

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO, INOVAÇÃO E EXTENSÃO –
PROPIEX
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS – PPGCEM**

RAFAEL DE PAULA GURKEWICZ

**COQUE METALÚRGICO COMO AGREGADO DE CONCRETO CONDUTIVO
PARA AUTOCICATRIZAÇÃO**

CRICIÚMA

2024

RAFAEL DE PAULA GURKEWICZ

**COQUE METALÚRGICO COMO AGREGADO DE CONCRETO CONDUTIVO
PARA AUTOCICATRIZAÇÃO**

Dissertação de Mestrado – DM apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Michael Peterson

CRICIÚMA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

G979c Gurkewicz, Rafael de Paula.

Coque metalúrgico como agregado de concreto condutivo para autocicatrização / Rafael de Paula Gurkewicz. - 2024.

85 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2024.

Orientação: : Michael Peterson.

1. Concreto condutivo. 2. Coque. 3. Agregados (materiais de construção). 4. Autocicatrização do concreto. 5. Concreto - Aditivos. I. Título.

CDD 23. ed. 620.136

Rafael de Paula Gurkewicz

Coque metalúrgico como agregado de concreto condutivo para autocicatrização.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC.

Criciúma, SC, 29 de agosto de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



ADRIANO MICHAEL BERNARDIN

Data: 03/09/2024 17:44:39-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin
Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC

Documento assinado digitalmente



EDUARDO JUNCA

Data: 04/09/2024 16:02:23-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Junca
Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC

Documento assinado digitalmente



LISANDRO SIMAO

Data: 04/09/2024 14:57:52-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lisandro Simão
Universidade de Ribeirão Preto UNAERP

AGRADECIMENTOS

Inicio meus agradecimentos aos meus pais, Rosa e Rosalino, e minha irmã, Paula Rafaela, por todo apoio e confiança depositados em mim durante minha jornada.

Ao meu professor Michael Peterson, meu orientador, por toda ajuda e empenho na pesquisa.

À professora Elaine Guglielmi Pavei Antunes, por todo apoio iniciado ainda nos anos de graduação.

Ao Programa de Bolsas Universitárias de Santa Catarina – UNIEDU, pelo apoio, financiamento e incentivo à pesquisa.

Aos membros do Grupo de Pesquisa em Desempenho de Estruturas e Construção Civil por toda contribuição em pesquisas realizadas ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos, colegas e a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desta pesquisa.

Aos professores do PPGCEM pelo conhecimento transmitido.

Aos membros da banca avaliadora.

RESUMO

Por ser um material de baixa resistência à tração, o concreto é suscetível ao aparecimento de fissuras o que possibilita a penetração de água ao seu interior e outros agentes agressivos. Dá-se o nome de concreto autocicatrizante ao concreto que possui a capacidade de fechar suas fissuras. Destaca-se um dos mecanismos de autocicatrização do concreto como sendo a indução de elevação de temperatura. O concreto condutivo é composto por cimento e agregados que melhoram a condutividade elétrica, bem como a relação água/cimento. Pode-se apontar a vantagem em custo e praticidade da utilização do concreto condutivo com coque metalúrgico no degelo de pontes e vias. O presente trabalho visa analisar a aplicabilidade do coque metalúrgico como agregado em concreto condutivo para autocicatrização. Para tal, fez-se a utilização de diferentes traços de concreto com diferentes teores de substituição de agregado miúdo por coque. Para a caracterização do agregado, aplicou-se ensaio de massa unitária, massa específica, granulometria, DRX, FRX e MEV. Para a análise da influência da substituição do agregado miúdo por coque metalúrgico, foi realizado ensaio de abatimento, resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral, densidade e resistividade elétrica, em quatro traços de concreto: CC0, CC7,5, CC15 e CC22,5, de acordo com os percentuais de coque. Para avaliar o desempenho do concreto condutivo no fechamento de fissuras, produziu-se placas de concreto utilizando o traço com teor de coque cujos resultados de resistência à compressão e à tração se mostraram mais altos enquanto a resistividade elétrica se mostrou mais baixa, a fim de aplicação de carga elétrica para avaliar sua autocicatrização. Verifica-se, por meio destes ensaios, que quanto maior o teor de coque, há uma redução no abatimento do concreto fresco, na densidade do concreto e no módulo de elasticidade, enquanto a resistividade do concreto aumenta. A resistência à tração não apresenta variações entre os teores e a resistência à compressão apresenta um traço com aumento, o CC15, enquanto os demais não apresentam mudança. A presença de coque metalúrgico não afeta a capacidade de autocicatrização do concreto, embora tenha provocado aumento na condução de calor das placas de concreto.

Palavras-chave: Resistividade; coque metalúrgico; agregado; concreto condutivo; autocicatrização.

ABSTRACT

As it is a material with low tensile strength, concrete is susceptible to the appearance of cracks, which allows water and other aggressive agents to penetrate its interior. Self-healing concrete is called the concrete that has the ability to close its cracks. One of the self-healing mechanisms of concrete is the induction of temperature rise. Conductive concrete is composed of cement and aggregates that increase electrical conductivity, as well as the water/cement ratio. It is possible to point out the cost and practicality advantage of using conductive concrete with metallurgical coke in the de-icing of bridges and roads. The present work aims to analyze the applicability of metallurgical coke as an aggregate in conductive concrete for self-healing. For this purpose, different mixes of concrete were used with different replacement contents of fine aggregate by coke. For the characterization of the aggregate, it was carried out unit mass, specific mass, particle size test, XRD, XRF and EDS were applied. For the analysis of the influence of replacing the fine aggregate for metallurgical coke, slump test, compressive strength, modulus of elasticity, tensile strength by diametrical compression, density and electrical resistivity in four concrete mixes: CC0, CC7.5, CC15 and CC22.5, according to the coke percentages. To evaluate the performance of conductive concrete in closing cracks, concrete plates were produced using a mixture with coke content whose compressive and tensile strength results were higher while electrical resistivity was lower, to apply an electrical charge to evaluate its self-healing ability. It is verified, through these tests, that the higher the coke content, there is a reduction in the slump of fresh concrete, in the concrete density and in the modulus of elasticity, while the resistivity of the concrete increases. Tensile strength does not vary between grades and compressive strength shows an increase in one trace, CC15, while the others do not change. The presence of metallurgical coke does not affect the self-healing capacity of the concrete, although it caused an increase in the heat conduction of the concrete slabs.

Key-words: Resistivity; metallurgical coke; aggregate; conductive concrete; Self-healing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma representativo das principais etapas do procedimento experimental. Fonte: Do autor (2024).....	34
Figura 2 - Coque metalúrgico. Fonte: Do autor (2024).....	35
Figura 3: Ensaio de resistência à compressão realizado no concreto endurecido após 28 dias. Fonte: Do autor (2024).....	43
Figura 4: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado no concreto endurecido após 28 dias. Fonte: Do autor (2024).....	45
Figura 5: Ensaio de módulo de elasticidade realizado no concreto endurecido após 28 dias. Fonte: Do autor (2024).....	46
Figura 6 - Esquema representando a disposição das hastes de cobre nos corpos de prova (a) longitudinalmente, (b) seção transversal. As medidas estão em centímetros. Fonte: Do autor (2024).	47
Figura 7: (a) Ensaio de resistividade elétrica, (b) terrômetro utilizado e (c) detalhe dos corpos de prova para ensaio. Fonte: Do autor (2024).	48
Figura 8: Representação de uma das placas submetidas ao carregamento elétrico. Fonte: Do autor (2024).	49
Figura 9: Placa de concreto sob termografia infravermelha. Fonte: Do autor (2024).	50
Figura 10: Curva granulométrica do coque metalúrgico e da areia. Fonte: Do autor (2024).....	52
Figura 11: Difrátograma do cimento CP IV-32-RS. Fonte: Do autor (2024).	53
Figura 12: Difrátograma do coque metalúrgico utilizado. Fonte: Do autor (2024).	54
Figura 13: Valores de abatimento para cada traço utilizado. Fonte: Do autor (2024).	57
Figura 14: Comparativo dos resultados de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral de cada traço. Fonte: Do autor (2024).	58
Figura 15: Valores obtidos através do ensaio de módulo de elasticidade (GPa). Fonte: Do autor (2024).	60
Figura 16: Valores de resistividade elétrica obtidos para cada traço de substituição de coque metalúrgico. Fonte: Do autor (2024).	61

Figura 17: Diagrama dos resultados dos traços estudados (a) Ensaio de compressão, (b) ensaio de tração por compressão diametral e (c) ensaio de resistividade elétrica. Fonte: Do autor (2024).....	63
Figura 18: Sobreposição dos diagramas de ensaios de resistência mecânica e resistividade. Fonte: Do autor (2024).	64
Figura 19: Microscopia Eletrônica de Varredura dos concretos nos traços de concreto com e sem presença de coque metalúrgico. Fonte: Do autor (2024). ..	66
Figura 20: medição de temperatura (a) da placa de concreto CC0 no início da aplicação de carga; (b) da placa de concreto CC0 no final da aplicação de carga; (c) da placa de concreto CC15 no início da aplicação de carga; (d) da placa de concreto CC15 no final da aplicação de carga. Fonte: Do autor (2024).....	67
Figura 21: Representação das medições realizadas de tensão elétrica nas placas de concreto (a) CC0 e (b) CC15. Fonte: Do autor (2024).	68
Figura 22: Fotografias térmicas das placas de concreto (a) CC0 antes de ser posto em estufa; (b) CC15 antes de ser posto em estufa; (c) CC0 após uma hora na estufa e (d) CC15 após uma hora na estufa. Fonte: Do autor (2024).	69
Figura 23: Medição termográfica das placas passadas as 24h na estufa (a) CC0 e (b) CC15. Fonte: Do autor (2024).....	70
Figura 24: Fissura nas placas de concreto (a) CC0 antes de ser posto em estufa; (b) CC15 antes de ser posto em estufa; (c) CC0 após permanecer em estufa por 24 horas e (d) CC15 após permanecer em estufa por 24 horas. Fonte: Do autor (2024).....	71
Figura 25: Resultados do ensaio de carbonatação no concreto (a) CC0; (b) CC15, na extremidade da placa e (c) CC15 no centro da placa. Fonte: Do autor (2024). ..	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland	25
Tabela 2: Potencial de fechamento de fissuras dos mecanismos de autocicatrização mais empregados	32
Tabela 3 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).....	38
Tabela 4 - Traços utilizados em pesquisas semelhantes a concreto condutivo.	40
Tabela 5 - Traços de substituição de agregados por coque.....	40
Tabela 6: Valores obtidos nos ensaios de caracterização do coque metalúrgico.	51
Tabela 7: Espectrometria de FRX do cimento CP IV-32-RS.	55
Tabela 8: Espectrometria de FRX do coque metalúrgico.	56
Tabela 9: Valores obtidos no ensaio de densidade do concreto endurecido.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CECAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
CerTec	Laboratório de Cerâmica Técnica
DRX	Difração de raios X
FRX	Fluorescência de raio X
IDT	Instituto de Engenharia e Tecnologia
LDCM	Laboratório de Cerâmica e Construção Civil
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
NBR	Norma Brasileira
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 OBJETIVOS	23
2.1 OBJETIVO GERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 CONCRETO	24
3.1.1 CIMENTO PORTLAND	24
3.1.2 AGREGADOS	26
3.2 CONCRETO CONDUTIVO	26
3.3 COQUE METALÚRGICO	27
3.3.1 CARVÃO MINERAL	28
3.3.2 PROCESSO DE COQUEIFICAÇÃO	28
3.3.3 QUESTÕES AMBIENTAIS	28
3.3.4 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO COQUE METALÚRGICO	29
3.4 AUTOCICATRIZAÇÃO EM CONCRETOS	30
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
4.1 MATERIAIS	34
4.2 MÉTODOS	35
4.2.1 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	35
4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	35
4.2.2.1 MASSA ESPECÍFICA	35
4.2.2.2 MASSA UNITÁRIA	36
4.2.2.3 TEOR DE ENXOFRE	37
4.2.2.4 DISTRIBUIÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	37
4.2.2.5 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X E ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	39
4.2.2.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	39
4.2.3 MISTURA DOS MATERIAIS	39
4.2.4 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	41
4.2.5 ENSAIOS	41
4.2.5.1 MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA	41
4.2.5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	42

4.2.5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	44
4.2.5.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE	45
4.2.5.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	46
4.2.5.6 AUTOCICATRIZAÇÃO	48
4.2.5.7 CARBONATAÇÃO	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	51
5.2 CONCRETO.....	56
5.2.1 ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE	56
5.2.2 DENSIDADE	57
5.2.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	58
5.2.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	59
5.2.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	60
5.2.6 DEFINIÇÃO DO TRAÇO PARA EXECUÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO	62
5.2.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	65
5.2.8 AUTOCICATRIZAÇÃO.....	66
5.2.8 CARBONATAÇÃO	71
6 CONCLUSÕES	74
7 SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS	75
REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Descoberto ao final do século XIX, o concreto é intensivamente usado desde o século XX, sendo o segundo material mais utilizado pelo homem, atrás apenas da água (HELENE; ANDRADE, 2010). É um material composto de cimento, água e agregados graúdos e miúdos, como brita e areia, e pode conter aditivos para obter propriedades especiais.

Embora seja o segundo material mais utilizado no mundo, o concreto possui uma série de limitações (DE FIGUEIREDO, 2005), tais como baixa capacidade de deformação antes da ruptura, comportamento frágil, baixa resistência à tração, suscetibilidade à fissuração e baixa condutividade elétrica. É possível, ao alterar a composição dos agregados e aditivos, obter diferentes características e usos para o concreto. Ao adicionar fibras na composição do concreto, por exemplo, pode-se controlar a fissuração do concreto. Adicionando-se o aço ao concreto, tem-se o concreto armado, que aumenta significativamente a resistência à tração (BOTELHO, 2018). Ao trocar ou adicionar alguns agregados do concreto, pode-se também alterar suas características condutivas, para que se tenha o concreto condutivo.

A resistividade elétrica do concreto é definida principalmente pela relação água/cimento e o teor de agregados. De acordo com Lencioni e Lima (2010), quanto maior a relação água/cimento, menor a resistividade do concreto, pois é maior o volume de poros. E quanto maior for o teor de agregados, maior será seu efeito de obstrução da corrente elétrica. Segundo Vicente (2010), os agregados comumente utilizados, como areia e brita, possuem alta resistividade elétrica. Além disso, a presença de armadura e o teor de umidade também são fatores importantes na definição da resistividade elétrica. Quando muito baixa, porém, a resistividade elétrica pode causar corrosão das armaduras pela passagem da corrente elétrica, devendo, portanto, ser superior a 200 kΩ mm (SANTOS, 2006).

Sabe-se que, sendo um material de baixa resistência à tração, o concreto é suscetível ao aparecimento de fissuras, possibilitando a penetração de água ao interior do concreto e outros agentes agressivos, que reduzem a durabilidade e possuem potencial degradante das armaduras (SCHMIDT et al., 2022). Para adquirir características de autocicatrização, ou seja, a regeneração de fissuras, pode-se

adotar a aplicação de concreto condutivo, em que, com a aplicação de carga elétrica e elevação da temperatura, é possível regenerar esta fissuração (DAI; WANG; HASAN, 2013).

O concreto condutivo pode ser utilizado em residências e edifícios comerciais para aquecer o ambiente, além de também ser utilizado na pavimentação de rodovias, para ser aquecido para evitar ou regenerar fissuras (DAI; WANG; HASAN, 2013), além de provocar o degelo das vias. Pode também ser utilizado para aterramento da edificação, mesmo que seja atingido por uma corrente de descarga muito elevada, pois “experimentos em todo o mundo tem demonstrado que as correntes de descarga se dissipam no aterramento sem provocar danos quando o sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) é realizado de modo adequado” (VICENTE, 2010, p. 2).

O concreto condutivo é composto por cimento e agregados que melhorem a condutividade elétrica do concreto (CANNABRAVA; FERREIRA; PASQUA, 2016). Dos agregados condutivos, cita-se o coque metalúrgico, tendo em vista que ele se destaca por suas características físico-químicas, baixo teor de enxofre e custo menor que outros agregados, como o sulfato de cobre e o grafite, por exemplo.

O coque metalúrgico é produzido através do processo de coqueificação, que consiste no carvão metalúrgico ser submetido a um tratamento térmico na ausência de oxigênio para produzir líquidos, gases e um resíduo sólido poroso rico em carbono (o coque), cuja temperatura, ao final do processo, fica entre 900 e 1 000 °C (AJIACO CASTRO, 2011).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (2020), no ano de 2019, o setor industrial consumiu mais de 10,4 milhões de toneladas de coque, sendo cerca de 95% apenas para o setor siderúrgico. Para a produção de cimento, destinou-se cerca de 65 mil toneladas de coque, o que representa menos de 1% do consumo total.

Algumas pesquisas brasileiras mostram que o uso de concreto condutivo com a utilização de coque é uma possibilidade viável na utilização de postes de concreto como estruturas de aterramento em redes aéreas de distribuição de energia. Ao utilizar coque metalúrgico, de acordo com Almaguer, Saquetti e Coelho (2021), é possível reduzir a resistividade elétrica da base engastada dos postes entre cinco e nove vezes em comparação à dos postes convencionais. Pode-se

apontar, ainda, a vantagem em custo e praticidade da utilização do concreto condutivo com coque metalúrgico no degelo de pontes e vias. De acordo com Yehia e Tuan (1998), o concreto condutivo leva cerca de 30 minutos para elevar a temperatura de uma laje experimental de pequena escala de $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o coque tendo um custo quatro vezes inferior ao custo da fibra de aço para desempenhar a mesma função.

Para a obtenção de concreto condutivo, utiliza-se materiais de carbono, como fibras de carbono, nanotubos de carbono e grafeno, por suas excelentes propriedades eletrônicas, além de desempenharem função de reforço na matriz cimentícia, aumentando a durabilidade do compósito e reduzindo a propagação de fissuras (MENDONÇA, 2019). Entretanto, estes materiais possuem alto custo, o que inviabiliza a sua aplicação. Como alternativa, estuda-se a aplicação de coque metalúrgico como agregado para concreto condutivo.

Com base nestas informações, o presente trabalho visa analisar a aplicabilidade do coque metalúrgico como agregado para concreto condutivo, visando obter propriedades autocicatrizantes. Para tal, faz-se a substituição de agregado miúdo por coque metalúrgico em diferentes teores em um mesmo traço de concreto, seguido de ensaios mecânicos e carregamento elétrico para elevação da temperatura e conseqüente fechamento de fissuras.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a aplicabilidade do coque metalúrgico como agregado para concreto condutivo para obtenção de propriedades autocicatrizantes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir os teores de substituição de agregado miúdo do concreto por coque metalúrgico, a fim de determinar o traço com maior resistência à compressão e à tração e menor resistividade;
- Avaliar a capacidade do concreto endurecido com a aplicação de coque na condutividade elétrica e térmica para regeneração de fissuras em concreto condutivo;
- Avaliar a capacidade de cicatrização de fissuras do concreto condutivo endurecido contendo adição de coque metalúrgico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os materiais cimentícios podem ser definidos como os materiais mais importantes produzidos pelo homem, pois, devido sua abundância, versatilidade, durabilidade e resistência, permitem a construção de todas as principais obras que o ser humano necessita para viver (BASTOS, 2006).

