

## Influência do tipo de agregado na resistência e deformabilidade de blocos estruturais produzidos com concreto seco: estudo numérico, experimental e estatístico

### Aggregate type influence on strength and deformability of structural zero-slump concrete blocks: numerical, experimental, and statistical study

Cleber Eduardo Fernandes Leal<sup>1</sup> , Wallison Angelim Medeiros<sup>1</sup> , André Kazunori Maebara<sup>1</sup>,  
Douglas Henrique da Silva<sup>1</sup>, Guilherme Aris Parsekian<sup>1</sup> , André Luis Christoforo<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil. Rodovia Washington Luís, km 235-SP-310, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil.

e-mail: cleber.efi@hotmail.com, wamedeiros@ufscar.br, andremaebara@gmail.com, dooug.henrique1@gmail.com, parsekian@ufscar.br, alchristoforo@ufscar.br

#### RESUMO

O comportamento da alvenaria estrutural resulta do desempenho de cada componente: unidades, juntas de argamassa, grautes e armaduras. Comercialmente, os blocos para alvenaria são produzidos com concreto seco ou zero-slump. Sua dosagem e propriedades físicas se diferem consideravelmente dos concretos convencionais e dependem da eficiência de compactação das máquinas vibroprensas. Ensaiar elementos de alvenaria em tamanho natural é dispendioso e requer uma infraestrutura específica. Nessa perspectiva, modelagens computacionais baseadas em formulações numéricas como o Método dos Elementos Finitos (FEM) podem se tornar alternativas viáveis e de grande potencial. Este trabalho objetiva analisar numérica e experimentalmente a influência do tipo de agregado nas propriedades físicas e, sobretudo, mecânicas (módulo secante e resistência à compressão) de blocos vazados de concreto para alvenaria estrutural. Foram testadas três resistências de bloco (6, 12 e 24 MPa), contendo três tipos de agregado (basalto, gnaiss e calcário). Dos resultados, observou-se que em blocos menos resistentes a porosidade das misturas influenciou mais as propriedades mecânicas que a rigidez do agregado. À medida que os concretos se tornam mais densos e resistentes, esse comportamento muda. Os modelos implementados e calibrados pelos resultados experimentais reproduziram satisfatoriamente o modo de ruptura dos blocos, os resultados de módulo e de resistência.

**Palavras-chave:** Alvenaria estrutural; Blocos vazados de concreto; Agregados para concreto; Propriedades mecânicas; Modelagem computacional.

#### ABSTRACT

The structural masonry behavior results from the performance of each component: units, mortar joints, grouts, and reinforcement. Commercially, masonry blocks are made with called dry or zero-slump concrete. Its dosage and physical properties differ considerably from conventional concretes and depend on vibropress machines compaction efficiency. Testing full-size masonry elements is expensive and demand a specific infrastructure. Thus, computer modeling based on numerical formulations such as the Finite Element Method (FEM) can become viable and high potential alternatives. This work aims to analyze numerically and experimentally the influence of aggregate type on physical and, mainly, mechanical properties (ultimate strength and secant deformation module in compression) of hollow concrete blocks for structural masonry. Units of three different strengths (6, 12 and 24 MPa) and containing three different aggregate types (basalt, gneiss, and limestone) were tested. From results, it was observed that in less resistant blocks, the mixtures porosity influenced mechanical properties more than aggregate stiffness. As concretes become denser and stronger, this behavior changes. The models implemented and calibrated by the experimental results were satisfactory in reproducing the failure mode of the blocks, secant modulus and compressive strength results.

**Keywords:** Structural masonry; Hollow concrete blocks; Concrete aggregates; Mechanical properties; Computational modeling.

## 1. INTRODUÇÃO

O comportamento mecânico dos elementos em alvenaria estrutural resulta da associação de contribuições fornecidas por cada componente. Dentre os componentes (blocos, juntas de argamassa, graute e armaduras), os blocos são os que mais influenciam na resistência à compressão do conjunto. Representam as unidades básicas da alvenaria, tendo sua fabricação, distribuição, aceitação e testagem reguladas por normalização específica. Quando produzidos com concreto, os blocos para alvenaria podem conter, além de cimento Portland, água e aditivos; agregados de diferentes naturezas, desde que as propriedades físicas/mecânicas do produto resultante atendam aos limites propostos no Item 5.3 da NBR 6136 [1]. Os agregados, por sua vez, devem apresentar características em conformidade com as especificações da NBR 7211 [2].

Apesar dos trabalhos já desenvolvidos sobre o papel dos agregados em concretos convencionais e de alta resistência (AITCIN e MEHTA [3]; MAGALHÃES *et al.* [4]; MEDDAH *et al.* [5]; HONG *et al.* [6]; VISHALAKSHI *et al.* [7]; LEAL *et al.* [8]), ainda há uma carência de informações acerca de sua influência na resistência e deformabilidade dos concretos especiais, entre os quais se destaca o concreto tipo seco ou zero slump. Menor ainda é a representatividade de estudos envolvendo o comportamento mecânico dos produtos/artefatos obtidos a partir de tais misturas. Esse é o caso dos blocos vazados para alvenaria estrutural, cujo processo produtivo possui características peculiares e é fortemente dependente das energias de compactação e vibração empregadas na etapa de moldagem. Nesse sentido, conhecer e controlar as propriedades físicas/mecânicas da unidade de alvenaria se faz importante quando se buscam edificações mais seguras e eficientes.

Muitas das vezes, porém, ensaiar estruturas completas ou mesmo elementos estruturais se torna algo oneroso, em função da infraestrutura necessária, instrumentação específica, dos tempos de preparo e execução. Em condições em que custo e infraestrutura para os testes são as variáveis limitantes, o uso de métodos numéricos como o Método dos Elementos Finitos (MEF) pode representar uma solução eficaz, versátil e de grande viabilidade na abordagem de problemas de engenharia [9].

Cabe salientar que, apesar do grande potencial de representatividade dos modelos computacionais, sua validação é necessária. Busca-se então fazê-la por meio de comparações com os resultados e modos de falhas observados em análises experimentais. Entende-se, portanto, a simulação numérica não como substituta, mas como ferramenta complementar à realização dos ensaios; valendo-se dos resultados de laboratório para sua devida calibração, em direção a uma reprodução cada vez mais ampla e fiel do que de fato ocorre nas estruturas. Sob essa perspectiva, este trabalho propõe avaliar numérica e experimentalmente a influência de agregados com três origens mineralógicas distintas (calcário, basalto e gnaisse) nas resistências à compressão, à tração e no módulo de deformação secante de três classes de blocos vazados de concreto para alvenaria estrutural (6, 12 e 24 MPa), produzidas em escala industrial e com o emprego misturas do tipo zero-slump.

### 1.1. Agregados e sua influência nos concretos

Até o final do século XIX, os agregados eram vistos apenas como materiais de preenchimento, mesmo representando cerca de 70% a 80% do volume dos concretos convencionais. Considerados inertes, tinham como única finalidade baratear a produção do concreto. Para sua aceitação, bastavam apresentar resistência mecânica. Hoje, essa concepção já não cabe. Após a ocorrência de desastres como os relacionados à reação álcali-agregado (reação expansiva causada pela combinação entre sódio e potássio presentes no cimento e compostos reativos contidos nos agregados), a interferência de propriedades físicas e químicas dos agregados no comportamento do concreto passou a ser levada em consideração [10].

Segundo AQUINO *et al.* [11], a dureza, massa específica e módulo de elasticidade dos agregados são os principais intervenientes na retração dos concretos por secagem. Investigando concretos com diferentes teores de calcário em substituição da areia silicosa convencional (0, 20, 30, 40, 50 e 100%), observam reduções significativas de retração, sobretudo, acima de 40%. KALRA e MEHMOOD [12] afirmam que a diferença entre os módulos de deformação dos agregados e da matriz cimentícia no concreto faz com que essas duas regiões se retraiam de maneira diferente, ocasionando a microfissuração do composto e se tornando a principal razão de sua baixa resistência à tração. Destacam ainda que a qualidade da Zona de Transição na Interface (ZTI) agregado-matriz depende do tamanho, forma, textura, petrografia e mineralogia do agregado.

ROCCO e ELICES [13] estudaram a influência da forma e tamanho do agregado na resistência à tração e módulo de deformação de concretos convencionais. Constataram que os agregados britados (de formatos angulares) produziram concretos mais rígidos que àqueles contendo agregados esféricos. O aumento no tamanho

do agregado, independentemente de sua forma, gerou decréscimo nos módulos dos concretos; e a resistência à tração não se mostrou influenciada pelo tamanho nem pelo formato do grão.

NETO *et al.* [14] estudaram os efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo na deformabilidade de concretos com alta resistência. Produziram oito traços, contendo agregados de origem basáltica e granítica em diâmetros máximos de 19 e 9,5 mm, respectivamente. Embora teor e diâmetro dos agregados pouco tenham influenciado o módulo dos concretos, o tipo de agregado basalto (mais rígido) resultou em valores de módulo maiores que das misturas com granito; demonstrando que as propriedades elásticas do concreto refletem as propriedades elásticas de seus constituintes.

## 1.2. Particularidades do concreto seco

Entre os concretos ditos especiais está o concreto seco, também conhecido por “concreto farofa”, “zero-slump” ou ainda “sem abatimento”. Segundo OTT e ANDREAS [15], seu uso teve início no período pós Segunda Guerra Mundial e foi impulsionado pela escassez e alto custo dos materiais de construção. São classificados como concretos secos: o concreto projetado, empregado na construção de túneis e contenção de encostas; o concreto utilizado na confecção de blocos de alvenaria, tubos; e o concreto compactado a rolo [16].

Quando o concreto zero-slump é utilizado na produção de blocos para alvenaria, as principais características observadas nos agregados são: tipo de rocha, dimensão máxima, formato, rugosidade superficial, dureza dos grãos, distribuição granulométrica e limpeza do material [17]. Segundo FERNANDES [17], o tipo de rocha interfere na durabilidade dos moldes usados para conformar as peças. Agregados de quartzo, por exemplo, são mais abrasivos que agregados de calcário. A dimensão máxima do grão também influi na durabilidade e tempo de preenchimento dos moldes. Seu formato controla a trabalhabilidade da mistura, adensamento e acabamento dos artefatos. Sua dureza eleva a resistência do concreto. Limpeza e rugosidade da superfície garantem a aderência do agregado à pasta de cimento, afetando as resistências de tração e compressão das misturas [17].

RODRIGUES [18] aponta que no concreto seco as propriedades no estado endurecido estão relacionadas às propriedades do estado fresco de forma muito mais pronunciada do que no concreto plástico. De acordo com FERNANDES [17], no concreto plástico a quantidade de pasta de cimento disponível geralmente é grande e supre com facilidade as necessidades de trabalhabilidade, preenchimento de vazios e acabamento das peças. A quantidade de brita também é maior no concreto plástico. Enquanto um traço de concreto convencional 1:2:3 (cimento:areia:brita) possui cerca de 30,4% do volume total em pasta, um traço para bloco de concreto de vedação 1:12:8 (cimento:areia ou pó de pedra:pedrisco) contém apenas 19,1%.

Ao contrário dos concretos plásticos convencionais, concretos secos não seguem à risca a conhecida “lei de Abrams” [18], tal como observado na Figura 1. No concreto convencional a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação água/cimento, ao passo que, o concreto seco tem sua resistência determinada pelo grau de compactação/adensamento fornecido pelo equipamento empregado [17].

SULISTYANA *et al.* [20] avaliaram 9 graus distintos de compactação na obtenção de concretos secos. Identificaram uma relação direta entre a intensidade de compactação e a resistência do material, de tal forma que, quanto maior a pressão aplicada, maior a resistência obtida. Evidenciou-se também que misturas com maior coesão necessitam de maior pressão para atingir um estado ótimo de compactidade. Além da pressão de compactação, a vibração na produção do concreto seco contribui retirando ar do material e melhorando sua resistência. A intensidade de vibração na moldagem dos blocos foi estudada por ADRIANO [21]. Produziram-se blocos com

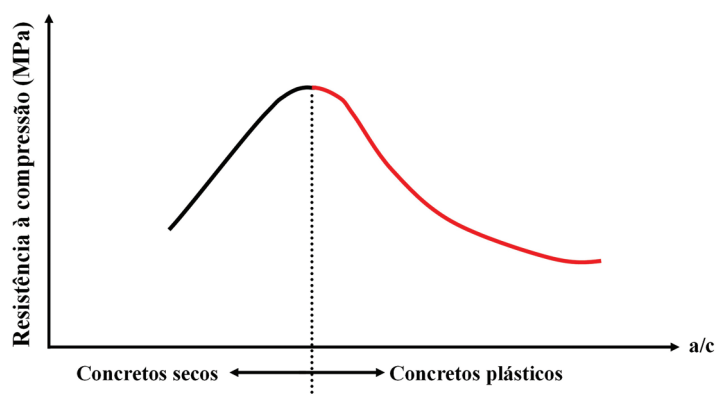


Figura 1: Resistência à compressão em função da elevação da relação água/cimento OLIVEIRA [19].

diferentes acelerações nas fôrmas da máquina vibrocompressora e, dos resultados, constatou-se que a resistência à compressão dos blocos cresceu, a uma taxa próxima da linear, com o aumento da vibração.

Outra propriedade de grande interesse no concreto seco corresponde à coesão ou “liga” da mistura. Na fabricação de blocos para alvenaria a coesão corresponde à capacidade do material em manter os artefatos produzidos íntegros após a moldagem ou desforma, de possuírem arestas bem definidas e resistência aos impactos do transporte. No concreto seco, a coesão é alcançada pela combinação entre uma distribuição granulométrica adequada de agregados (essencialmente a presença equilibrada de finos), umidade ótima da mistura, consumo equilibrado do aglomerante, processos eficazes de mistura e de adensamento [17].

### 1.3. Blocos de concreto para alvenaria: propriedades mecânicas de interesse

Atualmente os blocos vazados de concreto são fabricados em massa, por indústrias fortemente automatizadas. Na produção, o concreto de *slump* zero é fornecido para uma máquina vibroprensa (Figura 2), onde o material é compactado e vibrado dentro de moldes metálicos que definem a forma do bloco [22].

Produzir artefatos com tal concreto requer que a mistura seja ao mesmo tempo rígida o suficiente para permitir a desmoldagem imediata, e úmida o bastante para possibilitar a distribuição adequada da pasta durante os processos de mistura e vibração [15]. Variando a distribuição granulométrica dos agregados e as resistências dos blocos é possível encontrar desde estruturas porosas/abertas a superfícies lisas e compactas [22].

De acordo com PARSEKIAN *et al.* [22], a resistência à compressão é utilizada como principal medida de qualidade de um bloco, servindo também como parâmetro indireto na previsão de outras características da alvenaria. Nos blocos de concreto, quanto maior a resistência, maior também sua durabilidade. Entre os fatores que influem na resistência à compressão dos blocos está o tipo de cimento. PADILHA *et al.* [23] produziram 9 amostras de blocos combinando três tipos de cimento (CP II – F 32, CP IV 32, CPV ARI) e observaram maiores valores de resistência para o CP V ARI, tanto aos 7 quanto nos 28 dias de idade. Esse resultado reitera o fato de que, por conta das maiores resistências em poucas idades, o tipo CP V ARI é preferido pela maioria das empresas produtoras de blocos em larga escala (inclusive a empresa fabricante dos blocos para este estudo). A “precocidade” dessa classe de aglomerante se torna atrativa por permitir aos fabricantes o rápido desmolde, paletização e distribuição das unidades.

