



CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETO REFORÇADO POR FIBRAS DE LIMALHA DE AÇO EM SUBSTITUIÇÃO A AGREGADOS

Paulo Henrique Carvalho Mello¹, Silvia Paula Sossai Altoé², Isadora Bedusqui de Goes Radke³, José Venâncio Pinheiro Rotta⁴, Daise Fernanda Rubio da Silva⁵, Adriano Silva de Carvalho⁶

¹Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Maringá.
paulohcm123@gmail.com

²Docente, Doutora, Orientadora, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Maringá. spsaltoe@uem.br

³Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Maringá. isadora_goes@hotmail.com

⁴Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Maringá. josevprotta@hotmail.com

⁵Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Maringá. daiserubio.ec@gmail.com

⁶Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFSCar
adriano.ce7@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo apresentar os resultados obtidos para a investigação do comportamento mecânico de corpos de prova de concreto considerando a substituição parcial dos teores de agregado graúdo e miúdo por resíduo industrial de limalha de aço. Este resíduo em especial, possui considerável potencial de aplicação, visto que é resíduo de materiais metálicos, usualmente aço. Conhecidas as propriedades mecânicas do aço, 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. 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 efetuados ensaios de caracterização do material visando a obtenção da absorção de água, resistência à tração e compressão e módulo de elasticidade. Para tanto, foram utilizadas técnicas destrutivas e não-destrutivas. Observou-se que a substituição dos agregados por resíduo de usinagem leva a uma melhora dos parâmetros estudados, embora 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.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem; Resíduos; Concreto; Limalha de aço.

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem é responsável por dar forma e acabamento para peças metálicas através de retirada de material, este sendo a limalha de aço, um resíduo sólido típico deste processo, que possui forma e dimensões de acordo com o material utilizado e características do processo (MACHADO *et. al.*, 2015).

A produção de aço implica diretamente na geração de resíduos de usinagem de aço, um torno pode gerar cerca de 3 a 4 quilos deste resíduo por dia trabalhado, a título de exemplo de acordo com o *Investment Company Institute* a geração deste resíduo já alcançou cerca de 1200 milhões de toneladas ao ano (MALEK *et. al.*, 2021).

Considerando a diversidade de formas e tamanhos destes resíduos, além de sua composição metálica, a inserção deste no concreto pode ocasionar melhoras em propriedades mecânicas, além de poder atuar como fibras metálicas.

As fibras, atuam como reforço, sendo distribuídas de maneira homogênea na mistura, o nível de melhora no concreto está atrelado a alguns fatores como, o teor, a geometria, e o tipo das fibras utilizadas (RAI e JOSHI; 2014). 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 (ACI COMITTE; 1996). É observado uma alteração marginal na resistência a compressão do concreto quando adicionadas fibras convencionais (SINGH; 2017).



A utilização deste resíduo no concreto é encontrada em recentes e relevantes trabalhos recentes, tais como, o de Çelic *et. al.* (2022), Prabu *et. al.* (2020) e Arunakanthi e Ch. Kumar (2016), pesquisas estas que no geral demonstraram aumentos significativos em propriedades mecânicas do concreto, os resultados encontrados por estas serão devidamente discutidos posteriormente correlacionando-os com os valores obtidos por esta pesquisa.

O objetivo deste trabalho é a melhora das propriedades mecânicas do concreto através da inserção de fibras de limalhas de aço em substituição aos agregados miúdos e graúdos, assim como espera-se a resolução do seguinte objetivo específico:

- ✓ Verificar o teor ótimo de substituição dentro das faixas de estudo analisadas.
- ✓ Analisar a influência das substituições feitas no concreto, avaliando as propriedades do estado endurecido, tais como resistência mecânica, módulo e absorção de água.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

O aglomerante utilizado foi cimento CP II-F-32, de acordo com os parâmetros da NBR 16697 (2018), areia de granulometria média como agregado miúdo, para o agregado graúdo utilizou-se da mistura de brita 01 e brita 0 e por fim, resíduos de usinagem provenientes de tornearias do município de Guarapuava – Paraná, conforme Figura 1 abaixo.



