



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO  
*CAMPUS AÇAILÂNDIA*  
CENTRO DE CIÊNCIA HUMANAS, SOCIAIS, TECNOLÓGICAS E LETRAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL BACHARELADO

**GUSTAVO ROQUE DA SILVA**

**REAPROVEITAMENTO DO PÓ DE MADEIRA E ESCÓRIA DE ACIARIA NA  
FABRICAÇÃO DE CONCRETO PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Açailândia – MA

2025

**GUSTAVO ROQUE DA SILVA**

**REAPROVEITAMENTO DO PÓ DE MADEIRA E ESCÓRIA DE ACIARIA NA  
FABRICAÇÃO DE CONCRETO PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Artigo apresentado ao Curso Engenharia Civil Bacharelado do Centro de Ciência Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, *campus* Açailândia, como requisito para o grau de bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Lúcio Meneses Nascimento

Açailândia – MA

2025

S586r

Silva, Gustavo Roque da

Reaproveitamento do pó de madeira e escória de aciaria na fabricação de concreto para uso na construção civil / Gustavo Roque da Silva. – Açailândia: UEMASUL, 2025.

21 f. : il.

Artigo (Curso de Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Açailândia, MA, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Lucio Meneses Nascimento.

1. Concreto. 2. Escória. 3. Cimento. 4. Pó de madeira. I. Título.

CDU 691.322

**GUSTAVO ROQUE DA SILVA**

**REAPROVEITAMENTO DO PÓ DE MADEIRA E ESCÓRIA DE ACIARIA NA  
FABRICAÇÃO DE CONCRETO PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Artigo apresentado ao Curso Engenharia Civil Bacharelado do Centro de Ciência Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, *campus* Açailândia, como requisito para o grau de bacharelado em Engenharia Civil.

Aprovado em 17/07/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Bruno Lucio Meneses Nascimento (Orientador)**

Doutor em Engenharia Civil (Ênfase em Saneamento Ambiental)

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL

---

**Profa. Ma. Andréa Ferraz Silva Pereira**

Mestra em Ciência dos Materiais

Universidade Federal do Maranhão – UFMA

---

**Prof. Esp. Mario Silva de Lucena**

Especialista em Pavimentação e restaurações rodoviária

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL

**Reaproveitamento do pó de madeira e escória de aciaria na fabricação de concreto para uso na construção civil.**

*Reuse of wood dust and steel slag in the manufacture of concrete for use in civil construction.*

**Gustavo Roque da Silva<sup>1</sup>; Bruno Lúcio Meneses Nascimento<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, Centro de Ciências Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras, Açailândia/MA, Brasil. E-mail: gustavosilva.20200006816@uemasul.edu.br

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-4716-6215>

<sup>2</sup> Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, Centro de Ciências Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras, Açailândia/MA, Brasil. E-mail: bruno.nascimento@uemasul.edu.br

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7196-6502>

**Resumo:** Este estudo investigou o reaproveitamento do pó de madeira e da escória de aciaria como substitutos parciais do cimento na fabricação de concreto para construção civil, visando reduzir impactos ambientais e promover sustentabilidade. A metodologia incluiu ensaios laboratoriais para determinar a absorção de água, a resistência à compressão e a capilaridade em corpos de prova com substituições de 0%, 3%, 6% e 9% de cimento por resíduos, seguindo normas técnicas brasileiras como ABNT NBR 5739:2018 e NBR 9778:2005. Os resultados mostraram que a absorção de água permaneceu abaixo de 10% em todas as proporções, atendendo à NBR 6136:2006, enquanto a escória de aciaria apresentou desempenho superior em resistência à compressão, especialmente em dosagens de 6% e 9%, atingindo valores próximos ou superiores a 25 MPa aos 28 dias. A análise estatística (ANOVA e Tukey) confirmou que a escória não comprometeu significativamente a resistência, ao contrário da cinza de pó de madeira, que reduziu a resistência em até 42,33% em substituições de 9%. Conclui-se que a escória de aciaria é uma alternativa viável para substituição parcial do cimento, enquanto o pó de madeira demanda maior investigação para o seu possível uso em aplicações estruturais, destacando-se ambas como soluções sustentáveis para a construção civil.

**Palavras-chave:** Concreto, escória, cimento, pó de madeira.

**Abstract:** This study investigated the reuse of powdered wood and steel slag as partial cement substitutes in the manufacture of concrete for civil construction, aiming to reduce environmental impacts and promote sustainability. The methodology included laboratory tests to determine water absorption, compressive strength, and capillarity in specimens with cement replacements of 0%, 3%, 6%, and 9%, following Brazilian technical standards such as ABNT NBR 5739:2018 and NBR 9778:2005. The results showed that water absorption remained below 10% in all proportions, meeting NBR 6136:2006, while steel slag performed better in compressive strength, especially at dosages of 6% and 9%, reaching values close to or greater than 25 MPa at 28 days. Statistical analysis (ANOVA and Tukey's test) confirmed that slag did not significantly compromise strength, unlike powdered wood ash, which reduced strength by up to 42.33% at 9% replacement rates. It is concluded that steel slag is a viable alternative for partial cement replacement, while powdered wood requires further investigation for its potential use in structural applications, both standing out as sustainable solutions for civil construction.

**Keywords:** Concrete, slag, cement, powdered wood.

## 1. Introdução

É notório o aumento da frequência e da intensidade de desastres naturais, como inundações, secas e outros eventos extremos que causam perdas imensuráveis em vidas, propriedades e infraestrutura. A culpa, em grande parte, é do ser humano, com ações como o descarte inadequado de resíduos por indústrias, muitas vezes em locais impróprios, e o desmatamento desenfreado que contribuem significativamente para o desequilíbrio ambiental e o agravamento dessas catástrofes.

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI), a indústria de produtos de madeira se destaca como um dos mais importantes da economia em várias regiões do Brasil, contribuindo significativamente para o PIB e gerando milhares de empregos.

No entanto, conforme Altoé (2019), as moveleiras brasileiras consomem grandes quantidades de madeira, frequentemente provenientes de áreas desmatadas ilegalmente, gerando um grande volume de resíduos, entre os quais se destaca o pó de serragem. Na maioria dos casos,

esses resíduos são destinados de forma inadequada, podendo ser incinerados ou descartados em rios, o que causa um enorme impacto ambiental.

Como material natural e heterogêneo, a madeira é constituída por diversos tipos de células que desempenham funções específicas na árvore e são abundantes em polímeros como celulose, hemicelulose, lignina e extrativos (FIGUEROA, 2009). Conforme destacado por Figueroa (2009), a natureza polimérica da madeira faz com que ela sofra despolimerização e carbonização ao ser submetida ao fogo. Conseqüentemente, suas propriedades mecânicas são alteradas em função do nível de temperatura e do tempo de exposição ao calor.

Segundo Pagio *et al.* (2022) o setor siderúrgico, apesar de fundamental para a economia global, é um dos principais responsáveis pela geração de resíduos industriais. Dentre eles, a escória de aciaria se destaca. De acordo com dados do Instituto Aço Brasil (2023), a indústria siderúrgica brasileira gerou cerca de 662 kg de resíduos para cada tonelada de aço bruto produzida em 2023. Esse volume expressivo de resíduos representa um desafio ambiental significativo, exigindo soluções eficazes para sua gestão e destinação adequadas.

De acordo com Freitas (2018), a escória, por muito tempo vista apenas como um resíduo da produção siderúrgica, passou por uma significativa reavaliação. Países como Estados Unidos, Canadá e Alemanha lideram essa mudança de paradigma, classificando-a atualmente como um coproduto, ou seja, um produto adicional gerado durante o processo siderúrgico com valor econômico e aplicações diversas, visto que ela tem um potencial significativo para reutilização e criação de novos materiais.

Embora a escória de aciaria apresente um amplo potencial de aplicação em diversos setores, observa-se que uma quantidade significativa desse material permanece estocada em áreas externas das siderúrgicas por longos períodos. A exposição prolongada a diferentes condições ambientais pode induzir alterações nas propriedades físico-químicas das escórias, com destaque para o potencial expansivo, o qual pode comprometer o desempenho do material em determinadas aplicações (Freitas, 2018).

A construção civil é uma das indústrias que geram mais resíduos no Brasil, devido a quantidade de materiais que são necessários para as obras serem concluídas, utilizando cerca de 16,5% dos recursos naturais consumidos pela sociedade (Batista, 2022). Entre esses materiais está a madeira que segundo Matos (2017) é empregada de forma temporária nas obras, sendo utilizadas

como fôrmas, andaimes e escoras e após o uso das mesmas são descartadas, muitas vezes sem nenhuma utilidade.

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados no mundo e pode ser aplicado em várias fases da construção civil, desde a infraestrutura até os acabamentos (RODRIGUES et al., 2022). Embora seja inegável a relevância do cimento como material central para o desenvolvimento da infraestrutura urbana, sua fabricação representa um desafio ambiental significativo. Esse processo exige a extração de vastas quantidades de matéria-prima da natureza, como calcário e argila, e é intensivo em energia. Essa combinação resulta em impactos ambientais negativos consideráveis, principalmente na liberação maciça de gases de efeito estufa na atmosfera (RODRIGUES et al., 2022).

Em busca de materiais de construção mais sustentáveis, surge a proposta de substituir o cimento da produção de concreto por resíduos. Essa iniciativa transforma materiais frequentemente descartados de forma inadequada em alternativas viáveis para a construção civil, reduzindo a necessidade de extração de cimento, processos que geram impactos ambientais significativos. Dessa forma, este projeto tem como objetivo realizar ensaios de absorção e resistência à compressão a fim de avaliar o desempenho do concreto utilizado na construção civil e determinar a melhor proporção de cinza de pó de madeira e escória de aciaria para substituir o cimento em sua fabricação.

## **2. Metodologia**

Com o objetivo de obter os resultados desejados, experimentos foram conduzidos no laboratório da Franco Engenharia, localizado em Imperatriz – MA. Na fabricação do concreto para esses testes, foi substituído parcialmente o cimento por resíduos em diferentes proporções: 0%, 3%, 6% e 9%. Nesse estudo, o cimento foi substituído pela escória de aciaria em um primeiro conjunto de amostras e pela cinza do pó de madeira em outro conjunto. Dessa forma, foi possível comparar as propriedades dos concretos produzidos e identificar a proporção ideal para cada aplicação específica.

