

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
*DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL*

## **CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE CONCRETOS COM NANOSÍLICA**

**Giovana Massarico Gonçalves**

São Carlos

2020

GIOVANA MASSARICO GONÇALVES

## CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE CONCRETOS COM NANOSÍLICA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de Engenharia Civil  
da Universidade Federal de São Carlos como parte  
dos requisitos para a conclusão da graduação em  
Engenharia Civil

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Giannotti da  
Silva Ferreira

São Carlos

2020

## **AGRADECIMENTOS**

Através deste espaço, presto meus agradecimentos a todos que, de alguma forma, auxiliaram a realização deste trabalho. Com certeza, as ações de todos foram fundamentais para o bom desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso e, mesmo em período de pandemia, nunca me faltou auxílio.

Primeiramente, agradeço a minha orientadora Fernanda que, desde a época do planejamento do trabalho de conclusão de curso, vem acompanhando o desenvolvimento do mesmo e me guiando ao melhor caminho, de modo empático, atencioso, verdadeiro, responsável e flexível.

Também, agradeço a todos que frequentam o Laboratório de Materiais e Componentes do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar que, de alguma maneira, me auxiliaram em algum momento do trabalho, seja com referências de pesquisas anteriores, com auxílios técnicos ou com a companhia nos dias de ensaios no laboratório.

Em especial, agradeço ao técnico José Roberto por todo o auxílio prestado, verdadeiro profissional dedicado ao trabalho que nunca mediu esforços quando precisei, sempre disponível, correto e atencioso.

Por fim, agradeço a toda minha família, ao meu namorado e aos meus amigos pelo constante apoio durante todo o período. Quando o assunto não é técnico, vale toda a companhia e admiração, combustíveis para a realização de qualquer trabalho.

## RESUMO

Atualmente, no Brasil, a maioria das edificações é dependente do alto consumo de energia elétrica, consequência de, muitas vezes, desconsiderar estratégias para o desempenho térmico e para a eficiência energética do ambiente construído. Nesse contexto, várias pesquisas estão sendo realizadas para estudar a viabilidade da incorporação de aditivos e adições ao concreto, visando materiais com menores condutividades térmicas que atinjam um melhor desempenho térmico. Uma destas adições é a nanosílica, já muito estudada em relação à durabilidade e à resistência à compressão de concretos, porém pouco explorada quanto à condutividade térmica dos mesmos. Nessa direção, a adição de nanosílica proporciona um efeito fíler e pozolânico na matriz cimentícia, que resulta num maior refinamento dos poros, porém, em teores e dosagens adequadas, acredita-se que essa substituição parcial do cimento pela nanosílica pode provocar um efeito inverso, levando à criação de pequenos vazios na pasta de cimento, diminuindo a densidade dos concretos e suprimindo, significativamente, a transferência de calor. Assim, neste trabalho, foi estudado o efeito da adição de nanosílica na condutividade térmica de concretos, a partir do desenvolvimento de concretos com a incorporação de 0%, 5% e 10% de nanosílica coloidal em substituição em massa ao cimento. Foram avaliadas a massa específica, a absorção de água, o índice de vazios, a resistência à compressão e a condutividade térmica dos concretos desenvolvidos, cujos resultados foram analisados pela Análise de Variância (ANOVA) e, posteriormente, submetidos ao teste de Tukey. De modo geral, os resultados indicam que a adição de nanosílica coloidal provoca um aumento significativo na massa específica dos concretos, assim como nos valores de resistência à compressão para os traços com adição de 10% de nanosílica coloidal em substituição em massa ao cimento nas idades de 48 horas e 7 dias. Em relação à condutividade térmica dos concretos estudados, não foram observadas variações significativas em seus valores, de acordo com a Análise de Variância, comparando-se os traços com e sem adição de nanosílica coloidal ao traço referência.

*Palavras-chave:* concreto; nanosílica; condutividade térmica.

## ABSTRACT

Nowadays, in Brazil, most buildings are dependent on high electricity consumption, a consequence of often disregarding strategies for thermal performance and energy efficiency of the built environment. In this context, several researches are being carried out to study the feasibility of incorporating additives and additions to concrete, targeting materials with lower thermal conductivities that achieve a better thermal performance. One of these additions is nanosilica, which has already been studied in relation to durability and compressive strength of concrete, but little is being explored regarding its thermal conductivity. In this direction, the addition of nanosilica provides a filler and pozzolanic effect in the cement matrix, which results in a greater refinement of the pores, however, in adequate levels and dosages, this partial substitution of cement by nanosilica is believed to cause an inverse effect, leading to the creation of small voids in the cement paste, reducing the density of concrete and significantly suppressing heat transfer. Thus, in this work, the effect of adding nanosilica to the thermal conductivity of concrete was studied from the development of concrete with the addition of 0%, 5% and 10% of colloidal nanosilica in mass substitution to cement. The specific mass, water absorption, void index, compressive strength and thermal conductivity of the developed concrete were evaluated, the results of which were analyzed by the Analysis of Variance (ANOVA) and later submitted to the Tukey test. In general, the results indicate that the addition of colloidal nanosilica causes a significant increase in the specific mass of the concrete, as well as in the compressive strength values for the traces with the addition of 10% of colloidal nanosilica in mass substitution to cement at the ages of 48 hours and 7 days. Regarding the thermal conductivity of the concrete studied, no significant variations were observed in their values, according to the Analysis of Variance, comparing the traces with and without the addition of colloidal nanosilica to the reference trace.

*Key-words:* concrete; nanosilica; thermal conductivity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de cimento no Brasil .....	9
Figura 2: Consumo de energia elétrica por uso final nas residências brasileiras.....	10
Figura 3: Tarifas médias por classes de consumo no Brasil.....	11
Figura 4: Micrografias de partículas de cimento floculadas em uma suspensão cimento Portland-água sem e com a presença de aditivo superplastificante .....	14
Figura 5: Reações de hidratação do cimento no concreto tradicional e no concreto com nanosílica.....	15
Figura 6: Esquemática do método do fio quente .....	18
Figura 7: Montagem do conjunto do método da placa quente protegida .....	18
Figura 8: Sistema de baixo custo para medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos.....	19
Figura 9: Etapas do programa experimental .....	21
Figura 10: Materiais que serão utilizados na confecção dos concretos .....	22
Figura 11: Etapas do ensaio de consistência realizado.....	24
Figura 12: Processo de moldagem e corpos de prova para os ensaios de massa específica e índice de vazios e de resistência à compressão .....	25
Figura 13: Tubo de PVC, abraçadeiras metálicas e tampão .....	25
Figura 14: Resistor cartucho com pasta térmica em sua superfície .....	26
Figura 15: Corte esquemático do sistema de moldagem .....	26
Figura 16: Corpos de provas moldados para o ensaio de condutividade térmica.....	27
Figura 17: Corpo de prova desmoldado e equipamentos utilizados .....	27
Figura 18: Etapas de pesagem do ensaio de massa específica.....	28
Figura 19: Corpo de prova na prensa após ruptura.....	29
Figura 20: Equipamento do ensaio de condutividade térmica .....	30
Figura 21: Evolução da resistência à compressão dos concretos estudados.....	35
Figura 22: Evolução da condutividade térmica média dos concretos estudados .....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos traços de concreto e consistências obtidas .....	32
Tabela 2 – Massa específica real dos concretos com 28 dias de idade .....	33
Tabela 3 – Absorção de água dos concretos com 28 dias de idade.....	33
Tabela 4 – Índice de vazios dos concretos com 28 dias de idade.....	33
Tabela 5 – Resistência à compressão dos concretos com 48 horas de idade .....	34
Tabela 6 – Resistência à compressão dos concretos com 7 dias de idade.....	34
Tabela 7 – Resistência à compressão dos concretos com 28 dias de idade.....	34
Tabela 8 – Resistência à compressão dos concretos com 56 dias de idade.....	34
Tabela 9 – Desenvolvimento da resistência à compressão (%) dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência .....	36
Tabela 10 – Condutividade térmica dos concretos com 48 horas de idade.....	37
Tabela 11 – Condutividade térmica dos concretos com 7 dias de idade .....	37
Tabela 12 – Condutividade térmica dos concretos com 28 dias de idade .....	37
Tabela 13 – Condutividade térmica dos concretos com 56 dias de idade .....	38
Tabela 14 – Desenvolvimento da condutividade térmica (%) dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência .....	39

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1 Justificativa.....	8
1.2 Objetivos.....	11
1.3 Organização e desenvolvimento do trabalho.....	12
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 Influência da nanosílica e de aditivos superplastificantes em concretos.....	13
2.2 Condutividade térmica de concretos .....	15
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1 Materiais.....	22
3.2 Definição dos traços e moldagem dos corpos de prova .....	22
3.3 Ensaio realizados nos concretos .....	28
3.3.1 <i>Massa específica, absorção de água e índice de vazios.....</i>	<i>28</i>
3.3.2 <i>Resistência à compressão .....</i>	<i>28</i>
3.3.3 <i>Condutividade térmica dos concretos.....</i>	<i>29</i>
3.4 Análise estatística dos resultados .....	31
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
4.1 Definição dos traços.....	32
4.2 Ensaio realizados em concreto.....	33
4.2.1 <i>Massa específica, absorção de água e índice de vazios dos concretos</i>	<i>33</i>
4.2.2 <i>Resistência à compressão dos concretos .....</i>	<i>34</i>
4.2.3 <i>Condutividade térmica dos concretos.....</i>	<i>37</i>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>40</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>
<b>APÊNDICE: CONDUTIVIDADE TÉRMICA – MEDIÇÕES.....</b>	<b>44</b>

# 1. INTRODUÇÃO

A condutividade térmica constitui uma propriedade ainda pouco explorada, mas que vem sendo investigada nas pesquisas nos últimos anos. Ela se relaciona diretamente ao desempenho de materiais quanto ao isolamento térmico e, logo, ao consumo de energia de uma edificação.

É fato que, no Brasil, quase todas edificações são dependentes do alto consumo de energia elétrica atualmente. Isso se deve, muitas vezes, à falta de planejamento arquitetônico, que desconsidera estratégias de desempenho térmico e de eficiência energética, isolando a edificação do ambiente em sua volta. Entretanto, nas últimas décadas, as questões relacionadas à sustentabilidade, inclusive no setor da construção civil, vêm ganhando destaque e, para ser mais sustentável nas ações e nos empreendimentos, é necessário modificar a forma com que a sociedade consome. Nessa direção, a busca incessante por novas fontes de energia permanece até os dias de hoje, sendo economizar uma das melhores soluções no momento.

Nesse contexto, um estudo aplicado na condutividade térmica de concretos com nanosílica pode proporcionar uma inovação material no envoltório das edificações, trazendo melhor conforto térmico e economia de energia aos moradores, que raramente utilizariam equipamentos de aquecimento, resfriamento ou ventilação artificiais, verdadeiros vilões no consumo de energia.

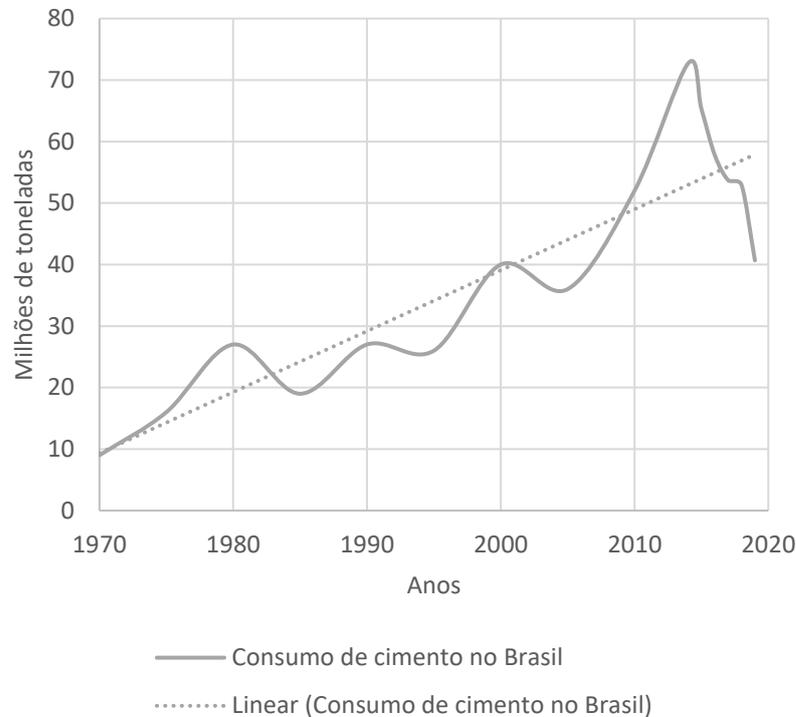
Nessa direção, esta pesquisa busca estudar o efeito da adição de nanosílica na condutividade térmica de concretos a fim de trazer mais informações sobre os efeitos dessa adição e também uma inovação material para o envoltório das edificações.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto armado, nos últimos anos, vem sendo o material mais utilizado na construção civil no Brasil, chegando num consumo de cerca de 19 bilhões de toneladas métricas ao ano (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O consumo de cimento, segundo o Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC), cresceu nas últimas décadas, como mostra a Figura 1, obtendo pico de mais de 70 milhões de toneladas em 2014. Nos últimos 5 anos,

apesar da queda no consumo, principalmente por questões econômicas do país, a linha de tendência continua crescente.

