

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

DIRETORIA DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ELISA SANTANA DE ALENCAR

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO E TIPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETOS DAS CLASSES C30 E
C40**

MONOGRAFIA

ARACAJU

2023

ELISA SANTANA DE ALENCAR

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO E TIPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETOS DAS CLASSES C30 E
C40**

Monografia apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel, da
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do
Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador: Prof. M.Sc. Euler Wagner Freitas
Santos.

ARACAJU

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Alencar, Elisa Santana de.

A368e Estudo da influência do tempo e tipo de cura na resistência à compressão de corpos de prova de concretos das classes C30 e C40. / Elisa Santana de Alencar. – Aracaju, 2023.

71 f.

Orientador: Prof. Me. Euler Wagner Freitas Santos. Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Sergipe, 2023.

1. Concreto. 2. Tipo de cura. 3. Tempo de cura. 4. Resistência à compressão. I. Santos, Euler Wagner Freitas. II. Título.

CDU 691.32

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia Nº 248

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO E TIPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETOS DAS CLASSES C30 E
C40**

ELISA SANTANA DE ALENCAR

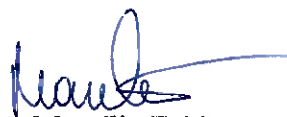
Esta monografia foi apresentada às 10h 10 do dia 11 de Janeiro de 20 23 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados.

Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.



Prof.^a. Dr.^a. Carla Cristina Nascimento
Santos Pereira

(IFS – Campus Aracaju)



Prof. M.Sc. Marcílio Fabiano Goivinho

(IFS – Campus Aracaju)



Prof. M.Sc. Euler Wagner Freitas Santos

(IFS – Campus Aracaju)
Orientador



Prof. Dr. Pablo Gleydsen de Sousa

(IFS – Campus Aracaju)
Coordenador da COEC

Dedico esse trabalho a minha família.
Obrigada por todo amor,
apoio e suporte. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Mais um ciclo se fecha, cheio de conquistas, aprendizados e memórias que ficarão guardados para sempre na memória e no coração. Não poderia deixar de agradecer a tantos que me ajudaram e fizeram parte dessa caminhada.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e aos espíritos superiores por todo auxílio, intuição e por permitirem que esse momento se concretizasse. Nenhuma folha cai no chão sem a permissão de Deus.

Aos meus pais, Neuzice e Fernando (*in memoriam*), pelo amor incondicional que me concederam, apoio e todos os ensinamentos, permitindo-me ser o ser humano que sou hoje. À minha irmã Lívia, por estar sempre ao meu lado, nos momentos alegres e tristes, e por ter aceitado seguir nessa vida sendo minha irmã. Torço por você todos os dias. Amo vocês.

À Matheus, que sempre esteve do meu lado nessa caminhada, me incentivando e nunca deixando que eu desistisse. Tenho certeza de que nosso encontro é de outras vidas. Amo você, gatinho.

Aos amigos que se fizeram presentes a muito ou pouco tempo. À Cris, Joana, Ianka e Natália por serem minhas parceiras e irmãs de alma. À Tati, Gabi, Aline, Carla e Geizi, por fazerem parte dessa caminhada comigo, compartilhando tantos sorrisos, preocupações, dias no Mago e memórias que ficarão guardadas no meu coração aonde quer que eu vá.

Ao meu professor e orientador Euler, por ter me aceitado como sua orientanda, passando tantos ensinamentos e me acalmando nos momentos mais cruciais. Obrigada por tanto. À minha parceira de trabalhos de laboratório no TCC, Thais, por ter feito parte desse trabalho comigo, me auxiliando sempre que necessário, dividindo conquistas, preocupações e sendo a melhor pessoa com quem eu poderia fazer as atividades experimentais.

Aos lugares onde estagiei, por último à FUNASA, em especial a Sylvio, Tatiane e Luciano pelo ensinamento profissional que me ofereceram. Gratidão por tudo.

Aos demais, Luis, Corcino, Thalishow, Joyre, Elyakim, Eveline, Dayane, Thamires que foram amigos que se fizeram presentes de alguma forma nessa jornada. Levo vocês no coração. Por fim, agradeço a todos que se fizeram presentes na minha vida.

À Supermix Concreto e a Votorantin pela doação dos insumos, possibilitando a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que se fizeram presentes na minha vida. Gratidão a todos.

“[...]Pedi a luz que vos clareie o caminho e
ela vos será dada; pedi forças para
resistirdes ao mal e as tereis; pedi a
assistência dos bons Espíritos e eles virão
acompanhar-vos e, como o anjo de Tobias,
vos guiarão; pedi bons conselhos e eles nos
vos serão jamais recusados; batei à nossa
porta e ela se vos abrirá; [...]”
(KARDEC, Allan, 2013)

RESUMO

ALENCAR, Elisa S. **Estudo da influência do tempo e tipo de cura na resistência à compressão de corpos de prova de concretos das classes C30 e C40**. 71 folhas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2023.

A cura do concreto é uma etapa fundamental no processo da concretagem, pois além de retardar a evaporação da água na preparação da mistura, deve também reduzir a retração do concreto, aumentando assim sua durabilidade. Existem alguns tipos de cura que são os mais utilizados no mercado atualmente, porém pesquisas apontam a cura úmida como a mais empregada principalmente em obras residenciais, sendo muitas vezes nem sequer realizada ou utilizada de forma incorreta. Diante do exposto, o presente estudo pretende avaliar a variação de resistência de dois tipos de concretos (classes C30 e C40) utilizados no mercado de construção civil sergipana mediante diferentes tempos (3, 7, 14 e 28 dias) e tipos de cura (cura por imersão e molhagem contínua). Os concretos foram avaliados mediante comparação entre os corpos de prova curados em laboratório por imersão e os curados por molhagem contínua, simulando condições de obra. Os resultados foram comparados a partir do tratamento estatístico da ANOVA e do Teste de Tukey. O concreto da classe C30 não apresentou variação significativa na resistência nem com tempo de cura nem com o tipo de cura. Já o concreto da classe C40, apresentou variação de resistência com o tipo de cura em cada um dos intervalos de tempos de cura observados. O emprego de tratamento estatístico tornou possível uma melhor análise da influência do tipo e tempo de cura nas resistências dos tipos de concretos estudados.

Palavras-chave: Concreto. Tipo de Cura. Tempo de Cura. Resistência à compressão.

ABSTRACT

ALENCAR, Elisa S. **Estudo da influência do tempo e tipo de cura na resistência à compressão de corpos de prova de concretos das classes C30 e C40.** 71 folhas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2023.

Concrete curing is a fundamental step in the concreting process, as in addition to delaying the evaporation of water in the preparation of the mixture, it must also reduce the shrinkage of the concrete, thus increasing its durability. There are some types of curing that are most used in the market today, but research points to wet curing as the most used, mainly in residential works, often not even performed or used incorrectly. Given the above, the present study intends to evaluate the resistance variation of two types of concrete (classes C30 and C40) used in the civil construction market in Sergipe through different times (3, 7, 14 and 28 days) and types of curing (curing by immersion and continuous wetting). The concretes were evaluated by comparing specimens cured in the laboratory by immersion and those cured by continuous wetting, simulating conditions on site. The results were compared based on the statistical treatment of ANOVA and the Tukey Test. Class C30 concrete did not show significant variation in strength either with curing time or with the type of curing. Class C40 concrete, on the other hand, showed resistance variation with the type of curing in each of the observed curing time intervals. The use of statistical treatment made possible a better analysis of the influence of type and curing time on the strength of the types of concrete studied.

Keywords: Concrete. Cure Type. Healing Time. Compressive strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de areia.....	23
Figura 2 – Tipos de brita.....	23
Figura 3 – Esquema ilustrativo da fabricação do cimento.	24
Figura 4 – Comportamento mecânico dos compostos do cimento Portland.....	25
Figura 5 – Ilustração do comportamento do aditivo químico nas partículas de cimento.	27
Figura 6 – Ação do superplastificante na partícula de cimento.	29
Figura 7 – Ilustração do mecanismo de incorporação do ar.....	30
Figura 8 – Relação entre a resistência do concreto e sua relação água/cimento.	34
Figura 9 – Relação da resistência à compressão e porosidade capilar.	35
Figura 10 – Ensaio de resistência à tração.....	36
Figura 11 – Hidratação dos compostos do cimento.	37
Figura 12 – Esquema demonstrativo da hidratação do cimento.....	38
Figura 13 – Esquematização da aplicação da etringita.	39
Figura 14 – Esquema de hidratação e pega do cimento Portland.....	40
Figura 15 – Modelos da estrutura do CSH.	41
Figura 16 – Cristais hexagonais de CH em MEV.	42
Figura 17 – Cristais de etringita em MEV.	42
Figura 18 – Representação da zona de transição e da matriz da pasta de cimento do concreto.....	43
Figura 19 – Cura úmida do concreto por molhagem contínua.....	44
Figura 20 – Cura do concreto com utilização de sacos de aniagem.	45
Figura 21 – Aplicação de produto para realização da cura química.	46
Figura 22 – Areia natural e artificial para caracterização.	50
Figura 23 – Brita 0.....	51
Figura 24 – Secagem do material em estufa.....	52
Figura 25 – Mistura do material em betoneira.	52
Figura 26 – Moldagem dos corpos de prova.	53
Figura 27 – Execução de ensaio <i>Slump Test</i>	53
Figura 28 – Corpos de prova sendo curados nos dois ambientes de cura (por imersão e molhagem contínua).....	54

Figura 29 – Ensaio de compressão axial realizado nos CP.	55
Figura 30 – Prensa MUE-100.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise da resistência do concreto da classe C30 em diferentes tempos de cura nos dois tipos de cura.....	59
Gráfico 2 - Análise da resistência do concreto da classe C40 em diferentes tempos de cura nos dois tipos de cura	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades dos compostos do cimento Portland.	26
Quadro 2 – Grupos de controle em função das idades e formas de cura.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo conforme ABNT NBR 7211:2022.....	22
Tabela 2 – Lista da composição granulométrica do agregado graúdo conforme ABNT NBR 7211:2022.....	23
Tabela 3 – Composição de compostos calculada segundo as fórmulas de Bogue...25	
Tabela 4 – Resultado do ensaio de caracterização do cimento.	49
Tabela 5 – Resultado do ensaio de caracterização da areia natural.	50
Tabela 6 – Resultado do ensaio de caracterização da areia artificial.....	50
Tabela 7 – Resultado do ensaio de caracterização da Brita 0.	51
Tabela 8 - Valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C30 (em MPa), em função do tempo e tipos de cura.....	57
Tabela 9 - Valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C40 (em MPa), em função do tempo e tipos de cura.....	58
Tabela 10 – Resultado da ANOVA para ambas as classes de resistência.	61
Tabela 11 – Comparativo dos valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C30I (em MPa), em função do tempo de cura.....	62
Tabela 12 – Comparativo dos valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C30II (em MPa), em função do tempo de cura.....	62
Tabela 13 – Comparativo dos valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C40I (em MPa), em função do tempo de cura.....	63
Tabela 14 – Comparativo dos valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C40II (em MPa), em função do tempo de cura.....	63
Tabela 15 – Comparativo dos valores de resistência à compressão dos corpos de prova da classe C30 (em MPa), em função do tipo de cura.....	64
Tabela 16 – Comparativo dos valores de resistência à compressão dos corpos de prova da classe C40 (em MPa), em função do tipo de cura.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS

a.C. Antes de Cristo

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Técnica Brasileira
ANOVA	Análise de Variância
MPa	Mega Pascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVO GERAL	19
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	CONCRETO	20
3.1.1	Histórico e Conceito	20
3.1.2	Aplicações de Estruturas em Concreto	21
3.2	CONSTITUINTES DO CONCRETO	21
3.2.1	Agregados	21
3.2.2	Cimento	24
3.2.3	Aditivos	26
3.2.3.1	Aditivos redutores de água (plastificante e superplastificante)	27
3.2.3.2	Aditivo modificador de pega	28
3.2.3.3	Outros aditivos	30
3.3	PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO	31
3.3.1	Consistência e trabalhabilidade	31
3.3.2	Homogeneidade	32
3.4	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	33
3.4.1	Resistência à compressão	33
3.4.2	Resistência à tração	35
3.5	CURA DO CONCRETO	36
3.5.1	Hidratação do cimento	36
3.5.2	Produtos de hidratação	40
3.5.3	Técnicas de cura	43
3.5.3.1	Cura úmida	43
3.5.3.2	Cura química	45
3.5.3.3	Cura térmica	46
3.6	INFLUÊNCIA DA CURA NO DESEMPENHO DO CONCRETO	47
3.7	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	47
4	METODOLOGIA	49
4.1	ETAPA 1	49

4.2	ETAPA 2	51
4.3	ETAPA 3	54
4.4	ETAPA 4	55
5	RESULTADOS	57
5.1	DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	57
5.2	TRATAMENTO ESTATÍSTICO ANOVA.....	61
5.3	TESTE DE TUKEY	62
5.3.1	Comparação das médias de acordo com o tempo de cura.....	62
5.3.2	Comparação das médias de acordo com o tipo de cura.....	64
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

A cura do concreto é a etapa que visa mantê-lo com o grau de umidade tal que se garanta o processo de pega e endurecimento da matriz de cimento, especialmente para concretos de menor relação água/cimento.

Sendo uma etapa essencial no processo de concretagem, a cura do concreto vem sendo amplamente estudada e diversificada, fazendo com que novas técnicas e materiais para esse fim sejam descobertos. O mercado tem ofertado novos mecanismos e produtos que aceleram esse processo de cura de concretos, proporcionando produtos com uma alta competitividade.

