REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO GRAÚDO NATURAL POR ESCÓRIA DE ALTO-FORNO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

INFLUENCE OF THE PARTIAL REPLACEMENT OF NATURAL COARSE AGGREGATE WITH BLAST FURNACE SLAG ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

INFLUENCIA DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGREGADO GRUESO NATURAL POR ESCORIA DE ALTO HORNO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO

Adriano Luiz Roma Vasconcelos
Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: adrianoromapa@hotmail.com

João Carlos Lisboa de Lima
Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Brasil
E-mail: joacarloslisboadelima@hotmail.com

Elielson Oliveira de Sousa
Doutor em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: elielsonsousa@yahoo.com.br

Aedjota Matos de Jesus
Doutor em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: aedjota.jesus@unir.br

Sabino Alves De Aguiar Neto
Doutor em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: eng.sabinoneto@gmail.com

Patrícia da Silva Chaves
Mestra em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: patricia.chaves@ifpa.edu.br

Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Doutor em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: denio@ufpa.br

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Vitor Hugo Lopes Branco
Doutor em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: vitor.branco@ifpa.edu.br
Thiago Rodrigues Gonçalves Caetano
Doutor em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: eng.thiago.caetano@gmail.com
Aldemar Batista Tavares de Sousa
Mestre em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: tavaresfbm@gmail.com
Luis Felipe Alencar Brandão
Mestre em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: luisfelipe2357@gmail.com
Mike Da Silva Pereira
Doutor em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: mike@ufpa.br
Wilson Damasceno Monteiro Junior
Bacharel em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: wilsonmonteirojunior@gmail.com
Anderson Carlos Galindo Silva
Mestre em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: anderson.carlos.civil@gmail.com
Valdinei de Sousa Lima
Bacharel em engenharia civil, Universidade Federal do Pará
E-mail: engvslima@gmail.com

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Resumo

A utilização de resíduos industriais como materiais alternativos na construção civil constitui uma estratégia para reduzir a exploração de recursos naturais e proporcionar destinação tecnicamente adequada a subprodutos industriais. Neste contexto, este estudo avaliou o comportamento mecânico de concretos produzidos com substituição parcial do agregado graúdo natural por escória de alto-forno (EAF) proveniente da produção de ferro-gusa a carvão vegetal. Foram produzidos concretos com 0%, 20%, 30% e 40% de substituição, em massa, do agregado graúdo natural pela EAF, mantendo-se relação água/cimento de 0,64. Os concretos foram avaliados aos 28 e 63 dias quanto à resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. A escória utilizada apresentou características físicas compatíveis com sua utilização como agregado graúdo, destacando-se sua textura áspera, formato irregular e reduzido desgaste superficial. Aos 28 dias, os concretos contendo 30% e 40% de EAF apresentaram aumento significativo nas propriedades mecânicas avaliadas em relação ao concreto de referência, enquanto a substituição de 20% apresentou comportamento semelhante ao concreto convencional. Aos 63 dias, o concreto com 40% de EAF apresentou os maiores valores de resistência à compressão e à tração, bem como de módulo de elasticidade. Os resultados indicam que a substituição parcial do agregado graúdo natural por EAF, especialmente nos teores de 30% e 40%, apresentou desempenho mecânico tecnicamente satisfatório, demonstrando potencial para aplicação na produção de concretos e contribuindo para o aproveitamento de resíduos industriais e a redução do consumo de agregados naturais.

Palavras-chave: Concreto; Escória de alto-forno; Agregado graúdo; Resíduos industriais; Propriedades mecânicas.

Abstract

The use of industrial waste as alternative materials in civil construction represents a strategy to reduce the exploitation of natural resources and provide an appropriate destination for industrial by-products. In this context, this study evaluated the mechanical behavior of concrete produced with partial replacement of natural coarse aggregate by blast furnace slag (BFS) generated from charcoal-based pig iron production. Concrete mixtures were produced with 0%, 20%, 30%, and 40% replacement, by mass, of natural coarse aggregate with BFS, maintaining a water-to-cement ratio of 0.64. The concretes were evaluated at 28 and 63 days for axial compressive strength, splitting tensile strength, and modulus of elasticity. The slag presented physical characteristics suitable for use as coarse aggregate, particularly its rough texture, irregular shape, and low surface wear. At 28 days, concretes containing 30% and 40% BFS showed a significant increase in the evaluated mechanical properties compared with the reference concrete, whereas the 20% replacement presented behavior similar to that of conventional concrete. At 63 days, the concrete containing 40% BFS presented the highest values of compressive strength, splitting tensile strength, and modulus of elasticity. The results indicate that partial replacement of natural coarse aggregate with BFS, particularly at replacement levels of 30% and 40%, provided technically satisfactory mechanical performance, demonstrating potential for application in concrete production while contributing to industrial waste utilization and reducing the consumption of natural aggregates.

Keywords: Concrete; Blast furnace slag; Coarse aggregate; Industrial waste; Mechanical properties.

Resumen

El uso de residuos industriales como materiales alternativos en la construcción civil constituye una estrategia para reducir la explotación de recursos naturales y proporcionar un destino técnicamente

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

adecuado a los subproductos industriales. En este contexto, este estudio evaluó el comportamiento mecánico de concretos producidos con sustitución parcial del agregado grueso natural por escoria de alto horno (EAF) proveniente de la producción de arrabio mediante carbón vegetal. Se produjeron concretos con 0%, 20%, 30% y 40% de sustitución, en masa, del agregado grueso natural por EAF, manteniendo una relación agua/cemento de 0,64. Los concretos fueron evaluados a los 28 y 63 días en cuanto a la resistencia a la compresión axial, la resistencia a la tracción por compresión diametral y el módulo de elasticidad. La escoria utilizada presentó características físicas compatibles con su uso como agregado grueso, destacándose su textura áspera, forma irregular y bajo desgaste superficial. A los 28 días, los concretos que contenían 30% y 40% de EAF presentaron un aumento significativo en las propiedades mecánicas evaluadas en comparación con el concreto de referencia, mientras que la sustitución del 20% presentó un comportamiento similar al del concreto convencional. A los 63 días, el concreto con 40% de EAF presentó los mayores valores de resistencia a la compresión y a la tracción, así como de módulo de elasticidad. Los resultados indican que la sustitución parcial del agregado grueso natural por EAF, especialmente en proporciones del 30% y 40%, presentó un desempeño mecánico técnicamente satisfactorio, demostrando potencial para su aplicación en la producción de concretos y contribuyendo al aprovechamiento de residuos industriales y a la reducción del consumo de agregados naturales.

