

Stress-strain curve of concretes with recycled concrete aggregates: analysis of the NBR 8522 methodology

Diagrama tensão-deformação específica em concretos com agregados reciclados de concreto: análise da metodologia proposta pela NBR 8522



D. A. GUJEL^a
danigujel@yahoo.com.br

C. S. KAZMIERCZAK^a
claudiok@unisinis.br

J. R. MASUERO^b
jrmasuero@gmail.com

Abstract

This work analyses the methodology "A" (item A.4) employed by the Brazilian Standard ABNT 8522 (ABNT, 2008) for determining the stress-strain behavior of cylindrical specimens of concrete, presenting considerations about possible enhancements aiming its use for concretes with recycled aggregates with automatic test equipment. The methodology specified by the Brazilian Standard presents methodological issues that brings distortions in obtaining the stress-strain curve, as the use of a very limited number of sampling points and by inducing micro cracks and fluency in the elastic behavior of the material due to the use of steady stress levels in the test. The use of a base stress of 0.5 MPa is too low for modern high load test machines designed for high strength concrete test. The work presents a discussion over these subjects, and a proposal of a modified test procedure to avoid such situations.

Keywords: 8522 Standard (ABNT, 2008), Concrete, Modulus of elasticity, strength-stress behaviour.

Resumo

Este trabalho analisa a metodologia descrita no Anexo "A" (item A.4) da Norma NBR 8522 (ABNT, 2008) para a determinação do diagrama tensão-deformação específica em corpos-de-prova cilíndricos de concreto apresentando considerações sobre possíveis adequações de seu uso para concretos com agregados reciclados e com equipamentos automatizados. A metodologia especificada na norma apresenta restrições metodológicas que geram distorções na obtenção do diagrama tensão-deformação, tais como o uso de número muito limitado de pontos de leitura e a inclusão, no comportamento elástico do material, de fenômenos diferidos como microfissuração e fluência ocorridos durante os patamares de estabilização de carga. A tensão básica de 0,5 MPa, especificada para garantir a estabilização da carga, é inadequada para grande parte das prensas automatizadas modernas, projetadas para o ensaio de concretos de alta resistência. São discutidos alguns aspectos da Norma e propostas alterações metodológicas.

Palavras-chave: Norma 8522 (ABNT, 2008), concreto, módulo de elasticidade estático, diagrama tensão-deformação específica.

^a Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UNISINOS, São Leopoldo, RS, Brasil;
^b Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

1. Introdução

A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar tensões sem deformação permanente ou ruptura. Por outro lado, a rigidez de um material está relacionada com a deformação que este material apresenta para um dado nível de tensões. Essas propriedades são inerentes ao próprio material e devem ser determinadas experimentalmente. Os ensaios mais comumente realizados nesse sentido são os que submetem o material a estados uniaxiais de tensão, tração e compressão simples, utilizados para determinar a relação entre a tensão normal média e a deformação longitudinal específica média. Com os dados de ensaios monitorados de tração e compressão, onde há o registro das deformações apresentadas para certos níveis de tensão, pode-se construir um gráfico, cuja curva resultante é denominada diagrama tensão-deformação.

O concreto apresenta um comportamento linear, quando submetido a tensões até certa magnitude. Conforme Melo Neto e Helene [1], o comportamento deixa de ser linear um pouco antes de 50% da carga última. Esse comportamento é decorrente da microfissuração progressiva que ocorre inicialmente na interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, e posteriormente se dissemina em todo o concreto. O diagrama tensão-deformação típico de um concreto obtido a partir de um ensaio de compressão simples está mostrado na Figura 1.