3.1 CONCRETO

O concreto é um material compósito, que, por definição, é um material que combina pelo menos duas fases distintas, denominadas de matriz e reforço (NETO, PARDINI, 2021), sendo no concreto a fase matriz cimentícia, cuja função é de aglomerar a fase reforço, que se apresenta através dos agregados da mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Bastos (2006), o concreto endurecido apresenta como principais características boa resistência à compressão, baixa resistência à tração e comportamento frágil, rompendo-se com pequenas deformações.

Por ser um material de uso amplamente difundido (HELENE; ANDRADE, 2010), o concreto possui uma série de variações, com diferentes aplicações e características, como o concreto leve, que possui menor densidade que o concreto convencional (THIENEL, HALLER, BEUNTNER, 2020); o concreto de ultra alto desempenho, que possui maior resistência e durabilidade (TAYEH et al., 2022); concreto condutivo, que utiliza incorporações de determinados materiais, como agregados baseados em carbono, para reduzir a resistividade elétrica e térmica do concreto e, assim, conduzir calor e temperatura (DEHGHANPOUR et al., 2020); entre outras aplicações.

3.1.1 CIMENTO PORTLAND

A NBR 16697:2018 define cimento Portland como um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, com adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais. Misturado homogeneamente com materiais pozolânicos (materiais silicosos ou silicoaluminosos), tem-se o cimento Portland

pozolânico. A Tabela 1 traz a designação dos cimentos Portland, conforme a normativa, que correspondem a adições e propriedades especiais. São identificados pela sigla, seguido da classe de resistência à compressão e sufixo, quando aplicável.

Tabela 1: Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland Comum	Sem adição	CP I	25 ,32 ou 40	RS ou BC
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland Composto	Com escória granulada de alto forno	CP-II E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto forno		CP III		
Cimento Portland Pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	
	Não estrutural	CPB	-	-

O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018).

3.1.2 AGREGADOS

Agregado, segundo a NBR 9935:2011, é um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto.

De acordo com a normativa, podem ser agregados naturais, se utilizado da forma que se encontra na natureza, podendo ser lavados, classificados ou britados, agregados artificiais, se resultante de processo industrial envolvendo alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima original, ou agregados reciclados, se obtidos de reciclagem de rejeitos ou subprodutos da produção industrial, mineração ou construção ou demolição da construção civil.

Os agregados podem ser graúdos, quando os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ou miúdos, quando passam pela peneira de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, segundo a NBR 7211.

3.2 CONCRETO CONDUTIVO

Segundo Mendonça (2019), conforme o concreto aumenta o grau de hidratação, resulta na diminuição e conectividade dos poros existentes na pasta cimentícia. Esta redução de porosidade causa um bloqueio no caminho percorrido pelos portadores de carga elétrica, o que causa um aumento na resistividade elétrica do concreto endurecido. Entretanto, ao se incorporar elementos condutivos na matriz cimentícia, forma-se uma rede elétrica condutora dentro do compósito, obtendo-se, portanto, um concreto com propriedades condutoras de eletricidade: o concreto condutivo.

De acordo com Cordon et al. (2019) e Dehghanpour et al. (2020), o concreto condutivo pode ser utilizado para aquecimento do ambiente e degelo de vias. Em regiões frias, pode ser empregado para substituir a mão de obra e maquinário para a remoção de gelo e neve das rodovias, evitando a utilização de sal e de outros químicos que danificam o aço no concreto armado. Dai, Wang e Hasan (2013) citam ainda a usabilidade de concreto condutivo na aplicação de carga elétrica para evitar e regenerar fissuras.

Cordon et al. (2019) apresentam um estudo de concreto condutivo utilizando percentuais de grafita. O estudo demonstra que, com 15% de adição de grafita ao concreto, a temperatura superficial chegou a 78 °C com uma taxa de aquecimento de 2,65 °C.min⁻¹. Com 20%, a temperatura superficial chegou a 83 °C com uma taxa de aquecimento de 2,95 °C.min⁻¹. Porém, a adição de grafita provoca queda nos resultados de resistência à compressão do concreto, reduzindo em metade em relação ao concreto sem grafita.

3.3 COQUE METALÚRGICO

De acordo com Ajiaco Castro (2011), o coque metalúrgico é definido como o resíduo carbonoso poroso de alta resistência resultado do processo de coqueificação, um tratamento térmico em atmosfera inerte. À temperatura entre 900 e 1100 °C, os carvões metalúrgicos fundem, incham, se aglomeram e solidificam no coque metalúrgico.

3.3.1 CARVÃO MINERAL

O carvão é uma rocha sedimentar carbonosa formada ao longo de milhões de anos a partir de alterações físicas e químicas em acúmulos de materiais orgânicos e inorgânicos, composto de carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre e nitrogênio (FLORES, 2018).

As reservas mundiais de carvão totalizam 894 302 megatoneladas, sendo 70% delas nos Estados Unidos, Rússia, China, Austrália e Índia e 0,3% das reservas encontram-se no Brasil (AGRA, 2016). Os principais depósitos de carvão no Brasil encontram-se nos estados da região Sul do país, sendo 89% destas reservas localizadas no Rio Grande do Sul, 10% em Santa Catarina e menos de 1% no Paraná e São Paulo (FLORES, 2018).

Os principais setores que empregam o carvão mineral são a geração de energia elétrica, papel e celulose, cerâmica, cimento e petroquímica e siderurgia e metalurgia (DNPM, 2015).

3.3.2 PROCESSO DE COQUEIFICAÇÃO

Basicamente, o processo de coqueificação é o aquecimento de carvão mineral com propriedades coqueificantes em ausência de oxigênio à temperatura de 900 °C a 1 100 °C (AJIACO CASTRO, 2011 e FLORES, 2018). Durante o aquecimento, os carvões apresentam uma transformação termoplástica, na qual ocorre liberação de voláteis e formação de uma fase líquida.

No intervalo plástico, que ocorre entre 350 °C e 500 °C, encontra-se duas reações fundamentais para a qualidade do coque: o craqueamento, que consiste na ruptura de ligações covalentes de moléculas complexas para moléculas mais simples e a condensação/aromatização, que forma um grupo aromático maior pela desidrogenação e recombinação por formação de ligações carbono-carbono, gerando um resíduo sólido carbonoso (AGRA, 2016). Após, em temperaturas mais elevadas, ocorre a liberação de gases do coque, o que leva a sua fissuração (FLORES, 2018).

3.3.3 QUESTÕES AMBIENTAIS

Uma desvantagem do processo de coqueificação é o seu potencial como poluente do ar, por sua emissão de gases e materiais particulados. O processo emite hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), que, em sua forma particulada, atinge tamanho respirável. “Mais de 170 HPAs já foram identificados no efluente, sedimento e água de coquearias” (CARVALHO, 2004, p. 446). De acordo com o Instituto Nacional do Câncer (2018), a exposição a HPAs está associada ao câncer de pulmão, de pele, de bexiga, de esôfago e de sistema hematopoiético.

Entretanto, com tecnologias empregadas, como uso de lavadores de gases, filtros de mangas, bacias de decantação e estação de tratamento de efluentes, é possível reduzir drasticamente o potencial poluidor da produção de coque. Com o emprego de lavadores de gases, filtros de mangas, sistemas de exaustores, bacias de decantação e estação de tratamento de efluentes, é possível manter os níveis de emissão de gases, particulados e outros materiais contaminantes dentro dos níveis aceitáveis.

Os lavadores de gases removem partículas sólidas nos gases gerados em processos de industrialização. O processo utiliza fluidos líquidos para a remoção das partículas, que são coletadas por gotas que devem ser removidas ao final do processo. “Os gases passam por um spray ou névoa formada pelo fluido de lavagem, as partículas são então absorvidas pelo fluido” (DE FREITAS, 2012, p. 32). É possível trabalhar com gases tóxicos, agressivos ou a altas temperaturas.

Segundo Carvalho (2018), o funcionamento dos filtros de mangas baseia-se na entrada de ar com particulados, que passa através das mangas montadas, onde é filtrado. O material particulado fica retido nas mangas e o ar filtrado é liberado no ambiente. Faz-se necessário a limpeza das mangas quando há queda de pressão no filtro ou periodicamente.

O sistema de bacias de decantação serve para a limpeza dos efluentes (FRASSON, 2018). Alinhado à estação de tratamento de efluentes, separa o particulado da água por meio de decantação, com a ajuda de floculantes. Com a adição de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, elevam o pH da água para reutilização em sistemas fechados ou liberação no ambiente.

3.3.4 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO COQUE METALÚRGICO

De acordo com Baptista e Cardoso (2013), por ser produto de carvão metalúrgico e coque verde de petróleo, o coque metalúrgico possui baixa resistividade térmica e elétrica, devido a seus elevados teores de carbono fixo e poder calorífico e baixos teores de enxofre e cinzas (impurezas). Quando o coque metalúrgico tem em sua produção a utilização de carvão alto volátil (teor de matéria volátil entre 31 e 40%), há um aumento em sua porosidade (MALAQUIAS, 2019), o que também contribui para sua baixa resistividade elétrica.

Sabe-se que o coque metalúrgico é um material poroso. E, “como acontece com outros materiais porosos, a resistência da pasta de cimento depende preliminarmente da porosidade” (CAMPITELI, 1987, p. 6). Quanto mais poroso é um agregado, maior a facilidade da água de percolar entre a mistura e reduzir a resistência à compressão e à tração. Segundo Angulo e Figueiredo (2011), é possível, porém, contornar esta queda de resistência à compressão e à tração reduzindo a relação água/cimento do concreto, o que reduz a porosidade da pasta.

3.4 AUTOCICATRIZAÇÃO EM CONCRETOS

Por ser um material de baixa resistência à tração, o concreto é suscetível ao aparecimento de fissuras o que possibilita a penetração de água ao seu interior e outros agentes agressivos (PACHECO, 2020).

O aparecimento de fissuras é uma das manifestações patológicas mais comuns no concreto e podem ser causadas por diversos fatores, sendo eles a execução da estrutura, movimentações estruturais, sobrecargas ou concentrações de tensões, características ambientais como temperatura e umidade, situações de projeto ou ainda induzidas por mais de um tipo de fenômeno (PACHECO, 2020 e TERREZO, 2021).

As fissuras podem ser ativas ou passivas. Fissuras ativas são as que apresentam alguma variação nas aberturas de acordo com a variação das tensões aplicadas e podem ser divididas ainda em sazonais, quando estão ligadas à variação de temperatura, ou progressivas, quando possuem aumento progressivo ao longo do tempo. As fissuras passivas são fissuras já estabilizadas, provocadas por processos que não seja o excesso de esforços (TERREZO, 2021 e LIMA, 2021).

A NBR 9573:2012 apresenta uma classificação das fissuras de acordo com seu nível de abertura, sendo microfissuras para espessuras de até 0,05 mm; fissuras, para espessuras de 0,06 a 0,5 mm, trincas para espessuras de 0,6 à 1,0 mm, enquanto a NBR 15575-2:2013 define “trinca” somente como forma coloquial de “fissura”. A NBR 6118:2014, porém, traz como limite de fissuração para concreto utilizado em estruturas espessura máxima de 0,4 mm.

Tratamentos comuns de fissurações incluem a aplicação de tintas e selantes flexíveis, que absorvem a abertura causada pelas tensões. Quando a fissura é oriunda de movimentos estruturais, porém, o tratamento é mais complexo e exige estudos mais detalhados (LIMA, 2021).

Dá-se o nome de concreto autocicatrizante ao concreto que possui a capacidade de fechar suas fissuras (PACHECO, 2020). Os processos de autocicatrização em materiais cimentícios podem ser divididos em duas categorias, de acordo com Alghamri, Kaellopoulos e Al-Tabbaa (2016), sendo elas: autocicatrização autogênica, quando o fenômeno de fechamento de fissuras ocorre utilizando componentes que já estão no concreto; e autocicatrização autônoma, quando envolve o uso de adições de materiais que não constituem convencionalmente o concreto, como agregados leves, aditivos, entre outros.

A autocicatrização autogênica é um processo natural no concreto. Os mecanismos mais importantes são a carbonatação de hidróxido de cálcio e a hidratação de grãos parcialmente não-hidratados de cimento, este último sendo menos estudado que a carbonatação (ROIG-FLORES, FORMAGINI, SERNA, 2021).

No caso da carbonatação, cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3) precipitam nas superfícies da fissura devido a reações químicas entre o Ca^{2+} , presente na matriz de concreto hidratado, e o CO_2 presente na água da fissura. Esta precipitação é capaz de reduzir a permeabilidade da fissura no concreto e recuperar fissuras de até 0,45 mm (RAJCZAKOWSKA, 2019, PACHECO, 2020, ROIG-FLORES, FORMAGINI e SERNA, 2021 e AMMAR, 2022).

A incorporação de materiais cimentícios suplementares pode aumentar a autocicatrização autogênica, tais como sílica ativa, cinza volante, metacaulim e escória de alto-forno (ROIG-FLORES, FORMAGINI e SERNA, 2021).

O mecanismo de autocicatrização autônoma utiliza materiais que são misturados ou introduzidos encapsulados no concreto para provocar o fechamento

das fissuras e que não são materiais convencionais do concreto (ALGHAMRI, KAELLOPOULOS e AL-TABBAA, 2016). Estes materiais podem ser polímeros superabsorventes, bactérias, agentes expansivos especiais, tubos com resinas ou adesivos, silicatos microencapsulados, aditivos cristalizantes, entre outros (ROIG-FLORES, FORMAGINI e SERNA, 2021 e AMMAR, 2022).

Uma das formas de se obter características autocicatrizantes no concreto é a utilização de aditivos cristalizantes, em que os ingredientes ativos do cristalizante desencadeiam reações catalíticas compatíveis com a hidratação do concreto, formando cristais e colmatando as fissuras de até 0,6mm (AMMAR, 2022 e ALVES et al., 2023).

Outro mecanismo de autocicatrização é a elevação de temperatura do concreto. De acordo com Joenck e Villena (2018), a autorregeneração de fissuras ocorre entre 30 e 70 °C e pode-se citar a indução eletromagnética como método de aceleração da autocicatrização, que consiste em induzir uma corrente elétrica para a elevação da temperatura da mistura.

A Tabela 2 apresenta o potencial de fechamento de fissuras dos mecanismos de autocicatrização mais empregados, tendo como base os estudos realizados por Rajczakowska (2019), Roig-Flores, Formagini e Serna (2021), Pacheco (2020) e Ammar, 2022.

Tabela 2: Potencial de fechamento de fissuras dos mecanismos de autocicatrização mais empregados

Mecanismo	Agente	Fissura colmatada
Autogênico	Materiais cimentícios suplementares	Até 0,15 mm
	Carbonatação de hidróxido de cálcio	Até 0,45 mm
	Aditivos cristalizantes	Até 0,60 mm
Autônomo	Polímeros superabsorventes	Até 0,20 mm
	Silicatos microencapsulados	Até 0,30 mm
	Tubos com resina ou adesivos	Até 0,50 mm

Bactérias

Até 0,80 mm

Fonte: Autor, (2024).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As principais etapas do procedimento experimental que foi seguido para o desenvolvimento da dissertação de mestrado encontram-se no fluxograma da Figura 1.

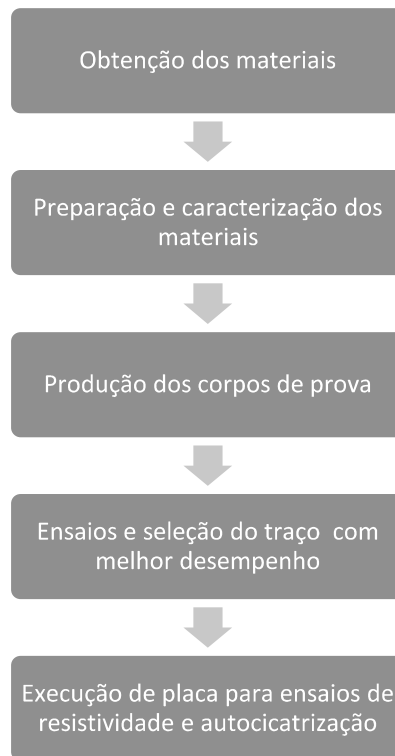


Figura 1 - Fluxograma representativo das principais etapas do procedimento experimental. Fonte: Do autor (2024).

O detalhamento das etapas é apresentado nas sessões seguintes.

4.1 MATERIAIS

O cimento escolhido foi o CP IV-32-RS, por sua resistência a sulfatos e por ser mais sustentável, com menos gasto energético em sua fabricação (LOUZEIRO, 2018). Como agregado miúdo, a areia e agregado graúdo a brita basáltica.

O coque utilizado foi fornecido por uma empresa do ramo de coqueria da região sul do estado de Santa Catarina.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

O coque metalúrgico foi fornecido pela empresa já pulverizado, conforme Figura 2.



Figura 2 - Coque metalúrgico. Fonte: Do autor (2024).

4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.2.2.1 MASSA ESPECÍFICA

A determinação da massa específica do agregado miúdo seguiu as recomendações descritas na ABNT NBR 16916: 2021, sendo obtida por meio das

Equações 1 e 2. O procedimento foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil, pertencente ao Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT/UNESC).

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (1)$$

Em que:

V_a : volume de água adicionado ao frasco (cm^3);

m_1 : massa do conjunto frasco + agregado (g);

m_2 : massa total, frasco + agregado + água (g) e

ρ_a : massa específica da água (g/cm^3).

$$d_m = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (2)$$

Em que:

d_m : massa específica do agregado (g/cm^3);

m : massa da amostra seca em estufa (g);

V : volume do frasco (cm^3) e

m_s : massa da amostra na condição saturada e superfície seca (g), condição na qual os poros das partículas dos agregados estão saturados (preenchidos de água), porém sem excesso de água na superfície.

4.2.2.2 MASSA UNITÁRIA

A técnica aplicada para a caracterização da massa unitária foi a do método A da NBR 16972:2021, a qual exige que o material seja posto no recipiente em 3 camadas e compactado por 25 golpes cada camada antes da próxima e depois o material é reguado. Para o material solto, utilizou-se o método C da NBR 16972:2021, cujo recipiente é cheio e reguado sem compactação. Cada método é feito três vezes e o resultado é obtido através da média de cada repetição. A areia e a brita basáltica utilizadas também foram submetidas ao ensaio pelo método C. O

ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais da Construção Civil, pertencente ao Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT/UNESC).

4.2.2.3 TEOR DE ENXOFRE

O teor de enxofre foi determinado através do equipamento marca *Sundy*, modelo SDS-IVa, onde a amostra é queimada em uma corrente de ar purificado à temperatura de 1150 °C. Durante esta combustão, todo o enxofre é oxidado para óxidos de enxofre gasosos (SO_2 e SO_3), que se dissolvem e formam ácido sulfuroso (H_2SO_3). Determinada a quantidade de ácido presente na amostra, é possível determinar, em porcentagem, a quantidade de enxofre do coque. O procedimento do equipamento é semelhante ao apontado na norma ASTM D 4239. O resultado é obtido diretamente no *software* do aparelho.