Figura 1: Resíduos utilizados
Fonte: Autores (2023)

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Seguindo os preceitos da NBR 17054 (2022) foram determinadas as curvas granulométricas dos agregados utilizados. Os resíduos utilizados foram classificados conforme sua geometria, de acordo com a ISO 3685 (2017), conforme Figura 2:



1 Cavaco em fita ^{a)}	2 Cavaco tubular ^{a)}	3 Cavaco tipo espiral	4 Cavaco tipo anéis helicoidais ^{a)}	5 Cavaco tipo cônico helicoidal ^{a)}	6 Cavaco em arco ^{b)}	7 Cavaco fragmentado	8 Cavaco agulha
1.1 Longo	2.1 Longo	3.1 Plano	4.1 Longo	5.1 Longo	6.1 Conectado		
1.2 Curto	2.2 Curto	3.2 Cônico	4.2 Curto	5.2 Curto	6.2 Desconectado (virgula)		
1.3 Emaranhado	2.3 Emaranhado		4.3 Curto	5.3 Curto			

Figura 2: Classificação dos resíduos

Fonte: ISO 3685 (2017)

2.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Foi utilizado como traço de referência “T1” um dos traços desenvolvidos por Camargo (2020), com relação água cimento de 0,5, as substituições de agregado por limalhas de aço se deram nas proporções de 5%, 10% e 15% em relação a massa de cimento.

Os traços “T2”, “T3” e “T4” se referem as substituições de agregados miúdos, por sua vez, os traços “T5”, “T6” e “T7” se referem a substituições de agregados graúdos. O consumo de materiais é apresentado na Tabela 1.

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

Tabela 1: Consumo de materiais

Fonte: Autores (2023)

2.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Foram realizadas caracterizações tanto para o estado fresco, com a medida do abatimento do tronco de cone, como para o estado endurecido, com a análise das resistências mecânicas de compressão e tração indireta, módulo de elasticidade e absorção de água.

Para o abatimento de tronco de cone, foi utilizado como referência a NBR NM 67 (1998).

O ensaio de absorção de água foi realizado tendo como instrução normativa a NBR 9778:2009.

A determinação do módulo de elasticidade do concreto foi realizada com a aplicação de cargas dinâmicas, através da leitura de velocidade de propagação de ondas de ultrassom no concreto, conforme ASTM C597:2016.



A resistência à compressão do concreto foi realizada conforme NBR 5739 (2018), com disposição do ensaio de acordo com a Figura 3. A análise da resistência à tração do concreto foi feita de maneira indireta conforme NBR 7222 (2011), com a carga sendo aplicada diametralmente.



Figura 3: Disposição do ensaio de compressão
Fonte: Autores (2023)

Com exceção do abatimento de tronco de cone, todos os ensaios realizados utilizaram 6 corpos de provas, os valores obtidos em cada amostras foram utilizados para a obtenção das aproximações não lineares, com intuito de obtenção dos melhores teores de incorporação, vale salientar que todas as aproximações realizadas só são válidas para as faixas de estudo, para teores maiores outras curvas deverão ser estudadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

De acordo com a NBR ISO 3685 (2017), os resíduos de usinagem utilizados foram classificados como sendo do tipo 6.2, desconectado em vírgula.

As curvas granulométricas para os agregados miúdos está presente na figura 4 abaixo, em que, “ZO” e “ZU” se referem as zonas ótima e utilizável da NBR 17054 (2022), e a amostra utilizada para a confecção dos corpos de prova foi escolhida como sendo a “A-03”.

