

CHRISTIAN VALCIR KNIPHOF DE OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DO PET (POLITEREFTALATO DE ETILA)  
RECICLADO E EXTRUSADO COMO SUBSTITUTO  
DE ARMADURA DE DISTRIBUIÇÃO EM LAJES**

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO – 2024

CHRISTIAN VALCIR KNIPHOF DE OLIVEIRA

**UTILIZAÇÃO DO PET (POLITEREFTALATO DE ETILA)  
RECICLADO E EXTRUSADO COMO SUBSTITUTO  
DE ARMADURA DE DISTRIBUIÇÃO EM LAJES**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Doutor.

Orientadora: Profa. Dra. Maritane Prior.

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO – 2024

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Valcir Kniphoff de Oliveira, Christian  
UTILIZAÇÃO DO PET (POLITEREFTALATO DE ETILA) RECICLADO E  
EXTRUSADO COMO SUBSTITUTO DE ARMADURA DE DISTRIBUIÇÃO EM  
LAJES / Christian Valcir Kniphoff de Oliveira; orientadora  
Maritane Prior. -- Cascavel, 2024.  
80 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade  
Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e  
Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Energia na Agricultura, 2024.

1. Construção Civil. 2. Concreto armado. 3. Eficiência  
energética. 4. Sustentabilidade. I. Prior, Maritane, orient.  
II. Título.

**CHRISTIAN VALCIR KNIPHOFF DE OLIVEIRA**

Utilização do PET (Politereftalato de etila) reciclado e extrusado como substituto de armadura de distribuição em lajes

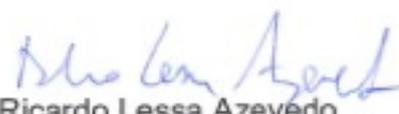
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADO pela seguinte banca examinadora:



Orientadora - Maritane Prior  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



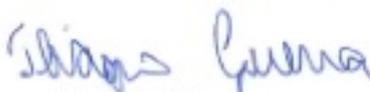
Samuel Nelson Melegari de Souza  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Ricardo Lessa Azevedo  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Carlos Eduardo Tino Balestra  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Toledo (UTFPR)



Thiago Guerra  
Centro Universitário de Cascavel (UNIVEL)

Cascavel, 01 de março de 2024

*Dedicatória*

*Dedico este a trabalho a toda comunidade científica que me fundamentou  
e de maneira póstuma a meus amigos engenheiros  
Marcelo Freiburger e Jair Kurmann.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Dione e Miguel pelos ensinamentos da vida que me provocaram sempre a inquietação e a busca pelo conhecimento, minhas queridas irmãs Karen e Suzana, que sempre foram motivo de orgulho e fonte de inspiração.

À minha amada esposa Gislayne que sempre pude contar como auxiliadora e como suporte emocional.

Aos meus inestimáveis filhos Maria e Joaquim que me são um porto seguro e estão sempre em meus pensamentos quando necessito de motivação.

Ao auxílio de todos que contribuíram à realização deste trabalho, minha querida professora e orientadora Maritane Prior por acreditar na minha tese e me auxiliar nessa jornada.

Aos meus colegas da UNIVEL, professores, coordenadores e laboratoristas que sempre nos animam e motivam para continuar.

A todos meus alunos que sempre me surpreendem e me motivam a sempre buscar mais conhecimento para poder compartilhar.

A todos os meus justos irmãos que fiz no último ano, em especial Fulvio e Anzolin, por serem fonte alento nos momentos mais difíceis.

A Deus que me proveu capacidades e sanidade necessárias para obtenção deste.

## LISTA DE SIGLAS

ABC	Associação Brasileira de Concreto
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PET	Politereftalato de etila
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
UNIOESTE	Universidade Estadual do Oeste do Paraná

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Minipainel treliçado.....	22
<b>Figura 2:</b> Sistema de minipainel com enchimento e engaste em viga e armadura de distribuição.....	22
<b>Figura 3:</b> Influência do comprimento da laje na flecha.....	25
<b>Figura 4:</b> Detalhe de um lote padrão dos corpos de prova prismáticos e dos cilíndricos retirados em cada batelada. ....	38
<b>Figura 5:</b> Moldes de madeira para concretagem dos corpos prismáticos com altura de capa. ....	40
<b>Figura 6:</b> Corpo de prova prismático no formato de capa de laje para teste de eficácia em armaduras de distribuição. ....	42
<b>Figura 7:</b> Análise de resistência à tração do PET.....	51
<b>Figura 8:</b> Detalhe das pinças na análise do PET.....	52
<b>Figura 9:</b> Rompimento da amostra de Aço 3,4mm CA-50.....	53
<b>Figura 10:</b> Gráfico de tensão-deformação de amostras de Polietileno Tereftalato (PET).....	54
<b>Figura 11:</b> Gráfico de tensão-deformação de amostras de Polietileno Tereftalato (PET).....	55
<b>Figura 12:</b> Rugosidade do AÇO e do PET.....	57
<b>Figura 13:</b> Medida da distância de ocorrência do rompimento a partir da lateral do corpo de prova.....	63
<b>Figura 14:</b> Gráfico de evolução de carga dos tratamentos com a inserção de apenas uma barra de PET no concreto.....	67
<b>Figura 15 -</b> Efeito do carregamento do Lote 6.....	67
<b>Figura 16:</b> Gráfico do comportamento das médias dos lotes com aço.....	68
<b>Figura 17:</b> Gráfico da capacidade de carga das barras de PET comparadas as com barras de aço.....	70

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Amostras Utilizadas por Ordem de Execução.....	37
<b>Tabela 2:</b> Amostras Utilizadas por Ordem de Execução.....	42
<b>Tabela 3:</b> Valores obtidos com o cálculo da média aritmética de todas as amostras das medições feitas no laboratório, trata-se de um resumo de todos os dados da tese. ....	46
<b>Tabela 4:</b> Resumo da análise comparativa das propriedades mecânicas de amostras de aço. ....	56
<b>Tabela 5:</b> Resumo do consumo energético e as emissões de em Kg de CO <sub>2</sub> correspondente a produção por Kg de material.....	61
<b>Tabela 6:</b> Dados correspondentes a primeira batelada de testes.....	62
<b>Tabela 7:</b> Diferença percentual entre as resistências à flexão do corpo de prova com adição de PET, AÇO ou TELA e seu respectivo testemunho.....	65
<b>Tabela 8:</b> Compilação das médias dos rompimentos das amostras, testemunhos e corpos de prova cilíndricos a tração e compressão respectivamente, seguido pela razão de ambas e a diferença. ....	66
<b>Tabela 9:</b> Resumo das diferenças entre resistência observada nos lotes testados e os valores referenciais. ....	69

OLIVEIRA, Christian Valcir Kniphoff de. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, setembro, 2023. **A utilização do PET reciclado e extrusado como substituto de armadura de distribuição em lajes.** Maritane Prior.

## RESUMO

Este estudo investigou o uso do Politereftalato de Etila (PET) reciclado e extrusado como alternativa ao aço CA-50 em armaduras de distribuição para lajes de concreto armado, visando promover práticas sustentáveis e eficientes na construção civil. Utilizando uma metodologia comparativa inovadora com moldes prismáticos para avaliar propriedades mecânicas, analisou-se 49 corpos de prova, revelando que o PET demanda significativamente menos energia para sua produção, com uma redução de 95,5% em relação ao aço, equivalendo a apenas 0,72 MJ/Kg. Os resultados destacam a eficácia máxima alcançada com a implementação de duas barras de PET a cada 15 cm, contrapondo a ideia de que maior quantidade de barras resulta em maior resistência, e sublinham a importância de considerar fatores como módulo de elasticidade e variações de temperatura para a aplicação prática. Conclui-se que o PET reciclado se apresenta como uma alternativa promissora ao aço nas armaduras de distribuição, alinhando-se aos objetivos de eficiência energética e sustentabilidade no setor.

**Palavras-Chave:** Construção civil, eficiência energética, concreto armado, sustentabilidade.

OLIVEIRA, Christian Valcir Kniphoff de. State University of Western Paraná, September, 2022. **The use of recycled and extruded PET as a replacement for distribution reinforcement in slabs.** Advisor. Prof. Dra. Maritane Prior.

## **ABSTRACT**

This study investigates the use of recycled and extruded Polyethylene Terephthalate (PET) as an alternative to CA-50 steel in distribution armatures for reinforced concrete slabs, aiming to promote sustainable and efficient practices in the construction industry. Employing an innovative comparative methodology with prismatic molds to evaluate mechanical properties, 49 test specimens were analyzed, revealing that PET significantly reduces energy consumption for its production, with a decrease of 95.5% compared to steel, amounting to only 0.72 MJ/Kg. The results highlight the optimal efficiency achieved by implementing two PET bars every 15 cm, countering the notion that a greater number of bars results in increased strength, and underline the importance of considering factors such as modulus of elasticity and temperature variations for practical application. It concludes that recycled PET presents itself as a promising alternative to steel in distribution armatures, aligning with the goals of energy efficiency and sustainability in the sector.

**Keywords:** Civil construction, energy efficiency, reinforced concrete, sustainability.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 Hipóteses.....	14
1.2 Objetivo geral.....	14
1.3 Objetivos específicos.....	14
1.4 Justificativa.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1 A Indústria da Construção.....	17
2.2 Materiais Empregados na Construção Civil.....	18
2.3 Concreto Armado.....	19
2.4 Lajes de Concreto Armado.....	20
2.4.1 Esbeltez das lajes.....	24
2.5 Balanço Energético.....	26
2.6 Aço Utilizado como Armadura em Concreto Armado.....	28
2.7 Politereftalato de Etila - PET.....	29
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1 Caracterizações.....	32
3.1.1 Resistência à tração.....	32
3.1.2 Rugosidade.....	33
3.2 Demanda energética.....	33
3.3 Ensaio Resistência Mecânica.....	35
3.3.1 Concreto e agregados.....	35
3.3.2 Amostras.....	37
3.3.3 Ensaio de resistência à flexão.....	41
3.3.4 Relação da resistência útil x área do fuste da barra.....	43
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>45</b>
4.1 Resistência à tração.....	50
4.2 Rugosidade.....	57
4.3 Demanda energética.....	58
4.3.1 Aço utilizado como armadura em concreto armado.....	59

4.3.2 Politereftalato de etila .....	60
4.3.3 Emissão de CO <sub>2</sub> e Consumo energético PET/AÇO .....	60
<b>4.4 Análise de rompimento à flexão .....</b>	<b>61</b>
4.4.1 Tratamento dos dados .....	64
4.4.2 Relação da resistência útil x área do fuste da barra .....	69
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em um cenário de avanços tecnológicos, com a inserção de novos materiais e a constante busca por sustentabilidade das ações do homem moderno, que tem buscado minimizar os impactos e danos que foram e ainda são causados à natureza. Assim, no setor de construção, um dos maiores setores do PIB brasileiro, que consomem recursos naturais e também produz uma grande quantidade de materiais para descarte é importante novas técnicas e tecnologias para diminuir os custos em um canteiro, gerando sustentabilidade e qualidade para todos os setores envolvidos.

Assim, nas últimas décadas, o setor da construção civil tem experimentado avanços significativos, ao mesmo tempo em que enfrenta desafios como a escassez de mão de obra qualificada, limitações financeiras, e a necessidade de uma maior industrialização. Estudos, como os de Pereira (2013) e Barbosa (2018), discutem o papel das tecnologias digitais e das práticas sustentáveis em enfrentar esses desafios para melhorar a eficiência e a produtividade do setor. Problemas como o alto índice de desperdício de materiais, evidenciado por Yazigi (2021) e as perdas financeiras devidas a retrabalhos, sublinham a importância de um planejamento mais eficaz e da adoção de métodos construtivos inovadores.

A construção civil contribui de maneira significativa para a economia brasileira, com um impacto notável no PIB e no emprego. O setor se caracteriza pela sua constante evolução, buscando responder às demandas de mercado e às necessidades sociais com novos métodos construtivos, gerenciamento de obras, e materiais. As inovações incluem a utilização de materiais sustentáveis e técnicas construtivas como *wood frame* e *steel frame*, ICF, e BIM, mencionadas por Kibert (2016) e Luca (2018).

Apesar da prevalência do concreto armado, a pesquisa contínua por melhorias na sua composição e pela exploração de novos materiais é uma área de interesse. A aplicação de técnicas avançadas na construção de túneis, demonstrada por Monteiro (2020) ressalta a busca por aprimoramentos em materiais e métodos, com foco particular em aspectos sustentáveis.

A educação em engenharia da construção civil abrange uma variedade de áreas, incluindo materiais e técnicas construtivas, promovendo uma visão abrangente e diversificada necessária para enfrentar desafios complexos da indústria. A tendência de utilizar materiais reciclados, como a incorporação de PET no concreto, destacada

por Rodrigues (2022) e Costa (2012), reflete um interesse crescente em práticas mais sustentáveis, que não apenas mitigam impactos ambientais, mas também oferecem melhorias nas propriedades do concreto.

Assim, a construção civil é marcada por uma trajetória de desenvolvimento contínuo, enfrentando desafios com inovação e adaptabilidade. A busca por sustentabilidade, aprimoramento de métodos construtivos e uma educação voltada para a interdisciplinaridade são vistas como respostas a desafios presentes e futuros, apontando para um direcionamento do setor em busca de eficiência e responsabilidade ambiental.

## **1.1 Hipóteses**

Este estudo explora a possibilidade de utilizar o PET (Politereftalato de Etila) extrusado como uma alternativa ao aço CA-50 em armaduras de concreto armado. A pesquisa investiga se o PET, com seu processo de produção que consome menos energia, poderia reduzir o consumo energético e produção de CO<sub>2</sub> geral, ao mesmo tempo em que satisfaz parcialmente as exigências de resistência estrutural para uso em armaduras de distribuição de lajes pré-fabricadas de concreto armado.

## **1.2 Objetivo geral**

Avaliar a viabilidade técnica e ambiental do uso de Politereftalato de etileno (PET) reciclado, processado por meio de extrusão, como material de armadura de distribuição em lajes treliçadas. Concentra-se no desenvolvimento e na otimização de métodos para a integração de PET reciclado em estruturas de concreto, especificamente como armadura de distribuição, analisando as propriedades mecânicas, a durabilidade e o impacto ambiental dessa substituição em comparação com materiais convencionais.

## **1.3 Objetivos específicos**

a) Realizar uma análise comparativa dos balanços energéticos associados à produção e utilização do aço e do PET reciclado;

b) Conduzir testes de resistência à tração para determinar a resistência à tração do PET reciclado, avaliando sua adequação para o uso como armadura em lajes treliças;

c) Investigar como o PET reciclado interage com o concreto.

#### **1.4 Justificativa**

A evolução na construção civil é impulsionada por fatores econômicos e pela necessidade de soluções que atendam critérios de viabilidade ambiental e técnica. Entre os materiais considerados para uso neste setor, o PET, caracterizado por sua capacidade de reciclagem, destaca-se. Apesar de sua natureza reciclável, sua disposição como resíduo sólido urbano (RSU) apresenta desafios ambientais devido à sua durabilidade e potencial poluente (ROMÃO, 2009). A participação de polímeros no RSU vem crescendo, atingindo cerca de 20% em massa em 2005, com o PET sendo um dos principais polímeros produzidos no Brasil, juntamente com PEAD (Polietileno de Alta Densidade), PEBD (Polietileno de Baixa Densidade), PELBD (Polietileno Linear de Baixa Densidade), PP (Polipropileno), PVC (Policloreto de Vinila), PS (Poliestireno). Destes, 71% são utilizados na indústria de embalagens, apresentando uma taxa de reciclagem em torno de 70%. No entanto, existe uma porção desses materiais que não é reciclada, representando um potencial de contaminação ambiental (PLASTIVIDA, 2022).

A busca por materiais alternativos ao aço para aumentar a durabilidade e a sustentabilidade das estruturas de concreto identifica o PET como uma opção a ser considerada. O PET, utilizado amplamente em embalagens, compartilha propriedades mecânicas adequadas para essa aplicação, sugerindo a possibilidade de seu ciclo de vida acompanhar o do concreto armado, dada sua inércia e potencial de reciclagem (BENTO, 2016).

Outros polímeros podem oferecer propriedades tecnicamente favoráveis, mas alguns, como o PEAD utilizado em embalagens de agrotóxicos, podem acarretar impactos ambientais maiores (CARDOSO, 2022). Embora o aço seja tradicionalmente empregado como reforço no concreto, sua utilização em ambientes corrosivos demanda precauções adicionais para protegê-lo de deteriorações químicas ou ambientais, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). Ademais, a produção de aço

contribui para as emissões de CO<sub>2</sub>, refletindo na pegada de carbono associada à construção civil.

Considerando tais aspectos, a avaliação da aderência do PET ao concreto e sua resistência à tração, em comparação com o aço, torna-se relevante, visando compreender os impactos de sua substituição não apenas no aspecto ambiental, mas também sob perspectivas econômicas e técnicas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A Indústria da Construção

Ao longo dos últimos séculos, a ênfase na habitabilidade das edificações induziu a implementação de inovações que melhoraram as condições de moradia em diversos biomas. Nos tempos atuais, questões relativas ao conforto térmico e acústico figuram entre as principais preocupações de engenheiros e arquitetos. No Brasil, a revisão da norma regulamentadora NBR 15575 (ABNT, 2021) definiu padrões mínimos para o desempenho térmico, acústico, lumínico, entre outros aspectos, em edificações habitacionais, evidenciando a necessidade de atenção dos profissionais da construção às diretrizes para assegurar a adequação habitacional (ABNT, 2021).

As edificações contemporâneas, em comparação às estruturas do início do século passado, revelam um avanço notável, proporcionando comodidades e facilidades antes inéditas. A percepção de superioridade das habitações atuais, frequentemente mencionada por gerações anteriores, reflete a evolução da infraestrutura e da aplicação tecnológica. Entretanto, o desenvolvimento dos materiais de construção não avançou no mesmo ritmo, sendo a combinação de concreto e aço um dos principais progressos do último século (SCHWIZER, 1997; VAZ, 2002; MELLO, 2009).

Na concepção de estruturas de concreto armado, a segurança e a durabilidade são aspectos fundamentais a serem considerados. Normativas técnicas como a NBR 6118 - "Projeto de estruturas de concreto - Procedimento", especificam os requisitos mínimos de segurança que devem ser observados, refletindo o processo contínuo de atualização da engenharia para incorporar avanços tecnológicos e conhecimentos científicos (ABNT, 2014).

A profissionalização no setor da construção civil, envolvendo tanto os profissionais quanto o meio acadêmico e as empresas, é essencial para fomentar a inovação e o aprimoramento. Esse processo é imperativo para garantir a integridade e a segurança das estruturas construídas, contribuindo assim para a satisfação dos usuários.

## 2.2 Materiais Empregados na Construção Civil

A indústria da construção civil é notória pela diversidade de insumos empregados, com milhares de materiais distintos utilizados em um único projeto, conforme apontado pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (2022). Cada um desses materiais contribui para as emissões de CO<sub>2</sub>, destacando a importância de compreender seus balanços energéticos para uma seleção consciente visando a sustentabilidade ambiental (COSTA, 2012). Mesmo diante de desafios como a pandemia e conflitos internacionais, a construção civil manteve-se em expansão, embora esses fatores tenham influenciado no aumento de preços dos insumos que registraram uma média de variação de 16,63% no ano de 2021 (CBIC, 2022).

A construção tradicional brasileira tem uma longa história com o uso de tijolos cerâmicos, material que predomina desde a construção dos primeiros colégios jesuítas há mais de 400 anos. A preferência pelos tijolos cerâmicos no mercado nacional é favorecida pela geologia do país, que facilita a exploração de argila, tornando este material uma opção econômica em relação a outras técnicas construtivas (POLETTI, 2011).