4.2.2.4 DISTRIBUIÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para identificar a distribuição da composição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo, suas dimensões máximas características e seus módulos de finura, adotou-se os procedimentos da ABNT NBR 17054: 2022.

As amostras foram secas em estufa a (105 ± 5) °C por um período de 24 horas. Após resfriadas a temperatura ambiente, foram inseridos 1.000 g em porções na peneira superior do conjunto, cujas malhas se encontram na Tabela 3. Após cinco minutos de agitação mecânica, foram identificadas as massas retidas em cada peneira. Executou-se o ensaio no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), pertencente ao IDT/UNESC.

Tabela 3 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

Série normal	Série intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
0,60 mm	-
0,30 mm	-
0,15 mm	-

Fonte: ABNT NBR 17054 (2022).

Com os percentuais retidos acumulados, foi determinada a dimensão máxima característica do agregado e o módulo de finura pelos critérios estabelecidos pela mesma norma:

- A dimensão máxima do agregado corresponde à abertura nominal da peneira da série normal ou intermediária, em milímetros, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa;
- O módulo de finura se define pela soma dos percentuais retidos acumulados em massa de um agregado nas peneiras da série normal dividida por 100.

4.2.2.5 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X E ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

O padrão de difração de raios x do cimento foi analisado utilizando um difratômetro difratômetro Bruker – D8 com goniômetro theta – theta, radiação k- α com tubo de cobre operando com 40 kV de voltagem e 40 mA de corrente elétrica. A velocidade e o intervalo de varredura do goniômetro são de 4 segundos para 0,02° do goniômetro de 4° a 70° 2 theta. A quantificação das fases cristalinas identificadas foi realizada pelo Método de Rietveld com GOF=1.52 e Rwp=12.07 na amostra de cimento e GOF=1.39 e Rwp=11.91 na amostra de coque. A espectrometria foi realizada em um espectrômetro de FRX modelo PW2400, segundo PR-CR-098. Ambos os equipamentos pertencentes ao LDCM do SENAI SC.

4.2.2.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A microestrutura do concreto foi investigada utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca JEOL, modelo JSM-6390, no LDCM do SENAI SC.

4.2.3 MISTURA DOS MATERIAIS

A dosagem do concreto adotada baseia-se nos trabalhos de Cardozo (2019) e Graupmann (2019). A Tabela 4 apresenta os traços que foram utilizados como base para a definição do traço de referência, com teor nulo de coque, e auxiliaram na definição dos percentuais de substituição do agregado miúdo.

Tabela 4 - Traços utilizados em pesquisas semelhantes a concreto condutivo.

Autor	Traço utilizado (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo) (kg)	Relação a/c	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Substituição do agregado (%)
GRAUPMANN, Olaf et al. (2019)	1: 1,95: 3	0,60	25,90	5
CARDOZO, Ariádnny Comin	1:1,5:0,05:0,25	0,55	19,61	25

Fonte: Do autor (2024).

Foram feitos três corpos de prova com as diferentes porcentagens de substituição do agregado miúdo (de 0,15 a 4,8 mm) por coque, além do traço de referência, para cada ensaio realizado. Os teores de substituição estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Traços de substituição de agregados por coque.

Nomenclatura da mistura	Traço utilizado (cimento:areia:coque:brita) (kg)	Relação a/c	Substituição do agregado (%)
CC0 (referência)	1:2:0:3	0,59	0
CC7,5	1:1,85:0,15:3	0,59	7,5
CC15	1:1,7:0,30:3	0,59	15
CC22,5	1:1:55:0,45:3	0,59	22,5

Fonte: Do autor (2024).

A mistura dos componentes se deu em uma betoneira, tendo por ordem a brita e a areia primeiro, junto à metade da quantidade de água, e posteriormente a adição do cimento, o coque metalúrgico e o restante da água, a mistura seguiu até que a consistência do concreto na betoneira ficasse em forma de pasta, avaliando visualmente a homogeneidade da mistura. Em seguida, realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone com o concreto fresco, conforme NBR 16889:2020. O equipamento utilizado deve ser umedecido, e o concreto adicionado ao molde em três camadas, cada uma recebendo 25 golpes com a haste de socamento e nivelado com régua no topo.

4.2.4 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após o ensaio de abatimento, foi feita a moldagem dos corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e dos corpos de prova prismáticos de dimensões de 12 cm de largura, 6 cm de altura e 17 cm de comprimento. Todos os corpos de prova cilíndricos ficaram sete dias em cura ao ar ambiente no mês de agosto e, em seguida, os destinados ao ensaio de densidade foram postos em estufa à aproximadamente 105 °C por 21 dias, conforme a NBR 9778:2009. Os demais foram submersos pelo mesmo período. Os corpos de prova destinados ao ensaio de resistividade elétrica ficaram os 28 dias ao ar.

4.2.5 ENSAIOS

4.2.5.1 MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DE ÁGUA

O ensaio de massa específica e absorção de água tem por base a NBR 9778:2009. A amostra deve ser seca em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por um período de 72 horas. Então, deve-se medir a massa da amostra. A norma define a saturação da amostra com a imersão em água à temperatura de 23 ± 2 °C por um período de 72 horas. Após, deve-se levar a água progressivamente à ebulição, entre 15 e 30 minutos, e esfriada naturalmente e ter sua massa registrada. Por fim, retirar a amostra da água e enxugá-la com pano úmido e registrar novamente a sua massa. O percentual de absorção pode ser calculado com a Equação 3.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

A é o teor de absorção, expresso em percentual;

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_s é a massa da amostra seca em estufa.

A massa específica seca pode ser calculada com a Equação 4.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (4)$$

Em que:

ρ_s é a massa específica seca;

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_s é a massa da amostra seca em estufa;

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

A massa específica saturada pode ser calculada com a Equação 5.

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (5)$$

Em que:

ρ_{sat} é a massa específica saturada;

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura

A massa específica real pode ser calculada com a Equação 6.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (6)$$

Em que:

ρ_r é a massa específica real;

m_s é a massa da amostra seca em estufa;

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

4.2.5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio mais comum para avaliação do emprego de determinado concreto é o ensaio de resistência à compressão, devido à facilidade de execução do ensaio, ao fato de que a maioria das cargas aplicadas nas estruturas são de compressão e, ainda, pela possibilidade de traçar relações entre a resistência à compressão com outras propriedades mecânicas do concreto, como resistência à tração e módulo de elasticidade (CASTRO, 2009).

A resistência à compressão é calculada tendo por base a NBR 5739:2018, cujo ensaio se deu utilizando uma prensa hidráulica da marca EMIC e velocidade de

carregamento aplicada aos três corpos de prova submetidos ao ensaio de $0,46 \pm 0,03 \text{ MPa s}^{-1}$. A norma define a medição da altura e diâmetro dos corpos de prova. Após a correta centralização do corpo de prova na prensa hidráulica, deve-se aplicar a carga de compressão. O carregamento só deve cessar quando houver uma queda de força que indique a ruptura. A resistência à compressão é calculada de acordo com a Equação 7.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (7)$$

Em que:

f_c é a resistência à compressão, expressa em megapascals;

F é a força máxima alcançada, expressa em Newtons;

D é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros.

Sendo mantida a relação h/d maior que 1,94, não há a necessidade de aplicar os fatores de correção previstos na norma.

A Figura 3 apresenta um corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à compressão.



Figura 3: Ensaio de resistência à compressão realizado no concreto endurecido após 28 dias. Fonte: Do autor (2024).

4.2.5.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à tração do concreto possui relação com a resistência à compressão, apresentando valores de 8 a 15% dos valores de resistência (BASTOS, 2015). O ensaio mais utilizado para obtenção da resistência à tração do concreto é o de resistência à tração por compressão diametral, por ser de baixo custo e possuir semelhança com o ensaio de compressão axial (SILVA, 2015).

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral, utilizou-se a prensa hidráulica utilizada no ensaio de resistência à compressão com a adição de dispositivo auxiliar para facilitar o posicionamento do corpo de prova, conforme NBR 7222:2011. A velocidade de carregamento aplicada aos três corpos de prova submetidos ao ensaio foi de $0,40 \pm 0,02 \text{ MPa s}^{-1}$. Após o devido posicionamento dos corpos de prova, deve-se aplicar a carga de forma constante e sem choques, com crescimento da tensão de tração. A resistência à tração por compressão diametral é calculada de acordo com a Equação 8.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \times d \times l} \quad (8)$$

Em que:

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, expressa em megapascals;

F é a força máxima obtida no ensaio, expressa em Newtons;

d é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros;

l é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros.

A Figura 4 apresenta um corpo de prova submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Figura 4: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado no concreto endurecido após 28 dias. Fonte: Do autor (2024).

4.2.5.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o módulo de elasticidade representa a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea, dentro de um limite proporcional adotado. Trata-se de um dos parâmetros utilizados no cálculo estrutural, uma vez que apresenta as propriedades elásticas do concreto para que se conheça as deformações dos elementos estruturais com as cargas a que estão submetidos (BENETTI, 2012).

O módulo de elasticidade foi calculado segundo as premissas da NBR 8522:2021, empregando a prensa hidráulica utilizada nos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral. Marcou-se 5 cm de cada extremidade dos corpos de prova, em toda a extensão da circunferência, para colocação dos compressômetros. A tensão aplicada no ensaio corresponde a 30 % do f_c encontrado no ensaio de resistência à compressão e a velocidade da carga aplicada foi de $0,35 \text{ MPa s}^{-1}$. Os carregamentos devem ser feitos de forma a manter a força aplicada por 60 segundos, seguido do descarregamento. O módulo de elasticidade é calculado de acordo com a Equação 9.

$$E_{ci,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (9)$$

Em que:

$E_{ci,i}$ é o módulo de elasticidade, expresso em gigapascals;

$\Delta\sigma$ é a variação de tensão obtida no ensaio, expressa em Newtons;

$\Delta\varepsilon$ é a variação da deformação específica do concreto;

A Figura 5 apresenta um corpo de prova submetido ao ensaio de módulo de elasticidade.



Figura 5: Ensaio de módulo de elasticidade realizado no concreto endurecido após 28 dias. Fonte: Do autor (2024).

4.2.5.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica trata-se do inverso da condutividade elétrica e, no concreto, está relacionada à microestrutura, influenciada pela composição química do cimento, relação água/cimento da mistura, proporção dos materiais utilizados, uso de adições minerais (SANTOS, 2006).

O ensaio de resistividade elétrica não possui norma brasileira específica para o concreto. Entretanto, fez-se adaptação da NBR 7117:2020, aplicado aos cálculos de resistividade de solos. O método dos quatro pontos é o mais conhecido e

empregado para a obtenção dos valores de resistividade elétrica do concreto (LENCIONI, 2011) e é descrito na norma ASTM G57:2012. Foi utilizado um aparelho terrômetro digital da marca Kyoritsu, modelo KEW 4106, com quatro terminais para medição da resistência elétrica do concreto. A NBR 7117:2020 define que os valores típicos de resistividade do concreto inferiores a 50.000 Ω mm são considerados altamente corrosivos. Para o ensaio, foram posicionadas quatro hastes de cobre de 6 mm² de seção aos corpos de prova prismáticos de dimensões de 12 cm de largura, 6 cm de altura e 17 cm de comprimento, conforme disposto na Figura 6.

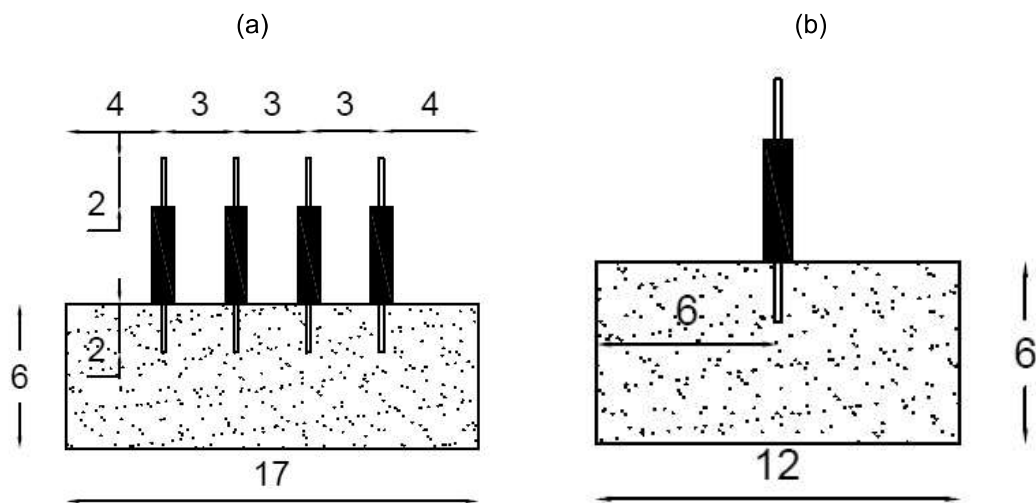


Figura 6 - Esquema representando a disposição das hastes de cobre nos corpos de prova (a) longitudinalmente, (b) seção transversal. As medidas estão em centímetros. Fonte: Do autor (2024).

Após a obtenção dos valores de resistência elétrica do concreto, foi possível calcular a resistividade elétrica conforme a Eq. 10.

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (10)$$

Em que:

ρ = resistividade elétrica do concreto, em ohm vezes milímetro (Ω mm);

R = resistência elétrica do concreto, em ohm (Ω);

a = distância entre os eixos das hastes, em milímetros (mm);

b = profundidade de penetração das hastes no corpo de prova, em milímetros (mm).

A Figura 7 apresenta o ensaio de resistividade elétrica, terrômetro utilizado e detalhe dos corpos de prova para ensaio.

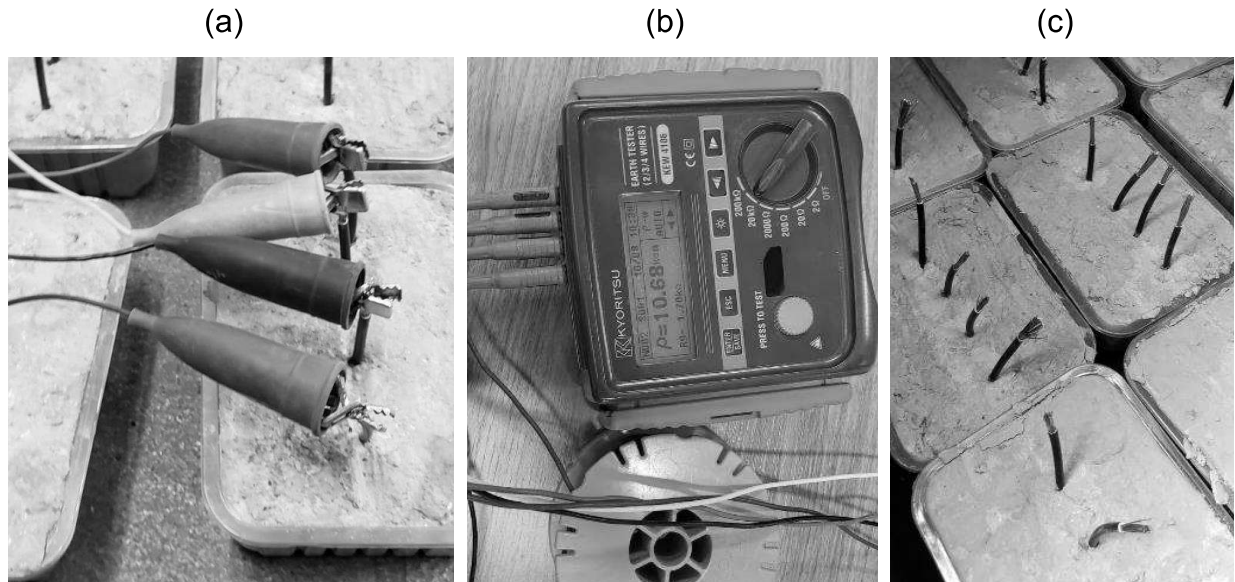


Figura 7: (a) Ensaio de resistividade elétrica, (b) terrômetro utilizado e (c) detalhe dos corpos de prova para ensaio. Fonte: Do autor (2024).

4.2.5.6 AUTOCICATRIZAÇÃO

Após os ensaios de resistência mecânica e de resistividade, analisou-se os resultados obtidos para definir o traço com coque metalúrgico para execução do ensaio de autocicatrização. Além dos resultados de resistência à compressão e resistência à tração, os resultados do ensaio de resistividade também foram considerados na definição do traço, uma vez que o teor de coque altera a resistividade e, por sua vez, a elevação da temperatura (BAPTISTA e CARDOSO, 2013), mecanismo de autocicatrização avaliado.

Em seguida à definição do traço, seguiu-se para a avaliação da autocicatrização, utilizando dois traços para a fabricação de painéis de concreto, sendo os traços de referência, ou seja, sem substituição de agregado miúdo por coque e o traço definido, sendo o traço que apresentou maiores resultados de resistência à tração e à compressão e menor resistividade elétrica.

Para avaliar a autocicatrização, foram induzidas fissuras em um painel de concreto com o traço definido através da inserção de lâminas com no máximo 0,4 mm de espessura (NBR 6118: 2014) após a concretagem e retirada após 48 horas,

quando a fluidez do concreto não é capaz de ocasionar o fechamento da fissura. Foi então aplicado uma carga elétrica utilizando-se uma fonte de alimentação IP-305, marca Impac, a fim de elevar a temperatura da laje para acima dos 30 °C (JOENCK E VILLENA, 2018) e feito o monitoramento da fissura.

Os painéis possuem dimensões de 50 x 25 x 5 cm (comprimento x largura x altura), conforme estudo realizado por Alves et al. (2023) e estão representados na Figura 8.

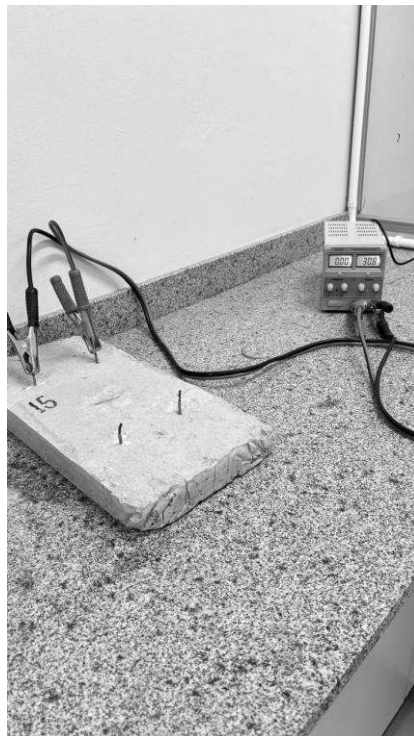


Figura 8: Representação de uma das placas submetidas ao carregamento elétrico.
Fonte: Do autor (2024).

As medições das espessuras das fissuras foram realizadas com o concreto endurecido após seis meses da concretagem. Utilizou-se termografia infravermelha com auxílio de uma câmera térmica FLIR T530 para registro da elevação de temperatura nas placas, verificando-se o gradiente térmico superficial, conforme pode ser visualizado na Figura 9. A câmera térmica também auxilia na inspeção de fissuras presentes no concreto, porém sem informar dados qualitativos (ROCHA et al., 2017).