Figura 1: Consumo de cimento no Brasil



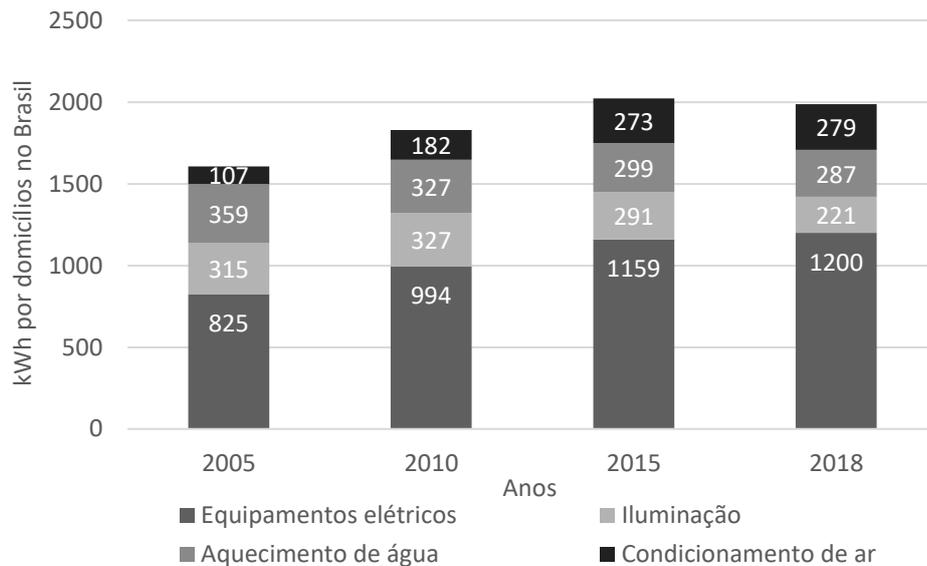
Fonte: Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (2019)

Nesse contexto, as pesquisas relacionadas aos concretos se apresentam em fase crescente, sempre conduzidas para melhores entendimentos dos materiais e para o desenvolvimento de inovações. Relacionado às pesquisas de adições minerais ao concreto, a nanosílica coloidal, em pó ou dispersa em aditivos superplastificantes vem ganhando destaque nas pesquisas científicas. Até o momento, os principais efeitos da adição de nanosílica são melhores resultados de resistência à compressão e de durabilidade frente aos principais agentes agressivos presentes no meio ambiente, como comprovam Hongjian, Suhuan e Xuemei (2015), Said, Ayad e Zeidan (2018) e Wang (2017). Assim, explica-se a importância da nanosílica como adição em concretos e como seus outros possíveis efeitos nos materiais cimentícios podem ser explorados.

Nessa direção, o campo de pesquisa das propriedades térmicas de concretos e, especialmente, as propriedades térmicas de concretos com adição de nanosílica ainda são pouco investigados, como, por exemplo, a condutividade térmica. A condutividade térmica é a propriedade do material que determina o fluxo de calor por condução que atravessa, na unidade de tempo, através de uma espessura unitária e de uma unidade de área do material, através de um gradiente de temperatura (SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS,

2010). Ela se relaciona às demandas e aos desafios das construções, atualmente, através da eficiência energética e do desempenho térmico das edificações, na medida que o consumo de energia dos edifícios depende dos valores de condutividade térmica dos materiais de construção (BUDAIWI *et al.*, 2002). A Figura 2 apresenta o uso de energia elétrica em edifícios residenciais por uso final, em que se pode observar o aumento para o condicionamento de ar nos últimos anos.

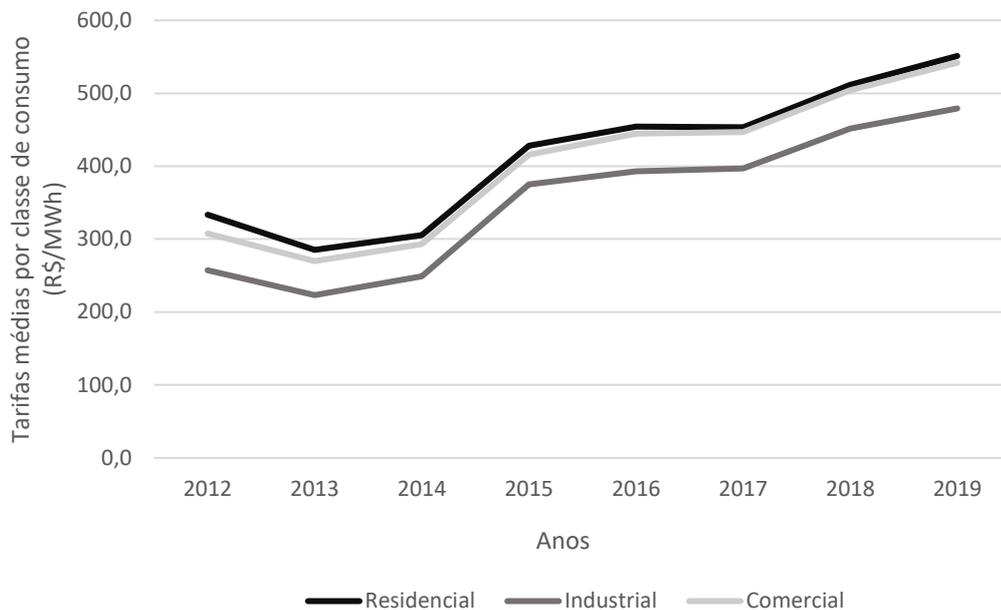
Figura 2: Consumo de energia elétrica por uso final nas residências brasileiras



Fonte: EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2020)

Nessa direção, materiais de menor condutividade térmica, bem aplicados nas edificações, podem proporcionar à população economia no consumo e, conseqüentemente, nos gastos com energia elétrica. No Brasil, a Figura 3 mostra os valores crescentes das tarifas médias em reais por megawatts hora para uso residencial, comercial e industrial nos últimos anos, todos crescentes.

Figura 3: Tarifas médias por classes de consumo no Brasil



Fonte: EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2020)

Assim, ao realizar este trabalho sobre a condutividade térmica de concretos com nanosílica, várias contribuições poderão ser realizadas, seja socialmente ou tecnicamente. Quando se inova em materiais, cujo uso resulte em edificações com melhor desempenho térmico, imediatamente a população desfruta de um avanço no conforto ambiental, ao se sentir mais confortável à temperatura do ambiente e, também, de uma melhor eficiência energética, ao economizar por não utilizar equipamentos AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado). Além disso, ao propor adições em concretos, técnicas e práticas diferentes podem ser desenvolvidas e adotadas, agregando conhecimento e tecnologia nessa área de atuação.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar o efeito da adição de nanosílica coloidal na condutividade térmica de concretos.

Os objetivos específicos consistem em:

- Avaliar a influência da adição de nanosílica coloidal na resistência à compressão dos concretos;
- Investigar os efeitos da variação do teor de substituição de nanosílica coloidal;
- Indicar características dos concretos com adição de nanosílica coloidal que influenciem a condutividade térmica.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

Para a organização e para o desenvolvimento deste trabalho, o mesmo foi dividido em 5 tópicos: revisão bibliográfica, metodologia, resultados e discussão, considerações finais e referências.

A revisão bibliográfica contempla o uso benéfico da adição da nanosílica em concretos e o estudo da condutividade térmica de concretos, no geral. Em seguida, a metodologia para os ensaios é apresentada, explanando todo o procedimento experimental e introduzindo os resultados e a discussão acerca deles. Por fim, todo o estudo desenvolvido é compilado nas considerações finais, concluindo e integrando os objetivos com os resultados alcançados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, a revisão bibliográfica será abordada em 2 etapas. Primeiramente, será apresentada a influência da adição da nanosílica na durabilidade e na resistência à compressão de concretos, características que vem sendo muito estudadas nos últimos anos. Em seguida, a condutividade térmica será abordada com definições, equações, normas e apresentação dos primeiros estudos da influência da adição da nanosílica na condutividade térmica de concretos.

### 2.1 INFLUÊNCIA DA NANOSÍLICA E DE ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES EM CONCRETOS

Nos últimos anos, o concreto armado vem sendo o material de construção mais utilizado no Brasil, estando a frente do aço, do bloco cerâmico e da madeira. Nesse contexto, a durabilidade dos componentes do concreto armado, proporcionalmente relacionada à proteção do aço a agentes agressivos, é o principal fator pela sua preferência (RIBEIRO, 2014).

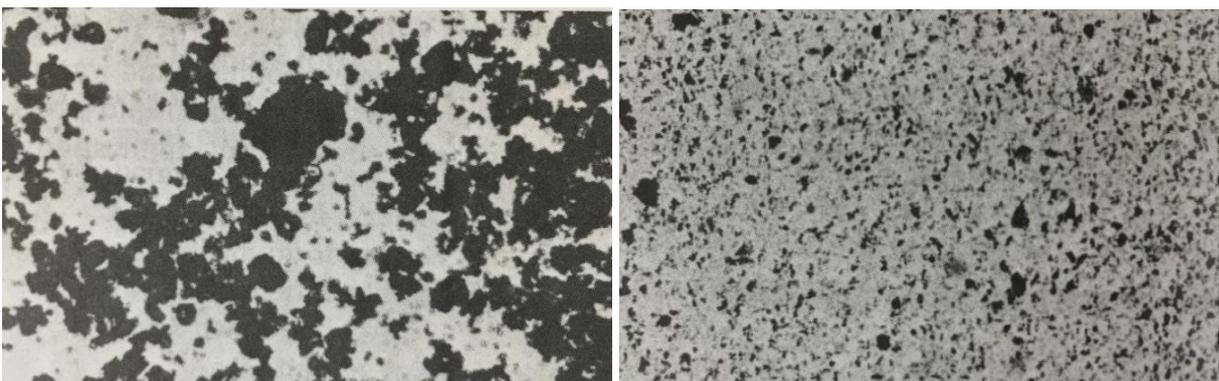
Com o objetivo de aumentar a durabilidade das estruturas de concreto, principalmente perante à corrosão de armaduras causadas por agentes agressivos, uma das principais manifestações patológicas, várias pesquisas estão sendo realizadas para estudar a viabilidade da incorporação de adições ao concreto. Uma destas adições é a nanosílica, que proporciona efeito fíler e pozolânico na matriz cimentícia, que resulta num maior refinamento dos poros e, conseqüentemente, em uma maior resistência à penetração de agentes agressivos, implicando em estruturas de concreto mais duráveis. Nessa direção, Senff *et al.* (2009) afirmam que, pela reação pozolânica com o hidróxido de cálcio, a quantidade de C-S-H aumenta, resultando em uma maior densificação da matriz, o que melhora a resistência e a durabilidade do material. Ainda, segundo Santos (2019), quanto maior o teor de nanosílica utilizado, menor a penetração dos íons cloreto. Por fim, de acordo com Pattali e Mathew (2017), a nanosílica pode ser mais eficaz do que a sílica ativa, no que diz respeito à durabilidade de concretos.

Além da durabilidade, a nanosílica, adicionada em pó, em solução coloidal ou dispersa em aditivo superplastificante proporciona, aos concretos, maior resistência à compressão. Para Li *et al.* (2017a), a adição de 2% de nanosílica em pó provocou um aumento de 17% na resistência à compressão aos 28 dias, sendo o resultado mais

satisfatório. Já segundo Zanon, Schmalz e Ferreira (2018), a utilização da nanosílica dispersa em aditivo superplastificante (teores de 0,5 e 0,7%) conferiu resultados positivos quando incorporada em conjunto com a sílica ativa (teor de 10%), resultando em um acréscimo de 9,7% na resistência à compressão dos concretos. Por fim, conforme Santos (2019), para maiores ganhos de resistência à compressão (acrécimo de 27%), o teor ideal de incorporação de nanosílica em solução coloidal, aos concretos, é de 10% em substituição volumétrica ao cimento. Além disso, os concretos com relação a/agl igual a 0,4 possuíram um acréscimo de resistência à compressão de 15% perante aqueles com relação a/agl igual a 0,56, justificado pela utilização do aditivo superplastificante.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os aditivos superplastificantes são capazes de reduzir consideravelmente a tensão superficial da água circundante numa mistura de concreto, elevando a fluidez do sistema. Também, sua estrutura química permite uma ótima dispersão das partículas de cimento na água, que pode acelerar a taxa de hidratação e, conseqüentemente, acelerar a pega e o endurecimento. Além disso, a utilização de aditivos superplastificantes provoca direto aumento nas propriedades mecânicas devido à redução na relação água/cimento, e pode resultar em resistências à compressão ainda maiores nas idades iniciais de hidratação. A Figura 4(a) ilustra a dispersão das partículas de cimento sem a presença de aditivo superplastificante, enquanto a Figura 4(b) ilustra com a presença de aditivo superplastificante, representando a maior dispersão das partículas de cimento na água.

