,5	1,28E-15*
0,6	CC75%	14	2,5	9,66E-17
0,6	CC75%	14	2,5	4,47E-16
0,6	CC75%	14	2,5	-
0,6	SAT	0	2,5	-
0,6	SAT	0	2,5	9,94E-16
0,6	SAT	0	2,5	1,07E-15
0,6	SAT	7	2,5	2,13E-20
0,6	SAT	7	2,5	3,31E-20
0,6	SAT	7	2,5	1,25E-17*
0,6	SAT	14	2,5	5,85E-17
0,6	SAT	14	2,5	2,32E-16
0,6	SAT	14	2,5	-
0,6	RILEM	14	2,5	8,92E-17
0,6	RILEM	14	2,5	9,96E-17
0,6	RILEM	14	2,5	1,27E-15*
0,4	ESTUFA	0	3	8,79E-18
0,4	ESTUFA	0	3	1,04E-17
0,4	ESTUFA	0	3	1,53E-17
0,4	ESTUFA	7	3	1,59E-17
0,4	ESTUFA	7	3	1,60E-17
0,4	ESTUFA	7	3	2,52E-17*
0,4	ESTUFA	14	3	1,30E-17
0,4	ESTUFA	14	3	2,26E-17

a/lig	Procedimento	t (dias)	Pi (bar)	Ki (m²)
0,4	ESTUFA	14	3	2,48E-17
0,4	CC25%	0	3	1,23E-17
0,4	CC25%	0	3	1,33E-17
0,4	CC25%	0	3	1,39E-17
0,4	CC25%	7	3	1,50E-17
0,4	CC25%	7	3	1,72E-17
0,4	CC25%	7	3	2,00E-17
0,4	CC25%	14	3	1,83E-17
0,4	CC25%	14	3	1,95E-17
0,4	CC25%	14	3	4,59E-17*
0,4	CC50%	0	3	5,09E-18
0,4	CC50%	0	3	6,05E-18
0,4	CC50%	0	3	7,15E-18
0,4	CC50%	7	3	8,11E-18
0,4	CC50%	7	3	8,58E-18
0,4	CC50%	7	3	1,05E-17
0,4	CC50%	14	3	1,24E-17
0,4	CC50%	14	3	1,27E-17
0,4	CC50%	14	3	1,27E-17
0,4	CC75%	0	3	3,42E-18
0,4	CC75%	0	3	3,70E-18
0,4	CC75%	0	3	4,34E-18
0,4	CC75%	7	3	6,01E-18
0,4	CC75%	7	3	7,56E-18
0,4	CC75%	7	3	1,02E-17
0,4	CC75%	14	3	6,00E-18
0,4	CC75%	14	3	6,32E-18
0,4	CC75%	14	3	7,57E-18
0,4	SAT	0	3	-
0,4	SAT	0	3	5,33E-20
0,4	SAT	0	3	5,43E-20
0,4	SAT	7	3	1,71E-20
0,4	SAT	7	3	1,05E-19
0,4	SAT	7	3	4,19E-18*
0,4	SAT	14	3	8,37E-20
0,4	SAT	14	3	9,04E-20
0,4	SAT	14	3	4,72E-18*
0,4	RILEM	14	3	8,80E-18
0,4	RILEM	14	3	8,91E-18
0,4	RILEM	14	3	9,23E-18
0,6	ESTUFA	0	3	6,89E-17
0,6	ESTUFA	0	3	1,03E-16
0,6	ESTUFA	0	3	1,26E-16

