

UNIGUAÇU – UNIÃO DE ENSINO SUPERIOR DO IGUAÇU LTDA
FACULDADE UNIGUAÇU
ENGENHARIA CIVIL
PROJETO FINAL DE CURSO II

LAURA GALVAN LAZZARIN

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO GRAÚDO POR PAPEL
KRAFT RECICLADO PROVENIENTE DE EMBALAGENS
CIMENTÍCIAS NA PRODUÇÃO DE PISOS INTERTRAVADOS**

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR
2025

LAURA GALVAN LAZZARIN

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO GRAÚDO POR PAPEL
KRAFT RECICLADO PROVENIENTE DE EMBALAGENS
CIMENTÍCIAS NA PRODUÇÃO DE PISOS INTERTRAVADOS**

Projeto de pesquisa apresentado como requisito para
aprovação na disciplina de Projeto Final de Curso II do
curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU.
Orientador(a): Prof^a. Me. Meire Claudia Barbosa

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO

LAURA GALVAN LAZZARIN

SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO GRAÚDO POR PAPEL KRAFT RECICLADO PROVENIENTE DE EMBALAGENS CIMENTÍCIAS NA PRODUÇÃO DE PISOS INTERTRAVADOS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil apresentado, sob a orientação da Professora Me. Meire Claudia Barbosa, aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel no curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU, pela seguinte banca examinadora:

Professor (a) Me. Meire Claudia Barbosa
Faculdade UNIGUAÇU

Professor (a) Me. Gabriel Matsuda
Faculdade UNIGUAÇU

Professor (a) Me. Melissa Pastorini Proença
Faculdade UNIGUAÇU

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU, 03 DE NOVEMBRO DE 2025.

A folha devidamente assinada está sob guarda da secretaria do curso.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à pessoa que serei amanhã, que colherá os frutos da perseverança de hoje, lembrando que cada palavra escrita aqui é também um passo rumo aos sonhos que ainda estão por vir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades e caminhos traçados e ainda pela força concedida para enfrentar cada desafio.

Como disse Allan Kardec, “Nascer, morrer, renascer ainda e progredir sempre, tal é a lei”. Que esta máxima me inspire a nunca desistir diante das dificuldades.

Aos meus pais, que nunca mediram esforços para que pudessem me proporcionar as melhores experiências no âmbito educacional, além de serem grandes exemplos.

A eles devo tudo que construí até hoje. Que no futuro eu seja pelo menos um terço do que eles são.

À minha família, que me apoiou durante a trajetória, cada um à sua maneira.

Às minhas avós, que são exemplos de força e coragem.

Ao meu avô Floriano, em memória, que foi um grande exemplo de determinação e caráter.

Ao meu avô Luiz, em memória, com o qual tive o primeiro contato com o mundo da construção civil. Que o final dessa etapa te orgulhe, aonde o senhor estiver.

Ao meu namorado, que foi um grande apoio ao final do curso.

Aos meus amigos pelas incontáveis horas de desabafo e apoio.

Aos meus professores que me acompanharam durante toda a trajetória acadêmica.

À minha orientadora, Prof^a. Me. Meire Cláudia Barbosa, que mesmo com a rotina agitada, sempre foi um ponto de apoio, não somente ao final, mas também no decorrer do curso. Levo-a como inspiração em minha carreira que está por vir.

EPÍGRAFE

“... a luta nunca foi contra o outro. O tempo inteiro foi entre você e você mesmo. O maior desafio da criatura humana é a própria criatura humana.”

Joanna de Ângelis.

RESUMO

A indústria construtiva, em todos os seus aspectos, reúne as maiores preocupações no que diz respeito a implicações negativas na natureza, principalmente a modificação dos espaços construídos, utilização de recursos naturais não renováveis e geração de resíduos. Dentre os resíduos da construção civil (RCC) dispostos na Resolução nº 307 do CONAMA, está o papel Kraft, encontrado nas embalagens de cimento. Observa-se no relatório do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC –, que do volume anual comercializado em 2020, 53 milhões de toneladas, cerca de 35 milhões foram comercializadas em embalagens de Papel Kraft. Embora apresente uma decomposição consideravelmente rápida, tendo em vista sua transformação em fibras de celulose, essas embalagens possuem resíduos de cimento adstritos em seu interior que não se decompõem facilmente, levando ao aumento de pH da superfície na qual foi depositado, contaminando o ambiente. Entre os principais consumidores de cimentos acondicionados em embalagens de Papel Kraft, estão as indústrias de pequeno e médio porte de artefatos cimentícios. Estas, são consumidas em grandes volumes, sendo adotado, em sua maioria, a incineração térmica para destinação final, uma vez que não há viabilidade técnica para reutilização direta em novo ciclo de empacotamento de cimento. Embora a incineração seja uma opção para a destinação final, é importante realizar estudos que explorem as propriedades desse subproduto e sua aplicação na produção de novos itens. Partindo disso, o presente trabalho teve como cerne a realização de análise acerca da aplicação de papel Kraft reciclado a partir de embalagens de cimento pós-uso na fabricação de pisos intertravados de concreto, como substituto parcial do agregado graúdo. Foram realizados testes com 5 traços, incluindo o traço de referência, o qual obteve os melhores resultados, no que diz respeito à tráfego leve. Enquanto isso, os traços com 5% e 10% de substituição ainda se mantiveram dentro dos limites normativos para pavimentos de concreto permeável de tráfego leve, apresentando queda moderada de resistência (cerca de 12%). Já as misturas com 15% e 20% apresentaram desempenho insatisfatório, com absorções elevadas e resistências abaixo do exigido. Diante disso, conclui-se que a substituição de até 5% do agregado graúdo por Papel Kraft reciclado é tecnicamente viável e ambientalmente benéfica, representando uma alternativa promissora para reduzir resíduos, otimizar o uso de materiais e contribuir para práticas construtivas mais sustentáveis. O estudo reforça a relevância de pesquisas que integrem desempenho técnico e responsabilidade ambiental, incentivando o desenvolvimento de novos materiais alinhados às diretrizes da construção sustentável.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Reaproveitamento de resíduos. Logística reversa. Concreto.

ABSTRACT

The construction industry, in all its aspects, encompasses major concerns regarding its negative impacts on nature, especially the modification of built environments, the use of non-renewable natural resources, and the generation of waste. Among the construction and demolition wastes (CDW) listed in CONAMA Resolution n° 307 is Kraft paper, commonly found in cement packaging. According to the report of the National Union of the Cement Industry (SNIC), of the 53 million tons of cement sold in 2020, approximately 35 million tons were packaged in Kraft paper bags. Although Kraft paper decomposes relatively quickly due to its transformation into cellulose fibers, these bags contain cement residues adhered to their inner surfaces that do not decompose easily, leading to an increase in the pH of the soil where they are disposed of, thus contaminating the environment. Among the main consumers of cement packed in Kraft paper bags are small and medium-sized industries that produce cement artifacts. These industries consume large volumes of cement, and thermal incineration is commonly adopted as the final disposal method, since there is no technical feasibility for direct reuse of the packaging in a new cement packing cycle. Although incineration is an option for final disposal, it is essential to conduct studies that explore the properties of this by-product and its potential application in the production of new materials. Based on this premise, the present study aimed to analyze the application of recycled Kraft paper from post-consumer cement packaging in the manufacture of concrete interlocking pavers as a partial replacement for coarse aggregate. Tests were conducted with five mix designs, including the reference mix, which achieved the best results for light-traffic applications. Mixes with 5% and 10% replacement levels remained within the normative limits established for permeable concrete pavements intended for light traffic, showing a moderate reduction in compressive strength (approximately 12%). Mixtures containing 15% and 20% replacement, however, exhibited unsatisfactory performance, with high water absorption and compressive strengths below the required standard. Therefore, it is concluded that replacing up to 5% of the coarse aggregate with recycled Kraft paper is technically feasible and environmentally beneficial, representing a promising alternative for waste reduction, optimization of material use, and promotion of more sustainable construction practices. This study reinforces the importance of research that integrates technical performance with environmental responsibility, encouraging the development of new materials aligned with the principles of sustainable construction.

Key word: Sustainability. Waste reuse. Reverse logistics. Concrete.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 JUSTIFICATIVA	16
3 OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GERAL	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4 REVISÃO DE LITERATURA	18
4.1 LOGÍSTICA REVERSA.....	18
4.2 SUSTENTABILIDADE EMPRESARIAL	19
4.2.1 Sustentabilidade na indústria da construção civil	20
4.2.2 Sustentabilidade aplicada à indústria cimenteira.....	21
4.3 INDÚSTRIA CIMENTEIRA.....	22
4.3.1 Processos de produção da indústria cimenteira do Brasil	22
4.4 PAPEL KRAFT	28
4.4.1 Matéria prima.....	29
4.4.2 Preparo da madeira	30
4.4.3 Polpação.....	31
4.4.4 Processo de produção do papel Kraft.....	31
4.5 PISOS INTERTRAVADOS.....	34
4.5.1 Histórico.....	34
4.5.2 Tipos produzidos	35
4.5.3 Processo produtivo	37
4.5.4 Concreto	39
4.5.5 Propriedades do concreto para peças de pisos intertravados	40
4.5.6 Normativas associadas e requisitos técnicos	41
5 MATERIAIS E MÉTODOS	45
5.1 MATERIAIS.....	47
5.1.1 Cimento	47
5.1.2 Agregados	49
5.1.3 Papel Kraft.....	52
5.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	55

5.2.1	<i>Slump Test</i>	58
5.2.2	Desforma e cura das peças intertravadas	59
5.2.3	Ensaio de Resistência à Compressão	60
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	61
6.1.1	Cimento	61
6.1.2	Agregados	61
6.2	AMOSTRAS	64
6.2.1	<i>Slump Test</i>	64
6.2.2	Absorção de Água	65
6.2.3	Resistência Mecânica	67
7	CONCLUSÃO	70
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Extração de Calcário e Argila.....	23
Figura 2 - Estação de Britagem.....	24
Figura 3 - Moinho de Bolas	24
Figura 4 - Pré-aquecedor	25
Figura 5 - Conjunto do Pré-Aquecedor, Pré-Calcinador e Forno Rotativo de Clínquer	26
Figura 6 - Forno de Clínquer	26
Figura 7 - Moagem de Clínquer.....	27
Figura 8 - Principais etapas do processo de fabricação do cimento	28
Figura 9 - Processo simplificado do funcionamento da seção de formação (caixa de entrada e mesa plana)	32
Figura 10 - Via Appia Antica.....	35
Figura 11 - Peças do tipo I	35
Figura 12 - Peças do tipo II	36
Figura 13 - Peças do tipo III	36
Figura 14 - Peças do tipo IV	37
Figura 15 - Vibro prensa para fabricação de paver	38
Figura 16 - Volume final	48
Figura 17 - Secagem dos agregados	49
Figura 18 - Pesagem do agregado saturado	50
Figura 19 - Pesagem do agregado submerso	50
Figura 20 - Massa unitária dos agregados	52
Figura 21 - Pasta homogênea oriunda do Papel Kraft	53
Figura 22 - Peneiramento da pasta	54
Figura 23 - Massa proveniente do Papel Kraft logo após o peneiramento.....	54
Figura 24 - Papel Kraft após o processo de secagem e separação	55
Figura 25 - Peças submersas.....	58
Figura 26 - <i>Slump test</i>	64

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 - Processo de produção de celulose	28
Fluxograma 2 - Descrição das atividades a serem desenvolvidas	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Granulometria dos agregados	63
Gráfico 2 - Resultados de absorção de água das peças intertravadas	65
Gráfico 3 - Resultados de resistência à compressão das peças intertravadas	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média dos constituintes das madeiras de folhas curtas e folhas longas.....	29
Tabela 2 - Amostragem para ensaio	44
Tabela 3 - Apresentação do traço pelo método ABCP.....	56
Tabela 4 - Resistência característica à compressão	56
Tabela 5 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável .	57
Tabela 6 - Valores dos ensaios do agregado graúdo.....	61
Tabela 7 - Valores dos ensaios do agregado miúdo	62
Tabela 8 - Desvios padrões das amostras	68

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor de suma importância na economia mundial, especialmente no Brasil. Isso se deve a representatividade relevante da mesma dentre os setores que integram o Produto Interno Bruto (PIB) do País, gerando emprego e renda de diferentes formas (LEAL, 2021).

Concomitante a isso, a indústria construtiva, em todos os seus aspectos, reúne as maiores preocupações no que diz respeito a implicações negativas na natureza, principalmente a modificação dos espaços construídos, utilização de recursos naturais não renováveis e geração de resíduos. Pode-se inferir, dentre outros fatores, que a produção exacerbada de resíduos é resultado do crescimento urbano, notado a partir do quantitativo de construções (novas, reformas ou demolições) em diversos locais do Brasil (LEAL, 2021).

Hodiernamente, a problemática envolvendo os resíduos da construção civil movem a cadeia produtiva do setor, conforme endossado pela Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2011). Tal diretriz faz-se de suma importância, uma vez que a indústria construtiva é responsável por 67 % dos resíduos sólidos urbanos municipais gerados, provocando diversos impactos negativos ao meio ambiente e à qualidade de vida das populações nos centros urbanos (LOPES *et al.*, 2022).

Nesse contexto, há uma logística reversa com enfoque na redução do impacto ambiental e os desperdícios de insumos, bem como o reuso, manufatura e reciclagem de produtos, podendo ser entendida como a área da logística que trata dos fluídos físicos de produtos, assim como, de suas embalagens (VIER *et al.*, 2021).

Dentre os resíduos da construção civil (RCC) dispostos na Resolução nº 307 do CONAMA, está o papel Kraft, encontrado nas embalagens de diversos materiais, como cal, gessos, argilas e cimento, sendo este último, insumo utilizado em várias etapas das obras. De acordo com a resolução supracitada, o papel Kraft é classificado como um resíduo classe B, devendo ser reutilizado, reciclado ou encaminhado às áreas de armazenamento temporário, sendo propensos a sua utilização ou reciclagem futura. Todavia, é possível notar que esse material é largamente descartado de forma inadequada, tornando importante que o setor se adapte a iniciativas sustentáveis para mitigar os impactos ao meio ambiente (ALMEIDA; SANTOS, 2024).

O Relatório Anual de 2020 do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC revelou que, apesar dos impactos da pandemia no mercado, o consumo deste insumo foi 10,6% maior que no ano anterior. Foi possível observar que, do volume anual comercializado de 53 milhões de toneladas, cerca de 35 milhões foram ensacadas em embalagens de Papel Kraft.

Dados complementares da indústria papelreira indicam que cerca de 69% do cimento consumido no Brasil é vendido em bolsas de Papel Kraft, o que corresponde a aproximadamente 41,8 milhões de toneladas, considerando uma produção média nacional de 60,6 milhões de toneladas anuais. Nesse contexto, ao considerarmos o acondicionamento do material cimentício em pacotes de 50 kg, pode-se inferir que, no ano de 2020, foram distribuídas aproximadamente 840 milhões de embalagens na indústria construtiva, que, em sua maioria, não recebem a destinação final ambientalmente adequada (CARVALHO, *et al.*, 2023).

Embora o papel Kraft apresente uma decomposição consideravelmente rápida, tendo em vista sua transformação em fibras de celulose, os resíduos de cimento adstritos nas embalagens não se decompõem facilmente, o que leva ao aumento de pH da superfície na qual foi depositado e conseqüentemente, contamina o ambiente. Tal aumento afeta a biodiversidade, interferindo no equilíbrio da biosfera, comprometendo a produção primária, e, conseqüentemente, toda cadeia trófica (SOARES *et al.*, 2020).

Ademais, as embalagens de cimento são, em geral, consumidas em grandes volumes, sendo adotado a incineração térmica para destinação final ambientalmente adequada das embalagens, uma vez que não há viabilidade técnica para reutilização direta em novo ciclo de empacotamento de cimento. Embora a incineração seja uma opção para a destinação final, é importante realizar estudos que explorem as propriedades desse subproduto e sua aplicação na produção de novos itens (CARVALHO *et al.*, 2023).

Hodiernamente, há inúmeros estudos apresentados resultados satisfatórios para a reciclagem das embalagens pós-uso em materiais de matriz cimentícia, bem como na aplicação de subprodutos na confecção de peças de concreto pré-fabricadas. Partindo disso, o presente trabalho teve como cerne a realização de análise acerca da aplicação de papel Kraft reciclado a partir de embalagens de cimento pós-uso na fabricação de pisos intertravados de concreto, como substituto parcial do agregado graúdo.