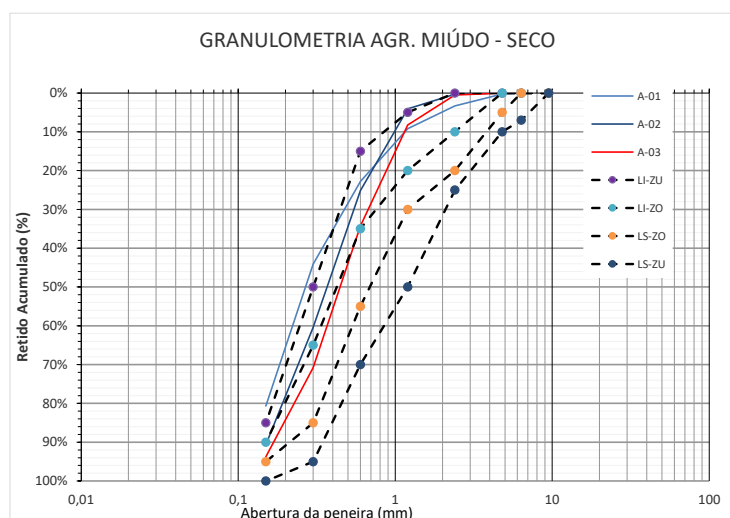


Figura 4: Granulometria dos agregados miúdos
Fonte: Autores (2023)

Para o agregado graúdo foi utilizada 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 5.

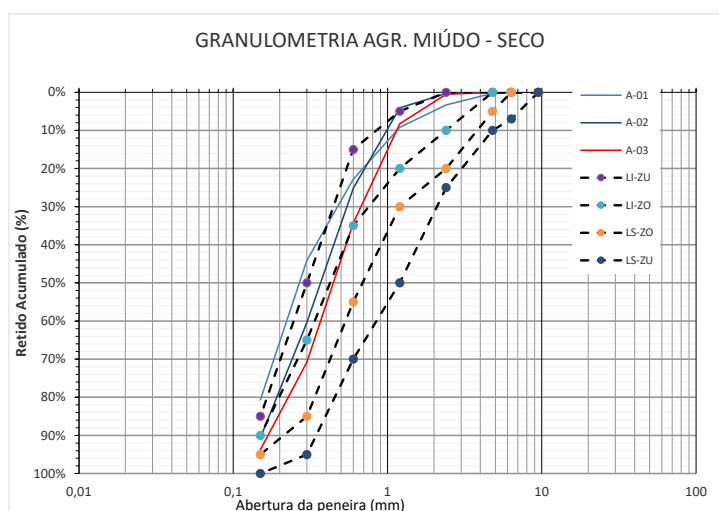


Figura 5: Granulometria dos agregados graúdos
Fonte: Autores (2023)

3.2 CONSISTÊNCIA DO CONCRETO PRODUZIDO

A consistência foi medida através do abatimento do tronco de cone ou *Slump-test*, os valores obtidos estão representados abaixo na Tabela 2.

Traço	Slump (cm)
T1	1,52
T2	1,80
T3	1,82
T4	1,80
T5	3,80
T6	3,10
T7	3,30

Tabela 1: Abatimento dos traços estudados
Fonte: Autores (2023)



Considerando o aspecto liso que os resíduos de usinagem possuem, era esperado o aumento do abatimento do tronco de cone conforme os resultados apontaram, de maneira mais notória para as substituições de agregado graúdo. De acordo com a NBR 8953 (2015), todos os traços obtiveram a mesma classificação para sua consistência, enquadrando-se na classe S10.

3.3 PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO – SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADO MIÚDO

Iniciando-se com a absorção de água encontrada, esta demonstrou seu maior valor para o traço de referência de 9,0%, com todas as incorporações reduzindo-o até o máximo de 38,6% para o teor de 10%, enquanto os traços com 5% e 10% reduziram a absorção de água em 19,8% e 31,1%.

Quanto menor a absorção de água pelo concreto menor também é o índice de vazios, o que pode implicar em um concreto com maior qualidade e consequente maior resistência.

Foi realizada a aproximação não linear para a absorção de água considerando apenas a faixa de substituição entre 0% e 15%, a curva obtida está representada na Figura 6 e possui um fator R^2 elevado de 0,82878 (fator este que quanto mais próximo de 1,0 maior o grau de confiabilidade da curva traçada).

