

Estudo Experimental da Resistência de Blocos de Concreto com Vidro Moído como Agregado Miúdo

**Armando Preizal Ferreira M. Sc.¹, Emil de Souza Sánchez Filho D. Sc.²,
Cláudia Valéria Gávio Coura D.Sc.³, Sérgio Kitamura D. Sc.⁴**

¹ Engenheiro Civil | Universidade Federal Fluminense | armandopreizal@uol.com.br

² Professor Titular da Universidade Federal Fluminense | emilsanchez@uol.com.br

³ Prof^a do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais | claudia.coura@ifsudestemg.edu.br

⁴ Prof. do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais | sergiokitamura@yahoo.com.br

Resumo

Este artigo apresenta os resultados de ensaios de blocos de concreto fabricados com vidro temperado moído, agregado miúdo de vidro triturado (AMVT) em substituição ao pó de pedra, e agregado miúdo natural (AMN). Os resíduos de vidro foram adquiridos em indústria recicladora, os blocos foram confeccionados em indústria especializada na fabricação de blocos. Foram executados 24 ensaios de compressão em blocos, sendo 12 blocos confeccionados com agregado miúdo natural (AMN) e 12 com agregado miúdo de vidro triturado (AMVT), e 24 ensaios de compressão em prismas com três blocos, sendo 12 prismas com blocos confeccionados com agregado miúdo natural (AMN) e 12 prismas com blocos confeccionados com agregado miúdo de vidro triturado (AMVT). Foram adotadas as resistências nominais de 4 MPa, 6 MPa, 8 MPa e 10 MPa, utilizando-se três corpos de prova para cada ensaio. Todos os resultados tiveram coeficiente de variação inferior a 25%, e pelo Teste de Grubbs não houve resultado espúrio. Os resultados para os blocos de concreto como corpos de prova comprimidos utilizando vidro triturado tiveram resistências à compressão, se comparadas com a resistência de referência, de, respectivamente: 4,50 MPa para 4,00 MPa; 6,00 MPa para 6,00 MPa; de 8,70 MPa para 8,00 MPa; e 10,47 MPa para 10 MPa. Os prismas com três blocos utilizando-se vidro triturado tiveram resistências à compressão, se comparadas com a resistência de referência, de, respectivamente: 3,78 MPa para 4,00 MPa; 5,55 MPa para 6,00 MPa; de 7,53 MPa para 8,00 MPa; e 7,92 MPa para 10 MPa. Todos os ensaios foram realizados na idade de 28 dias. A resistência à compressão nos blocos foi em média 6,49% superior à resistência de referência. Nos prismas com três blocos a resistência foi em média 10,00% inferior à resistência de referência.

Palavras-chave: rejeito de vidro; pó de pedra-vidro; bloco de concreto.

Abstract

This paper presents the results of tests with concrete blocks manufactured with crushed tempered glass, small aggregate of crushed glass (AMVT as the Brazilian Portuguese acronym for *agregado miúdo de vidro triturado*) in substitution of stone powder, and small natural aggregate (AMN as the Brazilian Portuguese acronym for *agregado miúdo natural*). The glass wastes were acquired from recycling industry. The blocks were made by an industry specialized in blocks' manufacture. Twenty-four compression strength tests were carried out in blocks, 12 blocks made with natural kid's aggregate (AMN) and

12 with shredded glass aggregate (AMVT), and 24 compression strength tests were performed on prisms with three blocks, of which 12 prisms with blocks made with (AMN), and 12 prisms with blocks made with crushed glass aggregate (AMVT). The adopted nominal strengths were of 4 MPa, 6 MPa, 8 MPa and 10 MPa, using three test specimens for each test. All results had coefficient of variation inferior to 25%, and by the Test of Grubbs, there was no spurious result. The tests results for the concrete blocks as compressed test pieces using crushed glass, if compared with the reference strength, had compressive strengths of, respectively: 4.50 MPa to 4.00 MPa; 6.00 MPa for 6.00 MPa; from 8.70 MPa to 8.00 MPa; and 10.47 MPa to 10 MPa. The prisms with three blocks using crushed glass, if compared with the reference resistance, had compressive strengths of, respectively: 3.78 MPa to 4.00 MPa; 5.55 MPa for 6.00 MPa; from 7.53 MPa to 8.00 MPa; and 7.92 MPa to 10 MPa. All assays were performed at the age of 28 days. The compressive strength of the blocks was on average 6.49% higher than the reference strength. In the three block prisms the resistance was on average 10.00% lower than the reference strength.