2 JUSTIFICATIVA

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), foram vendidos 4,7 milhões de toneladas de cimento em dezembro de 2020, significando um crescimento de 16,6% se comparado ao mesmo mês de 2019, mesmo considerando a estagnação do mercado em razão da pandemia (SNIC, 2020). Observou-se ainda, que aproximadamente 66% das vendas de cimento ocorreram na forma ensacada, em embalagem produzida à base de papel Kraft.

Ademais, conforme Carvalho *et al.* (2023), tendo em vista que as embalagens não possuem viabilidade técnica para reutilização direta em novo ciclo de empacotamento de cimento, as mesmas acabam possuindo como destinação final a incineração térmica, podendo ainda assim acarretar prejuízos à biosfera, uma vez que há resquícios da matriz cimentícia nas embalagens.

Nesse sentido e considerando o viés sustentável, torna-se relevante analisar a incorporação das embalagens de papel Kraft na produção de matrizes cimentícias, especialmente em seus subprodutos.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a utilização de papel Kraft reciclado proveniente de embalagens de cimento pós-uso como substituto parcial do agregado graúdo na produção de pisos intertravados de concreto.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as propriedades do concreto produzido no estado fresco.
- Avaliar as propriedades do concreto produzido no estado endurecido.
- Verificar o potencial técnico para comercialização da peça produzida com base na NBR 9781/2013 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 LOGÍSTICA REVERSA

Segundo Rogers e Tibben-Lembke (1998), pode-se definir a logística como um processo de movimentação de informações e recursos utilizados desde o princípio da produção até o consumo final. Nesse contexto e visando a melhoria no planejamento dos processos para as empresas, foi desenvolvida a logística reversa, que consiste em apresentar novas estratégias para as organizações, com o intuito de evitar o descarte inadequado de produtos.

A logística reversa tem por conceito o retorno dos bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo de alguns negócios ou do ciclo produtivo, por meio de canais de distribuição antagônicos aos convencionais, e pode ser definida como a parte da logística responsável pela redução, reciclagem, substituição e descarte das atividades logísticas tradicionais. Dessa maneira, agregam-se valores econômicos, ecológicos, legais e certamente logísticos, à cadeia produtiva. Ademais, é possível dividir a logística reversa em dois grandes grupos de aplicação, sendo eles produtos e embalagens (LEITE, 2009).

Para realizar a implementação da logística reversa faz-se necessário uma gama de processos e etapas que começam logo após o consumo de um produto, sendo um dos exemplos mais notáveis do uso de tal logística, a reciclagem (HAMMES, 2020).

No que diz respeito à reciclagem, entre os casos mais relevantes estão materiais em papel, vidro, metais e plásticos. Ao realizar a reciclagem de tais produtos, evita-se o uso de matéria-prima virgem, reduzindo a extração de recursos naturais e diminuindo a emissão de gases de efeito estufa associada à fabricação de novos produtos (PACITO *et al.*, 2024).

No âmbito da construção civil, a logística reversa é utilizada principalmente para o reaproveitamento de resíduos de demolição, como concreto e metais, embora sua implementação ainda ocorra de forma incipiente, com perspectivas de ampliação. Esses materiais, descartados em reformas ou obras, podem ser processados e reinseridos no ciclo de produção, com o intuito de reduzir a quantidade de resíduos em aterros, bem como a necessidade de novas extrações de recursos. Essa prática, pode se estender às embalagens dos materiais utilizados na construção civil, e não só minimiza o impacto ambiental da atividade, mas também é capaz de proporcionar

benefícios econômicos, uma vez que a reutilização reduz o custo de novos materiais e além do preço do devido descarte (SCHONWALD; DAL MAGRO; TOLÊDO, 2021).

Além das exigências legais, a logística reversa pode gerar vantagens competitivas para as empresas que a adotam. Ao implementar tal prática na indústria, é possível contribuir para a criação de uma imagem corporativa mais positiva, alinhada com os valores de responsabilidade ambiental, o que pode atrair novos clientes e parceiros comerciais (UCHÔA; CARVALHO, 2024).

4.2 SUSTENTABILIDADE EMPRESARIAL

A ideia de sustentabilidade empresarial surgiu em 1987 após o relatório “*Our common future*”, da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Porém, só em 1994, a ideia de sustentabilidade empresarial ganhou notoriedade e clareza, quando o consultor empresarial John Elkington, apresentou o conceito “*triple bottom line*”, com o intuito de propor às organizações que, para serem sustentáveis, deveriam equilibrar seus objetivos, sendo financeiramente viáveis, ambientalmente responsáveis e socialmente justas (SILVA, 2023).

Sendo assim, a sustentabilidade empresarial refere-se à capacidade das empresas de desenvolverem suas atividades de maneira que satisfaçam as necessidades econômicas e sociais da atualidade ao passo que não comprometem o meio ambiente e os recursos disponíveis para as gerações futuras. Pode-se dizer que tal conceito é uma evolução do modelo tradicional de negócios, o qual possuía enfoque quase exclusivo no lucro e crescimento econômico, surgindo assim, uma abordagem equilibrada, que considera os impactos sociais e ambientais das operações empresariais. Dessa forma, as indústrias cada vez mais atrelam as preocupações ambientais e sociais às suas estratégias de negócios, com o intuito de compatibilizar o desenvolvimento econômico com a preservação do meio ambiente e bem-estar das comunidades (UCHÔA; CARVALHO, 2024).

Nesse sentido, é possível que uma empresa industrial melhore seu desenvolvimento, reputação social, imagem empresarial e geração de rendimentos econômicos a longo prazo quando opera sob os termos reais de sustentabilidade. O processo geral utilizado para o desenvolvimento do conceito de competitividade empresarial em termos sustentáveis implica em fatores como: a identificação dos objetivos e metas adequadas às características de cada organização; a definição de

planos estratégicos de ação; a geração de um sistema de indicadores que mostre as informações derivadas da atividade empresarial; e por fim, a aplicação de avaliações de seu comportamento (ÂNGULO; OCHOA, 2023).

Faz-se necessário sinalizar que o design das estratégias e ações é distinto para cada empresa, uma vez que depende dos resultados de um diagnóstico prévio, com intuito de demonstrar suas deficiências, potencialidades e recursos. Nesse contexto, é possível inferir que a reutilização dos resíduos industriais como matéria prima nos processos produtivos ou ainda a inovação produtiva baseada em outras estratégias eco eficientes são ações que fortalecem a responsabilidade ambiental de qualquer indústria (ÂNGULO; OCHOA, 2023).

4.2.1 Sustentabilidade na indústria da construção civil

De acordo com os dados do Panorama dos Resíduos Sólidos de 2022 da ABRECON é possível inferir que o setor da construção civil é responsável por grande parcela dos resíduos sólidos, uma vez que naquele ano, foram coletados mais de 48 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) pelos municípios brasileiros.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (BRASIL, 2010), os resíduos sólidos deveriam possuir destinação final ambientalmente adequada. Em suma, a destinação correta dos resíduos varia em função de sua classe, estando relacionada à cinco termos, sendo eles a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético.

Nesse sentido, surge a necessidade de implementar soluções para mitigar os impactos negativos causados pelas construções e demolições, que consequentemente impulsionam o desenvolvimento de estudos nas áreas de tecnologia de construções e novos materiais (CARVALHO *et al.*, 2023).

Ademais, o cimento, material altamente consumido para execução de obras, apresenta-se como agente nocivo ao meio ambiente tanto pela liberação de gases do efeito estufa em sua fabricação, quanto pela geração de resíduos em toda cadeia, incluindo o descarte inadequado de suas embalagens (CARVALHO *et al.*, 2023).

4.2.2 Sustentabilidade aplicada à indústria cimenteira

A indústria cimenteira exerce atividade com elevado potencial poluidor, sendo os impactos ambientais relacionados ao processo produtivo do cimento presentes em todas as suas fases, desde a extração, produção e até sua disposição final. Havendo fontes de poluição em todas as etapas do processo como na moagem e homogeneização das matérias-primas, na clínquerização, no forno rotativo e resfriamento do clínquer, na moagem do clínquer, nas adições e produção de cimento, além de seu ensacamento e expedição do produto (SANTOS, 2019).

A Resolução Conama nº 1/86 (1986), considera impacto ambiental toda e qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas, que direta ou indiretamente, afetam: as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais.

De acordo com o projeto *“Cement Technology Roadmap Brazil 2050”*, elaborado com o apoio da Agência Internacional de Energia (IEA), da Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI), da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), há uma expectativa de redução da disponibilidade de escória de alto-forno e cinzas volantes no longo prazo. Principais adições incorporadas aos cimentos brasileiros, isso forçará o setor da construção civil a buscar soluções alternativas (SNIC, 2019).

Concomitante a isso, a alteração ocorrida em 2018 na NBR 16697 - Cimento Portland, marcou uma mudança no cenário industrial brasileiro, uma vez que deixou de priorizar a composição fixa e passou a priorizar o desempenho do material, somando a isso o fator sustentabilidade. Isso porque, tal mudança trouxe a flexibilização da produção, abrindo espaço para materiais alternativos, maior competitividade, redução de impacto ambiental e alinhamento com normas internacionais, como a EN 197-1 da Europa (BERGHE, 2025).

Dessa forma, após as mudanças das normativas, é possível utilizar menor quantidade de matéria prima como rochas carbonáticas, e, conseqüentemente, emitir menor quantidade de CO₂ por tonelada de cimento produzido. Ademais, as adições tendem a melhorar propriedades dos materiais cimentícios (PEREIRA, 2012).

4.3 INDÚSTRIA CIMENTEIRA

A metade do século XIX foi marcado pelo desenvolvimento de inúmeros setores econômicos, como as indústrias têxteis, de algodão, de papel e o setor bancário. Embora a primeira usina cimenteira instalada no Brasil, a Rodovalho, tenha iniciado sua operação nesse mesmo lapso, a indústria cimenteira sofreu diversas paralisações e reativações. Isso ocorreu pois, diferentemente dos setores supracitados, havia uma distância significativa entre a matéria prima extraída e a indústria, visto que até o início do século XX os meios de transporte eram pouco desenvolvidos no país, o que tornava o deslocamento, tanto da matéria prima, como do produto final, custosos (DA SILVA, 2022).

Conforme Santos (2005), haviam quatro fatores que dificultavam a consolidação da indústria cimenteira, sendo eles: a ausência da matéria prima nas proximidades da unidade fabril; a distância desta mesma matéria prima, uma vez que as principais reservas de calcário eram afastados dos potenciais mercados consumidores que se concentravam, à época, no Rio de Janeiro e São Paulo; o transporte pouco desenvolvido no período, encarecendo a locomoção; e, a facilidade na importação do cimento, uma vez que o mesmo não possuía tarifa alfandegária no período. Tais fatores desestimulavam qualquer continuidade do pioneirismo da indústria cimenteira no Brasil.

Somente no final da década de 1920, ocorreu a primeira implantação definitiva de uma indústria cimenteira brasileira, por meio da operação da Companhia Brasileira de Cimento Portland (CBCP), cuja produção possuía capacidade para 60 mil toneladas e o controle acionário era realizado por canadenses e capitais nacionais. Ademais, por este modelo industrial possuir um amplo planejamento, diferentemente dos modelos antigos, a mesma foi instalada no Bairro Perus, em São Paulo, o que a deixaria próxima tanto das principais reservas de calcário, quanto dos maiores centros consumidores de cimento da época, tendo em vista as transformações urbanas que ocorriam na região paulista (SANTOS, 2023).

4.3.1 Processos de produção da indústria cimenteira do Brasil

Recentemente, tem-se discutido bastante sobre a indústria do cimento, especialmente em relação ao seu processo de produção, uma vez que estes

contribuem significativamente para a criação de impactos ambientais e sociais. Esses impactos afetam tanto o meio ambiente quanto os trabalhadores dessa área e as comunidades que residem nas proximidades dessas fábricas. Assim, para uma compreensão mais aprofundada desses efeitos e suas causas, é fundamental analisar o processo e a cadeia de produção desse produto (SANTOS, 2023).

O cimento pode ser produzido tanto em plantas industriais interligadas como em instalações de moagem separadas ou plantas de mistura. O que diferencia os formatos de produção é que, para o primeiro, as plantas industriais estão interligadas, e, conseqüentemente, o transporte do calcário extraído das minas até a área industrial é facilitado. Já para o segundo formato, há uma tendência em adquirir o clínquer de unidades integradas (SANTOS, 2023).

De acordo com Santos (2020), pode-se dividir o processo de produção do cimento em oito etapas, sendo elas:

Extração: O processo inicia-se com a extração das matérias-primas nas pedreiras de rochas calcárias e argilas. Estas, são extraídas por meio de explosivos e por processos mecânicos, utilizando as escavadeiras, conforme a Figura 1. Em seguida, os materiais são transportados, geralmente por caminhões, até as instalações da britagem. A energia incorporada nesta fase dependerá da metodologia utilizada na extração, somados aos combustíveis de todos os equipamentos utilizados nesta fase e no transporte, como tratores, pás carregadeiras, caminhões e outros, dependendo da distância do local de extração e o complexo industrial (NEVILLE, 2013).

Figura 1 - Extração de Calcário e Argila.

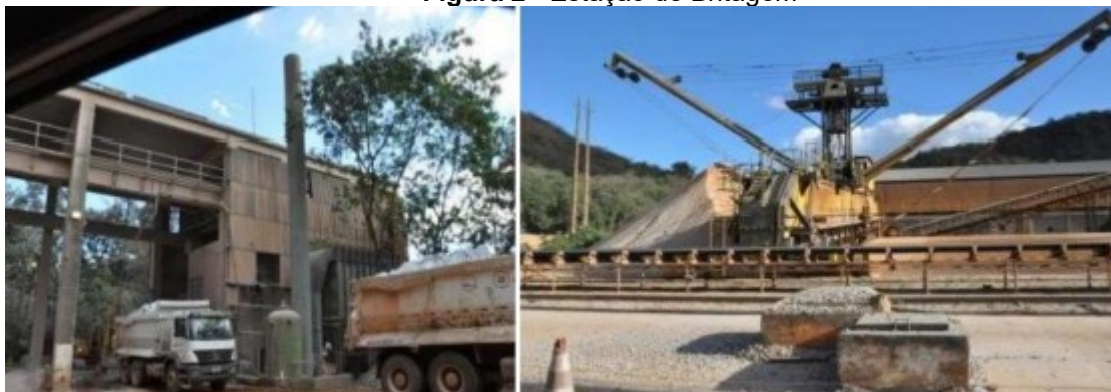


Fonte: Santos, 2020.

Britagem, Pré Homogeneização e Dosagem: A matéria prima extraída é transportada até as instalações da britagem (Figura 02), na qual os blocos são reduzidos a diâmetros menores que 90 mm. Após a etapa de britagem, o calcário e a

argila passarão pelo processo de pré-homogeneização, antigamente este processo era feito por via úmida. Todavia, como o consumo energético para evaporação da água contida na mistura é maior se comparado ao processo via seca, cerca de 99% das indústrias de cimento do Brasil atualmente operam pelo sistema seco (SANTOS, 2020).

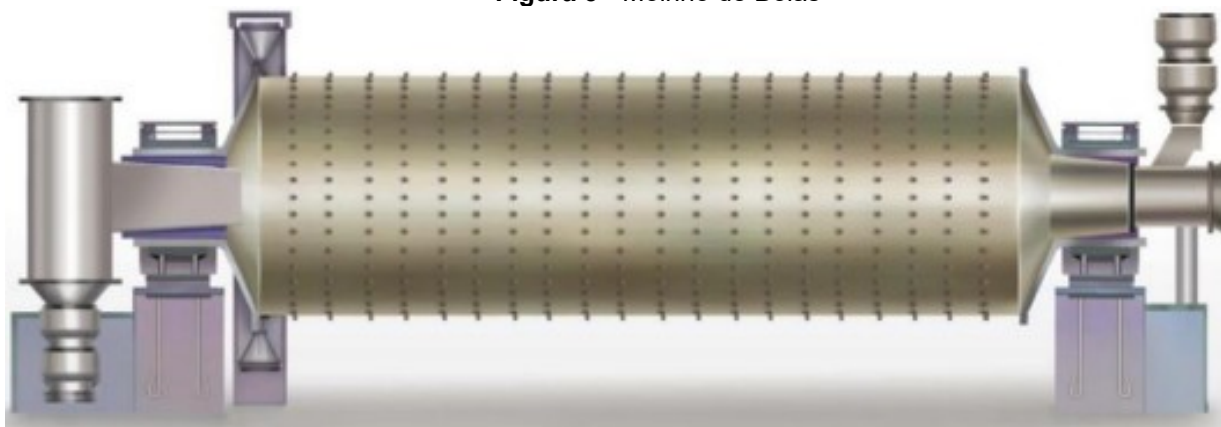
Figura 2 - Estação de Britagem



Fonte: Santos, 2020.