ANDOLFATO *et al.* [24] estudaram o efeito da quantidade de cimento na compactidade do concreto empregado e no comportamento mecânico dos blocos e de prismas com três blocos. Os blocos foram produzidos



**Figura 2:** Fabricação de blocos vazados de concreto em máquina vibroprensa.

em prensa pneumática e cinco diferentes traços. Argamassa de 4,9 MPa (medida em espécimes cilíndricos) foi empregada na montagem de todos os prismas. Em seguida, resistência à compressão e módulo de deformação secante à 40% da tensão última foram obtidos para os prismas e para as unidades. Para os blocos, aumentos de até 24% na relação água/materiais secos e maiores teores de cimento refletiram em aumentos no peso específico. O módulo cresceu com aumentos no teor de cimento; e os valores de resistência à compressão acompanharam os aumentos da compactidade. Para os prismas, os pesquisadores notaram que a relação de eficiência entre resistências ( $f_{pk}/f_{bk}$ ) diminuiu ao aumentar as resistências das unidades.

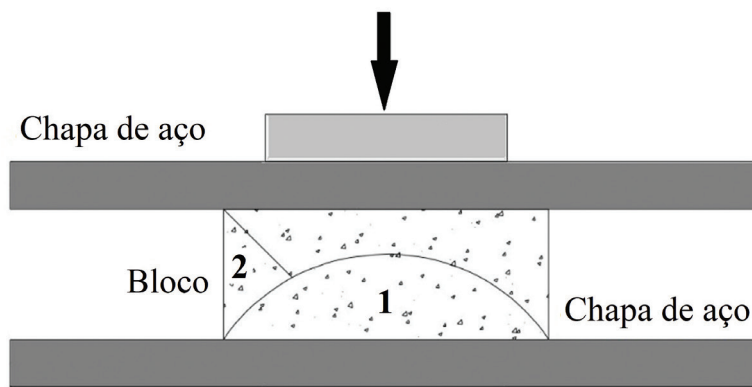
MARTINS *et al.* [25] estudaram a influência que a resistência dos blocos de concreto e o grauteamento exerceram na rigidez e resistência à compressão de prismas com duas unidades. Foram consideradas três classes de resistência para os blocos (4,5; 8 e 12 MPa na área bruta), três traços de graute (15, 20 e 25 MPa) e três traços para argamassa (5,8; 10,4 e 15,5 MPa). Dos resultados, observou-se que o módulo de elasticidade e a resistência à compressão aumentaram com a elevação na resistência das unidades, tanto nos prismas ocios quanto nos prismas cheios.

MEDEIROS [26] aponta que, embora a classificação de blocos de concreto leve em consideração sua resistência a compressão, as principais limitações estruturais da alvenaria se devem a tensões de tração. Conforme aponta PARSEKIAN *et al.* [22], a resistência à tração é determinante aos mecanismos de ruptura das unidades, como, por exemplo, na flexão dos painéis em alvenaria. Representa cerca de 10% a 20% da resistência à compressão e pode ser obtida por ensaios de tração direta (de maior complexidade e variação), ensaios de tração na flexão (onde apenas as fibras das extremidades alcançam deformações máximas), e ensaios de tração indireta, com resultados mais próximos aos de tração direta (e menor variação), porém e inferiores aos de tração na flexão. Neste trabalho, especificamente, a resistência à tração dos blocos foi obtida de forma indireta por meio da compressão sobre roletes paralelos, seguindo as especificações da ASTM C1006 [27].

MOHAMAD *et al.* [28] avaliaram o comportamento mecânico de blocos de concreto vibro-compactados. As deformações obtidas na tração corresponderam a cerca de 60% das deformações na compressão, com relação média entre deformações laterais e axiais igual a 0,61. Identificou-se um comportamento linear nas deformações de compressão até cerca de 30% da tensão de ruptura dos blocos. Sobre a forma de ruptura, os pesquisadores notaram a influência do atrito entre os blocos e conseqüente aderência entre às placas de aplicação de carga, restringindo deslocamentos laterais e originando um estado de tensões multiaxiais. A falha na compressão foi marcada pelo esfacelamento em formato cônico acima da base do bloco e esmagamento em suas laterais (Figura 3), causado pelo deslizamento da parte superior sobre a região do bloco aderida à placa.

#### 1.4. Aplicações da modelagem numérica

HAMID e CHUKWUNENYE [29] analisaram numericamente a influência do tamanho das unidades de concreto e relação altura/largura de prismas em seu comportamento à compressão. Com uso do software ANSYS foram adotados, elementos finitos tridimensionais de oito nós, na modelagem dos blocos, juntas de argamassa e das placas de aplicação de carga, cuja espessura também foi objeto de estudo. Nos resultados, observou-se que o tamanho dos blocos não afetou significativamente a resistência dos prismas. A relação altura/largura dos prismas, por sua vez, gerou estados de tensões diferentes para prismas com dois e com três blocos de altura. Enquanto no prisma de três blocos a tração lateral foi observada no bloco do meio, no prisma com duas unidades a porção central foi submetida à compressão, por conta da restrição/atrito causado pelas placas da prensa.



**Figura 3:** Modo de ruptura dos blocos na compressão: 1 – região de esfacelamento; 2 – região de esmagamento. Adaptado de MOHAMAD *et al.* [28].

Sobre as placas da prensa, os autores observaram que menores espessuras resultam em placas mais flexíveis, que induzem à ocorrência de maiores tensões laterais de tração no topo dos blocos, levando à falha prematura dos prismas. Aumentando a espessura das placas esse efeito é mitigado.

SANTOS *et al.* [30] estudaram a eficiência de modelos numéricos desenvolvidos via software ABAQUS na reprodução de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão em prismas com dois blocos de concreto. Para isso, foram considerados elementos finitos do tipo sólidos e tridimensionais (C3D8R) tanto para as juntas de argamassa quanto para os blocos. O comportamento plástico e modos de falha de ambos os materiais foram representados pelo modelo *Concrete Damage Plasticity* (CDP), assim como feito no presente estudo. Os modelos foram calibrados com resultados de duas análises experimentais distintas. Os resultados indicaram que ambas as calibrações deram origem a modelagens satisfatórias das propriedades mecânicas e da forma de ruptura dos prismas. As diferenças entre resultados numéricos e experimentais foram de 3% e 5% para a primeira e segunda calibração, respectivamente.

ABASI *et al.* [31] também investigaram, via software ABAQUS, a interferência da geometria dos prismas com blocos de concreto e do atrito com as placas de aplicação de carga em sua resposta à compressão. Uma análise paramétrica foi desempenhada utilizando elementos finitos tridimensionais e considerando diferentes relações altura/largura (de 1 a 5) e comprimento/largura (de 1 a 4) em prismas com blocos inteiros e meio blocos. Os modos de falha do concreto foram representados pelo modelo CDP. As juntas de argamassa foram simplificadas por uma superfície indeformável ao contanto normal (*hard-contact*). Para avaliar o efeito de confinamento das placas foram alternadas as condições de vinculação, ora com e ora sem atrito nas extremidades dos prismas. Observou-se o aumento em magnitude e melhor distribuição de tensões nos prismas com atrito. Prismas com duas unidades tiveram tensões na região central significativamente maiores que os prismas com cinco blocos de altura. Constatou-se que, quando mantida a condição de contato nas extremidades dos prismas, à medida que a altura dos prismas aumenta sua tensão última é reduzida; devido justamente à redução (nos blocos intermediários) do efeito de confinamento lateral causado pelas placas. Verificou-se que esse efeito também aumenta com maiores relações comprimento/largura dos blocos. A maior resistência obtida para os blocos inteiros (com maior área confinada) evidencia tal comportamento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção expõe materiais, equipamentos, normas reguladoras e procedimentos empregados no estudo. Lembrando que o mesmo objetiva analisar numérica e experimentalmente a influência do tipo de agregado na deformabilidade e resistência de blocos vazados de concreto para alvenaria estrutural.

### 2.1. Agregados utilizados e ensaios de caracterização

Os agregados utilizados na fabricação dos blocos foram: areia, pó de pedra e pedrisco; de três minerais distintos (basalto, calcário, gnaiss), conforme apresentado na Figura 4. Decidiu-se pela escolha de rochas de diferentes origens mineralógicas que representassem a maioria dos minerais empregados na construção civil. Segundo ROCUERO *et al.* [32], no Brasil, 64% da produção de brita nacional advém de rochas plutônicas (ex. granito, gnaiss, sienito), 30% são provenientes de rochas vulcânicas (basalto, riolito, diabásio), 4% de rochas calcárias (ex. calcário e dolomito) e apenas 2% de outras rochas.

Os agregados de calcário (pó de pedra e pedrisco) tiveram origem em Salto do Pirapora-SP, os de basalto (pó de pedra e pedrisco) vieram da cidade de Jaguariúna-SP, e os de gnaiss (areia, pó de pedra e pedrisco rotineiramente utilizados pela indústria parceira) foram provenientes de Guaianases-SP. Para cada agregado foram determinadas as propriedades físicas mencionadas na Tabela 1.

Amostras dos três pedriscos empregados na fabricação dos blocos (calcário, basalto e gnaiss) foram extraídas e submetidas à uma análise petrográfica, cujo objetivo foi confirmar/classificar os tipos de rocha. A análise foi visual, com o auxílio de uma lupa e de ácido clorídrico para indicar a presença de carbonatos. A Figura 5 ilustra as amostras submetidas à análise petrográfica.

### 2.2. Fabricação dos blocos

A produção dos blocos foi realizada com concreto do tipo seco por uma empresa parceira, situada em Guarulhos-SP. Foram utilizadas máquinas vibrocompressoras hidráulicas (Figura 6), automatizadas e de capacidade produtiva em torno de 4 milhões de blocos/mês. Todos as unidades foram conformadas no mesmo dia. Além dos agregados apresentados, a fábrica utilizou cimento Portland do tipo CPV-ARI, areia industrial de britagem (mesma origem do agregado gnaiss) e aditivo plastificante na composição das misturas.

Foram confeccionados blocos de três classes de resistência nominal (6, 12 e 24 MPa). Em cada classe empregou-se um traço-padrão, já utilizado pela empresa participante (Tabela 2). Para estudar os diferentes



Figura 4: Agregados utilizados na fabricação dos blocos.

Tabela 1: Propriedades físicas determinadas para os agregados.

PROPRIEDADE	NORMA REGULADORA DO ENSAIO	TAMANHO	
		MIÚDO	GRAÚDO
Composição granulométrica	NBR NM 248:2003 [33]	✓	✓
Densidade e absorção de água	NBR 16916:2021 [34]	✓	
Massa unitária e índice de vazios	NBR 16972:2021 [35]	✓	
Teor de material fino passante na peneira 75µm	NBR 16973:2021 [36]	✓	
Densidade e absorção de água	NBR 16917:2021 [37]		✓

Reduções das amostras de campo para ensaios em laboratório realizadas segundo a NBR 16915:2021 [38].

Valores de referência extraídos da NBR 7211:2009 [2].

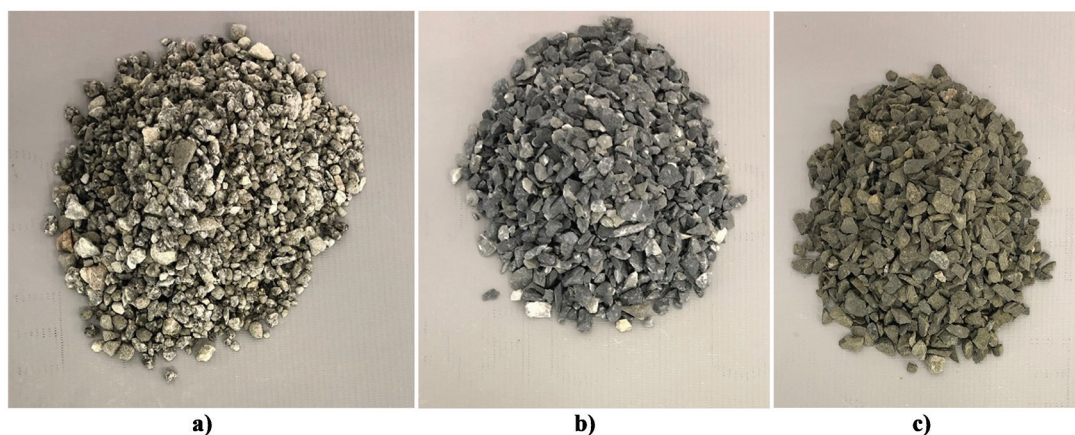


Figura 5: Agregados submetidos à análise petrográfica: a) gnaisse, b) calcário e c) basalto.



Figura 6: Vibroprensa utilizada na produção dos blocos.

Tabela 2: Traços-padrões unitários em massa para os blocos produzidos.

BLOCO	CIMENTO	AREIA	PÓ DE PEDRA*	PEDRISCO*	ADITIVO	ÁGUA
6 MPa	1	1,55	8,71	5,26	0,009	1,04
12 MPa	1	2,88	4,23	4,23	0,009	0,84
24 MPa	1	1,27	1,93	1,88	0,009	0,42

\*Agregados cujos tipos foram variados para obtenção dos traços G (gnaisse), C (calcário) e B (basalto).

agregados, adotou-se o seguinte procedimento: as quantidades de areia, cimento, aditivo plastificante e água foram fixadas para cada classe; enquanto o tipo dos agregados graúdo e miúdo foi alternado, mantendo, porém, as proporções dos traços-padrões. Assim, cada classe passou a contemplar um traço G (contendo agregados de gnaisse), um traço C (com agregados de calcário) e outro B (contendo basalto). Dessa forma, foram obtidos 9 (nove) traços para os blocos, nomeadamente, 6G, 6C, 6B; 12G, 12C, 12B; 24G, 24C e 24B.

