


Análise mecânica de concretos com substituições parciais de agregados por limalha de aço

Mechanical analysis of concrete with partial replacements of aggregates by steel filings

Paulo Henrique Carvalho Mello¹ , Sílvia Paula Sossai Altoé¹, Gustavo Saleme de Miranda Gdirão², Otávio Gandolphi do Nascimento Ribeiro², Pietro Marquette Thomazotti²

¹Universidade Estadual de Maringá, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Av. Colombo, n° 5790, bloco C67 sala 002, Maringá, PR, Brasil.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Graduação em Engenharia Civil. Av. Guarapuava n°800, bloco H, Guarapuava, PR, Brasil.

e-mail: paulomello@utfpr.edu.br, spsaltoe@uem.br, gidrao@utfpr.edu.br, pietrothomazotti@hotmail.com, otavio.gandolphi.com@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo apresentar os resultados obtidos para o comportamento mecânico do concreto considerando a substituição parcial dos teores dos agregados por resíduo industrial provenientes da usinagem de aço. Conhecidas as propriedades mecânicas dos metais, considera-se que a substituição parcial dos agregados em concretos por resíduos dessa natureza possa atuar não apenas como um fator de melhora no comportamento do material, mas também como uma maneira de se produzir uma destinação eficiente ao resíduo em questão, além de que, a substituição de agregados por materiais alternativos contribui para mitigar a escassez desses recursos. Dessa forma, o trabalho justifica-se pelas suas potencialidades em relação à engenharia de materiais cimentícios e impactos ligados à sustentabilidade das edificações. Para se investigar o material foram adotados três teores de substituições em relação ao peso de cimento, 5%, 10% e 15%, sendo efetuados ensaios para obtenção da absorção de água e consistência, além das resistências à tração indireta, compressão e módulo de elasticidade estático. A que a substituição dos agregados por resíduo de usinagem leva a maior qualidade do concreto produzido além de acréscimo de resistências, essa melhora se mostrou mais expressiva para a substituição do agregado miúdo, com aumento na resistência média à compressão e tração de até 73,70% e 73,71% respectivamente, obtendo-se através de aproximações não lineares o teor ótimo próximo a 12%, para as substituições de agregado graúdo teores acima dos estudados tendem a ser mais interessantes.

Palavras-chave: Limalha de aço; Concreto; Resíduos; Agregados; Fibras.

ABSTRACT

The present study aimed to present the results obtained for the mechanical behavior of concrete, considering the partial replacement of aggregate content with industrial waste from steel machining. Given the mechanical properties of metals, it is considered that the partial substitution of aggregates in concrete with waste of this nature can act not only as an improvement factor in the material's behavior but also as an efficient way to dispose of the specific waste. Additionally, the substitution of aggregates with alternative materials contributes to mitigating the scarcity of these resources. Thus, the work is justified by its potential in relation to cementitious materials engineering and impacts related to the sustainability of buildings. To investigate the material, three replacement levels were adopted concerning the weight of cement, namely 5%, 10%, and 15%. Tests were conducted to obtain water absorption and consistency, as well as indirect tensile strength, compression, and static elasticity modulus. The replacement of aggregates with machining waste was found to lead to higher quality concrete production and increased strengths. This improvement was more pronounced for fine aggregate replacement,

with an increase in average compression and tensile strength of up to 73.70% and 73.71%, respectively. Through nonlinear approximations, the optimal content was found to be around 12% for fine aggregate replacement. For coarse aggregate replacements, levels above those studied tend to be more interesting.

Keywords: Steel shavings; Concrete; Waste; Aggregates; Fibers.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é o procedimento responsável por moldar e finalizar peças metálicas através da remoção de material, denominado limalha, sendo um resíduo sólido com características específicas, tais como composição, forma e tamanho determinados pelo material utilizado e pela metodologia aplicada ao processo em questão [1].

A fabricação de aço está intimamente ligada à produção de resíduos de usinagem, um torno pode gerar aproximadamente de 3 a 4 quilos desse resíduo por dia de trabalho. A título de exemplo, de acordo com o Investment Company Institute, a produção total desse tipo de resíduo já atingiu cerca de 1.200 milhões de toneladas anualmente [2].

Segundo o INSTITUTO AÇO BRASIL [3], a produção de aço no país atingiu 36,2 milhões de toneladas em 2021, registrando um incremento de aproximadamente 15% em relação ao ano anterior. Esse volume representa 55,9% de toda a produção da América Latina. Tal crescimento refletiu também no aumento da geração de resíduos de usinagem.

Dada a variedade de formas e tamanhos possíveis dos resíduos, além de sua composição metálica, a incorporação das limalhas de aço no concreto pode resultar em melhorias nas propriedades mecânicas, tais como as resistências de compressão, e principalmente à tração, podendo ainda desempenhar um papel semelhante ao das fibras metálicas, aumentando a tenacidade e ductilidade do concreto, juntamente com auxílio no controle de propagação de fissuras.

A utilização de fibras de aço no concreto é interessante principalmente para o aumento da capacidade de absorção da energia pós fissuração, incremento da resistência ao impacto e à fadiga por flexão [4]. Sendo observado uma alteração marginal na resistência a compressão do concreto quando adicionadas fibras convencionais, salientando que, a utilização de fibras de aço não evita o surgimento de fissuras, mas sim auxilia no controle da propagação das mesmas pela matriz cimentícia [5].

A inclusão desse resíduo no concreto é abordada em estudos recentes, sendo utilizado de diversas formas, ÇELIC *et al.* [6] utilizou o resíduo em relação ao volume de concreto nas proporções de 0%, 1%, 2% e 3%, obtendo incrementos da resistência à compressão de 9% a 32%, além de obter aumento no controle de fissuração do concreto. PRABU *et al.* [7], utilizou o resíduo como substituição do agregado, nas proporções de 3%, 6% e 9% do peso de cimento, obtendo para este último teor os melhores resultados, com aumento de 21% e 40,2% na resistência à compressão e tração respectivamente. ALTHOEY e HOLSEN [8] utilizaram o resíduo como substituição de agregados, nas proporções de 5%, 10%, 15% e 20% do peso do agregado, com todas as incorporações resultando em aumentos nas resistências mecânicas de compressão, tração e flexão do concreto, com valores máximos obtidos de 38%, 11% e 18% respectivamente no teor de 20%.

A fundamentação para a inclusão deste material no concreto se baseia nas contribuições positivas evidenciadas por diversas pesquisas recentes, as quais delinham os teores ideais e tipos de incorporações desse material para melhorar as propriedades mecânicas do concreto. Essa abordagem visa viabilizar o compósito como um material estrutural na construção civil. Ao mesmo tempo, busca-se assegurar uma destinação final para o resíduo, conferindo-lhe um potencial de impacto ambiental reduzido no meio ambiente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O aglomerante utilizado foi cimento CII-F-32, de acordo com os parâmetros da NBR 16697 (2018) [9], e os resíduos de usinagem provenientes de tornearias do município de Guarapuava – Paraná, conforme Figura 1 abaixo.

Foram aferidas também duas dimensões dos resíduos, denominadas medições “A” e “B”, conforme Figura 2, com os valores obtidos na Tabela 1 abaixo.

As curvas granulométricas para os agregados miúdos está presente na Figura 3 abaixo, em que, “ZO” e “ZU” se referem as zonas ótimas e utilizável, com a amostra a ser utilizada escolhida como sendo a “A-03”.

Para o agregado graúdo foi utilizado uma mistura de Brita do tipo 1 e 0, composta pela proporção de 50% de cada brita a partir da peneira de 4,75 mm, onde granulometrias superiores foi utilizada 100% da Brita 0, conforme Figura 4.



Figura 1: Resíduos utilizados.