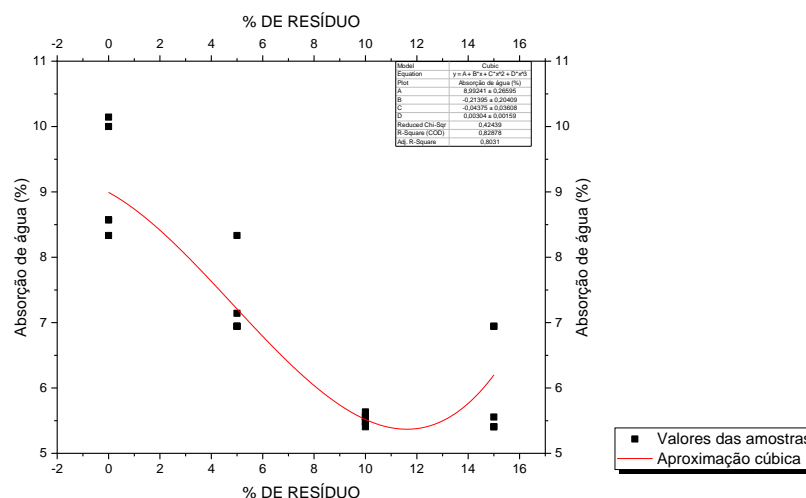


Figura 6: Absorção de água para os traços de substituição do agregado miúdo
Fonte: Autores (2023)

A velocidade de propagação de ondas de ultrassom foi medida de maneira indireta e com ela calculado o módulo de elasticidade dinâmico dos concretos, em que o traço de referência obteve o valor 44,44 GPa, que foi aumentado em 5,53%, 12,03% e 3,40%, estes incrementos do módulo de elasticidade dinâmico podem ser justificados pela composição dos resíduos serem essencialmente de aço, o qual já possui um módulo de elasticidade superior ao da areia.

É interessante observar que, o maior módulo de elasticidade é dado para a faixa de incorporação que obteve também a menor absorção de água e consequente maior qualidade de concreto.



Também foi realizada a aproximação não linear para o módulo de elasticidade, conforme Figura 7, obtendo um valor de aumento máximo conforme esperado na faixa entre 10% e 12%, o fator R^2 da curva foi de 0,99765.

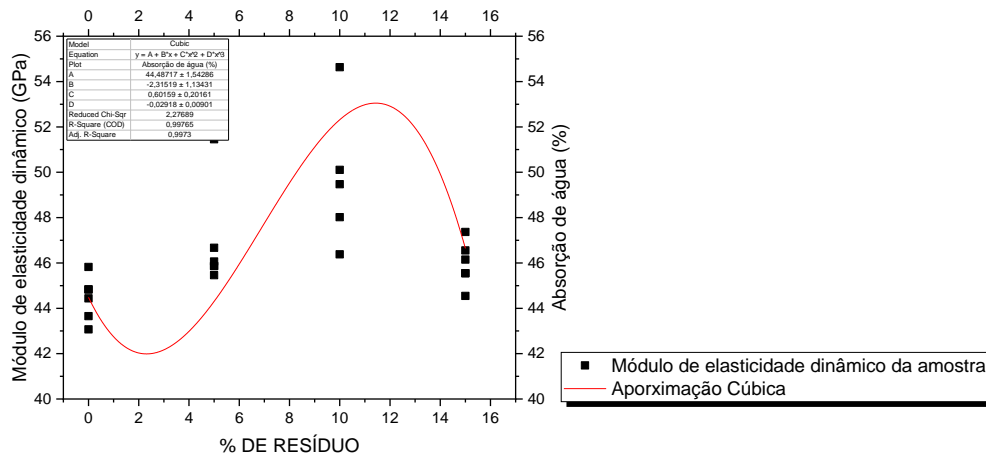


Figura 7: Módulo de elasticidade dos traços de substituição do agregado miúdo
Fonte: Autores (2023)

Todas as substituições obtiveram acréscimos na resistência a compressão do concreto, o traço de referência obteve para este parâmetro o valor de 19,98 MPa, o qual foi aumentado em 10,74%, 73,70% e 19,07%, para as substituições de 5%, 10% e 15%.