Observa-se que o concreto somente pode ser considerado como elástico linear até um nível de tensões correspondente à faixa de 40 a 50% da tensão de ruptura. Tensões acima desse patamar

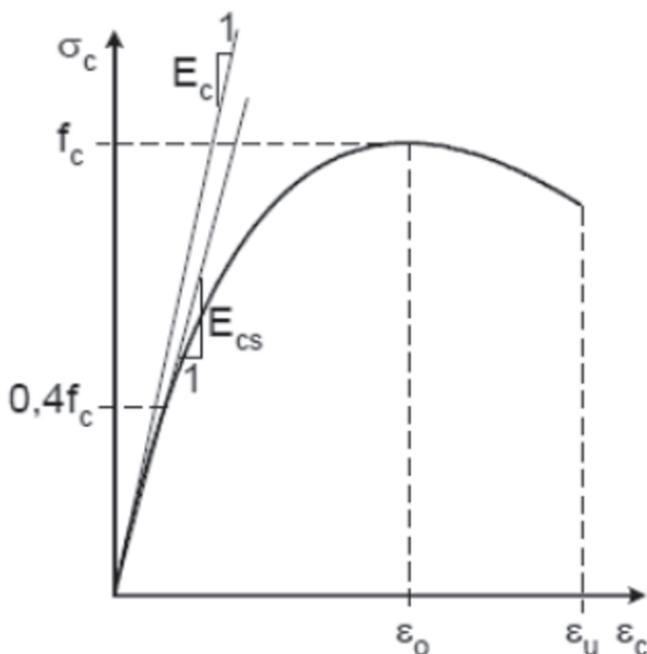


Figura 1
Diagrama tensão-deformação típico do concreto (compressão simples)

Fonte: Araújo (3)

provocam características macroscópicas de comportamento facilmente visualizadas, como a não linearidade crescente da curva tensão-deformação na etapa de carga, ou a existência de deformações permanentes quando o material submetido a tensões é descarregado [2]. Corroborando este comportamento, a norma NBR 6118 [3], no item 8.2.10.1, afirma que para tensões de compressão menores que $0,5 f_c$ é possível admitir uma relação linear entre tensões e deformações.

Demandas cada vez maiores por um uso diferenciado de áreas que seriam destinadas a aterros (ou ausência de locais de deposição adequados), por um lado, e a escassez de recursos naturais, por outro, além da conscientização da proteção ambiental, favoreceram a utilização de resíduos de construção como fonte para agregados [4, 5, 6]). Segundo Buttler [7], os resíduos de concreto possuem um grande potencial para serem reciclados quando comparados com outros resíduos, devido a possibilidade de pré-conhecimento do tipo de material empregado no material de origem.

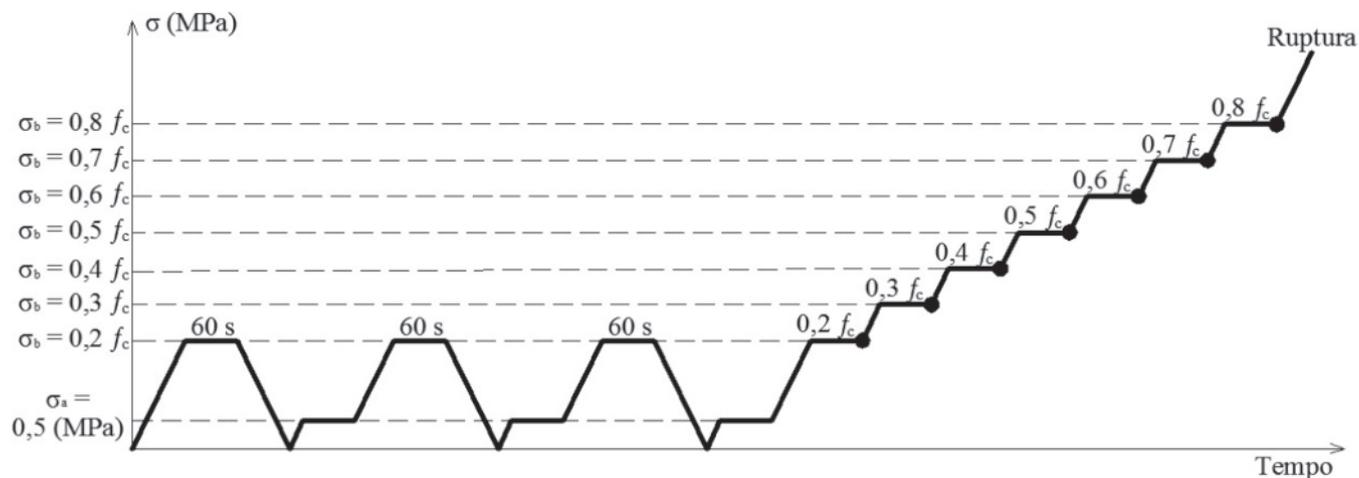
Se para concretos convencionais existem divergências entre valores obtidos através de procedimentos experimentais e os estimados por equações analíticas prescritas em normas a partir da resistência, a divergência tende a ser ainda maior em concretos produzidos com agregados reciclados de concreto - ARC, devido à existência de dados de ensaio em muito menor quantidade e à maior dispersão de resultados típica destes concretos. O Módulo de Elasticidade de concretos é dependente do teor de agregado graúdo e do teor de argamassa. Ao se substituir agregados convencionais por agregados reciclados ou de menor Módulo de Elasticidade, é necessário proceder-se investigações acerca desta propriedade [8].