Keywords: glass waste; glass; sand stone; concrete block.

Introdução

O programa experimental desenvolvido buscou avaliar a substituição do agregado miúdo natural (pó de pedra) por agregado miúdo de vidro triturado no concreto para a produção de blocos, quando solicitadas à compressão. O setor da construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), o concreto, cuja estimativa de consumo atual no mundo é da ordem de onze bilhões de toneladas métricas ao ano, é o material de construção mais utilizado.

Características dos materiais

O vidro é um material 100% reciclável e largamente utilizado. Suas propriedades mecânicas incluem elevados valores de resistência à compressão, à tração e ao desgaste. Mais de 70% de sua matéria é constituída por sílica (SiO_2), o que lhe confere boas propriedades pozolânicas, caracterizando-o como potencial constituinte para o concreto.

PETRUCCI (2007) considera a utilização do concreto com vidro possível, visto que o vidro adere perfeitamente ao cimento, dada sua adesividade molecular, e seu coeficiente de dilatação ser vizinho àquele do concreto e do aço e, na verdade, ligeiramente menor.

Propriedades físicas

O vidro tem *densidades* muito variáveis. Considera-se aceitável a densidade de 2,5, que dá massa de 2,5 kg/dm³ por mm de espessura para vidros planos. A *dureza* superficial do vidro, determinada pela escala de MOHS, é de 6,5. O vidro é dezesseis vezes mais *resistente à abrasão* do que o granito. Seu *coeficiente de condutibilidade térmica* é de K

= 0,79 Kcal/hm °C, em média. O *calor específico* do vidro é $C = 0,19$ Kcal/kg °C a $C = 0,20$ Kcal/kg °C, de 5 a 10 vezes maior do que o da água (PETRUCCI, 2007).

O coeficiente de dilatação térmica do vidro é de $\alpha = 8,6 \times 10^{-6}$. Em termos de *resistência química*, o vidro é praticamente inalterável na água, que dissolve em quantidades muito pequenas os álcalis nele contidos. O ácido fluorídrico ataca o vidro (PETRUCCI, 2007).

Propriedades mecânicas

O vidro é um material perfeitamente elástico, pois nunca apresenta deformação permanente. É, porém, frágil. Se submetido a uma flexão crescente, rompe sem apresentar sinais precursores. Seu *módulo de elasticidade* é de 60 GPa a 80 GPa. O *coeficiente de Poisson* do vidro é de 0,22, ao passo que, no concreto, esse coeficiente varia de 0,11 a 0,21. A NBR 6118:2014 admite que $\nu=0,20$. O índice de *resistência do vidro à tração* varia de 3 MPa a 70 MPa, a depender da duração da carga (em cargas permanentes, a resistência à tração diminui em cerca de 40%); do índice de umidade (redução de até 20%); da temperatura; do grau de polimento da superfície; do corte e estado dos bordos; e dos componentes e suas proporções.

A resistência do vidro à compressão é muito elevada, de cerca de 1000 MPa. Em termos práticos, isso significa que para quebrar um cubo de 1 cm de lado, a força necessária será da ordem de 100 kN. A resistência do vidro à ruptura por flexão é 40 MPa para vidro recozido, e 120 MPa a 200 MPa para vidro temperado, a depender da espessura, da manufatura dos bordos e tipo de fabrico.

As propriedades físicas e mecânicas acima caracterizadas são relevantes para melhor compreensão da utilização do vidro como alternativa na substituição do AMN (BARROS, 2010).