Além dos materiais tradicionais como tijolos cerâmicos, a construção civil contemporânea emprega uma vasta gama de materiais, incluindo o concreto, materiais cerâmicos e metais. O concreto, em particular, é um compósito formado pela união de cimento, água, areia e pedra, destacando-se pela sua versatilidade e resistência (YAZIGI, 2021). A utilização da madeira, embora tenha se reduzido significativamente em certas aplicações estruturais, ainda encontra espaço em componentes específicos da construção, como na estrutura de coberturas e em elementos como portas e janelas, além de seu uso em formas para concreto e suportes para andaimes (ZENID, 2011; BATISTA, 2022).

Esse panorama dos materiais de construção reflete uma evolução constante no setor, levando em conta que a escolha de insumos não se limita apenas a aspectos econômicos ou de disponibilidade, mas também incorpora considerações sobre sustentabilidade e impacto ambiental. A diversificação de materiais utilizados na construção civil moderna, como o concreto, aço e PET, além dos tradicionais cerâmicos e metálicos, exemplifica a complexidade e a importância de uma abordagem integrada no planejamento e execução de projetos de construção.

## 2.3 Concreto Armado

A inventividade construtiva do homem desenvolveu um material sob o nome de concreto que após endurecido adquire resistência semelhante das rochas naturais e, quando em estado fresco, é um composto plástico que permite ser modelado nas mais variadas formas e tamanhos (LIMA, 2014).

Segundo ressaltam Nilson et al. (2010), o concreto é um excelente material que pode ser usado em elementos estruturais como os pilares em razão de sua alta resistência a compressão. No entanto, a sua baixa resistência à tração e fragilidade se configuram como características que limitam seu uso de forma isolada em elementos que são submetidos parcialmente ou totalmente ao tracionamento, como exemplo em vigas, lajes, tirantes e outros elementos fletidos.

O cimento Portland, componente essencial do concreto, viabiliza a criação de estruturas arquitetônicas diversificadas, desde a fundação até o acabamento. Joseph Aspdin patenteou esse material em 1824, na ilha de Portland, Inglaterra, após aperfeiçoar a mistura de calcário e argila, cuja calcinação e subsequente moagem, acrescida de aditivos específicos, formam a base do cimento moderno (BATTAGIN, 2009).

Ravara (2008) enfatiza que o desenvolvimento da indústria cimenteira foi fundamental para que o uso de concreto armado nas construções fosse propagado. Bons resultados relacionados à qualidade e à homogeneidade das misturas de cimento na Europa (Suíça) gerou incentivo à criação de normativas e diretrizes destinadas às construções que utilizassem o concreto como material.

Entende-se que a importância do concreto armado, que se configura como um dos pilares da construção civil, derivando sua eficácia de uma combinação calculada de cimento, água, agregados e aço. A normatização deste compósito pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desde a primeira NBR, a NB-1/1940, demonstra a constante busca pela padronização e otimização das práticas construtivas, conforme orientações da Associação Brasileira de Concreto (ABC) e da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (VILELA, 2018).

A trajetória do consumo de cimento no Brasil espelha a expansão econômica do setor construtivo. Dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2022) indicam um salto para 60 milhões de toneladas em 2020, aproximadamente 290 kg por habitante, em contraste com os 34 kg por habitante em 1950. Este aumento

reflete o desenvolvimento infraestrutural e urbano no país, posicionando o cimento como um recurso fundamental na construção civil (ANGELOTTI, 2009; CBIC, 2022).

A introdução do aço no concreto, formando o concreto armado, marca uma evolução significativa em termos de resistência estrutural. A interação entre o aço e o concreto permite uma distribuição equilibrada das forças de tração e compressão, otimizando a capacidade de suporte das estruturas. Historicamente, a manipulação de metais e a criação de ligas como o latão e o bronze representaram avanços tecnológicos fundamentais, habilitando o desenvolvimento de ferramentas, armas e estruturas duradouras (NAVARRO, 2006).

O aprimoramento das propriedades do concreto armado não se limita à sua composição básica, mas estende ao uso de aditivos químicos que melhoram características como trabalhabilidade, tempo de cura e durabilidade. Contudo, modificações na formulação exigem atenção ao impacto ambiental potencial, ressaltando a necessidade de práticas de construção que aliem eficiência e responsabilidade ecológica (BORGES, 2014).

Nesse contexto, a interação entre o aço e o concreto se revela como um aspecto técnico de relevância. A colaboração entre esses materiais não apenas amplia as possibilidades construtivas, mas também incorpora uma dimensão de sustentabilidade ao permitir o design de estruturas que maximizam o uso eficiente dos recursos. A adequação às normativas técnicas vigentes, particularmente a NBR 6118 (ABNT, 2014) assegura a conformidade das práticas de engenharia às expectativas de segurança, funcionalidade e impacto ambiental mínimo.

Portanto, a consolidação do concreto armado como material de escolha na construção civil é resultado de um processo evolutivo que integra inovações materiais, técnicas construtivas avançadas e um compromisso contínuo com a qualidade e a sustentabilidade. A colaboração entre a ciência dos materiais, a engenharia estrutural e as políticas de normatização contribuem de maneira significativa para o avanço do setor construtivo, atendendo às demandas contemporâneas por estruturas seguras, eficientes e ambientalmente responsáveis.

## **2.4 Lajes de Concreto Armado**

Em uma edificação, é necessário que, entre os pavimentos, exista a laje, pois esta irá realizar a interface entre estes, bem como pode ser suporte para contra pisos

ou ainda funcionar como teto, sendo apoiada em vigas e assim é realizado a distribuição ideal da carga da construção (FERNANDES, 2022).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 14.4.2.1, lajes são definidas como placas, consideradas elementos de superfície plana que são sujeitas às ações normais a seu plano.

De acordo com Bastos (2006), as lajes são os elementos planos que são fundamentais para receber a maior parte das ações que são aplicadas numa construção, desta maneira, essas ações são usualmente perpendiculares ao plano da laje podendo ser divididas como ações distribuídas na área que são distribuídas linearmente ou ainda com forças concentradas. Assim, as ações normalmente são direcionadas para as vigas de apoio nas bordas da laje, no entanto, podem, de maneira eventual, ser também transmitidas diretamente aos pilares.

As lajes são elementos fundamentais na construção civil e sua escolha pode influenciar diretamente na segurança e eficiência da edificação. Para a escolha adequada, é necessário levar em consideração diversos fatores, como a carga que a laje irá suportar, a dimensão do vão, a geometria da laje e as condições de execução (MAGNANI et al., 2019).

Além disso, é importante destacar que as lajes pré-fabricadas apresentam inúmeras vantagens em relação às moldadas *in loco*, como a rapidez na execução, economia de material e mão de obra, além da precisão dimensional e uniformidade das peças (GUIMARÃES, 2021).

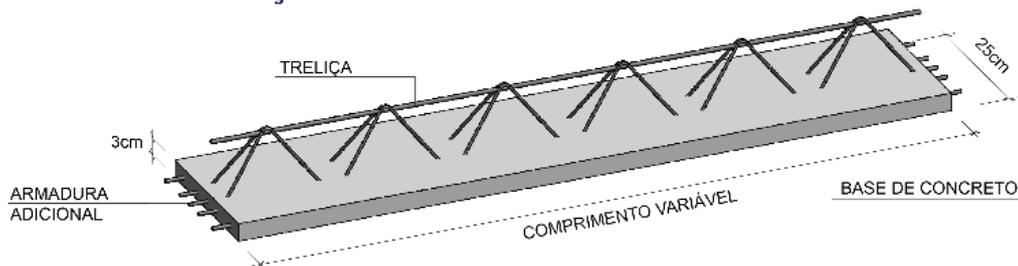
A escolha da forma de execução das lajes deve levar em conta também o tipo de edificação em que serão utilizadas, pois as lajes pré-fabricadas são mais adequadas para edifícios com múltiplos pavimentos, enquanto as lajes moldadas *in loco* são mais indicadas para edificações térreas (OLIVEIRA, 2001).

Para garantir a qualidade e segurança das lajes pré-fabricadas, é fundamental que sejam seguidas as normas técnicas estabelecidas pela ABNT, como a NBR 14862 (ABNT, 2002a), que define os requisitos e métodos de ensaio para as vigotas treliçadas utilizadas na fabricação de lajes pré-fabricadas, e a NBR 14859-1 e NBR 14859-2, que estabelecem os requisitos e procedimentos para a execução e montagem dessas lajes (ABNT, 2002b).

Segundo ressaltam Souza e Rodrigues (2008), as treliças são estruturas lineares formadas por barras retas que formam painéis triangulares quando são unidos, essa união acontece por tração ou compressão. As treliças são chamadas de:

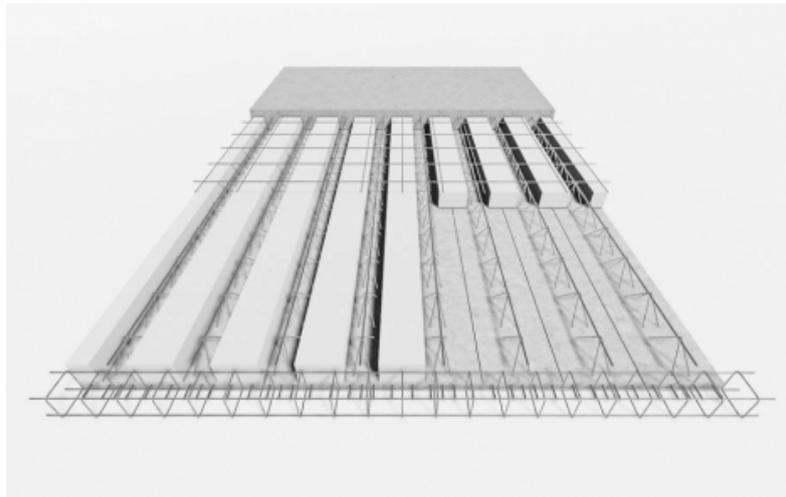
Corda, esse elemento é o conjunto de barras que limitam a treliça, superior e inferior; Montante: barra vertical em uma treliça; Diagonal em que a barra coincide com a diagonal de um painel; Painel: trecho entre dois alinhamentos consecutivos de montantes (Figuras 1 e 2); e treliça Nó: em que o ponto de união está entre as extremidades das barras.

### MINI PAINEL TRELIÇADO



**Figura 1:** Minipainel treliçado.

Fonte: Lajes Hertel (2022).



**Figura 2:** Sistema de minipainel com enchimento e engaste em viga e armadura de distribuição.

Fonte: Lajes Hertel (2022).

De acordo com Botelho (2018), as lajes são elementos horizontais que suportam as cargas das ocupações e transferem para as vigas e, posteriormente, para os pilares. A execução das lajes pré-fabricadas é realizada através da colocação de minipainéis treliçados, também conhecidos como vigotas, que são formados por uma placa de concreto que pode envolver a armadura total ou parcialmente, conforme

definido pelas normas técnicas NBR 14862 (ABNT, 2002a), NBR 14859-1 e NBR 14859-2 (ABNT, 2002b).

Para preencher o espaço entre as vigotas, são utilizados materiais como a lajota cerâmica e o EPS (poliestireno expansível). Segundo Castro (2023), esses materiais não possuem função estrutural, mas apenas ocupam o espaço que seria preenchido pelo concreto, proporcionando economia e reduzindo o peso final da estrutura. A escolha do material de enchimento deve ser feita com base nas características da edificação e nas necessidades específicas de cada projeto.

Além disso, é fundamental que a instalação dos painéis e o preenchimento entre as vigotas sejam acompanhados por um profissional qualificado. A adoção de boas práticas na execução da obra e a utilização de materiais de qualidade garantem a segurança e a durabilidade da estrutura (BRANDÃO, 1999).

A montagem e execução de lajes de painel treliçado, embora possam parecer complexas, são atividades amplamente difundidas entre os trabalhadores da construção civil no Brasil. Com a prática adquirida ao longo do tempo, essa execução se tornou habitual nos canteiros de obras, o que contribui para a agilidade e eficiência na construção de estruturas. De acordo com um estudo realizado por Mendes et al. (2014), a utilização desses painéis tem se tornado cada vez mais comum, devido aos benefícios como economia de materiais, redução do tempo de execução e melhor distribuição de cargas, o que reflete na familiaridade dos trabalhadores com a técnica, tornando-a uma prática bem estabelecida no setor.

Entretanto, é importante destacar que a utilização de lajes pré-fabricadas requer atenção e cuidados especiais durante a execução da obra. A colocação dos painéis e o preenchimento entre as vigotas devem ser acompanhados de perto por um profissional qualificado, a fim de garantir a segurança e a durabilidade da estrutura. Além disso, é necessário que sejam seguidas as normas técnicas vigentes, como a NBR 14859-1 e NBR 14859-2 (ABNT, 2002b), que definem os requisitos e procedimentos para a execução de lajes alveolares protendidas, e a NBR 14862 (ABNT, 2002a) que estabelece as especificações e métodos de ensaio para elementos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural.

É importante ressaltar que a utilização de lajes pré-fabricadas pode trazer muitas vantagens em relação às lajes moldadas *in loco*, mas sua utilização deve ser avaliada caso a caso, de acordo com as necessidades e características de cada projeto (BENDER, 2022).

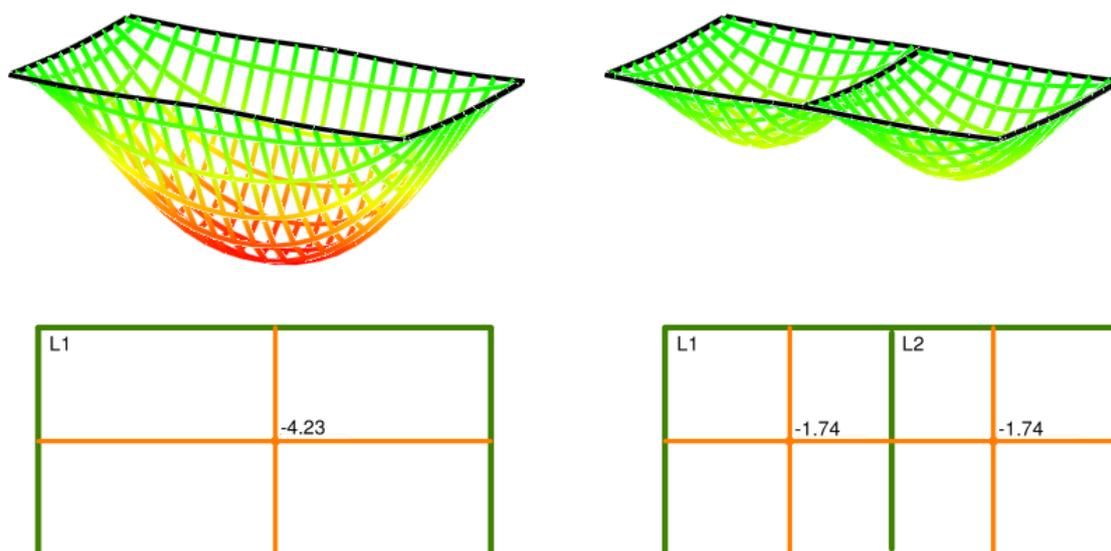
A armadura de distribuição é uma importante parte da estrutura de uma laje de concreto armado, pois é responsável por distribuir as cargas da laje nas vigotas e nas demais estruturas que fazem parte do sistema. Como explica El Debs (2000), a função da armadura de distribuição é de distribuir os esforços da laje nas vigotas levando as solicitações para os elementos que realmente têm a função de suportá-los.

Além disso, a armadura de distribuição também é fundamental para garantir a estabilidade da laje. Isso ocorre porque, em algumas situações, as vigotas de concreto armado não são capazes de suportar sozinhas as cargas da laje, principalmente quando a largura do enchimento é maior que 30 cm. Nesses casos, a armadura de distribuição é responsável por transmitir as cargas para outras partes da edificação, como as vigas e os pilares, evitando assim que a laje sofra deformações excessivas e até mesmo colapso (OLIVEIRA, 2016).

Dessa forma, a armadura de distribuição deve ser dimensionada de forma adequada para garantir a segurança e a durabilidade da estrutura. Para isso, é importante considerar diversos fatores, como as dimensões da laje, as cargas que serão aplicadas, as características dos materiais utilizados e as normas técnicas vigentes. Entre as normas importantes que especificam o assunto estão a NBR 6118 (ABNT, 2014), que trata do projeto de estruturas de concreto armado, e a NBR 14859 (ABNT, 2002b), que estabelece os requisitos para o dimensionamento e a execução de lajes nervuradas (BOCCHI, 1995).

#### 2.4.1 Esbeltez das lajes

Ao calcular uma laje, um dos aspectos importantes a ser considerado é a deformação que em alguma escala ocorrerá, mas não pode exceder certos limites. Essa deformação é referida pelas normas como flecha, conforme apresentado na Figura 3 (ABNT, 2014).



**Figura 3:** Influência do comprimento da laje na flecha.

Fonte: ALTOQI (2022).

A análise das deformações em uma laje é um aspecto crucial ao projetar estruturas de concreto. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) que trata do projeto de estruturas de concreto, a flecha limite admissível em uma laje deve ser a  $1/250$  do vão efetivo da estrutura, ou seja, a distância entre os apoios da laje. Além disso, a norma determina que a flecha máxima não deve exceder  $1/500$  do vão efetivo (ABNT, 2014).

Desta forma, na NBR 6118 (ABNT, 2014), as flechas máximas, também chamadas de deslocamentos limites, são definidas no item 13.3, que são valores práticos usados para verificar em serviço o estado limite de deformações excessivas da estrutura, e são classificados em quatro grupos básicos e descritos a seguir:

a) “aceitabilidade sensorial: em que o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. Desta forma, a limitação da flecha serve para prevenção dessas vibrações, e quando há situações especiais de utilização, é preciso realizar como estabelecido na Seção 23;

b) efeitos específicos: em que os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção;

c) efeitos em elementos não estruturais: quando os deslocamentos estruturais podem desencadear o mau funcionamento de elementos que, mesmo não fazendo parte da estrutura, estão a ela ligados;

d) efeitos em elementos estruturais: são aqueles deslocamentos que podem afetar o comportamento do elemento estrutural, que provocaria o afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. Desta forma, se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, devem ser considerados os seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura, de forma a incorporá-las ao modelo estrutural adotado”.

O controle das deformações em uma laje é fundamental para garantir a segurança e a durabilidade da estrutura ao longo do tempo. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a limitação da flecha é essencial para evitar problemas como fissuras e deslocamentos excessivos que podem comprometer a integridade da laje e causar desconforto aos usuários da edificação.

Para realizar o cálculo da flecha em uma laje, é necessário considerar a geometria da estrutura, as características dos materiais utilizados, as cargas aplicadas e, especialmente, a utilização das cargas preconizadas pela NBR 6120 (ABNT, 2019). Além das normas, a análise e o controle das deformações em lajes são aspectos cruciais do projeto e dimensionamento de estruturas de concreto.

Para garantir o controle das deformações em lajes de concreto, o emprego adequado da armadura de distribuição é de suma importância. Composta por barras de aço dispostas em uma malha posicionada próxima à face superior da laje, a armadura de distribuição desempenha um papel essencial na redistribuição das cargas, minimizando a ocorrência de flechas excessivas. Sua utilização aumenta a rigidez da laje e contribui para uma distribuição mais eficiente das cargas atuantes, evitando concentrações pontuais de tensões.