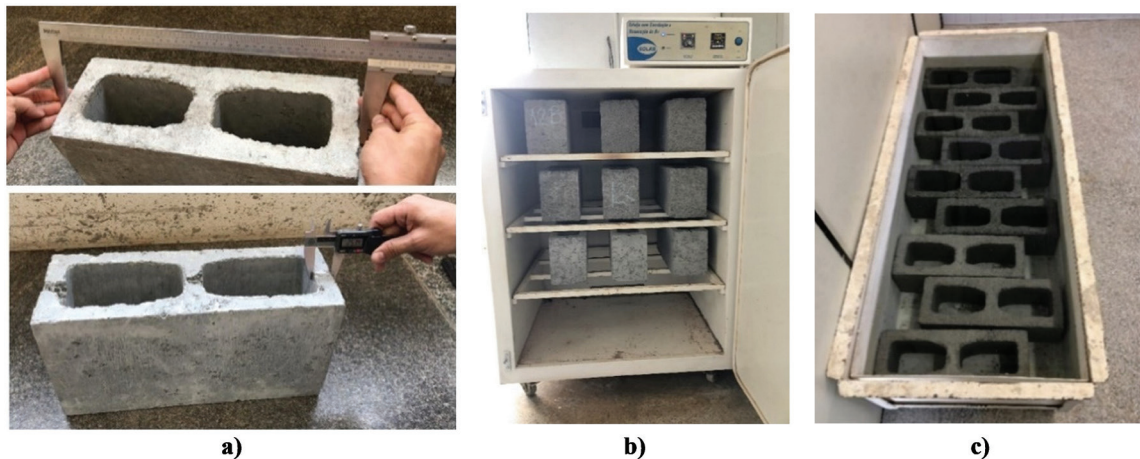
### 2.3. Caracterização dos blocos

Os blocos foram caracterizados segundo os ensaios de análise dimensional; determinação da massa seca e umidade relativa; determinação da área líquida e absorção de água (Figura 7), todos conforme as prescrições da NBR 12118 [39]. Para cada propriedade física foram realizadas 3 determinações, por classe de resistência e por tipo de agregado. Todas as unidades testadas atenderam aos requisitos da NBR 6136 [1].

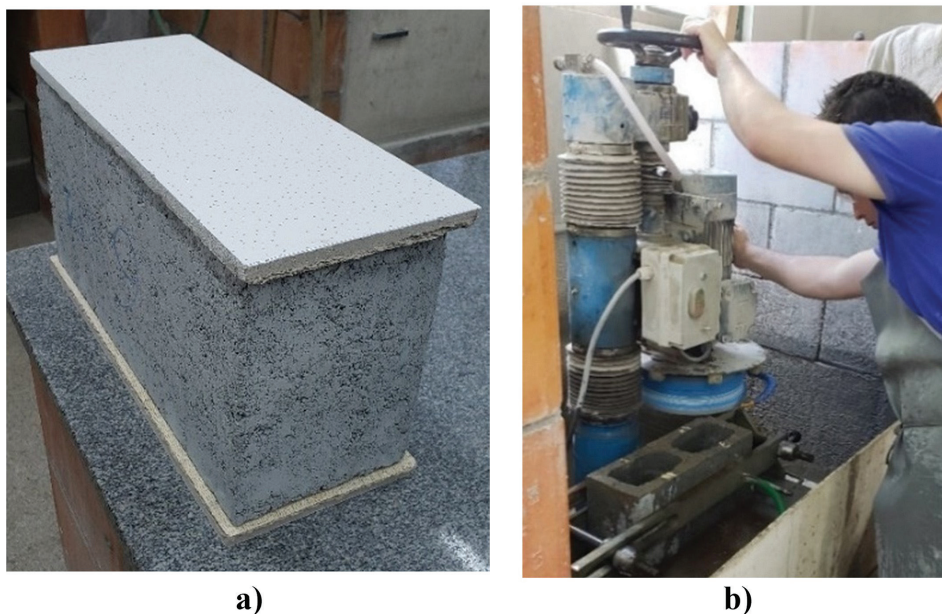
### 2.4. Avaliações experimentais

Antes dos ensaios principais, a superfície de aplicação de carga dos blocos foi regularizada com um capeamento do tipo seco, utilizando chapa de forro de fibra mineral, conhecido também como “forro-pacote” (Figura 8a). FORTES [40] testou à compressão blocos vazados de concreto com diferentes tipos de capeamento (forro-pacote, madeira compensada, chapa dura, retífica, pasta de cimento) e concluiu, pelo teste estatístico de Kruskal-Wallis, que não houve diferença significativa entre a pasta de cimento e a retífica ou o forro pacote.





**Figura 7:** Caracterização preliminar: a) análise dimensional; b) determinação da absorção de água – blocos em estufa; c) determinação da absorção de água – blocos submersos.



**Figura 8:** Preparação para ensaio: a) capeamento com forro-pacote; b) retífica.

Além disso, a utilização desse tipo de capeamento em substituição à pasta de cimento é justificada pelo fato de que os resultados selecionados para elaboração deste trabalho fazem parte de uma pesquisa de doutorado cujo objetivo é avaliar módulo e resistência das unidades após altas temperaturas. Ocorre que, após temperaturas acima dos 600 °C os blocos se encontram deteriorados a ponto de inviabilizar o capeamento convencional. Dessa forma, todos os blocos da pesquisa foram capeados com forro-pacote, inclusive os testados em temperatura ambiente, que são objetos de estudo do presente trabalho.

A espessura das placas de aplicação de carga obedeceu às recomendações da NBR 12118 [39] e os blocos ensaiados à tração tiveram seu topo e base retificados, segundo a mesma norma (Figura 8b).

O módulo de elasticidade secante e tensão última foram determinados em 4 blocos, para cada combinação de classe de resistência e tipo de agregado, totalizando 36 determinações. As deformações foram tomadas em 5% e 30% da tensão última [41]. Para isso, dois extensômetros do tipo “clip-gage” foram instalados nas paredes transversais externas dos blocos, na região central dos furos (Figura 9a).

Dada a ausência de normalização local específica para determinação da tração indireta dos blocos vazados de concreto, os ensaios foram realizados com base em procedimento adaptado da norma ASTM C1006 – 19 [42] (Figuras 9b e 9c). Para tração foram ensaiados 6 blocos, para cada combinação de tipo de agregado e classe de resistência.

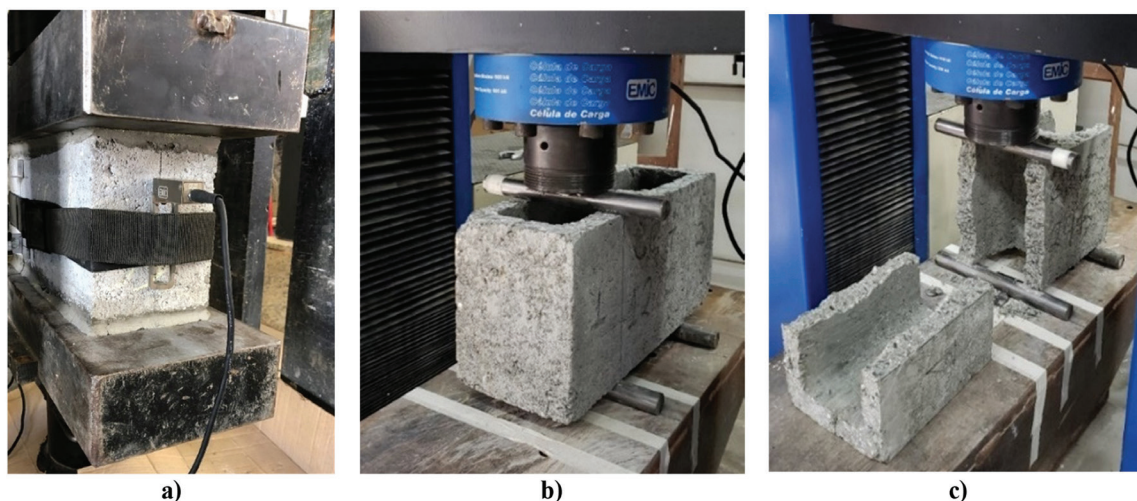


Figura 9: a) Determinação do módulo secante; b) Início ensaio de tração indireta; c) bloco rompido na tração.

## 2.5. Simulações numéricas

Os blocos vazados de concreto produzidos industrialmente são conformados em moldes “truncocônicos”, a fim de facilitar sua desmoldagem. Os blocos estudados mediam  $140 \text{ mm} \times 390 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ , com paredes da base medindo  $30 \text{ mm}$  e de topo medindo  $25 \text{ mm}$ ; com raio de mísulas de  $15 \text{ mm}$ . Para favorecer a distribuição das malhas e discretização da estrutura, alguns autores simplificam o formato dos blocos na modelagem computacional, considerando, por exemplo, seus furos internos prismáticos e desprezando a presença de mísulas nos encontros entre paredes. Neste trabalho, a simulação numérica realizada via software ABAQUS 2017 [43] reproduziu a geometria exata das unidades e placas de aplicação de carga da prensa (Figura 10a).

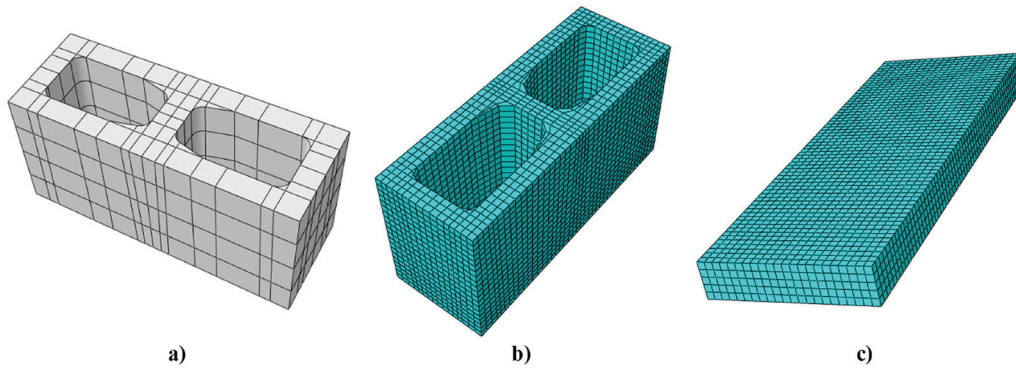
Tanto os blocos quanto os pratos da prensa foram discretizados por elementos contínuos/sólidos e hexaédricos, dotados de 8 nós, com 3 graus de liberdade em cada nó (translações ao longo dos eixos X, Y e Z). Na biblioteca do software ABAQUS [43], esse tipo de elemento recebe o nome de C3D8R.

A formulação matemática atribuída ao elemento é do tipo Lagrangiana ou “material”. Nessa formulação todo o comportamento de uma partícula é descrito em termos de suas coordenadas iniciais, ou seja, a posição onde a partícula ESTÁ é determinada em função da posição onde ela ESTAVA, no momento  $t = 0$ . Existe também a formulação do tipo Euleriana ou “espacial”. Nesse caso, todo o comportamento da partícula é expresso em função de sua posição no espaço, ocupada no momento corrente ( $t = t$ ) [44]. Em termos práticos, no ABAQUS [43] a formulação Lagrangiana admite que o elemento numérico se deforme juntamente com o material, enquanto a formulação Euleriana admite a posição do elemento como fixa no espaço, enquanto o material se movimenta dentro do elemento. Essa segunda formulação é comumente utilizada na modelagem de fluidos.

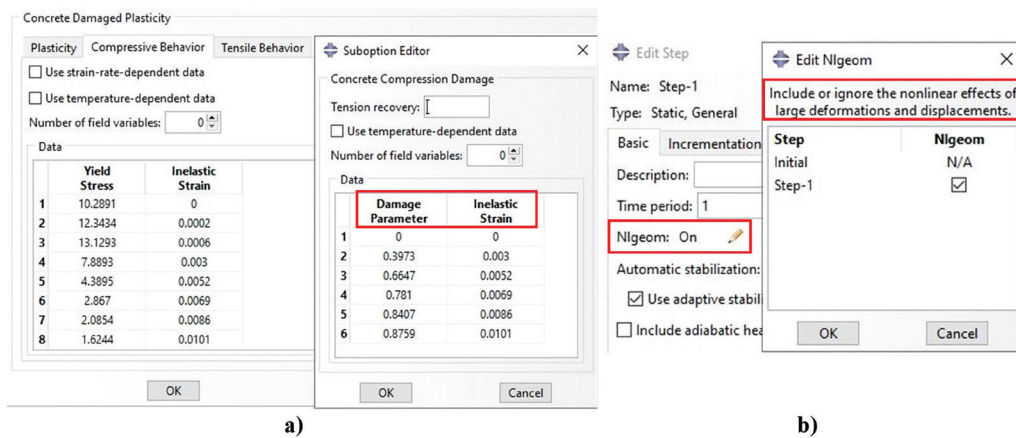
Elementos que possuem nós apenas em suas extremidades, como é o caso do adotado neste trabalho, utilizam interpolação linear em todas as direções determinar esforços e deslocamentos em pontos no interior dos elementos que não coincidam com os nós; por isso são também conhecidos como elementos lineares ou de primeira ordem. O termo “R”, no nome “C3D8R”, se refere à integração reduzida. Este processo consiste em reduzir o número de pontos de integração numérica (através da regra de Gauss) da matriz de rigidez e tem por função evitar o fenômeno de sobrestimação da rigidez que é conhecido por *locking* ou, quando relacionado à rigidez de cisalhamento, *shear-locking*.

Para cada bloco foram utilizados 7840 elementos com  $10 \text{ mm}$  de lado e 10311 nós (Figura 10b). Para cada placa foram utilizados 6820 elementos com  $10 \text{ mm}$  de lado e 8694 nós (Figura 10c).

As não-linearidades física (NLF) e geométrica (NLG) foram consideradas em todas as simulações. A NLF foi considerada pela adoção de relações constitutivas (curvas de tensão-deformação) que contemplam as deformações inelásticas e reproduzem o comportamento do material para além de um trecho elástico linear. A NFL também foi considerada na adoção de um modelo constitutivo (CDP) que considera os danos/fissuração do concreto tanto na tração quanto na compressão (Figura 11a). Muito embora o bloco não tenha altura/esbeltez suficiente para dar origem a esforços de segunda ordem significativos (como acontece em prismas de várias fiadas ou paredes de alvenaria), o equilíbrio na posição deformada foi considerado, ativando o botão “NLgeom” durante as etapas de configuração do modelo numérico no software utilizado (Figura 11b).



**Figura 10:** a) Geometria do bloco reproduzida nos modelos numéricos; b) malhas utilizadas na discretização dos blocos; c) malha utilizada na discretização das placas de aplicação de carga.



**Figura 11:** a) NLF: danos e deformações inelásticas consideradas pelo modelo constitutivo; b) NLG: ativação de análise com não linearidade geométrica no menu “Step” do ABAQUS [43].

Os mecanismos de dano à tração, dano na compressão e falha dos concretos foram controlados pelo modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), incorporado ao próprio software ABAQUS. Segundo KMIECIK e KAMISKI [45], trata-se de uma adaptação das hipóteses de Ducker-Prager, cuja superfície que representa a falha passa a ser circular pela introdução de um parâmetro  $K_c = 2/3$ . De acordo com LUBLINER *et al.* [46] e LEE e FENVES [47], o modelo CDP foi desenvolvido para prever o comportamento elastoplástico dos materiais ditos “quase frágeis” (concreto, rochas, solos coesivos), e seus principais modos de ruína são fissuração na tração e esmagamento na compressão. Para calibração e correta aplicação do modelo CDP, é necessário informar ao software alguns parâmetros:

- i. **Curvas de tensão-deformação no domínio inelástico para tração e compressão uniaxiais:** No modelo CDP as deformações elásticas ( $\epsilon_{el}$ ) e inelásticas ( $\epsilon_{inel}$ ) são calculadas de modo independente e posteriormente somadas para obtenção da deformação total ( $\epsilon$ ). As  $\epsilon_{inel}$  são extraídas das curvas tensão versus deformação inelástica informadas ao software pelo próprio usuário. Para obtenção das  $\epsilon_{el}$  o usuário deve o módulo de deformação (E) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do material representado. Na ausência de determinações experimentais, vários autores propuseram formulações matemáticas que reproduzissem as curvas tensão-deformação dos concretos. Para este trabalho considerou-se o equacionamento proposto por GUO [48] (Figura 12).