O vidro como agregado miúdo no concreto – AMVT

O resíduo de vidro utilizado nesta pesquisa é do tipo de segurança: vidro laminado e vidro temperado, ambos utilizados em automóveis. O vidro laminado é composto por placas de vidro unidas por camadas intermediárias de polivinil butiral (PVB). Em caso de quebra, os estilhaços ficam presos nessa camada intermediária.

O vidro temperado é obtido através do processo de têmpera, que compreende o aquecimento da matéria prima a cerca de 700°C, e subsequente resfriamento por jatos de ar. O choque térmico produz no vidro ainda sob pressão tensões que se distribuem uniformemente sobre sua inteira superfície, tornando-o mais resistente à compressão. Ao passo que a resistência típica do vidro comum é de cerca de 40 MPa, a tensão do vidro temperado é de cerca de 100 MPa. Logo, a resistência efetiva do vidro temperado será de 140 MPa.

O vidro triturado foi obtido da recicladora de vidro GT Glass Eco, em Belo Horizonte, MG. Triturado o vidro, faz-se sua separação através de peneiras. A matéria-prima mais utilizada são sobras de vidraçaria e de para-brisas de automóveis, ambas consideradas como materiais que produzem um produto final limpo e de boa qualidade.

Para atender às necessidades do estudo experimental, foram enviados à recicladora os percentuais das diversas peneiras da curva granulométrica do pó de pedra utilizado pela Pedreira São Sebastião, para a fabricação dos blocos de concreto. Recebido o AMVT da recicladora, o mesmo foi dosado e, depois, misturado em uma betoneira de eixo inclinado para atender à granulometria fornecida do AMN.

AMN – Agregado miúdo natural: o pó de pedra é um material de origem mineral, dividido em grânulos, composto basicamente de SiO_2 (dióxido de silício), com diâmetro variando de 0,063 mm a 2,0 mm. Forma-se por processos industriais de britagem. Os agregados exercem grande influência nas propriedades do concreto e são materiais granulosos provenientes de rochas estáveis, sendo classificados em miúdos e graúdos. Os miúdos são representados pela areia e os graúdos, pelas britas.

AG – Agregados graúdos: a NBR 7211:2009 fixa as características exigidas para os agregados graúdos como aqueles que passem por peneira de 75 mm e fiquem retidos na peneira de 4,75 mm. O agregado graúdo utilizado em blocos de concreto é a chamado brita zero, cuja granulometria varia de 4,8 mm a 9,5 mm. O concreto dos blocos e dos corpos de prova utilizou agregados nas seguintes granulometrias: pó de pedra de 0 a 5 mm, brita 00 de 3 a 5 mm, e brita 0 de 5 a 12 mm.

Água: a água utilizada na produção dos blocos de concreto da fábrica foi coletada de poço artesiano localizado na região da pedreira, bastante distante de áreas de contaminação.

Cimento: foi utilizado o cimento *CPVARI PLUS*, da HOLCIM do Brasil S.A.

Aditivo: para melhorar o acabamento, aumentar a resistência, e reduzir a fissuração, a permeabilidade e a água, foi usado o aditivo MasterCast 610, da Basf.

Programa experimental

Inicialmente, determinou-se a granulometria de uma amostra do agregado miúdo natural (pó de pedra) utilizado na fabricação dos blocos. Isso feito, foram enviados à recicladora os percentuais das peneiras da curva granulométrica do pó de pedra utilizado na fabricação dos blocos de concreto. Recebido da recicladora o vidro triturado, o mesmo foi dosado e misturado em betoneira de eixo inclinado. O novo agregado miúdo de vidro triturado foi submetido ao laboratório para obter-se a curva granulométrica e confirmar sua semelhança com o pó de pedra utilizado. O resultado indicou que o material era adequado aos objetivos programa experimental.