Palabras clave: Concreto; Escoria de alto horno; Agregado grueso; Residuos industriales; Propiedades mecánicas.

1. Introdução

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil e sua produção está diretamente associada ao elevado consumo de recursos minerais naturais. Entre seus principais constituintes, os agregados representam uma parcela significativa da massa total do concreto e, portanto, a crescente demanda por agregados naturais está associada à intensificação da exploração de jazidas e aos impactos ambientais decorrentes de sua extração e processamento. Nesse contexto, a utilização de subprodutos industriais como agregados alternativos constitui uma estratégia para reduzir o consumo de recursos naturais e, simultaneamente, promover o aproveitamento de materiais que seriam destinados a áreas de armazenamento ou descarte.

A indústria siderúrgica constitui uma importante fonte de subprodutos minerais, entre os quais se destaca a escória de alto-forno (EAF), gerada durante a produção de ferro-gusa. A composição e as propriedades da escória dependem das matérias-primas empregadas e das condições de operação e resfriamento do processo siderúrgico. Quando adequadamente processada, a escória de alto-forno pode apresentar características físicas compatíveis com sua utilização como agregado em concretos. A literatura demonstra que a utilização de escórias como

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

agregados pode modificar propriedades como trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, embora a magnitude e a direção desses efeitos dependam das características da escória, da granulometria, do teor de substituição e da composição do concreto (Özbay, Durmuş, 2015; Mohamed *et al.*, 2025)

Diferentemente da utilização da escória de alto-forno moída como material cimentício suplementar, a aplicação da escória em forma granular como agregado graúdo envolve principalmente sua interação física e mecânica com a matriz cimentícia. Nesse caso, características como massa específica, absorção de água, resistência à abrasão, formas das partículas e textura superficial podem exercer influência relevante sobre o comportamento do concreto. Estudos com agregados de escória de alto-forno resfriada ao ar mostram que o tamanho e o teor de substituição do agregado podem alterar significativamente a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a resistência à tração por compressão diametral e a trabalhabilidade dos concretos (Ozbakkaloglu, Gu e Fallah Pour, 2016). Trabalhos mais recentes também indicam que agregados de escória de alto-forno resfriada ao ar podem modificar a estrutura da zona de transição interfacial e influenciar o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto (CAO *et al.*, 2022; Mohamed *et al.*, 2025)

A zona de transição interfacial entre o agregado graúdo e a pasta de cimento constitui uma região particularmente relevante para o comportamento mecânico do concreto, uma vez que sua microestrutura e aderência podem influenciar a iniciação e a propagação de fissuras. Agregados com superfície mais rugosa e geometria mais angular podem proporcionar maior intertravamento mecânico e favorecer a aderência com a matriz cimentícia. Por outro lado, a maior angularidade e a maior absorção de determinados agregados de escória podem reduzir a trabalhabilidade da mistura. Assim, o efeito da substituição do agregado natural por escória não pode ser estabelecido apenas a partir da origem do material, sendo necessário considerar conjuntamente suas características físicas e o nível de substituição empregado.

Estudos experimentais disponíveis na literatura apresentam resultados distintos em função do tipo de escória e das condições experimentais. Ozbakkaloglu,

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Gu e Fallah Pour (2016), ao investigarem concretos com agregados graúdos de escória de alto-forno resfriada ao ar, observaram que o tamanho das partículas influenciou as propriedades mecânicas e que o aumento do teor de agregado de escória produziu diferentes respostas dependendo da classe de resistência do concreto. Cao *et al.* (2022). verificaram, em concreto de ultra-alto desempenho, que a substituição do agregado natural por escória de alto-forno resfriada ao ar reduziu a trabalhabilidade, enquanto a resistência à compressão e a resistência à tração apresentaram comportamento dependente do teor de substituição. Mais recentemente, Mohamed *et al*. (2025) avaliaram concretos contendo 30%, 50% e 100% de agregados de escória de alto-forno resfriada ao ar e observaram alterações nas propriedades mecânicas e na microestrutura associadas à substituição do agregado natural.

Embora esses estudos demonstrem o potencial da escória de alto-forno como agregado para concreto, os resultados disponíveis não podem ser diretamente generalizados para escórias provenientes de diferentes processos siderúrgicos, uma vez que suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas podem variar significativamente. Essa questão é particularmente relevante para escórias provenientes da produção de ferro-gusa a carvão vegetal, cuja caracterização e comportamento em concretos convencionais ainda requerem investigação específica. Além disso, a avaliação conjunta da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade em diferentes idades permite uma análise mais abrangente da influência da substituição do agregado natural sobre o comportamento mecânico do concreto.

Nesse contexto, este estudo investiga o comportamento mecânico de concretos produzidos com substituição parcial, em massa, do agregado graúdo natural por escória de alto-forno proveniente da produção de ferro-gusa em alto-forno a carvão vegetal. Foram avaliados teores de substituição de 20%, 30% e 40%, além de um concreto de referência sem escória, mantendo-se a relação água/cimento em 0,64. Os concretos foram avaliados aos 28 e 63 dias quanto à resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

elasticidade. O estudo busca, assim, determinar a influência do teor de substituição e da idade sobre as propriedades mecânicas dos concretos e relacionar o comportamento observado às características físicas do agregado de escória.

2. Materiais e Métodos

2.1. Planejamento Experimental

Para realização desta pesquisa foi desenvolvido o seguinte programa de ensaios tomando-se como base a produção de concretos com a utilização de agregados graúdos de escória de alto-forno em substituição parcial, em massa (20%, 30% e 40%) em relação ao agregado graúdo natural (seixo).

Os ensaios de massa específica, massa unitária, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC), localizado na Universidade Federal do Pará (UFPA).

2.1.1. Variáveis de resposta

No estudo do comportamento dos concretos com agregados de EAF, para se alcançar os objetivos propostos, é de suma importância a definição e quantificação das variáveis que servirão de parâmetro para a obtenção das respostas dos experimentos.