Figura 9: Placa de concreto sob termografia infravermelha. Fonte: Do autor (2024).

4.2.5.7 CARBONATAÇÃO

A carbonatação, segundo Pauletti (2004), trata-se de um processo físico-químico complexo do cimento, onde seus compostos são gradualmente substituídos por carbonatos, através de reações com CO_2 e outros gases ácidos, tais como SO_2 e H_2S . Estes processos físico-químicos envolvem reações gasosas, dissolução e precipitação de sólidos.

Essa reação entre o dióxido de carbono presente na atmosfera, umidade e materiais da pasta de cimento reduz a alcalinidade do concreto e pode provocar retração, além de corrosão de armaduras. Agregados mais leves e mais porosos possuem maior chance de penetração e difusão de gases como o dióxido de carbono (FERREIRA, 2015).

O ensaio de carbonatação mais aplicado consiste na visualização do pH do concreto, geralmente com uso de fenolftaleína 1% na especificação de Fenolftaleína P. A.; Álcool Etílico 96 ou 99%; Água destilada. O concreto é fraturado, é feita limpeza em sua área e, então aspersão do produto de forma perpendicular (COTOMACIO, 2024). O concreto terá mudança de coloração, indicando o pH. A coloração que indica que o concreto é suficientemente alcalino para fornecer passividade ao aço é magenta, ou seja, apresentar pH de aproximadamente 9 (DIN EN 14630, 2007).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A massa unitária da areia e da brita basáltica resultaram em $1,571 \text{ kg.dm}^{-3}$ e $1,483 \text{ kg.dm}^{-3}$, respectivamente. A caracterização do coque metalúrgico, feita através dos ensaios de massa unitária no estado solto, massa unitária no estado compactado, massa específica aparente e teor de enxofre estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores obtidos nos ensaios de caracterização do coque metalúrgico.

Ensaio	Valor obtido
Massa unitária no estado solto	$0,774 \text{ kg.dm}^{-3}$
Massa unitária no estado compactado	$0,863 \text{ kg.dm}^{-3}$
Massa específica aparente	$1,0 \text{ kg.dm}^{-3}$
Absorção de água	15%
Teor de Enxofre	0,40%

Fonte: Do autor (2024).

Conforme pode ser observado na Tabela 6, o coque metalúrgico possui massa unitária no estado solto equivalente a menos da metade da massa unitária da areia, o que é esperado pelo fato de o coque metalúrgico ser um material de maior porosidade que a areia. Pode-se verificar também que a massa específica aparente do coque metalúrgico é inferior à da areia, cujo valor é de $2,640 \text{ kg.dm}^{-3}$, bem como a absorção de água do coque é superior à da areia, cujo valor é de 0,30%, devido à maior porosidade do coque. Não existe uma norma específica que limite o teor de enxofre em agregados de concreto, além de recomendações de diferentes órgãos e autores, “enquanto a norma francesa limita a utilização em 1% de SO_3 o comitê americano é mais rígido, estabelecendo o teor de 0,5% de SO_3 ” (CAPRARO, 2019, p. 19). O coque metalúrgico apresenta teor de enxofre aceitável por algumas recomendações internacionais. De acordo com Itambé (2008), conforme citado por Capraro (2019, p. 36), os teores de enxofre nos cimentos Portland brasileiros variam de 0,8 a 3,0%. Segundo Capraro e Medeiros (2019), o teor de contaminação por enxofre não é uma fonte de variação na resistividade elétrica do concreto.

A Figura 10 apresenta a curva granulométrica do coque metalúrgico, com um comparativo com a granulometria da areia utilizada.

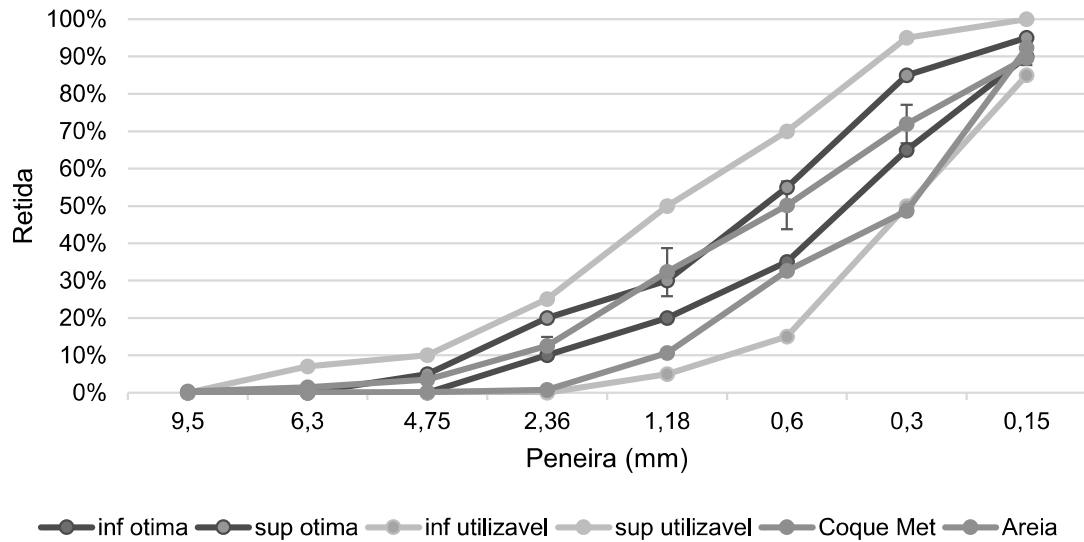


Figura 10: Curva granulométrica do coque metalúrgico e da areia. Fonte: Do autor (2024).

A partir da curva granulométrica, é possível verificar que a granulometria do coque metalúrgico está dentro da zona utilizável do agregado miúdo especificada na NBR 7211:2019 e, inclusive, em algumas peneiras, na zona ótima. A dimensão máxima característica encontrada foi de 4,75 mm, e o módulo de finura foi $2,60 \pm 0,22$, sendo equivalente ao módulo de finura da zona ótima da areia média, segundo a NBR 7211:2019.

A Figura 11 apresenta os difratogramas de raios X do cimento.

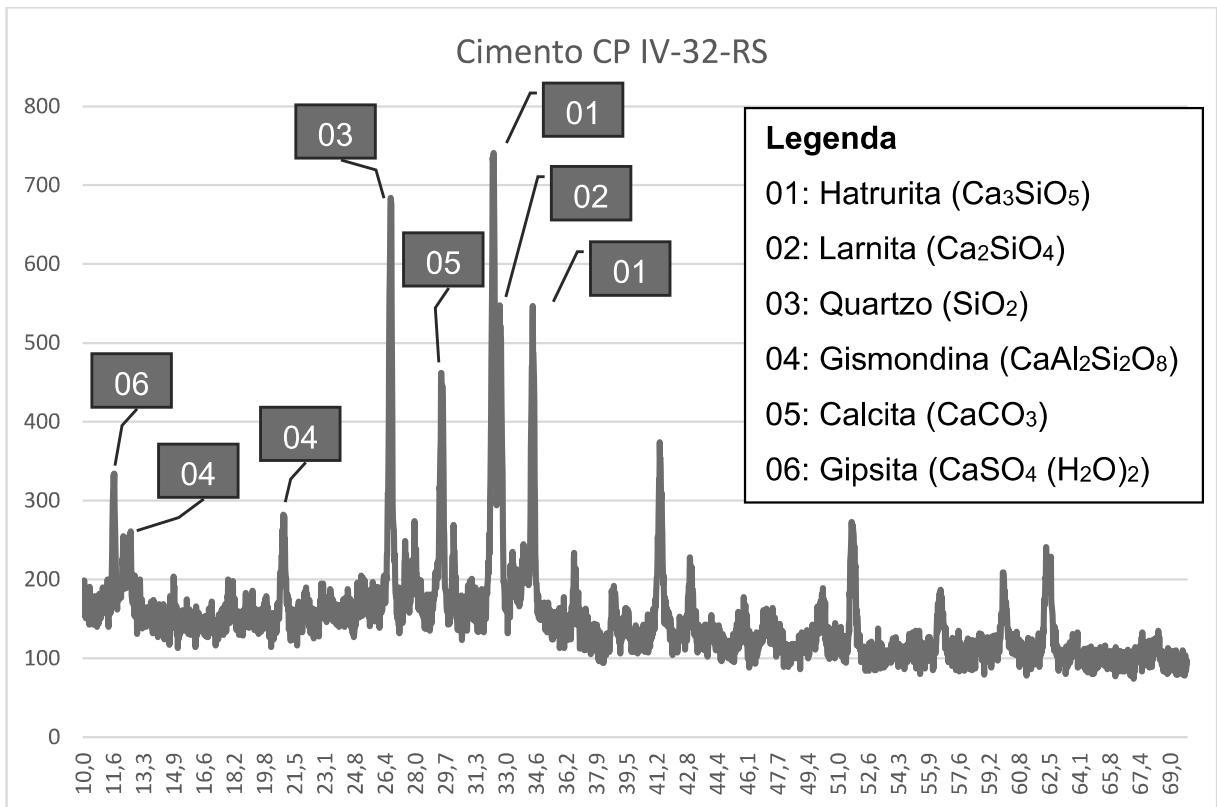


Figura 11: Difratoograma do cimento CP IV-32-RS. Fonte: Do autor (2024).

Pode-se verificar através do ensaio de DRX que as principais fases do cimento são hatrurita (Ca_3SiO_5), larnita (Ca_2SiO_4), quartzo (SiO_2), gismondina ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e calcita (CaCO_3), destacando a caracterização do clínquer presente na composição do cimento (VANGU et al., 2022 e GOBBO et al., 2013).

A Figura 12 apresenta os difratogramas de raios X do coque metalúrgico.

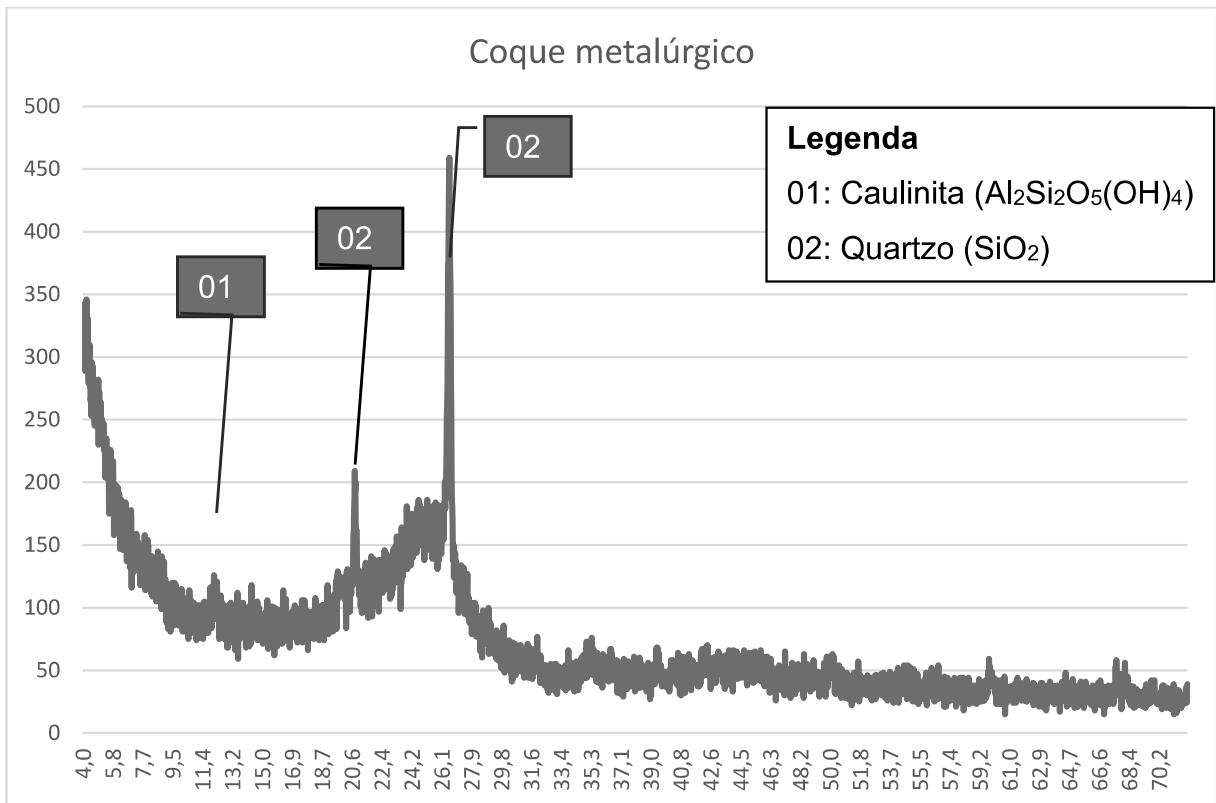


Figura 12: Difratograma do coque metalúrgico utilizado. Fonte: Do autor (2024).

Foi identificado, através do ensaio, que a amostra apresenta fase amorfa, portanto, a quantificação apresentada é referente à fração cristalina. A partir dos resultados de DRX do coque metalúrgico, pode-se verificar que suas principais fases cristalinas são quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), esta última deve ser residual, uma vez que a maior parte se torna metacaulim.

A Tabela 7 traz a análise química realizada através de Espectrometria de FRX na amostra de cimento utilizado no presente trabalho.

Tabela 7: Espectrometria de FRX do cimento CP IV-32-RS.

<u>Elemento</u>	<u>Resultado (%)</u>
CaO	37,93
SiO ₂	35,12
Al ₂ O ₃	9,15
MgO	4,56
Fe ₂ O ₃	2,66
K ₂ O	1,42
Na ₂ O	0,67
TiO ₂	0,3
SrO	0,16
MnO	0,14
P ₂ O ₅	0,14
ZnO	0,05
Elementos minoritários	3,80
Perda ao Fogo	3,78
Soma MF	100

Fonte: Do autor (2024).

Nota-se que o somatório dos óxidos não totaliza 100%. Tal fato se dá pela possibilidade de a amostra conter S, Cl e outros elementos voláteis perdidos durante a fusão ou não abrangidos pela curva de leitura utilizada. É possível verificar que há uma composição majoritária de CaO (37,93%), SiO₂ (35,12%) e Al₂O₃ (9,15%), com perda de massa de 3,8%, resultados que concordam com a caracterização do cimento CP IV-32 RS feita por Borges, Neto e Mendonça (2021).

A Tabela 8 traz a análise química realizada através de Espectrometria de FRX na amostra de coque metalúrgico utilizado no presente trabalho.

Tabela 8: Espectrometria de FRX do coque metalúrgico.

Elemento	Resultado (%)
SiO ₂	15,42
Al ₂ O ₃	5,36
SO ₃	1,59
Fe ₂ O ₃	1,30
CaO	0,50
K ₂ O	0,43
TiO ₂	0,36
P ₂ O ₅	0,29
Cl	0,21
MgO	0,18
Na ₂ O	0,08
Elementos minoritários	0,09
Perda ao Fogo	74,19
Soma MF	100

Fonte: Do autor (2024).

A partir da análise química realizada, é possível verificar que o coque metalúrgico apresenta grande percentual de dióxido de carbono, o que pode indicar risco de carbonatação para o concreto (PAULETTI, 2004). O elemento majoritário, ou seja, superior a 10%, da amostra é o Si. Al, S, Fe, Ca, K, Ti, P, Cl, Mg, Na, Cr, Zr, Mn, Sr apresentaram-se em percentuais entre 0,1 e 9,99%, enquanto Ni, Cu, Zn, Pb, Ga apresentaram-se em percentuais inferiores a 0,09%.

5.2 CONCRETO

5.2.1 ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE

A Figura 13 traz os valores de abatimento obtidos para cada traço, bem como a linha de tendência para traços intermediários.

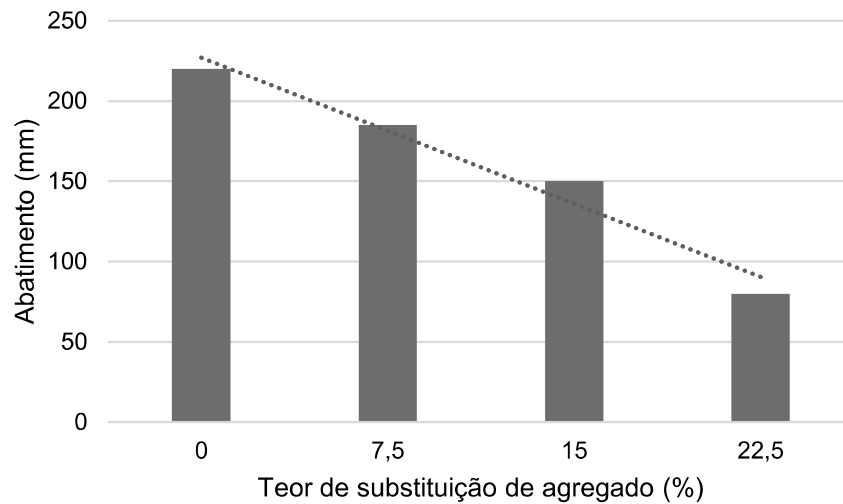


Figura 13: Valores de abatimento para cada traço utilizado. Fonte: Do autor (2024).

De acordo com os valores obtidos no ensaio de abatimento, é possível verificar que o abatimento diminui à medida que se aumenta o teor de coque utilizado. Segundo Pelissari, Viviane et al (2020), a água que serviria como lubrificante na relação água/cimento é capturada pelo agregado e deixa de exercer esta função.

5.2.2 DENSIDADE

A Tabela 9 apresenta os valores obtidos no ensaio de densidade do concreto endurecido.

Tabela 9: Valores obtidos no ensaio de densidade do concreto endurecido.

Propriedade	CC0	CC7,5	CC15	CC22,5
Densidade seca	2,214 ±	2,220 ±	2,149 ±	2,077 ±
(kg.dm ⁻³)	0,018	0,006	0,026	0,020
Densidade saturada	2,412 ±	2,357 ±	2,283 ±	2,295 ±
(kg.dm ⁻³)	0,026	0,006	0,016	0,020
Absorção (%)	8,968	6,167	6,233	10,467

Fonte: Do autor (2024).

É possível observar que a densidade do concreto fresco diminuiu à medida que o teor de coque utilizado na mistura foi aumentando. Isso se deve ao fato de o

coque ser um material poroso (AJIACO CASTRO, 2011), visto que “a água pode penetrar nos poros dos agregados” (CAMPITELI, 1987, p. 3), justificado pelo aumento na porcentagem de absorção de água do concreto endurecido no traço CC22,5. De acordo com a análise de variância, pode-se dizer com 95% de confiança que os traços CC0 e CC22,5 diferem entre si e entre os demais traços. Entretanto, os traços CC7,5 e CC15 não apresentam diferença estatística. De acordo com Medeiros Junior, Munhoz e Medeiros (2019), a relação água/cimento e a porosidade implicam em aumento da absorção de água, o que pode ser verificado nos resultados, visto que os traços CC7,5 e CC15 reduzem a relação água/cimento utilizada, mas não são tão porosos quanto o CC22,5, de teor maior de coque.