Este trabalho analisa a metodologia descrita no Anexo "A" (item A.4) da Norma NBR 8522 (ABNT, 2008) para a determinação do diagrama tensão-deformação específica em corpos-de-prova cilíndricos de concreto aplicada a concretos com agregados reciclados. São avaliadas restrições metodológicas que geram distorções na obtenção do diagrama tensão-deformação, tais como o uso de número muito limitado de pontos de leitura e a inclusão, no comportamento elástico do material, de fenômenos diferidos como microfissuração e fluência em função da adoção de patamares de estabilização de carga, que poderão gerar maiores distorções em exemplares de concreto com agregados reciclados.

2. Procedimentos Recomendados pela Norma NBR 8522 (ABNT, 2008)

A Norma NBR 8522 [9], em seu Anexo "A" descreve no item A.4 o procedimento recomendado para a obtenção do diagrama tensão-deformação de concreto endurecido, em corpos-de-prova cilíndricos. Antes do ensaio propriamente dito, deve-se compatibilizar as bases de medida, através do seguinte procedimento:

1. Ajustar o exemplar à prensa, ao qual deverão estar conectados medidores de deslocamento com leituras independentes na direção do eixo longitudinal;
2. Carregar o corpo de prova até uma tensão de compressão de no máximo 20% da tensão prevista de ruptura; Verificar as deformações registradas pelos medidores; Se a diferença entre elas for superior que 20% da maior deformação lida, descarregar o

**Figura 2**

Localção dos pontos para plotagem de gráficos sem patamares

- exemplar e proceder ao ajuste mais correto de centragem do mesmo nos pratos da prensa, girando o exemplar;
3. Aplicar novamente a tensão e verificar as deformações;
4. Repetir esse procedimento até que a diferença entre as deformações lidas não seja superior do que 20% da maior deformação.
5. Logo após a compatibilização, deve-se aplicar um carregamento crescente à velocidade de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa, com pausas de 60s nas tensões indicadas, para as seguintes leituras de deformação:
 - Leitura à tensão básica (σ_a) = 0,5 MPa;
 - Leituras nas tensões de $0,2 f_c$, $0,3 f_c$, $0,4 f_c$, $0,5 f_c$, .onde f_c representa a estimativa da tensão de ruptura à compressão simples.

As deformações devem ser lidas num tempo máximo de 30s após

pausas de 60s, obrigatórias em cada patamar de carregamento. Segundo a norma, os valores representativos do comportamento tensão-deformação são aqueles obtidos após os 60s nos quais a tensão permanece constante em cada patamar (Figura 2). Estes valores serão utilizados para o traçado do diagrama tensão-deformação do concreto.