Não obstante, observa-se que o processo de cura é negligenciado e muitas vezes realizado de forma errônea pelos profissionais envolvidos. Segundo Andrade e Tutikian (2011), diversos fatores deixam de ser levados em consideração nos trabalhos alusivos à etapa de cura, desde aspectos relacionados a diversidades climáticas, como a outros relativos ao tempo e tipo de materiais empregados, o que compromete significativamente as propriedades do concreto no estado endurecido, especialmente a sua resistência à compressão, que muitas vezes não alcança o valor de projeto. Os mesmos autores explicam que as atividades rotineiras de um canteiro de obras muitas vezes inviabilizam uma cura prolongada de lajes, por exemplo, o que pode acabar influenciando no ganho de resistência final. A ABNT NBR 14931:2004 aponta que o concreto deve ser curado até a resistência satisfatória ou no caso de lajes, até a resistência ser igual ou maior a 15 MPa.

A cura do concreto tem influência direta, tanto no ganho da resistência do concreto quanto na redução da sua retração, dado que minimiza a perda de água para o exterior (NEVILLE, 2016). Tendo isso em vista, é perceptível a importância de se analisar e escolher o tipo de cura ideal para cada situação, levando em conta todas as adversidades e a necessidade singular de cada estrutura, atendendo aos requisitos necessários para cada cenário.

Um dos métodos de cura mais usuais de se aplicar é a cura úmida do concreto, sendo facilmente encontrada em obras mais comuns do dia a dia. Essa técnica é bastante utilizada, principalmente em lajes, deixando sua superfície sempre úmida, conservando assim a água necessária para garantir a hidratação dos

constituintes do cimento, e, por conseguinte, o ganho de resistência previsto para o concreto.

Mesmo que seja um tipo de cura mais habitual e de fácil prática, como é o caso da cura por molhagem, muitas vezes essa técnica não é realizada da forma correta, como por exemplo: a frequência da molhagem não é a adequada, fazendo com que a superfície fique seca por algum período; não se utiliza a técnica de molhagem associada a outras que garantam eficácia no processo de cura, como a utilização de mantas para manter a superfície úmida por mais tempo; e até mesmo, a inexistência da cura em alguns tipos de estruturas de concreto, como em vigas e pilares (NEVILLE, 2016; ANDRADE; TUTIKIAN, 2011).

Perante o exposto, este trabalho buscou investigar o impacto no ganho da resistência final de concretos convencionais empregados em Sergipe, variando os aspectos tempo de cura e forma de cura, por molhagem constante e por imersão, em corpos de prova de concreto de duas classes de resistência distintas, C30 e C40 (NBR 8953:2015).

O trabalho foi dividido em tópicos para ter uma fundamentação e motivações para a realização dele. O tópico 2 demonstra os objetivos geral e específicos. No tópico 3 é demonstrado todo o embasamento e fundamentação do trabalho, através da fundamentação teórica. Os procedimentos e ensaios do experimento são demonstrados no tópico 4. No tópico 5 tem-se os resultados obtidos e discussões dos dados. Por fim, no tópico 6, apresenta-se a conclusão do trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento da resistência de concretos convencionais empregados no estado de Sergipe, mediante diferentes tipos e tempos de cura.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a influência de diferentes tempos de cura (3, 7, 14 e 28 dias) no ganho de resistência de concretos das classes C30 e C40;
- Avaliar a influência de diferentes tipos de cura (cura por imersão e por molhagem contínua) no ganho de resistência de concretos das classes C30 e C40 considerando tempos de cura específicos;
- Comparar a resistência final dos concretos considerando os diferentes tipos de cura;
- Empregar o tratamento estatístico da ANOVA associado ao Teste de Tukey para a análise da influência dos tempos e tipos de cura na variação da resistência dos concretos em estudo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONCRETO

Sendo o material mais amplamente utilizado na construção civil, o concreto é um elemento versátil e de fácil trabalhabilidade. Dentre alguns de seus atributos, ele apresenta uma ótima resistência à água, é um material com uma longa vida útil mesmo em ambientes mais agressivos e permite moldar diversos tipos de formas em elementos estruturais de maneira fácil. Além disso, o concreto é facilmente encontrado em canteiros de obra e apresenta um baixo custo (ANDRADE; TUTIKIAN, 2011).

3.1.1 Histórico e Conceito

Considerando que o concreto teve sua origem e inspiração na rocha sedimentar, pode-se afirmar que sua primeira aparição e utilização foram entre 8.000 e 4.000 anos a.C, no final do período Neolítico e início da idade do bronze, a partir da necessidade do homem de abrigo e proteção. Porém, foi no império romano que houve, de fato, a primeira idealização e concepção do concreto, o qual era composto por agregados graúdo (por exemplo cacos de pedra calcárea), areia, cal, Pozzolana e água (BUNDER, 2016). A partir de então, ocorreu a disseminação e aprimoramento desse material, resultando em diversos métodos construtivos.

Apesar de existirem diversos materiais alternativos e aditivos para sua fabricação, em suma, “o concreto é um material composto de água, cimento e agregados” (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2017, p. 19). Isso o torna ainda mais popular em canteiros de obra, no que se refere ao seu relativo baixo custo.

No Brasil, o concreto chegou de fato no início do século XX, porém como produto patentado. “A partir da instalação das cimenteiras, em meados dos anos 1920, inicia-se o processo de difusão da tecnologia do concreto, determinando um período crítico de instalação dessa tecnologia no Brasil ao longo dos anos 1930.” (SANTOS, 2008, p. 15).

Nota-se, portanto, que ocorreu uma difusão e aceitação da utilização do concreto por todo o mundo, graças às diversas vantagens e várias formas de utilização que esse material oferece.

3.1.2 Aplicações de Estruturas em Concreto

O uso do concreto se tornou comum e extremamente necessário em praticamente todas as obras. Mehta e Monteiro (2008) citam que o material concreto em conjunto com armaduras em aço, formam os elementos estruturais. Esses elementos estruturais são responsáveis por dar a sustentação da edificação, sejam eles formando o sistema estrutural da superestrutura, com elementos como lajes, pilares e vigas, ou na infraestrutura, com a fundação, transferindo e distribuindo a carga para o solo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Devido a sua grande resistência à água em comparação com outros materiais, existem também outros tipos de estruturas em concreto, como as canalizações, barragens e canais. “Elementos estruturais expostos à umidade, tais como estacas, fundações, sapatas, pisos, vigas, pilares, coberturas, paredes exteriores e pavimentos, são frequentemente construídos em concreto [...]” (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 03).

3.2 CONSTITUINTES DO CONCRETO

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2017), o concreto é composto por cimento, água e agregados. Essa mistura forma o chamado concreto simples, que segundo ABNT NBR 6118:2014, são aqueles elementos que não possuem qualquer tipo de armadura ou possui o mínimo exigido. Além desses constituintes, existem também os aditivos, que tem a função de melhorar algum aspecto do concreto, como impermeabilidade da massa, aumentar a plasticidade quando o concreto estiver fresco etc (BAUER, 2000).

3.2.1 Agregados

Segundo Mehta e Monteiro (2008) os agregados são um composto granular utilizados para formar concreto ou argamassa com cimento hidráulico. Conforme Bastos (2019), além de influenciarem em inúmeras características do concreto, os agregados formam cerca de 70 a 80% da sua constituição.

Bauer (2000) classifica os agregados em dois grupos:

- Naturais: são aqueles que já se encontram na natureza, como a areia e o cascalho.
- Artificiais: são obtidos a partir de processos industriais.

Sua classificação também pode ser obtida quanto à forma e textura, levando em consideração suas características externas. Podem ser classificados como arredondados, irregular, lamelar, anguloso, alongado, lamelar e alongado (NEVILLE; BROOKS, 2013).

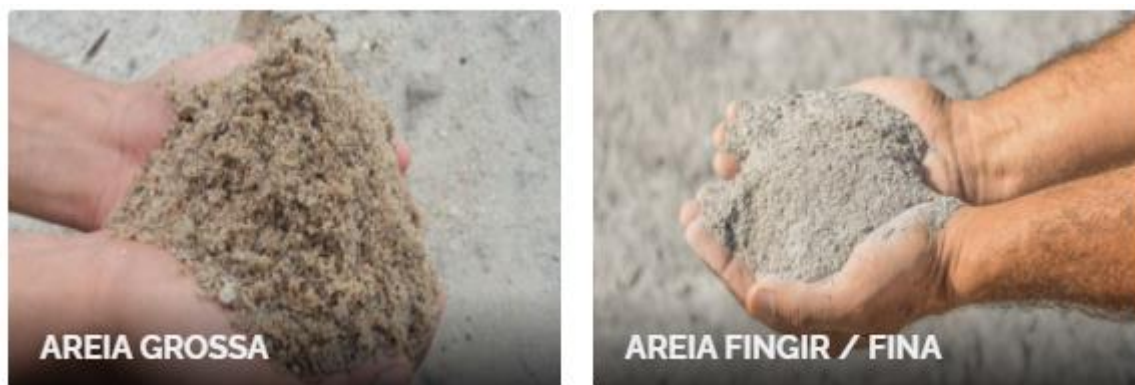
Dentre esses e outros tipos de classificações, a mais conhecida delas é a partir das dimensões da partícula, classificando-as como agregados gráudo e miúdo. A ABNT NBR 7211:2022 define agregado miúdo como grãos que passam pela peneira de abertura 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de 150 µm, conforme Tabela 1 e ilustrado na Figura 1.

Tabela 1 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo conforme ABNT NBR 7211:2022.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida e acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Fonte: Adaptação da ABNT NBR 7211:2022.

Figura 1 – Tipos de areia.



Fonte: JRF Areias e Britas (2021).

Bem como as areias, a ABNT NBR 7211:2022 também apresenta a classificação dos agregados graúdos, sendo grãos que passam pela peneira de 75 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm, conforme demonstrado na Tabela 2 e ilustrado na Figura 2.

Tabela 2 – Lista da composição granulométrica do agregado graúdo conforme ABNT NBR 7211:2022.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida e acumulada				
	Zona granulométrica (d/Da)				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ^b	87 – 100	-
19 mm	-	5 – 25 ^b	65 ^b – 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 15 ^b	80 ^b – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-

Fonte: Adaptação da ABNT NBR 7211:2022.

Figura 2 – Tipos de brita.



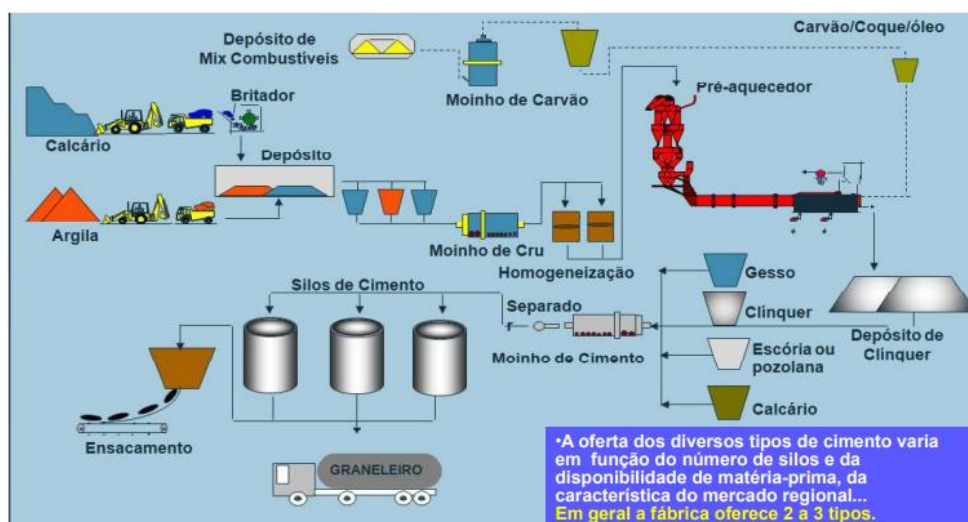
Fonte: VMS Areias (2021).

3.2.2 Cimento

Sendo um material pulverulento, o cimento desenvolve propriedades ligantes em consequência à sua hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Dentre os diversos tipos de cimentos, os mais usuais dentro da engenharia é o cimento Portland. Segundo Mehta e Monteiro (2008), o cimento Portland é um cimento hidráulico composto de silicatos de cálcio e que, ao serem misturados em água, acabem por se hidratar, resultando no endurecimento da pasta. A primeira civilização a utilizar um concreto com o uso de cimento hidráulico foram os antigos romanos (NEVILLE; BROOKS, 2013), mas foi na Inglaterra que a concepção do cimento Portland sucedeu (BASTOS, 2019).

Conforme citado por Neville e Brooks (2013), o cimento Portland é formado pela moagem de um material originalmente chamado de clínquer, que é composto pela mistura de calcário e argila e seu posterior cozimento até fusão incipiente. A mistura de calcário e da argila deve resultar em uma mistura homogênea com o propósito de que a cal se combine com os elementos argilosos, para que não resulte em um material com cal livre, prejudicando o resultado. Para melhor entendimento, a Figura 3 ilustra a fabricação do cimento.

Figura 3 – Esquema ilustrativo da fabricação do cimento.



Fonte: Isaia (2011).

Empregando o método de Bogue, é possível determinar uma estimativa da quantidade de cada composto do cimento Portland, o que pode variar conforme pode ser observado na Tabela 3 (NEVILLE; BROOKS, 2013).