a/lig	Procedimento	t (dias)	Pi (bar)	Ki (m²)
0,6	ESTUFA	7	3	6,66E-17
0,6	ESTUFA	7	3	6,69E-17
0,6	ESTUFA	7	3	9,93E-17*
0,6	ESTUFA	14	3	1,12E-16
0,6	ESTUFA	14	3	2,83E-16
0,6	ESTUFA	14	3	-
0,6	CC25%	0	3	7,99E-17
0,6	CC25%	0	3	8,02E-17
0,6	CC25%	0	3	1,55E-16*
0,6	CC25%	7	3	8,02E-17
0,6	CC25%	7	3	1,01E-16
0,6	CC25%	7	3	3,50E-16
0,6	CC25%	14	3	1,06E-16
0,6	CC25%	14	3	1,20E-16
0,6	CC25%	14	3	2,69E-16
0,6	CC50%	0	3	7,85E-17
0,6	CC50%	0	3	4,09E-16
0,6	CC50%	0	3	1,24E-15
0,6	CC50%	7	3	6,59E-17
0,6	CC50%	7	3	6,89E-17
0,6	CC50%	7	3	-
0,6	CC50%	14	3	7,72E-17
0,6	CC50%	14	3	8,03E-17
0,6	CC50%	14	3	5,07E-16*
0,6	CC75%	0	3	4,23E-17
0,6	CC75%	0	3	6,69E-17
0,6	CC75%	0	3	8,20E-16*
0,6	CC75%	7	3	7,97E-17
0,6	CC75%	7	3	7,98E-17
0,6	CC75%	7	3	9,82E-16*
0,6	CC75%	14	3	1,87E-16
0,6	CC75%	14	3	4,40E-16
0,6	CC75%	14	3	-
0,6	SAT	0	3	4,48E-20
0,6	SAT	0	3	7,74E-16
0,6	SAT	0	3	1,30E-15
0,6	SAT	7	3	2,19E-20
0,6	SAT	7	3	3,00E-20
0,6	SAT	7	3	2,27E-17*
0,6	SAT	14	3	8,13E-17
0,6	SAT	14	3	2,34E-16
0,6	SAT	14	3	-
0,6	RILEM	14	3	7,50E-17

a/lig	Procedimento	t (dias)	Pi (bar)	Ki (m ²)
0,6	RILEM	14	3	8,25E-17
0,6	RILEM	14	3	9,81E-16*

Onde: (-) indica as amostras sem leitura e (*) os outliers conforme análise de Dixon.

Tabela 2C: Resultados individuais de resistência a compressão

Concreto (a/lig)	Idade (dias)	Fcj (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
0,6	3	23,5	23,1	1,26	5,44
	3	24,4			
	3	21,4			
	7	30,9	30,4	0,41	1,36
	7	29,9			
	7	30,5			
	28	35,1	34,9	1,35	3,88
	28	36,5			
	28	33,2			
	91	37,5	38,3	0,75	1,95
	91	38,1			
	91	39,3			
	182	36,2	35,5	1,09	3,06
	182	36,4			
	182	34,0			
0,4	3	40,3	40,7	2,35	5,77
	3	43,8			
	3	38,1			
	7	53,3	54,6	1,02	1,87
	7	55,8			
	7	54,7			
	28	59,0	62,0	2,54	4,09
	28	61,7			
	28	65,2			
	91	68,9	69,3	0,31	0,45
	91	69,5			
	91	69,0			
	182	68,6	63,8	5,63	8,82
	182	66,9			
	182	55,9			

Tabela 3C: Resultados individuais de módulo de elasticidade

Concreto (a/lig)	Idade (dias)	Ec (Gpa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
0,6	3	27,42	27,1	0,29	1,06
	3	26,72			
	3	27,07			
	7	28,03	28,2	0,45	1,61
	7	28,76			
	7	27,67			
	28	32,48	32,8	1,14	3,47
	28	34,35			
	28	31,62			
	91	34,94	33,9	1,13	3,34
	91	32,34			
	91	34,49			
	182	26,8	26,9	0,05	0,19
	182	26,9			
0,4	3	32,47	32,6	0,15	0,47
	3	32,83			
	3	32,56			
	7	34,58	34,6	1,23	3,56
	7	33,17			
	7	36,19			
	28	37,91	38,2	0,21	0,55
	28	38,31			
	28	38,39			
	91	39,98	40,3	1,61	3,99
	91	38,54			
	91	42,44			
	182	35,7	35,9	0,15	0,42
	182	36			