A metodologia especificada na norma apresenta diversos pontos passíveis de aperfeiçoamento, pois determina o comportamento tensão-deformação do concreto a partir de um número limitado de resultados, e inclui, no comportamento elástico do material, fenômenos diferidos como microfissuração e fluência, ocorridos durante o tempo de estabilização de cargas nos patamares. Além disso, a tensão básica de 0,5 MPa é muito baixa para se garantir a estabilização da carga em prensas projetadas para concretos de alta resistência. A seguir, apresenta-se uma discussão sobre estes temas.

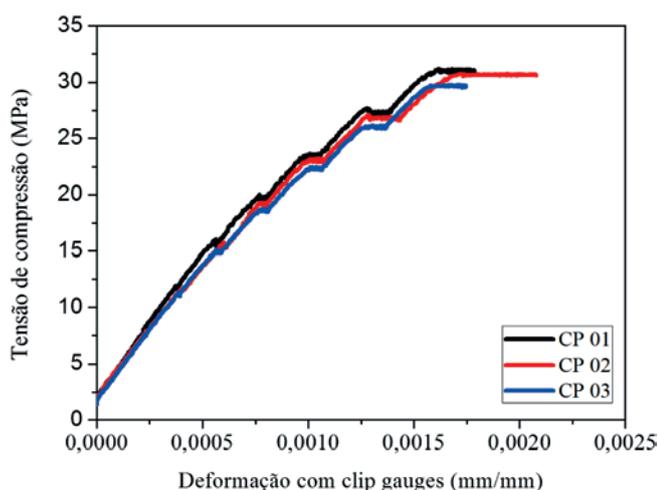
**Figura 3**

Gráfico tensão-deformação com os patamares de estabilização do carregamento previstos na norma

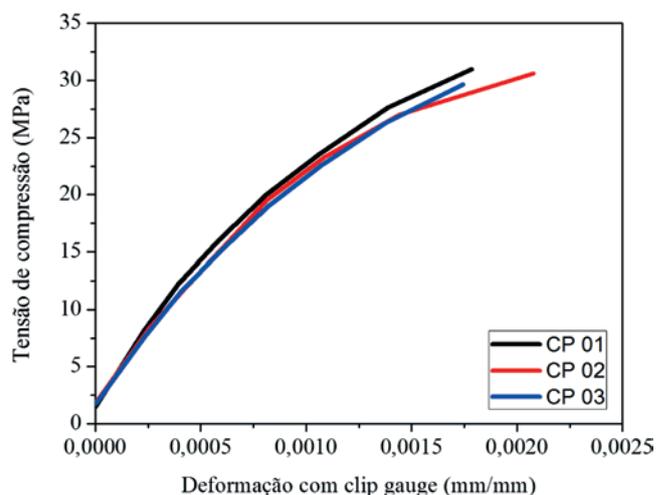
**Figura 4**

Gráfico tensão-deformação obtido após a retirada dos patamares especificados na norma

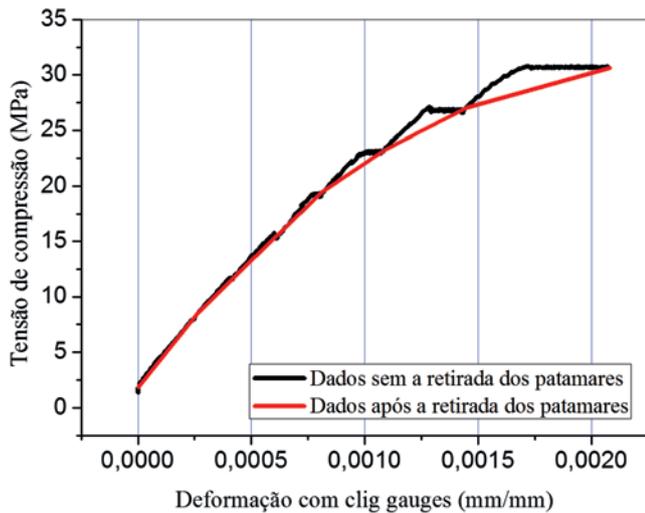


Figura 5

Gráfico tensão-deformação com os patamares de estabilização e após a retirada dos patamares especificados na norma – exemplo de corpo-de-prova representativo das diferenças de comportamento

