



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA  
MECÂNICA DE PEÇAS DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND  
CONFORME A DISPOSIÇÃO EM CÂMARA DE CURA TÉRMICA**

Maria Vitória Rempel

Lajeado, novembro de 2019.



Maria Vitória Rempel

**AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA  
MECÂNICA DE PEÇAS DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND  
CONFORME A DISPOSIÇÃO EM CÂMARA DE CURA TÉRMICA**

Artigo apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Rafael Mascolo

Lajeado, 25 de novembro de 2019

# **Avaliação do Desenvolvimento da Resistência Mecânica de Peças de Concreto de Cimento Portland conforme a Disposição em Câmara de Cura Térmica**

## **Evaluation of Mechanical Strength Development of Portland Cement Concrete Parts according to the Arrangement into the Thermal Curing Chamber**

### **RESUMO**

A cura a vapor do concreto é amplamente utilizada em empresas de pré-fabricados, por proporcionar um sistema industrializado de produção, acarretando uma grande redução do desperdício de materiais. Porém, peças de concreto de grandes dimensões apresentam uma maior dificuldade de homogeneidade na cura, devido à influência da disposição dos dutos de saída de vapor na câmara de cura, o que pode gerar uma diferença de resistências na peça. Com base neste problema, este estudo teve como objetivo analisar a influência de diferentes pontos de cura e da disposição de dutos de saída de vapor no desenvolvimento da resistência mecânica de peças de concreto em uma empresa localizada no interior da cidade de Arroio do Meio/RS. Foram moldados 6 lotes com 24 amostras cada, totalizando 144 corpos de prova, cuja distribuição no interior da câmara de cura se deu através de duas prateleiras. Metade das amostras foi curada com uma saída extra de vapor com o intuito de melhorar a distribuição do mesmo. Ao fim do programa experimental, observou-se que as amostras localizadas na parte mais baixa das prateleiras demonstraram resistências iniciais menores. Ainda, através de uma análise de variância, constatou-se diferença significativa entre as resistências das amostras curadas com e sem a saída extra de vapor.

**Palavras-chave:** Cura a vapor. Cura do Concreto. Pré-fabricados.

### **ABSTRACT**

Steam curing of concrete is widely used in prefab companies as it provides an industrialized production system, resulting in a large reduction in material waste. However, large concrete pieces present a greater difficulty of homogeneity in curing, due to the influence of the arrangement of steam outlet ducts in the curing chamber, which can generate a difference in strengths in the part. Based on this problem, this study aimed to analyze the influence of different curing points and the disposition of steam outlets on the development of mechanical strength of concrete parts in a company located in the interior of Arroio do Meio / RS. Six batches with 24 samples each were molded, totaling 144 specimens, whose distribution inside the curing chamber was through two shelves. Half of the samples were cured with an extra steam outlet in order to improve its distribution. At the end of the experimental program, it was observed that the samples located in the lower part of the shelves showed lower initial resistances. Also, through an analysis of variance, a significant difference was found between the resistances of the samples cured with and without the extra steam output.

**Keywords:** Steam Cure. Concrete Cure. Prefabricated.

### **1 INTRODUÇÃO**

A utilização de materiais cimentícios se dá desde a antiguidade até os dias atuais. O primeiro concreto da história consistiu na mistura de areia, pedra fragmentada, calcário e água, sendo realizado pelos gregos e romanos (NEVILLE, 2016). A descoberta dessas substâncias cimentícias na antiguidade e os constantes estudos proporcionaram um grande progresso na

área, permitindo o desenvolvimento de diversos tipos de aglomerantes e a adequada utilização de cada um. O cimento é elemento essencial na fabricação do concreto que, por sua vez, é um dos materiais estruturais mais utilizados na construção civil atual, juntamente com o aço. (NEVILLE; BROOKS, 2013).

No ramo da construção civil, objetivando uma utilização vantajosa dos materiais citados acima e um bom custo-benefício, busca-se um serviço otimizado e que evite o desperdício. Tal segmento segue uma frequente evolução e, aliado à tecnologia, torna-se cada vez mais eficaz, trazendo à tona um método construtivo já existente no mercado: a utilização dos pré-fabricados. O sistema de pré-fabricados funciona de forma industrializada, o que representa um processo repetitivo, organizado e uma produção em alta escala, além de proporcionar uma redução do desperdício de materiais. Para que o sistema funcione de maneira satisfatória, as empresas do ramo utilizam o cimento CP V ARI – Alta Resistência Inicial -, o que possibilita uma rápida desforma (LAGUNA; IKEMATSU, 2009). Com o objetivo de acelerar ainda mais a produção, as peças são submetidas à cura térmica, proporcionando um aumento rápido da resistência e, conseqüentemente, uma desforma em menor tempo.

A cura térmica, mais especificamente a vapor, consiste na elevação da temperatura de cura do concreto, objetivando um ganho rápido de resistência (NEVILLE; BROOKS, 2013). Entretanto, em grandes volumes de peças empilhadas e submetidas à cura a vapor, a distribuição do vapor não se dá de forma homogênea, o que pode causar uma diferença das resistências entre as peças dependendo da posição de cada uma. Tendo em vista a possível variabilidade na cura, este trabalho visa a análise do sistema de cura empregado em uma empresa de pré-fabricados, localizada no interior da cidade de Arroio do Meio/RS, avaliando a influência dos pontos de saída de vapor em diferentes posições no interior da câmara.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Pré-fabricados de concreto**

Como definição, os elementos pré-fabricados são aqueles executados em instalações permanentes, localizadas distantes da obra. A capacidade de produção da fábrica e a produtividade do sistema dependem do investimento em formas e equipamentos, devendo levar em consideração ainda a questão do transporte da fábrica até o local de obra. (EL DEBS, 2017). São diversas as vantagens observadas no sistema de pré-fabricados, pois os produtos são feitos na fábrica, o que possibilita uma produção mais eficiente e racional, trabalhadores especializados, repetição de atividades, controle de qualidade, entre outros. A competitividade existente no setor obriga o ramo da construção a se atualizar constantemente, desta forma, a automação vem sendo implantada. Além disso, há uma utilização otimizada dos materiais, o que acarreta num maior potencial econômico, desempenho estrutural e durabilidade quando comparado às construções moldadas no local (ACKER, 2002).

O autor ainda aponta que a pré-fabricação utiliza equipamentos controlados por computador no preparo do concreto. Aditivos e adições podem ser empregados com a finalidade de obter os desempenhos mecânicos específicos e o lançamento e adensamento do concreto são realizados em ambientes fechados e com maquinário otimizado. Outro fator importante e que possui influência direta na economia do processo é a modulação, sendo comumente bem estabelecida para elementos estruturais em construções pré-moldadas.

De acordo com a NBR 9062 (ABNT, 2017), a mão de obra deve ser treinada e especializada e os produtos devem seguir um rigoroso controle de qualidade, a fim de atender os requisitos propostos pelas normas. Ainda, os elementos são produzidos através de máquinas e equipamentos industriais, racionalizando o processo. Posteriormente ao procedimento de moldagem, os elementos são submetidos a uma técnica de cura com temperatura controlada.

## 2.2 Cura do concreto

A cura pode ser entendida como a aplicação de qualquer procedimento que impeça a saída prematura de água do concreto, para garantir a continuidade das reações de hidratação do cimento (RECENA, 2014). Paralelamente às reações de hidratação, ocorre o ganho de resistência do concreto, cujo aumento se dá de forma constante.

Mehta e Monteiro (2008) complementam ao afirmar que o termo cura do concreto envolve uma combinação de condições que promovem a hidratação do cimento, como tempo, temperatura e umidade. Ainda, os autores citam que os dois objetivos da cura são evitar a perda de umidade e manter a temperatura sob controle durante um intervalo de tempo suficiente para alcançar o nível de resistência esperado.