Tabela 4C: Resultados individuais de absorção por capilaridade

Concreto (a/lig)	Altura capilar (cm)	Água absorvida (g)	Absorção por capilaridade (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Desvio Padrão (g/cm ²)	CV (%)
0,6	3	27,5	0,35	0,4375	0,08	17,95
	3	28,7	0,37			
	5	39,5	0,5			
	5,1	41,4	0,53			
0,4	4	28,4	0,35	0,3925	0,04	9,76
	4	27,5	0,36			
	4,7	32,8	0,42			
	5	34,5	0,44			

Tabela 5C: Resultados individuais de absorção por imersão

Concreto (a/lig)	Idade (dias)	Absorção (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	CV (%)
0,6	182	4,18	4,15	0,03	0,71
		4,16			
		4,11			
0,4		3,00	2,97	0,09	2,97
		3,06			
		2,85			

Tabela 6C: Resultados individuais de permeabilidade à água

Concreto (a/lig)	Permeabilidade à água ($\times 10^{-12}$ m/s)	Média ($\times 10^{-12}$ m/s)	Desvio Padrão ($\times 10^{-12}$ m/s)	CV (%)
0,4	5,681	5,86	0,46	7,79
	5,413			
	6,487			
0,6	2,886	2,78	0,12	4,39
	2,608			
	2,842			

APÊNDICE D – Material ilustrativo suplementar



Figura 2D. Processo de (a) extração e (b) impermeabilização lateral dos discos de concreto

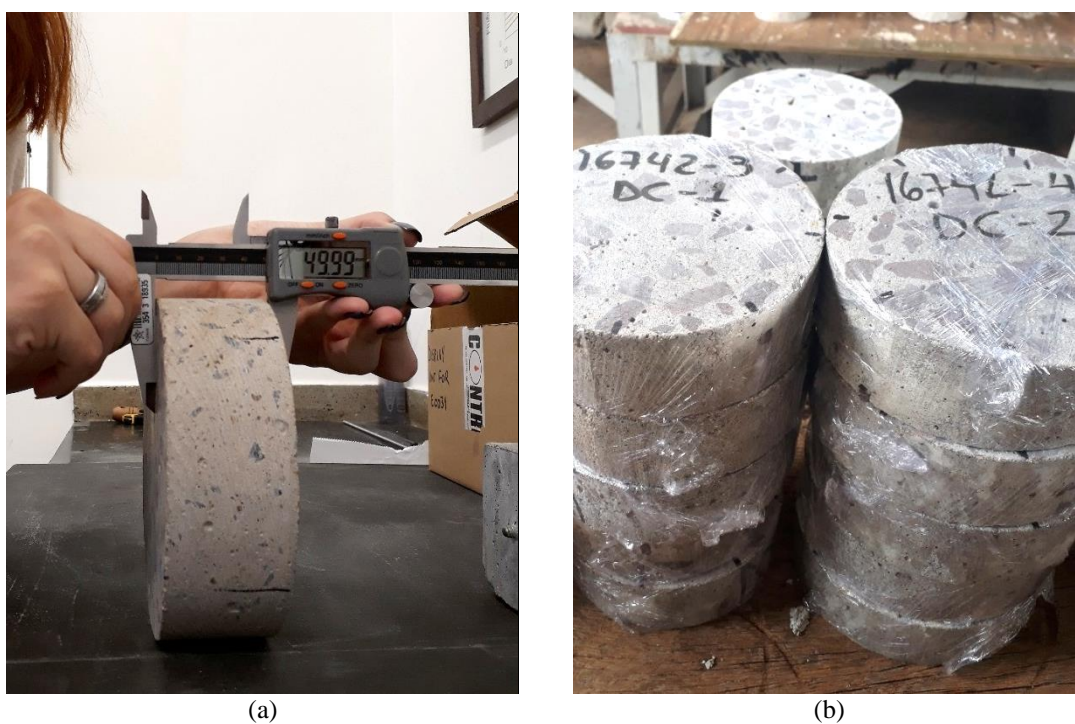


Figura 3D. Discos de concretos (a) conforme tolerância dimensional de $\pm 1\text{mm}$ e (b) embalados em filme de polietileno