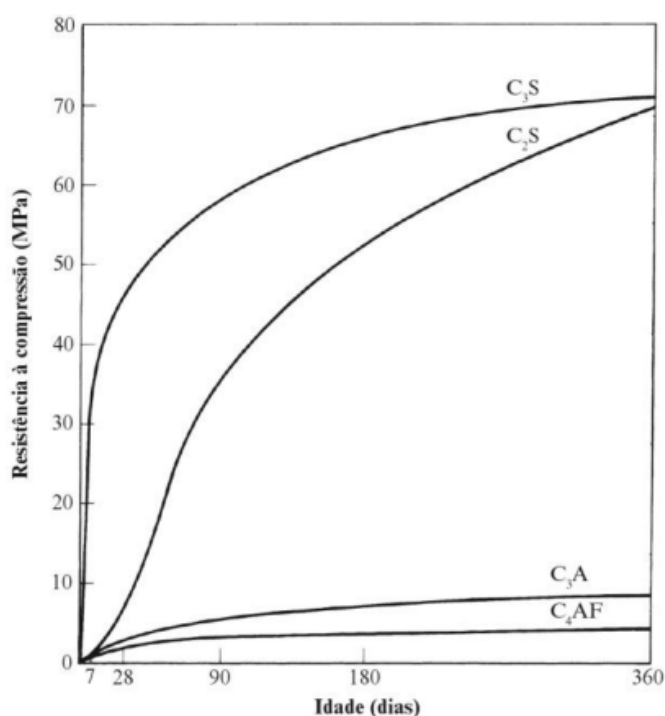
Tabela 3 – Composição de compostos calculada segundo as fórmulas de Bogue.

Composto	Teor Médio
C ₃ S	54,1%
C ₂ S	16,6%
C ₃ A	10,8%
C ₄ AF	9,1%

Fonte: Neville; Brooks (2013).

Neville e Brooks (2013) ainda citam a importância de cada um dos compostos. Sendo os mais presentes, os dois silicatos de cálcio são essenciais em se tratando de resistência mecânica. O C₃S é mais relevante nas idades iniciais (7 a 28 dias) e o C₂S em idades mais avançadas (90 dias). Os aluminatos são os principais responsáveis pelo calor de hidratação do cimento, porém contribuem pouco para a resistência. Os ferroaluminatos não afetam significativamente no comportamento do cimento, entretanto se mostram como ótimos aceleradores de hidratação. A Figura 4 apresenta o gráfico de evolução da resistência à compressão do cimento com a idade, com ilustração da influência de cada um desses compostos na resistência.

Figura 4 – Comportamento mecânico dos compostos do cimento Portland.



Fonte: Neville; Brooks (2013).

As características destes compostos são demonstradas no Quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades dos compostos do cimento Portland.

Propriedade	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
Resistência	Boa (Até os 28 dias)	Boa (Em idades avançadas)	Fraca	Fraca
Intensidade de reação	Média	Lenta	Rápida	Rápida
Calor desenvolvido	Médio (502 J/g)	Pequeno (260 J/g)	Grande (867 J/g)	Pequeno (419 J/g)

Fonte: Adaptação Neville (2016); Battagin, A; Battagin, I (2011); Neville; Brooks (2013).

3.2.3 Aditivos

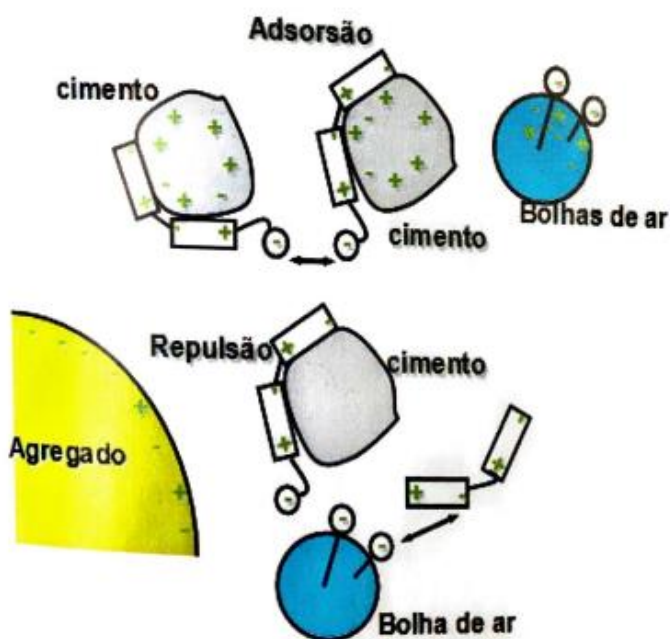
No decorrer dos anos, algumas características do concreto precisaram ser aprimoradas. Essas mudanças ocorreram para suprir novas demandas específicas, no que se refere a cada tipo de situação relacionada à obra. Tendo isso em vista, os aditivos foram desenvolvidos com o objetivo de melhorar ou dispor de algumas propriedades específicas para o concreto, como aumento da sua durabilidade, maior plasticidade no estado fresco, diminuir o calor de hidratação etc. (NEVILLE; BROOKS, 2013). Bauer (2000) ainda afirma que os aditivos são produtos não indispensáveis ao concreto, podendo ser colocados na betoneira juntamente com a mistura para fazer salientar ou fortalecer certas características. Segundo a ASTM C 494-10, os aditivos são classificados da seguinte forma:

- Redutor de água;
- Retardador;
- Acelerador;
- Redutor de água e acelerador;
- Redutor de água e retardador;
- Redutor de água de elevado desempenho ou superplastificante;
- Redutor de água de elevado desempenho e retardador ou superplastificante e retardador.

3.2.3.1 Aditivos redutores de água (plastificante e superplastificante)

Os aditivos redutores de água podem ser chamados de plastificantes ou superplastificantes. Essa denominação é diferenciada a partir da quantidade de água de amassamento que foi reduzida, para uma melhor trabalhabilidade do concreto. A Figura 5 mostra uma ilustração como o aditivo se comporta na pasta.

Figura 5 – Ilustração do comportamento do aditivo químico nas partículas de cimento.



Fonte: Hartmann et al. (2011).

Enquanto os plastificantes permitem uma redução da água em 5%, os superplastificantes podem reduzir esse consumo em até 40% (HARTMANN et al., 2011). Segundo Bauer (2019), o aditivo plastificante é adicionado à mistura do concreto durante sua realização, e tem como objetivo aumentar a plasticidade mantendo ou não a relação água/cimento. Contudo, o superplastificante é adicionado em campo no momento da aplicação. A ABNT NBR 11768:2019 define o aditivo plastificante como sendo um aditivo que permite a redução da quantidade de água sem modificar a consistência do concreto, como também permite a alteração das características de seu abatimento e fluidez sem alterar sua quantidade de água. Os dois efeitos podem ser também realizados juntos pelo aditivo.

Já o superplastificante é definido como um aditivo que permite uma elevada redução da quantidade de água do concreto. A finalidade do uso de aditivos plastificantes/superplastificantes em todo mundo, se deve pelas suas várias

finalidades, dentre elas a redução da quantidade de cimento do concreto, diminuindo seu custo final; redução do consumo de água para atingir a mesma consistência desejada; e aumento da fluidez do concreto, melhorando assim sua trabalhabilidade (HARTMANN et al., 2011) que é avaliada pela consistência, tendo sua medição através do abatimento de tronco de cone (*Slump Test*) para concretos convencionais (cujo procedimento segue o disposto na ABNT NBR 16889:2020 - Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone). No estado endurecido do concreto, esse aditivo também proporciona benefícios, dentre os quais são (BAUER, 2019):

- Melhora a hidratação do cimento;
- Diminui a porosidade;
- Aumenta a resistência mecânica;
- Menor índice de fissuras;
- Reduz a retração por secagem.

3.2.3.2 Aditivo modificador de pega

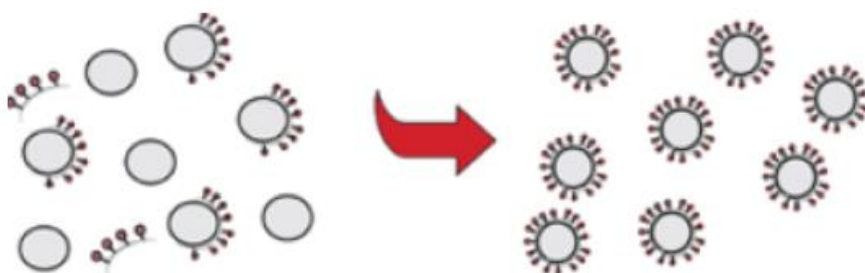
Em concordância com a ABNT NBR 11768:2011, existem dois tipos de modificadores de pega, sendo classificados em acelerador e retardador de pega. Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2017), o período de pega é o intervalo entre o início do endurecimento do concreto, até a condição em que ele possa ser desenformado, mesmo não atingindo sua resistência total final. Pode-se definir também o início da pega como sendo o momento em que não é mais possível realizar o lançamento do concreto em formas e adensá-lo, uma vez que já houve a modificação da sua consistência, comprometendo sua trabalhabilidade (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2017).

Os aditivos aceleradores de pega (e, por conseguinte, de resistência) são aqueles que reduzem o tempo de pega do concreto e aceleram a taxa hidratação do cimento (HARTMANN et al., 2011). O cloreto de cálcio (CaCl_2) foi utilizado por várias décadas como um acelerador de pega, devido à sua interação com os silicatos de cálcio presentes no cimento, mais especificamente com o C_3S , que é o principal responsável pelo ganho de resistência inicial (até os 28 dias) do concreto. Devido ao seu baixo custo e alta eficácia, o cloreto de cálcio sempre foi bem aceito no mercado, porém apresenta alguns riscos para a armadura da estrutura (NEVILLE, 2016).

Segundo o mesmo autor, a presença de íons de cloreto é demasiadamente prejudicial às armaduras da estrutura, proporcionando um ambiente propício às corrosões. Para Kosmatka e Wilson, apud Hartmann *et al.* (2011), os aditivos a base de cloretos não devem ultrapassar a margem de 2% da massa total do material cimentício. Em contrapartida, a ABNT NBR 12655:2022 determina que não seja permitido o uso de aditivos a base de cloreto em estruturas de concreto armado ou protendido. Existem aceleradores à base de outros produtos, como por exemplo, à base de nitrito de cálcio, formiato de cálcio, trietanolamina, entre outros (NEVILLE, 2016).

Já os aditivos retardadores de pega realizam o inverso. Eles prolongam a fase do estado plástico do concreto para o estado endurecido (ABNT NBR 11768:2011). De modo geral, os retardadores podem prolongar o tempo em que o concreto pode ser transportado, lançado e adensado, sendo então ideal para regiões em que o clima apresenta altas temperaturas (NEVILLE, 2016) como também para concretos a serem lançados em obras mais distantes da central dosadora. Esse aditivo age diretamente na formação do gel, limitando assim sua formação, conforme ilustrado na Figura 6. Como a partícula deste gel ainda se encontra pequena, acaba consequentemente restando menos água, permitindo assim que a água remanescente ajude na fluidez do concreto por mais tempo (BAUER, 2019).

Figura 6 – Ação do superplastificante na partícula de cimento.



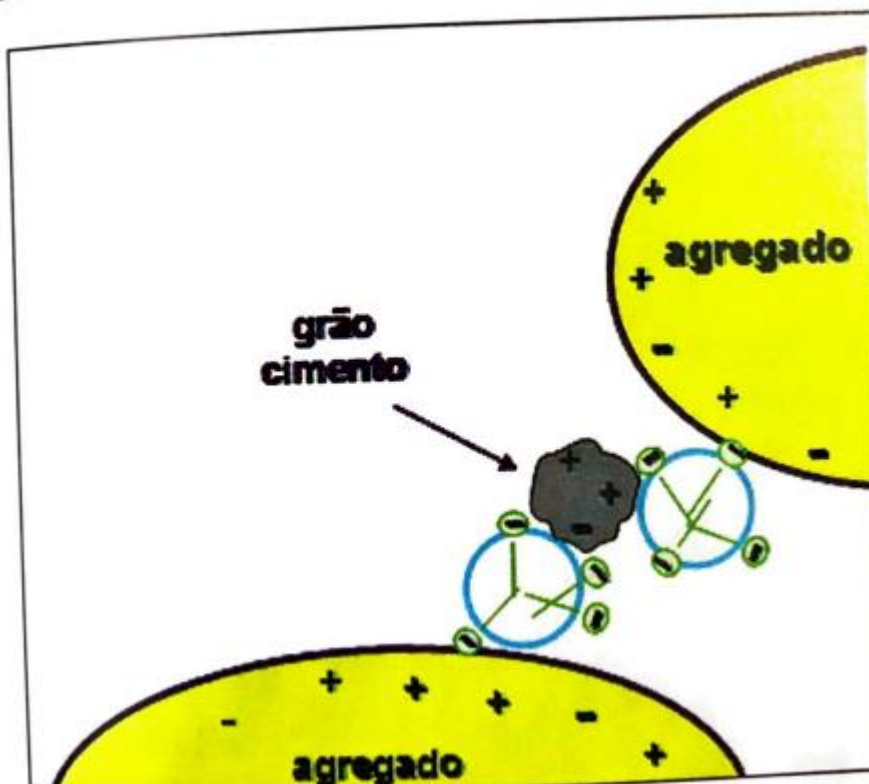
Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Bauer (2019) explica que a ação desse aditivo sobre os silicatos e aluminatos é justamente retardar a dissolução desses compostos, culminando na modificação da curva do calor de hidratação. Os retardadores podem ser feitos de vários compostos, dentre eles estão os ácidos lignossulfônicos, ácidos hidroxicarboxílicos e carboidratos como sacarose, glicose, frutose (HARTMANN *et al.*, 2011).

3.2.3.3 Outros aditivos

Podem-se encontrar diversos outros tipos de aditivos no mercado. Dentre eles tem-se o aditivo incorporador de ar, que introduz pequenas bolhas de ar no concreto, melhorando o consumo de cimento e a relação de gelo-degelo que existem em algumas regiões, como por exemplo, na fabricação dos pavimentos de concreto dos EUA (SANTOS *et al.*, 2018). Ele também facilita o lançamento do concreto, diminui a exsudação, a porcentagem de vazios acidentais é reduzida, entre outros aspectos (BAUER, 2019). A Figura 7 ilustra o mecanismo de atuação desse aditivo.

Figura 7 – Ilustração do mecanismo de incorporação do ar.



Fonte: Hartmann *et al.* (2011).

