

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

PAULO ARALDI

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE TEMPERATURA DE  
CURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO  
2020

PAULO ARALDI

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE TEMPERATURA DE  
CURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel do curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra.

TOLEDO

2020



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Toledo  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 237

# INFLUÊNCIA DE DIFERENTES CONDIÇÕES DE TEMPERATURA DE CURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

por

**Paulo Araldi**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 9:00 h do dia **08 de Julho de 2020** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

---

Profº Dr. Gustavo Savaris  
(UTFPR – TD)

---

Profª Dra. Lucia Bressiani  
(UTFPR – TD)

---

Prof Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra  
(UTFPR – TD)  
Orientador

Visto da Coordenação  
Prof. Dr. Gustavo Savaris  
Coordenador da COECI

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

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, por seu corpo docente e por sua estrutura física que juntos proporcionam um ambiente favorável à formação dos acadêmicos.

Agradeço a todos os professores, especialmente ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra pelas orientações, pelos conhecimentos transmitidos e pela compreensão, paciência e confiança.

Também agradeço ao Prof. Dr. Gustavo Savaris e à Prof. Dra. Lucia Bressiani, os quais fizeram excelentes ponderações que ajudaram a enriquecer o meu trabalho.

Agradeço aos laboratoristas Marcos Vinicius Schlichting e Wilson Leobet, da UTFPR pelas instruções e pela atenção que deram a mim e à minha pesquisa.

Agradeço à minha família e amigos que estiveram ao meu lado nos momentos difíceis.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que direta ou indiretamente me auxiliaram na realização deste trabalho.

## RESUMO

ARALDI, Paulo. **Influência de diferentes condições de temperatura de cura na resistência à compressão do concreto.** 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2020.

Atualmente, devido à sua versatilidade e baixo custo de produção, o concreto é o material de construção civil mais utilizado no mundo. Nos primeiros dias após ser lançado, o concreto passa por um período chamado de cura. Essa cura está diretamente relacionada às condições às quais o material está submetido, em especial, temperatura e umidade. Neste trabalho, analisou-se o efeito das temperaturas de 5°C, 23°C e 30°C na cura de corpos de prova sujeitos às mesmas condições de umidade. Foram moldados nove grupos, cada um contendo 6 espécimes, os quais foram divididos nas condições previamente descritas por períodos de 3, 7, 14 e 28 dias. Aos 28 dias, todos os grupos foram rompidos e analisou-se a influência da temperatura nos resultados de resistência à compressão. Os resultados mostraram que as maiores perdas de valores de resistência se dão entre os grupos curados à temperatura de 5°C, embora a cura à 30°C também resulte em um decréscimo nos valores de resistência.

**Palavras-chave:** Concreto. Resistência à compressão. Altas temperaturas. Baixas temperaturas.

## ABSTRACT

ARALDI, Paulo. **Influence of different curing temperature conditions on the compressive strength of concrete.** 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2020.

Currently, due to its versatility and low production cost, concrete is the most used construction material in the world. On the first days after being launched, concrete goes through a period called curing. This curing is directly related to the conditions to which the material is submitted, in particular, temperature and humidity. In this work, the effect of temperatures of 5°C, 23°C and 30°C on the curing of specimens subject to the same humidity conditions was analyzed. Nine groups were molded, each one containing 6 specimens, which were divided in the previously described conditions for periods of 3, 7, 14 and 28 days. At 28 days, all groups were tested and the influence of temperature on the results of resistance to compression was analyzed. The results showed that the greatest losses of resistance values occur among the groups cured at a temperature of 5°C, although curing at 30°C also results in a decrease in resistance values.

**Keywords:** Concrete. Compression strength. High temperatures. Low temperatures.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Valores de temperatura às 6h no dia 28/04/2016.....	12
Figura 2: Valores de temperatura às 14h no dia 12/10/2019 .....	12
Figura 3: Desenv. da resist. à comp. do concreto em diferentes idades e umidades. ....	15
Figura 4: Fissuração do concreto. ....	16
Figura 5: Efeito da temp do material e do ar, da umid. e da vel. do vento na taxa de evaporação da água na sup. do concreto. ....	17
Figura 6: Efeito de diferentes temp. no desenv. de resistência à compressão. ....	19
Figura 7: Efeito de altas temp. no ganho de resist. à compressão do concreto. ....	19
Figura 8: : a) cura por alagamento. b) por aspersão. c) com mantas úmidas e d) cura química .....	20
Figura 9: Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto C30 em diferentes temperaturas. ....	24
Figura 10: Desenvolvimento da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto C50 em diferentes temperaturas. ....	24
Figura 11:Esquema do processo de cura a vapor utilizada para o grupo Z. ....	25
Figura 12:Desenvolvimento da resistência à compressão em diferentes condições. ....	26
Figura 13: Desenvolvimento de resistência à compressão de pastas de cimento sem adição de cinzas volantes curadas em água a diferentes temperaturas. .	27
Figura 14: Desenvolvimento da resistência à compressão de pastas de cimento com 50% de cinzas volantes curadas em água a diferentes temperaturas .....	27
Figura 15: Desenvolvimento de resistência à compressão de pastas de cimento com 25% de cinzas volantes curadas a 20°C com valores de umidade relativa variáveis.....	28
Figura 16: Desenvolvimento de resistência à compressão para dif. temp. e idades.....	29

Figura 17: Curva de Abrams .....	38
Figura 18: Interpretação de um <i>boxplot</i> . .....	41
Figura 19: Resultados do ensaio de compressão .....	44
Figura 20: <i>Boxplot</i> para o grupo C28T30 .....	46
Figura 21: <i>Boxplot</i> para o grupo C3T5 .....	47
Figura 22: <i>Boxplot</i> para o grupo C7T5 .....	47
Figura 23: <i>Boxplot</i> para o grupo C14T5 .....	47
Figura 24: <i>Boxplot</i> para o grupo C28T5 .....	48
Figura 25: <i>Boxplot</i> para o grupo C3T30 .....	48
Figura 26: <i>Boxplot</i> para o grupo C7T30 .....	48
Figura 27: <i>Boxplot</i> para o grupo C14T30 .....	49
Figura 28: <i>Boxplot</i> para o grupo C28T30 .....	49
Figura 29: Representação dos valores limites para rejeição de $H_0$ .....	50



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Períodos mínimos de cura recomendados em concretos de cimento Portland.....	18
Tabela 2: Valores de Resistência em diferentes idades com diferentes traços	23
Tabela 3: Desenvolvimento de resistência à comp. para diferentes temp. e idades.....	29
Tabela 4: Condições de cura.....	30
Tabela 5: Abertura das peneiras. ....	32
Tabela 6: Ensaio de granulometria da areia .....	33
Tabela 7: Ensaio de granulometria da brita .....	33
Tabela 8: Resultado dos ensaios de m específica dos agregados e do aglomerante. ....	37
Tabela 9: Valores para determinação do consumo de água .....	38
Tabela 10: Valores para det. do consumo de agregado grúdo .....	39
Tabela 11: Traço do concreto .....	40
Tabela 12: ANOVA .....	41
Tabela 13: Resultados do Grupo de Referência.....	43
Tabela 14: Resultados dos Grupos curados a 5°C .....	43
Tabela 15: Resultados dos Grupos curados a 30°C .....	44
Tabela 16: Valores da ANOVA.....	49
Tabela 17: Valor limite para rejeição de $H_0$ .....	50
Tabela 18: Valor de q.....	51
Tabela 19: Diferença entre as médias .....	51

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1 JUSTIFICATIVA .....	12
1.2 OBJETIVOS .....	13
1.2.1 Objetivo Geral.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos .....	13
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
2.1 EFEITOS DA TEMP. E DA UMID. RELATIVA NA RESIST. DO CONC.....	15
2.1.1 Métodos de cura .....	20
2.2 ESTADO DA ARTE SOBRE OS E RELATIVA SOBRE A RESISTÊNCIA À.....	22
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	30
3.1 MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA E METODOLOGIAS DE CURA .....	30
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	31
3.2.1 Ensaio de Granulometria .....	31
3.2.2 Determinação da massa específica e massa unit. compactada.....	33
3.2.3 Definição do traço do concreto e moldagem dos corpos de prova.....	37
3.2.4 Análise dos resultados.....	40
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	43
4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	43
4.1.1 Análises Estatísticas.....	46
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	53
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	54

## 1. INTRODUÇÃO

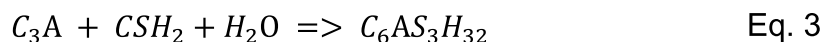
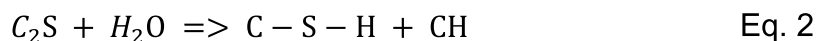
A construção civil é um dos principais segmentos econômicos em todo o mundo. De acordo com Pedroso (2009), estima-se um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano, valor inferior somente ao consumo de água. Em se tratando do Brasil, a quantidade de concreto que sai de centrais dosadoras é de cerca de 30 milhões de metros cúbicos.

Neste ponto, o concreto é um material protagonista no cenário da construção civil, sendo um dos principais materiais utilizados no mundo, devido às suas características de resistência mecânica, durabilidade, fácil trabalhabilidade e custo acessível desde materiais à aplicação. Nesse sentido, Mehta e Monteiro (2008), apontam algumas das principais razões pelas quais o concreto adquiriu tanta importância na construção civil. A primeira delas se deve ao fato de que, ao contrário da madeira e do aço, o concreto apresenta resistência à água, ao fogo e à corrosão, possibilitando sua utilização em estruturas como pontes, barragens, canais e estruturas de contenção.

Em segundo lugar, pode ser moldado em diversos tamanhos e formas, podendo assim atender às mais variadas necessidades de uso. Além disso, após adquirir resistência, os moldes podem ser removidos e reutilizados. Em terceiro lugar, outro motivo que favorece a utilização do concreto é a facilidade de obtenção do material. O concreto é composto basicamente por cimento Portland, areia, brita e água que são materiais facilmente encontrados no mundo.

Além disso, com cuidados na dosagem destes materiais e nos procedimentos de execução, concretos de qualidade podem ser obtidos sem a necessidade de complexos processos de fabricação.

O concreto adquire resistência a partir das reações de hidratação do cimento ao longo do tempo. Neste caso o cimento Portland é composto em sua maior parte por silicatos e aluminatos de cálcio que, ao se hidratar levam à formação de produtos que conferem resistência ao concreto. Um breve resumo das reações de hidratação é apresentado a seguir:



Onde:

$C_3S$  = Silicato Tricálcico ( $3CaO.SiO_2$ )

$C_2S$  = Silicato Dicálcico ( $2CaO. SiO_2$ )

$C_3A$  = Aluminato Tricálcico ( $3CaO.Al_2O_3$ )

$CSH_2$  = Gipsita ( $CaO.SO_4.2H_2O$ )

$C_6AS_3H_{32}$  = Etringita [ $3CaO.Al_2O_3.3(CaSO_4.2H_2O).32H_2O$ ]

$H_2O$  = Água

C-S-H = Silicato de Cálcio Hidratado ( $3CaO.2SiO_2.3H_2O$ )

CH = Hidróxido de Cálcio [ $Ca(OH)_2$ ]

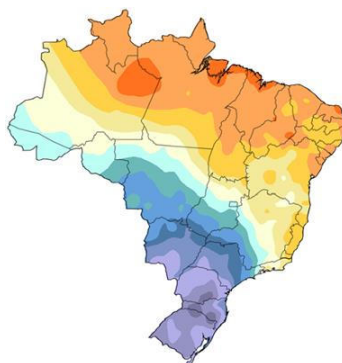
A partir da reação de hidratação do silicato dicálcico ( $C_2S$ ) conhecido como belita e do silicato tricálcico ( $C_3S$ ) conhecido como alita, há formação de silicato de cálcio Hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) e , a partir da reação de hidratação do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) há formação da etringita. A etringita é caracterizada por conferir enrijecimento à pasta de cimento, sendo um produto obtido a partir das primeiras idades do concreto, ao passo que, o C-S-H é responsável por conferir resistência mecânica ao concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Para que as reações de hidratação descritas acima ocorram e o concreto alcance seu melhor desempenho, condições adequadas de umidade e temperatura devem ser observadas. Entretanto, durante sua manufatura e aplicação, o concreto está sujeito a constantes variações de temperatura e umidade devido a variações climáticas. Fatores como precipitação, umidade relativa, temperatura e velocidade do vento afetam as características do material podendo levar a problemas de fissuração devido à retração plástica.