Para cada concreto que compôs os blocos (variando resistência e tipo de agregado), a densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson obtidos em laboratório foram considerados e inseridos separadamente nos modelos (no caso do software ABAQUS, isso ocorreu na aba “Material”). Essas propriedades físicas e mecânicas foram inseridas no modelo matemático proposto por Guo [48]. Como resultado, obteve-se para cada composição e resistência de bloco uma curva tensão deformação que foi informada ao modelo CDP, no software ABAQUS [43].

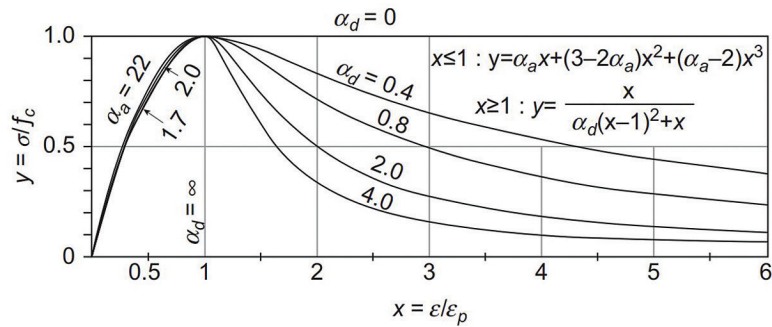


Figura 12: Relações constitutivas de tensão-deformação adotadas. GUO [48].

Tabela 3: Parâmetros gerais para comportamento plástico do concreto considerados no modelo CDP.

ÂNGULO DE DILATÂNCIA ( $\Psi$ )	EXCENTRICIDADE ( $\epsilon$ )	$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	$K_c$	VISCOSIDADE ( $\nu$ )
34°	0,1	1,16	2/3	1×10 <sup>-5</sup>

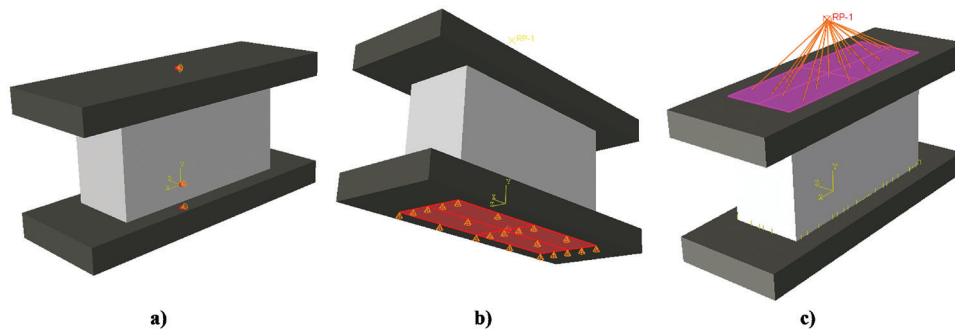


Figura 13: Condições de vinculação dos modelos: a) translações restritas em X e em Z; b) translação restrita em Y; c) aplicação do deslocamento.

- Durante a calibração dos modelos, os parâmetros  $\alpha_a$  e  $\alpha_d$  foram ajustados de forma que, após seguidas simulações, o erro percentual entre resultados numéricos e experimentais fosse o menor possível.
- ii.  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$ : Relação entre as resistências à compressão uniaxial e biaxial do concreto [43].
  - iii. **Ângulo de dilatância ( $\psi$ ):** Fisicamente, o ângulo de dilatação ( $\psi$ ) é interpretado como o ângulo de atrito interno do concreto [45]. Em simulações, usualmente se utiliza para o concreto  $\psi = 36^\circ$  ou  $\psi = 40^\circ$ . MEDEIROS [49] trata a alvenaria de blocos cerâmicos com  $\psi = 32^\circ$  e a alvenaria de blocos de concreto com  $\psi = 34^\circ$ ;
  - iv. **Viscosidade ( $\mu$ ):** Modelos de materiais que apresentam comportamento de “amolecimento” e degradação de rigidez como o concreto muitas vezes levam a dificuldades de convergência. Este parâmetro visa facilitar essa convergência admitindo viscoplasticidade nas equações constitutivas.
  - v. **Excentricidade ( $\epsilon$ ):** No modelo CDP, a superfície de potencial plástico no plano meridional assume a forma de uma hipérbole. A forma é ajustada através do parâmetro de excentricidade (excentricidade de potencial plástico). É um pequeno valor positivo que expressa a taxa de aproximação da hipérbole do potencial plástico à sua assíntota. Por padrão, o modelo CDP assume  $\epsilon = 0,1$ . Quando  $\epsilon = 0$ , a superfície no plano meridional torna-se uma linha reta, recaindo na clássica hipótese de Drucker-Prager;

Os valores adotados neste trabalho para cada um dos parâmetros apresentados estão na Tabela 3. Os valores apresentados na Tabela 3 correspondem às orientações contidas no próprio manual do software empregado [43], com exceção do “ângulo de dilatância”, que foi adotado com base em resultados observados na literatura.

Foi considerado contato do tipo *hard* para direção normal e coeficiente de 0.2 para o atrito entre o bloco e placas de carregamento. Como condições de vinculação, as translações ao longo do Eixo X (Direção 1 no software) e ao longo do Eixo Z (Direção 3 no software) foram restritas em três pontos: nó central no topo da placa superior de aplicação de carga; nó central no fundo do bloco; nó central no fundo da placa inferior (Figura 13a). A translação ao longo do Eixo Y (Direção 2 no software) foi restrita no fundo da placa inferior (Figura 13b).

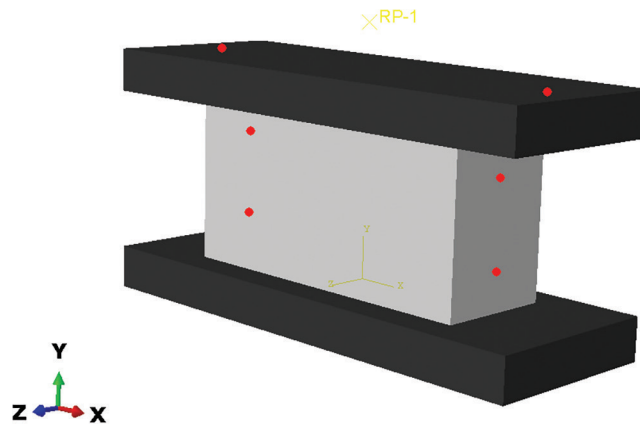


Figura 14: Posição dos clipgages no ensaio, reproduzida no software ABAQUS [43].

Tabela 4: Tratamentos experimentais delineados.

TRATAMENTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tipo de agregado	Ca	Ba	Ga	Ca	Ba	Ga	Ca	Ba	Ga
Classe de resistência (MPa)	6	6	6	12	12	12	24	24	24

Um deslocamento igual a 1.0 mm foi aplicado no sentido negativo da direção Y, em um ponto de referência (RP) acoplado a uma área no topo da placa superior (Figura 13c).

Para medição dos deslocamentos no bloco foram criados “sets” e pontos de referência (RP) para simular com exatidão a posição real dos clipgages e tomada das deformações durante os ensaios (Figura 14).

Após o processamento de cada modelo, os valores de força e deslocamento obtidos nas posições de interesse (Figura 14) foram expressos em pontos de uma curva. Em seguida, as áreas líquidas médias dos blocos (tomadas em laboratório) foram utilizadas para calcular as tensões correspondentes a cada valor de força da curva. Dividindo-se os deslocamentos nos pontos que simulavam as posições reais de cada clipgage (Figura 14) pela distância inicial entre esses pontos ( $L_0=100\text{mm}$ ) foram obtidas as deformações. A máxima tensão alcançada foi tomada como a tensão de ruptura/resistência à compressão do bloco ( $f_b$ ). Para o cálculo do módulo de deformação secante ( $E$ ), foram consideradas as tensões equivalentes a 5% e 30% de  $f_b$  e suas respectivas deformações  $E = (\sigma_{30\%} - \sigma_{5\%}) / (\epsilon_{30\%} - \epsilon_{5\%})$ .

## 2.6. Análise estatística

Antes de descrever as análises, é importante destacar que apenas os resultados obtidos experimentalmente foram submetidos ao tratamento estatístico. Neste trabalho, a modelagem numérica teve por função apenas reproduzir exclusivamente os ensaios realizados e comprovar, com base na comparação entre resultados numéricos e experimentais, a eficácia dos modelos na solução de problemas da engenharia.

Para iniciar análise estatística, um planejamento fatorial completo do tipo  $3^2$  foi considerado a fim de investigar a influência da resistência à compressão nominal dos blocos (6, 12 e 24 MPa) e do tipo de agregado (Calcário – Ca, Basalto – Ba e Gnaise – Ga) nas propriedades físicas (Área líquida –  $A_{liq}$ , Massa seca – Ms e Absorção e água – Ab) e mecânicas (Módulo de deformação secante – E, Resistência à compressão na área líquida dos blocos –  $f_b$  e Resistência à tração –  $f_t$ ) investigadas, o que resultou em 9 tratamentos (Tr) experimentais distintos (Tabela 4).

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada (ao nível de 5% de significância) para avaliar a influência dos fatores isoladamente, assim como da interação de ambos, nas propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto. O teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância) foi empregado para avaliar a influência dos níveis dos fatores nas propriedades supracitadas. Do teste de Tukey, **A** denota o tratamento experimental associado ao maior valor médio da propriedade, **B** o de segundo maior valor médio e assim sucessivamente, e **letras iguais** implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si.

Modelo de regressão geométrica (Equação 1) ajustados pelo método dos mínimos quadrados a dois parâmetros (K, N) foi utilizado com o propósito de relacionar os valores  $f_b$  e  $f_t$  para cada tipo de agregado, possibilitando avaliar se os parâmetros K e N encontrados na presente pesquisa (ajustados pelo método dos mínimos quadrados) são próximos dos valores encontrados na literatura correlata.

$$f_t = K \cdot f_b^N + \varepsilon \quad (1)$$

Procurou-se avaliar a precisão de modelos de regressão a dois parâmetros na estimativa do módulo (**E**) em função, ora da resistência a compressão ora da resistência a tração, para cada tipo de agregado. Além do modelo geométrico (Equação 1), o modelo linear (Equação 2), logarítmico (Equação 3) e exponencial (Equação 3) também foram utilizados.

$$E = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot X + \varepsilon \quad (2)$$

$$E = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln(X) + \varepsilon \quad (3)$$

$$E = \alpha_0 \cdot e^{\alpha_1 \cdot X} + \varepsilon \quad (4)$$

Das Equações de 2 a 4,  **$\alpha_i$**  consistem nos parâmetros ajustados pelo método dos mínimos quadrados, **X** é a variável independente ( **$f_b$**  ou  **$f_t$** ) e  $\varepsilon$  é o erro aleatório (Equações de 1 a 4). Adicionalmente, procurou-se também avaliar a precisão na estimativa das propriedades mecânicas (**E**,  **$f_b$** ,  **$f_t$** ) em função das propriedades físicas ( **$A_{liq}$** , **Ms**, **Ab**) combinadas (Equação 5).

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot Aliq + \alpha_2 \cdot Ms + \alpha_3 \cdot Ab + \varepsilon \quad (5)$$

Da Equação 5, **Y** consiste nas variáveis dependentes (**E**,  **$f_b$** ,  **$f_t$** ). Assim nas três equações anteriores,  **$\alpha_i$**  são os parâmetros ajustados pelo método dos mínimos quadrados e  $\varepsilon$  é erro aleatório.

Todos os modelos de regressão foram avaliados pela análise de variância (5% de significância). Pela formulação da ANOVA, valor-p (probabilidade p) menor do que o nível de significância implica que o modelo ou os termos do modelo são considerados significativos, e não significativos em caso contrário ( $p\text{-value} \geq 0.05$ ), cabendo destacar ainda que a precisão dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Caracterização dos agregados

A análise petrográfica permitiu confirmar a origem mineralógica dos agregados. Os resultados das análises macroscópicas seguem apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Resultados da análise petrográfica dos agregados.

GNAISSE	CALCÁRIO	BASALTO
Rocha metamórfica	Rocha sedimentar	Rocha ígnea
<b>Estrutura gnáissica:</b> foliação caracterizada por bandamento composicional (bandas claras ricas em quartzo e feldspato e bandas escuras ricas em biotita e hornblenda). Minerais visíveis a olho nu.	<b>Estrutura maciça:</b> com homogeneidade aparente;	<b>Estrutura maciça:</b> que reflete a aparência homogênea e compacta das rochas;
<b>Textura granoblástica:</b> rocha com minerais granulares, sem orientação;	<b>Textura não clástica:</b> químicas (formadas por precipitação química, efervesce com HCl), podendo ser calcário calcítico ( $\text{CaCO}_3$ ) ou dolomito ( $\text{MgCO}_3$ );	<b>Textura:</b> holocristalina afanítica, com minerais muito pequenos, impossível de se ver a olho nu;
<b>Classificação quanto ao tipo de metamorfismo:</b> regional/dinamotermal;	<b>Classificação quanto ao tipo de metamorfismo:</b> regional/dinamotermal;	<b>Classificação quanto à gênese:</b> extrusiva;
<b>Cor:</b> cinza, esbranquiçada com bandas escuras;	<b>Cor:</b> cinza e esbranquiçada com presença de material fino entre grão;	<b>Cor:</b> melanocrática, mais de 60% de minerais escuros;
<b>Minerais essenciais:</b> quartzo, feldspato, biotita, hornblenda.	<b>Minerais essenciais:</b> quartzo, feldspato, calcita e argilas.	<b>Mineral passível de ser identificado:</b> plagioclásio cálcico, sem quartzo.

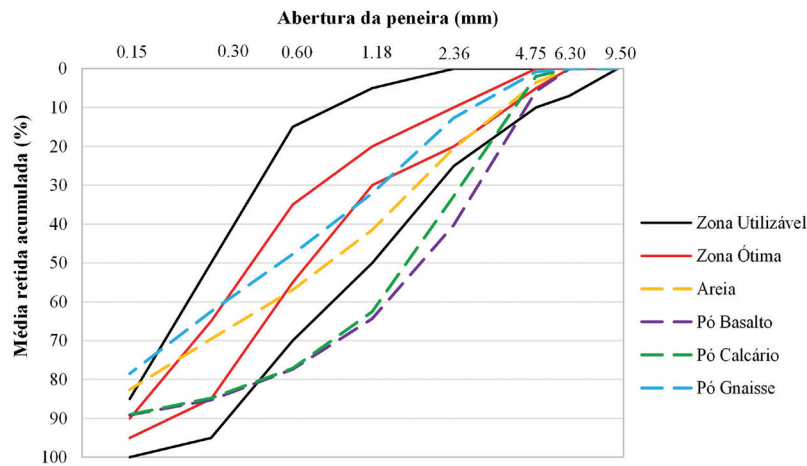


Figura 15: Granulometria dos agregados miúdos.