Resultados semelhantes foram obtidos por outros pesquisadores, a pesquisa de Prabu et. al. (2020), obteve para a substituição de 15% um acréscimo de 20% na resistência à tração. Malek et. al. (2021) demonstrou um aumento de 13,9% para o teor de 5%. Arunakanthi e Ch. Kumar (2016) obtiveram 15% e 19% de aumento de resistências para os teores de 5% e 15% respectivamente

A aproximação não linear obtida está representada pela Figura 8, com fator R^2 de 0,99212, é visto que assim como para o módulo de elasticidade os maiores valores tendem a estar na faixa de 10% a 12%.

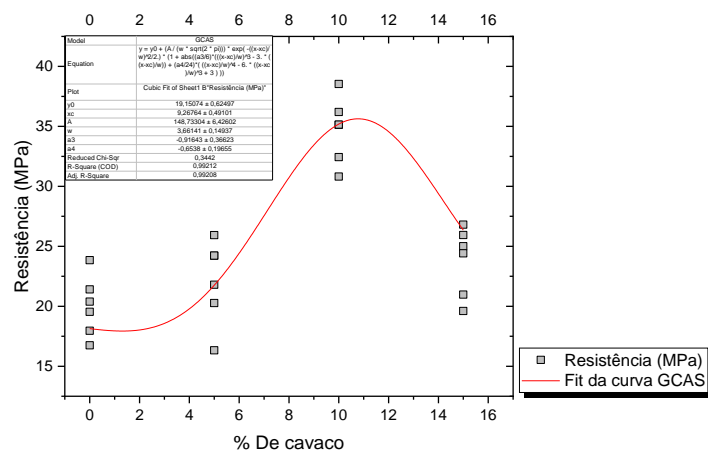


Figura 8: Resistência à compressão dos traços de substituição do agregado miúdo
Fonte: Autores (2023)

A resistência à tração indireta houve também o acréscimo observado para todas as substituições, assim como visto na compressão, o traço de referência obteve 2,97 MPa,



com acréscimo neste valor em 43,75%, 73,70% e 19,62% de aumento das médias para os traços com substituição de 5%, 10% e 15%.

A aproximação não linear desta propriedade está representada na Figura 9, com fator R^2 de 0,98136.

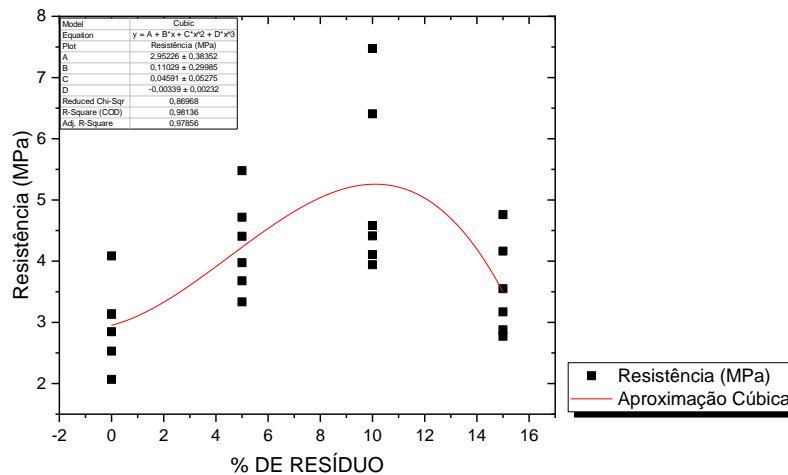


Figura 9: Resistência à tração dos traços de substituição do agregado miúdo

Fonte: Autores (2023)

É notório observar a novamente que o teor que possui a maior resistência a tração indireta está entre 10% e 12%, esta faixa também foi responsável pela menor absorção de água e maiores módulos de elasticidade e resistência à compressão, sendo este o teor ótimo de substituição de agregado miúdo em relação a massa de cimento.