O Brasil é um país de dimensões continentais com características climáticas variadas ao longo das estações. Para exemplificar, pode-se analisar a temperatura do país às 6 horas do dia 28/04/2016, conforme Figuras 1 e 2. Percebe-se grande diferença entre os valores entre norte e sul, de acordo com

a Figura 1, chegando a variações entre 2 e 28°C. Na Figura 2, percebe-se temperaturas que ultrapassam 36°C às 14h do dia 12/10/2019, ou seja, acima da temperatura recomendada pela norma.

Figura 1: Valores de temperatura às 6h no dia 28/04/2016.



Fonte: INMET.

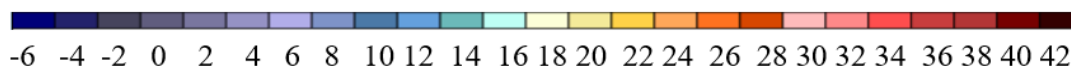
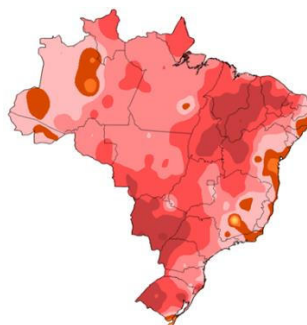


Figura 2: Valores de temperatura às 14h no dia 12/10/2019.



Fonte: INMET.

Mediante o exposto, tendo em vista que o concreto, nas diferentes regiões do Brasil está sujeito a efeitos de temperatura distintos ao longo do ano, o presente trabalho tem como objetivo analisar os efeitos de diferentes temperaturas na resistência à compressão do concreto.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Uma vez que o Brasil é um país que apresenta consideráveis variações de temperatura em seu território, conforme Figuras 1 e 2 – devido às suas proporções e às variações climáticas ao longo do ano – entende-se que

problemas relacionados à temperatura de cura do concreto são de ocorrência frequente, como por exemplo, fissuração devido à retração que afeta a durabilidade das estruturas de concreto, visto que agentes agressivos podem penetrar através destas fissuras e levar o concreto à degradação. Além disso, problemas de resistência podem ocorrer devido à perda de água por evaporação durante o processo de cura, visto que as reações de hidratação do cimento necessitam de água para sua ocorrência.

Thomaz (2005) afirma que a temperatura atua como um catalisador das reações químicas do clínquer com a água. Dessa forma, em temperaturas muito baixas, as reações são muito lentas, podendo ser totalmente inibidas abaixo de 0°C. Já para temperaturas muito altas, acima de 40°C, por exemplo, acontece rápido desenvolvimento de cristais a partir da superfície dos grumos de cimento, fato que dificulta a reação no interior dos grumos, criando uma estrutura não uniforme, o que leva a concretos com maior resistência inicial, porém com menor resistência em idades mais avançadas.

De acordo com a NBR 14931 (ABNT, 2004) a temperatura no momento do lançamento do concreto não deve ser inferior a 5°C ou superior a 30°C. Porém, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2, a realidade no território brasileiro apresenta valores que estão fora desse intervalo, tanto acima quanto abaixo. Percebe-se, portanto, que o estudo a respeito dos efeitos de diferentes temperaturas durante a cura do concreto, é importante para conhecer seus efeitos sobre as propriedades do material. Desta forma, o presente trabalho visa contribuir no âmbito da análise dos efeitos de diferentes temperaturas nas propriedades do concreto durante o tempo de cura.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho apresenta como objetivo geral analisar os efeitos de diferentes temperaturas durante o período da cura do concreto sobre sua resistência à compressão.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o efeito de temperaturas de 5°C e 30°C (valores extremos da norma brasileira) na cura em diferentes idades.

- Comparar o decréscimo de resistência em relação às condições padrões normativas ( $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e U.R. > 95%).
- Comparar os resultados obtidos com a literatura de referência.

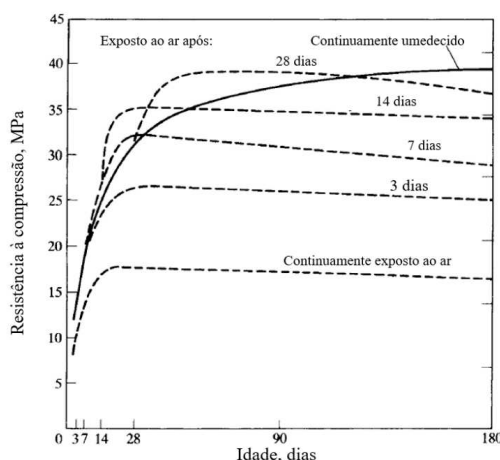
## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 EFEITOS DA TEMPERATURA E DA UMIDADE RELATIVA NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO.

Thomaz (2005) descreve a cura como sendo o intervalo de tempo que corresponde às reações iniciais de hidratação do cimento (Eq. 1-3) e endurecimento do concreto. Durante esse período, as condições de umidade e temperatura influenciam significativamente todas as propriedades do material, necessitando-se de cuidados especiais que favoreçam física e quimicamente a constituição da matriz do cimento. De fato, quando o cimento Portland entra em contato com a água, começam a ocorrer as reações de hidratação. A duração dessas reações, por sua vez, é diretamente influente na resistência e durabilidade do concreto.

Logo após lançado, o concreto se apresenta com grande quantidade de água para hidratação, porém, devido ao calor do ambiente e o calor liberado pelas reações de hidratação, essa água tende a evaporar, podendo ocorrer problemas de retração com a consequente fissuração do concreto, principalmente na superfície do mesmo. É nas idades iniciais que o concreto adquire resistência mais rapidamente, sendo que esse aumento de resistência continua acontecendo, embora de maneira mais lenta, por um período indeterminado, conforme Figura 3 (NEVILE E BROOKS, 2010).

Figura 3: Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto em diferentes idades e com diferentes umidades.



Fonte: Neville e Brooks (2010).



A Figura 3 também apresenta valores para resistência de concreto exposto a diferentes condições de umidade. Percebe-se que os valores de resistência, aos 180 dias, aumentam em mais de 100% no caso em que os corpos de prova são mantidos submersos durante todo o tempo, se comparados aos que não são submersos. Além disso, percebe-se que esse aumento de resistência é proporcional e está diretamente ligado ao número de dias em que o material esteve submerso antes de ser exposto ao ar livre.

A umidade interna do concreto é fator determinante para que as reações de hidratação ocorram de maneira adequada, sendo que, umidades inferiores a 80%, especialmente nos primeiros dias, são suficientes para colocar em risco a qualidade do material. Isso porque, abaixo de 80%, as reações de hidratação diminuem significativamente e, ainda que a umidade seja reestabelecida, as reações de hidratação, embora sejam reativadas, não voltam a ter o mesmo potencial que teriam caso a umidade se mantivesse constante com valor de 100%. Dessa forma, é essencial que a temperatura e a umidade sejam mantidas no concreto desde o momento em que ele é lançado até que adquira suficiente resistência, impermeabilidade e durabilidade (KOSMATKA et al., 2008).

Sob uma perspectiva da retração e conseqüente fissuração do concreto, Kosmatka et al. (2008) e Neville e Brooks (2010) afirmam que a perda de água excessiva também causa a retração do concreto, criando tensões de tração e, se essas tensões se desenvolverem antes de o material ter adquirido a resistência para suportar estas tensões, o resultado pode ser o surgimento de fissuras na superfície, conforme apresentado na Figura 4. Desse modo, qualquer superfície exposta deve ser protegida contra a evaporação.

Figura 4: Fissuração do concreto.



Fonte: Fórum da Construção<sup>1</sup>.

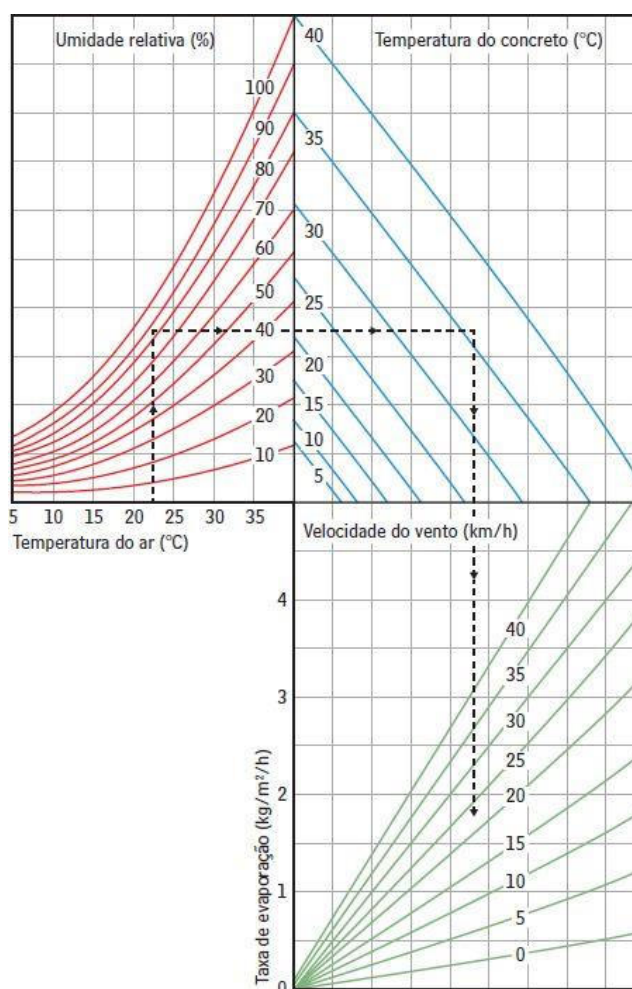
---

<sup>1</sup> Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=17&Cod=1484/>> Acesso em nov. 2019.

As fissuras por retração plásticas ocorrem na superfície de concreto, geralmente em fases iniciais. Elas estão geralmente associadas a concretagem em altas temperaturas, uma vez que essa condição causa rápida evaporação da umidade a partir da superfície do concreto, resultando em pequenas e irregulares fissuras. Os fatores que tem maior influência na evaporação da água e, conseqüentemente, no surgimento de fissuras por retração plástica são a temperatura do ar, temperatura do concreto, umidade relativa e velocidade do vento.

A Figura 5 apresenta um método desenvolvido por Menzel (1954) para prever os valores aproximados de evaporação de água, conhecendo-se a temperatura do ar, a umidade relativa do ambiente, a temperatura do concreto e a velocidade do vento.

Figura 5: Efeito da temperatura do material e do ar, da umidade relativa e da velocidade do vento na taxa de evaporação da água na superfície do concreto.



Fonte: Menzel (1954).

Para garantir condições para o desenvolvimento das reações de hidratação, e conseqüentemente que os espaços vazios na massa de concreto sejam ocupados por produtos de hidratação, procedimentos para manutenção de temperatura e umidade relativa devem ser tomados. Este processo é conhecido como cura do concreto. A cura do concreto é definida, portanto, como um conjunto de procedimentos responsável pela manutenção de condições de temperatura e umidade adequadas para o desenvolvimento das reações de hidratação do cimento.

Segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004), a temperatura de cura adequada deve estar entre  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e a umidade relativa deve estar acima de 95% até que a resistência característica do concreto atinja patamares da ordem de 15 MPa. A Tabela 1 apresenta um resumo dos períodos de tempo de cura de acordo com o tipo de cimento e fator a/c recomendados. Caso este procedimento não seja realizado, reduções nas propriedades mecânicas do concreto podem ser observadas.

Tabela 1: Períodos mínimos de cura recomendados para concretos de cimento Portland.

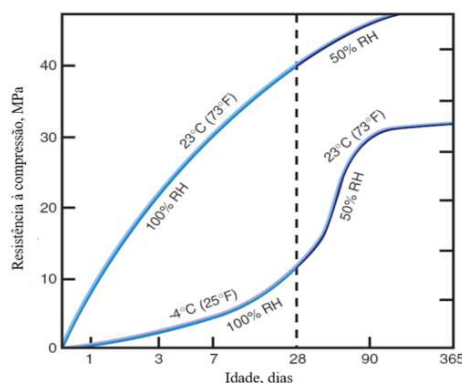
Tipo de Cimento	Relação água-cimento			
	0,35	0,55	0,65	0,7
CP I e II-32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP IV-32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CP III-32	2 dias	5 dias	7 dias	10 dias
CP I e II-40	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias
CP V-ARI	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias

Fonte: Thomaz (2005).