## **2.5 Balanço Energético**

A matriz energética brasileira é amplamente reconhecida por sua sustentabilidade e inovação, caracterizando-se pela predominância de fontes renováveis. Aproximadamente 80% da energia gerada no Brasil provém de fontes renováveis, uma proporção significativamente superior à de muitos outros países. Especificamente, a energia hidroelétrica representa cerca de 60% da geração total, evidenciando o compromisso do Brasil com a sustentabilidade e a necessidade de um uso eficiente dos recursos energéticos (EPE, 2022).

Além da hidroeletricidade, o Brasil tem investido em outras fontes de energia renovável, como eólica, solar e biomassa, diversificando sua matriz energética e minimizando a dependência de combustíveis fósseis. Esses esforços reforçam a posição de liderança do país no cenário global de energias renováveis (REN21, 2021).

A crescente conscientização sobre os impactos ambientais da produção de energia tem levado à reavaliação dos processos produtivos em diversos setores, incluindo a construção civil. A escolha de materiais e métodos construtivos agora leva em consideração o consumo energético e as emissões de gases de efeito estufa, além dos custos e eficiência (TAVARES; BRAGANÇA, 2016).

Um equívoco comum é a percepção de que métodos construtivos que não geram resíduos no canteiro de obras são inerentemente mais sustentáveis. No entanto, uma análise holística, que considere todas as fases do ciclo de vida do material ou produto, é essencial. O balanço energético que abrange todo o consumo de energia, desde a produção até o transporte de um produto, é um indicador fundamental da sua pegada ambiental.

Neste contexto, os estudos de Tavares e Bragança (2016) destacam a importância de considerar a demanda energética dos produtos na avaliação de sua sustentabilidade. A conversão do consumo energético em Mega Joules (MJ) permite uma comparação padronizada entre diferentes materiais e processos, facilitando a identificação de alternativas mais eficientes e menos poluentes.

Os índices analisados no balanço energético de um produto são convertidos em MJ (Mega Joule), unidade de energia definida pelo britânico James Prescott Joule que representa a energia necessária para mover a massa de 1kg em uma distância de 1 metro considerando uma aceleração de  $1 \text{ m/s}^2$  (BARROW, 1982). Apesar de ser a unidade padrão do sistema internacional existe uma equivalência com outras unidades energéticas, mais comuns e utilizadas para aferição de consumo energético. Alguns exemplos (RESNIK, HALLIDAY, 2004), (CASTELLANELLI, 2008):

1 caloria (cal) = 4,186 Joules (J);

1 kWh (Quilowatt-hora) =  $3,6 \cdot 10^6$  MJ (Mega Joules);

1 kg (Quilograma) de Diesel  $\approx$  40 MJ (Mega Joule).

## 2.6 Aço Utilizado como Armadura em Concreto Armado

A produção de vergalhão de aço está associada a um elevado consumo de energia e à geração de significativas emissões de CO<sub>2</sub>, refletindo os desafios ambientais enfrentados pela indústria siderúrgica. A análise das fontes energéticas empregadas nesse setor indica uma predominância de recursos não renováveis, como coque de carvão mineral, óleo combustível e gás natural (TAVARES; BRAGANÇA, 2021).

A matriz energética na siderurgia, marcada pela utilização de diversas fontes energéticas, evidencia a complexidade da transição para práticas mais sustentáveis. O carvão vegetal, proveniente de áreas reflorestadas, representa uma das alternativas renováveis já em uso, demonstrando o potencial para a diversificação da matriz energética (EPE, 2021).

O consumo energético específico e as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de vergalhão de aço são indicadores importantes para a avaliação dos impactos ambientais da atividade siderúrgica. A necessidade de otimização dos processos e de adoção de tecnologias com menor impacto ambiental é evidenciada pela análise desses indicadores (CLETO, 2022).

A reciclagem de aço é uma prática reconhecida por sua contribuição à redução da demanda por matérias-primas virgens e à diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>. Esse processo enfatiza a importância de incorporar estratégias de economia circular na produção siderúrgica (XAVIER; LOPES, 2020).

A implementação de tecnologias eficientes e o uso de fontes de energia renovável são apontados como estratégias para a mitigação dos impactos ambientais associados à produção de aço. Estas ações visam não apenas à redução dos desafios energéticos, mas também ao alinhamento da indústria siderúrgica com objetivos de desenvolvimento sustentável (SILVA; SERRA, 2021).

A revisão dos estudos indica a importância da adoção de práticas sustentáveis na indústria do aço, envolvendo inovações tecnológicas e a transição para fontes de energia menos impactantes ao meio ambiente. Políticas públicas e incentivos voltados para a sustentabilidade são fundamentais para promover mudanças efetivas na produção de vergalhão de aço, contribuindo para os esforços de mitigação das mudanças climáticas e conservação dos recursos naturais.

## 2.7 Politereftalato de Etila - PET

Segundo salientam Lucas e Moraes (2014), a sigla PET é designada para o Polietileno Tereftalato, poliéster ou polímero termoplástico, descrito como uma espécie de plástico de extrema resistência e 100% reciclável, que possui composição química, no entanto, não produz nenhum produto tóxico, formada apenas de carbono, hidrogênio e oxigênio.

Considerado um material de fácil aquisição pelas diferentes classes sociais o PET é um termoplástico, um material maleável, que pode ser reutilizado 100% desde a tampa até a parte terminal da garrafa, o que demonstra ser um material sustentável e aliado dos grandes projetos socioambientais (SOUSA et al., 2012).

O PET é o plástico com maior uso na indústria, pois é usado na fabricação de frascos e embalagens para refrigerantes, águas, sucos, óleos usados na alimentação, cosméticos, medicamentos e outros tipos de embalagens.

A grande utilização de plásticos tem ligação com suas propriedades, as quais são necessárias e importantes para a indústria como um todo, assim como em razão de sua durabilidade, resistência, baixo peso, modelagem fácil, custo de fabricação baixo. Assim, de forma progressiva, o plástico foi se tornando fundamental em diferentes setores, seja alimentação, bebidas, agricultura, têxtil e vestuário, construção civil, perfumaria e eletrônicos (FUNDAÇÃO HEINRICH BÖL, 2020).

O PET é um polímero termoplástico que é produzido industrialmente por duas vias: Pela via de esterificação direta do ácido tereftálico (TPA) com o etileno glicol (EG); e também pela transesterificação do dimetil tereftalato (DMT) com o etileno glicol (WANDERSON; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

De acordo com Manrich (2005), o polímero é qualquer material orgânico ou inorgânico, seja natural ou sintético, com um alto peso molecular e diferentes estruturas repetitivas (monômeros) que se ligam entre si por meio de ligações primárias e estáveis. No caso dos plásticos, estes são polímeros orgânicos sintéticos ou ainda derivados de compostos orgânicos que tem moldagem das mais diversas formas quando dispostos a condições de calor e pressão.

Dependendo do objetivo de quem classifica, os polímeros podem ser classificados mais comumente como: do seu ponto de partida de estrutura química; da sua metodologia de preparação; ou também de suas características tecnológicas e, por fim, do seu comportamento mecânico (MANRICH, 2005).

Com o constante avanço tecnológico, novas aplicações são feitas para o PET reciclado, pois com a substituição dos materiais convencionais pelos materiais alternativos que são habitualmente utilizados na engenharia e que trazem como benefícios, além da implementação de novas tecnologias, a preservação dos recursos naturais. Muitas vezes, esses materiais alternativos apresentam semelhanças ou até mesmo são superiores em suas características.

A transformação do Politereftalato de etila (PET) se distingue por sua eficiência energética quando comparada a outros materiais poliméricos. Murta (2016) destaca que o processo de transformação do PET, sendo de natureza física e não química, contribui significativamente para esta eficiência. Tal característica é de grande relevância frente aos desafios contemporâneos de sustentabilidade e redução do consumo energético.

Santos (2021) examina o processo de extrusão, essencial na produção do PET, que envolve a transição do material de sólido para líquido e sua subsequente moldagem. Este processo resulta na formação de um produto intermediário que, após ser cortado, transforma-se em *pellets*, prontos para uso nas indústrias de sopro e injeção. Esta descrição sublinha a eficácia do processo produtivo do PET.

O PET é um polímero semicristalino e ligeiramente polar, ou seja, os poliésteres termoplásticos demonstram ótima resistência química, em especial quando entram em contato com hidrocarbonetos alifáticos, álcoois, detergente, gasolina, ácidos minerais, graxas e óleos. No quadro 1, apresenta-se um resumo do comportamento do PET diante dos principais produtos químicos (SIMIELLI; SANTOS, 2010).

**Quadro 1** - Resistência do PET aos principais produtos químicos.

Agente Químico	Resistência do PET	
	23 °C	60 °C
Acetona	Ótima e regular	-
Ácido Acético (10%)	Ótima	Ótima e regular
Ácido sulfúrico (10%)	Ótima	-
Água	Ótima	Regular
Amônia (10%)	Ótima	-
Benzeno	Ótima	-
Cetona	Regular	Pobre
Etanol	Ótima	-
Etilenoglicol	Ótima	Ótima e regular
Gasolina	Ótima	Ótima e regular
Glicerol	Ótima	-
Graxas lubrificantes	Ótima	Ótima

Hidróxido de sódio (10%)	Pobre	-
Metanol	Ótima	Ótima e regular
Óleo de usinagem	Ótima	Ótima
Óleo hidráulico	Ótima	Ótima

Fonte: Simielli e Santos (2010).

As investigações realizadas por Faria (2011), em empresas de reciclagem do PET, iluminam as práticas operacionais, apontando para a relevância da eficiência em cada etapa produtiva. Tais estudos indicam a importância da otimização contínua para sustentar a viabilidade ambiental e econômica da produção do PET.

A crescente demanda por PET impulsiona a necessidade de investimentos em tecnologias que não apenas aumentem a eficiência produtiva, mas também minimizem impactos ambientais, incluindo a redução de emissões de gases de efeito estufa. Estas inovações tecnológicas são vistas como fundamentais para alinhar a produção de PET às metas de desenvolvimento sustentável.

A economia circular, com foco na reciclagem e reutilização do PET, é identificada como estratégica para diminuir o impacto ambiental. Práticas que reduzem a dependência de novas matérias-primas e diminuem a pegada de carbono, são essenciais para a sustentabilidade do setor, conforme discutido por Faria (2011).

O estudo desenvolvido por Oliveira et al. (2024), tem o objetivo de avaliar a utilização de PET (Politereftalato de Etila) extrusado como alternativa ao tradicional aço CA-50 em armaduras de concreto armado. Os resultados obtidos nos 49 corpos de prova analisados indicaram notável redução no consumo energético com o uso do PET, o que demandou 0,72 MJ/Kg, uma diminuição de 95,5% quando comparado ao aço. Os autores observaram ainda que o PET se apresentou como alternativa promissora ao aço, estando alinhado com os objetivos de eficiência energética e sustentabilidade na construção civil atual.

A literatura enfatiza a necessidade de melhorias nas práticas e processos produtivos da indústria do PET. A adoção de padrões de sustentabilidade e a implementação de práticas ambientalmente responsáveis são indispensáveis para minimizar o consumo energético e promover a responsabilidade ambiental dentro da indústria do PET.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Concreto e Materiais do Centro Tecnológico do Centro Universitário UNIVEL, situado na cidade de Cascavel, Oeste do Estado do Paraná.

#### 3.1 Caracterizações

Na engenharia de materiais aplicada à construção civil, exploramos duas propriedades relevantes: a resistência à tração e a rugosidade. A resistência à tração ajuda a compreender o comportamento dos materiais quando submetidos a forças de estiramento, enquanto a rugosidade afeta a interação entre materiais, como a adesão entre concreto e reforços.

A comparação entre o aço, comumente utilizado em estruturas, e o PET reciclado permite examinar as potencialidades de materiais sustentáveis. Este segmento do artigo visa detalhar como o PET reciclado pode representar uma alternativa ao uso do aço, focalizando em suas propriedades mecânicas e na capacidade de aderência com o concreto, que são elementos importantes para a funcionalidade e longevidade das estruturas de concreto armado.

##### 3.1.1 Resistência à tração

Utilizando a prensa "EDUTEC Máquina para Teste Universal Controlada por Computador modelo WAW-100 / CD-Y1513", com precisão de 1%, conduziu-se testes em cinco amostras de 10cm tanto de PET quanto de aço. O objetivo era obter uma medição precisa da capacidade de tração destes materiais.

A metodologia adotada incluiu o uso de pinças de 0,7mm para o PET e de 4-9mm para o aço, garantindo que o ponto de falha ocorresse intrinsicamente no material, e não na interface com as pinças. Esta precaução técnica assegura a confiabilidade dos resultados obtidos sobre a resistência à tração.

Para a realização dos testes de resistência a tração, foram utilizados os laboratórios do Centro Tecnológico do Centro Universitário UNIVEL – *campus* Cascavel.

### 3.1.2 Rugosidade

Foram utilizadas amostras de barras de aço conforme especificações da NBR 14859 (ABNT, 2002b), e amostras de PET reciclado. A escolha destes materiais baseou-se em seu uso prevalente na indústria da construção civil e na proposta de investigar alternativas mais sustentáveis ao aço.

A rugosidade superficial das amostras de aço e PET foi medida utilizando um rugosímetro digital, marca BEIJING DRAGON ELECTRONICS CO., modelo DR230. Este equipamento foi escolhido por sua capacidade de fornecer leituras precisas da rugosidade superficial, essenciais para a análise comparativa.

As amostras de aço e PET foram preparadas conforme padrões industriais, mantendo dimensões uniformes para garantir a precisão das medições. Cada amostra foi medida em múltiplos pontos para assegurar a consistência dos dados. A medição concentrou-se em quantificar as distâncias entre as ranhuras e a rugosidade geral das superfícies, seguindo um protocolo estabelecido para minimizar variações e garantir a reprodutibilidade das leituras.

Os dados de rugosidade foram analisados e comparados para avaliar a aderência potencial ao concreto das amostras testadas. A análise incluiu a consideração das especificações da NBR 14859 (ABNT, 2002b) sobre a importância da superfície nervurada das barras de aço para a aderência ao concreto. Além disso, investigou-se como as características de superfície do PET reciclado poderiam ser otimizadas para melhorar sua aderência, considerando as limitações do processo de fabricação desse material.

O estudo apoiou-se em revisões bibliográficas de trabalhos anteriores, como o de Ferreira (2020) sobre o uso de PET reciclado em impressoras 3D e a pesquisa de Peña (2024), que investigou as propriedades superficiais de diversos materiais em relação à sua interação com o concreto. Essas referências forneceram um pano de fundo para entender as implicações da rugosidade na aderência material-concreto e orientaram a análise dos dados coletados.

## 3.2 Demanda energética

Este estudo visou quantificar e comparar o balanço energético e as emissões atmosféricas associadas à produção e ao transporte de aço e PET reciclado,

ênfatizando a matriz energética brasileira de predominância renovável. A análise engloba as etapas de produção, armazenamento, e transporte, incluindo a avaliação do ciclo de vida completo dos materiais, desde a extração das matérias-primas até a disposição final.

Utilizando o software SimaPro 9.5.0.2, focou-se na análise de ciclo de vida (ACV) para calcular as emissões atmosféricas e o consumo energético de aço e PET reciclado. Os dados de emissões de CO<sub>2</sub> eq, CH<sub>4</sub> eq, e N<sub>2</sub>O eq foram coletados para investigar os impactos ambientais ao longo de suas fases de vida. Além de consultar diversos artigos que tratavam de um ou de ambos os materiais. Esta metodologia facilitou a comparação direta entre os materiais, refletindo questões de sustentabilidade e eficiência energética no setor da construção civil.

Informações adicionais foram obtidas por meio de conversões energéticas padrão e de revisão de literatura acadêmica e relatórios técnicos (BARROW, 1982; RESNIK, HALLIDAY, 2004; CASTELLANELLI, 2008; EPE, 2022; CLETO, 2022), essenciais para o cálculo do consumo energético em Mega Joules (MJ) por quilograma de material e análise das emissões diretas e indiretas nas etapas de produção e transporte.

No caso do aço, a análise abordou o consumo energético associado à sua produção, destacando o uso de diferentes fontes energéticas. Informações sobre consumo específico de energia e emissões de CO<sub>2</sub> por quilograma de aço produzido foram detalhadas, considerando a importância da reciclagem para a redução da demanda por matéria-prima e diminuição das emissões.

Para o PET, foi examinado o processo de transformação, enfatizando a produção e reciclagem do material. Foram analisadas as etapas de extrusão e corte, com base em dados existentes para quantificar o consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub>. A reciclagem do PET recebeu atenção especial pela sua capacidade de reduzir o consumo energético e as emissões.

Os dados sobre emissões atmosféricas e consumo energético foram integrados para comparar os materiais segundo critérios de eficiência energética e impacto ambiental. Esta comparação forneceu informações para discutir a viabilidade ambiental do uso de aço e PET reciclado na construção civil, considerando o cenário energético brasileiro e as estratégias para mitigar impactos ambientais.

### 3.3 Ensaio Resistência Mecânica

#### 3.3.1 Concreto e agregados

No desenvolvimento da composição do concreto para a presente pesquisa, adotou-se um traço de 3:2:1, correspondendo, respectivamente, a agregado graúdo, agregado miúdo e cimento Portland. Esta proporção foi estrategicamente escolhida para alcançar um equilíbrio ótimo em termos de resistência, durabilidade e trabalhabilidade do concreto. O cimento Portland, identificado pelo menor valor no traço, é fundamental para a coesão e resistência do material, como descrito por Mehta e Monteiro (2013) em "Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais".

Os agregados, que compõem a maior parte do volume do concreto, foram selecionados conforme as especificações da norma NBR 7211 (ABNT, 2022). O agregado miúdo, geralmente areia, possui granulometria entre 0,075 mm e 4,8 mm, enquanto o agregado graúdo, composto por pedras britadas ou seixos rolados, varia entre 4,8 mm e 50 mm. A conformidade com esses parâmetros granulométricos é crucial, conforme Neville (2011) aponta em "Propriedades do Concreto", para assegurar a homogeneidade e qualidade do concreto, influenciando diretamente suas propriedades mecânicas e durabilidade.

A relação água-cimento de 0,65 foi definida com base em critérios de hidratação eficiente do cimento e manutenção da integridade estrutural do concreto. A importância desta proporção é destacada por Aïtcin (2000) em "High-Performance Concrete", enfatizando que uma relação a/c equilibrada é essencial para a otimização das propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto.

Ademais, a incorporação de um aditivo plastificante na proporção de 2% em relação à massa do cimento segue as recomendações do fabricante, visando aprimorar a trabalhabilidade do concreto. A eficácia dessa adição em melhorar a manipulação e aplicação do concreto, sem aumentar o conteúdo de água, é corroborada por Ramachandran (1995) em "Concrete Admixtures Handbook".

Assim, a seleção deste traço específico, em conformidade com as diretrizes da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e as normas técnicas estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2022), é fundamental para atender às exigências estruturais e de durabilidade para a aplicação específica do concreto. Este processo, conforme discutido por Falkner (2007) em "Technology and Applications of

Autonomous Underwater Vehicles", assegura a qualidade e a conformidade do material com os padrões estabelecidos no campo da engenharia civil.

Os corpos de prova foram executados em cada batelada com a mesma dosagem de concreto. O agregado miúdo ou (areia) foi adquirida em uma única compra de um único fornecedor. Antes de ser utilizada, ambas as amostras foram submetidas ao processo de secagem, conforme preconiza a NBR NM 46 (ABNT, 2003a).

Quanto aos materiais, tanto areia quanto pedra foram caracterizados de acordo com as especificações da NBR NM 248 (ABNT, 2003b). Essa norma estabelece o método para determinar a composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos, sendo aplicada para avaliar a distribuição dos tamanhos das partículas presentes nos agregados.