3.4 PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO – SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO

Destaca-se que em relação ao comportamento para a absorção de água, notou-se uma tendência de redução para a absorção de água em função da porcentagem de resíduo considerada. Para o traço de referência observou-se os maiores valores de absorção, assim como foi observado ao se realizar a substituição do agregado miúdo. Contudo, para os corpos de prova desta seção, notou-se menor desvio padrão em relação aos valores obtidos para absorção de água ao se considerar a mesma porcentagem de substituição. Isto é, para os CPs avaliados em um mesmo traço houve menor discrepância entre os resultados obtidos. Notado especialmente para os traços com 10% e 15% de resíduo. Para a substituição de agregado graúdo observou-se considerável redução da absorção, sendo possível realizar a redução da absorção de valores na ordem de 10% (para o traço de referência) para valores na ordem de 7% de absorção (para o traço com 15% de substituição do agregado graúdo). Semelhantemente ao agregado miúdo foi realizado o ajuste por meio de uma curva de tendência cúbica, a qual apresentou resultados satisfatórios de predição, com R^2 ajustado de 0,98 conforme figura 10.

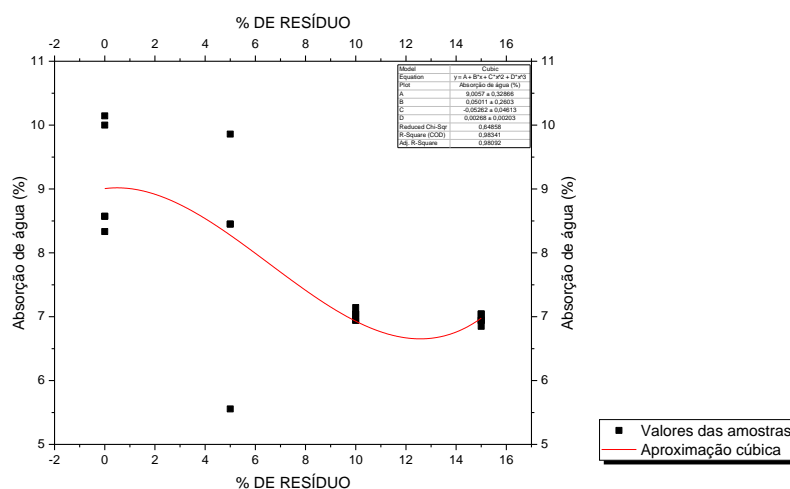


Figura 10: Absorção de água para os traços de substituição do agregado graúdo
Fonte: Autores (2023)

Através de ensaio indireto utilizando aparelho de ultrassom, estimou-se o módulo de elasticidade dinâmico dos corpos de prova com substituição de agregado graúdo. Nota-se também a tendência de aumento do módulo em função da porcentagem de substituição efetuada. Contudo esse aumento se mostrou menos expressivo, se comparado ao aumento observado para o agregado miúdo.

Ainda assim, o aumento obtido situou-se entre 1,27% e 3,40%. A regressão não-linear com função cúbica retornou um R^2 ajustado de 0,99, como apresentado na figura 11.

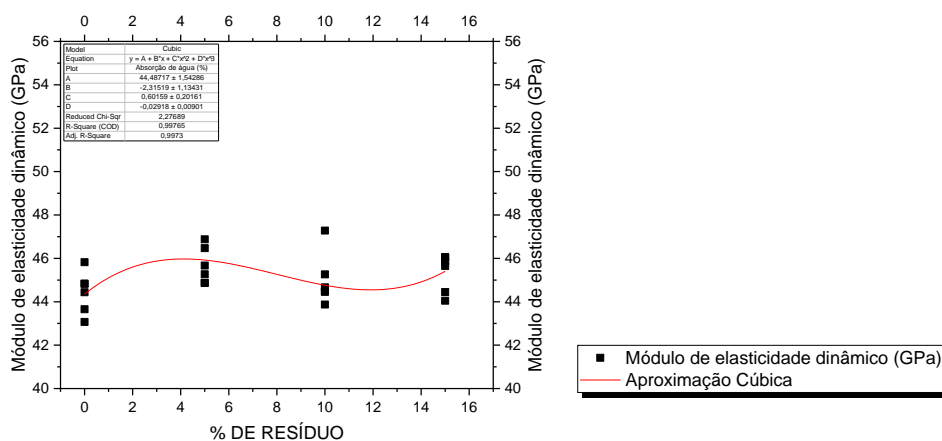


Figura 11: Módulo de elasticidade dos traços de substituição do agregado graúdo
Fonte: Autores (2023)