Verificou-se a viabilidade da utilização de escória de alto-forno como agregado graúdo nos concretos a partir dos seguintes ensaios mecânicos:

Variáveis de Resposta:

- Resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2007);
- Resistência à tração por compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011);
- Módulo de elasticidade NBR 8522 (ABNT, 2008).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Definida as variáveis de resposta, necessita-se definir as variáveis independentes ou de controle, as quais serão fixadas e mantidas durante todo o experimento. Adotaram-se as seguintes variáveis de controle:

a) **Teores de substituição:** Os teores irão variar de 0%, 20%, 30% e 40% de substituição do AGN (seixo) pela EAF.

b) **Idade do concreto (Ensaios mecânicos):** Foram adotados 28 e 63 dias, para o companhamento da evolução no tempo do desempenho mecânico

do concreto.

c) **Relação a/c:** De posse da curva de dosagem criada, buscou-se a resistência de 25 MPa aos 28 dias, com relação água/cimento de 0,64. A resistência mínima foi baseada na classe de agressividade II, imposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

3. Resultados e Discussão

Para cada betonada foram produzidos 12 corpos de prova com dimensões de 10 cm x 20 cm distribuídos da seguinte forma: 4 para os ensaios de resistência à compressão axial, 4 para os ensaios de módulo de elasticidade, 4 para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral. Realizou-se 8 betonadas até o fim do experimento, sendo que o número final de corpos de prova irá totalizar em 96 (Tabela 1).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Tabela 1. Resumo do programa experimental.

CONCRETOS	Relação a/c	Resistência à compressão axial simples		Módulo de elasticidade		Resistência à tração por compressão diametral	
		Idade (dias)		Idade (dias)		Idade (dias)	
		28	63	28	63	28	63
REFERÊNCIA	0,64	4	4	4	4	4	4
20 % DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	0,64	4	4	4	4	4	4
30 % DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	0,64	4	4	4	4	4	4
40 % DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	0,64	4	4	4	4	4	4
Número de corpos de prova		32		32		32	
TOTAL: 96							

2.2. Caracterização dos materiais

Neste item são descritas as características dos materiais utilizados na produção dos concretos, os quais são provenientes do estado do Pará. Algumas destas características foram determinadas em laboratório e outras fornecidas por fabricantes e fornecedores.

2.2.1. Aglomerante hidráulico

Foi empregado o cimento Portland pozolânico (CP IV - 32), disponível comercialmente na região metropolitana de Belém.

2.2.2. Agregado miúdo

Utilizou-se areia de origem quartzosa, provenientes de depósitos naturais do município de Ourém (PA), a areia passou pelo processo de secagem, com o auxílio de estufa, e foi armazenada em tonéis. Para caracterização do agregado miúdo empregado nesta pesquisa realizou-se alguns ensaios listados na Tabela 2.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Tabela 2. Métodos de caracterização do agregado miúdo.

Ensaios realizados	Norma
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Classificação	NBR 7211 (ABNT, 2009)

3.2.3. Agregado graúdo natural (seixo)

O agregado graúdo natural utilizado durante a confecção dos concretos é proveniente da região metropolitana de Belém. O material foi seco e armazenado em tonéis. Para caracterização do agregado graúdo empregado neste estudo foram realizados os ensaios listados na Tabela 3.

Tabela 3. Métodos de caracterização do agregado graúdo convencional (seixo).

Ensaios realizados	Norma
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Absorção de água	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Abrasão Los Angeles	NBR NM 51 (ABNT, 2001)
Índice de forma	NBR 7809 (ABNT, 2009)
Classificação	NBR 7211 (ABNT, 2009)

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

2.2.4. Escória de alto-forno

- **Coleta de amostra**

Do volume de escória gerado pela Siderúrgica Norte Brasil (SINOBRAS-PA), coletou-se uma amostra segundo as prescrições da NBR 10007 (ABNT, 2004) Amostragem de resíduos sólidos, com cerca de 300 kg do resíduo industrial. Após a coleta, a amostra foi acondicionada em recipientes plásticos, que foram encaminhados para o Laboratório de Engenharia Civil. A escória utilizada nesta pesquisa foi retirada desta amostra.

- **Ensaios de caracterização**

O resíduo industrial proveniente da região Sudeste do Pará foi utilizado na confecção dos concretos com adição de escória. A caracterização do agregado empregado nesta pesquisa foi realizada com os mesmos critérios estabelecido na Tabela 3.

2.3. Produção de Concretos

O método de dosagem adotado para realização desse estudo baseou-se nos procedimentos do IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992), que consiste em ajustar o teor ideal de argamassa estabelecendo, como parâmetro de controle, o valor do abatimento do tronco de cone, que neste estudo fixou-se em 70 ± 20 m.

2.3.1. Produção, moldagem e armazenamento dos corpos de prova

Durante a produção dos concretos seguiu-se o procedimento descrito no método IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992). A moldagem e o armazenamento dos corpos de prova seguiram as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015) – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

3. Apresentação, Análise de Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, desempenho mecânico das argamassas e dos concretos, feitos e indicados no programa experimental estabelecido no capítulo 3.

3.1. Caracterização dos Materiais

3.1.1. Aglomerante hidráulico

Utilizou-se na confecção dos concretos o cimento Portland do tipo CP IV 32 produzido na região. As tabelas 4, 5 e 6 indicam respectivamente os ensaios físicos, químicos e mecânicos, respectivamente do cimento utilizado.

Tabela 4. Características físicas do cimento Portland CP IV – 32.

ENSAIOS FÍSICOS				
Determinação	**Norma**	**Unid.**	**Especif.**	**Valores obtidos**
Ret. # 200 (0,075 mm)	NBR 12826	%	Max. 8,0	0,9
Ret. # 325 (0,044 mm)	NBR 12826	%	-	7,4
Área específica	NBR 16372	m^2/kg	-	619
Massa específica	NBR NM 23	g/cm^3	-	2,9
Cons. normal	NBR NM 43	%	-	33,4
Tempo de início de pega	NBR NM 65	hora	Min. 1,0	2:45
Tempo de fim de pega	NBR NM 65	hora	Max. 2,0	4:25
Expansibilidade quente	NBR NM 11582	mm	Max. 5,0	1,00
Expansibilidade frio	NBR NM 11582	mm	-	-

*Dados fornecidos pela fabricante

]

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Tabela 5. Características químicas do cimento Portland CP IV – 32.