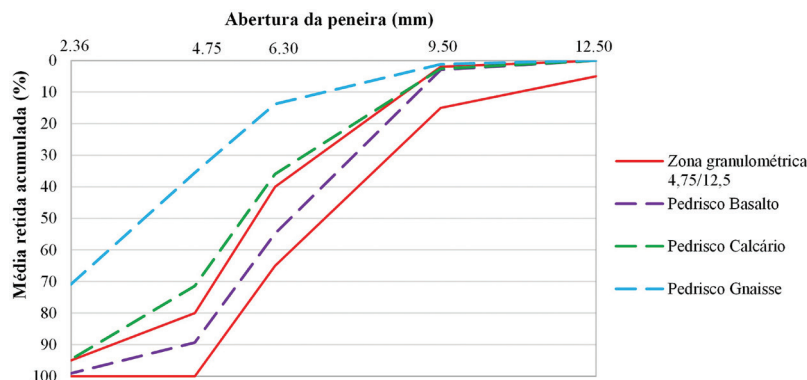


Figura 16: Granulometria dos agregados graúdos.

Os resultados da análise granulométrica para os agregados miúdos e graúdos seguem apresentados pelas Figuras 15 e 16, respectivamente.

Na Figura 15, o pó de gnaisse foi o único entre os agregados miúdos que atendeu à zona ótima de utilização da NBR 7211[2]. Com exceção da areia, que ainda se encontra dentro dos limites normativos de utilização, todos os demais agregados miúdos apresentaram menor quantidade de finos e curva acima do limite máximo superior.

Da Figura 16, nota-se que o basalto forneceu a distribuição granulométrica mais coerente com as especificações da NBR 7211[2], estando dentro dos limites ótimos. Enquanto isso, os demais agregados graúdos se mostraram mais finos, com destaque para o gnaisse, bem abaixo do limite inferior de utilização. Trata-se do agregado comumente utilizado pela empresa fabricante dos blocos e que confere nome aos traços 6G, 12G e 24G. Embora esteja fora das faixas ótimas da normalização, possui uma distribuição granulométrica baseada em estudos de otimização de traço da empresa fabricante dos blocos, com o objetivo de fornecer melhor aparência (acabamento), compacidade das misturas e menor desgaste das fôrmas.

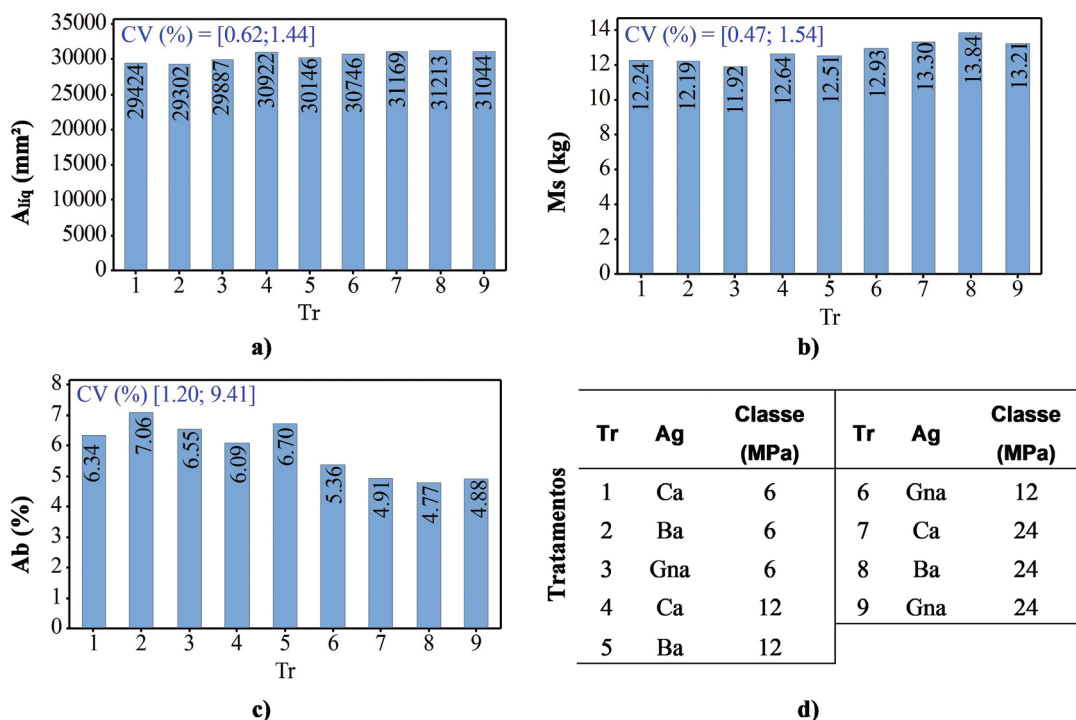
Os valores da massa unitária e densidade obtidos para os agregados são exibidos na Tabela 6. Observa-se que o agregado de maior densidade entre os testados foi o basalto, tanto na forma de agregado graúdo quanto miúdo. Em segundo lugar ficou o calcário e, por último, o gnaisse. Para massa unitária dos agregados miúdos no estado solto o contrário ocorreu: o maior valor foi obtido pelo agregado de gnaisse, seguido do calcário e, abaixo, o basalto. A areia, presente em todos os traços, apresentou densidade de valor equivalente ao pó de gnaisse. Sua massa unitária, porém (tanto no estado solto quanto compactado), superou os resultados de todos os agregados miúdos estudados.

### 3.2. Resultados de caracterização dos blocos

Para cada um dos 9 tratamentos experimentais estabelecidos na seção 2.6 (Figura 17d), os valores médios e coeficientes de variação (CV) para as propriedades físicas de área líquida ( $A_{liq}$ ), massa seca ( $M_s$ ) e absorção

**Tabela 6:** Médias dos resultados de massa unitária e densidade dos agregados.

MATERIAIS	MASSA UNITÁRIA (kg/m³)		DENSIDADE (g/cm³)	
	VALOR MÉDIO SOLTO	VALOR MÉDIO COMPACTADO	CONDIÇÃO SECA	COND. SATURADA SUPERFÍCIE SECA
Areia	1666.76	1815.84	2.482	2.551
Pó de basalto	1501.64	1613.61	2.715	2.807
Pó de calcário	1464.87	1645.37	2.516	2.594
Pó de gnaise	1550.77	1761.69	2.462	2.542
Pedrisco de basalto	1465.71	1566.82	2.990	2.910
Pedrisco de calcário	1491.61	1535.90	2.750	2.720
Pedrisco de gnaise	1493.28	1535.90	2.660	2.580



**Figura 17:** Propriedades físicas dos blocos: a) área líquida; b) massa seca; c) absorção de água.

**Tabela 7:** Umidade relativa dos blocos, por tratamento.

TRATAMENTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Umidade Relativa (%)	26,9	24,6	29,4	41,6	39,6	44,7	47,5	56,5	52,5

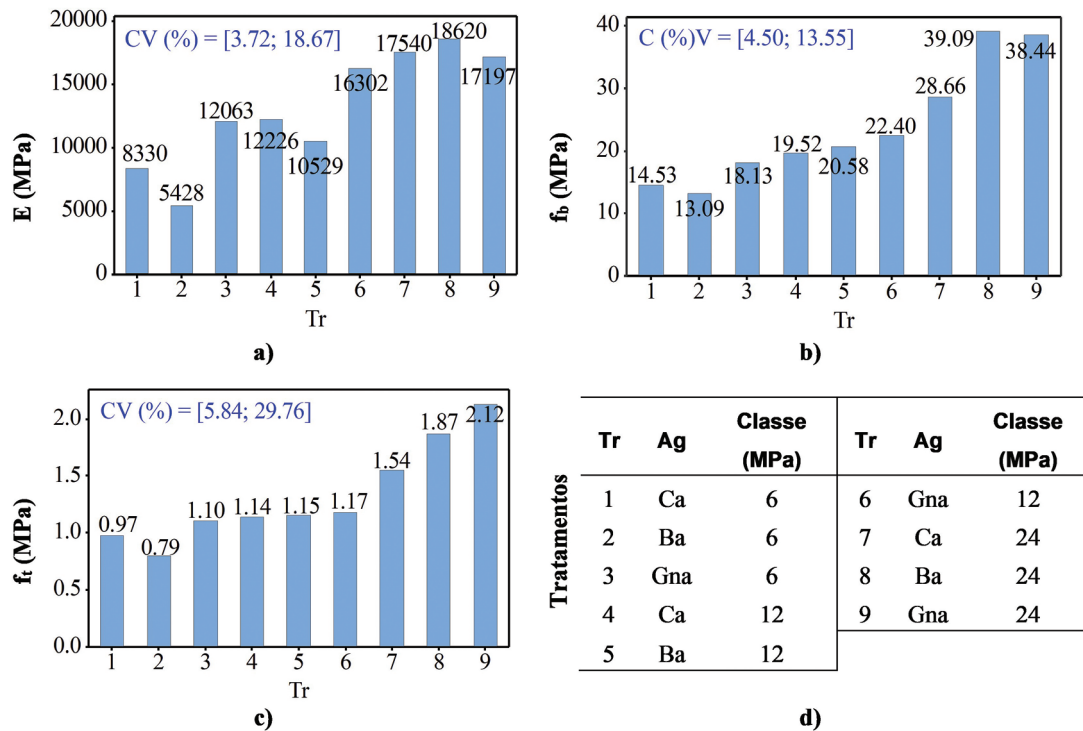
de água (**Ab**) dos blocos avaliados são apresentados nas Figura 17a, 17b e 17c, respectivamente. Os valores de umidade relativa dos blocos, por tratamento, seguem apresentados na Tabela 7.

Em relação à normalização, todas classes de resistência e tipos de agregados forneceram blocos com valores em conformidade para a absorção de água [1] e umidade relativa [40]. Classes de maiores resistências apresentaram maiores massas, em função da maior compactidade das misturas. As áreas líquidas aumentaram à medida que a classe de resistência cresceu. O mesmo aconteceu com a umidade relativa. Para a absorção de água o contrário ocorreu, blocos de maiores resistência e compactidade forneceram menores absorções.

### 3.3. Resultados das avaliações experimentais e análise estatística

As médias e coeficientes de variação (CV) dos resultados obtidos nas determinações do módulo de deformação secante (**E**), resistência última à compressão na área líquida dos blocos (**f<sub>b</sub>**) e resistência à tração (**f<sub>t</sub>**) são exibidos pela Figura 18, para cada um dos 9 tratamentos estabelecidos.





**Figura 18:** Propriedades mecânicas dos blocos: a) módulo secante; b) resistência à compressão; c) resistência à tração; d) tratamentos.

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados, respectivamente, os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância) considerando-se isoladamente os efeitos dos fatores tipo de agregado e classe de resistência dos blocos. Lembrando que, conforme o teste de Tukey, A representa o tratamento experimental associado ao maior valor médio da propriedade, B o de segundo maior valor médio e assim sucessivamente. Letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si.

Analisando, separadamente, o efeito do tipo de agregado sobre o módulo de deformação secante dos blocos, conclui-se da Tabela 8 que as unidades de classes 6 e 12MPa quando produzidas com gnaïsse apresentaram módulos significativamente maiores que aquelas confeccionadas com os demais minerais. No entanto, tal comportamento pode ser atribuído à maior parcela de finos presente nos agregados graúdos e miúdos de gnaïsse e, conseqüentemente, maior compacidade do traço otimizado, já empregado pela fábrica. Durante os ensaios, também foi notória a porosidade nos blocos contendo agregados de basalto. Visualmente, os blocos 6B e 12B demonstraram grande presença de vazios. Acredita-se que este fator esteja diretamente relacionado aos menores valores de módulo obtidos nesses dois traços. Ao adentrar à classe de resistência 24 MPa, essa diferença entre os traços e porosidade das misturas se tornou insignificante. Embora o agregado de basalto tenha originado misturas ligeiramente mais rígidas, essa diferença não foi considerada significativa pela análise estatística dos resultados, ou seja, blocos 24G, 24B e 24G exibiram módulo de deformação equivalentes.

Para a resistência à compressão dos blocos nota-se, na Tabela 8, resultados significativamente maiores para o traço otimizado de 6 MPa, contendo gnaïsse. Essa diferença, porém, já se torna insignificante na classe de 12 MPa. Nos blocos mais resistentes (24 MPa), mesmo o agregado de basalto gerando resistências ligeiramente superiores aos demais, a análise estatística revelou resistências à compressão equivalentes entre blocos 24B e 24G, sendo ambos significantemente superiores à resistência exibida pela mistura com calcário (24C). Interpreta-se que, em resistências maiores como 24 MPa, a redução da porosidade proporcionada pela alteração nos traços e maior energia de compactação na moldagem dos blocos permitiu que a maior dureza e rigidez dos agregados se sobressaísse às demais características das misturas. Esse é o comportamento geralmente observado nos concretos plásticos convencionais, que quando produzidos com agregados mais rígidos tendem a fornecer concretos também mais rígidos.

Quanto à resistência indireta de tração dos blocos, a Tabela 8 indica que a propriedade não sofreu variação significativa de resultados ao se substituir o tipo de agregado, em nenhuma das três classes de resistência.

No que se refere às propriedades físicas, com exceção dos blocos 12B (com resultados significantemente menores) os valores de área líquida se mostraram equivalentes entre as composições e classes de resistências

**Tabela 8:** Resultados do teste de Tukey (5% de significância) referente a **influência do tipo de agregado** nas propriedades investigadas, para cada classe de resistência de bloco.