A determinação do traço é o passo inicial e um dos mais importantes na fabricação do concreto. Para este estudo, empregou-se o método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), método que teve revisão realizada por Rodrigues (1998) e é referência em dosagem de concreto, que demanda a completa caracterização dos materiais. Nesse método é essencial conhecer

o fator água/cimento, a massa específica do cimento, da água e de ambos os agregados (miúdo e graúdo), além da massa unitária compactada do agregado graúdo e a granulometria dos agregados.

### 2.1 Ensaio da massa unitária com agregado graúdo solto e compactado

Este teste seguiu as normas da ABNT NBR NM 45:2006. A priori, a balança determinou a massa do recipiente vazio. Depois, adicionou-se o agregado graúdo até um terço do volume do recipiente e comprimiu-se com 25 golpes da haste compactadora. Em seguida, acrescentou-se mais brita até preencher dois terços do recipiente, procedendo a uma nova compactação. Logo após, esse processo foi repetido com o recipiente preenchido. Por fim, a balança determinou a massa total do recipiente contendo a brita compactada, processo observado na Figura 1.



*Figura 1 – Massa do recipiente vazio e massa do recipiente com o agregado graúdo.*

*Fonte: O autor (2025).*

Além disso, o ensaio de massa unitária da brita solta foi realizado. Diferentemente do método anterior, este não requer a compactação com 25 golpes da haste. A brita é simplesmente adicionada ao recipiente com uma concha ou pá, mantendo uma altura de cerca de 50 mm do topo, para permitir seu adensamento natural. O nivelamento da superfície superior é então feito manualmente ou com uma espátula, e a massa do recipiente com a brita solta é então pesada.

A massa unitária do agregado graúdo compactado foi determinada a partir da média das massas do recipiente com o agregado, obtidas em três ensaios. Para o cálculo final, utilizou-se a Equação 1:

$$Muc = \frac{Mar - Mr}{V} \quad (1)$$

$$Muc = \frac{16343,333 - 4750}{7539,82}$$

$$Muc = 1,5376 \text{ g/cm}^3$$

Onde:

$Muc$  = Massa unitária compactada ( $\text{g/cm}^3$ )

$Mar$  = Massa do recipiente mais agregado (g)

$Mr$  = Massa do recipiente (g)

$V$  = Volume ( $\text{cm}^3$ )

Calculou-se também a massa unitária do agregado graúdo solto. Para isso, utilizou-se a média das massas do recipiente com o agregado, obtidas em três ensaios. O cálculo final foi realizado usando a Equação 2.

$$Mu = \frac{Mar - Mr}{V} \quad (2)$$

$$Mu = \frac{16053,333 - 4750}{7539,82}$$

$$Mu = 1,499 \text{ g/cm}^3$$

Onde:

$Mu$  = Massa unitária solta ( $\text{g/cm}^3$ )

## 2.2 Ensaio da massa específica do agregado miúdo

Este ensaio foi realizado conforme a norma NBR 9776:1987, utilizando um frasco Chapman. Inicialmente, adicionou-se água ao frasco até a marca de 200  $\text{cm}^3$ . Em seguida, introduziu-se cuidadosamente 500 g de agregado miúdo seco no frasco, com auxílio de um funil. Após a adição, o frasco foi agitado para eliminar bolhas de ar. Por fim, realizou-se a leitura do volume da mistura água-agregado miúdo. As etapas descritas podem ser observadas na Figura 2 a seguir.



Figura 2 – Ensaio da massa específica do agregado miúdo pelo método Chapman.

Fonte: O autor (2025).

A massa específica do agregado miúdo foi determinada conforme a Equação 3. O resultado final corresponde à média aritmética de três ensaios consecutivos, cujos valores individuais não devem apresentar variação superior a  $0,05 \text{ g/cm}^3$  entre si.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (3)$$

$$\gamma_1 = \frac{500}{389 - 200} = 2,645 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\gamma_2 = \frac{500}{389 - 200} = 2,645 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\gamma_3 = \frac{500}{388 - 200} = 2,659 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\mu = \frac{2,645 + 2,645 + 2,659}{3} = 2,649 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Onde:

$\gamma$  = Massa específica do agregado miúdo ( $\text{g/cm}^3$ )

$L$  = Leitura do frasco, volume do conjunto água-agregado miúdo ( $\text{cm}^3$ )

$\mu$  = Média aritmética

### 2.3 Ensaio da massa específica do agregado graúdo

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 16917:2021, com o agregado graúdo previamente lavado para remoção de impurezas e seco ar por 3 dias. Duas amostras, contendo agregado graúdo, de 1000 g cada foram preparadas, sendo realizadas as seguintes medições: peso

do cesto vazio; cesto mais agregado em condição de ar; cesto imerso; cesto mais agregado imersos. Imagens dessa etapa podem ser observadas na Figura 3.



Figura 3 – Ensaio da massa específica do agregado graúdo.

Fonte: O autor (2025).

Para a realização dos cálculos, adotou-se a tabela fornecida pela Franco Engenharia, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Calculo da massa específica do agregado graúdo

Nº	MEDIÇÕES	FÓRMULAS	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2
P1	Peso do cesto	P1	145,2 g	145,2 g
P2	Peso do cesto + agregado seco ao ar	P2	1145,2 g	1145,2 g
P3	Peso do agregado seco	P2 – P1	1000 g	1000 g
P4	Peso do cesto imerso	P4	135,3 g	135,3 g
P5	Peso do cesto imerso + agregados	P5	770,9 g	772,3 g
P6	Peso do agregado imerso	P5 – P4	635,6 g	637 g
P7	Volume deslocado	P3 – P6	364,4 g	363 g
P8	Densidade	(P3/P7) *100%	274,42 %	274,95 %

Fonte: O autor (2025).

A massa específica total foi determinada pela média dos valores obtidos nas duas amostras, resultando em 2,7495 g/cm<sup>3</sup> ou 274,95% em relação à densidade real.

## 2.4 Ensaio de granulometria dos agregados

O ensaio granulométrico foi conduzido conforme a NBR 17054:2022. Para o agregado miúdo, analisaram-se duas amostras de 400 g em 8 peneiras, com pesagem do material retido para cálculo do módulo de finura. Para o agregado graúdo (brita 0), utilizaram-se amostras de 1500 g e uma peneira adicional de 12,5 mm, no entanto, foi retirada 4 peneiras, totalizando 5 peneiras, seguindo o mesmo método de peneiração manual e pesagem.

Com o objetivo de padronizar a coleta de dados, foi criada uma planilha específica para o experimento, cujo modelo está detalhado na Tabela 2 e 3.

*Tabela 2 – granulometria do agregado miúdo*

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)		Massa retida em %		Média (%)	Média Acumulada (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2		
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0
4,75	0	0,2	0	0,050	0,025	0,025
2,36	4,4	4,7	1,101	1,178	1,139	1,164
1,18	15,5	14,7	3,878	3,687	3,782	4,946
0,6	56,8	55,9	14,214	14,020	14,117	19,063
0,3	156,8	161,7	39,239	40,557	39,898	58,961
0,15	156,6	152,7	39,189	38,299	38,744	97,705
Fundo	9,5	8,8	2,377	2,207	2,292	99,997
Total	399,6	398,7	100	100	100	281,861

*Fonte: O autor (2025).*

Após o ensaio de granulometria, foi possível determinar o módulo de finura, um dado fundamental para encontrar o consumo da brita. Para obter esse valor, basta somar os acúmulos em porcentagem das peneiras (excluindo a peneira de 6,3 mm) e dividir por 100. Portanto, o valor do módulo de finura da areia utilizada foi 1,82. Esse resultado é crucial para ajustar a dosagem dos materiais no concreto, garantindo a trabalhabilidade e a resistência desejadas. Um módulo de finura adequado assegura uma distribuição granulométrica ideal, impactando diretamente na otimização da mistura.

Tabela 3 – granulometria do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)		Massa retida em %		Média (%)	Média Acumulada (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2		
12,5	3,2	6,1	0,21	0,408	0,309	0,309
9,5	93,5	81,4	6,24	5,448	5,844	6,153
6,3	884,2	857,5	59,03	57,39	58,21	64,363
4,75	400	400,4	26,70	26,798	26,749	91,112
2,36	109,7	139,5	7,32%	9,33	8,325	99,437
1,18	0	0	0	0	0	100
0,6	0	0	0	0	0	100
0,3	0	0	0	0	0	100
0,15	0	0	0	0	0	100
Fundo	7,2	9,2	0,48	0,61	0,547	100
Total	399,6	398,7	100	100	100	761,374

Fonte: O autor (2025).

## 2.5 Definição do traço

O fator água/cimento, essencial para definição do traço, foi determinado com base na resistência de dosagem calculada conforme a NBR 12655:2015 (Equação 4), que incorpora uma margem de segurança às propriedades do concreto para compensar eventuais variações executivas. Esse cálculo partiu da estimativa de que o concreto atingirá 25 MPa.

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 \times s_d \quad (4)$$

$$f_{cmj} = 25 + 1,65 \times 5,5 = 34,075 \text{ MPa}$$

Onde:

$f_{cmj}$  = resistência média do concreto à compressão, prevista para idade de 28 dias (MPa)

$f_{ckj}$  = resistência característica do concreto a compressão aos 28 dias (MPa)

$s_d$  = desvio-padrão da dosagem (MPa)

Logo após, o  $f_{cmj}$  foi empregado na Figura 4 a seguir, para calcular o fator água-cimento.