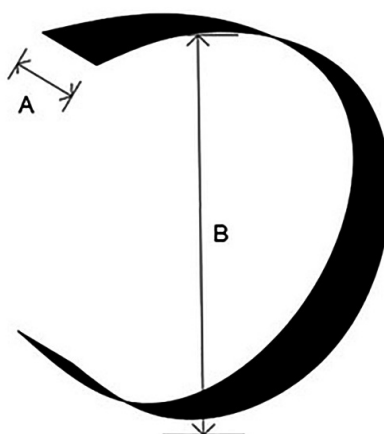


Figura 2: Resíduos utilizados – Dimensões aferidas.

Tabela 1: Resíduos utilizados – Dimensões aferidas.

AMOSTRA	MED. A (mm)	MED. B (mm)
1	4,00	11,70
2	4,30	8,70
3	4,65	9,10
4	4,60	11,90
5	4,40	9,10
6	4,40	5,65
7	4,65	7,80
8	4,55	11,50
9	4,50	8,95
10	4,30	9,00
Média	4,44	9,34
Desvio padrão	0,16	1,42

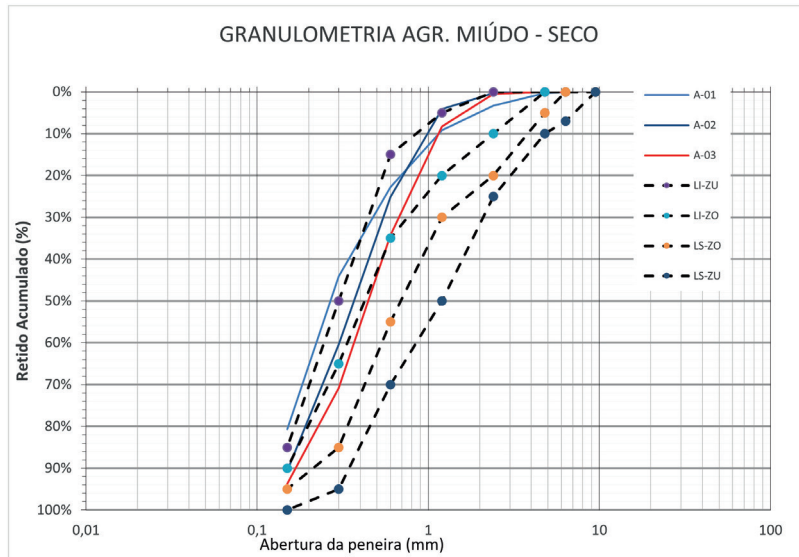


Figura 3: Granulometria dos agregados miúdos.

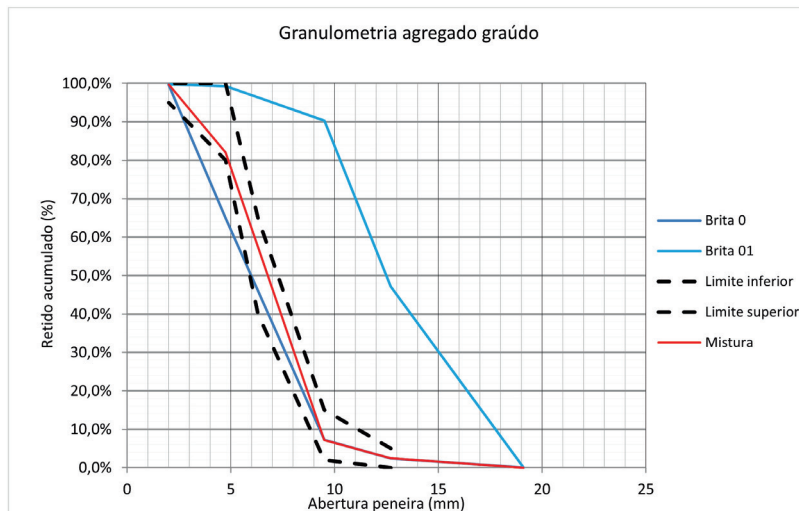


Figura 4: Granulometria dos agregados graúdos.

Foram também averiguadas as massas unitárias dos agregados e dos resíduos, conforme NBR 16972:2021 [10], utilizando a metodologia C para os três casos. Os valores obtidos estão na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Massa unitária dos agregados.

AGREGADO	MASSA UNITÁRIA (Kg/m³)
Miúdo (Areia)	1357,68
Graúdo (Brita)	1452,12
Resíduo (Limalha de aço)	606,06

2.2. Dosagem do concreto

Os agregados foram substituídos por limalha de aço em relação ao peso de cimento, nas proporções de 5%, 10% e 15%, sendo denominado “T1” o traço de referência de concreto convencional sem adição de resíduos, “T2”, “T3” e “T4” são traços em que o agregado miúdo foi substituído e “T5”, “T6” e “T7” os traços em que o agregado graúdo foi substituído por limalha de aço. O Consumo de materiais dos traços pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3: Composição unitária dos traços.

CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³)						
TRAÇO		FATOR A/C	CIMENTO	RESÍDUOS	AREIA	BRITA
T1	0%	0,5	530,52	0,00	1039,81	1443,00
T2	5%	0,5	530,52	26,53	1013,29	1443,00
T3	10%	0,5	530,52	53,05	986,76	1443,00
T4	15%	0,5	530,52	79,58	960,23	1443,00
T5	5%	0,5	530,52	26,53	1039,81	1416,48
T6	10%	0,5	530,52	53,05	1039,81	1389,95
T7	15%	0,5	530,52	79,58	1039,81	1363,43

Os traços adotados para substituições de agregados têm como referência base os estudos realizados por Camargo(2020) [11]. Nesse estudo, foram otimizados os traços de concreto estruturais, com fator água cimento de 0,5, visando alcançar uma resistência de 30 MPa.

O processo de cura utilizado foi o de câmara úmida, atendendo aos requisitos e orientações prescritos na NBR 5738:2015 – “Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova” [12].

2.3. Consistência no estado fresco

O ensaio de abatimento de cone ou Slump-Test é amplamente difundido e aceito como ensaio para obtenção da consistência do concreto, sendo este o utilizado, é regido pela ABNT NBR 16889:2022 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone [13].

Consiste no preenchimento de um cone em 3 camadas de igual altura de altura, com adensamento de 25 golpes de haste metálicas entre elas, assim ao final do ensaio é retirado o cone e medido o deslocamento vertical do concreto conforme Figura 5 abaixo:



Figura 5: Configuração típica do *Slump Test*.

2.4. Determinação da resistência a compressão

A resistência à compressão do concreto foi determinada conforme a norma NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos e prova cilíndricos [14], com aplicação de carga axial constante de 0,45 MPa por minuto, com variação máxima permitida de 0,15 MPa. O ensaio cessou ao ocorrer queda abrupta no carregamento, indicando o rompimento do corpo de prova.

Os corpos de prova possuem 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, respeitando as tolerâncias mínimas, dispensando fatores de correção. Foram realizados ensaios em 12 corpos de prova para cada traço de concreto, em duas idades: 56 e 90 dias, com 6 corpos de prova por idade. A determinação da resistência à compressão do concreto é dada pela Equação 1:

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D} \quad (1)$$

Em que:

f_c = resistência à compressão do concreto (Mpa);

F = força máxima alcançada (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm).

Também foram medidos os deslocamentos verticais dos CP's utilizando de um medidor de deslocamento, para obtenção do módulo de elasticidade estático do concreto, o ensaio foi realizado conforme demonstrado na Figura 6.



Figura 6: Configuração do ensaio de compressão.

2.5. Determinação da resistência a tração

A determinação da resistência a tração foi realizada de maneira indireta utilizando a NBR 7222:2011 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos [15], aplicando-se a carga de maneira constante diametralmente em corpos de prova cilíndrico, de mesmas dimensões dos utilizados para determinação da resistência a compressão.

