

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGE

BETTINA BUCHHOLZ

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO PARTICULADO DE TIJOLO COMO
SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PARA APLICAÇÃO EM
REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEÁVEL**

JOINVILLE

2023

BETTINA BUCHHOLZ

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO PARTICULADO DE TIJOLO COMO
SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PARA APLICAÇÃO EM
REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEÁVEL**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de mestre em
Engenharia Civil pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Centro de
Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade
do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Goulart dos
Santos

JOINVILLE

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

BUCHHOLZ, BETTINA
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO PARTICULADO DE
TIJOLO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO
PORTLAND PARA APLICAÇÃO EM REVESTIMENTO DE
PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEÁVEL / BETTINA
BUCHHOLZ. – 2023.
126 p.

Orientadora: Adriana Goulart dos Santos
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2023.

1. Pavimento permeável. 2. Resíduo de tijolo. 3. Concreto
permeável. I. Goulart dos Santos, Adriana. II. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

BETTINA BUCHHOLZ

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO PARTICULADO DE TIJOLO COMO
SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PARA APLICAÇÃO EM
REVESTIMENTO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEÁVEL**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de mestre em
Engenharia Civil pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Centro de
Ciências Tecnológicas – CCT, da Universidade
do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Goulart dos
Santos

BANCA EXAMINADORA:

Dr^a Adriana Goulart Dos Santos
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Dr^a Elisa Henning
Universidade do Estado de Santa Catarina

Dr Ricardo Almeida de Melo
Universidade Federal da Paraíba

JOINVILLE, 31 DE JULHO DE 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado forças para enfrentar e vencer todos os obstáculos que haviam no caminho e me separavam deste momento. Agradeço à minha família pelo suporte durante este tempo de pós-graduação e apoio nos momentos que precisei. Agradeço em especial à minha mãe Claudia Bindemann Buchholz, à minha tia Elke Bindemann Richter e às minhas irmãs Nicole e Caroline por serem sempre meu porto seguro nos períodos de dificuldade. Aos amigos que conquistei durante essa caminhada, por me ensinarem todos os dias os valores de uma amizade, por todo o companheirismo, incentivo e crescimento que vivenciamos juntos.

Agradeço à Universidade do Estado de Santa Catarina, instituição que carrego e sempre carregarei no coração. Sou eternamente grata a todos os professores que me acompanharam nessa trajetória, em especial a minha orientadora Adriana Goulart dos Santos, e ao técnico de laboratório Adilson Schackow pelo suporte e incentivo. Por fim, agradeço à FAPESC e PROAP/AUXPE pelo período no qual fui bolsista.

RESUMO

A indústria cimenteira é responsável por grande parcela do dióxido de carbono emitido na atmosfera, e a busca por meios de diminuição do consumo dessa matéria prima é uma realidade constante. Atrelado à necessidade de diminuição de emissão de gases poluentes, a valorização de resíduos é colocada em pauta através do reaproveitamento de materiais que seriam descartados. Neste contexto, a pesquisa estuda o efeito da utilização do resíduo particulado de tijolo (RPT) nas propriedades do concreto permeável, incluindo resistência à tração na flexão, resistência à compressão, permeabilidade, porosidade, massa específica e refletância solar. Concretos permeáveis sustentáveis foram desenvolvidos utilizando resíduo particulado de tijolo para reduzir o consumo de cimento. Para os ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à compressão, permeabilidade, porosidade e massa específica, o cimento foi substituído por RPT em proporções de 5%, 7,5% e 10%, já para os ensaios de refletância solar as substituições foram de 5%, 10% e 15%. No ensaio mecânico de resistência à tração na flexão, buscou-se atingir a resistência mínima de 2 MPa como especificado em norma para concretos permeáveis aplicados em vias de tráfego leve. O método de análise da variância (ANOVA) foi utilizada para verificar a influência dos parâmetros. Análises de correlação e regressão foram propostas entre as propriedades. Cálculos de redução de emissão de CO₂ foram realizados. Verificou-se que o teor de RPT tem pouco ou nenhum impacto na porosidade e permeabilidade das amostras de concreto permeável. Amostras de concreto permeável com resíduo apresentam maior resistência à compressão em comparação com as amostras de referência quando o teor de RPT é de 0-7,5%, e maior resistência à tração na flexão quando o teor de RPT é de 0-5%, acima destes valores as resistências são comprometidas. Constata-se também que 5% de RPT na pasta de cimento pode aumentar a refletância solar em 0,07. Com base nos resultados, conclui-se que produzir concreto permeável substituindo até 5%, em peso, de cimento por RPT é viável para reduzir as emissões de CO₂ e melhorar todas as propriedades do concreto simultaneamente. Considerando a hipótese de utilização de resíduo particulado de tijolo como insumo para pavimentação, através da substituição parcial do cimento Portland, concluiu-se que o material se adequa à aplicação em pavimentos permeáveis de concreto, fornecendo ao material desempenho mecânico satisfatório dentro das especificações técnicas para vias de tráfego leve.

Palavras-chave: Pavimento permeável; Resíduo de tijolo; Concreto permeável.

ABSTRACT

The cement industry is responsible for most of carbon dioxide (CO₂) emissions to the atmosphere, and the search for ways to reduce the consumption of this material is a reality. Linked to the need for reducing pollutant gas emissions, the valorization of waste is being discussed through the reuse of materials that would otherwise be discarded. This research studied the effect of brick waste powder (BWP) on the properties of pervious concrete, including flexural tensile strength, compressive strength, permeability, porosity, specific mass and solar reflectance. Sustainable pervious concretes were developed using brick waste to lower cement usage. For the tests of flexural tensile strength, compressive strength, permeability, porosity, and specific mass, pervious concrete with 5 wt.%, 7.5 wt.%, and 10 wt.% of brick waste powder replacing Portland cement were produced. For the solar reflectance test, replacements with 5 wt.%, 10 wt.%, and 15 wt.%. In the flexural tensile strength test, pervious concrete must have a flexural tensile strength of at least 2.0 MPa as specified in the standard for pervious concretes for use in light traffic roads. Analysis of variance (ANOVA) was used to check the influence of the parameters, and correlations and linear regressions were proposed between the properties. Potentially reduce CO₂ emissions in cement production was calculated. It is found that the BWP content has little and/or no impact on the porosity and permeability of the BWP pervious concrete samples considered here. BWP pervious concrete samples show greater compressive strength than conventional ones when the BC content is 0–7.5%, and greater flexural tensile strength when the BWP content is 0–7.5%, above which these strengths are compromised. It was also found that 5% of BWP in the cement paste can increase solar reflectance by 0.07. Based on findings, it is concluded that producing pervious concrete by replacing up to 5%, in weight of cement with BWP is feasible to curtail CO₂ emissions and improving all concrete properties simultaneously. Considering the hypothesis of using brick waste powder as an input for paving through the partial replacement of Portland cement, it is possible to conclude that pervious concrete made with RPT is suitable for use in light traffic roads, as it reached higher values in mechanical properties than those recommended by the standards.

Keywords: Brick waste; Pervious concrete; Pervious pavement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Pavimento permeável aplicado	25
Figura 2 - Ligação de pasta entre os agregados de concreto permeável.....	27
Figura 3 – Resíduo de tijolo	30
Figura 4 - Curvas granulométricas típicas de misturas de concreto permeável	36
Figura 5 - Concreto permeável com diferentes teores de água formando uma bola	38
Figura 6 – Fibras de polipropileno	40
Figura 7 - Fluxograma da etapa experimental	45
Figura 8 – Moinho de bolas.....	46
Figura 9 – Resíduo antes e após moagem.....	47
Figura 10 – Concreto no estado fresco	50
Figura 11 – Corpos de prova resistência à tração na flexão	52
Figura 12 – Ensaio resistência à tração na flexão.....	53
Figura 13 – Seção do corpo de prova após rompimento	54
Figura 14 – Ensaio resistência à compressão	55
Figura 15 – Ensaio de permeabilidade	58
Figura 16 – Misturador para pasta de cimento	60
Figura 17 – Amostras ensaio de refletância solar.....	61
Figura 18 - Distribuição granulométrica do RPT	65
Figura 19 – Brita 1.....	68
Figura 20 – Curva granulométrica da brita 1.....	69
Figura 21 – Pedrisco	70
Figura 22 – Curva granulométrica do pedrisco	71
Figura 23 – Resistência à tração na flexão	72
Figura 24 – Regressão Resistência à tração na flexão x %RPT	74
Figura 25 – Resistência à compressão.....	76
Figura 26 – Regressão resistência à compressão x %RPT	78
Figura 27 - Porosidade.....	80
Figura 28 – Coeficiente de permeabilidade.....	83
Figura 29 – Massa específica	85
Figura 30 – Curvas espectrais de refletância (0% RPT).....	87
Figura 31 - Curvas espectrais de refletância (5% RPT)	88
Figura 32 - Curvas espectrais de refletância (10% RPT)	88

Figura 33 - Curvas espectrais de refletância (15% RPT)	89
Figura 34 – Refletância solar.....	89
Figura 35 – Regressão refletância solar x %RPT	91
Figura 36 - Correlação de Pearson: resistência à compressão x resistência à tração na flexão	94
Figura 37 - Regressão linear: resistência à compressão x resistência à tração na flexão	94
Figura 38 - Correlação de Pearson: resistência à tração na flexão x massa específica	96
Figura 39 - Regressão linear: resistência à tração na flexão x massa específica.....	96
Figura 40 - Correlação de Pearson: resistência à tração na flexão x porosidade.....	97
Figura 41 - Regressão linear: resistência à tração na flexão x porosidade	98
Figura 42 - Correlação de Pearson: resistência à tração na flexão x permeabilidade	99
Figura 43 - Regressão linear: resistência à tração na flexão x porosidade	99
Figura 44 - Correlação de Pearson: resistência à compressão x massa específica	100
Figura 45 - Regressão linear: resistência à compressão x massa específica	101
Figura 46 - Correlação de Pearson: resistência à compressão x porosidade	102
Figura 47 - Regressão linear: resistência à compressão x porosidade.....	102
Figura 48 - Correlação de Pearson: resistência à compressão x permeabilidade	104
Figura 49 - Regressão linear: resistência à compressão x permeabilidade.....	104
Figura 50 - Correlação de Pearson: porosidade x permeabilidade	106
Figura 51 - Regressão linear: porosidade x permeabilidade.....	106
Figura 52 - Correlação de Pearson: porosidade x massa específica	108
Figura 53 - Regressão linear: porosidade x massa específica	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do traço	49
Tabela 2 – Quantidade de corpos de prova.....	49
Tabela 3 – Determinação da massa de água para ensaio	56
Tabela 4 – Distribuição granulométrica do RPT	65
Tabela 5 – Composição química do RPT	66
Tabela 6 – Massa retida acumulada da brita 1.....	69
Tabela 7 – Massa retida acumulada do pedrisco	71
Tabela 8 – Resultados ANOVA	93
Tabela 9 – Redução de emissão de CO ₂	109

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral.....	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	DRENAGEM E IMPERMEABILIZAÇÃO URBANA.....	17
2.2	ILHAS DE CALOR.....	18
2.3	PAVIMENTO PERMEÁVEL.....	24
2.4	RECURSOS NATURAIS E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS	27
2.5	RESÍDUO PARTICULADO DE TIJOLO RPT	29
2.6	REAÇÃO CIMENTO – POZOLANA	33
2.7	MATERIAIS UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL	34
2.7.1	Aglomerantes.....	35
2.7.2	Agregados	35
2.7.3	Água	37
2.7.4	Aditivos	38
2.7.5	Fibras de polipropileno	39
2.8	PESQUISAS COM RESÍDUOS EM CONCRETO PERMEÁVEL.....	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DO RESÍDUO PARTICULADO DE TIJOLO.....	46
3.1.1	Preparação do resíduo.....	46
3.1.2	Caracterização do resíduo	47
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS	48
3.3	MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	48
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO.....	50
3.4.1	Resistência à tração na flexão.....	50
3.4.2	Resistência à compressão	54
3.4.3	Porosidade e massa específica.....	55
3.4.4	Coeficiente de permeabilidade.....	56
3.4.5	Refletância	58

3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	61
3.6	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO E ANÁLISE DE REGRESSÃO	63
3.7	REDUÇÃO DE EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO.....	64
4	RESULTADOS	65
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO PARTICULADO DE TIJOLO.....	65
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS	67
4.2.1	Brita 1	67
4.2.2	Pedrisco.....	70
4.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	71
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	75
4.5	POROSIDADE	80
4.6	PERMEABILIDADE	82
4.7	MASSA ESPECÍFICA	85
4.8	REFLETÂNCIA SOLAR.....	87
4.9	SUMARIZAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANOVA.....	92
4.10	CORRELAÇÕES E REGRESSÕES.....	93
4.10.1	Resistência à tração na flexão x resistência à compressão	93
4.10.2	Resistência à tração na flexão x massa específica	95
4.10.3	Resistência à tração na flexão x porosidade	97
4.10.4	Resistência à tração na flexão x permeabilidade	98
4.10.5	Resistência à compressão x massa específica	100
4.10.6	Resistência à compressão x porosidade	101
4.10.7	Resistência à compressão x permeabilidade	103
4.10.8	Porosidade x permeabilidade.....	105
4.10.9	Porosidade x massa específica	107
4.11	CÁLCULO DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO ₂	109
5	CONCLUSÕES.....	110

1 INTRODUÇÃO

A problemática referente à necessidade de se encontrar formas de redução do consumo do cimento Portland na construção civil provém dos malefícios da poluição ambiental e do alto consumo de energia atrelados à sua fabricação (ZHAO *et al.*, 2020). A indústria do cimento contribui com cerca de 7% do total mundial de emissões de CO₂ (ALI *et al.*, 2011).

A China e a Índia são as maiores produtoras mundiais de cimento, sendo a China detentora de cerca de 53,7% de toda a produção mundial, enquanto a Índia, segunda colocada, dispõe de apenas 8,3%, seguida do Vietnã com 2,3% e dos Estados Unidos com 2,2%, o Brasil aparece como oitavo maior produtor, com 1,4% (USGS, 2021). Na China, a indústria de cimento é a principal fonte emissora de dióxido de carbono e poluentes atmosféricos, sendo responsável por 15% do total de dióxido de carbono emitido no país (ZHANG *et al.*, 2016).

Da produção do cimento derivam duas fontes de geração de dióxido de carbono, a geração relacionada ao processo de produção de cimento, dada através da queima de carbonatos que ocorre durante as reações químicas da fase de fabricação do clínquer, principal componente do cimento, e através da queima do combustível fóssil que gera a energia necessária para o processo de produção (ANDREW, 2018; LIU *et al.*, 2015; BARCELO *et al.* 2014). As emissões relacionadas ao processo de produção são a principal fonte geradora de dióxido de carbono vinculadas à produção de cimento na China, correspondendo a 63,1% do total emitido (SHAN *et al.*, 2019). Segundo Arachchige *et al.* (2019), 40% da emissão de CO₂ vinculada ao cimento é devido à queima do combustível fóssil, 50% provém do processo de produção devido a carbonatação do calcário e 10% está atrelado ao transporte e manuseio. As emissões globais são estimadas em 0,9 – 1,0 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento produzida (IPCC, 2005; ALI *et al.*, 2011).

Vários materiais secundários podem ser incorporados como materiais cimentícios complementares em concretos e argamassas (USGS, 2021). Após sua moagem, o resíduo particulado de tijolo (RPT), material dotado de característica pozolânica, poderia ser aplicado para este fim, como substituto parcial do cimento Portland. Tanto o impacto ambiental quanto a análise de custos indicam que o consumo de energia empregado e a emissão de CO₂ do cimento híbrido são reduzidos em comparação com o cimento Portland puro (ZHAO *et al.*, 2020).

Materiais não convencionais estão cada vez mais sendo utilizados como substitutos parciais do cimento Portland em diferentes aplicações do concreto (USGS, 2021). Estudos de materiais alternativos para redução da quantidade de cimento na composição do concreto vêm

sendo desenvolvidos continuamente em vários países do mundo a fim de reduzir o consumo desta matéria prima (GE *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2021; SCHACKOW *et al.*, 2020; STOLZ *et al.*, 2019; JOCHEM *et al.*, 2021; HENRÍQUEZ *et al.*, 2021).

O resíduo particulado de tijolo é um material residual que pode ser obtido de maneira simples, processando o tijolo em etapas de britagem, moagem e peneiramento. Suas propriedades físicas e químicas apresentam características pozolânicas, o que indica ser um potencial substituinte do cimento Portland. O emprego do RPT como ligante hidráulico é positivo da perspectiva ambiental ao tornar funcional um resíduo que seria descartado, bem como pela redução de custos de produção de compostos cimentícios e escassez de matéria prima (HE *et al.*, 2021). Com um grande número de resíduos de construção sendo utilizados para substituir o cimento na sua preparação, os impactos ambientais podem ser reduzidos de forma eficaz (ZHAO *et al.*, 2020).

As propriedades mecânicas dos materiais cimentícios podem ser melhoradas com a adição de uma quantidade adequada de RPT. No entanto, se a quantidade de RPT for muito grande, as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios diminuem. Com base em resultados de pesquisas, o nível de substituição ideal de cimento com RPT varia de 5 a 15% (HE *et al.*, 2021). A resistência à compressão de argamassas com a adição RPT é em geral de 10 a 35% menor do que sem a adição, porém, com a redução do tamanho da partícula de RPT o crescimento da resistência à compressão é acelerado, o que indica que as propriedades pozolânicas do material são melhoradas com o refinamento (ZHAO *et al.*, 2020).

Aliado à valorização de resíduos, a pavimentação permeável é outra alternativa sustentável que visa reduzir os impactos causados pela impermeabilização dos centros urbanos. O emprego desta tecnologia ajuda a combater problemas de inundações, redução do lençol freático e ilhas de calor, além de auxiliar no escoamento superficial da água na pista de rolamento (SABOO *et al.*, 2020).

Ao invés de impermeabilizar a superfície e reduzir seus poros como no pavimento convencional, o pavimento permeável abre a estrutura dos poros facilitando a infiltração, evaporação e armazenamento volumétrico de água, além de melhorar os quesitos de geração de ruído e aderência do pneu com a pista de rolamento (SANSALONE *et al.*, 2008). À medida que a porosidade do material aumenta, sua resistência à compressão diminui, mas usando proporções de mistura e consistências adequadas, o concreto permeável tem resistências mecânicas suficientes para ser aplicado na pavimentação (AKKAYA; ÇAĞATAY, 2021).

Assim, considerando a hipótese de utilização de resíduo particulado de tijolo como insumo para pavimentação, empregando-o como substituto parcial do cimento Portland, espera-

se que o material se adeque à aplicação em pavimentos permeáveis de concreto, fornecendo ao material desempenho mecânico e propriedades físicas satisfatórias dentro das especificações técnicas para condições de via de tráfego leve.

1.1 JUSTIFICATIVA

Admitindo a necessidade de desenvolvimento de novos materiais sustentáveis, a preocupação atrelada ao aquecimento e inundação das cidades e o impacto da geração de resíduos destinados à aterros sanitários, esta pesquisa justifica-se pelo intuito de conciliar desenvolvimento tecnológico e ambiental, ao aliar estudos referentes à emissão de poluentes, valorização de resíduos, permeabilidade dos centros urbanos e mitigação de ilhas de calor.

Nos Estados Unidos, o grau de impermeabilização das regiões metropolitanas é superior a 60%, desta área 30% está associada ao pavimento rodoviário e 25% à estacionamentos (SANSALONE *et al.*, 2008). Segundo Kauffmann e Silva (2005), a geração de maior impacto proveniente da urbanização para o regime hidrológico é a impermeabilização do solo das bacias e a diminuição da taxa de impermeabilização. Portanto, o âmbito da pesquisa acerca do pavimento permeável é de grande importância no que tange a busca por melhorias para a sociedade no que se refere ao alívio nas inundações repentinas advindas de chuvas intensas, reposição de águas subterrâneas que é influenciado negativamente por solos impermeabilizados que impedem a infiltração de água e a mitigação de ilhas de calor causadas pela urbanização.

No que tange a necessidade de redução de emissão de poluentes, a Organização Mundial da Saúde reconhece que a poluição do ar é um fator de risco crítico para doenças não transmissíveis, causando cerca de 24% das mortes de adultos por doenças cardíacas, 23% por acidente vascular cerebral, 43% por doença pulmonar obstrutiva crônica e 29% de câncer de pulmão. Dados mostram que 9 em cada 10 pessoas respiram ar contendo altos níveis de poluentes e que cerca de 7 milhões de pessoas morrem todos os anos devido à esta alta exposição (OMS, 2018).

A indústria de cimento está na segunda colocação como setor industrial que mais emite CO₂ na China, devido a estes dados, o país segue recebendo críticas para reduzir sua quantidade de emissão para níveis aceitáveis. Para isso são necessárias inovações tecnológicas que desenvolvam novos materiais de construção para substituir a utilização do cimento (XU *et al.*, 2014).

A produção de cada tonelada de cimento exige cerca de 130 Kg de combustível e 110 KWh de energia elétrica. A emissão total de CO₂ para a produção de uma tonelada de cimento

nos Estados Unidos, na China e na Índia é de cerca de 930 Kg (IPCC, 2007). Segundo Freire (2016), a média mundial de emissão de CO₂ por tonelada de cimento produzida é de 900 Kg/ton. Segundo Hasanbeigi *et al.* (2010) a indústria cimenteira emite cerca de 0,9 toneladas de CO₂ para cada tonelada de cimento Portland produzida. Segundo Moradikhou *et al.* (2020), o processo de produção de Cimento Portland é uma das principais fontes de emissão de CO₂, na sua fabricação 1 tonelada de CO₂ é liberada para produzir 1 tonelada de cimento, este setor é responsável por 7 a 10% das emissões globais de CO₂.

Outro fator que justifica a realização desta pesquisa refere-se à valorização de resíduos. A indústria de construção e demolição produz milhões de toneladas de resíduos, sendo o tijolo e o concreto os principais componentes deste montante. O método atual de descarte destes resíduos envolve a coleta por empresas de saneamento e despejo em aterros sanitários (CHOUDHARY *et al.*, 2021; CHEN *et al.*, 2011; POON; CHAN, 2007). A China produz cerca de 1,8 bilhões de toneladas de resíduos de construção e demolição a cada ano, e os Estados Unidos, aproximadamente 700 milhões (XIAO *et al.*, 2018; WU *et al.*, 2019).

O resíduo de tijolo não apenas provém da construção e demolição de edifícios, o resíduo pode provir diretamente da indústria oleira devido à problemas de homogeneidade da matéria prima e irregularidades na etapa de secagem e queima, o que pode ocasionar trincas ou até quebra do material na etapa final de produção, estes resíduos não podem ser reaproveitados e são por fim descartados (SCHACKOW, 2015).

Logo, são necessários o entendimento e a aplicação dos conhecimentos acerca de soluções que venham a mitigar os impactos causados pela urbanização. Cabe à esta pesquisa a determinação das propriedades físicas e resistências mecânicas do pavimento de concreto permeável com adição de RTP, a fim de se obter informações a respeito de sua possível aplicação em vias de tráfego leve.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o impacto da incorporação de resíduo particulado de tijolo como substituto parcial do cimento Portland nas propriedades do concreto permeável aplicado no revestimento de pavimentos.

1.2.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral desta pesquisa, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- a) Desenvolver misturas de concreto permeável que atinjam os requisitos de resistência à tração na flexão e permeabilidade;
- b) Investigar o efeito do resíduo particulado de tijolo em substituição ao cimento nas propriedades físicas e de resistência mecânica do concreto permeável;
- c) Buscar a quantidade ideal de resíduo que resulte na melhoria das propriedades do concreto permeável;
- d) Estimar a quantidade de CO₂ que deixa de ser emitida por metro cúbico de concreto ao reduzir o consumo de cimento substituindo-o por resíduo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão tratados conceitos referentes à drenagem e permeabilidade dos centros urbanos, seu impacto no meio ambiente e o desenvolvimento de produtos sustentáveis por meio da valorização de resíduos. Posteriormente, serão apresentados conceitos sobre o concreto e seus materiais constituintes, incluindo abordagem sobre o resíduo (RPT) em estudo. Por fim, o estado da arte é destacado ao discutir pesquisas atuais com resíduos inseridos no concreto permeável.

2.1 DRENAGEM E IMPERMEABILIZAÇÃO URBANA

O número de pessoas vivendo em áreas urbanas no mundo já ultrapassou os residentes de áreas rurais. Em 2009, quando ocorreu o marco, os moradores de áreas rurais representavam cerca de 3,41 bilhões de pessoas, sendo ultrapassado por 3,42 bilhões de moradores de áreas urbanas. O aumento do nível de urbanização tende a continuar e globalmente atingir proporções de cerca de 69% em 2050 (UN, 2009). Segundo a Organização da Nações Unidas (2019), 55% da população mundial vive em áreas urbanas e até 2050 este número deve chegar a 70%.

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015), a maior parte da população brasileira, 84,72%, vive em áreas urbanas, o restante, 15,28%, vivem em áreas rurais. A Grande Região com maior percentual de população urbana é o Sudeste, com 93,14% das pessoas vivendo em áreas urbanas. A Região Nordeste é a que conta com o maior percentual de habitantes vivendo em áreas rurais, 26,88% (IBGE, 2015).

A urbanização implica na concentração da população em um espaço reduzido com grande competição pelos recursos naturais, como solo e água. Este crescimento, tem levado à canalização de rios e excessiva impermeabilização do espaço urbano através de novas edificações e implantação de ruas e avenidas necessárias para a infraestrutura das cidades (TUCCI, 2012). Esta ocupação do solo por áreas impermeáveis, sejam elas telhados, áreas de passeio, ruas, estacionamentos, entre outros, causam alteração do ciclo hidrológico local, ocasionando enchentes e degradação da qualidade das águas pluviais (ARAUJO *et al.*, 2000).

Um dos principais problemas relacionados ao uso do solo é o impacto direto sobre os recursos hídricos. A urbanização tende a impermeabilizar o solo e acelerar o escoamento de água por condutos e canais, desta forma, a quantidade de água que chega ao mesmo tempo no sistema de drenagem é aumentada, pois há pouco espaço para que a água pluvial penetre no solo e seja absorvida, provocando inundações mais frequentes do que quando a superfície era

permeável e o escoamento se dava de forma natural (BALBO, 2020; HASELBACH *et al.*, 2011; TUCCI, 2012).

No Brasil, as rodovias são predominantemente compostas por revestimentos de concreto asfáltico denso, ou seja, impermeáveis (BERNUCCI *et al.*, 2008). As inundações urbanas são a maior ameaça para muitas cidades em todo o mundo, com impactos mais significativos nos países em desenvolvimento. O aumento na velocidade e no volume de água dos condutos, causam elevação no nível de reservatórios e rios, erosão de solos em seu transporte, e ainda o arraste de outros materiais e detritos presentes no meio urbano (BALBO, 2020).

Para conter esse problema, o sistema de drenagem urbana é desenvolvido para escoar o mais rapidamente, as águas provenientes das precipitações (ARAUJO *et al.*, 2000). A drenagem urbana é composta de diversos elementos, como sarjetas, valetas, bocas de leão, bocas de lobo e tubulações, e o pavimento, no geral, é um componente impermeável do sistema viário, idealizado para permitir o tráfego de veículos com conforto, segurança e economia, não concebendo, portanto, o conceito de permeabilidade em suas camadas (BALBO, 2020).

Porém, a tendência para a área de drenagem urbana é a busca pelo equilíbrio entre o meio ambiente e a urbanização. Atrelado a este conceito, cabe o desenvolvimento de dispositivos de acréscimo de infiltração e retardo de escoamento superficial. O pavimento permeável é destinado para este fim. Ele é capaz de reduzir a vazão drenada superficialmente, melhorar a qualidade da água, diminuir o impacto da erosão de sedimentos e ainda contribuir para a recarga de águas subterrâneas (ARAUJO *et al.*, 2000).

Além de permitir que as águas pluviais infiltrem no solo, a segurança viária também tem impulsionado o desenvolvimento de pavimentos permeáveis, pois durante os eventos e chuva ele é capaz de drenar a maior parte da água e garantir aderência à superfície (GIULIANI *et al.*, 2021). A permeabilidade concedida por estes pavimentos, permite que áreas de pedestres e ciclistas não empocem, favorecendo o deslocamento da população com conforto e segurança (BALBO, 2020).

O pavimento permeável é considerado um dos mais importantes desenvolvimentos para bacias hidrográficas urbanas, capaz de restaurar rapidamente áreas impermeabilizadas, combinando a função mecânica do pavimento com o gerenciamento de águas pluviais em uma única estrutura (FERGUSON, 2006).

2.2 ILHAS DE CALOR

À medida que as áreas urbanas se desenvolvem, edifícios, estradas e construções gerais tomam o lugar que antes era preenchido por vegetações ou áreas ainda não ocupadas, assim, superfícies que antes eram permeáveis e úmidas se tornam impermeáveis e secas (STEWART; OKE, 2012). Segundo Synnefa *et al.* (2007), áreas urbanas em todo o mundo estão sofrendo um rápido crescimento populacional e, por consequência, expansão urbana. Áreas ainda não exploradas e espaços cobertos por vegetação natural estão sendo substituídos por casas e condomínios residenciais, que além de sua própria implantação, necessitam de infraestrutura como calçadas e estradas de acesso. Como sequela deste processo, a energia solar absorvida pelas superfícies de concreto e asfalto faz com que a temperatura local se eleve em comparação com a zona ainda não urbanizada.

Conforme o mundo se torna mais urbano, as preocupações com o calor dentro das cidades ganham proporções maiores (HASELBACH *et al.*, 2011). Este crescimento populacional, levou ao aumento do uso de materiais de construção em substituição aos materiais naturais que compunham suas superfícies, fazendo com que a temperatura interna das cidades aumentasse e originasse o que chamamos de ilhas de calor urbano (CARPIO *et al.*, 2020). Segundo Stewart e Oke (2012), esse fenômeno é relevante em quase todas as áreas urbanas, não importando se a cidade estudada é pequena ou grande, ou se está situada em um clima quente ou frio.

O fenômeno denominado ilha de calor é um efeito produzido pelo crescimento das cidades, nas quais a temperatura ambiente é significativamente mais alta do que nos seus arredores rurais, isto, devido a absorção e ao acúmulo de calor nos pavimentos e itens de infraestrutura urbana que tornam a superfície impermeável e favorecem o aumento de temperatura (STEWART; OKE, 2012). Segundo EPA (2008), as ilhas de calor referem-se a temperaturas elevadas em áreas urbanizadas quando comparadas com seu entorno rural, e são causadas pelas mudanças nas propriedades radiativas e térmicas dos componentes da infraestrutura urbana.

A temperatura da superfície influencia indiretamente a temperatura do ar à sua volta. Locais com temperaturas superficiais mais frias, como parques e áreas com vegetação, contribuem para temperaturas mais frias do ar. Por outro lado, áreas com revestimentos densos, geralmente elevam a temperatura ambiente (EPA, 2008).

Com o avanço da urbanização e o crescente estudo de questões ambientais, o pavimento impermeável foi reconhecido como um dos maiores contribuintes para os efeitos de ilhas de calor, isto porque os pavimentos cobrem uma fração considerável do solo urbano (WU

et al., 2017). Segundo Haselbach (2009), superfícies pavimentadas são grandes contribuintes para o efeito de ilha de calor urbano, pois absorvem e armazenam energia durante o dia.

Segundo Akbari *et al.* (2009), pavimentos e telhados normalmente constituem mais de 60% das superfícies urbanas, sendo os telhados aproximadamente 20% e os pavimentos cerca de 40%. Segundo Carpio *et al.* (2016), no Brasil, o principal material utilizado para pavimentação de estradas nas grandes cidades é o pavimento denso produzido a partir do asfalto, componente derivado da destilação fracionada do petróleo. Segundo Qin (2015), pavimentos de asfalto são mais utilizados em relação ao pavimento de concreto de cimento Portland, porém, absorvem mais radiação solar. Segundo Qin e Hiller (2014), os pavimentos impermeáveis possuem superfície escura e grande inércia térmica, absorvem e armazenam uma grande quantidade de radiação solar, além de impedir o resfriamento evaporativo, contribuindo assim para o desenvolvimento de ilhas de calor.

As ilhas de calor têm o efeito de aumentar a demanda de energia, causando desconforto térmico e problemas de saúde ao intensificar ondas de calor sobre as cidades (SYNNEFA *et al.*, 2007; HASELBACH *et al.*, 2011). Segundo Santamouris *et al.* (2012), este fenômeno aumenta a temperatura das áreas urbanas e por consequência eleva o consumo de energia elétrica destinada ao resfriamento de ambientes, além de afetar a qualidade ambiental das cidades, fatos que tornam imprescindível o estudo de técnicas de mitigação que contribuam para a redução das temperaturas e melhoria do conforto urbano em áreas abertas. Segundo Stewart e Oke (2012), são necessárias estratégias de mitigação e adaptação, principalmente para as cidades que estão em constante crescimento e sofrem um eminente acréscimo de estresse térmico urbano.

De acordo com Carpio *et al.* (2020), há interesse científico no desenvolvimento de métodos de mitigação e adaptação dos efeitos das ilhas de calor na área de construção civil. Artigos recentes estudam novos tipos de pavimentos com abordagem ambiental que defendem a ideia de que os pavimentos são parte do ambiente urbano e devem apresentar multifuncionalidade, não apenas para mitigar as zonas de calor, mas também para serem ecologicamente corretos e proporcionar melhor qualidade de vida nas cidades.

Em seu trabalho, Ward *et al.* (2016) afirma que as cidades são compostas por uma combinação de materiais complexos e heterogêneos que ocupam proporções diferentes do solo. Cada tipo de material possui suas próprias características térmicas e resulta em diferentes condições de temperatura, sendo que os efeitos das superfícies impermeáveis contribuem significativamente para a absorção e geração de fluxo de calor. Segundo Berdahl e Bretz (1997), um solo natural de uma área rural, exposto à radiação solar durante um dia quente de verão,

permanece com a temperatura próxima à do ar nas mesmas circunstâncias, já os telhados e pavimentos de uma área urbana próxima, podem atingir até 50°C a mais do que a temperatura ambiente.

Os materiais constituintes das áreas urbanas, como telhados e pavimentos, normalmente possuem albedos menores do que em áreas rurais. Por consequência, estas áreas refletem menos e absorvem mais a energia solar emitida sobre elas. Este calor absorvido aumenta as temperaturas superficiais e contribui para a formação de ilhas de calor. Logo, as cidades se tornam armazenadoras da energia solar em forma de calor em suas estruturas. Áreas metropolitanas podem armazenar até o dobro da quantidade de calor em comparação com suas proximidades rurais durante o dia (EPA, 2008).

Um pavimento impermeável absorve uma grande quantidade de energia durante um dia ensolarado, e como não ocorre evaporação, a temperatura da superfície se mantém significativamente mais alta do que o ambiente ao redor. Essa alta temperatura produz troca de calor com a atmosfera, causando o aumento da temperatura do ar na área urbana se comparado com a zona rural circundante (ASAEDA; CA, 2000).

Com o intuito de alcançar pavimentos com alta resistência e durabilidade, estas estruturas são normalmente projetadas para serem impermeáveis e compostas de materiais densos. A sua influência no aumento da temperatura não está apenas relacionada ao armazenamento de calor adicional no material constituinte do pavimento, mas também através da redução do resfriamento por meio de processo evaporativo que se daria em uma superfície permeável (WU *et al.*, 2017).

Os pavimentos, antes vistos como estruturas projetadas apenas para passagem de veículos, hoje são vistos como um ativo ecológico e componente importante do meio ambiente. Além da estabilidade estrutural e durabilidade, espera-se que um pavimento também assuma funções de redução de ruídos, mitigação de ilhas de calor e sustentabilidade (JIANG *et al.*, 2018).

Os pavimentos permeáveis foram reconhecidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2008) como uma importante estratégia para mitigar os efeitos das ilhas de calor, podendo diminuir a temperatura do ar e consequentemente, reduzir o uso de energia vinculado ao resfriamento de ambientes e as emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao consumo direto de energia elétrica (WU *et al.*, 2017; AKBARI *et al.*, 2009; AKBARI; MATTHEWS, 2012).

