

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNNO MARGARIDO BRONDINO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO POR MEIO DA ANÁLISE
ESTATÍSTICA DE WEIBULL**

**LONDRINA
2023**

BRUNNO MARGARIDO BRONDINO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO POR MEIO DA ANÁLISE
ESTATÍSTICA DE WEIBULL**

Concrete strength study through Weibull statistical analysis

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres.

Coorientador: Prof. Me. Júlio Cesar Filla.

**LONDRINA
2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BRUNNO MARGARIDO BRONDINO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO POR MEIO DA ANÁLISE
ESTATÍSTICA DE WEIBULL**

Trabalho de conclusão de curso de
graduação apresentado como requisito
para obtenção do título de Bacharel de
Engenharia de Materiais da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23/junho/2023

Fabiano Moreno Peres
Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Pollyane Marcia de Souto
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Raphael Euclides Prestes Salem
Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

**LONDRINA
2023**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço minha mãe Nair Cristina Margarido Brondino, meu pai Odney Carlos Brondino e minha irmã Bárbara Margarido Brondino por todo o apoio nessa nova etapa.

Ao Prof. Fabiano Moreno Peres pela orientação e ao Prof. Júlio Cesar Filla pela coorientação durante todo o período de desenvolvimento do trabalho.

A UNIFIL campus Londrina e principalmente a coordenadora Carolina Alves do Nascimento Alvim do curso de Engenharia Civil.

Aos técnicos de laboratório Maurício José Alves e José Antônio Massarini por todo apoio na construção do projeto.

A meus familiares e à minha namorada Eduarda Bonato Olmos pela motivação e apoio.

“A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência, mas pela capacidade de começar de novo.”

F. Scott Fitzgerald

RESUMO

O concreto é o material estrutural mais utilizado na construção de edificações. Trata-se de um material de comportamento frágil, cuja resistência mecânica é um parâmetro fundamental para o projeto estrutural e a confiabilidade da estrutura. Diversos fatores afetam a resistência do material, com destaque para a distribuição de defeitos internos (principalmente vazios), a qual é dependente do fator água/cimento (A/C) e da idade do concreto. O objetivo desse trabalho foi estudar, por meio da análise estatística de Weibull de dois parâmetros, o efeito dos defeitos internos do concreto na resistência mecânica quando o material estiver sujeito a flexão, variando-se o fator água/cimento e o tempo de maturidade do concreto. Nesse sentido, foram realizados testes de flexão de 4 pontos em três séries de amostras: A/C de 0,45 aos 7 dias de maturidade (série I), A/C de 0,45 aos 21 dias de maturidade (série II) e A/C de 0,70 aos 21 dias de maturidade (série III). A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o aumento da relação A/C reduz a resistência do concreto, causando um provável prejuízo da distribuição interna de defeitos. A maturidade só se mostrou relevante na resistência mecânica entre as séries II e III. Os valores obtidos pelo módulo de Weibull foram de 14,844, 14,181 e 7,506 para as séries I, II e III, respectivamente. Tendo em vista que as séries I e II forneceram os maiores valores para esse parâmetro, os resultados sugerem que a distribuição interna de defeitos deve ser mais homogênea nas amostras fornecidas pelas mesmas.

Palavras-chave: concreto, fator água/cimento, distribuição interna de defeitos, análise de Weibull

ABSTRACT

Concrete is the most used structural material in the construction of buildings. It is a material with a fragile behavior, whose mechanical resistance is a fundamental parameter for the structural design and the reliability of the structure. Several factors affect the strength of the material, with emphasis on the distribution of internal defects (mainly voids), which is dependent on the water/cement (W/C) factor and the age of the concrete. The objective of this work was to study, using two-parameter Weibull statistical analysis, the effect of internal defects in concrete on mechanical strength when the material is subjected to bending, varying the water/cement factor and the maturity time of the concrete. In this sense, 4-point bending tests were carried out in three series of samples: A/C of 0,45 at 7 days of maturity (series I), A/C of 0,45 at 21 days of maturity (series II) and A/C of 0,70 at 21 days of maturity (series III). From the results obtained, it can be concluded that the increase in the A/C ratio reduces the strength of the concrete, causing a probable loss of the internal distribution of defects. Maturity was only relevant in terms of mechanical resistance between series II and III. The values obtained by the Weibull module were 14,844, 14,181 and 7,506 for series I, II and III, respectively. Considering that series I and II provided the highest values for this parameter, the results suggest that the internal distribution of defects should be more homogeneous in the samples provided by them.

Keywords: concrete, water/cement factor, internal void distribution, Weibull analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fotografia da seção transversal típica de um concreto.....	21
Figura 2 - Microestrutura da pasta de cimento endurecida	22
Figura 3 - Zona de transição interfacial pasta de cimento-agregado.....	23
Figura 4 - Dependência da resistência do concreto com a relação A/C	28
Figura 5 - Fluxograma	32
Figura 6 - Molde	33
Figura 7 - Medidas do molde.....	34
Figura 8 - Molde preenchido por concreto.....	35
Figura 9 - Câmara úmida.....	36
Figura 10 - Suporte móvel.....	37
Figura 11 - Posicionamento dos pontos	38
Figura 12 - Forma linear do gráfico até a ruptura	40
Figura 13 - Rompimento total após ensaio mecânico	40
Figura 14 - Papel de probabilidade de Weibull da série I (Relação A/C = 0,45 – aos 7 dias)	42
Figura 15 - Papel de probabilidade de Weibull da série II (Relação A/C = 0,45 – aos 21 dias)	44
Figura 16 - Papel de probabilidade de Weibull da série III (Relação A/C = 0,70 – aos 21 dias)	46
Figura 17 - Fratura das amostras A/C 0,45 / 21 dias.....	48
Figura 18 - Fratura da amostra em perfil.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais constituintes do Cimento Portland	15
Tabela 2 – Apresentação do traço	18
Tabela 3 - Reações de hidratação do cimento	19
Tabela 4 - Quantidade das matérias-primas para a relação A/C de 0,45 e A/C de 0,70	35
Tabela 5 - Resultados da série I (Relação A/C = 0,45 – aos 7 dias).....	41
Tabela 6 - Resultados da série II (Relação A/C = 0,45 – aos 21 dias).....	43
Tabela 7 - Resultados da série III (Relação A/C = 0,70 – aos 21 dias).....	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo Geral	12
1.2	Objetivos Específicos	12
1.3	Justificativa	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Concreto	13
2.2	Cimento Portland	14
2.3	Agregados	16
2.4	Aditivos	16
2.5	Dosagem e Traço do Concreto	17
2.6	Hidratação do Cimento	18
2.7	Reações de Hidratação	18
2.8	Cura do Concreto	20
2.9	Microestrutura do Concreto	21
2.9.1	Vazios na Pasta de Cimento Hidratada	24
2.9.2	Relações Microestrutura-Propriedades na Pasta de Cimento Hidratada	25
2.10	Resistência do Concreto	27
2.11	Análise de Weibull	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Fluxograma	32
3.2	Materiais	32
3.3	Equipamentos	33
3.4	Metodologia	33
3.4.1	Construção do Molde	33
3.4.2	Determinação da Umidade da Areia	34

3.4.3	Preparação da Mistura.....	34
3.4.5	Desmoldagem.....	35
3.4.6	Cura.....	36
3.4.7	Ensaio Mecânico.....	36
3.5	Tratamento de Dados.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5	CONCLUSÃO.....	50
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52
	APÊNDICE A – ANÁLISE DE ADERÊNCIA DE CURVA.....	54

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material estrutural mais utilizado no mundo, em função de suas propriedades mecânicas, versatilidade, ampla disponibilidade e baixo custo.

O concreto é um material compósito, de natureza cerâmica, constituído basicamente a partir de cimento, agregados e água. É um material frágil e, como tal, a resistência de uma peça de concreto é altamente dependente do tamanho, da forma e da distribuição de defeitos internos do material e outros concentradores de tensão, especialmente quando submetido a cargas de tração.

O concreto possui microestrutura muito complexa, bastante dependente da composição da mistura utilizada para a produção, constituída de diversas fases e produtos sólidos da hidratação do cimento e diferentes tipos de vazios. Além de sua complexidade, a sua microestrutura se altera continuamente com o tempo a partir da mistura do cimento com a água. Particularmente, a relação entre as quantidades de água e de cimento na mistura, conhecida como fator ou relação A/C, afeta a quantidade (normalmente referida como porosidade) e a distribuição de vazios, o que, por sua vez, afeta a resistência mecânica e a distribuição dos valores de resistência das amostras. Não é simples modelar matematicamente a relação entre a porosidade e a resistência do material, embora diversas propostas tenham sido apresentadas na bibliografia, a maioria com algum grau de inconsistência, em função das características próprias do material.

A resistência do concreto não só depende da relação A/C, mas também sofre interferência do adensamento e condições de cura (grau de hidratação do cimento), mineralogia e dimensão do agregado, tipos de aditivos, adições, condições de umidade e geometria do corpo de prova, tipo de tensão e velocidade de carregamento.

Por outro lado, para o projeto estrutural, não apenas a resistência é importante, mas também a confiabilidade do projeto. Desta forma, uma abordagem determinística para a resistência não é suficiente, tornando-se necessária uma abordagem probabilística. Qual a probabilidade da resistência de um elemento não ser suficiente para suportar o carregamento previsto?

Nesse contexto, em virtude da dificuldade em relacionar diretamente a porosidade com a resistência mecânica, torna-se interessante recorrer indiretamente a técnicas de análise que permitam obter valores de resistência associados a algum

parâmetro capaz de refletir a distribuição interna de vazios no concreto e, nesse sentido, a análise de Weibull pode ser adequada.

1.1 Objetivo Geral

Estudar por meio da análise estatística o efeito dos defeitos internos do concreto na resistência mecânica variando o fator água/cimento em relação à idade do concreto.

1.2 Objetivos Específicos

- Verificar o efeito da variação do fator água/cimento (A/C) na resistência mecânica;
- Verificar o efeito da idade do concreto na resistência mecânica;
- Estimar a distribuição de defeitos internos através de análise estatística de Weibull;
- Determinar a curva que mais se adere à distribuição de dados.

1.3 Justificativa

Apenas a resistência mecânica do concreto não é suficiente para garantir a segurança da estrutura. Sendo um material frágil, a resistência do concreto depende do tamanho, da forma e da distribuição de defeitos internos, principalmente os vazios, que são muito dependentes da quantidade relativa de água no sistema e da idade do concreto. Não sendo simples construir modelos que relacionem diretamente a porosidade do material com a resistência, a análise estatística torna-se uma opção interessante para melhorar o tratamento de dados a fim de investigar a tendência da influência na distribuição de defeitos internos sobre a resistência.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO

O concreto de Cimento Portland é o principal material estrutural utilizado na indústria da construção¹.

Embora tenha menor resistência mecânica que outros materiais estruturais, como o aço, segundo Mehta e Monteiro (2014) há pelo menos três fatores que concorrem para o amplo uso do concreto. Primeiramente, o material tem excelente resistência à água, favorecendo a sua durabilidade e a de outros elementos estruturais, como as armaduras de aço no concreto armado e protendido, mesmo em aplicações críticas, como em estações de tratamento de água e esgoto e barragens.

A segunda razão para a sua ampla aceitação e emprego diz respeito à facilidade com que o concreto fresco pode ser moldado nas mais diferentes formas e tamanhos, proporcionando muita flexibilidade e versatilidade ao projeto arquitetônico e estrutural.

O terceiro motivo que torna o concreto um material muito aceito entre engenheiros e incorporadores é o seu baixo custo. Os principais componentes para a produção do concreto são relativamente baratos e podem ser facilmente encontrados em praticamente todo o mundo. Basicamente, o concreto é um material cerâmico composto de materiais granulares (agregados) embebidos em uma matriz rígida de pasta de cimento (material ligante), a qual normalmente é feita de Cimento Portland e água.

A composição do concreto varia consideravelmente, mas normalmente contém (em volumes absolutos) 7% a 15% de Cimento Portland, 14% a 21% de água, 0,5% a 8% de ar, 24% a 30% de agregados miúdos e 31% a 51% de agregado graúdo. A proporção desses componentes afeta não apenas a resistência, mas também a facilidade com que o concreto pode ser lançado e compactado.

A função do cimento é atuar como material ligante, ou seja, como uma cola instantânea (basta adicionar água) que une as partículas de agregados. O cimento reage com a água, formando uma pasta que reveste os agregados no processo de

¹ Embora existam outros tipos de concreto, neste trabalho, o termo concreto se refere ao concreto de Cimento Portland.

mistura. Inicialmente a mistura é bastante plástica, facilitando a moldagem do material. Com o tempo ocorre a “pega” do concreto, caracterizada pela significativa perda de plasticidade e endurecimento da pasta, e a partir daí o endurecimento e ganho de resistência do material (MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016; PERES, 2021).

Provavelmente a propriedade mais importante do concreto endurecido é a sua resistência mecânica, a qual é afetada por diversos fatores. A resistência à compressão do material é razoável, mas a resistência à tração é de apenas cerca de 10% da resistência de compressão. Dessa forma, o concreto deve ser reforçado, normalmente com aço (concreto armado), para resistir aos esforços de tração em elementos estruturais, como lajes, vigas e pilares (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2 Cimento Portland

Os componentes principais do Cimento Portland são silicatos de cálcio, os quais, durante o processo de manufatura, são formados a partir do aquecimento de uma mistura de óxido de cálcio (CaO) e sílica (SiO_2). Estes materiais ocorrem em grandes quantidades na crosta da Terra, o primeiro deles em várias formas de carbonato de cálcio (principalmente calcário), enquanto que o segundo em uma variedade de formas minerais na areia e na argila (DOMONE; ILLSTON, 2010; VIRDI, 2017).