Moagem e Homogeneização da Mistura Crua: A mistura das matérias-primas necessita de um processo para reduzir o tamanho de suas partículas. Esse processo de moagem é feito em um moinho de bolas (Figura 3). Tal equipamento consiste em um cilindro horizontal rotativo, com parte de seu interior preenchido de bolas metálicas. Dessa forma, com a movimentação de tais bolas metálicas no interior do moinho, as partículas são fragmentadas através de três mecanismos principais, sendo eles: impacto, compressão e cisalhamento, podendo estes ocorrerem isoladamente ou em conjunto. O produto deste processo pode ser chamado de farinha (SANTOS, 2020).

Figura 3 - Moinho de Bolas



Fonte: Santos, 2020.

Pré-aquecimento: Após a homogeneização, a farinha segue para a torre de ciclone (Figura 4), onde ela será pré-aquecida antes de entrar no forno rotativo. Esse processo, consiste na passagem da farinha por uma série de ciclones verticais, entrando em contato com os gases de exaustão do forno rotativo, capazes de criarem uma contracorrente com a farinha. Tal etapa é responsável por remover a umidade restante na farinha. Dependendo do teor de umidade presente na matéria-prima, uma torre de ciclone pode ter até 6 estágios de ciclones, com aumento da recuperação de calor com cada estágio extra (NEVILLE, 2013).

Figura 4 - Pré-aquecedor



Fonte: Santos, 2020.

Pré-calcinação: Nessa etapa, a farinha pré-aquecida entra no pré-calcinador (Figura 5), que consiste em uma câmara de combustão na qual o material permanece em uma temperatura de aproximadamente 800°C de 30 segundos a 1 minuto. Dentro dessa câmara ocorre cerca de 90% da reação de calcinação, que se resume na transformação do calcário em óxido de cálcio (CaO). Todavia, para garantir uma temperatura constante no local, somente parte da calcinação ocorre no pré-calcinador. Se a calcinação se completasse nesta etapa, seria difícil controlar a temperatura com que o material entra no forno (NEVILLE, 2013; SANTOS, 2020).

Adição e moagem do clínquer: Após resfriamento, o clínquer é moído junto com outras matérias primas, novamente pelo moinho de bolas (Figura 07). Os aditivos utilizados são o gesso, argila e o calcário, armazenados em silos separados. A quantidade que é adicionada de cada um deles no clínquer diferencia os tipos de cimento Portland produzidos, sendo que o gesso é o único aditivo que está sempre presente na mistura (NEVILLE, 2013). O gesso é adicionado às misturas com o intuito de evitar a “pega” instantânea dos cimentos, logo do seu contato com a água (HELENE, TUTIKIAN, 2005).

Figura 7 - Moagem de Clínquer

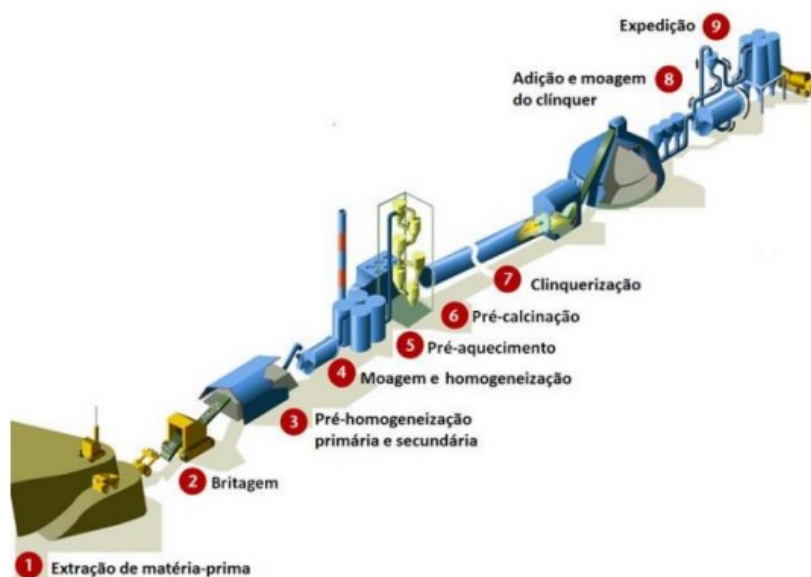


Fonte: SNIC, 2020.

Expedição: Após as etapas supracitadas, o cimento produzido é comercializado de duas maneiras: a granel, ou em sacos de 40 ou 50 kg, dependendo do tipo de cimento. No caso dos sacos, o ensacamento é feito automaticamente por máquinas que enchem os sacos de papel Kraft até atingirem o peso e formato ideais (SANTOS, 2020).

Resumidamente, segundo Santos (2023), o processo de produção do cimento segue as etapas conforme a Figura 08.

Figura 8 - Principais etapas do processo de fabricação do cimento



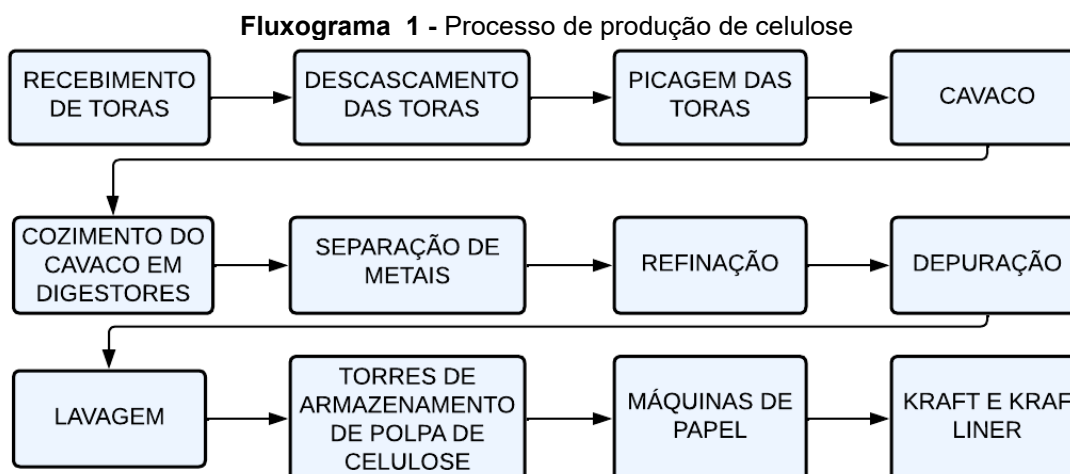
Fonte: Santos, 2020.

4.4 PAPEL KRAFT

O processo Kraft é o principal meio de produção de celulose, utilizado mundialmente devido à sua versatilidade, cozimento contínuo com mínimas perdas químicas e máxima eficiência energética (CORREIA, 2010).

De acordo com Faostat (2021), a produção global de celulose química por meio do processo Kraft atingiu 148 milhões de toneladas, dos quais 42 milhões de toneladas foram de celulose não branqueada e 106 milhões de toneladas foram de celulose branqueada no ano de 2021.

As etapas envolvidas no processo de obtenção de papel Kraft seguem, em linhas gerais, o que está demonstrado no Fluxograma 1.



Fonte: Autora, 2025.

4.4.1 Matéria prima

A principal fonte de matéria-prima de celulose para fabricação de papel é a madeira, sendo esta, escolhida de acordo com o tipo da fibra e utilização final. O *Eucalyptus spp.*, de origem folhosa, possui fibra curta, com comprimento de 0,5 a 2 mm, e é utilizado para fabricação de derivados de papéis em cadernos, blocos de notas, lenços, papéis higiênicos, guardanapos e outros materiais que precisam ter características macias e de boa absorção. Em contrapartida, o *Pinus spp.* de origem conífera possui fibra longa, apresenta fibras com 2 e 5 mm, sendo utilizado em materiais que necessitam de maior resistência, como o papelão ondulado, papel cartão e sacos de papel, sendo estes últimos fabricados com papel Kraft (TIENEN, 2023).

Genericamente, a madeira é formada por celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e outros compostos orgânicos e inorgânicos minoritários de baixa massa. A Tabela 1 demonstra a constituição das madeiras de folhas curtas, representadas pelo *Eucalyptus spp.*, e de folhas longas, como o *Pinus spp* (KLOCK *et al.*, 2005).

Tabela 1 - Composição média dos constituintes das madeiras de folhas curtas e folhas longas

CONSTITUINTE	% em fibras curtas	% em fibras longas
Celulose	45 ± 2%	42 ± 2%
Hemicelulose	30 ± 5%	27 ± 2%
Lignina	20 ± 4%	28 ± 2%
Extrativos	3 ± 2%	5 ± 3%

Fonte: Adaptado de Fengel e Wegener, 1989.

Analisando a tabela supra, é possível inferir que a celulose é o principal componente da parede celular de fibras, sendo este um polímero linear de alto peso molecular, podendo ser dividida em regiões cristalinas, que são ordenadas e rígidas e não cristalinas, que são amorfas e flexíveis. Dessa forma, é possível conferir diferentes propriedades físicas e químicas às diferentes madeiras (KLOCK *et al.*, 2005).

Tendo em vista a estrutura estável, rígida e resistente da celulose, esta torna-se especialmente útil para a fabricação de diversos materiais. Além disso, apresenta outras propriedades atrativas como uma alta área de superfície específica, baixa densidade, renovabilidade biodegradabilidade, biocompatibilidade e baixa citotoxicidade (CHEN *et al.*, 2021).

Já a hemicelulose, é composta por cadeias mais curtas de diversos tipos de hexoses (como glicose, manose e galactose) e pentoses (como xilose e arabinose). Essas cadeias, conferem propriedades benéficas para a produção de papel, uma vez que aumentam a capacidade de absorver água, reduzem o tempo e a energia necessária na etapa de refinação, além de aumentar a interação química entre as fibras, o que resulta em uma maior resistência à tração e melhor desempenho em termos de porosidade (KLOCK *et al.*, 2005).

Sendo assim, é possível inferir que é preferível a escolha do *Pinus spp.*, como matéria prima para a produção de papel Kraft, uma vez que apresenta maiores percentuais de celulose, conferindo a rigidez necessária para a produção dos sacos de papel (TIENEN, 2023)

4.4.2 Preparo da madeira

O preparo da madeira para a produção do papel inicia-se no pátio da fábrica de celulose, na qual as cascas das toras de madeira são removidas por meio de um descascador. Tais cascas, não são benéficas para o processo seguinte, a polpação, pois consomem reagentes e comprometem a qualidade da massa celulósica. Estas serão descartadas, porém, utilizadas na indústria de combustíveis (CASTRO, 2009).

Após serem descascadas e lavadas, as toras são encaminhadas para os picadores, onde são transformadas em fragmentos conhecidos como cavacos. As dimensões ideais para os cavacos variam entre 15 a 20 mm de comprimento e 3 a 6 mm de espessura. Durante o processo de polpação, o tamanho e a distribuição dos cavacos são cruciais, pois influenciam a penetração dos reagentes durante o cozimento e ajudam a reduzir a quantidade de rejeitos (TIENEN, 2023).

Em seguida, as peneiras vibratórias fazem a classificação e direcionamento do cavaco, encaminhando os que estiverem fora da especificação para o silo de biomassa para geração de energia através da caldeira. Enquanto os aprovados serão encaminhados para os digestores onde acontecerá o cozimento, através de uma rampa transportadora (MARTINS, 2022).

4.4.3 Polpação

Para obter a celulose é necessário a separação das fibras da madeira, esse processo de separação é chamado de polpação. De maneira geral, os diferentes processos utilizados na separação das fibras são classificados em: mecânico, químico e semi-químico. Os processos químicos são os mais utilizados, uma vez que consistem na individualização das fibras de madeira no digestor com utilização de reagentes químicos em condições específicas de concentração dos reagentes, temperatura, pressão e tempo, etapa popularmente conhecida como cozimento (SMOOK, 1989).

O processo químico mais utilizado é o processo alcalino, conhecido como "Kraft", no qual se utiliza solução de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) como reagentes químicos deslignificantes. Durante um cozimento, o Kraft convencional é dissolvido, tornando-se aproximadamente, 80% de lignina, 50% de hemicelulose e 10% de celulose, o menor percentual ocorre devido difícil acessibilidade dos íons hidróxido nas regiões cristalinas da celulose (SMOOK, 1989).

Após o cozimento, a polpa segue para sistema de depuração para remoção dos sólidos de maiores dimensões (nós de madeira, palitos, cavacos não cozidos). O aceite da depuração é encaminhado para os filtros de lavagem para remoção do licor aderente na massa, chamado de licor negro, nele estão presentes os extrativos, não interessantes para o papel. O licor negro residual segue para a evaporação e posteriormente é queimado na caldeira para geração de energia e vapor, além de promover a recuperação dos produtos químicos do cozimento (TIENEN, 2023).

4.4.4 Processo de produção do papel Kraft

Na máquina de papel a polpa de celulose passa por um processo de preparação a partir das etapas de refinação, formulação e depuração. Na sequência essa mistura é distribuída sobre uma tela formadora para desaguamento e segue para seção de prensagem e secagem. Desta forma, percebe-se que após a preparação da polpa, as demais etapas têm como objetivo remover a água e formar a folha de papel na faixa de umidade solicitada pelo cliente (TIENEN, 2023).

A refinação é um tratamento mecânico aplicado à polpa de celulose com o intuito de aprimorar a ligação entre as fibras e obter propriedades físicas essenciais

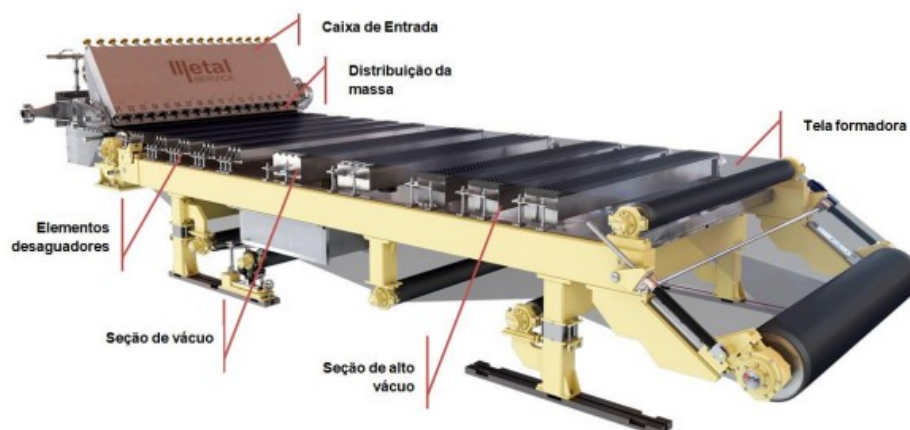
para a produção de papel, como o índice de retenção de água, drenagem na mesa de formação da folha, resistência mecânica, porosidade e boas características de impressão no papel final (BAKER, 2000).

Após o refinamento, é feita a preparação da mistura com diferentes percentuais de fibras curtas, fibras longas, refugo do processo e outros materiais solicitados pela indústria ou pelo cliente. Durante essa etapa, uma variedade de produtos químicos é adicionada para alcançar as características desejadas no papel e para eliminar ou controlar problemas operacionais. Essa fase pode ser realizada de forma contínua ou em bateladas (TIENEN, 2023).

A etapa de depuração envolve um tratamento mecânico para remover impurezas da massa fibrosa, como cavacos, palitos, plásticos, areia e partículas metálicas. Um bom desempenho na depuração é fundamental para garantir a qualidade do papel e o desempenho da máquina (MARTINS, 2022).

Após a preparação da massa, inicia-se a primeira etapa da máquina de papel, a seção de formação, que é composta pela caixa de entrada e pela mesa plana, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Processo simplificado do funcionamento da seção de formação (caixa de entrada e mesa plana)



Fonte: Tienen, 2023.

A caixa de entrada tem a função de distribuir de maneira homogênea a suspensão fibrosa ao longo da tela de formação da folha, mantendo um fluxo volumétrico constante e uma concentração uniforme. A partir da caixa de entrada, começa o processo de transformação de uma solução de fibras celulósicas, cargas minerais e aditivos, diluída em água, com uma consistência média entre 0,2% e 1,0%,

em uma forma estruturada que resultará na folha de papel. A caixa de entrada promove a distribuição sobre a tela formadora com o ângulo de incidência e a localização correta ao longo de toda a largura da máquina, evitando variações de fluxo e consistência, o que é crucial para a qualidade do produto final (TIENEN, 2023).