Em relação à temperatura, é ideal que se mantenham temperaturas intermediárias. De acordo com Kosmatka et al. (2008), temperaturas muito altas aceleram o processo de evaporação da água e a temperaturas muito baixas, os processos de hidratação são muito lentos. De fato, a temperaturas próximas de  $0^{\circ}\text{C}$  o desenvolvimento de resistência inicial é significativamente reduzido e, abaixo de  $-10^{\circ}\text{C}$ , é praticamente inexistente. As temperaturas muito elevadas, por sua vez, ocasionam aceleração no processo de evaporação da água necessária para as reações de hidratação, prejudicando o processo de hidratação e, conseqüentemente, reduzindo a resistência do concreto.

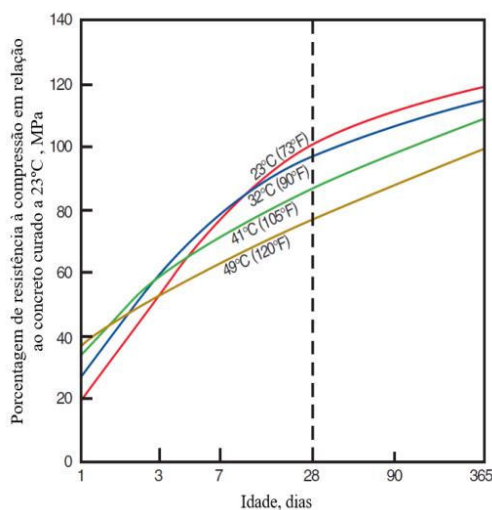
A Figura 6 apresenta os valores de resistência à compressão de corpos de prova curados à temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e à temperatura de  $-4^\circ\text{C}$ . Segundo Bauer (2008), temperaturas abaixo de  $0^\circ\text{C}$  são decididamente danosas ao concreto fresco, visto que a expansão da água de solidificação rompe as ligações entre as partículas sólidas, diminuindo consideravelmente a resistência do concreto. A Figura 7 apresenta valores para corpos de prova curados a temperaturas de até  $49^\circ\text{C}$ . Percebe-se que, embora a resistência inicial, nos primeiros dias, seja maior para maiores temperaturas, devido a um aumento na taxa das reações de hidratação, em idades mais avançadas, após 7 dias, essa relação se inverte, devido à perda de água.

Figura 6: Efeito de diferentes temperaturas no desenvolvimento de resistência à compressão.



Fonte: Kosmatka et al. (2008).

Figura 7: Efeito de altas temperaturas no ganho de resistência à compressão do concreto.



Fonte: Kosmatka et al. (2008).

A NBR 7212 (ABNT, 2012) afirma que a temperatura ambiente para lançamento do concreto deve estar entre 5°C e 30°C, sendo que fora desses limites devem ser tomados cuidados especiais. A temperatura do concreto por ocasião do seu lançamento deve ser fixada de modo a evitar a ocorrência de fissuração de origem térmica. Neville e Brooks (2010) afirmam que o objetivo da cura é manter o concreto saturado até que os espaços originalmente ocupados por água sejam ocupados pelos produtos de hidratação. A hidratação do cimento ocorre apenas em capilaridades preenchidas por água. . Sendo assim, a perda de umidade através da evaporação deve ser evitada, para que o desenvolvimento da resistência ocorra da maneira desejada, conforme apresentado na Figura 3.

### 2.1.1 Métodos de cura

Bauer (2008) apresenta alguns dos principais métodos de cura adotados. A Figura 8 ilustra esses métodos.

Figura 8: a) cura por alagamento. b) cura por aspersão. c) cura com mantas úmidas e d) cura química.



Fonte: Cimento Holcim<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Disponível em: <<https://www.cimentoHolcim.com.br/blog/7-tipos-de-cura-do-concreto-para-a-sua-obra/>> Acesso em out. 2019.

O primeiro deles é a cura por alagamento ou imersão. Esse método é adequado para superfícies planas, como pavimentos e pisos. O alagamento é ideal para prevenir a perda de água na superfície, bem como para manter uma temperatura uniforme no concreto. É importante salientar que a temperatura da água não deve apresentar diferença de temperatura maior do que aproximadamente 11°C em relação ao concreto, para evitar tensões térmicas que podem resultar em fissuras. Esse método é mais comumente usado em obras de pequeno porte, uma vez que requer muito trabalho e supervisão constante.

A cura por aspersão, por sua vez, é bastante indicada para casos em que a temperatura ambiente é bastante superior à temperatura de congelamento e a umidade é baixa. Nesse sistema, a umidade é garantida devido a um sistema de mangueiras microperfuradas ou por sprinklers, sendo ideal para superfícies planas, como pavimentos e lajes. Um dos pontos negativos desse método, entretanto, pode ser o custo e a necessidade de constante supervisão.

Outro método é através de mantas úmidas. Essas mantas devem ser colocadas sobre o concreto, assim que o material adquiere enrijecimento suficiente para não sofrer danos na superfície. Essas mantas servem para retardar a velocidade de evaporação da água da superfície, porém vale ressaltar que a umidade do material precisa ser constantemente reestabelecida. Além das mantas, há outros materiais que podem ser utilizados, como pó de serra, feno, palha e areia. Entretanto, estes materiais podem apresentar risco de descolorir o concreto.

A cura química, por sua vez, utiliza de produtos químicos como ceras, parafinas, acrílicos, entre outros, capazes de formar uma membrana que reduz a evaporação, podendo ser aplicados por meio de regadores ou equipamentos de pulverização. Esse é o método mais usado devido a sua praticidade. Nesse tipo de cura é importante tomar cuidado com o tipo de produto utilizado, uma vez que alguns componentes podem dificultar a fixação da tinta, do revestimento, do chapisco e do contrapiso sobre o concreto ou ainda, podem liberar substâncias que causam problemas respiratórios.

A cura a vapor consiste no aumento da temperatura nas primeiras idades do concreto convencional, sendo que essa temperatura seja maior que a temperatura ambiente, porém inferior a 70°C, uma vez que acima desse valor, o processo se torna pouco econômico e pode ocasionar danos. A cura a vapor é vantajosa para casos em que se deseja alta resistência inicial e também em ambientes muito frios, onde é necessário maior calor para que ocorram os processos de hidratação, como em casos de estruturas pré-moldadas.

## 2.2 ESTADO DA ARTE SOBRE OS EFEITOS DA TEMPERATURA E DA UMIDADE RELATIVA SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.

München et al. (2019) analisaram os efeitos de diferentes temperaturas de cura sobre a resistência à compressão do concreto. Foram moldados 105 corpos de prova cilíndricos com três composições de concreto, sendo uma rica (1: 3,5), a intermediária (1: 5,0) e outra pobre (1: 6,5). A resistência à compressão axial dos concretos foi determinada no 1º, 7º e 28º dia de idade.

As condições de cura da pesquisa foram referentes às baixas temperaturas, expondo as amostras de concreto a -3, 0, 3, 8 °C e à temperatura referência de 22°C. Os concretos foram curados em câmara fria, nas respectivas temperaturas, durante os primeiros 7 dias de cura. Já no restante do período, os 21 dias, mantiveram-se em condições ambientes (cerca de 22°C). Os exemplares com a temperatura de 22 °C foram condicionados em tempo integral em condições ambientes.

O teor de umidade mantido na câmara fria foi de  $95 \pm 3\%$  e os valores obtidos estão apresentados na Tabela 2. Pode-se observar que os resultados de resistência à compressão atingidos pelo traço rico foram os mais elevados para todas as temperaturas de cura. Também foi possível identificar que as amostras ensaiadas no 1º e 7º dia de idade tiveram a resistência inferior àquela dos 28 dias. Os menores resultados nas idades iniciais foram, com a temperatura de -3 e 0°C, como já era esperado.

Tabela 2: Valores de Resistência em diferentes idades com diferentes traços.

Temperatura de cura	Resistência à compressão axial (MPa)								
	Rico			Intermediário			Pobre		
	1 dia	7 dias	28 dias	1 dia	7 dias	28 dias	1 dia	7 dias	28 dias
22	20,6	31,4	37,6	17,1	24,3	33,7	13,6	23,7	26,8
8	19,2	30,5	42,5	11,1	22,3	35,5	4,6	18,8	24,3
3	9,6	29,9	38,2	3,5	19	36,1	3,3	17,5	23,8
0	6,9	29,8	42,7	1,3	18,5	38	0	16,7	25,8
-3	7,9	28,7	47,2	1,5	21,6	40	0,4	16	26,5

Fonte: München et al. (2019)

Além disso, as amostras curadas com temperatura de 22°C, em todos os traços, atingiram as maiores resistências nas idades iniciais (1º e 7º dia), devido às condições de cura nos primeiros sete dias. As melhoras na resistência à compressão dos traços foram evidentes conforme a temperatura de cura foi superior a 3°C. De acordo com os autores, o desenvolvimento de uma condição favorável não foi atingido em baixas temperaturas, pois as reações de hidratação são exotérmicas. A formação de C3S, produto de hidratação do cimento, é retardada, causando impacto na resistência inicial da matriz.

Nota-se que a temperatura de cura influencia na resistência à compressão das matrizes cimentícias, sendo o traço pobre o mais prejudicado, atingindo resistência nula no primeiro dia de ensaio nas temperaturas de 0 e -3°C. Já o traço intermediário, para as mesmas condições, apresentou pequena melhora, conferindo resistências de 1,3 e 1,5 MPa. Esse fato se explica, segundo os autores, pelo fato de que o concreto possui maior dificuldade no desenvolvimento das resistências iniciais, devido à redução na velocidade de hidratação do cimento pela pressão hidráulica e difusão da água.

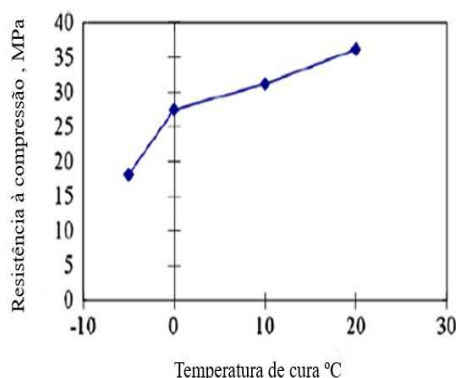
Nassif e Petrou (2013) procuraram investigar os efeitos da cura realizada em baixas temperaturas sobre o concreto. O objetivo principal da pesquisa foi investigar a suposição de que, na verdade a resistência e a microestrutura do concreto são mais afetadas pelas baixas temperaturas do que se acredita. Foram moldados 25 corpos de prova, com dimensões de 750 x 750 x 300 mm, de 3 classes de concreto, a saber C30, C40 e C50. Esses corpos de prova foram mantidos em um ambiente com temperaturas de 20°C, 10°C, 3°C, 0°C e -5°C até a data de ensaio à compressão.



O estudo concluiu que a cura a temperaturas próximas à temperatura de congelamento da água causou a formação de fissuras de até 10 mm de largura por 10 mm de comprimento. Além disso, a resistência de compressão aos 28 dias foi reduzida em aproximadamente 25% quando o corpo de prova de concreto foi curado a 0°C em vez de 20°C. A redução aumentou para 50% quando a temperatura de cura baixou para -5°C, devido ao congelamento da água ou ao retardo das reações de hidratação. As Figuras 9 e 10 apresentam valores de resistência à compressão do concreto C30 e o módulo de elasticidade obtido para o concreto C50.

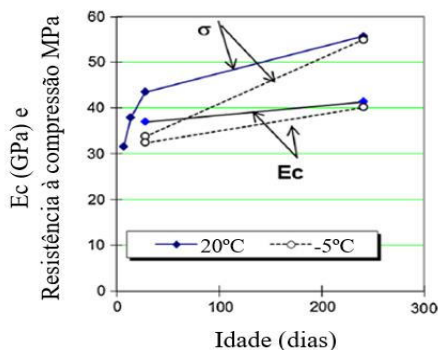
Os autores afirmam que o pior cenário acontece quando, devido às baixas temperaturas, a água congela nos poros antes do concreto adquirir resistência suficiente para resistir à pressão causada por esse congelamento. Tal fenômeno causa perdas de resistência irreparáveis.

Figura 9: Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto C30 em diferentes temperaturas.



Fonte: Nassif e Petrou (2013).

Figura 10: Desenvolvimento da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto C50 em diferentes temperaturas.



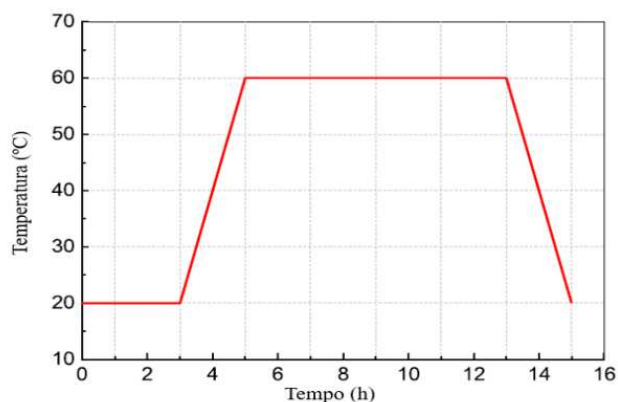
Fonte: Nassif e Petrou (2013).