Figura 4: Micrografias de partículas de cimento floculadas em uma suspensão cimento Portland-água sem e com a presença de aditivo superplastificante



(a)

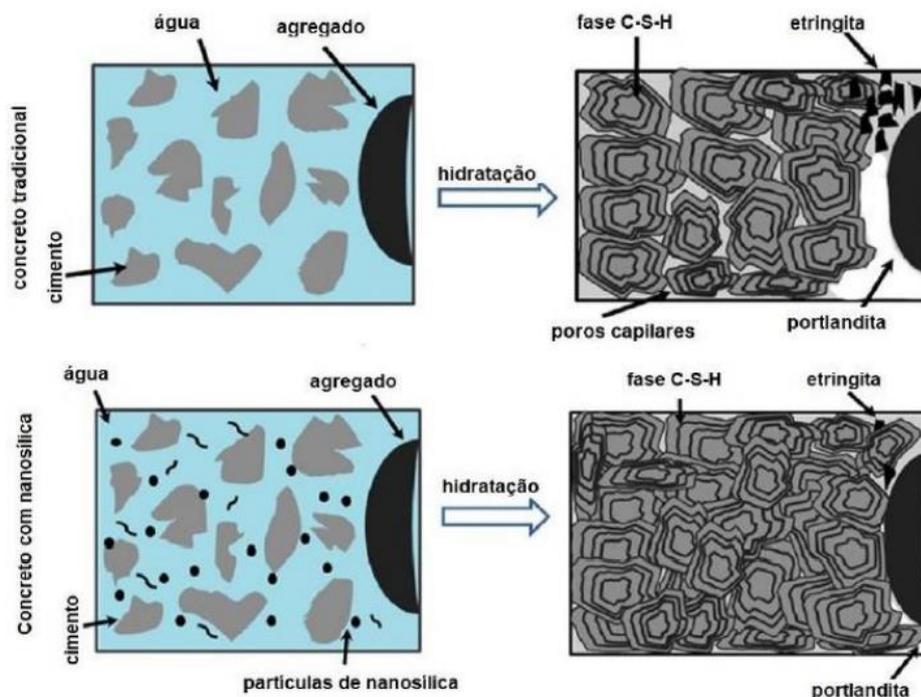
(b)

Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Além disso, a adição de nanosílica faz com que haja uma reação pozolânica da nanosílica com o hidróxido de cálcio formado pela hidratação do  $C_3S$  e  $C_2S$ . As reações pozolânicas geram compostos hidratados com melhor homogeneidade e reduzem o teor de

hidróxido de cálcio, ao formar uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), um composto mais resistente, dando origem a uma pasta cimentícia mais densa e homogênea (SANTOS, 2019). Não só, a nanosílica, por apresentar granulometria inferior à sílica ativa, e, assim, maior superfície específica, tem seu efeito pozolânico potencializado (LI *et al.*, 2017a). Além disso, ainda há o efeito fíler, em que as nanopartículas preenchem os espaços lamelares da estrutura C-S-H e atuam como núcleo para formação de novas reações pozolânicas, resultando no aumento da quantidade de C-S-H e no maior refinamento dos poros da matriz e da zona de transição (SENF *et al.*, 2009). A Figura 5 mostra as reações pozolânicas e o efeito fíler na hidratação do cimento, ressaltando a portlandita e a etringita representadas próximas ao agregado, com cores pretas e brancas, respectivamente, e os poros capilares representados como espaços entre as partículas de cimento após a hidratação.

Figura 5: Reações de hidratação do cimento no concreto tradicional e no concreto com nanosílica



Fonte: Singh *et al.* (2013)

## 2.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE CONCRETOS

O desempenho térmico de concretos consiste num eixo de pesquisa muito relevante atualmente, visto os constantes desafios energéticos das construções atuais, que podem ser vencidos através de novas tecnologias nos materiais. Nesse contexto, o conhecimento da condutividade térmica do concreto é fundamental em muitas áreas da construção,

principalmente para garantir o design com eficiência energética das estruturas externas dos edifícios. Segundo Budaiwi *et al.* (2002), o consumo de energia dos edifícios depende dos valores de condutividade térmica dos materiais de construção. No Brasil, utiliza-se a NBR 15220 (ABNT, 2005) para analisar e avaliar o desempenho térmico das edificações, além de apresentar métodos para medir a condutividade térmica de um corpo de prova.

A condutividade térmica se dá pelo fluxo de calor transmitido através de uma unidade de área de um material sob uma unidade de gradiente de temperatura unitária, sendo influenciada pelas características mineralógicas do agregado, pelo teor de umidade, pela densidade e pela temperatura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Já Asadi *et al.* (2018), por meio da revisão de literatura relevante ao tema, afirmam que a densidade consiste na melhor propriedade relacionada à condutividade térmica, abrangendo sua pesquisa na análise dos seguintes fatores:

- Teor de umidade: concretos em condição saturada apresentam maior condutividade térmica;
- Temperatura: a condutividade térmica de concretos diminui à medida que a temperatura dos mesmos aumenta;
- Tipo de agregado: a condutividade térmica aumenta ao elevar a parcela do volume de agregado graúdo, mas diminui ao utilizar agregados leves;
- Incorporação de adições minerais: cinzas volantes aumentam a condutividade térmica, enquanto outros materiais pozolânicos podem ocasionar a diminuição, como o fumo de sílica e o silano;
- Densidade: a condutividade térmica diminui quando a densidade do concreto diminui.

Para fins práticos, de acordo com Asadi *et al.* (2018), a equação 01 pode ser usada para estimar a condutividade térmica do concreto com densidades variando de 150 a 2350 kg/m<sup>3</sup>.

$$K = 0,0625 \times e^{0,0015\rho} \quad (R^2 = 0,81) \quad (01)$$

Sendo:

$K$  = condutividade térmica;

$\rho$  = densidade do concreto.

Na mesma direção, conforme Demirboga e Kan (2012), o comitê do Instituto Americano de Concreto (*ACI Committee*) propõe a equação 02 para concretos leves não estruturais:

$$K = 0,0864 \times e^{0,00125\rho} \quad (02)$$

Sendo:

$K$  = condutividade térmica;

$\rho$  = densidade do concreto.

Segundo Jittabut *et al.* (2016), a incorporação de nanosílica resulta na diminuição da densidade de compósitos de cimento, enquanto, para Sikora *et al.* (2017), o mesmo ocorre para argamassas de cimento. Segundo esses autores, a nanosílica possui partículas com maior área superficial, devido as suas menores dimensões, comparadas às partículas de cimento. Assim, os autores afirmam que a água disponível para a hidratação do cimento diminui e nem todas as partículas de cimento reagem com a água durante a hidratação, levando à criação de pequenos vazios na pasta de cimento, os quais proporcionam um decréscimo na densidade dos concretos. Desse modo, esses pequenos vazios suprimem, significativamente, a transferência de calor, resultando num valor mais baixo de condutividade térmica.

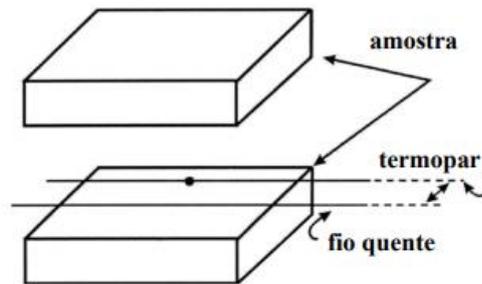
Experimentalmente, a condutividade térmica pode ser analisada em dois diferentes estados de transferência de calor entre materiais: estacionário e transiente. O estado estacionário consiste em uma transferência de calor constante, em que a temperatura ou o fluxo de calor não depende do tempo, enquanto o transiente depende do tempo e das variações de temperatura ao longo do tempo. Desse modo, os métodos para a medição da condutividade térmica também diferem de acordo com esses dois diferentes estados.

O método do estado estacionário é geralmente escolhido para medir a condutividade térmica em materiais homogêneos, levando mais tempo de ensaio, mas resultando num valor mais preciso. Já o método transiente é normalmente utilizado para materiais heterogêneos que se relacionam a teores de umidade, como é o caso do concreto. Uma vantagem deste último é a possibilidade de considerar o teor de umidade, mas uma desvantagem é a necessidade de repetir o ensaio várias vezes para obter resultados precisos (ASADI *et al.*, 2018).

Ainda segundo Asadi *et al.* (2018), há dois métodos transientes, o do fio quente e o da fonte plana, sendo o primeiro o mais utilizado e o escolhido para materiais cimentícios, devido à disponibilidade de equipamento nos laboratórios de investigação, ao custo do

equipamento, ao tempo de medição experimental e à capacidade para medir a amostra úmida. Nessa direção, o método do fio quente consiste na medição da temperatura aumentada a uma distância específica de um fio quente, que é uma fonte de calor linear no interior do material de ensaio. A Figura 6 representa a esquemática do método.

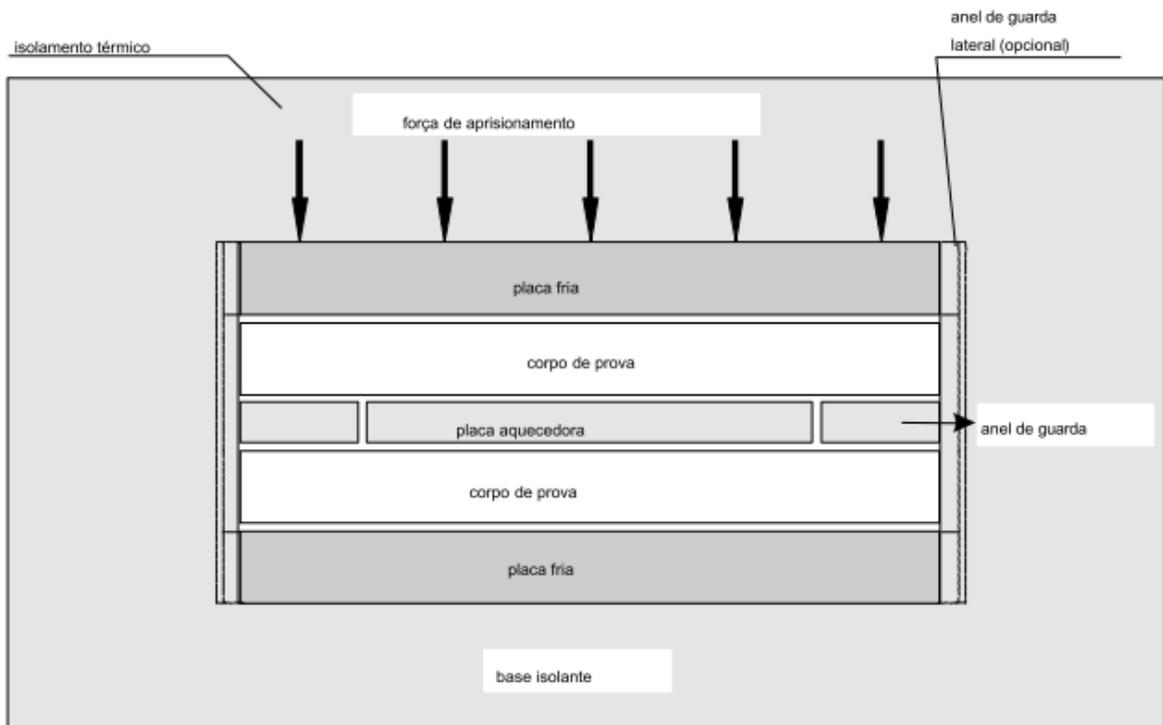
Figura 6: Esquemática do método do fio quente



Fonte: Santos (2002)

Por fim, no Brasil, segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), recomenda-se a medição da condutividade térmica através de dois métodos: o da placa quente protegida e o fluximétrico. O método fluximétrico, porém, é recomendado apenas para o estado estacionário, ou seja, para materiais homogêneos. Já o método da placa quente protegida considera materiais heterogêneos e consiste na medição do gradiente de temperatura médio estabelecido sobre o corpo de prova, a partir de um certo fluxo de calor e em condições de regime permanente, através do esquema experimental da Figura 7.

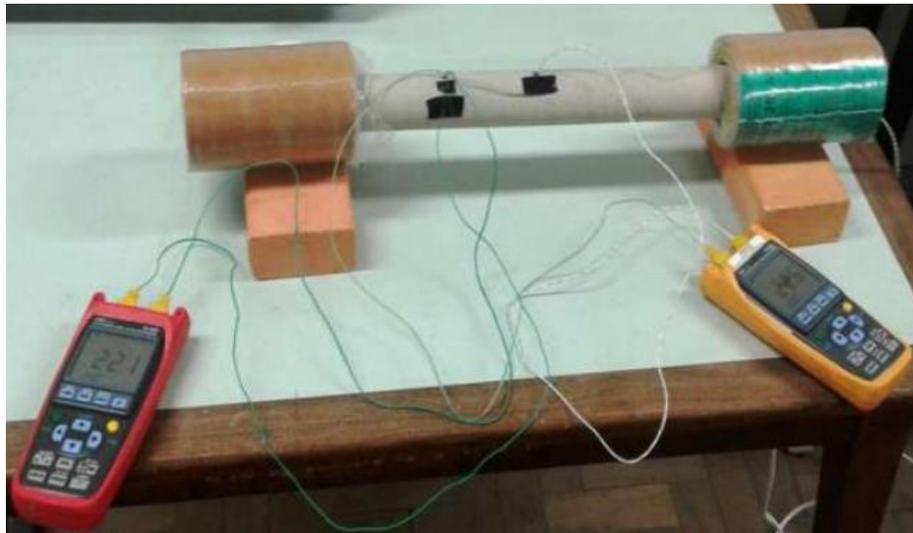
Figura 7: Montagem do conjunto do método da placa quente protegida



Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005)

Os equipamentos para medição de condutividade térmica, como pode-se observar, são complexos e, muitas vezes, caros. Nessa direção, Vilela (2017) realizou uma pesquisa sobre o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos. Esse sistema considera um fluxo de calor radial e unidirecional no corpo de prova por efeito joule. O equipamento consiste em um resistor elétrico posicionado no centro de um corpo de prova cilíndrico, que transmite calor ao mesmo por efeito joule. Segundo Incropera *et al.* (2012), em sistemas cilíndricos e esféricos, existem gradientes de temperatura somente na direção radial, e isso irá possibilitar analisá-los como sistemas unidimensionais. Também, em condições de regime estacionário, em que a temperatura em cada ponto do sistema independe do tempo, esses sistemas podem ser analisados através da forma apropriada da equação do calor ou da forma apropriada da Lei de Fourier. Desse modo, o sistema de medição de condutividade térmica desenvolvido por Vilela (2017) permite uma análise de fluxo de calor unidimensional e em regime estacionário, em concordância com os métodos tradicionais. Vale ressaltar que, na análise em regime estacionário, há a necessidade de repetir o ensaio várias vezes para obter resultados precisos. Tal sistema pode ser observado na Figura 8.