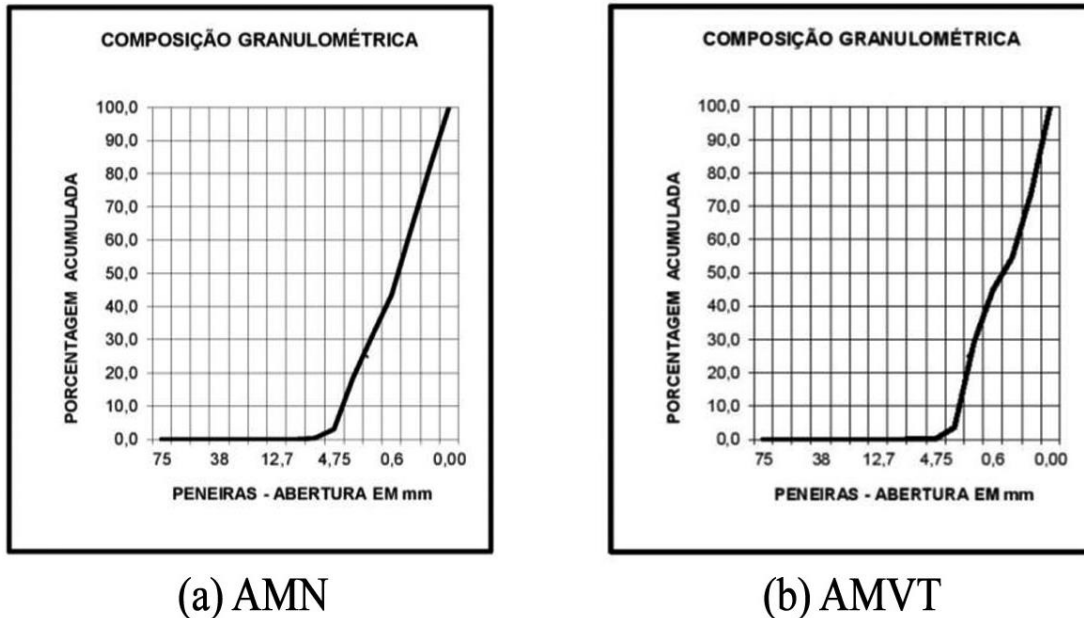


Figura 4 – Curvas de granulometria do AMN e AMVT.

A fábrica informou que a composição dos traços incluiu cimento, areia artificial (pó de pedra), areia grossa, brita 00 (pedrisco), brita 0 em quilos, e um litro de aditivo Rheomix 610. Deu-se início à produção dos blocos.

Para 4 MPa	74:458:140:105	ou	1:6,19:1,89:1,42	ou	1:9,50
Para 6 MPa	101:447:136:102	ou	1:4,43:1,35:1,01	ou	1:6,78
Para 8 MPa	123:435:133:100	ou	1:3,54:1,08:0,81	ou	1:5,43
Para 10 MPa	158:419:128:96	ou	1:2,65:0,81:0,61	ou	1:4,07

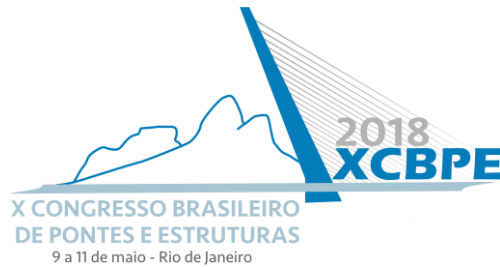
Foram utilizadas as seguintes quantidades de água e fatores água/cimento:

Para 4 MPa	74 kg de cimento e	64,66 litros de água – $a/c = 0,87$
Para 6 MPa	101 kg de cimento e	59,69 litros de água – $a/c = 0,59$
Para 8 MPa	123 kg de cimento e	64,66 litros de água – $a/c = 0,52$
Para 10 MPa	158 kg de cimento e	59,69 litros de água – $a/c = 0,37$

O agregado miúdo natural teve módulo de finura de 2,41, massa específica real de 2,66 kg/dm³, e massa específica aparente seca de 1,51 kg/dm³. O agregado miúdo de vidro triturado, teve módulo de finura de 2,06, massa específica real de 2,54 kg/dm³, e massa específica aparente seca de 1,35 kg/dm³.