Os pavimentos permeáveis foram criados originalmente visando a drenagem de vias urbanas, no entanto, como permitem a percolação da água até o solo subjacente, o fenômeno de

evaporação pode acontecer na sua superfície. Devido a evaporação, uma parte do calor absorvido é convertido em calor latente, semelhante aos fenômenos que ocorrem em superfícies naturais cobertas por vegetação. Portanto, a implementação de pavimentos porosos pode ser um dos métodos mais eficazes para moderar as condições térmicas levando a uma redução da taxa de aquecimento atmosférico que afeta diretamente as pessoas nos dias quentes de verão (ASAEDA; CA, 2000).

O pavimento de concreto permeável é uma tecnologia que pode ajudar a mitigar os efeitos das ilhas de calor. Em pavimentos impermeáveis, uma parcela da radiação incidente é armazenada no material e transmitida por condução para o solo, nos pavimentos permeáveis, essa energia acumulada pode ser dissipada através da transferência de calor para a água armazenada nos poros da estrutura por meio de resfriamento evaporativo. Além disso, o autor afirma que após ondas de calor, o sistema de concreto permeável é capaz de esfriar mais rapidamente quando comparado ao concreto convencional (HASELBACH *et al.*, 2011).

A energia absorvida pelo pavimento impermeável se mantém como calor sensível por não permitir resfriamento evaporativo, já o pavimento permeável, divide parte da absorção em calor sensível e calor latente por ser um pavimento evaporativo, portanto, o pavimento permeável é uma solução eficaz para aliviar os impactos das ilhas de calor (FORTUNIAK, 2008). Além disso, segundo Haselbach (2009), a taxa de transferência de calor do concreto permeável com 23% de porosidade total é aproximadamente 59% maior em comparação com o concreto tradicional para circunstâncias semelhantes. O uso de concreto permeável em vez de superfícies de pavimento impermeáveis é um método viável de não aumentar os impactos das ilhas de calor urbanas, ao mesmo tempo em que se beneficia de suas características de gerenciamento de águas pluviais (HASELBACH, 2009).

Segundo Qin e Hiller (2014), tanto o aumento do fluxo evaporativo, quanto o aumento da refletância solar são eficazes para reduzir a temperatura e promover pavimentos mais frios. Segundo Qin (2015) e Akbari e Matthews (2012), as denominações associadas à pavimentos frios são pavimentos refletivos, evaporativos ou pavimentos com aproveitamento de calor. Segundo Haselbach (2009) e Haselbach (2011), os pavimentos refletivos são capazes de manter uma temperatura mais baixa, pois absorvem menos energia devido à sua maior refletância solar, os pavimentos evaporativos tendem a ficar frios por reter água em suas camadas e permitir a perda de calor e, portanto, possibilitar seu resfriamento por meio de evaporação, já os pavimentos de aproveitamento de calor extraem o calor absorvido e o destina para outros usos.

Materiais frios são conhecidos como materiais com alta refletância à radiação solar e alta emissividade. A utilização desses materiais em áreas urbanas, como estradas, telhados e

outras estruturas, podem contribuir significativamente para a redução do impacto das ilhas de calor nas cidades e melhorar a qualidade ambiental de áreas abertas (SANTAMOURIS *et al.*, 2012). Segundo Carpio *et al.* (2016), a redução da quantidade de radiação solar absorvida pelas superfícies dos edifícios e pavimentos contribui para melhorar as condições de conforto térmico e mitigar o efeito das ilhas de calor.

Segundo EPA (2008), as propriedades dos materiais urbanos, como refletância solar, emissividade térmica e capacidade de calor influenciam no desenvolvimento de ilhas de calor urbanas, isto porque determinam como a energia do sol é refletida, absorvida e emitida. Segundo Balbo (2020), o clima local é bastante influenciado pela refletância solar dos materiais componentes da infraestrutura das cidades, sendo o albedo mais sentido em áreas com superfícies impermeáveis.

Albedo, também chamado de refletância solar, é a fração da energia solar emitida sobre uma superfície que foi refletida. Ele pode ser usado para estimar a capacidade dos pavimentos de absorver/refletir as radiações solares. Geralmente, o albedo é um fator relacionado à rugosidade e cor da superfície do pavimento, e um pavimento com superfície mais áspera e escura geralmente apresenta um albedo menor, sendo que quanto maior o albedo, maior a capacidade da superfície de refletir a energia sobre ele incidida, ou seja, um material com um albedo maior indica que pode absorver menos calor das radiações externas (WU *et al.*, 2017).

De acordo com Santamouris *et al.* (2012), o uso de materiais com propriedades reflexivas é uma técnica de mitigação eficiente para amenizar o impacto das condições térmicas em áreas urbanas. Segundo Haselbach (2011), dentre as técnicas empregadas para reduzir os efeitos das ilhas de calor, está a utilização de superfícies com alto albedo, para reduzir a energia solar absorvida pelas estruturas, dentre estas técnicas incluem-se telhados verdes, pavimentos, edifícios e telhados frios.

Segundo Qin e Hiller (2014), como os pavimentos representam de 20 a 40% da área de uma cidade típica, a ideia de usar pavimento frio para combater as ilhas de calor se torna uma grande linha de pesquisa. Segundo Haselbach (2009), a temperatura da superfície do concreto permeável é maior do que o concreto convencional, mas pode ser modelada com base em uma combinação de materiais de maior refletância solar.

Zhang *et al.* (2015) afirma que o concreto permeável tem menor refletividade e tende a absorver mais radiação solar quando comparado ao concreto convencional, conseqüentemente, a sua temperatura superficial será mais alta. Como tanto a refletividade dos agregados, dos aglomerantes e dos vazios contribuem para a refletividade total do material, aumentar o albedo do agregado ou do aglomerante pode ser a solução de engenharia certa para

aumentar o albedo do pavimento permeável, já que os poros precisam ser mantidos para drenar a água da chuva, bem como, permitir o resfriamento evaporativo.

Segundo Qin (2015) e Akbari e Matthews (2012), pavimentos frios podem ser desenvolvidos a partir das tecnologias de pavimentação já existentes introduzindo a eles novos materiais, sendo que um pavimento se torna mais frio do que o pavimento convencional se aumentar a refletância solar, aumentar a evaporação e/ou reduzir o calor sensível para a atmosfera.

De acordo com Takebayashi e Moriyama (2012), os pavimentos que possuem elevada refletância solar são adequados para resfriar o pavimento naquelas áreas expostas à grande radiação solar. Segundo Akbari e Matthews (2012) e Pomerantz *et al.* (2009), pavimentos refletivos têm maior albedo do que pavimentos convencionais e, portanto, ajudam a diminuir a temperatura da superfície e a liberação de calor sensível. A refletância solar do pavimento asfáltico recém instalado é de cerca de 0,05. Segundo Akbari *et al.* (2009) um concreto de cor clara pode ter uma refletância solar inicial de 0,35–0,40 que ao envelhecer cairá para cerca de 0,25–0,30.

Qin e Hiller (2014) e Jabri *et al.* (2005) afirmam que os materiais componentes do concreto são propensos a absorver e armazenar radiação solar devido às suas superfícies escuras e alta inércia térmica. Segundo Boriboonsomsin e Reza (2007), uma abordagem utilizada para aumentar o albedo do concreto para uso na pavimentação é torná-lo mais claro. Cinzas volantes e escórias são sugestões de materiais, porque são ecologicamente corretas, prontamente disponíveis e já familiares à indústria de concreto. O autor demonstrou experimentalmente que o concreto poderia ser mais branco usando ingredientes mais claros, o que resultaria em valores de albedo mais altos.

Segundo Qin (2015), a temperatura máxima da superfície do pavimento aumenta linearmente com a absortividade, que é tida como 1 menos a refletividade ($1-R$). O autor afirma ainda que os pavimentos de concreto podem ser altamente refletivos se o concreto for misturado com materiais mais claros. Segundo Marceau e Vangeem (2007), a refletância solar do concreto é dominado principalmente pelo cimento, enquanto os outros materiais constituintes exercem papel secundário. Portanto, a substituição do cimento por outros materiais mais claros e ecológicos pode trazer bons resultados para o aumento da refletância do pavimento de concreto, além de evoluções no desenvolvimento ambiental.

2.3 PAVIMENTO PERMEÁVEL

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), o pavimento, em sua forma convencional, se trata de uma estrutura destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços oriundos dos veículos e melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança dos usuários. Segundo Haselbach (2009), existem muitos pavimentos alternativos que estão sendo desenvolvidos e considerados por apresentarem benefícios ambientais. No que diz respeito ao controle de escoamento de águas pluviais, o principal deles é o concreto permeável. A Figura 1 apresenta um pavimento permeável aplicado.

Figura 1 – Pavimento permeável aplicado



Fonte: Balbo (2020)

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), o pavimento permeável é definido como o pavimento que atende simultaneamente as solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação/armazenamento de água, diminuindo o escoamento superficial sem gerar danos à estrutura. O pavimento deve permitir percolação de cem por cento da água precipitada sobre ele e toda a sua superfície deve ser permeável.

O uso do concreto permeável se concentra em estacionamentos, pavimentos de baixo tráfego e passarelas de pedestres (TENNIS *et al.*, 2004). Segundo Ferguson (2006), o pavimento permeável é considerado um dos mais importantes desenvolvimentos para bacias hidrográficas urbanas, capaz de restaurar rapidamente áreas impermeabilizadas, combinando a função mecânica do pavimento com o gerenciamento de águas pluviais em uma única estrutura.

Segundo Tennis *et al* (2004), embora o concreto permeável possa ser usado para um número surpreendente de aplicações, seu uso principal é em pavimentos.

Haselbach (2011) afirma que o concreto permeável é uma solução que integra a exigência estrutural do pavimento com a prática de gerenciamento de águas pluviais, isto se torna possível geralmente através de um sistema constituído por uma camada de revestimento de natureza permeável sobre uma camada de base formada por agregados, permitindo que a água seja armazenada na camada e se infiltre lentamente no solo subjacente.

Segundo Balbo (2020), pavimentos permeáveis são estruturas porosas e planas que atuam como dispositivos complementares de drenagem por permitirem a percolação de águas pluviais por meio de seu revestimento e base. Este mecanismo permite a estocagem de água percolada no volume de vazios que compõe ambas as camadas, e em seguida, a infiltração da água para a camada de subleito se esta for razoavelmente permeável, ou instalação de drenos sob a estrutura para captação e condução das águas para o sistema de drenagem tradicional.

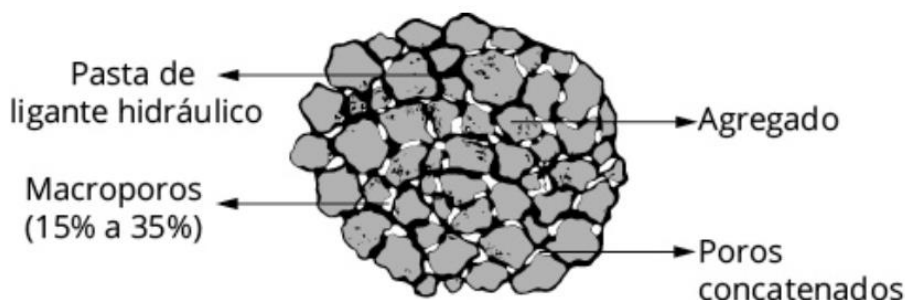
Existem três tipos de revestimentos permeáveis aplicados para pavimentação: o concreto permeável de cimento Portland; o concreto asfáltico permeável e os blocos intertravados de concreto. Dentre estes tipos de revestimento, o concreto permeável de cimento Portland apresenta a maior taxa de infiltração, enquanto o concreto asfáltico permeável a menor taxa de infiltração (EPA, 2016). Neste trabalho a abordagem se dará em torno do concreto permeável de cimento Portland.

Para que o concreto ofereça a propriedade de permeabilidade ao pavimento é necessário que a dosagem da mistura contenha nenhuma ou muito pouca parcela de agregado miúdo, buscando-se um índice de vazios variando entre 15 % e 30% do volume total de concreto (BALBO, 2020). Segundo Tennis *et al* (2004), no concreto permeável, as quantidades de água e materiais cimentícios são cuidadosamente controladas para formar uma camada espessa ao redor das partículas de agregado. A mistura contém pouca ou nenhuma areia e a pasta cimentícia está presente em quantidade suficiente apenas para unir as partículas agregadas, criando um sistema de vazios interconectados, entre 15% e 25% do volume total de concreto, altamente permeáveis e que drenam a água rapidamente.

Segundo Xie *et al.* (2018), no concreto permeável todos os agregados são envoltos por uma camada de pasta de cimento e, em seguida ligados entre si pela pasta de cimento, sendo assim, o concreto permeável consiste em vazios de ar e esqueleto sólido formado por pasta de cimento agregado. O esqueleto de concreto permeável fornece propriedades mecânicas, e os

vazios interligados permitem a permeação de água e ar. A Figura 2 demonstra o esquema de ligação pasta/agregado do concreto permeável.

Figura 2 - Ligação de pasta entre os agregados de concreto permeável



Fonte: Balbo (2020)

Para se tornar um material com alta permeabilidade, a característica essencial é de que os agregados possuam granulometria aberta. Isto se torna o principal motivo pelo qual o concreto permeável é um material de baixa resistência, a ausência de agregado miúdo (YANG *et al.*, 2008). Segundo Tennis *et al.* (2004), tanto o baixo teor de argamassa quanto a alta porosidade reduzem a resistência do material em comparação com as misturas de concreto convencionais, mas a resistência suficiente para muitas aplicações é prontamente alcançada. O autor afirma ainda, que a sua elevada porosidade lhe confere também outras características úteis: é isolante termicamente e tem boas propriedades acústicas.

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), o concreto permeável destinado à revestimento de pavimentos deve cumprir algumas especificações. Quando recém construído o pavimento deve apresentar coeficiente de permeabilidade maior que 10^{-3} m/s e para vias de tráfego leve de concreto permeável moldado no local, caso tratado nesta dissertação, a resistência à tração na flexão mínima deve ser de 2MPa.

Segundo Sahin *et al.* (2021), considerações sobre pavimentos sustentáveis requerem posicionamentos claros sobre materiais com apelo ecológico. O emprego de ligantes hidráulicos ecoeficientes, de agregados resultantes de reciclagem e de resíduos industriais na mistura do concreto deve vir à tona para termos uma postura sustentável no setor da construção civil. O concreto permeável pode compreender todos esses conceitos e métodos a fim de se tornar um material altamente eficiente ambientalmente para pavimentação viária.

2.4 RECURSOS NATURAIS E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS

O Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2021) afirma que o setor da construção civil reconhecidamente tem papel fundamental nos trabalhos e metas para atingir bons patamares de desenvolvimento sustentável. A indústria da construção civil é tida como o setor que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, além da problemática associada a geração de resíduos sólidos. Estima-se que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas sejam provenientes da construção.

O uso cimento Portland na produção do concreto traz grandes desafios e impactos ambientais negativos, sobretudo no que diz respeito à alta demanda energética para sua produção, aliado à liberação de gases de efeito estufa provenientes desta etapa (SABIR *et al.*, 2001). Segundo Sahin *et al.* (2021), minimizar o uso de materiais cimentícios implica em reduzir diretamente o consumo de matéria prima, e por consequência a demanda de energia para produção do insumo e o impacto da geração de dióxido de carbono para o meio ambiente, tornando-se um passo importante para atingir metas de sustentabilidade ambiental. Diante disso, pesquisadores de todo o mundo tem trabalhado para desenvolver materiais de construção ecologicamente corretos, capazes de minimizar o consumo de energia e recursos naturais.

Conforme os anos passam, edifícios antigos vão chegando ao fim da sua vida útil e a infraestrutura urbana vai sendo atualizada. Com isso, crescem os números de construções e demolições presentes nas cidades, e como consequência disso, crescem conjuntamente as quantidades de resíduos provenientes dessas obras. Esses resíduos geralmente consistem em tijolos de barro, argamassa, madeira e cerâmicas (TANG *et al.*, 2020). Segundo Poon *et al.*, (2001), os resíduos de construção e demolição consistem em alta porcentagem de materiais inertes, como tijolos e concreto. Em porcentagens menores, também são encontrados metais, madeira, vidros e plásticos. Segundo Martos *et al.* (2018), o resíduo de construção e demolição um termo genérico que define os resíduos gerados pelas atividades econômicas que envolvem a construção, manutenção, demolição e desconstrução de edifícios e obras civis.

De acordo com Poon *et al.* (2001), existem dois tipos principais de resíduos de construção civil, resíduos de estrutura e resíduos de acabamento. Fragmentos de concreto, armaduras de aço, placas e peças de madeira são gerados como resíduos da estrutura durante a construção. Os resíduos de acabamento gerados na fase de acabamento do edifício são compostos por materiais como azulejos, cerâmicas, tintas e instalações domésticas, como banheiras, vasos e pias.

Segundo Martos *et al.* (2018), os resíduos de construção e demolição possuem alto volume e peso, porém, provavelmente apresenta menor impacto ambiental em termos de agressão química para a natureza, sendo constituídos em maior parte por materiais inertes.

Embora o impacto ambiental seja baixo se comparado com outros fluxos de resíduos, os impactos ambientais associados a uma quantidade alta de resíduo de construção é uma preocupação importante, principalmente derivada de sua logística e ocupação do solo.

Sahin *et al.* (2021) afirma que a questão discutida globalmente é: o que pode ser feito com as enormes quantidades de resíduos de construção e demolição resultantes? Segundo Poon *et al.* (2001), a maioria dos resíduos de construção e demolição acabam por ser armazenados e depositados em aterros sanitários, o que demanda imenso espaço, além de ser dispendioso em termos de saúde, economia e meio ambiente.

Segundo Martos *et al.* (2018), o setor de construção europeu produz anualmente cerca de 820 milhões de toneladas de resíduo de construção, o que equivale a 46% do total de resíduos produzidos na região. Destes 46% de resíduo de construção, 85% são construídos por tijolos, concreto e cerâmicas. Segundo Sahin *et al.* (2021), a capacidade da maioria dos países para tratar de forma adequada seus resíduos de construção, varia significativamente e são compostas e limitadas principalmente à métodos antiquados de britagem direta e utilização do material como agregados para base/sub-base de pavimentos. Isso exige o desenvolvimento de formas inovadoras e eficazes de lidar com os RCD, especialmente para países em desenvolvimento e com dificuldades econômicas.

Os desafios para o setor da construção civil são a redução e otimização tanto do consumo de materiais quanto do uso da energia, bem como a redução de resíduos gerados, focando na preservação do meio ambiente e na melhoria da qualidade de vida da população. Para tanto, deve-se buscar soluções que potencializem o uso racional de energia ou de energias renováveis, reduzam o uso de materiais de alto impacto ambiental, e minimizem os resíduos de construção com novos métodos construtivos e reutilização de materiais, além de aplicar materiais reciclados da construção na pavimentação e implementar o uso de pavimentos permeáveis (MMA, 2021).

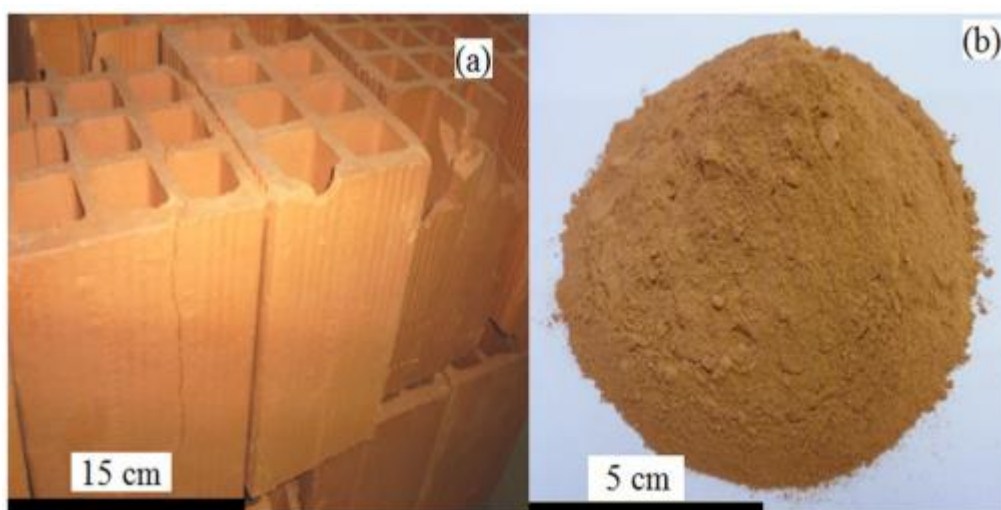
He *et al.* (2021) afirma que pesquisar formas de utilização dos resíduos de construção de forma abrangente, para alcançar a redução, reciclagem de neutralização do RCD se tornou um problema mundial a ser resolvido.

2.5 RESÍDUO PARTICULADO DE TIJOLO RPT

O tijolo é considerado o segundo material de construção mais utilizado no mundo, atrás apenas do concreto (WONG *et al.*, 2018). A maior parte dos resíduos de construção e demolição é composto por resíduos de tijolo. Neste contexto, moer o tijolo até que se atinja uma

consistência de pó e usá-lo como substituto do cimento para produzir materiais de construção sustentáveis é considerado um método viável (HE *et al.*, 2021). Segundo Ma *et al.* (2020), o uso de resíduo particulado de tijolo (RPT) como material cimentício suplementar fornece uma abordagem eficaz para a recuperação de resíduos de construção e demolição. A Figura 3 apresenta o resíduo particulado de tijolo na forma descartada pela indústria oleira e o material já moído.

Figura 3 – Resíduo de tijolo



(a) Descarte de tijolos da indústria oleira

(b) Tijolos após moagem

Fonte: Schackow (2015)

Os resíduos de concreto e tijolos representam aproximadamente 80% do total de RCD. Submeter estes resíduos à processos de reciclagem e reutilização, geraria não apenas a redução do descarte de RCD, mas também ajudaria a reduzir a dependência excessiva da indústria da construção em matérias primas naturais (XIAO *et al.*, 2016). Pesquisadores do mundo todo estão trabalhando nos últimos anos para utilizar materiais de tijolos reciclados em concreto com o intuito de reduzir a quantidade de resíduos de tijolos destinados à aterros sanitários (LI *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2009; LIU *et al.*, 2017). Segundo He *et al.* (2021), a utilização do RPT não só economiza uma grande área ocupada por resíduos de tijolos em aterros, mas também reduz a dependência da indústria de concreto em relação ao cimento Portland, garantindo sustentabilidade dos materiais de construção.

Entre os possíveis usos do resíduo de tijolo em concretos estão as substituições de agregados graúdos e miúdos, bem como substituições parciais de cimento (WONG *et al.*, 2020). Segundo Silva *et al.* (2009), a prática mais comum é britá-los e utilizá-los como substitutos

parciais de agregados miúdos e graúdos em bases de estradas de baixa qualidade ou concreto, porém, devido à sua baixa resistência, a taxa de utilização para este fim é muito baixa. Segundo Kumar *et al.* (2017) e Liu *et al.* (2017), a utilização mais promissora do resíduo de tijolo é submetê-lo à uma fina moagem e aplicá-lo como material suplementar do cimento Portland, devido à sua característica pozzolânica.

A NRB 12653 (ABNT, 2014) define materiais pozzolânicos como materiais silicosos ou silicoaluminosos, que não possuem características cimentícias aglutinantes diretas, mas que quando finamente divididas e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes. A norma introduz também o termo atividade pozzolânica, e o define como a capacidade de determinado material de, na presença de água, reagir com o hidróxido de cálcio e formar compostos com propriedades cimentícias.

O processo de preparação do resíduo de tijolo para utilização como material suplementar do cimento normalmente segue as etapas de coleta, trituração, moagem e peneiramento (HE *et al.*, 2021). Segundo Wong *et al.* (2018), as pozzolanas são materiais amorfos, ricos em sílica e alumina, que na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio e formam hidratos de silicato de cálcio (CSH) e hidratos de silicato de cálcio e alumínio (CASH) melhorando as propriedades dos materiais a base de cimento. A pozzolanicidade, segundo o autor, é governada pelos teores de sílica, alumina e pela área superficial específica do material. Segundo Irki *et al.* (2018), quanto mais fina for a granulometria do RPT, maior será a resistência à compressão da argamassa com a mesma relação de substituição.

A resistência do concreto pode ser melhorada ao substituir parte do cimento Portland por resíduo particulado de tijolo na mistura do concreto, desde que em proporções corretas. Isso se deve tanto à sua composição química quanto à sua finura. O uso do resíduo de tijolo pode causar redução das propriedades mecânicas do concreto, porém, acertada a quantidade ótima a ser incorporada, o concreto pode atender aos requisitos normativos e até mesmo apresentar melhorias (WONG *et al.*, 2018).

Os produtos cerâmicos, nos quais estão incluídos os tijolos, são definidos como materiais inorgânicos não metálicos, quase insolúveis em água e que contêm compostos cristalinos (cerca de 30% em massa), e sua matéria prima básica são materiais argilominerais. Os tijolos são processados em uma massa trabalhável úmida que após passar pela etapa de moldagem, são submetidos a temperaturas acima de 800 °C, que é quando o corpo endurece. Durante a evaporação da água dos minerais argilosos, na etapa de tratamento térmico, a rede cristalina dos minerais argilosos se deteriora, enquanto um composto anidro de estrutura amorfa

é produzido. Este tratamento térmico pelo qual a massa de argila passa, leva à desidroxilação de minerais argilosos, criando-se fases amorfas reativas em sua composição (NAVRÁTILOVÁ e ROVNANÍKOVÁ, 2016).

Os argilominerais, assim como o resíduo particulado de tijolo é rico em sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), e óxido de ferro (Fe_2O_3) e possui atividade pozolânica (REIG *et al.*, 2013). A característica pozolânica se desenvolve quando um material argilomineral é submetido a temperaturas entre 500 e 900 °C e moído em partículas tão pequenas quanto as do cimento Portland (HE *et al.*, 2021). Além disso, segundo Komnitsas *et al.* (2015), o tamanho das partículas é um dos principais fatores que afetam a pozolanicidade de um RPT. Um menor tamanho de partícula promove uma maior reação pozolânica devido ao aumento da área de superfície específica do material que tende a acelerar a reação.

De acordo com Wong *et al.* (2018), a influência da granulometria do resíduo particulado de tijolo é essencial para sua atividade pozolânica, bem como para as propriedades do concreto fresco e endurecido. Materiais com partículas de tamanho menor, cerca de 20 μm são mais reativos do que materiais com partículas variando entre 75 e 150 μm . Segundo Zhao *et al.* (2020), o resíduo de tijolo tende a ser refinado e esférico conforme o tempo de moagem aumenta, o que influencia no aumento da área superficial específica e na reação de atividade pozolânica, entretanto, um tempo de moagem muito longo pode causar a aglomeração das partículas, não sendo recomendado períodos de moagem demasiados.

Segundo He *et al.* (2021), com a adição apropriada de resíduo de tijolo como substituto parcial do cimento na matriz de concreto, propriedades mecânicas e de durabilidade podem ser melhoradas, e, portanto, a matéria prima é considerada potencial para substituir materiais a base de cimento. Segundo o autor, a adição ideal de resíduo varia entre 5 e 15% do peso total de cimento. Segundo Wong *et al.* (2018), o destino mais viável para o resíduo de tijolo é a aplicação na forma de pó para a substituição do cimento Portland. O autor afirma que um nível de substituição de até 20% pode aumentar a resistência e algumas propriedades de durabilidade do concreto, no entanto, em níveis mais elevados, a substituição pode ter um impacto negativo na resistência do concreto ou da argamassa.

Ge *et al.* (2012) afirma que níveis de substituição de até 25% geram reduções mínimas na resistência à compressão do concreto, quando o nível de substituição atinge 30% vê-se reduções de cerca de 29% na resistência à compressão. Segundo Schackow (2015), argamassas contendo resíduo de tijolo tem redução na trabalhabilidade, quando mantido fato água-cimento constante, isto, devido a maior capacidade de consumo de água do RPT, por ser mais fino do

que o cimento, portanto, recomenda-se o uso de até 10% de resíduo caso desejado manter o fator água-cimento constante.

Segundo Ma *et al.* (2020), quando a finura do resíduo é maior do que a finura do cimento, a resistência à compressão com teores de RPT até 15% é superior à sem RPT, em contrapartida, a resistência à compressão diminui com a incorporação de RPT quando sua finura é próxima ou inferior à finura do cimento. A resistência à flexão diminui linearmente com o aumento do teor de RPT, e a resistência à flexão da argamassa com RPT de alta finura é maior do que a da argamassa com RPT de baixa finura.

2.6 REAÇÃO CIMENTO – POZOLANA

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), o cimento Portland é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais. Segundo Bauer (2022), o cimento Portland é constituído fundamentalmente por cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO_3), que é adicionado após a calcificação para retardar o tempo de pega do produto. Entretanto, são a cal, sílica, alumina e óxido de ferro os componentes essenciais do cimento Portland. Com a adição destas matérias primas, e realizadas as etapas de pulverização, homogeneização e tratamento térmico, são formados os compostos silicato tricálcico (C_3S), silicato bicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferro aluminato tetracálcico (C_4AF).

De acordo com Isaia (2007), aglomerantes hidráulicos são produtos de processos a altas temperaturas, sendo assim, não possuem água na sua composição. O mecanismo de hidratação se inicia com dissolução do produto em meio aquoso. Segundo Bauer (2022), no momento em que a água entra em contato com o cimento inicia-se o processo de hidratação, onde ocorrem reações químicas, cuja consequência é o gradativo enrijecimento da pasta. No processo de hidratação, os grãos de cimento que inicialmente se encontram em suspensão vão se aglutinando gradualmente uns aos outros, conduzindo a construção de um esqueleto sólido responsável pela estabilidade da estrutura.

Schackow (2015) afirma que é a formação dos produtos de hidratação do cimento que acarretam na perda de trabalhabilidade, solidificação e ganho de resistência do material. Os principais produtos provenientes da hidratação do cimento são o silicato de cálcio hidratado (CSH), hidróxido de cálcio (CH), hidróxido de magnésio (MH), entre outros, sendo o CSH o principal contribuinte para resistência do material.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), materiais pozolânicos são definidos como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos não possuem propriedades aglutinantes, mas quando finamente divididos e em contato com a água, reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades ligantes. A norma conceitua ainda, que atividade pozolânica é a capacidade de um material de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água, formando por consequência compostos com propriedades cimentícias.

De acordo com Schackow (2015), quando um produto com característica pozolânica, como o resíduo de tijolo (RPT), é adicionado ao cimento, em contato com a água ele reage com o hidróxido de cálcio (CH) proveniente da etapa de hidratação do cimento, e forma silicato de cálcio (CSH) secundário. O CSH é a principal fase de hidratação do cimento Portland, e o maior contribuinte para o desenvolvimento da resistência do material, diferentemente do CH, que tem um influencia menor no processo de hidratação e não gera grande influência no desenvolvimento de resistência do concreto.

2.7 MATERIAIS UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável é produzido com os mesmos materiais que compõe o concreto convencional, a diferença entre os compostos está na ausência ou parcial eliminação dos agregados miúdos da mistura e na granulometria exigida para o agregado graúdo. (BALBO, 2020; XIE *et al.*, 2020; FERGUSON, 2006). Segundo Chandrappa e Biligiri (2016), a composição do concreto permeável normalmente consiste em agregados graúdos de tamanho único misturados à uma quantidade ideal de pasta de cimento para revestir e ligar os agregados. Isso fornece propriedades endurecidas úteis, porém resulta em uma mistura que requer considerações diferentes na confecção, colocação, compactação e cura (TENNIS *et al.*, 2004).

Segundo Xie *et al.* (2020), as propriedades do concreto permeável são influenciadas pelas propriedades e relação volumétrica da pasta de cimento, pelas características, tamanho e graduação dos agregados. Segundo Tennis *et al.* (2004), as proporções das misturas de concreto permeável são um pouco menores em comparação com o concreto convencional e são necessários controles rígidos na dosagem de todos os ingredientes para fornecer os resultados desejados. O controle tecnológico afeta e está presente em todas as etapas da dosagem, segundo Zhong e Wille (2015) e a Joshaghani (2014), a pasta de cimento pode ser melhorada reduzindo a relação de água/cimento, ou incorporando sílica ativa, pó de microsílica e emulsões poliméricas e que as resistências a compressão e flexão podem ser aprimoradas reduzindo o

tamanho do agregado na mistura, porém, a permeabilidade diminui com a diminuição do tamanho dos vazios.

Vancura *et al.* (2011) afirma que aumentar o volume de pasta de cimento para envolver os agregados também auxilia no aumento da resistência mecânica do concreto permeável. Segundo Xie *et al.* (2020), trabalhar na melhoria de uma propriedade do material afeta diretamente outras características, positiva ou negativamente, portanto, é difícil equilibrar as propriedades mecânicas e a permeabilidade do concreto permeável.

2.7.1 Aglomerantes

Não há restrição quanto ao tipo de ligante hidráulico utilizado na mistura de concreto permeável, vários tipos podem ser utilizados desde que sejam de emprego estrutural (BALBO, 2020). Segundo Chandrappa e Biligiri (2016) a principal função do material cimentício é fornecer revestimento suficiente ao redor dos agregados para aumentar a durabilidade do concreto permeável.

Batezini (2013) afirma que o principal ligante hidráulico utilizado como aglomerante em concretos permeáveis é o cimento Portland. Segundo Tennis *et al.* (2004), assim como no concreto convencional, para a produção do concreto permeável também são utilizados cimentos convencionais, além disso, podem ser usados materiais cimentícios complementares, como pozolanas, cinzas volantes e escórias de alto forno.

Segundo Balbo (2020), o consumo de ligante hidráulico normalmente está entre 300 kg/m³ e 400 kg/m³ de concreto, isto, considerando o comum emprego de superplastificantes redutores de água e baixa relação de água/cimento. Segundo Batezini (2013), é importante considerar que a proporção com que esses aditivos são incorporados na mistura deve ser determinado com cuidado para que o produto final apresente satisfatória condutividade hidráulica e resistência mecânica.

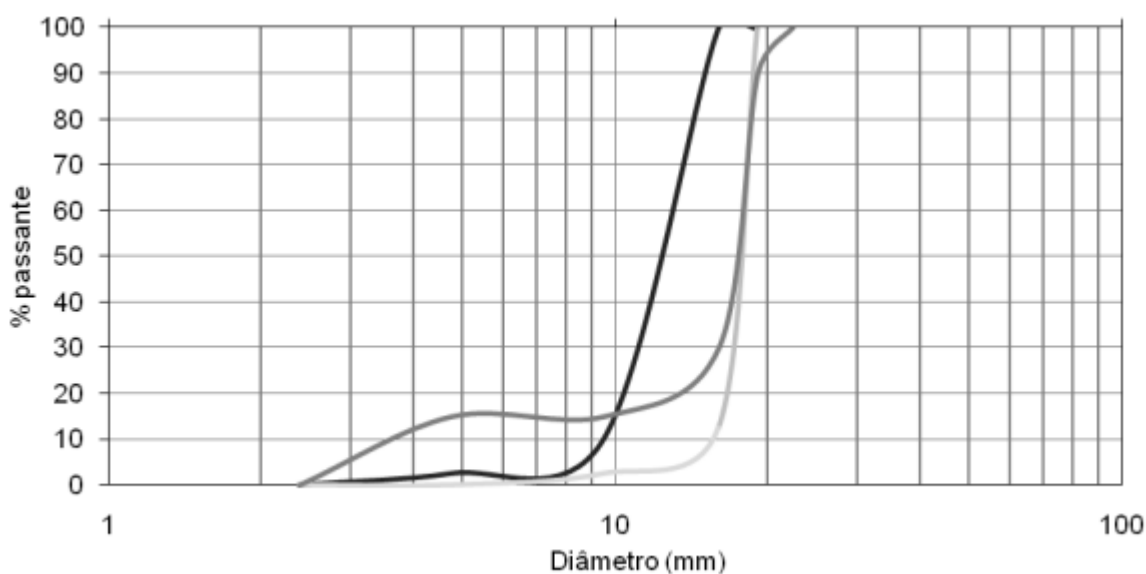
2.7.2 Agregados

De acordo com Tennis *et al.* (2004), o teor de agregado miúdo é limitado ou quase nulo no concreto permeável e o agregado gráudo deve apresentar graduação uniforme, ou seja, de diâmetro único, em que o diâmetro máximo utilizado seja de 19mm. Normalmente são empregadas curvas com variações de diâmetro entre 19 mm e 4,8 mm, 9,5 mm e 2,4 mm ou 9,5 mm e 1,2 mm. Segundo Chandrappa e Biligiri (2016), a proporção entre agregado e cimento

normalmente se encontra na faixa de 4:1 até 6:1, e o volume total de agregados no corpo de concreto permeável é de cerca de 50 a 65% , no concreto convencional este valor é de aproximadamente 60 a 75%.