Zou et al. (2018) observaram os efeitos de diferentes condições de cura em corpos de prova inicialmente curados a vapor. De acordo com os autores, a cura a vapor é um processo que acelera as reações de hidratação do concreto, contribuindo para o ganho de resistência nas idades iniciais. Entretanto, os autores também afirmam que a cura a vapor também pode ter alguns efeitos indesejados, como aumento de porosidade e microfissuras superficiais, devido ao aumento da permeabilidade superficial. Os moldes foram divididos em dois grupos, de acordo com as condições de cura.

Um dos grupos (denominado pela sigla B) foi curado a uma temperatura de  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , com umidade relativa de  $97 \pm 2\%$ . O outro grupo (abreviado como Z) foi curado no vapor. Para a cura a vapor, os corpos de prova foram mantidos inicialmente a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  por um período de 3 horas. Em seguida a temperatura foi aumentada para  $60^\circ\text{C}$  durante 10 horas e, por fim, voltou a  $20^\circ\text{C}$ , conforme ilustrado na Figura 11.

Depois da cura a vapor, o segundo grupo de corpos de prova foi subdividido em outros quatro grupos, a saber: cura padrão a temperatura e umidade relativa do laboratório (ZB), cura em estufa a cerca de  $60^\circ\text{C}$  (ZD), cura a  $-20^\circ\text{C}$  (ZF) e cura submersa a  $20^\circ\text{C}$  (ZW). Cada uma das condições teve como objetivo simular as diferentes condições climáticas às quais o material está realmente exposto no local em questão, nesse caso, a China.

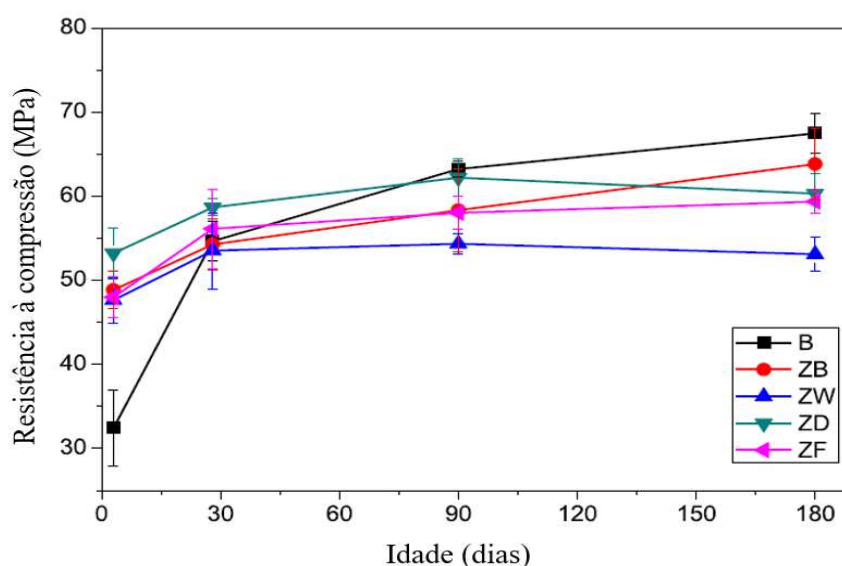
Figura 11: Esquema do processo de cura a vapor utilizada para o grupo Z.



Fonte: Zou et al. (2018).

De acordo com os autores, os resultados da Figura 12 apontam que a resistência após 3 dias no concreto curado a vapor é cerca de 50% maior do que a do concreto curado de maneira convencional. Isso confirma a aceleração das reações de hidratação do cimento, causada pela cura a vapor. Entretanto, os valores de resistência aumentam lentamente após determinado tempo de cura, ao passo que, no processo de cura convencional, ocorre um aumento muito significativo no valor de resistência aos 3 dias e aos 180 dias. Segundo os autores, isso é uma prova dos problemas causados a longo prazo devido à cura a vapor.

Figura 12: Desenvolvimento da resistência à compressão em diferentes condições.



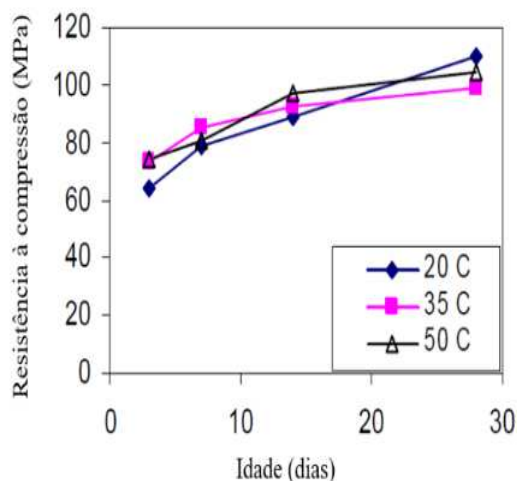
Fonte: Zou et al. (2018).

Saengsoy et al. (2008) se dedicaram a estudar o comportamento das propriedades mecânicas e da durabilidade de corpos de prova de concreto com adição de cinzas volantes, sob o ponto de vista do desenvolvimento da hidratação do cimento e das reações das cinzas volantes em diferentes condições de cura.

A proporção de substituição de cimento por cinza volante foi de 0%, 25% e 50% do volume. Em relação à temperatura, corpos de prova foram curados em água a  $20\pm 2^\circ\text{C}$ ,  $35\pm 2^\circ\text{C}$  e  $50\pm 2^\circ\text{C}$ . Em relação à umidade relativa, os corpos de prova foram expostos às seguintes condições: submersos (S), cura química (Q), e com umidade relativa de 60%, 80% e 95% (U60, U80 e U90, respectivamente).

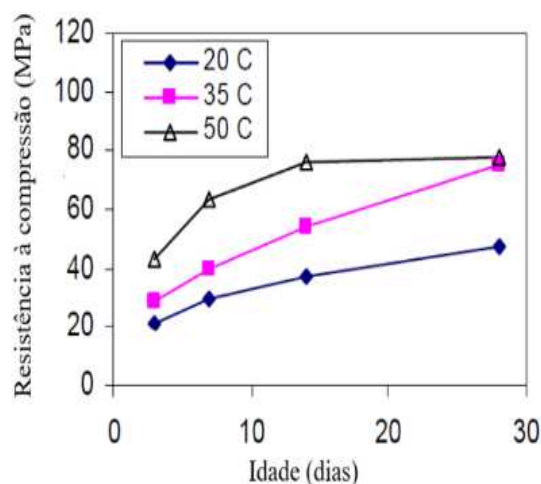
A Figura 13 apresenta os resultados de resistência à compressão para os corpos de prova submersos curados a diferentes temperaturas. A Figura 14 apresenta os valores para corpos de prova com adição de cinzas volantes, também com umidade relativa de 100%.

Figura 13: Desenv. de resist. à compressão de pastas de cimento sem adição de cinzas volantes curadas em água a dif. temp.



Fonte: Saengsoy et al. (2008).

Figura 14: Desenv. de resist. à compressão de pastas de cimento com 50% de cinzas volantes curadas em água a dif. temp.



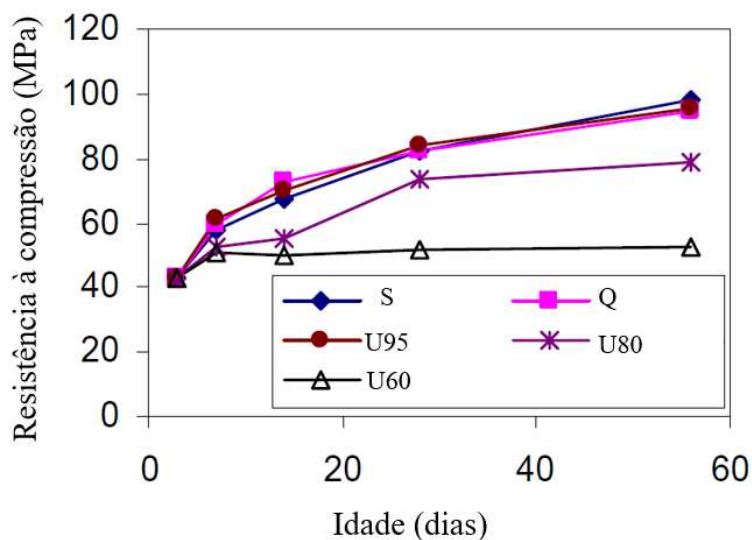
Fonte: Saengsoy et al. (2008).

Os autores afirmam que, de acordo com os resultados obtidos, não houve grande diferença entre o desenvolvimento de resistência à compressão dos corpos de prova curados a diferentes temperaturas para os corpos de prova sem adição de cinzas volantes. Por outro lado, os corpos de prova com

adição de 50% apresentaram diferença significativa. Isso porque, segundo eles, o grau de hidratação das cinzas volantes é fortemente influenciado pela temperatura de cura e o aumento dessa temperatura acelera o grau de hidratação das cinzas volantes tanto em idades iniciais quanto avançadas. Esse resultado implica que o maior desenvolvimento da resistência da pasta de cimento com cinzas volantes se deve ao acelerado grau de hidratação da cinza volante devido à maior temperatura de cura.

Em relação à diferença de umidade relativa, percebe-se, de acordo com a Figura 15, que não houve grande alteração entre os valores de S, Q e U95. Entretanto, para os valores abaixo de U80, os resultados mostram alterações significativas. De fato, os autores afirmam que a resistência à compressão se desenvolve lentamente quando exposta a umidades abaixo de 80% e, além disso, com umidade de 60%, a resistência praticamente não aumenta após 7 dias. Segundo os autores, tal fato se explica pela evaporação da água interna aos corpos de prova, devido à diminuição da umidade relativa ambiente.

Figura 15: Desenvolvimento de resistência à compressão de pastas de cimento com 25% de cinzas volantes curadas a 20°C com valores de umidade relativa variáveis.



Fonte: Saengsoy et al. (2008).

Cecconello e Tutikian (2012) moldaram 62 corpos de prova com o objetivo de analisar o comportamento do desenvolvimento da resistência à compressão com temperaturas entre 0 e 25°C. Nos primeiros sete dias, os corpos de prova foram mantidos a temperaturas de 0, 5, 10, 15, 20 e 25°C e,

após esse período, foram curados todos à temperatura de 20°C. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos no experimento.

Tabela 3: Desenvolvimento de resistência à compressão para diferentes temperaturas e idades.

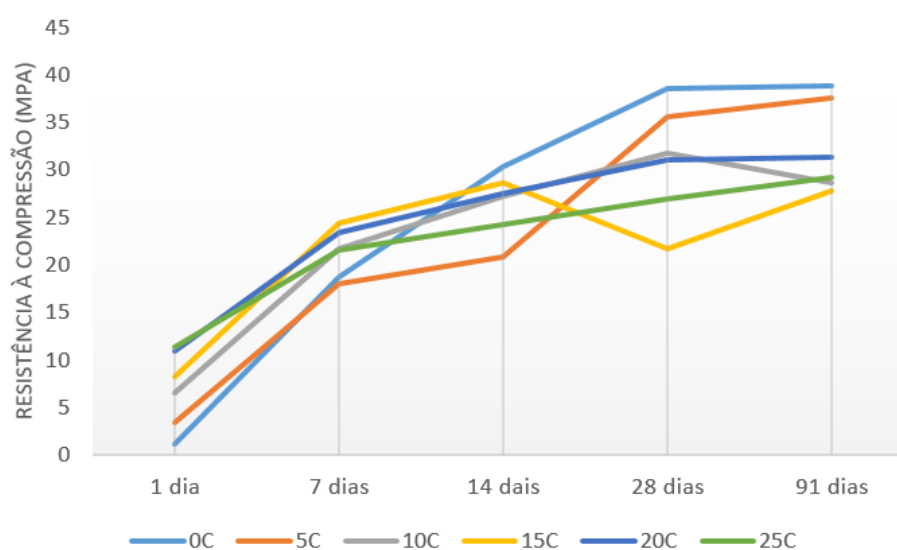
Temperatura de cura	Resistência à compressão axial (MPa)				
	1 dia	7 dias	14 dias	28 dias	91 dias
<b>25</b>	11,4	21,5	24,3	26,9	29,2
<b>20</b>	11	23,4	27,5	31	31,4
<b>15</b>	8,3	24,4	28,7	21,7	27,8
<b>10</b>	6,5	21,7	27,3	31,8	28,7
<b>5</b>	3,5	18	20,9	35,6	37,6
<b>0</b>	1,2	18,8	30,3	38,6	38,8

Fonte: Cecconello e Tutikian (2012).