O agregado miúdo foi obtido da mesma fonte e adquirido em uma única compra para evitar diferenças entre lotes. Essa prática é recomendada para garantir a consistência dos resultados e está em linha com os procedimentos padrão estabelecidos em literatura relevante. Conforme preconizado pela norma já citada, realizou-se o ensaio de granulometria com cinco amostras, de acordo com os procedimentos normativos.

Foi realizada a secagem dos materiais utilizados em estufa segundo a norma NBR NM 27 (ABNT, 2001), a qual prevê que, para o procedimento ser realizado, precisa estar num intervalo de temperatura entre  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  por 24 horas.

O concreto dosado para moldar estes corpos de prova foi (aglomerante (cimento): agregado miúdo (areias de rio lavada): agregado graúdo (brita 1)) (1,5:3,9:4,6) em massa, com uma relação água/cimento de 0,75. O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CP II F-32. Para este trabalho, foi considerado um concreto executado para grau de agressividade I, de acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2005). Além disso, foi adicionado um aditivo superplastificante, na proporção de 3% em relação à massa do aglomerante segundo recomenda o fabricante.

Como o fator água/cimento é fundamental para a resistência final do concreto, todos os agregados, tanto areia de rio lavada e brita 1, foram submetidos ao processo de secagem em estufa, sendo mantidos por 24h a uma temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ); garantido assim as mesmas condições para todas as amostras.

Para a determinação da porcentagem de utilização do aditivo, levou-se em consideração o peso do aglomerante, sendo que, no caso deste trabalho, o cimento

utilizado foi o CP II F-32. A escolha desse cimento específico levou em conta suas características e adequação às exigências do projeto.

Essa combinação de traço de concreto, relação água/cimento, aditivo superplastificante e tipo de cimento utilizado foi selecionada com o objetivo de obter um concreto com propriedades adequadas, garantindo resistência, trabalhabilidade e desempenho de acordo com as necessidades do projeto em questão.

### 3.3.2 Amostras

Seguindo o que recomenda a NBR 5738 (ABNT, 2015) sobre a moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto, foram realizados 75 corpos de prova (Tabela 1), incluindo amostras cilíndricas e prismáticas, apresentadas na Figura 4. Em cada batelada, foram feitos 5 (cinco) moldes prismáticos da análise proposta, totalizando 5 corpos de prova. Além disso, foram executadas mais 2 (dois) testemunhos. As bateladas foram definidas a fim de comparar as propriedades mecânicas do PET frente ao aço na utilização como armadura de distribuição. Para esta pesquisa, foram realizadas e nomeadas as bateladas com as seguintes configurações:

**Tabela 1:** Amostras Utilizadas por Ordem de Execução.

<b>Lote</b>	<b>Amostras</b>	<b>Barras/Tela (mm)</b>	<b>Testemunhos</b>	<b>CP Prismático</b>
LOTE 01	5 amostras	2 barras de pet 3,04 mm	2	3
LOTE 02	5 amostras	2 barras de aço 3,33 mm CA-50	2	3
LOTE 03	5 amostras	3 barras de pet 3,04 mm	2	3
LOTE 04	5 amostras	3 barras de aço 3,4 mm CA-50	2	3
LOTE 05	5 amostras	TELA 10x10 cm 3,4 mm CA-50	2	5
LOTE 06	5 amostras	1 barra de pet 3,04 mm	2	6
LOTE 07	5 amostras	1 AÇO CA 50 3,4mm	2	3

Fonte: O autor (2024).



**Figura 4:** Detalhe de um lote padrão dos corpos de prova prismáticos e dos cilíndricos retirados em cada batelada.

Fonte: O autor (2024).

Os corpos de prova cilíndricos foram considerados resistentes em 3 testes entre as bateladas. Para o ensaio de resistência da compressão não foi objetivada apenas a flexão, visto que buscou-se avaliar o efeito da resistência da compressão. Entretanto, é necessário saber a resistência à compressão de cada amostra para se balizar sobre o quão resistente é o concreto e seu efeito na flexão. Desta forma, calcula-se apenas a diferença ganha com o material utilizado como material de armadura de distribuição. Foi respeitado o mesmo traço e mesmas condições para as amostras, entretanto, para cada corpo de prova prismático foi feito o abatimento do concreto a fim de conferir o *slump*, segundo o que preconiza a NBR 16889 (ABNT, 2020): “Concreto – Determinação do abatimento do tronco de cone”. Outra caracterização do concreto foi a resistência à compressão do mesmo, através da NBR 5738 (ABNT, 2015): “Modelagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto”.

### 3.3.2.1 Corpo de prova

Como já exposto na revisão, as normas não possuem um método para dimensionamento de armadura de distribuição, existe apenas uma relação entre a área de aço da armadura positiva e a área da armadura de distribuição.

Objetivou-se com a metodologia exposta a seguir, determinar a quantidade de barras do material que é suficiente para atender a quantidade mínima estabelecida em norma e o atendimento de resistência à solicitação de tração que este material seria submetido a fim de ter o mesmo efeito de resistência garantido pela área de aço.

Para tanto uma metodologia precisou ser desenvolvida, como a função da armadura de distribuição é garantir que a carga que é exercida sobre o enchimento seja direcionada às vigotas, objetivou-se um teste prático para determinar que a resistência à tração obtida pelo corpo de prova com aço seja equivalente ao obtido com o preposto material, aqui denominado PET.

O ensaio sobre a tração seguiu a NBR 12142 (ABNT, 2010): “Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos” e a NBR 5738 (ABNT, 2015): “Modelagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto”.

Os moldes prismáticos possuem dimensão de 0,15x0,15x0,5m, entretanto como objetivou-se encontrar a reação do aço e do pet apenas com a capa da laje, o corpo de prova prismático não foi preenchido na altura de 0,15m, sendo posicionada a armadura e o PET com cobrimento de 0,025m e a camada de concreto foi de 0,05m, conforme Figura 5.



**Figura 5:** Moldes de madeira para concretagem dos corpos prismáticos com altura de capa.

Fonte: O autor (2024).

Para evitar que o concreto deslocasse o aço e o PET para o fundo da forma, foram feitas aberturas e as barras fixadas nas laterais, permitindo que o concreto fosse depositado sem comprometer o posicionamento das barras.

A metodologia adotada neste estudo não está normatizada na forma como foi executada, portanto, pode ser considerada inovadora, baseou-se nas normas aplicáveis à determinação da flexão em vigas. No entanto, é importante destacar que o comportamento da capa da laje, neste contexto, é relevante principalmente para a análise da distribuição de cargas. Esta análise é essencial, pois representa a primeira interação da estrutura com o carregamento, contribuindo para a distribuição efetiva da carga acidental nas treliças. Esta abordagem está alinhada com os princípios estabelecidos na NBR 6120 (ABNT, 2019), que trata das "Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações".

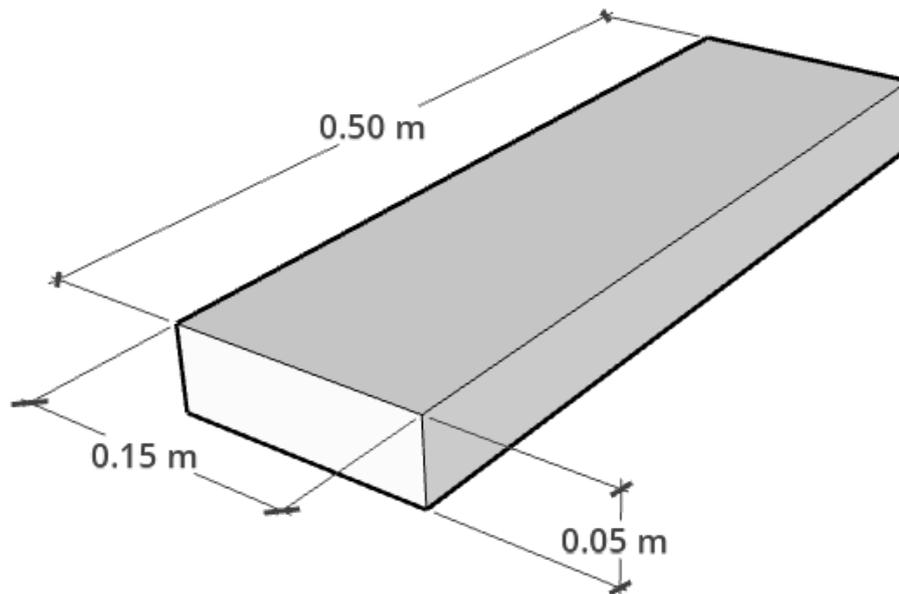
Ao todo foram solicitados 49 corpos de prova prismáticos com as configurações supra citadas, os resultados da tração máxima suportada foi o resultado principal a ser obtido, porém, a análise permitiu a obtenção de outros fatores que exercem influência na resistência final, como *Slump*, Dimensão, Massa, local em que aconteceu a ruptura e a Idade de rompimento. Todos estes dados foram anotados para cada amostra.

### 3.3.3 Ensaio de resistência à flexão

Para o ensaio de resistência à flexão, utilizou-se a Prensa Servo controlada CBR Owntec. A barra de aço utilizada possuía resistência conhecida e tabelada. Os resultados obtidos foram comparados com os valores estabelecidos pela norma NBR 12142 (ABNT, 2010). A resistência à tração foi analisada diretamente nos materiais isolados, PET e Aço, que foram submetidos à tração na prensa.

A flexão do conjunto foi analisada na prensa de concreto, seguindo as recomendações da norma NBR 12142 (ABNT, 2010), que trata da determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, e da norma NBR 5738 (ABNT, 2015), que trata da modelagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. No entanto, o corpo de prova precisou ser adaptado. De acordo com as normas, esse teste deve ser realizado com um corpo de prova nas dimensões de 0,15x0,15x0,50m.

Assim, para analisar o comportamento desejado, que é o de uma capa de laje, o corpo de prova prismático foi concretado até a altura de 5cm. Portanto, o corpo de prova final ficou com as dimensões de 0,05x0,15x0,50m, conforme apresentado na Figura 6.



**Figura 6:** Corpo de prova prismático no formato de capa de laje para teste de eficácia em armaduras de distribuição.

Fonte: O autor (2024).

Seguindo o que recomenda a NBR 5738 (ABNT, 2015) que trata da moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto, foi realizado um total de 75 corpos de prova (Tabela 2), incluindo amostras cilíndricas e prismáticas, apresentadas na Figura 6.

**Tabela 2:** Amostras Utilizadas por Ordem de Execução.

Lote	Amostras	Barras/Tela (mm)	Testemunhos	CP Prismático
LOTE 01	5 amostras	2 barras de pet 3,04 mm	2	3
LOTE 02	5 amostras	2 barras de aço 3,33 mm CA-50	2	3
LOTE 03	5 amostras	3 barras de pet 3,04 mm	2	3
LOTE 04	5 amostras	3 barras de aço 3,4 mm CA-50	2	3
LOTE 05	5 amostras	TELA 10x10 cm 3,4 mm CA-50	2	5
LOTE 06	5 amostras	1 barra de pet 3,04 mm	2	6
LOTE 07	5 amostras	1 AÇO CA 50 3,4mm	2	3

Fonte: O autor (2024).

Em cada batelada, foram feitos 5 (cinco) moldes prismáticos da análise proposta, totalizando 5 corpos de prova. Além disso, foram executadas mais 2 (dois) testemunhos. As bateladas foram definidas a fim de comparar as propriedades mecânicas do PET frente ao aço na utilização como armadura de distribuição. Para

esta pesquisa, foram realizadas e nomeadas as bateladas com as seguintes configurações, como mostra a Figura 4, a qual detalha um lote padrão dos corpos de prova prismáticos e dos cilíndricos retirados em cada batelada.

Os corpos de prova cilíndricos foram consistentes com valores semelhantes em todas as bateladas. Em uma das bateladas, foram retirados 6 corpos de prova, onde 3 serviram para o mesmo propósito dos demais, enquanto os outros 3 foram utilizados para a análise de absorção de água.

A resistência à compressão não foi objetivada apenas à flexão, tendo em vista o efeito que se buscou avaliar. Entretanto, é fundamental saber a resistência à compressão de cada amostra para se balizar e determinar quão resistente é o concreto e seu efeito na flexão, em seguida, calcula-se apenas a diferença ganha com o material utilizado como material de armadura de distribuição. Foi respeitado o mesmo traço e mesmas condições para as amostras, entretanto, para cada corpo de prova prismático foi feito o abatimento do concreto a fim de conferir o *slump*, segundo o que preconiza a NBR 16889 (ABNT, 2020): “Concreto – Determinação do abatimento do tronco de cone”. Outra caracterização do concreto foi a resistência à compressão do mesmo, por meio das orientações da NBR 5738 (ABNT, 2015): “Modelagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto”.

### 3.3.4 Relação da resistência útil x área do fuste da barra

O objetivo desta análise foi avaliar a eficácia das barras de polietileno tereftalato (PET) em comparação com as tradicionais barras de aço quando utilizadas como reforço em compósitos de concreto. Especificamente, buscou-se entender como a área de superfície dessas barras afeta a transferência de carga e a resistência mecânica do concreto reforçado.

A área da superfície de cada “cilindro”, considerando que a barra de aço e PET geometricamente é cilíndrica, é essencial para a avaliação da eficiência de transferência de carga, por isso, foi calculada com base na geometria dos cilindros, utilizando as fórmulas padrão para a área de superfície de cilindros. A área útil do fuste das barras foi determinada como uma variável crítica na análise da eficácia do reforço.

Os resultados foram comparados com os de testemunhos de concreto padrão para avaliar o impacto do tipo de barra de reforço na resistência do compósito. A

diferença na resistência entre os lotes testados e os testemunhos foi ajustada pela área útil do fuste para normalizar os resultados, permitindo uma comparação justa da eficiência estrutural em termos de Megapascal (MPa).

A análise focou na comparação da eficácia das barras de PET e aço, com base na resistência mecânica e na eficiência de transferência de carga, ajustadas pela área de contato. A análise incluiu a avaliação da não linearidade entre a quantidade de reforço e a resistência alcançada, considerando fatores como distribuição, orientação e aderência das barras no compósito de concreto reforçado.

Os dados fornecidos indicam que, devido à diversidade de fontes de materiais utilizadas no processo de extrusão, o Politereftalato de etileno (PET) reciclado utilizado neste estudo apresentou variações nas suas composições químicas entre os lotes. Apesar dessas variações serem uma consequência natural do processo de reciclagem, foi confirmado que todas as amostras mantiveram propriedades dentro de um espectro aceitável para os objetivos desta pesquisa.

Este PET reciclado é um polímero de engenharia, obtido por meio de reciclagem e subsequente extrusão, caracterizado como termoplástico com organização molecular semicristalina. A densidade do material foi registrada em  $1,36 \text{ g/cm}^3$  e as amostras exibiram uma taxa de contração volumétrica variando entre 0,2% e 2,0%. As temperaturas críticas, como a de transição vítrea e de fusão, foram consistentemente medidas em  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $260 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente.

Para garantir a qualidade do processamento e das propriedades finais do produto, o material passou por um rigoroso processo de secagem, recomendado entre  $160$  e  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  por 3 a 5 horas. Esse procedimento é essencial para reduzir a presença de umidade, que pode prejudicar a estabilidade e as propriedades mecânicas do PET durante a moldagem e o uso subsequente em aplicações de embalagem, nas quais é exigida resistência térmica e mecânica.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como finalidade apresentar os dados obtidos com as análises realizadas e seus respectivos resultados.

Explorando a caracterização de materiais fundamentais na engenharia civil, este texto se debruça sobre as propriedades de resistência à tração e rugosidade superficial do aço e do Politereftalato de Etila (PET) reciclado. A análise da resistência à tração ajuda a determinar a capacidade dos materiais em resistir a forças de tração antes da falha, enquanto a rugosidade superficial é um fator que influencia diretamente na aderência entre materiais, constituindo-se como um aspecto importante para aplicações como o concreto armado. Por meio de testes precisos, o desempenho do aço, tradicionalmente utilizado na armadura de concreto armado, é comparado com alternativas sustentáveis, como o PET reciclado. A análise comparativa visa entender as potencialidades e limitações de cada material, procurando harmonizar as exigências estruturais com as preocupações ambientais. Ao avaliar o comportamento dos materiais sob cargas e sua interação com o concreto, contribuimos para a discussão sobre a viabilidade de utilizar materiais reciclados em projetos de engenharia, abrindo caminho para investigações futuras e o desenvolvimento de métodos construtivos mais sustentáveis.

A fim de apresentar de forma organizada os dados obtidos, todos os valores foram compilados na Tabela 3. Cabe ressaltar que esses valores foram calculados a partir da média simples dos dados coletados durante a pesquisa.

Com base nos dados obtidos, fica evidente que todas as amostras, quando comparadas com o testemunho, apresentaram ganho significativo em resistência. Essa melhoria na tensão revela um cenário promissor para a utilização do PET como material estrutural.

Ao considerar um cálculo estrutural, tem-se uma barra de 3,4mm a cada 5cm, atuando como uma laje de distribuição sob um carregamento adequado para mais da metade das ocupações preconizadas na NBR 6120 (ABNT, 2019). Entretanto, conforme avaliado na resistência à tração simples, o PET na espessura utilizada alcançou apenas 10kN, enquanto o aço atingiu 500kN, conforme as figuras 10 e 11.

**Tabela 3:** Valores obtidos com o cálculo da média aritmética de todas as amostras das medições feitas no laboratório, trata-se de um resumo de todos os dados da tese.

BARRA	SLUMP (cm)	A1 (cm)	A2 (cm)	LARGURA (cm)	COMPRIMENTO (cm)	MASSA (kg)	FLEXÃO (kN)	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	D4 (cm)
2 PET	16,5	5,2	5,3	15,0	49,8	9,2	220,3	23,3	0,0		
TESTEMUNHO	16,5	5,0	4,9	15,0	50,2	8,9	186,9	22,2	0,0		
2 AÇO CA 50 3,4mm	16,8	5,1	5,1	15,0	50,1	9,2	355,3	19,3	26,6		
TESTEMUNHO	16,8	5,1	5,3	15,0	50,5	9,2	202,1	23,2	0,0		
3 PET	17,0	5,2	5,1	15,0	50,2	9,1	178,5	24,2	0,0		
TESTEMUNHO	17,0	5,1	5,1	15,0	50,5	9,1	162,0	17,1	0,0		
3 AÇO CA 50 3,4mm	17,0	4,9	5,1	15,0	49,8	9,0	362,8	17,2	32,3		
TESTEMUNHO	17,0	4,8	4,9	15,0	50,3	8,6	177,9	18,6	0,0		
TELA 10X10 3,4mm	18,0	5,1	5,2	15,0	49,9	9,3	352,9	14,4	19,2	27,3	30,1
TESTEMUNHO	18,0	5,1	4,9	15,0	50,3	8,7	162,0	23,0			
1 PET	12,0	5,1	5,2	15,0	50,1	9,3	285,3	21,2			
TESTEMUNHO	12,0	5,1	5,1	15,0	50,4	9,1	259,7	20,0			
1 AÇO CA 50 3,4mm	17,0	5,0	4,9	15,0	50,1	9,0	454,1	19,3	31,5		
TESTEMUNHO	17,0	4,9	5,1	15,0	50,4	9,0	246,8	25,0			

\*\*Notas: A1 e A2: Altura do molde prismático medida em cm.

D1; D2; D3 e D4: Amostras onde ocorreu o rompimento do corpo de prova em 1, 2, 3 e 4 lugares respectivamente.

Fonte: O autor (2024).

Essa constatação é de suma importância, pois evidencia a viabilidade técnica do PET como substituto parcial do aço na armadura de distribuição. O fato de o PET ter apresentado um desempenho satisfatório em relação à resistência, aliado ao seu peso mais leve e facilidade de manuseio, ressalta suas vantagens como material estrutural na construção civil.