Foram utilizados 6 corpos de prova de cada traço neste ensaio aos 28 dias, disposto conforme Figura 7, a resistência a tração é dada pela Equação 2:

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

em que:

$f_{ct,sp}$ = resistência à tração por compressão diametral (Mpa);

F = força máxima obtida no ensaio (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

l = ao comprimento do corpo de prova (mm).

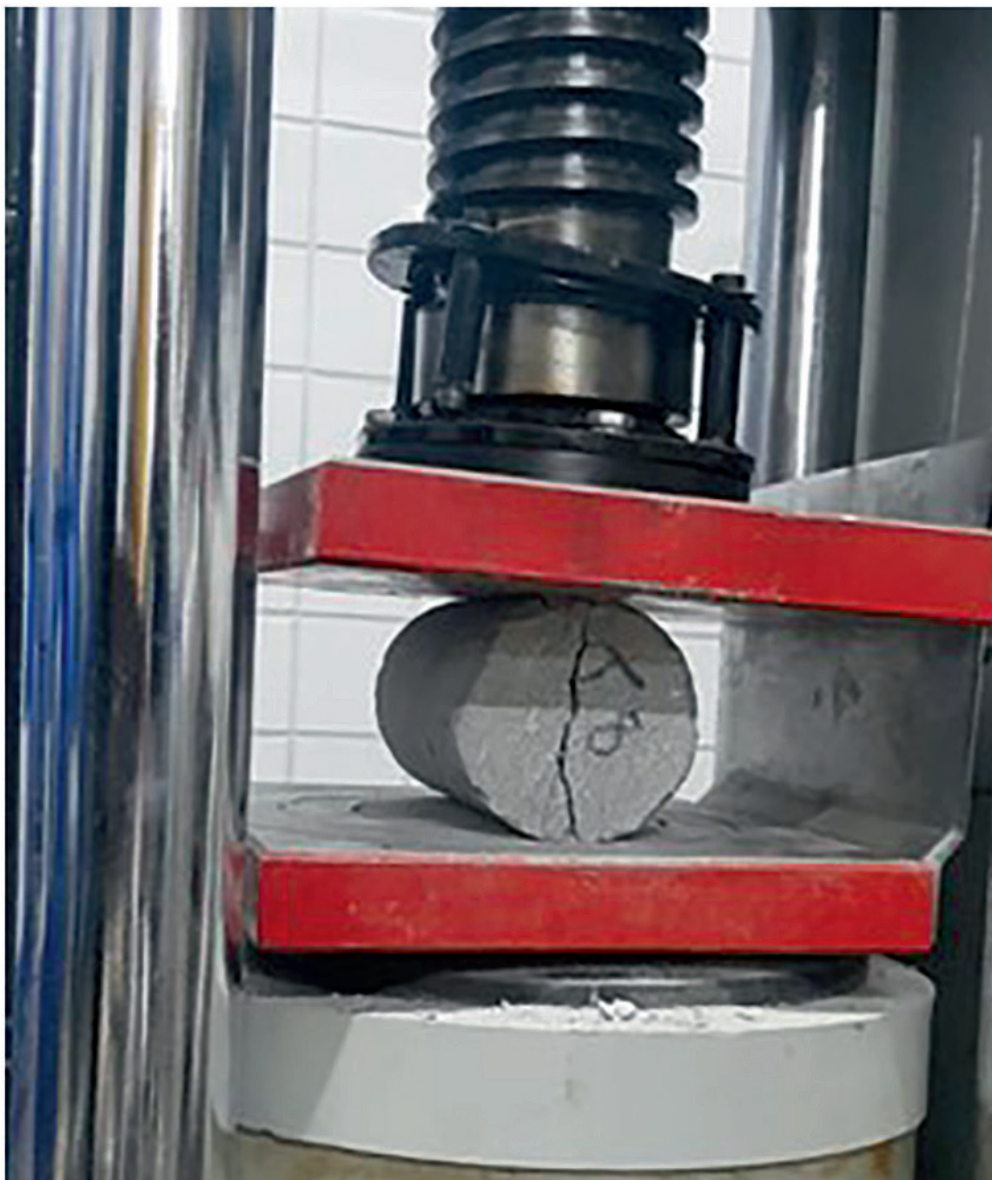


Figura 7: Configuração do ensaio de tração.

2.6. Ensaio de absorção de água

Para a determinação da absorção de água pelo concreto foi utilizada a NBR 9778:2009 – Argamassas e Concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica [16], realizando o ensaio em 6 corpos de prova para cada traço.

Para realização são necessários três principais parâmetros dos corpos de prova, a massa seca, massa submersa e massa saturada, obtidas conforme orientações normativas.

A absorção de água é dada então pela Equação 3 abaixo:

$$A = \left(\frac{M_{SAT} - M_s}{M_s} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

em que:

A = absorção de água por imersão (%);

M_{SAT} = massa dos corpos de prova saturados (g);

M_s = massa seca (g).

2.7. Módulo de elasticidade estático

Conforme NBR 8522-1:2021 – Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos estáticos à compressão [17], a determinação do módulo de elasticidade estático pode ser realizada com a obtenção da inclinação da reta tangente, formada pelos pontos de 0,5 MPa e 30% da tensão máxima obtida na curva tensão por deformação específica do concreto definida a partir do ensaio de carga axial de corpos de prova cilíndricos realizado com auxílio de transdutor de deslocamento vertical.

3. RESULTADOS

3.1. Consistência do estado fresco

Houve um aumento pouco expressivo no abatimento obtido das substituições de areia em comparação com o traço de referência. Esse aumento é justificado pela superfície mais lisa dos resíduos em relação à areia, o que pode resultar em um maior escorregamento, conforme evidenciado nos ensaios.

Esse efeito da textura dos resíduos também se manifesta nas substituições de agregados graúdos, porém de maneira mais expressiva, com primeira incorporação de 5% apresenta um abatimento de aproximadamente 250% a mais.

Os valores podem ser observados na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Abatimento dos traços.

TRAÇO	SLUMP (cm)	CLASSE (NBR 8953)
T1	1,52	S10
T2	1,80	S10
T3	1,82	S10
T4	1,80	S10
T5	3,80	S10
T6	3,10	S10

É visto que, este aumento não obedece a nenhuma tendência, ou seja teores maiores obrigatoriamente não implicam em maiores valores de abatimento, essa característica está relacionada com a falta de padronização da geometria dos resíduos, ou seja, a variabilidade nas formas e tamanhos da limalha de aço é refletida na consistência do concreto produzido

3.2. Substituição de agregados miúdos

3.2.1. Resistência à compressão

O traço de referência “T1” obteve aos 28 dias 19,98 MPa de resistência à compressão, sendo aumentada em 10,74%, 73,70% e 19,07% para as incorporações de 5%, 10% e 15% respectivamente, os valores das amostras estão contidos na Figura 8 abaixo.

Ainda para a compressão foi obtida uma aproximação não linear da resistência esperada com o teor de substituição, o fator R^2 da curva foi de 0,992, válida para o intervalo de análise.

Para a compressão o teor ótimo de substituição de agregado miúdo está na faixa de 10% a 12%, em relação ao peso de cimento, conforme apresentado pela Figura 9.

O aumento da resistência a compressão no concreto com substituição do agregado miúdo por limalha de aço em relação ao peso de cimento é visto em pesquisas como a de Malek *et al.* (2021) [2], que obtiveram um aumento de 13,5%, 20,80%, e 36,30% para os teores de 5%, 10% e 15% e a de Prabu *et al.* (2021) [7] em que, os incrementos foram de 19,1%, 20% e 21%, nos teores de 3%, 6% e 9%.

Foi observado então que, os teores próximos a 10% a 12% tendem a possuir maiores resistência a compressão, conforme será mostrado posteriormente estes também foram os que apresentaram menores valores de absorção de água, está propriedades está ligada diretamente ao índice de vazios do concreto, quanto menor este parâmetro maior é a qualidade do concreto produzido, ou seja, os teores entre 10% e 12% além de maiores resistências mecânicas de compressão também possuem os menores índices de vazios, implicando que os concretos dentro destas faixas possuem maior qualidade.