A partir dos dados, percebe-se que, inicialmente, temperaturas maiores apresentaram maiores resultados na resistência à compressão, quando comparadas a temperaturas menores. Porém, no longo prazo esse cenário se inverteu, sendo que, aos 91 dias os maiores valores de resistência à compressão estão nas temperaturas de 0 e 5°C.

Para melhor visualização, os resultados são apresentados em forma de gráfico na Figura 16.

Figura 16: Desenvolvimento de resistência à compressão para diferentes temperaturas e idades.



Fonte: Cecconello e Tutikian (2012).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA E METODOLOGIAS DE CURA

Para o estudo, foram moldados 54 corpos de prova. A Tabela 4 apresenta as condições de cura que foram aplicadas para cada grupo. A identificação C3T5 indica, por exemplo, que o grupo foi curado durante 3 dias a uma temperatura de 5°C antes de ir para uma câmara à temperatura ambiente. Para tanto, foram moldados corpos de prova com diâmetro igual a 10 cm e 20 cm de comprimento, conforme NBR 5738 (ABNT 2008) Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

Uma vez que as temperaturas recomendadas pela NBR 14931 (ABNT, 2004) variam entre 5°C e 30°C, esses foram os valores extremos de temperatura adotados para as condições de cura neste trabalho com o objetivo de avaliar seus efeitos sobre a resistência à compressão do concreto.

De acordo com a Tabela 4, um primeiro grupo foi curado a uma temperatura de 5°C, sendo que, dentro desse grupo, houve subgrupos retirados do recipiente de 5°C para serem colocados na câmara de cura a 23°C após 3 dias, 7 dias e 14 dias. Um subgrupo, porém, foi mantido a 5°C durante 28 dias.

Um segundo grupo foi submerso a uma temperatura de 30°C e, após 3, 7 e 14 dias, alguns corpos de prova foram transferidos para a câmara de cura a 23°C, sendo que um subgrupo foi mantido a 30°C durante 28 dias.

Um terceiro grupo foi exposto a uma temperatura de 23°C na câmara de cura durante 28 dias, sendo este utilizado como referência.

Tabela 4: Condições de cura.

Identificação	Tempo	Quantidade	Descrição
C3T5	3	6	Submerso a 23°C após 3 dias de submersão a 5°C
C7T5	7	6	Submerso a 23°C após 7 dias de submersão a 5°C
C14T5	14	6	Submerso a 23°C após 14 dias de submersão a 5°C
C28T5	28	6	Submerso a 5°C por 28 dias
C3T30	3	6	Submerso a 23°C após 3 dias de submersão a 30°C
C7T30	7	6	Submerso a 23°C após 7 dias de submersão a 30°C
C14T30	14	6	Submerso a 23°C após 14 dias de submersão a 30°C
C28T30	28	6	Submerso a 30°C por 28 dias
C28T23	28	6	Submerso a 23°C por 28 dias

Fonte: Autor (2020).

Após 28 dias, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão em uma prensa, seguindo as orientações da NBR 5739 (ABNT, 1994) Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Os resultados obtidos foram submetidos a testes estatísticos a fim de se observar a relevância dos valores obtidos em cada grupo.

Vale ressaltar que todos os corpos de prova analisados foram submetidos a cura submersa (umidade relativa igual a 100%), sendo considerados apenas efeitos de temperatura. Desta forma, em condições de concretagens em campo, além da temperatura do ambiente, outros parâmetros como a umidade relativa, a velocidade do vento e a temperatura do concreto em função das reações de hidratação exotérmicas devem ser levados em consideração quanto à análise da resistência do concreto, visto que estes parâmetros acabam levando à evaporação da água de amassamento, conforme apresentado na Figura 5. Tal fato demonstra que estes parâmetros exercem maior efeito sobre as propriedades mecânicas do concreto e reforçam a necessidade de cuidados em relação à realização correta de procedimentos de cura.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa são cimento Portland CP II F-32, areia com Dimensão Máxima Característica (DMC) igual a 1,18 mm e Módulo de Finura igual a 1,83 e brita nº 0, com DMC igual a 19,1 mm.

Os ensaios de caracterização foram utilizados para o cálculo do traço de concreto a ser utilizado segundo o método da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABCP).

#### 3.2.1 Ensaio de Granulometria

Para caracterizar um agregado é necessário conhecer quais são as parcelas constituídas de grãos de cada diâmetro, expressas em função da massa total do agregado (BAUER, 2008). Para o ensaio de granulometria, utiliza-se uma série de 8 peneiras colocadas sobre um fundo. O número e a abertura das peneiras estão relacionados na Tabela 5. As peneiras são organizadas de forma que as com abertura maior fiquem sobre as de menor



abertura, possibilitando assim a passagem de material com menor diâmetro até as peneiras inferiores. As peneiras são agitadas manualmente para que os grãos de areia passem das superiores às inferiores, de acordo com seu tamanho.

Tabela 5: Abertura das peneiras.

<b>Nº Peneira</b>	<b>Abertura</b>
3/4'	19,0 mm
3/8'	9,50 mm
4	4,75 mm
8	2,36 mm
16	1,18 mm
30	600 µm
50	300 µm
100	150 µm
Fundo	0

Fonte: Bauer (2008).

Em seguida, as massas retidas nas peneiras foram pesadas e a curva granulométrica foi construída. A curva granulométrica apresenta a porcentagem de material passante e retido em cada peneira, indicando assim a graduação do material.

Além disso, calculou-se o módulo de finura e determinou-se a dimensão máxima característica do agregado (DMC). O módulo de finura da areia foi determinado através do somatório das porcentagens retidas acumuladas do agregado nas peneiras da série normal (entre a 4,75 mm a 150 µm) dividido por 100. Já a dimensão máxima característica foi determinada a partir da abertura nominal da peneira, em milímetros, da malha na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

Os valores estão apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6: Ensaio de granulometria da areia.

<b>Abertura Peneira</b>	<b>Material Retido</b>	<b>% Retida</b>	<b>%Retida Acumulada</b>
19,0 mm	0	0	0
9,50 mm	0	0	0
4,75 mm	0	0	0
2,36 mm	0,72	0,72	0,72
1,18 mm	1,55	1,55	2,27
600 µm	8,65	8,63	10,9
300 µm	59,46	59,34	70,24
150 µm	28,82	28,76	99
Fundo	1	1	100
<b>Total</b>	<b>100,2</b>		

Fonte: Autor (2020).

Tabela 7: Ensaio de granulometria da brita.

<b>Abertura Peneira</b>	<b>Material Retido</b>	<b>% Retida</b>	<b>%Retida Acumulada</b>
19,0 mm	10	0,33	0,33
9,50 mm	2012,42	66,84	67,17
4,75 mm	789,54	26,22	93,39
2,36 mm	177,85	5,91	99,3
1,18 mm	7,42	0,25	99,55
600 µm	1,11	0,04	99,58
300 µm	2,16	0,07	99,65
150 µm	3,71	0,12	99,78
Fundo	6,71	0,22	100
<b>Total</b>	<b>3010,92</b>		

Fonte: Autor (2020).

A partir desses valores, calculou-se um módulo de finura de 1,83 para a areia e uma dimensão máxima característica de 1,18mm e 19,0 mm para a areia e brita, respectivamente.

### 3.2.2 Determinação da massa específica e massa unitária compactada

Esse procedimento foi realizado de acordo com orientações da NBR NM 52 (ABNT, 2003). Colocou-se a amostra de 1000g de agregado miúdo em um

recipiente, a qual foi coberta com água e ficou em repouso por 24h. Após esse período, a amostra foi retirada da água e estendida sobre uma bancada, submetendo-a à ação de uma suave corrente de ar quente com um soprador térmico, revolvendo-a com frequência para assegurar uma secagem uniforme. Prosseguiu-se a secagem até que os grãos não ficassem fortemente aderidos entre si. O agregado miúdo foi colocado num molde, sem comprimi-lo; a superfície foi suavemente compactada com 25 golpes de haste de socamento e então levantou-se verticalmente o molde. Esse procedimento foi repetido até o momento em que houve desmoronamento da borda, o que indica que o material estava com a umidade ideal para dar continuidade ao procedimento. Neste momento o agregado terá chegado à condição de saturado superfície seca.

Foram pesados 500 g de amostra ( $m_s$ ), colocados no picnômetro e registrou-se a massa do conjunto ( $m_1$ ). Encheu-se o picnômetro com água até próxima da marca de 500 ml, em seguida o frasco foi movimentado de forma a eliminar as bolhas de ar e colocado em um banho mantido a temperatura constante de  $23 \pm 2$  °C. Após 1 h, completou-se com água até a marca de 500 cm<sup>3</sup> e determinou-se a massa total com precisão de 0,1 g ( $m_2$ ). O agregado miúdo foi retirado do frasco e foi secado a 105 °C por 24h. Em seguida, calculou-se a massa ( $m$ ).

Em seguida, foi calculada a massa específica aparente do agregado seco, com a Equação 4.

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

$d_1$ : é a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

$m$ : é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

$V$ : é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

$V_a$ : é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a Equação 5, em centímetros cúbicos.

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

$m_1$ : é a massa do conjunto (frasco + agregado), em gramas;

$m_2$ : é a massa total (frasco + agregado + água), em gramas;

$\rho_a$  : é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico;

Em seguida, calculou-se a massa específica do agregado saturado com superfície seca, utilizando-se a Equação 6.

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

$d_2$ : é a massa específica aparente do agregado saturado com superfície seca, em gramas por centímetro cúbico;

$m_s$ : é a massa da amostra na condição saturada com superfície seca, em gramas;

$V$ : é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

$V_a$ : é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a Equação 5, em centímetros cúbicos.

Por fim, calculou-se a massa específica do agregado, por meio da Equação 7.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

$d_3$ : é a massa específica do agregado, em gramas por centímetro cúbico;

$m$ : é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

$V$ : é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

$V_a$ : é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a Equação 5, em centímetros cúbicos.

$m_s$ : é a massa da amostra na condição saturada com superfície seca, em gramas;

$\rho_a$  : é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico;

Para o agregado graúdo, determinou-se sua massa específica e massa

unitária compactada. Segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2003) Agregado graúdo – Determinação de massa específica, a amostra foi pesada e em seguida submersa em água, onde permaneceu durante 24 horas, para que os poros permeáveis saturassem. Transcorrido o período de 24 horas da submersão, a amostra foi seca superficialmente e novamente pesada, obtendo-se assim a massa do agregado na condição saturado com superfície seca. Em seguida, essa mesma amostra foi submersa na balança hidrostática, obtendo-se assim a massa do agregado submerso. Por fim, a amostra foi levada à estufa à temperatura de 105°C onde permaneceu por mais 24 horas, e depois disso novamente foi pesada, obtendo-se agora a massa seca ao ar. Finalmente, a massa específica aparente do agregado foi determinada através da Equação 8.

$$\gamma = \frac{m}{m - m_a} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

$\gamma$ : é a massa específica aparente, em gramas por centímetro cúbico;

$m$ : é a massa ao ar da amostra seca em estufa;

$m_a$ : é a massa em água da amostra saturada.

Por fim, calculou-se o valor da massa unitária compactada do agregado graúdo. Com o auxílio de uma trena, determinou-se o volume interno de um recipiente que foi tarado em seguida. Esse recipiente foi preenchido com brita, a qual foi despejada a uma altura de aproximadamente 10 cm para evitar a compactação. O molde foi preenchido em 3 camadas, que foram compactadas com 25 golpes distribuídos cada uma. Após o preenchimento, com o auxílio de uma régua, a superfície foi regularizada e em seguida a massa do recipiente cheio foi medida. Dessa forma obteve-se o valor da massa da brita compactada e calculou-se a sua massa unitária compactada dividindo-se esse valor pelo volume do recipiente. O procedimento foi realizado 3 vezes e calculou-se a média.

Para determinação da massa específica do cimento a norma utilizada foi a NBR NM 23 (ABNT, 2003) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Uma amostra de 60 g de cimento foi

introduzida com auxílio de um funil dentro do frasco graduado de Le Chatelier contendo querosene. Para encontrar a massa específica em  $\text{g/cm}^3$ , utilizou-se a Eq. 9.

$$\rho = \frac{m}{\Delta V} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde:

$\rho$ : é a massa específica do cimento, em gramas por centímetro cúbico;

$m$ : é a massa de cimento utilizada;

$\Delta V$ : é a variação do volume de querosene no frasco.