Figura 8: Sistema de baixo custo para medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos



Fonte: Vilela (2017)

Durante a realização do ensaio por esse sistema, medições de temperatura no interior e na superfície do corpo de prova são realizadas periodicamente até que o sistema entre em regime estacionário, sem variação de temperatura. A partir da última medida, a variação de temperatura entre o interior e a superfície do corpo de prova consiste no dado

de entrada para a Equação 03, que é uma adaptação e manipulação da equação de calor em regime estacionário para taxas de calor conduzidas através de superfícies cilíndricas:

$$k = \frac{q_r \times \ln(r_2/r_1)}{2 \times \pi \times L \times \Delta T} \quad (\text{EQ.03})$$

Onde:

$q_r$  = potência do resistor cartucho;

$r_1$  = valor do raio do resistor cartucho;

$r_2$  = valor do raio do corpo de prova;

$L$  = comprimento do corpo de prova;

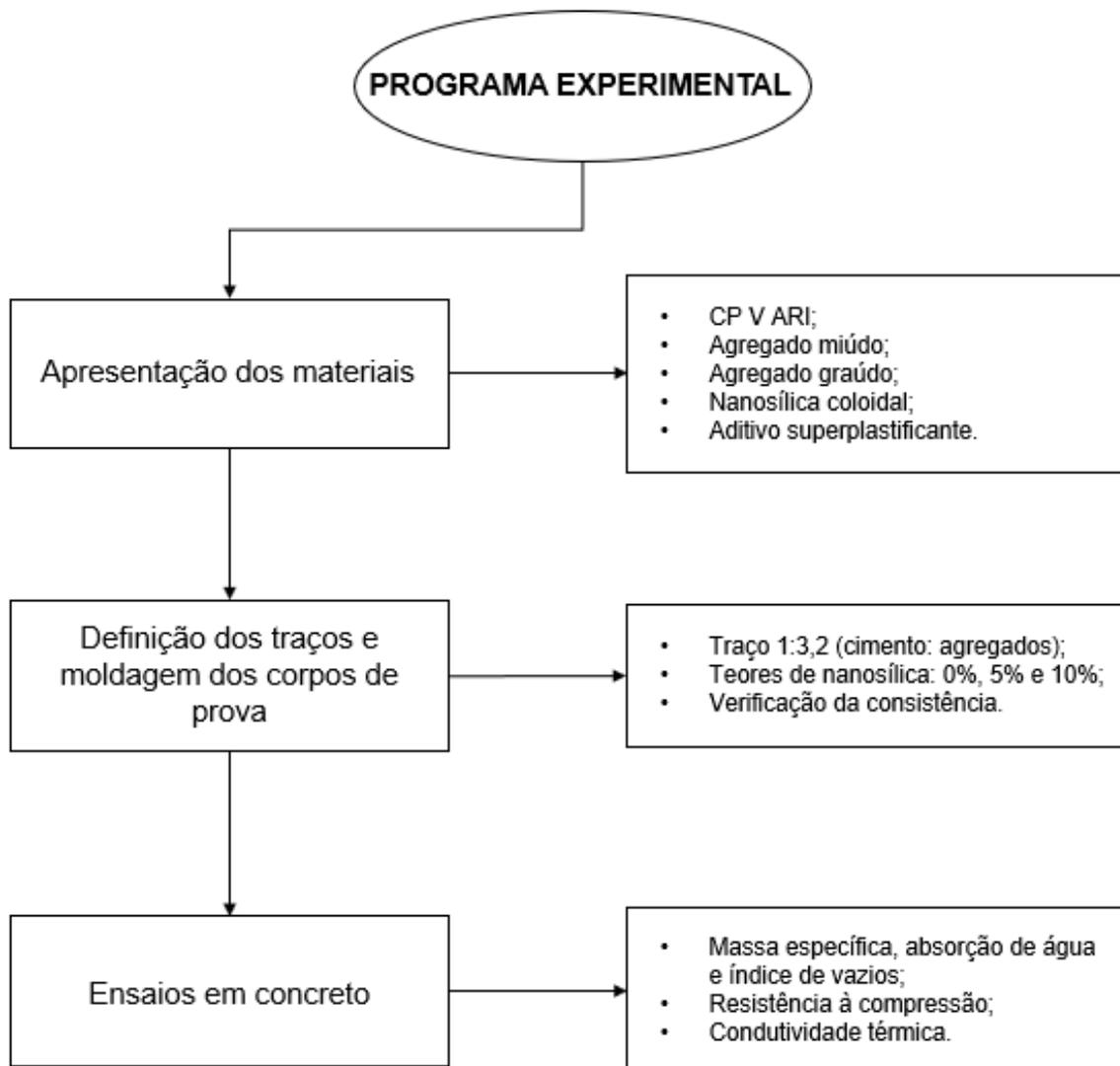
$\Delta T$  = diferença entre as temperaturas do centro e da superfície do corpo de prova.

Em suma, o estudo da condutividade térmica vem crescendo nos últimos anos, porém, a influência da adição de nanosílica na condutividade térmica de concretos ainda é um tema pouco estudado, que deve ser explorado. Então, introduz-se a metodologia deste trabalho que, a partir desta revisão bibliográfica, busca justamente dar as diretrizes para estudar essa influência.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para verificar a influência da adição de nanosílica coloidal na condutividade térmica de concretos e, assim, alcançar os objetivos propostos para este trabalho, o programa experimental visa analisar o efeito da adição da nanosílica nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos estudados, sendo dividido em 3 etapas: apresentação dos materiais, definição dos traços e moldagem dos corpos de prova e ensaios realizados em concreto. A Figura 9 apresenta o programa experimental deste trabalho.

Figura 9: Etapas do programa experimental



Fonte: Autora

Esta pesquisa se relaciona com trabalhos já realizados pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Assim, diversos parâmetros adotados nesta pesquisa foram baseados no trabalho desenvolvido por Santos (2019), sendo eles: materiais utilizados já caracterizados e, traços dos concretos, relação água/aglomerante e procedimento de mistura. Destaca-se que os materiais atendem às especificações das normas brasileiras para utilização na confecção de concretos.

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho são: cimento, agregados miúdo e graúdo, aditivo superplastificante e nanosílica coloidal, apresentados na Figura 10.

Figura 10: Materiais que serão utilizados na confecção dos concretos



Fonte: Autora

O uso da nanosílica coloidal é justificado pela concordância com o trabalho de Santos (2019), em que, dentre os tipos estudados, foi o que trouxe melhores resultados em relação às propriedades mecânicas.

A seguir, apresenta-se uma breve descrição dos materiais:

- Cimento: CP V ARI;
- Agregados miúdo e graúdo: naturais, encontrados e comercializados na região de São Carlos;
- Nanosílica: solução aquosa de sílica coloidal, denominada Levasil CB 8 e comercializada pela AzkoNobel;
- Aditivo superplastificante: ADVA CAST 585, a base de policarboxilato, fabricado pela Grace (*GCP Applied Technologies*).

### 3.2 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a definição dos traços dos concretos, estabeleceu-se:

- Traço 1:3,2 (cimento: agregados);

- Relação a/agl igual a 0,40;
- Nanosilica em teores de 0%, 5% e 10% de substituição em massa aos aglomerantes. A substituição é feita em massa, pois segue a recomendação do fabricante.

A relação a/agl foi escolhida de acordo com o trabalho de Santos (2019), como já mencionado, ao analisar a relação da redução da relação a/agl com o aumento da resistência à compressão de concretos, uma vez que as adições minerais tendem a ser utilizadas em concretos que necessitam maiores valores de resistência.

Os materiais foram misturados de acordo com o seguinte procedimento:

- Umedecer a cuba, adicionar a areia e ligar a argamassadeira;
- Adicionar 90% de água e bater por 1 minuto;
- Desligar argamassadeira, raspar as laterais e o fundo durante 30 segundos;
- Ligar a argamassadeira, adicionar o cimento, bater por 1 minuto;
- Desligar a argamassadeira e repetir o procedimento de raspagem durante 30 segundos;
- Ligar a argamassadeira e adicionar o aditivo superplastificante e o restante da água, bater por 1 minuto;
- Desligar a argamassadeira e raspar novamente durante 30 segundos;
- Ligar e bater durante 2 minutos;
- Adicionar a nanosilica coloidal e bater por 2 minutos;
- Desligar, raspar novamente e adicionar o agregado graúdo durante 30 segundos;
- Ligar e bater 1 minuto.

O teor de aditivo superplastificante utilizado em cada mistura foi definido mediante a verificação da consistência dos concretos, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), sendo adotada uma consistência de  $(230 \pm 10)$  mm.

Para a realização do ensaio de consistência foram necessários: mesa para índice de consistência, molde tronco cônico, soquete metálico e régua metálica. Para a execução do ensaio, adotou-se também o procedimento especificado pela NBR 13276 (ABNT, 2016):

- Limpar o tampo da mesa para índice de consistência e o molde tronco-cônico com pano umedecido;
- Encher o molde troncocônico, colocado no centro na mesa (uma pessoa deve segurar o molde enquanto outra enche o molde), em três camadas aproximadamente iguais, aplicar em cada uma delas, respectivamente, 15, 10

- e 5 golpes com o soquete, se necessário completar o molde com mais concreto;
- Realizar o arrasamento do concreto passando uma régua metálica rente à borda do molde, com movimentos de vai e vem em toda superfície;
  - Eliminar qualquer partícula em volta do molde;
  - Retirar o molde lentamente e na vertical;
  - Acionar a manivela da mesa para índice de consistência, de modo que a mesa suba e caia 30 vezes em 30 segundos de maneira uniforme;
  - Medir com a régua metálica o espalhamento da mistura, realizando medidas em 3 diâmetros;
  - O índice de consistência do concreto corresponde à média das três medidas de diâmetro, expressa em milímetros.

Figura 11: Etapas do ensaio de consistência realizado



Fonte: Autora

Após a definição dos teores de aditivo superplastificante a serem utilizados, os corpos de prova foram moldados, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), para os ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios e para o ensaio de resistência à compressão dos concretos. Para ambos, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, sendo adotada essa dimensão de corpo de prova em função da dimensão máxima característica do agregado graúdo (igual a 9,5 mm). Para o ensaio de massa específica, foram moldados 2 corpos de prova para cada traço e, para o ensaio de resistência à compressão dos concretos, foram moldados 4 corpos de prova para cada traço e para cada idade (48 horas, 7, 28 e 56 dias). Após um dia em ambiente

climatizado (temperatura controlada entre 22 e 23,5° C), as amostras foram desmoldadas e mantidas em câmara úmida até a idade prevista dos ensaios.

Figura 12: Processo de moldagem e corpos de prova para os ensaios de massa específica e índice de vazios e de resistência à compressão



Fonte: Autora

Para o ensaio de condutividade térmica, utilizou-se a metodologia de Vilela (2017), com algumas adaptações. Assim, foram moldados, para cada traço, 1 corpo de prova cilíndrico de 41,51 mm de diâmetro, aproximadamente, por 400 mm de comprimento. Os moldes foram feitos de tubos de PVC de 2 polegadas, cortados na direção longitudinal, para facilitar a desmoldagem, e presos com duas abraçadeiras metálicas. Cada corpo de prova foi moldado com um resistor cartucho de 9,51 mm de diâmetro em seu interior. Para isso, foram utilizados tampões com furos circulares de 9,51 mm de diâmetro nas extremidades, para garantir a boa localização do resistor e pasta térmica na superfície do resistor para que o calor fosse melhor dissipado.

Figura 13: Tubo de PVC, abraçadeiras metálicas e tampão



Fonte: Autora

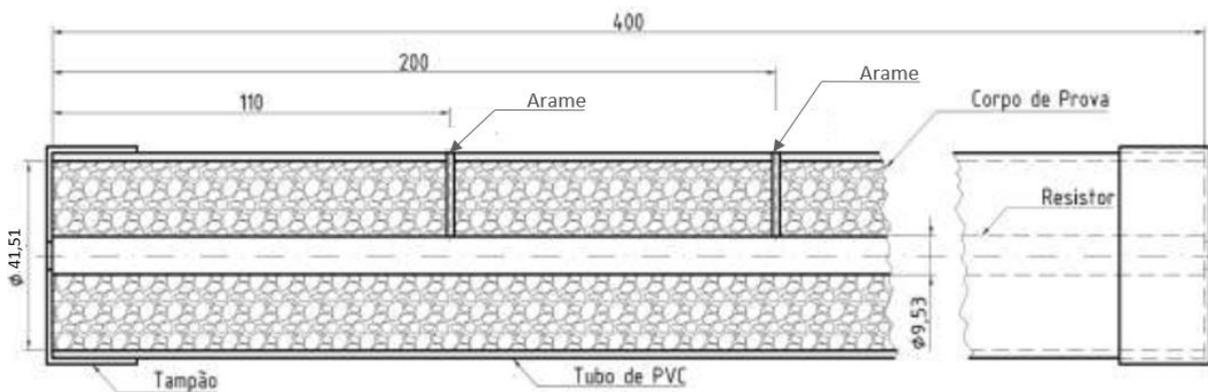
Figura 14: Resistor cartucho com pasta térmica em sua superfície



Fonte: Autora

Além disso, foram realizados 2 furos circulares no molde, de diâmetros semelhantes aos termopares, posteriormente utilizados, para inserir arames na moldagem, de modo que eles ficassem posicionados até o centro do corpo de prova. Um dos arames foi posicionado no centro do corpo de prova (200 mm de sua extremidade) e o segundo, a 110 mm de sua extremidade. A Figura 15 representa o corte esquemático do sistema de moldagem e a Figura 16 representa a moldagem realizada neste trabalho.