Esses resultados abrem perspectivas promissoras para a construção de estruturas mais sustentáveis e eficientes. A possibilidade de utilizar o PET como uma alternativa ao aço em parte da estrutura pode representar uma significativa redução na demanda por recursos naturais não renováveis, contribuindo para uma abordagem mais *eco-friendly* na indústria da construção.

Contudo, é crucial destacar que, para consolidar o PET como uma opção efetiva, mais estudos e testes devem ser conduzidos, a fim de aprimorar suas características e confirmar sua eficácia em diferentes cenários e demandas estruturais. Com a continuidade da pesquisa e investimentos em inovação, o PET

pode se tornar uma peça-chave na construção de um futuro mais sustentável e responsável ambientalmente.

É evidente que a necessidade de ajustar a espessura do produto se torna aparente. Embora o PET tenha apresentado aumento significativo na resistência, superior a 30% no LOTE 01, em comparação com o seu testemunho, conforme demonstrado na tabela 6 e corroborado pelas análises da seção transversal, é preciso considerar o aprimoramento dessa característica para garantir seu desempenho ideal.

Ainda que os resultados preliminares indiquem um progresso positivo na resistência do PET como material estrutural, é importante ressaltar que o processo de aperfeiçoamento deve ser contínuo. A otimização da espessura é um fator crítico para alcançar o equilíbrio entre a resistência mecânica e as necessidades estruturais das construções.

Nesse sentido, estudos adicionais são essenciais para compreender a relação entre a espessura do PET e sua resistência, considerando diferentes condições e demandas estruturais. A busca por uma proporção ideal é fundamental para que o PET se consolide como uma alternativa confiável e eficiente em relação ao uso do aço como armadura de distribuição no concreto.

Vale destacar também que o PET apresenta um fator importante a ser considerado sob o aspecto executivo. Sendo mais leve e de manuseio mais fácil, pode ser transportado em rolo e não demanda nenhuma ferramenta diferente das já disponíveis em qualquer obra. Essas características tornam o PET um virtual substituto do aço para a utilização na armadura de distribuição, desde que este seja desenvolvido em espessura maior e sua resistência alcance a mesma do aço.

A praticidade executiva do PET é um aspecto que não pode ser negligenciado. Sua leveza contribui para reduzir o esforço físico necessário durante o manuseio, proporcionando maior conforto aos trabalhadores da construção civil. Além disso, o transporte em rolos facilita a logística de distribuição, agilizando o processo construtivo e diminuindo o tempo de execução das obras.

A ausência da necessidade de ferramentas específicas para trabalhar com o PET é um fator decisivo para sua viabilidade como substituto do aço. A disponibilidade de equipamentos padrão em qualquer obra permite uma transição mais suave para a adoção do PET como elemento estrutural.

No entanto, é fundamental que pesquisas adicionais sejam conduzidas para desenvolver o PET com uma espessura maior e garantir que sua resistência atenda

aos requisitos exigidos no contexto da armadura de distribuição. Ao atingir esse objetivo, o PET pode se consolidar como uma alternativa sólida e sustentável, impulsionando o setor da construção civil em direção a práticas mais *eco-friendly* e eficientes.

No contexto do desenvolvimento sustentável na indústria da construção civil, a resistência química do PET à corrosão destaca-se como um fator crucial. Este atributo torna o PET reciclado uma alternativa viável para utilização em concretos que incorporam agregados reciclados, especialmente em situações em que a procedência desses materiais pode não ser plenamente garantida. Frigione (2010) em seu estudo "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete" demonstra que o uso de PET reciclado como agregado não só preserva as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto, mas também oferece resistência química melhorada. Essa combinação de propriedades posiciona o PET reciclado como uma solução promissora para aplicações estruturais na construção civil, alinhando-se com os objetivos de sustentabilidade e inovação no setor.

Portanto, a utilização do PET como auxiliar na armadura de distribuição em concretos com agregados reciclados pode contribuir para a construção de estruturas mais *eco-friendly*, promovendo a reutilização de materiais e diminuindo o impacto ambiental do setor da construção civil. Sua resistência química e a possibilidade de ser incorporado a processos construtivos já existentes fazem do PET um candidato promissor para aprimorar a sustentabilidade e eficiência no campo da engenharia civil.

Quanto as caracterizações dos materiais, tanto rugosidade quanto resistência à tração foram desenvolvidas. A análise da rugosidade foi feita em 5 amostras distintas de ambos os materiais, foram adotadas duas medições por amostra. A rugosidade média do aço foi de  $11,003\mu\text{m}$  já a do PET foi de  $8,115\mu\text{m}$ ; a unidade de medida  $\mu\text{m}$  é  $10^{-6}$  metros. Portanto, a variação entre as rugosidades médias foi na ordem de 73%, não foi possível realizar a medição da ranhura do aço uma vez que a limitação do micrometro impedia tal análise.

Ao analisar a eficácia do PET reciclado como substituto do aço em aplicações estruturais, observa-se que a resistência alcançada em relação à área útil apresenta resultados promissores. No estudo realizado, o LOTE 06, utilizando PET, alcançou resistência de 3,93 MPa, enquanto o LOTE 07, com aço, resultou em resistência de 5,21 MPa. Notavelmente, o PET atingiu 75% da resistência do aço, ocupando 81% de sua área. Este dado indica que a substituição do aço pelo PET, do ponto de vista

técnico, não é apenas viável, mas também eficiente em termos de desempenho estrutural.

Esta conclusão encontra respaldo em estudos recentes na literatura científica. Frigione (2010) demonstrou que o PET reciclado, quando usado como agregado em concreto, mantém propriedades mecânicas adequadas, além de oferecer resistência química melhorada. Além disso, Silva, Brito e Dhir (2015) reforçaram a viabilidade do PET reciclado em concreto, destacando sua sustentabilidade e desempenho satisfatório, particularmente em termos de resistência à compressão e absorção de água. Esses estudos corroboram a análise apresentada, sustentando a potencialidade do PET como uma alternativa técnica viável ao aço em certas aplicações estruturais.

A análise comparativa do desempenho energético entre o aço e o polietileno tereftalato (PET) revela uma diferença notável em termos de eficiência energética relativa à resistência mecânica. Especificamente, o aço registra um consumo energético de 16,06 Megajoules por quilograma (MJ/kg) e uma resistência mecânica de 5,21 Megapascals (MPa), resultando numa eficiência de apenas 0,33 MPa por MJ/kg. Em contraste, o PET demonstra um perfil energético significativamente mais favorável com um consumo de 0,72 MJ/kg e uma resistência de 3,93 MPa, o que equivale a uma eficiência de 5,46 MPa por MJ/kg. Esta avaliação quantitativa indica que o PET é aproximadamente 16 vezes mais eficiente em termos de resistência por unidade de energia consumida em comparação ao aço.

Esta superioridade do PET é corroborada por literatura acadêmica que examina a energia incorporada e a eficiência energética dos materiais de construção. O trabalho de Ashby (2005) em "Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice" destaca a importância de uma escolha material consciente baseada na eficiência energética, abordando a correlação entre a energia incorporada nos materiais e suas propriedades mecânicas. Ashby enfatiza que o baixo consumo energético do PET, combinado com uma resistência mecânica comparativamente alta, oferece uma vantagem substancial na seleção de materiais com menor impacto ambiental.

Adicionalmente, Thompson et al. (2009) em "The Plastics Paradox: Life-Cycle Analysis and the Environmental Impacts of Plastics" argumentam pela necessidade de uma avaliação holística que transcenda a mera eficiência energética na produção e inclua análises de ciclo de vida completo. Estas análises devem considerar todas as fases, desde a produção até a reciclagem e o descarte, para avaliar verdadeiramente

a sustentabilidade de materiais como o PET. Essa abordagem é crucial para entender não apenas o desempenho energético dos materiais, mas também seus impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida, facilitando assim uma escolha mais informada e responsável no contexto da construção civil.

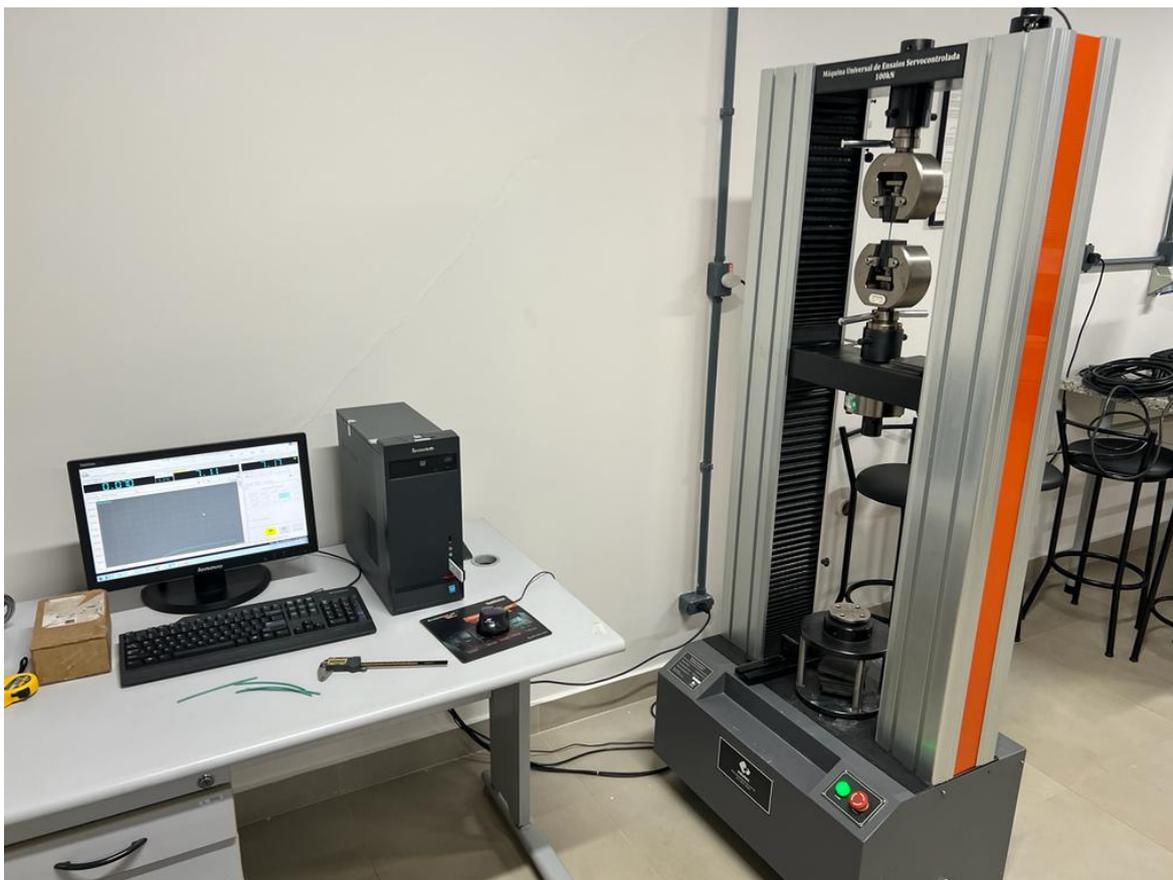
Portanto, os dados sobre o desempenho do PET em comparação ao aço, suportados por uma metodologia de análise de ciclo de vida abrangente, evidenciam uma clara vantagem energética do PET, reforçando seu papel potencial como um material mais sustentável na indústria da construção.

#### **4.1 Resistência à tração**

A principal função do aço no concreto armado é absorver as forças de tração, uma necessidade estrutural crítica em construções civis. Neste contexto, a análise comparativa da resistência à tração entre o aço e o PET reciclado torna-se essencial para avaliar a viabilidade de ambos os materiais em aplicações de concreto armado. Utilizando a prensa "EDUTEC Máquina para Teste Universal Controlada por Computador modelo WAW-100 / CD-Y1513", com precisão de 1%, conduziram-se testes em cinco amostras de 10cm de comprimento tanto de PET quanto de aço. O objetivo era obter uma medição precisa da capacidade de tração destes materiais.

A metodologia adotada incluiu o uso de pinças de 0,7mm para o PET e de 4-9mm para o aço, garantindo que o ponto de falha ocorresse intrinsecamente no material, e não na interface com as pinças. Esta precaução técnica assegura a confiabilidade dos resultados de resistência à tração obtidos.

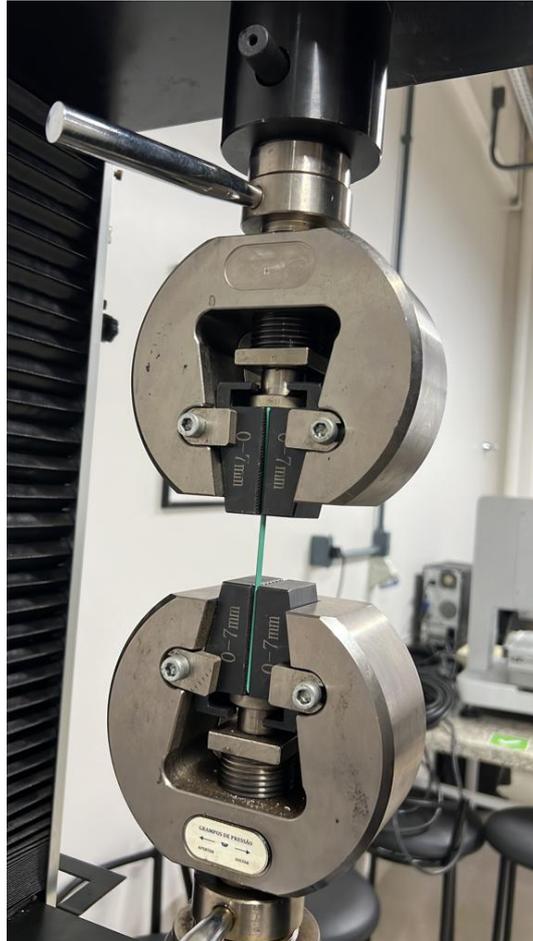
Os testes revelaram que o fenômeno de rompimento devido à tração resulta em empescoamento, destacando a significância desse comportamento nas análises de resistência dos materiais. Em um estudo conduzido por Pereira (2019), uma barra de aço carbono CA – 60, com diâmetro de 3,4mm, foi submetida a um ensaio de tração uniaxial, durante o teste, observou-se uma curva tensão-deformação curvilínea após o ponto de escoamento, indicando a ocorrência de deformação plástica progressiva. Em estágio avançado do teste, notou-se um empescoamento marcado por um estreitamento localizado na região da barra (Figura 7), um indicativo claro da resistência à tração do aço.



**Figura 7:** *Análise de resistência à tração do PET*

Fonte: O autor (2024).

Comparativamente, a investigação sobre PET, relatada por Gonçalves et al. (2013), destaca o potencial do uso de materiais reciclados como o PET em componentes estruturais. Embora apresente uma resistência à tração inferior à do aço, o estudo aponta para as possíveis aplicações do PET quando sujeito a cargas menos exigentes. Especialmente relevante é a análise das blendas PET/PEAD que, com a adição de compatibilizantes, demonstraram melhorias em suas propriedades mecânicas, aproximando-se dos valores de tensão máxima e módulo de elasticidade típicos do aço (Figura 8).



**Figura 8:** Detalhe das pinças na análise do PET.

Fonte: O autor (2024).

Na Figura 9, é possível visualizar o rompimento em uma estricção promovida pela tração. O rompimento de barras metálicas submetidas à tração é um fenômeno significativo em diversas áreas da engenharia e materiais. Neste estudo, analisamos o comportamento de uma barra metálica de aço carbono CA – 60 de 3,4mm durante um ensaio de tração uniaxial. Observou-se que, após o ponto de escoamento, a curva tensão-deformação apresentou comportamento curvilíneo, indicativo de deformação plástica progressiva. Em um estágio avançado do ensaio, a barra apresentou estricção, caracterizado por um estreitamento localizado na região.



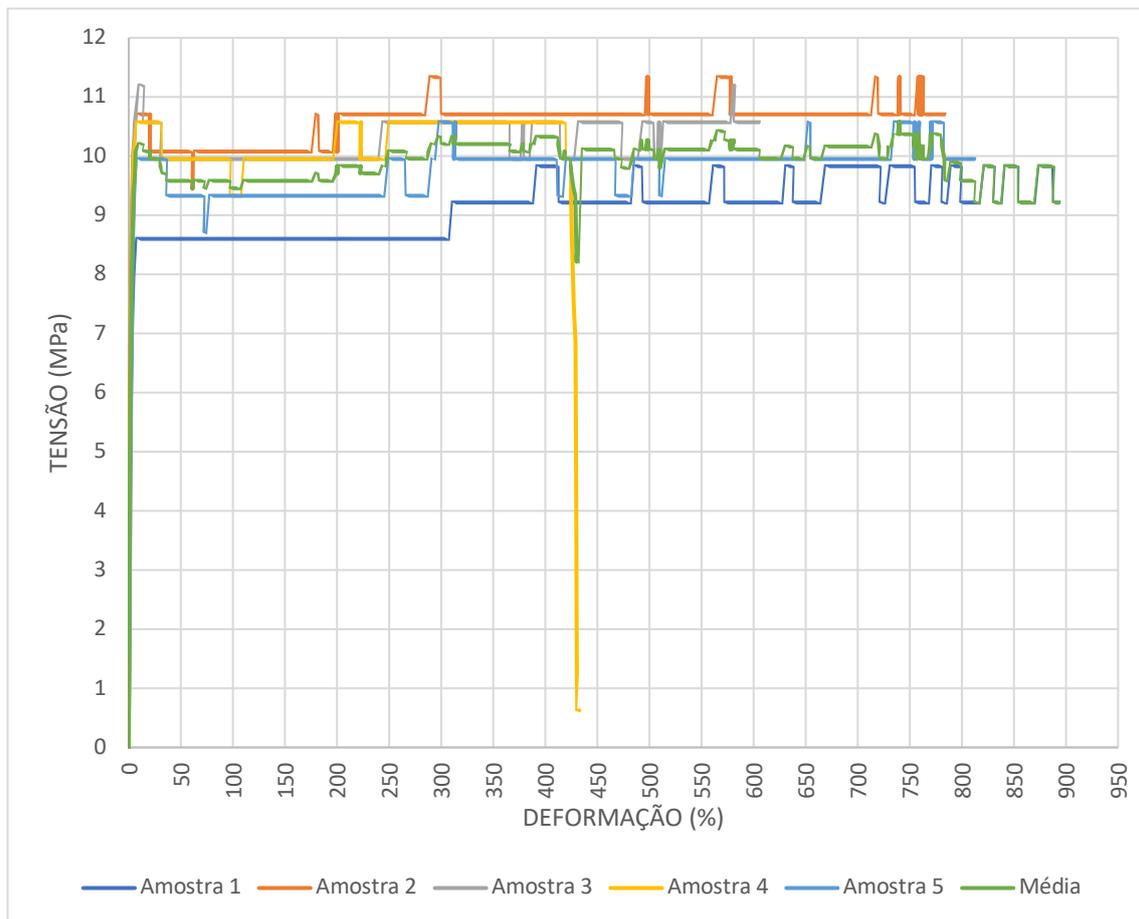
**Figura 9:** Rompimento da amostra de Aço 3,4mm CA-50

Fonte: O autor (2024).

Este estudo destaca a complexidade da escolha de materiais para aplicações estruturais, sobretudo quando se considera a incorporação de alternativas sustentáveis como o PET reciclado. Os resultados obtidos na análise da resistência à tração de aço e PET ilustram a diversidade de comportamentos mecânicos entre materiais tradicionais e reciclados, evidenciando a importância de considerar não apenas as propriedades mecânicas, mas também o contexto de aplicação e as demandas específicas de cada projeto de construção.