Após realização dos ensaios de massa específica e unitária, foram obtidos os seguintes resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultado dos ensaios de massa específica dos agregados e do aglomerante.

Material	Areia	Brita	Cimento
<b>Massa Específica (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b>	2,55	2,92	2,83

Fonte: Autor (2020).

### 3.2.3 Definição do traço do concreto e moldagem dos corpos de prova

Para a dosagem do concreto, foi utilizado o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Para tanto, foi admitido um concreto com resistência Característica à compressão ( $f_{ck}$ ) igual a 20 MPa, um controle de obra classe B (para definição do valor de desvio padrão de dosagem  $SD = 5,5$ ) e um abatimento do concreto igual a 90 mm. Além disso, os resultados de caracterização dos agregados foram utilizados na dosagem conforme descrito a seguir:

Primeiramente, determinou-se a resistência de dosagem, de acordo com a Equação 10:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 Sd \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

$f_{cj}$ : resistência de dosagem do concreto, em MPa

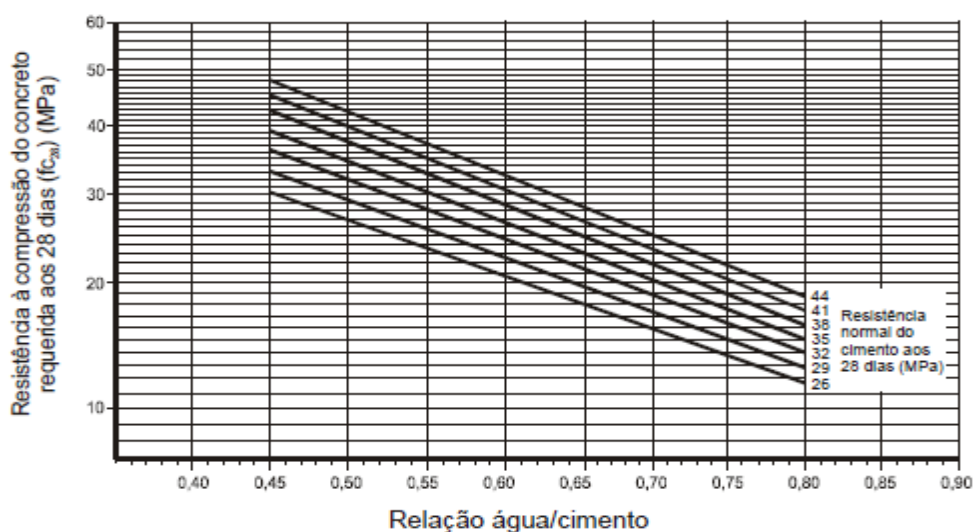
$f_{ck}$ : resistência característica do concreto à compressão, em MPa

*Sd*: desvio padrão de dosagem.

Em seguida, determinou-se a relação água/cimento, de acordo com a curva de Abrams, apresentada na Figura 17.

Para determinação do consumo de água, se utiliza da Tabela 9, considerando-se o DMC da brita e o abatimento do concreto. Em seguida o consumo de cimento é determinado pela Equação 10.

Figura 17: Curva de Abrams



Fonte: Bauer (1979).

Tabela 9: Valores para determinação do consumo de água.

Abatimento do tronco de cone (Slump) mm	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19	25	32	38
<b>40 a 60</b>	220	195	190	185	180
<b>60 a 80</b>	225	200	195	190	185
<b>80 a 100</b>	230	205	200	195	190

Fonte: ABCP (1983).

$$C_c = \frac{C_{\text{água}}}{a/c} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

$C_c$ : consumo de cimento, em kg/m<sup>3</sup>;

$C_{\text{água}}$ : consumo de água;

$a/c$ : relação água/cimento.

O próximo passo é a determinação do consumo de agregados. Para o agregado graúdo, utiliza-se a Equação 11, onde o valor do volume compactado ( $V_c$ ) é determinado através da Tabela 10 utilizando o módulo de finura do agregado miúdo e o DMC da brita.

$$C_b = V_c * M_c \quad \text{Eq. 11}$$

Onde:

$C_b$ : consumo de brita;

$V_c$ : Volume compactado seco do agregado graúdo por  $m^3$  de concreto;

$M_c$ : Massa unitária compactada do agregado graúdo.

Tabela 10: Valores para determinação do consumo de agregado graúdo.

MF	Diâmetro Máximo Agregado Graúdo (mm)				
	9,5	19	25	32	38
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: ABCP (1983).

Para determinar o consumo de agregado miúdo, utiliza-se da Equação 12, com o valor da massa específica dos materiais.

$$C_a = \left[ 1 - \left( \frac{c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_{\text{água}}}{\gamma_{\text{água}}} \right) \right] * \gamma_a \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

$\gamma_c$ : Peso específico do cimento

$\gamma_b$ : Peso específico da brita

$\gamma_{\text{água}}$ : Peso específico da água

$\gamma_a$ : Peso específico da areia



Primeiramente estipulou-se um controle utilizado na produção do concreto, esse controle adotado foi do tipo B, sendo então o desvio padrão de dosagem igual a 5,5 MPa. Definindo o  $f_{ck}$  do concreto com 20 MPa, a resistência de dosagem do concreto aos 28 dias obtida por meio da Equação 6 foi de 29,07 MPa.

O cimento CP II-F-32 que foi utilizado apresenta resistência normalizada de 32 MPa aos 28 dias. Esse valor de resistência normal do cimento, em conjunto com o valor de 29,07 MPa para o  $f_{cj}$  (Resistência de dosagem do concreto), foram relacionados nas Curvas de Abrams (Figura 19) para obtenção da relação água/cimento de 0,54.

O passo seguinte foi determinar o consumo de cimento ( $C_c$ ), que surgiu a partir da relação entre o fator  $a/c$  de 0,54 e o consumo de água de 205 kg/m<sup>3</sup>, conforme Tabela 4. Usou-se a Equação 7 para encontrar o consumo de cimento de 379,629 kg/m<sup>3</sup>.

Em seguida, com auxílio da Equação 11 e da Tabela 5, calculou-se um consumo de brita ( $C_b$ ) de 1090 kg/m<sup>3</sup> e com a Equação 12, calculou-se um consumo de areia de 730 kg/m<sup>3</sup>.

Dessa forma, os resultados obtidos para 1 kg de concreto estão apresentados na Tabela 11. Dividindo-se os valores pelo consumo do cimento, obtém-se o traço, conforme está apresentado na mesma tabela.

Tabela 11: Traço do concreto

Material	Cimento	Areia	Brita	Água
<b>Consumo kg/m<sup>3</sup></b>	379,6	730	1090	205
<b>Traço (em massa)</b>	1	1,92	2,87	0,54

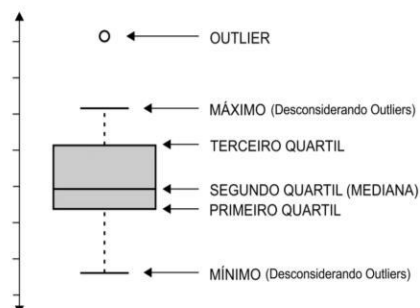
Fonte: Autor (2020).

#### 3.2.4 Análise dos resultados

O *boxplot* ou diagrama de caixa é uma ferramenta gráfica que permite visualizar a distribuição e valores discrepantes dos dados. As medidas de estatísticas descritivas como o mínimo, máximo, primeiro quartil, segundo quartil ou mediana e o terceiro quartil formam o *boxplot*, conforme Figura 18. O local onde a linha tracejada vertical começa (de baixo para cima) indica o Limite inferior aceitável, que corresponde a  $Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1)$  e onde a haste

termina indica o Limite superior aceitável, que corresponde a  $Q_1 + 1,5(Q_3 - Q_1)$ . Valores que excedem esses extremos são considerados *outliers* (OPERDATA, 2020).

Figura 18: Interpretação de um *boxplot*.



Fonte: Operdata<sup>3</sup>.

Também foi executada a análise de variância (ANOVA), que é um método para testar a igualdade de três ou mais médias populacionais, baseado na análise das variâncias amostrais (MONTGOMERY e UNGER, 2003). A princípio, adota-se duas hipóteses. A HIPÓTESE NULA ( $H_0$ ) indica que a média de todas as populações é igual, ou seja, não há nenhuma variação em média entre os grupos. A HIPÓTESE ALTERNATIVA ( $H_1$ ) indica que nem todas as médias populacionais são iguais, ou seja, pelo menos uma média é diferente.

Tabela 12: ANOVA

Fonte da Variação	SQ	GL	Variância	Razão F
<b>Entre</b>	SQE	k-1	$S^2_{\text{entre}} = \frac{SQE}{k-1}$	$F = \frac{S^2_{\text{entre}}}{S^2_{\text{dentro}}}$
<b>Dentro</b>	SQD	n-k	$S^2_{\text{dentro}} = \frac{SQD}{n-k}$	
<b>Total</b>	SQE+SQD	n-1	-----	

Fonte: Montgomery e Runger (2003).

Onde:

k: número de amostras (grupos), no caso, 9.

n: soma do número de elementos de todas as amostras, no caso, 54.

SQ: soma dos quadrados;

GL: grau de liberdade.

<sup>3</sup> Disponível em: <<https://operdata.com.br/blog/como-interpretar-um-boxplot/>> Acesso em abr. 2020.

A hipótese nula da ANOVA indica que os valores de resistência à compressão não diferem uns dos outros de maneira significativa. Por outro lado, a hipótese alternativa garante que os valores não são iguais, ou seja, há pelo menos um valor de resistência à compressão significativamente diferente.

O nível de significância ( $\alpha$ ) adotado é de 0,05. Isso indica um erro de 5% de se concluir que existe uma diferença quando de fato não há nenhuma diferença. Caso a hipótese nula seja rejeitada, ou seja, caso a ANOVA indique que há pelo menos um valor significativamente diferente dos demais, aplica-se o teste de diferença honestamente significativa de Tukey, que indica uma diferença mínima significativa para comparar os valores dos grupos entre si.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA

Aos 28 dias, os corpos de prova foram rompidos e os resultados são apresentados nas Tabelas 13,14 e 15 e também na Figura 19, em forma de gráfico.

Tabela 13: Resultados do Grupo de Referência.

Grupo	Corpo de Prova	$f_{ck}$ (MPa)	Média	Desvio Padrão	Variação %
C28T23	1	44,16	39,84	4,62	11,6
	2	44,51			
	3	43,40			
	4	34,87			
	5	36,32			
	6	35,79			

Fonte: Autor (2020).

Tabela 14: Resultados dos Grupos curados a 5°C.

Grupo	Corpo de Prova	$f_{ck}$ (MPa)	Média	Desvio Padrão	Variação %
C3T5	1	39,08	39,39	3,06	7,78
	2	35,69			
	3	39,53			
	4	37,16			
	5	42,02			
	6	43,83			
C7T5	1	40,21	37,05	4,76	12,87
	2	31,92			
	3	33,87			
	4	35,39			
	5	45,00			
	6	35,92			
C14T5	1	36,31	35,27	2,58	7,31
	2	39,08			
	3	31,42			
	4	35,76			
	5	33,65			
	6	35,39			
C28T5	1	33,36	31,59	3,50	11,1
	2	33,23			
	3	36,07			
	4	27,45			
	5	32,12			
	6	27,34			

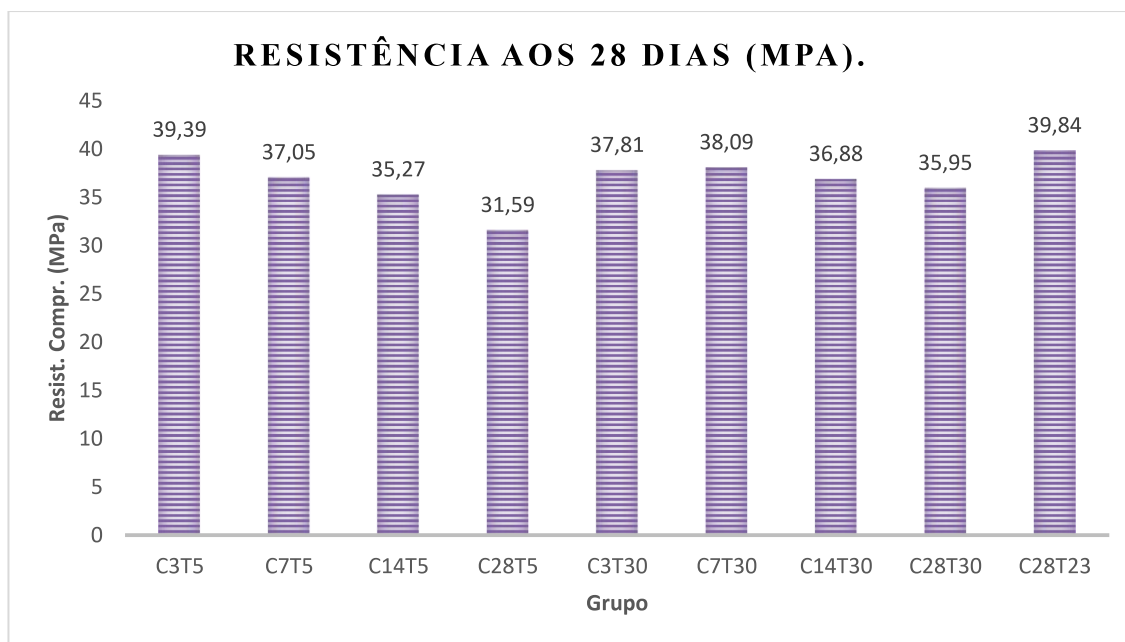
Fonte: Autor (2020).