Ao se avaliar a resistência à compressão dos traços com substituição do agregado graúdo, percebeu-se comportamento inverso ao observado para a substituição do agregado miúdo. Nota-se que o maior acréscimo de resistência foi observado quando houve a substituição de agregado miúdo por 10% de resíduo. Já para o agregado graúdo ao se realizar a substituição por 10% de limalha de aço, observou-se queda na resistência à compressão. Contudo, ainda que não tão expressivo quanto ao aumento observado para o agregado miúdo.



Ao se realizar a substituição do agregado graúdo por 10% de limalha de aço observou-se aumento na resistência à compressão. Esse aumento foi de 12,9%. O coeficiente de correlação R^2 obtido com base na regressão polinomial cúbica foi de 0,978.

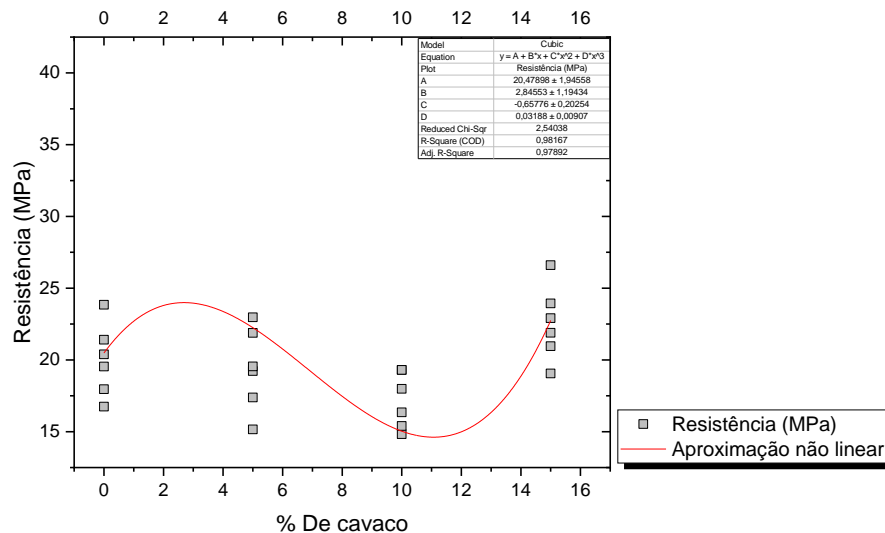


Figura 12: Resistência à compressão dos traços de substituição do agregado graúdo
Fonte: Autores (2023)

Para a resistência à tração, considerando os valores médios obtidos, observou-se redução apenas para o traço com 5% de substituição, sendo que para 10% e 15% os valores médios de resistência à tração aumentaram em relação ao traço de referência. Destaca-se que esse aumento foi de 21,8% e de 23,44.

Esse comportamento era esperado dada a considerável resistência à tração do aço, motivo pelo qual, o comportamento observado se justifica. Ao se realizar a aproximação por uma função cúbica dos resultados, obteve-se R^2 de 0,99, conforme figura 13.

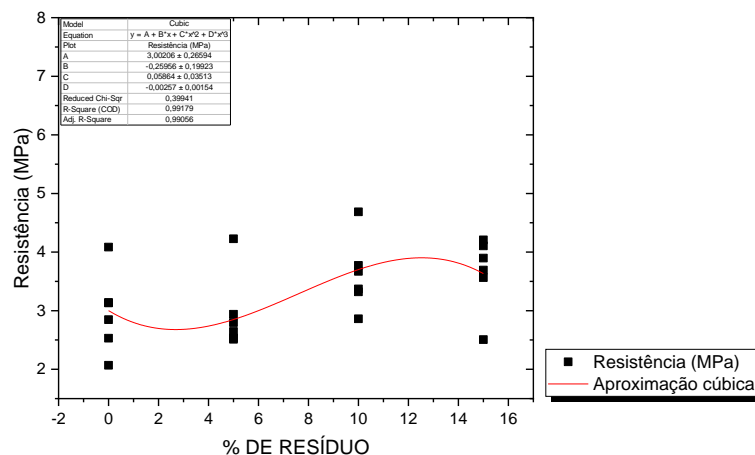


Figura 13: Resistência à tração dos traços de substituição do agregado miúdo
Fonte: Autores (2023)