5.2.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A Figura 14 apresenta um comparativo entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de cada traço.

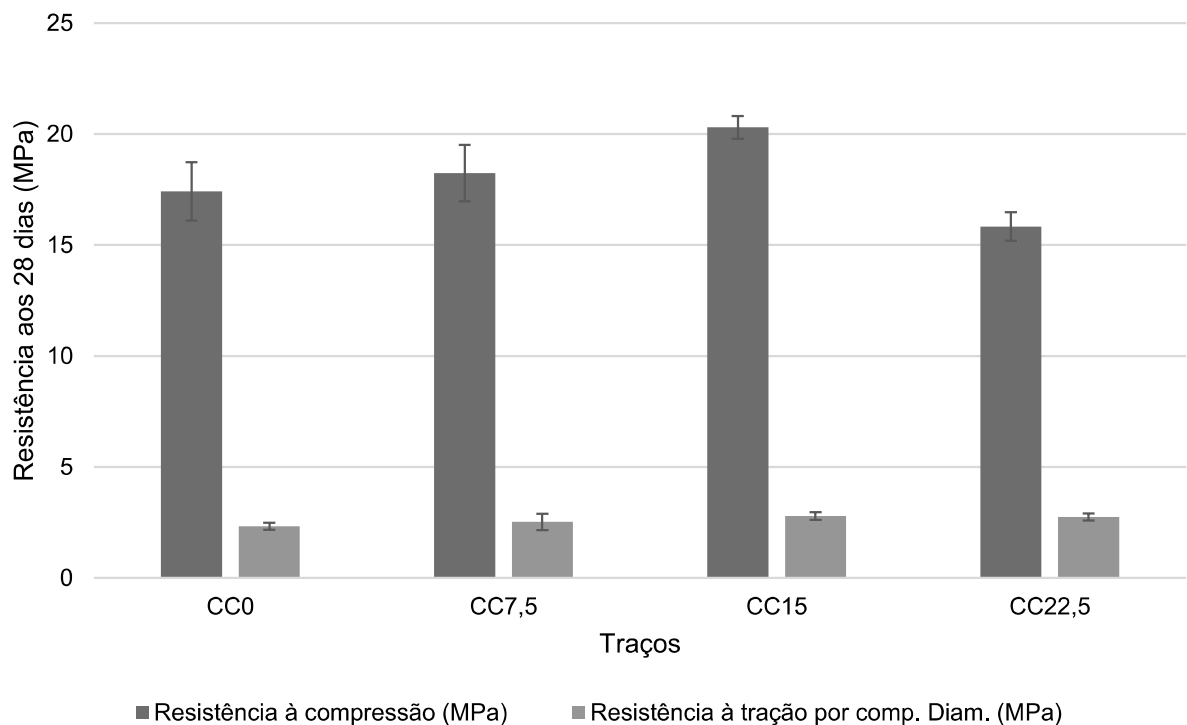


Figura 14: Comparativo dos resultados de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral de cada traço. Fonte: Do autor (2024).

É possível verificar que o resultado de resistência à tração por compressão diametral apresenta 19,90% de aumento do traço CC0 para o CC15 e cai novamente 1,67% no CC22,5. Entretanto, ao aplicar a análise estatística de variância (ANOVA), se observa, com 95% de confiança, que os resultados de resistência à tração por compressão diametral não se diferem estatisticamente entre si, independente do percentual de coque utilizado na substituição. A análise ainda aponta, também com 95% de confiança, que não existe diferença estatística entre os traços CC0, CC7,5 e CC22,5 para a resistência à compressão. No entanto, o traço CC15 difere-se dos traços CC0 e CC22,5. A baixa resistência, que é apresentada já pelo traço CC0, é explicada pela relação água/cimento utilizada, visto que encontra-se próxima do limite estipulado pela NBR 6118:2014, que traz para ambientes rurais resistência do concreto armado de, no mínimo, 20 MPa e relação a/c menor ou igual a 0,65 e para áreas urbanas resistência de, no mínimo, 25 MPa e relação a/c menor ou igual a 0,60. A elevada relação água/cimento possui efeito significativo na resistência (HOFFMANN, 2015). Com a adição de coque, o agregado absorve parte desta água utilizada na relação, que deixa de exercer função lubrificante (PELISSARI, VIVIANE et al, 2020) e, conseqüentemente, aumenta a resistência do concreto, como é possível observar no traço CC15. Entretanto, devido a sua porosidade, o traço CC22,5 apresenta uma perda significativa na resistência à compressão.

5.2.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

A Figura 15 traz os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade.

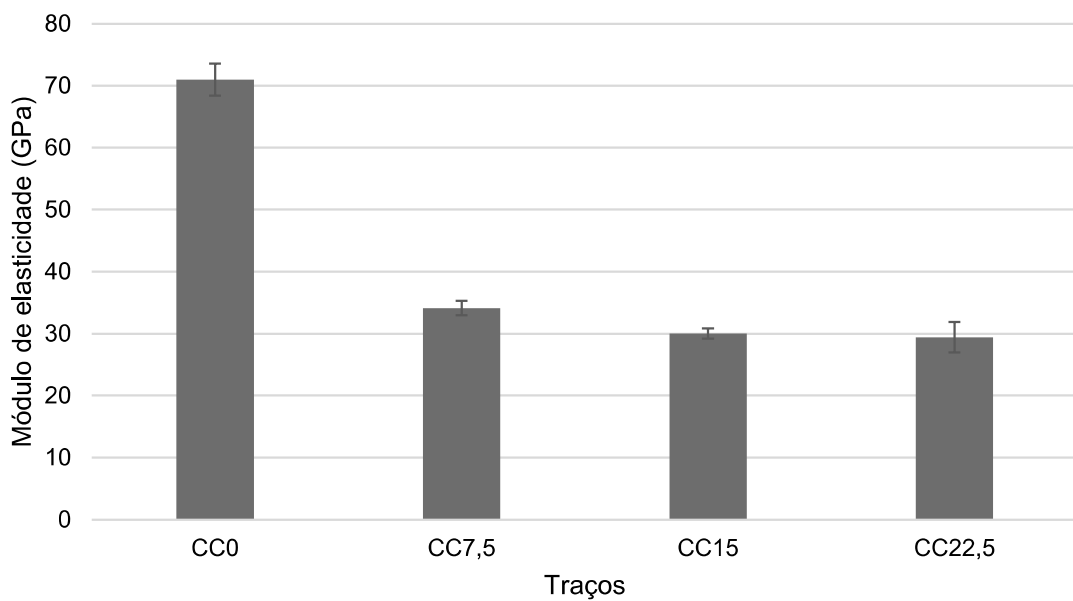


Figura 15: Valores obtidos através do ensaio de módulo de elasticidade (GPa).
Fonte: Do autor (2024).

“Um importante princípio dado pela Ciência dos Materiais que é a relação inversamente proporcional existente entre a porosidade e a resistência mecânica de um material” (TENÓRIO, 2007, p. 2), é possível observar que os traços com coque metalúrgico possuem menor módulo de elasticidade em relação ao traço de referência, visto que existe correlação entre o módulo de elasticidade e a porosidade do material (MICHELENA, 2013). O teste Tukey aponta, com 95% de confiança, que os traços CC7,5, CC15 e CC22,5 não diferem estatisticamente entre si.

5.2.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A Figura 16 traz os valores de resistividade elétrica obtidos para cada substituição realizada.

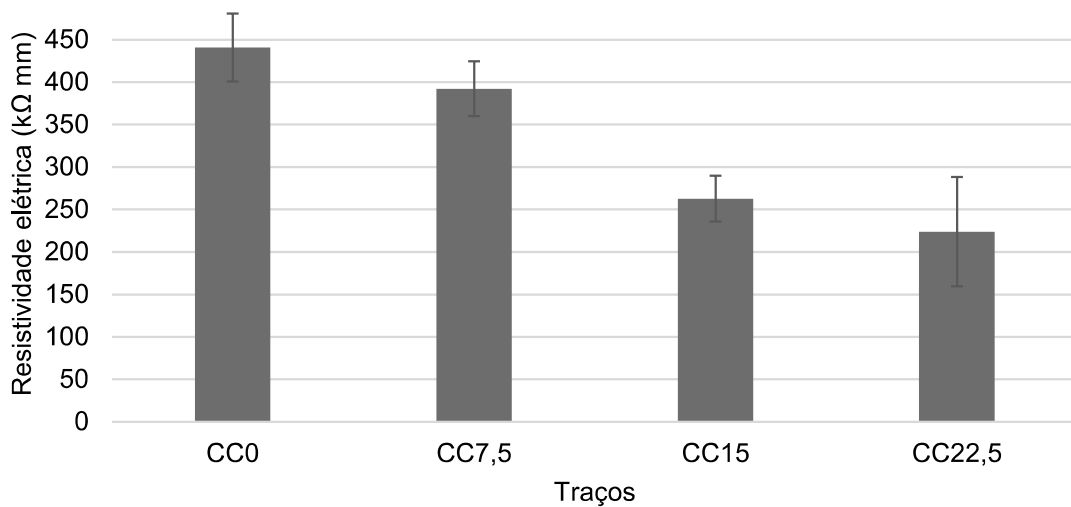
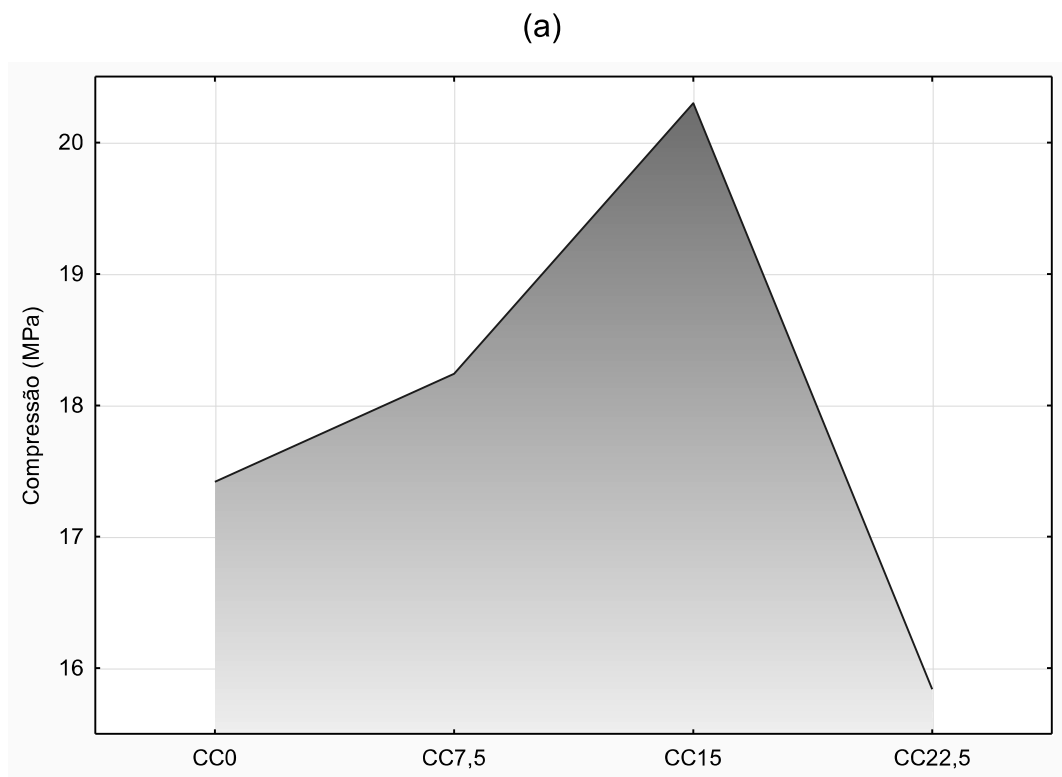


Figura 16: Valores de resistividade elétrica obtidos para cada traço de substituição de coque metalúrgico. Fonte: Do autor (2024).

Pela análise de Tukey, pode-se afirmar com 95% de confiança que não existe diferença estatística entre os traços CC0 e CC7,5 e os traços CC15 e CC22,5 não diferem entre si. Entretanto, existe diferença entre os dois primeiros traços com os dois últimos. É possível verificar que a resistividade elétrica do concreto é maior para os teores mais baixos de coque e menor para os teores mais altos, o que significa uma maior condutividade elétrica em concretos com adição de coque metalúrgico. A porosidade do coque também é um fator influenciador na resistividade (GIMENEZ, 2013). Dentre os fatores que influenciam na resistividade elétrica do concreto, estão a microestrutura do concreto, tipo e quantidade dos agregados, condição de saturação do concreto, adições minerais ou aditivos químicos, além de condições de ambiente, como temperatura e umidade ou ação de agressivos químicos, como cloretos e carbonatação. A relação água/cimento utilizada também é um fator que influencia a resistividade, pois “quanto maior a relação água/cimento, maior o volume de poros e maior é a probabilidade de existirem poros com maiores diâmetros e interconectados e, portanto, menor será a resistividade elétrica” (SANTOS, 2006, p. 27). Os resultados de resistividade para todos os traços são superiores a 200 kΩ mm, o que configura uma probabilidade desprezível de corrosão das armaduras causada pela passagem de corrente elétrica através do concreto (SANTOS, 2006).

5.2.6 DEFINIÇÃO DO TRAÇO PARA EXECUÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO

Para prosseguir com a execução das placas de concreto para avaliar a capacidade de autocicatrização do concreto condutivo com a adição do coque metalúrgico, analisou-se os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica, módulo de elasticidade e resistividade elétrica de forma global para definição de um traço único com teor de coque que apresente resultados mais altos de resistência e menor de resistividade. A Figura 17 apresenta os diagramas dos traços estudados.



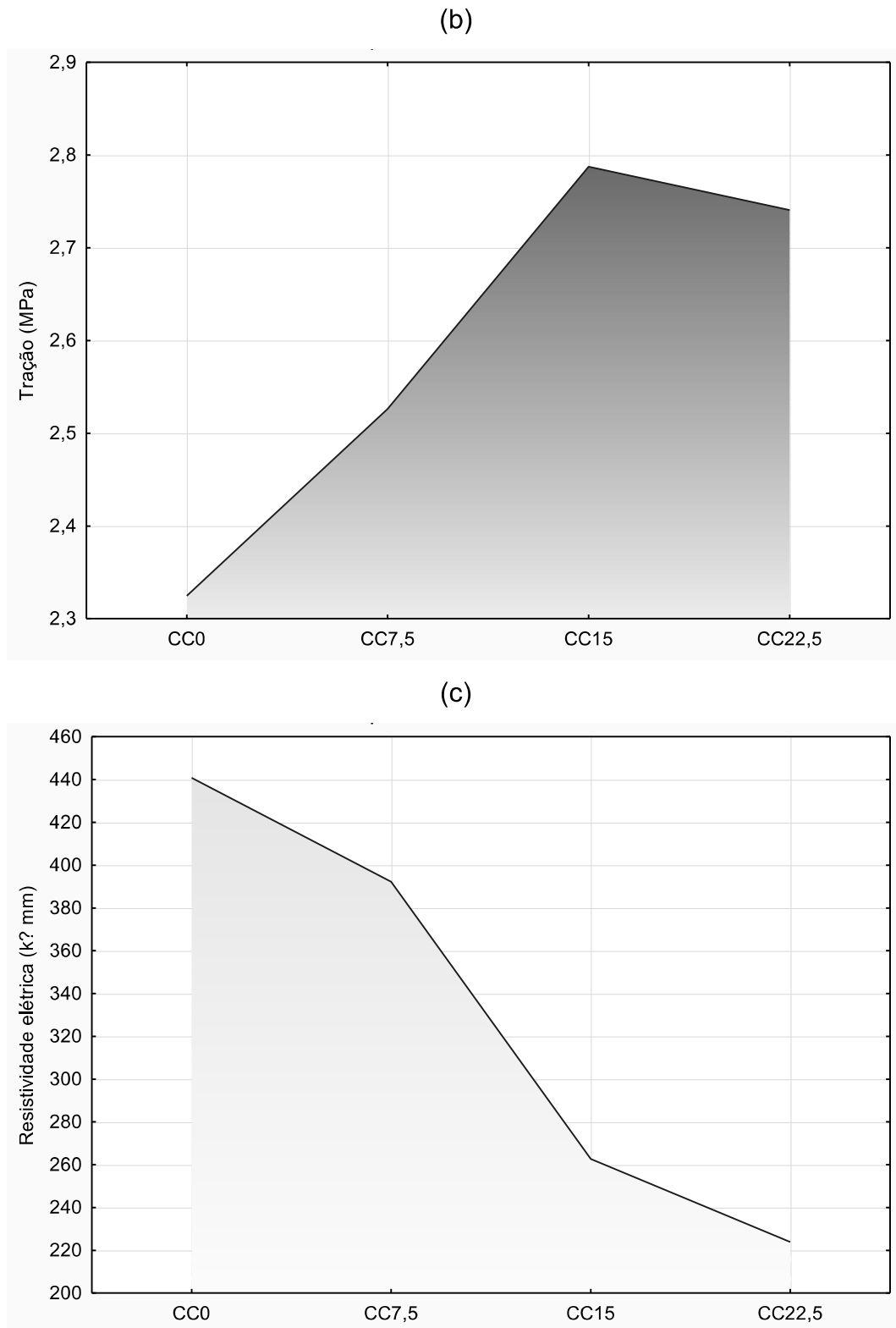


Figura 17: Diagrama dos resultados dos traços estudados (a) Ensaio de compressão, (b) ensaio de tração por compressão diametral e (c) ensaio de resistividade elétrica. Fonte: Do autor (2024).

Os diagramas foram sobrepostos para definição de uma “zona ótima”, ou seja, um traço em que haja o melhor desempenho mecânico com a menor resistividade. A sobreposição é apresentada na Figura 18.