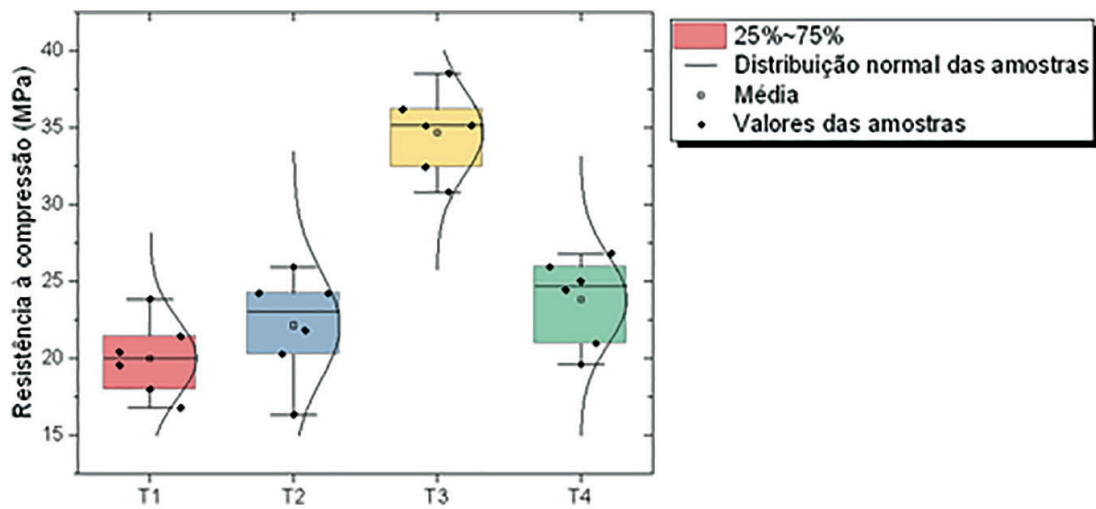


Figura 8: Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de agregado miúdo.

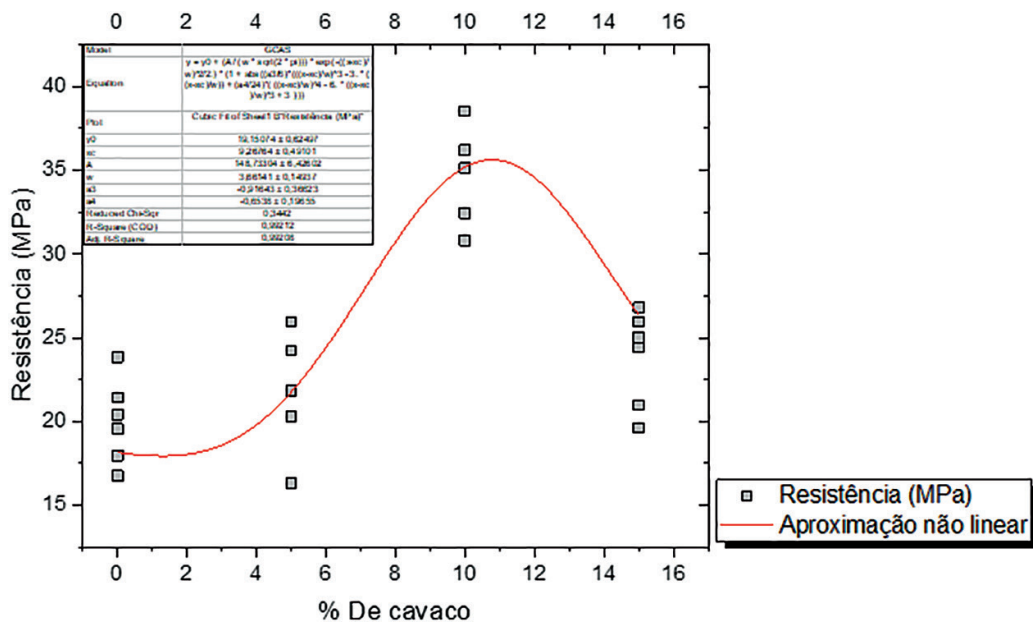


Figura 9: Resistência a compressão em relação ao teor de substituição.

Com os valores obtidos aos 91 dias, foi realizada a aproximação não linear da evolução da resistência utilizando como base a equação do item 12.3.3 da NBR 6118:2023 [18]. A evolução das resistências é observada na Figura 10 abaixo:

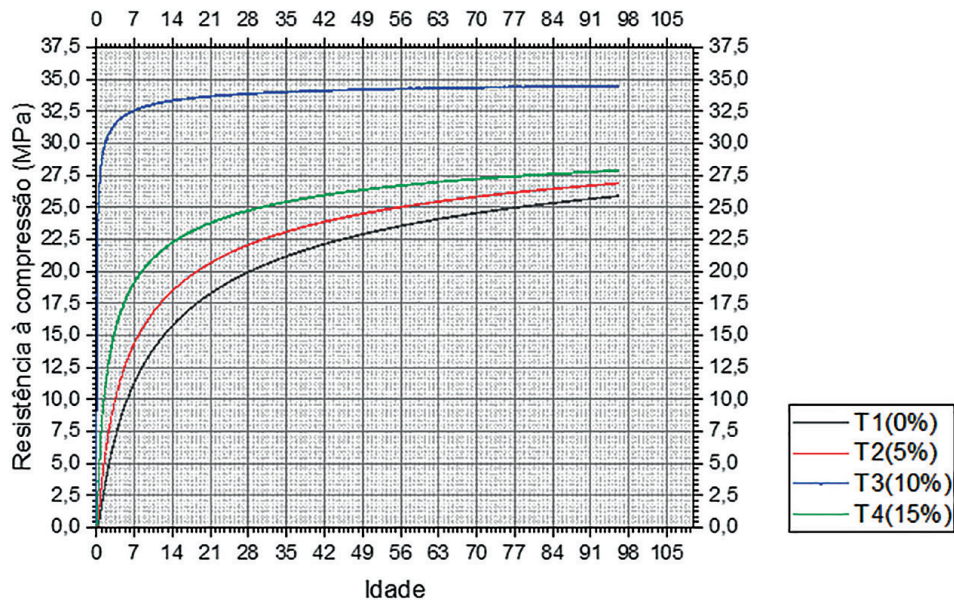


Figura 10: Evolução das resistências.

3.2.2. Resistência a tração

Assim como observado na resistência a compressão, a tração indireta obteve acréscimos de resistência para todas as substituições, com o valor obtido no traço de referência de 2,97 MPa, com aumentos de 43,75% 73,70% e 19,62% para as substituições de 5%, 10% e 15% respectivamente, os valores obtidos para das amostra podem ser observados na Figura 11.

Prabu *et al.* (2021) [7] também observaram aumentos neste parâmetro, na ordem de 35,8%, 35,1%, e 40,2%, para os teores de 3%, 6%, 9% e 12%, assim como ALTHOEY e HOLSEN [8] também obtiveram incrementos na tração indireta, na ordem de até 11%, utilizando 20% de limalha de aço em relação ao peso dos agregados, já MALEK *et al.* [2], encontraram incrementos de até 38,40% no teor de 15% de substituição do agregado miúdo.

No geral foi observada a concordância dos resultados obtidos de resistência à tração e compressão do concreto, com os melhores teores próximos a 10% e 12%.