Balbo (2020) afirma que são possíveis de se utilizar diversas curvas granulométricas para compor o concreto permeável, desde que elas possuam graduação uniforme, a granulometria do agregado gráudo que deve ser mantida contínua para evitar o empacotamento das partículas e permitir a criação de vazios no interior do material, inúmeras distribuições granulométricas uniformes são possíveis, não se tolerando faixas granulométricas contínuas ou bem graduadas. Segundo Ćosic, *et al.* (2015), faixas granulométricas com agregados de maior dimensão resultam em um aumento de porosidade, já misturas feitas com agregados de dimensões menores apresentam uma maior densidade e consequentemente, melhoria da resistência mecânica. A Figura 4 apresenta as curvas granulométricas típicas para misturas de concreto permeável.

Figura 4 - Curvas granulométricas típicas de misturas de concreto permeável



Fonte: Batezini (2013)

Segundo Tennis *et al.* (2004), durante a produção do concreto permeável, assim como no concreto convencional, os agregados devem estar próximos a uma condição saturada de superfície seca, ou ainda, a condição e umidade deve ser controlada para permitir contabilizar a umidade livre dos agregados, visto que o controle de água na mistura é importante para obtenção dos resultados esperados do material, a água absorvida da mistura por agregados muito secos pode levar a misturas secas que não assentam ou compactam bem, já água extra

nos agregados provocará problemas de adensamento e aumentará a relação água cimento da mistura.

De acordo com Chandrappa e Biligiri (2016), o tipo de agregado utilizado influencia nas propriedades mecânicas do concreto permeável, portanto, recomenda-se que os agregados destinados à mistura tenham suas propriedades especificadas nos pontos que afetam o desempenho do material. Devem ser usados os mesmos tipos de agregados que se emprega no concreto convencional, como granito, gnaiss, entre outros. Além do tipo de agregado, suas características como tamanho, forma e absorção de água também desempenham um papel importante na resistência, durabilidade e permeabilidade do concreto permeável.

2.7.3 Água

Segundo Chandrappa e Biligiri (2016), a relação água-cimento é uma das variáveis mais importantes para se considerar no concreto permeável. A relação água cimento aplicado no concreto permeável é menor quando comparado com as usadas na mistura de concreto convencional e normalmente varia na faixa de 0,28 a 0,40. Segundo Tennis *et al.* (2004), relações de água-cimento entre 0,27 e 0,34 são usadas quando juntamente a ela são inseridos aditivos químicos na mistura. O autor afirma que a relação água-cimento no concreto permeável não é clara como no concreto convencional, isto porque o teor total de pasta é menor que o teor de vazios entre os agregados, portanto é necessário tornar a pasta de cimento mais forte.

De acordo com Tennis *et al.* (2004), é possível identificar o teor ideal de água na mistura de forma tátil/visual. O concreto fresco, formando um punhado em forma de bola na mão deve se apresentar brilhoso e não deve escorrer pasta do agregado, o formato não deve se desintegrar ou perder sua estrutura vazia conforme a pasta flui para os espaços entre os agregados. Como regra geral, a água potável é adequada para uso no concreto. A Figura 5 mostra o concreto permeável com diferentes teores de água na mistura.

Figura 5 - Concreto permeável com diferentes teores de água formando uma bola



(a) pouca água (b) quantidade adequada de água (c) muita água.

Fonte: Tennis *et al.* (2004)

2.7.4 Aditivos

Segundo a NRB 11768-1 (ABNT, 2019), aditivos para concreto são definidos como produto que são adicionados ao concreto, em quantidade geralmente não superior a 5% da massa total de ligante contida na mistura, com o objetivo de melhorar determinadas propriedades do concreto tanto em estado fresco quanto em estado endurecido.

Balbo (2020) afirma que com aumento da quantidade de água na pasta (ligante hidráulico + água efetiva de hidratação), a resistência à compressão e à tração do concreto

diminui, portanto, a resistência à compressão do concreto não dependerá apenas da distribuição de tensões entre grãos, mas também das tensões na argamassa, mais ou menos porosa em função da quantidade de água de amassamento presente na mistura.

Segundo Tennis *et al.* (2004), a fim de se obter propriedades especiais no concreto, o emprego de aditivos químicos é tido como uma prática comum, e assim como no concreto convencional, pode ser utilizado no concreto permeável. Segundo Xie *et al.* (2020), a dosagem do superplastificante e a relação água/cimento da pasta de cimento são selecionadas para obter as propriedades mecânicas alvo do concreto permeável.

De acordo com a NRB 11768-1 (ABNT, 2019), aditivos redutores de água, os chamados superplastificantes, são produtos capazes de reduzir quantidade de água da mistura sem modificar a consistência do concreto, aumentando o abatimento e a fluidez, consequentemente melhorando a trabalhabilidade do material.

Segundo Tennis *et al.* (2004), devido ao rápido tempo de pega associado ao concreto permeável, retardadores ou misturas estabilizadoras de hidratação são comumente usados. Também são utilizados produtos de mistura proprietários que facilitam a colocação e proteção de pavimentos permeáveis. Superplastificantes são usados para elevar e controlar a trabalhabilidade do concreto fresco.

Balbo *et al.* (2020) afirma que a relação água cimento nos concretos permeáveis é puramente em função de sua trabalhabilidade, podendo então ser considerada a utilização de superplastificantes. Segundo Chandrappa e Biligiri (2016), o concreto permeável geralmente tem abatimento zero, o que determina o uso de diferentes aditivos que aumentam a trabalhabilidade sem aumento indevido do teor de água.

2.7.5 Fibras de polipropileno

O concreto é um material com tendência a sofrer mecanismo de ruptura frágil, portanto a inclusão de fibras na mistura melhora a sua ductilidade, resistência à tração e resistência à flexão (HOSSAIN *et al.*, 2019). A incorporação de fibras no concreto de cimento de Portland é um método utilizado para melhorar algumas propriedades do material, como resistência à tração, resistência à flexão, ductilidade, tenacidade, durabilidade e menor propagação de fissuras (HASSANPOUR, *et al.*, 2012; KAYALI *et al.*, 2003; MAZAHERIPOUR *et al.*, 2011; YOO; BANTHIA, 2019; GAO, 2021; KURANLI *et al.*, 2022; SUN; XU, 2009).

As fibras, no geral são produzidas a partir de materiais como vidro, aço, carbono e polímeros, como o polipropileno e o polietileno (HASSANPOUR, *et al.*, 2012; SUN; XU,

2009). Segundo Akça *et al.* (2015) e Sun e Xu, (2009), a fibra de vidro e a fibra de polipropileno são os dois materiais micro reforçados mais utilizados para aprimorar o desempenho do concreto, melhorando assim as propriedades mecânicas de resistência à tração, resistência à flexão, tenacidade, ductilidade, módulo de ruptura e absorção de energia. A Figura 6 mostra a forma das fibras de polipropileno.

Figura 6 – Fibras de polipropileno



Fonte: Autora (2023)

Badr *et al.* (2006) afirma que as fibras de polipropileno incorporadas ao concreto podem aprimorar muitas deficiências do concreto convencional. Segundo os resultados da pesquisa de Mazaheripour *et al.* (2011), a resistência a tração e a flexão é aumentada com o acréscimo de fibras de polipropileno. O autor constatou que as fibras de polipropileno aumentaram cerca de 14,4% a resistência à tração e 10,7% a resistência à flexão, em comparação com o concreto sem fibras.

De acordo com Kuranli *et al.* (2022) e Salehi *et al.* (2022), a utilização de fibras majora a resistência à flexão, além de resistir à expansão das trincas e evitar fissuras repentinas, consequentemente aumentando a capacidade de carga. É importante determinar a quantidade ideal de fibra para o concreto, visto que ao excedê-la, espera-se uma diminuição na resistência devido a heterogeneidade na matriz do concreto (AKÇA *et al.*, 2015; SALEHI, *et al.*, 2022). Salehi, *et al.* (2022), afirma que a quantidade ideal de fibra é de 1% em volume de concreto.

Segundo os resultados da pesquisa de Zhang *et al.* (2022), a incorporação de fibras de polipropileno no concreto reduziu sua fragilidade, inibiu a propagação de trincas e aprimorou as resistências à tração, flexão e compressão. Com a adição de 1% de fibras, consideradas em volume de concreto, houve aumento de resistência a tração de 56,7%. Akça *et al.* (2015), investigou os efeitos da fibra de polipropileno nas propriedades do concreto. O autor determinou o teor ótimo de fibra em 1% em volume de concreto e concluiu que a adição de fibras, nessa proporção, beneficia tanto a resistência à tração quanto a resistência à flexão do material.

Na pesquisa de Yuan e Jia (2021), a inserção de fibras de polipropileno no concreto beneficiou a resistência à tração e a resistência à flexão do material. A quantidade ideal de fibras foi determinada em 0,9% do volume de concreto. No estudo de Kuranli *et al.* (2022), a incorporação de fibras de polipropileno melhorou o valor de resistência à flexão do concreto em 1469% em comparação com o concreto sem fibra. O teor ótimo de fibras que atingiu este resultado foi de 0,8% em volume de concreto.

Sun e Xu (2009) afirmam que a utilização de fibras de polipropileno no concreto melhora as propriedades de resistência à tração e à flexão do, além de aprimorar o desempenho à fadiga, resistência à abrasão e retração do material. Segundo o autor, os melhores resultados foram obtidos com o teor de fibra de 0,9% em volume de concreto. Os resultados da pesquisa de Das *et al.* (2018), mostram que a adição de fibras de polipropileno no concreto beneficia as resistências à tração e à flexão do material. O autor afirma que a resistência à tração melhorou em 30,43% em comparação com o concreto sem adição de fibras. Estes resultados foram obtidos com a teor de fibras considerado ótimo pelo autor de 0,75% em volume de concreto.

2.8 PESQUISAS COM RESÍDUOS EM CONCRETO PERMEÁVEL

Hwang e Cortés (2021), analisou as propriedades de argamassas e concretos permeáveis ao substituir parcialmente o cimento Portland por cinzas volantes de carvão e pó de vidro residual. A mistura ótima de argamassa obtida na pesquisa possui proporção de 14,3% de cinzas volantes e 7,3% de pó de vidro foi usada para produzir concreto permeável com agregado graúdo em tamanhos de 4,75 mm a 9,5 mm na proporção de massa para o ligante de 4:1 e relação água-cimento de 30%. A permeabilidade e a perda de massa foram testadas com o concreto permeável endurecido por 28 dias e a resistência à compressão foi testada com o concreto permeável endurecido por 7, 28, 56 e 90 dias. O concreto apresentou permeabilidade de 6,3 mm/s, resistência à compressão aos 28 dias de 15,2 MPa e perda de massa de 44,8%. A

resistência à compressão máxima foi estimada em 18,7 MPa. A produção sustentável de concreto permeável de infraestrutura verde é viável com a co-utilização de cinzas volantes de carvão com pó de vidro residual como substitutos parciais de cimento em argamassa, o que também diminui os encargos na gestão de resíduos sólidos com esses materiais residuais.

Zheng *et al.* (2022), inseriram um conceito de fabricação de concreto permeável reciclado sem cimento, com base nas atividades potenciais de sílica e alumina no tijolo. Os autores estudaram a reciclagem total de resíduos de construção e demolição, na qual o pó de tijolo reciclado ativado por álcali foi usado como aglutinante para substituir o cimento. Na pesquisa, os resíduos sólidos macro e em formato de pó, ativado por álcali, foram usados como material agregado e ligante, respectivamente, para obter a reciclagem total dos resíduos. A substituição do cimento por pó de tijolo ativado por álcalis mostrou benefícios econômicos e ambientais. As descobertas deste trabalho forneceriam um caminho promissor para resolver os resíduos de construção e demolição em grande escala na China. Como conclusão, o concreto permeável reciclado, fabricado sem cimento apresentou alta permeabilidade à água, mas resistência à compressão relativamente baixa. A substituição de cimento não só economizou os custos de fabricação de concreto, mas também trouxe reduções substanciais de emissão de CO₂.

Schackow *et al.* (2020), empregou resíduos da indústria papelreira como substituto parcial do cimento Portland com o intuito de diminuir o uso de cimento na produção de calçadas públicas de concreto permeável. Foram produzidos concretos permeáveis com 5 e 10% de resíduos da indústria papelreira em substituição ao cimento Portland. Foram analisadas a resistência à tração na flexão, resistência à compressão, permeabilidade e condutividade térmica do material. Como conclusão, o resíduo não teve influência significativa na resistência à tração à flexão, mas os valores encontrados foram superiores ao mínimo exigido pelas normas brasileiras. O uso do resíduo diminuiu a resistência à compressão à medida que se reduzia o teor de cimento da mistura, porém, os autores afirmam queda na resistência à compressão também se deve à não utilização do agregado miúdo. As misturas apresentaram alto grau de permeabilidade e menor condutividade térmica em comparação com o concreto convencional.

Qin *et al.* (2021), avaliou o desempenho do concreto permeável com biocarvão pulverizado como substituto parcial do cimento Portland. Segundo o autor, substituir uma porção do cimento por biocarvão é uma alternativa vantajosa para reduzir as emissões de CO₂. Foram estudadas a porosidade, permeabilidade, absorção de água, resistência à tração, resistência à compressão, morfologia e refletância solar do material. As amostras foram preparadas substituindo o cimento Portland por biocarvão nas taxas de 0%, 0,65%, 3,2%, 6,5%, 9,5% e 13,5%. Como conclusão, o teor de biocarvão tem pouco ou nenhum impacto na

porosidade e na permeabilidade. Comparado ao concreto permeável convencional, sem biocarvão, as amostras de concreto permeável com carvão absorvem cerca de 0,8% mais e evaporam mais rápido. Eles também exibem maiores resistências à compressão e à tração quando o teor de biocarvão é inferior a 6,5%. A adição de 6,5% de biocarvão pode diminuir o albedo em 0,05.

Li *et al.* (2021), estudou sobre o desempenho do concreto permeável quando nele adiciona-se resíduo de vidro moído em pó para substituir parte do cimento Portland. Foram variados o teor de substituição de resíduos em 0%, 10%, 15%, 20% e 25% e a relação água-cimento em 0,22, 0,24, 0,26 e 0,28 e foram analisadas propriedades mecânicas, de permeabilidade e resistência ao gelo. Como conclusão, um aumento na relação de água-cimento acarreta em aumento das resistências à compressão e tração na flexão, porosidade e coeficiente de permeabilidade até certo ponto, a partir disso, os valores começam a decair. O melhor desempenho foi obtido com a relação água-cimento de 0,26. Com relação a quantidade de resíduo de vidro, o teor ótimo foi obtido em 20% quando os maiores valores de resistência foram alcançados.

Liu *et al.* (2019), estuda a cinza volante, resíduo de subproduto industrial, como substituto do cimento Portland no concreto permeável. As cinzas volantes foram usadas para substituir o cimento pelo método de volume equivalente nos níveis de 3%, 6%, 9% e 12% e foram testadas as propriedades de porosidade, permeabilidade, resistência à compressão, resistência à flexão e resistência ao processo de gelo-degelo. Como conclusão, a adição de cinzas volantes diminuiu a resistência à compressão e à flexão se analisadas aos 28 dias, porém, ao analisar as mesmas com 150 dias de cura, as resistências são maiores do que as do início da idade, o que indicou que a idade teve um efeito importante nas resistências do concreto permeável modificado com cinzas volantes. A porosidade e a permeabilidade de todas as misturas de concreto permeável mudaram pouco com o teor de cinzas volantes. A adição de cinzas volantes diminuiu significativamente a resistência ao congelamento-degelo do concreto permeável.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa se sustenta a partir de uma abordagem quantitativa acerca da substituição de cimento por resíduo particulado de tijolo em uma dosagem de concreto permeável aplicado ao revestimento de pavimentos. A pesquisa está caracterizada como correlacional, e seu desenho é experimental na categoria de experimento puro, pois o problema de estudo possui variáveis dependentes e independentes definidas e controladas. A pesquisa possui validação interna, pois haverá controle dos corpos de prova desenvolvidos com resíduo a partir de corpos de prova de referência, sem a adição de RPT. Cabe ainda ao estudo a validação externa, pois pressupõe-se que a partir dos resultados obtidos o concreto permeável com adição de RPT possa ser aplicado em vias de tráfego leve (MONTEIRO, 2021).

A hipótese formulada para a pesquisa é: o pavimento de concreto permeável com adição de RPT como substituto parcial do cimento atende às exigências mecânicas normativas para aplicação em vias de tráfego leve. Para alcançar a determinação da hipótese global, hipóteses parciais relacionadas diretamente às propriedades do concreto desenvolvido precisam ser formuladas, estas hipóteses vinculam diretamente as variáveis intervalares dependentes e independentes.

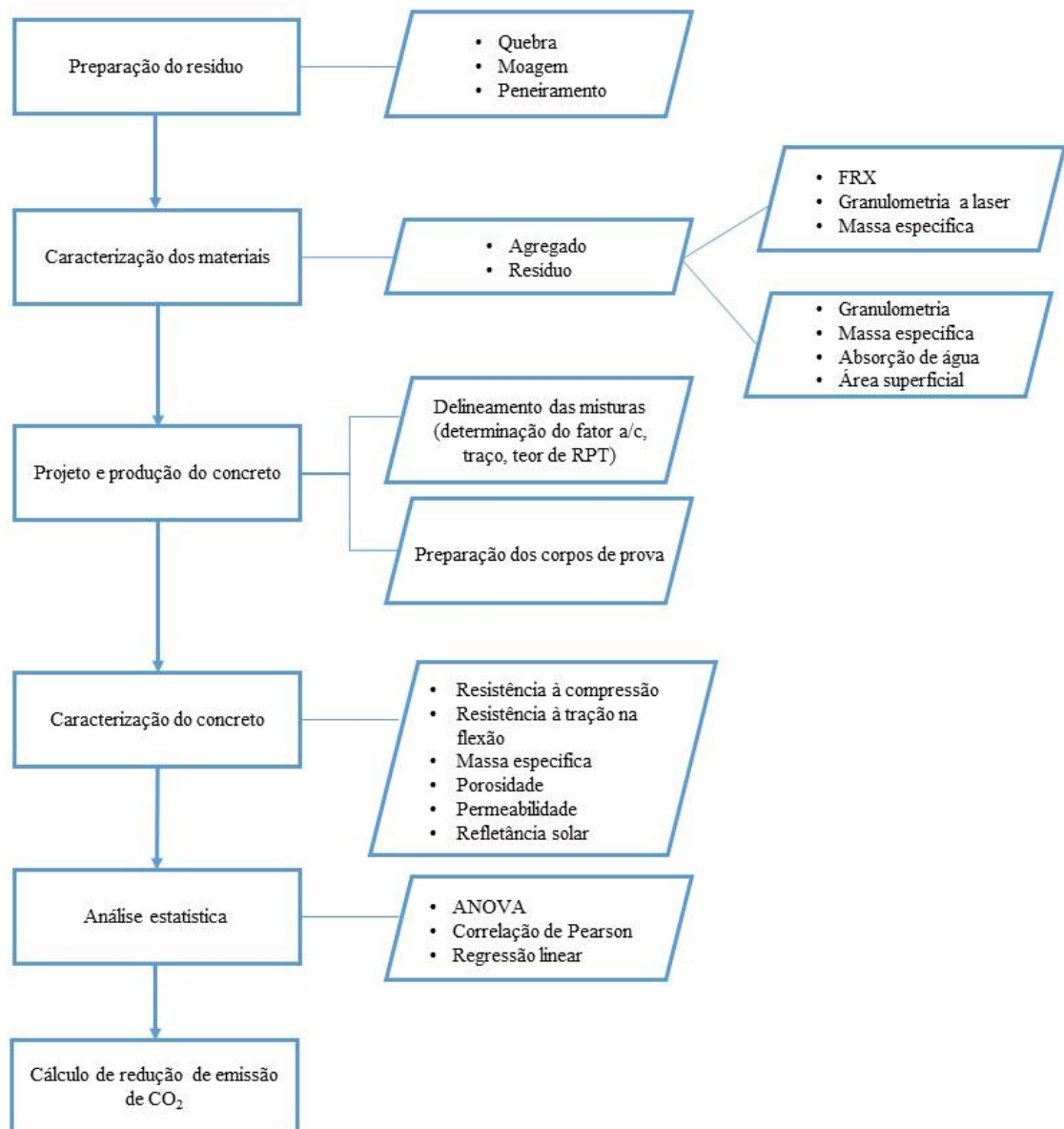
A variável independente é definida como a porcentagem (0; 5; 7,5 e 10%) de adição de RPT no traço do concreto, as variáveis dependentes são resultados de ensaios experimentais, como resistência à tração na flexão, resistência à compressão, permeabilidade, porosidade, massa específica e refletância. As hipóteses pertinentes às análises diretas das variáveis dependentes e independente possuem a seguinte abordagem: a substituição parcial do cimento Portland por RPT tem influência sobre a resistência à tração na flexão, resistência à compressão, porosidade, permeabilidade, massa específica, e refletância do concreto permeável.

As unidades de análise da pesquisa são corpos de prova de concreto permeável com adição de resíduo particulado de tijolo. O método de coleta de dados do estudo será por instrumentos específicos.

A pesquisa é dividida em duas abordagens: bibliográfica e experimental. A abordagem bibliográfica refere-se ao desenvolvimento do referencial teórico que embasa conceitualmente as análises e as comparações de resultados através de estudos anteriores pertinentes ao tema. A abordagem experimental é fundada em experimentos laboratoriais capazes de mensurar as propriedades mecânicas e físicas dos corpos de prova de concreto permeável com adição de RPT, dando origem as variáveis dependentes do estudo, com o intuito de verificar se o desempenho deste material é aceitável para sua aplicação em camadas de revestimentos de vias

de tráfego leve, bem como analisar a influência do resíduo nas referidas propriedades. A abordagem experimental é dividida em seis etapas: preparação do resíduo; caracterização dos materiais; projeto e produção do concreto; caracterização do concreto; análise estatística e cálculo da estimativa de redução de emissão de CO₂ pela substituição de cimento Portland por RPT. Pode-se observar de forma esquemática as etapas da abordagem experimental do estudo no fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma da etapa experimental



Fonte: Autora (2023).

3.1 OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DO RESÍDUO PARTICULADO DE TIJOLO

O resíduo particulado de tijolo foi obtido do descarte de produção de uma empresa oleira localizada na cidade de Joinville-SC. A empresa trabalha com a produção de tijolos de cerâmica vermelha convencional.

3.1.1 Preparação do resíduo

Para a utilização do resíduo como material pozolânico, os tijolos recebidos da olaria foram quebrados em pedaços menores com o auxílio de um martelo, em seguida o material foi colocado em um moinho de bolas, modelo SERVITECH CT-241, disponibilizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Santa Catarina. A Figura 8 apresenta o moinho de bolas utilizado para moagem do resíduo de tijolo.

Figura 8 – Moinho de bolas



Fonte: Autora (2023)

Cada parcela de material foi submetida à um ciclo de moagem de 40 minutos, tempo necessário para que o material passasse com facilidade na peneira com abertura de 0,075mm. O material foi estocado em recipientes fechados com proteção contra a umidade. A Figura 9 apresenta o resíduo antes e após a moagem no moinho de bolas.

Figura 9 – Resíduo antes e após moagem



Fonte: Autora (2023)

3.1.2 Caracterização do resíduo

Para a caracterização do resíduo particulado de tijolo foram realizados os ensaios de fluorescência de raios X, granulometria a laser, massa específica e superfície específica. O ensaio de fluorescência de raios X foi realizado com um espectrômetro de fluorescência de raios-X EDX-720 com energia dispersiva, o equipamento é de fabricação da empresa SHIMADZU e foi disponibilizado pela Universidade do Estado de Santa Catarina. Para o ensaio de granulometria à laser foi utilizado o equipamento SHIMADZU SALD-2201 versão 2.2.0 também realizado na universidade. O ensaio para determinação da massa específica foi realizado de acordo com a norma NBR 16605 (ABNT, 2017). O ensaio para determinação da área superficial foi realizado de acordo com a norma NBR 16372 (ABNT, 2015) com a utilização do equipamento Polyperm 100 através do método de Blaine.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS

Quanto à caracterização dos materiais agregados, foram realizados ensaios de granulometria, absorção de água e massa específica.

O ensaio de absorção de água e massa específica foi realizado de acordo com a norma rodoviária ME 195 (DNER, 1997), os resultados são obtidos após procedimentos manuais em laboratório que envolvem algumas etapas de peneiramento, umedecimento, secagem, pesagem e aplicação das mensurações em fórmulas específicas que retornam os valores de massa específica na condição seca, massa específica na condição saturada com superfície seca e absorção de água. O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

As misturas de concreto foram produzidas em betoneira com capacidade máxima de 120 litros. Os materiais componentes do concreto são: pedrisco e brita 1 como agregados naturais, cimento CP V ARI RS, superplastificante redutor de água POWERFLOW 4001 fornecido pela empresa MC Bauchemie e fibras de polipropileno para auxiliar na resistência à tração do concreto.

O traço piloto de 1:4 (cimento – agregados) com relação água cimento de 0,33 foi obtida de Schackow *et al.* (2020), esta pesquisa trata também da aplicação de resíduos como substituto do cimento Portland no concreto permeável, porém, neste caso, com resíduos da indústria papelreira. O autor obteve bons resultados acerca da resistência à tração na flexão e alto grau de permeabilidade nas suas amostras. Foi alterado ao longo do estudo apenas o fator água-cimento, de 0,33 para 0,31 para ajustes da mistura. A porcentagem de substituição do RPT foi feita sobre a quantidade em peso de cimento a partir da mistura de referência sem adição de resíduos. A composição do traço é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do traço

Materiais para produção de 1m³	Porcentagem de adição de resíduo			
	0%	5%	7,5%	10%
Cimento (Kg)	478,56	454,62	442,66	430,70
RPT (Kg)	0	23,93	35,89	47,86
Pedrisco (Kg)	246,47	246,47	246,47	246,47
Brita (Kg)	1674,96	1674,96	1674,96	1674,96
Água (Kg)	152,32	152,32	152,32	152,32
Superplastificante (g)	957,11	909,26	885,33	861,40
Fibra de polipropileno (Kg/m³)	1	1	1	1

Fonte: Autora (2023)

A quantidade e dimensão dos corpos de prova por ensaio são descritas na Tabela 2, considerando que para os ensaios de resistência à compressão, porosidade e massa específica foram utilizados os mesmos corpos de prova.

Tabela 2 – Quantidade de corpos de prova

Ensaio	0%	5%	7,5%	10%	Total	Tamanho (cm)	Volume (m³)
	RPT	RPT	RPT	RPT			
Resistência à tração na flexão	5	5	5	5	20	10x10x55	0,11
Resistência à compressão ¹	5	5	5	5	20	10Øx20h	0,031
Porosidade ¹	5	5	5	5	-	10Øx20h	-
Massa específica ¹	5	5	5	5	-	10Øx20h	-
Permeabilidade	1	1	1	1	4	70x80x10	0,22
Refletância	5	5	5 ²	5	20	10x10x2,5	0,0031
Total					64		0,37

¹ Aproveitamento dos mesmos corpos de prova

² Calculado para 15% de resíduo

Fonte: Autora (2023).

A quantidade total de concreto permeável produzida na pesquisa foi de 0,37m³. Considerando o traço do concreto de 1:4, foram necessários 167 quilogramas de cimento e 10 quilogramas de resíduo particulado de tijolo para a produção de todos os corpos de prova. A Figura 10 mostra a consistência do concreto no estado fresco.

Figura 10 – Concreto no estado fresco



Fonte: Autora (2023).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Após a moldagem dos corpos de prova, desmolde e cura do concreto, as amostras foram submetidas aos ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à compressão, porosidade, permeabilidade, massa específica e refletância.

3.4.1 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão de pavimentos de concreto é uma medida indispensável da condição endurecida do material, pois é o concreto que recebe os impactos dos esforços de tração que são impostos pelas cargas dinâmicas e estáticas dos veículos sobre o pavimento.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a norma NBR 12142 (ABNT, 2010). Para este ensaio foram produzidos 5 corpos de prova com dimensões de 10x10x55cm para cada mistura de concreto permeável, totalizando 20 amostras. O ensaio foi realizado no 28º dia de cura.

Neste ensaio o corpo de prova é submetido à uma aplicação de carga empregando o princípio de viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão. O resultado de resistência à tração na flexão é obtido através da Equação (1):

$$f_{ct,f} = F * \frac{l}{b} * d^2 \quad (1)$$

Onde:

$f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão, expressa em Megapascals (MPa);

F é a força máxima registrada na máquina de ensaio expressa em Newtons (N);

l é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);

b é a largura média dos corpos de prova, expressa em milímetros (mm);

d é a altura média dos corpos de prova, expressa em milímetros;

Os corpos de prova e do ensaio de resistência à tração na flexão são apresentados nas Figura 11 e Figura 12 respectivamente. A seção do corpo de prova rompido é apresentada na

Figura 11 – Corpos de prova resistência à tração na flexão



Fonte: Autora (2023).

Figura 12 – Ensaio resistência à tração na flexão



Fonte: Autora (2023).

Figura 13 – Seção do corpo de prova após rompimento



Fonte: Autora (2023).

3.4.2 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foram produzidos 5 corpos de prova para cada formulação de concreto permeável, totalizando 20 amostras. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos de prova foram rompidos por compressão a partir de aplicação de carga uniaxial. O ensaio foi realizado no 28º dia de cura. Os resultados de resistência à compressão foram obtidos através da Equação (2).

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

Onde:

f_c é a resistência à compressão, expressa em Megapascals (MPa);

F é a força máxima alcançada, expressa em Newtons (N);

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

O ensaio de resistência à compressão e um corpo de prova são apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Ensaio resistência à compressão



Fonte: Autora (2023).

3.4.3 Porosidade e massa específica

A porosidade e a massa específica foram obtidas de acordo com a norma americana ASTM C1754 (ASTM, 2012). O volume dos corpos de prova é definido a partir de suas dimensões, a massa seca dos corpos de prova é obtida após permanência em estufa a 38°C por no mínimo 24 horas ou até que apresente constância de massa, posteriormente os corpos de prova são submersos em água na posição vertical por 30 minutos e suas massas submersas são obtidas a partir de balança hidrostática. A porosidade e a massa específica são obtidas a partir das Equações (3) e (4) respectivamente.

$$Porosidade (\%) = \left[1 - \frac{A - B}{\rho_w * V} \right] * 100 \quad (3)$$

$$Massa\ específica = \frac{A}{V} \quad (4)$$

Onde:

A é a massa seca da amostra, expressa em gramas (g);

B é a massa submersa da amostra, expressa em gramas (g);

ρ_w é a densidade da água, expressa em g/cm³;

V é o volume da amostra em cm³;

3.4.4 Coeficiente de permeabilidade

Para determinar o coeficiente de permeabilidade foram seguidas as diretrizes do anexo A da norma NBR 16416 (ABNT, 2015). A área superficial mínima exigida pela norma é de 0,50m², para este estudo foram moldadas placas de 70x80x10cm, totalizando área superficial de 0,56m². As placas foram moldadas com 10 cm de espessura, espessura mínima para pavimentos permeáveis destinados à tráfego leve segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015).

Para execução do ensaio, após 28 dias de cura, a superfície da placa é limpa para retirar possíveis sedimentos depositados, um anel de infiltração é posicionado sobre o local de análise sobre a placa e o pavimento foi pré-molhado e após 2 minutos o ensaio é iniciado. Um volume de água conhecido é despejado sobre o anel de infiltração com velocidade suficiente para manter o nível de água entre as marcações de 10 e 15 mm. O volume de água a ser despejado é determinado em função do tempo de pré-molhagem de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Determinação da massa de água para ensaio

Tempo de pré-molhagem (s)	Massa de água para ensaio (Kg)
≤ 30s	18 ± 0,05
> 30s	3,60 ± 0,05

Fonte: ABNT (2015).

O intervalo de tempo é marcado entre o primeiro contato da água com a superfície do pavimento e o momento em que não houver mais água livre sobre ela, a precisão deve ser de 0,1 segundos. O coeficiente de permeabilidade é definido a partir da Equação (5).

$$K = \frac{C * m}{d^2 * t} \quad (5)$$

Onde:

K é o coeficiente de permeabilidade, expresso em milímetros por hora (mm/h);

m é a massa de água infiltrada, expressa em quilogramas (Kg);

d é o diâmetro do anel de infiltração, expresso em milímetros (mm);

t é o tempo necessário para toda a água percolar, expresso em segundos (s);

C é o fator de conversão de unidades do sistema SI, com valor igual a 4.583.666.000.

O ensaio de permeabilidade é apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Ensaio de permeabilidade



Fonte: Autora (2023).

3.4.5 Refletância

A refletância solar, também conhecida como albedo, é a medida da capacidade de um material refletir a radiação solar incidente. É expressa como a fração da radiação solar refletida em relação à radiação solar incidente. Para determinar a refletância dos corpos de prova de concreto permeável, serão seguidas as diretrizes da norma americana ASTM E903 (ASTM, 2012). Este ensaio é capaz de medir a refletância e absorvância espectral do material, utilizando um equipamento denominado espectrofotômetro equipado com esferas integradas. Todas as medições realizadas no ensaio são determinadas com precisão de 0,001 (ASTM, 2020).

Para os ensaios de refletância solar, foram utilizadas diferentes porcentagens de substituição de resíduo (0%, 5%, 10% e 15%). Essa mudança ocorreu devido a ajustes feitos durante a pesquisa. Inicialmente, a ideia do estudo era trabalhar com estes percentuais de

substituição de (0%, 5%, 10% e 15%). No entanto, por questões logísticas, os primeiros ensaios realizados foram os de refletância solar, pois os corpos de prova precisariam ser enviados para outra universidade em outra cidade devido à falta de equipamentos disponíveis.

Posteriormente, ao realizar ensaios de teste de resistência à tração na flexão, observou-se que os corpos de prova com 15% de substituição de resíduo apresentaram resistências extremamente baixas, muito inferiores aos dados obtidos para o concreto com 10% de resíduo. Em função disso, decidiu-se não mais trabalhar com a adição de 15%, uma vez que ficou evidente que o concreto não atingiria a resistência desejada. Optou-se, então, por trabalhar com um percentual intermediário de 7,5%.

Neste estágio, os ensaios de refletância solar já estavam concluídos e refazê-los exigiria investimentos adicionais. No entanto, é considerada importante a análise da refletância com substituições maiores de resíduo, a fim de investigar o seu impacto em proporções mais elevadas, já que, nesse caso específico, não é levada em consideração a resistência mecânica do material.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina, na cidade de Florianópolis. A Refletância (ρ) é obtida por ensaio conforme a Norma Técnica ASTM E903 (2012), “*Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres*”, considerando um espectro de referência dado pela Norma Técnica ASTM G173 (Condição: global 37° tilt irradiance AM 1.5). Os valores da Refletância e Absortância podem ser expressos de forma absoluta variando de 0 a 1 ou de forma relativa variando de 0 a 100%. Nesta avaliação foram realizados ensaios de Refletância (ρ) através do uso de um espectrofotômetro, modelo Lambda 1050 UV-VIS-NIR, Serial N° 1050L1203282, marca PerkinElmer, com esfera integradora (150mm). A faixa espectral coberta foi de 300nm - 2500nm.