O objetivo da cura à temperatura normal é manter o concreto saturado ou o mais próximo disso possível, até que os espaços na pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, sejam ocupados até um nível desejado pelos produtos de hidratação do cimento. A necessidade de cura se dá pelo fato de que a hidratação do cimento pode suceder somente em capilares preenchidos com água, sendo esse o motivo da prevenção da perda de água pelos poros. Ainda, a água perdida internamente através da autodessecação deve ser suprida com água do exterior, de forma que ocorra o ingresso de água no concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

### 2.2.1 Cura a vapor

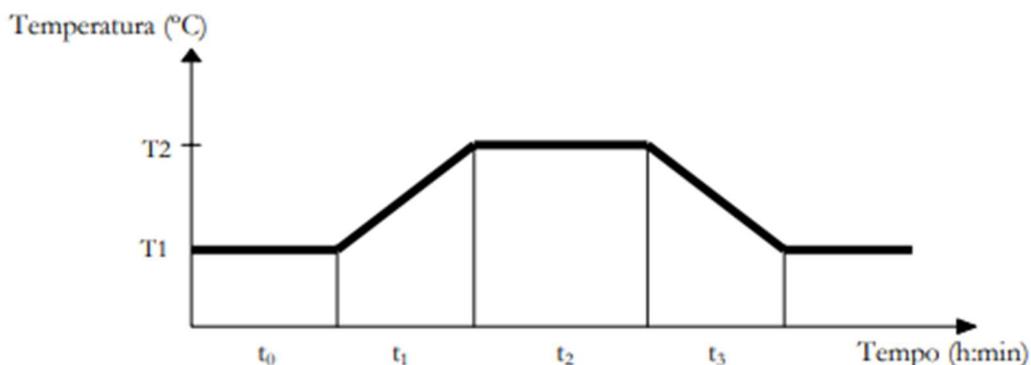
Em virtude da elevação da temperatura de cura agilizar o processo de ganho de resistência do concreto, é possível, através da cura a vapor, acelerar ainda mais o procedimento. Quando o vapor está sob pressão atmosférica, o que significa que o mesmo possui uma temperatura inferior a 100°C, a técnica pode ser considerada um caso especial de cura úmida. Isto ocorre porque, como a atmosfera está saturada com vapor, o fornecimento de água é garantido (NEVILLE, 2016).

Como a temperatura tem influência nos estágios iniciais do endurecimento sobre a resistência final, um equilíbrio deve ser realizado entre as temperaturas que resultam nas altas resistências inicial e final.

De acordo com a NBR 9062 (ABNT, 2017), a temperatura máxima para o processo de cura a vapor é de 70°C, evitando, assim, modificações na microestrutura do concreto. Ainda, faz-se necessário seguir um ciclo de cura, visando evitar danos nas peças (BARDELLA; BARBOSA; CAMARINI, 2005). O ciclo de cura pode ser observado na Figura 1 e é composto pelos seguintes períodos:

- $T_1$ : temperatura ambiente (°C);
- $T_2$ : temperatura máxima atingida no ciclo (°C);
- $t_0$ : período de espera (h:min). Intervalo de tempo que decorre entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento, devendo coincidir com o tempo de pega do concreto;
- $t_1$ : período de elevação da temperatura (h:min). Nesta etapa ocorre o aumento controlado da temperatura de cura, o qual, de acordo com a NBR 9062 (ABNT, 2017), não pode ultrapassar os 20°C/hora;
- $t_2$ : período de manutenção da temperatura (h:min). Ocorre um regime isotérmico até que a resistência desejada seja alcançada;
- $t_3$ : período de esfriamento (h:min). É realizada a diminuição controlada da temperatura das peças até que se atinja a temperatura ambiente, sendo a temperatura máxima de esfriamento igual a 30°C por hora.

Figura 1 – Ciclo de cura térmica a vapor



Fonte: Bardella, Barbosa e Camarini (2005).

### 2.3 Caldeira a vapor

Também conhecida como gerador de vapor, a caldeira é uma máquina destinada a gerar vapor através de uma troca térmica entre um combustível e água. Tal equipamento é constituído por chapas e tubos cujo objetivo é realizar o aquecimento da água, para que esta passe do estado líquido para o gasoso. Isto ocorre devido ao calor liberado pelo combustível, que aquece as partes metálicas e transfere este calor à água, produzindo então o vapor (LEITE; MILITÃO, 2008).

Os autores complementam que a energia necessária ao processo, ou seja, o fornecimento de calor sensível à água até que a mesma atinja a temperatura de ebulição, somado com o calor latente para vaporizar a água e o calor de superaquecimento para torna-la vapor superaquecido, se dá pela queima de um combustível.

De acordo com Nogueira (2005), a utilização de caldeiras a vapor é de grande vantagem, tendo em vista que o sistema é pouco agressivo quimicamente e possui grande capacidade de transportar energia. Na geração e utilização de vapor ocorrem alterações de fase que acarretam significativas variações de volume, o que resulta em um elevado coeficiente de transferência térmica que, quando somado ao calor latente, gera altas taxas de transferência de calor por unidade de área.

## 3 MÉTODO

Atualmente, a empresa conta com um sistema de tubulação de aço que realiza o transporte do vapor da caldeira até a câmara de cura, a qual possui uma área de aproximadamente 190 m<sup>2</sup>, sendo o vapor fornecido somente nas extremidades da câmara junto ao solo. São produzidas duas estufas na área da câmara, cujo volume depende da quantidade de formas moldadas no dia. Para a realização do programa experimental, foi proposta a moldagem de 144 corpos de prova cilíndricos em formas metálicas, visando proximidade com o processo realizado pela empresa. Metade das amostras foi curada com o sistema atual de distribuição de vapor e metade com uma saída extra inserida no meio da estufa. A moldagem das amostras esteve em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2015) e foi dividida em 6 lotes, sendo A e B os dois primeiros, curados com o sistema atual de tubulação. Os lotes D e E foram os seguintes, curados com a saída extra de vapor no meio da estufa; já os lotes C e F foram realizados mais tarde, como forma de obtenção de uma contraprova. O lote F foi curado com a saída extra e o lote C após a retirada da mesma.

Foram posicionadas duas prateleiras no interior da primeira estufa, uma na extremidade e próxima à saída de vapor e a outra no meio onde não há saída de vapor, conforme Figura 2.

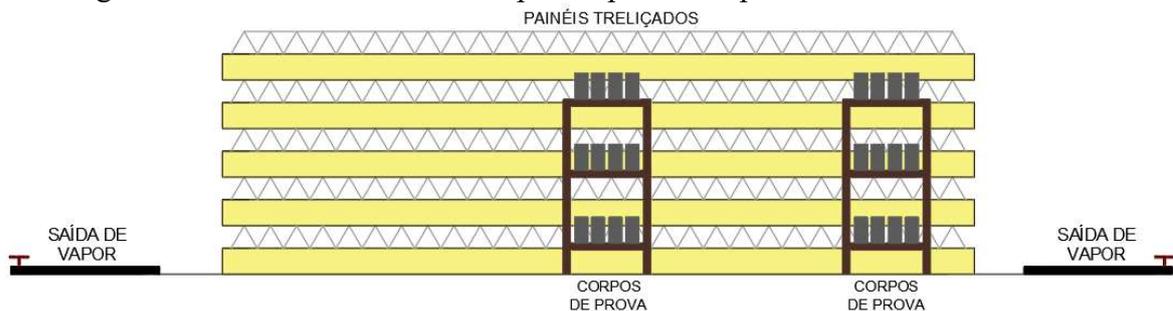
Figura 2 – Posicionamento das prateleiras na estufa



Fonte: Autora (2019).

O processo foi dividido em três etapas, de forma que na primeira foram moldados 48 corpos de prova, divididos em duas fases (lotes A e B), objetivando a realização de uma análise estatística. Tanto na primeira quanto na segunda fase, os 24 corpos de prova moldados foram dispostos nas prateleiras posicionadas no interior da estufa. As prateleiras comportaram cada uma 12 corpos de prova, dispostos em 3 alturas diferentes, resultando em 4 corpos de prova para cada altura, de acordo com a Figura 3.

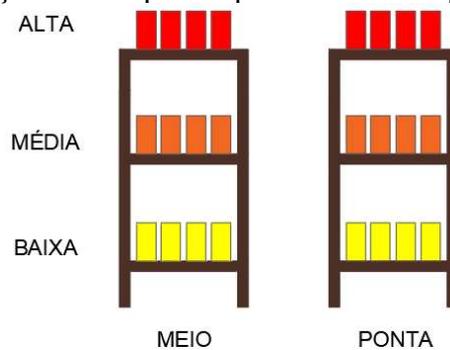
Figura 3 – Posicionamento dos corpos de prova nas prateleiras no interior da estufa



Fonte: Autora (2019).