A partir das evidências apresentadas, fica claro que o aço continua a ser um material de escolha para aplicações que exigem alta resistência à tração e durabilidade. No entanto, os estudos de Gonçalves et al. (2013) sobre o PET reciclado abrem caminho para a exploração de materiais alternativos em situações em que as cargas estruturais permitem. O desafio reside em equilibrar a necessidade de performance estrutural com as crescentes demandas por práticas de construção mais sustentáveis.

Em estudos para caracterizar as propriedades mecânicas de polímeros frente a metais, ensaios de tração são um método padrão de avaliação. A Figura 10 exibe o gráfico tensão-deformação de amostras de Polietileno Tereftalato (PET). Enquanto a Figura 11 é o gráfico correlato do AÇO, com uma linha representando a média de comportamento dessas amostras. As Figura 10 e 11 indicam aumento próximo ao linear da tensão com a deformação até atingir um pico, após o qual ocorre redução, sugerindo o início de falha nas amostras. As amostras de PET mostraram tensão máxima muito inferior àquela das amostras de aço, com base nos dados de carga e tensão da tabela fornecida.



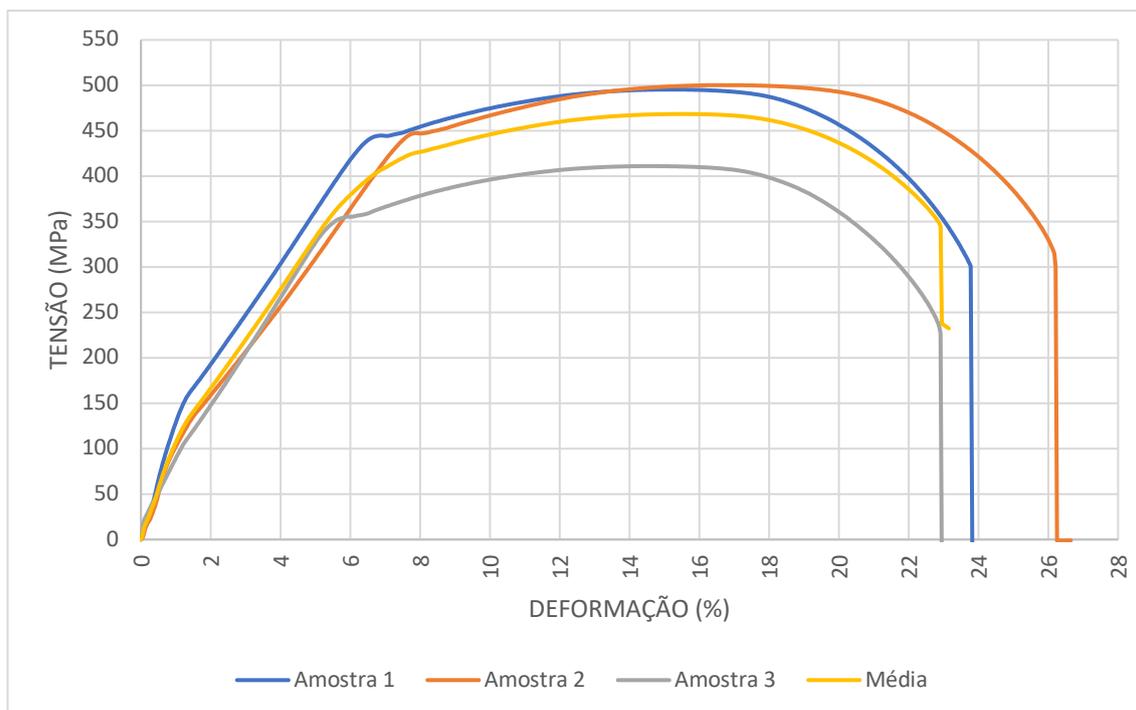
**Figura 10:** Gráfico de tensão-deformação de amostras de Polietileno Tereftalato (PET)

Fonte: O autor (2024).

As amostras de aço suportaram tensões na ordem de 400 a 500 MPa, ao passo que as amostras de PET não ultrapassaram 12 MPa. Além disso, a deformação percentual nas amostras de PET foi significativamente maior, excedendo 800% em

alguns casos, em contraste com as amostras de aço, que apresentaram deformação máxima entre 20 e 27%. Os valores de deslocamento em milímetros também ressaltam a maior ductilidade do PET em comparação com o aço.

Estes dados sobre tensão, deslocamento e deformação das amostras de PET e aço permitem a observação das capacidades e limitações de cada material. O aço, com alta resistência e baixa deformação, é adequado para aplicações que exigem durabilidade e menor propensão à deformação. O PET, com sua alta capacidade de deformação, é apropriado para situações que demandam flexibilidade e resistência à fadiga. A seleção de materiais para aplicações de engenharia, portanto, depende de uma compreensão clara das propriedades mecânicas e dos requisitos específicos de desempenho.



**Figura 11:** Gráfico de tensão-deformação de amostras de Polietileno Tereftalato (PET)

Fonte: O autor (2024).

Na Tabela 4, é apresentado um resumo da análise comparativa das propriedades mecânicas de amostras de aço utilizadas neste estudo.

**Tabela 4:** Resumo da análise comparativa das propriedades mecânicas de amostras de aço.

	<b>AÇO 01</b>	<b>AÇO 02</b>	<b>AÇO 03</b>	<b>PET 01</b>	<b>PET 02</b>	<b>PET 03</b>	<b>PET 04</b>	<b>PET 05</b>
<b>Carga (kN)</b>	16,435	16,595	13,64	0,08	0,09	0,09	0,085	0,085
<b>Tensão (MPa)</b>	495,328	500,151	411,091	9,828	11,335	11,194	10,572	10,572
<b>Desloc. (mm)</b>	11,986	13,333	11,591	447,019	392,081	303,273	217,283	406,594
<b>Deformação (%)</b>	23,952	26,646	23,152	893,906	783,986	606,19	434,072	812,69

Fonte: O autor (2024).

A análise comparativa das propriedades mecânicas de amostras de aço (AÇO 01, AÇO 02 e AÇO 03) e polietileno tereftalato (PET) (PET 01 a PET 05), submetidas a ensaios de carga, revela distinções significativas no comportamento destes materiais. Os resultados indicam que as amostras de aço apresentam uma capacidade de carga superior, refletindo maior resistência mecânica em comparação às amostras de PET. Esta observação é corroborada pelos valores de tensão que, para o aço, situam-se em um patamar elevado, evidenciando sua robustez estrutural.

No que se refere ao deslocamento e à deformação, constata-se que as amostras de aço exibem um comportamento menos propenso à deformação significativa sob cargas elevadas, uma característica desejável para aplicações estruturais onde a integridade dimensional é crítica. Em contraste, as amostras de PET demonstram uma elevada capacidade de deformação, mesmo sob cargas relativamente baixas. Este comportamento sugere uma flexibilidade notável do material que pode ser vantajosa em aplicações que requerem absorção de energia ou flexibilidade.

A análise destes dados permite inferir sobre a aplicabilidade de cada material em contextos específicos de engenharia. Enquanto o aço é preferencial para estruturas que demandam alta resistência e durabilidade, o PET pode ser considerado para aplicações que beneficiam de sua capacidade de deformação elevada e resistência à fadiga. Este estudo destaca, portanto, a importância de uma seleção criteriosa de materiais, baseada em uma compreensão detalhada de suas propriedades mecânicas, para o sucesso de projetos de engenharia.

Embora este capítulo não conclua definitivamente a questão da substituição do aço por materiais reciclados como o PET, ele lança uma base para futuras investigações. O aprofundamento no entendimento das propriedades mecânicas e do comportamento sob cargas de diferentes materiais é crucial para a inovação na

engenharia civil. Assim, a exploração continuada das potencialidades do PET reciclado, ao lado do desenvolvimento de novas tecnologias de materiais, poderá levar a soluções construtivas que harmonizem resistência, economia e sustentabilidade.

## 4.2 Rugosidade

A rugosidade superficial é um parâmetro relevante na avaliação de materiais em engenharia, particularmente em situações que demandam interações físicas específicas entre materiais, como na adesão das barras de aço ao concreto armado. Este estudo foca na capacidade de adesão ao concreto de materiais alternativos, como o PET reciclado. Segundo a NBR 14859 (ABNT, 2002b), a superfície nervurada das barras de aço tem um papel na aderência ao concreto, facilitando a transferência de esforços. Por outro lado, materiais poliméricos reciclados, como o PET, possuem superfícies mais lisas devido a limitações no processo de fabricação, o que pode influenciar a sua capacidade de adesão.



**Figura 12:** Rugosidade do AÇO e do PET.

Fonte: O autor (2024).

Utilizando um rugosímetro digital BEIJING DRAGON ELECTRONICS CO., modelo DR230, a rugosidade das amostras de aço e PET foi medida (Figura 12). Os resultados mostraram rugosidade de  $11,174\mu\text{m}$  para o aço e  $8,641\mu\text{m}$  para o PET. Embora os valores sejam relativamente próximos, as diferenças podem ter implicações na adesão ao concreto, considerando a função das superfícies

nervuradas para as barras de aço conforme especificado pela NBR 14859 (ABNT, 2002b).

Este trabalho também revisou estudos anteriores relevantes, como a investigação de Ferreira (2020) sobre o uso de PET reciclado para filamentos de impressoras 3D FDM e o estudo de Peña (2024) que explorou o impacto das propriedades superficiais de diferentes materiais na sua interação com o concreto. Essas pesquisas destacam a importância da rugosidade na adesão ao concreto e apontam para a possibilidade de ajustar a superfície de materiais reciclados para melhorar essa característica.

Em conclusão, apesar das diferenças observadas na rugosidade entre o aço e o PET, o estudo indica a existência de um potencial para ajustar a rugosidade de materiais reciclados, como o PET, visando a sua aplicação em situações estruturais. Isso sugere a possibilidade de desenvolver abordagens construtivas que integrem a vantagem ambiental dos materiais reciclados com os requisitos técnicos para aplicações em concreto armado.

#### **4.3 Demanda energética**

Neste capítulo, é apresentada a comparação entre o aço, tradicionalmente utilizado como armadura em concreto armado, e o Politereftalato de Etila (PET), destacando suas implicações em termos de consumo energético e emissão de CO<sub>2</sub>. A produção de aço é notável pelo seu intensivo consumo de uma variedade de fontes energéticas, incluindo combustíveis fósseis e eletricidade, contribuindo significativamente para as emissões de CO<sub>2</sub>. Em contraste, o PET, um polímero termoplástico amplamente reconhecido por sua resistência mecânica e química, apresenta um processo de transformação caracterizado por maior eficiência energética. A análise subsequente integra essas discussões ao contexto mais amplo das emissões de CO<sub>2</sub> e do consumo energético associado à produção de ambos os materiais. Mediante a avaliação comparativa, o estudo visa destacar diferenças significativas em sustentabilidade e eficiência energética entre o aço e o PET, enfatizando o potencial do PET como alternativa mais ecológica em aplicações específicas dentro da indústria da construção civil.

#### 4.3.1 Aço utilizado como armadura em concreto armado

A fabricação de vergalhões de aço implica um consumo energético intenso, envolvendo fontes como óleo combustível, gás natural, coque de carvão mineral, eletricidade, e carvão vegetal. Tavares e Bragança (2021) detalham a composição das fontes energéticas na produção de aço: 1% proveniente de óleo combustível, 6% de gás natural, 45% de coque de carvão mineral, 10% de eletricidade, 19% de carvão vegetal, e 19% de outras fontes. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), 46% das fontes energéticas na siderurgia brasileira são renováveis, porém, uma análise mostra que 57,4% da energia utilizada origina-se de fontes não renováveis. Importante destacar que o carvão vegetal utilizado na siderurgia provém de áreas de reflorestamento, contribuindo para que, em cenário otimista, até 60% da energia usada possa ser classificada como não renovável.

Cleto (2022) quantifica a energia necessária para fabricar 1kg de vergalhão de aço em aproximadamente 16,05 MJ, com 33% dessa energia derivada de fontes renováveis, alinhando-se aos dados de Tavares e Bragança (2021). Este processo resulta na emissão de 1,061kg de CO<sub>2</sub> por kg de aço produzido, destacando o desafio ambiental associado ao alto consumo energético e às substanciais emissões de CO<sub>2</sub> na produção de vergalhões de aço.

A indústria siderúrgica tem explorado alternativas para minimizar seu impacto ambiental, considerando a implementação de fontes energéticas renováveis e o desenvolvimento de tecnologias limpas e eficientes. A reciclagem de sucata e resíduos do processo produtivo surge como uma estratégia de economia circular, potencializando a redução da demanda por matéria-prima virgem e diminuindo as emissões de CO<sub>2</sub>.

Além disso, a instituição de certificações que validem a sustentabilidade dos processos e produtos siderúrgicos promove a transparência e incentiva a adoção de práticas industriais responsáveis. A conformidade com normas como a NBR ISO 14001, referente aos sistemas de gestão ambiental, fortalece a posição da indústria siderúrgica em direção a uma produção mais sustentável.

#### 4.3.2 Politereftalato de etila

De acordo com a ABIPET (2015), o PET é um polímero termoplástico com resistência que é utilizado para fabricação de garrafas, esse material apresenta alta resistência mecânica e química, o que suporta o contato com diversos agentes agressivos, assim como pode ser reciclado 100% após o uso.

O processo de transformação do Polietileno Tereftalato (PET) se destaca pela sua eficiência energética quando comparado a outros materiais, consolidando sua posição como uma alternativa sustentável para uma variedade de aplicações (MURTA, 2016). Santos (2021) ressalta que a transformação do PET ocorre por meio de um processo físico, em vez de químico, contribuindo significativamente para a redução do consumo energético. Durante a produção do PET, a etapa de extrusão é fundamental, consistindo no aquecimento e compressão do material, que muda de sólido para líquido. Posteriormente, este é moldado em uma estrutura chamada "canhão", que o direciona a uma matriz para formar um produto intermediário conhecido como "macarrão". Esse produto é então processado por um conjunto de facas, que o cortam em pequenos fragmentos ou pellets, utilizados nas indústrias de sopro e injeção.

Um estudo realizado por Faria (2011), que investigou sete empresas de reciclagem, ofereceu informações relevantes sobre o consumo energético no processo de produção do PET. Este estudo categorizou as etapas de produção em extrusão e corte, observando que o consumo energético médio para produzir 1kg de PET é de 0,7 kW, com um desvio padrão de 0,5 kW/kg. A extrusão foi responsável por 0,2 kW do consumo energético, enquanto o corte representou 0,3 kW.

Santos (2021) fornece uma estimativa específica para o consumo energético na etapa de extrusão, crucial para a obtenção do "macarrão" intermediário, indicando que a produção de 1kg de PET nessa fase consome aproximadamente 0,72 MJ/kg.

#### 4.3.3 Emissão de CO<sub>2</sub> e Consumo energético PET/AÇO

Integrando a análise de emissão de CO<sub>2</sub> ao consumo energético na produção de PET e aço, este estudo destaca diferenças significativas em termos de sustentabilidade e eficiência energética. A produção de aço, de acordo com Cleto (2022), demanda aproximadamente 16,05 MJ por quilograma, resultando em uma

emissão de 1,061kg de CO<sub>2</sub>, refletindo o alto impacto ambiental associado ao seu processo produtivo. Por outro lado, a transformação do PET requer substancialmente menos energia, aproximadamente 0,72 MJ por quilograma (SANTOS, 2021), sugerindo uma pegada de carbono inferior.

A emissão de CO<sub>2</sub> para a produção de 1kg de PET pode ser estimada utilizando o valor de 0,72 MJ/kg e a conversão fornecida pela calculadora do IDESAM, que considera a matriz energética específica e sua relação com as emissões de gases de efeito estufa. Assumindo que cada MJ de energia consumida na produção de PET corresponda, em média, à emissão de 0,085kg de CO<sub>2</sub>, com base em dados gerais sobre emissões de energia elétrica no Brasil, conforme Akatu (2024) e Faria (2011), o cálculo resulta em uma emissão estimada de aproximadamente 0,0612kg de CO<sub>2</sub> para a produção de 1kg de PET.

A Tabela 5 resume o consumo energético e as correspondentes emissões de CO<sub>2</sub> para a produção de 1kg de cada material, fornecendo uma base comparativa clara entre o PET e o aço.

**Tabela 5:** Resumo do consumo energético e as emissões de em Kg de CO<sub>2</sub> correspondente a produção por Kg de material.

<b>MATERIAL</b>	<b>CONSUMO ENERGÉTICO (MJ/Kg)</b>	<b>CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/Kg)</b>	<b>EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> (Kg CO<sub>2</sub>/Kg)</b>
<b>PET</b>	0,72	0,20	10%
<b>AÇO</b>	16,05	4,46	223%

Fonte: O autor (2024).

Esta comparação evidencia o PET como uma alternativa mais sustentável em termos de eficiência energética e emissões de CO<sub>2</sub>, reforçando a importância de considerar o ciclo de vida dos materiais na avaliação do impacto ambiental de produtos e processos industriais.

#### **4.4 Análise de rompimento à flexão**

Para o ensaio de resistência à flexão, utilizou-se a Prensa Servo controlada CBR Owntec. A barra de aço utilizada possuía resistência conhecida e tabelada, e os resultados obtidos foram comparados com os valores estabelecidos pela norma NBR

12142 (ABNT, 2010). A resistência à tração foi analisada diretamente nos materiais isolados, PET e Aço, que foram submetidos à tração na prensa. Esse processo resultou em um gráfico conhecido como Tensão x Deformação, no qual os regimes de deformação dos materiais eram classificados como elásticos e plásticos. Beer et al. (2011) explicam que, no regime elástico, o material apresenta uma resposta linear ao carregamento, e a deformação é completamente reversível após a remoção da carga, enquanto, no regime plástico, a deformação é permanente e não totalmente recuperável.

Os dados da primeira batelada podem ser observados na Tabela 6.

**Tabela 6:** Dados correspondentes a primeira batelada de testes.

LOTE	SLUMP	A1	A2	LARG.	COMP.	CARGA						
						(kN)	D1	D2	D3	D4		
BCP01	2	PET	16,5	5	6	15	50,5	252,8	16	0	0	0
BCP02	2	PET	16,5	5,2	5,2	15	49,5	223,4	28,9	0	0	0
BCP03	2	PET	16,5	5,1	5	15	50,5	212,1	23,3	0	0	0
BCP04	2		16,5	5,2	5,2	15	49,5	226,3	19,7	0	0	0
BCP05	2		16,5	5,3	5,1	15	49	187,1	28,6	0	0	0
BCP06	TEST.		16,5			4,9		184,4			20,5	
BCP07	TEST.		16,5			5		189,3			23,9	
CCP01	NÃO SE APLICA		16,5			NÃO SE APLICA		95,63			NÃO SE APLICA	

\*\*Legenda: Test. Testemunho; Larg. Largura; Comp. Comprimento.

Fonte: O autor (2024).

Os dados tabulados representam os resultados experimentais obtidos no estudo dos corpos de prova prismáticos. "Lote" se refere à identificação atribuída a cada conjunto de amostras. "Slump" indica a medida de abatimento do concreto no estado fresco, em centímetros, que é um indicador da trabalhabilidade do concreto. As variáveis A1 e A2 indicam as alturas medidas dos corpos de prova, com o objetivo de manter a altura padronizada em 5 centímetros. A "Largura" e o "Comprimento" dos corpos de prova devem ser consistentemente 15cm e 50cm, respectivamente, seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma para corpos de prova prismáticos.