ENSAIOS QUÍMICOS				
Determinação	**Norma**	**Unid.**	**Especif.**	**Valores obtidos**
Perda ao fogo	NBR NM 18	%	-	6,68
Resíduo insolúvel	NBR NM 15	%	-	18,46
SiO_2	NBR NM 14	%	-	26,02
Al_2O_3	NBR NM 14	%	-	10,92
Fe_2O_3	NBR NM 14	%	-	3,06
CaO	NBR NM 14	%	-	47,8
MgO	NBR NM 14	%	Max. 6,5	2,51
SO_3	NBR NM 16	%	Max. 4,0	2,50
Na_2O	NBR NM 17	%	-	-
K_20	NBR NM 17	%	-	-

*Dados fornecidos pela fabricante

Tabela 6. Características mecânicas do cimento Portland CP IV – 32.

ENSAIOS MECÂNICOS - Resistência à compressão (MPa) - NBR 7215				
Idade	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Especif.	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
Obtido	9,1	23,1	36,8	45,8
Desvio	1,1	0,9	0,8	0,9

*Dados fornecidos pela fabricante

3.1.2. Agregado miúdo

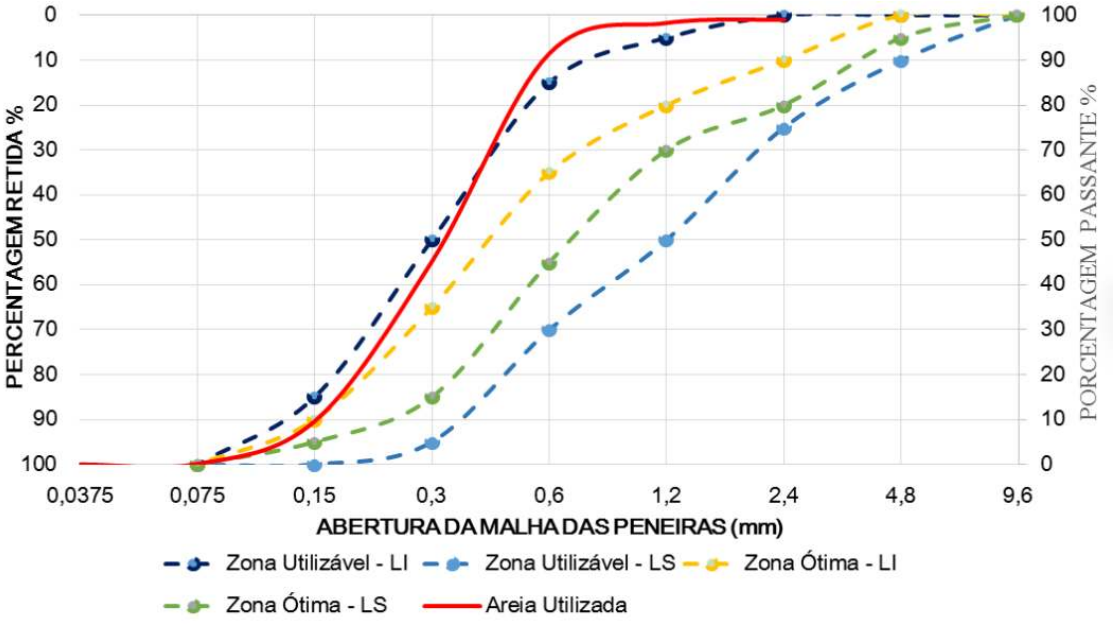
O agregado miúdo utilizado na produção dos concretos atende aos requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009). Na Figura 1 compara-se a curva granulométrica do agregado miúdo com os limites das zonas granulométricas.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Figura 1. Curva granulométrica e propriedades do agregado miúdo.



Módulo de Finura	1,55
Dimensão máxima (mm)	1,18
Massa específica (g/cm³)	2,63
Massa unitária (g/cm³)	1,56

3.1.3. Agregado graúdo natural (seixo)

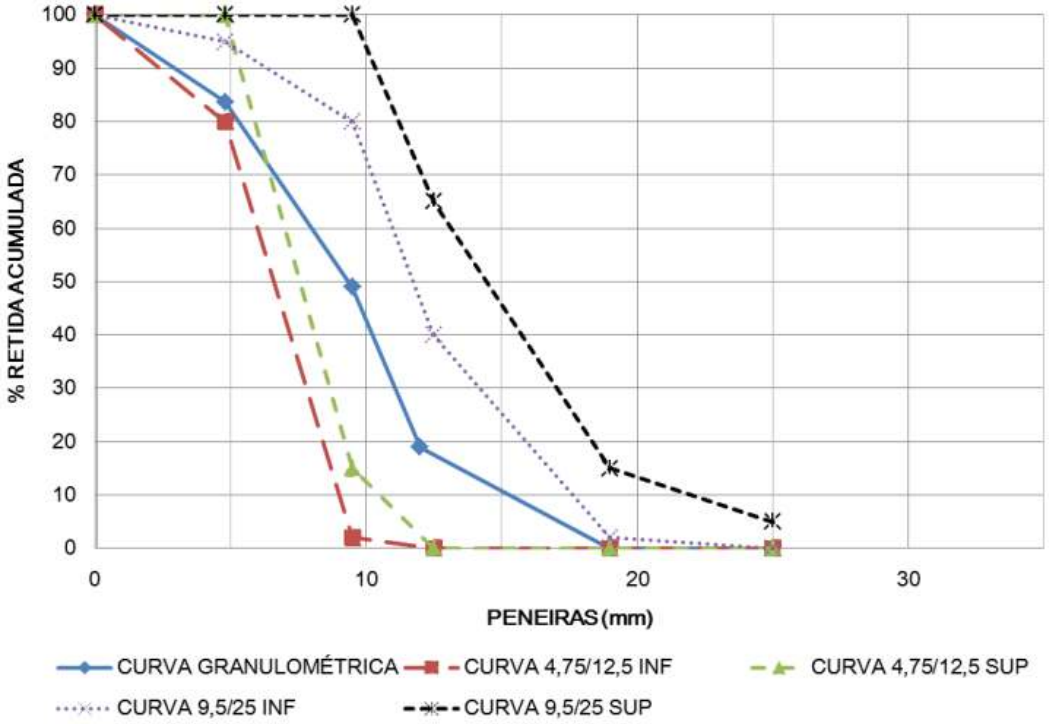
O AGN (seixo) utilizado na confecção dos concretos atende aos requisitos descritos na NBR 7211 (ABNT, 2009), na Figura 2 compara-se a curva granulométrica do agregado graúdo natural com os limites das zonas granulométricas.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Figura 2. Curva granulométrica e propriedades do agregado graúdo (seixo).