2.1 Determinação da curva tensão-deformação

Ao se traçar um gráfico a partir dos dados de tensão aplicada com a correspondente deformação específica resultante, obtém-se curvas semelhantes às mostradas na Figura 3, correspondentes a três corpos-de-prova provenientes do mesmo concreto, com uso de aquisição de dados automatizada.

Os patamares observados na curva são decorrentes do procedimento experimental determinado pela NBR 8522 [9], que preconiza fazer as leituras de tensão e deformação em até 30s e somente após a tensão aplicada ter sido mantida constante por 60s. Desta forma, quando é empregada instrumentação que permita a aquisição de dados com pequenos intervalos de tempo entre as leituras, o efeito de microfissuração ou de deformações diferidas (fluência ou comportamento viscoelástico) fica evidente.

A adoção do critério especificado pela norma nas curvas apresentadas na Figura 3, excluindo os patamares de carregamento e considerando como válidos os pontos obtidos somente após a manutenção da carga por no mínimo 60s, resulta em curvas tensão-deformação com o formato visualizado na Figura 4. É possível observar na Figura 5 a curva obtida através do ensaio com os patamares e a curva tratada para o corpo de prova mais representativo. Os procedimentos de ensaio prescritos pela NBR 8522 [9] permitem a determinação da curva tensão-deformação mesmo quando os equipamentos utilizados são de leitura analógica e manual, como é o caso de deslocamentos lidos a partir de um ou mais relógios comparadores (deflectores mecânicos). Para equalizar os tempos de leitura em qualquer condição experimental, a norma impõe a permanência em cada patamar de carga por 60s, permitindo até mais 30s para a leitura dos diversos mostradores analógicos. Tal procedimento traz duas consequências: a definição da curva de comportamento tensão-

-deformação a partir de um número bastante limitado de pontos, e a inclusão, no comportamento elástico do material, de fenômenos diferidos (microfissuração, fluência, etc.) ao impor até 90s de cargas constantes em cada nível de leitura. Esses fenômenos diferidos se tornam mais evidentes à medida que as tensões de compressão aplicadas crescem (como visto na Figura 3).

Quando há disponibilidade de uma prensa automatizada que permita a programação da velocidade de aplicação de carga e a aquisição digital das cargas aplicadas em cada instante, e também uma instrumentação automatizada que permita a aquisição digital dos dados de deslocamento de forma simultânea à aquisição das informações de cargas, parece ser desnecessário se manter patamares de carga constante por 60s a 90s nos poucos níveis de carga especificados para o ensaio, uma vez que numa aquisição contínua de dados todas as cargas aplicadas podem ser utilizadas como níveis de medida, aumentando a representatividade do ensaio.

A exclusão dos patamares de carga reflete de forma mais fiel e com menor variabilidade o comportamento tensão-deformação do concreto. Neste caso, a obtenção da curva representativa do comportamento tensão-deformação e a definição do valor do Módulo de Elasticidade Tangente Inicial pode ser realizada a partir de uma regressão linear simples (por mínimos quadrados) utilizando-se todos os pontos adquiridos entre a tensão mínima a partir da qual não há mais efeito de acomodação do exemplar na prensa (tensão básica) e a tensão limite superior especificada para o ensaio.