Segundo Hartmann *et al.* (2011), os aditivos modificadores de viscosidade são aditivos que permitem alterações nas propriedades reológicas de argamassas e concretos, como sua plasticidade, elasticidade e, como o próprio nome do aditivo já descreve, viscosidade. São produtos à base de polissacarídeos e sua adição ao concreto aprimora a coesão da massa em seu estado fresco, limitando a perda de água por exsudação e limitando a segregação (TUTIKIAN; MOLIN, 2008).

Comumente esse aditivo é utilizado em concretos autoadensáveis, já que ele melhora a coesão na ausência de finos na mistura (HARTMANN *et al.*, 2011).

O presente trabalho empregou dois tipos de aditivos, sendo eles o redutor de água e o estabilizador de hidratação.

3.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

Segundo Bauer (2000), o concreto no estado fresco é uma mistura de agregados graúdos e miúdos envolvidos em uma pasta constituída de cimento e espaços de ar, denominada de matriz. O desempenho final de um concreto é bastante complexo, visto que diversas de suas características do estado endurecido dependem da sua execução no estado fresco, e a má execução ou inadequação de suas propriedades resultam em diversos problemas (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

De acordo com Cavalline Neto e Coelho (2016), um dos fatores que influenciam nas características finais do concreto é o adensamento, responsável pela diminuição dos vazios, eliminando o ar de seu interior e, por conseguinte, amplificação de características como uniformidade, trabalhabilidade, impermeabilidade e resistência. Além disso, ele também possibilita o preenchimento total das formas pelo concreto. Conforme os mesmos autores, a má execução do adensamento pode resultar em várias patologias, como a segregação dos agregados, redução da seção de uma peça, diminuição da resistência de um traço, entre outros.

As propriedades do concreto no estado fresco são deveras importantes para a execução dele e essa fase corresponde a um período que se inicia logo na mistura do concreto e finaliza entre 1h e 5h (HELENE; ANDRADE, 2010).

3.3.1 Consistência e trabalhabilidade

A consistência do concreto é definida como a maior ou menor capacidade que o concreto tem de se deformar e varia, de modo geral, a depender da quantidade de água utilizada na mistura do concreto, utilização ou não de aditivos químicos, e pela granulometria de agregados (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2017). Para calcular a consistência do concreto neste estado, é feito um ensaio a partir do conjunto

normativo ABNT NBR 16889:2020, que é realizado através do abatimento do tronco de cone, também conhecido como *slump test* (HELENE; ANDRADE, 2010).

De acordo com Romano, Cardoso e Pileggi (2011), trabalhabilidade está ligada às fases de mistura, transporte, lançamento e acabamento. A trabalhabilidade pode ser definida como “a propriedade determinante do esforço necessário ao manuseio de uma quantidade de concreto recém-misturado com a mínima perda de homogeneidade.” (ASTM C 125-09a apud NEVILLE, 2016, p. 194).

Carvalho e Figueiredo Filho (2017) consideram que um concreto que tem facilidade em ser adensado é tido como trabalhável. Segundo os mesmos autores, a trabalhabilidade do concreto depende também da granulometria dos materiais, da adição ou não de aditivos e da relação água/cimento. Neville (2016) também cita que o tempo e a temperatura são dois fatores que afetam a trabalhabilidade. O concreto acaba enrijecendo com o tempo e isso nada tem a ver com a pega, e sim com a absorção natural da água pelos agregados, caso não estejam completamente saturados. Já a temperatura influencia na água de abatimento do concreto. Quanto mais quente o dia, maior deverá ser o teor de água para manter a constante trabalhabilidade inicial do concreto (NEVILLE, 2016) .

3.3.2 Homogeneidade

Sendo um fator que influencia diretamente na qualidade final do concreto, a homogeneidade é uma característica fundamental para o concreto, devendo este apresentar agregados graúdos totalmente dispersos na massa e totalmente envolvidos pela pasta. Quanto melhor essa característica, melhor será o desempenho do concreto, principalmente no que se refere à permeabilidade e à proteção proporcionada à armadura (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2017).

Um fator que auxilia na homogeneidade do concreto é a fase da mistura dos elementos, uma vez que ela quebra os aglomerados, que são formados por partículas finas que tendem a se aglomerar devido às forças de van der Waals como também às forças capilares na presença de água (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

3.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Conforme Bauer (2019), o concreto é um material que sempre está evoluindo e é considerado um sólido a partir do momento de pega. Mesmo em idades avançadas, o concreto ainda é sensível às modificações que existem no ambiente, e isso acaba sendo registrado nas suas características. O mesmo autor explica que algumas características qualificam o concreto, porém essas mesmas características devem ser consideradas a partir das especificações de cada obra.

A título de exemplo, temos a impermeabilidade, essencial para estruturas hidráulicas, mas não prioritária para edificações verticais, por exemplo (BAUER, 2019). Isaia (2011) comenta que a água no concreto endurecido é responsável, de forma direta ou não, pelas características deste, já que influencia na reação de hidratação do cimento, o que acaba culminando na formação do calor de hidratação, nos produtos resultantes dessa hidratação, na retração do concreto, entre outros fatores. No presente trabalho serão discutidos alguns aspectos mais pertinentes do concreto endurecido relacionados ao quesito de cura do concreto.

3.4.1 Resistência à compressão

Conforme Andrade e Tutikian (2011), na engenharia, a resistência mecânica do material pode variar de elemento para elemento. Como exemplo, temos o aço, que tem melhor resistência à tração, sendo essa característica bastante explorada na construção civil. Carvalho e Figueiredo Filho (2017) afirmam que no caso do concreto, sua resistência à compressão é amplamente conhecida e discutida, sendo determinada a partir de ensaios utilizando corpos de prova que são submetidos à compressão.

A resistência mecânica do concreto pode ser definida como “a capacidade do material de suportar as cargas aplicadas sobre ele, sem que o mesmo entre em ruína” (ANDRADE; TUTIKIAN, 2011, p. 161). Mehta e Monteiro (2008) afirmam que mesmo aplicando 50% da carga de ruptura, a fissuração na pasta não é significativa, invertendo isso quanto essa carga passa a ser entre 50 e 75%, já que, a partir daí, ocorre uma fissuração considerável na matriz. Demonstra-se dessa forma que o comportamento tensão-deformação do concreto não é linear, visto que depende da velocidade de carregamento e da propagação de microfissuras.

O conjunto normativo ABNT NBR 5739:2018 é responsável pelo ensaio de compressão do concreto utilizando corpos de prova cilíndricos, sendo sua moldagem especificada na ABNT NBR 5738:2015. Diversos são os fatores que influenciam no resultado da resistência, sendo os principais a idade do concreto e a relação das quantidades dos seus constituintes (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2017).

A relação água/cimento tem influência direta na resistência final do concreto, sendo ela inversamente proporcional a resistência à compressão. Duff Abrams, em 1919, estabeleceu a relação na qual determina a resistência do co (01) demonstrado na equação 01 (NEVILLE, 2016):

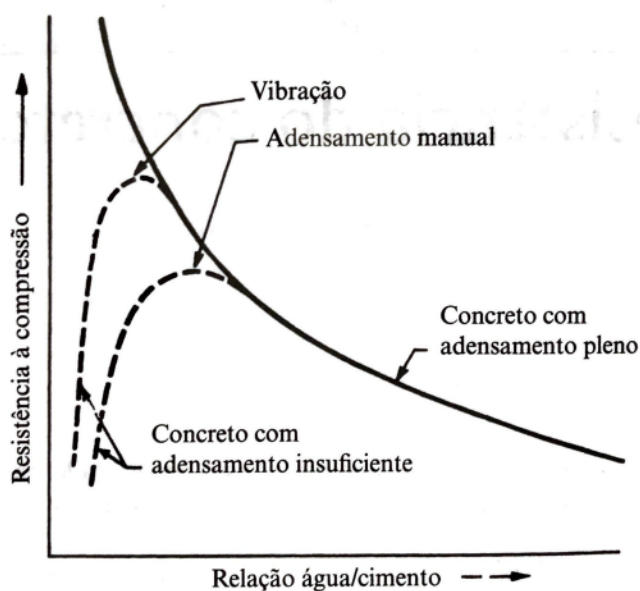
$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}}$$

Sendo:

- a/c: relação água cimento da mistura;
- K1 e K2: constantes empíricas.

Essa relação também pode ser demonstrada a partir da curva de Abrams, demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Relação entre a resistência do concreto e sua relação água/cimento.



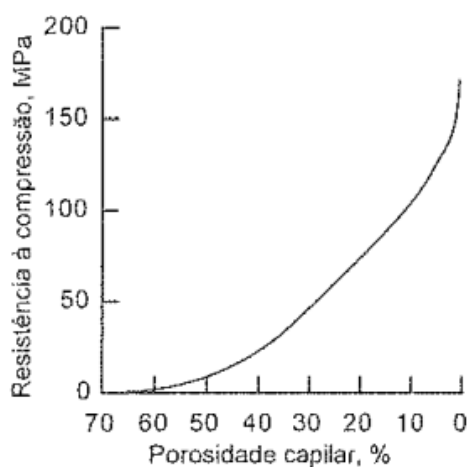
Fonte: Neville (2016).

Isaia (2011) aponta que a relação $a/c = 0,40$ é a ideal para a completa hidratação do cimento na pasta desse aglomerante, gerando os produtos de hidratação, que serão abordados posteriormente. Os concretos comuns utilizam relações maiores que essa, fazendo com que essa água necessária e determinada

por métodos específicos de dosagem do concreto, aloje-se em poros dos produtos de hidratação, formando assim os vazios. Sendo assim, esses vazios, que foram provocados pela água, acabam prejudicando a vida útil e durabilidade das estruturas, pois podem acarretar retração e fissuração, mostrando que a água tem papel ambivalente na estrutura do concreto no estado endurecido (ISAIA, 2011).

A relação resistência-porosidade também é algo a ser considerado, já que a resistência dos materiais é inversamente proporcional à sua porosidade, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Relação da resistência à compressão e porosidade capilar.



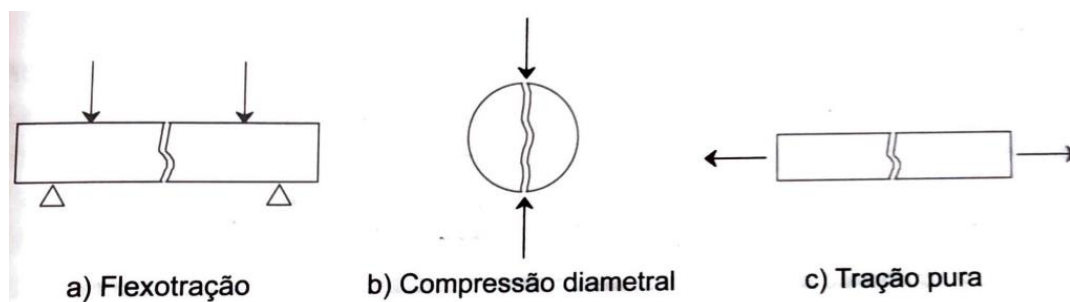
Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Porém, nem todo vazio do concreto apresenta influência na resistência final do concreto (ANDRADE; TUTIKIAN, 2011). Mehta e Monteiro (2008) consideram que apenas vazios capilares acima de 50nm de diâmetro podem apresentaram influência na resistência final do concreto.

3.4.2 Resistência à tração

Por não resistir bem à tração, essa propriedade do concreto é muitas vezes deixada de lado, todavia, seu conhecimento é necessário, já que pode estar ligado a fissurações causadas, por exemplo, por esforço cortante (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2017). Farias *et al.* (2018) falam que existem 3 tipos de ensaios para determinar essa resistência, sendo eles ensaio de tração direta, ensaio de tração por compressão diametral e ensaio de tração na flexão, conforme demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Ensaio de resistência à tração.



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2017).

As normas que regem esses ensaios são ABNT NBR 7222:2011 para o ensaio de resistência à tração indireta e a ABNT NBR 12142:2010 para o ensaio de resistência a tração na flexão.

3.5 CURA DO CONCRETO

Recena e Pereira (2011) definem cura do concreto como o método utilizado visando o impedimento da saída prematura da água utilizada na preparação. De modo simples, a cura garante que o concreto permaneça quase que completamente saturado, assegurando que os produtos de hidratação preencham os espaços anteriormente preenchidos pela água (NEVILLE, 2016). A cura deve ser iniciada a partir do início da pega, onde a hidratação do cimento acontece de forma rápida, e é nesse período onde a água tende a evaporar pelos poros, comprometendo esse processo (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2017). A água para a cura pode ser a mesma utilizada no amassamento, devendo ser livre de matéria orgânica ou ferro (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A ABNT NBR 14931:2004 determina que o concreto deva ser curado enquanto não atingir o endurecimento satisfatório e devidamente preservado para evitar a perda de água, garantir uma superfície resistente e formar uma capa superficial durável.