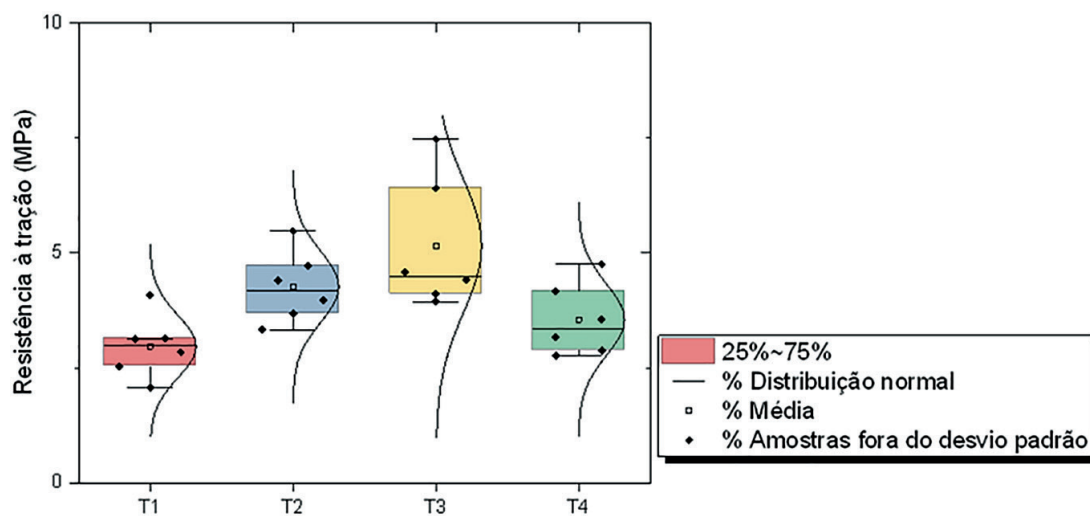


Figura 11: Resistência a tração direta aos 28 dias das substituições de agregado miúdo.

3.2.3. Absorção de água

O traço de referência obteve 9,0% de absorção de água, todas as incorporações de limalha de aço diminuíram o índice de absorção de água, com a maior redução obtida com o teor de 10%, com redução de 38,6%, os traços com 5% e 15% reduziram 19,8% e 31,1% respectivamente, conforme valores contidos na Figura 12:

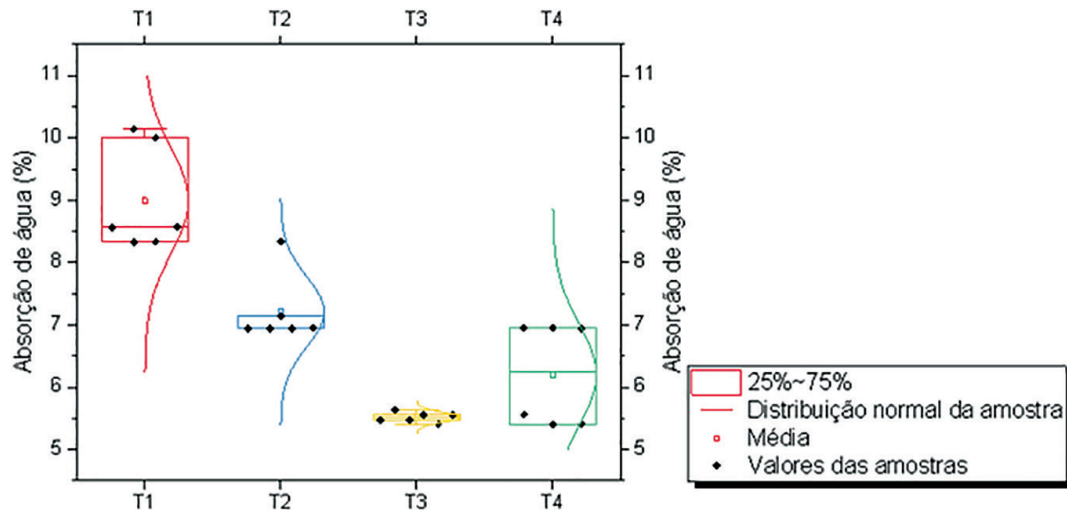


Figura 12: Absorção de água das substituições de agregado miúdo.

Quanto maior a absorção de água maior também é o índice de vazios do concreto, o que indica concretos de menor qualidade, portanto é possível afirmar que, a substituição de areia por limalha de aço ocasionou um aumento da qualidade do concreto produzido, fator este que é refletido no aumento das resistências conforme observado anteriormente.

Foi possível a realização da aproximação não linear com fator R^2 de 0,803. A aproximação não linear é representada na Figura 13 abaixo:

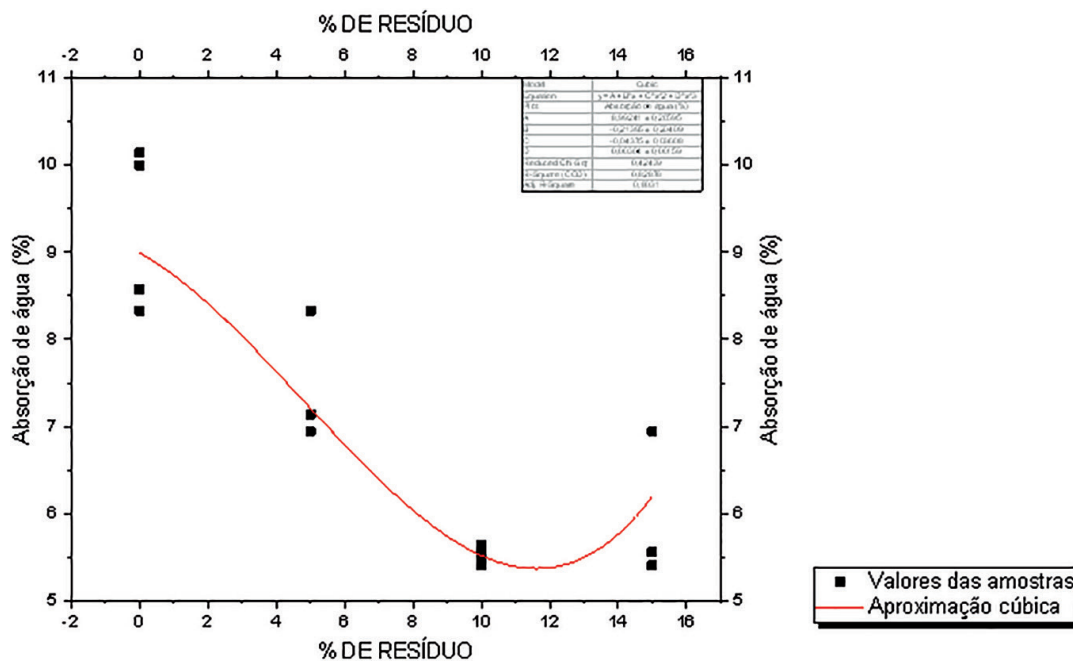


Figura 13: Absorção de água por teor de incorporação.

Nota-se pela curva que, os teores que possivelmente apresentam as maiores reduções na absorção de água estão entre 11% e 12%, assim como visto nos resultados de resistência à compressão e tração.

3.2.4. Módulo de elasticidade

Com base na leitura da tensão-deformação de cada amostra, procedeu-se à interpolação não linear dos dados, resultando na criação da curva média de tensão por deformação para cada traço. Esse procedimento foi realizado com o intuito de proporcionar uma compreensão mais clara do comportamento induzido por cada incorporação. A Figura 14 ilustra essas curvas médias.

O aumento da área sobre a curva (tenacidade) é característico quando adicionadas fibras ao concreto, das quais tendem reduzir marginalmente a resistência à compressão do concreto, sendo assim, a adição do resíduo de usinagem no concreto nos teores de 5% e 10% proporcionaram um aumento da tenacidade do concreto, um comportamento fibroso, juntamente com o incremento nas resistências à compressão e tração

O cálculo do módulo de elasticidade estático para cada corpo de prova ensaiado assim como para a curva média de cada traço representada na Figura 12, os valores obtidos em GPa estão contidos na Tabela 5.