2.2 Tensão básica estabelecida para o ensaio

A Norma estabelece uma tensão básica para o ensaio de 0,5 MPa. Este valor, em algumas situações, pode gerar erros na determinação do módulo de elasticidade.

Em função da elevada resistência dos concretos atuais, as prensas modernas tendem a ter uma capacidade de carga elevada (na ordem de 200 tf ou mais) e, como consequência, elevação no valor da carga mínima onde há precisão da leitura da força aplicada. Pelo mesmo motivo de aumento das resistências, o uso de corpos de prova de dimensões 10x20cm em substituição aos de 15x30cm tornou-se generalizado. Em função desses dois fatores, a tensão inferior de 0,5 MPa estabelecida pela norma para o ensaio do módulo tangente inicial pode estar fora da faixa onde a precisão de leitura no equipamento de ensaio se mantém.

Além do exposto, nos gráficos obtidos com equipamentos com coleta automatizada de dados a parte inicial da curva tensão-deformação sempre apresenta um comportamento diferenciado do restante da curva, como consequência de acomodações e restrições do equipamento de ensaio, não refletindo o comportamento do material.

Logo, considerando-se que o concreto tem um comportamento elástico linear no trecho inicial de carregamento, a tensão inferior pode ser estabelecida em um nível de carregamento mais alto que 0,5 MPa, sem que isso comprometa a obtenção do Módulo Tangente inicial diminuindo o erro decorrente das restrições da prensa utilizada.

2.3 Umidade dos corpos-de-prova

É consensual na comunidade científica que a cura do concreto

seja feita em um ambiente úmido para permitir a hidratação dos compostos do cimento e a redução da porosidade da pasta de cimento hidratada [10]. Neville [12] recomenda que uma umidade relativa de no mínimo 80% seja mantida para uma adequada hidratação do cimento. Se um concreto não é bem curado, especialmente em baixas idades, ele poderá sofrer perdas irreparáveis [13]. Segundo o Mehta e Monteiro [11], a baixa umidade pode gerar microfissuras devido a retração por secagem do concreto, colocando em risco o desempenho do mesmo. Os efeitos prejudiciais ocasionados pela secagem e consequentemente pelo encolhimento autógeno, especialmente para concretos com menor relação a/c, alteram sensivelmente as suas propriedades. Devido aos motivos expostos, a maioria das normas técnicas especificam que os corpos-de-prova de concreto sejam curados em ambiente saturado, e nesta mesma condição seja determinada a sua resistência a compressão. A umidade interna dos corpos-de-prova tem um efeito considerável em sua resistência a compressão, sendo conhecido que a resistência a compressão de corpos-de-prova secos em ambiente de laboratório é cerca de 15% maior que a observada em corpos-de-prova saturados, de mesma composição e submetidos ao mesmo processo de cura[2].

O efeito da umidade no módulo de elasticidade, entretanto, é controverso. Autores como Li [14] afirmam que concretos saturados apresentam um módulo de elasticidade estático maior que concretos secos, para um mesmo traço e processo de cura. Outros, como Shoukry et al. [15] afirmam que o módulo de elasticidade segue a mesma tendência da resistência a compressão, sendo até 20% maior em corpos-de-prova cuja umidade está em equilíbrio com o ar, quando comparados a corpos-de-prova saturados. Liu et al [16], em uma revisão sobre o tema, afirmam que há consenso de que em função do aumento do grau de saturação do concreto sua resistência diminui e o módulo de elasticidade aumenta. Em seus experimentos, foi observado um aumento de até 30% no valor do módulo de elasticidade estático, comparando-se um concreto seco como o mesmo concreto no estado saturado.