Para este ensaio foram confeccionados corpos de prova compostos pela pasta de cimento que envolverá os agregados no concreto permeável. Esta metodologia foi determinada pelo fato da incapacidade do espectrofotômetro em medir com precisão elementos que contenham poros. Para ter segurança no resultado de ensaio de refletância em laboratório a superfície precisa ser homogênea e ter baixa rugosidade.

A pasta de cimento foi preparada com o auxílio de um misturador fornecido pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina, o equipamento é mostrado na Figura 16.

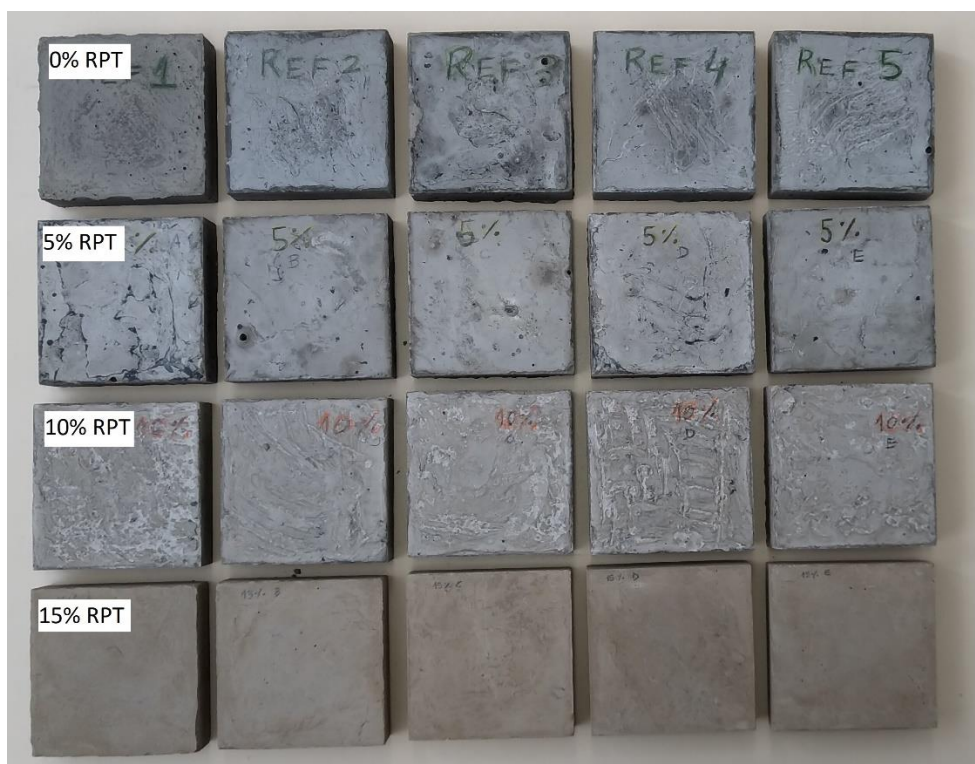
Figura 16 – Misturador para pasta de cimento



Fonte: Autora (2023)

O processo de mistura adotado utilizou a seguinte sequência de colocação dos materiais: cimento, resíduo e água. O processo de mistura foi cronometrado e durou 1 minuto para cada produção. Após determinada a mistura, o material foi colocado em moldes quadrados de 100x100x25 mm. A Figura 17 mostra os 15 moldes prontos já desenformados.

Figura 17 – Amostras ensaio de refletância solar



Fonte: Autora (2023)

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o intuito de verificar a influência da adição de RPT nas propriedades do concreto permeável, os dados obtidos nos ensaios de caracterização física e mecânica, foram analisados estatisticamente através do software Minitab. Realizou-se testes de hipótese e análise da variância (ANOVA), garantido a comprovação das suposições atreladas ao emprego desta metodologia, como: normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias.

Para todas as variáveis resposta (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, permeabilidade, porosidade, massa específica e refletância), relacionadas ao fator de porcentagem de substituição de RPT, foram realizadas ANOVA fator único.

O teste de hipótese utilizado neste estudo é um procedimento estatístico para tomada de decisão no qual são elaboradas duas hipóteses, a hipótese nula (H_0), que considera que as médias calculadas para cada propriedade estudada são iguais, indica que não há variação entre o fator analisado, e a hipótese alternativa (H_1), que considera que as médias calculadas para cada propriedade são diferentes entre si, indicando que há variação entre o fatores analisados

(MONTGOMERY, 2012). Desta forma, as hipóteses geradas para as variáveis resposta desta pesquisa envolvem:

H₀: nenhuma média difere (não há influência da adição de RPT na propriedade do concreto permeável).

H₁: pelo menos uma média difere (há influência da adição de RPT na propriedade do concreto permeável).

Será empregado teste bilateral, com nível de confiança de 95% e nível de significância de 5%. Para determinação do resultado, se a probabilidade de significância (p-valor) for maior que o nível de significância (0,05), a hipótese nula não será rejeitada e concluir-se-á que não há influência da adição de RPT nas propriedades do concreto permeável, se a probabilidade de significância (p-valor) for menor que o nível de significância (0,05), a hipótese nula será rejeitada e concluir-se-á que há influência da adição de RPT nas propriedades do concreto permeável.

Com o intuito de detectar diferenças entre os resultados obtidos na ANOVA, utiliza-se o método de Dunnett, empregado quando se pretende testar contrastes entre os fatores estudados e um valor de controle, que no caso desta pesquisa se refere às amostras sem adição de resíduo no traço do concreto. Neste teste não há interesse na comparação dos tratamentos experimentais entre si, mas sim, entre os tratamentos experimentais e a amostra de controle. O método de Dunnett é utilizado na ANOVA para criar intervalos de confiança para as diferenças entre a média de cada nível de fator e a média de um grupo de controle (MONTGOMERY, 2012).

Notou-se no decorrer da pesquisa, que alguns resultados de ensaios mecânicos apresentaram incoerências em comparação com os demais. Arelou-se a este fato a dificuldade do processo de confecção do concreto permeável, em especial a dificuldade de padrão e homogeneidade na compactação manual e distribuição desigual de energia. Estes resultados errôneos não agregavam à análise, pois sabidamente eram discrepantes e não condiziam com o esperado com relação as resistências mecânicas. Para não afetar a resolução da pesquisa, optou-se por retirar estes valores incoerentes e manter as análises com apenas 4, e não 5 valores nos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão. Portanto, com o intuito de manter as amostras pareadas, retirou-se de cada conjunto de amostras (0; 5; 7,5 e 10%) o valor resultante que mais divergiu da média. Sendo assim, a composição final da amostra para os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão é de 4 corpos de prova por porcentagem de resíduo.

Para completar a etapa de pesquisa estatística, foram realizados ajustes de modelos de regressão e correlação entre as propriedades estudadas do concreto permeável. Para esta etapa da metodologia também foi empregado o software Minitab.

3.6 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO E ANÁLISE DE REGRESSÃO

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida estatística que avalia a associação linear entre duas variáveis quantitativas. Ela é amplamente utilizada para medir a força e a direção dessa relação (MONTGOMERY e RUNGER, 2009). Segundo Barbetta *et al.* (2010), duas variáveis são ditas positivamente correlacionadas se elas caminham em um mesmo sentido, ou seja, valores pequenos de x tendem a ter valores pequenos em y e valores grandes em x tendem a ter valores grandes em y , já duas variáveis estão negativamente correlacionadas quando elas caminham em sentidos opostos, ou seja, valores pequenos de x tendem a ter valores grandes em y e valores grandes em x tendem a ter valores pequenos em y .

A correlação se refere a uma associação numérica entre duas variáveis, não induzindo necessariamente à uma conclusão de causa e efeito. Uma forma de visualizar se as duas variáveis apresentam correlação é através de diagramas de dispersão, onde os valores das variáveis são expressos por pontos em um sistema cartesiano (BARBETTA *et al.*, 2010).

A correlação de Pearson varia de -1 a 1. Um valor de 1 indica uma correlação positiva perfeita, o que significa que as duas variáveis têm uma relação linear positiva, ou seja, quando uma aumenta, a outra também aumenta de forma proporcional. Um valor de -1 indica uma correlação negativa perfeita, onde as variáveis têm uma relação linear negativa, ou seja, quando uma aumenta, a outra diminui de forma proporcional. Um valor de 0 indica que não há uma relação linear entre as variáveis. O valor de " r " será tão mais próximo de 1 (ou de -1) quanto mais forte for a correlação dos dados observados. Tem-se r com valor +1 se os pontos estiverem exatamente sobre uma reta ascendente e tem-se r com valor de -1 se os pontos estiverem exatamente sobre uma reta descendente. Quando não houver relação linear nos dados, r acusará um valor próximo de 0 (BARBETTA *et al.*, 2010).

Segundo Montgomery e Runger (2009), a análise de regressão é um método estatístico utilizado para modelar e investigar a relação entre duas ou mais variáveis. Nesse contexto, um gráfico bidimensional é construído, onde cada par (x, y) é representado por um ponto. A observação desse diagrama de dispersão sugere que, embora não exista uma curva única que passe por todos os pontos, há uma forte indicação de que os pontos se distribuam aleatoriamente

em torno de uma reta. Além disso, a média da variável y parece estar relacionada a x por meio de uma equação linear.

Segundo Bussab e Morettin (2017), a Regressão linear simples é uma técnica estatística utilizada para modelar a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. É uma forma de análise de regressão que busca encontrar uma reta que melhor se ajuste aos dados observados, permitindo fazer previsões ou inferências sobre a variável dependente com base nas variáveis independentes. O modelo de regressão linear assume que existe uma relação linear entre as variáveis independentes e a variável dependente expressa pela equação de uma reta. O ajuste é feito pelo método de mínimos quadrados.

O coeficiente de determinação (R^2) é um coeficiente estatístico usado para julgar a adequação de um modelo de regressão, ele representa o quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada, onde 0% indica que o modelo não explica nada da variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média e 100% indica que o modelo explica toda a variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média (MONTGOMERY e RUNGER, 2009). Segundo Spiegel (2004), o coeficiente R^2 mede o quão bem a reta de regressão se ajusta aos dados amostrais. Se a variação total é completamente explicada pela reta de regressão, R^2 é igual a 1, e diz-se ter uma correlação linear perfeita, por outro lado, se R^2 é igual a 0, diz-se que a variação não é explicada pela reta de regressão.

3.7 REDUÇÃO DE EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Como abordado da justificativa da pesquisa, A média mundial de emissão de CO_2 por tonelada de cimento produzida é de 900 Kg/ton (FREIRE, 2016). Segundo Hasanbeigi *et al.* (2010) a indústria cimenteira emite cerca de 0,9 toneladas de CO_2 para cada tonelada de cimento Portland produzida. Segundo Moradikhrou *et al.* (2020), o processo de produção de Cimento Portland é uma das principais fontes de emissão de CO_2 , na sua fabricação 1 tonelada de CO_2 é liberada para produzir 1 tonelada de cimento.

Sabendo-se o traço utilizado para a produção do concreto permeável, e assim, a quantidade de cimento utilizada para o preparo de um metro cúbico de material, é possível estimar a quantidade de dióxido de carbono que deixará de ser emitida na atmosfera ao substituir parte do cimento por resíduo particulado de tijolo, considerando a média de emissão de dióxido de carbono de 1000Kg por tonelada de cimento produzida. A estimativa de redução será calculada para os percentuais de substituição de resíduo de 5; 7,5 e 10% e estas serão comparadas com o traço de referência do concreto permeável.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do programa experimental proposto e suas respectivas discussões. O capítulo inicia com os resultados e discussões referentes à caracterização dos materiais, seguida pelos resultados dos ensaios mecânicos e físicos de caracterização do concreto permeável, análise estatística, e por fim, o cálculo de redução de emissão de dióxido de carbono.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO PARTICULADO DE TIJOLO

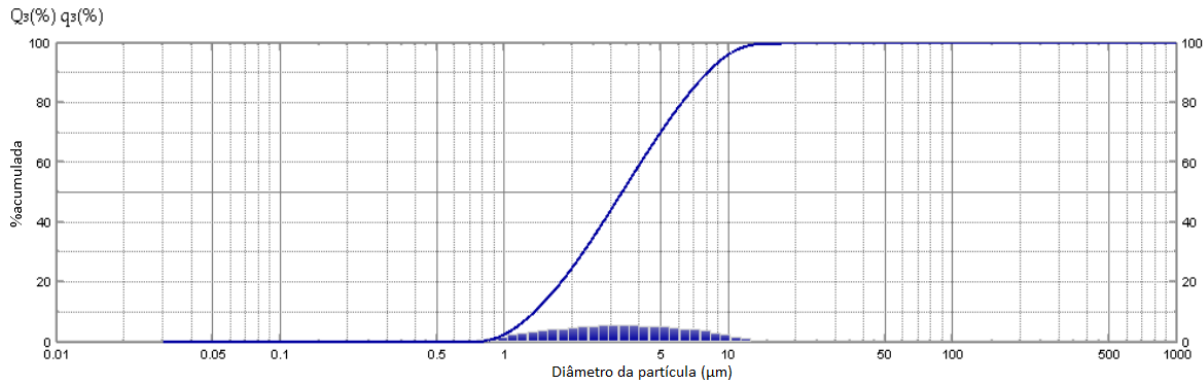
Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), como requisito físico, os materiais pozolânicos devem apresentar menos de 20% de material retido na peneira 45 μm . Para averiguar esta exigência, realizou-se o ensaio de granulometria à laser. O resíduo apresentou diâmetro médio de 3,316 μm . Além disso, 90% das partículas possuem dimensão inferior a 7,974 μm , atendendo, portanto, ao requisito físico de material pozolânico. A distribuição granulométrica do material está representada na Tabela 4 e Figura 18.

Tabela 4 – Distribuição granulométrica do RPT

10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
D(μm)	D(μm)	D(μm)	D(μm)	D(μm)	D(μm)	D(μm)	D(μm)	D(μm)
1,339	1,769	2,223	2,728	3,316	4,030	4,936	6,155	7,974

Fonte: Autora (2023)

Figura 18 - Distribuição granulométrica do RPT



Fonte: Autora (2023)

A NBR 12653 (ABNT, 2017) estabelece como requisito químico, que os materiais pozolânicos apresentem em sua composição química uma concentração total de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) igual ou superior a 70% e que a concentração de trióxido de enxofre (SO_3) seja inferior 4%. A análise química de fluorescência de raios X do resíduo particulado de tijolo apresentou a composição química apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química do RPT

Composição química	Teor em massa (%)
SiO_2	46,509
Al_2O_3	28,072
Fe_2O_3	18,307
TiO_2	2,545
K_2O	1,569
CaO	1,078
SO_3	0,967
P_2O_5	0,605
MnO	0,258
V_2O_5	0,091

Fonte: Autora (2023)

Os resultados encontrados para o resíduo particulado de tijolo atendem às especificações da norma. A concentração total de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) é de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 92,888\%$ e a concentração de trióxido de enxofre $\text{SO}_3=0,967\%$. A massa específica obtida através de ensaio regido pela norma NBR 16605 (ABNT, 2017) do resíduo particulado de tijolo é de $2,13 \text{ g/cm}^3$.

Para a análise de área superficial, o ensaio foi realizado tanto para o resíduo quando para o cimento utilizado para propor uma comparação da área superficial entre os dois materiais. Enquanto a área superficial do cimento é de $3208,71 \text{ cm}^2/\text{g}$, a área superficial do resíduo representa mais que o dobro da área do cimento, com $6816,97 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Segundo Bauer (2022), a área superficial do material aumenta exponencialmente com a redução do tamanho das partículas. Quanto maior a área superficial, maior a quantidade de água necessária para o envolvimento dos grãos do material.

A área superficial específica refere-se à área total da superfície de um material por unidade de massa ou volume. Quanto maior a área superficial específica, mais ativa é a

superfície do material, o que implica em uma maior interação com outros materiais, reagentes ou meios. A área superficial específica descreve a extensão da superfície em relação à massa ou volume do material. Em alguns casos, materiais com alta área superficial podem ter uma maior capacidade de adsorção de água, o que pode influenciar na quantidade de água necessária para atingir uma mistura com a consistência desejada. Uma maior área superficial contribui para maior reatividade do material e pode ainda afetar a consistência e a trabalhabilidade (CALLISTER e RETHWISCH, 2018; SCHACKOW, 2015).

Segundo Schackow (2015), argamassas contendo resíduo de tijolo tem redução na trabalhabilidade, quando mantido fato água-cimento constante, isto, devido a maior capacidade de consumo de água do RPT, por ser mais fino do que o cimento, portanto, recomenda-se o uso de até 10% de resíduo caso desejado manter o fator água-cimento constante.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS

4.2.1 Brita 1

A brita 1 utilizada na pesquisa foi comprada e fornecida pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina. A aparência do material é mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Brita 1



Fonte: Autora (2023)

A massa retida acumulada em cada peneira para a brita 1 é mostrada na Tabela 6.

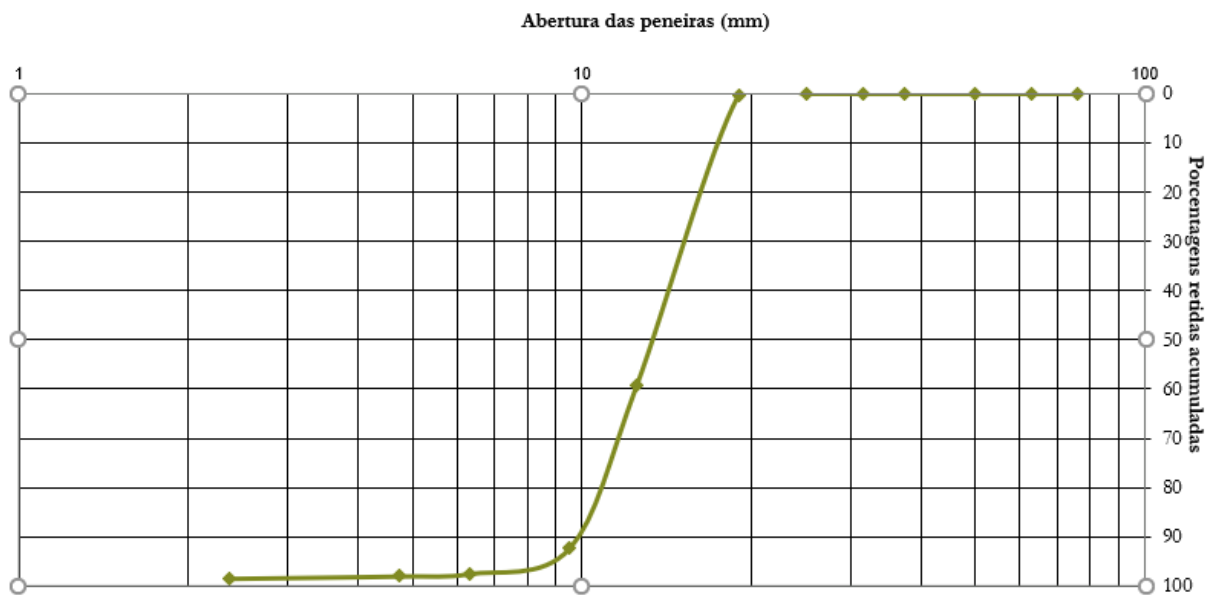
Tabela 6 – Massa retida acumulada da brita 1

Peneira (mm)	Massa retida acumulada (%)
25	0
19	0,3
12,5	59,3
9,5	92,3
6,3	97,5
4,75	98,0
2,36	98,4
1,18	98,7
0,6	98,9
0,3	99,1
0,15	99,4
Fundo	100

Fonte: Autora (2023)

A curva granulométrica da brita 1 é apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Curva granulométrica da brita 1



Fonte: Autora (2023)

O módulo de finura da brita 1 foi calculado em 6,85. Sua absorção de água foi de 0,42% e sua densidade na condição saturada com superfície seca de 2,78 g/cm³.

4.2.2 Pedrisco

O pedrisco utilizado na pesquisa foi comprado e fornecido pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina. A aparência do material é mostrada na Figura 21

Figura 21 – Pedrisco



Fonte: Autora (2023)

A massa retida acumulada em cada peneira para o pedrisco é mostrada na Tabela 7.

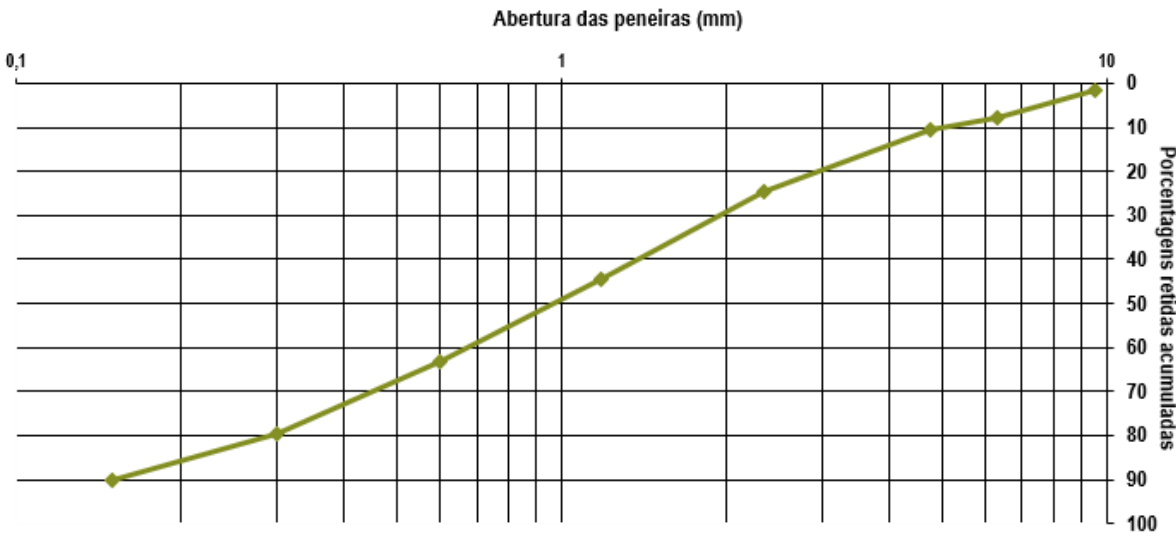
Tabela 7 – Massa retida acumulada do pedrisco

Peneira (mm)	Massa retida acumulada (%)
9,5	1,65
6,3	7,83
4,75	10,48
2,36	24,55
1,18	44,42
0,6	63,13
0,3	79,72
0,15	90,03
Fundo	100

Fonte: Autora (2023)

A curva granulométrica do pedrisco é apresentada na Figura 22.

Figura 22 – Curva granulométrica do pedrisco



Fonte: Autora (2023)

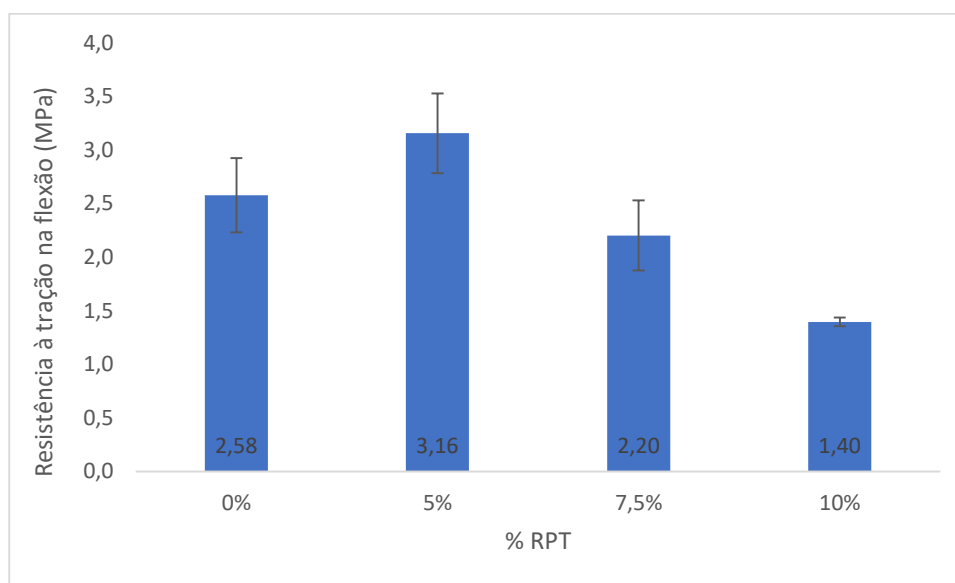
O módulo de finura do pedrisco foi calculado em 3,14. Sua absorção de água foi de 3,58% e sua densidade na condição saturada com superfície seca de 2,60 g/cm³.

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), o concreto permeável moldado no local destinado para vias de tráfego leve deve apresentar resistência à tração à flexão de mínima de

2,0 MPa. Os ensaios foram realizados no 28º dia de cura. Dos quatro tipos de concreto estudados, três obtiveram resultados satisfatórios quando comparado à norma, sendo eles o concreto de referência, e os concretos com 5 e 7,5% de substituição de cimento por RPT. Os resultados obtidos para o concreto com 10 % de substituição foram insuficientes. Na Figura 23, são apresentadas as médias de resistência à tração na flexão para cada porcentagem de substituição.

Figura 23 – Resistência à tração na flexão



Fonte: Autora (2023)

Os resultados numéricos indicam que o parâmetro de resistência à tração na flexão para as misturas de concreto permeável que incorporam RPT em proporções de 5 e 7,5% está contemplado nas especificações de resistência para concreto permeável produzido apenas com cimento. O concreto com substituição de 5% de RPT apresentou o melhor resultado, com média de resistência a tração na flexão de 3,16 MPa, isso representa um aumento de 22,48% de resistência em comparação com a referência sem adição de resíduo. O concreto com substituição de 7,5%, apesar de reduzir a resistência em 14,54% quando comparado a referência, possui resistência maior do que 2 MPa, estando apto a ser utilizado como pavimento para vias de tráfego leve. O concreto com substituição de 10% não atingiu a resistência mínima e apresentou queda de 54,12% em relação a referência.

Para análise estatística, que verifica a influência do RPT na resistência à tração na flexão, tem-se as hipóteses:

H_0 : nenhuma média difere (não há influência da adição de RPT na resistência à tração na flexão do concreto permeável).

H_1 : pelo menos uma média difere (há influência da adição de RPT na resistência à tração na flexão do concreto permeável).

A análise resultou em um p-valor 0,001, como 0,001 é menor que 0,05 rejeita-se a hipótese nula. Sendo assim, pelo menos uma média difere, havendo influência do RPT na resistência a tração na flexão do concreto permeável. O coeficiente de regressão da análise (R^2) foi de 85,57%.

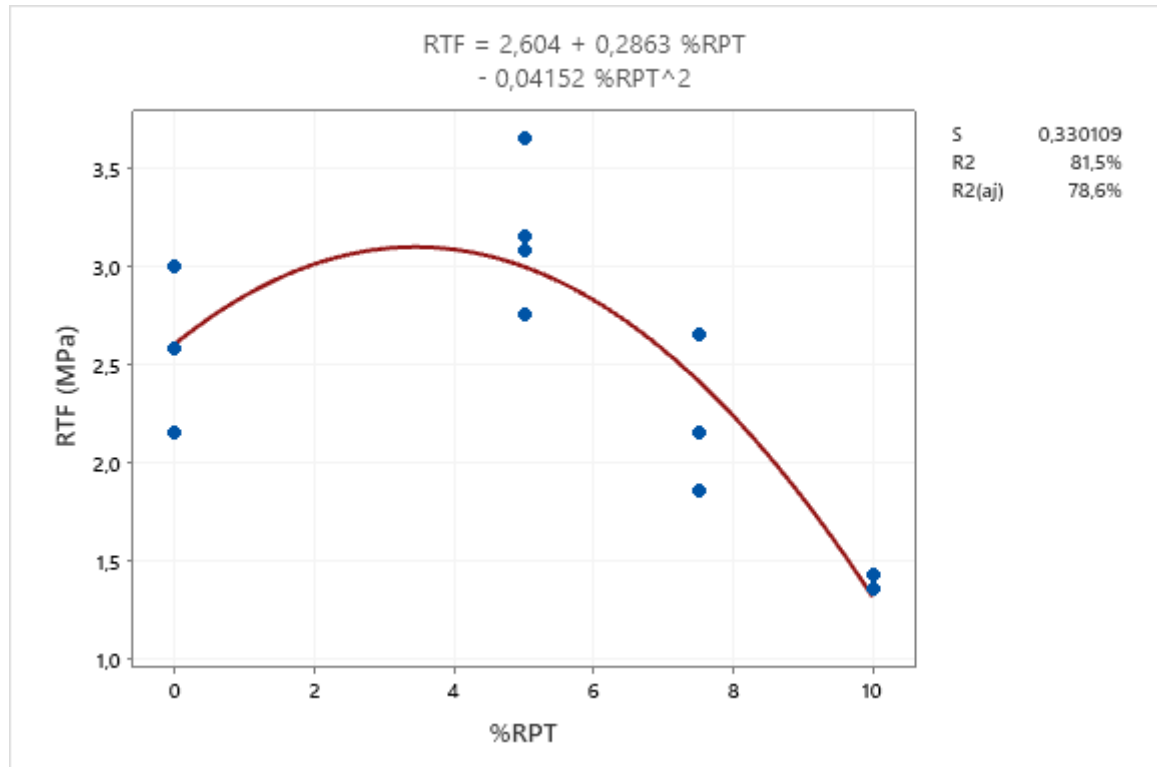
Com a hipótese nula rejeitada, sabe-se que pelo menos uma média difere. Aplicou-se o teste de Dunnett para verificar quais são as médias divergentes. O resultado do teste de Dunnett apontou que a divergências de média acontecem entre a amostra de controle e amostra de 5% e entre a amostra de controle e a amostra de 10%.

Posterior a realização da ANOVA, para verificar a suposição de normalidade dos resíduos, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, caso o p-valor obtido no teste for superior ao valor de alfa (5%), confirma que os resíduos dos dados apresentam normalidade. O p-valor do teste foi de 0,100, como 0,100 é maior do que 0,05 pode-se verificar a suposição de normalidade dos resíduos como verdadeira, portanto, os valores extraídos do teste ANOVA são confiáveis.

Para avaliar a homogeneidade da variância aplicou-se o teste de Levene, obtendo-se p-valor de 0,272, como $0,272 > 0,05$ não rejeita-se a hipótese nula, sendo assim, pode-se afirmar que as variâncias não diferem e a suposição de homogeneidade da variância está verificada, o que implica na seguridade de que os dados obtidos pelo teste ANOVA são confiáveis.

A Figura 24 apresenta a análise de regressão que relaciona a porcentagem de resíduo e a resistência à tração na flexão. Na imagem, pode-se ver que análise de regressão resultou em uma função quadrática com coeficiente de determinação R^2 de 81,5%.

Figura 24 – Regressão Resistência à tração na flexão x %RPT



Fonte: Autora (2023)

Ao realizar uma análise de regressão entre a porcentagem de substituição de resíduos e a resistência à tração na flexão, é possível derivar uma equação que representa essa relação. Ao igualar essa equação a zero, obtém-se o ponto de máximo da curva, revelando o teor ideal de resíduo que confere ao concreto estudado a maior resistência mecânica. Essa abordagem permite determinar a quantidade ideal de resíduo a ser incorporados no concreto, de modo a maximizar sua capacidade de resistência à tração na flexão.

Através da análise de regressão, tem-se a equação:

$$RTF = 2,604 + 0,2863RPT - 0,04152 RPT^2 \quad (6)$$

Derivando a equação e igualando-a à zero, tem-se:

$$RTF' = 0,2863 - 0,08304 RPT$$

$$0,2863 - 0,08304 RPT = 0$$

$$RPT_{m\acute{a}x} = 3,44\%$$

$$RTF_{3,44\%} = 3,10 MPa$$

Portanto, considerando apenas a análise de substituição de resíduo visando a melhoria da propriedade de resistência à tração na flexão, tem-se 3,44% como a porcentagem ideal de RPT para se obter o valor máximo de resistência à tração na flexão de 3,10 MPa.

No estudo de Li *et al.* (2021), o concreto permeável foi preparado substituindo parcialmente o cimento por pó de vidro residual em proporções de (0%, 10%, 15%, 20% e 25%). Com o aumento do teor de resíduo, a resistência à tração na flexão do concreto diminuiu gradualmente aos 28 dias, aumentou lentamente aos 56 dias, e diminuiu aos 112 dias. A quantidade de resíduo que mais melhorou a resistência foi de 20%. A razão é que com o aumento do período de cura, uma grande quantidade de SiO_2 e Al_2O_3 reage com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para produzir os géis CAH e CSH, formando uma parte da microestrutura com textura fina e menor permeabilidade. Isso pode levar a um bom intertravamento entre os agregados, mantendo-os juntos e aumentando o desempenho à flexão do corpo de prova. O valor máximo aos 28 dias foi obtido para substituição com 10% de resíduo com resistência de 1,4 MPa, nenhuma resistência aos 28 dias superou a resistência do material sem resíduo.

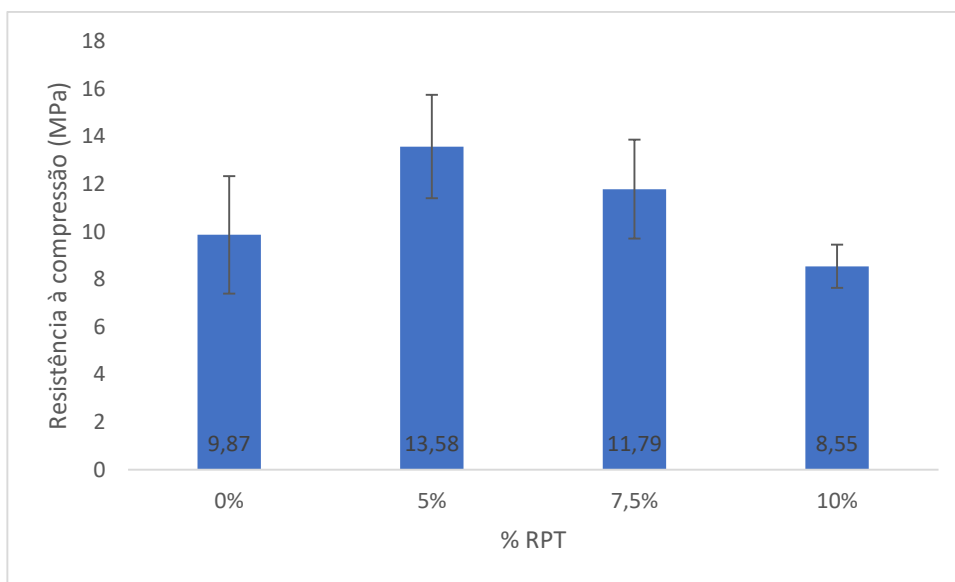
Na pesquisa de Liu *et al.* (2018), com o objetivo de estudar os efeitos da cinza volante nas propriedades do concreto permeável, a cinza foi utilizada para substituir o cimento em níveis de (3%, 6%, 9% e 12%) usando o método de equivalência de volume. O autor concluiu que a adição de cinza volante reduziu significativamente a resistência à flexão aos 28 dias e aos 150 dias do concreto permeável. Quanto maior o teor de cinza volante, menor a resistência à flexão do concreto. Comparado ao grupo de controle com resistência à tração na flexão de 4,84 MPa, quando o teor de cinza volante era de 12%, a resistência aos 28 dias foi de 3,54 MPa, representando uma perda de resistência de 26,9%. Além da própria adição de resíduo na mistura, a redução na resistência à flexão aos 28 dias também foi atribuída à fraca aderência entre os agregados graúdos causada pela redução no consumo de cimento e pela hidratação incompleta do cimento.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi realizado no 28º dia de cura. A resistência à compressão do concreto permeável pode variar dependendo da formulação específica do concreto e das condições de cura. No entanto, geralmente, sua resistência à compressão é menor em comparação com o concreto convencional. A sua principal função é permitir a drenagem, reduzindo a acumulação de água superficial e contribuindo para o controle de enchentes. Portanto, a resistência à compressão não é a característica mais relevante ao avaliar a adequação

do concreto permeável para uma determinada aplicação e não há exigência de resistência mínima normatizada para esta propriedade. A Figura 25 apresenta o gráfico dos valores médios de resistência à compressão.