Figura 15: Corte esquemático do sistema de moldagem



Fonte: Modificado de Vilela (2017)

Figura 16: Corpos de provas moldados para o ensaio de condutividade térmica



Fonte: Autora

Após um dia em ambiente climatizado no laboratório (temperatura controlada entre 22 e 23,5 °C), as amostras foram desmoldadas e mantidas em mesmo ambiente até a idade prevista dos ensaios. Os equipamentos utilizados no molde e na desmoldagem, bem como o corpo de prova após retirada do molde, podem ser observados na Figura 17.

Figura 17: Corpo de prova desmoldado e equipamentos utilizados



Fonte: Autora

### 3.3 ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS

#### 3.3.1 MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

Os ensaios de massa específica e de índice de vazios dos concretos foram realizados conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005) na idade de 28 dias.

Figura 18: Etapas de pesagem do ensaio de massa específica



Fonte: Autora

#### 3.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão dos concretos foram realizados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), nas idades de 48 horas, 7, 28 e 56 dias. Antes dos ensaios, as amostras foram retificadas.

Figura 19: Corpo de prova na prensa após ruptura



Fonte: Autora

### **3.3.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS CONCRETOS**

Os ensaios de condutividade térmica dos concretos seguiram o método da pesquisa de Vilela (2017), com algumas adaptações, como número de termopares, realização do ensaio em ambiente climaticamente controlado (temperatura entre 22 e 23,5 °C), resistor cartucho de potência diferente e diferentes idades de ensaio (48 horas, 7, 28 e 56 dias). Os equipamentos e os materiais utilizados para o ensaio consistem em um resistor cartucho de 200 W de potência e voltagem de 220 V, 3 termopares tipo K, 3 multímetros semelhantes, lã de vidro, pasta térmica, fita isolante e cronômetro.

Foram inseridos 2 termopares nos furos realizados pelos arames na moldagem, para medir a temperatura no centro do corpo de prova e 1 na superfície do corpo de prova (centralizado). Todos foram presos com fita isolante para evitar deslocamentos dos termopares durante o ensaio. A lã de vidro foi utilizada nas extremidades do corpo de prova, para minimizar a transferência de calor longitudinal e, conseqüentemente, minimizar erros de medição do sistema.

O resistor cartucho utilizado possui 200 W de potência e voltagem 220 V, porém foi utilizado em voltagem 127 V devido a um teste realizado para verificar a temperatura máxima alcançada pelo resistor, para que ela não fosse muito elevada e pudesse interferir nos resultados das próximas idades, uma vez que foi utilizado o mesmo corpo de prova na análise em diferentes idades. Nessa direção, optou-se por utilizá-lo na voltagem 127 V para obter uma menor potência e, logo, uma menor temperatura máxima alcançada pelo resistor. A Figura 20 mostra o equipamento montado durante a realização do ensaio de condutividade térmica.

Figura 20: Equipamento do ensaio de condutividade térmica



Fonte: Autora

As temperaturas foram medidas antes do início do ensaio até o momento em que não houve mais variação entre elas, ou seja, até o momento em que o sistema entrou em regime estacionário. Elas foram medidas a cada 5 minutos nos primeiros 30 minutos e a cada 10 minutos até o final do ensaio.

Com a última medida de temperatura de todos os termopares, calculou-se 3 variações de temperatura ( $\Delta T$ ) entre os pontos no centro e na superfície do corpo de prova: a primeira entre a temperatura interna no centro do corpo de prova e a temperatura na superfície ( $\Delta T_1$ ), a segunda entre a temperatura interna na periferia do corpo de prova e a temperatura na superfície ( $\Delta T_2$ ) e a terceira entre a média das temperaturas internas no centro e na periferia do corpo de prova e a temperatura na superfície ( $\Delta T_{médio}$ ).

A partir dos valores encontrados, este foi substituído na Equação 03, mencionada na revisão bibliográfica, para, assim, obter os valores de condutividade térmica, estabelecidos como mínimo, máximo e médio para cada traço e para cada idade de ensaio, de acordo com a variação de temperatura utilizada.

$$k = \frac{q_r \times \ln(r_2/r_1)}{2 \times \pi \times L \times \Delta T} \quad (\text{EQ. 03})$$

Onde:

$q_r$  = potência do resistor cartucho;

$r_1$  = valor do raio do resistor cartucho;

$r_2$  = valor do raio do corpo de prova;

$L$  = comprimento do corpo de prova;

$\Delta T$  = diferença entre as temperaturas do centro e da superfície do corpo de prova ( $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  ou  $\Delta T_{médio}$ ).

Vale ressaltar que a potência do resistor cartucho foi calculada para cada ensaio, através da medição da voltagem e da amperagem por um multímetro e a multiplicação dos valores. Além disso, o raio de cada corpo de prova foi calculado a partir da média aritmética de 3 medições realizadas com auxílio de paquímetro digital.

### 3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os resultados de resistência à compressão dos concretos e de condutividade térmica de concretos foram tratados estatisticamente através da Análise de Variância (ANOVA) e, posteriormente, submetidos ao teste de Tukey. Esse tratamento foi realizado com auxílio do software OriginLab e com nível de significância  $\alpha = 5\%$ .

A análise de variância possui a finalidade de verificar a existência de diferenças significativas, do ponto estatístico, entre as leituras obtidas em cada ensaio. Ela, basicamente, testa duas hipóteses, nula ( $H_0$ ) ou alternativa ( $H_1$ ), sendo a primeira para a ausência de diferença significativa entre os resultados e a segunda para a existência de pelo menos uma entre eles. Para afirmar uma das hipóteses, compara-se o p-valor com o  $\alpha$  (nível de significância), sendo que, quando p-valor  $< \alpha$ , rejeita-se  $H_0$ , assumindo a existência de diferença significativa entre os resultados.

Existindo essa diferença, realiza-se o teste de Tukey, que testa as médias amostrais duas a duas, verificando entre quais existem diferenças significativas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, serão apresentados os resultados de definição dos traços de concreto e dos ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios, de resistência à compressão dos concretos e de condutividade térmica dos concretos.

### 4.1 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

O ensaio de consistência, a partir da média dos diâmetros dos espalhamentos obtidos, permitiu a definição dos teores de aditivo superplastificante utilizados em cada traço. A Tabela 1 apresenta a composição dos traços de concreto e a média das consistências obtidas no ensaio.

Tabela 1 – Composição dos traços de concreto e consistências obtidas

Concreto	Materiais (g)					Água	Consistência (mm)
	Cimento	NN*	A.M.**	A.G.***	SP (%)****		
REF	1000	-	1280	1920	0,2	400	228
NN5	950	50	1280	1920	0,5	350	222
NN10	900	100	1280	1920	1,3	300	227

\* Nanosílica

\*\*Agregado miúdo

\*\*\*Agregado graúdo

\*\*\*\*Porcentagem de aditivo superplastificante calculada em relação às massas de aglomerante

Vale ressaltar que a nanosílica utilizada é dispersa em uma solução aquosa onde 50% da massa total é composta de sílica e 50% de água, portanto, para a definição dos traços, foi considerada apenas a porcentagem de sílica existente na massa total do material e a água de amassamento foi quantificada descontando-se a água da solução. A adição de nanosílica foi feita em substituição ao cimento, portanto, para cada traço, a massa de cimento foi sendo corrigida, descontando-se a massa de nanosílica adicionada. Além disso, com o aumento da quantidade de nanosílica, houve aumento do teor de aditivo, o que pode ser justificado pela grande área superficial da nanosílica, que proporciona a absorção de uma maior quantidade de água, reduzindo a consistência da mistura em situações que a relação água/aglomerante é fixa. Segundo Sanchez e Sobolev (2010 *apud* Schmalz, 2018), as partículas de cimento Portland possuem área superficial entre 100 e 1000 m<sup>2</sup>/kg, enquanto as partículas de nanosílica entre 10000 e 1000000 m<sup>2</sup>/kg.

## 4.2 ENSAIOS REALIZADOS EM CONCRETO

### 4.2.1 MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS

Os resultados do ensaio de massa específica, de absorção de água e de índice de vazios, bem como o desvio-padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV), estão apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Massa específica real dos concretos com 28 dias de idade

Concreto	Massa específica real ( $\rho_r$ ) (g/cm <sup>3</sup> )			DP (g/cm <sup>3</sup> )	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	CP1	CP2	Média			
REF	2,68	2,68	2,68	0,00	0,00	-
NN5	2,74	2,73	2,74	0,01	0,36	Sim
NN10	2,71	2,71	2,71	0,00	0,00	Sim

Tabela 3 – Absorção de água dos concretos com 28 dias de idade

Concreto	Absorção de água (A) (%)			DP (%)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	CP1	CP2	Média			
REF	5,70	5,70	5,70	0,00	0,00	-
NN5	6,20	6,40	6,30	0,14	2,22	Sim
NN10	5,50	5,40	5,45	0,07	1,28	Não

Tabela 4 – Índice de vazios dos concretos com 28 dias de idade

Concreto	Índice de vazios ( $I_v$ ) (%)			DP (%)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	CP1	CP2	Média			
REF	13,28	13,23	13,26	0,04	0,30	-
NN5	14,62	14,85	14,73	0,16	1,09	Sim
NN10	13,04	12,69	12,87	0,25	1,94	Não

A partir dos valores obtidos, pode-se observar que a adição de 5% de nanosílica coloidal em massa aos concretos provocou diferenças significativas, em relação ao concreto referência, para todas as propriedades ensaiadas, gerando um aumento da massa específica, da absorção de água e do índice de vazios. Entretanto, a adição de 10% de nanosílica coloidal em massa aos concretos provocou diferenças significativas, em relação ao concreto referência, apenas na massa específica.

#### 4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão para as idades de 48h, 7, 28 e 56 dias, bem como o desvio-padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) estão apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 5 – Resistência à compressão dos concretos com 48 horas de idade

Traço	Resistência à compressão (MPa)					DP (MPa)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	CP1	CP2	CP3	CP4	Média			
REF	31,5	34,4	34,0	33,2	33,3	1,3	3,9	-
NN5	35,3	35,2	35,5	33,6	34,9	0,8	2,5	Não
NN10	35,9	38,4	36,0	35,2	36,4	1,4	3,8	Sim

Tabela 6 – Resistência à compressão dos concretos com 7 dias de idade

Traço	Resistência à compressão (MPa)					DP (MPa)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	CP1	CP2	CP3	CP4	Média			
REF	50,2	41,0	44,	41,8	44,4	4,2	9,4	-
NN5	37,2	39,6	38,2	41,0	39,0	1,6	4,2	Não
NN10	47,9	54,9	50,7	51,9	51,4	2,9	5,6	Sim

Tabela 7 – Resistência à compressão dos concretos com 28 dias de idade

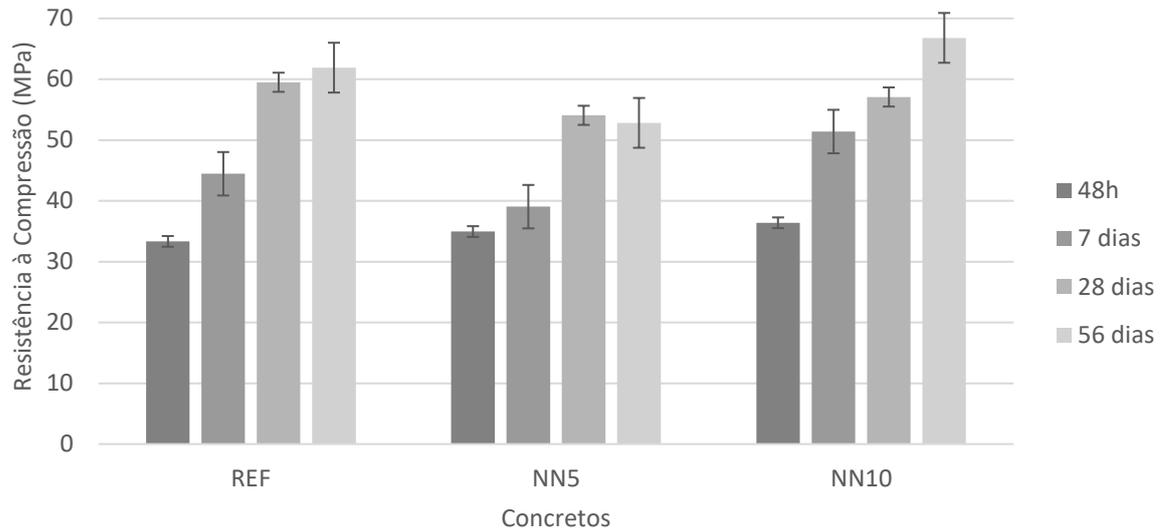
Traço	Resistência à compressão (MPa)					DP (MPa)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	CP1	CP2	CP3	CP4	Média			
REF	55,5	57,0	62,3	63,0	59,5	3,7	6,3	-
NN5	54,4	58,0	50,3	53,3	54,0	3,1	5,8	Não
NN10	60,5	52,7	55,8	59,2	57,0	3,5	6,1	Não

Tabela 8 – Resistência à compressão dos concretos com 56 dias de idade

Traço	Resistência à compressão (MPa)					DP (MPa)	CV (%)	Estatisticamente diferente de REF?
	CP1	CP2	CP3	CP4	Média			
REF	56,5	60,5	66,0	64,4	61,9	4,2	6,8	-
NN5	54,3	53,2	49,4	54,2	52,8	2,3	4,3	Sim
NN10	65,8	63,1	68,9	69,2	66,8	2,8	4,2	Não

A Figura 21 ilustra a evolução, no decorrer do tempo, da resistência média dos concretos e a Figura 22 mostra as formas de ruptura dos corpos de prova após a realização do ensaio.