PROPRIEDADES	CLASSE DE RESISTÊNCIA = 6 MPa		
	CALCÁRIO (CA)	BASALTO (BA)	GNAISE (GNA)
E (MPa)	8331 B	5428 C	12063 A
$f_b$ (MPa)	14,54 B	13,09 B	18,14 A
$f_t$ (MPa)	0,97 A	0,26 A	1,11 A
$A_{liq}$ (mm <sup>2</sup> )	29425 A	29303 A	29887,5 A
Ms (kg)	12,25 A	12,20 A	11,93 B
Ab (%)	6,34 B	7,06 A	6,55 B
PROPRIEDADES	CLASSE DE RESISTÊNCIA = 12 MPa		
	CALCÁRIO (CA)	BASALTO (BA)	GNAISE (GNA)
E (MPa)	12226 B	10529 B	16302 A
$f_b$ (MPa)	19,55 A	20,58 A	22,41 A
$f_t$ (MPa)	1,14 A	1,16 A	1,18 A
$A_{liq}$ (mm <sup>2</sup> )	30922 A	30147 B	30746 A
Ms (kg)	12,64 B	12,52 B	12,94 A
Ab (%)	6,09 B	6,71 A	5,36 C
PROPRIEDADES	CLASSE DE RESISTÊNCIA = 24 MPa		
	CALCÁRIO (CA)	BASALTO (BA)	GNAISE (GNA)
E (MPa)	17540 A	18620 A	17197 A
$f_b$ (MPa)	28,66 B	39,09 A	38,45 A
$f_t$ (MPa)	1,55 A	1,87 A	2,13 A
$A_{liq}$ (mm <sup>2</sup> )	31170 A	31213,5 A	31045 A
Ms (kg)	13,30 B	13,84 A	13,21 B
Ab (%)	4,91 A	4,77 A	4,88 A

dos concretos. Essa semelhança é explicada pelo fato de que todos os blocos são obtidos com os mesmos moldes, assim, já é esperado que tenham as mesmas dimensões. Já os menores valores de  $A_{liq}$  observados nos blocos 12B também podem ser atribuídos à grande presença de vazios nas unidades moldadas com essa mistura. A massa seca dos blocos classe 6 e 12 MPa apresentou comportamento variado. Para as misturas mais fracas os agregados de calcário e basalto forneceram massas equivalentes entre si, e significativamente superior à mistura de gnaise. Para os blocos classe 12 MPa o contrário ocorreu, blocos 12C e 12 B apresentaram massas equivalentes entre si, e significativamente maiores que o traço 12G. Para os blocos mais resistentes, a massa seca seguiu o comportamento das propriedades mecânicas, com os traços de calcário e gnaise sendo superados pelo de basalto. A absorção de água dos blocos mais resistentes (24 MPa) foi equivalente para todos os tipos de agregado. Para os blocos de classe 6 e 12 MPa, as misturas com agregados de basalto apresentaram os maiores valores de absorção, o que também pode ser atribuído à maior porosidade visível nesses concretos.

Observando, separadamente, a influência da resistência do bloco produzido em cada mistura de concreto (com basalto, com gnaise e com calcário), conclui-se que os valores das propriedades mecânicas acompanharam o aumento na classe de resistência, para os três tipos de agregado. Para os traços com basalto, os valores de  $E$ ,  $f_b$  e  $f_t$  aumentaram significativamente com a progressão na classe de resistência dos blocos. Para os traços com calcário,  $E$  e  $f_b$  aumentaram significativamente com a elevação na resistência das unidades, enquanto os valores de  $f_t$  das classes 6 e 12 MPa foram equivalentes entre si e juntos superados pelos resultados da classe 24 MPa. Nas misturas contendo gnaise os valores de  $f_b$  e  $f_t$  foram equivalentes para as classes 6 e 12 MPa, sendo significativamente menores que resultados da classe 24 MPa. Os resultados de  $E$ , por sua vez, foram similares entre as classes de 12 e 24 MPa e ambos significativamente maiores que os da classe de 6 MPa.

No que se refere às propriedades físicas, a absorção de água foi menor para maiores classes de resistência, como consequência do aumento na compactação e diminuição de porosidade de todos os traços. Para as misturas com gnaise, essa diferença foi significativa entre todas as classes de resistência. Nos concretos

**Tabela 9:** Resultados do teste de Tukey (5% de significância) referente a **influência da classe de resistência dos blocos** nas propriedades investigadas, para cada tipo de agregado.

PROPRIEDADES	BASALTO (BA)		
	CLASSE = 6 MPa	CLASSE = 12 MPa	CLASSE = 24 MPa
E (MPa)	5428 C	10529 B	18620 A
$f_b$ (MPa)	13,09 C	20,58 B	39,09 A
$f_t$ (MPa)	0,80 C	1,56 B	1,87 A
$A_{liq}$ (mm <sup>2</sup> )	29303 C	30147 B	31213,5 A
Ms (kg)	12,20 B	12,52 B	13,84 A
Ab (%)	7,06 A	6,71 A	4,77 B
PROPRIEDADES	CALCÁRIO (CA)		
	CLASSE = 6 MPa	CLASSE = 12 MPa	CLASSE = 24 MPa
E (MPa)	8331 C	12226 B	17540 A
$f_b$ (MPa)	14,54 C	19,52 B	28,66 A
$f_t$ (MPa)	0,97 B	1,14 B	1,55 A
$A_{liq}$ (mm <sup>2</sup> )	29425 B	30922 A	31170 A
Ms (kg)	12,25 C	12,64 B	13,30 A
Ab (%)	6,34 A	6,09 A	4,91 B
PROPRIEDADES	GNAISSE (GA)		
	CLASSE = 6 MPa	CLASSE = 12 MPa	CLASSE = 24 MPa
E (MPa)	12063 B	16302 A	17197 A
$f_b$ (MPa)	18,14 B	22,41 B	38,44 A
$f_t$ (MPa)	1,11 B	1,18 B	2,13 A
$A_{liq}$ (mm <sup>2</sup> )	28997,5 B	30746 A	31045 A
Ms (kg)	11,93 B	12,94 A	13,21 A
Ab (%)	6,55 A	5,36 B	4,88 C

com basalto e calcário as classes 6 e 12 MPa forneceram valores de **Ab** equivalentes e maiores que os exibidos pela classe 24 MPa. Para todos os tipos de agregados, a massa seca foi maior nos blocos de maiores classes de resistência. Nos blocos com basalto, os valores de **Ms** foram equivalentes entre as classes 6 e 12 MPa, sendo significativamente superados pela classe 24 MPa. Nos blocos com calcário a diferença foi significativa entre todas as classes e, nos blocos com gnaiss os valores de **Ms** foram equivalentes para as classes de 12 e 24 MPa e, ambos, significativamente maiores que dos blocos classe 6 MPa.

Uma vez que o teste de Tukey não possibilita realizar uma análise combinada de fatores, esse efeito foi compreendido, conforme o planejamento fatorial considerado, pelos gráficos de interação. Nas Figuras 19 e 20 são apresentados os gráficos de interação entre os fatores **tipo de agregado** e **classe de resistência dos blocos** para as propriedades mecânicas e físicas, respectivamente.

Na Figura 19a, em que se discute os efeitos da interação entre o tipo de agregado e classe de resistência dos blocos na propriedade **E**, observa-se que na mistura com gnaiss, de 12 para 24 MPa a variação é positiva, porém pequena, enquanto as curvas dos concretos com basalto e calcário crescem em uma maior taxa entre as classes de 12 e 24 MPa. Os gráficos estão se interceptando, isso indica que o efeito de interação entre os dois fatores é significativo. A combinação do agregado basalto com a classe de resistência de 24 MPa resultou no maior valor de **E**. Para a propriedade  $f_b$ , a Figura 19b também aponta significância para o efeito de interação entre o tipo de agregado e classe de resistência dos blocos. Os valores da propriedade crescem a uma taxa maior para os agregados de basalto e de gnaiss, da classe 6 MPa até a classe 24 MPa. Novamente, a combinação do agregado basalto com a classe de resistência de 24 MPa resultou no maior valor de  $f_b$ . Quanto à propriedade  $f_t$ , a Figura 19c indica significância na interação entre tipo de agregado e classe de resistência apenas para os blocos feitos com basalto e calcário. Da classe 12 para 24 MPa, os valores da propriedade crescem a uma taxa maior para os agregados de basalto e de gnaiss. Aqui, porém, a combinação do agregado gnaiss com a classe de resistência de 24 MPa é a responsável pelo maior valor de  $f_t$ .

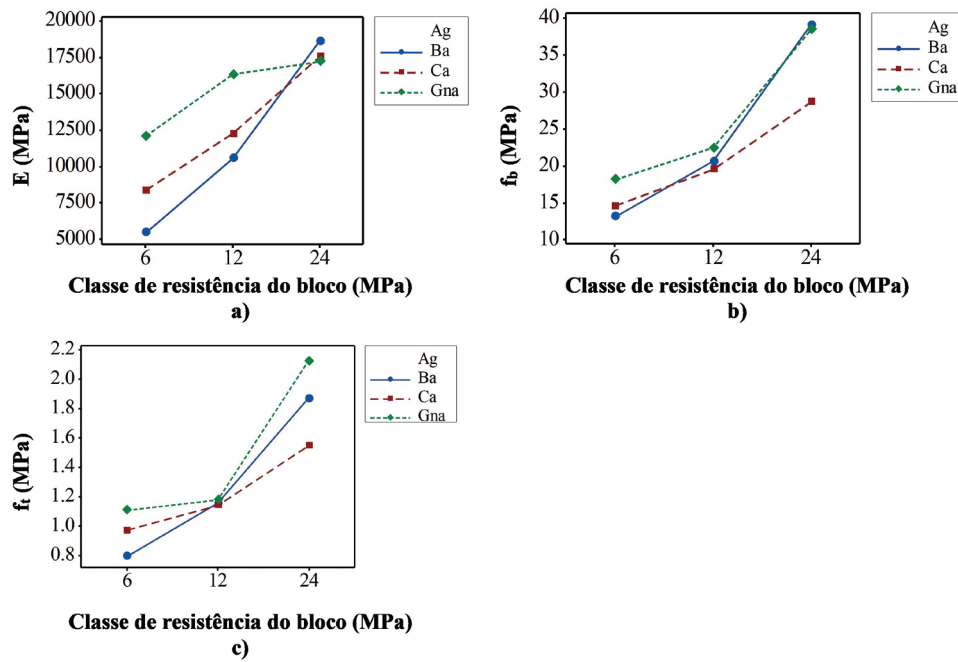


Figura 19: Resultados dos efeitos de interação entre os dois fatores sobre as propriedades mecânicas: a) módulo secante; b) resistência à compressão; c) resistência à tração.

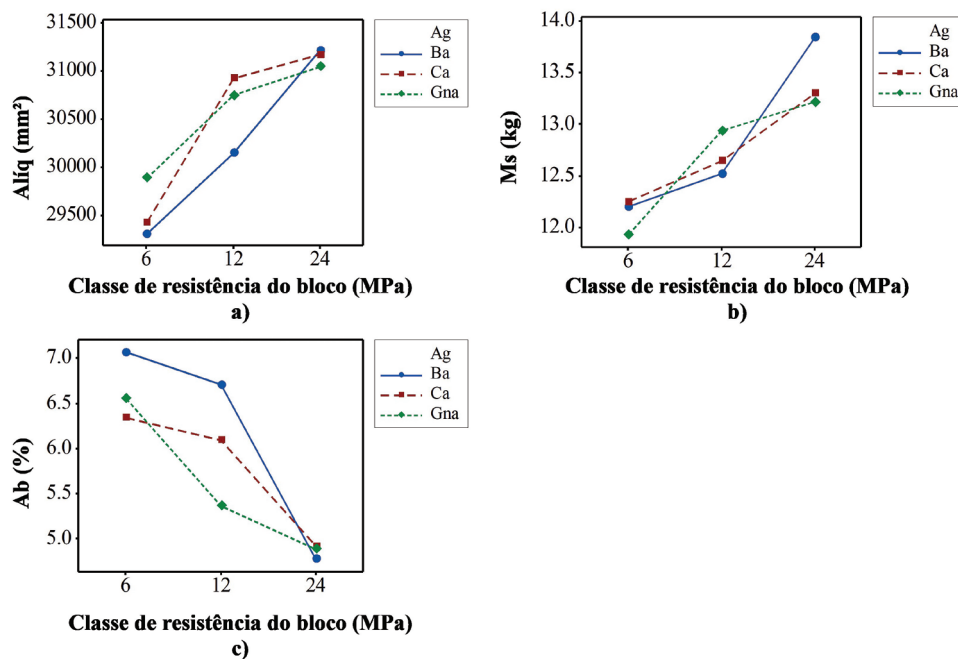


Figura 20: Resultados dos efeitos de interação entre os dois fatores sobre as propriedades físicas: a) área líquida; b) massa seca; c) absorção de água.

Na Figura 20a, observa-se que a propriedade de  $A_{liq}$  é significativamente afetada pela interação entre os fatores classe de resistência e tipo de agregado nos blocos. Da classe 6 para 12 MPa os valores de  $A_{liq}$  dos blocos crescem em maior taxa para os agregados de gnaíse e calcário. Da classe 12 para 24 MPa o crescimento da propriedade é mais acentuado para a mistura com basalto e, ao final, a combinação entre esse agregado e a classe de resistência 24 MPa resulta no maior valor de  $A_{liq}$ . A Figura 20b permite concluir que a massa seca dos blocos ( $M_s$ ) é significativamente afetada pela interação do tipo de agregado e sua classe de resistência. Da classe 6 MPa para a de 12 MPa a propriedade cresce mais rapidamente para a mistura com gnaíse, enquanto entre as classes de 12 e 24 MPa os valores de  $M_s$  dos blocos com basalto crescem a uma maior taxa. Ao final, a

**Tabela 10:** Resultados dos modelos de regressão geométrica para a estimativa da resistência a tração ( $f_t$ ) em função da resistência a compressão ( $f_b$ ) para cada tipo de agregado.

AGREGADO	MODELO	R <sup>2</sup> (%)	P-VALOR
Basalto	$f_t = 18,48 \cdot f_b^{1,01}$	79,35	0,000
Calcário	$f_t = 16,70 \cdot f_b^{1,05}$	68,76	0,000
Gnaisse	$f_t = 18,90 \cdot f_b^{0,85}$	75,80	0,000

**Tabela 11:** Resistência à tração por compressão diametral estimada em função da resistência à compressão de concretos convencionais com base na literatura. Adaptado de [50], [51] e [52].

AUTOR	COEFICIENTES DA REGRESSÃO		RESISTÊNCIA DO CONCRETO
	K	N	
CARINO e LEW (1982)	0,272	0,71	–
RAPHAEL (1984)	0,313	0,667	$f_c \leq 40$ MPa
AHMAD e SHAH (1985)	0,462	0,55	$15 \text{ MPa} \leq f_c \leq 84$ MPa
GARDNER <i>et al.</i> (1988)	0,47	0,59	$3 \text{ MPa} \leq f_c \leq 46$ MPa
	0,46	0,60	$13 \text{ MPa} \leq f_c \leq 72$ MPa
GARDNER (1990)	0,34	0,66	$4 \text{ MPa} \leq f_c \leq 57$ MPa
	0,33	0,667	
CEB-FIP (1991)	0,30	0,667	$f_c < 83$ MPa
OLUOKUN <i>et al.</i> (1991)	0,294	0,69	$3,5 \text{ MPa} \leq f_c \leq 63$ MPa
ACI 363R (1992)	0,59	0,50	$21 \text{ MPa} \leq f_c \leq 83$ MPa
ARIOGLU (1995)	0,321	0,661	$15 \text{ MPa} \leq f_c \leq 120$ MPa
MOKHTARZADEH e FRECH (2000)	0,56	0,50	$48 \text{ MPa} \leq f_c \leq 103$ MPa
	0,32	0,63	
KIM <i>et al.</i> (2002)	0,31	0,71	$2,2 \text{ MPa} \leq f_c \leq 51,3$ MPa
JSCE (2002)	0,44	0,50	–
ARIOGLU <i>et al.</i> (2006)	0,387	0,63	$4 \text{ MPa} \leq f_c \leq 120$ MPa
JSCE (2007)	0,23	0,667	–
JCI (2008)	0,13	0,85	–
AIJ (2008)	0,18	0,75	–
ACI (2011)	0,56	0,50	–

combinação entre o agregado basalto e a classe 24 MPa gera o maior valor de **Ms**. A Figura 20c também revela influência significativa da interação entre tipo de agregado e classe de resistência na absorção (**Ab**) dos blocos avaliados. Em todas as situações, a propriedade decresce com a progressão na classe de resistência do bloco. Da classe 6 MPa para a de 12 MPa esse decréscimo é maior para as misturas contendo gnaisse. Entre as classes de 12 e 24 MPa a diminuição de **Ab** é mais acentuada para os blocos produzidos com basalto, de tal forma que, a combinação entre esse agregado e a classe 24 MPa também dão origem ao menor valor de **Ab**.