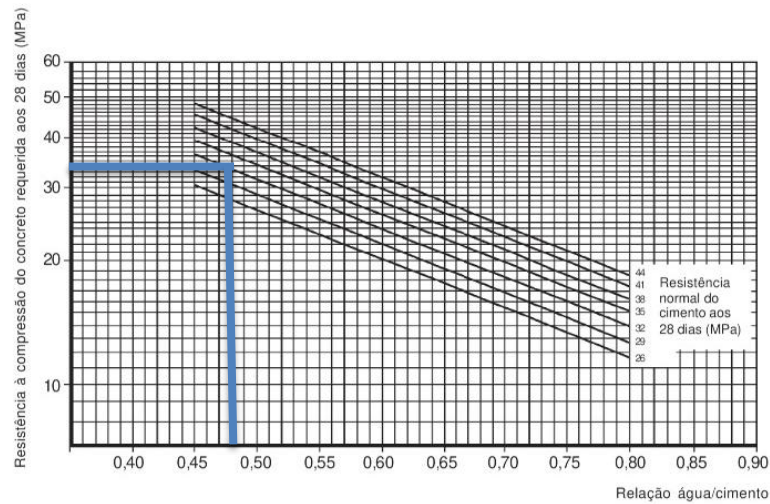


FIGURA 2 - Gráfico para a determinação da relação a/c em função das resistências do concreto e cimento aos 28 dias

*Figura 4 – Relação água/cimento.*

*Fonte: Adaptado de Rodrigues (1998).*

A representação gráfica mostrada na Figura 4 define como valor do eixo vertical a resistência de 34 MPa,  $f_{cjm}$  calculado anteriormente, e 32 MPa na linha diagonal, parâmetro que representa a resistência à compressão típica do cimento utilizado (Figura 5), em consonância com suas características técnicas certificadas pelo fabricante. Por fim, observa-se a relação água/cimento de aproximadamente 0,475.



*Figura 5 – Cimento utilizado.*

*Fonte: O autor (2025).*

Para o desenvolvimento e dosagem do concreto, foram utilizados os materiais e suas respectivas características, conforme as normas técnicas vigentes. O Quadro 1 mostra os valores necessários e as propriedades fundamentais dos componentes empregados. Esses dados são cruciais para assegurar a composição e o desempenho adequados da mistura de concreto.

Quadro 1: dados dos materiais para o cálculo de dosagem do concreto.

Valores necessários para dosagem do concreto		
Cimento	CP II – Z – 32	MPa
Massa específica do cimento	3,100	g/cm <sup>3</sup>
Diâmetro máximo do agregado graúdo	19	mm
Módulo de finura do agregado miúdo	1,82	
Massa específica do agregado miúdo	2,649	g/cm <sup>3</sup>
Massa específica do agregado graúdo	2,7495	g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária compactada do agregado graúdo	1,5376	g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária solta do agregado graúdo	1,499	g/cm <sup>3</sup>

Fonte: O autor (2025).

Com a conclusão dos ensaios, o consumo de cimento, de brita e de areia foram calculados, respectivamente, pelas Equações 5, 6 e 7, essas equações foram encontradas na ABCP na revisão feita por Rodrigues (1998).

$$Cc = \frac{Ca}{a/c} = \frac{200}{0,475} = 421 \frac{kg}{m^3} \quad (5)$$

Onde:

$Cc$  = Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)

$Ca$  = consumo de água (l/m<sup>3</sup>)

$a/c$  = fator água-cimento

$$Cb = V_b \times \gamma_b = 0,770 \times 1537,6 = 1183,95 \frac{kg}{m^3} \quad (6)$$

Onde:

$Cb$  = consumo de brita

$V_b$  = volume de brita

$\gamma_b$  = massa específica da brita

Antes de determinar o consumo de areia foi necessário calcular o volume de areia, utilizando a Equação 8.

$$V_{areia} = 1 - \left( \frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right) \quad (8)$$

$$V_{ar} = 1 - \left( \frac{421}{3100} + \frac{1183,95}{2749,5} + \frac{200}{1000} \right) = 0,233$$

Onde:

$V_{ar}$  = Volume de areia

$\gamma_c$  = massa específica do cimento

$\gamma_a$  = massa específica da água

$$C_{ar} = V_{ar} \times \gamma_{ar} = 0,233 \times 2649 = 617,2 \frac{kg}{m^3} \quad (7)$$

Onde:

$C_{ar}$  = consumo de areia

$\gamma_{ar}$  = massa específica da areia

Por fim, o traço foi determinado pela seguinte expressão de proporção entre cimento ( $C_c$ ), areia ( $C_{ar}$ ), brita ( $C_b$ ) e água ( $C_a$ ):

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_{ar}}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c}$$

Isso leva à proporção final de cimento: areia: brita: água, resultando no seguinte traço de concreto:

$$1: 1,466: 2,81: 0,475$$

## 2.6 Transformação do pó de madeira em cinza

O pó de serragem utilizado foi proveniente da madeira Tukurubá (*Pouteria oblancoolata*), obtido em uma marcenaria próxima à cidade de Açailândia. Antes da queima, o pó de madeira foi seco ao ar livre para facilitar o início do processo.

A queima do pó de serragem foi conduzida em uma lata de tinta de 18 litros e não foi possível ter o controle da temperatura desse processo. O material permaneceu em combustão por aproximadamente 24 horas, com a lata possuindo apenas uma abertura para passagem de ar, o que acelerou o processo. Na figura 6, observa-se a cinza proveniente dessa etapa.



*Figura 6 – Cinza do pó de serragem.*

*Fonte: O autor (2025).*

## 2.7 Fabricação do concreto

A execução do traço foi realizada utilizando a betoneira disponível na Franco Engenharia. Para cada tratamento, foram confeccionados 9 corpos de prova, conforme detalhado na Quadro 2.

*Quadro 2: corpos de provas para a execução dos ensaios.*

	<b>Tratamentos</b>		
<b>Corpo de prova</b>	<b>Cinza do pó de serragem 3%, 6%, 9%</b>	<b>Escória de alto forno 3%, 6%, 9%</b>	<b>Sem substituição</b>
<b>CP1</b>	Resistência a compressão 7 dias	Resistência a compressão 7 dias	Resistência a compressão 7 dias
<b>CP2</b>	Resistência a compressão 7 dias	Resistência a compressão 7 dias	Resistência a compressão 7 dias
<b>CP3</b>	Resistência a compressão 21 dias	Resistência a compressão 21 dias	Resistência a compressão 21 dias
<b>CP4</b>	Resistência a compressão 21 dias	Resistência a compressão 21 dias	Resistência a compressão 21 dias
<b>CP5</b>	Resistência a compressão 28 dias	Resistência a compressão 28 dias	Resistência a compressão 28 dias

<b>CP6</b>	Resistência a compressão 28 dias	Resistência a compressão 28 dias	Resistência a compressão 28 dias
<b>CP7</b>	Teste de absorção	Teste de capilaridade	Teste de absorção
<b>CP8</b>	Teste de absorção	Teste de capilaridade	Teste de absorção
<b>CP9</b>	Teste de absorção	Teste de capilaridade	Teste de absorção

*Fonte: O autor (2025).*

No total, foram produzidos 63 corpos de prova. Observa-se, no quadro, que o teste de absorção para os corpos de prova com adição de escória de alto forno foi substituído pelo teste de absorção por capilaridade, isso ocorreu devido à indisponibilidade da estufa.

Os materiais foram devidamente segregados conforme a dosagem preestabelecida (Figura 7) e colocados sequencialmente na betoneira para homogeneização. A água, muito importante para obtenção da trabalhabilidade adequada, foi adicionada por último em parcelas controladas até atingir uma consistência boa. Imediatamente após a mistura completa, procedeu-se ao ensaio de abatimento (*slump test*) para verificação da consistência da mistura fresca.



*Figura 7 – Materiais utilizados no concreto.*

*Fonte: O autor (2025).*

## **2.8 Teste de abatimento do concreto**

A determinação da consistência do concreto pelo abatimento foi realizada de acordo com a ABNT NBR NM 67, o molde foi primeiramente umedecido e, em seguida, preenchido com três camadas. Cada camada foi compactada com 25 golpes, utilizando-se uma haste de 16x600 mm com superfície lisa.

Após o preenchimento e compactação, a placa de base foi cuidadosamente limpa, e o molde foi removido na direção vertical. Em seguida, conforme determinado pela NBR NM 67, mediu-se o abatimento do concreto. Esse valor corresponde à variação entre a altura original do molde e a medida central do corpo de prova.

Todos os testes de abatimento estiveram de acordo com o especificado, apresentando resultados entre 60 mm e 80 mm, conforme ilustrado na Figura 8. No entanto, para algumas amostras, foi preciso adicionar mais água e repetir o processo de abatimento para atingir a consistência desejada.



*Figura 8 – Teste de abatimento.*

*Fonte: O autor (2025).*

## **2.9 Moldagem do corpo de prova**

Para garantir a qualidade dos ensaios, os corpos de prova de concreto foram cuidadosamente moldados e curados. Utilizaram-se recipientes reutilizáveis com dimensões de 100 mm x 150 mm e base removível, que foram previamente lubrificadas com óleo mineral para facilitar a desmoldagem e posicionados sobre uma mesa nivelada, de acordo com os requisitos da NBR NM 67.

O processo de adensamento do concreto foi realizado em duas camadas distintas. Cada camada recebeu 12 golpes, complementados por batidas laterais nos moldes. Essa técnica assegura a eliminação de vazios e a obtenção de uma amostra homogênea e densa. Após a moldagem, as amostras foram submetidas à cura inicial, seguindo rigorosamente as diretrizes da NBR 5738:2015. Durante as primeiras 24 horas, os corpos de prova foram mantidos em uma superfície nivelada e

devidamente protegida, preservando sua integridade e garantindo o início adequado do processo de hidratação do cimento.

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados. Alguns foram para a etapa do teste de absorção, enquanto outros foram transferidos para um tanque de cura. Estes últimos permaneceram submersos, garantindo a hidratação adequada do concreto e o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas. A remoção do tanque ocorria apenas duas horas antes de cada ensaio de rompimento, um período suficiente para estabilização da temperatura e umidade, minimizando qualquer interferência externa nos resultados dos testes de resistência.

## 2.10 Teste de absorção do concreto

Este ensaio foi realizado seguindo a norma NBR 9778:2005. Primeiramente, três amostras de concreto que continham 3%, 6% e 9% de cinza de serragem, juntamente com três amostras de concreto sem adição, foram secas em estufa por 72 horas a uma temperatura de  $(100 \pm 5)$  °C para a determinação de suas massas secas. Posteriormente, essas mesmas amostras foram imersas em água por outras 72 horas para a determinação de suas massas saturadas. O processo detalhado desse teste está ilustrado na Figura 9.



*Figura 9 – Teste de absorção do concreto.*

*Fonte: O autor (2025).*

O resultado do teste de absorção foi calculado utilizando a Equação 9.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

$A$  = absorção (%)

$m_{sat}$  = massa da amostra saturada em água (g)

$m_s$  = massa da amostra seca em estufa (g)

A Tabela 4, mostra os dados obtidos através do ensaio de absorção, apresenta adequadamente os valores de massa saturada em água e massa seca em estufa.