Módulo de Finura	7,17
Dimensão máxima (mm)	25
Massa específica (g/cm³)	2,63
Massa unitária (g/cm³)	1,76
Absorção de água (%)	2,66
Abrasão Los Angeles (%)	49,7
Índice de forma	2,16

3.1.4. Escória de alto-forno

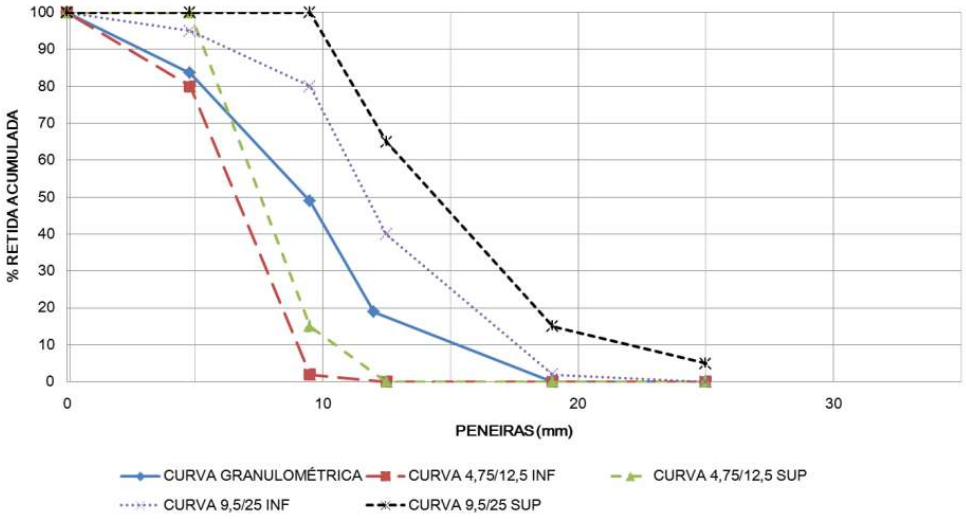
A caracterização do agregado de escória de alto-forno teve as mesmas normativas de um agregado graúdo convencional e sua curva granulométrica e propriedades está na Figura 3.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Figura 3- Curva granulométrica e propriedades do agregado graúdo (EAF).



Módulo de Finura	7,07
Dimensão máxima (mm)	25
Massa específica (g/cm³)	3,06
Massa unitária (g/cm³)	1,61
Absorção de água (%)	3,01
Abrasão Los Angeles (%)	31,1
Índice de forma	2,52

A massa específica da escória é superior à massa específica do seixo, fato este relacionado aos elementos químicos presentes na composição química do resíduo industrial. A absorção de água da EAF foi ligeiramente superior a do AGN, sendo que esta diferença de absorção não influenciou na quantidade de água de amassamento utilizada durante as betonadas. O desgaste superficial da escória foi consideravelmente inferior ao máximo imposto pela NBR NM 7211 (ABNT 2009). A escória apresentou uma textura áspera e um formato irregular, além de deter o índice de forma dentro do limite permitido por norma. É importante salientar que a forma da EAF está diretamente relacionada com a forma de beneficiamento na qual a mesma foi submetida (britagem). A EAF analisada se enquadra nos requisitos impostos pela NBR NM 7211 (ABNT, 2009), pois esta está dentro da faixa de graduação 4,75/12,5 (Figura 3).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

3.2. Produção de concretos

O método de dosagem adotado na confecção das misturas experimentais foi o desenvolvido pelo IPT/EPUSP (Helene; Terzian, 1995). Neste método, fixa-se o valor do abatimento para o desenvolvimento das misturas, que neste estudo foi mantido em 70 ± 20 mm. A partir do qual, parte-se para obtenção do teor ideal de argamassa para os materiais empregados, adotando-se o traço principal de 1:5. O teor de argamassa ideal foi de 61 % e a relação água/cimento de 0,64. Após a execução do traço principal, partiu-se para confecção das misturas 1:3,5 e 1:6,5, definidos como traços auxiliares, necessários para produção da curva de dosagem.

Tabela 7. Caracterização do agregado graúdo, bem como o consumo estimado para moldagem de 12 corpos de prova cilíndricos de (Ø 10 x 20) cm.

Concreto referência						
Traço			Consumo (Kg)			Massa específica (g/cm³)
Cimento	Areia	Seixo	Cimento	Areia	Seixo	Seixo
1	2,35	2,15	9,3	21,86	20	2,63

3.3. Avaliação das Propriedades do Concreto

3.3.1. Avaliação da resistência à compressão axial

A Figura 4 apresenta uma análise comparativa entre os concretos sem escória, e os concretos com adição de escória nas proporções de 20%, 30% e 40%. Observa-se que aos 28 dias, não houve incremento de resistência à compressão nos concretos com 20% em relação aos de referência. Enquanto que nas substituições de 30 e 40% obteve-se um aumento significativo de desempenho mecânico ($P<0,05$). Já, aos 63 dias os concretos sem escória e com 20 % e 30% de EAF não obtiveram aumento significativo de resistência, ao passo que os concretos com 40 % apresentaram um ganho de desempenho mecânico em relação aos outros, ressalta-se que esse ganho de resistência aos 63 dias está diretamente ligado ao tipo de cimento utilizado durante o programa experimental, e não mais diretamente pelo emprego da EAF, tendo em vista que este tipo de cimento apresenta materiais