A produção de Cimento Portland é uma operação em larga escala, demandando grandes quantidades de matérias-primas, de forma que, normalmente, as plantas industriais se localizam próximo a jazidas viáveis de calcário e/ou argila.

As matérias-primas do Cimento Portland contêm alguns outros componentes, sendo que particularmente a argila contém óxidos de alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_3), magnésio (MgO), sódio (Na_2O) e potássio (K_2O). Os dois primeiros têm efeito significativo na manufatura e na composição do cimento resultante, enquanto que os demais, mesmo em pequenas quantidades, podem ter efeitos importantes nas propriedades finais (DOMONE; ILLSTON, 2010; GONÇALVES; MARGARIDO, 2012; NEVILLE, 2016). A Tabela 1 apresenta os principais constituintes do Cimento Portland.

As matérias-primas selecionadas são cominuídas, adequadamente proporcionadas para a obtenção de determinado tipo de cimento e misturadas. A mistura é então alimentada em um forno rotativo, onde é aquecida a temperaturas de

até 1.400°C a 1.600°C. Neste processo, a mistura é quimicamente convertida em clínquer, na forma de pelotas de cerca de 25 mm de diâmetro. Após o resfriamento, o clínquer é pulverizado e recebe adições de gesso, para controlar o tempo de pega do concreto, e outras adições para melhorar suas propriedades, como escória de alto-forno, pozolana, *filler* calcário, entre outras (MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016).

Após a moagem, as partículas de cimento são bastante pequenas: 85 a 95% delas tem diâmetro menor que 45 μm (média entre 10 e 15 μm), enquanto que as maiores partículas atingem 90 μm (MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016). Esse aspecto é importante porque a hidratação das partículas de cimento começa na superfície, sendo que quanto menor a partícula, maior a superfície específica e mais rápida de desenvolver a hidratação.

Tabela 1 - Principais constituintes do Cimento Portland

Fórmula química	Composto	Fórmula simplificada	%
$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico	C_3S	45 - 60
$2 \text{CaO}.\text{SiO}_2$	Silicato dicálcico	C_2S	15 - 30
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico	C_3A	6 - 12
$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	Tetracálcio aluminoferrita	C_4AF	6 - 8

Fonte: Adaptado de MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016

No Brasil, os principais tipos de cimento encontrados no mercado são os seguintes (MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016).

- CP I – Cimento Portland comum;
- CP II – Cimento Portland composto (com adições de escória de alto-forno, pozolana e *filler*);
- CP III – Cimento Portland de alto-forno (com adição de escória de alto-forno, apresentando baixo calor de hidratação);
- CP IV – Cimento Portland pozolânico (com adição de pozolana, apresentando baixo calor de hidratação);
- CP V – Cimento Portland de alta resistência inicial – ARI (com maiores

proporções de C3S, que lhe confere alta resistência inicial e alto calor

- de hidratação);
- CP-B – Cimento branco (menos minério de ferro);
- CP-X-RS – Cimento Portland resistente a sulfatos (X designa uma das classes anteriores).

2.3 Agregados

Os agregados normalmente usados para concreto são materiais de origem natural: cascalho, areia e rocha britada. Dependendo do tamanho das partículas, os agregados são classificados em agregados miúdos e graúdos.

O agregado miúdo é constituído de areia de origem natural ou resultante de britagem de rochas estáveis, ou mistura de ambas, com grãos que passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm, e que apresentam uma boa distribuição granulométrica, de forma a garantir o melhor preenchimento dos vazios no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O agregado graúdo é um material constituído de pedregulhos ou rocha britada, cujos grãos passam pela peneira ABNT 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os agregados constituem um volume substancial do concreto (cerca de 75% a 80%), sendo que as suas propriedades têm importante efeito sobre as propriedades do concreto resultante. As principais funções dos agregados são, por um lado técnico, aumentar a resistência das argamassas e do concreto, diminuindo a retração, e por um lado econômico, reduzir o consumo de cimento, cujo custo é mais elevado (DOMONE; ILLSTON, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014; MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016; NEVILLE, 2016).

Além dos agregados de origem natural, podem ser empregados agregados industrializados, como argila expandida, escória de alto-forno e vermiculita expandida, especialmente para a preparação de concretos mais leves, e os agregados de materiais de construção reciclados (NEVILLE, 2016).

2.4 Aditivos

Além dos principais constituintes do concreto, eventualmente se usam aditivos que lhe conferem certas propriedades particulares. Dentre estes destacam-se: promotores de trabalhabilidade, aditivos redutores de água (plastificantes), agentes incorporadores de ar, aceleradores (principalmente em climas frios) e retardantes, neste último caso quando os trabalhos envolvem grandes volumes de concreto ou quando há o risco de ocorrência rápida de pega em altas condições de temperatura. (DOMONE; ILLSTON, 2010; MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016).

2.5 Dosagem e traço do concreto

O projeto da mistura para se conferir um rol de propriedades e características desejáveis ao concreto fresco e endurecido desempenha um papel muito relevante da tecnologia do concreto. A dosagem do concreto é da forma mais adequada e mais econômica quanto ao proporcionalmente de cimento, água, agregados, adições e aditivos.

Projetistas estruturais normalmente especificam ou assumem certa resistência e módulo de elasticidade para determinar as dimensões dos elementos estruturais, mas diversos outros fatores devem ser considerados no processo de dosagem. Diversos parâmetros interdependentes precisam ser ajustados, entre eles a seleção criteriosa dos materiais componentes, a relação entre as quantidades de água e de cimento (fator água/cimento, ou simplesmente fator A/C), o tamanho máximo do agregado, a distribuição granulométrica dos agregados, a relação agregado/cimento e o uso de aditivos, além de outros aspectos, como custo, trabalhabilidade e durabilidade (MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016). Segundo Mehta e Monteiro (2014), a dosagem do concreto é o processo de obtenção da combinação correta de cimento, agregados, água, adições e aditivos, para produzir o concreto de acordo com as especificações dadas.

Há bastante conhecimento técnico-científico que poderia orientar procedimentos de dosagem do concreto. Entretanto, na prática, certas dificuldades relacionadas principalmente com a variabilidade das características dos materiais prejudicam a modelagem matemática do processo. Dessa forma, normalmente adotam-se procedimentos empíricos baseados em extensos dados de ensaios e na experiência do engenheiro, tendo surgido diversos métodos, podendo-se destacar os métodos do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) e da Associação Brasileira de

Cimento Portland (ABCP), o segundo sendo uma adaptação do método do *American Concrete Institute* (ACI) (FIRME, 1983; TUTIKIAN; HELENE, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O chamado “traço do concreto” é basicamente a expressão das proporções dos materiais componentes para a produção de um determinado concreto. As proporções podem ser dadas em peso ou volume, idealmente em base seca dos materiais, e são normalmente expressas em relação à quantidade de cimento. Uma forma conveniente de apresentação do traço é mostrada no Tabela 2. Por exemplo, um traço [1:2:3:0,5] indica que a proporção dos materiais será, para cada parte de cimento, duas partes de areia, três partes de brita e ½ parte de água.

Tabela 2 – Apresentação do traço

C	S	B	A/C
$\frac{C_c}{C_c}$	$\frac{C_c}{C_c}$	$\frac{C_c}{C_c}$	$\frac{C_c}{C_c}$

C: proporção de cimento

S: proporção de agregado miúdo (areia)

B: proporção de agregado graúdo (brita)

A/C: proporção de água (fator água-cimento)

Fonte: Adaptado de MAMLOUK, ZANIEWSKI, 2016

2.6 Hidratação do cimento

A propriedade adesiva do cimento se desenvolve somente após a mistura com água. Isto ocorre porque a reação química do cimento com a água, conhecida como hidratação do cimento, resulta em produtos que possuem características de pega e endurecimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.7 Reações de hidratação

A hidratação do cimento é um processo complexo e progressivo, que se desenvolve por meio de dois mecanismos principais. No mecanismo de dissolução-precipitação ocorre a dissolução dos compostos anidros do cimento em seus constituintes iônicos, seguindo-se a formação de hidratos em solução, os quais, em função de sua baixa solubilidade, precipitam da solução supersaturada. O segundo

mecanismo é chamado de hidratação no estado sólido ou topoquímico e envolve reações que acontecem diretamente na superfície dos compostos, sem que estes entrem em solução. Verifica-se que o mecanismo de dissolução-precipitação controla os estágios iniciais de hidratação do cimento, enquanto que o mecanismo topoquímico se desenvolve nos estágios mais avançados, em decorrência da menor mobilidade iônica na solução (MEHTA; MONTEIRO, 2014; MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016; NEVILLE, 2016). A Tabela 3 apresenta as reações químicas primárias que se desenvolvem durante a hidratação do cimento e os respectivos produtos.

Tabela 3 - Reações de hidratação do cimento

Reações de hidratação do cimento
$2(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 6\text{H}_2\text{O} = 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$
$2(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 4\text{H}_2\text{O} = 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2 = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
$4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 10\text{H}_2\text{O} + 2\text{Ca}(\text{OH})_2 = 6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 10\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

Fonte: Adaptado de MAMLOUK, ZANIEWSKI (2016)

Embora o processo de hidratação consista em reações simultâneas dos compostos anidros com água, as respectivas velocidades de hidratação são diferentes. Os aluminatos hidratam mais rapidamente que os silicatos, sendo responsáveis por boa parte das características de enrijecimento e pega (solidificação) de uma pasta de cimento. A reação do aluminato tricálcio com água é imediata e libera grande quantidade de calor. A adição de gesso ao cimento visa justamente à redução da taxa de hidratação do aluminato, aumentando o tempo de trabalhabilidade do concreto. Os silicatos, que representam cerca de 75% do cimento Portland comum, desempenham um papel dominante na determinação das características de endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência) (MEHTA; MONTEIRO, 2014; MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016; NEVILLE, 2016).

Após a mistura com água a pasta de cimento se manterá trabalhável por cerca de 45 minutos, a partir de então a pasta começa a enrijecer, na medida em que os cristais formados deslocam a água nos poros. A pasta começa a solidificar depois de duas a três horas após a mistura com a água.

Os silicatos de cálcio combinam com a água para formar um gel de silicatos

hidratados de cálcio (C-S-H). O gel de C-S-H é inicialmente fraco e poroso, mas com a passagem do tempo se torna mais resistente e menos poroso. A formação dos cristais de C-S-H começa poucas horas após a adição de água ao cimento e pode se desenvolver continuamente enquanto houver partículas de cimentos não reagidas e água livre no sistema (MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016).

Conforme mostrado na Figura 1, a hidratação dos silicatos produz ambos C-S-H e hidróxido de sódio. A completa hidratação de C_3S produz 61% de C-S-H e 39% de hidróxido de cálcio, enquanto que a completa hidratação de C_2S resulta em 82% de C-S-H e 18% de hidróxido de cálcio. Tendo em vista que os C-S-H é que tornam a pasta de cimento hidratado mais forte, a resistência final do concreto é melhorada aumentando-se o conteúdo de C_2S em relação à quantidade de C_3S .

Inicialmente, quando o gel é poroso, os poros são completamente preenchidos com água. Requer-se cerca de 15% de água por peso de cimento para preencher os poros do gel (água de gel). Além disso, requer-se mais 23% de água para garantir a continuidade da reação química (água de ligação). Dessa forma, a necessidade total de água não deveria ser maior que 38% (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quantidades crescentes de água provocam a formação cada vez maior de espaço não preenchido entre os grãos originais, na forma de poros capilares, com dimensões desde 5 nm até 10 μm . Se apenas a quantidade mínima necessária para a hidratação fosse adicionada ao concreto, não haveria água disponível para a formação de capilares, de forma que o concreto seria mais compacto, resistente e durável. Por outro lado, a quantidade de água na mistura de concreto também controla a plasticidade e a trabalhabilidade da mistura. Dessa forma, na maioria dos casos a quantidade de água necessária para o concreto é determinada pela trabalhabilidade e não pelas reações de hidratação (DOMONE; ILLSTON, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014; MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016; NEVILLE, 2016).

Há outras reações importantes para a indústria do concreto, com destaque para a reação pozolânica, as quais não são, por ora, discutidas em maior profundidade neste trabalho.