Há uma elevada magnitude de desvio padrão notada neste teste. Ao excluir amostras cujos valores estão além de 20% da média, observa-se uma similaridade nos resultados para todos os traços dessa propriedade, demonstrando a pouca influência da limalha de aço no valor de módulo de elasticidade do concreto nestas proporções.

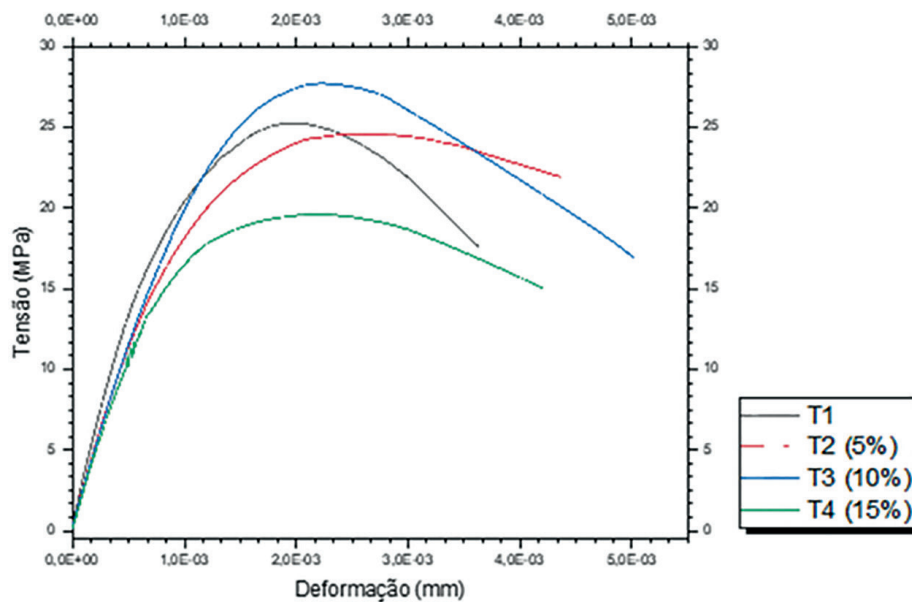


Figura 14: Absorção de água por teor de incorporação.

Tabela 5: Módulo de elasticidade estático para substituições de agregado miúdo.

	T1	T2	T3	T4
CP1	–	28,40	23,74	26,94
CP2	24,30	–	25,84	27,04
CP3	36,09	19,91	31,23	26,48
CP4	27,85	24,36	17,17	13,69
CP5	26,69	23,78	24,30	19,10
CP6	–	23,32	21,72	23,95
Média	28,73	23,95	24,00	22,87
Variação	0	–17%	–16%	–20%
Módulo da curva média	29,35	23,97	23,42	22,81

3.3. Substituição de agregados graúdos

3.3.1. Resistência a compressão

Ao analisar a resistência à compressão com a substituição de agregado graúdo, ocorreu o oposto do que se viu com os agregados miúdos. A taxa de 10% de substituição mostrou o maior aumento de resistência, mas, para os agregados grossos, houve uma redução de 13,96% na resistência. Com substituições de 5% e 15%, houve uma pequena redução e um aumento de 12,90%, respectivamente. Esses resultados estão na Figura 15.

Mesmo o aço possuindo maior resistência mecânica do que o agregado graúdo, a redução da resistência à compressão em teores baixos pode ser justificada pela geometria de arco típica dos resíduos utilizados, esta que, tende a possuir menor resistência à compressão se comparado a geometria aproximada de esferas com mesmo diâmetro de agregados graúdos, este aspecto sendo compensado com o aumento da incorporação de limalha de aço.

Resultados semelhantes foram observados por SHUKLA *et al.* [19], que, ao adicionar entre 6% e 12% em relação ao peso do cimento, registraram aumentos de 5% a 14% na resistência à compressão. Essa tendência, confirmada por SHEIKA e REZA [20], que observaram um aumento de 28,4% para um teor de 15% e 35,9% para um teor de 20%, destaca que a resistência do concreto tende a aumentar significativamente após o limite de 10% de incorporação.

A análise de aproximação não linear, semelhante à realizada para o agregado miúdo, obteve um coeficiente R^2 de 0,98. Essa curva é aplicável às faixas de estudo, conforme ilustrado na Figura 16, evidenciando uma tendência de aumento na resistência após uma incorporação de 15%.

Com os valores obtidos nos ensaios aos 91 dias, foi realizada a aproximação não linear de maneira semelhante à vista no tópico de agregados miúdos para a evolução das resistências, obtendo para todas as curvas fatores R^2 superiores a 0,90, conforme Figura 17.

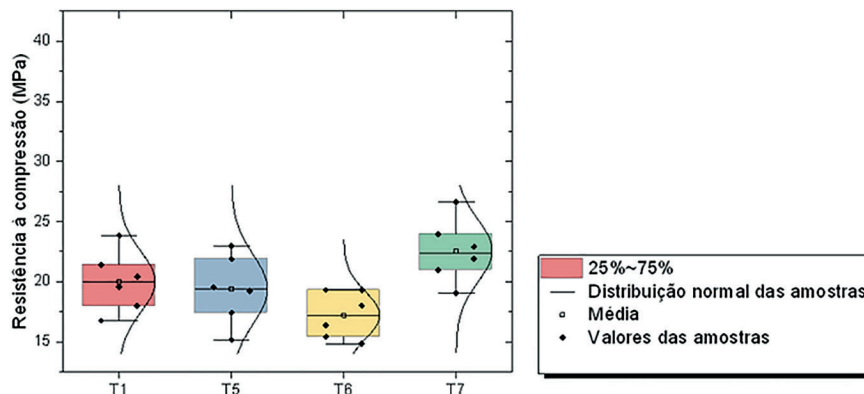


Figura 15: Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de agregado graúdo.

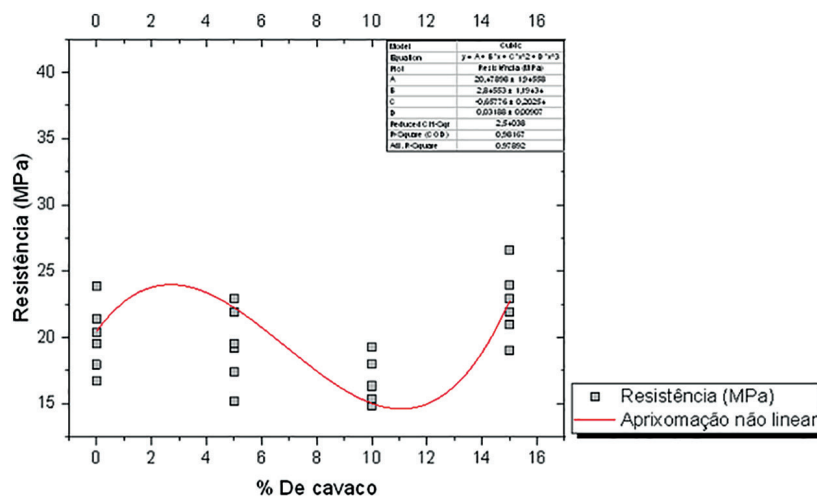


Figura 16: Resistência a compressão em relação ao teor de substituição.

Após 91 dias, tanto o traço 5 quanto o 6 apresentaram uma redução um pouco mais significativa na resistência à compressão, aproximadamente 10% em relação ao traço de referência “T1”. Por outro lado, o traço 7 ainda registrou um aumento na resistência, cerca de 2%. Em termos gerais, as amostras exibiram uma menor variabilidade nos valores de resistência de 28 dias a 91 dias quando comparadas aos traços 2, 3 e 4.