*Tabela 4 – massa seca em estufa e saturada em água*

Nº CP	Massa seca na estufa				Massa saturada em água			
	S - 3%	S - 6%	S - 9%	0%	S - 3%	S - 6%	S - 9%	0%
CP7	3445	3485	3520	3575	3740	3740	3840	3835
CP8	3400	3540	3280	3545	3685	3795	3580	3805
CP9	3430	3515	3330	3570	3715	3770	3640	3830

*Fonte: O autor (2025).*

### 2.11 Ensaio de absorção por capilaridade do concreto com adição de escória de alto forno

O teste de capilaridade foi conduzido nos laboratórios de geologia e madeira da UEMASUL (Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão). Primeiramente, as amostras foram secas em estufa por cerca de 24 horas, momento que obteve a massa constante. Em seguida, foram imersas em um recipiente com água, com 5 mm de sua base submersos, e suas massas foram registradas em intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas. Contudo, os cálculos finais foram baseados apenas na massa registrada após 72 horas. A Figura 10 mostra alguns registros dessa etapa.



*Figura 10 – Etapa do teste de capilaridade.*

*Fonte: O autor (2025).*

Além disso, foi realizado o rompimento dos corpos de prova para observar a percolação da água e registrar a altura da ascensão capilar na amostra (Figura 11). Em seguida, os cálculos da absorção por capilaridade foram feitos seguindo a norma NBR 9779:2012, pela Equação 10.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (10)$$

Onde:

$C$  = absorção da água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)

$m_{sat}$  = massa saturada do corpo de prova (g)

$m_s$  = massa do corpo de prova seco (g)

$S$  = área da seção transversal (cm<sup>2</sup>)



Figura 11 – Etapa de rompimento do ensaio de capilaridade.

Fonte: O autor (2025).

O rompimento do corpo de prova foi realizado na Franco Engenharia. Os dados referentes à altura máxima da ascensão capilar interna da amostra estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – altura da ascensão capilar (cm)

Nº Corpo de prova	Tratamento – Escória de alto forno		
	3%	6%	9%
CP7	8 cm	7 cm	8 cm
CP8	7,5 cm	7 cm	8,5 cm
CP9	7 cm	6,5	8 cm

Fonte: O autor (2025).

## 2.12 Ensaio de resistência a compressão

O teste de resistência a compressão foi realizado conforme a norma NBR 5739:2018, foi utilizado uma máquina de ensaio universal equipada com placas de compressão adequadas. Os corpos de prova foram centralizados nas placas e submetidos a uma carga axial de compressão, aplicada de forma gradual e uniforme, até a ruptura. A taxa de carregamento foi controlada para garantir resultados precisos. A carga máxima atingida antes da ruptura, dada em tonelada-força, foi registrada e utilizada para o cálculo. O processo de execução do ensaio pode ser observado na Figura 12.



Figura 12 – Rompimento do concreto para o ensaio de resistência a compressão.

Fonte: O autor (2025).

Os corpos de prova foram ensaiados aos 7, 21 e 28 dias após a desmoldagem, no laboratório da Franco Engenharia em Imperatriz – MA. Os cálculos foram realizados de acordo com Equação 11, disponibilizada na norma NBR 5739:2018.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (11)$$

Onde:

$f_c$  = resistência a compressão (Mpa)

$F$  = força máxima alcançada (N)

$D$  = diâmetro do corpo de prova (mm)

### **2.13 Análise estatística dos resultados**

Para aprofundar a descrição da metodologia estatística empregada, o processo de análise dos dados foi conduzido por meio do software estatístico Jamovi. Com ele, foi viabilizado o uso de técnicas estatísticas essenciais para a interpretação dos resultados dos experimentos de resistência à compressão.

O primeiro teste realizado foi a Análise de Variância (ANOVA), que foi aplicada para ambos os tratamentos investigados. O objetivo primordial da ANOVA foi verificar se existiam diferenças estatisticamente significativas nas médias de resistência à compressão entre os diversos grupos de porcentagem de substituição em cada idade de cura (7, 21 e 28 dias). Essa análise inicial é crucial para determinar se o fator de substituição exerce alguma influência geral sobre a propriedade mecânica avaliada.

O Teste de Tukey é complementar a ANOVA e foi empregado para ambos os tratamentos. Este é um teste post hoc utilizado quando a ANOVA indica uma diferença significativa entre as médias dos grupos. O Teste de Tukey permite realizar comparações múltiplas entre todos os pares de médias dos grupos de substituição, controlando a taxa de erro. Isso possibilita identificar especificamente quais pares de porcentagens de substituição diferem entre si em termos de resistência à compressão, oferecendo um entendimento mais detalhado do impacto de cada nível de substituição.

Adicionalmente, e de forma específica para o tratamento com substituição de cimento por cinza de pó de madeira, foi realizado o Teste de Regressão Linear. Este teste estatístico foi fundamental para modelar a relação entre a porcentagem de substituição e a resistência à compressão. Através da regressão linear, foi possível quantificar o impacto da variação na proporção de cinza de pó de madeira sobre a resistência.

## **3. Resultados e discussão**

### **3.1 Resultado do teste de absorção**

A Tabela 6 apresenta os resultados detalhados do teste de absorção de água em corpos de prova de concreto, onde parte do cimento foi substituído por cinza do pó de serragem. Este ensaio é crucial para avaliar a durabilidade e a resistência do material à penetração de umidade, fornecendo informações sobre o desempenho do concreto em diferentes níveis de substituição.

*Tabela 6 – Resultado da absorção de água em corpos de prova com substituição de cimento por cinza do pó de serragem.*

<b>Substituição</b>	<b>Nº do corpo de prova</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Absorção média (%)</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>0%</b>	CP7	7,27	7,30	0,0269
	CP8	7,33		
	CP9	7,28		
<b>3%</b>	CP7	8,56	8,42	0,1068
	CP8	8,38		
	CP9	8,31		
<b>6%</b>	CP7	7,32	7,26	0,0465
	CP8	7,20		
	CP9	7,25		
<b>9%</b>	CP7	9,09	9,18	0,0927
	CP8	9,15		
	CP9	9,31		

*Fonte: O autor (2025).*

Ao analisar a Tabela 6, observa-se que para a referência (0% de substituição), a absorção média foi de 7,30%, com um baixo desvio padrão de 0,0269, indicando alta consistência nos resultados. Com a substituição de 3%, a absorção média aumentou para 8,42%, e o desvio padrão cresceu para 0,1068, sugerindo uma maior variabilidade. Curiosamente, ao se aumentar a substituição para 6%, a absorção média decaiu para 7,26%, um valor inclusive menor que o da amostra de referência, e o desvio padrão foi de 0,0465, indicando uma melhora na uniformidade. Esse comportamento pode apontar para uma otimização da microestrutura do concreto com essa dosagem específica.

Além disso, com 9% de substituição, a absorção média atingiu o maior valor de 9,18%, com um desvio padrão de 0,0927. Apesar desse aumento em relação às outras dosagens, é crucial notar que todos os valores de absorção média em todas as porcentagens de substituição (0%, 3%, 6% e 9%) permaneceram abaixo do limite estabelecido pela NBR 6136:2006. Essa norma estabelece que a absorção de água em blocos de concreto deve ser, no máximo, 10%, independentemente de sua aplicação ou das condições às quais são expostos. Este é um resultado extremamente positivo, pois demonstra que, mesmo com a incorporação da cinza do pó de serragem, o concreto mantém sua capacidade de atender aos requisitos normativos de absorção. Isso sugere que a cinza do pó de serragem pode ser uma alternativa viável para a substituição

parcial do cimento, sem comprometer a durabilidade e a resistência do concreto em relação à absorção de água.

### 3.2 Resultado do teste de absorção por capilaridade

Este ensaio é fundamental para avaliar a capacidade do material em resistir à ascensão de água por capilaridade, um fator crítico para a durabilidade em ambientes onde há contato constante com a umidade, como em fundações ou paredes que sofrem com umidade ascendente.

*Tabela 7 – Absorção por capilaridade em corpos de prova com substituição de cimento por escória de alto forno (massa saturada com 72h)*

<b>Substituição</b>	<b>Nº do corpo de prova</b>	<b>Absorção por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Absorção média (g/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>3%</b>	CP7	0,76	0,85	0,0794
	CP8	0,95		
	CP9	0,83		
<b>6%</b>	CP7	0,76	0,70	0,0900
	CP8	0,57		
	CP9	0,76		
<b>9%</b>	CP7	1,08	1,02	0,0520
	CP8	1,02		
	CP9	0,95		

*Fonte: O autor (2025).*

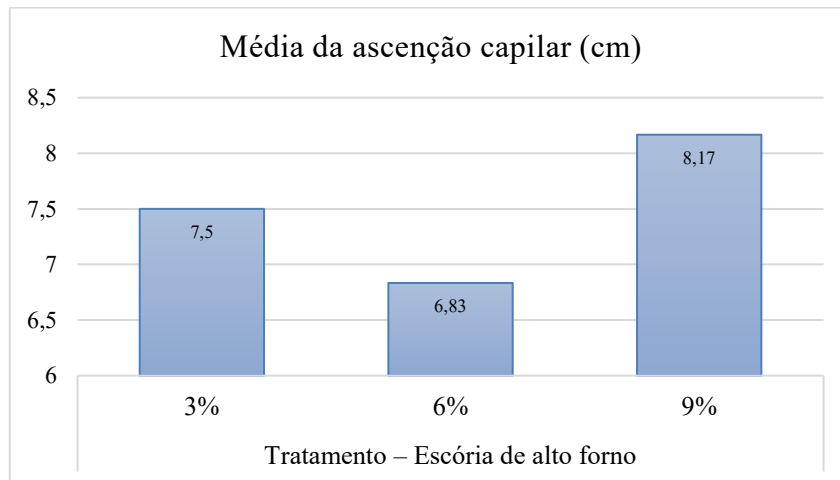
Observando a Tabela 7, é possível analisar o comportamento da absorção por capilaridade para as diferentes porcentagens de substituição. Para a substituição de 3%, a absorção média foi de 0,85 g/cm<sup>2</sup>, com um desvio padrão de 0,0794, indicando uma certa variabilidade entre as amostras. Ao aumentar a substituição para 6%, a absorção média diminuiu para 0,70 g/cm<sup>2</sup>, o que pode sugerir uma melhora na resistência à capilaridade neste nível de dosagem. No entanto, o desvio padrão de 0,0900 para 6% é ligeiramente maior do que para 3%, apontando para uma dispersão um pouco maior dos resultados.