Fabricação dos blocos

Foram utilizadas máquinas e tecnologia da Argamil, empresa sediada em Três Rios, RJ. A cura dos blocos ocorreu em câmara úmida a vapor. Ao iniciar-se a vaporização, o



cimento já estava sendo hidratado. Os blocos permaneceram na câmara até que essa atingisse a 60°C, altura em que os blocos não mais absorviam água.

Os ensaios

A seleção dos blocos obedeceu aos seguintes critérios: blocos (1) em conformidade com a NBR 6136:2014; (2) com acompanhamento laboratorial; (3) com controle de qualidade; (4) homogêneos; (5) compactos; (6) com cantos vivos; e (7) com ausência de trincas e imperfeições. Os ensaios à compressão simples contemplaram bloco único, e prisma com três blocos, em conformidade com a NBR 15961-2:2011, e a NBR 12118:2013.

A determinação das propriedades dimensionais foi realizada com paquímetros com resolução de 0,01mm, conforme NBR 6136:2014. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do IFSudesteMG, Juiz de Fora.

Os blocos de concreto foram produzidos com pó de pedra como AMN, e com AMVT. Os blocos ensaiados com AMN estavam em conformidade com a NBR 6136:2014 e foram ensaiados na resistência à compressão em conformidade com a NBR 12118:2014.

Análise dos resultados

Ensaio: usou-se concreto nas resistências de 4 MPa, 6 MPa, 8 MPa e 10 MPa (para análise de resistência à compressão e à flexo-compressão) nas medidas de 14 cm x 19 cm x 29 cm, com peso médio de 8,7 kg, na idade de 28 dias. Ensaíram-se três corpos de prova para cada resistência, num total de doze com a utilização do agregado AMN, e doze com AMVT.

Resistência à compressão: no carregamento dos corpos de prova para o teste de resistência dos blocos de 4 e 6 MPa à compressão, operaram-se os dispositivos de comando da prensa de forma que a tensão aplicada, calculada em relação à área bruta, aumentasse progressivamente, sem choques, à razão de $0,15 \pm 0,03$ MPa/s, o que corresponde a $1,5 \pm 0,3$ kgf/cm².s. Fez-se o mesmo com relação aos blocos de 8 e 10 MPa, à razão de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s, o que corresponde a $0,5 \pm 0,1$ kgf/cm².s.

O coeficiente de variação apresentou valores mínimo de 1,45%, e máximo de 9,50%. Aplicado o Teste de Grubbs, obteve-se o valor mais alto de 1,13 (tomado o valor de 1,15 como valor crítico) nos ensaios com três amostras.

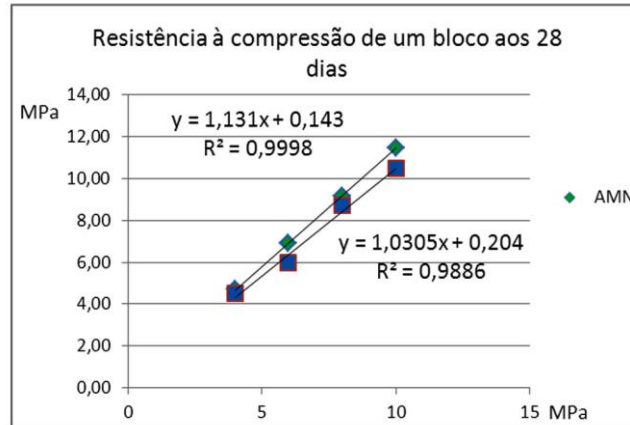


Figura 6 – Curvas de correlação e coeficiente de correlação linear de *Pearson* para a resistência à compressão axial em blocos de concreto com AMN e AMVT aos 28 dias.

O coeficiente de correlação linear de *Pearson* indica elevado grau de correlação entre a resistência do bloco com AMN e a do bloco com AMVT. A inclinação da reta de regressão, que é da ordem de 13% para o bloco de concreto fabricado com AMN, e de 3% para o bloco de concreto fabricado com AMVT, indica que a resistência do concreto com AMVT é cerca de 10% menor que a resistência do bloco de concreto com AMN.