Ao analisar o gráfico gerado pela equação normativa, nota-se uma tendência de equidade na resistência entre o traço de referência “T1” e o traço “T7” com 15% de limalha em idades mais avançadas. Além disso, observa-se que, com o passar do tempo, a resistência do traço com 10% de limalha tende a superar os valores do “T5”, mantendo a curva aproximadamente paralela ao traço de referência. Isso implica em uma redução de resistência praticamente constante, independentemente do tempo decorrido.

3.3.2. Resistência a tração

A resistência à tração do concreto diminuiu apenas 0,84% com uma incorporação de 5%, uma redução pouco significativa. No entanto, com teores de 10% e 15%, observou-se um aumento significativo de 21,80% e 23,44%, como indicado na Figura 18.

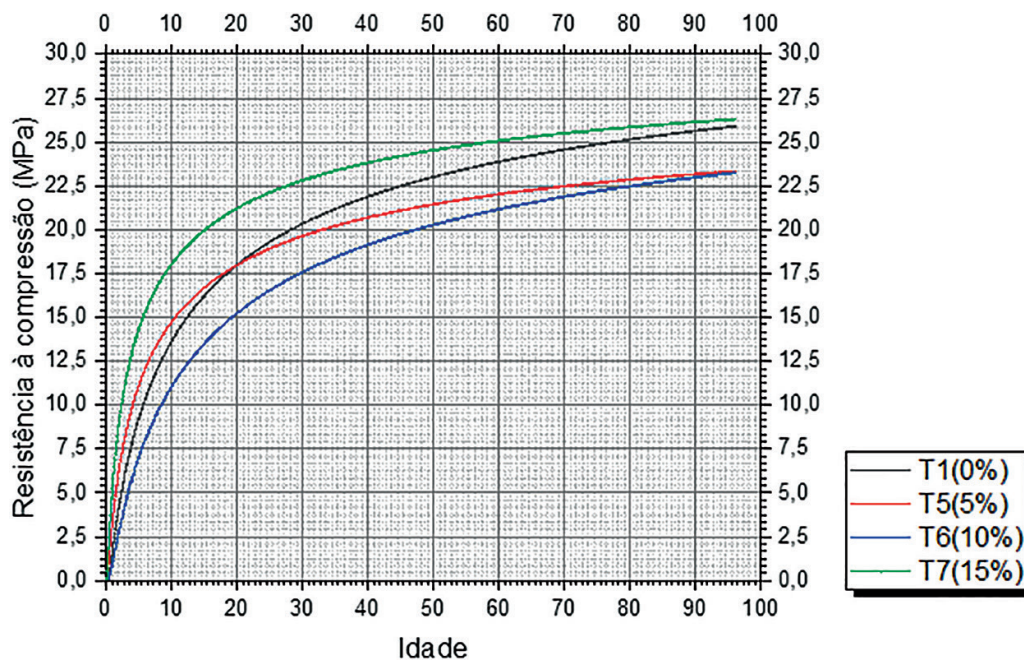


Figura 17: Evolução de resistência.

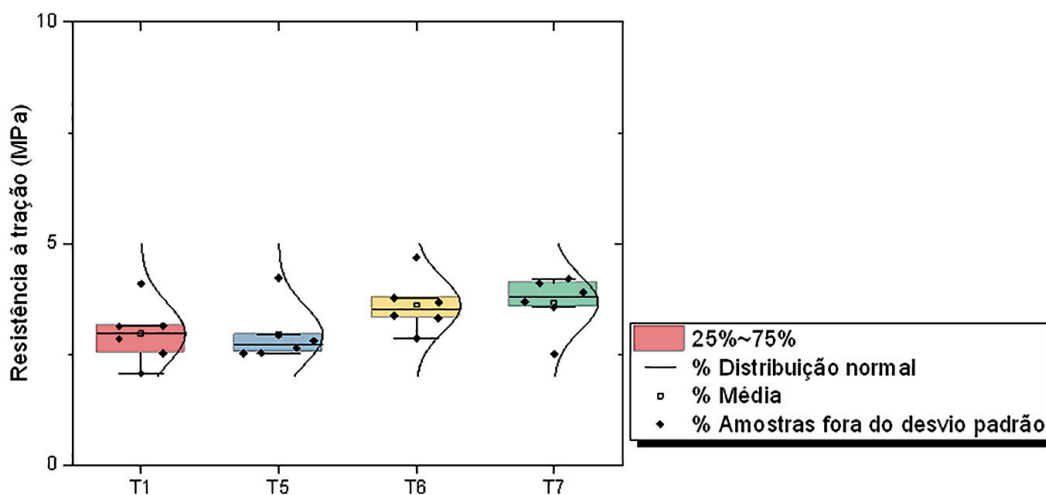


Figura 18: Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de agregado graúdo.

Este aumento superior da resistência à tração frente a resistência à compressão pode ser justificado levando em consideração a resistência mecânica do aço, material este que possui uma resistência à tração superior, a qual foi refletida nos resultados obtidos.

3.3.3. Absorção de água

A absorção de água novamente reduziu conforme o aumento da incorporação de limalha de aço, obtendo reduções de 8,8%, 21,9% e 22,6% para os teores de 5%, 10% e 15% conforme visto no gráfico da Figura 19:

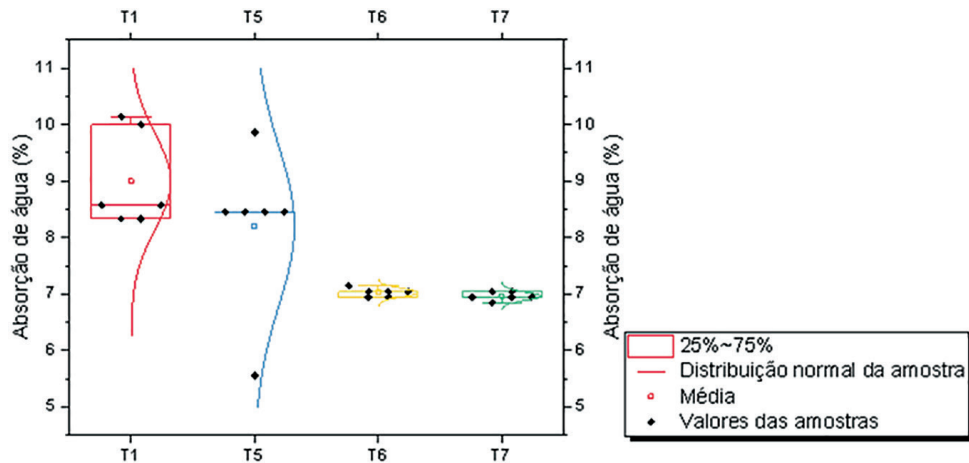


Figura 19: Absorção de água das substituições de agregado graúdo.

A aproximação não linear realizada possui fator R^2 ajustado de 0,98, sendo válida apenas para as faixas de estudo realizadas, é demonstrada pela Figura 20.

Pela curva traçada é possível determinar que substituições entre 12% e 13% tendem uma maior redução da absorção de água pelo concreto, implicando diretamente em menores índices de vazios e qualidade superior do concreto produzido.