Por fim, ao elevar a substituição para 9%, a absorção média por capilaridade subiu para 1,02 g/cm<sup>2</sup>, sendo o valor mais alto entre as dosagens testadas. Apesar de o desvio padrão de 0,0520 ser o menor entre todas as substituições, indicando maior consistência nos resultados para essa dosagem, o aumento na absorção média sugere que um percentual maior de escória de alto forno

pode comprometer a capacidade do concreto de resistir à ascensão de água por capilaridade. Isso pode ser atribuído à potencial formação de uma rede de poros ou à alteração na estrutura interna do concreto com a adição de maior volume desse resíduo, impactando negativamente sua capacidade de barrar a umidade por capilaridade.

Ao realizar uma comparação com a pesquisa de Pedroza et al. (2018), observa-se uma notável similaridade na absorção média por capilaridade. Os resultados com 3% e 6% de substituição de cimento por escória de alto-forno foram muito próximos aos 0,67 g/cm<sup>2</sup> encontrados por Pedroza et al. (2018) em concreto com resistência estimada de 25 MPa. Isso indica que, nessas porcentagens, a substituição da escória não causa uma alteração significativa no desempenho do concreto em relação a esse tipo de absorção.

A Figura 13 apresenta os resultados da avaliação da altura da ascensão capilar. Este estudo é crucial para compreender como a adição desse material impacta a capacidade do concreto de absorver água por capilaridade, um fator importante na durabilidade e no desempenho do material.



*Figura 13 – Altura da ascensão capilar.*

*Fonte: O autor (2025).*

Ao analisar o gráfico, observa-se que as amostras com 3% de substituição de escória de alto forno apresentaram uma média de ascensão capilar de 7,5 cm. Interessantemente, a substituição de 6% resultou em uma redução na ascensão capilar, atingindo o menor valor de 6,83 cm, o que pode indicar uma melhora na resistência à penetração de água. No entanto, quando a substituição foi de 9%, a altura da ascensão capilar aumentou significativamente para 8,17 cm,

superando os valores das outras porcentagens e sugerindo que, a partir de certo ponto, a adição de escória pode comprometer a resistência à capilaridade do concreto.

Em uma nova comparação com o estudo de Pedroza et al. (2018), nota-se uma distinção importante: enquanto a absorção por capilaridade apresentou resultados próximos, a altura média da ascensão capilar foi consistentemente inferior. O estudo de Pedroza et al. (2018) registrou uma média de ascensão capilar de 10,7 cm utilizando o concreto com estimativa de 25 MPa, valor significativamente maior que os observados nesse experimento. Isso indica que, no teste de ascensão capilar, a escória de alto forno não influenciou negativamente o desempenho do concreto.

### 3.3 Resultado do teste de resistência a compressão

A Tabela 8 apresenta os resultados detalhados dos testes de resistência à compressão do concreto, avaliando o impacto da substituição parcial do cimento por dois materiais distintos: escória de alto-forno e cinza do pó de madeira. Os dados são dispostos para diferentes percentuais de substituição (0%, 3%, 6% e 9%) e em diferentes idades de rompimento (7, 21 e 28 dias), fornecendo uma visão abrangente sobre como essas adições afetam a resistência mecânica do concreto ao longo do tempo.

*Tabela 8 – Resultado do teste de resistência a compressão do concreto.*

Tratamentos:		Escória de alto-forno			Cinza do pó de madeira		
Substituição	Dia do rompimento	Resistência média (MPa)	DP	VR (%)	Resistência média (MPa)	DP	VR (%)
0%	7 dias	20,13	4,203				
	21 dias	23,49	3,920	—	—	—	—
	28 dias	27,15	6,348				
3%	7 dias	17,52	1,801	12,97	12,69	0,026	36,94
	21 dias	21,03	2,181	10,45	15,88	1,218	32,38
	28 dias	24,22	1,342	10,78	18,96	0,185	30,17
6%	7 dias	19,19	3,523	4,68	16,08	0,503	20,13
	21 dias	23,74	3,955	-1,06	16,73	1,130	28,76
	28 dias	24,22	0,865	10,78	19,58	2,975	27,87
9%	7 dias	18,07	1,616	10,20	9,02	0,124	55,21
	21 dias	23,59	2,154	-0,43	12,09	1,704	48,51
	28 dias	25,26	0,830	6,97	15,66	0,265	42,33

*Onde DP = desvio padrão; VR = variação da resistência (%).*

*Fonte: O autor (2025).*

Analisando os resultados com substituição de cimento por escória de alto-forno, observa-se que o concreto de referência (0% de substituição) atingiu 27,15 MPa aos 28 dias. Com a adição de 3% de escória, a resistência aos 28 dias foi de 24,22 MPa, representando uma redução de 10,78%. É notável que a resistência aos 7 e 21 dias também apresentou valores inferiores em comparação ao controle, indicando um desenvolvimento inicial da resistência mais lento.

Surpreendentemente, com 6% de escória, a resistência aos 21 dias (23,74 MPa) foi ligeiramente superior à da amostra de referência no mesmo período, e aos 28 dias manteve 24,22 MPa. Já com 9% de escória, a resistência aos 28 dias foi de 25,26 MPa, uma redução de 6,97% em relação ao concreto de referência, mas ainda assim superior à de 3% de escória. De modo geral, a escória de alto-forno tende a reduzir a resistência à compressão, mas em porcentagens como 6% e 9% essa redução é menos acentuada ou até se estabiliza em idades mais avançadas, sugerindo um potencial para o uso dessas dosagens.

No que se refere à substituição por cinza do pó de madeira, os resultados revelam um impacto maior na resistência à compressão. A 3% de substituição, a resistência aos 28 dias foi de 18,96 MPa, uma queda significativa de 30,17% em comparação ao concreto de referência. Essa tendência de redução da resistência se acentua com o aumento da porcentagem de cinza, a 6%, a resistência aos 28 dias foi de 19,58 MPa (redução de 27,87%), e a 9%, atingiu apenas 15,66 MPa (uma diminuição de 42,33%). Claramente, a cinza do pó de madeira, nas proporções testadas, compromete a resistência à compressão do concreto de forma mais acentuada do que a escória de alto-forno, especialmente em maiores teores de substituição e em idades iniciais.

Ao comparar o desempenho da escória de alto-forno com a cinza do pó de madeira, é evidente que a escória apresenta um comportamento superior em termos de manutenção da resistência à compressão. Enquanto a escória, mesmo com alguma redução, mantém valores de resistência mais próximos ao concreto de referência, a cinza do pó de madeira resulta em perdas significativas de resistência em todas as porcentagens e idades avaliadas. A escória de alto-forno parece ser uma alternativa mais viável para substituição parcial do cimento sem comprometer excessivamente as propriedades mecânicas do concreto, ao passo que a cinza do pó de madeira exige uma análise mais aprofundada de suas características e dosagens para ser considerada uma opção com desempenho satisfatório em aplicações que demandam alta resistência.

É importante ressaltar que não houve uma investigação aprofundada das propriedades dos materiais. Consequentemente, não foi possível obter informações cruciais, como o grau de

cristalização e a composição química da escória, que, dependendo de suas características, podem ter impactado negativamente sua reatividade em contato com o concreto. Além disso, o pó de madeira não passou por nenhum processo químico e não teve controle de seu processo de queima, o que pode ter influenciado as propriedades da cinza resultante.

### 3.4 Análise estatística do teste de resistência à compressão

#### 3.4.1 ANOVA (análise da variância)

As tabelas 10 e 11 apresentam os resultados da análise de variância (ANOVA) para avaliar o efeito da substituição de cimento por escória de alto-forno e por cinza do pó de madeira, respectivamente, na resistência à compressão de corpos de prova aos 7, 21 e 28 dias. A ANOVA é utilizada para determinar se existem diferenças estatisticamente significativas entre os grupos analisados, considerando a variação interna dos dados. Os resultados indicam a relevância da substituição como fator influente na resistência do material.

*Tabela 10 – Teste ANOVA para a resistência à compressão dos corpos de prova com substituição de cimento por escória de alto-forno.*

<b>Dia do rompimento</b>	<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>7 dias</b>	Substituição (%)	8,14	3	2,71	0,302	0,824
	Resíduos	35,97	4	8,99	-	-
<b>21 dias</b>	Substituição (%)	9,95	3	3,32	0,328	0,807
	Resíduos	40,45	4	10,11	-	-
<b>28 dias</b>	Substituição (%)	11,40	3	3,81	0,350	0,793
	Resíduos	43,60	4	10,89	-	-

*p = p-value, indica a probabilidade de observar um resultado tão extremo quanto o obtido nos dados, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira. FV = Fontes de Variação, SQ = Soma dos Quadrados, GL = Grau de Liberdade, QM = Quadrado Médio, F = razão entre a variância entre grupos (QMT) e a variância dentro dos grupos (QMR).*

*Fonte: O autor (2025).*

Analisando a tabela 10, observa-se que os resultados da ANOVA para resistência à compressão aos 7 dias indicam que a substituição de cimento por escória de alto-forno não teve efeito significativo ( $F = 0,302$ ;  $p = 0,824$ ). O valor de  $p$  superior a 0,05 sugere que as variações na resistência entre os grupos (0%, 3%, 6%, 9%) podem ser atribuídas ao acaso, sem evidências estatísticas de que a substituição influencie o desempenho inicial do material. A soma de quadrados

dos resíduos foi consideravelmente maior que a da substituição, reforçando a baixa influência desse fator.

Aos 21 dias, o teste também não detectou diferenças significativas entre os grupos ( $F = 0,328$ ;  $p = 0,807$ ). Apesar de um leve aumento na soma de quadrados da substituição a proporção em relação aos resíduos manteve-se baixa, indicando que a escória não alterou significativamente a resistência nesta fase intermediária. O valor de  $p$  novamente acima de 0,05 confirma a ausência de efeito estatístico.