Já a mesa plana, que suporta a tela de formação da folha, tem como objetivo remover o máximo possível de água das fibras por meio da drenagem. Uma área plana horizontal é formada a partir do apoio da tela sobre os rolos. Essa tela desliza a uma velocidade constante e contínua sobre os rolos. Na parte inicial do setor plano, a suspensão das fibras, com consistência média entre 0,2% e 0,8%, é distribuída pela caixa de entrada. A tela formadora atua como elemento de suporte e filtração da massa; após percorrer a extensão da mesa plana, a folha formada passa por uma série de elementos desaguadores que facilitam o processo de drenagem, tanto por gravidade quanto pela ação das garrafas de vácuo, seguindo para a prensagem com uma consistência em torno de 20% (TIENEN, 2023).

A seção de prensagem continua o processo de remoção de água da folha e melhoria de sua lisura. A prensagem é baseada na mecânica da folha de papel, que é colocada em contato com feltro entre dois rolos, combinada com a sucção de água pelo rolo inferior. Esse processo resulta em um aumento do teor de sólidos sem fraco o entrelaçamento das fibras (MARTINS, 2022).

Os feltros, que são produtos têxteis usados na seção de prensagem, desempenham um papel fundamental ao suporte físico, transporte e extração da água da folha, devido à sua capacidade de absorção. Além disso, eles também foram destacados para o acabamento e as propriedades físicas da folha (BAKER, 2000).

Na etapa seguinte, a secagem, a água é removida por evaporação por meio de uma aplicação de calor. Esse processo ocorre por meio de mecanismos de transferência de calor e de massa, que estão inter-relacionados e se complementam. Durante esta operação, pode haver impacto na estrutura e no acabamento superficial do papel, devido à ligação das ligações entre as fibras e à alteração das características da superfície da folha, o que influencia diretamente nas propriedades de resistência do papel. Por fim, o papel seco, com a umidade adequada solicitada pelo cliente, será enrolado e estará pronto para uso (TIENEN, 2023).

4.5 PISOS INTERTRAVADOS

4.5.1 Histórico

À medida que o tempo avançou, as comunidades reconheceram a urgência de criar vias, atalhos e estradas como meio de superar as consideráveis distâncias que separavam diversos assentamentos. Esse esforço visava estabelecer conexões eficazes e promover a comunicação entre essas localidades distintas (BEZERRA, 2024).

Os povos Etruscos, viviam na Itália no período de 800 a 350 a.C., e foram reconhecidos como pioneiros na construção de vias para o transporte de cargas e pessoas entre vilas e colônias, empregando técnicas inovadoras para conectar extensas distâncias, moldando as ruas das cidades com até 15 metros de largura. Para a pavimentação dessas vias, adicionavam pedras de mão juntamente com um material mais fino. Essa abordagem tinha como objetivo proporcionar maior segurança à população, especialmente em condições de presença de água na superfície (BARROS, 2025).

Posteriormente, os Romanos, herdeiros do vasto conhecimento Etrusco, desempenharam um papel crucial na expansão de seu império. A construção das vias romanas contava com a adaptação à disponibilidade de materiais, clima e topografia, sendo projetadas em conformidade com sua importância estratégica, especialmente no que diz respeito ao expansionismo de seu império (BEZERRA, 2024).

Os revestimentos das vias romanas geralmente consistiam em solos arenosos misturados com pedras naturais. Nas vias mais movimentadas, empregavam pedras talhadas manualmente para proporcionar maior durabilidade e resistência (BARROS, 2025).

A figura 10 mostra a *Via Appia Antica*, uma das primeiras vias construídas pelos Romanos.

Figura 10 - Via Appia Antica

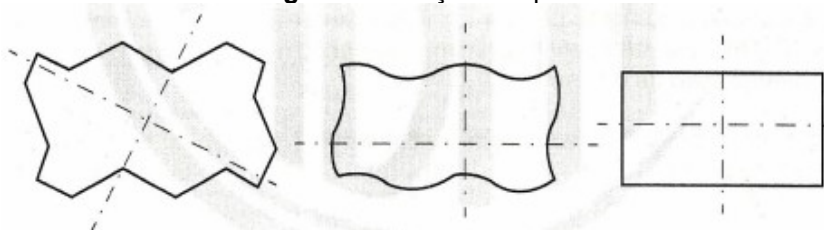
Fonte: Bezerra, 2024.

4.5.2 Tipos produzidos

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), o piso intertravado é considerado um pavimento flexível, o qual a estrutura é constituída por uma camada de base, acompanhada por outra de revestimento. É composto por peças de concreto sobrepostas em uma base assentada, cujas juntas são preenchidas por material de rejuntamento. Nesse sentido, o intertravamento de tais peças é obtido através da contenção das mesmas (BINS *et al.*, 2025).

Existem diversos formatos de pisos intertravados e são classificados em quatro grupos distintos de acordo com a norma:

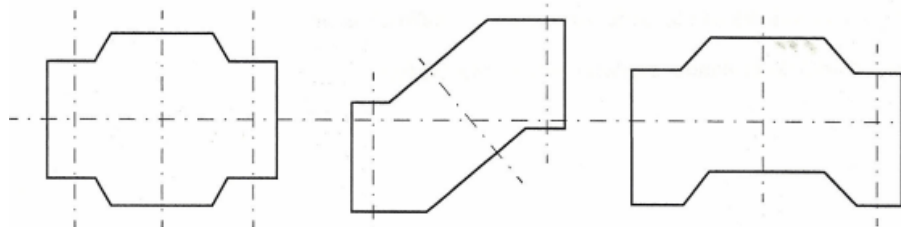
Peças de concreto do tipo I: é composto por peças de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinha de peixe, conforme a Figura 11 (ABNT, 2013).

Figura 11 - Peças do tipo I

Fonte: NBR 9781, 2013

Peças de concreto do tipo II: é caracterizado por peças de concreto com formato único, diferente do retangular e que só podem ser assentadas em fileiras, conforme a Figura 12 (ABNT, 2013).

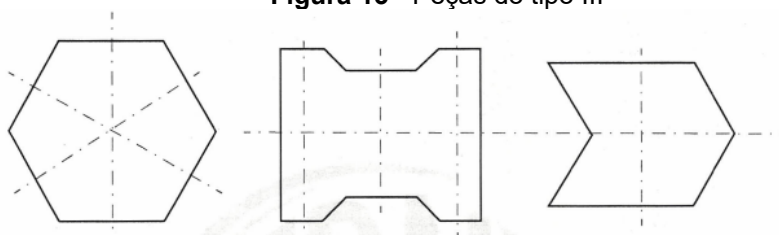
Figura 12 - Peças do tipo II



Fonte: NBR 9781, 2013

Peças de concreto do tipo III: trata-se de peças de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triedros, etc., com peso superior a 4 kg, conforme a Figura 13 (BINS, 2025).

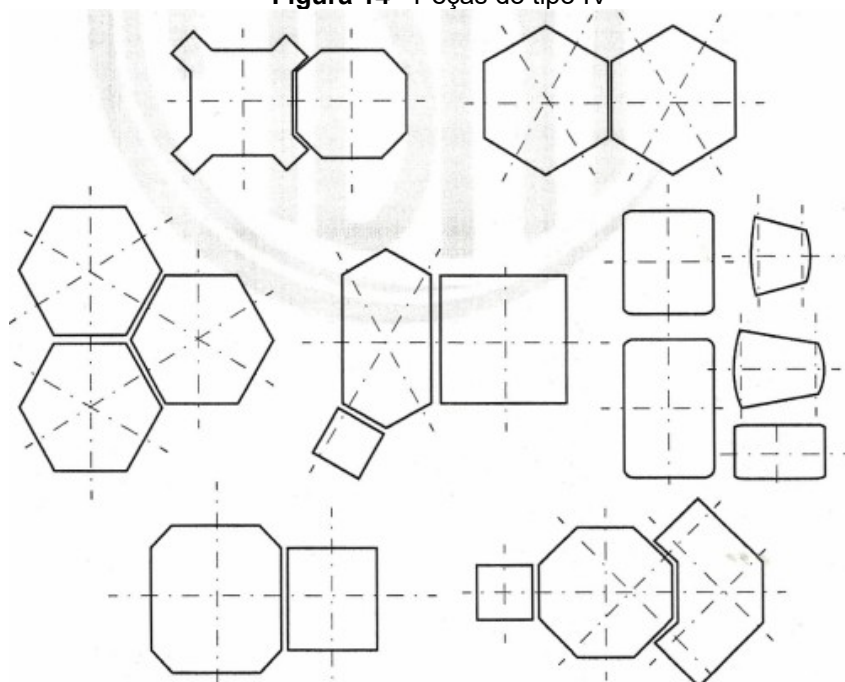
Figura 13 - Peças do tipo III



Fonte: NBR 9781, 2013

Peças de concreto do tipo IV: é formado por um conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento, conforme a Figura 14 (BINS, 2025).

Figura 14 - Peças do tipo IV



Fonte: NBR 9781, 2013

4.5.3 Processo produtivo

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), os materiais a serem utilizados na fabricação de pavimentos intertravados são, fundamentalmente, aglomerantes, agregados e água, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos. Nesse contexto, o concreto utilizado na produção de pavers é constituído pelos mesmos insumos do concreto convencional, apresentando como principal diferença o teor de umidade da mistura (TAKAHASHI *et al.*, 2021).

O processo comumente utilizado no Brasil e no mundo é o vibro-prensado, que consiste em fabricar os artefatos de concreto, como pavers, blocos de vedação, através da compactação e moldagem do concreto por meio de vibração e pressão. Tal técnica industrial resulta no melhor desempenho estético do produto (BINS, 2025).

Diferentemente do método tradicional, que utiliza largamente os processos manufaturados, este é feito em ambiente industrial, com o auxílio de máquinas específicas para certa finalidade, conforme a Figura 15. O cimento e os agregados são pesados com precisão, o concreto é colocado nas formas, passa pelo processo de vibração e prensagem simultaneamente, e, em seguida, é desformado e levado para o processo de cura. Este tipo de técnica garante maior agilidade e produtividade

possibilitando também maior controle das variáveis durante todo o processo (TAKAHASHI *et al.*, 2021).

Figura 15 - Vibro prensa para fabricação de paver



Fonte: BINS, 2025

Inicia-se com a mensuração por meio das massas dos materiais presentes do traço, uma vez que é mais adequado para evitar grandes variações, com exceção de águas e aditivos, que são mensurados pelos volumes. Assim, promove-se a mistura dos materiais a fim de atingir a perfeita homogeneização, sendo de suma importância para manter a qualidade da produção (BINS, 2025).

Após essa operação, este material é levado à maquinários chamados vibroprensas, que depois de depositar o traço nos moldes, ocorre o processo de vibração acompanhada de prensagem. A vibração é encarregada de adensar a mistura e remover a maior quantidade de vazios possível, ao passo que a prensagem promove o adensamento, moldagem e controle da altura dos blocos. Esta moldagem a seco promove alta capacidade de misturar e aumentar sua resistência e durabilidade, além de que permite a desforma imediata, garantindo produtividade e conseqüentemente a redução dos custos de produção (ABCP, 2010).

4.5.4 Concreto

O concreto é uma mistura composta por aglomerante hidráulico, agregados e água, podendo conter aditivos químicos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, desde que sejam usados em quantidades adequadas (SIRTOLI, 2022).

A tecnologia do concreto possui como objetivo encontrar a proporção ideal entre seus diferentes elementos, de modo a atender às propriedades necessárias (mecânicas, físicas e de durabilidade) e garantir a trabalhabilidade adequada para o transporte, lançamento e adensamento do concreto em diversas aplicações (BASTOS, 2023).

4.5.4.1 Aglomerante Hidráulico

O Cimento Portland é um aglomerante hidráulico empregado na produção dos concretos convencionais. A contribuição do cimento para os concretos e argamassas está voltada quanto a sua resistência mecânica. Além disso, por ser composto por finas partículas promove a retenção da água na mistura e a plasticidade. Quanto maior a quantidade de cimento presente na mistura, maior será a retração, por outro lado, maior também será a aderência à base (SIRTOLI, 2022).

Os diferentes tipos de cimento disponíveis no mercado são classificados pela sigla e pela classe de resistência à qual pertencem. A sigla é representada por CP, que significa Cimento Portland, acrescido de algarismos romanos de I a V (ABCP, 2002).

4.5.4.2 Agregados

Segundo a ABNT NBR 9935, os agregados são materiais granulares, geralmente inertes, sem forma e volume definidos (ABNT, 2011).

Para construção civil, os agregados são utilizados para produção de argamassas e concretos, preenchendo 85% do volume e, assim, reduzindo o custo da obra sem causar prejuízo à resistência mecânica dos elementos das edificações (PINHEIRO, 2020).

Segundo a ABNT NBR 7211 classifica-se os agregados em miúdo e graúdo, de acordo com o tamanho dos grãos (ABNT, 2009):

- Agregado miúdo: agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de 150 μm .
- Agregado graúdo: agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de 4,75 mm.

Os agregados mais utilizados na construção civil são: rachão, gabião, brita graduada, brita corrida, pedra (ou brita) 1, pedra (ou brita) 2, pedra (ou brita) 3, pedra (ou brita) 4, pedra (ou brita) 5, pedrisco (ou brita 0), pó de pedra e areia. Esses materiais são classificados de acordo com a distribuição granulométrica descritas pela ABNT NBR 7211 (2009).

4.5.4.3 Água

A água é utilizada com duas funções, sendo elas: proporcionar a reação de hidratação e endurecimento do cimento Portland e homogeneizar a mistura.

Para cada traço de concreto, se estabelece uma quantidade distinta de água a fim de proporcionar trabalhabilidade adequada, de acordo com a sua finalidade, e de garantir a resistência requerida (ABCP, 2002).

Recomenda-se, para a elaboração de misturas com o cimento Portland, a utilização de água potável. Não é aconselhado a utilização de águas contaminadas ou com excesso de sais solúveis. A água para o amassamento de argamassas e concretos deve seguir as recomendações da NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

4.5.5 Propriedades do concreto para peças de pisos intertravados

As propriedades do concreto para blocos de pavimento intertravado possuem algumas particularidades. Dentre as propriedades essenciais, observa-se a resistência à compressão, absorção e consistência. De acordo com Tango (1984), a resistência desejada é alcançada de acordo com o estudo do traço e conseqüentemente a dosagem requerida.

Os equipamentos e o processo de produção empregado, devem resultar na confecção de blocos na qual suas propriedades no estado endurecido satisfaçam às exigências de uso de acordo com as normas, porém com o custo mínimo. Sendo

assim, as propriedades do concreto para blocos intertravados no estado fresco estão relacionadas ao manuseio durante a produção e conseqüentemente, à consistência da mistura. Logo, a consistência da mistura necessária ao concreto para blocos está relacionada ao fato de que na maioria das vezes, quando em produção manual, o concreto utilizado é o virado, portanto a desmoldagem se faz com os blocos ainda no estado fresco, ou seja, a desmoldagem é feita logo após que os blocos são moldados (VILA NOVA, 2023).

Faz-se necessário, que o concreto, sob estas condições, apresente características que determinem a facilidade de moldagem no equipamento e o manuseio após desforma. A consistência requerida ou consistência de moldagem varia em função do equipamento utilizado (TANGO, 1984).

4.5.6 Normativas associadas e requisitos técnicos

A Norma Brasileira ABNT NBR 9781 (2013) - Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio, possui em seu escopo os requisitos e métodos para aceitação de peças de concreto para pavimentação intertravada. Nesse contexto, inúmeras características são analisadas, como a tolerância de dimensão das peças, resistência à compressão, absorção e resistência à abrasão, sendo este último facultativo de acordo com a norma supracitada.

A construção civil exige diversas normas e legislações que regem o modo correto de execução das construções para que não haja problemas futuros. A maioria dessas leis e normas são disponibilizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e para a fabricação de peças de concreto para pavimentação não seria diferente (FILHO, 2018).

A norma ABNT NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – Especificações e métodos de ensaio, se tornou válida a partir do dia 7 de fevereiro de 2013. Nela, são estabelecidos os requisitos e métodos de ensaio exigidos para a aceitação de peças de concreto para a utilização em pavimentação intertravada para ser utilizada por pedestres, veículos dotados de pneus e áreas de armazenamento de produtos em geral (ABNT, 2013).

A norma citada ainda traz várias referências normativas, dentre elas, estão as normas referentes ao cimento Portland, agregados para concreto, aditivos químicos

para concreto, água para amassamento do concreto e a ABNT NBR 15953 – Pavimento Intertravado com peças de concreto – Execução, que é a segunda norma que traz mais sobre pavimentos intertravados (ABNT, 2013).

Há ainda, a ABNT NBR 16416 - Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos (ABNT, 2015), que estabelece os requisitos e procedimentos técnicos para o projeto, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto. Seu principal objetivo é garantir que esses sistemas sejam projetados de forma a permitir a infiltração da água da chuva, contribuindo para o controle do escoamento superficial e a recarga do lençol freático, promovendo, assim, uma infraestrutura urbana mais sustentável.