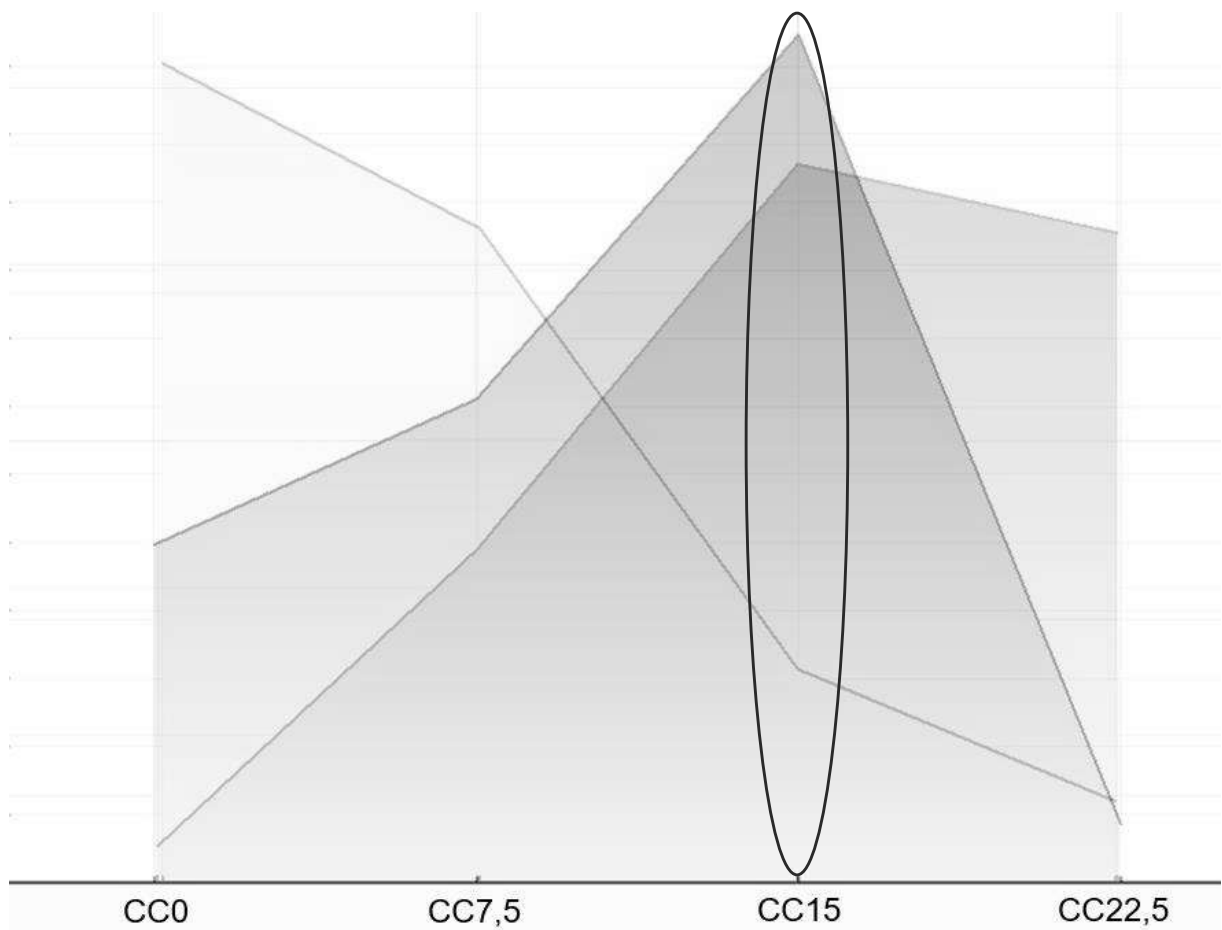
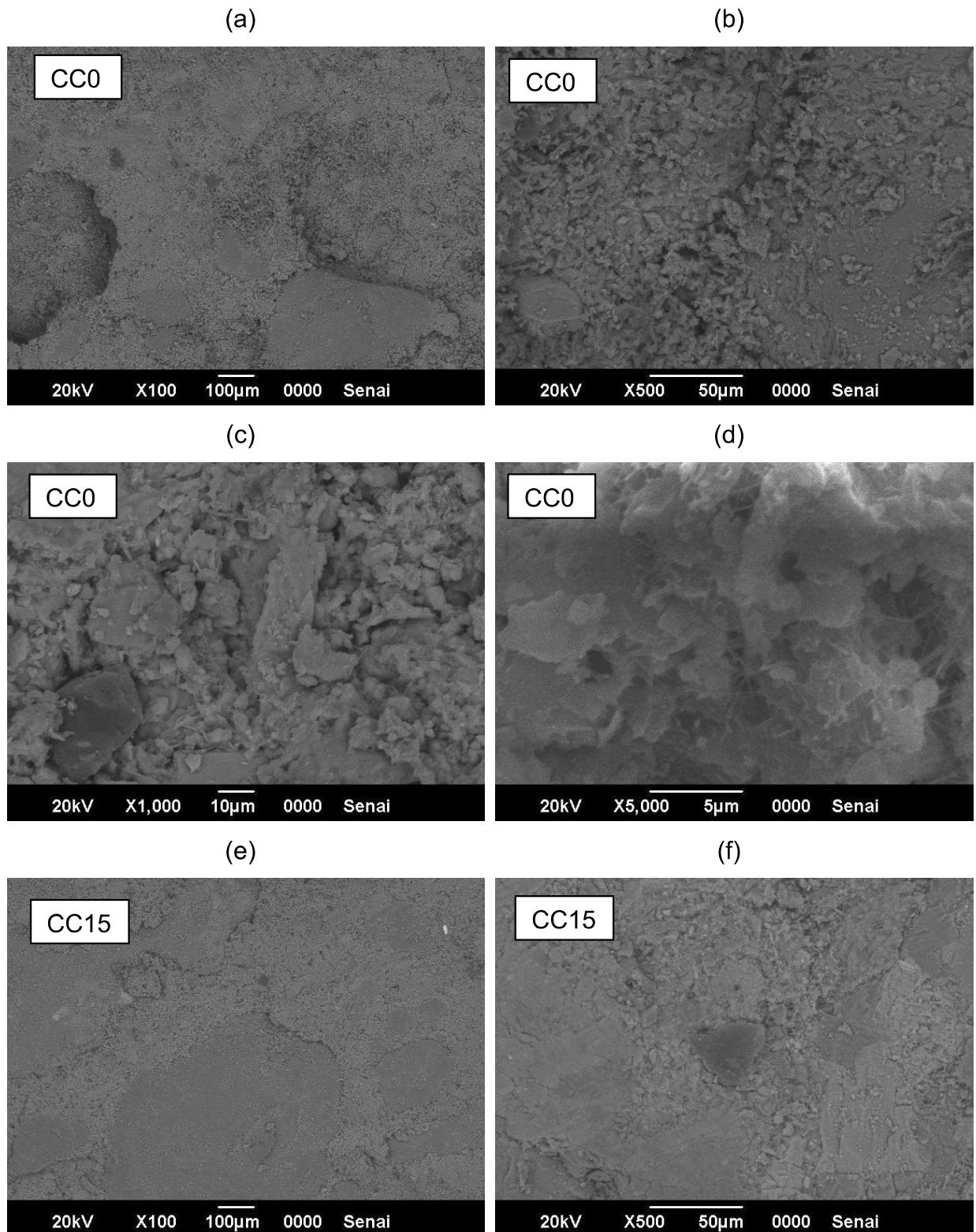


Figura 18: Sobreposição dos diagramas de ensaios de resistência mecânica e resistividade. Fonte: Do autor (2024).

É possível verificar visualmente que o traço que apresentou maior desempenho em resistência à compressão e resistência à tração para menor resistividade elétrica foi o traço com 15% de coque metalúrgico. O traço CC15 apresenta média de resistência à compressão igual a 20,30 MPa, sendo um valor de resistência comumente utilizado e considerado concreto de resistência média (MEHTA e MONTEIRO, 2008 e SCHWANTES, 2012), ao passo que apresenta média de resistividade elétrica de 262,73 k Ω mm, ficando acima do limite inferior de 200 k Ω mm, valor suficiente para desprezar possíveis danos à armadura (SANTOS, 2006).

5.2.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A Figura 19 apresenta a microscopia eletrônica de varredura dos concretos produzidos nos traços CC0 e CC15.



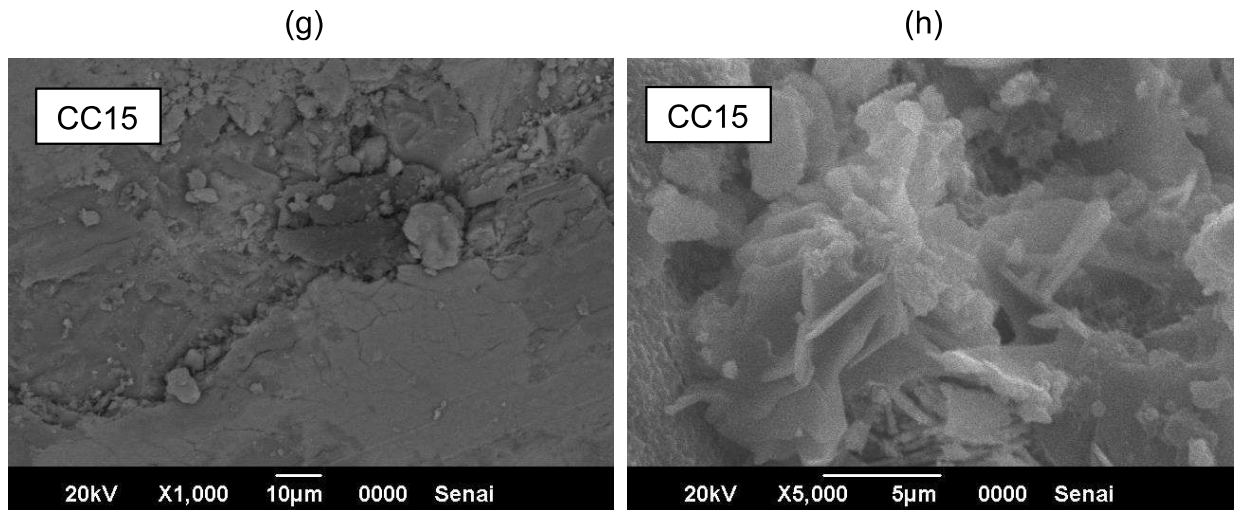


Figura 19: Microscopia Eletrônica de Varredura dos concretos nos traços de concreto com e sem presença de coque metalúrgico. Fonte: Do autor (2024).

Através da microscopia eletrônica de varredura dos concretos, pode-se verificar que a presença de coque metalúrgico reduz a presença de vazios no concreto. Tal resultado corrobora com os resultados obtidos de absorção de água dos concretos, em que houve uma redução da absorção no CC15 em relação ao CC0 e com os resultados de resistência à compressão, em que o concreto de traço CC15 apresentou valores mais elevados em relação ao CC0, uma vez que a redução de vazios no concreto aumenta sua resistência mecânica e reduz a absorção de água (CAPPELLESSO, 2016 e DOMENICO et al., 2018).

5.2.8 AUTOCICATRIZAÇÃO

As placas foram submetidas ao carregamento elétrico por duas horas a uma tensão constante de 30,8 volts. As placas tiveram suas temperaturas aferidas com a câmera termográfica antes, durante e após o ensaio, conforme apresentado na Figura 20.

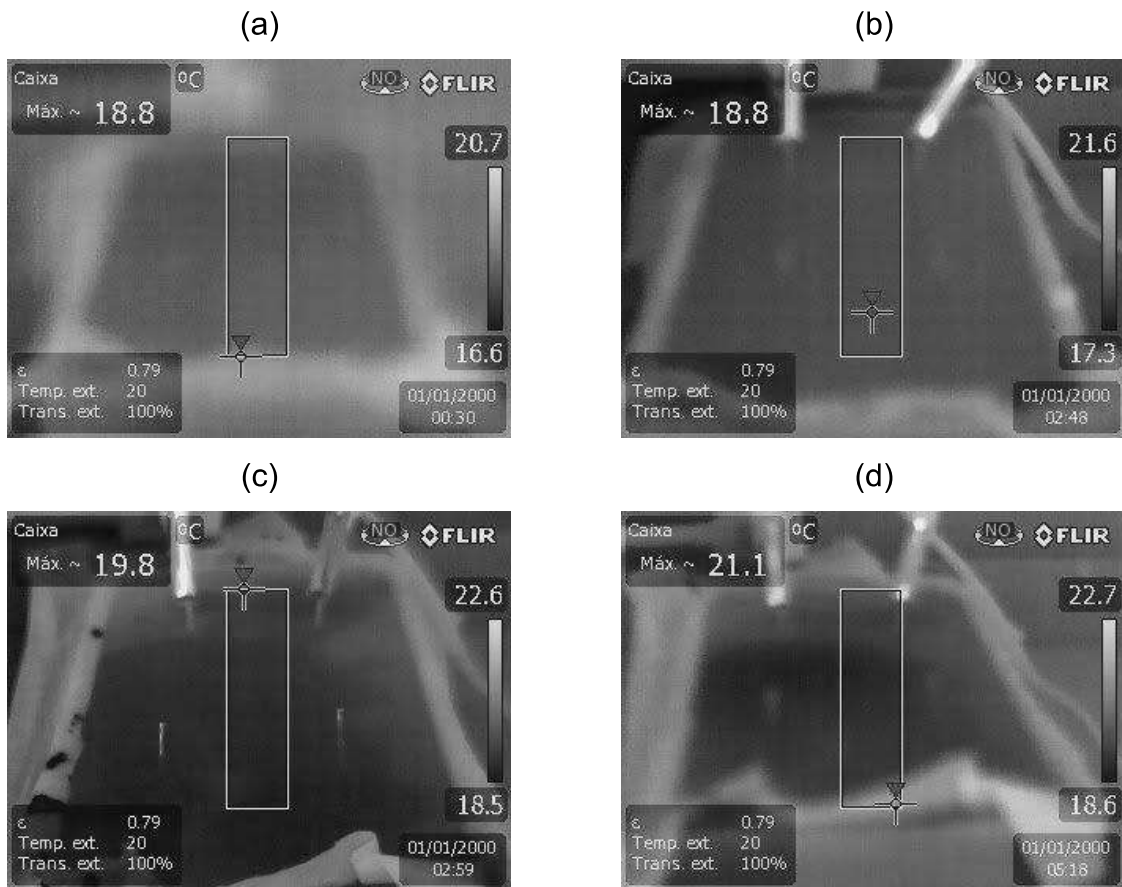
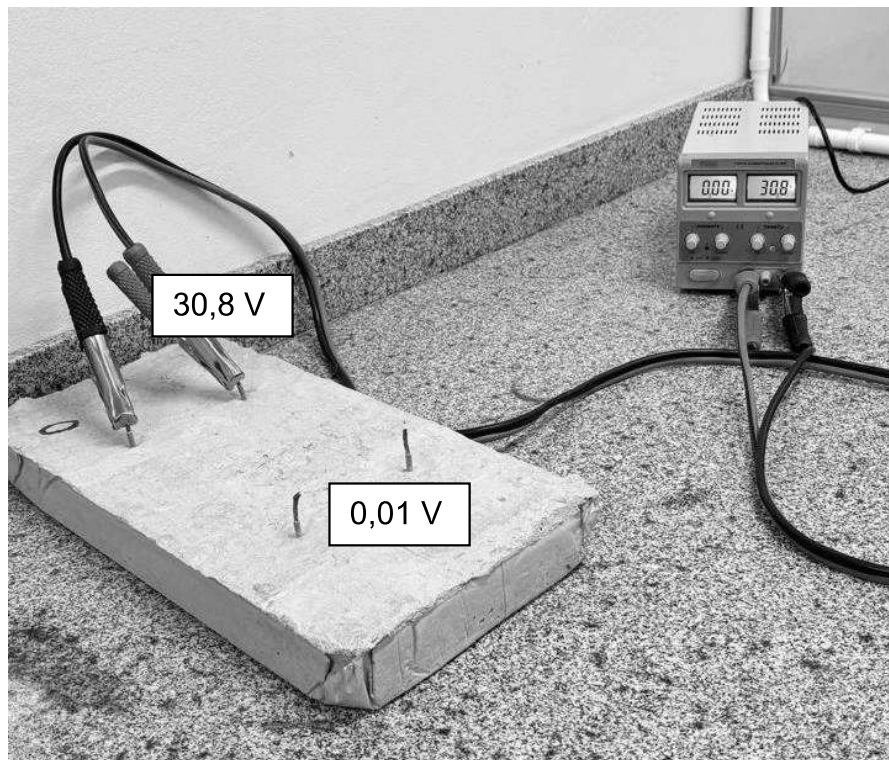


Figura 20: medição de temperatura (a) da placa de concreto CC0 no início da aplicação de carga; (b) da placa de concreto CC0 no final da aplicação de carga; (c) da placa de concreto CC15 no início da aplicação de carga; (d) da placa de concreto CC15 no final da aplicação de carga. Fonte: Do autor (2024).

Foi possível verificar que tanto o traço sem adição de coque metalúrgico como o traço com 15% não apresentaram aumento de temperatura com a aplicação da carga elétrica e, conseqüentemente, não houve fechamento das fissuras. Entretanto, foi possível observar com o auxílio de um multímetro que a tensão de entrada nos eletrodos instalados foi exatamente a mesma tensão adotada na fonte, enquanto a tensão nos eletrodos afastados em 25 cm ficou em média 0,01 V para o concreto sem adição de coque e 0,06 V para o concreto com adição de coque, conforme a Figura 21, demonstrando que a presença de coque facilita a passagem da corrente elétrica, ainda que o concreto tenha se mantido com características isolantes.

(a)



(b)

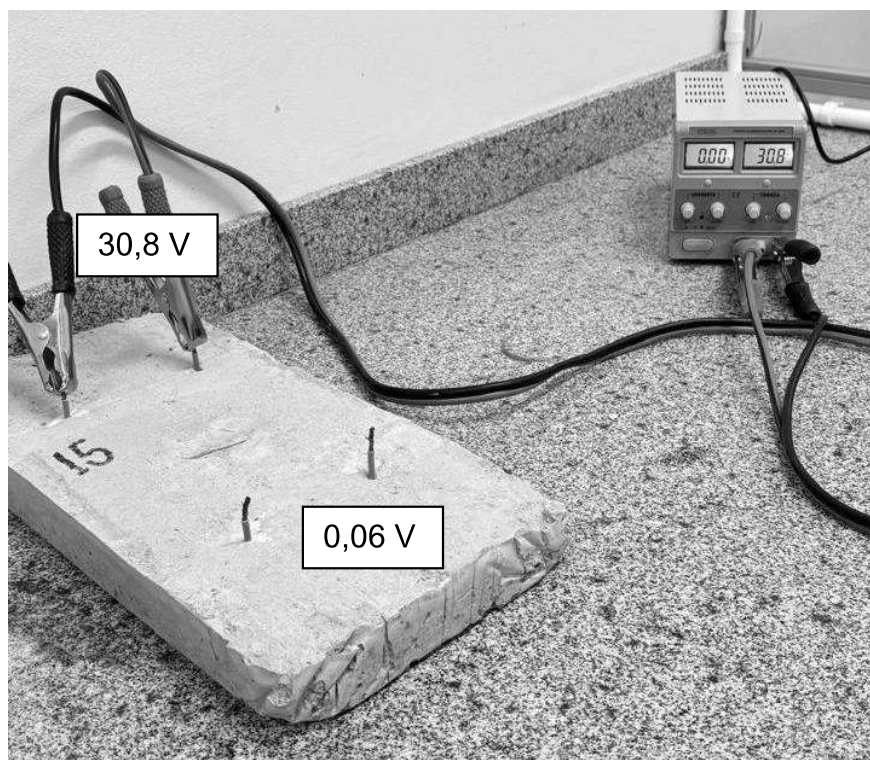


Figura 21: Representação das medições realizadas de tensão elétrica nas placas de concreto (a) CC0 e (b) CC15. Fonte: Do autor (2024).

Uma vez que não apresentaram aumento de temperatura com a aplicação da carga elétrica, as placas tiveram suas temperaturas aferidas novamente e foram levadas à estufa na temperatura de 110 °C e tiveram nova medição após uma hora, conforme Figura 22.