Observa-se, na tabela 10, que aos 28 dias os resultados seguem o mesmo padrão: nenhuma diferença significativa foi observada ( $F = 0,350$ ;  $p = 0,793$ ). Embora a soma de quadrados da substituição tenha aumentado, a alta variabilidade dos resíduos e o  $p$ -valor acima de 0,05 indicam que a substituição por escória não impactou a resistência final do material, mesmo após o período de cura completo.

*Tabela 11 – Teste ANOVA para a resistência à compressão dos corpos de prova com substituição de cimento por pó de madeira.*

<b>Dia do rompimento</b>	<b>FV</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>7 dias</b>	Substituição (%)	135,1	3	45,02	10,1	0,025
	Resíduos	1	4	4,48	-	-
<b>21 dias</b>	Substituição (%)	134,9	3	44,96	8,54	0,033
	Resíduos	21,1	4	5,27	-	-
<b>28 dias</b>	Substituição (%)	141,5	3	47,2	3,83	0,114
	Resíduos	49,3	4	12,3	-	-

*p = p-value, indica a probabilidade de observar um resultado tão extremo quanto o obtido nos dados, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira. FV = Fontes de Variação, SQ = Soma dos Quadrados, GL = Grau de Liberdade, QM = Quadrado Médio, F = razão entre a variância entre grupos (QMT) e a variância dentro dos grupos (QMR).*

*Fonte: O autor (2025).*

A tabela 11 revela um efeito estatisticamente significativo da substituição na resistência aos 7 dias ( $F=10,1$ ,  $p=0,025$ ). O elevado valor  $F$  e o baixo  $p$ -valor indicam que as diferenças entre grupos não são aleatórias. A soma de quadrados da substituição é cerca de 7 vezes maior que a dos resíduos, demonstrando que a variação entre as formulações explica a maior parte da variabilidade

observada. Estes resultados sugerem que a cinza de pó de madeira tem impacto nas propriedades mecânicas do material.

Aos 21 dias, os resultados mantêm a significância estatística ( $F=8,54$ ,  $p=0,033$ ), embora com valores ligeiramente menores que aos 7 dias. A proporção entre a soma do quadrado da substituição e a soma do quadrado do resíduo permanece elevada, indicando que o efeito da cinza continua sendo o principal fator de variação. O aumento no quadrado médio dos resíduos sugere maior variabilidade interna nos grupos nesta fase intermediária de cura.

A análise dos resultados aos 28 dias revela uma mudança significativa no padrão observado nas idades anteriores, com a perda de significância estatística ( $p=0,114$ ) que supera o limite de 0,05. Embora a soma de quadrados da substituição tenha apresentado um aumento, também ocorreu um crescimento dos resíduos que resultou em uma razão F reduzida, indicando que a variabilidade entre os grupos se tornou menos relevante frente à maior heterogeneidade interna das amostras. Este comportamento sugere que o efeito da cinza de pó de madeira, embora perceptível nas fases iniciais, torna-se menos determinante com o avanço do processo de cura.

### 3.4.2 Teste de Tukey para a resistência a compressão do corpo de prova com substituição de cimento por escória de alto-forno

As Tabelas 12, 13 e 14, acompanhadas pelas Figuras 14, 15 e 16 respectivamente, apresentam os resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão em diferentes idades de cura (7, 21 e 28 dias), comparando os efeitos da substituição parcial de cimento por escória de alto-forno. Esses recursos visuais e numéricos permitem identificar diferenças significativas entre os grupos de substituição (0%, 3%, 6% e 9%), complementando a análise da ANOVA ao mostrar comparações pareadas específicas. As figuras ilustram graficamente as diferenças entre as médias, enquanto as tabelas detalham as diferenças absolutas e sua significância estatística.

*Tabela 12 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 dias.*

<b>Comparação</b>	<b>Diferença Média (MPa)</b>	<b>p-valor</b>	<b>Diferença significativa</b>
0% - 3%	2,615	0,820	Não
0% - 6%	0,945	0,988	Não
0% - 9%	2,055	0,898	Não
3% - 6%	-1,670	0,940	Não
3% - 9%	-0,560	0,997	Não
6% - 9%	1,110	0,980	Não

*Fonte: O autor (2025).*

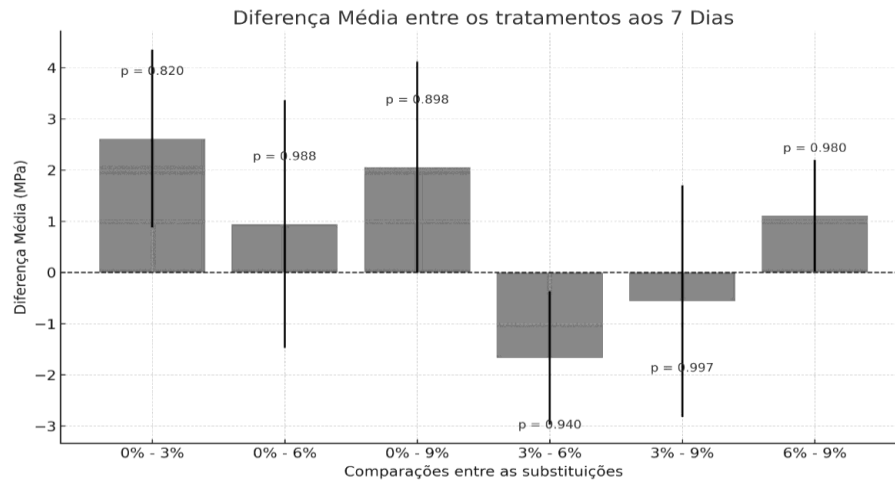


Figura 14 – Gráfico do teste Tukey aos 7 dias.

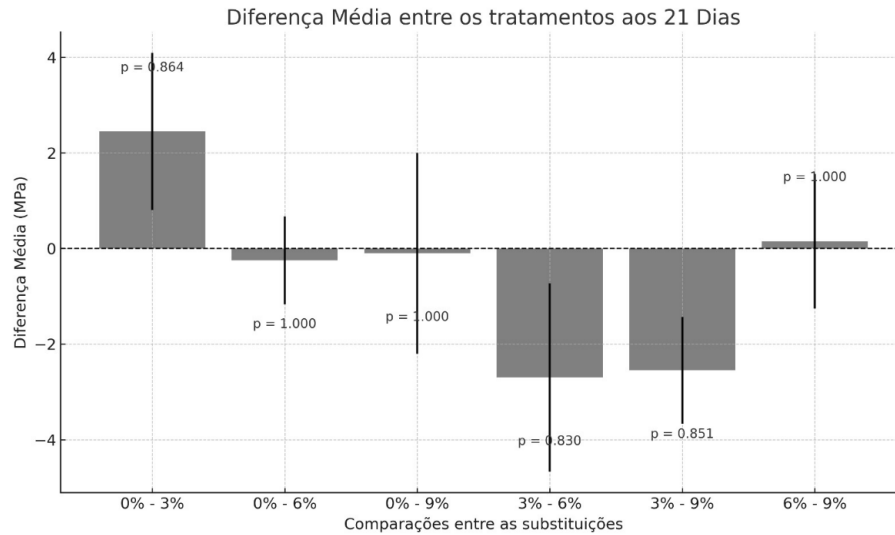
Fonte: O autor (2025).

A Tabela 12 e a Figura 14 ilustram os resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão aos 7 dias. A tabela detalha as diferenças médias entre os pares de porcentagens de substituição e seus respectivos p-valores. Em todas as comparações, o p-valor é maior que 0,05, indicando que nenhuma das diferenças médias é estatisticamente significativa neste período inicial. O gráfico da Figura 14 visualmente reforça essa ausência de significância, mostrando as barras de diferença média com suas respectivas barras de erro, e os p-valores altos anotados acima de cada barra confirmam a inexistência de diferenças estatisticamente relevantes entre os tratamentos aos 7 dias.

Tabela 13 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos corpos de prova aos 21 dias.

Comparação	Diferença Média (MPa)	p-valor	Diferença significativa
0% - 3%	2,450	0,864	Não
0% - 6%	-0,250	1,000	Não
0% - 9%	-0,100	1,000	Não
3% - 6%	-2,700	0,830	Não
3% - 9%	-2,550	0,851	Não
6% - 9%	0,150	1,000	Não

Fonte: O autor (2025).



*Figura 15 – Gráfico do teste Tukey aos 21 dias.*

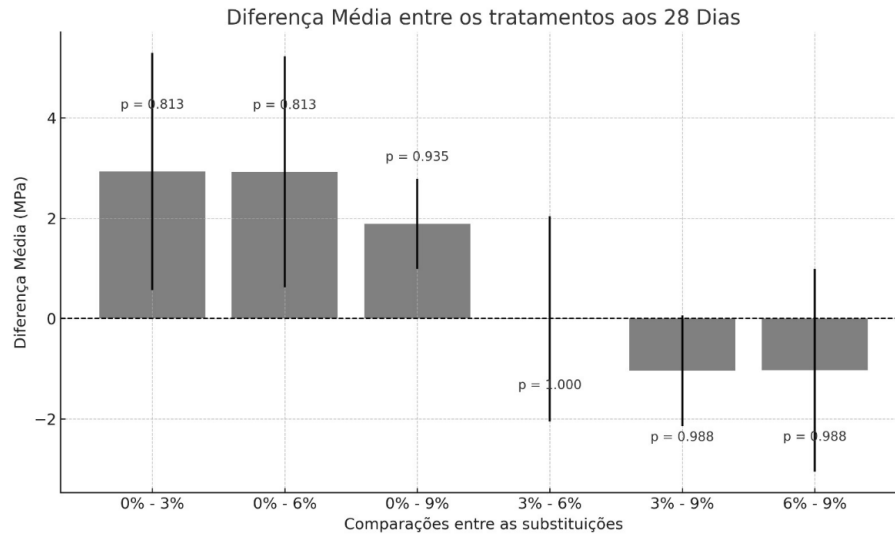
*Fonte: O autor (2025).*

Para a idade de 21 dias, a Tabela 13 e a Figura 15 apresentam os resultados do teste de Tukey. Assim como aos 7 dias, todos os p-valor para as comparações entre os grupos de substituição são maiores que 0,05. Isso demonstra que, mesmo aos 21 dias, não há diferenças estatisticamente significativas na resistência à compressão entre os grupos de substituição. A Figura 15, com seu gráfico de barras e p-valor elevados, corrobora essa conclusão, indicando que as variações observadas nas médias são provavelmente devido ao acaso e não a um efeito real da substituição da escória.