A norma aplica-se a pavimentos permeáveis de concreto construídos com revestimento de peças de concreto intertravadas, placas de concreto, ou ainda concreto moldado no local (in situ). No que diz respeito às peças intertravadas, a NBR 16416 (ABNT, 2015) apresenta os mesmos requisitos técnicos constantes na NBR 9781 (2013) com relação a dimensões e tolerâncias das peças, resistência à absorção de água, verificação de resistência à abrasão e à ruptura e ainda, ao controle visual de defeitos.

Ambas se diferem em alguns aspectos, uma vez que a NBR 16416 (ABNT, 2015) acrescenta requisitos como a permeabilidade do sistema, o dimensionamento das camadas de base, sub-base e subleito com materiais granulares drenantes, o espaçamento entre peças e material de rejunte, e a manutenção e limpeza periódica. Ademais, nos requisitos de resistência à compressão acrescenta-se o uso de peças intertravadas de concreto permeável para o tráfego de pedestres, para aquelas que resistem a valores maiores que 20 MPa.

4.5.6.1 Tolerância de dimensões das peças

As dimensões e tolerâncias das peças devem atender aos seguintes quesitos:

- Medida nominal do comprimento de no máximo 250 mm;
- Medida real da largura de no mínimo 97 mm na área da peça destinada à aplicação de carga no ensaio de resistência à compressão;
- Medida nominal da espessura de no mínimo 60 mm;

- O índice de forma (relação entre o comprimento e a espessura da peça) para peças de concreto utilizadas em vias com tráfego de veículos ou áreas de armazenamento deve ser menor ou igual a 4 (FIGUEIREDO, 2022)

Os blocos produzidos devem obedecer a tais dimensões para que sejam aceitos e conseqüentemente, executáveis. Ressalva-se que em relação às dimensões existe uma tolerância de 3cm a mais ou a menos, de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013).

4.5.6.2 Resistência à compressão

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), as peças de pisos intertravados devem possuir como valores de resistência característica à compressão aos 28 dias, 35 MPa, no que diz respeito a peças utilizadas para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha e, 50 MPa para peças com esforços solicitados de tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.

De acordo com Fioriti (2007), a norma brasileira NBR 9781 apresenta valores mínimos exigidos que fazem com que os blocos usados na pavimentação tenham que suportar resistências muito elevadas. Todavia, a mesma, não leva em consideração outros usos em que as sobrecargas são pequenas, por exemplo, o uso de blocos apenas para calçadas, ciclovias e praças, onde não ocorre a passagem de carros, exigindo assim uma solicitação com resistência baixa.

4.5.6.3 Absorção

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), a amostra de peças de concreto deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%, não podendo ser aceito nenhum valor individual maior do que 7%.

Para que esses ensaios sejam realizados, a norma estabelece o número de amostras de bloco de concreto de acordo com a Figura 17 abaixo.

Tabela 2 - Amostragem para ensaio

PROPRIEDADE	AMOSTRA
Inspeção visual	6 ^a
Avaliação dimensional	6 ^a
Absorção de água	3
Resistência à compressão	6
Resistência à abrasão	3 ^b

^a: As peças amostradas podem ser utilizadas também para os ensaios de resistência à compressão ou abrasão

^b: Ensaio facultativo

Fonte: Adaptado da NBR 9781, 2013.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi constituída por uma pesquisa literária por meio de estudos publicados em teses, artigos, monografias, livros, sites e dissertações, procurando fornecer estrutura teórica consistente com o intuito de enriquecer o conteúdo do mesmo.

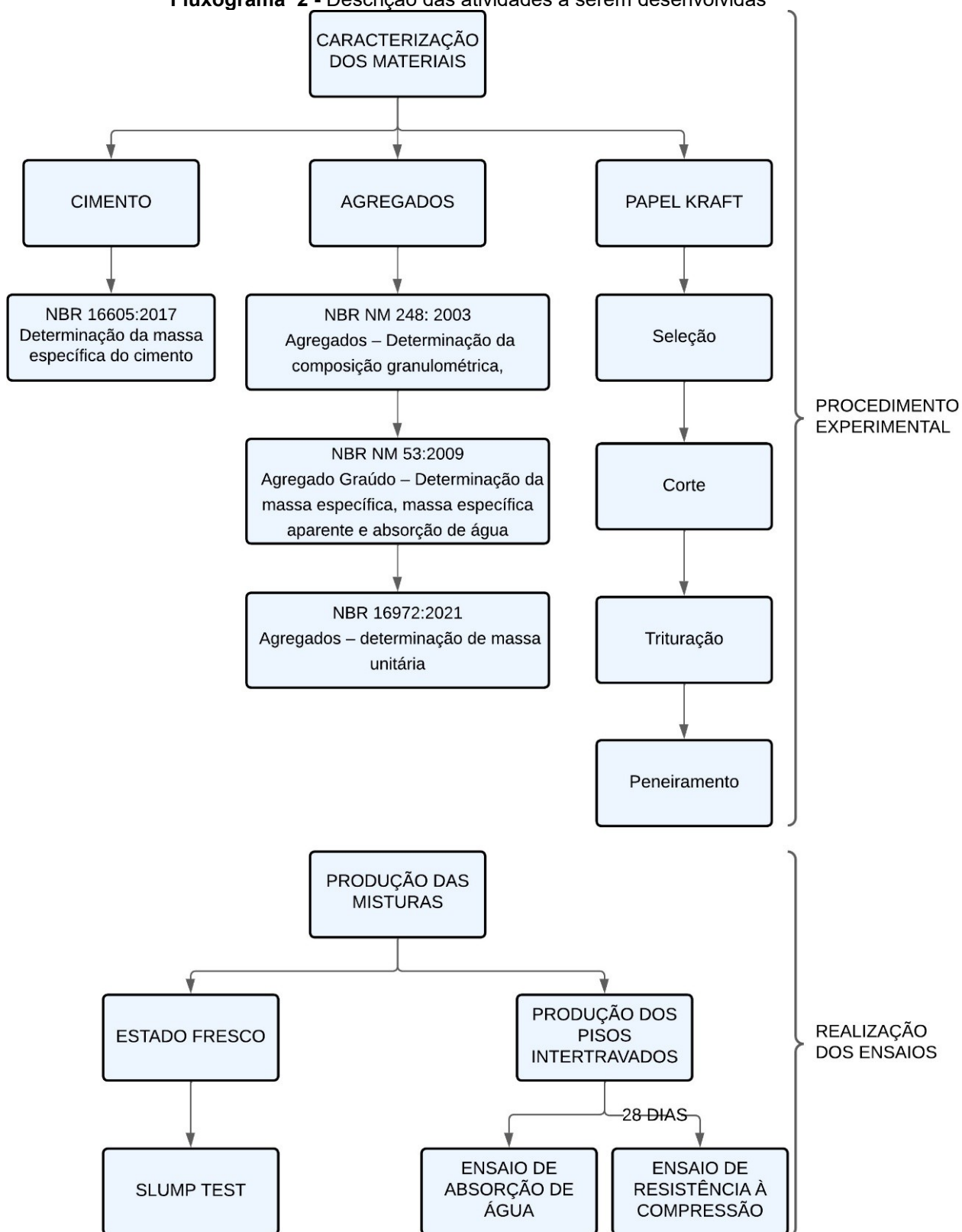
O processo experimental foi desenvolvido tanto no centro de engenharias da faculdade Uniguaçu, em São Miguel do Iguaçu/PR, o qual possui um laboratório específico para os procedimentos de caracterização dos materiais, quanto em uma fábrica de artefatos cimentícios de pequeno porte, também em São Miguel do Iguaçu/PR, a qual possui os equipamentos necessários para a fabricação dos artefatos de concreto. O objetivo geral consiste em avaliar o comportamento da produção de pisos intertravados com a adição de papel kraft.

Para aprofundar o estudo e ampliar o conhecimento, foram realizados testes por meio da confecção de peças de piso intertravado, utilizando o cimento CP V-ARI, agregado miúdo, e agregado graúdo.

Nesse sentido, foram confeccionadas seis peças de pisos intertravados para cada traço, os quais foram submetidas ao ensaio de abatimento no momento de sua produção, absorção de água, compressão e resistividade aos seus 28 dias. Depois de realizados os experimentos foram coletados os dados para análise de resultados.

O Fluxograma 2 a seguir resume os procedimentos e processos que foram realizados no presente trabalho.

Fluxograma 2 - Descrição das atividades a serem desenvolvidas



Fonte: Autora, 2025.

5.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram confeccionadas 30 peças de pisos intertravados com a adição do papel kraft em forma de pelotas, nas proporções de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em relação a quantidade de agregado graúdo. Para tanto, se fez necessário primeiramente a caracterização dos materiais e determinação do traço de referência.

5.1.1 Cimento

Conforme supracitado, foi utilizado o cimento CP V-ARI, mais comumente empregado na indústria de artefatos cimentícios, devido a sua alta resistência nos primeiros dias, podendo ser rapidamente desmoldado.

O Cimento Portland V-ARI (NBR 16697 - 2018) tem como característica principal atingir altas resistências em poucos dias. Em função da maior quantidade de silicato tricálcico (C_3S) presente no CP V-ARI, uma vez que esse composto é o principal responsável pela resistência inicial e a moagem mais fina do cimento.

Normalizado pela NBR 16967 – Cimento Portland – Requisitos (2018), sua composição pode ter no máximo 10% de filler calcário. A indústria, principalmente de pré-fabricados, utiliza o cimento CP V-ARI, pois permite a desforma e movimentação das peças com maior velocidade (FERNANDES, 2019).

5.1.1.1 Massa específica

Para a determinação da massa específica do cimento, foi utilizada a ABNT NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó. O experimento consiste na utilização de um frasco *Le Chatelier*, querosene, uma balança de precisão e cimento seco.

Após a pesagem das amostras cimentícias, ambas com 60g, iniciou-se o ensaio preenchendo o frasco *Le Chatelier* com querosene até uma marca entre 0 cm^3 e 1 cm^3 , registrando essa medida como a leitura inicial V1.

Em seguida, a amostra de cimento foi cuidadosamente colocada dentro do frasco com a ajuda de um funil de haste curta. A adição do cimento foi realizada em

pequenas proporções, garantindo que não ocorresse a aderência do material às paredes internas do frasco acima do nível do líquido.

Após a inserção da amostra, o frasco foi submetido a movimentos pendulares, assegurando que, ao retornar à posição vertical, não aparecessem mais borbulhas de ar.

Figura 16 - Volume final



Fonte: Autora, 2025.

A seguir foi anotado o volume, após adição da amostra no querosene, conforme a Figura 16, e a massa específica foi calculada através da seguinte fórmula:

$$\text{Massa específica} = \frac{M}{V_2 - V_1} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

A qual:

M: Massa em gramas do cimento;

*V*₁: Volume inicial em centímetros cúbicos do querosene;

*V*₂: Volume final em centímetros cúbicos do querosene;

5.1.2 Agregados

Foram utilizados agregados miúdos e graúdos, sendo o primeiro, areia, e o segundo brita 0. A escolha da brita 0 deu-se pelo maior preenchimento do número de vazios, bem como pela melhora estética das peças.

Para determinação da composição granulométrica, foram executados os ensaios a partir das recomendações da NBR 14054 - Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio (ABNT, 2022), da NBR NM 53 (ABNT, 2009) – Agregado Graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, da NBR NM 52 (ABNT, 2009) – Agregado miúdo — Determinação da massa específica e massa específica aparente, e também da NBR 16972 (ABNT, 2021) – Agregados – determinação de massa unitária.

Inicialmente, executou-se a determinação da massa específica e da absorção de água dos agregados, utilizando como cerne a NBR NM 53 (ABNT, 2009) e a NBR 16972 (ABNT, 2021).

O método fundamenta-se no princípio de Arquimedes, no qual o volume de um corpo pode ser obtido a partir da diferença entre sua massa no ar e sua massa quando submerso em água. Para a execução do ensaio, tanto para o agregado graúdo (brita 0), quanto para o agregado miúdo (areia fina), foi inicialmente realizada a secagem de ambos em estufa até atingir massa constante, registrando-se esse valor como a massa seca, de acordo com a Figura 17.

Figura 17 - Secagem dos agregados



Fonte: Autora, 2025.

Em seguida, o agregado graúdo foi imerso em água até a completa saturação dos poros permeáveis e, posteriormente, seco superficialmente com pano absorvente, obtendo-se a chamada condição de superfície seca saturada (SSD). Nessa etapa, registrou-se a massa do agregado saturado, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Pesagem do agregado saturado



Fonte: Autora, 2025.

Posteriormente, o agregado graúdo foi pesado ainda saturado, porém totalmente imerso em água, obtendo-se sua massa submersa, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Pesagem do agregado submerso



Fonte: Autora, 2025.

A partir dessas três medições foi possível calcular o volume sólido deslocado, correspondente à diferença entre a massa saturada e a massa submersa.

$$V = M_{sat} - M_{sub}$$

Assim, a massa específica do agregado é determinada pela razão entre a massa seca em estufa e a diferença entre a massa saturada e a massa submersa.

$$\rho = \frac{M_{seco}}{M_{sat} - M_{sub}}$$

Já a absorção de água é calculada pela diferença entre a massa na condição saturada e a massa seca, dividida pela massa seca e multiplicada por 100, expressando-se o resultado em percentual.

$$A = \frac{M_{sat} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100$$

Já para o agregado miúdo, após a imersão da amostra, a secagem superficial, obtendo a condição denominada superfície seca saturada (SSD), foi realizada a pesagem, registrando-se a massa saturada. Posteriormente, o ensaio foi conduzido utilizando-se o frasco de Chapman.

O frasco foi inicialmente preenchido com água até a marca de 200 mililitros, e após, a amostra de areia seca foi introduzida lentamente até o deslocamento do nível da água. A diferença entre as leituras permitiu determinar o volume sólido correspondente à amostra ensaiada.

Concomitante a isso, a determinação da massa unitária foi realizada conforme a norma NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios (ABNT, 2006). A massa unitária pode ser determinada tanto para o material em estado solto quanto para o material compactado, de acordo com o grau de adensamento desejado.

Após o resfriamento à temperatura ambiente, o material foi homogeneizado e preparado para o ensaio. O recipiente utilizado apresenta volume conhecido, conforma a Figura 20.

Figura 20 - Massa unitária dos agregados

Fonte: Autora, 2025.

Para a determinação da massa unitária com o agregado solto, o recipiente foi preenchido sem qualquer adensamento, permitindo que o material caísse livremente de uma altura aproximada de cinco centímetros acima da borda. Em seguida, a superfície foi nivelada utilizando-se uma régua metálica, removendo o excesso de material. Determina-se, então, a massa do recipiente cheio e do recipiente vazio, sendo a diferença entre elas correspondente à massa do agregado contido no volume do recipiente.

A massa unitária é calculada pela razão entre a massa do agregado seco e o volume interno do recipiente, conforme a equação:

$$\rho_u = \frac{m_1 - m_2}{V}$$

A qual m_1 representa a massa do recipiente com o agregado, m_2 a massa do recipiente vazio e V o volume interno do recipiente.

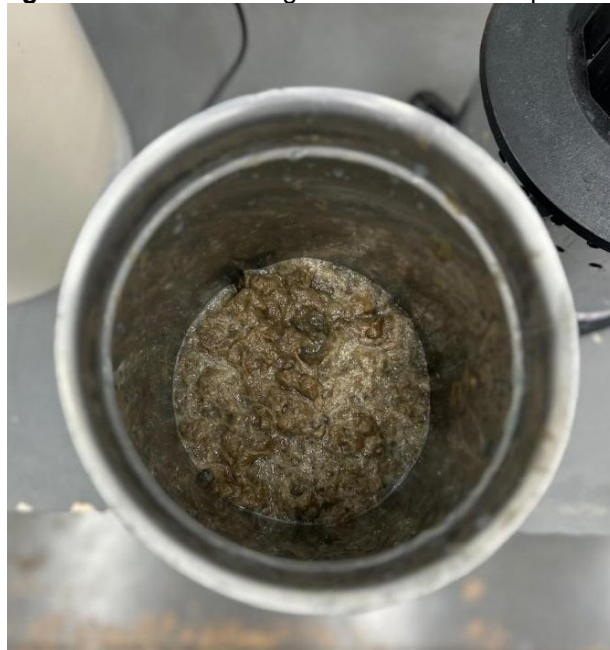
Já para a determinação granulométrica, de acordo com a NBR 14054 - Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio (ABNT, 2022), foram utilizadas peneiras da série normal, para as amostras de agregado graúdo e miúdo, respectivamente, as quais foram agitadas com o auxílio do agitador mecânico.