2.8 Cura do concreto

Os concretos, especialmente na superfície, precisam ser protegidos da perda de umidade tão logo quanto possível após o lançamento e durante os primeiros dias

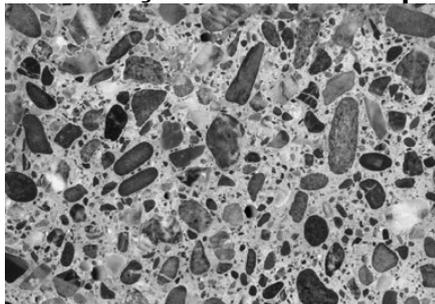
após o endurecimento, particularmente nas peças mais estreitas. Além de reduzir ou eliminar a fissuração decorrente da retração, a cura do concreto garante que haja um suprimento adequado de água para continuar a hidratação e o ganho de resistência. Embora seja uma etapa essencial na tecnologia do concreto, com frequência a cura é incorreta ou insuficientemente realizada. Levy e Helene (1996) recomendam um período de cura mínimo de 2 a 10 dias, dependendo do fator água-cimento adotado e do tipo de cimento usado para fazer o concreto. Algumas técnicas de cura que podem ser usadas são a imersão da peça em água, borrifamento de água, neblina de água, uso de revestimentos saturados que retenham umidade, vedação da superfície concretada (LEVY; HELENE, 1996; DOMONE; ILLSTON, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.9 Microestrutura do concreto

A microestrutura do concreto é bastante complexa e heterogênea, o que torna difícil a elaboração de modelos realistas com o propósito de prever o comportamento do material. Entretanto, tanto o conhecimento da microestrutura e das propriedades individuais dos constituintes do concreto, como da relação entre eles, serve para auxiliar no controle das suas propriedades (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A Figura 1 apresenta uma seção transversal polida típica do concreto endurecido, onde se pode notar facilmente a predominância de duas fases bem distintas: agregado, na forma de partículas de forma e tamanhos diferentes, e o meio ligante, composto de uma pasta de cimento. Dessa forma, podemos dizer que, ao nível macroscópico, o concreto pode ser considerado como um material bifásico, constituído de partículas de agregado dispersas em uma matriz de pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

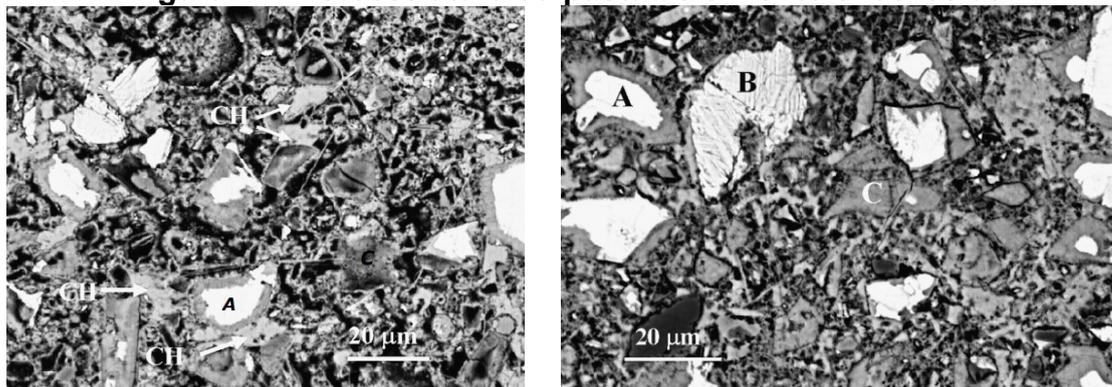
Figura 1 - Fotografia da seção transversal típica de um concreto



Fonte: MEHTA, MONTEIRO (2014)

Ao nível microscópico verifica-se que as duas fases não são distribuídas de forma homogênea entre elas, diferenciando entre si. Por exemplo, em algumas regiões, a massa de pasta de cimento hidratada aparenta ser tão densa quanto o agregado, enquanto que em outras ela é altamente porosa, como se pode observar na Figura 2a, que mostra uma região da matriz localizada na microestrutura de um concreto de 7 dias, com fator A/C de 0,45. Na micrografia estão identificadas partículas de hidróxido de cálcio (CH), partículas de cimento totalmente hidratadas (C) e uma partícula de cimento parcialmente hidratada (A), em torno da qual se pode notar uma camada de C-S-H “interno”. Na mesma micrografia, observa-se que boa parte do fundo da imagem é constituída de poros. Para efeito de comparação, a Figura 2b também apresenta uma região da matriz, entretanto, neste caso corresponde a uma amostra com 100 dias de maturidade, com fator A/C de 0,3, visivelmente mais compacta.

Figura 2 - Microestrutura da pasta de cimento endurecida



(a)

(b)

Fonte: Adaptado de DIAMOND (2004)

As imagens da Figura 2 indicam que o volume de vazios capilares na pasta de cimento hidratada diminui com a redução da relação água/cimento ou com o aumento da idade de hidratação.

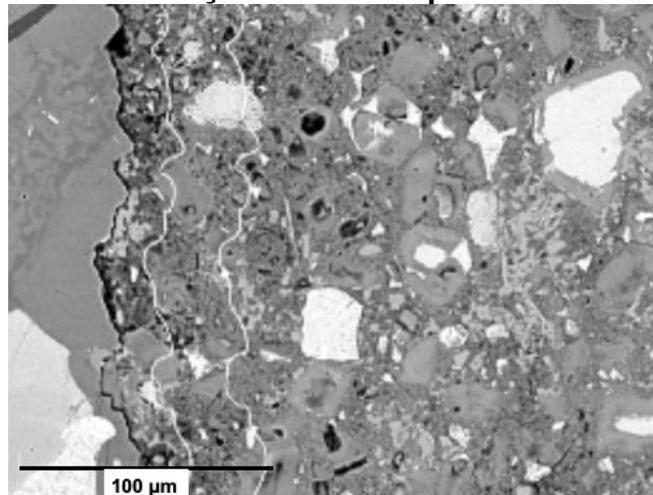
Em uma ordem de grandeza inferior, a microestrutura da pasta de cimento hidratada é ainda mais complexa e dependente do tempo (MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016). Após a adição de água ao cimento, como resultado da interação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxilas, e dentro de poucos minutos da hidratação do cimento, começam a aparecer cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido como etringita. Poucas horas mais tarde, grandes cristais

prismáticos de hidróxido de cálcio e pequenos hidratos de silicato de cálcio fibrosos começam a preencher os espaços vazios antes ocupados por água e partículas de cimento em dissolução. Depois de alguns dias, dependendo da relação alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita pode se tornar instável e se decompor para formar o monossulfato hidratado, que tem a forma de placa hexagonal (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Na presença do agregado, a microestrutura da pasta de cimento hidratada na vizinhança de grandes partículas é normalmente muito diferente da microestrutura da matriz de pasta ou argamassa no sistema. A zona mais próxima do agregado contém predominantemente grãos menores e possui uma porosidade significativamente mais elevada, enquanto os grãos maiores são encontrados mais distantes (DIAMOND, 2004; MEHTA, MONTEIRO, 2014; HILAL, 2016).

A Figura 3 apresenta a região da zona de transição interfacial entre a pasta de cimento e o agregado.

Figura 3 - Zona de transição interfacial pasta de cimento-agregado



Fonte: Adaptado de SCRIVENER *et al* (2004)

Na Figura 3 pode-se observar que não há um contorno discreto entre a zona de transição interfacial e a pasta de cimento. As mudanças são progressivas, sendo mais significativas nos primeiros 15 a 20 μm mais próximos do agregado (as linhas brancas assinaladas estão a aproximadamente 20 a 50 μm da interface (SCRIVENER *et al*, 2004).

De fato, muitos aspectos do comportamento do concreto sob tensão podem ser explicados apenas quando a interface pasta de cimento-agregado é tratada como uma

terceira fase na microestrutura do concreto. A zona de transição interfacial é normalmente mais fraca do que os outros dois componentes do concreto – o agregado e a matriz pasta de cimento hidratada, de forma que esta região afeta o comportamento mecânico do concreto muito mais do que se poderia esperar pela sua dimensão (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.9.1 Vazios na pasta de cimento hidratada

Devido ao crescimento aleatório dos cristais e aos diferentes tipos de cristais, são deixados vazios na estrutura da pasta à medida que o cimento hidrata. A resistência, durabilidade e a estabilidade volumétrica do concreto são fortemente afetadas pelos vazios. Dois tipos de vazios são formados durante a hidratação: espaço interlamelar e vazios capilares (MEHTA; MONTEIRO, 2014; MAMLOUK; ZANIEWSKI, 2016).

O espaço interlamelar ocorre entre as camadas no C-S-H. A dimensão do espaço situa-se entre 0,5 nm e 2,5 nm, o que é muito pequeno para afetar a resistência. Entretanto, estes espaços representam 28% da porosidade da pasta. A água presente no espaço interpartículas é aprisionada por ligações de hidrogênio, mas pode ser removida quando a umidade é menor que 11% (o que resulta em considerável encolhimento).

Os vazios capilares representam os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada. A quantidade e o tamanho dos vazios capilares dependem da separação inicial das partículas de cimento, que é fortemente controlada pelo fator A/C. Para uma pasta de cimento bem hidratada, na qual tenha sido utilizada uma quantidade mínima de água, os vazios capilares situam-se na faixa de 3 μm a 5 μm . Vazios capilares maiores que 50 nm (macroporos) já são capazes de reduzir a resistência e aumentar a permeabilidade.

Segundo Mehta e Monteiro (2014; p.34), o termo porosidade se refere justamente a um método de cálculo do volume total de vazios capilares. Segundo estes mesmos autores, supõe-se que a distribuição de tamanho dos poros, e não a porosidade capilar total seja o critério mais adequado para avaliar as características da pasta de cimento hidratada.

Além dos espaços interlamelares e dos vazios capilares, o ar pode ser

aprisionado na pasta de cimento durante a mistura. O ar aprisionado reduz a resistência e aumenta a permeabilidade. Por outro lado, minúsculas e bem distribuídas bolhas de ar podem aumentar a durabilidade da pasta de cimento.

A zona de transição interfacial requer ainda outras considerações. Inicialmente, no concreto fresco recém compactado, filmes de água se formam em torno das grandes partículas de agregado, contribuindo para aumentar localmente a relação A/C. Devido à elevada relação A/C, os compostos cristalinos de hidratação, nas proximidades do agregado graúdo, apresentam cristais relativamente maiores e formam, portanto, uma estrutura local mais porosa do que na matriz da pasta de cimento ou da argamassa. Com o desenvolvimento da hidratação, o C-S-H pouco cristalino e uma segunda geração de cristais menores de etringita e hidróxido de cálcio começam a preencher o espaço vazio que existe entre a estrutura criada pelos grandes cristais de etringita e de hidróxido de cálcio. Isso ajuda a melhorar a densidade e, conseqüentemente, a resistência da zona de transição na interface (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Uma técnica que comumente é usada para estudar a porosidade do concreto é a porosimetria por intrusão de mercúrio (KUMAR; BHATTACHARJEE, 2003; HILAL, 2016). Entretanto, segundo Diamond (2004), esta técnica é um método inadequado para a medida da distribuição do tamanho de poros em materiais à base de cimento, uma vez que, materiais à base de cimento podem ter uma estrutura de porosidade complexa e não uniforme, com poros de diferentes tamanhos, formas e interconectividade. A intrusão de mercúrio assume uma distribuição de porosidade homogênea, o que pode não refletir a realidade em materiais à base de cimento. Isso pode levar a uma interpretação incorreta da distribuição de tamanhos dos poros.

2.9.2 Relações microestrutura-propriedades na pasta de cimento hidratada

Enquanto material estrutural, as principais características desejadas do concreto endurecido são a resistência, a estabilidade dimensional e a durabilidade, as quais são afetadas tanto pela proporção como pelas propriedades da pasta de cimento hidratada, que por sua vez depende das suas características microestruturais, principalmente da quantidade e da distribuição de sólidos e vazios (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Nesta sessão será dada ênfase à resistência.

A principal fonte de resistência nos produtos sólidos da pasta de cimento

hidratada é a existência das forças de atração de van der Waals, responsáveis pela aderência entre duas superfícies sólidas, sendo esta, portanto, dependente da extensão e da natureza das superfícies envolvidas. Os pequenos cristais de C-S-H, sulfoaluminatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados hexagonais possuem grandes áreas superficiais e capacidade de aderência. Esses produtos de hidratação do cimento tendem a aderir fortemente não apenas entre si, como também aos sólidos de área superficial reduzida, como hidróxido de cálcio, grãos de clínquer anidro e partículas de agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014; HILAL, 2016).

A resistência se encontra na parte sólida de um material, de forma que vazios tendem a ser prejudiciais à resistência, havendo uma relação inversa entre porosidade e resistência dos sólidos. Na pasta de cimento hidratada, considera-se que os espaços interlamelares e os vazios microscópicos têm pouca influência sobre a resistência. Por outro lado, os vazios capilares e as microfissuras sempre presentes, de dimensões significativamente maiores, representam importantes pontos de concentração de tensões quando ocorre a aplicação da carga, favorecendo a ruptura do material. O volume de vazios capilares na pasta de cimento hidratada depende da quantidade de água de mistura adicionada ao cimento no início da hidratação e do grau de hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Da mesma forma, a resistência na zona de transição interfacial depende do volume e tamanho dos vazios existentes. Mesmo quando a relação A/C for baixa, nas primeiras idades, o volume e o tamanho dos vazios na zona de transição interfacial serão maiores que na matriz, de forma que a zona de transição possui naturalmente menor resistência. Entretanto, com o tempo, a lenta cristalização de novos produtos nos vazios na zona de transição tende a aumentar a resistência local.

Outro fator que compromete a resistência da zona de transição interfacial é presença de microfissuras, as quais se desenvolvem por diversas causas. Dependendo do tamanho e da forma e do tamanho do agregado, filmes espessos de água podem se formar debaixo das partículas, sendo que a zona de transição formada nestas condições será suscetível à fissuração quando sujeita à influência de tensões de tração induzidas por movimentos diferenciais entre o agregado e a pasta de cimento hidratada. Tais movimentos costumam surgir tanto na secagem quanto no resfriamento do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a zona de transição interfacial pode ser considerada como a fase limitante da resistência do concreto. Justamente por causa

da presença da zona de transição que ocorre a fratura do concreto em níveis de tensão consideravelmente mais baixos do que a resistência de qualquer um dos outros dois componentes principais.

2.10 RESISTÊNCIA DO CONCRETO

No concreto a resistência mecânica está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura, sendo definida como a tensão máxima que a amostra de concreto pode suportar.