*Tabela 14 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias.*

<b>Comparação</b>	<b>Diferença Média (MPa)</b>	<b>p-valor</b>	<b>Diferença significativa</b>
0% - 3%	2,930	0,813	Não
0% - 6%	2,925	0,813	Não
0% - 9%	1,890	0,935	Não
3% - 6%	-0,005	1,000	Não
3% - 9%	-1,040	0,988	Não
6% - 9%	-1,035	0,988	Não

*Fonte: O autor (2025).*



*Figura 16 – Gráfico do teste Tukey aos 28 dias.*

*Fonte: O autor (2025).*

Observa-se que a Tabela 14 e a Figura 16 mostram os resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão aos 28 dias. Mais uma vez, os p-valores para todas as comparações entre os grupos de substituição são consistentemente altos. Isso significa que, mesmo após o período completo de cura de 28 dias, a substituição de cimento por escória de alto-forno não resultou em diferenças estatisticamente significativas na resistência à compressão entre os diferentes teores de substituição. O gráfico na Figura 16 ilustra visualmente essas pequenas diferenças médias, com as barras de erro sobrepostas e os p-valores indicando a falta de significância estatística, reiterando que a substituição não impactou a resistência final do material.

### **3.4.3 Teste de Tukey para a resistência a compressão do corpo de prova com substituição de cimento por pó de madeira**

As Tabelas 15, 16 e 17, juntamente com as Figuras 17, 18 e 19, respectivamente, apresentam os resultados dos testes Post Hoc de Tukey, complementando a análise de variância da resistência à compressão de corpos de prova com substituição de cimento por cinza de pó de madeira em diferentes idades. Estes testes permitem identificar quais pares de grupos de substituição apresentam diferenças estatisticamente significativas na resistência média.

Tabela 15 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 dias.

Comparação	Diferença Média (MPa)	p-valor	Diferença significativa
0% - 3%	7,44	0,079	Não
0% - 6%	4,05	0,349	Não
0% - 9%	11,12	0,021	Sim
3% - 6%	-3,38	0,469	Não
3% - 9%	3,68	0,413	Não
6% - 9%	7,06	0,092	Não

Fonte: O autor (2025).

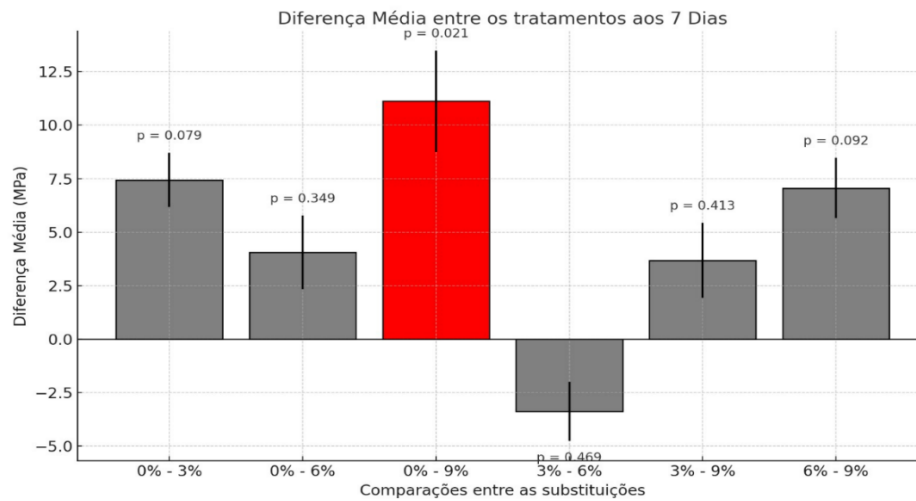


Figura 17 – Gráfico do teste Tukey aos 7 dias.

Fonte: O autor (2025).

A Tabela 15 e a Figura 17 ilustram os resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão aos 7 dias. A tabela detalha as diferenças médias entre os pares de porcentagens de substituição e seus respectivos p-valores. Nota-se que a comparação "0% - 9%" apresenta um p-valor de 0,021, que é menor que o nível de significância de 0,05, indicando uma diferença estatisticamente significativa. As demais comparações mostram p-valores acima de 0,05, sugerindo que não há diferenças significativas entre esses outros pares. O gráfico da Figura 17 visualmente ressalta a diferença significativa para a comparação "0% - 9%", onde a barra correspondente é destacada em vermelho e os p-valores são anotados para cada comparação, reforçando as conclusões da tabela.

Tabela 16 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos corpos de prova aos 21 dias.

Comparação	Diferença Média (MPa)	p-valor	Diferença significativa
0% - 3%	7,605	0,094	Não
0% - 6%	6,755	0,131	Não
0% - 9%	11,390	0,026	Sim
3% - 6%	-0,850	0,980	Não
3% - 9%	3,785	0,448	Não
6% - 9%	4,635	0,316	Não

Fonte: O autor (2025).

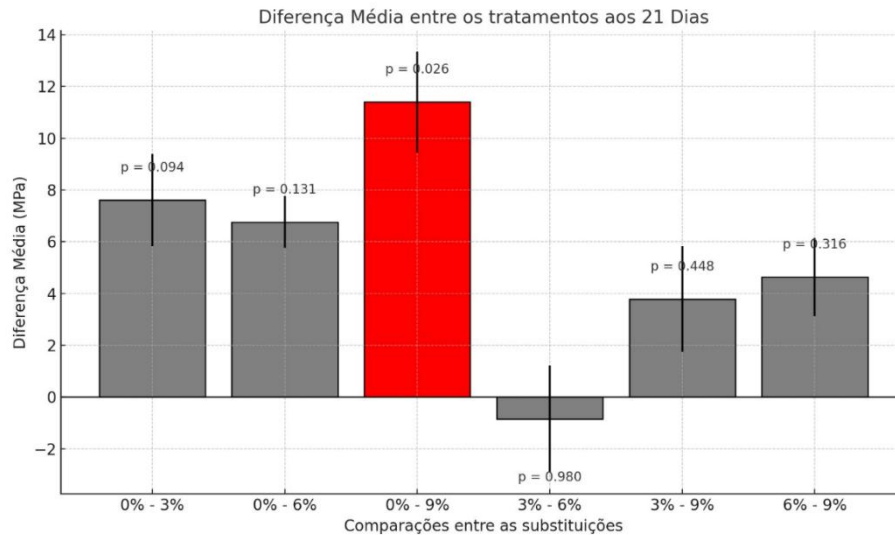


Figura 18 – Gráfico do teste Tukey aos 21 dias.

Fonte: O autor (2025).

Para a idade de 21 dias, a Tabela 16 e a Figura 18 apresentam os resultados do teste de Tukey. De forma semelhante aos 7 dias, a comparação "0% - 9%" é a única que exibe um p-valor inferior a 0,05, especificamente 0,026. Isso demonstra que há uma diferença estatisticamente significativa na resistência à compressão entre o concreto sem substituição e o concreto com 9% de substituição de cinza de pó de madeira aos 21 dias. Todas as outras comparações mostram p-valores acima de 0,05, indicando a ausência de diferenças significativas. A Figura 18, com seu gráfico de barras, destaca visualmente a diferença significativa para "0% - 9%", com a barra em vermelho, e os p-valores confirmam a análise da tabela.

Tabela 17 – Teste de Tukey para a resistência à compressão dos corpos de prova aos 28 dias.

Comparação	Diferença Média (MPa)	p-valor	Diferença significativa
0% - 3%	8,19	0,233	Não
0% - 6%	7,57	0,277	Não
0% - 9%	11,49	0,097	Não
3% - 6%	-0,63	0,998	Não
3% - 9%	3,30	0,788	Não
6% - 9%	3,93	0,699	Não

Fonte: O autor (2025).

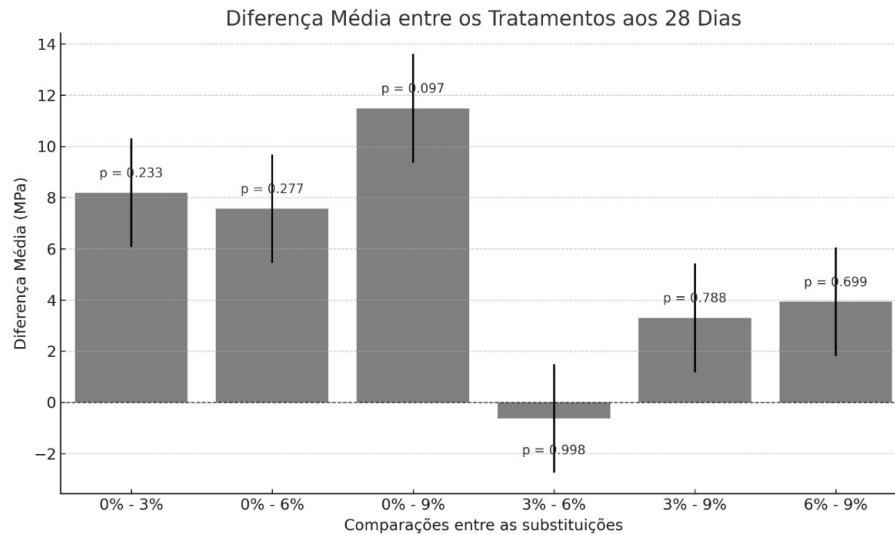


Figura 19 – Gráfico do teste Tukey aos 28 dias.

Fonte: O autor (2025).

Por fim, observa-se na Tabela 17 e na Figura 19 os resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão aos 28 dias. Nesta fase, todos os p-valores para as comparações entre os grupos de substituição são superiores a 0,05. Isso indica que, após 28 dias de cura, a substituição de cimento por cinza de pó de madeira não resultou em diferenças estatisticamente significativas na resistência à compressão entre os diferentes teores de substituição. O gráfico na Figura 19 visualiza essas pequenas diferenças médias, reiterando que, neste período, a substituição não impactou a resistência final do material de forma estatisticamente perceptível.

### 3.4.4 Teste de regressão linear para resistência a compressão dos corpos de prova com substituição de cimento por pó de madeira.