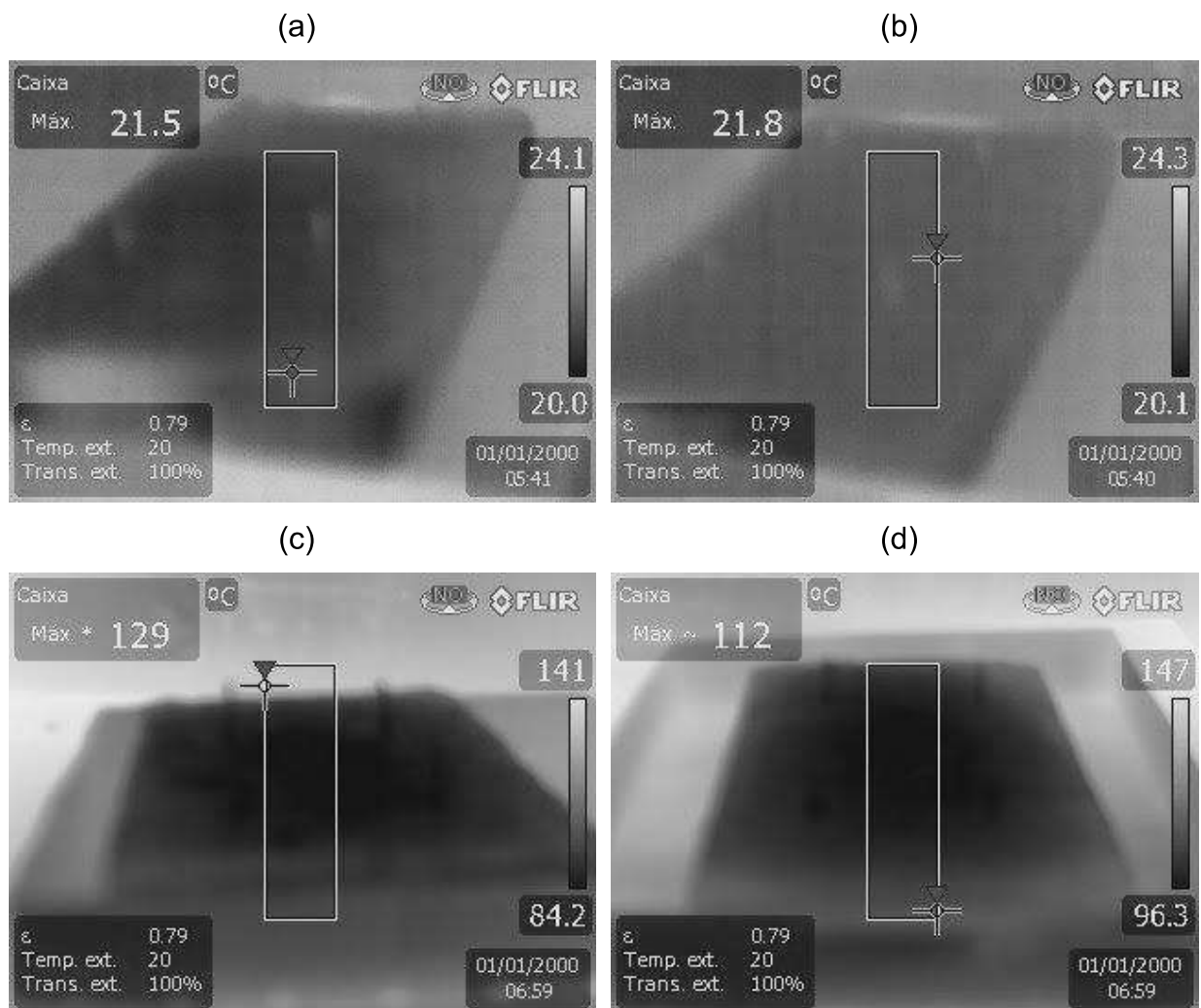


Figura 22: Fotografias térmicas das placas de concreto (a) CC0 antes de ser posto em estufa; (b) CC15 antes de ser posto em estufa; (c) CC0 após uma hora na estufa e (d) CC15 após uma hora na estufa. Fonte: Do autor (2024).

Foi possível verificar que, passada uma hora, o centro da placa de concreto com adição de coque metalúrgico teve sua temperatura elevada para 96,3 °C, enquanto o concreto sem adição de coque apresentou 84,2 °C sob as mesmas condições de ambiente. Depois, permaneceram por 24 horas, a fim de verificar o fechamento da fissura com o aumento da temperatura, apresentado na Figura 23.

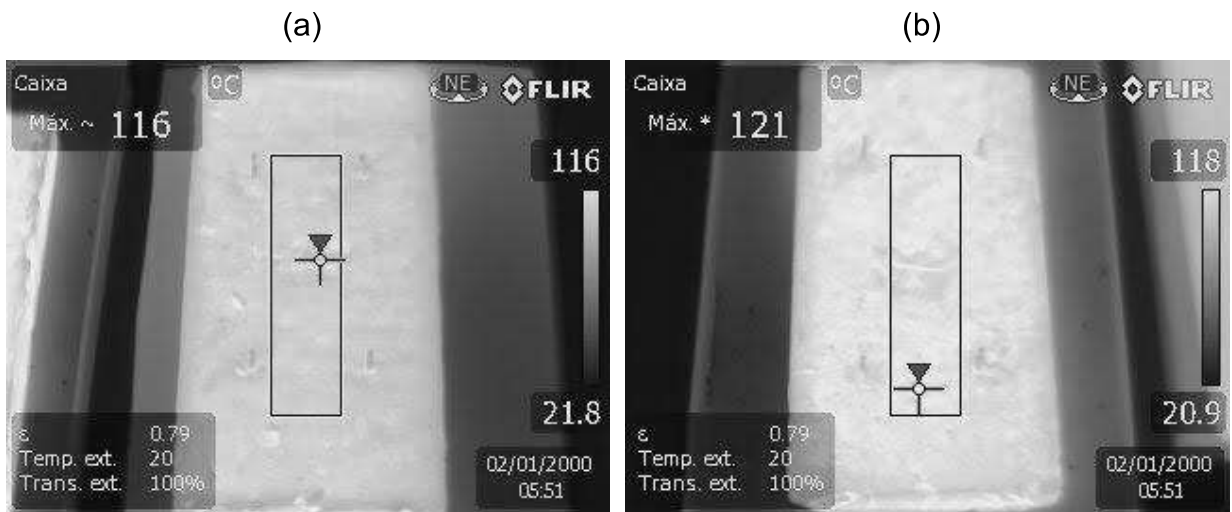
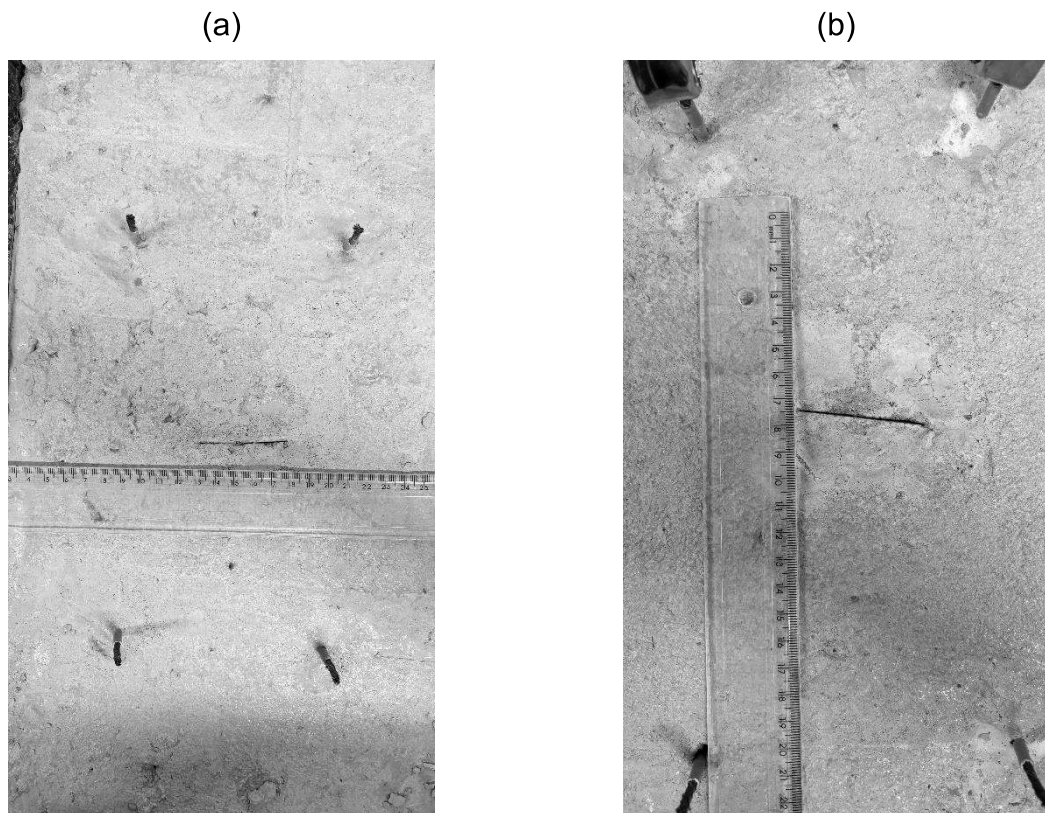


Figura 23: Medição termográfica das placas passadas as 24h na estufa (a) CC0 e (b) CC15. Fonte: Do autor (2024).

A Figura 24 apresenta a variação das fissuras nas placas antes e após as 24 horas na estufa a 110 °C.



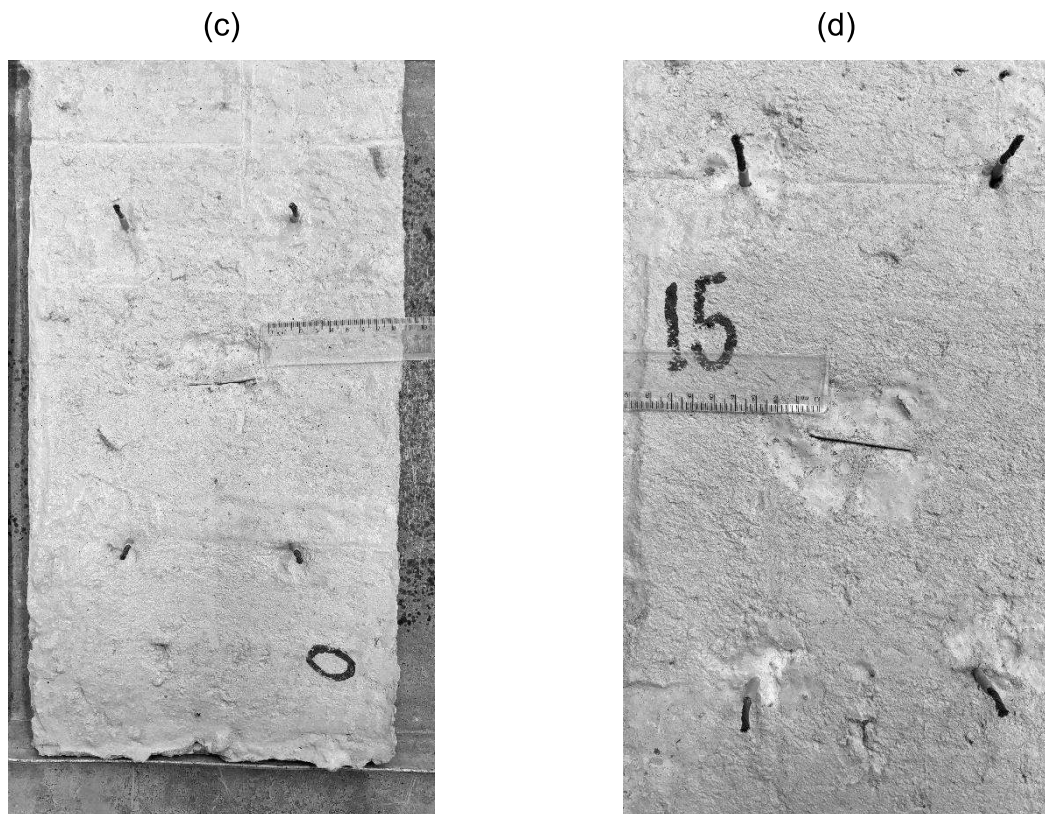


Figura 24: Fissura nas placas de concreto (a) CC0 antes de ser posto em estufa; (b) CC15 antes de ser posto em estufa; (c) CC0 após permanecer em estufa por 24 horas e (d) CC15 após permanecer em estufa por 24 horas. Fonte: Do autor (2024).

A fissura da placa de concreto com o traço CC0 antes de ser posta em estufa media 0,4 mm de espessura e a placa de concreto com traço CC15 possuía fissura de 0,5 mm de espessura. Após a elevação da temperatura por 24 horas de estufa, mediu-se novamente as fissuras e notou-se que nenhuma das placas apresentou fechamento, ficando os mesmos 0,4 mm de espessura para a placa CC0 e 0,5 mm de espessura para a placa CC15.

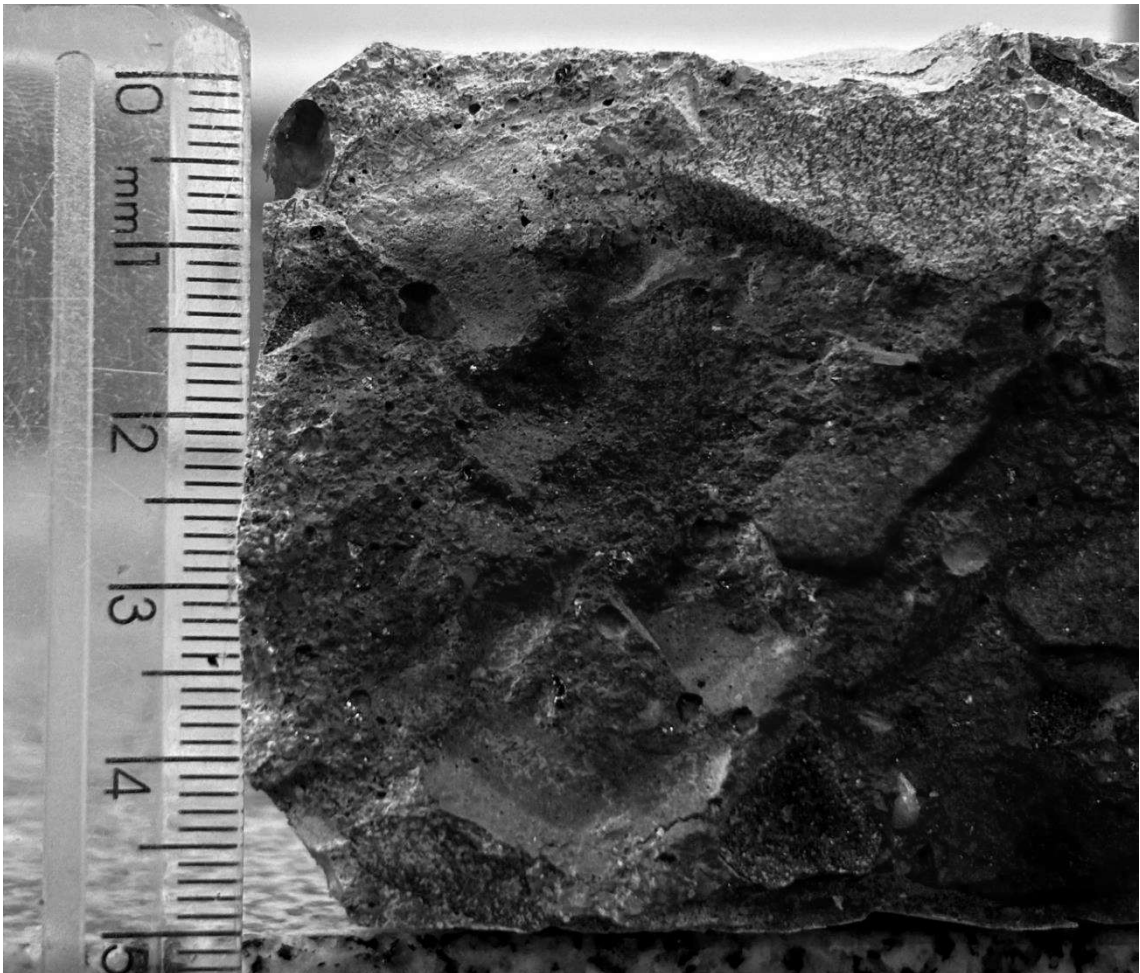
5.2.8 CARBONATAÇÃO

A Figura 25 apresenta os resultados do ensaio de carbonatação para as placas de concreto com os traços CC0 e CC15.

(a)



(b)



(c)

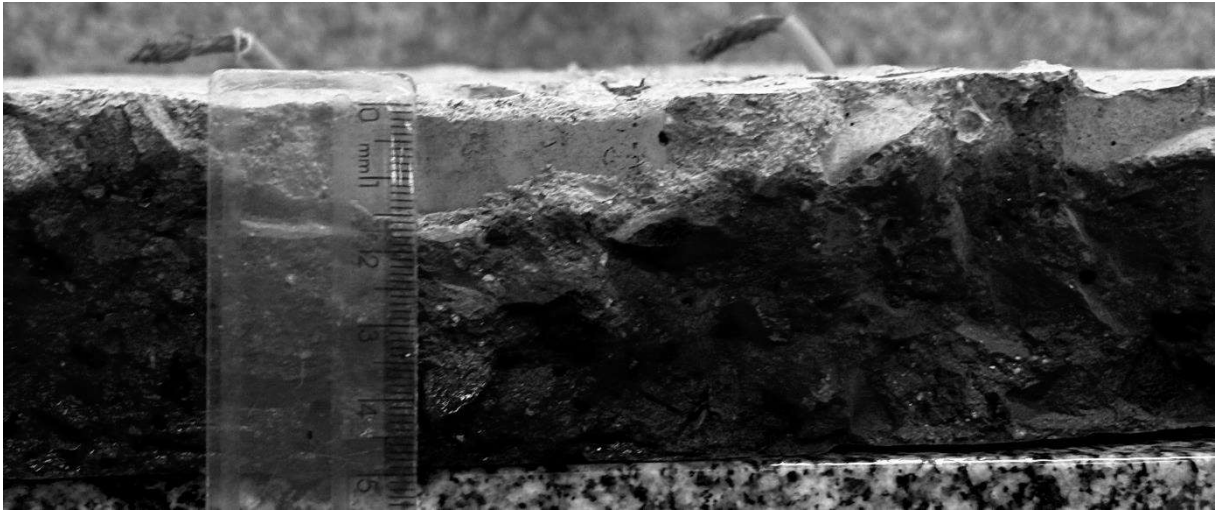


Figura 25: Resultados do ensaio de carbonatação no concreto (a) CC0; (b) CC15, na extremidade da placa e (c) CC15 no centro da placa. Fonte: Do autor (2024).

Através do ensaio, foi possível verificar que o traço CC0 apresentou 11 mm de profundidade de carbonatação de forma praticamente uniforme ao longo da placa de concreto, enquanto o traço CC15 apresentou variação na profundidade de carbonatação de 10 a 15 mm. Portanto, há indicativo de que a presença de coque metalúrgico no traço do concreto influencia na carbonatação, tanto no aumento da profundidade quanto na perda de homogeneidade da camada carbonatada. Entretanto, tanto o concreto de traço CC0 quanto o de traço CC15 apresentaram valores de profundidade de carbonatação coerentes com o apresentado por Lima et al. (2019) para concreto sem adição de coque metalúrgico de traço semelhante ao utilizado no presente estudo para o CC0, que variou de 4 a 17 mm.