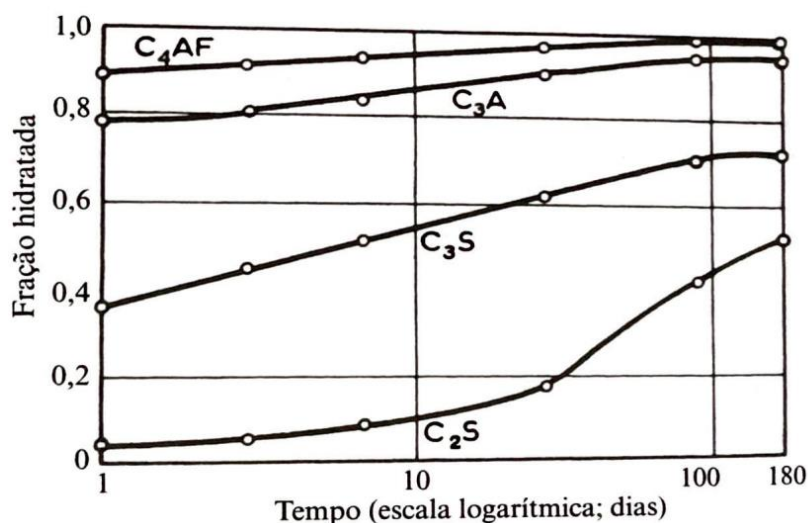
3.5.1 Hidratação do cimento

Segundo Mehta e Monteiro (2008), alguns constituintes do cimento iniciam sua hidratação no primeiro momento em que ele entra em contato com a água. Essa é a reação responsável por tornar o cimento um material aglomerante. Porém, é no

início da pega que essa hidratação ocorre de maneira mais rápida, tornando assim a pasta de cimento uma massa firme e resistente (NEVILLE, 2016). Para que essa hidratação se mantenha, o interior do concreto precisa apresentar uma umidade relativa mínima de 80%, caso contrário, a hidratação do cimento pode acabar sendo comprometida (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A cura do concreto é responsável pela continuidade da hidratação do cimento, e a velocidade dessa hidratação obedece à seguinte ordem: $C_4AF > C_3A > C_3S > C_2S$ (NEVILLE, 2016). A Figura 11 detalha melhor o desenvolvimento de hidratação desses compostos.

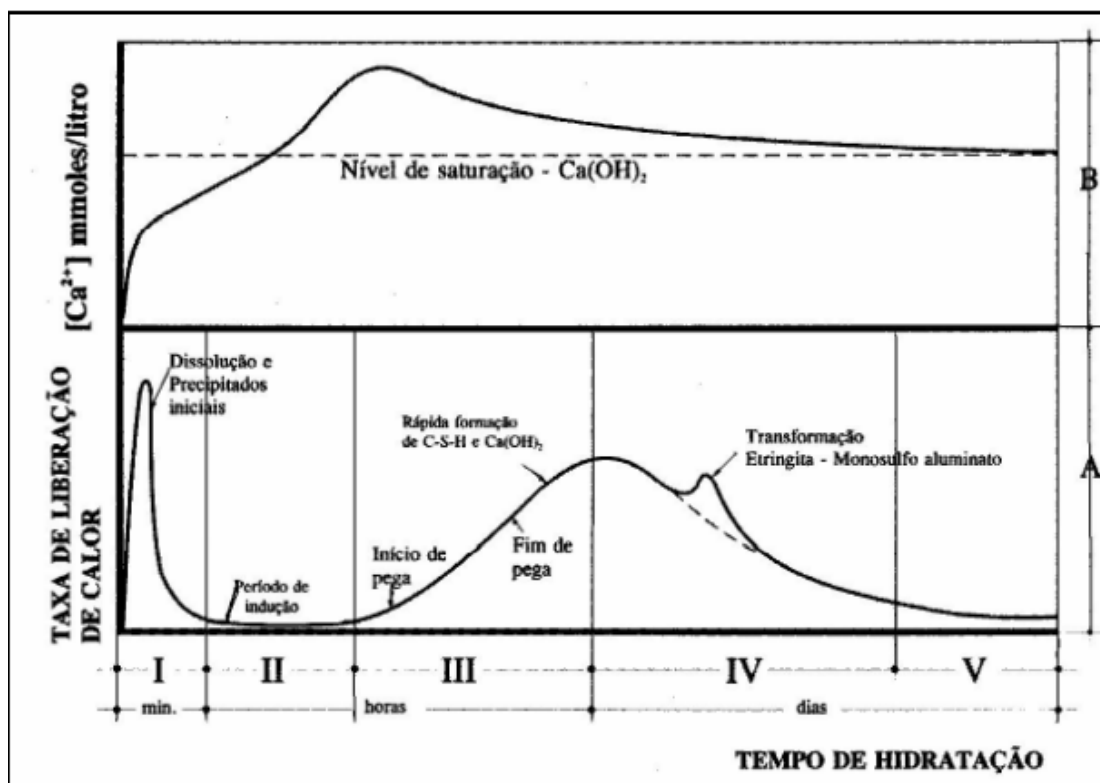
Figura 11 – Hidratação dos compostos do cimento.



Fonte: Neville (2016).

A hidratação do cimento pode ser dividida em cinco etapas, demonstradas na Figura 12 (QUARCIONI, 2008).

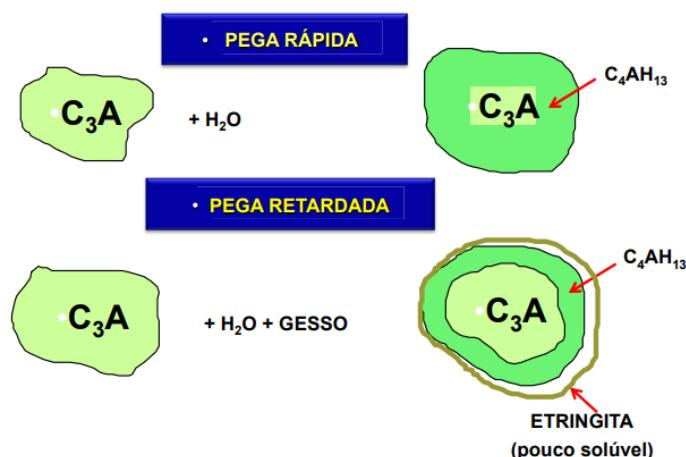
Figura 12 – Esquema demonstrativo da hidratação do cimento.



Fonte: Jawed; Skalny; Young (1983) e Zampieri (1989) apud Quarcione (2008).

A primeira etapa é dita como estágio inicial ou pré-indução (I). Essa fase se inicia nos primeiros minutos da reação e libera uma grande quantidade de calor graças ao C_4AF e a hidratação do sulfato de cálcio ($CaSO_4$) (QUARCIONI, 2008). Além disso, essa etapa também conta com o surgimento dos precipitados iniciais, sendo um deles a etringita primária (MELO, 2010). Ela surge a partir da reação do $CaSO_4$ na forma de gesso com o aluminato tricálcico, retardando o processo de pega, conforme ilustrado na Figura 13 (ODLER, 2007 apud MELO, 2010).

Figura 13 – Esquematização da aplicação da etringita.



Fonte: Mehta e Monteiro (2009).

Em seguida ocorre o período de indução (II) também conhecido como período de dormência, onde a liberação de calor é reduzida. Uma camada de gel, constituída em sua maior parte pela etringita primária, envolve os grãos anidros formando uma barreira e impedindo sua dissolução (QUARCIONI, 2008). Esse período permite o lançamento e adensamento do concreto, já que o gel formado faz com que a pega não seja imediata (CARVALHO, 2002).

O próximo período é conhecido como período de aceleração (III). Depois que a barreira do gel for destruída, existe um aumento na concentração dos compostos e início da formação dos primeiros hidratados, marcando o início da pega, já tornando a mistura menos trabalhável (CARVALHO, 2002). Quarcioni (2008) comenta que os silicatos, em especial o C_3S , são hidratados rapidamente até atingir sua máxima hidratação até o final desse período, que corresponde ao fim da pega e ao máximo de calor liberado. O mesmo autor fala que os principais produtos gerados nessa etapa são o CSH e o $Ca(OH)_2$, representado como CH - a portlandita. Essa etapa finaliza com a desaceleração na geração de calor.

O período de desaceleração (IV) é marcado pela diminuição gradual do calor e continuidade das reações lentas, que também dão origem ao CSH e CH (QUARCIONI, 2008). Essa fase ainda mostra um pequeno pico de calor, característico pela formação da etringita em sua forma final (trissulfoaluminato de cálcio hidratado – fase AFt), que se dá pela completa hidratação do C_3A na presença do sulfato (MELO, 2010).

A última etapa é dita como período final (V) e tem como característica a formação de placas hexagonais de monossulfoaluminato na fase AFm, devido à

reação do trissulfoaluminato com o C_3A e C_4AF (QUARCIONI, 2008). A Figura 14 esquematiza o processo de hidratação e pega do cimento.

Figura 14 – Esquema de hidratação e pega do cimento Portland.



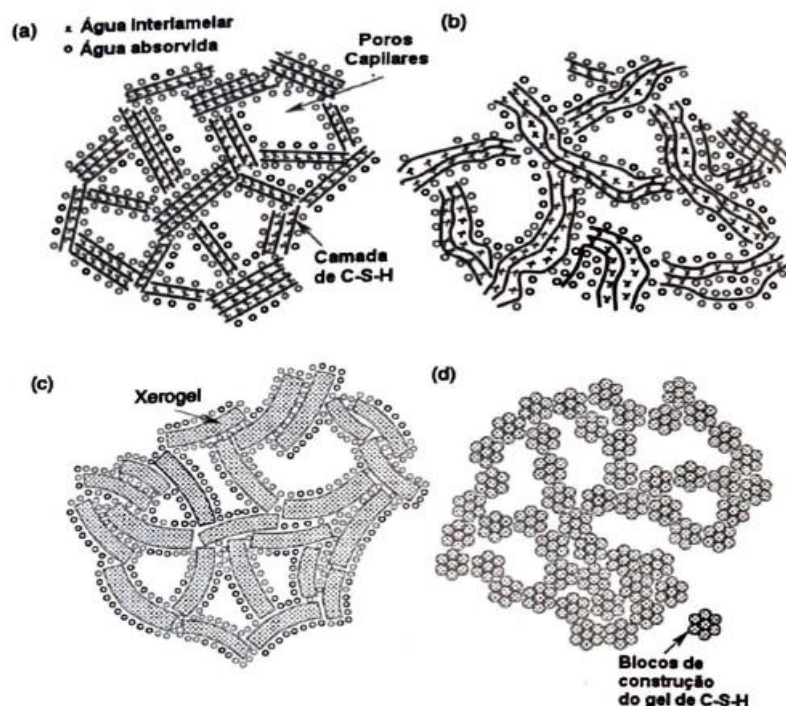
Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

3.5.2 Produtos de hidratação

Em suma, a cura do concreto é um dos principais fatores para a continuação da hidratação do cimento, e em consequência disso, surgem os chamados produtos de hidratação.

Um desses produtos de hidratação é o CSH (silicato de cálcio hidratado). Mehta e Monteiro (2008) explicam que a fase do CSH constitui a maior parte da pasta de cimento completamente hidratada, cerca de 50 a 60% do volume dos sólidos. Segundo os mesmos autores, ele também é responsável pelas principais propriedades do concreto, como por exemplo, a resistência. Microscopicamente, o CSH é formado por camadas de SiO_4 , porém sua estrutura exata é desconhecida, existindo assim diversos modelos que tentam explicar sua forma (PAULON; KIRCHHEIM, 2011). A Figura 15 apresenta alguns desses modelos.

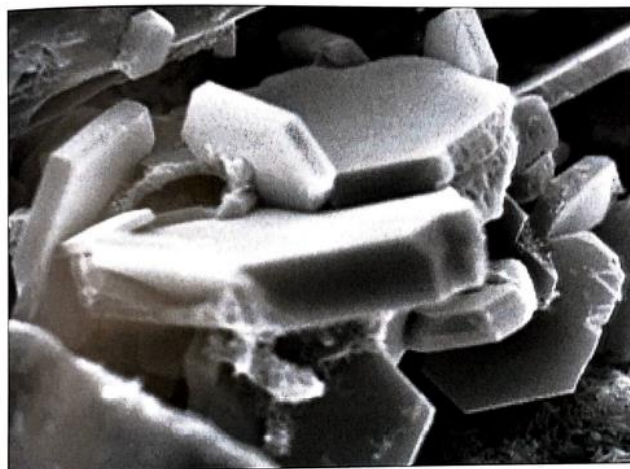
Figura 15 – Modelos da estrutura do CSH.



Fonte: Paulon e Kirchheim (2011).

Outro produto de hidratação é o hidróxido de cálcio ou portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), representado por CH. Ele representa cerca de 20 a 25% do volume total dos sólidos e é geralmente encontrado na forma de grandes cristais com forma prismática hexagonal (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Paulon e Kirchheim (2011) explicam que a temperatura de hidratação, espaço disponível e impurezas podem interferir na formação desse produto. Os mesmos autores também explicam que a contribuição do CH na resistência final do concreto é menor se comparado ao CSH, já que sua área superficial é considerada baixa. A Figura 16 detalha a estrutura do CH, em fotografia de ampliação obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

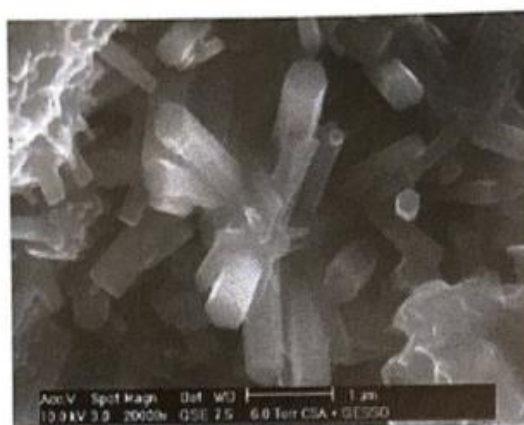
Figura 16 – Cristais hexagonais de CH em MEV.



Fonte: Paulon e Kirchheim (2011).

A etringita também é um dos produtos resultantes, sendo um dos materiais a se formarem na primeira hora de hidratação do cimento. Sua principal contribuição é na influência da pega, enrijecimento e resistência inicial do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Ela surge a partir da reação do sulfato de cálcio na forma de gesso com o C_3A e tem forma de cristais na forma prismática hexagonal, conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Cristais de etringita em MEV.