A NBR 8522 [9] faz menção à NBR 5738 [17] que diz respeito à moldagem e cura dos exemplares para o ensaio de compressão simples, que preconiza o uso de corpos-de-prova saturados. Para esta condição, o resultado obtido para a tensão de compressão do exemplar é um valor menor do que o obtido com o mesmo seco, reproduzindo portanto a situação mais crítica, importante para o dimensionamento de estruturas no estado limite último. Porém, as condições ambientais críticas para o Módulo de Elasticidade são aquelas que levam a um menor valor, ou seja, em condição seca. O uso de corpos-de-prova secos acarretaria maiores deformações para as mesmas tensões, o que é crítico tanto para o dimensionamento de seções de concreto armado em estado limite último, devido à compatibilização das tensões entre aço e concreto, quanto para a verificação da estrutura em estado limite de serviço. Salvador [18] mostra que a umidade relativa do ar afeta a deformação em cada instante de uma peça de concreto, e que o aumento da umidade do ar leva à diminuição das flechas em uma peça fletida, bem como a diminuição da umidade a um aumento nas flechas. Assim, a condição crítica para a determinação do módulo de elasticidade é a condição seca, e não a saturada como preconizado pela NBR 8522 [9].

A utilização de corpos-de-prova na condição seca, entretanto, esbarra em impedimentos técnicos, uma vez que ao longo do período de cura os exemplares estão submetidos à cura submersa ou a ambiente saturado e o tempo necessário para uma secagem completa do corpo-de-prova após a retirada do ambiente de cura pode chegar a alguns dias, impedindo que o ensaio seja realizado na data estipulada – na idade usual para a realização do ensaio, de 28 dias, a redução do tempo de secagem a algumas horas por meio de secagem acelerada não é aconselhada, pois pode gerar tensões internas de tração e prejudicar as propriedades mecânicas do concreto. Se alternativamente os corpos-de-prova forem retirados da sala de cura dias antes do ensaio (para permitir a sua secagem), a cura será prejudicada e não haverá como comparar os valores de resistência obtidos em exemplares com diferentes tempos de secagem - Entretanto, em concretos com idade elevada, o tempo necessário para a secagem do exemplar exerce uma influência desprezível em suas propriedades mecânicas (pois o exemplar já apresenta um grau de hidratação elevado), e nestes o uso de corpos-de-prova no estado seco poderia ser adotado, melhor representando a situação mais crítica para a determinação do módulo de elasticidade. Alternativamente, um coeficiente de minoração poderia ser utilizado para estimar o valor do Módulo de Elasticidade na condição ambiental mais crítica (na condição seca) a partir do valor obtido experimentalmente em corpos-de-prova saturados. Esta consideração pode ser crítica em concretos com agregados reciclados, em função de sua porosidade ser mais elevada que a de concretos com agregados naturais e, consequentemente, haver maior quantidade de água livre em seu interior.

O Módulo de Elasticidade para concretos com agregados reciclados são baixos em relação aos concretos que utilizam 100% de agregados naturais, como observado por autores como Xiao, Li e Zhang [19], Katz [4] e Benetti [8]. Segundo Leite [20] o Módulo de Elasticidade do concreto depende, entre outros fatores, do agregado utilizado, cujo módulo de deformação está relacionado principalmente à sua porosidade, e é esta que controla a capacidade de restrição da deformação da matriz do concreto. Para Xiao, Li e Poon [21], o Módulo de Elasticidade para concretos com ARC é sempre menor em relação a concretos convencionais devido a grande quantidade de argamassa ligada ao agregado natural, a qual quase sempre tem menores módulos de elasticidade.

Domingo et al. [22] e Brito e Alves [23] verificaram que há uma tendência para a redução do Módulo de Elasticidade quanto maior for a proporção do agregado reciclado na mistura, fazendo com que a rigidez dos concretos diminua.