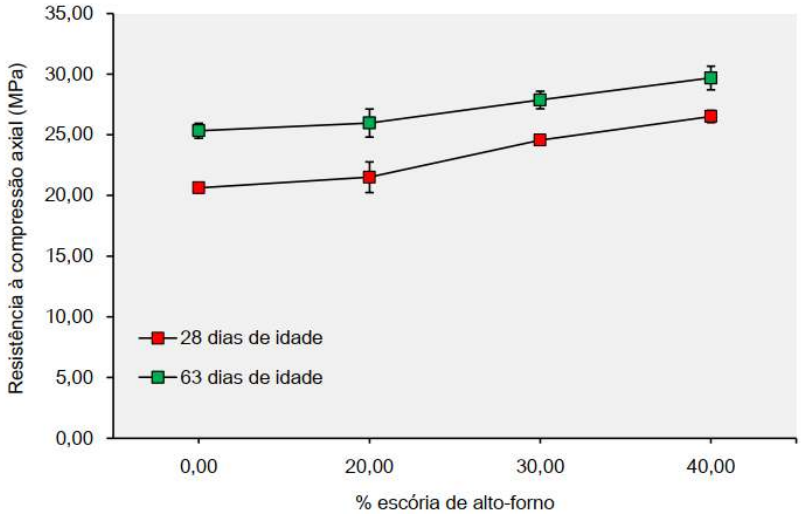
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

pozolânicos na sua composição que irão contribuir para o aumento de desempenho em idades avançadas.

Figura 4. Resistência à compressão axial dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno. Valores expressos em média ± desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando p<0,05 (ANOVA;Tukey, p<0,05).



O aumento de resistência nos concretos contendo escória podem ser explicados em função do resíduo industrial apresentar uma maior resistência ao desgaste superficial, em relação ao agregado graúdo natural. Assim como, o formato irregular e a textura áspera da EAF contribuíram para melhora na aderência entre a EAF e a matriz de cimento.

Monosi *et al.* (2015), substituiu 40 % do agregado graúdo natural por escória de aciaria, em massa, e comparou com concretos sem adição de EAC, mantendo a mesma relação água-cimento de 0,54. Aos 28 dias os concretos foram ensaiados à compressão axial, onde os concretos especiais obtiveram um ganho de resistência de 40 %. Este aumento está relacionado à melhor força de ligação entre a interface pasta-agregado, em função do seu formato irregular e sua textura áspera, assim como o a EAC apresentou um elevado índice de dureza, em função do seu baixo desgaste superficial.

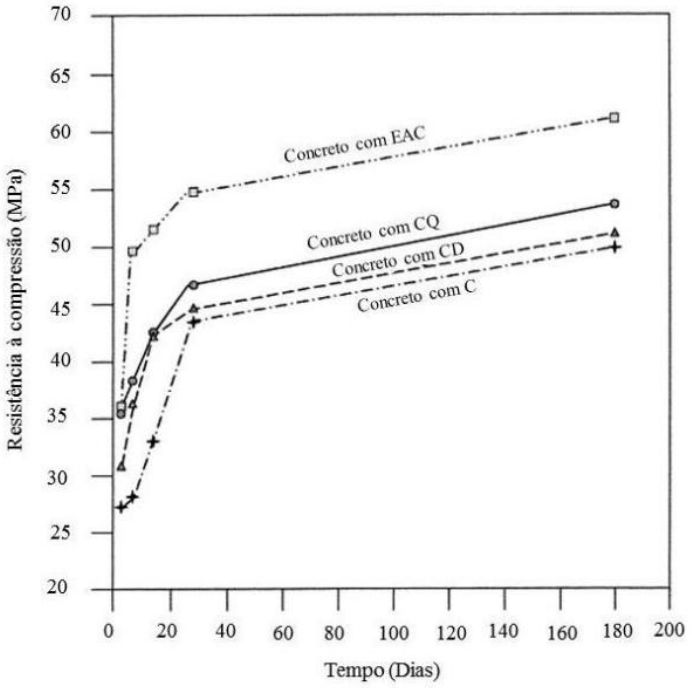
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Beshr, Almusallam e Maslehuddin (2002), analisaram as propriedades mecânicas de 4 traços de concretos produzidos com agregado graúdo de calcário (C), calcário dolomítico (CD), calcário quartzolítico (CQ) e escória de aciaria (EAC). Os corpos de prova desses concretos foram ensaiados à compressão axial aos 3, 7, 14, 28 e 180 dias de cura. A Figura 5 indica que o agregado graúdo influencia significativamente na capacidade resistente do concreto, sendo que a maior resistência alcançada foi com a amostra confeccionada com EAC.

Figura 5. Desenvolvimento das resistências à compressão de concretos preparados a partir de agregados selecionados, (adaptado de Beshr, Almusallam e Maslehuddin (2002).



Os dados neste estudo indicam que em concretos com EAC, a maior parte do carregamento de compressão é suportada pelos agregados, ao invés de somente a pasta de cimento.

Maslehuddin *et al.* (2002), aumentou o desempenho mecânico do seu concreto ao substituir 50% de AGN por EAC. Esta melhora na capacidade de resistência à compressão indica que este material pode ser utilizado beneficamente em concretos de cimento Portland.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Sekaran, Palaniswamy e Balaraju (2015), confeccionaram um concreto com 50 % de escória de aciaria (EAC) e 30 % de cinza volante (CV), que apresentou um aumento significativo de desempenho mecânico (ensaio de resistência à compressão e flexão de vigas) em relação ao concreto convencional e ao concreto feito apenas com agregado graúdo natural (AGN) e 30% de CV. Este ganho está relacionado à elevada resistência à abrasão e ao esmagamento da EAC em comparação ao AGN. Desta forma, a adição deste resíduo industrial como agregado graúdo na produção de concreto, torna-se uma alternativa tecnicamente viável, visando à diminuição do acúmulo de resíduo industrial depositado, bem como ajuda diretamente na redução da exploração de jazidas naturais.