5.1.3 Papel Kraft

O Papel Kraft foi coletado através das bolsas de cimento utilizadas na empresa de artefatos cimentícios responsável pela fabricação das peças intertravadas e

posteriormente, encaminhadas ao laboratório centro de engenharias da faculdade Uniguaçu. As bolsas foram abertas e passaram pelo processo de corte manual, obtendo pedaços entre 20 a 30 centímetros de comprimento e 5 a 10 centímetros de largura. Em seguida, o papel foi misturado com água e triturado em um liquidificador industrial, até criar uma pasta homogênea, como observa-se na Figura 21.

Figura 21 - Pasta homogênea oriunda do Papel Kraft



Fonte: Autora, 2025.

Em seguida, a pasta foi peneirada, com a ajuda de um tecido conforme a Figura 22, o que impediu a perda de material no processo.

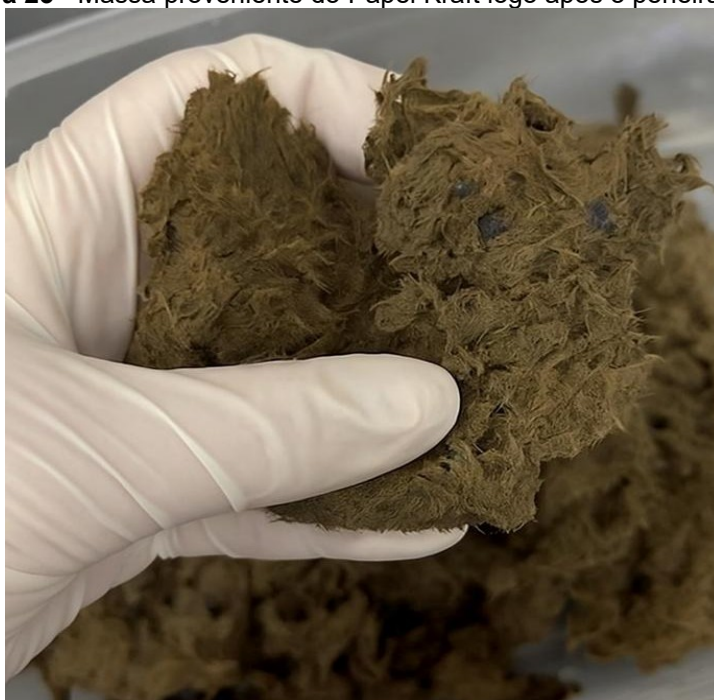
Figura 22 - Peneiramento da pasta



Fonte: Autora, 2025.

O Papel Kraft formou uma massa consistente, conforme a Figura 23. Dessa forma, foi necessário realizar a separação dela manualmente e após, a secagem da mesma em sol pleno por dois dias.

Figura 23 - Massa proveniente do Papel Kraft logo após o peneiramento



Fonte: Autora, 2025.

Após a secagem, o Papel Kraft formou uma espécie de agregado, conforme a Figura 24, haja visto a junção de água, cimento e celulose. Com isso, foi possível delimitar a amostra, para que as pelotas de Papel Kraft utilizadas na confecção das peças intertravadas se assemelhassem aos agregados graúdos. Utilizando a NBR NM

248 (ABNT, 2003), o material passante na peneira 4,75 milímetros – peneira diferencial entre agregados graúdos e miúdos – foram descartados.

Figura 24 - Papel Kraft após o processo de secagem e separação



Fonte: Autora, 2025.

5.2 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Após a caracterização dos materiais, o processo de confecção dos pisos intertravados deu-se com a escolha do traço de concreto. Foi empregado o método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Tal método possui como finalidade a determinação das proporções ideais entre cimento, agregados e água, de modo a obter uma mistura homogênea, de fácil moldagem e com resistência mecânica adequada, atendendo aos requisitos da NBR 9781 (ABNT, 2013) – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio.

Diferentemente dos métodos de dosagem voltados ao concreto plástico, como o método de dosagem racional de IPT/EPUSP, o método ABCP baseia-se em ajustes experimentais, a partir de ensaios práticos com diferentes combinações de materiais, até se obter uma mistura com trabalhabilidade seca, baixa porosidade e resistência adequada à compressão. Trata-se, portanto, de um método empírico e iterativo, em que as proporções são definidas por meio de observação e correção de resultados obtidos em laboratório (RABELLO, *et al.*, 2023).

O processo iniciou-se com a caracterização dos materiais, retro apresentados. Em seguida, estabeleceu-se uma proporção inicial de referência, de 1:3:2,5. A relação água/cimento (A/C) é um dos principais parâmetros controlados e, nesse método, é ajustada de forma a garantir a coesão e compacidade da mistura, sem gerar exsudação ou segregação (ABCP, 2010).

Como o concreto destinado à produção das peças intertravadas possui consistência seca, a quantidade de água utilizada é mínima geralmente, resultando em relações A/C entre 0,30 e 0,50, sendo adotada máxima relação.

Após as verificações, foi possível obter o traço ideal de 1:2:3, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Apresentação do traço pelo método ABCP

	CIMENTO	AREIA	BRITA	ÁGUA
APRESENTAÇÃO DO TRAÇO	1	2	3	0,5

Fonte: Autora, 2025.

Concomitante a produção das massas, foram executados os ensaios de *Slump Test* no estado fresco. Já para o estado endurecido, as 30 peças de pisos intertravados produzidas, utilizando formas clássicas com as dimensões de 6x10x20cm, foram submetidas ao ensaio de compressão após completarem 28 dias, tempo previsto na NBR 9781 (ABNT, 2013).

De acordo com a Tabela 4, a seguir, retirada da NBR 9781 (ABNT, 2013), os pisos intertravados deverão atender valores mínimos de resistência à compressão, de acordo com a solicitação de serviço.

Tabela 4 - Resistência característica à compressão

SOLICITAÇÃO	RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO (f_{pk}) AOS 28 DIAS MPa
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	≥ 50

Fonte: Adaptado da NBR 9781, 2013.

As peças ainda poderão se enquadrar nos requisitos de resistência à compressão da NBR 16416 (ABNT, 2015), para peças de concreto permeáveis, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável

TIPO DE REVESTIMENTO	TIPO DE SOLICITAÇÃO	ESPESSURA MÍNIMA (mm)	RESISTÊNCIA MECÂNICA CARACTERÍSTICA (MPa)	MÉTODO DE ENSAIO
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 35^a$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 20^a$	
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 2,0^b$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 1,0^c$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100,0	$\geq 2,0^c$	

***a*: Determinação da resistência à compressão, conforme ABNT NBR 9781**

***b*: Determinação da resistência à flexão, conforme ABNT NBR 15805**

***c*: Determinação da resistência de tração na flexão, conforme ABNT NBR 12142**

Fonte: Adaptado da NBR 16416, 2015.

Ademais, foram realizados ensaios de absorção de água das peças intertravadas. Foram utilizadas 3 peças de cada traço, as quais também podem passar pelo ensaio de resistência à compressão, de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013).

O ensaio iniciou-se com a preparação dos corpos de prova, removendo todo o pó e partículas soltas e após, as mesmas foram imersas em água, no período de 24 horas, conforme a Figura 25.

Figura 25 - Peças submersas



Fonte: Autora, 2025.

As peças foram retiradas e pesadas, obtendo a massa na condição saturada com superfície seca (SSD). Na sequência, as mesmas foram levadas à estufa, a fim de serem pesadas posteriormente no estado seco.

A absorção de água das peças é dada pela seguinte equação:

$$A = \frac{m_1 - m_2}{m_1}$$

Na qual:

A : é a absorção de cada corpo de prova, expressa em porcentagem (%);

m_1 : é a massa do corpo de prova seco, expressa em gramas (g);

m_2 : é a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

5.2.1 *Slump Test*

O *Slump test*, também conhecido como teste de abatimento, é uma técnica utilizada no intuito de avaliar a consistência e a trabalhabilidade do concreto fresco. Tal teste é fundamental para garantir que a mistura atinja as propriedades desejadas durante a aplicação, como resistência e durabilidade (ABNT, 2018).

O teste foi realizado após a mistura ser obtida, utilizando uma betoneira de 400 litros de capacidade. Após a mistura, foi realizado o ensaio em cada um dos traços, sendo eles: traço de referência e os demais com a substituição do agregado graúdo (brita 0) nas porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20% de Papel Kraft.

O ensaio foi guiado de acordo com as diretrizes estabelecidas na NBR 16889 (ABNT, 2020). Primeiramente o cone de Abrams foi colocado em uma superfície plana e firme.

O molde, após umedecido, foi posicionado sobre a base e o operador se posicionou sobre as aletas, de forma que o molde permanecesse estável.

Após o posicionamento do material, o molde foi preenchido rapidamente com o concreto, em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde. Cada camada foi adensada com 25 golpes com o auxílio de uma haste de adensamento.

O molde, cone de Abrams, foi cuidadosamente retirado na direção vertical, com um movimento constante e rápido, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral. Imediatamente após a retirada do molde, foi medido o abatimento do concreto, determinado pela diferença entre a altura do molde e a altura média do corpo de prova desmoldado.

5.2.2 Desforma e cura das peças intertravadas

O processo de cura do concreto, no que se refere a produção dos pisos intertravados, apresenta como objetivo assegurar a hidratação completa do cimento, evitando a perda prematura de água necessária para a reação de hidratação e prevenindo fissuras superficiais e baixa resistência mecânica (FERNANDES, 2019).

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), que estabelece os requisitos e métodos de ensaio para blocos de concreto para pavimentação, a cura deve ser realizada de modo a manter o material em ambiente úmido ou com controle de temperatura e umidade durante o período inicial de endurecimento. O processo inicia-se logo após a moldagem e desmoldagem das peças, sendo o tempo de cura um fator determinante para o desempenho final do produto.

O método mais utilizado na indústria é a cura úmida em câmara fechada, onde os blocos recém-moldados são empilhados em ambiente controlado, com umidade relativa superior a 95% e temperatura entre 35°C e 60°C, por um período mínimo de 24 horas (FERNANDES, 2019). Todavia, por se tratar de um experimento de menor escala, utilizou-se a cura úmida convencional, na qual as peças foram mantidas

cobertas com lonas plásticas, durante um período de sete dias, garantindo que a água presente na mistura não se evapore rapidamente.

O traço de referência foi desenformado um dia após a fabricação. Já os traços com a substituição do agregado graúdo em 5% e 10% de Papel Kraft foram desenformados em dois dias, e os demais, 15% e 20% foram desenformados com 3 dias.

Os traços com a substituição parcial do agregado graúdo por Papel Kraft foram capazes de reter mais umidade, impossibilitando a desforma em um dia, embora o cimento utilizado – CP-V ARI – tenha por característica a rapidez na secagem.

5.2.3 Ensaio de Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado seguindo as diretrizes estabelecidas pela NBR 9781 (ABNT, 2013) - Peças de concreto para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio, no Laboratório de Engenharia Civil da Faculdade Uniguaçu.

Os blocos foram posicionados sobre placas auxiliares junto à prensa, de modo que o eixo vertical que passa pelo centro da peça coincida com o eixo vertical de atuação da carga.

A resistência à compressão dos blocos foi obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção de carregamento da peça, multiplicando-se o resultado pelo fator p , definido pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013), levando em consideração a altura da peça.

Segundo a norma, e admitindo que seja obedecida a distribuição normal de força, os valores de resistência à compressão foram obtidos por meio da Equação

$$f_{pk, est} = fp - t s$$

Onde:

$f_{pk, est}$: Resistência característica estimada à compressão (MPa)

fp : Resistência média das peças (MPa).

t : Coeficiente de *Student*, leva em consideração o tamanho da amostra

s : Desvio padrão da amostra (MPa), dado pelo número de peças da amostra (n) e a resistência individual das peças (f_{pi}) (MPa).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

6.1.1 Cimento

O procedimento foi realizado em duas amostras cimentícias, iguais. A primeira amostra alcançou uma massa específica de $2,6619 \text{ g/cm}^3$, já a segunda, uma massa específica de $2,6666 \text{ g/cm}^3$.

De acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017), a diferença entre dois resultados individuais, obtidos a partir de uma mesma amostra de mesma massa e submetida ao ensaio, utilizando os mesmos equipamentos em um curto intervalo de tempo, não pode ser maior que $0,02 \text{ g/cm}^3$. No caso das amostras anteriormente mencionadas, a diferença foi de $0,0041 \text{ g/cm}^3$, mostrando-se satisfatória.

Ademais, pode-se inferir que a massa específica média entre as amostras ficou em $2,66 \text{ g/cm}^3$. De acordo com NBR 16605 (ABNT, 2017), a massa específica média do cimento CP V-ARI é de aproximadamente $3,06 \text{ g/cm}^3$. Esse valor, contudo, pode variar entre diferentes fabricantes, em média $0,9$ a $1,2 \text{ g/cm}^3$, colocando o cimento utilizado dentro dos parâmetros aceitos pela indústria.

6.1.2 Agregados

A Tabela 6, apresenta os valores obtidos para a massa específica da brita 0.

Tabela 6 - Valores dos ensaios do agregado graúdo

SECO (g)	Superfície Seca Saturada SSD (g)	Submerso (g)	Volume sólido (g)	Massa Específica (g/cm^3)	Massa Unitária (g/cm^3)	Absorção de Água (%)
1.929,30	2.033,00	1.273,10	759,90	2,54	1,45	5,38

Fonte: Autora, 2025.

A massa específica dos agregados graúdos foi determinada conforme os procedimentos descritos na NBR 9776 (ABNT, 2020). Embora a norma não estabeleça limites numéricos de aceitação, os valores típicos variam de acordo com a natureza petrográfica do material, situam-se geralmente entre $2,50 \text{ g/cm}^3$ e $3,00 \text{ g/cm}^3$

para rochas de origem ígnea ou metamórfica, como granito, basalto e diabásio (TANGO, 1984).

Já a massa unitária, por sua vez, foi determinada de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006). Os valores obtidos, em sua grande maioria variam conforme o grau de compactação do material, sendo comuns resultados entre $1,35 \text{ g/cm}^3$ e $1,50 \text{ g/cm}^3$ para agregados graúdos do tipo brita 0.

Complementarmente, a NBR 7211 (ABNT, 2023), estabelece os requisitos de aceitação e os limites de variação admissíveis para as propriedades físicas dos agregados. Essa norma referência os métodos de determinação contidos na NBR 9776 (ABNT, 2020) e na NBR NM 45 (ABNT, 2006) e define, entre outros parâmetros, a absorção de água máxima de 3,0% para agregados graúdos.

O valor de 5,38% de absorção de água obtido para a brita 0 é superior ao limite máximo, esse resultado indica um agregado de alta porosidade, exigindo substituição parcial ou ajuste da dosagem de água no traço.

Já a Tabela 7, contém os valores obtidos para determinação da massa específica dos agregados miúdos.

Tabela 7 - Valores dos ensaios do agregado miúdo

Volume inicial (cm³)	Volume final (cm³)	Deslocamento (cm³)	Massa do Agregado (g)	Massa Específica (g/cm³)	Massa Unitária (g/cm³)
200	390	190	500	2,63	1,43

Fonte: Autora, 2025.

A determinação da massa específica e da massa unitária do agregado miúdo apresentou resultados condizentes com as faixas estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2023). O ensaio indicou uma massa específica de $2,63 \text{ g/cm}^3$, valor típico de areias de origem silicosa, predominantemente compostas por grãos de quartzo, cuja densidade média é de aproximadamente $2,65 \text{ g/cm}^3$. Esse resultado evidencia que o material possui grãos densos e baixa porosidade interna, características desejáveis para utilização em concretos e argamassas.