O diagrama de dispersão da Figura 7 representa uma análise da correlação dos valores de resistência obtidos nos ensaios dos blocos de concreto com AMN e AMVT. O coeficiente de correlação linear de *Pearson* indica um forte grau de correlação entre a resistência do bloco com AMN e a resistência do bloco com AMVT. A inclinação da reta de regressão, que é da ordem de 91%, indica que a resistência do concreto com AMVT é cerca de 9% menor que a resistência do concreto com AMN.

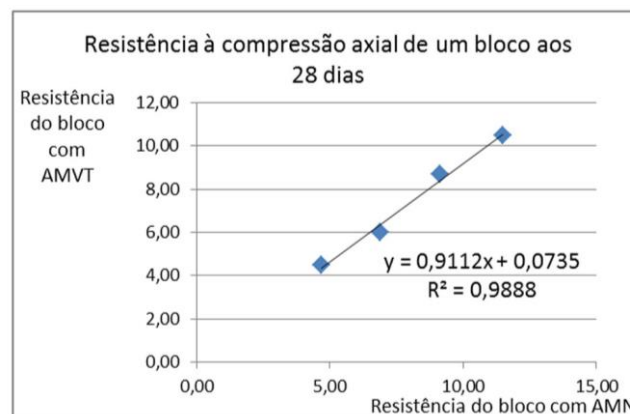
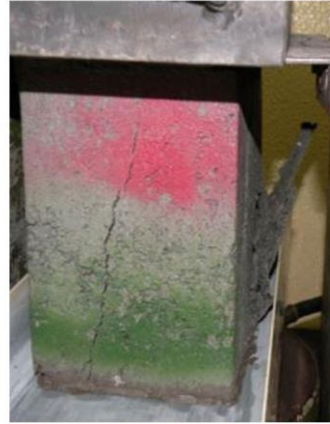


Figura 7 – Curva de correlação e coeficiente de correlação linear de *Pearson* para a resistência à compressão axial dos blocos de concreto com AMN e AMVT aos 64 dias.



(a) Início do ensaio



(b) Rompimento por fendilhamento

Figura 8– Ensaio de compressão do bloco em prensa Cotenco de 0 a 120 tf.

Resistência à compressão do prisma com três blocos

Optou-se por prismas de três blocos em favor da redução dos efeitos de confinamento dos pratos da máquina sobre os blocos das extremidades. Embora os prismas de três blocos sejam mais representativos do modo de ruptura, o bloco do meio geralmente permanece livre dos efeitos de confinamento. O argamassamento também pode alterar a resistência da alvenaria, a distribuição de tensões, a fissuração e a ruptura das paredes estruturais. A ausência de argamassa nos septos dos blocos provoca concentração de tensões, reduzindo a resistência da alvenaria.

O capeamento dos blocos foi realizado com cimento e enxofre, e o tipo de assentamento adotado foi o argamassamento total, onde a argamassa é colocada em todas as faces das paredes dos blocos, incluindo os septos transversais.

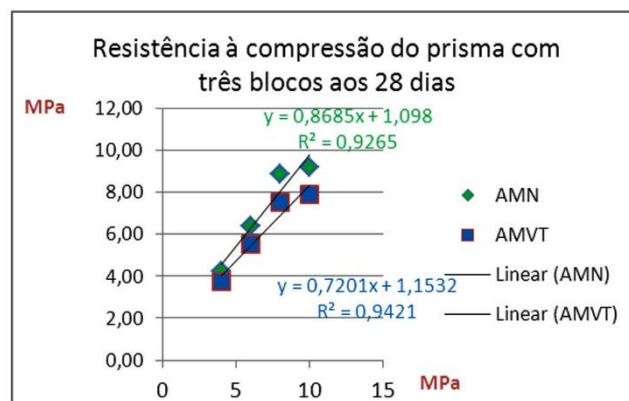


Figura 9 – Curva de correlação e coeficiente de correlação linear de *Pearson* entre a razão AMN:AMVT, e estimativa de resistência à compressão axial nos prismas com AMN/AMVT.