Tabela 15: Resultados dos Grupos curados a 30°C.

Grupo	Corpo de Prova	$f_{ck}$ (MPa)	Média	Desvio Padrão	Variação %
C3T30	1	40,52	37,81	3,21	8,49
	2	34,85			
	3	36,47			
	4	34,07			
	5	42,12			
	6	38,85			
C7T30	1	42,50	38,09	4,48	11,76
	2	43,20			
	3	32,28			
	4	39,91			
	5	36,47			
	6	34,21			
C14T30	1	33,10	36,88	4,98	13,52
	2	38,49			
	3	39,73			
	4	44,79			
	5	32,91			
	6	32,29			
C28T30	1	41,84	35,95	3,86	10,74
	2	38,83			
	3	32,04			
	4	36,70			
	5	32,99			
	6	33,31			

Fonte: Autor (2020).

Figura 19: Resultados do ensaio de compressão.



Fonte: Autor (2020).

A partir dos dados obtidos, pode-se perceber na Figura 18 que a temperatura de 5°C diminui os valores de resistência de forma gradativa, conforme a idade de cura avança. Os valores seguem uma tendência linear, que pode ser aproximada a partir da Equação 13. Os valores para temperaturas de 5°C apresentam um  $R^2$  de 0,97, numa escala que varia de 0 a 1, indicando que a equação da reta apresenta valores bastante aproximados para a relação idade do concreto/desenvolvimento de resistência.

$$y = -0,29x + 39,67 \quad \text{Eq. 13}$$

Onde:

y: Resistência, em MPa;

x: Idade, em dias.

Esses valores corroboram os estudos de Nassif e Petrou (2013), uma vez que mostram que, quando submetidos a baixas temperaturas, os corpos de prova levam mais tempo para desenvolver as características de resistência à compressão, devido à desaceleração das reações de hidratação do cimento. De fato, quando comparados ao valor de referência, isto é, do grupo C28T23, percebe-se que aos 3 dias, há uma variação de 1,3%. Entretanto, conforme a idade aumenta, essa variação também aumenta, chegando a diminuir 20% aos 28 dias. Isso mostra que quanto maior o tempo de cura sob baixa temperatura, menor será sua resistência aos 28 dias.

Em relação aos corpos de prova mantidos a 30°C, observa-se que os efeitos da temperatura afetam em menor grau a resistência do concreto, uma vez que, a variação, se comparada ao grupo referência C28T23, para os 3 dias foi de cerca de 5% e, aos 28 dias, cerca de 9%. Neste ponto, embora haja uma redução de resistência do concreto quando exposto a 30°C por diferentes períodos de tempo, observa-se que a variação de resistência entre 3 e 14 dias de corpos de prova foi de aproximadamente 1 MPa, demonstrando uma variação muito pequena.

Para a cura a 30°C, a variação segue certa tendência linear conforme a Eq. 14, com  $R^2$  de 0,91

$$y = -0,08x + 38,27$$

Eq. 14

Onde:

$y$ : Resistência, em MPa;

$x$ : Idade, em dias.

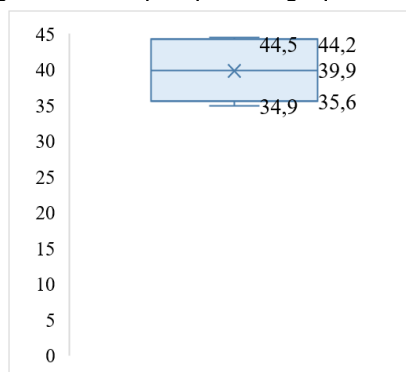
As Equações 13 e 14 permitem estimar, por exemplo, qual seria o valor da resistência de um concreto que está sendo curado a uma determinada temperatura de acordo com a idade do mesmo, considerando os materiais e o respectivo traço analisado.

Comparando os grupos C3T5 e C3T30 observa-se que o segundo grupo apresentou menor média de resistência, entretanto, este comportamento se inverte para as demais idades, demonstrando que baixas temperaturas afetam mais a resistência do concreto devido à desaceleração das reações de hidratação do cimento, conseqüentemente, é aconselhável que concretagens sejam evitadas durante dias cuja previsão de baixas temperaturas se mantenha por mais de 3 dias.

### 3.2.5 Análises estatísticas

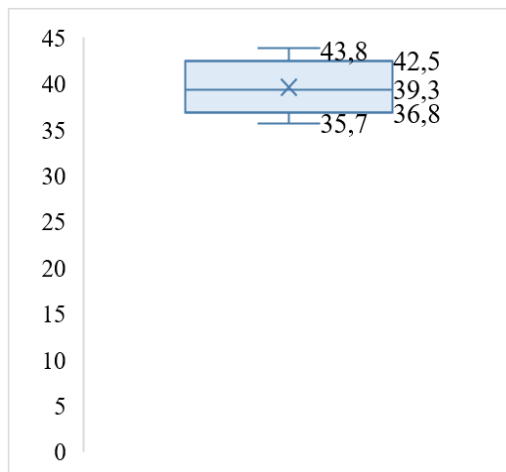
As figuras 20 a 28 mostram o *boxplot* de todos os grupos. Conforme observado nas Figuras 20 a 28, nenhum dos grupos apresenta outliers, ou seja, os valores, embora apresentem uma diferença considerável, estão dentro dos limites de variação aceitáveis.

Figura 20: Boxplot para o grupo C28T30



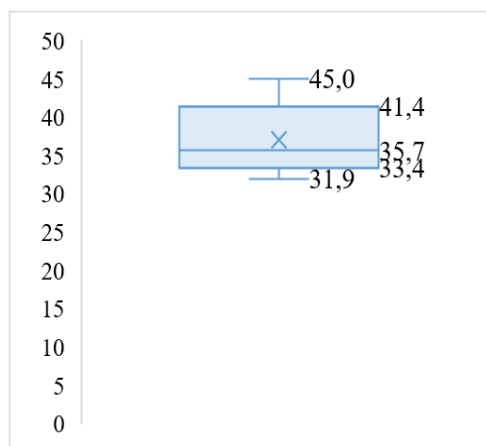
Fonte: Autor (2020).

Figura 21: Boxplot para o grupo C3T5.



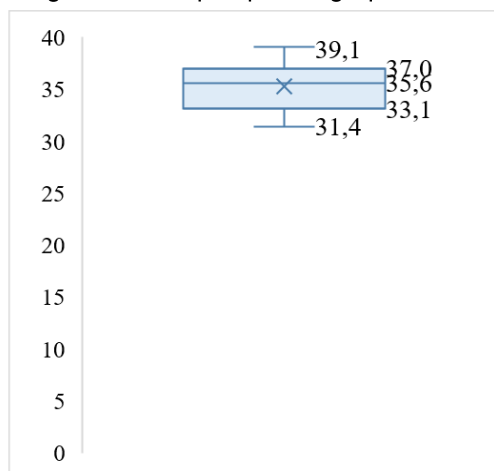
Fonte: Autor (2020).

Figura 22: Boxplot para o grupo C7T5.



Fonte: Autor (2020).

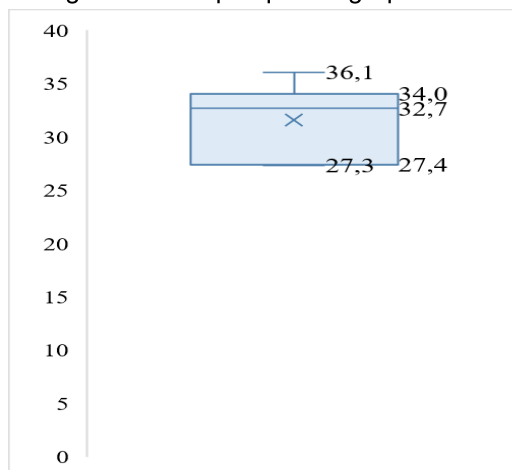
Figura 23: Boxplot para o grupo C14T5.



Fonte: Autor (2020).

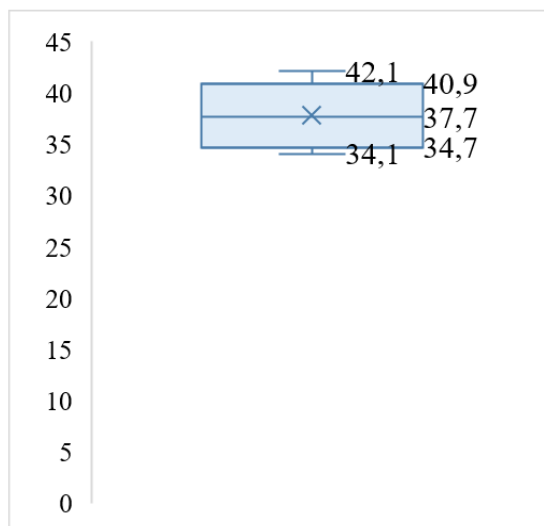


Figura 24: Boxplot para o grupo C28T5



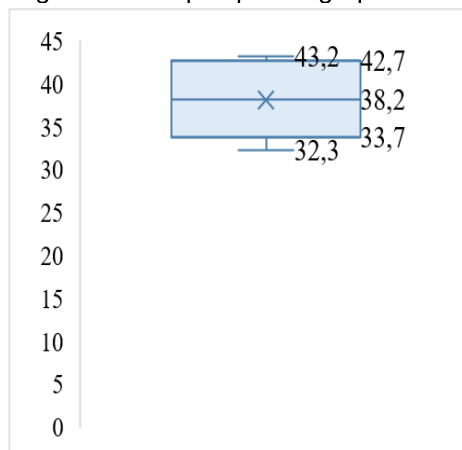
Fonte: Autor (2020).

Figura 25: Boxplot para o grupo C3T30.



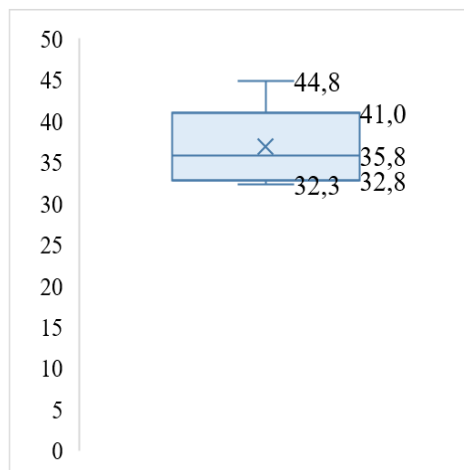
Fonte: Autor (2020).

Figura 26: Boxplot para o grupo C7T30.



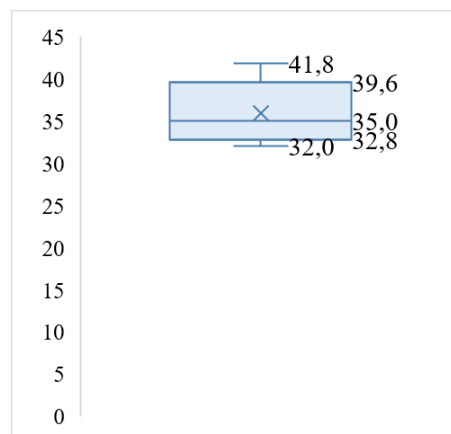
Fonte: Autor (2020).

Figura 27: Boxplot para o grupo C14T30.



Fonte: Autor (2020).