Figura 25 – Resistência à compressão



Fonte: Autora (2023)

Os resultados numéricos indicam que o parâmetro de resistência à compressão para as misturas de concreto permeável que incorporam RPT em proporções de 5 e 7,5% apresentam resultados superiores à referência sem adição de resíduo, já o concreto com substituição de 10% de resíduo obteve resistência inferior. O concreto com substituição de 5% de RPT apresentou o melhor resultado, com média de resistência à compressão de 13,58 Mpa, isso representa um aumento de 37,60% de resistência em comparação com a referência sem adição de resíduo. O concreto com 7,5% de substituição também obteve melhorias, com média de resistência de 11,79 MPa, representando aumento de 19,45% em comparação com a referência. O concreto com substituição de 10% apresentou pequeno decréscimo de resistência, com média de 8,55 MPa, que representa uma queda de 13,38% em relação à referência.

Para análise estatística, que verifica a influência do RPT na resistência à compressão, tem-se as hipóteses:

H_0 : nenhuma média difere (não há influência da adição de RPT na resistência à compressão do concreto permeável).

H_1 : pelo menos uma média difere (há influência da adição de RPT na resistência à compressão do concreto permeável).

A análise resultou em um p-valor 0,019, como 0,019 é menor que 0,05 rejeita-se a hipótese nula. Sendo assim, pelo menos uma média difere, havendo influência do RPT na resistência à compressão do concreto permeável. O coeficiente de regressão da análise (R^2) foi de 54,95%.

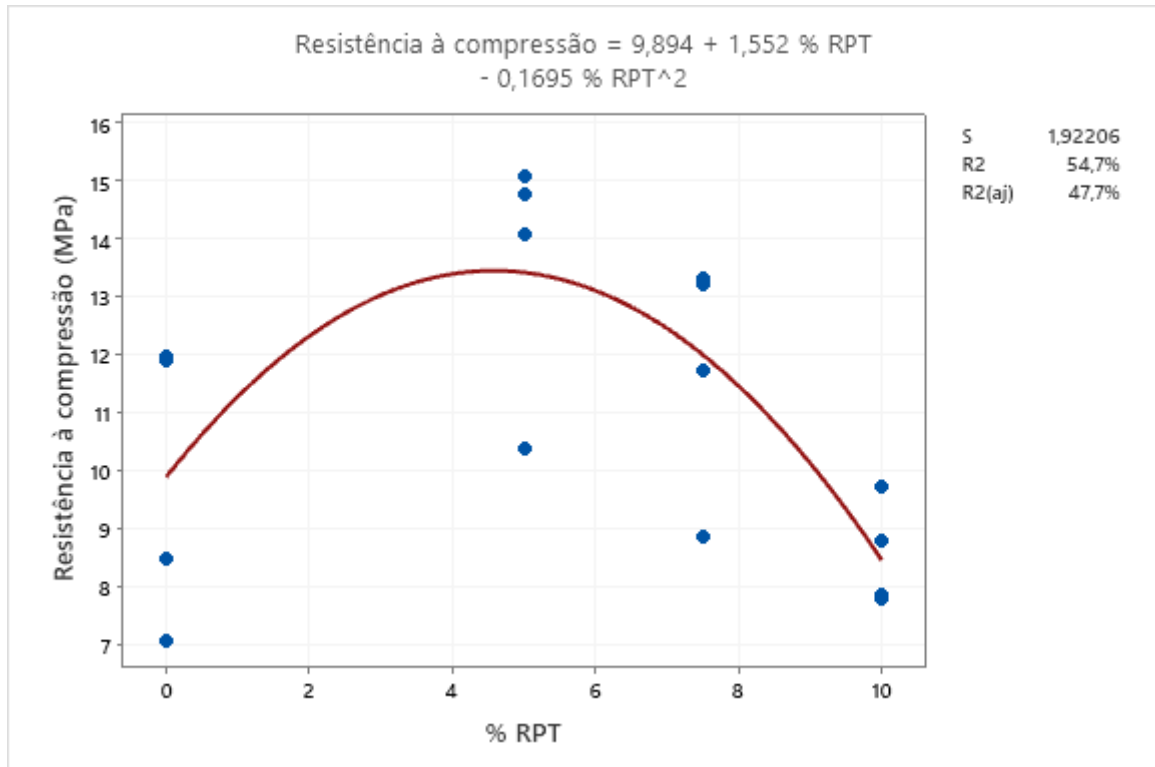
Com a hipótese nula rejeitada, sabe-se que pelo menos uma média difere. Aplicou-se o teste de Dunnett para verificar quais são as médias divergentes. Porém, o resultado do teste de Dunnett não apontou as divergências de média. Isso pode ser explicado pelo fato de que as médias diferem entre si, e não entre a referência, que é o objetivo do teste de Dunnett. Sendo assim, conclui-se que não há influência da adição de RPT na resistência à compressão do concreto permeável.

Posterior a realização da ANOVA, para verificar a suposição de normalidade dos resíduos, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, caso o p-valor obtido no teste for superior ao valor de alfa (5%), confirma que os resíduos dos dados apresentam normalidade. O p-valor do teste foi de 0,100, como 0,100 é maior do que 0,05 pode-se verificar a suposição de normalidade dos resíduos como verdadeira, portanto, os valores extraídos do teste ANOVA são confiáveis.

Para avaliar a homogeneidade da variância aplicou-se o teste de Levene, obtendo-se p-valor de 0,272, como 0,272 é maior que 0,05 não rejeita-se a hipótese nula, sendo assim, pode-se afirmar que as variâncias não diferem e a suposição de homogeneidade da variância está verificada, o que implica na seguridade de que os dados obtidos pelo teste ANOVA são confiáveis.

A Figura 26 apresenta a análise de regressão que relaciona a porcentagem de resíduo e a resistência à compressão. Na imagem, pode-se ver que a análise de regressão resultou em uma função quadrática com coeficiente de determinação R^2 de 54,7%.

Figura 26 – Regressão resistência à compressão x %RPT



Fonte: Autora (2023)

Ao realizar uma análise de regressão entre a porcentagem de substituição de resíduos e a resistência à compressão, é possível derivar uma equação que representa essa relação. Ao igualar essa equação a zero, obtém-se o ponto de máximo da curva, revelando o teor ideal de resíduo que confere ao concreto estudado a maior resistência mecânica. Essa abordagem permite determinar a quantidade ideal de resíduo a ser incorporados no concreto, de modo a maximizar sua capacidade de resistência à compressão.

Através da análise de regressão, tem-se a equação:

$$RC = 9,894 + 1,552RPT - 0,1695 RPT^2 \quad (7)$$

Derivando a equação e igualando-a à zero, tem-se:

$$RC' = 1,552 - 0,339 RPT$$

$$1,552 - 0,339 RPT = 0$$

$$RPT_{\text{máx}} = 4,58\%$$

$$RC_{4,58\%} = 13,45 \text{ MPa}$$

Portanto, considerando apenas a análise de substituição de resíduo visando a melhoria da propriedade de resistência à compressão, tem-se 4,58% como a porcentagem ideal de RPT para se obter o valor máximo de resistência à compressão de 13,45 MPa.

No estudo de Li *et al.* (2021), onde o concreto permeável foi preparado substituindo parcialmente o cimento por pó de vidro residual em proporções de (0%, 10%, 15%, 20% e 25%), com o aumento do teor de resíduo, a resistência à compressão do concreto diminuiu aos 28 dias, aumentou lentamente aos 56 dias e primeiro aumentou e depois diminuiu aos 112 dias, a quantidade de resíduo que melhor beneficiou o concreto foi de 20%. No entanto, com alto teor de resíduo, a diminuição do teor de pasta de cimento levou a uma diminuição dos produtos de hidratação, não havendo reações entre o material pozolânico, portanto, a quantidade de resíduo não deve ultrapassar a geração dos produtos de hidratação, afetando negativamente a resistência à compressão do concreto permeável.

Na pesquisa de Liu *et al.* (2018), com o objetivo de estudar os efeitos da cinza volante nas propriedades do concreto permeável, a cinza foi utilizada para substituir o cimento em níveis de (3%, 6%, 9% e 12%) usando o método de equivalência de volume. O autor concluiu que a adição de cinza volante reduziu tanto a resistência à compressão aos 28 dias quanto aos 150 dias do concreto permeável, e conforme a porcentagem de substituição aumentava, diminuía-se a resistência à compressão. Com substituição de 12% de resíduo, a redução de resistência já representou 33,8% em relação à referência, apontando que em comparação com o grupo de controle, a resistência à compressão aos 28 dias do concreto permeável modificado com cinza volante foi significativamente menor.

No estudo de Hwang e Cortés (2021), foram confeccionados concretos permeáveis com adição de cinza volante e pó de vidro moído como substituto parcial do cimento Portland. O teor ótimo de substituição foi de 14,3% de cinza volante e 7,3% de pó de vidro com agregados graúdos em tamanhos variando de 4,75 a 9,5mm e traço de 1:4. A co-utilização de cinza volante e pó de vidro como substitutos do cimento teve maior resistência à compressão em comparação com o concreto de referência. A resistência à compressão máxima obtida foi de 15,2 MPa.

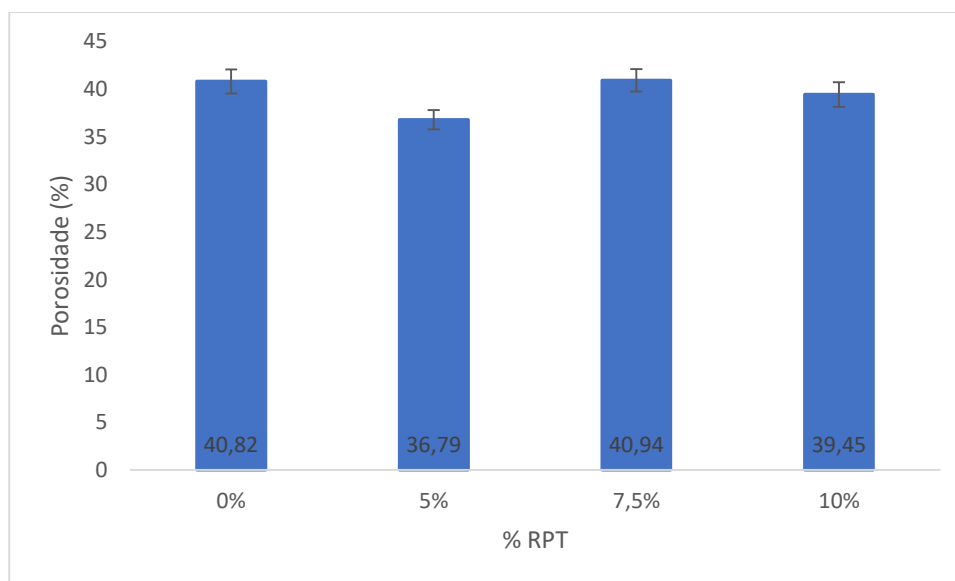
Na pesquisa de Zeng *et al.* (2022), foi proposta uma reciclagem total dos resíduos de construção para produção de concreto permeável. O pó de tijolo moído foi ativado por ativadores alcalinos em diferentes proporções (Al+Si). Os resíduos sólidos e o pó de tijolo reciclado ativado por álcali foram usados como agregado e material de ligação, respectivamente, para alcançar a reciclagem total dos resíduos. O concreto permeável apresentou baixa resistência à compressão, inferior a 6 MPa para todas as amostras testadas.

Na pesquisa de Qin *et al.* (2021), foram confeccionados concretos permeáveis com adição de biocarvão como substituto parcial do cimento Portland em proporções de 0%, 0,65%, 3,2%, 6,5%, 9,5% e 13,5%. O autor concluiu que as amostras de concreto permeável com adição de biocarvão apresentam maior resistência à compressão do que as amostras de referência quando o teor de biocarvão é de 0 até 6,5%, acima desse valor as essas resistências são comprometidas.

4.5 POROSIDADE

A porosidade do concreto permeável pode variar dependendo da mistura e do método de fabricação utilizado. No entanto, geralmente, esta porosidade está na faixa de 10% a 35% (Tennis *et al.*, 2004). A Figura 27 apresenta as médias de porosidade para os quatro tipos de concreto permeável ensaiados nesta pesquisa.

Figura 27 - Porosidade



Fonte: Autora (2023)

Os dados numéricos indicam pequenas variações na porosidade do material, quando comparado com a referência sem adição de resíduos. O concreto com 5% de adição apresenta média de 36,79% de porosidade, isso representa um decréscimo de 9,88% em relação à referência, com média de 40,82%. O material com 7,5% de adição, com média de 40,94% de porosidade, diverge da referência em apenas 0,29% e o material com 10% de resíduo em apenas 3,35%.

Para análise estatística, que verifica a influência do RPT na porosidade, tem-se as hipóteses:

H_0 : nenhuma média difere (não há influência da adição de RPT na porosidade do concreto permeável).

H_1 : pelo menos uma média difere (há influência da adição de RPT na porosidade concreto permeável).

A análise resultou em um p-valor 0,001, como 0,001 é menor que 0,05 rejeita-se a hipótese nula. Sendo assim, pelo menos uma média difere, havendo influência do RPT na porosidade do concreto permeável. O coeficiente de regressão da análise (R^2) foi de 71,14%.

Com a hipótese nula rejeitada, sabe-se que pelo menos uma média difere. Aplicou-se o teste de Dunnett para verificar quais são as médias divergentes. O resultado do teste de Dunnett apontou que a divergências de média acontecem entre a amostra de controle e amostra de 5%.

Posterior a realização da ANOVA, para verificar a suposição de normalidade dos resíduos, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, caso o p-valor obtido no teste for superior ao valor de alfa (5%), confirma que os resíduos dos dados apresentam normalidade. O p-valor do teste foi de 0,100, como 0,100 é maior do que 0,05 pode-se verificar a suposição de normalidade dos resíduos como verdadeira, portanto, os valores extraídos do teste ANOVA são confiáveis.

Para avaliar a homogeneidade da variância aplicou-se o teste de Levene, obtendo-se p-valor de 0,987, como 0,987 é maior que 0,05 não rejeita-se a hipótese nula, sendo assim, pode-se afirmar que as variâncias não diferem e a suposição de homogeneidade da variância está verificada, o que implica na seguridade de que os dados obtidos pelo teste ANOVA são confiáveis.

Apesar de a análise estatística apontar como relevante a diferença de médias entre o concreto sem adição de resíduo e o concreto com 5% de adição, avaliou-se o processo de confecção do concreto permeável, principalmente a dificuldade de padrão na compactação manual e distribuição desigual de energia, e a grande influência destes fatores causada sobre os poros do concreto permeável. Apenas o concreto com 5% de substituição de resíduo afetou significativamente a porosidade, segundo o teste estatístico, porém, se este fenômeno fosse de fato causado pela porcentagem de resíduo inserida na mistura, este resultado deveria se manter para as outras misturas com maiores porcentagens de substituição, sendo assim, aponta-se a heterogeneidade causada pela dificuldade de padrão na compactação como o motivo para as variações de porosidade entre os materiais, e não de fato a variação de percentual de resíduo substituído.

Na pesquisa de Qin *et al.* (2021), foram confeccionados concretos permeáveis com adição de biocarvão como substituto parcial do cimento Portland em proporções de 0%, 0,65%, 3,2%, 6,5%, 9,5% e 13,5%. Verificou-se que o teor de biocarvão tem pouco ou nenhum impacto na porosidade do concreto permeável. A porosidade das amostras variou de 25% a 32% com o teor de biocarvão e o impacto parece aleatório. As variações são atribuídas à heterogeneidade dos materiais concretos permeáveis. A similaridade da porosidade é razoável porque a porosidade do concreto permeável é controlada pelos grandes poros entre os agregados usados, o que é determinado principalmente pelo tamanho e distribuição granulométrica do agregado e não pelo tipo de ligante.

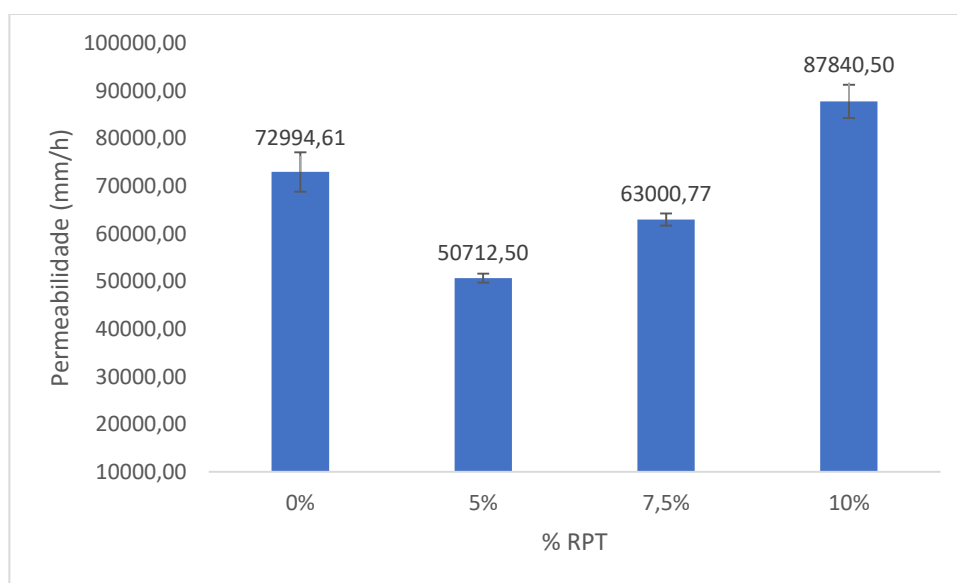
Na pesquisa de Hwang e cortés (2021), a porosidade do concreto permeável feito com pó de vidro e cinza volante como substituto parcial do cimento Portland foi medida em 25,8%. No estudo de Li *et al.* (2021), onde o concreto permeável foi preparado substituindo parcialmente o cimento por pó de vidro residual, o aumento do teor de resíduo gerou efeito negativo na porosidade.

Na pesquisa de Liu *et al.* (2018), com o objetivo de estudar os efeitos da cinza volante nas propriedades do concreto permeável, a cinza foi utilizada para substituir o cimento em níveis de (3%, 6%, 9% e 12%) usando o método de equivalência de volume. Com a substituição do resíduo, a porosidade do concreto pouco se alterou. O autor atribui este resultado ao fato de que o cimento foi parcialmente substituído pela cinza volante usando o método de volume equivalente, dessa forma, a adição de cinza volante não causou alterações no volume de poros da amostra.

4.6 PERMEABILIDADE

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), o pavimento permeável, independentemente do tipo de revestimento adotado, deve apresentar, quando recém-construído, coeficiente de permeabilidade maior que 3600 mm/h. A Figura 28 apresenta as médias do coeficiente de permeabilidade para os concretos analisados.

Figura 28 – Coeficiente de permeabilidade



Fonte: Autora (2023)

Todas as misturas apresentaram altos graus de permeabilidade, os valores do coeficiente de permeabilidade são muito superiores ao mínimo exigido em norma. Para análise estatística, que verifica a influência do RPT na permeabilidade, tem-se as hipóteses:

H_0 : nenhuma média difere (não há influência da adição de RPT na permeabilidade do concreto permeável).

H_1 : pelo menos uma média difere (há influência da adição de RPT na permeabilidade do concreto permeável).

A análise resultou em um p-valor 0,001, como 0,001 é menor que 0,05 rejeita-se a hipótese nula. Sendo assim, pelo menos uma média difere, havendo influência do RPT na permeabilidade do concreto permeável. O coeficiente de regressão da análise (R^2) foi de 96,70%.

Com a hipótese nula rejeitada, sabe-se que pelo menos uma média difere. Aplicou-se o teste de Dunnett para verificar quais são as médias divergentes. O resultado do teste de Dunnett apontou que a divergência de média acontece entre a amostra de controle e todas as amostras com substituição de resíduo.

Posterior à realização da ANOVA, para verificar a suposição de normalidade dos resíduos, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, caso o p-valor obtido no teste for superior ao valor de alfa (5%), confirma que os resíduos dos dados apresentam normalidade. O p-valor do teste foi de 0,100, como 0,100 é maior do que 0,05 pode-se verificar a suposição de normalidade dos resíduos como verdadeira, portanto, os valores extraídos do teste ANOVA são confiáveis.

Para avaliar a homogeneidade da variância aplicou-se o teste de Levene, obtendo-se p-valor de 0,258, como 0,258 é maior que 0,05 não rejeita-se a hipótese nula, sendo assim, pode-se afirmar que as variâncias não diferem e a suposição de homogeneidade da variância está verificada, o que implica na seguridade de que os dados obtidos pelo teste ANOVA são confiáveis.

A realização de ensaios em laboratórios é uma etapa essencial para a obtenção de resultados precisos e confiáveis. No entanto, em certas ocasiões, fatores externos podem afetar os resultados dos ensaios. Um exemplo disso é quando a reação do operador interfere na desativação do cronômetro, comprometendo a acurácia dos resultados. Apesar de a análise estatística apontar como relevante a diferença de médias entre o concreto sem adição de resíduo e as outras misturas, o ensaio de permeabilidade, como mostrado na etapa de materiais e métodos, é realizado manualmente, despejando uma quantidade de água sobre o pavimento mantendo a altura de água constante entre as marcações do anel e marcando o tempo necessário para que toda a água infiltrasse. Como se tratam de materiais muito permeáveis, o tempo para que a água infiltrasse era mínimo, não tendo tempo suficiente para que a água acumulasse entre as marcações do anel e fosse mantido a altura de água constante, ao passo que a água entrava em contato com a superfície, imediatamente ela era absorvida. Com isso, o tempo, em segundos, cronometrado, era apenas o tempo de se despejar a água sobre o pavimento, sofrendo muita interferência da reação de resposta do operador para desacionar o cronômetro, sendo este, ainda, o principal fator que afeta em fórmula o resultado final do ensaio.

Considerando que todos os materiais analisados obtiveram excelentes desempenhos de permeabilidade, muito acima do normatizado, atribui-se a diferença de permeabilidade às variações de operações tanto na moldagem do concreto como na execução do ensaio de permeabilidade, e não de fato à substituição de resíduo no material.

Na pesquisa de Hwang e cortés (2021), a permeabilidade do concreto permeável feito com pó de vidro e cinza volante como substituto parcial do cimento Portland foi medida em $6,3 \pm 0,1$ mm/s.

No estudo de Li *et al.* (2021), onde o concreto permeável foi preparado substituindo parcialmente o cimento por pó de vidro residual, o aumento do teor de resíduo gerou uma tendência de queda na permeabilidade.

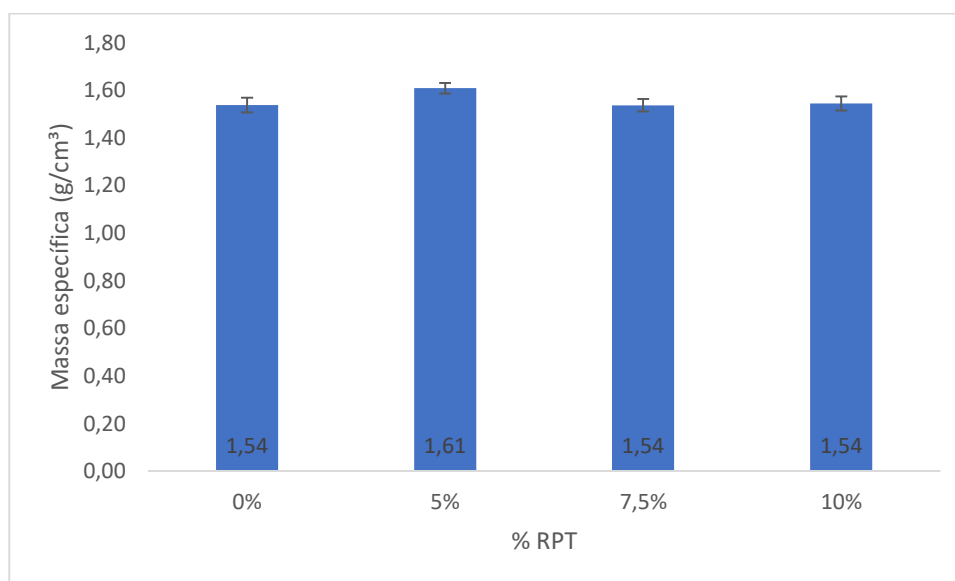
Na pesquisa de Liu *et al.* (2018), onde o cimento foi substituído parcialmente por cinza volante para confeccionar o concreto permeável, a substituição do resíduo pouco alterou a permeabilidade. Os coeficientes de permeabilidade de todos os concretos foram cerca de 3,8 mm/s, o que atende ao requisito padrão de 0,5 mm/s para concreto permeável da norma chinesa.

Na pesquisa de Qin *et al.* (2021), foram confeccionados concretos permeáveis com adição de biocarvão como substituto parcial do cimento Portland em proporções de 0%, 0,65%, 3,2%, 6,5%, 9,5% e 13,5%. Verificou-se que o teor de biocarvão tem pouco ou nenhum impacto na permeabilidade do concreto permeável, as variações são possivelmente atribuídas à heterogeneidade dos materiais concretos permeáveis.

4.7 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica do concreto permeável é consideravelmente menor em comparação com o concreto convencional, devido à presença de espaços vazios na matriz do concreto. A massa específica pode ser afetada por vários fatores, como a proporção dos materiais na mistura, o tamanho e a distribuição dos agregados, e a quantidade de espaços vazios desejados para permitir a permeabilidade. A Figura 29 apresenta as médias de massa específica para todos os concretos analisados.

Figura 29 – Massa específica



Fonte: Autora (2023)

Segundo Tennis *et al.* (2004), geralmente, a massa específica do concreto permeável varia de aproximadamente 1,6 a 2 g/cm³. Como visto nos resultados das etapas anteriores, o concreto permeável desenvolvido teve alta permeabilidade e porosidade, consequentemente, sua massa específica resultou em valores inferiores, próximos ao comumente assumido como mínimo. Observa-se médias iguais de 1,54g/cm³ para as massas específicas dos concretos de

referência, com 7,5 e com 10% de adição de resíduo. A média para o concreto com 5% de substituição foi de 1,61 g/cm³, o que representa um aumento de 4,54%.

Os resultados se complementam ao analisar que nos dados de porosidade, o concreto menos poroso foi com 5% de substituição, o que neste caso apresentou a maior massa específica. Percebe-se também, que os valores não divergiram muito entre si, assim como nos resultados de porosidade.

Ainda assim, foram realizadas as análises estatísticas para o ensaio, para análise que verifica a influência do RPT na massa específica, tem-se as hipóteses:

H₀: nenhuma média difere (não há influência da adição de RPT na massa específica do concreto permeável).

H₁: pelo menos uma média difere (há influência da adição de RPT na massa específica concreto permeável).

A análise resultou em um p-valor 0,002, como 0,002 é menor que 0,05 rejeita-se a hipótese nula. Sendo assim, pelo menos uma média difere, havendo influência do RPT na massa específica do concreto permeável. O coeficiente de regressão da análise (R²) foi de 59,91%.

Com a hipótese nula rejeitada, sabe-se que pelo menos uma média difere. Aplicou-se o teste de Dunnett para verificar quais são as médias divergentes. O resultado do teste de Dunnett apontou que a divergências de média acontecem entre a amostra de controle e amostra de 5%.

Posterior a realização da ANOVA, para verificar a suposição de normalidade dos resíduos, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, caso o p-valor obtido no teste for superior ao valor de alfa (5%), confirma que os resíduos dos dados apresentam normalidade. O p-valor do teste foi de 0,100, como 0,100 é maior do que 0,05 pode-se verificar a suposição de normalidade dos resíduos como verdadeira, portanto, os valores extraídos do teste ANOVA são confiáveis.

Para avaliar a homogeneidade da variância aplicou-se o teste de Levene, obtendo-se p-valor de 0,961, como 0,961 é maior que 0,05 não rejeita-se a hipótese nula, sendo assim, pode-se afirmar que as variâncias não diferem e a suposição de homogeneidade da variância está verificada, o que implica na seguridade de que os dados obtidos pelo teste ANOVA são confiáveis.

Na pesquisa de Hwang e Cortés (2021), a massa específica do concreto permeável feito com pó de vidro e cinza volante como substituto parcial do cimento Portland foi medida em 1.873 kg/m³.

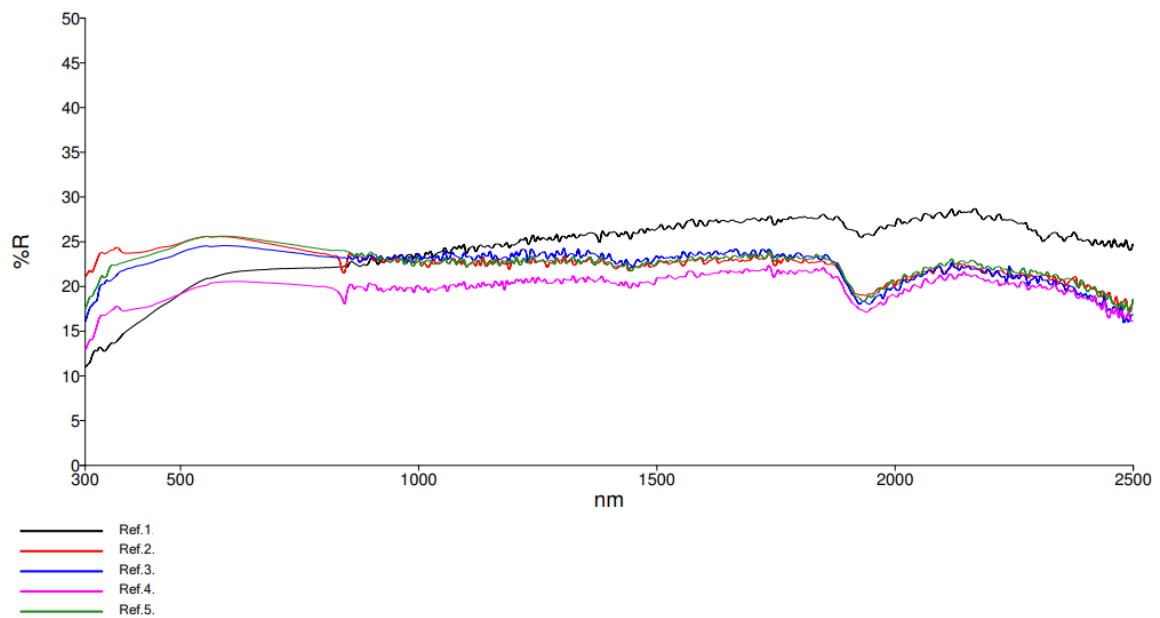
Na pesquisa de Qin *et al.* (2021), foram confeccionados concretos permeáveis com adição de biocarvão como substituto parcial do cimento Portland em proporções de 0%, 0,65%,

3,2%, 6,5%, 9,5% e 13,5%. A massa específica do concreto permeável feito com biocarvão foi medida em 1310 kg/m³.

4.8 REFLETÂNCIA SOLAR

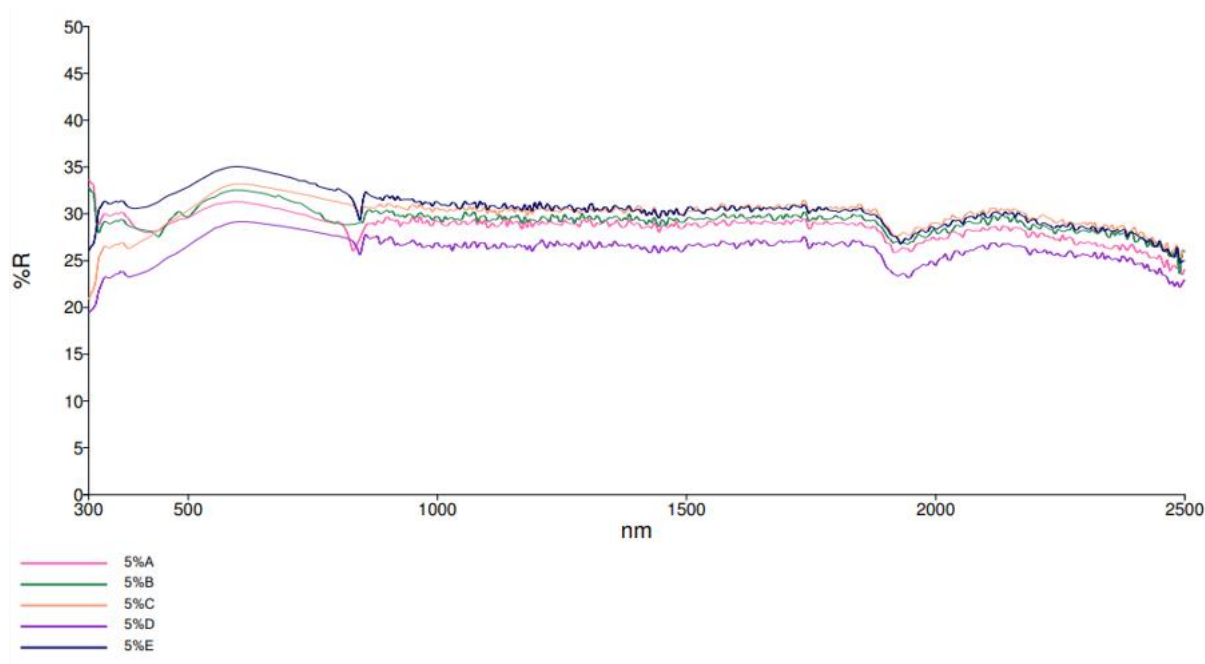
As curvas espectrais de refletância das amostras, para toda a faixa de comprimentos de onda avaliada (300-2500nm) são apresentadas nas Figura 30, Figura 31, Figura 32 Figura 33.