Para comprovar a resistência à compressão do prisma, foram empregados 24 corpos de prova. O coeficiente de variação teve valores mínimo de 3,31%, e máximo de 16,31%. O valor mais alto com a aplicação do Teste de Grubbs foi de 1,14, sendo o índice de 1,15 considerado como valor crítico.

O coeficiente de correlação linear de *Pearson* indica forte correlação entre a resistência do prisma com três blocos de AMN e a do prisma com AMVT. A inclinação da reta de regressão, que é de 86% para o prisma com AMN, e de 72% para o prisma com AMVT, indica que a resistência do prisma com AMVT é cerca de 14% menor que a resistência do prisma com AMN. A Figura 10 mostra que o coeficiente de correlação para a curva de ajuste da razão AMN/AMVT, com relação à resistência estimada, apresenta uma correlação um pouco fraca, o que parece indicar que, na razão entre a resistência do prisma com AMN e a resistência do prisma com AMVT em relação à resistência estimada, não existe correlação.

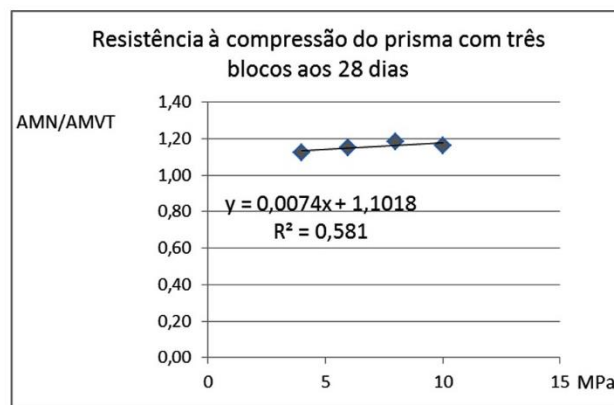


Figura 10 – Curva de correlação e coeficiente de correlação linear de *Pearson* para razão AMN:AMVT, e estimativa de resistência à compressão axial nos prismas com AMN/AMVT.



(a) Início do ensaio

(b) Rompimento

(c) Prisma rompido

Figura 11 – Ensaio de resistência à compressão do prisma com três blocos.

Conclusões

Este artigo mostra que os ensaios de compressão axial de blocos apresentaram resultados superiores às resistências estimadas, tanto para blocos com AMN como com AMVT, ainda que os blocos produzidos com AMVT tenham apresentado resultados inferiores aos com AMN. Verificou-se, assim, a viabilidade dos blocos AMVT, com a vantagem da utilização de material reciclado.

Quanto aos ensaios de compressão axial em prismas com três blocos, os resultados obtidos com AMVT foram inferiores aos obtidos com AMN, e ficaram abaixo da resistência estimada. Isso pode ser atribuído à maior suscetibilidade do prisma à instabilidade, pois o bloco intermediário não recebe a influência direta do atrito com as placas da prensa.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6136 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. NBR 8949: Paredes de alvenaria estrutural ensaio à compressão simples. Rio de Janeiro, 1985.
- _____. NBR 12118 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. ABNT - Rio de Janeiro, 2013.
- _____. NBR 15961-1 – Alvenaria estrutural - Blocos de concreto - Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. NBR 15961-2 – Alvenaria estrutural - Blocos de concreto - Parte 2: Execução e controle de Obras. ABNT - Rio de Janeiro, 2013.
- METHA, K.P., MONTEIRO, P.J.M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3ª edição. São Paulo, Editora Pini, 2008.
- NEVILLE, A.A., Propriedades do concreto. São Paulo, Editora Pini, 1982.
- PREIZAL, A. Estudo Experimental da Resistência de Blocos de Concreto com vidro como Agregado Miúdo. Niterói: UFF. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense. 2015.
- SÁNCHEZ, E. Nova normalização brasileira para a alvenaria estrutural. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2013.