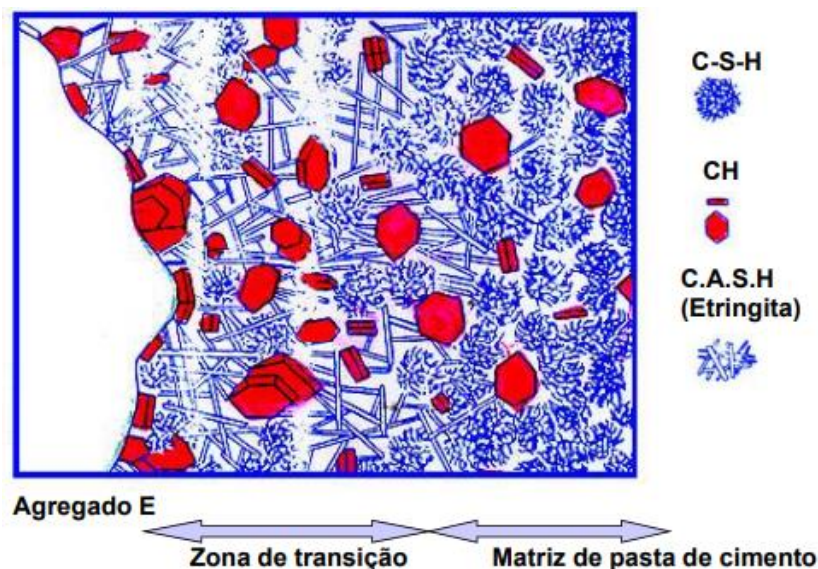
**b: 15 horas de hidratação.
Barra de escalas=1 μ m (MERLINI, 2008).**

Fonte: Paulon e Kirchheim (2011).

A zona de transição da microestrutura final do concreto é formada pelos produtos de maior tamanho de cristais, sendo por isso uma região de maiores vazios,

menos densidade e menor resistência. Essa estrutura, com todos os seus elementos formados estão representados na Figura 18.

Figura 18 – Representação da zona de transição e da matriz da pasta de cimento do concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

3.5.3 Técnicas de cura

Neville e Brooks (2013) ressaltam a importância da cura para evitar a perda de água pelos poros, já que a hidratação do cimento ocorre apenas nos capilares preenchidos por água. Segundo Silva e Galvão (2019), para cada situação de obra existe uma técnica de cura ideal, específica para cada tipo de ambiente e voltada para o objetivo do projeto. A seguir serão descritos alguns dos principais tipos de cura.

3.5.3.1 Cura úmida

A cura úmida exige que o concreto esteja em permanente contato com a água, a qual será absorvida por ele, e deve ser iniciada assim que a superfície não esteja mais sujeita a danos (NEVILLE, 2016). Segundo Silva R. e Silva B. (2016), a cura úmida consiste em manter a superfície do concreto úmida por meio de molhagem contínua, conservar sua superfície úmida ou imersão total em água, evitando assim a evaporação da mesma.

A cura por molhagem contínua ou aspersão contínua é a forma mais simples de proteger o concreto da perda de água. O processo consiste em molhar a superfície do concreto de forma contínua (BAUER, 2019), conforme demonstrado na Figura 19.

Figura 19 – Cura úmida do concreto por molhagem contínua.



Fonte: Peinado (2013).

O mesmo autor faz o alerta quanto à continuidade regular da cura, já que fatores externos tendem a influenciar na secagem mais acelerada da superfície.

Neville (2016) explica a existência de métodos para preservação dessa umidade da cura por aspersão através da utilização de tecidos de aniagem umedecidos ou produtos absorventes (comercializados no Brasil com a nomenclatura de mantas de cura), permitindo que a superfície fique úmida por mais tempo, demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – Cura do concreto com utilização de sacos de aniagem.



Fonte: Peinado (2013).

A cura submersa consiste na imersão total da estrutura de concreto em água livre de impureza e é descrita por Bauer (2019) como o método ideal de cura, porém tem aplicação restrita a lajes de pavimentos. Para o presente trabalho, foi utilizada a cura úmida por aspersão e imersão, para a obtenção dos resultados.

3.5.3.2 Cura química

Silva R. e Silva B. (2016) explicam que a cura química equivale à aplicação de um produto na estrutura de concreto, formando uma película em sua superfície, impedindo que a evaporação da água ocorra. Uma característica da utilização dessa cura é a formação de um pó esbranquiçado em toda a área em que o produto foi aplicado. A aplicação da cura química é demonstrada na Figura 21.

Figura 21 – Aplicação de produto para realização da cura química.



Fonte: Peinado (2013).

3.5.3.3 Cura térmica

A cura térmica consiste na elevação da temperatura da água que está em contato com o concreto (SILVA; GALVÃO, 2019). Neville (2016) explica que a alta temperatura à qual o concreto é exposto acelera as reações químicas, aumentando o ganho de resistência inicial. Em contrapartida, o mesmo autor adverte sobre a resistência a partir de sete dias, já que a rápida hidratação dos compostos podem gerar produtos de menor qualidade, provavelmente mais porosos.

Debs (2000), apud Silva e Galvão (2019), cita que os melhores meios para realizar a cura térmica são utilizando: vapor atmosférico; vapor e pressão; circulação de água ou óleo em tubos justapostos às formas; e com resistência elétrica.

A ABNT NBR 9062:2017 alerta para que, no caso da cura térmica a vapor, devem existir cuidados para que a cura seja feita de forma uniforme em toda a peça de concreto.

3.6 INFLUÊNCIA DA CURA NO DESEMPENHO DO CONCRETO

Todo o processo de concretagem é importante para a qualidade do concreto, porém a cura do concreto tem papel fundamental no ganho de resistência do concreto (NEVILLE, 2016). Recena e Pereira (2011) ainda explicam que a cura do concreto é fundamental para a “manutenção da saúde do concreto”, garantindo a total manifestação das suas propriedades finais, dentre elas a resistência ao longo do tempo.

Isaia (2011) explica que a cura e suas condições são importantes para as propriedades resultantes do concreto, por favorecer a continuidade nas reações de hidratação dos componentes do cimento. O mesmo autor ainda explica que a essência da resistência mecânica se deve à qualidade e quantidade dos produtos resultantes da hidratação do cimento, demonstrando ainda mais a importância da continuidade desse processo. Recena e Pereira (2011) citam que é esperado que quanto melhor e por mais tempo for feita a cura do concreto, maior será sua resistência mecânica.

3.7 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Dos diversos tratamentos estatísticos que existem, o presente trabalho utilizará dois tipos: Análise de Variância (ANOVA) e o Teste de Tukey.

Segundo Paese, Caten e Ribeiro, (2001), a Análise de Variância é uma ferramenta que compara diversos grupos, permitindo dessa forma apurar se os grupos estudados possuem de fato diferenças significativas.

Para realizar a comparação entre as médias, existe um teste básico, chamado atualmente de teste F de Snedecor, ou simplesmente teste F. Uma vez que o teste F seja realizado e significativo, então os testes de comparações entre as médias são realizados, para investigar diferenças entre pares de médias específicas (PAGOTO et al, 2021).

No caso do presente trabalho, a ANOVA busca demonstrar se a mudança dos tempos e dos tipos de cura influenciaram significativamente no ganho de resistência final do concreto.

Ao passo que a ANOVA resulta em uma diferença significativa, é aplicado o Teste de Tukey, que busca determinar quais parâmetros dentro dos grupos de tempo e tipo de cura influenciaram de forma significativa no ganho de resistência do concreto.

Esse teste tem como princípio testar a diferença entre as médias de tratamento. No teste de Tukey foi calculada a diferença mínima significativa (DMS) para realizar a comparação entre a diferença das médias dos pares das propriedades a serem analisadas. A DMS foi calculada conforme demonstrado na equação 2:

$$DMS = q_{\alpha,(\delta,k)} * \sqrt{\frac{QMR}{r}}$$

Sendo:

- DMS: diferença média significativa;
- q: valor tabelado;
- QMR: quadrado médio de resíduo;
- r: número de repetições de cada tratamento.

4 METODOLOGIA

Como já mencionado, a cura é um processo muitas vezes negligenciado e executado de maneira errônea pelos profissionais. Fatores como clima, interferência externa e o método de cura ideal para cada situação são deixados de lado, o que acaba agravando essa etapa. Outro ponto levado em consideração são as atividades rotineiras de um canteiro de obras, que acaba por inviabilizar uma cura prolongada.

Com o objetivo de facilitar o entendimento do desenvolvimento deste trabalho, o mesmo foi dividido em quatro etapas:

- Etapa 1: separação, pesagem e caracterização dos materiais;
- Etapa 2: concretagem e confecção dos corpos de prova;
- Etapa 3: processo de cura dos corpos de prova;
- Etapa 4: ensaios para a determinação da resistência dos corpos de prova;
- Etapa 5: realização da análise estatística.

Para melhor simular condições reais e que são praticáveis em canteiros de obra, optou-se por escolher traços de concreto que são utilizados na prática. Portanto, as dosagens e insumos desse trabalho foram concedidos por uma concreteira da região.

4.1 ETAPA 1

Nesta etapa os materiais foram separados, pesados e caracterizados.

A água utilizada foi a fornecida pela rede de abastecimento DESO nas instalações do Instituto Federal de Sergipe – Campos Aracaju.

O cimento utilizado foi o Portland CP II F 40 Estrutural. O material foi caracterizado obedecendo às prescrições das normas, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado do ensaio de caracterização do cimento.

Ensaio	Resultado	Método de ensaio
Finura	6,3%	ABNT NBR 11579:2012
Tempo de pega	75 minutos	ABNT NBR 16607:2018
Expansibilidade	0.3 mm	ABNT NBR 11582:2018

Fonte: A autora (2022).

Como agregado miúdo, foram utilizadas as areias natural e artificial, conforme fotografias da Figura 22. A caracterização dos materiais foi realizada no laboratório de Materiais de Construção do campus Aracaju do IFS, e os resultados são apresentados nas Tabela 5 e Tabela 6.

Figura 22 – Areia natural e artificial para caracterização.



Fonte: A autora (2022).

Tabela 5 – Resultado do ensaio de caracterização da areia natural.

Ensaio	Resultado	Método de ensaio
Massa real específica	2,605 g/cm ³	ABNT NBR NM 53:2009
Massa unitária	1,930 g/cm ³	ABNT NBR NM 45:2006
Granulometria D _{máx}	2,4 mm	ABNT NBR NM 248:2003

Fonte: A autora (2022).

Tabela 6 – Resultado do ensaio de caracterização da areia artificial.

Ensaio	Resultado	Método de ensaio
Massa real específica	2,667 g/cm ³	ABNT NBR NM 53:2009
Massa unitária	1,300 g/cm ³	ABNT NBR NM 45:2006
Granulometria D _{máx}	2,4 mm	ABNT NBR NM 248:2003

Fonte: A autora (2022).

O agregado graúdo utilizado foi a brita 0. A Figura 23 apresenta uma fotografia da brita utilizada neste estudo. Sua caracterização foi realizada no laboratório do Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju, tendo seus resultados mostrados na Tabela 7.

Figura 23 – Brita 0.



Fonte: A autora (2022).

Tabela 7 – Resultado do ensaio de caracterização da Brita 0.

Ensaio	Resultado	Método de ensaio
Massa real específica	1,4 g/cm ³	ABNT NBR NM 53:2009
Massa unitária	2,643 g/cm ³	ABNT NBR NM 45:2006
Granulometria D _{máx}	12,5 mm	ABNT NBR NM

Fonte: A autora (2022).

Os aditivos Muraplast FK 320 e Hydrakem Novakem, polifuncional e estabilizador de hidratação, respectivamente, foram empregados para melhor desempenho dos concretos.

De posse dos materiais, foi realizada a secagem em estufa e a separação para posterior concretagem.

4.2 ETAPA 2

Nessa etapa foi realizada a concretagem, produzindo concretos de classe de resistência C30 e C40. Essas duas resistências foram selecionadas por serem de uso corriqueiro na região.

Para cada classe de concreto procedeu-se da seguinte forma: inicialmente, foi necessário fazer a secagem dos agregados em estufa durante 24h (Figura 24). Em

seguida, fez-se a pesagem dos insumos para realização da mistura que ocorreu em uma betoneira com capacidade de 120 litros, conforme imagem mostrada na Figura 25.

Figura 24 – Secagem do material em estufa.



Fonte: A autora (2022).

Figura 25 – Mistura do material em betoneira.



Fonte: A autora (2022).

O concreto foi moldado em corpos cilíndricos de 10 cm X 20 cm (Figura 26) devidamente untados, seguindo a NBR 5738:2016, sendo reservada uma porção para execução do *Slump Test* (ABNT NBR 16889:2020), observado na Figura 27.

Figura 26 – Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: A autora (2022).

Figura 27 – Execução de ensaio *Slump Test*.



Fonte: A autora (2022).

Após 48 horas, os corpos de prova (CP) foram desmoldados e destinados para os dois ambientes de cura (ver Figura 28).

Figura 28 – Corpos de prova sendo curados nos dois ambientes de cura (por imersão e molhagem contínua).



Fonte: A autora (2022).

Ao final da concretagem, foram moldados um total de 48 corpos de prova (24 para cada classe) sendo que três corpos de prova para cada forma de cura, classe de resistência e tempo de cura. Os tempos de cura do estudo foram de 3, 7, 14 e 28 dias, sendo as três primeiras selecionadas por corresponderem aos tempos mais usuais de cura em obras (quando é realizada) e a última consiste na condição ideal devido à demanda de hidratação do cimento.

4.3 ETAPA 3

Para melhor entendimento da distribuição dos corpos de prova, a Quadro 2 apresenta os grupos de controle organizados de acordo com a classe de resistência, com o tempo de cura e pelas formas de cura.

Quadro 2 – Grupos de controle em função das idades e formas de cura.

(continua)

Classe	Grupo de cura	Tempo de Cura			
		3	7	14	28
C30	C30 I	C30 I 3	C30 I 7	C30 I 14	C30 I 28
	C30 II	C30 II 3	C30 II 7	C30 II 14	C30 II 28
C40	C40 I	C40 I 3	C40 I 7	C40 I 14	C40 I 28

C40 II	C40 II 3	C40 II 7	C40 II 14	C40 II 28
--------	----------	----------	-----------	-----------

Fonte: A autora (2022).