As amostras foram identificadas conforme a posição e a altura das prateleiras, sendo nomeados como ponta alta, ponta média e ponta baixa – prateleira da extremidade –, meio alta, meio média e meio baixa – prateleira do meio da estufa, conforme Figura 4.

Figura 4 – Identificação dos corpos de prova conforme posição nas prateleiras



Fonte: Autora (2019).

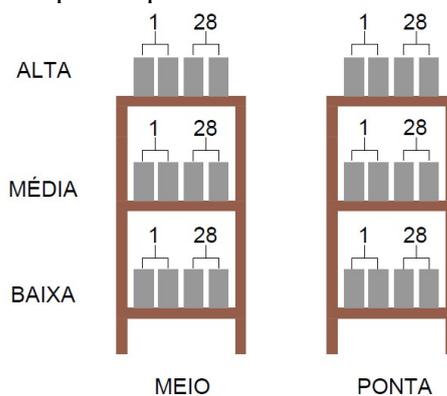
A parte mais baixa das prateleiras está situada a aproximadamente 15 cm do chão, já a parte mediana se encontra a aproximadamente 70 cm acima, enquanto a porção mais alta situa-se a 1,45 m do solo.

A segunda etapa do experimento foi realizada através da introdução de um duto de saída de vapor no meio da estufa e consistiu na moldagem de 48 corpos de prova, também em duas fases (lotes D e E), sendo os mesmos dispostos da mesma maneira.

Já a terceira etapa do processo foi realizada visando a obtenção de uma contraprova para ambas situações, sendo 24 amostras curadas com a saída extra de vapor (lote F) e outras 24 após a retirada da tubulação extra (lote C).

Em cada uma das moldagens realizadas os corpos de prova foram divididos em duas partes, sendo 12 rompidos com idade de 1 dia e os 12 restantes com idade igual a 28 dias. As 12 amostras de cada etapa de rompimento foram constituídas por 2 corpos de prova irmãos de cada altura e prateleira, conforme Figura 5.

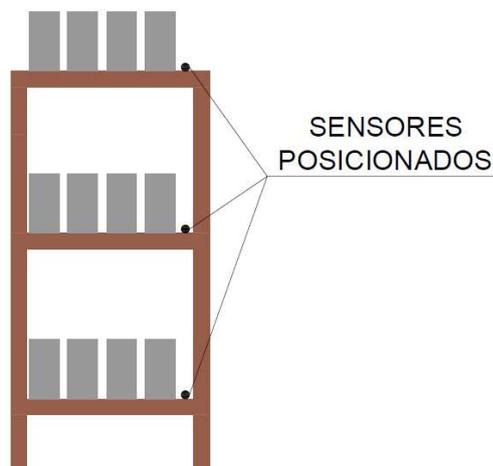
Figura 5 – Identificação dos corpos de prova irmãos conforme idade de rompimento



Fonte: Autora (2019).

A temperatura no interior da estufa foi coletada através de sensores posicionados em cada uma das alturas das prateleiras e conectados a um Datalogger, que posteriormente foi conectado a um computador, onde um sistema especial possibilitou a coleta dos dados. Ainda, um sensor foi posicionado do lado de fora da estufa, visando a coleta da temperatura ambiente, totalizando assim, 7 sensores. É possível observar a distribuição dos sensores nas prateleiras através da Figura 6.

Figura 6 – Posicionamento dos sensores nas prateleiras



Fonte: Autora (2019).

### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados para a confecção das amostras estão descritos a seguir.

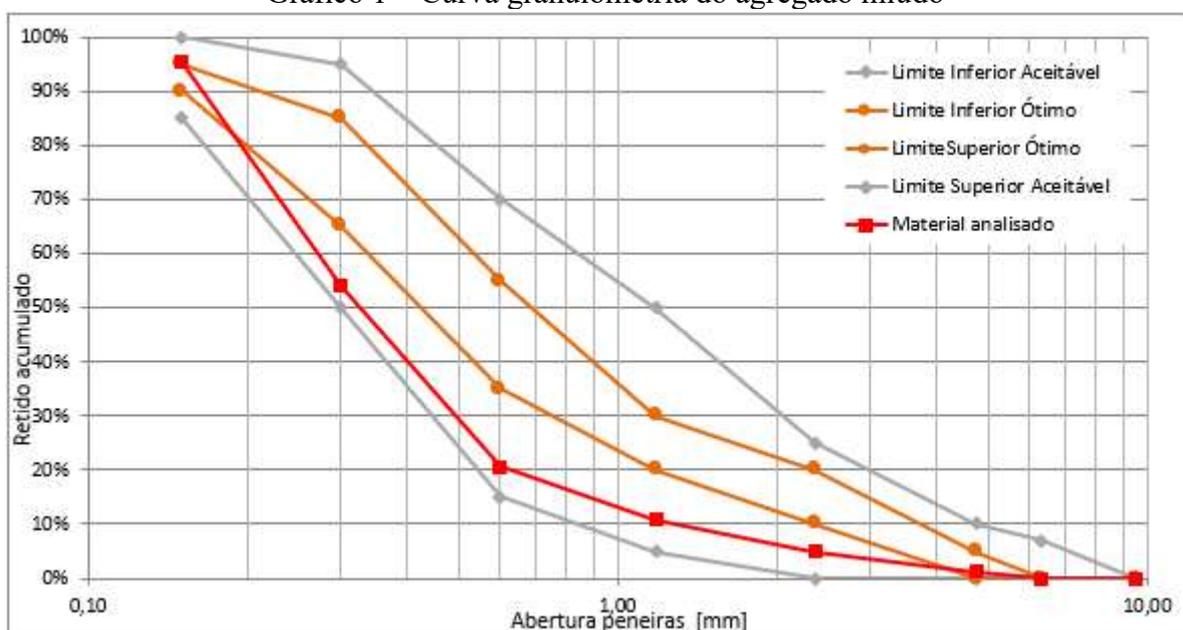
#### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CP V – ARI, de Alta Resistência Inicial, da marca Cimpor. Foi realizado ensaio de massa específica do material conforme NBR 16605 (ABNT, 2017), cujo resultado foi de 3,11 g/cm<sup>3</sup>.

#### 3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia fina, cuja dimensão nominal é de 0,06 a 0,2mm. Foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária, visando a caracterização do material. Seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), obteve-se a curva granulométrica do agregado, estando essa apresentada no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autora (2019).

Avaliando o gráfico, nota-se que o material analisado se enquadra quase totalmente entre os limites inferior aceitável e ótimo.

O ensaio de massa específica da areia foi realizado em conformidade com a NBR NM 52 (ABNT, 2009) e resultou em um valor de 2,37 g/cm<sup>3</sup>. Ainda, o ensaio para determinação da massa unitária foi realizado de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), onde obteve-se um valor de aproximadamente 1,47 g/cm<sup>3</sup>.