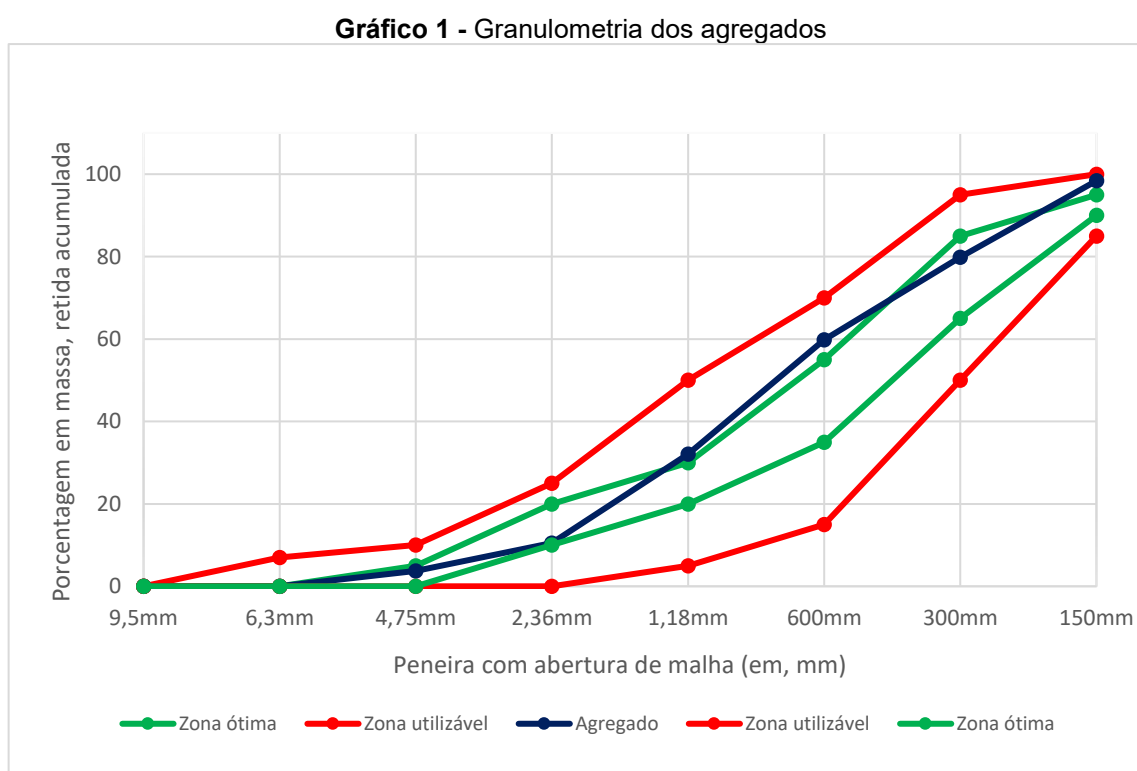
Já a massa unitária que resultou em $1,43 \text{ g/cm}^3$, corresponde a um valor médio usual para areias naturais de granulometria média. Tal parâmetro representa a relação entre a massa do agregado e o volume total ocupado, incluindo os vazios entre as partículas. A diferença observada entre a massa específica e a massa unitária

demonstra que cerca de 45% do volume total é composto por vazios, o que é considerado adequado para esse tipo de material.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam que o agregado miúdo analisado apresenta boa compactidade, adequada distribuição granulométrica e ausência de materiais leves ou impurezas. Sendo assim, o material enquadra-se nos parâmetros normativos, sendo considerado apropriado para o uso em composições de concreto e argamassa estrutural, garantindo estabilidade e desempenho satisfatório nas misturas.

6.1.2.1 Granulometria dos agregados

O Gráfico 1, demonstra a granulometria do agregado miúdo utilizado.



Fonte: Autora, 2025.

Observa-se que a distribuição do material se situa predominantemente entre os limites da zona utilizável e da zona ótima, o que indica uma granulometria adequada para aplicação em composições de concreto ou camadas granulares.

De modo geral, a curva real demonstra uma distribuição contínua das partículas, sem discontinuidades acentuadas entre as frações retidas nas peneiras

de 9,5 mm a 150 μm , o que caracteriza um agregado bem graduado. Essa característica é desejável, pois proporciona melhor empacotamento dos grãos, reduzindo o volume de vazios e, conseqüentemente, diminuindo o consumo de pasta cimentícia necessário para preencher os interstícios.

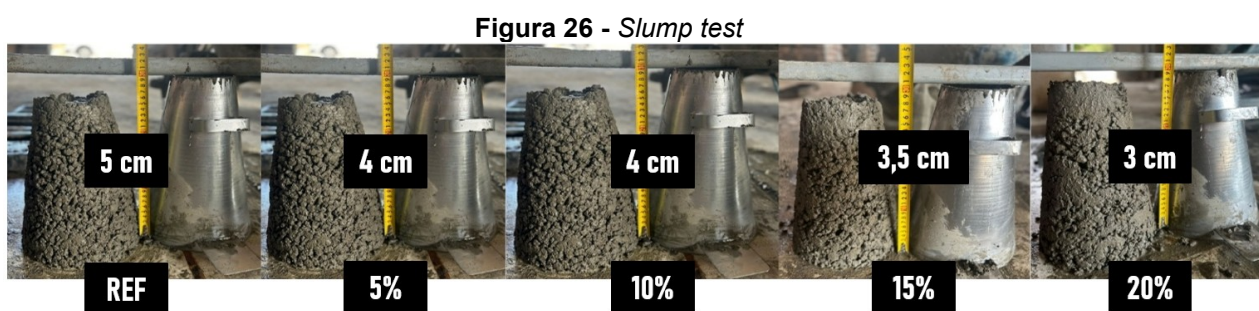
Nota-se ainda, que a curva apresenta ligeiras variações em relação à zona ótima em algumas faixas intermediárias – entre as peneiras de 4,75 mm e 600 μm –, sugerindo pequeno desvio na proporção de finos. No entanto, tais variações mantêm-se dentro dos limites aceitáveis da zona utilizável, não comprometendo o desempenho do material.

Assim, é possível notar que o agregado apresenta granulometria compatível com as especificações técnicas, podendo ser utilizado com segurança na produção de concretos ou pavimentos, garantindo adequada trabalhabilidade, resistência mecânica e comportamento hidráulico conforme o tipo de aplicação.

6.2 AMOSTRAS

6.2.1 Slump Test

Na Figura 26, é possível observar que os resultados de abatimento foram visualmente similares.



Fonte: Autora, 2025.

No traço de referência, o primeiro à esquerda, observou-se um abatimento de 5 cm, valor que caracteriza uma consistência plástica média, adequada para concretos moldados em formas com vibração moderada. À medida que ocorreu a substituição parcial do agregado graúdo por fibras de Papel Kraft, verificou-se uma

redução progressiva do abatimento, passando para 4 cm nos teores de 5% e 10%, 3,5 cm no teor de 15% e 3 cm no teor de 20%.

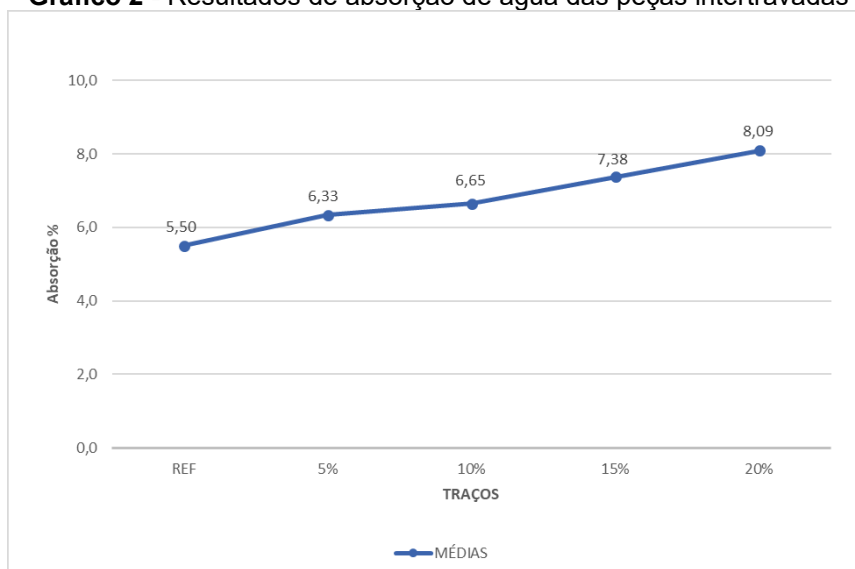
Essa tendência indica que a incorporação de fibras de Papel Kraft reduz a trabalhabilidade da mistura, tornando o concreto mais coeso e menos fluido. O efeito se deve principalmente à alta absorção de água das fibras celulósicas, que retêm parte da água de amassamento e reduzem o volume livre de água disponível para lubrificar os grãos. Além disso, as fibras aumentam a fricção interna e a resistência ao escoamento da massa, ocasionando a diminuição observada nos valores de abatimento.

Todavia, visualmente, os concretos apresentaram aparência semelhante, sem sinais de segregação ou exsudação, o que sugere que, apesar da leve redução na fluidez, a coesão e a homogeneidade da mistura foram preservadas.

6.2.2 Absorção de Água

O Gráfico 2, apresenta os valores médios de absorção entre as peças intertravadas.

Gráfico 2 - Resultados de absorção de água das peças intertravadas



Fonte: Autora, 2025.

A análise dos resultados de absorção de água das peças de piso intertravado demonstra uma tendência crescente conforme o aumento do percentual de substituição de agregado graúdo por Papel Kraft. O traço de referência, apresentou

média de absorção de 5,50%, enquanto os traços com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição apresentaram médias de 6,33%, 6,65%, 7,38% e 8,09%, respectivamente.

Tal elevação gradual evidencia que a incorporação das fibras influencia diretamente a porosidade e a permeabilidade do concreto, devido às características físicas e químicas do material adicionado. O Papel Kraft é composto majoritariamente por fibras de celulose, que apresentam alta capacidade de absorção de água e estrutura fibrosa porosa, fatores que favorecem a retenção de umidade durante o processo de cura e aumentam a formação de vazios e microcanais na matriz cimentícia após a secagem (KLOCK *et al.*, 2005).

Nos traços com até 10% de substituição, o aumento da absorção ainda se mantém dentro de faixas consideradas aceitáveis para concretos não estruturais, especialmente para pavimentos intertravados de uso leve. Entretanto, a partir de 15% de substituição, a absorção ultrapassa 7%, indicando maior porosidade e menor compactação interna, o que pode impactar negativamente na resistência mecânica e na durabilidade do material frente à ação de intempéries, ciclos de molhagem e secagem ou penetração de agentes agressivos.

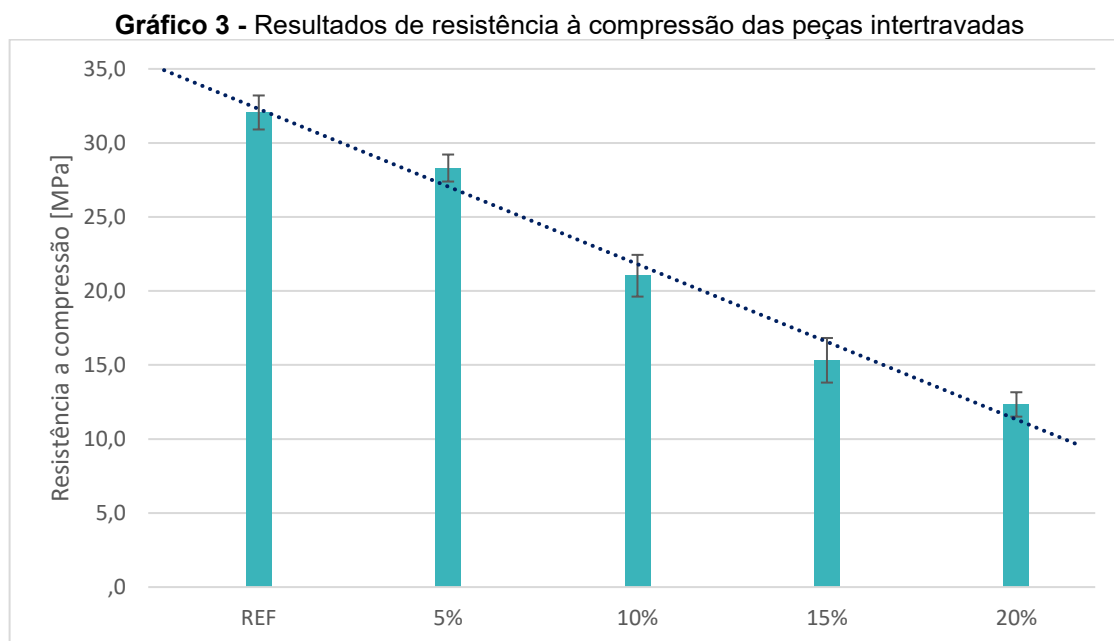
De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), o limite máximo de absorção de água para pisos intertravados é de 6% para classe de uso mais exigente (tráfego intenso) e até 8% para classe de uso moderado. Dessa forma, observa-se que os traços com até 10% de substituição atendem parcialmente ao requisito normativo, enquanto os traços com 15% e 20% superam o valor limite de 8%, ficando fora das especificações recomendadas para aplicações em pavimentos sujeitos a tráfego.

Os resultados obtidos demonstram, portanto, que a adição de Papel Kraft aumenta progressivamente a absorção de água do concreto, consequência da maior capilaridade e irregularidade superficial das fibras em comparação com o agregado natural. Esse efeito, embora possa contribuir para melhor aderência pasta-fibra e maior retenção de umidade na cura inicial, também compromete a impermeabilidade e a resistência final do compósito.

Por conseguinte, os dados indicam que a substituição de até 10% do agregado graúdo por Papel Kraft mantém os níveis de absorção dentro de limites aceitáveis para uso não estrutural, enquanto substituições superiores resultam em materiais mais porosos e potencialmente menos duráveis, sendo necessário, nesses casos, otimizar o traço ou utilizar aditivos impermeabilizantes para garantir desempenho adequado.

6.2.3 Resistência Mecânica

A avaliação da resistência à compressão das peças de piso intertravado, conforme o Gráfico 3, revela uma tendência decrescente acentuada à medida que aumenta o percentual de substituição do agregado graúdo por Papel Kraft.



Fonte: Autora, 2025.

O traço de referência apresentou resistência média de 32,06 MPa, valor compatível com concretos permeáveis de alto desempenho considerando tráfego leve, de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), embora o objetivo tenha sido alcançar as resistências médias de peças intertravadas convencionais. Nos traços modificados, observou-se redução progressiva dos valores médios: 28,30 MPa (5%), 21,03 MPa (10%), 15,32 MPa (15%) e 12,34 MPa (20%).

Essa redução da resistência mecânica pode ser atribuída a diversos fatores inter-relacionados. Primeiramente, o Papel Kraft, por ser um material de origem celulósica, apresenta alta porosidade e elevada capacidade de absorção de água, o que altera a relação A/C efetiva da mistura. Parte da água de amassamento é retida pelas fibras, diminuindo a hidratação do cimento em regiões adjacentes e gerando zonas de fraqueza na matriz cimentícia. Além disso, a substituição do agregado graúdo — componente responsável pela distribuição das tensões e aumento da resistência interna do concreto — por um material fibroso e de menor rigidez resulta

em perda de compacidade e aumento da porosidade total, conforme comprovado pelos ensaios de absorção.

Tabela 8 - Desvios padrões das amostras

Traços	Desvio Padrão
REF	1,148 ^a
5%	0,913 ^b
10%	1,410 ^c
15%	1,506 ^d
20%	0,824 ^e

Fonte: Autora, 2025.

Os desvios padrão (DP) observados na Tabela 8, variando entre 0,824 e 1,506, indicam boa repetibilidade dos ensaios e demonstram que a dispersão dos resultados é relativamente baixa, o que confere confiabilidade aos valores médios obtidos. A análise qualitativa mostra que as amostras do grupo de referência apresentaram a menor variabilidade, o que é coerente com a uniformidade típica de um concreto convencional.

Ademais, conforme o teste de Tukey de comparação de médias, os grupos analisados apresentaram letras distintas (a, b, c, d, e), indicando que o aumento do teor de substituição por Papel Kraft reduziu estatisticamente a resistência média das peças, ao passo que são todas distintas entre si. Assim, a variável analisada – percentual de substituição – exerceu influência direta e significativa sobre o desempenho mecânico do concreto.

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), pisos intertravados destinados a tráfego de veículos leves devem apresentar resistência mínima de 35 MPa, e na NBR 16416 (ABNT, 2015), para uso em calçadas e áreas de pedestres, valores em torno de 20 MPa são aceitáveis. Assim, apenas o traço de referência e o traço com 10% de substituição (21,03 MPa) se enquadram em usos leves, no que diz respeito à concretos permeáveis. Já os traços com 15% e 20% ficam abaixo do limite mínimo recomendado, tornando-se inadequados para aplicações que exijam elevada resistência mecânica.

Concomitante a isso, a absorção de água do agregado graúdo foi de 5,38%, valor superior ao limite recomendado pela norma ($\approx 3\%$). Tal absorção elevada explica, em grande parte, a redução da trabalhabilidade (menor abatimento) observada já no traço de referência e a queda progressiva da resistência à

compressão das peças conforme aumentou a substituição por Papel Kraft. Parte significativa da água de amassamento foi adsorvida pelos poros do agregado e pelas fibras de papel, reduzindo a água efetivamente disponível para hidratação e aumentando a porosidade da matriz. Recomenda-se a pré-condicionamento dos agregados à condição SSD e a reposição controlada da água absorvida, ou o uso de aditivos superplastificantes, como medidas corretivas a serem adotadas antes da produção em escala.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou a viabilidade técnica e ambiental da incorporação de resíduos de Papel Kraft como substituição parcial do agregado graúdo na produção de peças de concreto intertravado. A pesquisa buscou avaliar o impacto dessa adição no desempenho mecânico, na permeabilidade e na potencial aplicação industrial, considerando diferentes portes de indústrias e cenários de produção.