Agregados naturais são geralmente densos e fortes, de forma que a porosidade da matriz pasta de cimento e da zona de transição interfacial entre a matriz e o agregado graúdo normalmente controlam a resistência característica do concreto de densidade normal (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Em níveis crescentes de tensão, a partir de 70% da resistência última, as fissuras formadas na matriz tendem a se espalhar gradualmente até se juntarem a fissuras originadas na zona de transição interfacial. Quando o sistema de fissura se torna contínuo em uma trinca dominante, o material se rompe.

Em geral, existe uma relação inversa fundamental entre porosidade e resistência dos sólidos. Kumar e Bhattacharjee (2003) fizeram uma análise crítica de diversos modelos matemáticos propostos na literatura, tendo concluído que a maioria dos modelos relacionando a resistência com a porosidade é inadequada no contexto do concreto.

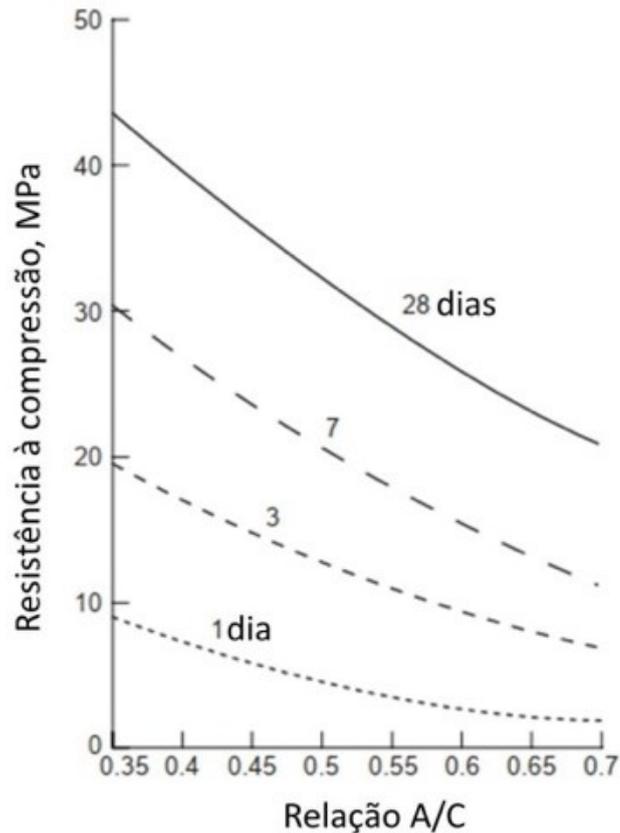
Como visto, o aumento da relação A/C aumenta a porosidade da matriz e principalmente da zona de transição, enfraquecendo progressivamente o material. Portanto, a relação A/C é determinante para a resistência do concreto. Em 1918, Duff Abrams (MEHTA; MONTEIRO, 2014) descobriu que existe uma relação entre o fator A/C e a resistência do concreto. Esta relação, conhecida como lei de Abrams é dada pela equação 1.

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{A/C}} \quad (1)$$

onde f_c é a resistência à compressão do concreto e k_1 e k_2 constantes empíricas.

A resistência à compressão do concreto é uma função da relação A/C e do grau de hidratação do cimento. A uma dada temperatura de hidratação, o grau de hidratação e a resistência dependem do tempo. A Figura 4 ilustra a influência da relação A/C e idade de cura úmida sobre a resistência do concreto.

Figura 4 - Dependência da resistência do concreto com a relação A/C



Fonte: Adaptado de MEHTA, MONTEIRO (2014)

Além da relação A/C, diversos fatores podem ter efeito importante na resistência, como adensamento e condições de cura (grau de hidratação do cimento), mineralogia e dimensão do agregado, tipos de aditivos, adições, condições de umidade e geometria do corpo de prova, tipo de tensão e velocidade de carregamento.

2.11 Análise de Weibull

Dentre as funções da família exponencial, que são essenciais na análise de confiabilidade em engenharia são as funções densidade de probabilidade de Weibull e a lognormal. Enquanto a distribuição Weibull é flexível e pode ser usada

universalmente para determinar as taxas de falha, a densidade lognormal é uma boa aproximação para variáveis positivas com distribuições assimétricas, com médias mais baixas e grande variância (KAPUR; PRECHT, 2014).

2.11.1 Função de Densidade de Probabilidade de Weibull

De acordo com Meeker e Escobar (1998), função densidade de probabilidade de Weibull é dada em (1).

$$f(x) = \frac{m}{\sigma_0} \left(\frac{x}{\sigma_0}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{x}{\sigma_0}\right)^m}, x \geq 0, m > 0, \sigma_0 > 0 \quad (2)$$

Onde m é o parâmetro de forma (m é denominado módulo de Weibull, o qual informa a uniformidade do material), σ_0 é o parâmetro de escala (vida característica).

Com efeito, o módulo de Weibull (m) pode ser utilizado para descrever a heterogeneidade e a uniformidade dos materiais frágeis, ou seja, o módulo de Weibull é uma medida da variabilidade do material; quanto maior o valor de m , mais homogêneo é o sólido e mais uniforme a distribuição dos defeitos internos do material (FELBECK; ATKINS, 1984; MEYERS, 2009).

A função de distribuição acumulada da Weibull, fornece a probabilidade de uma amostra falhar com uma carga inferior a c e é dada pela equação (2).

$$F(c) = P(X < c) = \int f(x)dx = 1 - e^{-\left(\frac{c}{\sigma_0}\right)^m} \quad (3)$$

Onde X representa a tensão de ruptura.

Weibull (1951) postulou que a probabilidade de sobrevivência a uma tensão c , ou seja, a probabilidade de que o volume de um espécime não contenha uma falha grande o suficiente para falhar sob a tensão c é dada por $S = P(X \geq c)$ e poderia ser escrita na forma dada em (3).

$$S = P(X \geq c) = 1 - P(X < c) = 1 - F(c) = e^{-\left(\frac{c}{\sigma_0}\right)^m} \quad (4)$$

Os parâmetros m e σ_0 são constantes ajustáveis e definem a forma da função

de Weibull.

Materiais com grande variabilidade possuem valores menores para m , sendo que aços possuem $m \approx 100$ e cerâmicas apresentam $m \approx 10$ (Roylance, 2001). O módulo de Weibull para a resistência do concreto foi medido entre 4,2 e 24,2, enquanto que para o concreto reforçado com fibra de aço de ultra-alto desempenho (UHPRFC) ficou entre 6,4 e 9,6 sob flexão e em torno de 8,5 sob tensão direta em concretos reforçados com fibra de desempenho (HPRFCs) (Duy-Liem et. al., 2019).

Onde σ é a tensão aplicada e m , σ_0 e σ_u são constantes do material com uma população de falhas, a qual assume-se que essa população não altera de elemento para elemento. σ_u é a tensão a qual a probabilidade de falha ocorrer é zero, caso seja assumido que qualquer tensão pode causar a falha em um material cerâmico, σ_u

O papel de probabilidade é uma técnica gráfica utilizada para verificar a aderência dos dados a um determinado modelo estatístico. Se os dados seguem uma distribuição de Weibull, seu papel de probabilidade se distribuirá aproximadamente como uma reta em um gráfico quantil-quantil (Q-Q Plot). Dessa forma, os valores dos parâmetros podem ser calculados pelo método do papel de probabilidade, a partir da Função de Distribuição Acumulada, uma vez que a mesma pode ser linearizada. Para tal, aplica-se o logaritmo aos dois lados da equação (2), como segue:

$$\begin{aligned} \ln(S) &= \ln(1 - F(c)) = \ln\left(e^{-\left(\frac{c}{\sigma_0}\right)^m}\right) \\ -\ln(S) &= \left(\frac{c}{\sigma_0}\right)^m \\ \ln(-\ln S) &= m \ln\left(\frac{c}{\sigma_0}\right) = m \ln(c) - m \ln(\sigma_0) \end{aligned} \quad (5)$$

Fazendo $Y = \ln(-\ln S)$, $X = \ln(c)$ e $b = m \ln(\sigma_0)$ na equação (6), estabelece-se uma relação linear da forma dada em (7), na qual o parâmetro m corresponde à inclinação. Por esse motivo, o parâmetro de forma m também é conhecido como a inclinação de Weibull.

$$Y = mX + b \quad (6)$$

Em geral, a equação da reta e consequente determinação do parâmetro m , se

dá pelo Método dos Mínimos Quadrados ou pelo Método da Máxima Verossimilhança.

O parâmetro de escala ou vida característica σ_0 é definido como o intervalo de valores de resistência no qual 63,2% das amostras falham.

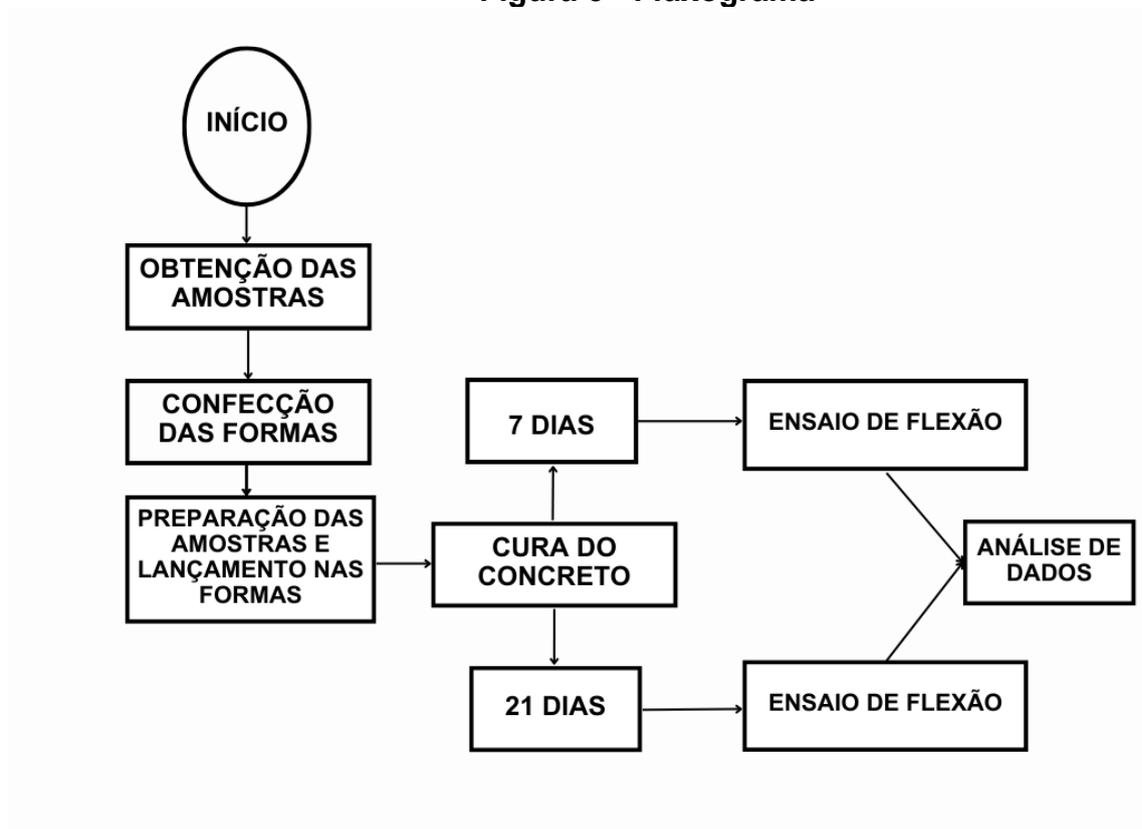
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A resistência mecânica do concreto foi determinada a partir de ensaios de flexão de 4 pontos em amostras preparadas com traço básico de concreto.

3.1 Fluxograma

As atividades práticas realizadas para este trabalho encontram-se descritas no fluxograma apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2 Materiais

Os materiais que foram utilizados são aqueles comumente empregados para fazer concreto comum: cimento, agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia) e água. O cimento foi o CP II da marca Votoran, o CP II é um cimento Portland composto, pois possui adições de escória de alto-forno, pozolana e *filler*. A brita

utilizada foi a de número 1 com as dimensões de 9,5 mm a 19 mm de diâmetro. Já a areia foi a de tamanho médio (0,42 mm a 2 mm de diâmetro).

Foram separados 200 Kg de cimento (CP II), 340 Kg de areia média, 520 Kg de brita 1 e 102 litros de água potável para todas as séries.

As quantidades relativas de cimento e agregados obedeceram ao traço 1:2:3 (cimento:areia:brita).

Todo o processo desde da preparação da mistura até a finalização dos ensaios foi realizado dentro dos laboratórios da UNIFIL campus Londrina do curso de Engenharia Civil.