Figura 21: Evolução da resistência à compressão dos concretos estudados



Fonte: Autora

Figura 22: Formas de ruptura dos corpos de prova



Fonte: Autora

Na idade de 48 horas, as médias dos valores variaram de 33,3 a 36,4 MPa, sendo que os valores obtidos indicam que a incorporação, em massa, de nanosílica coloidal resulta em acréscimos na resistência à compressão, visto que os dois traços com sua adição apresentaram valores superiores ao traço de referência. Também, com a análise estatística,

observa-se que há diferença significativa em relação ao traço referência e ao traço com 10% de nanosílica coloidal.

Analisando-se os resultados obtidos na idade de 7 dias, as médias dos valores variaram de 39,0 a 51,4 MPa. Os valores obtidos indicam que a adição de 5% em massa de nanosílica coloidal não resulta em acréscimos na resistência à compressão, assim, de acordo com a análise estatística, não há diferença estatística em relação a esse traço e ao traço de referência. Além disso, os valores obtidos também indicam que a adição de 10% em massa de nanosílica coloidal resulta em acréscimos na resistência à compressão e, estatisticamente, possui uma diferença significativa em relação ao traço referência.

Já na idade de 28 dias, as médias dos valores variaram de 54,0 a 59,5 MPa. Os resultados indicam que a adição de nanosílica coloidal não resulta em acréscimos na resistência à compressão, já que os dois traços com sua adição apresentaram valores inferiores ao traço de referência. Porém, a análise estatística mostra que não há diferença significativa entre os traços com nanosílica e o traço referência.

Por fim, analisando-se os resultados obtidos na idade de 56 dias, as médias dos valores variaram de 52,8 a 66,8 MPa. Os valores obtidos indicam que a adição de 5% em massa de nanosílica coloidal não resulta em acréscimos na resistência à compressão, enquanto a adição de 10%, sim. De acordo com a análise estatística, há diferença significativa apenas entre o traço com adição de 5% de nanosílica e o traço referência.

O desenvolvimento da resistência à compressão, em porcentagem, dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência, nas quatro idades de ensaio, pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 9 – Desenvolvimento da resistência à compressão (%) dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência

Traço	Variação da resistência à compressão (%)			
	48 horas	7 dias	28 dias	56 dias
NN5	4,9	-12,2	-9,1	-14,7
NN10	9,2	15,6	-4,1	7,9

Os maiores ganhos de resistência à compressão, nas quatro idades estudadas, ocorreram com a adição em massa de 10% de nanosílica coloidal nas idades de 48 horas e 7 dias, o que pode ser justificado pela característica de ganho rápido de resistência nas idades iniciais, proporcionado pela adição de nanosílica. De modo geral, a adição em massa de 5% de nanosílica coloidal proporcionou diminuição da resistência à compressão com relação ao traço referência (considerando os valores absolutos), obtendo-se um ganho

apenas na idade de 48 horas. Entretanto, a adição em massa de 10% de nanosílica coloidal acarretou em acréscimo dos valores de resistência à compressão com relação ao traço referência, obtendo uma diminuição apenas na idade de 28 dias.

Destaca-se que, embora os valores de resistência à compressão dos concretos com adição de nanosílica tenham sido menores que os de referência em algumas idades, a diferença não foi significativa. Possivelmente esse comportamento pode ser justificado pela baixa relação a/agl utilizada (igual a 0,40), que já proporciona uma menor porosidade ao material quando comparado a concretos com relações a/agl maiores e que pode se sobressair aos efeitos fíler e pozolânico (de refinamento dos poros).

#### 4.2.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS CONCRETOS

Os resultados obtidos no ensaio de condutividade térmica para as idades de 48 h, 7, 28 e 56 dias estão apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 10 – Condutividade térmica dos concretos com 48 horas de idade

Traço	Condutividade térmica W/mK			Estatisticamente diferente de REF?
	Mínima	Máxima	Média	
REF	1,29	1,41	1,35	-
NN5	1,12	1,70	1,38	Não
NN10	0,89	1,70	1,16	Não

Tabela 11 – Condutividade térmica dos concretos com 7 dias de idade

Traço	Condutividade térmica W/mK			Estatisticamente diferente de REF?
	Mínima	Máxima	Média	
REF	1,00	1,17	1,05	-
NN5	1,10	1,22	1,13	Não
NN10	0,75	1,30	0,95	Não

Tabela 12 – Condutividade térmica dos concretos com 28 dias de idade

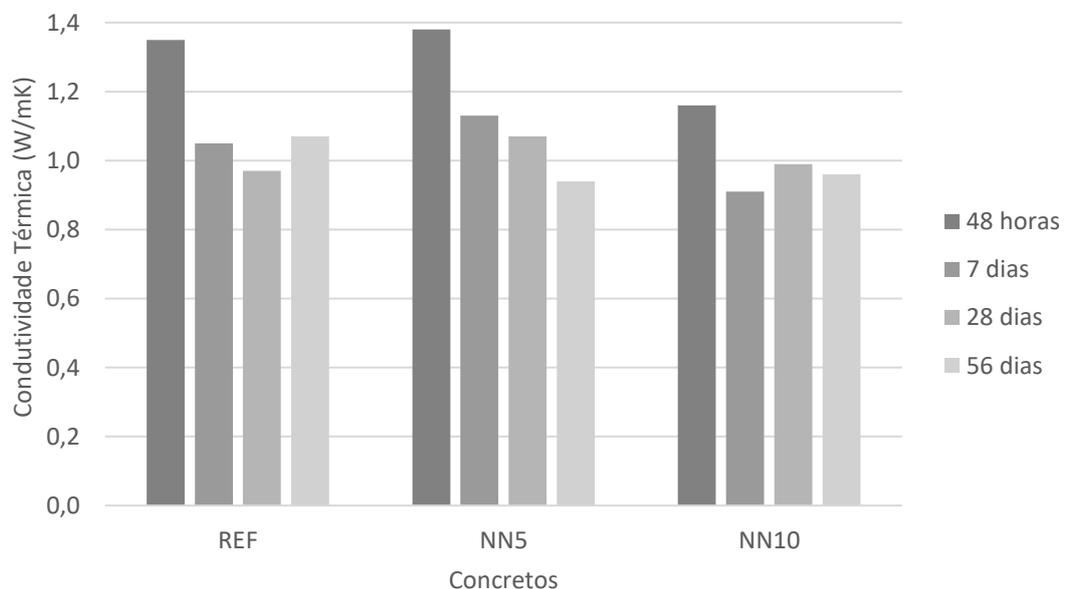
Traço	Condutividade térmica W/mK			Estatisticamente diferente de REF?
	Mínima	Máxima	Média	
REF	0,80	1,13	0,97	-
NN5	1,05	1,10	1,07	Não
NN10	0,78	1,30	0,99	Não

Tabela 13 – Condutividade térmica dos concretos com 56 dias de idade

Traço	Condutividade térmica W/mK			Estatisticamente diferente de REF?
	Mínima	Máxima	Média	
REF	0,9	1,43	1,07	-
NN5	0,9	0,98	0,94	Não
NN10	0,74	1,38	0,96	Não

A Figura 22 ilustra a evolução, no decorrer do tempo, da condutividade térmica média dos concretos.

Figura 22: Evolução da condutividade térmica média dos concretos estudados



Fonte: Autora

Na idade de 48 horas, as médias dos valores variaram de 1,16 a 1,38 W/mK, sendo que os valores obtidos indicam que a adição em massa de nanosílica coloidal resulta em decréscimos na condutividade térmica, visto que os dois traços com sua adição apresentaram valores inferiores ao traço de referência. Também, com a análise estatística, observa-se que não há diferença significativa em relação aos traços de referência e aos traços com adição de nanosílica coloidal.

Analisando-se os resultados obtidos na idade de 7 dias, as médias dos valores variaram de 0,95 a 1,13 W/mK. Os valores obtidos indicam que a adição em massa de nanosílica coloidal também resulta em decréscimos na condutividade térmica, visto que os dois traços com sua adição apresentaram valores inferiores ao traço de referência.

Também, com a análise estatística, observa-se que não há diferença significativa em relação aos traços de referência e aos traços com adição de nanosílica coloidal.

Já na idade de 28 dias, as médias dos valores variaram de 0,97 a 1,07 W/mK. Os valores obtidos indicam que a adição de 5% em massa de nanosílica coloidal resulta em acréscimos na condutividade térmica, porém, de acordo com a análise estatística, não há diferença estatística em relação a esse traço e ao traço de referência. Além disso, os valores obtidos também indicam que a adição de 10% em massa de nanosílica coloidal resulta em decréscimos na resistência à compressão e, estatisticamente, também não há uma diferença significativa em relação ao traço de referência.

Por fim, analisando-se os resultados obtidos na idade de 56 dias, as médias dos valores variaram de 0,94 a 1,07 W/mK. Os valores obtidos indicam que as adições de 5 e de 10% em massa de nanosílica coloidal resultam em decréscimos na condutividade térmica, porém, de acordo com a análise estatística, não há diferença significativa entre os traços com adição de nanosílica e o traço de referência.

O desenvolvimento da condutividade térmica, em porcentagem, dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência, nas quatro idades de ensaio, pode ser observado na Tabela 15.

Tabela 14 – Desenvolvimento da condutividade térmica (%) dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência

Traço	Variação da condutividade térmica (%)			
	48 horas	7 dias	28 dias	56 dias
NN5	2,22	7,62	10,31	-12,15
NN10	-14,07	-13,33	2,06	-10,28

Apesar das variações dos concretos com adição em massa de nanosílica coloidal em relação ao concreto referência, apresentarem, no geral, uma tendência de diminuição dos valores de condutividade térmica para o traço de adição, em massa, de 10% de nanosílica coloidal, as diferenças não são estatisticamente significativas, permanecendo de acordo com os resultados do ensaio de resistência à compressão.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, pode-se fazer as seguintes considerações:

- A adição de 5% de nanosílica coloidal em massa aos concretos estudados provocaram aumentos significativos na massa específica, na absorção de água e no índice de vazios dos concretos estudados, enquanto a adição de 10% de nanosílica coloidal em massa aos concretos estudados apresentou diferença significativa apenas na massa específica, também com aumento;
- Os resultados mais expressivos da adição de nanosílica coloidal para a resistência à compressão dos concretos foram obtidos com a adição de 10% de nanosílica, gerando cerca de 9,2% de aumento às 48 horas e de 15,6% aos 7 dias, em relação ao concreto referência. Esses resultados podem ser justificados pelo efeito fíler e pozolânico na incorporação da nanosílica, além da utilização do aditivo superplastificante, que melhoram a dispersão das partículas de nanosílica e cimento;
- Em relação à condutividade térmica dos concretos estudados, não foram observadas variações significativas em seus valores, de acordo com a Análise de Variância, comparando-se os traços com e sem adição de nanosílica coloidal ao traço referência;
- Relacionado ao desempenho térmico do material estudado, aplicações podem ser analisadas e desenvolvidas para uma melhor eficiência energética no ambiente construído. Como exemplo, resultados de valores maiores de massa específica e de valores menores de condutividade térmica podem ser ideais para aplicações em pisos radiantes, auxiliando para que parte do calor gerado pelo sistema de piso aquecido não seja direcionada para baixo;
- Por fim, este trabalho permitiu a elaboração e a operação de um sistema de medição de condutividade térmica em concretos.

## REFERÊNCIAS

ASADI, I. *et al.* Thermal conductivity of concrete – A review. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 81–93, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.002>. Acesso em: 30 maio. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BUDAIWI, I.; ABDU, A.; AL-HOMOUD, M. Variations of thermal conductivity of insulation materials under different operating temperatures: Impact on envelope-induced cooling load. **Journal of Architectural Engineering**, v. 8, n. 4, p. 125-132, 2002.

DEMIRBOGA, R.; KAN, A. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 730-734, 2012.

FELIX, R. Brasil caminha para ter a energia mais cara do planeta. **Gazeta do Povo**. 3 jul. 2018. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/economia/brasil-caminha-para-ter-a-energia-mais-cara-do-planeta-86tyszyp8czy77fbcvtovdsq/>. Acesso em: 9 jun. 2020.

HONGJIAN, D.; SUHUAN, D.; XUEMEI, L. Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 114-122, 2015.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Tradução e revisão técnica: Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 643 p. Tradução de: *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6th ed.