Figura 30 – Curvas espectrais de refletância (0% RPT)



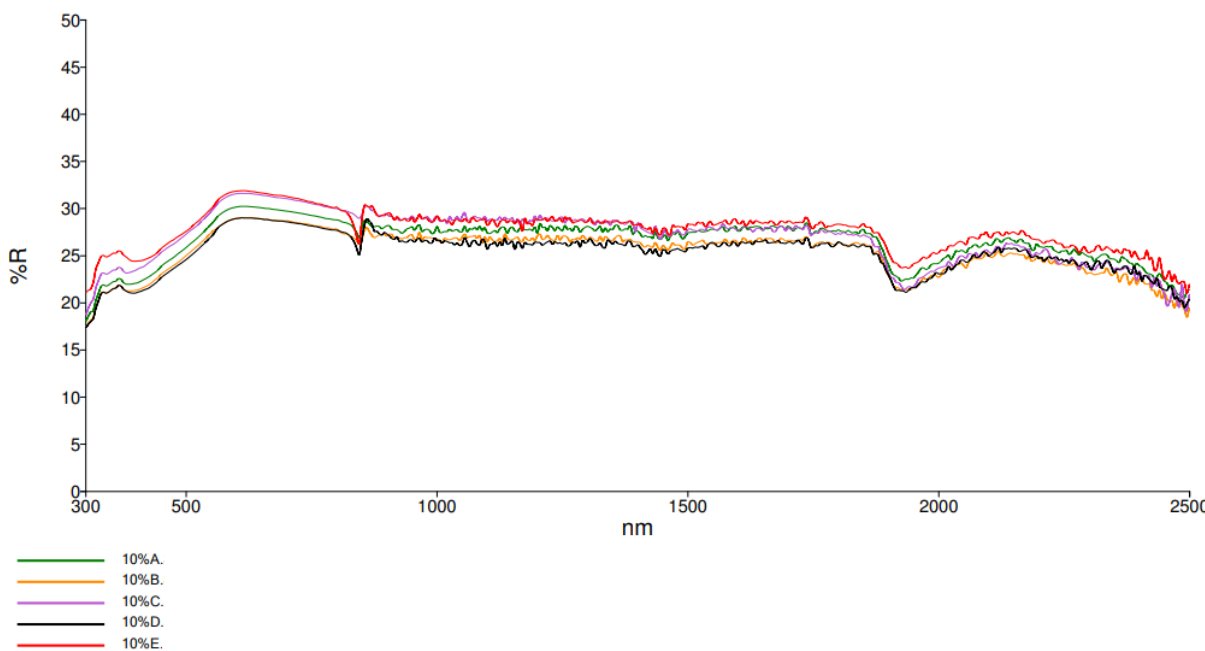
Fonte: Autora (2023)

Figura 31 - Curvas espectrais de refletância (5% RPT)



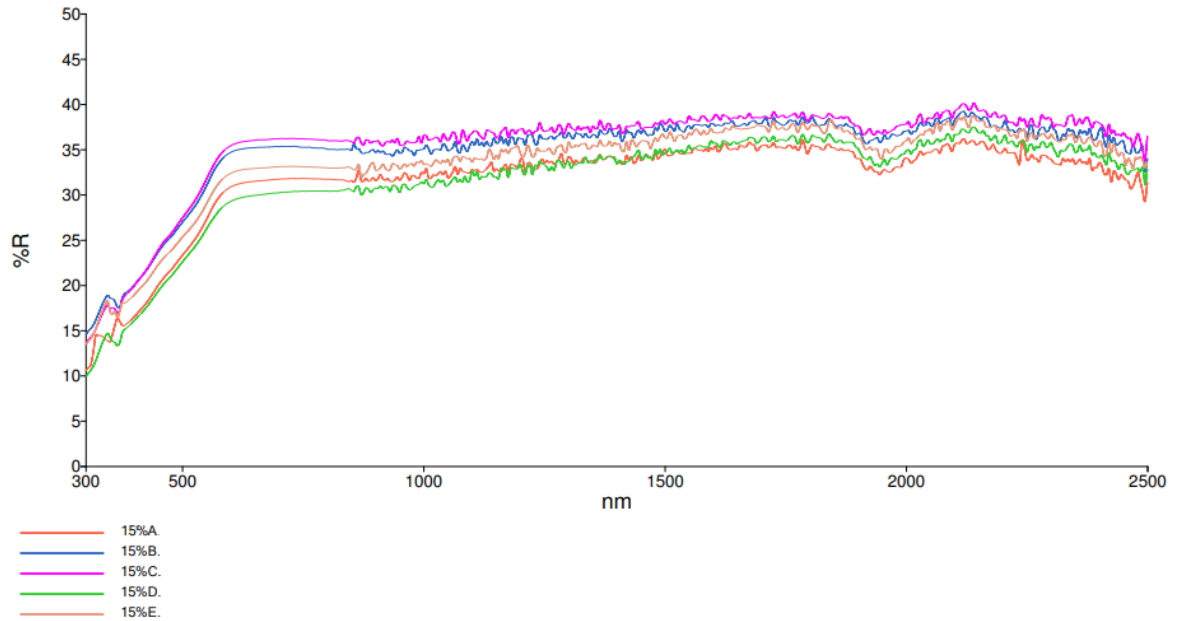
Fonte: Autora (2023)

Figura 32 - Curvas espectrais de refletância (10% RPT)



Fonte: Autora (2023)

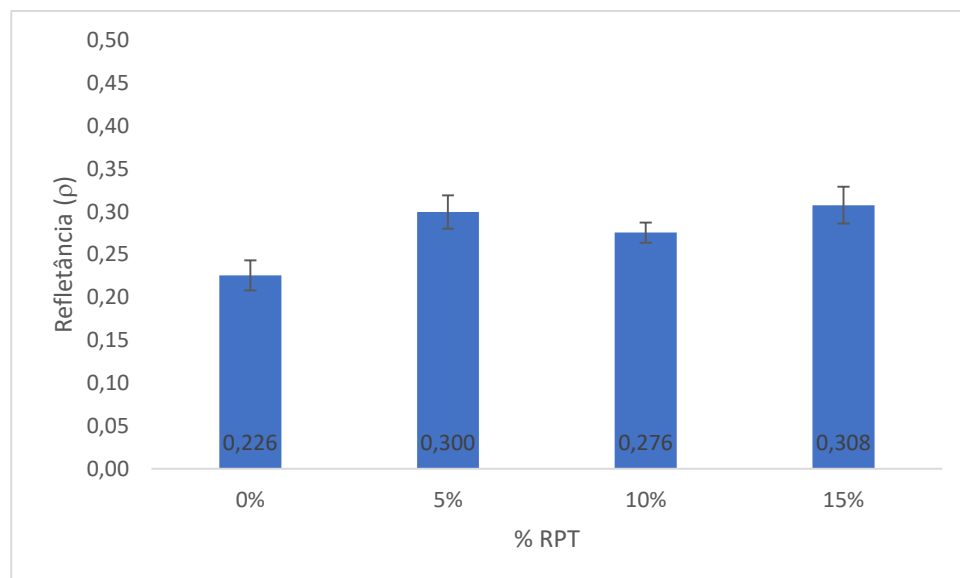
Figura 33 - Curvas espectrais de refletância (15% RPT)



Fonte: Autora (2023)

Através da análise dos gráficos é possível notar que os maiores valores de refletância solar pertencem às amostras com 15% de adição de resíduo, seguida pelas amostras com 5% e 10% de adição e, por fim, as amostras de referência. A Figura 34 apresenta os valores das médias para todas as amostras.

Figura 34 – Refletância solar



Fonte: Autora (2023)

Através da análise dos valores de refletância é possível notar que os maiores valores de refletância solar pertencem às amostras com 15% de adição de resíduo, seguida pelas amostras com 5%, 10% e as amostras de referência, respectivamente. A refletância solar é expressa de forma absoluta variando entre 0 e 1, neste caso, almeja-se valores maiores, ou seja, mais próximos a 1 para que maior parte da energia seja refletida e não absorvida.

O concreto com substituição de 15% de RPT apresentou o melhor resultado, com média de refletância solar de 0,3076, isso representa um aumento de 36,34% em comparação com a referência sem adição de resíduo. O concreto com substituição de 5% de resíduo, que obteve melhores resultados no teste anterior de resistência a tração na flexão, apresentou aumento de 32,80% na refletância solar.

Foram realizadas as análises estatísticas para o ensaio, para análise que verifica a influência do RPT na refletância solar, tem-se as hipóteses:

H_0 : nenhuma média difere (não há influência da adição de RPT na refletância solar do concreto permeável).

H_1 : pelo menos uma média difere (há influência da adição de RPT na refletância solar concreto permeável).

A análise resultou em um p-valor 0,001, como 0,001 é menor que 0,05 rejeita-se a hipótese nula. Sendo assim, pelo menos uma média difere, havendo influência do RPT na refletância solar do concreto permeável. O coeficiente de regressão da análise (R^2) foi de 79,86%.

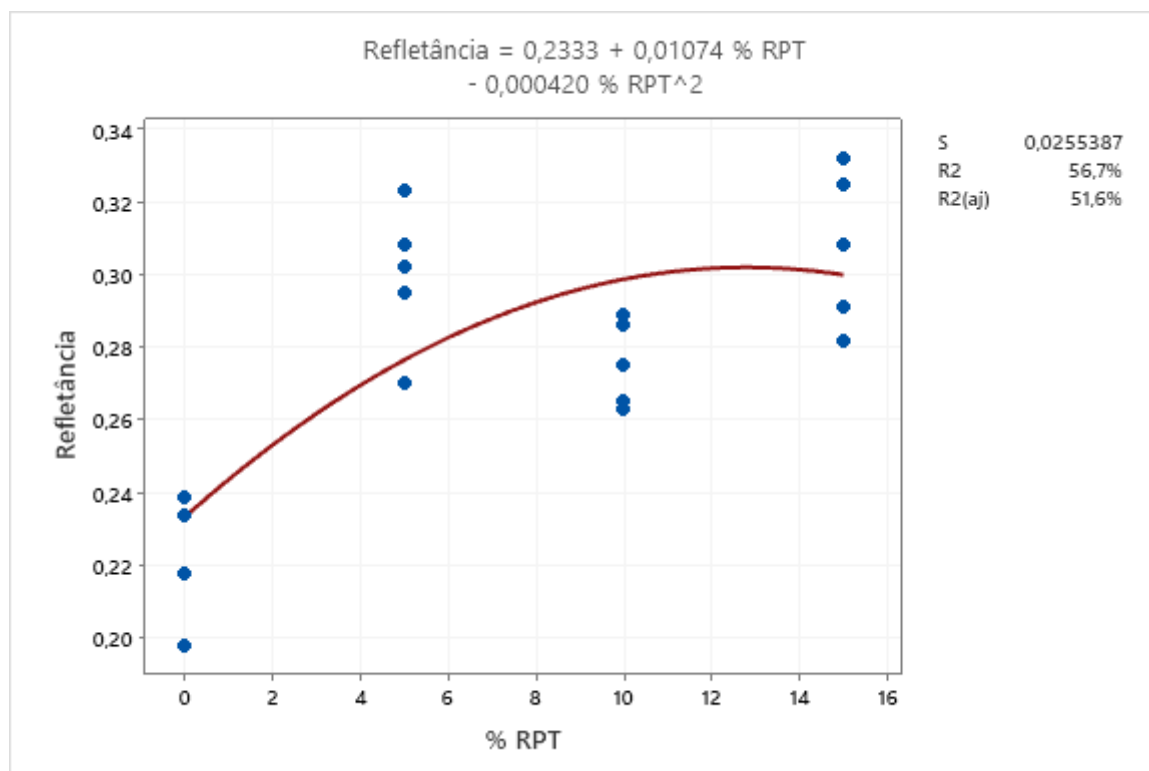
Com a hipótese nula rejeitada, sabe-se que pelo menos uma média difere. Aplicou-se o teste de Dunnett para verificar quais são as médias divergentes. O resultado do teste de Dunnett apontou que a divergências de média acontecem entre a amostra de controle e todas as amostras, com 5, 10 e 15% de resíduo.

Posterior a realização da ANOVA, para verificar a suposição de normalidade dos resíduos, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, caso o p-valor obtido no teste for superior ao valor de alfa (5%), confirma que os resíduos dos dados apresentam normalidade. O p-valor do teste foi de 0,100, como 0,100 é maior do que 0,05 pode-se verificar a suposição de normalidade dos resíduos como verdadeira, portanto, os valores extraídos do teste ANOVA são confiáveis.

Para avaliar a homogeneidade da variância aplicou-se o teste de Levene, obtendo-se p-valor de 0,782, como 0,782 é maior que 0,05 não rejeita-se a hipótese nula, sendo assim, pode-se afirmar que as variâncias não diferem e a suposição de homogeneidade da variância está verificada, o que implica na seguridade de que os dados obtidos pelo teste ANOVA são confiáveis.

A Figura 35 apresenta a análise de regressão entre a refletância solar e a porcentagem de substituição de resíduo. Na imagem, pode-se ver que análise de regressão resultou em uma função quadrática com coeficiente de determinação R^2 de 56,7%.

Figura 35 – Regressão refletância solar x %RPT



Fonte: Autora (2023)

Ao realizar uma análise de regressão entre a porcentagem de substituição de resíduos e a refletância solar, é possível derivar uma equação que representa essa relação. Ao igualar essa equação a zero, obtém-se o ponto de máximo da curva, revelando o teor ideal de resíduo que confere ao concreto estudado a maior refletância solar. Essa abordagem permite determinar a quantidade ideal de resíduo a ser incorporados no concreto, de modo a maximizar sua capacidade de refletir a radiação solar.

Através da análise de regressão, tem-se a equação:

$$R = 0,2333 + 0,01074RPT - 0,001420 RPT^2 \quad (8)$$

Derivando a equação e igualando-a à zero, tem-se:

$$R' = 0,01074 - 0,00184 RPT$$

$$0,01074 - 0,00184 RPT = 0$$

$$RPT_{m\acute{a}x} = 12,78\%$$

$$R_{12,78\%} = 0,302$$

Portanto, considerando apenas a análise de substituição de resíduo visando a melhoria da propriedade de refletância solar, tem-se 12,78% como a porcentagem ideal de RPT para se obter o valor máximo de refletância solar de 0,302.

Na pesquisa de Qin *et al.* (2021), foram confeccionados concretos permeáveis com adição de biocarvão como substituto parcial do cimento Portland em proporções de 0%, 0,65%, 3,2%, 6,5%, 9,5% e 13,5%. A pesquisa concluiu que o concreto com adição de biocarvão possui refletância solar inferior à do concreto de referência. Essa diminuição é explicada pelo fato de que o biocarvão é de cor escura, mais escura que o cimento, o que diminui o albedo da pasta de concreto. Ademais, a amostra de concreto permeável que contém a maior quantidade de biocarvão é a que possui a menor refletância solar.

Na pesquisa de Carpio *et al.* (2016), foram avaliadas a refletância solar de vinte tipos de revestimento de pavimentos utilizados no Brasil em estradas, praças, estacionamentos e calçadas. Dentre as 20 superfícies analisadas, a diferença entre a maior refletância, ou seja, a superfícies mais clara (mosaico português branco) e a mais escura (mistura asfáltica) foi de aproximadamente 48%, e a diferença correspondente na temperatura de superfície medida foi de 18,4 °C. a refletância solar do pavimento de concreto permeável foi de 0,17. A mistura asfáltica convencional apresentou refletância solar de 0,02, já o pavimento de concreto convencional resultou em uma refletância solar de 0,42, inferior apenas ao revestimento de mosaico português.

Segundo Qin *et al.* (2021), quando comparados concreto permeável e concreto convencional, a amostra de concreto permeável apresenta refletância solar de 0,168, que é cerca de 0,20 menor do que o concreto convencional. Essa diminuição é compreendida pelo fato de que os poros do concreto permeável tendem a prender os fótons na superfície e, portanto, absorvem mais fótons do que uma superfície tradicional de concreto denso.

4.9 SUMARIZAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANOVA

A Tabela 8 apresenta os dados da análise da variância para todos os ensaios realizados no estudo.

Tabela 8 – Resultados ANOVA

Propriedade	GL	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	P-valor
RTF	3	58,20	19,399	4,88	0,019
Resistência à compressão	3	6,546	2,18194	23,72	0,001
Porosidade	3	55,97	18,658	13,15	0,001
Permeabilidade	3	3704090106	1234696702	156,24	0,001
Massa específica	3	0,01796	0,005988	7,97	0,002
Refletância solar	3	0,020455	0,006818	21,15	0,001

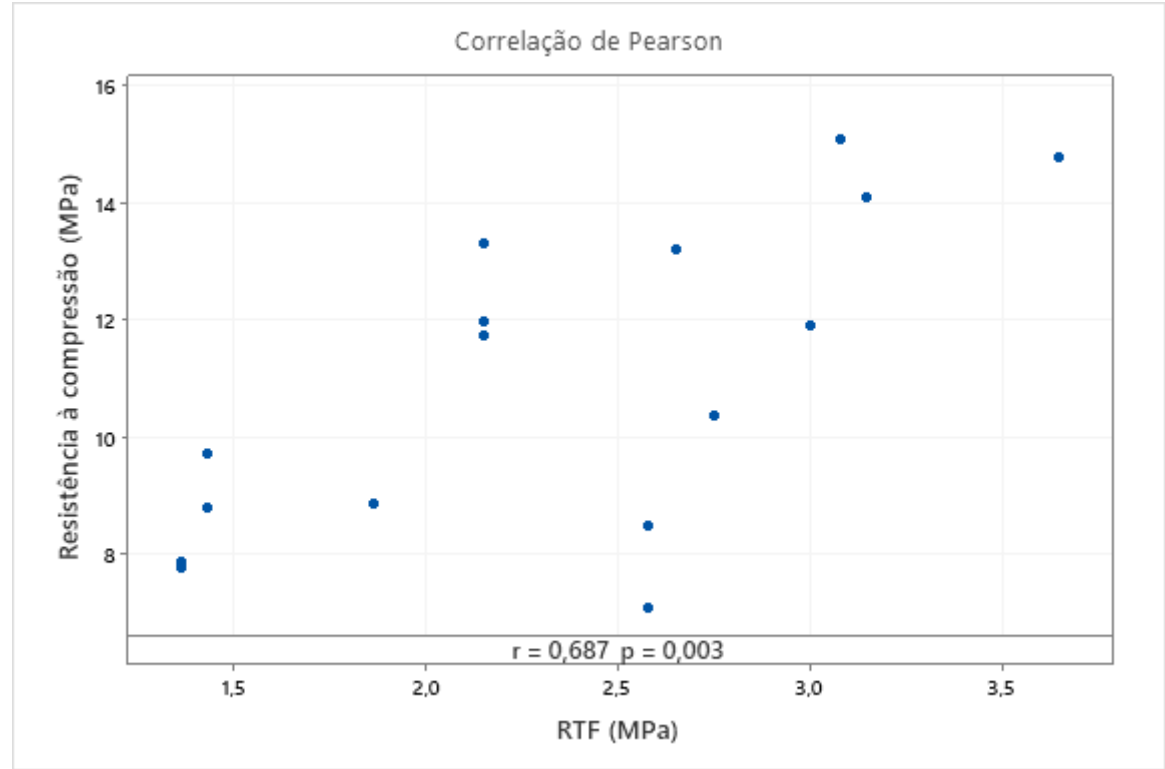
Fonte: Autora (2023)

4.10 CORRELAÇÕES E REGRESSÕES

4.10.1 Resistência à tração na flexão x resistência à compressão

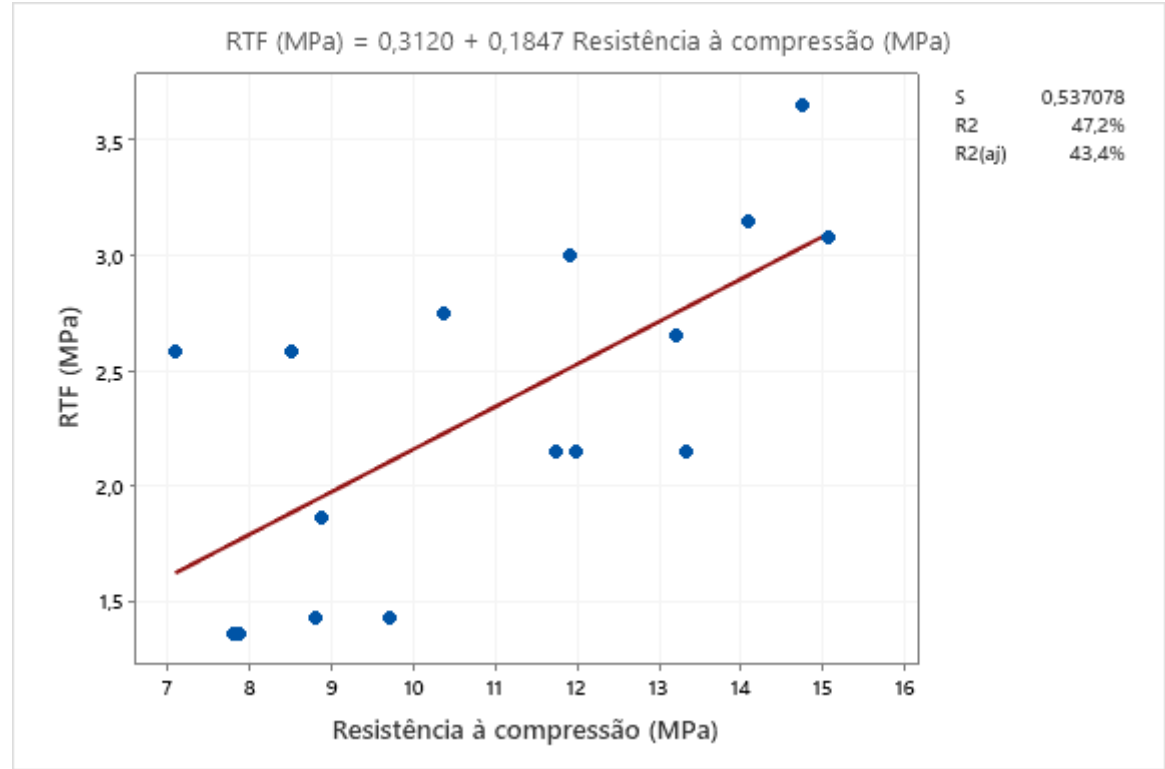
A correlação entre resistência à compressão e resistência à tração na flexão do concreto permeável modificado com resíduo particulado de tijolo pode ser encontrada na Figura 36. Houve uma boa correlação linear entre resistência à compressão e resistência à tração na flexão, o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre elas foi de 0,687, retratando uma correlação linear positiva, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta. A Figura 37 apresenta a regressão linear calculada com o fim de relacionar em forma de equação a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão do concreto permeável. O R^2 é uma medida estatística que representa o quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada, onde 0% indica que o modelo não explica nada da variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média e 100% indica que o modelo explica toda a variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média. O coeficiente de regressão (R^2) obtido para este método foi de 47,2%.

Figura 36 - Correlação de Pearson: resistência à compressão x resistência à tração na flexão



Fonte: Autora (2023)

Figura 37 - Regressão linear: resistência à compressão x resistência à tração na flexão



Fonte: Autora (2023)

No estudo de Li *et al.* (2021), onde o concreto permeável foi preparado substituindo parcialmente o cimento por pó de vidro residual, a relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão foi fortemente positiva, o resultado do ajuste feito por regressão linear (R^2) foi de 0,9576, este valor evidencia alta precisão e boas relações lineares, podendo fornecer uma referência efetiva para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto permeável. A equação resultante desta pesquisa é apresentada na Equação (9).

$$y = 2,1 + 0,18x \quad (9)$$

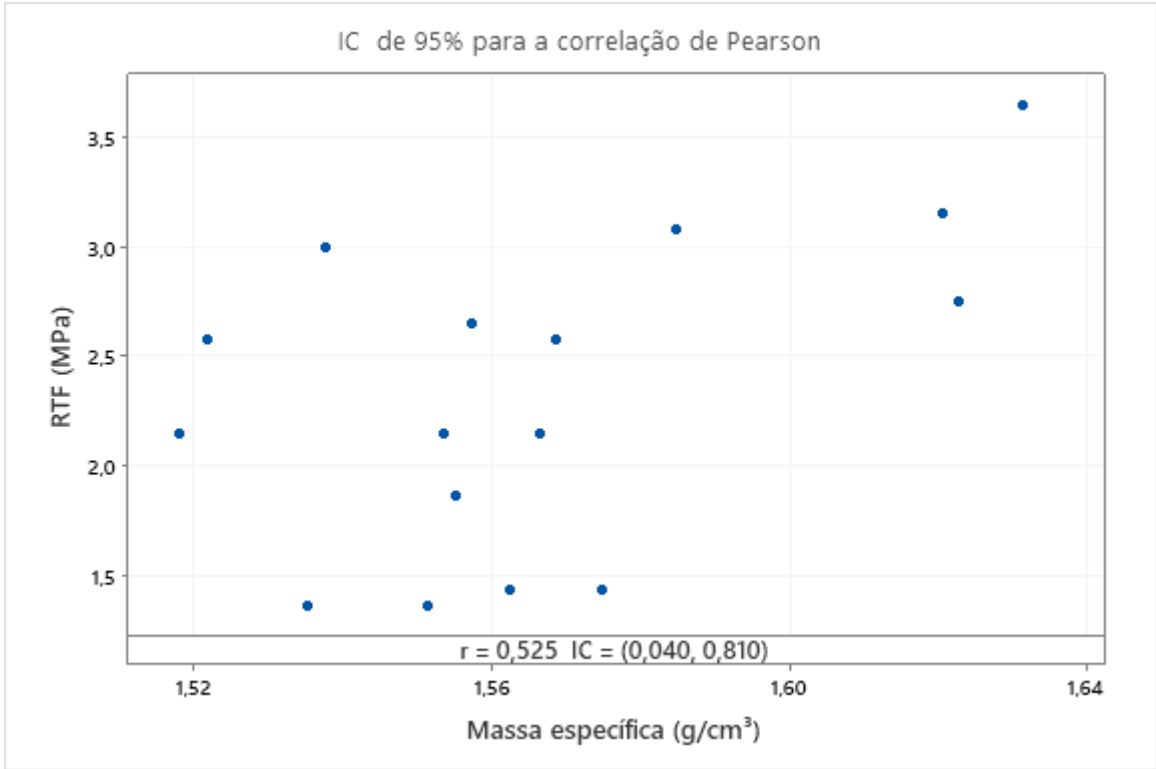
Na pesquisa de Liu *et al.* (2018), que produz concreto permeável com cinza volante como substituto parcial do cimento Portland, a correlação entre as propriedades de resistência à compressão e resistência à tração na flexão é fortemente positiva, e a regressão linear entre elas obteve um R^2 de 0,93. A equação obtida da análise é apresentada na Equação (10).

$$y = 5,02x - 2,01 \quad (10)$$

4.10.2 Resistência à tração na flexão x massa específica

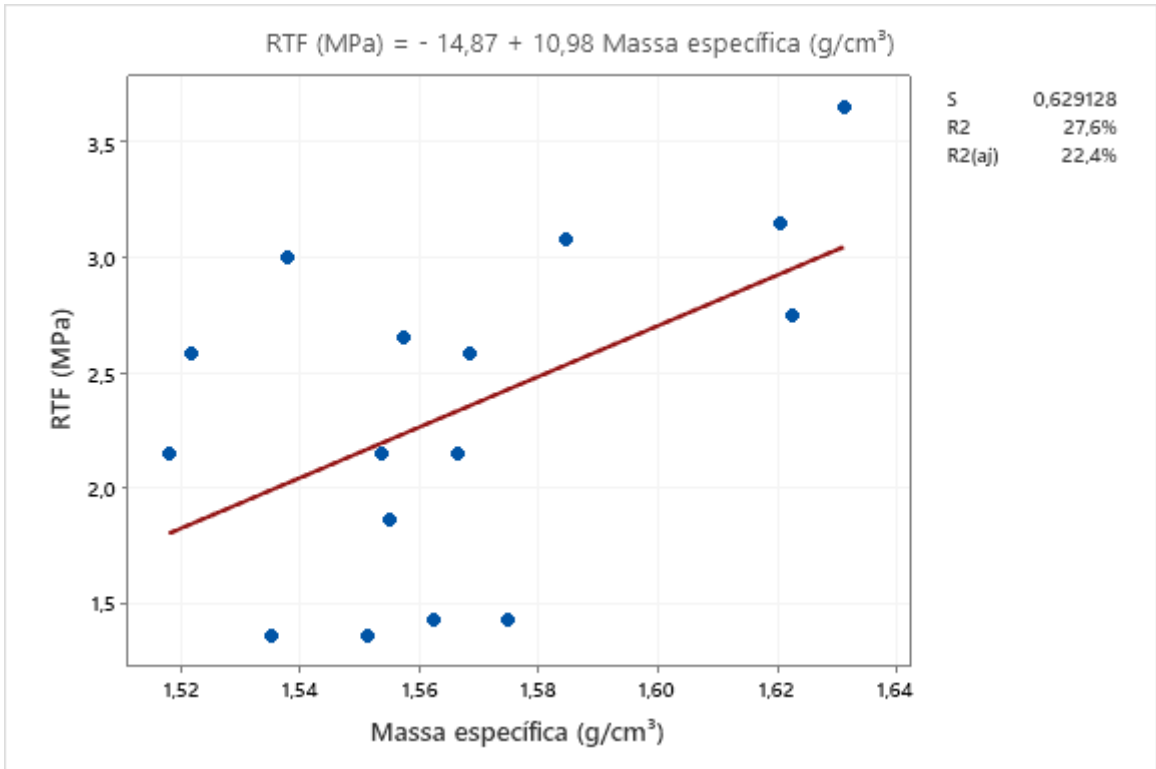
A correlação entre resistência à tração na flexão e a massa específica do concreto permeável modificado com resíduo particulado de tijolo pode ser encontrada na Figura 38. Como esperado, houve uma boa correlação linear entre resistência à tração na flexão e massa específica, o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre elas foi de 0,525, retratando uma correlação linear positiva, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta, visto que quanto maior a massa específica, menos vazios o material tende a ter, aumentando a sua resistência mecânica. A Figura 39 apresenta a regressão linear calculada com o fim de relacionar em forma de equação a resistência à tração na flexão e a massa específica do concreto permeável. O coeficiente de regressão (R^2) obtido para este método foi de 27,6%.

Figura 38 - Correlação de Pearson: resistência à tração na flexão x massa específica



Fonte: Autora (2023)

Figura 39 - Regressão linear: resistência à tração na flexão x massa específica

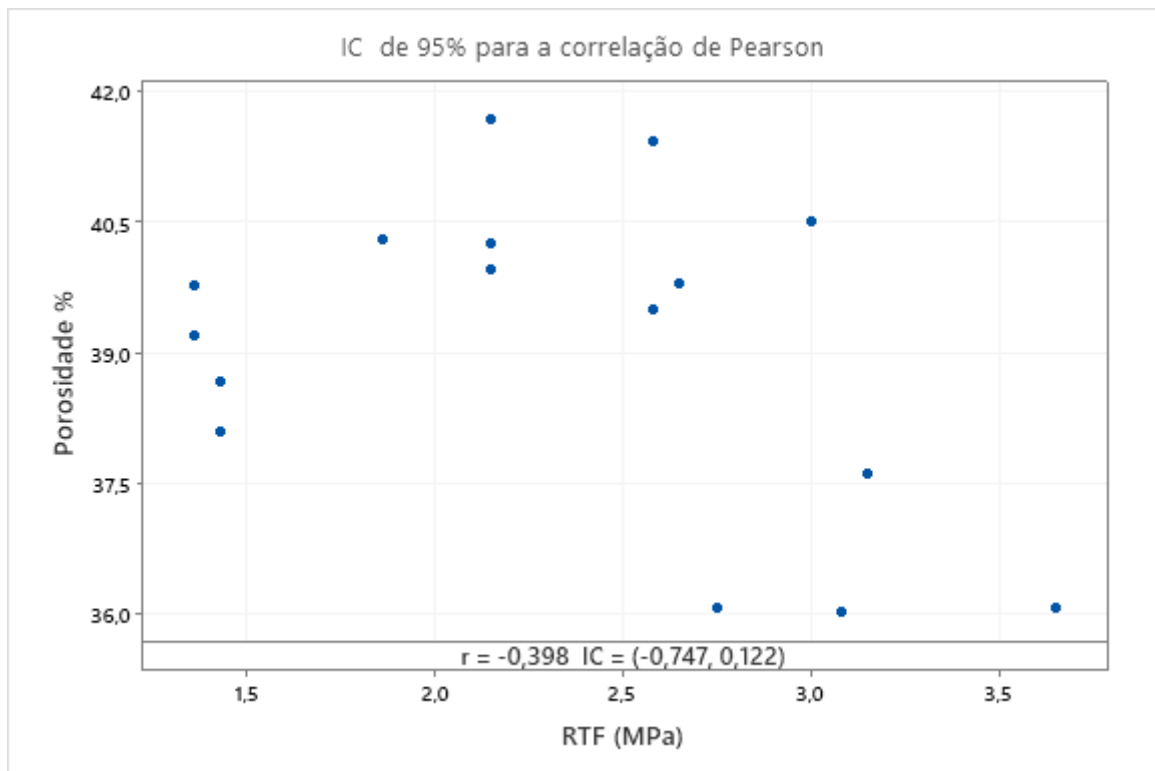


Fonte: Autora (2023)

4.10.3 Resistência à tração na flexão x porosidade

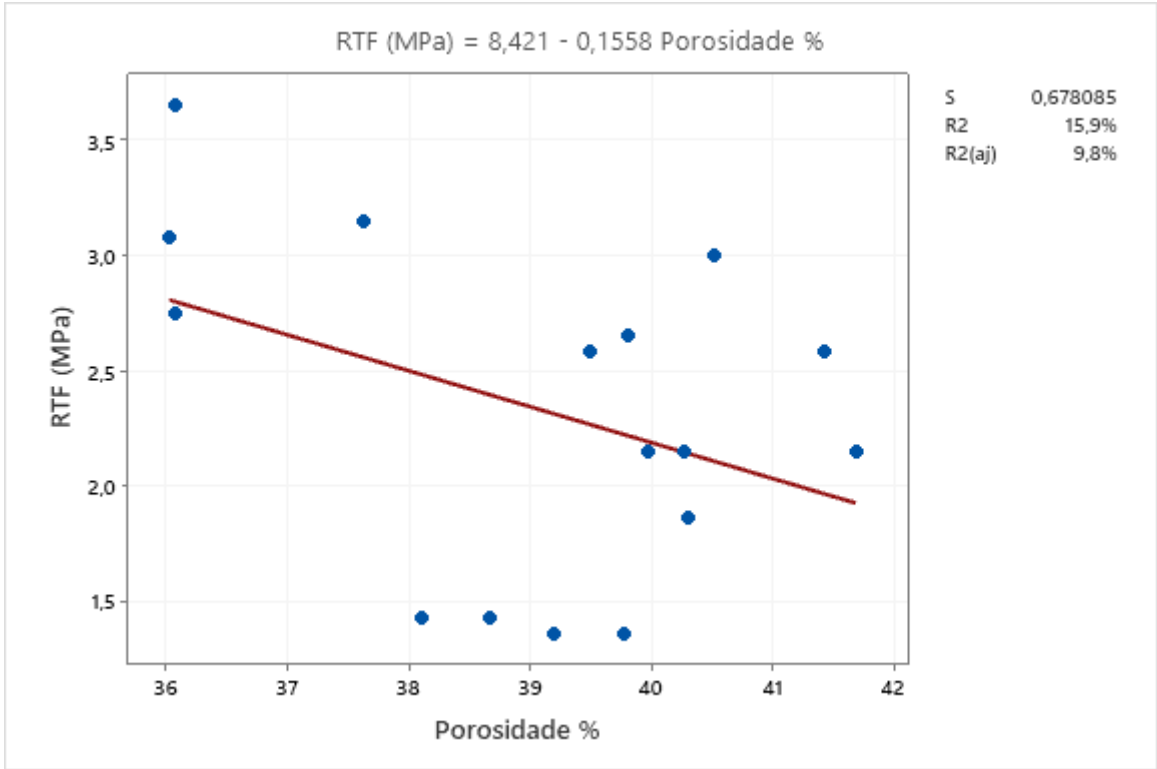
A correlação entre resistência à tração na flexão e a porosidade do concreto permeável modificado com resíduo particulado de tijolo pode ser encontrada na Figura 40. O coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as propriedades foi de -0,398, retratando uma correlação negativa e que se apresenta não linear como vê-se pelo gráfico. A Figura 41 apresenta a regressão linear calculada com o fim de relacionar em forma de equação a resistência à tração na flexão e a porosidade do concreto permeável. O coeficiente de regressão (R^2) obtido para este método foi de 15,9%.