Figura 28: Boxplot para o grupo C28T30.



Fonte: Autor (2020).

Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Valores da ANOVA.

Fonte da Variação	SQ	GL	Variância	Razão F
Entre	298,0477	8	37,2559	2,3578
Dentro	711,0378	45	15,8008	
Total	1009,086	53	-	

Fonte: Autor (2020).

Admitindo-se um nível de significância de 5%, analisa-se a Tabela 17, onde o Grau de Liberdade entre os grupos está no eixo horizontal e o Grau de

Liberdade dentro dos grupos está no eixo vertical. A partir disso, obtém-se, por interpolação, um valor de 2,16.

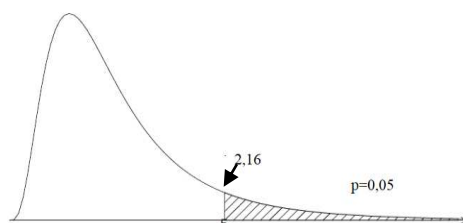
Tabela 17: Valor limite para rejeição de  $H_0$ .

	2	4	6	8	10	20	30	40	60
2	19,00	19,25	19,33	19,37	19,40	19,45	19,46	19,47	19,48
4	7,71	6,94	6,16	6,04	5,96	5,80	5,75	5,72	5,69
6	5,14	4,53	4,28	4,15	4,06	3,87	3,81	3,77	3,74
8	4,46	3,84	3,58	3,44	3,35	3,15	3,08	3,04	3,01
10	4,10	3,48	3,22	3,07	2,98	2,77	2,70	2,66	2,62
20	3,49	2,87	2,60	2,45	2,35	2,12	2,04	1,99	1,95
30	3,32	2,69	2,42	2,27	2,16	1,93	1,84	1,79	1,74
40	3,23	2,61	2,34	2,18	2,08	1,84	1,74	1,69	1,64
60	3,15	2,53	2,25	2,10	1,99	1,75	1,65	1,59	1,53

Fonte: Fonte: Montgomery e Runger (2003).

Isso significa que  $F < 2,16$  indicam  $H_0$ , ao passo que  $F \geq 2,16$  indicam  $H_1$ . A área hachurada na Figura 29 representa os valores para os quais há rejeição da hipótese nula  $H_0$ . Uma vez que o valor encontrado para  $F$ , de acordo com a Tabela 16 é 2,36, pode-se concluir, pela análise de variância, que existe pelo menos uma diferença na comparação entre os resultados.

Figura 29: Representação dos valores limites para rejeição de  $H_0$ .



Fonte: Autor (2020).

Uma vez ignorada a hipótese nula, é necessário aplicar o teste de Tukey para definir uma diferença mínima significativa (DMS) entre os valores encontrados. A partir da Tabela 18 e da Equação 15, obtém-se o valor de DMS.

$$DMS = q * \sqrt{\frac{V_d}{k}} \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

$q$ : Obtido na Tabela 18, através de  $k$  e  $GL_D$ ;

$V_d$ : Variância dentro dos grupos.

$k$ : Número de dados em cada grupo.

Tabela 18: Valor de  $q$ .

V d (gl erro)	k									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	3,64	4,60	5,22	5,67	6,03	6,33	6,58	6,80	6,99	
6	3,46	4,34	4,90	5,30	5,63	5,90	6,12	6,32	6,49	
7	3,34	4,16	4,68	5,06	5,36	5,61	5,82	6,00	6,16	
8	3,26	4,04	4,53	4,89	5,17	5,40	5,60	5,77	5,92	
9	3,20	3,95	4,41	4,76	5,02	5,24	5,43	5,59	5,74	
10	3,15	3,88	4,33	4,65	4,91	5,12	5,30	5,46	5,60	
11	3,11	3,82	4,26	4,57	4,82	5,03	5,20	5,35	5,49	
12	3,08	3,77	4,20	4,51	4,75	4,95	5,12	5,27	5,39	
13	3,06	3,73	4,15	4,45	4,69	4,88	5,05	5,19	5,32	
14	3,03	3,70	4,11	4,41	4,64	4,83	4,99	5,13	5,25	
15	3,01	3,67	4,08	4,37	4,59	4,78	4,94	5,08	5,20	
16	3,00	3,65	4,05	4,33	4,56	4,74	4,90	5,03	5,15	
17	2,98	3,63	4,02	4,30	4,52	4,70	4,86	4,99	5,11	
18	2,97	3,61	4,00	4,28	4,49	4,67	4,82	4,96	5,07	
19	2,96	3,59	3,98	4,25	4,47	4,65	4,79	4,92	5,04	
20	2,95	3,58	3,96	4,23	4,45	4,62	4,77	4,90	5,01	
24	2,92	3,53	3,90	4,17	4,37	4,54	4,68	4,81	4,92	
30	2,89	3,49	3,85	4,10	4,30	4,46	4,60	4,72	4,82	
40	2,86	3,44	3,79	4,04	4,23	4,39	4,52	4,63	4,73	
60	2,83	3,40	3,74	3,98	4,16	4,31	4,44	4,55	4,65	
120	2,80	3,36	3,68	3,92	4,10	4,24	4,36	4,47	4,56	

Fonte: Montgomery e Runger (2003).

Utilizando-se valores de  $Vd = 15,80$  e  $k = 6$ , encontra-se  $q=4,57$  e obtém-se um DMS de 7,41. Esse valor indica que a diferença entre as médias menores do que 7,41 não são consideráveis, mas valores iguais ou maiores do que 7,41 são estatisticamente consideráveis. A tabela 19 mostra que entre dois grupos houve uma diferença considerável. Essa diferença foi significativa entre os grupos C28T5 e C3T5 e também entre os grupos C28T5 e C28T23.

Tabela 19: Diferença entre as médias. Os valores destacados são maiores ou iguais à DMS.

	C3T5	C7T5	C14T5	C28T5	C3T30	C7T30	C14T30	C28T30	C28T23
C3T5		2,34	4,12	7,8	1,58	1,3	2,51	3,44	0,45
C7T5			1,78	5,46	0,76	1,04	0,17	1,1	2,79
C14T5				3,68	2,54	2,82	1,61	0,68	4,57
C28T5					6,22	6,5	5,29	4,36	8,25
C3T30						0,28	0,93	1,86	2,03
C7T30							1,21	2,14	1,75
C14T30								0,93	2,96
C28T30									3,89

Fonte: Autor (2020).

O grupo C28T23 foi o grupo usado como referência, ou seja, em condições de umidade e temperatura adequados para a cura. Com efeito, foi o grupo que apresentou maior valor de resistência. Por outro lado, o grupo C28T5 foi o grupo que esteve por mais tempo a uma das condições extremas de cura. Devido a isso, as reações de hidratação foram retardadas, o que explica a diferença estatisticamente comprovada entre os dois grupos.

Já entre os grupos C28T5 e C3T5, curados à mesma temperatura, o fator decisivo para as diferenças de resistência foi o tempo durante o qual o material permaneceu submerso com baixa temperatura. O grupo C3T5 foi curado a 5°C por um período curto de tempo, ao passo que o grupo C28T5 permaneceu nos 5°C até a data de sua ruptura no ensaio de compressão, o que pode ter ocasionado retardo nos processos de hidratação do cimento, reduzindo assim seus valores de resistência. Esse comportamento está de acordo com a equação da reta observada na equação 13, na qual, quanto maior o tempo submerso a uma temperatura baixa, menor é o valor de resistência.

É importante ressaltar que, embora sejam os limites da norma, 5°C e 30°C não são temperaturas das mais extremas, sendo que, em diversas partes do Brasil, em dias muito quentes ou muito frios, ocorrem temperaturas maiores ou menores do que estas e ainda há grande variação da umidade relativa do ambiente, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2, podendo levar a perdas de água de amassamento e afetar a resistência do concreto. Os resultados obtidos nesse estudo apontam que em situações reais, no momento da concretagem, se o material estiver sujeito a condições de temperaturas extremas, pode haver maior perda de resistência em relação ao esperado.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou os efeitos de diferentes condições de temperaturas de cura na resistência à compressão do concreto. As principais considerações e conclusões do trabalho foram:

- A temperatura à qual o concreto está sujeito é estritamente importante na determinação do valor de sua resistência à compressão. Neste ponto, os corpos de prova curados à temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  (cura convencional) foram os que apresentaram melhor resultados de resistência à compressão. Tal fato ocorre porque a liberação de água no interior dos poros ocorre de forma moderada, isto é, não há perda excessiva de água, a qual é fator crucial para o desenvolvimento das reações de hidratação. Além disso, a essa temperatura, também não ocorre congelamento de água nos poros, o que causaria dilatação e aumento da quantidade de vazios e, conseqüentemente, redução de resistência.
- Quando curados a  $5^{\circ}\text{C}$ , os corpos de prova apresentaram valores de resistência linearmente decrescentes, seguindo inclusive uma equação linear. Conforme a idade de exposição aumenta de 3 para 28 dias, o valor de resistência diminui em cerca de 20%, o que confirma que, quando curados a baixas temperaturas, os corpos de prova perdem resistência, devido ao retardamento das reações de hidratação, que necessitam de calor para ocorrer.
- Curados a  $30^{\circ}\text{C}$ , os corpos de prova também apresentam uma tendência a diminuir o valor da resistência à compressão, embora menos acentuada do que quando curados a  $5^{\circ}\text{C}$  – cerca de 5%. É possível que isso se deva ao fato de que  $30^{\circ}\text{C}$  é uma temperatura mais próxima da temperatura ideal de  $23^{\circ}\text{C}$ , onde os corpos de prova apresentaram o melhor desempenho.
- A maior diferença entre valores de resistência, conforme confirmado pelos testes estatísticos, se deu com o grupo C28T5 comparado aos grupos C28T23 e C3T5, corroborando a ideia de que as temperaturas mais baixas, a longo prazo são mais danosas à resistência do concreto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **34ª Reunião De Técnicos Da Indústria Do Cimento: Parâmetros da Dosagem Racional do Concreto**, São Paulo, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CECCONELLO, V.; TUTIKIAN, B.. A influência das baixas temperaturas na evolução das resistências do concreto. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.** [online]. 2012, vol.5, n.1, pp.68-83. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1983-41952012000100006>> Acesso em: abril, 2020.

HOLCIM. Sete tipos de concreto para sua obra. Disponível em: <<https://www.cimentoholcim.com.br/blog/7-tipos-de-cura-do-concreto-para-a-sua-obra/>> Acesso em out. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Boletins Climatológicos. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=anomaliaTempMediaAnual> Acesso em: outubro, 2019.

KOSMATKA S. H.; KERKHOFF B.; PANARESE W. C. **Design and Control of Concrete Mixtures**. 14ªed. Skokie: Portland Cement Association, 2008.

MEHTA, P. Kumar.; MONTEIRO, J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 3ª ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2008.

MENZEL, C. A. Causes and Prevention of Crack Development in Plastic Concrete, **Proceedings of the Portland Cement Association**, p. 130-136. 1954.

MONTGOMERY, Douglas C., RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e probabilidade para engenheiros**. LTC: Rio de Janeiro, 2003.

MUNCHEN, Rafael Müller et al. Impacto nas propriedades mecânicas do concreto curado sob baixas temperaturas. **Matéria (Rio J.)** [online]. 2019, vol.24, n.2, e12346. Epub June 10, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0661>> Acesso em: abril, 2020.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2º ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2010.

NASSIF, A. Y.; PETROU, M. F.; Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 44, p. 161–167, abr. 2013.

OLIVEIRA, Bruno. Boxplot: Como interpretar?. **Operdata**. 2019. Disponível em: <<https://operdata.com.br/blog/como-interpretar-um-boxplot/>> Acesso em abr. 2020.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo: IBRACON, n. 53. p. 14-22. Jan./Mar., 2009. Trimestral. ISSN 1809-7197.

SAENGSOY W.; NAWA T.; TERMKHAJORNKIT P. Influence of relative humidity on compressive strength of fly ash cement paste, **Journal of Structural and Construction Engineering**. v. 73, n. 631, p. 1433–1441, set. 2008.

SANTOS, Sérgio Botassi dos. Fissuração do Concreto devido às Tensões de Origem Térmica: Como evitá-la?. Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=17&Cod=1484/>> Acesso em nov. 2019.

THOMAZ E. Execução, Controle e Desempenho das Estruturas de Concreto. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v.1, 2005, p. 528-581.

ZOU C.; LONG G.; MA C.; XIE Y. Effect of subsequent curing on surface permeability and compressive strength of steam-cured concrete. **Construction and Building Materials**. v. 188, p. 424–432, ago. 2018.