JITTABUT, P. et al. Effect of Nano-silica Addition on the Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Cement Composites. **Chiang Mai J. Sci**, v. 43, n. 5, p. 1160–1170, 2016. Disponível em: <http://epg.science.cmu.ac.th/ejournal/>. Acesso em: 22 maio. 2020.

LI, L. G. et al. Synergistic effect of micro- silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 229-238, 2017.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P. J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

PATTALI, A.; MATHEW, B. An Experimental Investigation on Strength Properties of Concrete Containing Micro-Silica and Nano-Silica. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 4, n. 6, p. 1692–1694, 2017. Disponível em: [www.irjet.net](http://www.irjet.net). Acesso em: 22 maio. 2020.

RIBEIRO, D. V. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1. ed, cap. 3, p. 37–50. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

SACHT, HM; ROSSIGNOLO, JA; SANTOS, WN. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Revista Matéria**, v. 15, n. 1, p. 31-39, 2010.

SAID, A; AYAD, A; ZEIDAN, M. Beneficial use of nano-silica in concrete: a review. **TCEIA – Trends in Civil Engineering and its Architecture**, v. 1, p. 22-24, 2018.

SANTOS, M. O. dos. **Estudo de concretos com adição de nanosílica submetidos à ação combinada de íons cloreto e CO<sub>2</sub>**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, 2019.

SANTOS, W. N. dos. O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. **Cerâmica**, v. 48, n. 306, p. 86-91, 2002.

SCHMALZ, R. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da**

**adição da nanosílica.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, 2018.

SENN, L. et al. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2487–2491, 2009.

SIKORA, P. *et al.* Thermal Properties of Cement Mortars Containing Waste Glass Aggregate and Nanosilica. **Procedia Engineering**, v. 196, n. 1, p. 159–166, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.186>. Acesso em: 20 maio. 2020.

SINGH, L. P. et al. Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1069-1077, 2013.

VILELA, K. C. **Desenvolvimento de sistema de baixo custo para medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos.** 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2017.

WANG, X. **Effects of nanoparticles on the properties of cement-based materials.** 2017. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Iowa State University, 2017.

ZANON, T.; SCHMALZ, R.; FERREIRA, F. G. da S. Avaliação dos efeitos da nanosílica em concretos submetidos à ação de íons cloreto. **Revista ALCONPAT**, v. 8, n. 2, p. 138–149, 2018.

## **APÊNDICE: CONDUTIVIDADE TÉRMICA – MEDIÇÕES**

Tabela A - 1: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço REF 48 horas

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	26	26	25
5	40	41	31
10	54	53	36
15	63	61	40
20	68	69	44
25	74	75	49
30	80	80	54
40	88	89	59
50	95	97	62
60	98	100	64
70	102	102	66
80	104	104	67
90	106	107	81
100	107	107	82
110	111	110	83
120	112	113	83
130	113	116	84
140	113	115	85
150	114	116	84
160	114	117	85
170	115	118	85
180	116	119	86
190	117	120	86
200	117	120	86

Figura A - 1: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço REF 48 horas

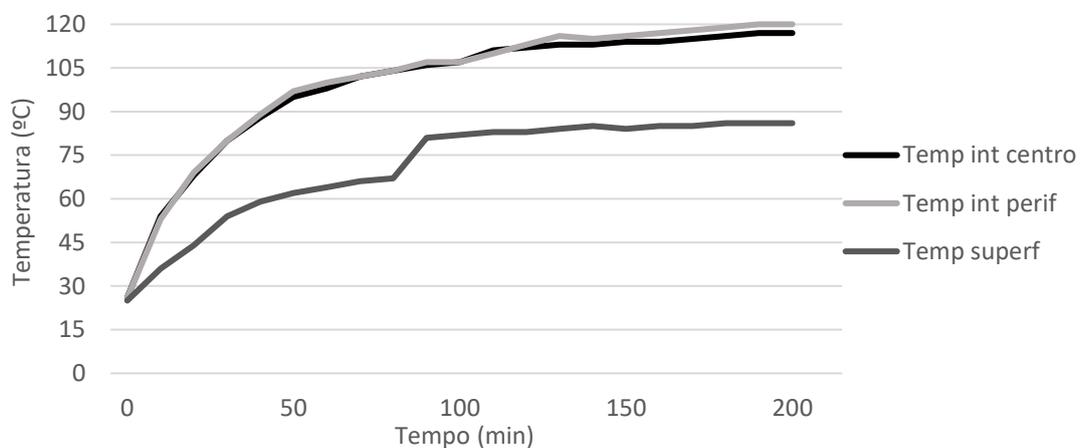


Tabela A - 2: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço NN5 48 horas

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	25	25	24
5	44	40	29
10	53	51	38
15	61	59	45
20	69	67	51
25	75	73	56
30	81	79	61
40	93	88	68
50	100	94	74
60	105	98	76
70	109	100	77
80	111	101	80
90	114	102	82
100	115	103	83
110	116	103	83
120	117	104	82
130	118	105	83
140	119	105	86
150	119	106	86
160	119	107	86
170	120	107	86
180	120	107	84
190	121	108	85
200	121	109	87
210	122	110	87
220	123	112	88
230	123	112	88

Figura A - 2: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço NN5 48 horas

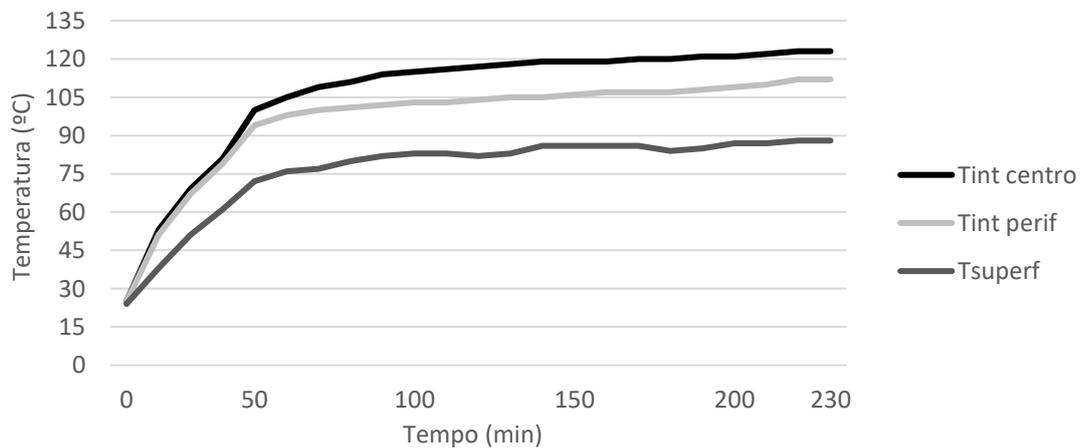


Tabela A - 3: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço NN10 48 horas

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	25	25	23
5	38	40	29
10	48	50	38
15	56	60	45
20	63	68	51
25	69	74	56
30	75	81	60
40	84	96	67
50	92	101	72
60	95	105	76
70	98	108	79
80	100	110	81
90	102	112	82
100	103	114	83
110	103	116	84
120	104	120	84
130	105	121	84
140	107	123	84
150	107	124	84
160	107	126	84
170	108	126	85
180	108	127	84
190	109	128	84
200	109	129	84
210	110	130	85
220	110	131	86
230	110	131	86

Figura A - 3: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço NN10 48 horas

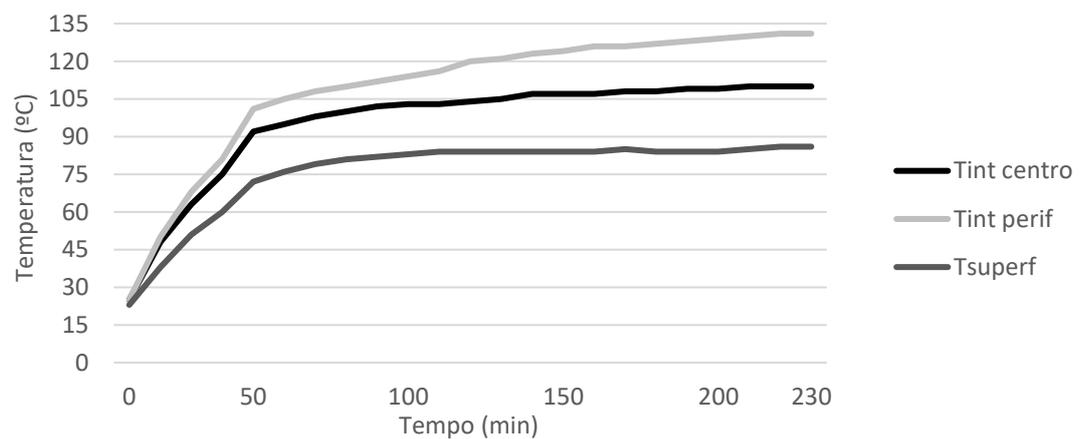


Tabela A - 4: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço REF 7 dias

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	20	19	20
5	43	42	28
10	54	55	37
15	64	65	45
20	73	74	52
25	80	82	58
30	86	88	63
40	96	98	70
50	103	105	76
60	108	110	80
70	111	114	83
80	114	117	85
90	115	120	85
100	117	122	86
110	118	123	87
120	118	124	88
130	119	125	89
140	119	126	89
150	121	127	89
160	122	128	90
170	122	129	91
180	122	129	91

Figura A - 4: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço REF 7 dias

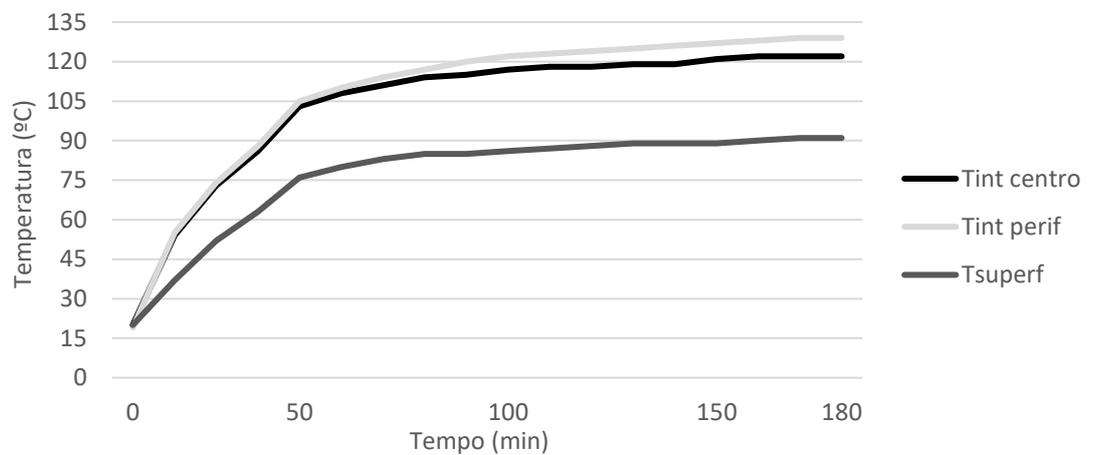


Tabela A - 5: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço NN5 7 dias

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	26	26	24
5	46	44	32
10	64	59	41
15	74	68	49
20	82	78	56
25	90	85	60
30	96	91	65
40	106	100	72
50	112	107	78
60	117	112	82
70	121	114	82
80	122	116	84
90	123	117	86
100	123	118	86
110	123	119	86
120	124	120	87
130	125	120	87
140	125	120	87

Figura A - 5: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço NN5 7 dias

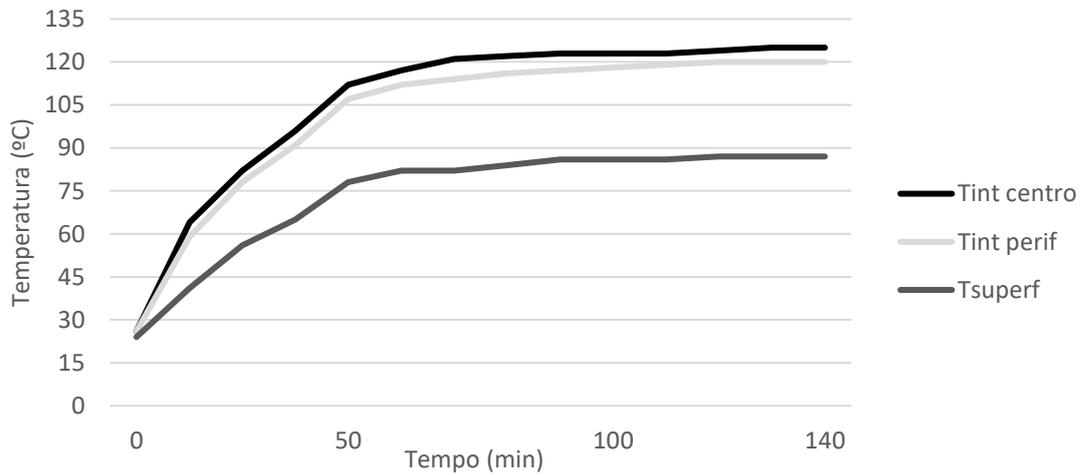


Tabela A - 6: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço NN10 7 dias

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	27	26	26
5	38	51	31
10	50	63	39
15	60	73	46
20	68	82	52
25	75	91	58
30	81	98	62
40	90	109	69
50	96	116	74
60	102	121	79
70	106	125	82
80	108	131	84
90	110	133	85
100	111	135	86
110	111	137	87
120	114	137	85
130	117	135	86
140	116	138	88
150	116	137	88
160	116	139	87
170	116	137	87
180	117	137	88
190	117	137	88