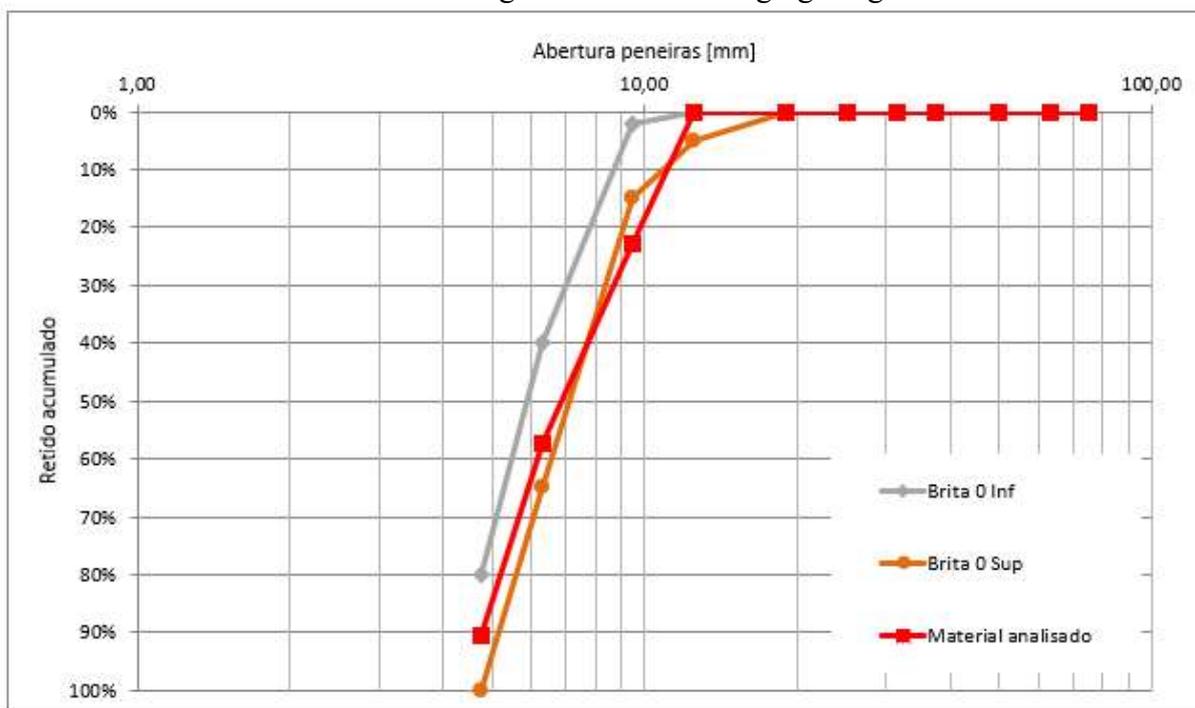
Além dos ensaios apresentados acima, foi calculado o módulo de finura, cujo valor ficou estipulado em 1,86, e a dimensão máxima característica, que resultou em 2,36mm.

#### 3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita 0 ou pedrisco, cuja dimensão nominal está fixada entre 4,8 e 9,5mm. Para a caracterização do material, foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária, estando todos estes em conformidade com as normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 53 (ABNT, 2009) E NBR NM 45 (ABNT, 2006), respectivamente.

No Gráfico 2 é possível observar a curva granulométrica do material.

Gráfico 2 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autora (2019).

Através do gráfico 2, constata-se que o material analisado se encontra parcialmente entre os limites inferior e superior. O ensaio foi realizado mais de uma vez, porém, o resultado foi o mesmo.

Para os ensaios de massa específica e massa unitária, foram encontrados os valores de 2,76 g/cm<sup>3</sup> e aproximadamente 1,5 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

### 3.2 Traço do concreto

O traço definido e utilizado pela empresa para a confecção de 1 metro cúbico de concreto é de 300 kg de cimento, 796 kg de areia fina úmida, 1302 kg de brita zero, 153 litros de água e 2 litros de superplastificante. Desta forma, o teor de argamassa é de 48% e o a/c estipulado em 0,51.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentadas a análise e discussão dos resultados obtidos através do programa experimental. Primeiramente apresentam-se os resultados de resistência à compressão de cada lote de corpos de prova rompidos, seguidos dos gráficos de temperatura do interior da estufa e das variações entre pontos a partir de uma análise estatística dos dados.

### 4.1 Resistência à compressão sem saída de vapor extra

Os resultados obtidos através do ensaio de resistência à compressão das amostras curadas sem a saída de vapor extra são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. Foram rompidos dois corpos de prova irmãos para cada idade e posição na prateleira.

Tabela 1 – Resistência à compressão do lote A

<b>Posição</b>	<b>R1 (MPa) 1 dia</b>	<b>R2 (MPa) 1 dia</b>	<b>R1 (MPa) 28 dias</b>	<b>R2 (MPa) 28 dias</b>	<b>Volume estufa (m<sup>3</sup>)</b>
Ponta alta	20,48	21,26	32,72	35,38	206,4
Ponta média	19,96	20,74	34,91	36,00	
Ponta baixa	19,52	18,41	37,48	35,12	
Meio alta	20,88	20,34	32,64	35,51	
Meio média	18,6	20,46	31,31	31,07	
Meio baixa	17,61	19,30	34,42	34,90	

Fonte: Autora (2019).

Tabela 2 – Resistência à compressão do lote B

<b>Posição</b>	<b>R1 (MPa) 1 dia</b>	<b>R2 (MPa) 1 dia</b>	<b>R1 (MPa) 28 dias</b>	<b>R2 (MPa) 28 dias</b>	<b>Volume estufa (m<sup>3</sup>)</b>
Ponta alta	19,99	20,86	30,62	31,24	245,76
Ponta média	20,52	20,03	31,83	30,70	
Ponta baixa	18,53	18,51	30,89	30,36	
Meio alta	19,57	20,06	33,70	30,81	
Meio média	18,93	18,80	32,13	30,80	
Meio baixa	17,78	17,23	30,57	28,70	

Fonte: Autora (2019).

Tabela 3 – Resistência à compressão do lote C

<b>Posição</b>	<b>R1 (MPa) 1 dia</b>	<b>R2 (MPa) 1 dia</b>	<b>R1 (MPa) 28 dias</b>	<b>R2 (MPa) 28 dias</b>	<b>Volume estufa (m<sup>3</sup>)</b>
Ponta alta	16,90	16,83	32,34	31,99	237,6
Ponta média	18,14	17,96	31,67	32,22	
Ponta baixa	16,78	16,27	32,12	32,61	
Meio alta	17,68	17,61	34,04	34,89	
Meio média	18,38	17,99	33,39	31,29	
Meio baixa	16,82	14,86	31,62	30,93	

Fonte: Autora (2019).

Os corpos de prova rompidos com 1 dia de idade e localizados na parte inferior da prateleira apresentaram resistências menores quando comparados com as amostras da porção mediana e alta. Porém, ao analisar as resistências obtidas no ensaio de compressão com idade de 28 dias, observou-se que o padrão não foi seguido. O lote A demonstrou resistências maiores na parte mais baixa da prateleira aos 28 dias; o lote B apresentou maior resistência na porção mediana da prateleira localizada na extremidade e na parte superior da prateleira posicionada no meio da estufa; já o lote C apresentou maiores resistências na porção mais baixa da prateleira da extremidade e na porção mais alta da prateleira do meio.

Quando analisado o ganho de resistência no decorrer dos 28 dias, percebe-se que há uma certa diferença entre as amostras, de forma que o corpo de prova que exibiu maior desenvolvimento teve sua resistência aumentada em 17,96 MPa. Já a amostra que obteve menor desenvolvimento em sua resistência demonstrou um ganho de 10,38 MPa, gerando uma diferença de 7,58 MPa.

#### 4.2 Resistência à compressão com saída de vapor extra

Os resultados de resistência encontrados para as amostras curadas com a saída de vapor extra na estufa são apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6. Assim como na primeira situação, foram rompidos dois corpos de prova irmãos para cada idade e posição na prateleira.

Tabela 4 – Resistência à compressão do lote D

Posição	R1 (MPa) 1 dia	R2 (MPa) 1 dia	R1 (MPa) 28 dias	R2 (MPa) 28 dias	Volume estufa (m <sup>3</sup> )
Ponta alta	11,85	10,78	25,12	24,84	172,8
Ponta média	11,75	11,39	24,84	21,91	
Ponta baixa	9,58	10,74	22,67	27,84	
Meio alta	11,92	10,05	27,79	23,02	
Meio média	11,71	11,44	25,99	23,21	
Meio baixa	10,63	9,68	22,80	26,44	

Fonte: Autora (2019).

Tabela 5 – Resistência à compressão do lote E

Posição	R1 (MPa) 1 dia	R2 (MPa) 1 dia	R1 (MPa) 28 dias	R2 (MPa) 28 dias	Volume estufa (m <sup>3</sup> )
Ponta alta	11,57	12,97	28,15	24,12	177,6
Ponta média	12,15	11,97	26,73	27,26	
Ponta baixa	11,64	12,39	30,64	28,70	
Meio alta	12,76	12,84	23,68	23,21	
Meio média	13,74	13,43	29,17	28,30	
Meio baixa	11,94	11,28	27,21	27,17	

Fonte: Autora (2019).