3.3 Equipamentos

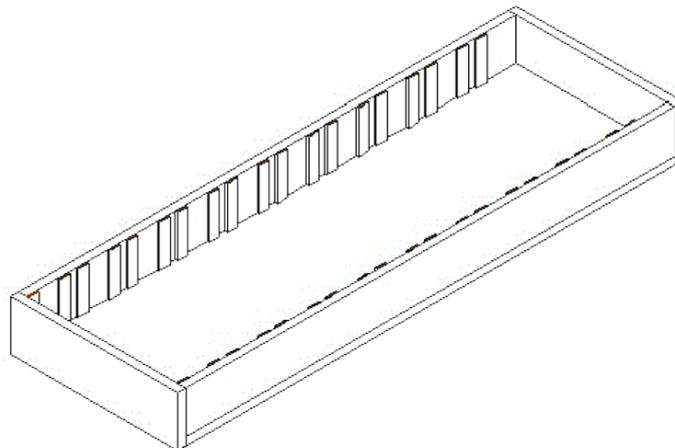
- Máquina universal de ensaios EMIC disponível no laboratório da UNIFIL – Londrina do curso de Engenharia Civil;

3.4 Metodologia

3.4.1 Construção do molde

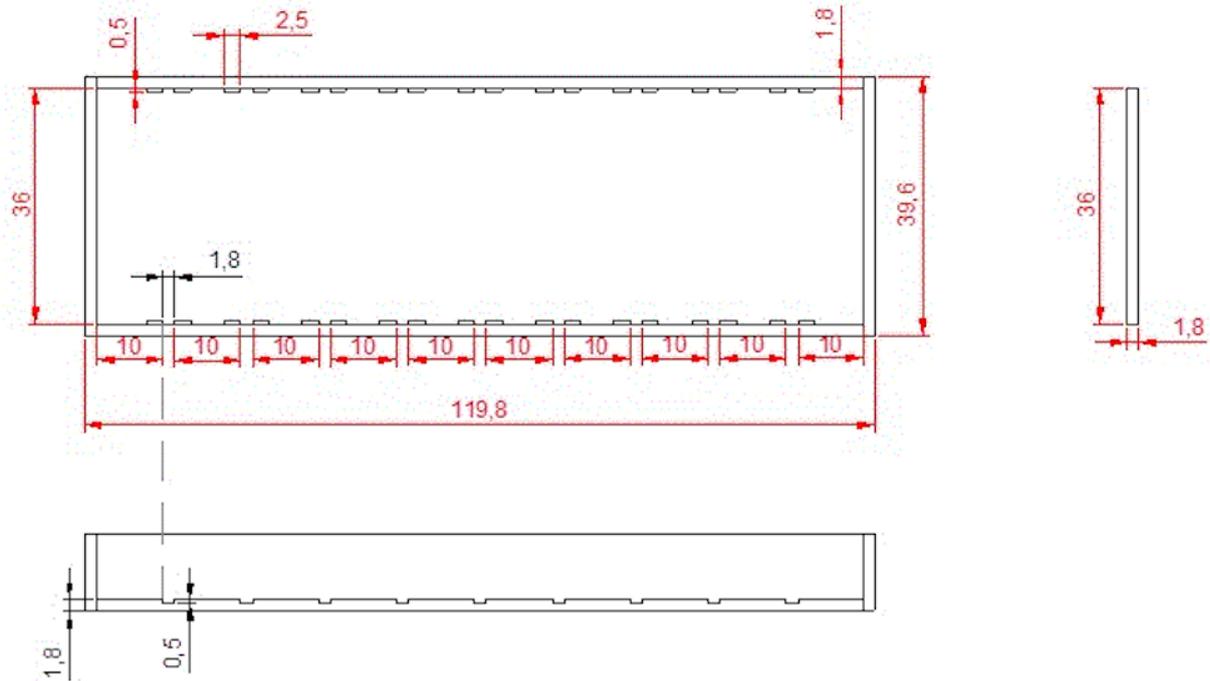
Os moldes foram confeccionados com o compensado naval (material base). Foram criados 3 moldes iguais com a capacidade de 10 amostras cada, totalizando 30 amostras. O molde está representado na Figura 6 e as medidas na Figura 7.

Figura 6 - Molde



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 7 - Medidas do molde



Fonte: Autoria própria (2023)

3.4.2 Determinação da umidade da areia

A determinação da umidade foi utilizada para determinar a quantidade de água ligada à areia, a fim de satisfazer o traço do concreto. Através do processo de secagem da areia foi determinado que havia 3,25 kg de água no agregado miúdo, esse valor foi rebatido (subtraído) na quantidade de água calculada para cada tipo de relação A/C (0,45 e 0,70).

3.4.3 Preparação da mistura

Foram pesadas as quantidades de cimento, água, brita e areia para cada tipo de amostra (0,45 e 0,7). Os valores foram obtidos pela unidade de quilograma (kg). As quantidades das matérias-primas para a relação A/C de 0,45 e A/C de 0,70 foram representadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade das matérias-primas para a relação A/C de 0,45 e A/C de 0,70

Material	A/C 0,45 (kg)	A/C 0,70 (kg)
Cimento	50	50
Areia	100	100
Brita	150	150
Água	19,25	31,75

Fonte: Autoria própria (2023)

Após a pesagem das quantidades das matérias-primas, iniciou-se a preparação das amostras. As matérias-primas foram despejadas em uma betoneira na seguinte ordem: brita, metade da quantidade de água, cimento, areia e o restante da água.

3.4.4 Moldagem

O desmoldante utilizado nesse projeto foi o óleo diesel comum, o mesmo foi passado no molde através de um pincel em toda sua cavidade (antes do preenchimento com o concreto).

Após o fim da mistura, com a ajuda de uma carruola e uma pá, o concreto na forma de pasta foi levado até os moldes. Com auxílio de uma espátula os moldes foram preenchidos por concreto ainda na forma de pasta a fim de facilitar sua inserção nas cavidades (Figura 8). A compactação do concreto foi feita por uma haste de aço, a qual foi despejada em 30 golpes em pontos aleatórios por cavidade preenchida a fim de remover as bolhas de ar inclusas no interior do concreto.

Figura 8 - Molde preenchido por concreto



Fonte: Autoria própria (2023)

3.4.5 Desmoldagem

Após a compactação do concreto, contou-se o tempo de 24 horas para realização da desmoldagem. O processo de desmoldagem ocorreu da seguinte forma: primeiro foram removidos todos os parafusos do molde com uma parafusadeira Makita-CLX228BR e em seguida foi feita a retirada das divisões dos moldes. Essa forma foi a mais viável para a desmoldagem total de todos os corpos de prova.

3.4.6 Cura

A cura foi feita dentro de uma câmara úmida (Figura 9), na qual foram posicionados os corpos de prova dentro do reservatório e preenchido com água através de uma mangueira, até que todas as amostras estivessem totalmente submersas (esse processo foi realizado igualmente para todas as séries).

Figura 9 - Câmara úmida



Fonte: Autoria própria (2023)

Os concretos foram retirados da cura em dois tempos diferentes: 7 dias e 21 dias. Logo após sua remoção, foram inspecionados com uma trena para tomar nota se havia erro quanto às suas dimensões e em seguida foram posicionados na máquina de ensaio (um de cada vez) para dar início aos testes mecânicos.

3.4.7 Ensaio mecânicos

Foi determinada a resistência do concreto a partir de ensaios de flexão de 4 pontos, conforme a norma ASTM C 78, de amostras com diferentes fatores A/C e diferentes idades. Foram testadas 3 séries.

Série I: Fator A/C 0,45 aos 7 dias

Série II: Fator A/C 0,45 aos 21 dias

Série III: Fator A/C 0,70 aos 21 dias

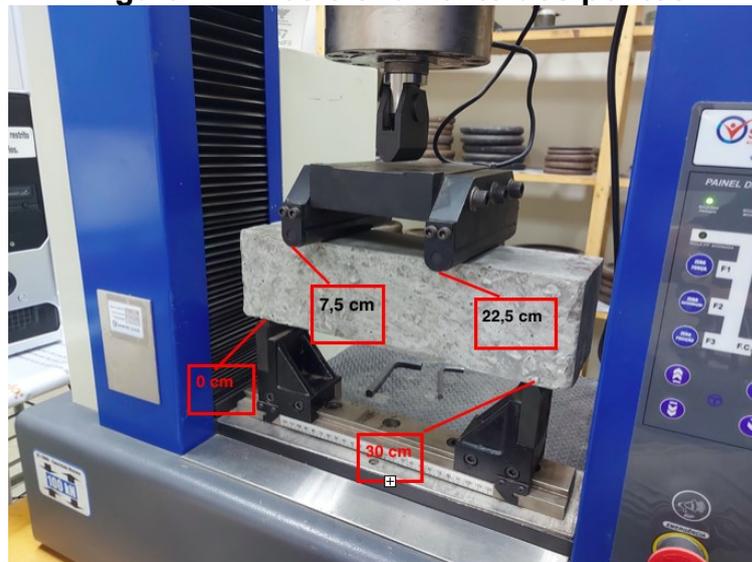
A máquina de ensaios utilizada foi a máquina de flexão em 4 pontos. Com auxílio de um suporte móvel acrescentado a máquina (Figura 10), cujo o peso é de 9,94 kg. Para posicionamento dos pontos, adotou-se o seguinte critério: os dois pontos da base ficaram na extremidade, ou seja, em 0 cm e o outro em 30 cm (foi descontado 2,5 cm de cada extremidade do corpo de prova, ou seja, ao invés de 35 cm de comprimento, a amostra passou a ter 30 cm a fim de obter o melhor posicionamento na máquina de ensaio). Os pontos superiores tiveram uma diferença de 7,5 cm de cada ponto da extremidade situado na base, ou seja, um ponto em 7,5 cm e outro em 22,5 cm. Os posicionamentos dos pontos estão indicados na Figura 11. Após o ajuste de posicionamento dos pontos, iniciou-se os ensaios mecânicos.

Figura 10 - Suporte móvel



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 11 - Posicionamento dos pontos



Fonte: Autoria própria (2023)

Com os corpos de prova quebrados, a superfície de rompimento foi fotografada com um celular comum, a fim de auxiliar a análise na escala macrográfica.

3.5 TRATAMENTO DE DADOS

O auxílio da planilha do Excel foi essencial para os cálculos e a formulação dos gráficos. As cargas máximas obtidas nos ensaios foram posicionadas na tabela do Excel na coluna “Pmax (kN)”.

Com a obtenção das cargas utilizadas na ruptura das amostras, iniciou-se os cálculos para a obtenção das tensões (representada na coluna como “ σ (MPa)”), a partir da equação (8).

$$\sigma = \frac{3.P.L}{4.b.h^2} \quad (7)$$

Onde “P” representa a carga obtida no ensaio mais o peso do suporte, “L” é o comprimento útil da amostra, “b” é a medida da base da amostra e “h” é a altura da amostra.

Em seguida, foi posicionado a coluna “ σ_i (MPa)” que indica a ordem crescente das tensões aplicadas.

Para a probabilidade de sobrevivência (representada na coluna como “Ps”) foi utilizada a seguinte equação (9):

$$P_s = (N+1-i) / N \quad (8)$$

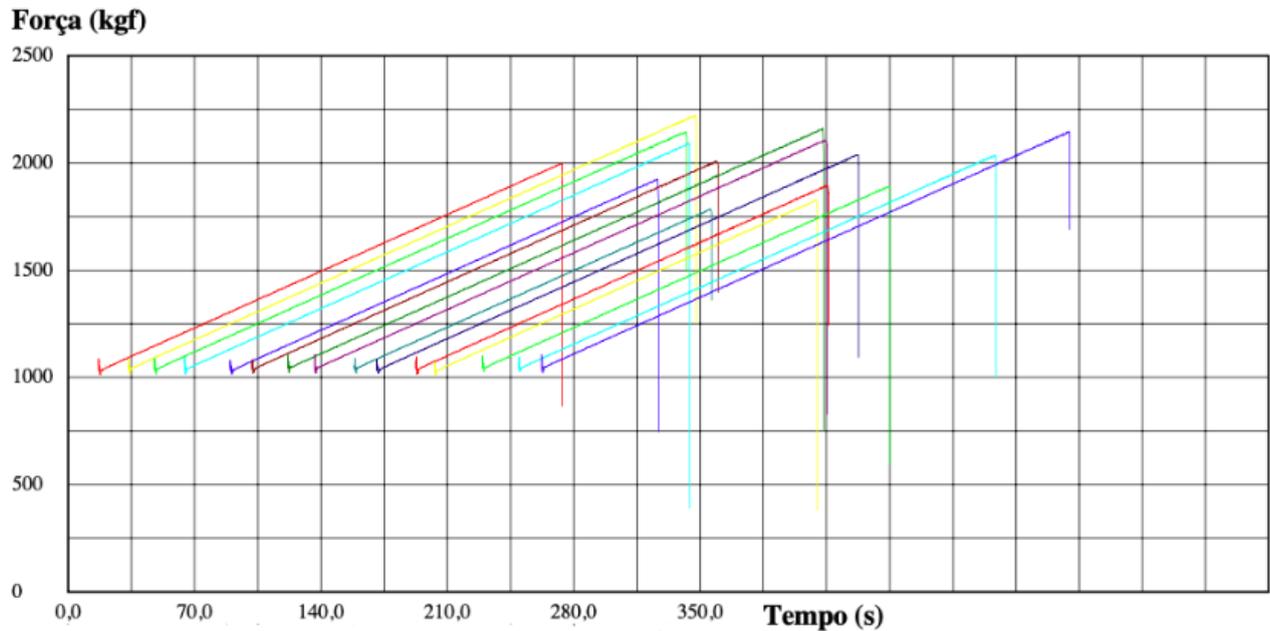
Onde “N” se refere ao número de amostras da série e o “i” representa a posição (número de ordem) na ordem crescente dos valores das tensões.

Com os valores das tensões e a probabilidade de sobrevivência foi possível calcular o $\ln(\sigma_i)$ e $\ln(-\ln P(s))$. Esses cálculos estão representados nas colunas “ $\ln(\sigma_i)$ ” e “ $\ln(-\ln(Ps))$ ”. Os valores desses cálculos foram usados para traçar o gráfico de dispersão e assim obter a linha tendência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As curvas de carregamento de todos os ensaios seguiram um comportamento linear até a ruptura como pode ser mostrado na Figura 12, para a série II. A Figura 13 apresenta o comportamento na ruptura tipicamente observados nos ensaios.