Figura A - 6: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço NN10 7 dias

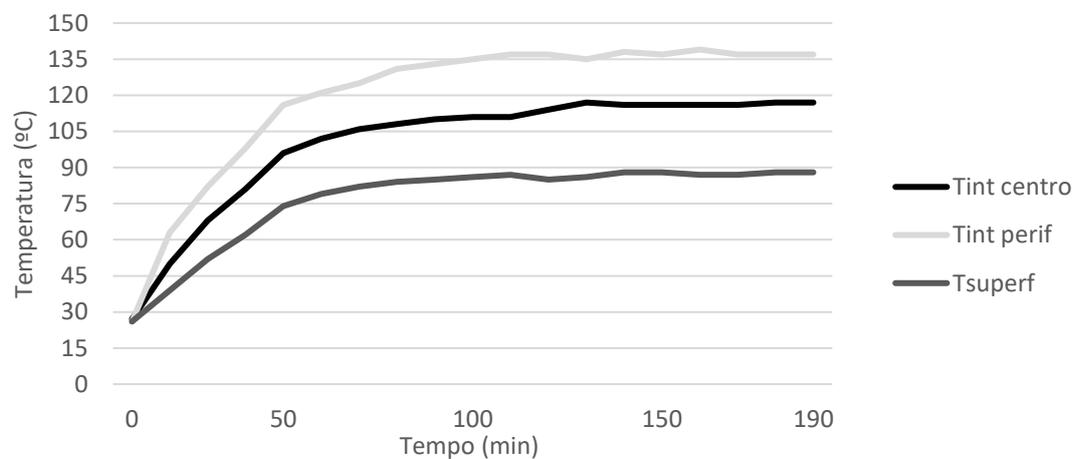


Tabela A - 7: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço REF 28 dias

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	21	21	18
5	40	40	27
10	51	53	36
15	61	65	44
20	70	74	50
25	77	84	56
30	83	90	60
40	93	100	67
50	99	107	72
60	104	113	76
70	108	116	78
80	110	118	80
90	112	121	81
100	113	123	82
110	114	125	83
120	115	126	84
130	117	128	84
140	117	128	84

Figura A - 7: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço REF 28 dias

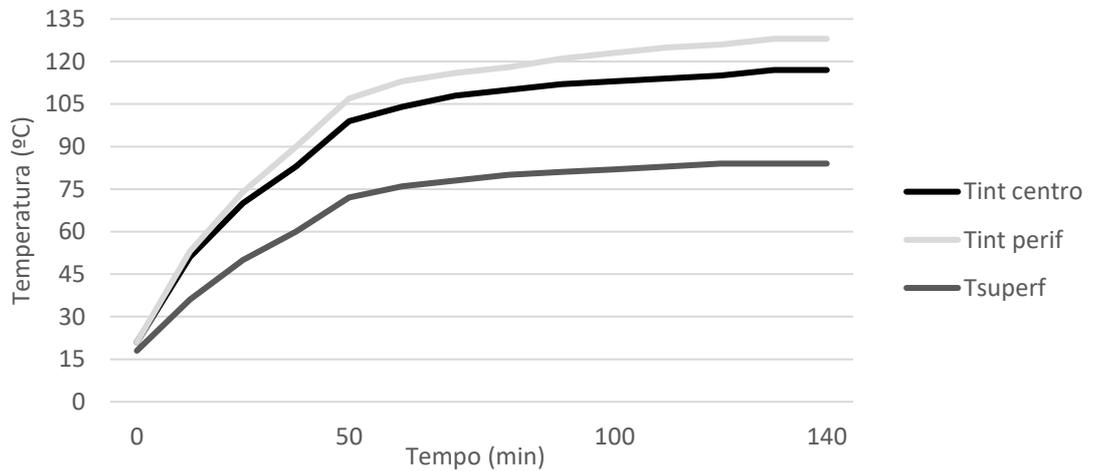


Tabela A - 8: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço NN5 28 dias

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	21	21	20
5	46	44	27
10	58	56	37
15	68	68	44
20	78	78	51
25	85	85	57
30	92	92	62
40	102	102	69
50	110	109	76
60	115	115	82
70	119	119	85
80	122	122	87
90	124	124	89
100	125	126	90
110	126	127	90
120	127	128	90
130	128	129	92
140	128	130	92
150	130	132	93
160	130	132	93

Figura A - 8: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço NN5 28 dias

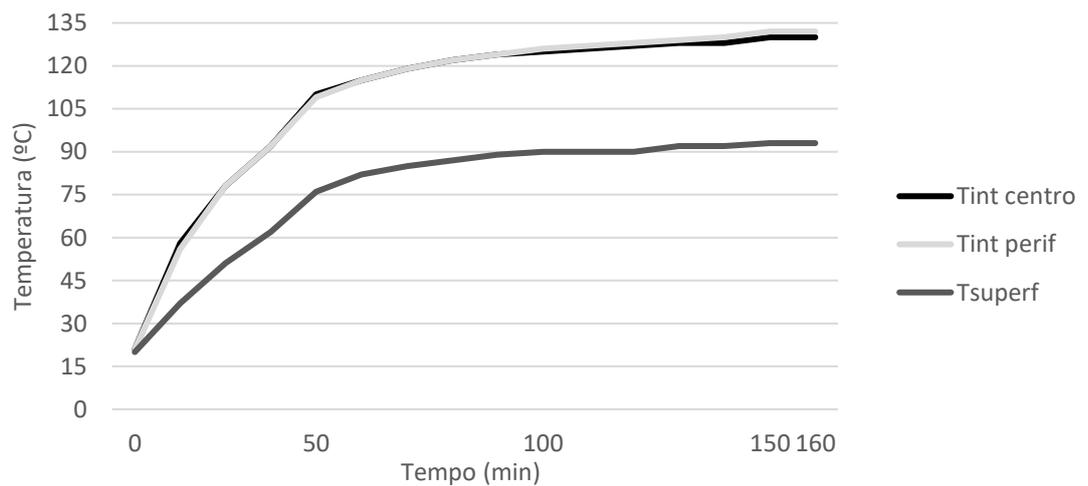


Tabela A - 9: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço NN10 28 dias

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	20	19	17
5	40	42	24
10	51	55	33
15	61	67	41
20	69	77	48
25	77	85	54
30	83	92	59
40	93	104	66
50	100	112	72
60	105	117	77
70	108	120	80
80	111	125	84
90	113	130	85
100	114	133	86
110	115	135	88
120	116	136	87
130	117	138	88
140	117	138	88

Figura A - 9: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço NN10 28 dias

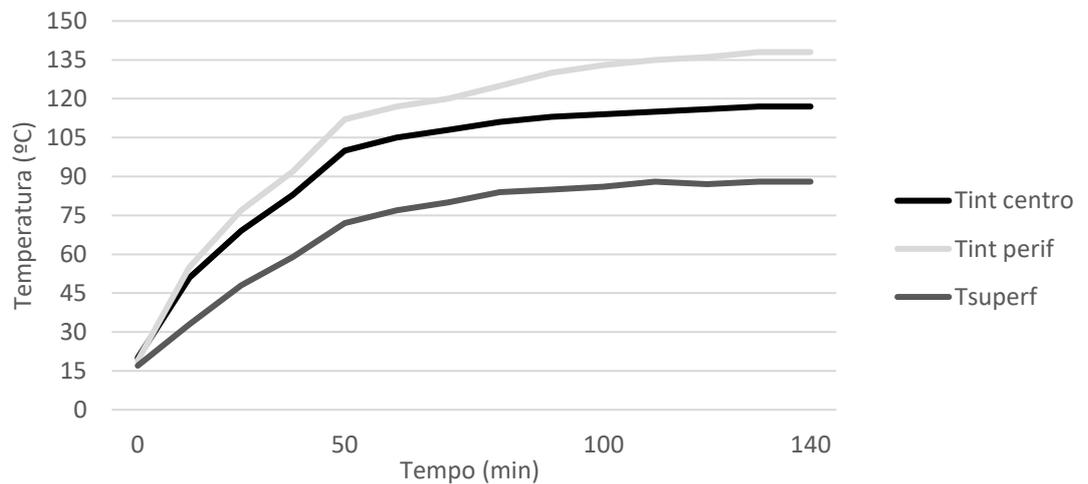


Tabela A - 10: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço REF 56 dias

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	21	21	20
5	37	45	27
10	50	59	37
15	60	71	46
20	69	81	52
25	76	89	58
30	82	97	63
40	92	107	72
50	99	114	78
60	103	118	81
70	106	121	84
80	109	124	86
90	110	127	87
100	112	128	88
110	112	129	89
120	114	130	89
130	114	131	90
140	115	132	90
150	116	133	91
160	117	134	92
170	117	134	92

Figura A - 10: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço REF 56 dias

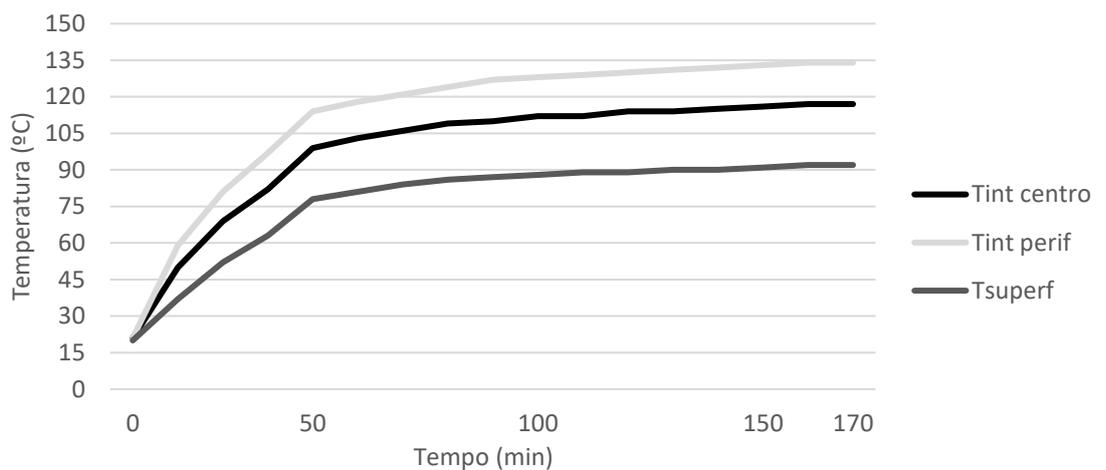


Tabela A - 11: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço NN5 56 dias

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	23	23	23
5	52	40	29
10	63	62	39
15	74	73	48
20	82	82	54
25	90	90	60
30	98	97	66
40	107	106	74
50	114	113	79
60	119	118	81
70	122	122	84
80	124	125	85
90	126	127	88
100	128	129	87
110	128	130	89
120	129	131	88
130	130	132	88
140	131	133	88
150	131	134	87
160	131	134	89
170	132	135	90
180	132	135	91
190	132	136	92
200	132	136	92

Figura A - 11: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço NN5 56 dias

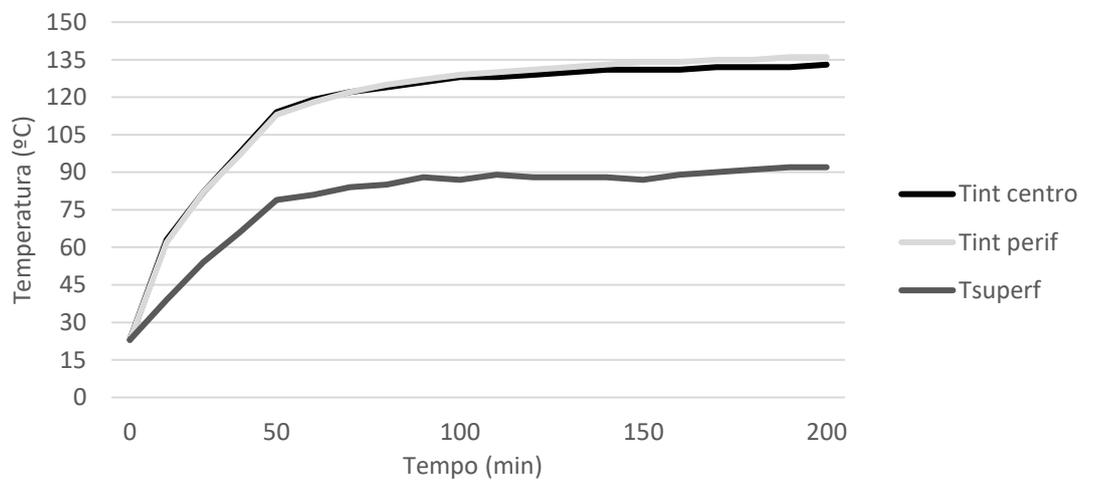


Tabela A - 12: Medições do ensaio de condutividade térmica do traço NN10 56 dias

Tempo	Temperatura interna centro (°C)	Temperatura interna periferia (°C)	Temperatura superfície (°C)
0	25	24	23
5	45	53	30
10	56	66	38
15	67	78	47
20	75	85	53
25	83	93	59
30	90	101	64
40	98	112	72
50	106	121	78
60	111	129	81
70	114	133	85
80	116	134	86
90	118	137	89
100	119	139	89
110	119	140	90
120	119	142	90
130	119	144	91
140	120	145	91
150	120	145	91

Figura A - 12: Comportamento da temperatura ao longo do tempo no ensaio de condutividade térmica do traço NN10 56 dias