A variável "carga (kN)" mostra a resistência máxima que cada corpo de prova suportou antes do rompimento, expressa em quilonewtons (kN). As colunas D1, D2, D3 e D4 registram as distâncias, em centímetros, do ponto de ruptura até a lateral do corpo de prova. A presença de valores zero indica que não houve ruptura adicional nesses pontos específicos.

Neste conjunto de dados, algumas amostras foram reforçadas com PET, identificadas nos lotes BCP01 a BCP03, enquanto outras amostras, como BCP06 e BCP07, serviram como testemunhos, ou seja, amostras de referência sem reforço. O lote CCP01 é distinto pois não se aplica a variável "*Slump*" ou outras medidas, sendo um caso especial dentro da série de testes realizada. A tabela fornece uma visão comparativa da resistência e do comportamento sob carga de diferentes composições de concreto, fundamentais para análises subsequentes de desempenho estrutural.

As medidas D1, D2, D3 e D4 são as medidas da superfície lisa dos corpos de prova prismáticos, identificando onde ocorreu o rompimento como apresentado na Figura 13.



**Figura 13:** Medida da distância de ocorrência do rompimento a partir da lateral do corpo de prova

Fonte: O autor (2024).

Os testemunhos romperam a 21,1 (cm) em média da lateral da amostra.

As amostras com PET romperam em apenas um local, em média a 23 cm da lateral. Já as amostras com aço foram separadas pois a tela rompeu em 4 locais, enquanto as amostras com 3, 2 e 1 barra romperam em média em apenas 2 locais, os aços romperam a 18,6 e 28 cm. Já a tela, que foi separada das amostras de aço rompeu em 4 locais que na média ficaram distantes da lateral da amostra na face lisa de 14, 19, 27 e 30 cm.

A avaliação da fratura em corpos de prova prismáticos é um passo crucial para entender o comportamento dos materiais sob carga, especialmente no campo da engenharia civil, pois esses parâmetros impactam diretamente a segurança e a

durabilidade das estruturas de concreto. No presente estudo, a análise foi focada em localizar e quantificar o rompimento nos corpos de prova de concreto reforçado com diferentes materiais, como PET e aço, cada um apresentando um padrão de fratura característico.

As superfícies lisas dos corpos de prova foram meticulosamente examinadas para determinar os pontos de ruptura, registrados como medidas D1, D2, D3 e D4, conforme ilustrado na figura que acompanha este texto. Os resultados mostraram que os testemunhos apresentaram rompimento médio a 21,1cm da lateral, evidenciando um comportamento relativamente uniforme entre as amostras analisadas.

De maneira particular, as amostras contendo PET exibiram ruptura em um ponto único, com uma distância média da lateral de 23cm, sugerindo um ponto de fragilidade singular ao longo do corpo de prova. Em contraste, as amostras reforçadas com aço exibiram um padrão de ruptura mais complexo. Enquanto as amostras com telas de aço fraturaram em quatro pontos distintos – com as rupturas ocorrendo, em média, a 14, 19, 27 e 30cm das laterais –, as amostras com 3, 2 e 1 barra de aço tenderam a fraturar em apenas dois locais. Essas últimas rupturas foram observadas, em média, a 18,6 e 28cm da lateral.

#### 4.4.1 Tratamento dos dados

A flexão do conjunto foi analisada na prensa de concreto, seguindo as preconizações da norma NBR 12142 (ABNT, 2010), que trata da determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, e da norma NBR 5738 (ABNT, 2015), que trata da modelagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.

Como já exposto na revisão, as normas não possuem um método para dimensionamento de armadura de distribuição, existe apenas uma relação entre a área de aço da armadura positiva e a área da armadura de distribuição.

Para tanto, uma metodologia precisou ser desenvolvida. Como a função da armadura de distribuição é garantir que a carga que é exercida sobre o enchimento seja direcionada às vigotas, objetivou-se um teste prático para determinar que a resistência à tração obtida pelo corpo de prova com aço seja equivalente ao obtido com o preposto material, aqui denominado PET.

Na Tabela 7, é possível observar a diferença percentual entre as resistências para a flexão do corpo de prova com adição de PET, aço ou tela estudados.

**Tabela 7:** Diferença percentual entre as resistências à flexão do corpo de prova com adição de PET, AÇO ou TELA e seu respectivo testemunho.

LOTE	BARRA	FLEXÃO (kN)	FLEXÃO DA AMOSTRA / TESTEMUNHO
LOTE 01	2 PET	220,3	18%
	TESTEMUNHO	186,9	
LOTE 02	2 AÇO CA 50 3,4mm	355,3	76%
	TESTEMUNHO	202,1	
LOTE 03	3 PET	178,5	10%
	TESTEMUNHO	162,0	
LOTE 04	3 AÇO CA 50 3,4mm	362,8	104%
	TESTEMUNHO	177,9	
LOTE 05	TELA 10X10 3,4mm	352,9	118%
	TESTEMUNHO	162,0	
LOTE 06	1 PET	285,3	10%
	TESTEMUNHO	259,7	
LOTE 07	1 AÇO CA 50 3,4mm	454,1	84%
	TESTEMUNHO	246,8	

Fonte: O autor (2024).

É perceptível, nessa análise inicial, que existe uma discrepância entre os lotes, ainda se faz necessária a correção com a resistência a compressão, mas já é possível evidenciar que a resistência com a “TELA 10x10 3,4mm” obteve a maior diferença com um ganho de resistência final na ordem de 118% em relação a seu respectivo testemunho, seguido do LOTE 4 com três barras de aço com 104%, dentre as amostras com PET, a que melhor resultou positivamente foi o LOTE 1 com 18% da resistência de seu testemunho, logo, desta análise inicial, podemos supor que, com PET, o ideal é ter 2 para um intervalo de 15cm.

Portanto, o tratamento se deu a partir de uma relação direta entre a média de resistência à tração dos corpos de prova cilíndricos e a resistência com a tração obtida pelos corpos de prova prismáticos balizando todas as amostras para que a resistência respectiva à compressão fosse ponderada em cada análise e essa influência mitigada. Demonstra-se na coluna da Flexão (Amostra / Testemunho) a diferença percentual entre a resistência a Flexão evidenciando a influência que o material, seja PET, AÇO ou TELA exerceu sobre a resistência final do corpo de prova. Esse cálculo foi compilado na Tabela 8.

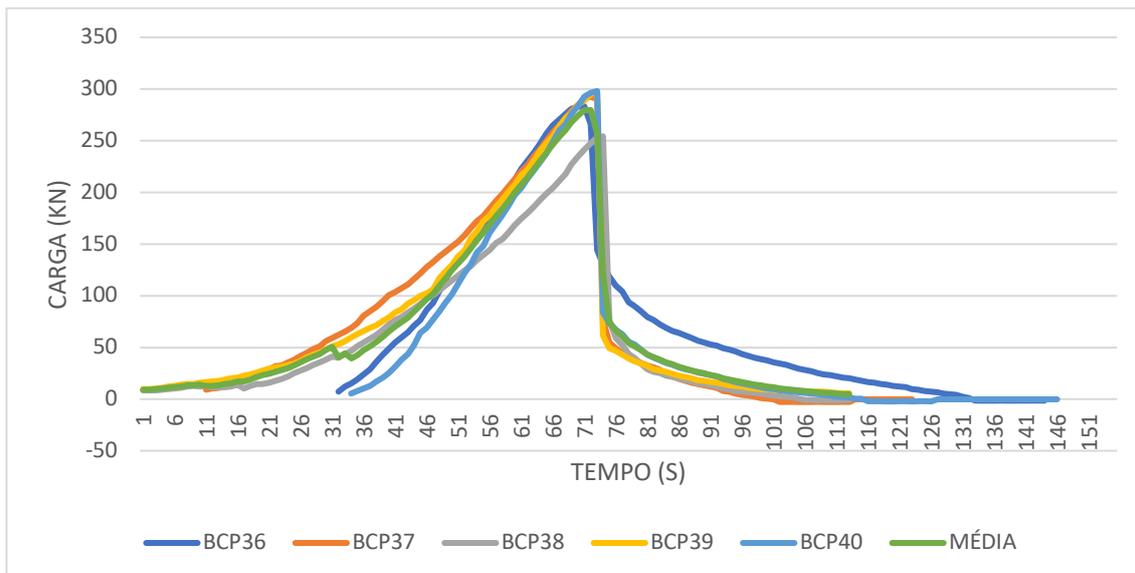
**Tabela 8:** Compilação das médias dos rompimentos das amostras, testemunhos e corpos de prova cilíndricos a tração e compressão respectivamente, seguido pela razão de ambas e a diferença.

LOTE	BARRA	COMPRESSÃO (kN)	FLEXÃO / COMPRESSÃO	TESTEMUNHO - AMOSTRA
LOTE 01	2 PET	97,88	225%	34%
	TESTEMUNHO	97,88	191%	
LOTE 02	2 AÇO CA 50 3,4mm	91,50	388%	167%
	TESTEMUNHO	91,50	221%	
LOTE 03	3 PET	90,53	197%	18%
	TESTEMUNHO	90,53	179%	
LOTE 04	3 AÇO CA 50 3,4mm	81,27	446%	228%
	TESTEMUNHO	81,27	219%	
LOTE 05	TELA 10X10 3,4mm	69,97	504%	273%
	TESTEMUNHO	69,97	232%	
LOTE 06	1 PET	119,30	239%	22%
	TESTEMUNHO	119,30	218%	
LOTE 07	1 AÇO CA 50 3,4mm	140,43	323%	148%
	TESTEMUNHO	140,43	176%	

Fonte: O autor (2024).

Os dados referentes aos carregamentos do Lote 6, caracterizados pela inserção de apenas uma barra de PET no concreto, foram resumidos na Tabela 8.

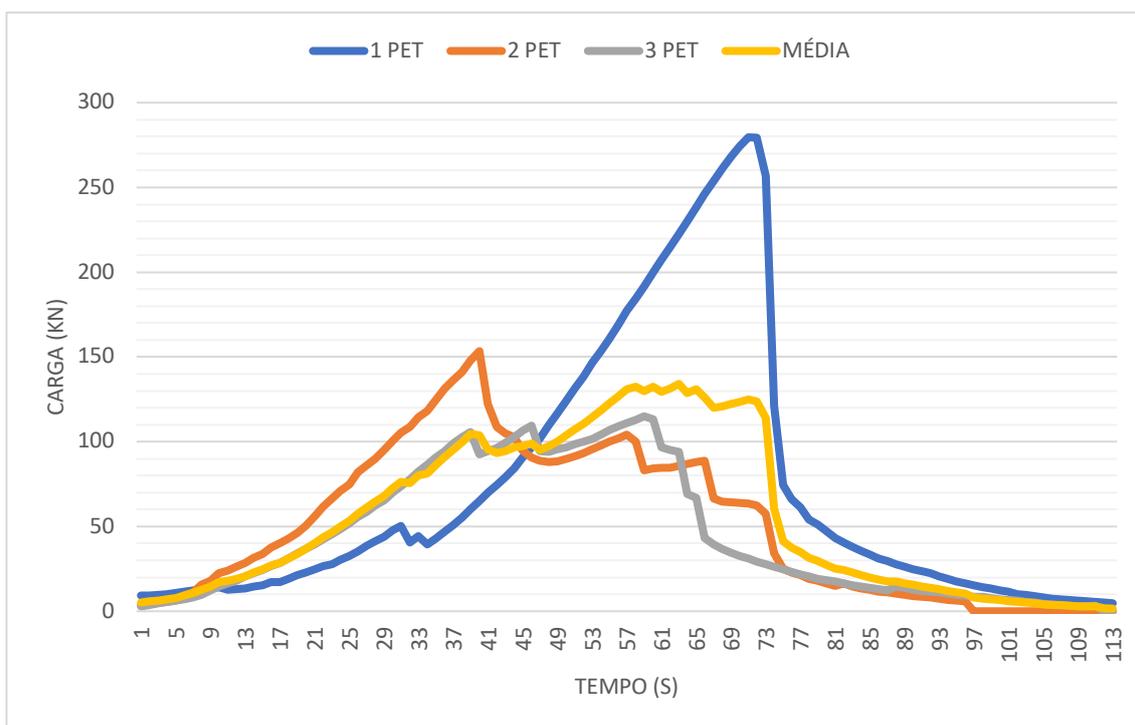
As cinco amostras apresentaram comportamentos similares, e a média desses comportamentos foi calculada e ilustrada no gráfico representado na Figura 14.



**Figura 14:** Gráfico de evolução de carga dos tratamentos com a inserção de apenas uma barra de PET no concreto.

Fonte: O autor (2024).

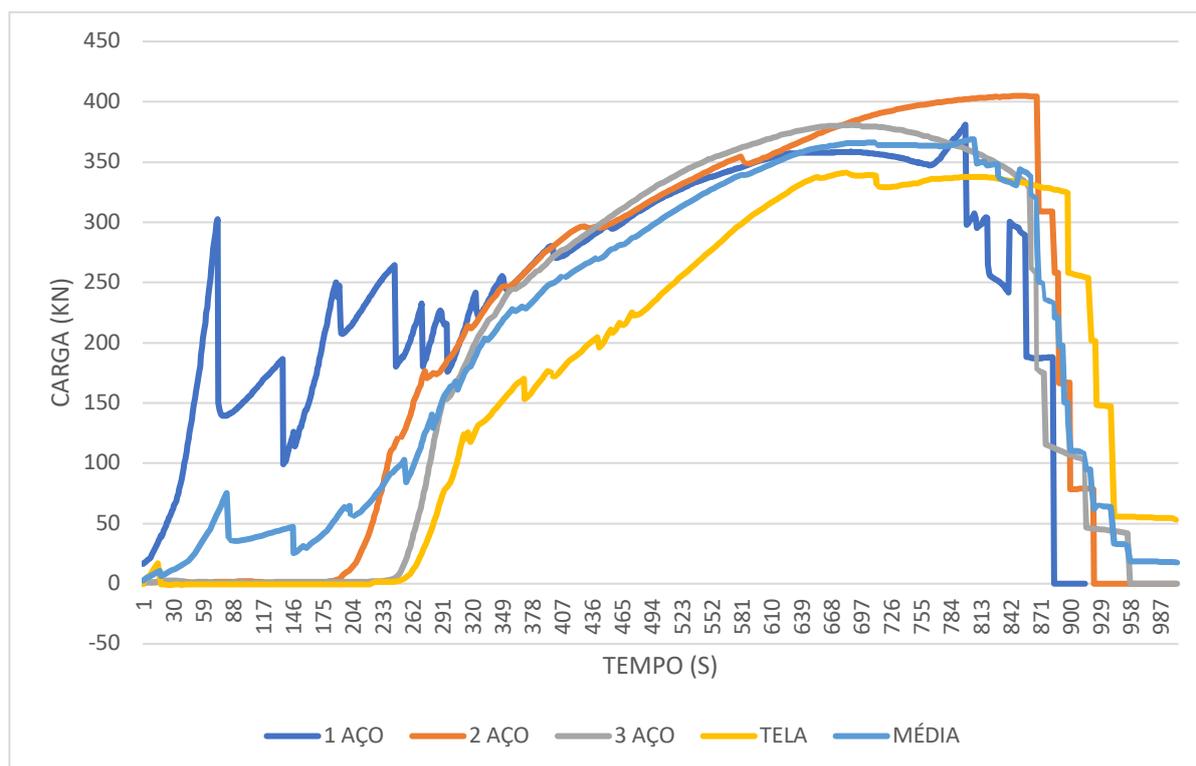
Os dados referentes aos carregamentos do Lote 6, caracterizados pela inserção de apenas uma barra de PET no concreto, foram resumidos na Figura 15. As cinco amostras apresentaram comportamentos similares, e a média desses comportamentos foi calculada e ilustrada no gráfico a seguir.



**Figura 15 -** Efeito do carregamento do Lote 6

Fonte: O autor (2024).

A figura 16 estabelece uma comparação entre todas as amostras de PET ao apresentar um gráfico que incorpora a média das medições de cada um dos três lotes. Isso significa que as médias para as amostras 1 PET, 2 PET e 3 PET foram calculadas inicialmente. Em seguida, procedeu-se ao cálculo da média dessas médias, com o objetivo de analisar o comportamento geral das amostras.



**Figura 16:** Gráfico do comportamento das médias dos lotes com aço.

Fonte: O autor (2024).

A Figura 15 ilustra o comportamento da média das médias de todos os lotes contendo aço. A característica serrilhada do gráfico sugere uma possível acomodação do material durante os experimentos, notadamente no lote 07 (1 aço), que continha 1 unidade de aço.

Para atenuar este efeito, recomenda-se para estudos futuros o emprego de um capeamento nas amostras. Esse procedimento é sugerido porque a exposição dos agregados graúdos na superfície contribuiu para os observados picos de tensão antes da ruptura.

#### 4.4.2 Relação da resistência útil x área do fuste da barra

Para compreender a eficácia da utilização de barras de PET em comparação com as tradicionais barras de aço quando integradas ao concreto, foi fundamental analisar a interação entre esses materiais e o concreto. Para tal, calculou-se a área da superfície dos cilindros ou barras, dado que essa área útil do fuste é diretamente proporcional à eficiência da transferência de carga entre o material da barra e o concreto circundante.

O cálculo da área da superfície foi baseado na geometria dos cilindros utilizados, considerando suas dimensões específicas. Em seguida, avaliou-se a resistência dos lotes de cilindros reforçados com barras de PET e aço, comparando-os com valores de referência obtidos de testemunhos padrão de concreto, permitindo assim quantificar o incremento ou decréscimo (diminuição) na resistência devido ao uso dos diferentes materiais.

A diferença entre a resistência observada nos lotes testados e a resistência dos testemunhos (valor referencial) foi calculada para determinar o impacto real da inserção de cada tipo de barra no concreto. A partir dessas diferenças, ajustou-se o resultado pela área útil do fuste para normalizar os dados, resultando na eficiência estrutural expressa em Megapascal (MPa). Este ajuste é crucial, pois leva em conta a variação na área de contato entre as barras e o concreto, oferecendo uma comparação mais precisa entre os diferentes materiais.

**Tabela 9:** Resumo das diferenças entre resistência observada nos lotes testados e os valores referenciais.

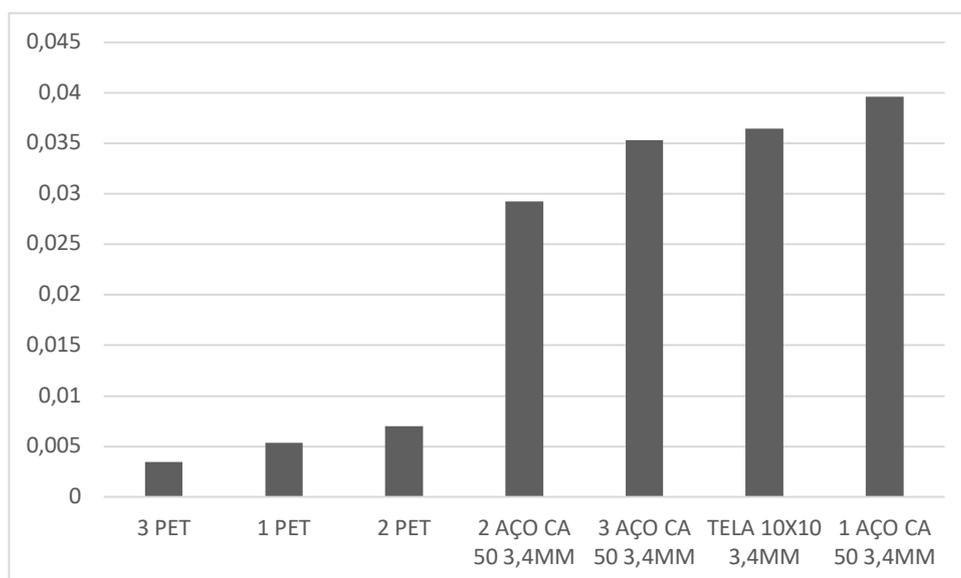
Lote	Área útil do fuste (m <sup>2</sup> )	Resistência (kN)	Testemunho (kN)	(Resis)-(Teste) (kN)	((Resis)-(Test)) Área útil (Mpa)
LOTE 01	4,78E-03	220,340	186,850	33,490	0,007
LOTE 02	5,23E-03	355,278	202,100	153,178	0,029
LOTE 03	4,78E-03	178,520	161,995	16,525	0,003
LOTE 04	5,23E-03	362,836	177,900	184,936	0,035
LOTE 05	5,23E-03	352,856	162,000	190,856	0,036
LOTE 06	4,78E-03	285,318	259,650	25,668	0,005
LOTE 07	5,23E-03	454,056	246,790	207,266	0,040

Fonte: O autor (2024).