Para validar os dados estatísticos referentes à resistência à compressão de corpos de prova com substituição de cimento por cinza de pó de madeira, foi conduzido um teste de regressão linear. Os resultados desse teste, que incluem coeficientes, p-valores e a significância das diferenças para cada porcentagem de substituição em relação ao grupo de referência (0%), são apresentados detalhadamente nas Tabelas 18, 19 e 20, correspondendo aos períodos de 7, 21 e 28 dias, respectivamente.

*Tabela 18 – Teste de regressão linear para a resistência à compressão aos 7 dias.*

<b>Parâmetro</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>p-valor</b>	<b>Diferença significativa</b>
Intercepto (0%)	20,13	<0,001	Referência
3% - 0%	-7,44	0,025	Sim
6% - 0%	-4,05	0,128	Não
9% - 0%	-11,12	0,006	Sim

**Ajuste do modelo:**  $R^2 = 0,883$  (88,3% da variabilidade explicada)

*R<sup>2</sup> ou R-quadrado, é uma medida estatística que indica a proporção da variabilidade da variável dependente que é explicada pelo modelo*

*Fonte: O autor (2025).*

A Tabela 18 mostra os resultados do teste de regressão linear para a resistência à compressão aos 7 dias. O coeficiente de 3% - 0% é -7,44 com um p-valor de 0,025, indicando que há uma diferença significativa entre o grupo de 0% e 3%. Para 6% - 0%, o coeficiente é -4,05 e o p-valor de 0,128, o que não é significativo. Já para 9% - 0%, o coeficiente é -11,12 com um p-valor de 0,006, mostrando uma diferença significativa. O ajuste do modelo é de 0,883, explicando 88,3% da variabilidade dos dados.

*Tabela 19 – Teste de regressão linear para a resistência à compressão aos 21 dias.*

<b>Parâmetro</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>p-valor</b>	<b>Diferença significativa</b>
Intercepto (0%)	23,48	<0,001	Referência
3% - 0%	-11,39	0,008	Sim
6% - 0%	-6,75	0,042	Sim
9% - 0%	-7,60	0,030	Sim

**Ajuste do modelo:**  $R^2 = 0,865$  (86,5% da variabilidade explicada)

*R<sup>2</sup> ou R-quadrado, é uma medida estatística que indica a proporção da variabilidade da variável dependente que é explicada pelo modelo*

*Fonte: O autor (2025).*

A Tabela 19 apresenta os resultados do teste de regressão linear para a resistência à compressão aos 21 dias. Todas as comparações com o grupo de referência (0%) mostram diferenças significativas: 3% - 0% tem um coeficiente de -11,39 com p-valor de 0,008; 6% - 0% tem coeficiente de -6,75 com p-valor de 0,042; e 9% - 0% tem coeficiente de -7,60 com p-valor de 0,030. O ajuste do modelo para esta idade é de 0,865, explicando 86,5% da variabilidade.

*Tabela 20 – Teste de regressão linear para a resistência à compressão aos 28 dias.*

<b>Parâmetro</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>p-valor</b>	<b>Diferença significativa</b>
Intercepto (0%)	27,15	<0,001	Referência
3% - 0%	-8,19	0,080	Não
6% - 0%	-7,56	0,097	Não
9% - 0%	-11,49	0,031	Sim

**Ajuste do modelo: R<sup>2</sup> = 0,742 (74,2% da variabilidade explicada)**

*R<sup>2</sup> ou R-quadrado, é uma medida estatística que indica a proporção da variabilidade da variável dependente que é explicada pelo modelo*

*Fonte: O autor (2025).*

Por fim, a Tabela 20 exhibe os resultados para a resistência à compressão aos 28 dias. Observa-se que apenas a comparação 9% - 0% apresenta uma diferença significativa, com coeficiente de -11,49 e p-valor de 0,031. As comparações 3% - 0% (p-valor de 0,080) e 6% - 0% (p-valor de 0,097) não são estatisticamente significativas. O ajuste do modelo aos 28 dias é de 0,742, explicando 74,2% da variabilidade.

#### **4. Considerações finais**

Este estudo investigou a viabilidade do uso de pó de madeira e escória de alto forno como substitutos parciais do cimento na produção de concreto, com foco na avaliação do desempenho mecânico e da durabilidade do material resultante. Os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água, absorção por capilaridade e resistência à compressão forneceram importantes insights sobre o potencial desses resíduos para a construção civil.

Os resultados dos testes de absorção de água para o concreto com cinza de pó de serragem mostraram que, mesmo com a substituição do cimento em diferentes percentuais (3%, 6% e 9%), todos os valores de absorção média permaneceram abaixo do limite de 10% estabelecido pela NBR 6136:2006. Isso indica que a cinza de pó de serragem pode ser uma alternativa viável para a substituição parcial do cimento, sem comprometer a durabilidade e a resistência do concreto à absorção de água, o que pode gerar benefícios ambientais e econômicos.

No que se refere à resistência à compressão, a adição de escória de aciaria revelou um comportamento interessante no desenvolvimento da resistência. Embora as dosagens com substituição tenham apresentado resistências iniciais menores que a amostra de referência, a dosagem de 9% de escória de alto forno conseguiu atingir e até mesmo superar a resistência esperada de 25 MPa aos 28 dias, ademais, a dosagem de 6% também se mostrou próxima a essa marca. Além disso, a adição de escória de alto forno contribuiu para uma maior uniformidade no desenvolvimento da resistência do concreto. Esses resultados demonstraram o bom desempenho da escória de alto-forno como um promissor material cimentício suplementar, capaz de desenvolver elevadas resistências em idades mais avançadas e promover a sustentabilidade na construção civil. No entanto, apesar desses resultados, é necessária a caracterização da escória de aciaria antes da sua utilização.

Com a análise estatística, conclui-se que a substituição de cimento por escória de alto-forno e por cinza do pó de madeira impacta de maneiras distintas a resistência à compressão do concreto. A análise de variância (ANOVA) demonstrou que a substituição por escória de alto-forno não gerou diferenças estatisticamente significativas na resistência à compressão em nenhuma das idades avaliadas, conforme indicado pelos p-valores acima de 0,05. O teste de Tukey para a escória de alto-forno corroborou essa ausência de significância estatística em todas as comparações pareadas, reforçando que as variações observadas podem ser atribuídas ao acaso e que a escória, nas porcentagens testadas, não comprometeu a resistência final do material de forma perceptível.

Em contrapartida, a substituição por cinza do pó de madeira revelou um efeito estatisticamente significativo na resistência à compressão nas idades iniciais (7 e 21 dias), com p-valores abaixo de 0,05, particularmente na comparação entre o concreto de referência (0%) e o com 9% de substituição. O teste de regressão linear para a cinza do pó de madeira confirmou que a substituição de 9% apresentou uma diferença significativa em relação ao grupo de referência aos 7

dias, com um p-valor de 0,006. Contudo, aos 28 dias, a significância estatística foi perdida, sugerindo que o efeito da cinza se torna menos determinante com o avanço do processo de cura.

Em suma, a pesquisa demonstrou que tanto a cinza do pó de madeira quanto a escória de alto forno possuem potencial para serem incorporadas na produção de concreto. Embora a cinza do pó de madeira se destaque em relação à absorção de água, a escória de alto forno se mostra mais eficiente no ganho de resistência à compressão em idades avançadas. A utilização desses resíduos representa um passo importante para a minimização do impacto ambiental gerado pela indústria da construção civil e pela indústria moveleira e siderúrgica, que produzem grandes volumes de resíduos. Para estudos futuros, sugere-se a investigação das propriedades dos materiais, a realização de ensaios complementares para aprofundar a compreensão sobre o comportamento a longo prazo e a durabilidade dessas misturas em diferentes condições ambientais, bem como análises de custo-benefício para sua implementação em larga escala.

### **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de realizar esta pesquisa e pelo aprendizado de todos os dias. Estendo minha gratidão à minha família por sempre me apoiar.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Bruno Lúcio Meneses Nascimento, ao João Franco e à Franco Engenharia por disponibilizarem equipamentos, conhecimento e tempo para auxiliar na realização deste estudo.

Por fim, mas não menos importante, minha gratidão aos meus colegas de turma que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste artigo.

## REFERÊNCIAS

ALTOÉ, Silvia Paula Sossai; DE ARAÚJO, João Vitor Pires. Reaproveitamento do resíduo pó de serra na construção civil. aplicação em enchimento de lajes pré-fabricadas. **Revista de engenharia e tecnologia**, v. 11, n. 3, páginas 123-134, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **O setor**. Curitiba: Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente, 2022. Disponível em: <https://abimci.com.br/o-setor/>. Acesso em: 10 JAN. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:2015**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Concreto – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

BATISTA, Marcelo Lopes. Gestão de resíduos na construção civil: ênfase no desenvolvimento sustentável Waste management in civil construction: emphasis on sustainable development. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 23356-23373, 2022.

FIGUEROA, Manuel Jesús Manriquez; MORAES, Poliana Dias de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, out./dez. 2009.

FREITAS, Suzy Magaly Alves Cabral de. **Escória de aciaria: Caminhos para uma Gestão Sustentável** – Minas Gerais, 2018. Trabalho de Pós-graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT - Universidade Federal de Ouro Preto, 2018. Disponível em: <https://www.tecnologiammm.com.br/article/10.4322/tmm.2014.006/pdf/tmm-11-1-41.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Indicadores de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil 2024. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/indicadores-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 21 nov. 2024.

MATOS, Victor Hugo Miranda de. **Viabilidade de substituição da madeira natural e compensada pela madeira plástica para uso temporário em obra situada no município de Osasco/SP**. 2017. Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. 2017.

PAGIO, M. Z.; CARRARETO, L. F.; VIEIRA, G. L.; MAGALHÃES, D. C. Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 167-186, abr./jun. 2022.

PEDROZA, Arthur Henrique Aragoni et al. ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ABSORÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO COM COMPARATIVO DE TRAÇOS. In: **ENEMET**, São Paulo, out. 2018.

RODRIGUES, G. G. O. et al. Utilização de argilas submetidas a calcinação flash com vistas a redução dos impactos negativos causados pela fabricação de cimento Portland. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 24, n. 2, p. 48-59, 2022.

RODRIGUES, Públio Penna Firme. **Parâmetros de dosagem do concreto**. 3. ed. São Paulo: ABCP, 1998. 32 p. (ET-67).