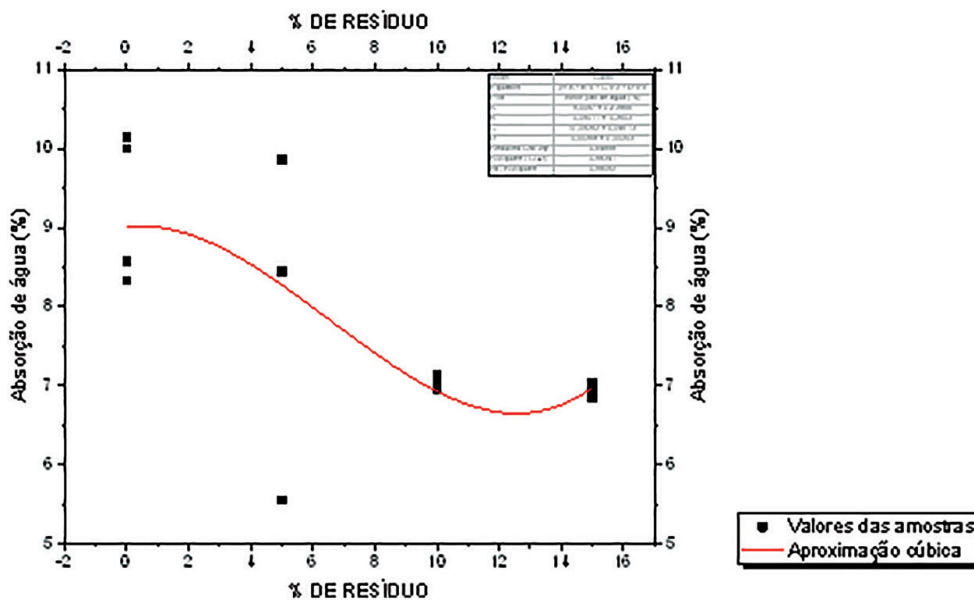


Figura 20: Absorção de água por teor de incorporação.

3.3.4. Módulo de elasticidade estático

A curva média de tensão por deformação específica para cada traço está demonstrada na Figura 21 abaixo:

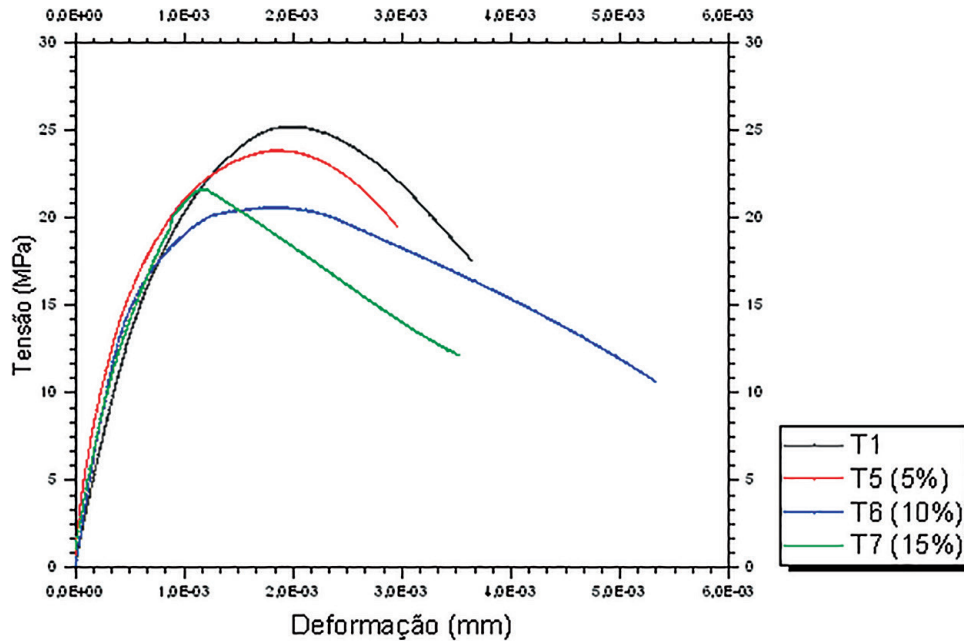


Figura 21: Curvas tensão por deformação para as substituições de agregados graúdos.

Ao contrário do observado para as substituições de agregado miúdo, não houve significativa melhora na tenacidade do concreto de acordo com as leituras realizadas, não sendo possível afirmar a limalha de aço atue como material fibroso no concreto nestas condições. O módulo de elasticidade estático para cada corpo de prova de cada traço, bem como para as curvas médias está contido na Tabela 4.X abaixo:

Ao contrário do observado para a substituição de agregado miúdo, todas as incorporações de limalha de aço ocasionaram significativos aumentos no módulo de elasticidade estático do concreto, sendo superiores em até 31% para o maior teor de incorporação, frente ao concreto de referência representado pelo “T1”.

Assim como para a resistência à compressão, se tratando da substituição de agregado graúdo, é observado a importância de estudos com teores maiores, visto a tendência de acréscimo tanto do módulo como da resistência à compressão para substituições superiores a 15%.

Tabela 6: Módulo de elasticidade estático para substituições de agregado graúdo.

	T1	T5	T6	T7
CP1	–	–	29,11	35,63
CP2	24,30	–	48,56	35,66
CP3	36,09	40,60	–	–
CP4	27,85	24,40	33,08	–
CP5	26,69	30,52	41,45	35,66
CP6	–	–	19,76	43,72
Média	28,73	31,84	34,39	37,67
Variação	0	11%	20%	31%
Módulo da curva média	29,35	31,65	34,78	22,81

4. CONCLUSÕES

O presente estudo realizou uma investigação de parâmetros de comportamento do material concreto, considerando a substituição parcial de agregados por resíduos de usinagem. De maneira geral, foi observado significativos incrementos nas propriedades quando substituídos agregados miúdos por limalha de aço em proporção próxima de 10%, ocasionando maiores resistências mecânicas e qualidade geral do concreto produzido, o mesmo não pode ser dito para as substituições de agregado graúdo, que demonstraram principalmente que teores superiores aos estudados tendem a melhores resultado.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] MACHADO, Á.R., ABRÃO, A.M., COELHO, R.T., *et al.*, *Teoria da usinagem dos materiais*, 1 ed., São Paulo, Edgard Blucher, 2009.
- [2] MAŁEK, M., KADELA, M., TERPIŁOWSKI, M., *et al.*, “Effect of metal lathe waste addition on the mechanical and thermal properties of concrete”, *Materials (Basel)*, v. 14, n. 11, pp. 2760, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14112760>. PubMed PMID: 34071033.
- [3] INSTITUTO AÇO BRASIL, *A Siderurgia em Números 2022*, Rio de Janeiro, Instituto Aço Brasil, 2022.
- [4] ACI Comite, *State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete Reported (ACI 544.1R-96 Reapproved 2002)*, Detroit – MI, ACI, 1996.
- [5] SINGH, H., *Steel fiber reinforced concrete: behavior, modelling and design*, Singapore, Springer, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-2507-5>.
- [6] ÇELİK, A.İ., ÖZKILIÇ, Y.O., ZEYBEK, Ö., *et al.*, “Performance assessment of fiber-reinforced concrete produced with waste lathe fibers”, *Sustainability (Basel)*, v. 14, n. 19, pp. 11817, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su141911817>.
- [7] PRABU, M., VIGNESH, K., SAI PRASANNA, N., *et al.*, “Experimental study on concrete in partial replacement of fine aggregate with lathe waste”, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, v. 11, pp. 68–72, 2020. <https://www.ijser.org/researchpaper/Experimental-study-on-concrete-in-partial-replacement-of-fine-aggregate-with-lathe-waste.pdf>, acessado em março de 2023.
- [8] ALTHOEY, F., HOSEN, A., “Physical and mechanical characteristics of sustain-able concrete comprising industrial waste materials as a replacement of conventi-onal aggregate”, *Sustainability (Basel)*, v. 13, n. 8, pp. 4306, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su13084306>.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT 2018.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e índice de vazios*, Rio de Janeiro, ABNT, 2021.
- [11] CAMARGO, M. V. DE. Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END). 2020. 143f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*, Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*, Rio de Janeiro, ABNT, 2020.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 5722: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2011.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 9778: Argamassas e Concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*, Rio de Janeiro, ABNT, 2009.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos estáticos à compressão*, Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*, Rio de Janeiro, ABNT, 2023.
- [19] SHUKLA, A.K., “Application of CNC waste with recycled aggregate in concrete mix”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, v. 3, n. 4, pp. 1026–1031, 2013.
- [20] SHEIKH, M.A., REZA, M., “Strengthening of concrete using lathe scrap waste”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 7, pp. 464–470, 2020.