Nas Tabelas 10 e 12 são apresentados os resultados dos modelos de regressão a uma variável livre, encontrando-se **em negrito** os modelos considerados significativos pela análise de variância ( $p$ -valor < 0,05).

Como observado na Tabela 10, os todos modelos de  $f_t$  em função de  $f_b$  foram considerados significativos e apresentaram coeficientes de determinação R<sup>2</sup> satisfatórios. Para compará-los com demais trabalhos da literatura, nota-se a ausência de trabalhos que retratem, especificamente, a relação entre propriedades mecânicas de concretos secos. Dessa forma, os coeficientes K e N (Equação 1) obtidos para os modelos da Tabela 10 foram comparados àqueles reunidos e apresentados por ARIOGLU *et al.* [50], ROS e SHIMA [51] e BEHNOOD *et al.* [52] para relacionar a **resistência à compressão** e **resistência à tração por compressão diametral** de concretos plásticos convencionais de diferentes composições (com adições ou não), idades, relações água cimento, temperaturas de cura, e diversas faixas de resistência à compressão (Tabela 11).

**Tabela 12:** Melhores ajustes para a estimativa do módulo de elasticidade (**E**) em função da resistência a compressão ( $f_b$ ) e da resistência a tração ( $f_t$ ) para cada tipo de agregado.

AGREGADO	$E = f(f_b)$		
	MODELO	R <sup>2</sup> (%)	P-VALOR
Basalto	$E = 0,02 \cdot f_b^{0,78}$	81,21	0,000
Calcário	$E = 0,013 \cdot f_b^{0,78}$	82,35	0,000
Gnaíse	$E = 0,0001 \cdot f_b^{1,32}$	48,23	0,012
AGREGADO	$E = f(f_t)$		
	MODELO	R <sup>2</sup> (%)	P-VALOR
Basalto	$E = -5,85 + 0,77 \cdot \ln(f_b)$	73,59	0,000
Calcário	$E = 0,022 \cdot f_t^{0,43}$	39,43	0,028
Gnaíse	$E = 0,0001 \cdot f_t^{1,02}$	27,01	0,083

Comparando os resultados expostos nas Tabelas 10 e 11, conclui-se que os valores para os coeficientes **K** e **n** encontrados nos modelos de regressão deste trabalho se distanciaram em grande medida dos evidenciados na literatura correlata para concretos convencionais, onde, por exemplo, **n** geralmente se encontra entre 1/2 e 3/4. Cabe destacar que, o material utilizado para fabricar os blocos deste trabalho possui dosagem e propriedades físicas que se diferem dos concretos convencionais, além de ser fortemente influenciado pela energia de compactação fornecida pelas máquinas vibroprensas. Além do material, acredita-se que a geometria dos blocos (diferente dos já conhecidos espécimes cilíndricos de concreto) esteja relacionada à diferença entre os coeficientes obtidos. Diferença essa que torna ainda mais evidente a necessidade de mais estudos, que propiciem expandir o conhecimento acerca do comportamento mecânico, das demais propriedades do concreto zero *slump* e, sobretudo, dos artefatos produzidos com o material.

Das Tabelas 10 e 12, nota-se que, com exceção do **E** estimado pela  $f_t$  para o gnaíse, todos os demais modelos foram considerados significativos pela ANOVA. Em relação aos valores obtidos para o coeficiente de determinação R<sup>2</sup>, a Tabela 10 evidencia o melhor resultado como sendo das misturas contendo agregados de basalto. Os concretos contendo gnaíse forneceram os menores coeficientes de determinação para os modelos de regressão de **E** em função de  $f_b$ . Para essas duas variáveis os melhores resultados também foram obtidos com a composição de basalto.

Nas Tabelas 13 e 14 são apresentados os resultados dos modelos de regressão múltipla para a estimativa das propriedades mecânicas (com base apenas nas físicas) considerando-se ora a classificação pelos valores característicos de resistência a compressão ora pelos tipos de agregados, estando sublinhados os modelos e os termos dos modelos considerados significativos pela análise de variância (**p-valor < 0,05**).

Nota-se, na Tabela 13, que os maiores valores para o coeficiente de determinação R<sup>2</sup> foram obtidos para os modelos de regressão da propriedade **E** em função das propriedades físicas (com destaque para as classes de resistência de bloco 6 e 12 MPa), seguidos dos R<sup>2</sup> das equações que têm  $f_b$  e  $f_t$  como variáveis dependentes. Ao expressar as propriedades mecânicas separadamente por tipo de agregado (Tabela 14), a quantidade de modelos considerados significativos pela ANOVA foi superior. Com exceção do modelo que estima  $f_t$  em função das propriedades físicas, todos os demais foram considerados significativos. Da Tabela 14, os modelos que forneceram os maiores valores de R<sup>2</sup> foram os que estimam a propriedade  $f_b$ .

### 3.4. Resultados da modelagem numérica

As curvas de tensão-deformação obtidas nas simulações numéricas de cada composição e resistência de bloco são exibidas na Figura 21.

Os modelos numéricos (Figura 22a) foram capazes de reproduzir com grande semelhança o padrão de ruptura observado nos blocos durante a realização dos ensaios mecânicos (Figura 22b). Nota-se, por exemplo, a fissuração em formato troncônico do bloco, atribuída às tensões laterais de tração resultantes da restrição causada pelo atrito com as placas da prensa.

**Tabela 13:** Resultados dos modelos de regressão múltipla por classes de resistência.

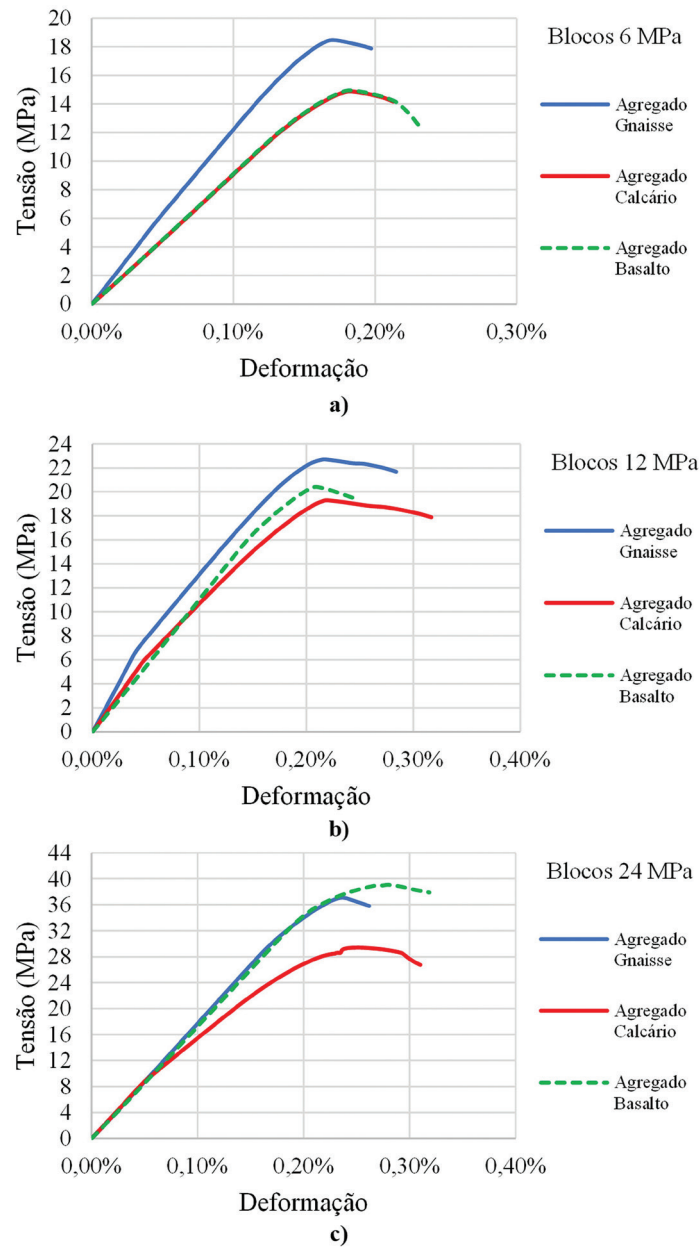
<b>MODELO (BLOCOS CLASSE = 6 MPa)</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>P-VALOR</b>
$E \text{ (MPa)} = 68523 + 2.804 \cdot Aliq - 9312 \cdot Ms - 4485 \cdot Ab$	92,79	0,000
$f_b \text{ (MPa)} = 156.9 + 0.00028 \cdot Aliq - 10.47 \cdot Ms - 3.44 \cdot Ab$	79,28	0,004
$f_t \text{ (MPa)} = 2.16 + 0.000148 \cdot Aliq - 0.320 \cdot Ms - 0.256 \cdot Ab$	36,36	0,281
<b>MODELO (BLOCOS CLASSE = 12 MPa)</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>P-VALOR</b>
$E \text{ (MPa)} = 231293 - 2.406 \cdot Aliq - 7782 \cdot Ms - 7571 \cdot Ab$	95,43	0,000
$f_b \text{ (MPa)} = 183.4 - 0.00387 \cdot Aliq - 1.89 \cdot Ms - 3.31 \cdot Ab$	32,88	0,338
$f_t \text{ (MPa)} = 2.63 - 0.000083 \cdot Aliq + 0.096 \cdot Ms - 0.026 \cdot Ab$	3,70	0,956
<b>MODELO (BLOCOS CLASSE = 24 MPa)</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>P-VALOR</b>
$E \text{ (MPa)} = 35960 - 4.69 \cdot Aliq + 5366 \cdot Ms + 11455 \cdot Ab$	47,72	0,140
$f_b \text{ (MPa)} = -83 - 0.00051 \cdot Aliq + 8.89 \cdot Ms + 3.02 \cdot Ab$	20,82	0,577
$f_t \text{ (MPa)} = 15.4 - 0.000563 \cdot Aliq + 0.165 \cdot Ms + 0.359 \cdot Ab$	11,97	0,782

**Tabela 14:** Resultados dos modelos de regressão múltipla por tipos de agregado.

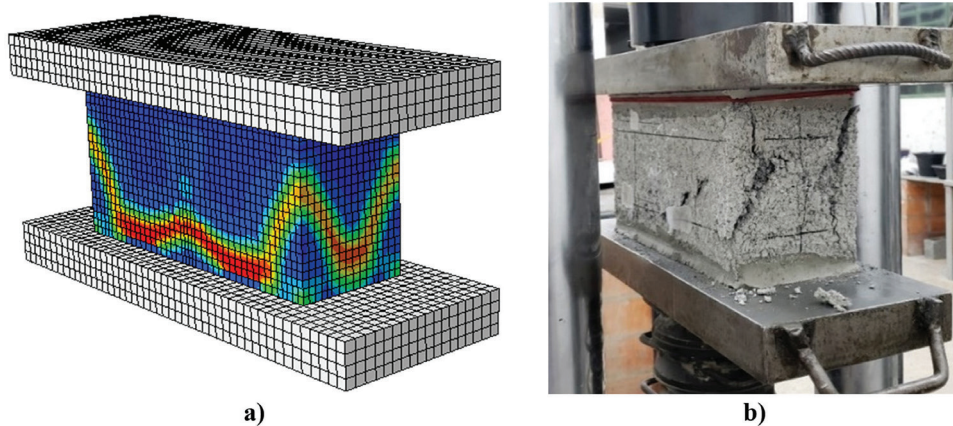
<b>MODELO (BASALTO)</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>P-VALOR</b>
$E \text{ (MPa)} = -117492 + 1.18 \cdot Aliq + 7067 \cdot Ms + 738 \cdot Ab$	59,51	0,054
$fb \text{ (MPa)} = -116 + 0.00134 \cdot Aliq + 8.1 \cdot Ms - 1.28 \cdot Ab$	74,29	0,010
$ft \text{ (MPa)} = -3.42 + 0.000026 \cdot Aliq + 0.34 \cdot Ms - 0.076 \cdot Ab$	46,47	0,152
<b>MODELO (CALCÁRIO)</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>P-VALOR</b>
$E \text{ (MPa)} = 585528 + 8.80 \cdot Aliq - 49376 \cdot Ms - 33201 \cdot Ab$	73,77	0,010
$fb \text{ (MPa)} = 174 + 0.00545 \cdot Aliq - 16.0 \cdot Ms - 17.7 \cdot Ab$	94,83	0,000
$ft \text{ (MPa)} = -16.2 + 0.000209 \cdot Aliq + 0.74 \cdot Ms + 0.27 \cdot Ab$	85,74	0,001
<b>MODELO (GNAISSE)</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>P-VALOR</b>
$E \text{ (MPa)} = 179285 - 7.89 \cdot Aliq + 7278 \cdot Ms - 2734 \cdot Ab$	72,00	0,013
$fb \text{ (MPa)} = 437 + 0.0424 \cdot Aliq - 106.1 \cdot Ms - 64.2 \cdot Ab$	90,11	0,000
$ft \text{ (MPa)} = 27.4 + 0.00305 \cdot Aliq - 7.51 \cdot Ms - 4.26 \cdot Ab$	72,89	0,012

Na Tabela 15 são expostos os resultados de resistência à compressão e módulo de deformação secante obtidos na simulação numérica dos blocos. Para comparação, os erros percentuais correspondentes às diferenças entre resultados numéricos e experimentais foram calculados e seguem apresentados.

De modo geral, observou-se boa aproximação entre os resultados experimentais e os fornecidos pelas simulações numéricas, sobretudo para as classes maiores de resistência de bloco (12 e 24 MPa). Com exceção do traço 6B, o maior erro percentual foi de 8,04%. Para o módulo de deformação secante (E), os modelos numéricos tenderam a blocos mais rígidos que os avaliados experimentalmente. Para a resistência à compressão dos



**Figura 21:** Curvas de tensão-deformação obtidos na modelagem para cada composição e resistência de bloco: a) Blocos de 6 MPa; b) Blocos de 12 MPa; c) Blocos de 24 MPa.