Tabela 6 – Resistência à compressão do lote F

Posição	R1 (MPa) 1 dia	R2 (MPa) 1 dia	R1 (MPa) 28 dias	R2 (MPa) 28 dias	Volume estufa (m <sup>3</sup> )
Ponta alta	23,79	25,17	42,45	41,45	186,72
Ponta média	24,47	23,68	40,77	41,31	
Ponta baixa	21,43	21,93	38,54	34,76	
Meio alta	25,28	24,18	41,51	43,47	
Meio média	25,27	25,33	42,26	39,94	
Meio baixa	19,33	19,31	39,85	40,08	

Fonte: Autora (2019).

Ao analisar os resultados encontrados, é possível observar que as resistências das amostras dos lotes D, E e F rompidas com 1 dia de idade seguiram o padrão dos lotes A, B e C, de forma que as resistências menores foram apresentadas nos corpos de prova localizados nas porções inferiores das prateleiras e as resistências maiores nas partes mediana e alta. Contudo, os resultados de resistência aos 28 dias também não seguiram o padrão, estando os maiores valores dispersos entre as alturas das prateleiras.

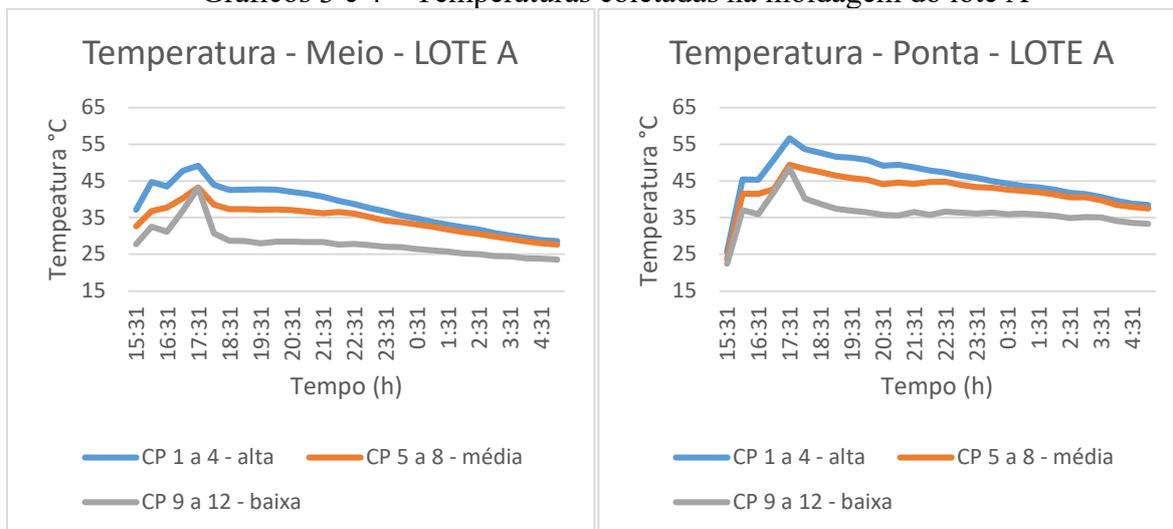
O ganho de resistência ao longo dos 28 dias demonstrou uma variação maior em relação aos lotes sem a saída extra de vapor, estando a menor variação fixada em 10,37 MPa – altura média da prateleira do meio -, e a maior 20,77 MPa – altura inferior da prateleira do meio -, gerando uma variação de 10,40 MPa.

### 4.3 Temperaturas coletadas na estufa

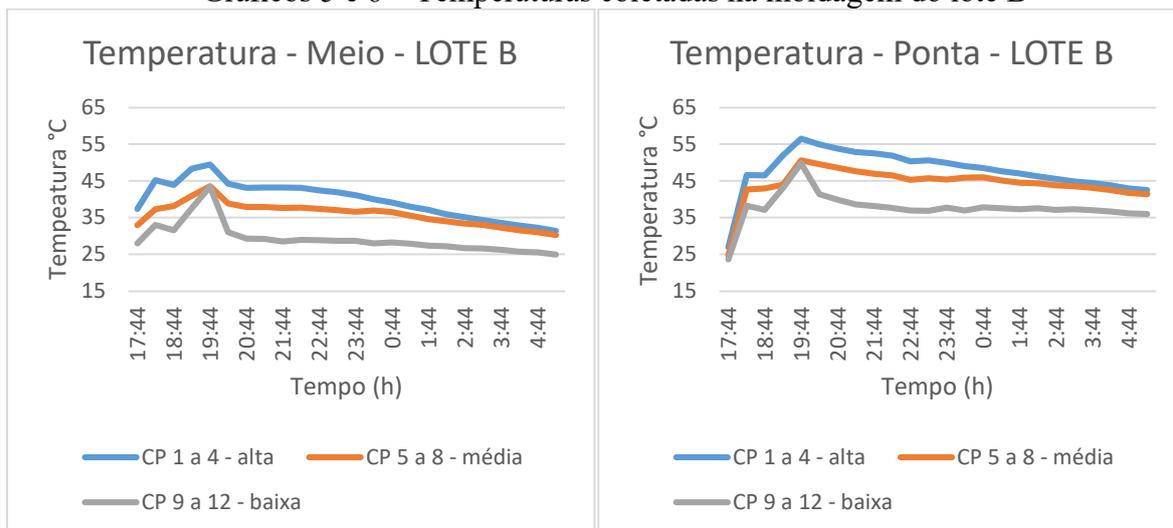
As temperaturas obtidas na estufa são apresentadas nos Gráficos 3 a 14, sendo os sensores ligados a partir do momento em que a lona foi posicionada sobre as formas e desligados instantes antes da desforma. O tempo de coleta varia de 11 a 13 horas, sendo este o tempo em que as formas permanecem no interior da estufa, abrangendo o período de aquecimento e resfriamento da câmara de cura.

Os Gráficos 3 a 8 representam os lotes curados sem a saída de vapor extra, enquanto os gráficos 9 a 14 apresentam as temperaturas dos lotes curados com a saída extra. Ainda, pode-se verificar a variação de temperatura máxima e mínima por hora da estufa em cada lote e as temperaturas ambiente registradas durante o período de cura no Quadro 1.

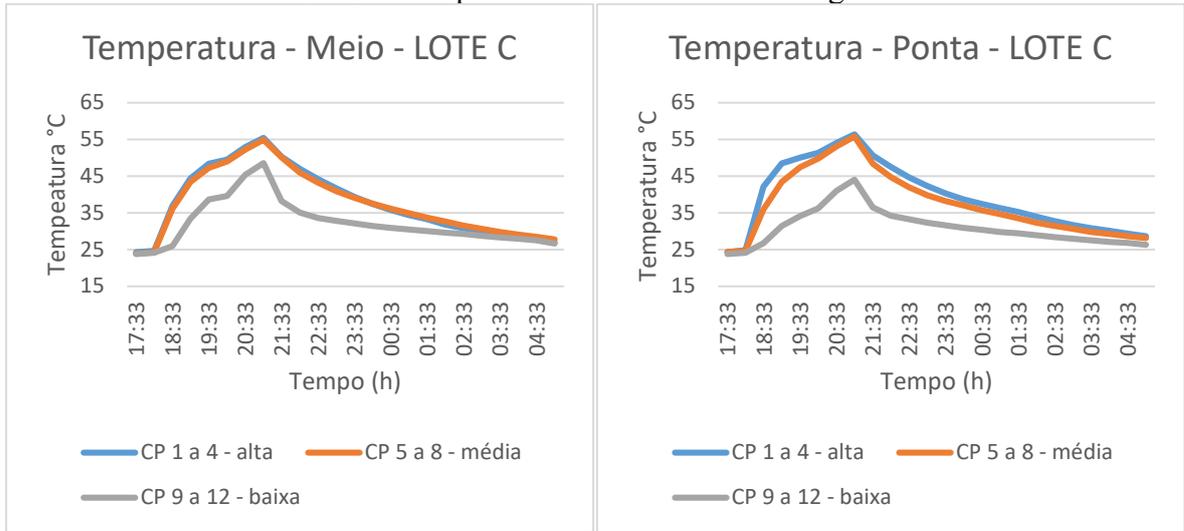
Gráficos 3 e 4 – Temperaturas coletadas na moldagem do lote A