Figura 40 - Correlação de Pearson: resistência à tração na flexão x porosidade



Fonte: Autora (2023)

Figura 41 - Regressão linear: resistência à tração na flexão x porosidade

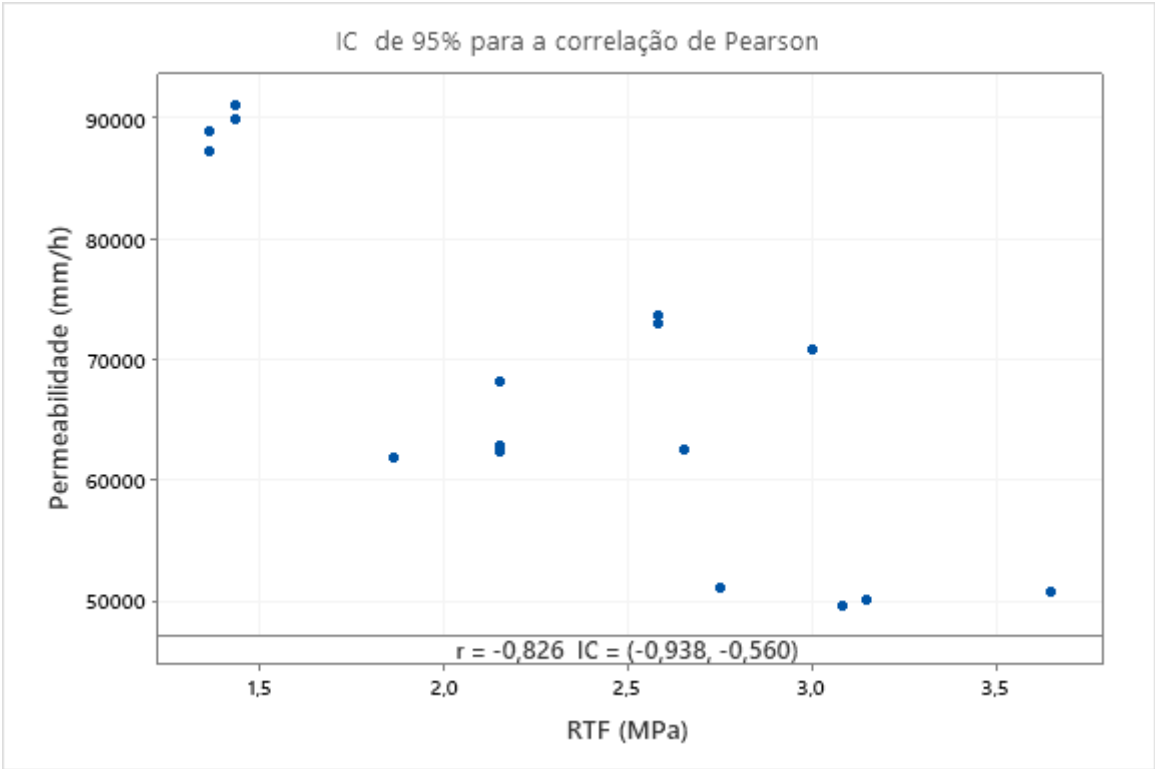


Fonte: Autora (2023)

4.10.4 Resistência à tração na flexão x permeabilidade

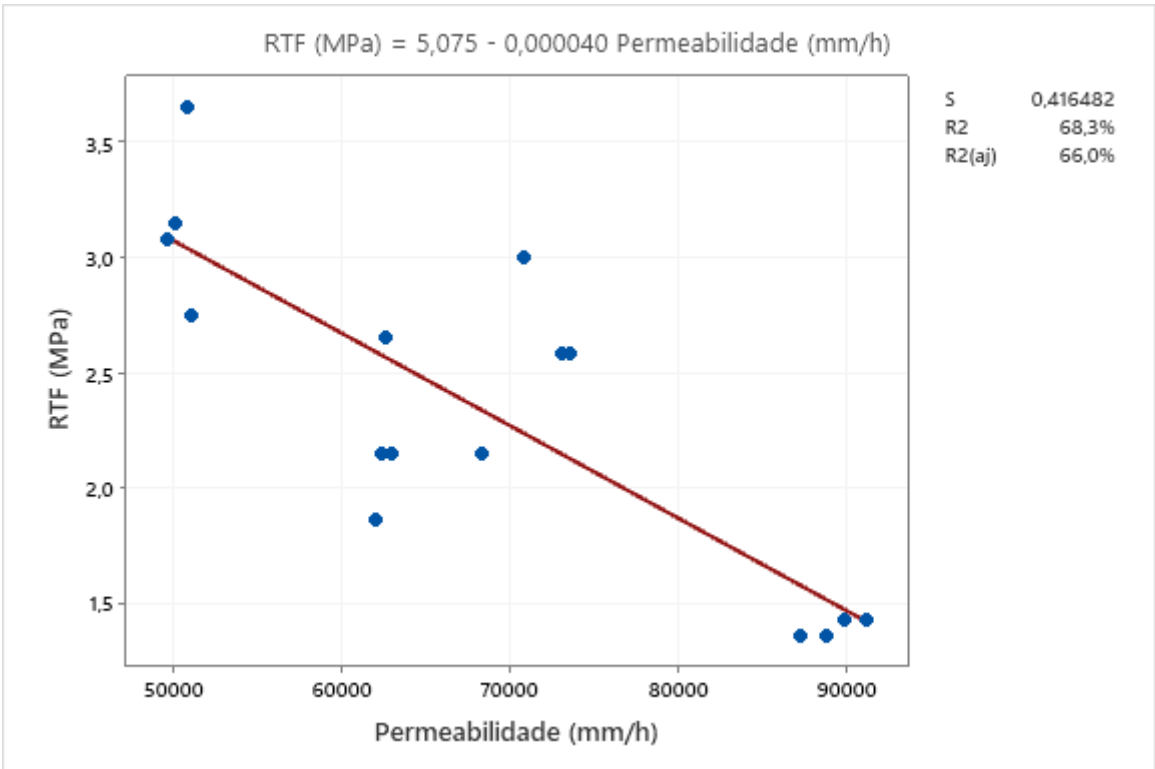
A correlação entre resistência à tração na flexão e a permeabilidade do concreto permeável modificado com resíduo particulado de tijolo pode ser encontrada na Figura 42. O coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as propriedades foi de -0,826, retratando uma forte correlação linear negativa, ou seja, quando uma variável diminui, a outra aumenta. Quanto mais permeável o material, menor resistência mecânica ele possui. A Figura 43 apresenta a regressão linear calculada com o fim de relacionar em forma de equação a resistência à tração na flexão e a permeabilidade do concreto permeável. O coeficiente de regressão (R²) obtido para este método foi de 68,3%.

Figura 42 - Correlação de Pearson: resistência à tração na flexão x permeabilidade



Fonte: Autora (2023)

Figura 43 - Regressão linear: resistência à tração na flexão x porosidade

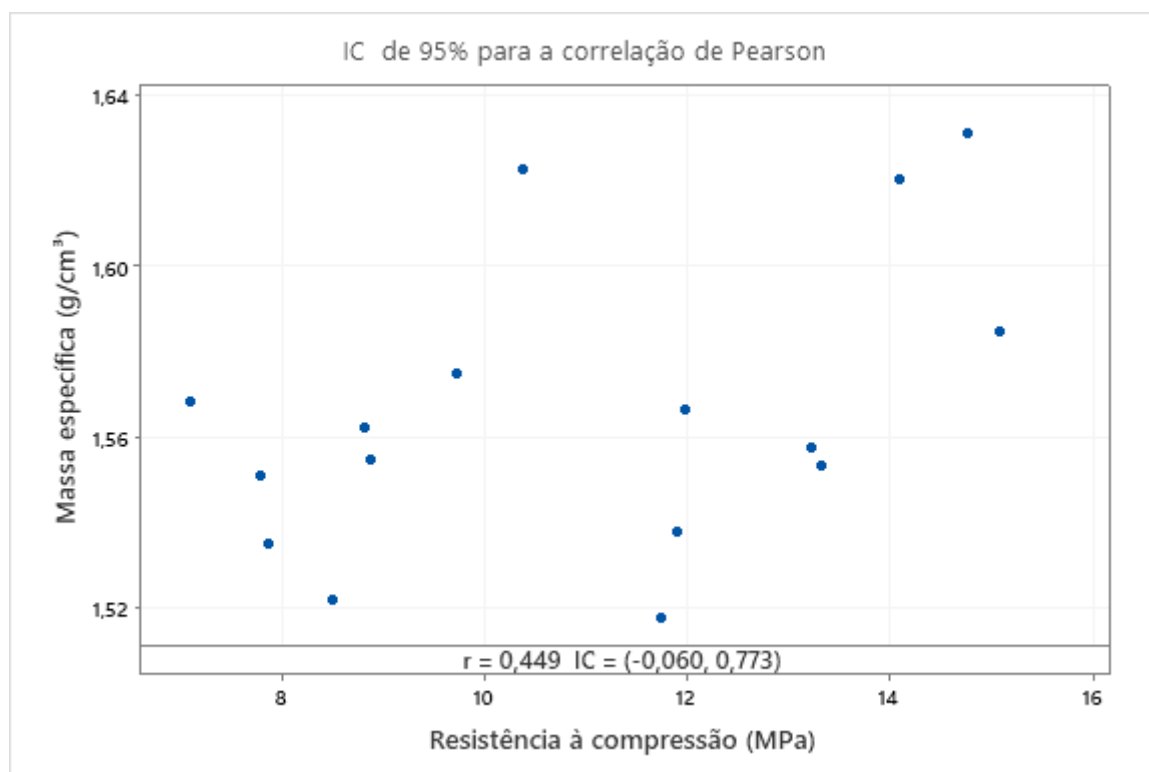


Fonte: Autora (2023)

4.10.5 Resistência à compressão x massa específica

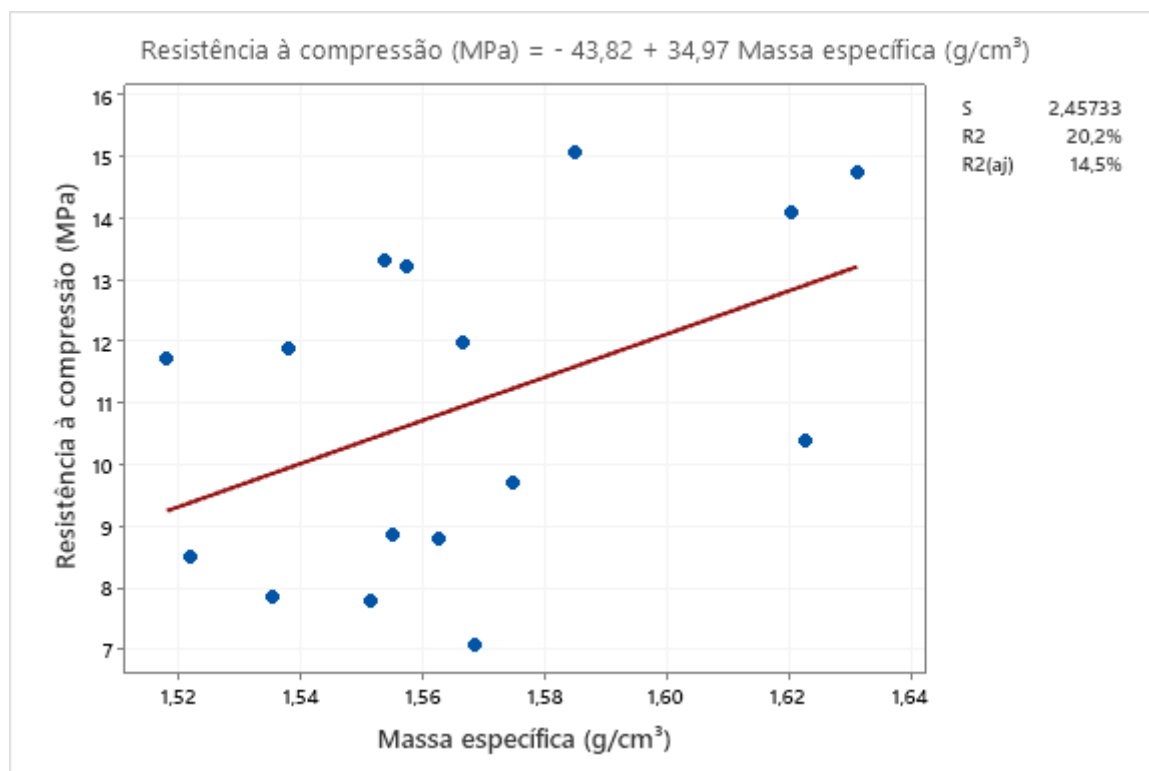
A correlação entre resistência à compressão e a massa específica do concreto permeável modificado com resíduo particulado de tijolo pode ser encontrada na Figura 44. O coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as propriedades foi de 0,449, retratando uma média correlação linear positiva, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta. A Figura 45 apresenta a regressão linear calculada com o fim de relacionar em forma de equação a resistência à compressão e a massa específica do concreto permeável. O coeficiente de regressão (R^2) obtido para este método foi de 20,2%.

Figura 44 - Correlação de Pearson: resistência à compressão x massa específica



Fonte: Autora (2023)

Figura 45 - Regressão linear: resistência à compressão x massa específica

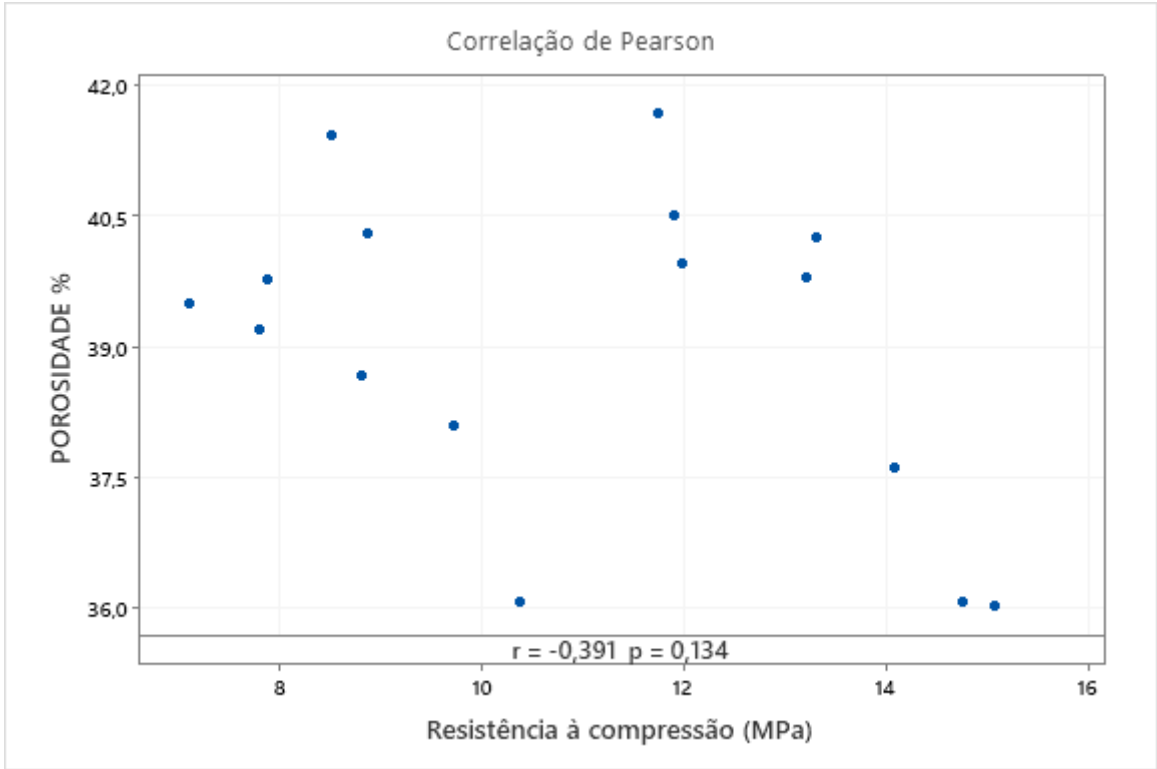


Fonte: Autora (2023)

4.10.6 Resistência à compressão x porosidade

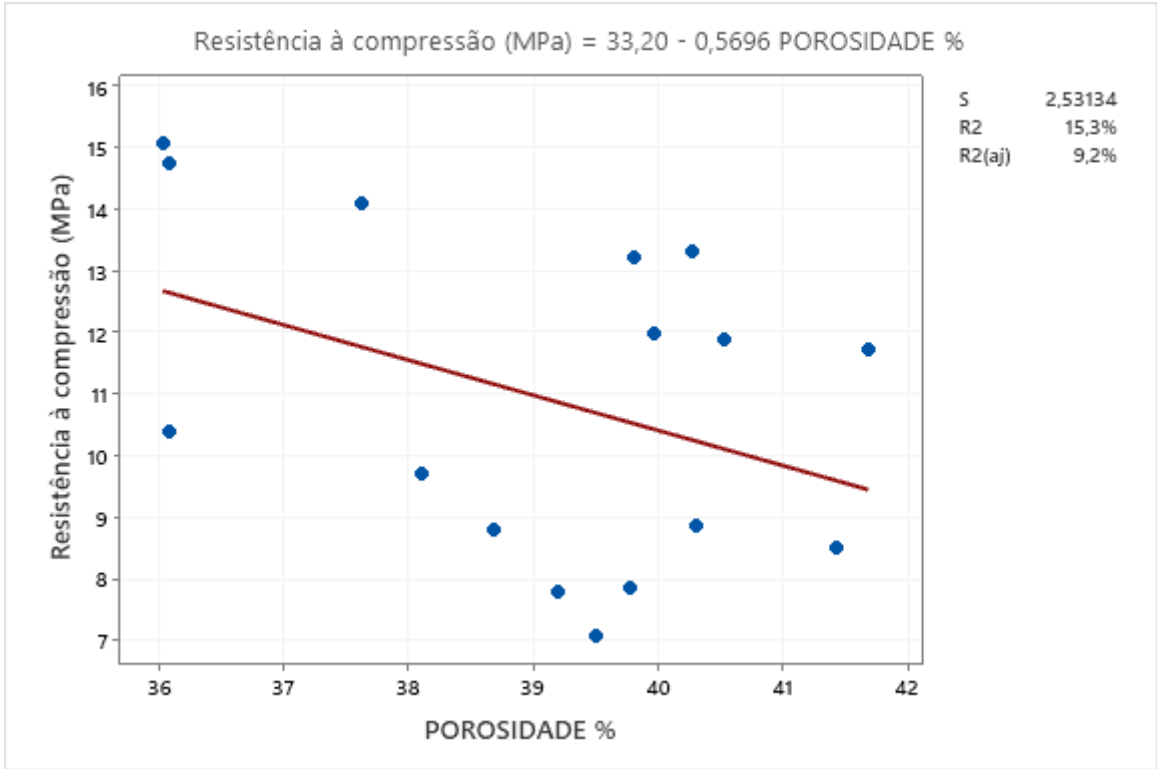
A correlação entre resistência à compressão e a porosidade do concreto permeável modificado com resíduo particulado de tijolo pode ser encontrada na Figura 46. O coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as propriedades foi de -0,391, retratando uma correlação linear negativa, ou seja, quando uma variável diminui, a outra aumenta. Quanto mais poroso o material, menor resistência mecânica ele possui. A Figura 47 apresenta a regressão linear calculada com o fim de relacionar em forma de equação a resistência à compressão e a porosidade do concreto permeável. O coeficiente de regressão (R^2) obtido para este método foi de 68,3%.

Figura 46 - Correlação de Pearson: resistência à compressão x porosidade



Fonte: Autora (2023)

Figura 47 - Regressão linear: resistência à compressão x porosidade



Fonte: Autora (2023)

Na pesquisa de Zeng *et al.* (2022), foi proposta uma reciclagem total dos resíduos de construção para produção de concreto permeável. O pó de tijolo moído foi ativado por ativadores alcalinos em diferentes proporções (Al+Si). Os resíduos sólidos e o pó de tijolo reciclado ativado por álcali foram usados como agregado e material de ligação, respectivamente, para alcançar a reciclagem total dos resíduos. A análise mostrou que o coeficiente de permeabilidade à água diminuiu quase linearmente com o aumento da resistência à compressão para todas as misturas de concreto. Esses resultados evidenciaram os papéis opostos dos poros na permeabilidade e na resistência do concreto permeável. A correlação entre as duas propriedades foi de 0,96.

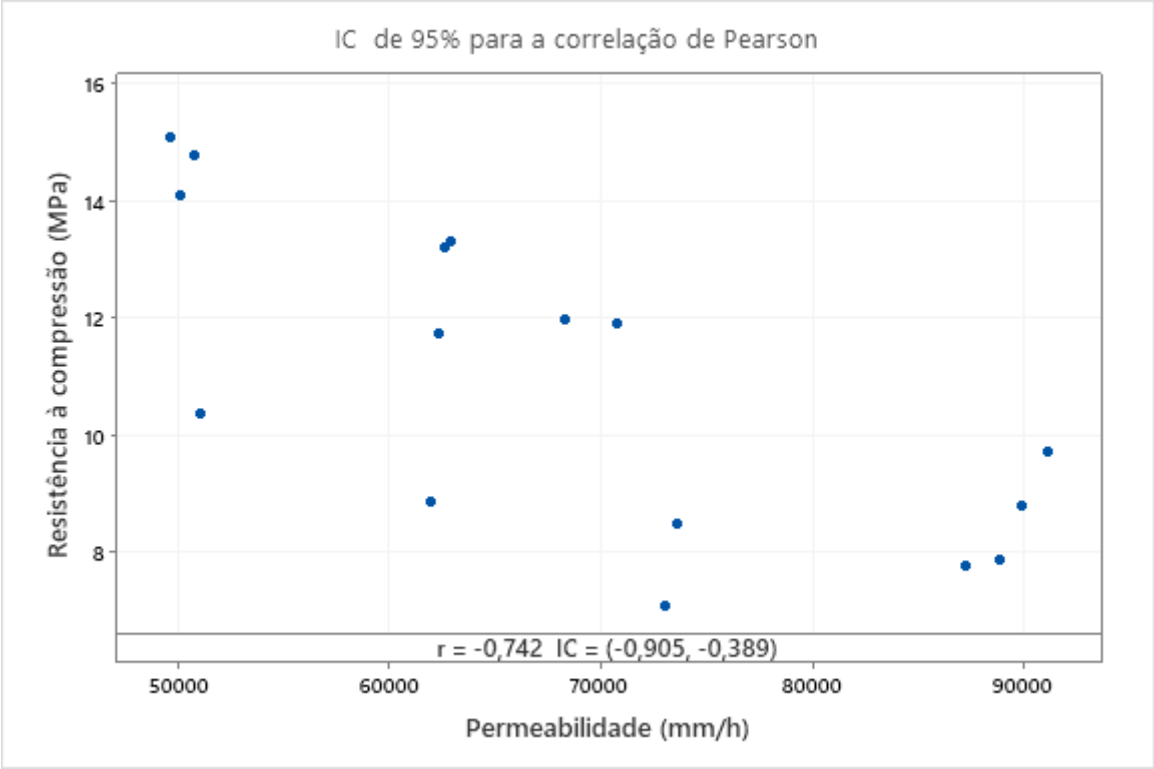
No estudo de Li *et al.* (2021), onde o concreto permeável foi preparado substituindo parcialmente o cimento por pó de vidro residual, a relação entre a resistência à compressão e a porosidade foi fortemente negativa, por meio de análises de regressão dos dados experimentais, foram obtidas duas curvas de relação de ajuste (R^2) de 0,9742. Observou-se que a resistência à compressão diminuiu com o aumento da porosidade, evidenciando que a porosidade tem um impacto negativo na resistência das misturas de concreto permeável. A equação resultante desta pesquisa é apresentada através da Equação (11).

$$y = 34,88 - 0,99x \quad (11)$$

4.10.7 Resistência à compressão x permeabilidade

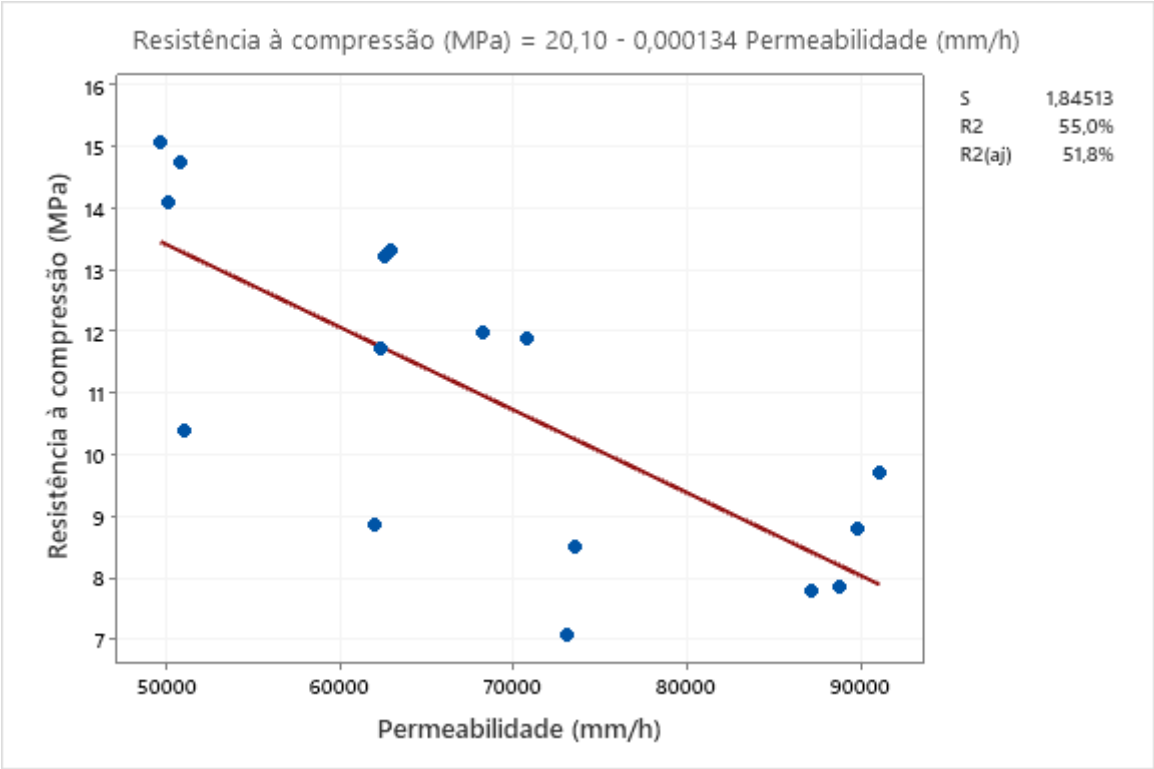
A correlação entre resistência à compressão e a permeabilidade do concreto permeável modificado com resíduo particulado de tijolo pode ser encontrada na Figura 48. O coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as propriedades foi de -0,742, retratando uma forte correlação linear negativa, ou seja, quando uma variável diminui, a outra aumenta. Quanto mais permeável o material, menor resistência mecânica ele possui. A Figura 49 apresenta a regressão linear calculada com o fim de relacionar em forma de equação a resistência à compressão e a permeabilidade do concreto permeável. O coeficiente de regressão (R^2) obtido para este método foi de 55%.

Figura 48 - Correlação de Pearson: resistência à compressão x permeabilidade



Fonte: Autora (2023)

Figura 49 - Regressão linear: resistência à compressão x permeabilidade



Fonte: Autora (2023)

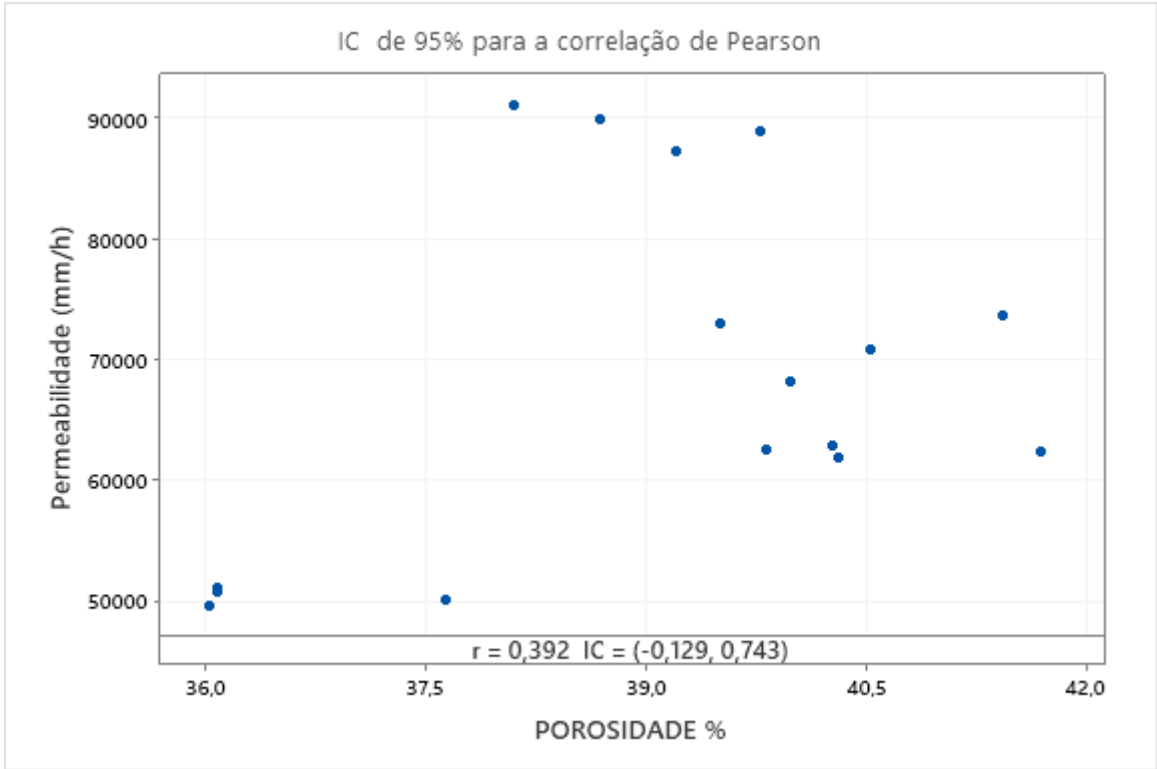
Na pesquisa de Hwang e cortés (2021), a permeabilidade do concreto permeável feito com pó de vidro e cinza volante como substituto parcial do cimento Portland, uma correlação inversa também é mostrada entre a permeabilidade e a resistência à compressão. Além disso, o coeficiente de correlação de Pearson (r) foi calculado como -0,620, indicativo de uma correlação inversa entre duas propriedades.

No estudo de Li *et al.* (2021), onde o concreto permeável foi preparado substituindo parcialmente o cimento por pó de vidro residual, a relação entre a resistência à compressão e a permeabilidade foi expressa em equação quadrática com ajuste (R^2) de 0,9449.

4.10.8 Porosidade x permeabilidade

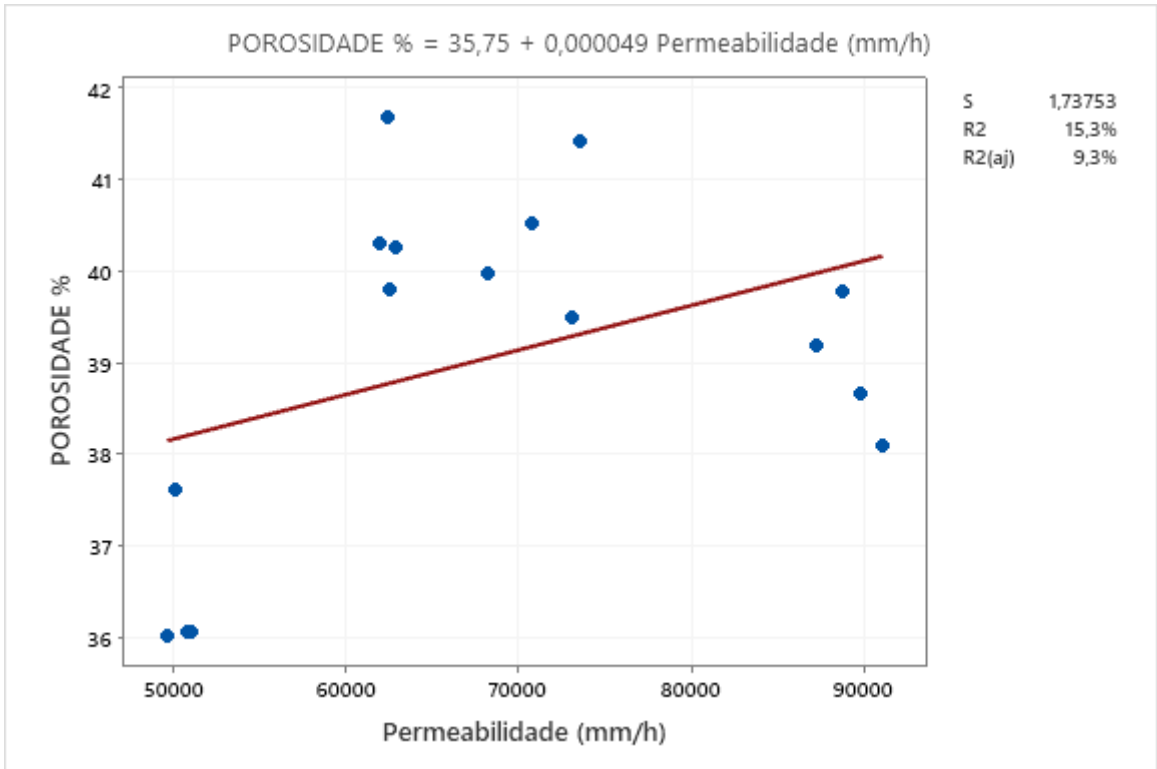
A correlação entre a porosidade e a permeabilidade do concreto permeável modificado com resíduo particulado de tijolo pode ser encontrada na Figura 50. O coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as propriedades foi de 0,392, retratando uma correlação positiva e que se apresenta não linear como vê-se pelo gráfico. A Figura 51 apresenta a regressão linear calculada com o fim de relacionar em forma de equação a porosidade e a permeabilidade do concreto permeável. O coeficiente de regressão (R^2) obtido para este método foi de 15,3%.

Figura 50 - Correlação de Pearson: porosidade x permeabilidade



Fonte: Autora (2023)

Figura 51 - Regressão linear: porosidade x permeabilidade



Fonte: Autora (2023)

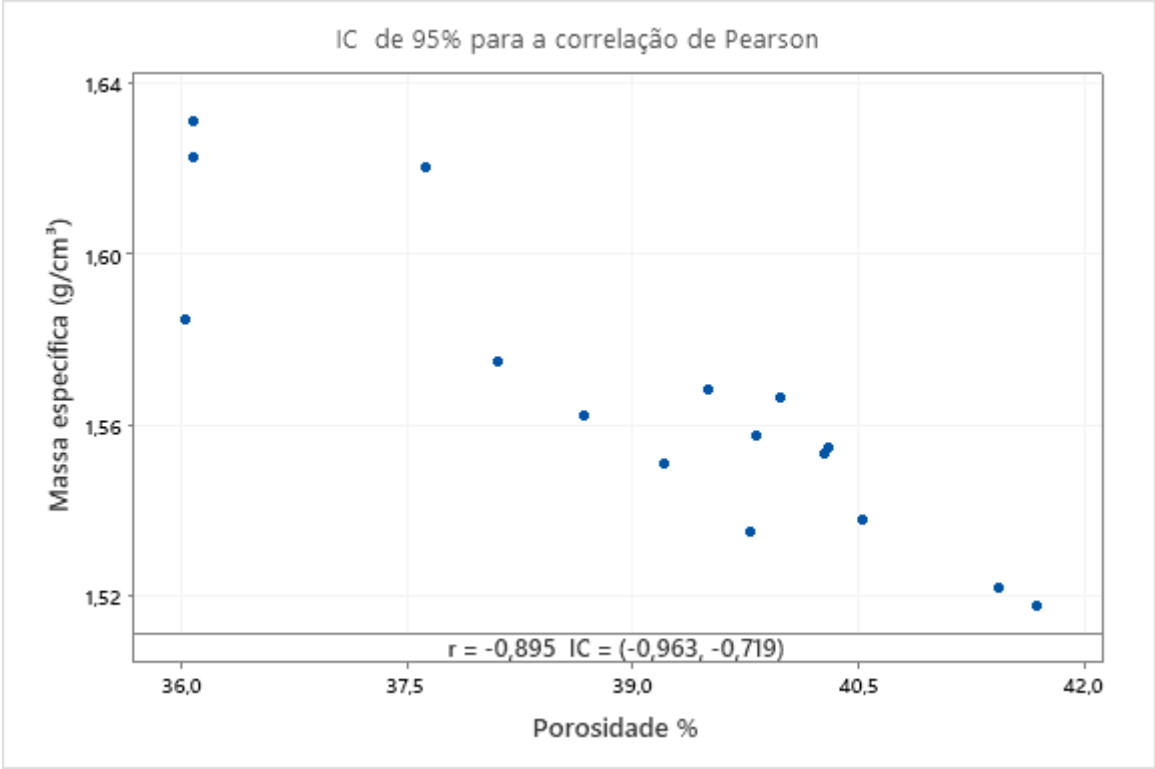
Na pesquisa de Qin *et al.* (2021), foram confeccionados concretos permeáveis com adição de biocarvão como substituto parcial do cimento Portland em proporções de 0%, 0,65%, 3,2%, 6,5%, 9,5% e 13,5%. Segundo o autor, a permeabilidade do concreto permeável é controlada principalmente pela porosidade, a permeabilidade da amostra aumenta linearmente com a porosidade. A regressão linear que correlaciona as duas variáveis na pesquisa resultou em um R^2 de 0,73. A equação é apresentada a seguir.

$$y = 3,3 + 0,059x \quad (12)$$

4.10.9 Porosidade x massa específica

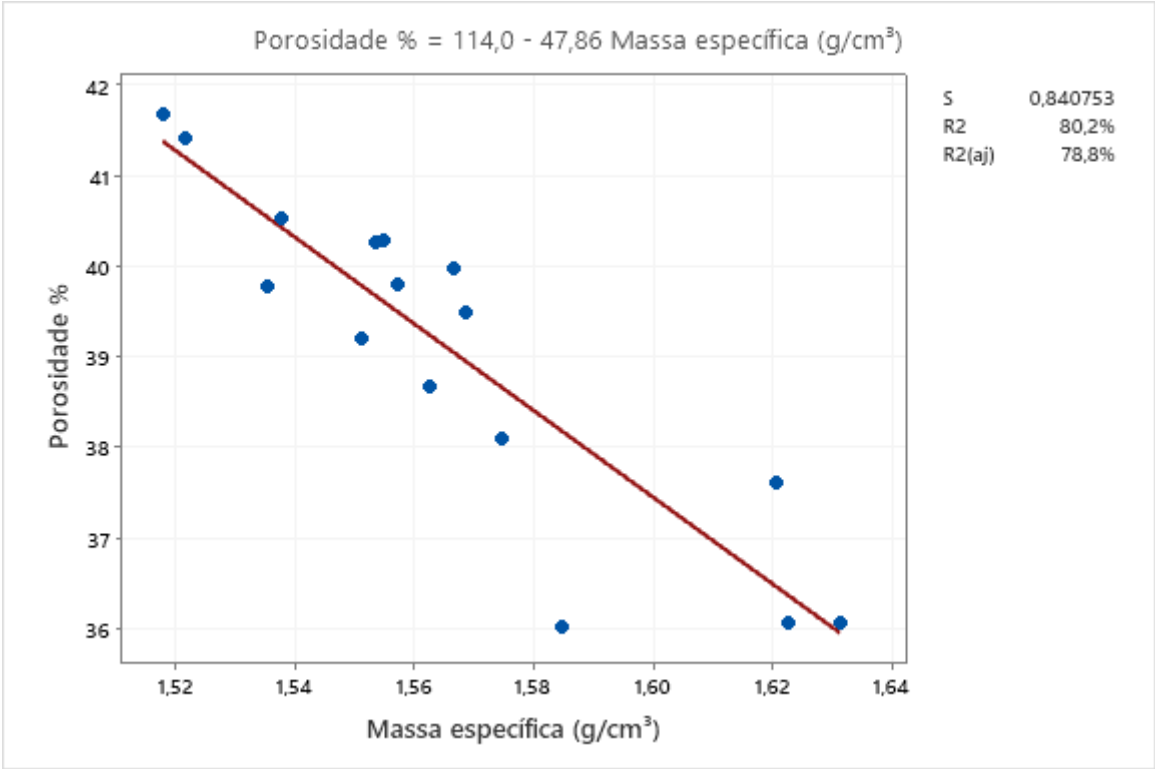
A correlação entre porosidade e massa específica do concreto permeável modificado com resíduo particulado de tijolo pode ser encontrada na Figura 52. O coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as propriedades foi de -0,895, retratando uma forte correlação linear negativa, ou seja, quando uma variável diminui, a outra aumenta. Quanto maior a massa específica do material, menor a sua porosidade. A Figura 53 apresenta a regressão linear calculada com o fim de relacionar em forma de equação a porosidade e a massa específica do concreto permeável. O coeficiente de regressão (R^2) obtido para este método foi de 80,2%.