Os corpos de prova do grupo controle designados por I foram imersos em um tanque. Já os corpos de prova designados por II foram curados pelo processo de molhagem contínua, ao menos duas vezes por dia visando, mais uma vez, simular as condições comuns de uma obra.

4.4 ETAPA 4

Finalizados os tempos de curas, as rupturas dos 48 corpos de prova ocorreram quando todos atingiram a idade de 30 dias. Os CP's foram submetidos ao ensaio de compressão axial (Figura 29), baseado na NBR 5739:2018, a fim de verificar as suas resistências à compressão axial e realizar as análises pertinentes, inclusive com tratamento estatístico de ANOVA e Teste de Tukey.

Figura 29 – Ensaio de compressão axial realizado nos CP.



Fonte: A autora (2022).

O equipamento utilizado para o ensaio de ruptura foi uma máquina de ensaio mecânico – Prensa MUE-100, com capacidade de carga de 100 toneladas, disponibilizada pelo Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju, conforme imagem da Figura 30.

Figura 30 – Prensa MUE-100.



Fonte: A autora (2022).

4.5 ETAPA 5

Após a ruptura dos corpos de prova foi empregada a Análise de Variância (ANOVA) com objetivo de identificar quais grupos de estudo tiveram diferença significativa entre as médias de resistências. Ou seja, o objetivo é determinar se houve variação significativa da resistência médias dos concretos em função dos tempos e tipos de cura.

A partir da identificação da ocorrência de diferenças significativas entre as resistências médias, foi aplicado o Teste de Tukey, para determinar quais médias são diferentes entre si. Para tanto, foi utilizada a diferença mínima significativa (DMS) calculada conforme demonstrado na equação 2 do item 3.7.

5 RESULTADOS

A partir dos dados coletados, os resultados foram submetidos ao tratamento estatístico da Análise de Variância (ANOVA) - fator duplo com repetição e ao Teste de Tukey, com o objetivo de contribuir para avaliar quais foram os parâmetros que mais causaram impacto na resistência do concreto na idade de ruptura.

5.1 DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Com a aplicação da cura durante intervalos de tempo distintos, buscou-se verificar o comportamento do concreto quando exposto a diferentes duração e tipos de cura. Na Tabela 8 e na Tabela 9 são apresentados os dados da resistência final do concreto obtidos após o ensaio de compressão axial dos corpos cilíndricos, além de suas médias e desvio padrão.

Os grupos de controle de cura em função dos tempos e tipos de cura estão apresentados no Quadro 2 deste trabalho.

Tabela 8 - Valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C30 (em MPa), em função do tempo e tipos de cura.

Classe \ Tempo de cura	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
C30I	38,73	38,56	40,87	38,59
	41,74	42,94	42,54	40,14
	39,11	40,09	37,41	39,55
Média	39,86	40,53	40,27	39,43
Desvio Padrão	1,64	2,22	2,62	0,78
C30II	37,52	37,86	38,46	38,86
	38,42	31,57	38,4	37,45
	37,95	39,46	37,26	37,54
Média	37,963	36,296	38,04	37,95
Desvio Padrão	0,45	4,17	0,68	0,79
C30I – Grupo de CP's submetidos à imersão (MPa).				
C30II – Grupo de CP's submetidos à molhagem contínua (MPa).				

Fonte: A autora (2022).

Tabela 9 - Valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C40 (em MPa), em função do tempo e tipos de cura.

Classe \ Tempo de cura	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
C40I	47,22	48,58	49,03	44,94
	46,39	48,09	48,66	47,25
	45,95	48,59	50,02	48,91
Média	46,52	48,42	49,236	47,033
Desvio Padrão	0,644	0,285	0,703	1,993
C40II	40,61	44,12	42,92	45,24
	39,93	42,7	44,64	44,31
	37,13	42,84	44,09	37,3
Média	39,223	43,22	43,883	42,283
Desvio Padrão	1,844	0,782	0,878	4,340

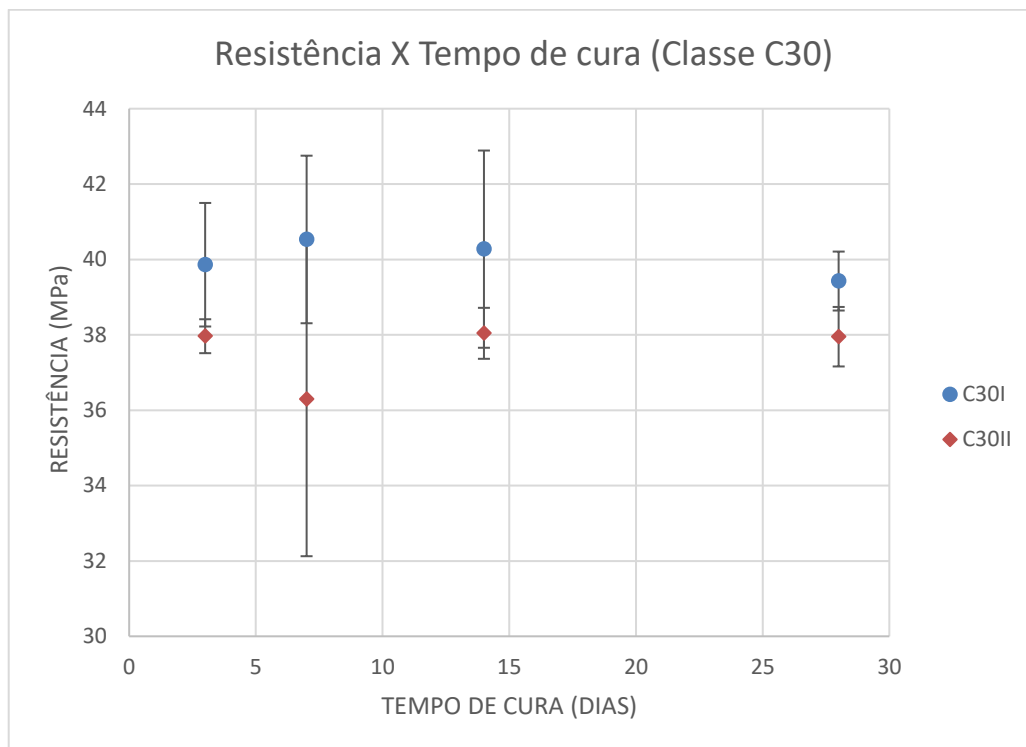
C40I – Grupo de CP's submetidos à imersão.

C40II – Grupo de CP's submetidos à molhagem contínua.

Fonte: A autora (2022).

Através dos dados obtidos, na Tabela 8 e no Gráfico 1, pode-se notar que houve redução da resistência média quando o tipo de cura é alterado da cura por imersão (grupo controle designado por I) para a cura por molhagem contínua (grupo controle designado por II), para a classe de resistência C30. Quanto a influência do tempo de cura, o grupo C30 não expressou um aumento na resistência média tanto na cura por imersão quanto na cura por molhagem.

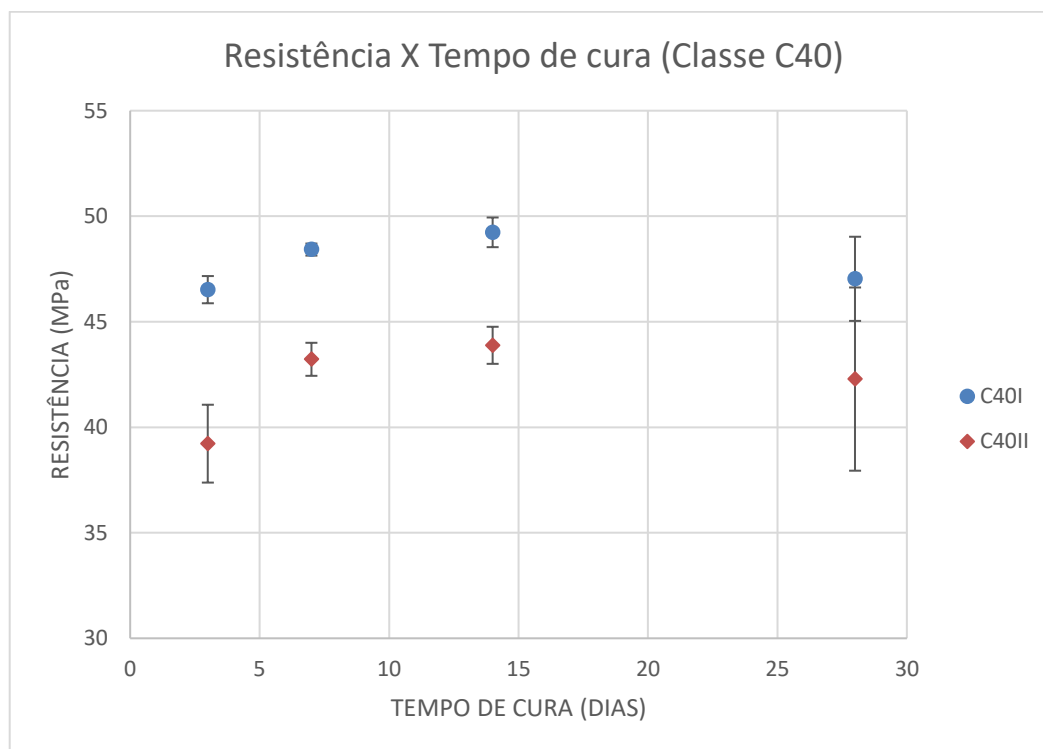
Gráfico 1 – Análise da resistência do concreto da classe C30 em diferentes tempos de cura nos dois tipos de cura.



Fonte: A autora (2022).

Considerando a classe de resistência C40, na cura por imersão, tanto na Tabela 9 como o Gráfico 2, observou-se um aumento em suas médias conforme o aumento do tempo de cura até os 14 dias, chegando-se a um crescimento de aproximadamente 6% nesse último período de cura. No entanto, para o tempo de cura de 28 dias, esse aumento foi de apenas 1% em relação ao observado na resistência média obtida dos corpos de prova referente a 3 dias de cura. Com os dados mencionados, pode-se notar ainda que houve redução da resistência média quando a cura é alterada de cura por imersão para cura por molhagem contínua.

Gráfico 2 - Análise da resistência do concreto da classe C40 em diferentes tempos de cura nos dois tipos de cura



Fonte: A autora (2022).

Com relação à classe de resistência C30, conforme apresentado na Tabela 8 e no Gráfico 1, houve um aumento de resistência de 1,6%, do concreto curado por 7 dias em relação ao que teve 3 dias de cura; e um aumento de 1,02% do concreto com tempo de cura de 14 dias em relação ao que foi curado por 3 dias. Contrariando a literatura discutida no presente trabalho em relação ao maior ganho de resistência com o aumento do tempo de cura, houve uma redução na resistência final do concreto curado por 28 dias em 1,04% em relação aos corpos de prova curados por 3 dias. Falhas em procedimentos, como concretagem ou até mesmo a cura dos corpos de prova, poderiam justificar os valores encontrados, porém não foi observado nos CP's de 28 dias qualquer alteração incomum ou tratamento desigual aos CP's das demais idades no decorrer do programa experimental. Por outro lado, essa contatação também pode indicar não ter havido ganho efetivo de resistência pelo maior intervalo de cura de 28 dias.

É válido ressaltar que, com a dosagem disponibilizada pela empresa fornecedora de concreto local, observa-se que as resistências obtidas foram superiores à de projeto, praticamente em todos os corpos de prova, exceto para dois corpos de prova do grupo controle de 3 dias, submetidos a cura por molhagem, da

classe C40. Em termos de média, todas as médias de resistência foram superiores a resistência de projeto, exceto pela média do grupo de estudo referente ao tempo de cura de 3 dias (ver Gráfico 2). Tendo-se os valores mínimos de aumento correspondentes a: 31,4% para os da classe C30 I (no grupo C30 – 28 dias); 20,96% para concretos de classe C30 II (no grupo C30 – 7 dias); 16,3% entre os grupos de controle referentes a classe C40I (no grupo C40 I - 3 dias); 5,71% para os da classe C40II (no grupo C40 II – 28 dias).

5.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO ANOVA

Para uma melhor avaliação dos resultados obtidos, os dados coletados foram aplicados no tratamento estatístico da análise de variância (ANOVA) - fator duplo com repetição, com 95% de confiabilidade. Esse tratamento busca demonstrar quão significativo foi o efeito da mudança dos tipos de cura e dos tempos de cura na resistência do concreto. A Tabela 10 apresenta os resultados dessa aplicação.

Tabela 10 – Resultado da ANOVA para ambas as classes de resistência.

Classe do concreto	Comparativo	Fator F	Valor P	F Crítico
C30	Tipos de cura	8,602786	0,009748	4,493998
	Tempo de cura	0,142838	0,932767	3,238872
C40	Tipos de cura	53,58547	1,72E-06	4,493998
	Tempo de cura	4,3367	0,02038	3,238872

Fonte: A autora (2022).

Através dos resultados listados acima, possibilitou-se observar que apenas os corpos de prova da classe de resistência C30 não tiveram média de resistência variando em função do tempo de cura. Ou seja, o tempo em que o corpo de prova dessa classe foi curado não interferiu significativamente para o ganho da resistência final dos concretos, o que também já foi observado na análise do Gráfico 1 e da Tabela 8.

Ainda de acordo com a Tabela 10, os valores encontrados de F e a probabilidade de significância (Valor P) indicam que a variação do tipo de cura é significativa para as duas classes de resistência do concreto, ou seja, houve diferença expressiva na resistência dos concretos entre a cura por imersão e a cura por molhagem. Com relação à idade de cura, o grupo com classe de resistência C40

demonstrou que a variação da resistência foi expressiva em relação ao tempo em que o corpo de prova foi curado. Todavia, para esse parâmetro, no concreto de classe C30, essa diferença foi considerada não significativa, já que resultou em um F menor que o F Crítico, conforme já dito anteriormente ($F < F$ Crítico e Valor $P > 0,05$).