3.4.3. Avaliação da resistência à tração por compressão diametral

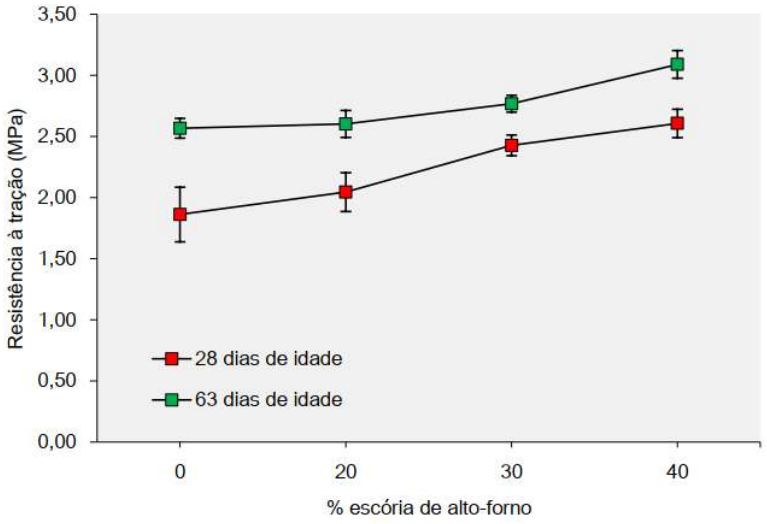
A Figura 6 apresenta os resultados entre os concretos sem adição de escória, e os concretos com adição de escória nas proporções de 20%, 30% e 40%. Observa-se que aos 28 dias, não houve incremento de resistência à tração nos concretos com 20% em relação aos de referência. Enquanto que nas substituições de 30 e 40% obteve-se um aumento significativo de desempenho mecânico, em relação ao de referência e o de 20% ($P<0,05$). No entanto, ao correlacionar as resistências nos concretos com 30 e 40 %, identifica-se que ambos não apresentam diferença significativa entre eles. Já, aos 63 dias somente o concreto com 40% de escória apresentou diferença significativa de desempenho mecânico em relação aos outros concretos ($P<0,05$). Acredita-se que esse aumento de resistência no teor de 40% está relacionado à maior força de interação entre o agregado e a pasta, haja vista que os concretos confeccionados com esse teor tinham na sua composição uma maior quantidade de agregados de EAF.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Figura 6. Resistência à tração por compressão diametral dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno. Valores expressos em média ± desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando p<0,05 (ANOVA;Tukey, p<0,05).



Da mesma maneira que a análise de resistência à compressão axial, a análise do desempenho mecânico à tração, segue a mesma linha de pensamento, isto é, este incremento de resistência se deu em função da EAF apresentar uma maior dureza superficial em relação ao agregado natural, assim como a sua forma e textura áspera, que melhoraram a aderência entre a interface matriz-agregado.

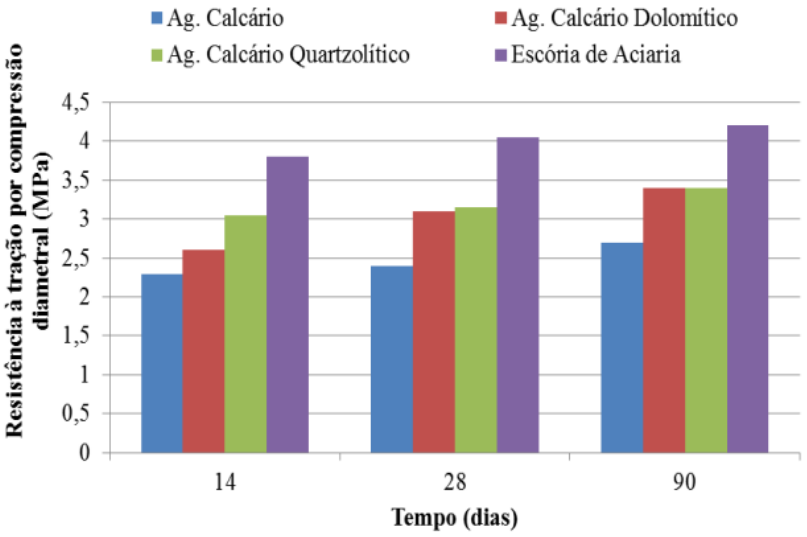
Beshr, Almusallam e Maslehuddin (2002), estudaram a resistência à tração por compressão diametral nos 4 tipos de concretos feitos com agregados distintos, e obtiveram o maior desempenho mecânico no concreto com EAC (Figura 7).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Figura 7. Resistência à tração por compressão diametral de concretos preparados a partir de agregados selecionados, (adaptado de BESHR *et al*, 2002).



Este ganho de resistência está relacionado ao formato irregular, textura áspera e boa resistência à abrasão da escória, estas características densificam a zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento.

3.4.4. Avaliação do módulo de elasticidade

A Figura 8 apresenta os resultados entre os concretos sem adição de escória, e os concretos com adição de escória nas proporções de 20%, 30% e 40%. Aos 28 dias, a substituição de 20 % do agregado graúdo natural por EAF não apresentou uma diferença significativa de módulo de elasticidade em relação ao concreto confeccionado sem escória. Enquanto que nas adições de 30 e 40% observa-se um ganho significativo do módulo de deformação ($P<0,05$), em relação aos outros teores, no entanto ao correlacionar os dois últimos teores conclui-se que ambos não diferem significativamente entre si. De forma análoga a Figura 4.21 mostra a linha de tendência dos valores médios do módulo de elasticidade dos concretos analisados aos 28 dias.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Figura 8. Módulo de elasticidade dos concretos para idades diferentes, em função do teor de substituição do agregado graúdo natural por escória de alto-forno. Valores expressos em média ± desvio padrão. As diferenças significativas foram consideradas quando p<0,05 (ANOVA;Tukey, p<0,05).