Gráficos 5 e 6 – Temperaturas coletadas na moldagem do lote B

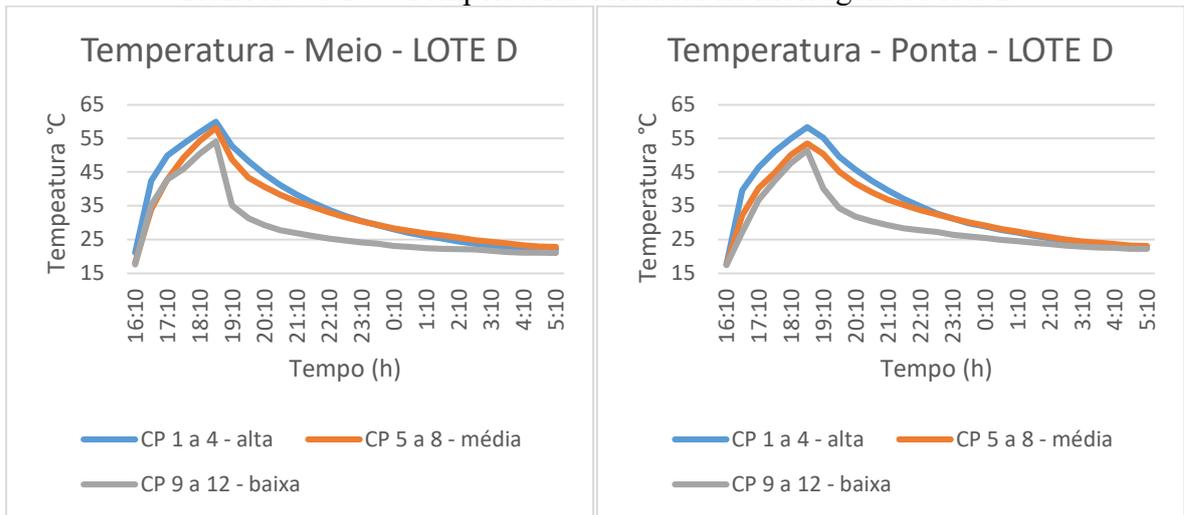


Gráficos 7 e 8 – Temperaturas coletadas na moldagem do lote C



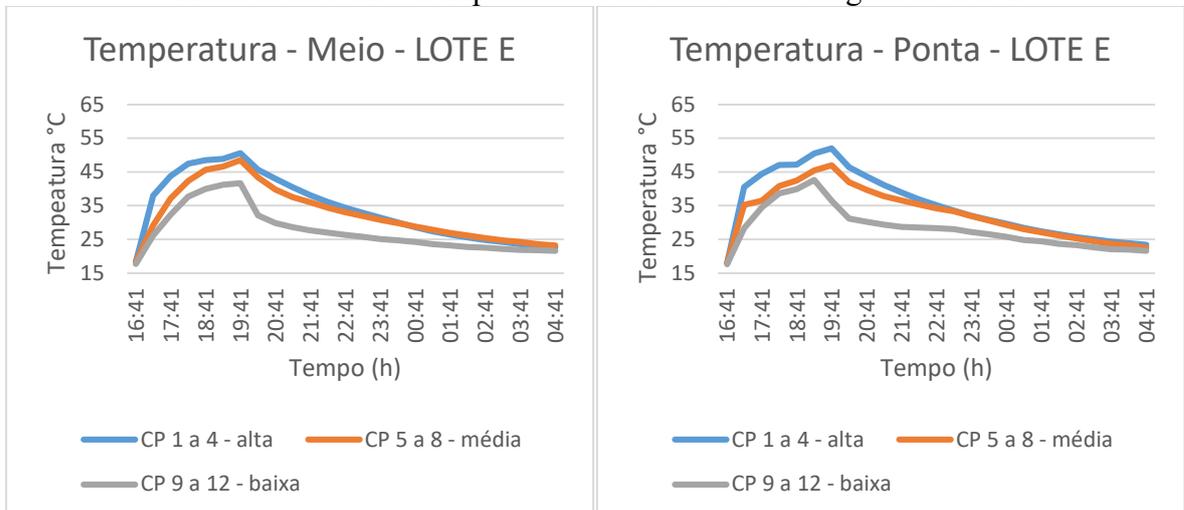
Fonte: Autora (2019).

Gráficos 9 e 10 – Temperaturas coletadas na moldagem do lote D



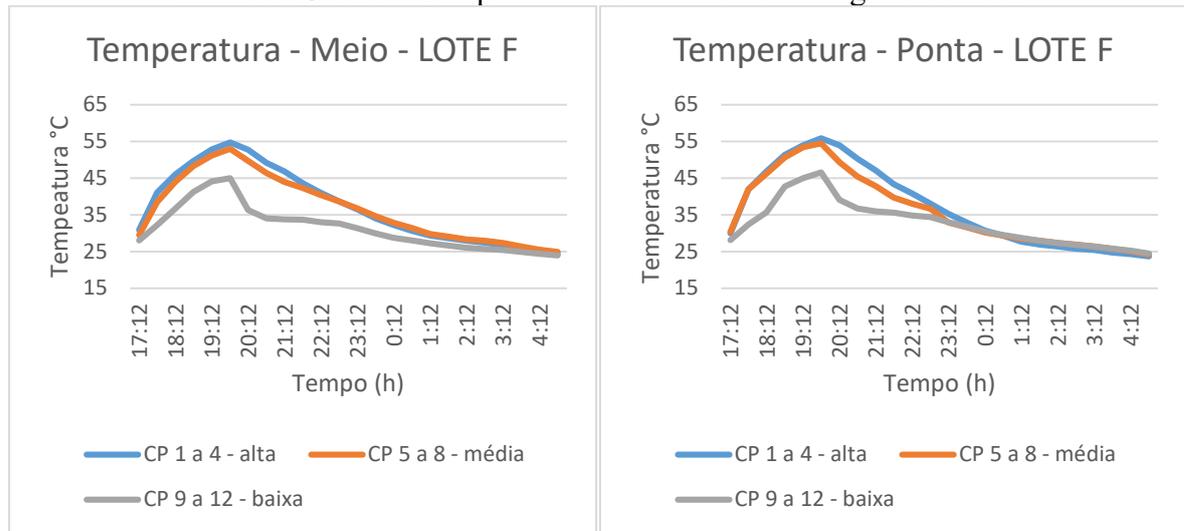
Fonte: Autora (2019).

Gráficos 11 e 12 – Temperaturas coletadas na moldagem do lote E



Fonte: Autora (2019).

Gráficos 13 e 14 – Temperaturas coletadas na moldagem do lote F



Fonte: Autora (2019).

Quadro 1 – Variação de temperatura na estufa e temperatura ambiente registrada

LOTE	A	B	C	D	E	F
Aquec. Máx. por hora	19,5°C	19,5°C	17,8°C	28,8°C	26,4°C	16,9°C
Aquec. Mín. por hora	3,4°C	3,4°C	2,1°C	6,9°C	1,7°C	6,8°C
Resf. Máx. por hora	14,5°C	14,2°C	7,1°C	15,3°C	11,9°C	7,8°C
Resf. Mín. por hora	0,1°C	0,1°C	0,7°C	0,1°C	0,3°C	0,0°C
Média temperatura ambiente	22,11°C	21,80°C	27,6°C	15,4°C	14,9°C	25,4°C
Temperatura ambiente Máx.	26,9°C	27,4°C	33,7°C	17,1°C	19,4°C	31,6°C
Temperatura ambiente Mín.	19,3°C	19,3°C	20,2°C	14,1°C	12,4°C	19,5°C

Fonte: Autora (2019).