A metodologia consistiu na preparação de traços de concreto com substituições de 0%, 5%, 10% e 15% de Papel Kraft, seguidos da avaliação da trabalhabilidade do concreto em estado fresco, ensaios de resistência à compressão, bem como a análise da absorção de água. Complementarmente, foram analisados os requisitos das peças de acordo com as normativas de peças intertravadas permeáveis, a fim de verificar possíveis aplicações alternativas das peças produzidas com maior teor de porosidade.

De modo geral, os resultados demonstram que a adição de Papel Kraft em teores superiores a 10% compromete significativamente a resistência à compressão das peças, devido ao aumento da porosidade e à perda de continuidade da matriz. Contudo, substituições moderadas, até 5%, mostraram uma redução relativamente pequena da resistência – cerca de 12% –, o que sugere a possibilidade de aproveitamento do resíduo em proporções controladas, desde que se mantenha o desempenho físico e mecânico dentro dos limites normativos.

No que se refere à aplicação prática, constatou-se que a viabilidade da técnica varia de acordo com o porte industrial. Em indústrias de pequeno porte, a implementação tende a ser facilitada pela simplicidade operacional e pelo baixo custo inicial, embora a limitação do controle tecnológico restrinja o uso das peças a aplicações de menor exigência mecânica.

Em unidades de médio porte, o teor de 5% revela-se particularmente promissor, uma vez que essas indústrias dispõem de recursos para ajustar o traço, controlar a umidade e empregar aditivos plastificantes, possibilitando ganhos ambientais e econômicos. Já nas grandes indústrias, a padronização do resíduo, o controle laboratorial contínuo e a adoção de selos de sustentabilidade potencializam a competitividade e reforçam o posicionamento ambiental das empresas.

A ampliação dessa prática em escala industrial, contudo, requer análise criteriosa dos custos envolvidos. Processos como trituração, secagem, armazenamento, padronização do resíduo e controle rigoroso de umidade podem elevar o custo operacional, especialmente em plantas industriais de maior complexidade. Somam-se a isso os investimentos necessários em ensaios tecnológicos, ajustes de dosagem e eventuais aditivos, indispensáveis para assegurar a conformidade com as normas técnicas. Assim, embora o uso do Papel Kraft apresente vantagens ambientais evidentes, sua adoção em larga escala demanda planejamento operacional e financeiro.

Cabe destacar, que as peças intertravadas produzidas com substituição parcial de agregados por Papel Kraft em até 10%, podem ainda, serem aplicadas como pavimento permeável, conforme os requisitos estabelecidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Para que a peça atenda a essa função, a empresa pode adaptar o traço convencional do concreto, reduzindo o teor de finos e o consumo de pasta cimentícia, de modo a aumentar a porosidade interconectada.

Além disso, pode-se empregar agregados graúdos de granulometria uniforme, limitando a fração passante na peneira de 4,75 mm, e utilizar aditivos plastificantes ou superplastificantes para manter a trabalhabilidade sem comprometer a permeabilidade. O controle do abatimento e da compactação é fundamental para preservar os vazios e garantir o desempenho hidráulico exigido pela norma.

Sob a perspectiva ambiental, a incorporação de resíduos celulósicos, como o Papel Kraft, ao concreto se alinha aos princípios da economia circular e da construção sustentável, promovendo a valorização de subprodutos industriais e a redução do consumo de recursos naturais não renováveis. A prática contribui para minimizar o descarte inadequado de resíduos sólidos e diminuir a extração de agregados naturais, um dos principais impactos ambientais associados à indústria da construção civil.

Sob a ótica ambiental, a utilização do Papel Kraft contribui para a economia circular, reduzindo a extração de agregados naturais, o volume de resíduos destinados a aterros e a pressão sobre recursos não renováveis. Além disso, o aproveitamento do resíduo pode diminuir custos indiretos associados ao transporte e à destinação final, tornando o processo produtivo mais eficiente e ambientalmente responsável.

Diante do exposto, conclui-se que a substituição de até 5% do agregado graúdo por Papel Kraft representa a alternativa mais equilibrada, unindo desempenho técnico satisfatório, benefícios ambientais e viabilidade operacional. Teores superiores, embora possíveis em aplicações específicas como pavimentos permeáveis, podem comprometer a integridade mecânica das peças e, portanto, exigem avaliação criteriosa.

Apesar da viabilidade técnica da adição de pequenas frações de Papel Kraft, é importante considerar o desafio da aceitação desse tipo de material pelo mercado. Em muitos segmentos da construção civil, ainda há resistência ao uso de resíduos como substituintes de matéria-prima, especialmente pela percepção de que podem comprometer a durabilidade ou o desempenho mecânico das peças.

Assim, a inserção desse produto no mercado depende não apenas de comprovações técnicas robustas, mas também de estratégias de comunicação e certificações que reforcem a segurança, o desempenho e o valor sustentável da solução. A adoção tende a ser mais favorável em nichos que valorizam práticas ambientais, como obras públicas com exigência de critérios ESG ou projetos de urbanismo sustentável.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o uso combinado de Papel Kraft com aditivos plastificantes ou pozolânicos para compensar a perda de resistência e melhorar a coesão da mistura.
- Desenvolver um traço específico de concreto permeável com adição de Papel Kraft, verificando o equilíbrio entre resistência mecânica e permeabilidade, conforme os requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015).
- Investigar tratamentos prévios no Papel Kraft, como imersão em cal, cimento ou sílica ativa, para melhorar a aderência à matriz cimentícia e reduzir sua absorção de água.
- Realizar ensaios de desgaste e abrasão para determinar a viabilidade do uso dos pavers em áreas de tráfego leve.

REFERÊNCIAS

- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Boletim Técnico: Guia básico de utilização do Cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, 2002. 28 p.
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. **Manual de Pavimento Intertravado**. São Paulo: ABCP, 2010.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 11578: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16972: Agregados – Determinação de massa unitária**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15900–1: Água para amassamento do concreto Parte 1 - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 9935: Agregados - Terminologia**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 7211: Agregados para Concreto - Especificações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.
- ANGULO, P.; OCHOA, C. Estrategias de sostenibilidad para la mayor competitividad en la industria cementera de México. **Rev. ALCONPAT**, Mérida, v. 13, n. 2, p. 254-270, agosto, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.637>. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200768352023000200008&lng=es&nrm=iso. Acesso em: 05 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. Minas Gerais, ABRELPE, 2023.

BAKER, C. F. **Refining Technology**. Pira Internacional Ltd, 2000.

BARROS, Alex, C. **Pavimento Intertravado: Uma alternativa para a pavimentação das vias de cidades do interior: Estudo do custo da implantação do pavimento em pedra tosca x intertravado**. Editora Dialética, São Paulo, 2025.

BASTOS, P. S. **Fundamentos do concreto armado**. Universidade Estadual Paulista, Bauru- SP, 2023, p. 1-90, set. 2023.

BERGHE, R. V. S.; SCHANKOSKI, R. A.; NOVELLI, L. G.; JACOBELIS NETO, W.; PILAR, R. **Analysis of the incorporation of ferronickel slag for the production of composite Portland cements**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 25, e137879, jan./dez. 2025. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212025000100836>

BINS, G. de O.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; SILVA, D. A. L. **Análise de pisos intertravados com substituição do agregado miúdo por resíduo de construção e demolição**. Revista Principia, [S. l.], v. 59, n. 2, p. 427–444, 2022. DOI: 10.18265/1517-0306a2021id4975. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/4975>. Acesso em: 30 abr. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União, Brasília,DF, 2010.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 431. Altera o art. 3º. da Resolução CONAMA nº. 307, de 5 de julho de 2002, estabelecendo nova classificação para o gesso**. Diário Oficial da União, n. 99, p. 123, 25 jun. 2011.

CARVALHO, E. R. DE. et al. **Incorporação de fibras de papel kraft provenientes de embalagens de cimento pós-uso para produção de pisogramas de concreto**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 28, n. 4, p. e20230142, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0142>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/xSzPx3Htncbj6PCqg6tymVC/>. Acesso em: 03 mar. 2025.

CASTRO, H. F. **Processos Químicos Industriais II: Papel e Celulose**, 2009. Disponível em:

<https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840556/434/apostila4papelecelulose.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2025.

CAVALCANTE VILA NOVA, P. C. et al. **Uso de resíduos de madeira utilizados para a produção de piso intertravado**. In: OPEN SCIENCE RESEARCH XII. Editora Científica Digital, 2023. p. 1097-1113.

CHEN, X.; WANG, K.; WANG, Z.; ZENG, H.; YANG, T.; ZHANG, X. Highly stretchable composites based on cellulose. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 170, p. 71-87, Feb. 2021.

CORREIA, F. M.; D'ANEGELO, J. V. H.; SILVA Jr, F. G. **Revisitando número kappa: conceitos e aplicações na indústria de celulose**. *O Papel*, v. 80, n. 07, p. 77-89, Julho, 2019.

DA SILVA, L. S. **Indústria Brasileira do Cimento: Consumo e Impactos Ambientais**. *Rev. Construindo (Minas Gerais)*, v. 14 n. 1 (2022): JAN/JUN 2022. ISSN 2318-6127. Disponível em: <https://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/8769>. Acesso em: 14 mar. 2025.

FERNANDES, I.; **Blocos e Pavers, Produção e controle de qualidade**; 8ª Edição, 2019.

FENGEL, D., WEGENER. **Wood chemistry: ultrastructure: reactions**. Berlin: W. de Gruyter, 1989.

FIGUEIREDO, F. *et al.* **Produção de piso intertravado de concreto (pavers) com substituição parcial do agregado miúdo pelo grits, eliminação da indústria de papel e celulose/Produção de pisos em blocos de concreto com substituição parcial do agregado fino por grits, resíduo da indústria de papel e celulose**. FEUP, 2022. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/140917>. Acesso em: 01 mai. 2025.

FILHO, R. F.; PAIVA, Ed C. R.; ESPINOSA, J. W. M. **Utilização de resíduos de concreteira para a fabricação de pavers**. 2018.

FIORITI, C.F. *et al.* Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 43-54, out./dez. 2007.

HAMMES A, G. *et al.* Avaliação do desempenho da logística reversa na construção civil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], p. 248, 2020.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. **Dosagem dos concretos de cimento Portland. Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 439-471, 2005.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 3. ed. Curitiba: FUPEF, 2005.

LEAL, A. P. Resíduos da Construção Civil: Uma revisão sobre as possibilidades de aplicação. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. 459–483, 2021. DOI: 10.51891/rease.v7i6.1385. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/1385>. Acesso em: 02 mar. 2025.

LEITE, P. **Logística Reversa: Meio Ambiente e competitividade**. São Paulo: Prentice Hall, 2009.

LOPES, C. *et al.* **Logística reversa de resíduos da construção civil**. NAVUS – Revista de Gestão e Tecnologia/Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial - Florianópolis: Senac/SC. v. 12, p. 01-17, jan/dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.22279/navus.2022.v12.p01-17.1759>. Disponível em: <https://navus.sc.senac.br/navus/article/view/1759>. Acesso em: 02 mar. 2025.

MARTINS, L. G. **Avaliação Do Desempenho Ambiental Da Produção de Papel e Celulose: Uma Pesquisa Bibliométrica Entre 2010 e 2019**. N.p., 2022. Print. Disponível em: https://unesp.primo.exlibrisgroup.com/discovery/openurl?institution=55UNESP_INST&vid=55UNESP_INST:UNESP&rft.aulast=Martins&rft.date=2022-01-27&rft.aufirst=Leonardo%20Giorgetti&rft.atitle=Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20desempenho%20ambiental%20da%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20papel%20e%20celulose:%20uma%20pesquisa%20bibliom%C3%A9trica%20entre%202010%20e%202019. Acesso em: 10 de abr. 2025.

NEVILLE, A M. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. E-book. pág.30. ISBN 9788582600726. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788582600726/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

PACITO, C. E. *et al.* **Logística Reversa: uma análise do varejo de construção civil**. **Revista Conecta**, São Paulo, Brasil, v. 7, n. 2, p. 56–71, 2024. Disponível em: <https://fatecrl.edu.br/revistaconecta/index.php/rc/article/view/251>. Acesso em: 04 mar. 2025.

PEREIRA, A. L.; BOECHAT, C. B.; TADEU, H. F. B.; SILVA, J. T. M. **Logística Reversa e Sustentabilidade**. Porto Alegre: +A Educação - Cengage Learning Brasil, 2012. E-book. pág.159. ISBN 9788522113941. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788522113941/>. Acesso em: 04 abr. 2025.

PEREIRA DE ALMEIDA, Filipe; LIMA SANTOS, Jean Carlos. **Blocos de Alvenaria Sustentáveis com Incorporação de Fibras de Papel Kraft**. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 7–24, 2024. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/11854>. Acesso em: 2 mar. 2025.

PINHEIRO, A. C. da F. B.; CRIVELARO, M. **Materiais de Construção**. Editora Saraiva, 2020.

VIER, M. B. *et al.* Reflexões sobre a Economia Circular. COLÓQUIO — **Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 18, n. 4, p. 27-47, out./dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.26767/2206>. Disponível em: <https://seer.faccat.br/index.php/coloquio/article/view/2206>. Acesso em: 02 mar. 2025.

RABELO, P. H.; RABELO, B.; BELLÉ BLUME, P.; PEREIRA, Y. D.; LOPES, D. C. **Revisão sobre o método ABCP para dosagem do concreto.** *Salão do Conhecimento*, Ijuí, v. 9, n. 9, 2023. Disponível em: <https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaoconhecimento/article/view/24300>. Acesso em: 28 set. 2025.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. **Going backwards: reverse logistics trends and practices.** The University of Nevada, Reno: Center for Logistics Management, Reverse Logistics Council, 1998.

SANTOS, L. B. **A importância do setor mineral no desenvolvimento econômico de Itapeva/SP: estudo de caso da fábrica de cimento Lafarge.** Monografia (Graduação em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.

SANTOS, M. Identificação dos impactos ambientais causados pela indústria cimenteira no Brasil. **Natural Resources**, v. 13, n. 2, p. 44-55, 2023. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2023.002.0006>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/naturalresources/article/view/8246>. Acesso em: 14 mar. 2025.

SCHONWALD, G.; DAL MAGRO, M.; TOLÊDO, J. H. D. de. Logística Reversa Aplicada na Construção Civil. **Revista Brasileira de Meio Ambiente & Sustentabilidade**, [S. l.], v. 1, n. 5, p. 297–353, 2021. Disponível em: <https://rbmaes.emnuvens.com.br/revista/article/view/120>. Acesso em: 04 mar. 2025.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, **Relatório Anual 2020.** Rio de Janeiro, SNIC, 2021. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf. Acesso em: 03 mar. 2025.

SJÖSTRÖM, E. **Wood Chemistry: fundamentals and applications.** 2. ed. San Diego, California: Academic Press Inc, 1993.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050.** Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

SOARES, R. C., FIALHO, R. L., BARBOSA, A.S., *et al.* **Portland Cement Packaging Reuse in the Production of Pre-Castbeams for Non-Structural Masonry.** *Journal of Solid Waste Technology Management*, v. 46, n. 4, pp. 563–571, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5276/JSWTM/2020.563>. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/jswt/jswt/2020/00000046/00000004/art00012>. Acesso em: 03 mar. 2025.

SPRUIT, Anouk et al. Development and validation of the Attachment Relationship Inventory—Caregiver Perception 2–5 years (ARI-CP 2–5): Psychometric structure, external validity, and norms. **journal/**, v. 42, n. 2, p. 188-205, 2021.

TANGO, C.E.S. **Blocos de concreto: dosagem, produção e controle de qualidade**. 1 ed. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1984, v.1.

TAKAHASHI, D. H.; C., T. NOGUEIRA. **Avaliação da resistência à compressão de pisos intertravados produzidos com RCD**. 2021. Dissertação - Instituto Presbiteriano Mackenzie, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/29357>. Acesso em: 28 abr. 2025.

TIENEN, Y. M. da S. V.. **Produção de papel kraft com fibra reciclada e celulose microcristalina**. 2023. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/33162>. Acesso em: 02 abr. 2025.

UCHÔA, J. C. de M.; CARVALHO, F. S. A. de. **Logística Reversa na Construção Civil: Implicações para a Sustentabilidade Empresarial e o Meio Ambiente**. In: LIMA, L.A. de O., *et al.* Sustentabilidade e Inclusão: Práticas contemporâneas no âmbito da gestão, educação e saúde. 1ª ed. Seven, 2024. p. 44-52.