5.3 TESTE DE TUKEY

Após realizada a ANOVA, o Teste de Tukey foi aplicado para determinar quais parâmetros dentro desses grupos realmente geram impacto de forma significativa.

Para cada tipo de classe de resistência foi encontrada um DMS diferente, sendo 4,804 para a classe C30 e 4,421 para a classe C40.

5.3.1 Comparação das médias de acordo com o tempo de cura

Para uma melhor avaliação do tempo de cura e analisar quais deles de fato impactaram no ganho da resistência final, o Teste de Tukey foi aplicado em pares de idades de ambas as classes de resistência. Os resultados podem ser observados na Tabela 11 e na Tabela 12.

Tabela 11 – Comparativo dos valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C30I (em MPa), em função do tempo de cura.

Comparativo	Diferença	DMS	Resultado
3 x 7	0,67	4,804	IGUAL
3 x 14	0,413	4,804	IGUAL
3 x 28	0,433	4,804	IGUAL
7 x 14	0,257	4,804	IGUAL
7 x 28	1,103	4,804	IGUAL
14 x 28	0,847	4,804	IGUAL

Fonte: A autora (2022).

Tabela 12 – Comparativo dos valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C30II (em MPa), em função do tempo de cura.

(continua)			
Comparativo	Diferença	DMS	Resultado
3 x 7	1,667	4,804	IGUAL
3 x 14	0,077	4,804	IGUAL
3 x 28	0,013	4,804	IGUAL
7 x 14	1,743	4,804	IGUAL

7 x 28	1,653	4,804	IGUAL
14 x 28	0,09	4,804	IGUAL

Fonte: A autora (2022).

A partir dos dados da Tabela 11 e da Tabela 12, pode-se observar que, para os concretos da classe de resistência C30, tanto para a cura por imersão quanto para a cura por molhagem, o tempo de cura não foi um fator que causou uma variação significativa na resistência final do concreto, como já foi demonstrado anteriormente na Tabela 10 no teste ANOVA. Isso foi percebido analisando que a diferença entre as médias comparadas foi menor que a DMS, ocasionando em um resultado denominado por “IGUAL” na tabela, ou seja, nenhuma das médias comparadas interferiu de maneira significativa na variação da resistência.

Para o concreto de classe C40 demonstrados na Tabela 13 e na Tabela 14, existe uma variação significativa de resistência entre os pares testados nas idades de 3 e 14 dias do grupo C40II. A diferença entre as médias desses pares é maior do que a DMS, demonstrando assim o impacto significativo na resistência do concreto curado por molhagem entre as idades de 3 e 14 dias.

Tabela 13 – Comparativo dos valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C40I (em MPa), em função do tempo de cura.

Comparativo	Diferença	DMS	Resultado
3 x 7	1,9	4,421	IGUAL
3 x 14	2,717	4,421	IGUAL
3 x 28	0,513	4,421	IGUAL
7 x 14	0,817	4,421	IGUAL
7 x 28	1,387	4,421	IGUAL
14 x 28	2,203	4,421	IGUAL

Fonte: A autora (2022).

Tabela 14 – Comparativo dos valores de resistência a compressão dos corpos de prova da classe C40II (em MPa), em função do tempo de cura.

(continua)			
Comparativo	Diferença	DMS	Resultado
3 x 7	3,997	4,421	IGUAL
3 x 14	4,66	4,421	OK
3 x 28	3,06	4,421	IGUAL
7 x 14	0,663	4,421	IGUAL

7 x 28	0,937	4,421	IGUAL
14 x 28	3,15	4,421	IGUAL

Fonte: A autora (2022).

Apesar de as demais médias de resistência demonstrarem diferenças entre os tempos de cura e de já terem sido discutidas matematicamente nesse trabalho (ver item 5.1 – Tabela 8 e Tabela 9 e Gráficos 1 e 2), os valores de resistência não são significativamente diferentes quando comparados entre si para os demais tempos de cura da classe C40 e nem entre todos os pares analisados da classe C30. Ou seja, de acordo com o tratamento estatístico adotado apenas foi observado ter havido variação de resistência para os concretos da classe C40, curados por imersão, com os tempos de cura de 3 e 14 dias.

5.3.2 Comparação das médias de acordo com o tipo de cura

Nesse tópico será realizado um comparativo entre os tipos de cura utilizando todos os tempos de cura para determinar qual parâmetro foi mais significativo.

A Tabela 15 demonstra que na análise das médias entre a cura por imersão e molhagem contínua do concreto de classe de resistência C30, a mudança do tipo de cura não foi um fator que influenciou de maneira significativa para o ganho de resistência final do concreto, visto que os resultados para todas as idades analisadas resultaram em “IGUAL”. Entretanto, esse resultado não era o esperado, visto que o tratamento estatístico ANOVA, demonstrado anteriormente, aponta que para esse mesmo grupo C30, o tipo de cura influenciou no resultado de maneira relevante e o Teste de Tukey apontaria quais dessas médias dentro desse aspecto de fato colaboraram para esse resultado. Sendo assim, o teste demonstra que não há variação significativa das resistências com o tipo de cura dos concretos, podendo ser justificado pelo fato de a diferença entre as médias ser muito pequena, ao ponto de o Teste de Tukey não demonstrar de fato onde ocorre essa diferença.

Tabela 15 – Comparativo dos valores de resistência à compressão dos corpos de prova da classe C30 (em MPa), em função do tipo de cura.

(continua)			
Comparativo	Diferença	DMS	Resultado
3 I x 3 II	1,89	4,803807	IGUAL

7 I x 7 II	4,23	4,803807	IGUAL
14 I x 14 II	2,23	4,803807	IGUAL
28 I x 28 II	1,48	4,803807	IGUAL

Fonte: A autora (2022).

No comparativo entre os grupos de cura nos concretos de classe de resistência C40, a Tabela 16 demonstra que o tipo de cura impactou na variação das resistências de forma significativa e em todos os tempos de cura estudados (3, 7, 14 e 28 dias) isso ocorreu de forma expressiva. Os resultados também demonstram que a cura por imersão teve um melhor desempenho no que se refere a continuidade da hidratação do cimento, nos tempos de cura acima descritos, chegando a ser superior a 23,09%, para o caso do tempo de cura de 14 dias.

Tabela 16 – Comparativo dos valores de resistência à compressão dos corpos de prova da classe C40 (em MPa), em função do tipo de cura.

Comparativo	Diferença	DMS	Resultado
3 I x 3 II	7,3	4,42074	OK
7 I x 7 II	5,2	4,42074	OK
14 I x 14 II	5,35	4,42074	OK
28 I x 28 II	4,75	4,42074	OK

Fonte: A autora (2022).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou demonstrar a importância da cura do concreto, no que diz respeito à continuidade da hidratação do cimento para garantir uma melhor performance do concreto e assim adquirir uma resistência final que atenda às especificidades de cada projeto e de cada situação, conforme discutido por Andrade e Tutikian (2011). Essa demonstração envolve apresentar as diferenças de comportamento do concreto, em termos de resistência à compressão, quando curado por diferentes tipos de cura, no caso foram utilizadas as curas por imersão e molhagem contínua, como também foi observado o impacto do tempo de cura do concreto na sua resistência na idade de ruptura em estudo. Para tanto foram considerados concretos da classe C30 e C40, dosados de acordo com o que foi especificado em traço fornecido por concreteira local.

Após a ruptura dos corpos de prova, os dados obtidos foram analisados matematicamente e tratados estatisticamente de duas formas: utilizando a ANOVA e o Teste de Tukey, conforme demonstrado nos itens 5.2 e 5.3. A partir desse confronto de informações, pode-se avaliar o comportamento do concreto mediante a alteração tanto do tempo de cura quanto do tipo de cura.

Para o concreto de classe C30, pode-se afirmar, mediante os tratamentos estatísticos, que nem o tempo de cura e nem o tipo de cura contribuíram para uma variação significativa das resistências, embora matematicamente foi observada a variação na resistência média dos concretos, havendo aumento na cura por imersão em relação a cura por molhagem para o mesmo tempo de cura.

Para o concreto de classe de resistência C40, foi possível observar pelo tratamento estatístico que os concretos curados por imersão apresentaram resistências médias maiores que os concretos curados por molhagem em todos os tempos de cura observados. Apesar de matematicamente ter havido um aumento da resistência média dos concretos até o tempo de cura de 14 dias. Havendo um aumento de quase 12% entre o ganho de resistência observado aos 14 dias e o de 3 dias de cura por molhagem, e de aproximadamente 6% na cura por imersão nesse mesmo intervalo de cura.

Do estudo também pode-se observar, mediante a pequena variação de resistência em tempos de cura mais longos em relação a intervalos de cura menores, que para os dois tipos de técnicas de cura aqui empregados, sendo de maneira

efetiva, o intervalo de cura de maior duração pode produzir o mesmo ganho de resistência de intervalos de cura de menor duração.

Para futuros trabalhos, sugere-se:

Realizar estudos adicionando corpos de prova não curados para avaliação do surgimento dos produtos de hidratação do concreto;

Utilizar diferentes tempos de cura (até mesmo mais prolongados) para avaliar o ganho de resistência do concreto;

Adicionar outros métodos de cura ao experimento e analisar se existe diferença no ganho de resistência final do concreto com o aumento do tempo de cura;

Realizar estudo para outras classes de resistência, alternando também os tempos e tipos de cura.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768:2019**. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2022**. Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889:2020**. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142:2010**. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5723:2016**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:2011**. Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:2022**. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953:2015**. Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931:2003**. Execução de estruturas de concreto – Procedimento RJ 2004. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931:2004**. Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento RJ 2014. Rio de Janeiro, 2014.
- ANDRADE, Jairo J. O.; TUTIKIAN, Bernardo F. Resistência mecânica do concreto. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 17.
- ASTM C 494 - 10. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Type C - Accelerating admixtures, West Conshohocken, United States, 2001.

BASTOS, Paulo S. **Estruturas de Concreto I: Fundamento do Concreto Armado**. 2019. Notas de aula (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2019.

BATTAGIN, Arnaldo Forti; BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva. O cimento Portland no Brasil. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Materiais de construção civil** e princípios de ciência e engenharia de materiais. 2 ed. São Paulo: Ibracon, 2010, cap. 24.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção**: atualizado pelas normas brasileiras de janeiro de 2018. 6 ed. Rio de Janeiro: LCT, 2019.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção**: novos materiais para a construção civil. 5 ed. Rio de Janeiro: LCT, 2010.

BUNDER, Jeferson. **O concreto**: sua origem, sua história. 2016. Dissertação (Pós-graduação) – Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura. Universidade de São Paulo, 2016.

CAVALLINE NETO, Gilton; COELHO, Frederico Menezes. A importância do correto adensamento do concreto e seu impacto na resistência final da peça. **Projectus**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 4, p. 17-30, 2017.

CARVALHO, Roberto; FIGUEIREDO FILHO, Jasson. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto**: Segundo a NBR 6118:2014. 4 ed. São Paulo: EduFSCar, 2021.

CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2018, Foz do Iguaçu. **Avaliação da adição de aditivo incorporador de ar nas características do concreto convencional fresco e endurecido**. IBRACON, 2018.

FARIAS, L. A. et al. **Ensaio de tração direta em corpos de prova de concreto**. 2018.

HARTMANN, Carine et al. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto**: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 10.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tíberio. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Materiais de construção civil** e princípios de ciência e engenharia de materiais. 2 ed. São Paulo: Ibracon, 2010, cap. 29.

ISAIA, Geraldo. A água no concreto. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto**: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 9.

JRF AREIAS E BRITAS, Produtos. Disponível em: <<https://jrareia.com.br/>>. Acesso em Jan/ 2023.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto**: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO, Sandra. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. Dissertação (Pós-graduação) - Programa De Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, 2010.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do Concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, Adam Matthew; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PAESE, Cíntia; CATEN, Carla ten; RIBEIRO, José Luis Duarte. Aplicação da análise de variância na implantação do CEP. **Production**, v. 11, p. 17-26, 2001.

PAGOTTO, Lyvia Gonzalez et al. Análise de variância e testes de médias: um estudo aplicado em experimentos com variedades de algodoeiro e seleções de citrumelo. **Brazilian Applied Science Review**, v. 5, n. 3, p. 1287-1296, 2021.

PAULON, Vladimir; KIRCHHEIM, Ana Paula. Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 16.

VMS AREIAS. Produtos. Disponível em: < <http://vmsareiaebrita.com.br/servicos.php>>. Acesso em Ago/ 2022.

QUARCIONI, Valdecir Angelo. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland-estudo em pasta**. 2008. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, 2008.

RECENA, Fernando A. P.; PEREIRA, Fernanda Macedo. Produção e controle de concreto em obras. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 15.

ROMANO, Roberto; CARDOSO, Fábio; PILEGGI, Rafael. Propriedades do concreto no estado fresco. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 13.

SANTOS, Roberto Eustaquio. **A armação do concreto no Brasil: história da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia**. 2008. Dissertação (Pós-graduação) - Programa De Pós-Graduação em Conhecimento e Inclusão Social, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

SANTOS, Nilcy Taveiro et al. Avaliação da adição de aditivo incorporador de ar nas características do concreto convencional fresco e endurecido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2018, Foz do Iguaçu.

SILVA, Jéssica Ferreira da. **Análise dos tipos de cura e sua influência no ganho de resistência à compressão em um concreto convencional**. 2019. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) - Bacharelado em Engenharia Civil, [S.I.], 2019.

SILVA, Ramon Possamai. **Avaliação da influência de diferentes tipos de cura em vigas de concreto armado**. 2016. Artigo (Requisito para obtenção de título de Bacharel) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2016.

TUTIKIAN, Bernardo; MOLIN, Denise. **Concreto Autoadensável**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2008.