A partir dos gráficos de temperatura apresentados, visualiza-se que a caldeira a vapor aquece a estufa por um período de duas a três horas, sendo o tempo restante responsável pelo resfriamento, já que a saída de vapor são fechadas e a lona mantém o calor no interior da câmara. As temperaturas máximas alcançadas ficam em torno de 60°C, estando de acordo com a NBR 9062 (ABNT, 2017). Nota-se também uma similaridade entre os gráficos de cada moldagem, constatando-se temperaturas maiores na prateleira da ponta nos lotes curados sem a saída de vapor e temperaturas similares entre o meio e a ponta após a inserção da saída extra. Observando as variações de temperatura encontradas para o aquecimento da estufa no Quadro 1, nota-se que a variação máxima de aquecimento obtida nos lotes D e E estão acima dos 20°C estabelecidos como incremento máximo de temperatura por hora pela NBR 9062 (ABNT, 2017). Considerando a média de temperatura ambiente registrada, percebe-se que as mesmas demonstram dias mais frios na moldagem dos lotes citados acima, gerando uma variação maior, pois quando o vapor é liberado, a temperatura na estufa está relativamente baixa. Ainda, observa-se que, para todos os lotes, a temperatura de resfriamento se manteve no padrão estabelecido, cujo valor máximo é de 30°C/hora.

#### 4.4 Análise de variância

Foram realizadas quatro análises de variância. A primeira delas abrangeu todos os dados de resistência coletados e todos os fatores – posição da prateleira na estufa, altura da amostra na prateleira, lote e idade –. A segunda análise contemplou o lote sem a saída extra, enquanto a

terceira análise englobou os lotes com a saída extra de vapor. A quarta e última análise foi responsável por levar em consideração somente o fator referente à saída de vapor. Os resultados estão representados nas Tabelas 7 a 10.

Tabela 7 – Análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão – Dados gerais

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
POSIÇÃO	1	1,5	1,49	0,36	0,552
ALTURA	2	51,8	25,91	6,21	0,003
LOTE	5	3340,4	668,07	160,19	0,000
IDADE	1	6577,3	6577,35	1577,16	0,000
Erro	134	558,8	4,17		
Falta de ajuste	62	459,7	7,41	5,39	0,000
Erro puro	72	99,1	1,38	*	*
Total	143	10529,8			

Fonte: Autora (2019).

Onde,

GL= Graus de liberdade;

SQ= Soma de quadrados;

QM= Quadrado médio;

Valor F= Valor calculado de F;

Valor-P= Probabilidade de significância.

Tabela 8 – Análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão – Lotes sem saída extra de vapor

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
POSIÇÃO	1	3,68	3,68	1,83	0,181
ALTURA	2	15,44	7,72	3,84	0,026
LOTE	2	70,10	35,05	17,44	0,000
IDADE	1	3449,07	3449,07	1716,70	0,000
Erro	65	130,59	2,01		
Falta de ajuste	29	101,04	3,48	4,24	0,000
Erro puro	36	29,55	0,82	*	*
Total	71	3668,87			

Fonte: Autora (2019).

Onde,

GL= Graus de liberdade;

SQ= Soma de quadrados;

QM= Quadrado médio;

Valor F= Valor calculado de F;

Valor-P= Probabilidade de significância.

Tabela 9 – Análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão – Lotes com saída extra de vapor

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
POSIÇÃO	1	0,21	0,21	0,06	0,815
ALTURA	2	23,19	11,60	3,08	0,053
LOTE	2	2799,46	1399,73	371,55	0,000
IDADE	1	4168,30	4168,30	1106,46	0,000
Erro	65	244,87	3,77		
Falta de ajuste	29	175,16	6,04	3,12	0,001
Erro puro	36	69,71	1,94	*	*
Total	71	7236,03			

Fonte: Autora (2019).

Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão – Fator saída extra de vapor

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
VAPOR	1	1397	1396,58	21,71	0,000
Erro	142	9133	64,32		
Total	143	10530			

Fonte: Autora (2019).

Com base na análise de variância exibida na Tabela 7 e considerando um valor de 95% de confiança, nota-se que a posição da prateleira na estufa não interfere de maneira significativa nos resultados obtidos, pois o valor-P é de aproximadamente 55%. Porém, ao observar os demais fatores, há variação significativa em todos eles, já que o valor-P é inferior a 5%. Desta forma, a altura da amostra na prateleira interfere significativamente nos resultados encontrados. Os fatores lote e idade demonstraram valor-P igual a 0%, presumindo assim que todos os valores de resistência, em relação a estes dois fatores, diferem também de maneira significativa, o que pode ser explicado pelo fato de que os lotes foram moldados em diferentes datas e que há um considerável desenvolvimento de resistência de 1 para 28 dias.

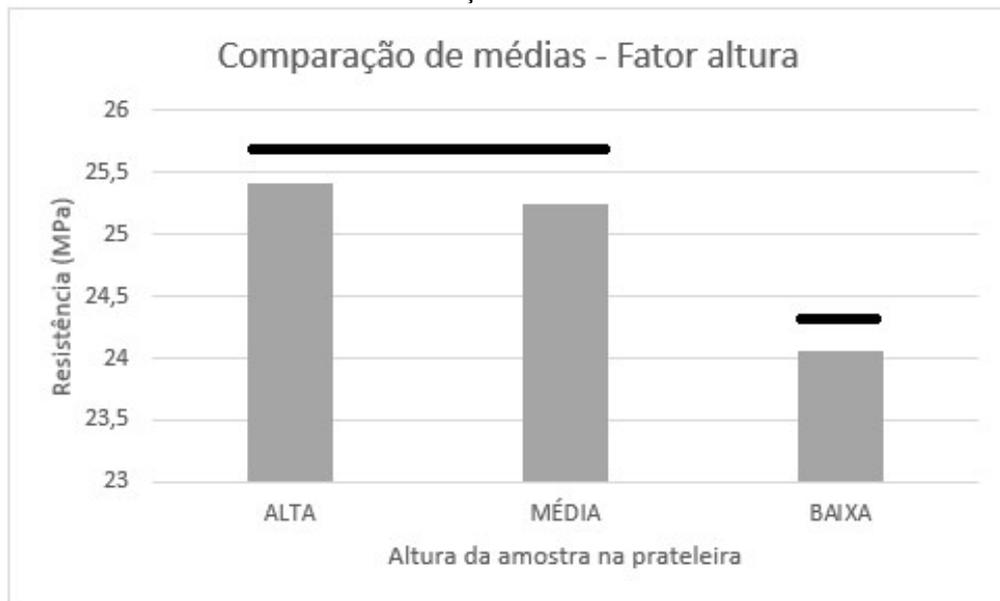
Na análise de variância demonstrada na Tabela 8, cujos dados analisados são os lotes sem a saída extra de vapor, há variação significativa nos fatores altura, lote e idade. A posição resultou em um valor-P de 18,1%, de modo que as médias não diferem de forma significativa. A altura obteve um valor-P de 2,6%, indicando que as médias diferem entre si. Os fatores lote e idade são diferentes devido às datas de moldagem e ao ganho de resistência ao longo dos 28 dias.

No fator posição da Tabela 9, nota-se um valor-P elevado, igual a 81,5%. A saída extra de vapor posicionada no meio da estufa resultou em uma diferença de médias menor ainda quando comparada à análise anterior. Já o fator altura, que antes era significativo, obteve um valor-P de 5,3%, o que significa que as médias do mesmo já não diferem de forma significativa.

Na Tabela 10, encontra-se a análise que considerou somente o fator da saída extra de vapor, cujo resultado indica que há diferença significativa de médias entre os lotes com a tubulação extra e os lotes sem, tendo em vista que o valor-P resultante foi zero.