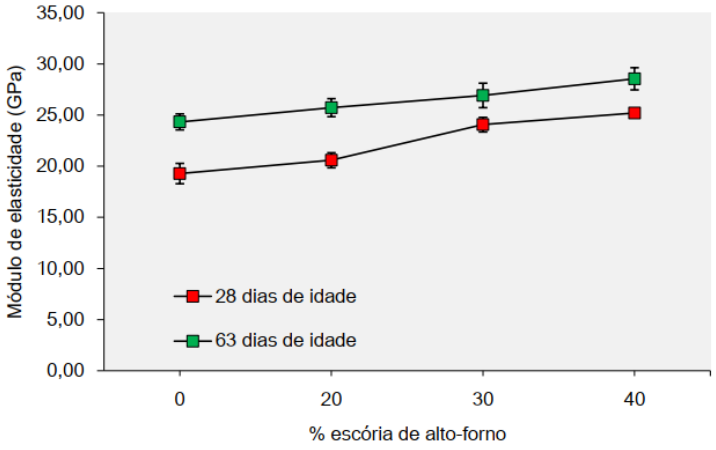
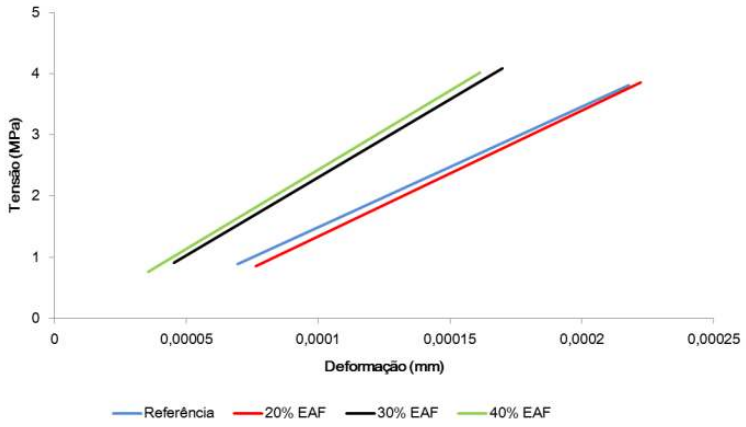


Figura 9. Linha de tendência dos valores médios do módulo elasticidade (28 dias).



O aumento no módulo de elasticidade dos concretos contendo as substituições de 30 e 40% está relacionado às melhores propriedades físicas encontradas no agregado de escória de alto-forno.

Adegoloye *et al.* (2014), substituiu 50 e 100% de agregado graúdo natural de sílico-calcário por escória de aciaria (EAC), em volume, analisando a resistência à compressão e módulo de elasticidade em concretos de alta resistência com relação água e cimento fixados em 0,3. Os resultados indicaram um ganho de 9% na resistência em concretos especiais, fato este relacionado à maior resistência à

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

abrasão da escória, além desta apresentar uma superfície áspera gerando um melhor grau de aderência do agregado com a pasta de cimento. O módulo dinâmico aumentou em média 10 % nos concretos contendo EAC, pois o maior peso específico da escória influenciou diretamente na capacidade de deformação elástica dos concretos.

4. Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram que a substituição parcial do agregado graúdo natural por escória de alto-forno apresentou influência positiva nas propriedades mecânicas do concreto. De modo geral, os concretos com escória apresentaram desempenho superior ao concreto de referência, principalmente nos teores de substituição de 30% e 40%. A substituição de 20% apresentou resultados próximos aos obtidos para o concreto convencional, não sendo observadas diferenças significativas em algumas das propriedades avaliadas.

Entre os teores estudados, a substituição de 40% apresentou os melhores resultados, destacando-se pelos maiores valores de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, especialmente aos 63 dias. Os resultados indicam que as características físicas da escória, como sua maior massa específica, superfície mais rugosa e formato irregular, podem ter contribuído para uma melhor interação entre o agregado e a matriz cimentícia.

Dessa forma, a utilização da escória de alto-forno como substituição parcial do agregado graúdo natural mostrou-se tecnicamente viável para a produção de concretos, com destaque para os teores de 30% e 40%, que proporcionaram ganhos nas propriedades mecânicas avaliadas. Além de apresentar potencial para o aproveitamento de um resíduo industrial, essa aplicação pode contribuir para a redução do consumo de agregados naturais. Entretanto, a utilização da escória deve considerar suas características específicas, uma vez que suas propriedades podem variar de acordo com as matérias-primas e as condições do processo de produção.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio**. NBR 5739**. Rio de Janeiro. 2007.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. **NBR 7222.** Rio de Janeiro. 2011.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. **NBR 8522.** Rio de Janeiro. 2008.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Projeto de estruturas de concreto. **NBR 6118.** Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248**. Rio de Janeiro. 2003.

ASSSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. **NBR NM 45.** Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. **NBR NM 52**. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. **NBR NM 53.** Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto – Especificação. **NBR 7211**. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. **NBR 7809**. Rio de Janeiro. 2019.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostragem de resíduos sólidos. **NBR 10007**. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. **NBR 5738.** Rio de Janeiro. 2015.

ADEGOLOYE, G., BEAUCOUR, A., ORTOLA, S., AND NOUMOWÉ, A. (2015). Concretes made of EAF slag and AOD slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability. **Construction and Building Materials**, 10.1016/ j.conbuildmat.2014.12.007, 313-321. Online publication date: 1-Fev-2014.

CAO, Q.; NAWAZ, U.; JIANG, X.; ZHANG, L.; ANSARI, W. S. Efeito do agregado de escória de alto-forno refrigerado a ar nas propriedades mecânicas do concreto de ultra-alto desempenho. **Case Studies in Construction Materials,** v. 16, e01027, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01027.

H. Beshr, A. A. Almusallam, M. Maslehuddin**.** Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete**. Construction and Building Materials**, 17 (2002), p. 97-103.

ÖZBAY, E.; ERDEMIR, M.; DURMUŞ, H. İ. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties. **A review. Construction and Building Materials**, v. 105, p. 423–434, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153.

OZBAKKALOGLU, T.; GU, L.; FALLAH POUR, A**.** Normal- and high-strength concretes incorporating air-cooled blast furnace slag coarse aggregates: Effect of slag size and content on the behavior. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 138–146, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.015.

MOHAMED, O. A.; GHANAM, O.; HAMDAN, A.; *et al.* Mechanical properties and durability of concrete with recycled air-cooled blast furnace slag aggregates. **Scientific Reports**, v. 15, 24384, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-09242-1.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 26/09/2026
Vol: 13.21
DOI: 10.66104/vr6qrr64
Pages: 1-27

ZHANG, P.; WANG, W.; ZHENG, Y.; HU, S. Effect of recycled aggregate and slag as substitutes for natural aggregate and cement on the properties of concrete: A review. **Journal of Renewable Materials**, v. 11, n. 4, p. 1853–1879, 2023. DOI: 10.32604/jrm.2023.024981.

CC BY