Figura 12 - Forma linear do gráfico até a ruptura



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 13 - Rompimento total após ensaio mecânico



Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 5 discrimina os resultados individuais das n amostras testadas da

série I, enquanto que a Figuras 14 apresenta a respectiva curvas de Weibull.

Tabela 5 - Resultados da série I (Relação A/C = 0,45 – aos 7 dias)

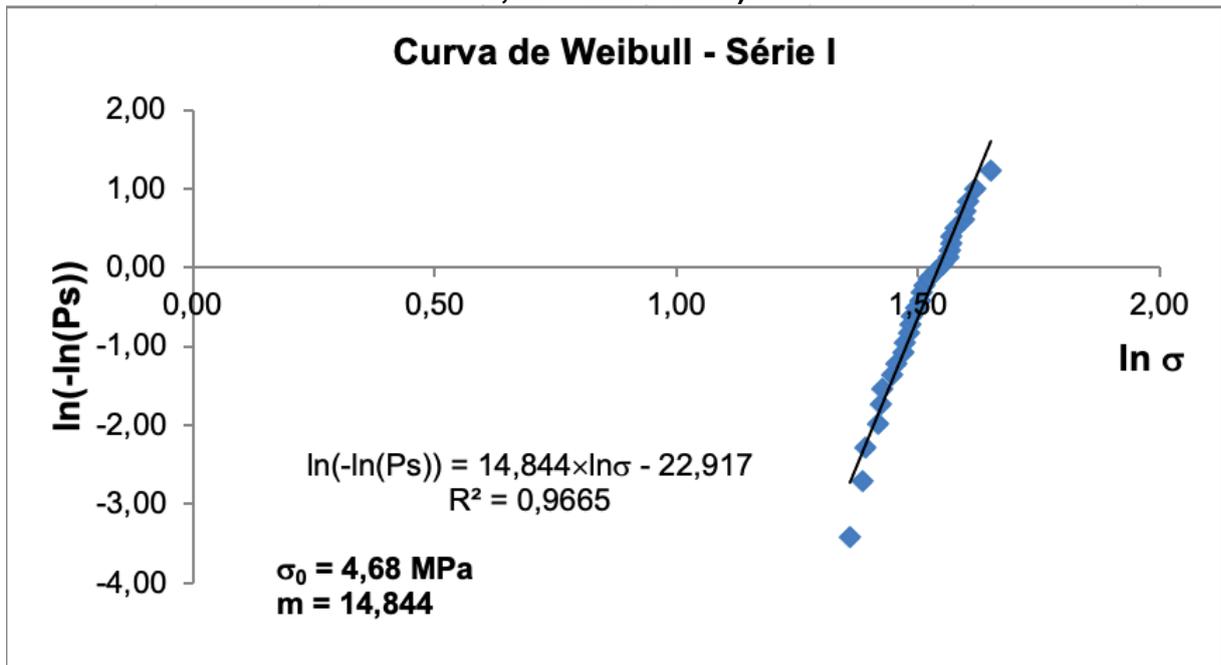
n	P _{max} (kN)	s (MPa)	i	σ _i (MPa)	Ps	ln (σ _i)	ln (-ln(Ps))
1	18,86	4,24	1	3,90	0,9677	1,36	-3,42
2	20,69	4,65	2	3,99	0,9355	1,38	-2,71
3	22,10	4,97	3	4,02	0,9032	1,39	-2,28
4	22,39	5,04	4	4,13	0,8710	1,42	-1,98
5	21,31	4,79	5	4,15	0,8387	1,42	-1,74
6	21,19	4,77	6	4,16	0,8065	1,42	-1,54
7	19,33	4,35	7	4,24	0,7742	1,45	-1,36
8	21,52	4,84	8	4,28	0,7419	1,45	-1,21
9	17,75	3,99	9	4,35	0,7097	1,47	-1,07
10	18,47	4,16	10	4,36	0,6774	1,47	-0,94
11	20,94	4,71	11	4,40	0,6452	1,48	-0,82
12	17,87	4,02	12	4,41	0,6129	1,48	-0,71
13	19,62	4,41	13	4,42	0,5806	1,49	-0,61
14	19,55	4,40	14	4,46	0,5484	1,50	-0,51
15	21,93	4,93	15	4,50	0,5161	1,50	-0,41
16	21,34	4,80	16	4,51	0,4839	1,51	-0,32
17	19,84	4,46	17	4,54	0,4516	1,51	-0,23
18	18,46	4,15	18	4,58	0,4194	1,52	-0,14
19	19,02	4,28	19	4,65	0,3871	1,54	-0,05
20	20,34	4,58	20	4,71	0,3548	1,55	0,04
21	19,65	4,42	21	4,77	0,3226	1,56	0,12
22	17,32	3,90	22	4,79	0,2903	1,57	0,21
23	19,39	4,36	23	4,79	0,2581	1,57	0,30
24	21,30	4,79	24	4,80	0,2258	1,57	0,40
25	21,94	4,94	25	4,84	0,1935	1,58	0,50
26	18,35	4,13	26	4,93	0,1613	1,60	0,60
27	20,05	4,51	27	4,94	0,1290	1,60	0,72
28	20,02	4,50	28	4,97	0,0968	1,60	0,85
29	20,16	4,54	29	5,04	0,0645	1,62	1,01
30	23,18	5,21	30	5,21	0,0323	1,65	1,23

Fonte: Autoria própria (2023)

A média de carga (P_{max}) para a ruptura da amostra para a série II foi de 20,13 kN.

A média da tensão (σ_i) obtida no ensaio para a série II foi de 4,53 MPa.

Figura 14 - Papel de probabilidade de Weibull da série I (Relação A/C = 0,45 – aos 7 dias)



Fonte: Autoria própria (2023)

O módulo de Weibull (m) obtido para a série I foi de 14,844.

A Tabela 6 discrimina os resultados individuais das n amostras testadas da série II, enquanto que a Figuras 15 apresenta a respectiva curvas de Weibull.

Tabela 6 - Resultados da série II (Relação A/C = 0,45 – aos 21 dias)

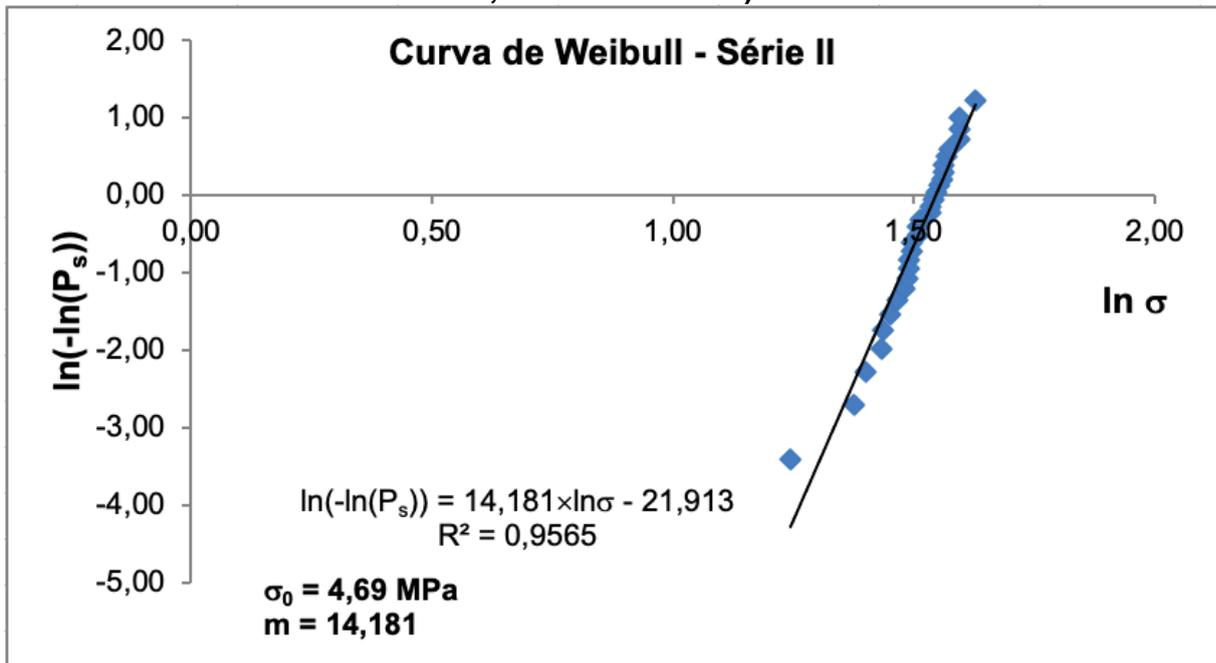
n	P _{max} (kN)	s (MPa)	i	σ_i (MPa)	Ps	ln (σ_i)	ln (-ln(Ps))
1	20,62	4,64	1	3,47	0,9677	1,24	-3,42
2	20,22	4,55	2	3,96	0,9355	1,38	-2,71
3	20,97	4,72	3	4,05	0,9032	1,40	-2,28
4	21,45	4,83	4	4,19	0,8710	1,43	-1,98
5	19,27	4,34	5	4,20	0,8387	1,44	-1,74
6	19,53	4,39	6	4,27	0,8065	1,45	-1,54
7	21,22	4,77	7	4,34	0,7742	1,47	-1,36
8	21,90	4,93	8	4,39	0,7419	1,48	-1,21
9	19,68	4,43	9	4,43	0,7097	1,49	-1,07
10	15,41	3,47	10	4,43	0,6774	1,49	-0,94
11	20,89	4,70	11	4,43	0,6452	1,49	-0,82
12	19,85	4,47	12	4,46	0,6129	1,49	-0,71
13	22,65	5,10	13	4,47	0,5806	1,50	-0,61
14	19,70	4,43	14	4,52	0,5484	1,51	-0,51
15	21,92	4,93	15	4,52	0,5161	1,51	-0,41
16	19,70	4,43	16	4,55	0,4839	1,51	-0,32
17	21,90	4,93	17	4,64	0,4516	1,53	-0,23
18	21,15	4,76	18	4,64	0,4194	1,53	-0,14
19	20,63	4,64	19	4,67	0,3871	1,54	-0,05
20	18,98	4,27	20	4,70	0,3548	1,55	0,04
21	19,82	4,46	21	4,72	0,3226	1,55	0,12
22	21,29	4,79	22	4,76	0,2903	1,56	0,21
23	20,78	4,67	23	4,76	0,2581	1,56	0,30
24	17,61	3,96	24	4,77	0,2258	1,56	0,40
25	20,09	4,52	25	4,79	0,1935	1,57	0,50
26	18,69	4,20	26	4,83	0,1613	1,57	0,60
27	18,01	4,05	27	4,93	0,1290	1,59	0,72
28	18,64	4,19	28	4,93	0,0968	1,59	0,85
29	20,08	4,52	29	4,93	0,0645	1,60	1,01
30	21,16	4,76	30	5,10	0,0323	1,63	1,23

Fonte: Autoria própria (2023)

A média de carga (P_{max}) para a ruptura da amostra para a série II foi de 20,12 kN.

A média da tensão (σ_i) obtida no ensaio para a série II foi de 4,53 MPa.

Figura 15 - Papel de probabilidade de Weibull da série II (Relação A/C = 0,45 – aos 21 dias)



Fonte: Autoria própria (2023)

O módulo de Weibull (m) obtido para a série II foi de 14,181.

A Tabela 7 discrimina os resultados individuais das n amostras testadas da série III, enquanto que a Figuras 16 apresenta a respectiva curvas de Weibull.