A análise revelou variações notáveis na eficiência estrutural entre os diferentes lotes, indicando que o tipo de barra empregada influencia diretamente a interação com o concreto. Esta observação é sustentada pelos cálculos que quantificam o impacto da substituição de barras de aço por alternativas de PET, com foco específico na resistência mecânica e na sustentabilidade. Ao ajustar a diferença na resistência observada pelo tamanho da área de contato (área útil do fuste), foi possível normalizar os resultados para uma comparação justa, destacando a relevância de considerar a eficácia estrutural em função da área de superfície.

A seguir, é apresentado um gráfico que demonstra a eficiência comparativa da interação entre barras de PET e barras de aço quando embebidas em concreto. A eficiência é medida em termos de resistência oferecida pelas barras ao material compósito. Essa métrica é essencial para avaliar a capacidade de diferentes materiais de reforço em transferir tensões e absorver cargas dentro do contexto estrutural. A análise se concentra tanto no comportamento individual das barras de PET e aço quanto na influência do aumento quantitativo desses reforços na resistência global.

Como ilustrado no gráfico da Figura 17, a capacidade de carga das barras de PET, em comparação com as barras de aço, é substancialmente menor, indicando uma interação menos eficiente com o concreto.



**Figura 17:** Gráfico da capacidade de carga das barras de PET comparadas as com barras de aço.

Fonte: O autor (2024).

Em termos percentuais, a contribuição à resistência das barras de PET é uma fração daquela proporcionada pelas barras de aço. Além disso, a quantidade de barras de reforço parece não ser um fator linearmente proporcional à resistência alcançada, o que ressalta a complexidade dos mecanismos de transferência de carga em compósitos reforçados. Tal observação corrobora com a literatura existente, que relata a não linearidade entre quantidade de reforço e incremento de resistência, sugerindo a importância de outros fatores como a distribuição, orientação e aderência das barras no contexto do compósito de concreto reforçado.

## 5 CONCLUSÕES

A construção civil é um dos pilares do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, com o concreto armado sendo um componente-chave, representando uma parcela significativa dos custos de material e mão de obra neste setor. Reconhecendo a influência substancial que mudanças nas práticas construtivas podem ter, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, a inovação em técnicas construtivas e o aprimoramento de métodos já estabelecidos emergem como caminhos vitais para a evolução sustentável do setor. Neste cenário, a investigação sobre o potencial do PET (Politereftalato de Etila) reciclado e extrusado abre novas perspectivas para a indústria, propondo uma alternativa sustentável à tradicional armadura de aço em lajes de concreto armado.

Este estudo explorou a viabilidade técnica e ambiental do uso de PET reciclado como substituto de armadura de distribuição em lajes, trazendo à luz uma diminuição significativa no consumo energético necessário para sua produção quando comparado ao aço CA-50. A descoberta de que o PET reciclado requer apenas 0.72 MJ/Kg, uma redução de 95.5% em relação ao aço, não apenas sublinha a sua eficiência energética superior, mas também sugere o PET como uma alternativa viável e mais sustentável, para determinadas aplicações na construção civil. Essa transição para materiais mais ecológicos é essencial à medida que buscamos métodos construtivos que harmonizem avanços tecnológicos com responsabilidade ambiental.

Além da eficiência energética, os testes mecânicos revelaram detalhes cruciais sobre a utilização ótima do PET reciclado, mostrando que a eficácia deste material na resistência à tração não é estritamente proporcional ao número de barras utilizadas, destacando um ponto ótimo com duas barras a cada 15 cm. Esse achado não apenas contribui para a compreensão técnica necessária para a implementação prática do PET em estruturas de concreto armado, mas também indica a necessidade de uma abordagem adaptativa ao integrar novos materiais na construção, considerando variáveis como o módulo de elasticidade e variações de temperatura.

Portanto, a economia de energia significativa associada ao PET reciclado, alinhada com a necessidade de práticas de construção mais sustentáveis, enfatiza a contribuição crucial deste estudo ao avanço de materiais alternativos no setor da construção civil. A busca por otimizar as propriedades mecânicas do PET extrusado e avaliar seu desempenho a longo prazo ressalta um caminho promissor para a

inovação. Espera-se que as descobertas deste estudo encorajem a indústria da construção civil a reavaliar e inovar no uso de materiais, promovendo a adoção de técnicas que reduzam o consumo energético e reforcem o compromisso com a sustentabilidade.

Dessa forma, o presente trabalho não apenas apresenta uma alternativa sustentável que pode reduzir a dependência de recursos finitos e promover a reciclagem de resíduos plásticos, mas também serve como um estímulo para a adoção de práticas de construção mais ecológicas. A proposição de utilizar PET reciclado na construção civil, como evidenciado neste estudo, representa um passo na direção de mudanças viáveis e sustentáveis, marcando um avanço em um setor tradicionalmente conservador em suas práticas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 221p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15575-1. Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14862. Armaduras treliçadas eletrossoldadas – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2002a. 9p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14859. Laje pré-fabricada - Requisitos: Lajes unidirecionais.** Rio de Janeiro: ABNT, 2002b. 13p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7480. Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 13p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12142. Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 5p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5738. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 9 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16889. Concreto – Determinação do abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 9 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7211. Agregados para concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 14 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6120. Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 6p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 46:2003 - Agregados - Determinação da umidade superficial em materiais miúdos por secagem em estufa.** Rio de Janeiro: ABNT, (1987) 2003a. 13p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 248:2003 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003b. 13p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 27:2001 – Agregados – Redução de amostra de campo para ensaios laboratoriais.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 07p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12655. Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 29p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7222 Concreto e agregados - Determinação da resistência à tração por meio de prismas testemunhos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 3p.

**ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico.** [s.d.]. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/Construção Civil: desempenho 2021 e cenário para 2022>. [s.d.]. Acesso em: 05 jul. 2022.

AKATU. **A relação entre energia elétrica e gases de efeito estufa.** Disponível em: <https://akatu.org.br/a-relacao-entre-energia-eletrica-e-gases-de-efeito-estufa/>. Acesso em: 06 mar. 2024.

ASHBY, M. F. **Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice.** Butterworth-Heinemann. 2005

AÏTCIN, P. C. **High-Performance Concrete.** E & FN Spon. 2000

BARBOSA, A. B. Construção 4.0: como a tecnologia está mudando a construção civil. In: VII Seminário Nacional de Tecnologia na Construção Civil, 2018, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2018.

BARROW, John D. **The Constants of Nature; From Alpha to Omega - The Numbers that Encode the Deepest Secrets of the Universe.** Pantheon Books, 1982. (BARROW, 1982).

BATISTA, L. **O papel da madeira em construções sustentáveis.** *Revista Ecológica de Construção*, 7(3) 2022, 88-97.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland.** Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo. 2009. Disponível em <[www.abcp.com.br](http://www.abcp.com.br)>. Acesso em 15 jul. 2023.

BENDER, R. et al. **Análise da força cortante em lajes com vigotas treliçadas.** 2022.

BENTO, N. I. et al. Compósitos à base de resíduos de PET e lama vermelha como catalisadores para remoção de orgânicos da água. **Revista de materiais perigosos**, v. 314, p. 304-311, 2016.

BEER, F.P. & JOHNSTON, Jr. E. R, **Resistência dos Materiais.** 3.ed. Pearson Makron Books, 2000.

BORGES, P. H. R. et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, v. 14, p. 153-168, 2014.

BOTELHO, M. H. C. ; MARCHETTI, O. **Concreto armado-Eu te amo**. Editora Blucher, 2018.

BRANDÃO, A. M. da S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CASTELLANELLI, M. et al. Desempenho de motor ciclo diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 145-153, 2008.

CASTRO AFFONSO, B. de et al. **O uso do sistema monolítico em eps na construção civil: uma alternativa sustentável**. **CONSTRUINDO**, v. 15, n. 1, 2023.

CARDOSO, R. M. S. **Vestígios ambientais de embalagens de agrotóxicos: uma análise da relação pessoa-ambiente no contexto rural sob a perspectiva da teoria bioecológica**. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão – SE. 2022. 140f.

CBIC. **Desempenho da Construção Civil em 2020 e perspectivas para 2021**. Disponível em: <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2021/12/construcao-civil-desempenho-2021-e-cenarios-2022.pdf>. Acesso em: 22 de junho 2022.

CLETO, F. R.; VON MÜHLEN, J. F.; BELIZARIO-SILVA, F. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: blocos e telhas cerâmicos**. São Paulo: SIDAC, 2022.

CLETO, M. Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> na produção de vergalhão de aço. **Revista Brasileira de Energia**, 2022. Disponível em: <http://revistabrasileiradeenergia.com.br/consumo-energetico-e-emissoes-de-co2>. Acesso em: 09 maio 2023.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

DOMINGOS, L. A. **A importância do planejamento e controle da produção e suas ferramentas: um estudo de caso em uma indústria de embalagens plásticas**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2022. 43f.

EL DEBS, M K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. Oficina de Textos, 2000.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA., [s.d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt> Acesso em: 01 jul. 2022.

FALKNER, H. **Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles**. Taylor & Francis Group. 2007.

FARIA, F. P.; PACHECO, E.B.A.V. A reciclagem de plástico a partir de conceitos de Produção Mais Limpa. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, n. 3, p. 93, 2011a.

FARIA, L. Análise do consumo energético na reciclagem do PET e suas implicações para a sustentabilidade. **Revista Biofix**, v. 6, n. 1, p. 34-45, 2011b. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/biofix/article/viewFile/50095/31999>. Acesso em: 06 mar. 2024.

FERREIRA, F. F. **Estudo e desenvolvimento de filamento de PET reciclado para impressoras 3D FDM**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2020. Acessado em: 12 de março de 2024. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/12937>.

FRIGIONE, M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, 24(8), 2010. 1451-1456.

FUNDAÇÃO HEINRICH BÖL. **Atlas do plástico: Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos**. Rio de Janeiro - Brasil: [s.n.].

GUIMARÃES, M. M. et al. Comparação das características físicas e financeiras entre os sistemas de vedação drywall e alvenaria convencional-estudo de caso. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 48760-48775, 2021.

GONÇALVES, A. P. B., GUIMARÃES, D. H., TOQUERO, M. C. N., CALDAS, L. H. R., FILHO, A. M. M., CALDAS, B. G. S., DOS SANTOS, Z. I. G., DE ARAÚJO, V. S., LUPORINI, S., & JOSÉ, N. M. Caracterização Mecânica de Blendas de PET Reciclado/PEAD. **Anais...12º Congresso Brasileiro de Polímeros (12ºCBPol)**. 2013. Disponível em: <https://e-democracia.com.br/cbpol/anais/2013/pdf/6FT6.pdf>

IDESAM. **Calculadora de Emissões**. Disponível em: <https://idesam.org/calculadora/>. Acesso em: 06 mar. 2024.

KIBERT, C J. **Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery**. 4ª ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.

LAJES HERTEL. **Lajes**. Disponível em: <<https://www.lajeshertel.com.br/>>. Acesso em: 12 mar. 2022.

LUCA, M. A. S. de et al. A Engenharia no contexto Social: Evolução e Desenvolvimento. **Gest. Technol. Innov.** Vol. 2 n. 1, 2018 Janeiro – Abril.

MAGNANI, R. **Cálculo e desenho de concreto armado**. RM, 1999.

MEHTA, P. K., & MONTEIRO, P. J. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Instituto de Engenharia e Tecnologia. 2013.

MELLO, L. C. B. B.; AMORIM, S. R. L. **O subsetor de edificações da construção civil no Brasil: uma análise comparativa em relação à União Europeia e aos Estados Unidos**. *Produção*, v. 19, p. 388-399, 2009.

MENDES, B. J; DE OLIVEIRA, L. C. Análise Comparativa entre os Modelos de Lajes: Maciça, Nervurada e Treliçada Unidirecional. **Blucher Engineering Proceedings**, v. 1, n. 3, p. 8-9, 2014.

MONTEIRO, V. M. **Comportamento Mecânico e Controle de Qualidade do Concreto Projetado com Fibras no Revestimento de Túneis da Mina Cuiabá. 2020.** Tese de Doutorado. PUC-Rio.

MURTA, A. L. S. LOGÍSTICA REVERSA DE GARRAFAS PET PARA CONSTRUÇÃO DE CASAS POPULARES. **Sustainable Business International Journal**, n. 68, 2016.

NAVARRO, R. F. A evolução dos materiais. parte1: da pré-história ao início da era moderna. **Revista eletrônica de materiais e processos**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2006.

NEVILLE, A. M. (2011). **Propriedades do Concreto.** Pearson Education.

OLIVEIRA, C. V. K; PRIOR, M; PIACENTINI, R. V; ORBEN, J. M. C; SOUZA, S. N. M. Utilização do pet (politereftalato de etila) reciclado e extrusado como substituto de armadura de distribuição em lajes. **Revista Caribeña De Ciências Sociales.** Miami,v.13,n.3,p.01-20.2024.

OLIVEIRA, F. **O Concreto: sua origem, sua história.** Presidente Prudente, 2016.

OLIVEIRA, L. A. F. de **Estudo do comportamento e da resistência das vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis formados a frios e lajes pré-fabricadas.** UFMG. Dissertação de Mestrado. 2001. 108f.

PEÑA A; FIDEL; T. A; JHOJAN F. **Análisis comparativo de la influencia de la geometría y la rugosidad de las fibras para concreto en las capacidades mecánicas del concreto y propuesta de empleo de fibras en zigzag y rugosas de PET reciclado.** Tese de Bacharelado, Universidad Peruana de Ciências Aplicadas (UPC), 2023. Acessado em: 12 de março de 2024. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10757/671506>.

PEREIRA, F. O. R; LAMBERTS, R; CANDIDO, C. **Eficiência energética na arquitetura.** 3ª ed. São Paulo: PW Editores, 2013.

PEREIRA, P. G. N. **A Evolução da Microestrutura Propriedades Mecânicas e Textura Cristalográfica na Fabricação do Vergalhão CA-60.** Universidade Federal do Ceará. 2019. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/44918/3/2019\\_tcc\\_pgnpereira.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/44918/3/2019_tcc_pgnpereira.pdf)

PICKLER, G. P. **Análise de eficiência energética de uma termoformadora de copos poliméricos descartáveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/174696/344790.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 mar. 2024.

**PLASTIVIDA.** [s.d.]. Disponível em:<<https://www.plastivida.org.br> >. Acesso em: 05 jul. 2022.

POLETTI, W.; HARTMANN, G. A.; TRINDADE, R. Resultados paleomagnéticos preliminares em tijolos coloniais do sudeste e nordeste do Brasil. **Latinmag letters, proceedings Tandil**, Argentina, v. 1, p. 2, 2011.

QUEIROZ, R. C. **Introdução à engenharia civil: história, principais áreas e atribuições da profissão.** Editora Blucher, 2019.

RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete Admixtures Handbook: Properties**, Science, and Technology. Noyes Publications.1995.

RAVARA, P. B. **A consolidação de uma prática: do edifício fabril em betão armado nos EUA aos modelos europeus na modernidade.** Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura de Lisboa. 2008. Disponível em: <<https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/1441>> Acesso em: 15 mar. 2024.

REN21. **Renewables 2021 Global Status Report.** Disponível em: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>. Acesso em: 01 de julho de 2022. (REN21, 2021).

RESNIK, Robert; HALLIDAY, David. **Física.** 5ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2004.

RODRIGUES NETO, C. F. **Análise das propriedades do concreto reforçado com macrofibras de vidro em relação ao concreto convencional.** 2022.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A.S; PAOLI, M. A. Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, v. 19, p. 121-132, 2009.

SANTOS, R. M. dos et al. **Caracterização reológica e térmica de blendas de pet pós-consumo/PEAD compatibilizadas com PE-g-MA e extensor de cadeia epoxídico.** 2020.

SANTOS, V. L. dos. **Produção de fios de poliéster a partir do Poli (Etileno Tereftalato): análise de viabilidade.** 2021.

SILVA, R. V., de BRITO, J., & DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Journal of Cleaner Production**, 86, 2015. 178-186. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.026

SILVA, A. R.; SERRA, O. V. Tecnologias limpas na produção de aço: desafios e perspectivas. **Revista Monografias Ambientais**, 2021. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/6102>. Acesso em: 09 maio 2023.

SIMIELLI, E. R; SANTOS, P. A. **Plásticos de Engenharia: principais tipos e sua moldagem por injeção.** São Paulo, Artliber Editora, 2010. 93.

SOUSA, T. K. A.; MOURA, J. M.; FERNANDES, A. T. Reutilização de Pet como Prática de Educação Ambiental na creche Municipal Wilmon Ferreira de Souza - Bairro Três Barras, Cuiabá – MT. **Anais... III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, 2012.

SOUZA, M.; RODRIGUES, R. **Sistemas estruturais de edificações e exemplos**. 93 p. Notas de aula — Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Departamento de Estruturas UNICAMP, Campinas, 2008.

TAVARES, S. F.; BRAGANÇA, L. Índices de CO<sub>2</sub> para materiais de construção em edificações brasileiras. **Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment**, p. 927-936, 2016.

TAVARES, L. H.; BRAGANÇA, M. J. Fontes energéticas na produção de aço: Uma análise ambiental. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, 2021. Disponível em: <http://revistadeengenhariaetecnologia.com.br/fontes-energeticas-na-producao-de-aço>. Acesso em: 09 maio 2023.

TEIXEIRA, A. M. de A. **A Utilização de Garrafa PET como Material Geossintético: Vantagens e Desvantagens**. Trabalho de graduação. Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa, 2019. 66 f.

THOMPSON, R. C., MOORE, C. J., VOM SAAL, F. S., & SWAN, S. H. The Plastics Paradox: Life-Cycle Analysis and the Environmental Impacts of Plastics. **Environmental Science & Technology**, 43(12), 2009. 4214-4219. DOI: 10.1021/es802701a

VAZ, L.F. **Modernidade e moradia: habitação coletiva no Rio de Janeiro, séculos XIX e XX**. 7Letras, 2002.

VILELA, D. T.N; et al. Estudo do controle tecnológico do concreto em obras civis na cidade de Ouro Branco (MG). **Anais... do 60 Congresso Brasileiro do Concreto – CBC 2018**. Foz do Iguaçu. v. 60, 2018.

WANDERSON, R.; SPINACÉ, A. S. S.; PAOLI, M.A. - Poli (Tereftalato de Etileno), PET: Uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 19, nº 2, p. 121-132, 2009.

XAVIER, C. D.; LOPES, R. S. Eficiência energética e sustentabilidade na siderurgia. **Revista de Iniciação Científica e Extensão**, 2020. Disponível em: <http://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/6792>. Acesso em: 09 maio 2023.

YAZIGI, W. **A técnica de edificar**. Editora Blucher, 2021.

ZENID, J. G. **Madeira na construção civil**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2011.