Figura 52 - Correlação de Pearson: porosidade x massa específica



Fonte: Autora (2023)

Figura 53 - Regressão linear: porosidade x massa específica



Fonte: Autora (2023)

4.11 CÁLCULO DE REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO₂

Sabe-se, através do traço do concreto permeável, as quantidades de cimento necessárias para produzir 1m³ de material, com as devidas porcentagens de substituição de resíduo, calcula-se a redução de emissão de dióxido de carbono para cada proporção de substituição de resíduo proposta na pesquisa. Os cálculos foram realizados considerando a emissão de 900 Kg de CO₂ para cada tonelada de cimento produzida, conforme bibliografia citada. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Redução de emissão de CO₂

Produção de 1m³ de concreto permeável			
% RPT	Quantidade de cimento (Kg)	Emissão de CO ₂ (Kg)	Redução de emissão CO ₂ (Kg)
0	478,56	449,85	0
5	454,62	427,34	22,50
7,5	442,66	416,10	33,75
10	430,70	404,86	44,99

Fonte: Autora (2023)

Com a aplicação de 5% de RPT como substituto parcial do cimento, deixa-se de emitir na atmosfera 22,5 Kg de CO₂ por metro cúbico de concreto produzido. Aplicando 7,5% de resíduo, esse valor sobe para 33,75 Kg de CO₂ por metro cúbico de concreto produzido, e para aplicação de 10% de substituição, 44,99 Kg.

A redução das emissões de CO₂ na produção de cimento é um objetivo importante para mitigar o impacto ambiental desse setor da indústria, e o uso de materiais alternativos como substituto parcial do cimento é uma das estratégias para atingir esta meta, tanto por reduzir as emissões de CO₂, bem como aproveitar resíduos que seriam descartados. Com estes dados, é possível afirmar que o concreto desenvolvido neste trabalho contribui para auxiliar o desenvolvimento sustentável e estudos de redução do impacto ambiental.

5 CONCLUSÕES

Diante da necessidade de desenvolvimento de novos materiais sustentáveis, o impacto da geração de resíduos destinados à aterros sanitários e da preocupação atrelada ao aquecimento e inundação das cidades, esta pesquisa propôs aliar estudos referentes à emissão de poluentes, valorização de resíduos, permeabilidade dos centros urbanos e mitigação de ilhas de calor ao tornar funcional um resíduo que seria descartado, incorporá-lo no concreto como aglutinante, reduzindo assim o consumo de cimento e ainda implementando-o em pavimentos de concreto permeável, afim de mitigar inundações e ilhas de calor, sendo capaz de produzir concretos permeáveis mais sustentáveis.

Considerando os resultados obtidos, conclui-se que a utilização de RPT como substituto parcial do cimento Portland possui potencial para utilização em revestimento de pavimentos de concreto permeável. Ressalta-se que as propriedades mecânicas normatizadas atingiram com êxito as exigências mínimas de desempenho.

O resíduo particulado de tijolo teve influência significativa na resistência à tração na flexão do concreto permeável. Estatisticamente, são consideráveis as diferenças de resistência entre o concreto de referência e o concreto com 5% de substituição de resíduo, melhor resultado do estudo. Para o concreto com substituição de 7,5% de resíduo, do ponto de vista estatístico, os resultados não foram significativamente diferentes do concreto de referência, apresentado cerca de 14% de redução de resistência, entretanto, manteve a exigência da norma em atingir resistência superior a 2 MPa, estando, portanto, apto a ser utilizado para vias de tráfego leve. Sendo assim, apesar de haver redução na resistência quando comparado à referência, segue-se com um resultado positivo, visto que, estatisticamente o concreto com 7,5% de adição de resíduo se manteve com as mesmas características mecânicas que o concreto com utilização de 100% de cimento na composição. O teor ideal de resíduo para a resistência à tração na flexão, obtido através da derivação da curva de regressão, indicou ponto de resistência máximo quando a porcentagem de resíduo é de 3,44%.

Para o estudo de resistência à compressão, conclui-se que a adição de resíduo particulado de tijolo estatisticamente não teve influência significativa na resistência à compressão do concreto permeável. Apesar desta conclusão estatística, vê-se o resultado ainda como positivo, visto que, mesmo retirando 5% e 7,5% de cimento e substituindo-o por resíduo, ainda consegue-se atingir valores de resistência superiores ao concreto confeccionado apenas com o uso de cimento. O concreto com substituição de 5% de resíduo foi o que apresentou melhor resultado. O teor ideal de resíduo para a resistência à compressão, obtido através da

derivação da curva de regressão, indicou ponto de resistência à compressão máximo quando a porcentagem de resíduo é de 4,58%.

A respeito da porosidade, os dados numéricos indicam pequenas variações de porcentagem em relação à referência. Apesar de a análise estatística indicar significância da adição de resíduo nos resultados de porosidade do concreto permeável, avaliando-se o comportamento do gráfico com os demais valores, aponta-se a heterogeneidade causada pela dificuldade de padrão na compactação como o motivo para as variações de porosidade entre os materiais, e não de fato a variação de percentual de resíduo substituído, o mesmo ocorre no que se refere à permeabilidade.

Segundo a análise de refletância solar, todos os concretos com adição de resíduo apresentaram valores superiores e estatisticamente relevantes em relação à referência. Os melhores resultados foram atingidos pelo concreto com 15% de substituição, com aumento de 36,34% em relação à referência, seguido pelo de 5%, com aumento de 32,8%. O teor ideal de resíduo para a máxima refletância, obtido através da derivação da curva de regressão, indicou ponto de refletância máximo quando a porcentagem de resíduo é de 12,78%.

Aliando os estudos de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e refletância solar, conclui-se que a utilização do resíduo particulado de tijolo como substituto parcial do cimento Portland para aplicação em revestimento de pavimentos de concreto permeável é positiva e que dentre as porcentagens de resíduo analisadas neste estudo, a utilização de 5% de RPT em substituição ao cimento Portland é a ideal para obter melhorias em todas as características do material simultaneamente.

Com base nas análises de correlação e regressão, cujo objetivo era um complemento de estudo para avaliar se havia ou não uma relação entre as propriedades, vê-se em alguns casos que não há influência alguma de uma propriedade sobre a outra, não havendo linearidade nos gráficos apresentados. Em outros casos há linearidade, porém, com baixos valores de r e R^2 e casos em que há de fato uma relação entre as propriedades analisadas.

Fatores determinantes para a sustentabilidade são abordados neste estudo, a confecção deste concreto permeável permite que a água da chuva chegue ao solo reduzindo alagamentos em áreas urbanas, contribui para a recarga de lençóis freáticos, utiliza resíduos da indústria cerâmica, contribuiu para a redução da emissão de dióxido de carbono e o uso de recursos naturais matérias-primas para fabricação de cimento Portland. A partir da abordagem de redução de emissão de CO_2 , conclui-se que com a aplicação de 5% de RPT como substituto parcial do cimento, deixa-se de emitir na atmosfera 22,5 Kg de CO_2 por metro cúbico de concreto produzido. Aplicando 7,5% de resíduo, esse valor sobe para 33,75 Kg de CO_2 por

metro cúbico de concreto produzido, e para aplicação de 10% de substituição, 44,99 Kg. Valores ainda mais significativos quando se pensa na produção em escala para confecção de grandes áreas de vias de tráfego leve.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ____. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- ____. **NBR 11768-1:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.
- ____. **NBR 12142:** Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- ____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ____. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó –Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.
- ____. **NBR 16416:** Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.
- ____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- ____. **NBR 16697:** Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- AKKAYA, A.; ÇAĞATAY, İ. H. Experimental investigation of the use of pervious concrete on high volume roads. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 279, p. 1-9, Fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122430>. Acesso em: 3 maio. 2021.
- ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 15, p. 2252-2261, Jan. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000566>. Acesso em: 24 abr. 2021.
- ANDREW, R. M. Global CO2 emissions from cement production. **Earth System Science Data**, [s. l.], v. 10, p. 195–217, Jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>. Acesso em: 11 abr. 2021.
- ARACHCHIGE, U.; AMAKM, A.; BMCM, B.; KKGL, C. Environmental Pollution by Cement Industry. **International Journal of Research**, [s. l.], v. 6, p. 631–635, Jul. 2019. Disponível em: <https://journals.pen2print.org/index.php/ijr/>. Acesso em: 27 maio. 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C518:** Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. Estados Unidos: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754**: Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. Estados Unidos: ASTM, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E903**: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. Estados Unidos: ASTM, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G173**: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. Estados Unidos: ASTM, 2003.

AKBARI, H.; MATTHEWS, H. Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 2–6, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.055>. Acesso em: 27 maio. 2021.

AKBARI, H.; MENON, S.; ROSENFELD, A. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO 2. **Climatic Change**, v. 94, n. 3–4, p. 275–286, 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-008-9515-9>. Acesso em: 04 maio. 2021.

AKÇA, K.; ÇAKIR, O.; IPEK, M. PROPERTIES OF POLYPROPYLENE FIBER REINFORCED CONCRETE URING RECYCLED AGGREGATES. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 620–630, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.133>. Acesso em: 04 maio. 2021.

ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2252–2261, 2011. Pergamon. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>. Acesso em: 04 maio. 2022.

ANDREW, R. M. Global CO2 emissions from cement production. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 1, p. 195–217, 2018. Disponível em: <https://www.earth-syst-sci-data.net/10/195/2018/>. Acesso em: 04 abr. 2022.

ARACHCHIGE, U.; AMAKM, A.; BMCM, B.; KKGL, C. Environmental Pollution by Cement Industry. **International Journal of Research**, v. 6, n. 8, p. 631–635, 2019. Disponível em: <https://journals.pen2print.org/index.php/ijr/>. Acesso em: 25 abr. 2022.

ARAUJO, P.; TUCCI, C.; GOLDENFUM, J. Avaliação Da Eficiência Dos Pavimentos Permeáveis Na Redução De Escoamento Superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 21–29, 2000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v5n3.p21-29>. Acesso em: 15 abr. 2022.

ASAEDA, T.; CA, V. Characteristics of permeable pavement during ft summer weather and impact on the thermal environment. **Building and Environment**, v. 35, p. 363–375, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00020-7). Acesso em: 15 mar. 2022.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. 3º ed. São Paulo: Atlas, 2010. 408p.

BARCELO, L.; KLINE, J.; WALENTA, G.; GARTNER, E. Cement and carbon emissions. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 47, p. 1055–1065, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-013-0114-5>. Acesso em: 27 abr. 2021.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 6º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. 542p.

BERNUCCI, L. M. *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BADR, A.; ASHOUR, A. F.; PLATTEN, A. K. Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete. **International Journal of Impact Engineering**, v. 32, n. 11, p. 1907–1920, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.05.003>. Acesso em: 15 abr. 2022.

BALBO, J. T. **Pavimentos de Concreto Permeáveis**: uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2013.

BERDAHL, P.; BRETZ, S. E. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 149–158, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01004-3). Acesso em: 27 abr. 2022.

BORIBOONSOMSIN, K.; REZA, F. Mix desing and benefit evaluation of high solar reflectance concrete for pavements. **Transportaion research record**, p. 11–20, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/22F2011-02>. Acesso em: 17 abr. 2022.

BUSSAB, P. A.; MORETTIN, W. O. **Estatística Básica**. 9º ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 882p.

CHEN, M. Z.; LIN, J. T.; WU, S. P.; LIU, C. H. Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, p. 1532–1536, 2011. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005). Acesso em: 15 abr. 2021.

CHOUDHARY, J.; KUMAR, B.; GUPTA, A. Potential utilization of construction wastes in asphalt pavements as fillers using ranking framework. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 277, p. 1–13, Jan. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821000222>. Acesso em: 18 abr. 2022.

COLAVITE, A. S.; KONISHI, F. A matriz do transporte no Brasil : uma análise comparativa para a competitividade. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 12., 2015, Resende. **Anais [...]**. Resende: AEDB, 2015. p. 1–11.

CARPIO, J. A.; MARINOSKI, D.; TRICHÊS, G.; LAMBERTS, R.; MELO, J. Urban pavements used in Brazil: Characterization of solar reflectance and temperature verification in

the field. **Solar Energy**, v. 134, p. 72–81, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.044>. Acesso em: 18 abr. 2022.

CARPIO, M.; GONZÁLEZ, Á.; GONZÁLEZ, M.; VERICHEV, K. Influence of pavements on the urban heat island phenomenon: A scientific evolution analysis. **Energy and Buildings**, v. 226, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110379>. Acesso em: 08 abr. 2022.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 262–274, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>. Acesso em: 08 jan. 2022.

ĆOSIĆ, K.; KORAT, L.; DUCMAN, V.; NETINGER, I. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 69–76, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073>. Acesso em: 22 fev. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM____. **DNER-ME 195/97**: Agregados: determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997.

DAS, C. S.; DEY, T.; DANDAPAT, R.; MUKHARJEE, B. B.; KUMAR, J. Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 649–659, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.036>. Acesso em: 22 fev. 2022.

FERGUSON, B. K. Porous Pavements : the Making of Progress in Technology and Design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING. **Anais [...]**. Geórgia: 2006. p.11–16.

FORTUNIAK, K. Numerical estimation of the effective albedo of an urban canyon. **Theoretical and applied climatology**, v. 91, p. 245–258, 2008. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/4c502d0ba6333eeced379f4a3ec5129b/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=48318>. Acesso em: 22 fev. 2022.

FREIRE, D. Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO2. **Agência FAPESP**, 2016. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/politica-de-republicacao-da-agencia-fapesp/30159/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

GAO, D.; GU, Z.; PANG, Y.; YANG, L. Mechanical properties of recycled fine aggregate concrete incorporating different types of fibers. **Construction and Building Materials**, v. 298, p. 123732, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123732>. Acesso em: 22 mar. 2022.

GE, Z.; GAO, Z.; SUN, R.; ZHENG, L. Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 289–293, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002>. Acesso em: 22 mar. 2022.

GE, Z.; WANG, Y.; SUN, R.; WU, X.; GUAN, Y. Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v.

98, p. 128–136, 2015. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2015.08.100](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.100). Acesso em: 15 abr. 2022.

GIULIANI, F.; PETROLO, D.; CHIAPPONI, L.; ZANINI, A.; LONGO, S. Advancement in measuring the hydraulic conductivity of porous asphalt pavements. **Construction and Building Materials**, v. 300, n. July, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124110>. Acesso em: 11 abr. 2022.

HASELBACH, L. Concreto Permeável e Mitigação do Efeito Ilha de Calor Urbano. **Road safety on five continents conference**, p. 14–16, 2009. Disponível em: <https://www.vti.se/RS5C>). Acesso em: 11 abr. 2022.

HASELBACH, L.; BOYER, M.; KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R. Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems. **Transportation research record**, v. 2240, p. 107/115, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2240-14>. Acesso em: 02 abr. 2022.

HASANBEIJI, A.; MENKE, C.; PRICE, L. The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1509–1518, 2010. Disponível em: The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry - ScienceDirect. Acesso em: 15 jun. 2023.

HASSANPOUR, M.; SHAFIGH, P.; MAHMUD, H. BIN. Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement - A review. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 452–461, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.071>. Acesso em: 02 abr. 2022.

HE, Z.; SHEN, A.; WU, H.; *et al.* Research progress on recycled clay brick waste as an alternative to cement for sustainable construction materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 274, p. 1-13, 2021. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2020.122113](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122113). Acesso em: 15 abr. 2021.

HENRÍQUEZ, P. A.; APONTE, D.; IBÁÑEZ-INSA, J.; BARRA BIZINOTTO, M. Ladle furnace slag as a partial replacement of Portland cement. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 289, p. 1-18, 2021. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2021.123106](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123106). Acesso em: 7 maio. 2021.

HOSSAIN, F. M. Z.; SHAHJALAL, MDISLAM, K.; TIZNOBAIK, M.; ALAM, S. Experimental study on the mechanical properties of recycled aggregate concrete using crumb rubber and polypropylene fiber. **Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering**, v. 2019, p. 983–996, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.245>. Acesso em: 05 maio. 2022.

HWANG, S. S.; MORENO CORTÉS, C. M. Properties of mortar and pervious concrete with co-utilization of coal fly ash and waste glass powder as partial cement replacements. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121415, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121415>. Acesso em: 05 maio. 2022.

INDICE BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População Rural e Urbana**. IBGE. Brasil, 2015. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>. Acesso em: 25 fev. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Carbon dioxide capture**. Nova Iorque: IPCC, 2005.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Genebra: IPCC, 2007.

IRKI, I.; DEBIEB, F.; OUZADID, S.; et al. Effect of Blaine fineness of recycling brick powder replacing cementitious materials in self compacting mortar. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 32, n. 9, p. 963–975, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1393202>. Acesso em: 25 fev. 2022.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. v.1. São Paulo: IBRACON, 2007. 832p.

JABRI, K. S.; HAGO, A. W.; AL-NUAIMI, A. S.; AL-SAIDY, A. H. Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1472–1479, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.018>. Acesso em: 04 maio. 2022.

JIANG, W.; HUANG, Y.; SHA, A. A review of eco-friendly functional road materials. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 1082–1092, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.082>. Acesso em: 15 fev. 2022.

JOCHEM, L. F.; CASAGRANDE, C. A.; ONGHERO, L.; VENÂNCIO, C.; GLEIZE, P. J. P. Effect of partial replacement of the cement by glass waste on cementitious pastes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 273, p. 1-13, 2021. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2020.121704](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121704). Acesso em: 7 maio, 2021.

JOSHAGHANI, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; JABERIZADEH, M. Mechanical characteristic of pervious concrete considering the gradation and size of coarse aggregates. **Concrete - Innovation and Design: fib Symposium Proceedings**, v. 6, n. 9, p. 152–153, 2015. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2020.121704](https://www.researchgate.net/publication/264707417_Mechanical_characteristic_of_pervious_concrete_considering_the_gradation_and_size_of_coarse_aggregates_and_void_ratio). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264707417_Mechanical_characteristic_of_pervious_concrete_considering_the_gradation_and_size_of_coarse_aggregates_and_void_ratio. Acesso em: 7 maio, 2021.

KAUFFMANN, M.; SILVA, L. Taxa De Impermeabilização Do Solo : Um Recurso Para a Implementação Da Bacia Hidrográfica Como Unidade De Planejamento Urbano Integrado À Gestão Dos Recursos. In: XI ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL. **Anais [...]**. Salvador: 2005. p.19.

KAYALI, O.; HAQUE, M.; ZHU, B. Some characteristics of high strength fiber reinforce lightweight aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 207–213, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00016-1). Acesso em: 7 maio, 2021.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D.; VLACHOU, A.; BARTZAS, G.; GALETAKIS, M. Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. **Advanced Powder Technology**, v. 26, n. 2, p. 368–376, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2014.11.012>. Acesso em: 7 maio, 2021.

KUMAR, B. M. V.; ANANTHAN, H.; BALAJI, K. V. A. Experimental studies on cement stabilized masonry blocks prepared from brick powder, fine recycled concrete aggregate and pozzolanic materials. **Journal of Building Engineering**, v. 10, p. 80–88, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.02.007>. Acesso em: 7 maio, 2021.

KURANLI, Ö. F.; UYSAL, M.; ABBAS, M. T.; et al. Evaluation of slag/fly ash based geopolymer concrete with steel, polypropylene and polyamide fibers. **Construction and Building Materials**, v. 325, n. May 2021, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126747>. Acesso em: 14 mar, 2022.

LI, Q.; QIAO, F.; YU, L. Impacts of pavement types on in-vehicle noise and human health. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 66, n. 1, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1119217>. Acesso em: 14 mar, 2022.

LI, H.; DONG, L.; JIANG, Z.; YANG, X.; YANG, Z. Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 1017–1026, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.149>. Acesso em: 14 mar, 2022.

LI, A. Y.; QIAO, H.; LI, Q.; HAKUZWEYEZU, T.; CHEN, B. Study on the performance of pervious concrete mixed with waste glass powder. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 123997, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123997>. Acesso em: 14 mar, 2022.

LI, S.; GAO, J.; LI, Q.; ZHAO, X. Investigation of using recycled powder from the preparation of recycled aggregate as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 267, p. 1-14, 2021. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2020.120976](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120976). Acesso em: 15 abr. 2021.

LIU, H.; LUO, G.; WANG, L.; GONG, Y. Strength time-varying and freeze-thaw durability of sustainable pervious concrete pavement material containing waste fly ash. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 1, 2019. Disponível em : <https://doi.org/10.3390/su11010176>. Acesso em: 15 abr. 2022.

LIU, S.; DAI, R.; CAO, K.; GAO, Z. The role of sintered clay brick powder during the hydration process of cement pastes. **Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering**, v. 41, n. 2, p. 159–165, 2017. Springer International Publishing. Disponível em : <https://link.springer.com/article/10.1007/s40996-017-0049-0#:~:text=SCBP%20has%20little%20effect%20on,improves%20rapidly%20in%20the%20late>. Acesso em: 15 abr. 2022.

LIU, Z.; GUAN, D.; WEI, W.; et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. **Nature**, [s. l.], v. 524, p. 335-338, 2015. Disponível em: [10.1038/nature14677](https://doi.org/10.1038/nature14677). Acesso em: 10 maio, 2021.

MA, Z.; TANG, Q.; WU, H.; XU, J.; LIANG, C. Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103758, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103758>. Acesso em: 10 maio, 2021.

MARCEAU, M. L.; VANGEEM, M. G. Solar Reflectance of Concretes for LEED Sustainable Sites Credit : Heat Island Effect. **Research and Development Information**, n.

2982, p. 94, 2007. Disponível em: https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/sn2982-solar-reflectance-of-concretes-for-leed-sustainable-sites-credit-heat-island-effect.pdf. Acesso em: 10 maio, 2021.

MARTOS, J. L.; STYLES, D.; SCHOENBERGER, H.; ZESCHMAR-LAHL, B. Construction and demolition waste best management practice in Europe. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 166–178, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.016>. Acesso em: 10 maio, 2021.

MAZAHERIPOUR, H.; GHANBARPOUR, S.; MIRMORADI, S.; HOSSEINPOUR, I. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 351–358, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.018>. Acesso em: 10 maio, 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Brasil em Números**, v. 29, p. 449–470, 2021. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/planejamento-ambiental-e-territorial-urbano/urbanismo-sustentavel/constru%C3%A7%C3%A3o-sustent%C3%A1vel.html>. Acesso em: 01 maio, 2021.

MONTGOMERY, D. C. **Desing and analysis of experiments**. 8º ed. [s. l.]: John Wiley & Sons, 2012.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada à engenharia**. 4º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 490p.

MORADIKHOU, A. B.; ESPARHAM, A.; AVANAKI, M. J. Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 251, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118965>. Acesso em: 10 JUN, 2023.

NAVRÁTILOVÁ, E.; ROVNANÍKOVÁ, P. Pozzolan properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 530–539, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>. Acesso em: 14 mar, 2022.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **9 em cada 10 pessoas em todo o mundo respiram ar poluído, mas mais países estão tomando medidas**. Genebra: OMS, 2018. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>. Acesso em: 10 maio, 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050**. OMS, 2019. Disponível em: <https://unric.org/pt/onu-preve-que-cidades-abriguem-70-da-populacao-mundial-ate-2050/#:~:text=Segundo%20a%20ONU%2C%20atualmente%2055,implementando%20processos%20de%20pol%C3%ADticas%20descentralizadas>. Acesso em: 10 maio, 2021.

POMERANTZ, M.; AKBARI, H.; BERDAHL, P.; et al. Reflective surfaces for cooler buildings and cities. **Philosophical Magazine**, v. 79, p. 1457–1476, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13642819908216984>. Acesso em: 18 fev, 2022.

POON, C. S.; YU, A. T. W.; NG, L. H. On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 32, n. 2, p. 157–172, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00052-0). Acesso em: 18 fev, 2022.

POON, C. S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 50, p. 293–305, 2007. Disponível em: [10.1016/j.resconrec.2006.06.005](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.005). Acesso em: 11 maio, 2021.

QIN, Y. Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements. **Energy and Buildings**, v. 96, p. 86–94, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.005>. Acesso em: 11 maio, 2021.

QIN, Y.; HILLER, J. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. **Energy and Buildings**, v. 85, p. 389–399, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.076>. Acesso em: 11 maio, 2021.

QIN, Y.; PANG, X.; TAN, K.; BAO, T. Evaluation of pervious concrete performance with pulverized biochar as cement replacement. **Cement and Concrete Composites**, v. 119, p. 104022, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104022>. Acesso em: 11 maio, 2021.

REIG, L.; TASHIMA, M. M.; BORRACHERO, M. V.; et al. Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 98–106, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.031>. Acesso em: 11 maio, 2021.

SABIR, B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p. 441–454, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5). Acesso em: 07 mar, 2022.

SABOO, N.; NIRMAL PRASAD, A.; SUKHIJA, M.; CHAUDHARY, M.; CHANDRAPPA, A. K. Effect of the use of recycled asphalt pavement (RAP) aggregates on the performance of pervious paver blocks (PPB). **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 262, p. 1–13, 2020. Disponível em: [10.1016/j.conbuildmat.2020.120581](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120581). Acesso em: 10 maio, 2021.

ŞAHİN, O.; İLCAN, H.; ATEŞLİ, A. T.; et al. Construction and demolition waste-based geopolymers suited for use in 3-dimensional additive manufacturing. **Cement and Concrete Composites**, v. 121, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104088>. Acesso em: 10 maio, 2021.

SALEHI, P.; DABBAGH, H.; ASHENGROPH, M. Effects of microbial strains on the mechanical and durability properties of lightweight concrete reinforced with polypropylene fiber. **Construction and Building Materials**, v. 322, p. 126519, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126519>. Acesso em: 10 maio, 2021.

SANSALONE, J.; KUANG, X.; RANIERI, V. Permeable Pavement as a Hydraulic and Filtration Interface for Urban Drainage. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 134, p. 666–674, 2008. Disponível em: [10.1061/\(asce\)0733-9437\(2008\)134:5\(666\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2008)134:5(666)). Acesso em: 10 maio, 2021.

SANTAMOURIS, M.; GAITANI, N.; SPANOU, A.; et al. Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas - Design realization and results on the flisvos project.

Building and Environment, v. 53, p. 128–136, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.022>. Acesso em: 10 maio, 2021.

SCHACKOW, A. **Efeito das características pozolâncias de rejeitos de tijolo nas propriedades de argamassas**. 2015. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2015.

SCHACKOW, A. *et al.* Permeable concrete plates with wastes from the paper industry: Reduction of surface flow and possible applications. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 250, p. 1–11, 2020. Disponível em: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118896. Acesso em: 7 maio. 2021.

SHAN, Y. *et al.* Peak cement-related CO₂ emissions and the changes in drivers in China. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], v. 23, p. 959–971, 2019. Disponível em: 10.1111/jiec.12839. Acesso em: 19 maio. 2021.

SILVA, J.; BRITO, J. DE; VEIGA, R. Incorporation of fine ceramics in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 556–564, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014>. Acesso em: 19 maio. 2021.

SPIEGEL, R. S. **Probabilidade e estatística**. uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2004. 518p.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>. Acesso em: 19 maio. 2021.

STOLZ, J.; BOLUK, Y.; BINDIGANAVILE, V. Wood ash as a supplementary cementing material in foams for thermal and acoustic insulation. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 215, p. 104–113, 2019. Disponível em: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.174. Acesso em: 7 maio. 2021.

SUN, Z.; XU, Q. Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, n. 1–2, p. 198–204, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2009.07.056>. Acesso em: 7 maio. 2021.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; APOSTOLAKIS, K. On the developement, optical properties and yhermal performance of coll colored coatings for the urban enviroment. **Solar Energy**, v. 81, p. 488–497, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.005>. Acesso em: 7 maio. 2021.

TAKEBAYASHI, H.; MORIYAMA, M. Relationships between the properties of an urban street canyon and its radiant environment: Introduction of appropriate urban heat island mitigation technologies. **Solar Energy**, v. 86, n. 9, p. 2255–2262, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.019>. Acesso em: 7 maio. 2021.

TANG, Q.; MA, Z.; WU, H.; WANG, W. The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103807, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103807>. Acesso em: 7 maio. 2021.

TENNIS, D.; MICHAEL, L.; LEMING, L.; AKERS, D. **Pervious concrete pavement**. Illinois: Portland Cement Association, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da Drenagem Urbana**. Brasília, DF: CEPAL, 2012.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2021**. Washington: USGS, 2021.

UNITED NATIONS. **Urban and Rural Areas 2009**. Department of Economic and Social Affairs. UN, 2009. Disponível em: http://www.un.org/esa/population/publications/wup2003/2003Urban_Rural.pdf. Acesso em: 7 maio. 2021.

VANCURA, M.; MACDONALD, K.; KHAZANOVICH, L. Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 10, p. 1080–1085, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.011>. Acesso em: 7 maio. 2022.

WARD, K.; LAUF, S.; KLEINSCHMIT, B.; ENDLICHER, W. Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. **Science of the Total Environment**, v. 569–570, p. 527–539, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.119>. Acesso em: 7 maio. 2022.

WONG, C. L.; MO, K. H.; YAP, S. P.; ALENGARAM, U. J.; LING, T. C. Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 226–239, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.193>. Acesso em: 7 maio. 2022.

WU, H.; SUN, B.; ZHUO, L.; YIN, J. Laboratory-simulated investigation on thermal behaviours of permeable concrete pavements. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, p. 97–108, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1329865>. Acesso em: 7 maio. 2022.

WU, H.; ZUO, J.; ZILLANTE, G.; WANG, J.; YUAN, H. Construction and demolition waste research: a bibliometric analysis. **Architectural Science Review**, [s. l.], v. 62, p. 354–365, 2019. Disponível em: [10.1080/00038628.2018.1564646](https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1564646). Acesso em: 14 maio. 2021.

XIAO, J.; MA, Z.; DING, T. Reclamation chain of waste concrete: A case study of Shanghai. **Waste Management**, v. 48, p. 334–343, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.018>. Acesso em: 12 maio. 2021.

XIAO, J.; MA, Z.; SUI, T.; AKBARNEZHAD, A.; DUAN, Z. Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 188, p. 720–731, 2018. Disponível em: [10.1016/j.jclepro.2018.03.277](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.277). Acesso em: 12 maio. 2021.

XIE, X.; ZHANG, T.; WANG, C.; et al. Mixture proportion design of pervious concrete based on the relationships between fundamental properties and skeleton structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, p. 103693, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103693>. Acesso em: 12 maio. 2021.

XIE, X.; ZHANG, T.; YANG, Y.; et al. Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 732–746, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.128>. Acesso em: 12 maio. 2021.

XU, J. H.; FLEITER, T.; FAN, Y.; EICHHAMMER, W. CO₂ emissions reduction potential in China's cement industry compared to IEA's Cement Technology Roadmap up to 2050. **Applied Energy**, [s. l.], v. 130, p. 592–602, 2014. Disponível em: [10.1016/j.apenergy.2014.03.004](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.004). Acesso em: 11 maio. 2021.

YANG, Z.; MA, W.; SHEN, W.; ZHOU, M. The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, v. 23, n. 3, p. 391–394, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-007-3391-4>. Acesso em: 11 maio. 2021.

YOO, D.; BANTHIA, N. Impact resistance of fiber-reinforce concrete - A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103389, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103389>. Acesso em: 11 maio. 2021.

YUAN, Z.; JIA, Y. Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforce concrete: An experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 121048, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121048>. Acesso em: 05 maio. 2022.

ZHENG, Q.; JIKE, N.; XU, C.; et al. Total recycling of low-quality urban-fringe construction and demolition waste towards the development of sustainable cement-free pervious concrete: The proof of concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 352, p. 131464, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131464>. Acesso em: 05 maio. 2022.

ZHANG, R.; JIANG, G.; LIANG, J. The Albedo of Pervious Cement Concrete Linearly Decreases with Porosity. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/746592>. Acesso em: 05 maio. 2022.

ZHANG, S. *et al.* Modeling energy efficiency to improve air quality and health effects of China's cement industry. **Applied Energy**, [s. l.], v. 184, p. 574–593, 2016. Disponível em: [10.1016/j.apenergy.2016.10.030](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.030). Acesso em: 6 maio. 2021.

ZHANG, B.; FENG, Y.; XIE, J.; et al. Compressive behaviours, splitting properties, and workability of lightweight cement concrete: The role of fibres. **Construction and Building Materials**, v. 320, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126237>. Acesso em: 6 maio. 2021.

ZHAO, Y.; GAO, J.; LIU, C.; CHEN, X.; XU, Z. The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 242, p. 1–10, 2020. Disponível em: [10.1016/j.jclepro.2019.118521](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118521). Acesso em: 15 abr. 2022.

ZHONG, R.; WILLE, K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 51–60, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>. Acesso em: 15 abr. 2022.

ZHOU, J.; ZHENG, M.; WANG, Q.; YANG, J.; LIN, T. Flexural fatigue behavior of polymer-modified pervious concrete with single sized aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 897–905, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.136>. Acesso em: 15 abr. 2022.