Tabela 7 - Resultados da série III (Relação A/C = 0,70 – aos 21 dias)

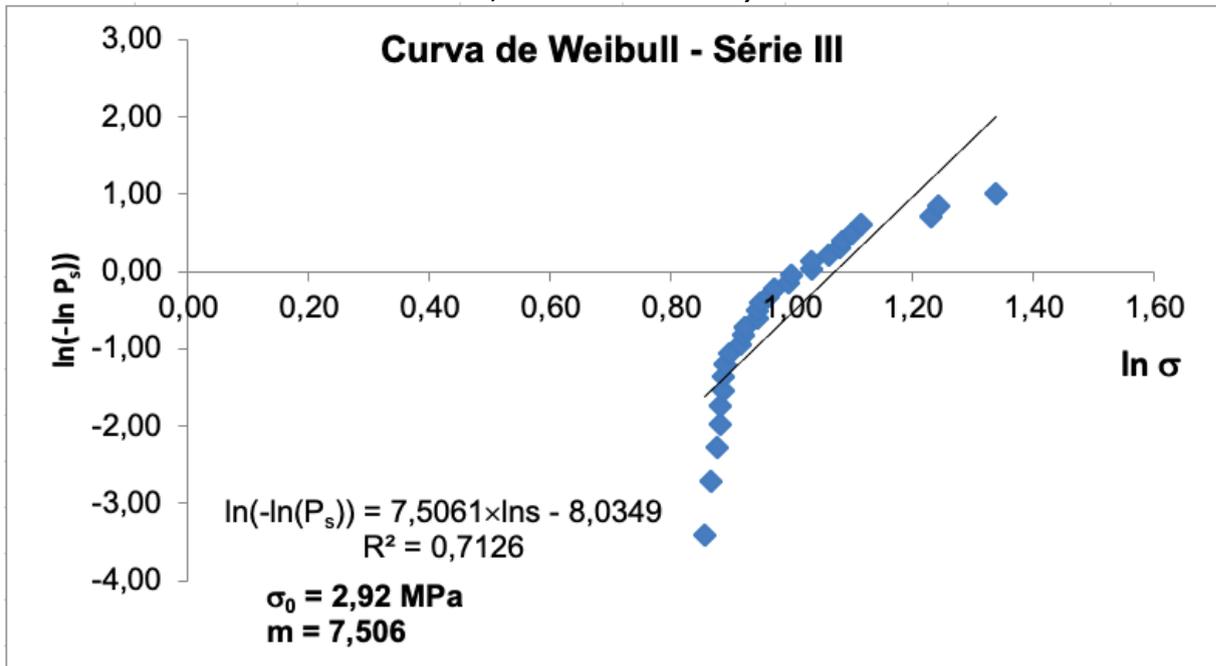
n	P _{max} (kN)	σ (MPa)	i	σ _i (MPa)	Ps	ln (σ _i)	ln (-ln(Ps))
1	11,18	2,51	1	2,352932573	0,9677	0,86	-3,42
2	10,77	2,42	2	2,375432573	0,9355	0,87	-2,71
3	12,85	2,89	3	2,400182573	0,9032	0,88	-2,28
4	12,02	2,70	4	2,413682573	0,8710	0,88	-1,98
5	11,47	2,58	5	2,413682573	0,8387	0,88	-1,74
6	10,67	2,40	6	2,422682573	0,8065	0,88	-1,54
7	11,73	2,64	7	2,427182573	0,7742	0,89	-1,36
8	10,46	2,35	8	2,429432573	0,7419	0,89	-1,21
9	13,53	3,04	9	2,451932573	0,7097	0,90	-1,07
10	10,80	2,43	10	2,492432573	0,6774	0,91	-0,94
11	12,48	2,81	11	2,510432573	0,6452	0,92	-0,82
12	11,61	2,61	12	2,514932573	0,6129	0,92	-0,71
13	10,73	2,41	13	2,564432573	0,5806	0,94	-0,61
14	10,79	2,43	14	2,568932573	0,5484	0,94	-0,51
15	10,73	2,41	15	2,580182573	0,5161	0,95	-0,41
16	11,40	2,56	16	2,611682573	0,4839	0,96	-0,32
17	10,56	2,38	17	2,638682573	0,4516	0,97	-0,23
18	12,06	2,71	18	2,703932573	0,4194	0,99	-0,14
19	13,14	2,96	19	2,712932573	0,3871	1,00	-0,05
20	13,06	2,94	20	2,805182573	0,3548	1,03	0,04
21	15,19	3,42	21	2,807432573	0,3226	1,03	0,12
22	12,47	2,81	22	2,890682573	0,2903	1,06	0,21
23	15,41	3,47	23	2,937932573	0,2581	1,08	0,30
24	11,42	2,57	24	2,955932573	0,2258	1,08	0,40
25	13,34	3,00	25	3,000932573	0,1935	1,10	0,50
26	16,94	3,81	26	3,043682573	0,1613	1,11	0,60
27	11,16	2,51	27	3,417182573	0,1290	1,23	0,72
28	10,90	2,45	28	3,466682573	0,0968	1,24	0,85
29	11,08	2,49	29	3,810932573	0,0645	1,34	1,01

Fonte: Autoria própria (2023)

A média de carga (P_{max}) para a ruptura da amostra para a série III foi de 12,06 kN.

A média da tensão (σ_i) obtida no ensaio para a série III foi de 2,71 MPa.

Figura 16 - Papel de probabilidade de Weibull da série III (Relação A/C = 0,70 – aos 21 dias)



Fonte: Autoria própria (2023)

O módulo de Weibull (m) obtido para a série III foi de 7,506.

Comparando-se os resultados das diferentes séries, verifica-se que: (i) Não há alteração significativa entre a resistência característica e o módulo de Weibull das séries I e II (fator A/C 0,45), testadas, respectivamente, aos 7 dias e aos 21 dias; (ii) Há significativa redução tanto na resistência característica como no módulo de Weibull aos 21 dias, quando o fator A/C passa de 0,45 para 0,7; (III) O fator R^2 (coeficiente de determinação) da série III indica uma qualidade inferior de ajuste do modelo aos dados observados ou, em outras palavras, que o modelo explica somente cerca de 70% da variação dos dados.

Dessa forma, pode-se esperar que com o excesso de água ocorra não apenas uma redução na resistência à tração do material, como uma distribuição mais grosseira dos defeitos internos do material, como sugere o menor valor do módulo de Weibull da mistura com fator A/C 0,7.

Os dados foram apreciados, e a análise apontou que somente os resultados da série I se ajustam a uma distribuição de Weibull, enquanto que as séries II e III são mais bem ajustadas pela distribuição lognormal. De fato, outros autores também têm recomendado cautela no uso generalizado da distribuição de Weibull para o estudo das propriedades mecânicas dos materiais frágeis porque ela não se aplica a todos

os casos (LU et al, 2002; DANZER et al, 2007; BASU et al, 2009). Entretanto, embora não seja sempre estritamente válida, normalmente a distribuição de Weibull é o modelo mais comumente usado para auxiliar a compreensão da distribuição da resistência dos materiais frágeis, (CHEN et al, 2014). Neste trabalho, ainda que com as limitações apontadas, o módulo de Weibull (m) pode ser útil para proporcionar alguma inferência em relação aos efeitos do excesso de água na mistura sobre a microestrutura do concreto, especialmente nas primeiras idades. Embora os dados estejam melhor aderidos à distribuição lognormal, os dados também se aderiram a distribuição Weibull conforme Tabela A1 do Apêndice A.

A dispersão nos resultados de resistência à fratura de materiais frágeis é causada principalmente por variações estatísticas no comprimento de fissuras, trincas ou defeitos assemelhados preexistentes nas amostras. Ou seja, a “estatística da distribuição das falhas” desempenha um papel central na análise da confiabilidade dos materiais frágeis, uma vez que a resistência da amostra depende das dimensões do defeito principal (o mais crítico), que varia de amostra para amostra (LAW, 1993; DANZER et al, 2007).

A resistência de um material frágil é determinada pela magnitude da tensão que causa o crescimento de um defeito “crítico”. Dessa forma, a probabilidade de falha é dada pela probabilidade que um defeito com comprimento crítico esteja submetido a certa tensão suficiente para causar o seu crescimento. Se as cargas forem de tração, um dos defeitos que seja pelo menos parcialmente carregado em modo I (modo de abertura de trinca) controlará a resistência do corpo (ROESLER et al, 2007). A hipótese fundamental da estatística de Weibull é justamente a do elo mais fraco, ou seja, a amostra falha se o seu elemento de volume mais fraco falha.

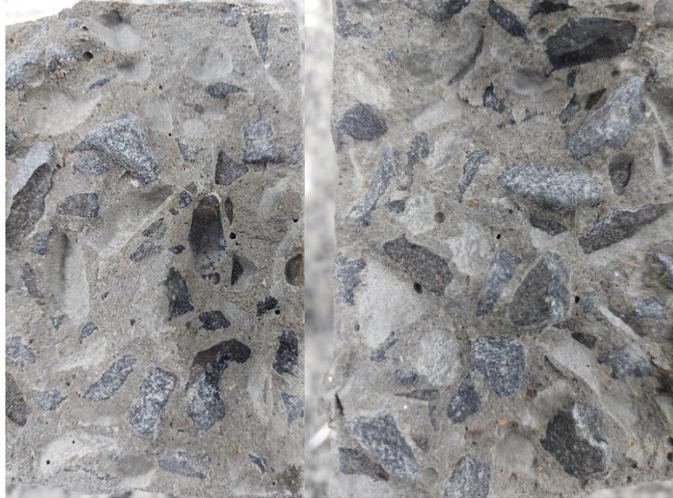
O módulo de Weibull (m) para a série A/C 0,70 possui uma maior tendência a ser mais heterogênea quanto a distribuição de defeitos internos, uma vez que, quanto menor o “ m ” maior a heterogeneidade dessa distribuição (FELBECK; ATKINS, 1984).

A origem da fratura do concreto pode depender de vários fatores, entretanto, segundo Mehta e Monteiro (2014), a zona de transição na interface entre a pasta de cimento hidratada e as partículas maiores de agregado pode ser considerada como a fase limitante da resistência do concreto, ou seja, “o elo mais fraco da corrente”, nas palavras dos autores, que corresponde justamente à hipótese do modelo de Weibull.

Observando-se as superfícies e o perfil da fratura das amostras testadas, Figura 17 e 18 respectivamente, há evidências de que realmente a zona de transição

na interface foi a região mais fraca e vulnerável. Pode-se observar que as partículas dos agregados graúdos permaneceram intactas e suas superfícies não apresentaram partes de argamassa aderidas. Por outro lado, na parte destacada se notam as depressões correspondentes à forma geométrica do agregado destacado.

Figura 17 - Fratura das amostras A/C 0,45 / 21 dias



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 18 - Fratura da amostra em perfil



Fonte: Autoria própria (2023)

Inicialmente, no concreto fresco recém-compactado, filmes de água se formam em torno das partículas grandes do agregado (principalmente debaixo da partícula, o que contribuiria para o aumento da relação A/C local. Como consequência, os produtos de hidratação do cimento apresentam cristais relativamente maiores nestes pontos, determinando a formação de uma microestrutura mais porosa, em relação a pasta de cimento e na argamassa. Além disso, a pasta de cimento hidratada e a rocha possuem coeficientes de expansão térmica diferentes, de forma que durante a secagem surgem microfissuras na zona de transição, provocadas pela movimentação

(expansão e contração) diferenciais entre os diferentes materiais durante o resfriamento e secagem, o que contribui ainda mais para a redução da resistência.

Com efeito, o excesso de água na mistura tende a afetar a distribuição dos poros no concreto, levando a um aumento do tamanho dos poros e à sua localização em pontos específicos, com destaque para a zona de transição, uma vez que com o excesso de água ocorre uma maior segregação dos materiais. O excesso de água também pode aumentar a quantidade de poros capilares (dimensões tipicamente menores que 50 μm) na pasta hidratada, favorecendo a eventual interconexão entre eles (KOSMATKA; WILSON, 2011) e a formação de uma rede mais extensa de poros capilares.

De acordo com o que foi estudado durante o desenvolvimento deste trabalho, espera-se uma melhor compreensão sobre a distribuição de poros no concreto de uma forma indireta utilizando a análise estatística de Weibull. Além de demonstrar que somente o valor de resistência prescrito do concreto não é suficiente para ditar uma confiabilidade do projeto.

5 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que o aumento do teor de água na mistura do concreto efetivamente prejudica a resistência do material.

A maturidade do concreto não alterou significativamente entre as séries I e II. Quando comparado série II e série III (possuem os mesmos dias de maturidade), a série II obteve valores mais elevados para a resistência mecânica.

Os valores do módulo de Weibull obtidos indicam que o material se torna menos uniforme com a elevação da relação A/C , sugerindo uma tendência de alteração significativa no tamanho e na distribuição dos defeitos internos.

O método de Weibull se mostrou adequado para o estudo da resistência do concreto, em função do fator A/C e do tempo de maturidade do material. Entretanto, a técnica exige um número grande de amostras.

Tendo em vista que o método fornece uma forma de inferência sobre a homogeneidade do material, a aplicação deste tipo de análise pode trazer mais confiabilidade na tomada de decisão pelas grandes construtoras do Brasil e de nível mundial, que buscam alta performance em suas construções.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a relação entre a microestrutura do concreto e os parâmetros de Weibull para diferentes tipos de aditivos.
- Realizar estudos comparativos entre os modelos de Weibull e da distribuição log-normal, aplicados à resistência do concreto.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. **C-78: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete**. West Conshohocken, p. 1-3.
- BASU, B.; TIWARI, D.; KUNDU, D.; PRASAD, R. Is Weibull distribution the most appropriate statistical strength distribution for brittle materials? **Ceramic International**, n. 35, p. 237-246, 2009.
- CHEN, X.; WU, S.; ZHOU, J. Variability of compressive strength of concrete cores. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, n. 4, 2014.
- DANZER, R.; SUPANCIC, P.; PASCUAL, J.; LUBE, T. Fracture statistics of ceramics – Weibull statistics and deviations from Weibull statistics. **Engineering Fracture Mechanics**, p. 2919-2932, 2007.
- DIAMOND, S. **The microstructure of cement paste and concrete** – a visual primer. *Cement & Concrete Composites*, p. 913-933, 2004.
- DOMONE; P.; ILLSTON, J. **Construction Materials: their nature and behaviour**. Londres, 2010.
- DUY-LIEM, N. *et al.* Weibull modulus from size effect of high-performance fiber-reinforced concrete under compression and flexure. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 743-758, 2019.
- FELBECK, D.K.; ATKINS, A.G. **Strength and Fracture of Engineering Solids**. New Jersey, 1984.
- FIRME, P.P. **Parâmetros de dosagem de concreto**. 34ª Reunião de Técnicos da Indústria do Cimento. São Paulo: ABCP, 1983.
- GONÇALVES, M.C.; MARGARIDO, F. **Ciência e Engenharia de Materiais de Construção**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2012.
- HILAL, A.A. Microstructure of Concrete. In YILMAZ, S; OZMEN, H.B. **High Performance Concrete Technology and Applications**. Londres: Intechopen, 2016.
- KAPUR; K. PENCHT; M. **Reliability engineering**. p. 489, 2014.
- KOSMATKA, S.H.; WILSON, M.L. **Concrete Mixtures: the guide to applications, methods, and materials**. New Jersey: Portland Cement Association, 2011.
- KUMAR, R.; BHATTACHARJEE, B. **Porosity, pore size and in situ strength of concrete**. p. 155-164, 2003
- LAW, B. **Fracture of Brittle Solids**. 2 ed. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1993.