4 CONCLUSÃO



O presente trabalho apresentou uma relevante investigação dos principais parâmetros de comportamento para o material concreto, considerando a substituição parcial dos agregados por resíduos de usinagem. Observou-se de modo geral, uma melhora nas resistências à tração e compressão dos corpos de prova avaliados, bem como uma sensível melhora em outras propriedades, como a absorção de água e módulo de elasticidade dinâmico. Destaca-se, contudo, que a melhora observada foi mais expressiva para a substituição do agregado miúdo. Os resultados observados podem ser parcialmente explicados pelo fato de o resíduo em questão ser produzido por meio de processos industriais em corpos fabricados em aço. Dessa forma, o resíduo pode ser imaginado, resguardadas as devidas proporções, como uma fibra existente na matriz cimentícia. Dessa forma, a utilização deste material se apresenta como uma solução muito interessante, tanto do ponto de vista mecânico, quanto de sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ACI Comitê 544. (2002). **State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete Reported (ACI 544.1R-96 Reapproved 2002)**. ACI Structural Journal, 1996 (Reapproved).

Arunakanthi, E.; Chaitanya Kumar, J.D. **Experimental studies on fiber reinforced concrete (FRC)**. Int. J. Civ. Eng. Technol. 2016, 7,329–336.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697: **Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17054: **Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. 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 ISO 3685: **Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**. Rio de Janeiro: ABNT 2017.

CASARIN; S. J. **Manufatura Mecânica: Usinagem**. Editora e Distribuidora Educacional S.A., 1º ed. Londrina-PR. 2018.

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.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. 2000. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Civil. São Paulo-SP. 2000



MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria Da Usinagem Dos Materiais**. 1. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

MALEK, M.; KADELA, M.; TERPILOWSKI, M.; SZEWCZYK, T.; LASICA, W.; MUZOLF, P. **Effect of Metal Lathe Waste Addition on the Mechanical and Thermal Properties of Concrete**. MATERIALS. 2021. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/351786205_Effect_of_Metal_Lathe_Waste_Addition_on_the_Mechanical_and_Thermal_Properties_of_Concrete >. Acesso em 20 de mai. de 2023.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo-SP: IBRACON 2014.

Prabu, M.; Vignesh, K.; Saii Prasanna, N.; Praveen, C.; Mohammed Nafeez, A. **Experimental study on concrete in partial replacement of fine aggregate with lathe waste**. Int. J. Sci. Eng. Res. 2020, 11, 68–72. Disponível em: < <https://www.ijser.org/researchpaper/Experimental-study-on-concrete-in-partial-replacement-of-fine-aggregate-with-lathe-waste.pdf> > Acesso em 20 de março de 2023.

RAI, A.; JOSHI, Y. P. **Applications and Properties of Fiber Reinforced Concrete**. Journal of Engineering. Research and Applications, Vol 4. maio de 2014. Disponível em: < <http://www.kresttechnology.com/krest-academic-projects/krest-mtech-projects/Civil/Civil%20M.tech%20Projects%202017%20-2018/2.%20Concrete%20Projects/BASE%20PAPERS/25.fiber%20reinforced%20concrete.pdf> >. Acesso em 20 de mai. de 2023.

SINGH, H. **Steel fiber reinforced concrete: behavior, modelling and design**. Springer, 2017.

ÇELIC, A. I.; OZKILIÇ, Y.O.; ZEYBEK, O.; OZDONER, N.; TAYEH, B.A. **Performance Assessment Fiber-Reinforced Concrete Product with Waste Lathe Fibers**. Sustainability. 20 de setembro de 2022. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/19/11817> >. Acesso em 20 de mai. de 2023.