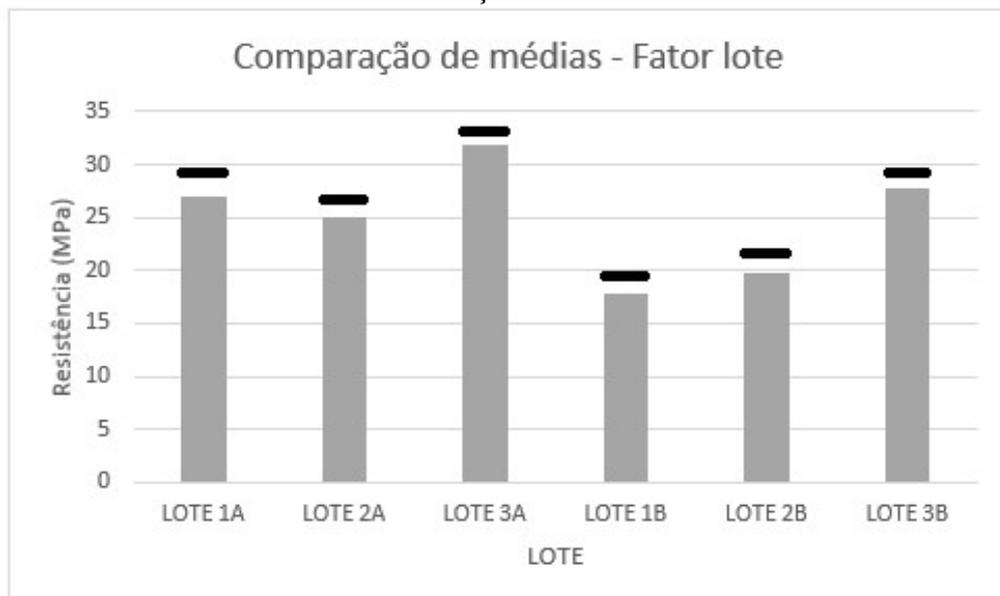
Após a verificação da existência de diferenças significativas, com o objetivo de identificar as médias que variam com significância, foram elaborados gráficos de comparações de médias a partir do Software Minitab, responsável pela análise de variância. Os Gráficos 15 e 16 correspondem às comparações realizadas entre as médias para os fatores com mais de dois níveis considerados na análise.

Gráfico 15 – Diferenças de médias – Fator altura



Fonte: Autora (2019).

Gráfico 16 – Diferenças de médias – Fator lote



Fonte: Autora (2019).

O Gráfico 15 demonstra que as médias de duas das três alturas diferem, de forma que a única média diferente das demais é da altura mais baixa da prateleira. Então, considera-se que as médias de resistência das alturas alta e mediana são iguais, enquanto a média de resistência da altura inferior é diferente das demais.

O Gráfico 16 comprova, através de uma comparação entre todos os lotes, que apenas dois deles não tem variação significativa entre as médias, sendo o restante considerado diferente, já que as linhas posicionadas acima das colunas não estão alinhadas.

## 5 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após observados e avaliados todos os resultados obtidos, constatou-se que a posição da prateleira na estufa não interfere como esperado na resistência mecânica das amostras, contudo,

a altura das amostras nas prateleiras faz com que as resistências sejam diferentes. A explicação se dá através do fato de que o ar quente, sendo menos denso, se concentra em sua grande parte na porção superior da estufa, mesmo que as saídas se encontrem junto ao solo, o que acarreta um maior desenvolvimento de resistência nos corpos de prova mais altos das prateleiras. Porém, quando analisadas as resistências aos 28 dias, tal padrão não foi seguido, de forma que amostras aleatórias demonstraram maior resistência.

Ainda, notou-se uma não conformidade de temperatura com os padrões da NBR 9062 (ABNT, 2017) nos dias mais frios de moldagem, tendo em vista que o aquecimento por hora da estufa ultrapassou os 20°C permitidos, o que pode ser explicado pelo fato de que a estufa se encontra em um pavilhão cujas laterais são abertas, de forma que, quando a lona é posicionada sobre as formas produzindo a câmara de cura, a mesma se encontra com uma temperatura muito baixa em relação ao jato de vapor que é liberado.

Outro aspecto importante constatado em relação aos dias frios em que foram moldados os lotes D e E são as resistências resultantes, que ficaram abaixo dos 15 MPa estipulados pela empresa como resistência mínima das peças. A ocorrência dessa não conformidade pode ser explicada pelo baixo calor de hidratação fornecido às amostras antes do vapor ser liberado na estufa, retardando o endurecimento e ocasionando resistências iniciais mais baixas. Ainda, durante o programa experimental, foi instalada uma central dosadora de concreto na empresa, o que ocasionou diferença no traço. Porém, não há influência direta nos resultados, pois a análise de variância avalia os lotes como um todo. Além disso, notou-se um resfriamento máximo por hora menor nos dias mais quentes, cujas temperaturas ficaram acima dos 25°C, em relação aos dias em que a temperatura ficou abaixo dos 22°C.

Quando analisados os volumes das estufas para cada moldagem, levando em consideração as temperaturas ambientes médias acima dos 20°C, verificou-se um maior desenvolvimento de resistência mecânica no lote F, cujo volume da estufa foi o menor quando comparado com os lotes A, B e C. A cura dos lotes A, B e C foi realizada com o sistema atual de tubulação, porém, o lote F contou com a saída extra no meio da câmara.

O sistema atual de tubulação possui diversos pontos de vazamento de vapor, o que gera um mau aproveitamento da capacidade da caldeira responsável por fornecer o mesmo. Visando melhorar o sistema, o uso de uma lona térmica, a instalação de uma tubulação dimensionada de forma correta e, ainda, uma saída extra de vapor posicionada no meio da estufa resultariam em um processo de cura mais homogêneo e resistências mecânicas mais similares para as peças fabricadas.

Uma tubulação bem dimensionada evita a perda de carga excessiva pelo atrito com as paredes dos tubos, de forma que a velocidade do vapor no interior dos mesmos seja adequada, não causando erosão por ser muito alta, nem condensação por ser muito baixa.

Em dias frios, a liberação do vapor deve ser realizada gradativamente, sendo os registros abertos lentamente, não ocasionando uma variação abrupta de temperatura que ultrapasse os 20°C/hora permitidos pela NBR 9062 (ABNT, 2017).

Como as maiores temperaturas ficam concentradas na parte superior da estufa, as resistências iniciais mais altas são observadas nas amostras que se encontram nas posições alta e média das prateleiras. Porém, aos 28 dias, corpos de prova aleatórios demonstraram maior resistência, o que pode ser explicado em função da estufa se manter úmida em sua totalidade, o que gera a hidratação das amostras em geral.

Outro ponto a ser considerado seria a realização de mais pilhas de peças de concreto com altura menor, visando a diminuição da variação de temperatura entre alturas. Atualmente, a altura das pilhas pode chegar a 2 metros, o que ocasiona uma variação de temperatura de até 18°C entre a parte superior e a parte inferior da prateleira.

O estudo realizado levou em consideração um dos corredores formados dentro da estufa, de forma que a saída extra de vapor citada deve ser inserida no meio de cada corredor da estufa,

que pode variar de 2 a 3. Com a saída extra, aliada às medidas citadas anteriormente, há a possibilidade de um sistema de cura mais homogêneo, gerando resistências idênticas em todas as peças fabricadas.

## REFERÊNCIAS

- ACKER, Arnold Van. **Manual de Sistemas: Pré-Fabricados de Concreto**. Federação Internacional de Protensão, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção da água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BARDELLA, P. S.; BARBOSA, D. C.; CAMARINI, G. **Sistemas de Cura em Concretos Produzidos com Cimento Portland de Alto-Forno com Utilização de Sílica Ativa**. UNICAMP, Campinas, São Paulo: 2005. Disponível em: <[http://www.set.eesc.usp.br/1enpp/pepm/cd/conteudo/trab\\_pdf/115.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/1enpp/pepm/cd/conteudo/trab_pdf/115.pdf)>. Acesso em: 6 abr 2019.
- BROOKS, J. J.; NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- EL DEBS, M.K. (2000). **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos.
- LAGUNA, Luis Antonio; IKEMATSU, Paula. **A influência da temperatura na desformação do concreto**. Revista Técnica, São Paulo, ed. 150, 2009. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/150/artigo286635-2.aspx>>. Acesso em: 10 abr. 2019.
- LEITE, N. R.; MILITÃO, R. A. **Tipos e Aplicações de Caldeiras**. Escola Politécnica - Depto. Enga. Mecânica. São Paulo, 2008. Disponível em: <[http://lsimej.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras\\_prominp.pdf](http://lsimej.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf)>. Acesso em: 04 maio 2019.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. Disponível em: <<https://bucket-gw-cni-static-cmssi.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/LivroVapor.pdf>>. Acesso em: 04 maio 2019.
- RECENA, Fernando Piazza. **Retração do concreto**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2014.