LEVY, S.; HELENE, P. Cura: como, quando e por quê. **Téchne**, n.20, p. 18-21, 1996.

LU, C.; DANZER, R.; FISCHER, F.D. Fracture statistics of brittle materials: Weibull or normal distribution. **Physical Review E**, v. 65, n. 6, 2002.

MAMLOUK, M.S.; ZANIEWSKI, J.P. **Materials for Civil and Construction Engineers**. 3 ed. New Jersey: Pearson, 2016.

MEEKER; W. ESCOBAR; L. Statistical methods for reliability data / Wiley series in probability and statistics. **Applied probability and statistics**. Nova York: Wiley, p. 680, 1998.

MEHTA, K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª ed. São Paulo; IBRACON, 2014.

MEYERS, M.A.; K.K. **Mechanical Behavior of Materials**. 2 ed. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2009.

NEVILLE, A.M. propriedades do Concreto. 5ª ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2016.

NGUYEN; D et al. Weibull modulus from size effect of high-performance fiber-reinforced concrete under compression and flexure. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 743-758, 2019.

ROESLER, J.; HARDERS, H.; BAEKER, M. **Mechanical Behaviour of Engineering MaterialsI**. Nova York York: Springer, 2007.

ROYLANCE, D. **Statistics of Fracture. Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge**. 2001.

SCRIVENER, K.L.; CRUMBIE, A.K.; LAUGESSEN, P. The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. **Interface Science**, 12, p. 411-421, 2004.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

VIRDI, S.S. **Construction Science and Materials**. 2 ed. Chichester (K): John Wuley & Sons, 2017.

WEIBULL, W. **A statistical distribution function of wide applicability**. Mech, p 293–296, 1951.

APÊNDICE A – Análise de aderência de curva

Para verificar a distribuição que melhor se adequa à variável tensão, construiu-se os gráficos apresentados nas Figuras A1 a A3, para os grupos I a III. Os gráficos apresentados incluem apenas as duas melhores distribuições (Weibull e Lognormal). Como pode ser observado pelos histogramas, as distribuições dos dados dos grupos II e III aproximam-se melhor da Distribuição Lognormal, o que também pode ser observado nos gráficos das funções de distribuição acumulada, no Q-Q Plot e no P-P Plot, a partir da proximidade dos pontos às retas. A distribuição das tensões do grupo II, por sua vez, aproxima-se melhor da curva da Weibull.

Para verificar a aderência dessas distribuições, foram calculadas algumas medidas, apresentadas na Tabela A1. Os testes de Cramer Von Mises (CVM) e Kolmogorov-Smirnov (KS) testam a hipótese nula de que os dados se aderem à distribuição em estudo. Considerando-se um nível $\alpha = 5\%$ de significância, um p-value superior a 0,05 indica que os dados parecem não violar a distribuição sendo testada. Como pode ser observado, todos os p-values calculados indicam a não rejeição da hipótese nula (todos os p acima de 0,05), ou seja, os dados parecem aderir às duas distribuições avaliadas.

Além dos p-values, a Tabela A1 também contempla os valores do log da verossimilhança (LL), do AIC (Critério de Informação de Akaike) e do BIC (Critério de Informação Bayesiano), calculados a partir do ajuste dos dados pelo Método da Máxima Verossimilhança. Para comparar as distribuições a partir dessas estatísticas, utiliza-se o critério “quanto maior, melhor” para LL e “quanto menor, melhor” para AIC e BIC.

Para os grupos I e III, o maior valor de LL foi observado para a distribuição Lognormal, assim como os menores valores de AIC e BIC. Os dados do grupo II aderiram-se melhor à distribuição Weibull.

Tabela A1 – Aderência dos dados às curvas teóricas.

GRUPO	Medida	Densidade	
		Weibull	Lognormal
G2	p-value CVM	0,15	0,16
	p-value KS	0,20	0,97
	LL	-10,45	-9,56
	AIC	24,91	23,11
	BIC	27,71	25,91
G3	p-value CVM	0,15	0,16
	p-value KS	0,14	0,18
	LL	-7,20	-10,76
	AIC	18,40	25,52
	BIC	21,20	28,33
G4	p-value CVM	0,14	0,14
	p-value KS	0,47	0,26
	LL	-14,75	-8,95
	AIC	33,51	21,90
	BIC	36,10	24,49

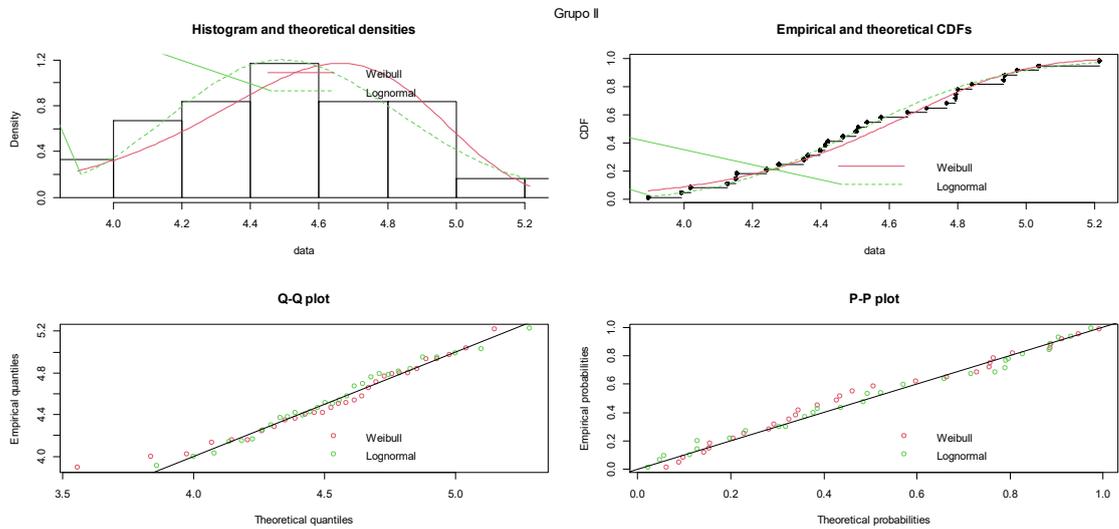


Figura A1 – Aderência dos dados às densidades Weibull e Lognormal - grupo

I.

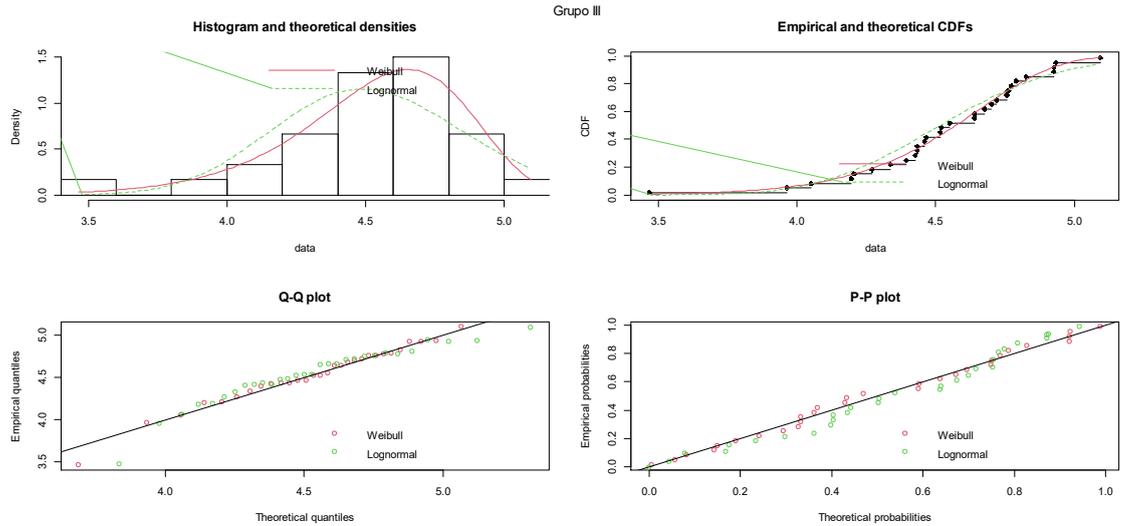


Figura A2 – Aderência dos dados às densidades Weibull e Lognormal - grupo

II.

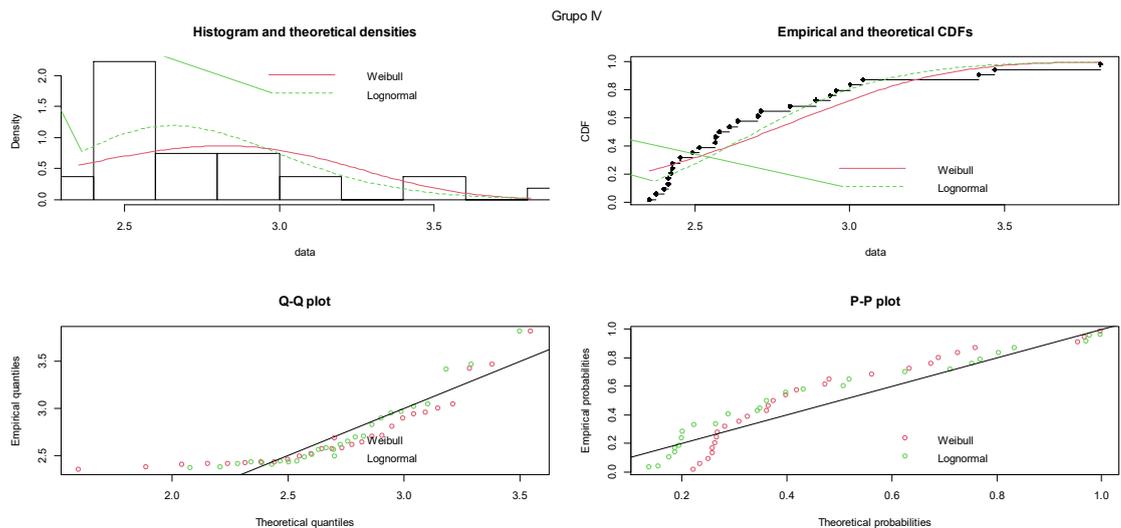
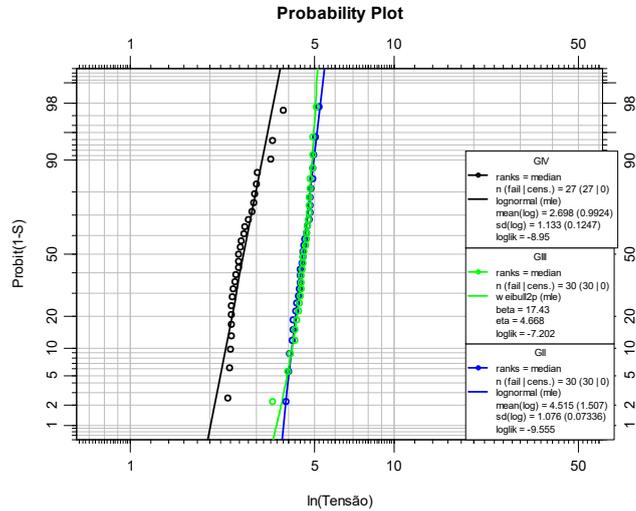


Figura A3 – Aderência dos dados às densidades Weibull e Lognormal - grupo

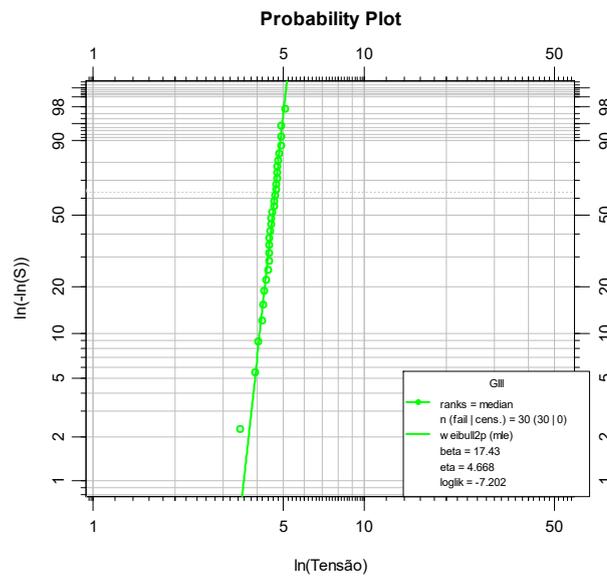
III.

Os papéis de probabilidade para os grupos I a III em conjunto, e para o grupo II, individualmente, são apresentados na Figura A4, painéis a e b, respectivamente. Como pode ser observado, os pontos estão bem aderidos às distribuições ajustadas. O gráfico para o grupo 3 na Figura A4, painel a, apresenta-se ligeiramente curvado em virtude da diferença de escala utilizada para a distribuição Weibull e, por isso, foi apresentado isolado na Figura A4 painel b, em escala adequada, de onde pode-se notar sua proximidade da reta. Os gráficos sugerem comportamentos muito

semelhantes entre os grupos I e II e um distanciamento desses grupos em relação a grupo III.



(a)



(b)

Figura A4 – Papel de Probabilidade – (a) Grupos I e III (Lognormal); (b) Grupo II (Weibull).