6 CONCLUSÕES

Os resultados de caracterização do agregado apontam que o coque metalúrgico se equivale à areia média, no que se refere à granulometria. Entretanto, é um material mais leve e mais poroso que a areia. Tal característica resulta em maior absorção de água do agregado, o que diminui o abatimento e reduz a perda de resistência conferida pela alta relação água/cimento utilizada.

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral não apresentaram diferenças entre os teores de coque. O ensaio de resistência à compressão resultou em um aumento de resistência no traço CC15, o que pode ser devido à absorção da água, porém sem ainda chegar à representativa perda de resistência causada pela porosidade do agregado. O traço CC22,5, maior teor de agregado poroso, ser estatisticamente igual na resistência à compressão aos traços CC0 e CC7,5 pode ser explicado pelo aumento excessivo da porosidade, justificado pelo ensaio de densidade do concreto endurecido, o que resulta na perda de resistência à compressão verificada nos traços com maior influência da água na pasta. Em relação ao módulo de elasticidade, pode-se perceber que a presença de coque metalúrgico na mistura provoca queda nos resultados para menos da metade de CC0 para CC7,5 e não apresenta diferenças significantes de CC7,5 para teores maiores. Esta redução no módulo é positiva para a utilização em pavimentação, uma vez que reduz a chance de deformações da via.

A presença de coque metalúrgico reduz a resistividade elétrica do concreto endurecido. Os traços CC0 e CC7,5 apresentam uma resistividade muito maior quando comparados aos traços CC15 e CC22,5. Os resultados mostraram que a presença de coque metalúrgico em teor de 15% aumenta a resistência à compressão e à tração e reduz a resistividade elétrica em relação aos demais teores estudados.

Os ensaios de autocicatrização demonstraram que a presença de coque metalúrgico causou uma variação de temperatura de apenas 2 °C. Após induzir o aumento da temperatura, pode-se observar que a presença de coque metalúrgico causou um aumento na condução térmica do concreto. Porém, este aumento da condução térmica não foi o suficiente para o fechamento de fissuras.

7 SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS

O estudo gera sugestões para trabalhos futuros que avaliem a substituição de agregado em diferentes percentuais de coque, bem como outras relações água/cimento ou métodos de saturação do agregado, a fim de verificar alterações na resistência mecânica e nos resultados de módulo de elasticidade. Destaca-se, ainda, a possibilidade de ensaios para verificar mais cautelosamente a influência do enxofre nas armaduras, a execução de estruturas ainda maiores de concreto com adição de coque.

Para testar o fechamento de fissuras em concreto contendo coque metalúrgico, recomenda-se, ainda, estudar um traço com maior teor de coque metalúrgico e menor relação a/c. Estudar também a aplicação de maiores tensões elétricas nas placas de concreto.

Há, ainda, a possibilidade de aumentar a escala das placas de concreto para execução em tamanhos de lajes residenciais. Por fim, estudar a elevação da temperatura para magnitudes ainda maiores para o fechamento das fissuras, porém estudando os limites de resistência ao fogo do concreto.

REFERÊNCIAS

AGRA, A. A. **Avaliação da adição de coque de petróleo em misturas de carvões para coqueificação contendo carvão nacional**. 2016. UFRGS. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/197561>.

AJIACO CASTRO, F. S. **Evaluación del comportamiento térmico de carbones del Cerrejón, carbones coquizantes y sus mezclas en la producción de coque metalúrgico**. Departamento de Química, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7565>.

ALGHAMRI, R., KANELLOPOULOS, A., AL-TABBAA, A. **Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 124, p. 910-921, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143>

ALMAGUER, H. A. D.; SAQUETTI, D.; COELHO, V. L. **Um Estudo do Uso da Base Engastada dos Postes de Concreto Como Aterramento para Redes Aéreas de Distribuição**. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 6, n. 1, p. 9-21, 2021. Disponível em: <http://www.revistas.poli.br/~anais/index.php/repa/article/view/1369/693>.

ALVES, F. E. Z., GURKEWICZ, R. P., ZANCAN, E. C., NIEVES, L. J. J., ANTUNES, E. G. P. (2023), "**Estudo de painéis de concreto impermeabilizados com aditivo redutor de permeabilidade a base de silicato**", *Revista ALCONPAT*, 13(2), pp. 175 –191. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.643>

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **D4239: Standard test method for Sulfur in the analysis sample of coal and coke using high temperature tube furnace combustion methods**. Pennsylvania, EUA 2008.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **G57: Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method**. West Conshohocken, 2012.

AMMAR, L. **Capacité d'auto-cicatrisation des matériaux cimentaires: Amélioration avec des agents expansifs et des additions minérales**. 2022. Tese de Doutorado. INSA de Rennes.

ANDRADE, B. S. O. **Concreto armado: um estudo sobre o processo histórico, características, durabilidade, proteção e recuperação de suas estruturas**. 2016. Monografia. UFMG. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/30820/2/VERS%c3%83O%20OFICIAL%20-%20BRUNO%20TCC-REVISADA-%2029.01.16.pdf>

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com agregados reciclados**. ISAIA, GC Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: Arte Interativa, 2011. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5015876/mod_resource/content/0/CAP%2047_RCD_3.pdf.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 15575-2: Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7117: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos. Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geométrica. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7211: Agregados para concreto – especificação, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 8522: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9573: Vermiculita expandida — Temperaturas inicial e final de amolecimento — Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados – Terminologia**, Rio de Janeiro, 2011.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2012. São Leopoldo, RS. Disponível em: <https://repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/4523>.

BAPTISTA, R.; CARDOSO, F. de O. **Estudo ambiental da utilização do coque de petróleo na cogeração de energia elétrica em comparação com o carvão mineral**. [S.l.: S.n, 2013?]. Disponível em: <http://www.unaerp.br/documentos/1479-184-493-1-sm/file>.

BASTOS, P. S. D. S. **Histórico e principais elementos estruturais de concreto armado**. São Paulo, 2006.

BASTOS, P. S. S. **Concreto protendido - notas de aula. Disciplina: 2129 - Concreto Protendido**. Bauru: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2015.

BORGES, A. K. S. M., NETO, O. M. M., MENDONÇA, A. M. G. D. **Análise química-mineralógica de cimentos Portland comerciais**. Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis – REUCP, v. 15, n. 1, p. 66-73, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Osires-De-Melo-Neto/publication/353830640_Analise_quimica-mineralogica_de_cimentos_Portland_comerciais/links/611448a01e95fe241ac5eb51/Analise-quimica-mineralogica-de-cimentos-Portland-comerciais.pdf

BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. **Concreto armado-Eu te amo**. Editora Blucher, 2018. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=x951DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=concreto+armado&ots=ZiUxlnB3vQ&sig=7xFn7OK3X7_9pGGaQ02NMNQ6-Tk.

CAMPITELI, V. C. **Porosidade do concreto**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1987. Disponível em: http://www.pcc.poli.usp.br/files/text/publications/BT_00009.pdf.

CAPPELLESSO, V. G. **Uso de impermeabilizante por cristalização para redução da permeabilidade do concreto**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/159626>

CAPRARO, A. P. B. **Ataque interno de sulfatos: mudanças nas propriedades de compostos cimentícios**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/63002>.

CAPRARO, A. P. B.; DE MEDEIROS, M. H. F. **Avaliação do mecanismo de corrosão em concretos contaminados por pirita**. Revista Técnico-Científica, n. 21, 2019. Disponível em: <http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/sistema/index.php/revista/article/view/625>.

CARDOZO, A. C. **Concreto leve: mistura híbrida com argila expandida e vermiculita**. 2019. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/6488>.

CARVALHO, M. V. A. de. **Avaliação de meios filtrantes para filtro de mangas com sistema de limpeza de jato de ar pulsante do processo de despoejamento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica**. 2018. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/9780/CARVALHO_Max_2018.pdf?sequence=5&isAllowed=y.

CARVALHO, R. J. **Impacto Ambiental do Processo de Coqueificação**. ENTMME: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, v. 20, p. 445-452, 2004. Disponível em: https://www.artigos.entmme.org/download/2004/hidrometalurgia,_eletrometalurgia_e_pirometalurgia/1410%20-%20Carvalho,%20R.J.%20-%20IMPACTO%20AMBIENTAL%20DO%20PROCESSO%20DE%20COQUEIFICA%20C3%87%C3%83O.pdf.

CASTRO, Elisângela de. **Study of Concrete Strength by means of Small Cores and Sclerometry Essays**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CORDON, H. C. F., TADINI, F. B., AKIYAMA, G. A., ANDRADE, V. O. D., SILVA, R. C. D. **Development of electrically conductive concrete**. Cerâmica, v. 66, p. 88-92, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132020663772775>

COTOMACIO, A. C. **Engenharia diagnóstica aplicada à Perícia Criminal em local de desabamento: um ensaio de carbonatação com o uso de fenolftaleína**. Revista Brasileira de Criminalística, v. 13, n. 1, p. 125-134, 2024. Disponível em: <https://revista.rbc.org.br/index.php/rbc/article/view/732>.

DAI, Q.; WANG, Z.; HASAN, M. R. M. **Investigation of induction healing effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests**. Construction and Building Materials, v. 49, p. 729-737, 2013. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.089>.

DE FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Figueiredo-12/publication/293811669_Concreto_com_fibras/links/56bb6b1008ae2481ab6abc4f/Concreto-com-fibras.pdf.

DE FREITAS, H. L. **Análise numérica da eficiência de separação gás-líquido do lavador de gás da Arcelormittal Monlevade**. 2012. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-92EJJE/1/disserta__o_revis_o_final___hugo_leonardo_de_freitas.pdf.

DEHGHANPOUR, H., YILMAZ K, AFSHARI F, IPEK M. **Electrically conductive concrete: A laboratory-based investigation and numerical analysis approach.** t Construction and Building Materials. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119948>

DI DOMENICO, P., LIMA, T. T., CASTRO, M. N., CASTRO, R. M. 2018. **Influência do agregado miúdo reciclado na resistência à compressão e porosidade do concreto.** Revista Internacional de Ciências, v. 8, n. 1, p. 129-147. Disponível em: <https://doi.org/10.12957/ric.2018.33254>

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral**, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2020: ano base 2019.** Empresa de Pesquisa Energética e Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **DIN EN 14630: Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods.** CEN: Brussels, 2007

FERREIRA, C. N. G. **Dimensionamento de elementos estruturais em concreto leve.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 2015. 166 f. São Carlos, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/7576>

FLORES, B. D. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES TERMOPLÁSTICAS DO CARVÃO DA CAMADA BARRO BRANCO (SANTA CATARINA - BRASIL) E SUA INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE COQUEIFICAÇÃO.** Tese. Porto Alegre, 2018. UFRGS. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/188447>.

FRASSON, B. J. **Aproveitamento de subprodutos da mineração de carvão para produção de cimentos álcali ativados.** 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/189038/PECV1103-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.

GIMENEZ, L. M. **Relação da condutividade elétrica aparente com algumas propriedades físico-hídricas e com a variabilidade espacial dos solos.** 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-17122013-121535/en.php>.

GOBBO, L. de A., MONTANHEIRO, T. J., MONTANHEIRO, F., SANT'AGOSTINO, L. M. **Avaliação de cimento portland a partir da difração de raios x associada à análise por agrupamento.** Revista do Instituto Geológico, v. 34, n. 2, p. 41-49, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20130008>.

GRAUPMANN, O., MARTINS, M. A., CONSUL, M., CECHIN, L. **Análise da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de aterro**

sanitário. Matéria (Rio de Janeiro), v. 24, n. 2, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/cjWSrDhs4gPWTZR9gDpvR6G/?lang=pt#>.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland.** Isaia, Geraldo Cechella. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 905-944, 2007. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc48.pdf>.

HOFFMANN, L. **Efeitos da adição de materiais pulverulentos proveniente da britagem de rochas na resistência de concretos convencionais.** 2015. Disponível em: <https://www.acervodigital.ufpr.br/handle/1884/42769>.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. **Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos - HPA.** 2018. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/poluentes/hidrocarbonetos-policiclicos-aromaticos-hpa>.

JOENCK, V. B. C.; VILLENA, J. **Misturas Asfálticas Autorregenerativas: Estado da Arte.** 2018. 1º Simpósio de Transportes do Paraná. 2º Seminários em Aeroportos e Transporte Aéreo. 2ª Urbanidade. UFPR. Curitiba.

LENCIONI, J. W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios.** 2011. Disponível em: https://www.lareferencia.info/vufind/Record/BR_9465bfe50e2472229942693d8d95ba5f.

LENCIONI, J. W.; LIMA, A. G. **Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto—Estado-da-Arte.** In: VI Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, Córdoba, Argentina. 2010. Disponível em: http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar_2010/Topico%204/CINPAR%20124.pdf.

LIMA, C. R. S., OLIVEIRA, D. M., MENDES, W. J. S., JÚNIOR, J. S. **A influência do fator água/cimento na carbonatação de estruturas de concreto verificada através de ensaio acelerado e solução de fenolftaleína.** 15º Congresso Internacional de Patología y Recuperación de Estructuras. Universidad Nacional de Salta, Argentina, 2019.

LOUZEIRO, Gustavo Rodrigues Miranda. **Avaliação do ciclo de vida do cimento: análise do gasto energético do cimento LC³ em comparação aos cimentos portland CP-I e CP-IV.** 2018. 72 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

MALAQUIAS, B. S. **Efeito da adição de coque verde de petróleo na microestrutura e características metalúrgicas do coque.** 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/30197/1/Efeito%20da%20Adi%3%a7%3%a3o%20de%20Coque%20Verde%20de%20Petr%3%b3leo%20na%20Microestrut%20e%20Caracter%3%adsticas%20Metal%3%bargicas%20do%20Coque%20-%20Bruno%20Santos%20Mala~1.pdf>.

MEDEIROS JUNIOR, R. A.; MUNHOZ, G. S.; MEDEIROS, M. H. F. **Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana.** Revista ALCONPAT, v. 9, n. 2, p. 152-166, 2019. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-68352019000200152&script=sci_abstract&tlng=pt.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais.** São Paulo: Editora Ibracon, 2008. p. 12-14, 121, 122.

MICHELENA, I. **Influência da porosidade no módulo de elasticidade de um material compósito com foco na indústria de materiais de fricção.** 2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/150645/001009021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

MENDONÇA, M. G. S. **Influência de adições de grafite, óxido de grafite e grafite-like em argamassa de cimento Portland: durabilidade, propriedades mecânicas e resistividade elétrica.** 2019. 176 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2019.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** Editora Blucher, 2021.

PACHECO, F. TUTIKIAN, B. F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto.** 2020. 348 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Unisinos, São Leopoldo, RS, 2020. Disponível em: <https://repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/9376?show=full>

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação.** 2004. 176 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/5157>

PELLISSARI, V., MATOSKI, A., ALBERTI, M. E., MEDEIROS, A. **Absorção de água de amassamento em concretos produzidos com agregados reciclados.** Brazilian Applied Science Review, v. 4, n. 1, p. 51-69, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BASR/article/view/6079>.

RAJCAKOWSKA, M. **Self-Healing Concrete.** Tese (Doutorado). Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering – Luleå Tekniska Universitet. Luleå, Suécia. 2019. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1366001/FULLTEXT01.pdf>

ROCHA, J. H. A., SILVA, M., PÓVOAS, Y., MONTEIRO, E. **Análise da Profundidade de Fissuras em Concreto com Termografia Infravermelha.** Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 2, n. 3, 2017. Disponível em: <http://revistas.poli.br/~anais/index.php/rep/article/view/688/306>

ROIG-FLORES, M., FORMAGINI, S., SERNA, P. **Self-healing concrete-What Is it Good For?**. Revista Materiales de Construcción, v. 71, n. 341, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/mc.2021.07320>.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** 2006. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/5188/1/dissertacao%20LOURDIMINE%20SANTOS.pdf>.

SANTOS, M. L. **Estudo comparativo sobre os tipos de autocicatrização do concreto.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas. Faculdade de Tecnologia, 2021. Manaus, AM. Disponível em: https://riu.ufam.edu.br/bitstream/prefix/5995/3/TCC_MateusLima.pdf

SCHMIDT, B. C.; DIAS, L. A.; MEINHART, A. H.; KUNST, S. R.; OLIVEIRA, C. T.; ARNOLD, D. C. M. **Use of self-healing concrete and its influence on reinforcement corrosion.** Research, Society and Development, [S. l.], v. 11, n. 16, p. e333111638055, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i16.38055.

SCHWANTES, C. G. G. **Concreto Estrutural Leve: Resistência à compressão e módulo de elasticidade usando argila expandida como agregado graúdo.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Porto Alegre, RS. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/63166/000861222.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SILVA, F. F. da. **Uso de métodos numéricos para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto.** 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia civil). Universidade Federal do Pampa. Alegrete, RS, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/handle/riu/1731>

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino.** 2013. 130 f. Dissertação de mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

TAYEH, B. A., AKEED, M. H., QAIDI, S., BAKAR, B. H. A. **Influence of microsilica and polypropylene fibers on the fresh and mechanical properties of ultra-high performance geopolymer concrete (UHP-GPC).** Case Studies in Construction Materials. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01367>

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais.** 2007. Disponível em: <http://200.17.114.109/bitstream/riufal/385/1/Avalia%c3%a7%a3o%20de%20propriedades%20do%20concreto%20produzido%20com%20agregados%20reciclados%20de%20res%c3%aduos%20de%20constru%c3%a7%a3o%20e%20demoli%c3%a7%a3o%20visando%20aplica%c3%a7%b5es%20estruturais.pdf>.

TERREZO, V. B. da S. **Fissuras em edificações: causas e tratamentos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021. Ilha Solteira, SP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/bd7315e2-9770-4e3e-9f31-e83e4689ab6d/content>

THIENEL, K. C., HALLER, T., BEUNTNER, N. **Lightweight Concrete – From Basics to Innovations.** Materials. 2020, 13, 1120. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13051120>

VANGU, S., PHUATI, P., EALE, E., LOBOTA, M., NGIMBI, M. **Caractérisations Chimique et Minéralogique aux Rayons x et Suivi de la Broyabilité des Clinker, Dolérite, Basalte et Métabasalte du Kongo-Central pour une Application Cimentière.** ACASTI and CEDESURK Online Journal, 2022, 10 (1), pp.11-23. Disponível em: <https://hal.science/hal-03772224/document>

VICENTE, O. **Estudo sobre o comportamento elétrico do concreto utilizado em sistemas de aterramento estrutural.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina, Mestrado em Engenharia Elétrica, Londrina, 2010. Disponível em: http://www.uel.br/pos/meel/disserta/2010_Osni%20Vicente.pdf.

YEHIA, S. A.; TUAN, C. Y. **Bridge deck deicing.** 1998. Disponível em: <https://digitalcommons.unomaha.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=civilengfacproc>.