**Figura 22:** Ruptura observada nos blocos: a) experimental; b) modelagem.



**Tabela 15:** Comparação entre resultados experimentais e da simulação numérica.

BLOCOS	$f_b$ (MPa)			E (MPa)		
	ENSAIO	MODELO NUMÉRICO	ERRO (%)	ENSAIO	MODELO NUMÉRICO	ERRO (%)
6G	18,14	18,47	1,82	12.063	12.784	5,98
6C	14,54	14,88	2,34	8.331	9.001	8,04
6B	13,09	14,94	14,13	5.428	9.045	66,64
12G	22,41	22,70	1,29	16.302	16.549	1,52
12C	19,55	19,32	1,18	12.226	12.490	2,16
12B	20,58	20,41	0,83	10.529	10.982	4,30
24G	38,45	37,08	3,56	17.197	17.678	2,80
24C	28,66	29,37	2,48	17.540	17.592	0,30
24B	39,09	39,04	0,13	18.620	17.226	7,49

blocos ( $f_b$ ), a simulação dos blocos classe 6 MPa forneceu resistências ligeiramente maiores que os valores experimentais, enquanto os modelos de blocos 12 e 24 MPa apresentaram resultados numéricos de  $f_b$  ora maiores, ora menores que àqueles obtidos nos ensaios.

#### 4. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho foi motivada, sobretudo, pela carência de informações acerca da influência do tipo de agregado na resistência e deformabilidade dos concretos especiais, em particular, o concreto tipo seco ou zero *slump*. Os resultados aqui obtidos confirmaram as informações obtidas na literatura de que sua dosagem e propriedades físicas se diferem dos concretos convencionais, sendo notadamente influenciadas pela distribuição granulométrica dos agregados e eficiência de compactação na moldagem das máquinas vibroprensas.

Ao analisar o efeito do tipo de agregado sobre o módulo de deformação secante dos blocos, concluiu-se que, para as classes menos resistentes (6 e 12MPa), o uso dos agregados mais finos de gnaiss proporcionou valores de **E** significativamente maiores que com os demais minerais. Maiores valores de  $f_b$  e  $f_t$  também foram exibidos pelos traços 6G e 12G. Porém, é importante destacar que a resistência indireta de tração dos blocos ( $f_t$ ) não significativamente afetada ao se substituir o tipo de agregado, para nenhuma das três classes de resistência de bloco (6, 12 e 24 MPa). Entende-se que o uso de um traço já otimizado pela empresa fabricante dos blocos e a maior parcela de finos presente nos agregados graúdos e miúdos de gnaiss sejam responsáveis pelos maiores valores de **E** e  $f_b$  nos blocos 6G e 12G.

Grande presença de vazios foi observada nos concretos nos blocos de 6 e 12 MPa quando o traço original (com gnaiss) foi modificado pela introdução do basalto. Essa maior porosidade dos blocos 6B e 12B foi a responsável pela obtenção dos menores valores obtidos para as propriedades mecânicas (**E**,  $f_b$  e  $f_t$ ) das classes menos resistentes. Concluiu-se que, para blocos menos resistentes, a distribuição granulométrica dos agregados e a compactação/adensamento das próprias misturas influenciaram mais o resultado das propriedades mecânicas que a própria rigidez dos agregados utilizados.

À medida que as misturas de concreto seco se tornaram mais densas e resistentes, com visível redução dos vazios, a diferença entre os valores das propriedades mecânicas (**E**,  $f_b$  e  $f_t$ ) tende a se tornar insignificante. Ao analisar os blocos de 24 MPa, nota-se que a mistura contendo o agregado deu origem a unidades ligeiramente mais resistentes e mais rígidas que aqueles produzidos com os demais agregados, mesmo não sendo essa diferença estatisticamente significativa. Desse modo, interpreta-se que em misturas de resistências maiores, como as de 24 MPa, a redução da porosidade proporcionada pelo enriquecimento dos traços e maiores energias de compactação durante a moldagem permitiram que a maior dureza e rigidez dos agregados se sobressaísse às demais características. Esse é o comportamento geralmente observado nos concretos plásticos convencionais, que quando produzidos com agregados mais rígidos tendem a fornecer concretos também mais rígidos.

Sobre as propriedades físicas observou-se que, com exceção dos blocos 12B (de resultados significativamente menores), os valores de área líquida se mostraram equivalentes entre as composições e classes de resistência dos concretos. Os menores valores de  $A_{liq}$  observados nos blocos 12B também são atribuídos à grande presença de vazios nas unidades de 6 e 12 MPa moldadas com basalto. A massa seca dos blocos classe 6 e 12 MPa apresentou comportamento variado. Para os blocos mais resistentes (classe 24 MPa), os valores de **Ms** seguiram o comportamento das propriedades mecânicas, com os traços de calcário e gnaiss sendo superados

pelo de basalto. A absorção de água (**Ab**) dos blocos de 24 MPa foi equivalente para todos os tipos de agregado. Para os blocos de classe 6 e 12 MPa, as misturas com basalto apresentaram os maiores valores de **Ab**, o que também pode ser atribuído à notável porosidade desses concretos.

Após investigar a influência da resistência do bloco produzido em cada mistura de concreto, conclui-se que os valores das propriedades mecânicas acompanharam o aumento na classe de resistência, para os três tipos de agregado. Como propriedade física, a **Ab** também foi menor para maiores classes de resistência, como consequência do aumento na compactação e diminuição de porosidade de todos os traços. Com exceção da propriedade  $f_t$  nas misturas com agregados de gnaiss, os efeitos da interação entre os fatores **tipo de agregado** e **classe de resistência** dos blocos (em todos os seus níveis) em suas propriedades físicas e mecânicas foram considerados estatisticamente significativos.

Da comparação com a literatura, conclui-se que os valores dos coeficientes **K** e **n** encontrados nos modelos de regressão deste trabalho se distanciaram em grande medida do que é observado em concretos convencionais. Essa informação, novamente, corrobora com o fato de que o material utilizado para fabricar os blocos deste trabalho (e na maioria das grandes empresas) possui dosagem, características físicas e tecnologia produtiva peculiares. Além do material, acredita-se que a geometria dos blocos (diferente dos já espécimes cilíndricos de concreto) também esteja relacionada à diferença entre os coeficientes obtidos nas regressões. A constatação dessa diferença, aliada à escassez de trabalhos na literatura correlata, torna evidente a demanda por novos estudos, os quais permitam expandir o conhecimento acerca do comportamento mecânico, propriedades físicas do concreto zero *slump* e, sobretudo, de componentes da construção produzidos com tal material.

Em função do tempo e da instrumentação necessária, muitas das vezes, ensaios podem se tornar onerosos. Nessas condições, a simulação numérica pode se tornar uma alternativa viável. Isso foi o que demonstraram os resultados das simulações realizadas neste estudo. Com exceção do traço 6B (cuja evidente presença de vazios explica a variabilidade), o erro percentual entre resultados experimentais e numéricos não excedeu 8,04%. A calibração dos modelos implementados, com base nos próprios resultados experimentais permitiu, inclusive, reproduzir com proximidade o modo de ruptura dos blocos, marcado pelo atrito com as placas, indução de tensões laterais de tração e ruptura no formato troncônico.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Projeto Nº: 2018/19748-9) pelo fomento às pesquisas dos autores deste trabalho, à GLASSER Pisos e Pré-moldados Ltda. pela doação dos blocos de concreto, e à coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGECiv/UFSCar pelo constante apoio.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [3] AITCIN, P.C., MEHTA, P.K., “Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 87, n. 2, pp. 103–107, 1990. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=1882>
- [4] MAGALHÃES, A.G., FRANÇA, E.P., AGUILAR, M.T.P., *et al.* “A influência de agregados graúdos de diferentes mineralogias nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho”, In: *17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Foz do Iguaçu, 2006. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/41/019/41019105.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/019/41019105.pdf)
- [5] MEDDAH, M.S., ZITOUNI, S., BELÂABES, S., “Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 4, pp. 505–512, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.009>
- [6] HONG, L., GU, X., LIN, F., “Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 65, pp. 338–349, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.131>
- [7] VISHALAKSHI, K.P., REVATHI, V., REDDY, S.S., “Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete”, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 194, pp. 52–60, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.029>

- [8] LEAL, C.E.F., PARSEKIAN, G.A., FERREIRA, F.G.S., *et al.*, “Comparação entre módulos de deformação de concretos nacionais produzidos com agregados graúdos de diferentes origens mineralógicas”, *Matéria (Rio J.)*, v. 25, n. 4, e-12907, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1207>
- [9] CARVALHO, P.R.O., *Análise numérica de pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto em situação de incêndio: ênfase no comportamento térmico e termoestructural*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-02082019-114958/pt-br.php>
- [10] SBRIGHI NETO, C., “Agregados naturais, britados e artificiais para concreto”, In: Isaia, G.C. (ed), *Concreto: ciência e tecnologia*. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. pp. 233–260.
- [11] AQUINO, C., INOUE, M., MIURA, H., *et al.*, “The effects of limestone aggregate on concrete properties”, *Construction and Building Materials*, v. 65, n. 2, pp. 2363–2368, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.008>
- [12] KALRA, M., MEHMOOD, G., “A review paper on the effect of different types of coarse aggregate on concrete”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, v. 431, n. 8, 082001, 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/431/8/082001>
- [13] ROCCO, C.G., ELICES, M., “Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete”, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 76, n. 2, pp. 286–298, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2008.10.010>
- [14] NETO, B.B.P., OLIVEIRA, D.R.C., RAMOS, D., “Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência”, *Matéria (Rio J.)*, v. 16, n. 2, pp. 690–702, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762011000200005>
- [15] OTT, J., ANDREAS, A.B., “Hi-tec solutions to molding problems encountered in the manufacture of “zero slump” concrete products”, In: *8th International Conference on Concrete Block Paving*, San Francisco, 2006.
- [16] FRASSON JÚNIOR, A., *Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/78274>
- [17] FERNANDES, I., *Blocos e Pavers – Produção e Controle de Qualidade*. 7 ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais, 2016. 200 p.
- [18] RODRIGUES, P.P.F., “Recomendações para a fabricação de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação”, In: *Reunião Anual IBRACON*, São Paulo, 1984.
- [19] OLIVEIRA, A.L., *Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87148>
- [20] SULISTYANA, PURWANTO, WIDOANINDYAWATI, V., *et al.*, “The influence of compression applied during production to the compression strength of dry concrete: an experimental study”, *Procedia Engineering*, v. 95, pp. 465–472, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.206>
- [21] ADRIANO, V.S.R., *Análise experimental da influência da vibração na resistência de blocos de concreto produzidos em máquinas vibro-compactadoras*. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica), Universidade Nacional de Brasília, Brasília, 2013. <https://bdm.unb.br/handle/10483/7631>
- [22] PARSEKIAN, G.A., HAMID, A.A., DRYSDALE, R.G., *Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural*. 2 ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014. 625 p.
- [23] PADILHA, S.A., PALIGA, C.M., TORRES, A.S., “Estudo comparativo da resistência à compressão de blocos de concreto produzidos com diferentes cimentos e dosados em ambiente de fábrica”, *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 13, n. 2, pp. 184–195, 2017. <https://doi.org/10.5216/reec.v13i2.46469>
- [24] ANDOLFATO, R.P., CAMACHO, J.S., RAMALHO, M.A., “Brazilian results on structural masonry concrete blocks”, *ACI Materials Journal*, v. 104, n. 1, pp. 33–39, 2007. <http://hdl.handle.net/11449/69503>
- [25] MARTINS, R.O.G., NALON, G.H., ALVARENGA, R.C.S.S., *et al.*, “Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms”, *Construction and Building Materials*, v. 182, n. 10, pp. 233–241, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.091>
- [26] MEDEIROS, J.S., *Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. [http://www.pcc.poli.usp.br/files/text/publications/BT\\_00098.pdf](http://www.pcc.poli.usp.br/files/text/publications/BT_00098.pdf)

- [27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *ASTM C1006: Splitting tensile strength of masonry units*. West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- [28] MOHAMAD, G., LOURENÇO, P.B., ROMAN, H.R., *et al.*, “Estudo de caracterização mecânica de blocos de concreto vibro-compactados à seco”, *Matéria (Rio J.)*, v. 16, n. 1, pp. 638–657, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762011000100010>
- [29] HAMID, A.A., CHUKWUNENYE, A.O., “Compression behavior of concrete masonry prisms”, *J. Struct. Eng.*, v. 112, n. 10, pp. 605–613, 1986. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1986\)112:3\(605\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:3(605))
- [30] SANTOS, C.F.R., ALVARENGA, R.C.S.S., RIBEIRO, *et al.*, “Avaliação numérico-experimental de prismas de alvenaria estrutural pelo método dos elementos finitos”, *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 2, pp. 477–508, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000200010>
- [31] ABASI, A., HASSANLI, R., VINCENT, T., *et al.*, “Influence of prism geometry on the compressive strength of concrete masonry”, *Construction and Building Materials*, v. 264, 120182, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120182>
- [32] RECUERO, J.C., LARROYD, F., COSTA, M.M.D., Cadastro nacional de produtores de brita. Brasília: agência nacional de mineração, 2018. <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1>
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16973: Agregado miúdo – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16915: Agregados – Amostragem*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 12118: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- [40] FORTES, E.S., *Influência do capeamento e caracterização da resistência a compressão de alvenaria estrutural de blocos de concreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4680>
- [41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16868-3: Alvenaria estrutural – Parte 1 – Projeto*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- [42] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). *ASTM C1006: Standard test method for splitting tensile strength of masonry units*. West Conshohocken: ASTM International, 2019.
- [43] DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA CORP, “Abaqus”, version 2017. [www.3ds.com](http://www.3ds.com)
- [44] PAULA, C.F., *Estudo das descrições Lagrangiana e Euleriana na análise não-linear geométrica com o emprego do Método dos Elementos Finitos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-21032018-084639/pt-br.php>
- [45] KMIĘCIK P., KAMINSKI, M., “Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 11, n. 3, pp. 623–636, 2011. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60105-8](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60105-8)
- [46] LUBLINER, J., OLIVER, J., OLLER, S., *et al.*, “A plastic-damage model for concrete”, *Int. J. Solids Structures*, v. 25, n. 3, pp. 299–326, 1989. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- [47] LEE, J., FENVERS, G.L., “Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures”, *Journal of Engineering Mechanics*, v. 124, pp. 892–900, 1998. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- [48] GUO, Z., *Principles of reinforced concrete*. Oxford: Elsevier, 2014.

- [49] MEDEIROS, W.A. *Pórticos em concreto pré-moldado preenchidos com alvenaria participante*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/10029>
- [50] ARIOGLU, N., GIRGIN, Z.C., ARIOGLU, E., “Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application in strength criterion”, *ACI Materials Journal*, v. 103, n. 1, pp. 18–24, 2006. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&id=15123>
- [51] ROS, S., SHIMA, H., “Relationship between splitting tensile strength and compressive strength of concrete at early age with different types of cements and curing temperature histories”, *Concrete engineering annual paper*, v. 35, n. 1, pp. 427–432, 2013.
- [52] BEHNOOD, A., VERIAN, K.P., GHAREHVERAN, M.M., “Evaluation of the splitting tensile strength in plain and Steel fiber-reinforced concrete based on the compressive strength”, *Construction and Building Materials*, v. 98, pp. 519–529, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.124>