Na pesquisa de Topçu e Gunçan [24], valores da redução do Módulo de Elasticidade para concretos com ARC foram de até 80% em relação a concretos com AGN. Xiao, Li e Zhang [19] encontraram valores até 45% inferiores para o módulo quando houve substituição de 100% do AGN pelo ARC. Como se pode observar, os valores encontrados para o Módulo de Elasticidade entre concretos com e sem ARC são muito divergentes, pois dependem de diversos fatores inerentes ao próprio ARC utilizado, como: idade do concreto de origem, resistência, quantidade de argamassa aderida, porcentagem de substituição, entre outros. Da mesma forma, a complexidade na estimação do módulo através das formulações apresentadas por normas para concretos convencionais aumenta para concretos que utilizam ARC.

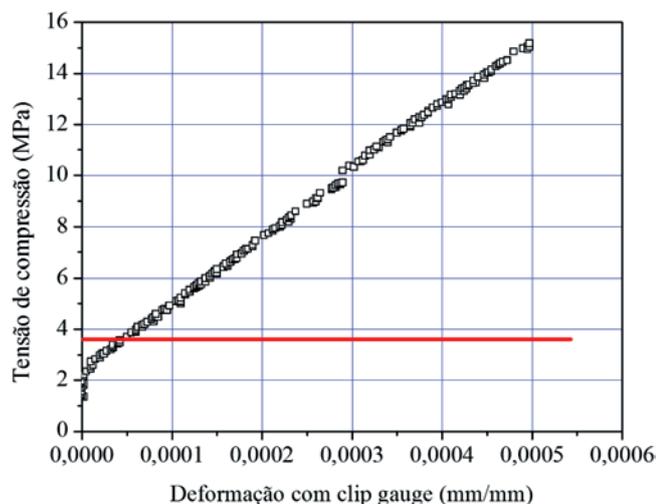


Figura 6
Tensão-deformação para o concreto sem ARC, rompido aos 28 dias e com relação $a/agl. = 0,65$

3. Programa experimental adotando-se as alterações metodológicas propostas

De modo a exemplificar o que foi discutido, foi elaborado um programa experimental onde foram ensaiados concretos com agregados convencionais e com a substituição de 50% do agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado de concreto (ARC).

No programa experimental foi utilizado cimento CPV-ARI RS; agregado gráudo natural (AGN) de origem basáltica, retido na peneira de malha 4,8 mm e passante na peneira 19 mm; com massa unitária de 1,51 g/cm³ e massa específica de 2,73 g/cm³; agregado miúdo natural (AMN) de origem quartzosa, retido na peneira de malha 0,075 mm e o passante em malha 4,8 mm (permanecendo dentro da zona ótima de utilização), mas-

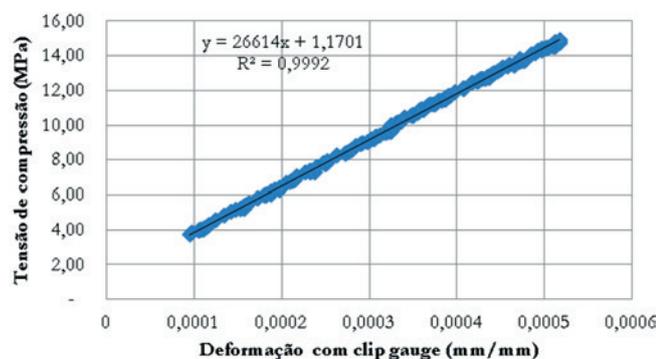


Figura 7
Gráfico tensão-deformação com o MEE obtido através de regressão para exemplar de concreto com ARC, $a/agl. = 0,45$, aos 28 dias de idade

sa unitária de 1,47 g/cm³ e massa específica de 2,57 g/cm³; e agregado reciclado de concreto (ARC) proveniente de resíduos de estacas advindas de empresa de pré-fabricados (concreto original com f_{cj} de 35 MPa, submetido a cura térmica), retido na peneira de malha 4,8 mm e o passante na peneira 19 mm, com massa específica de 1,13 g/cm³ e a massa unitária de 2,21 g/cm³.

3.1 Métodos e Parâmetros de Ensaio

Os traços utilizados para os concretos com e sem agregados reciclados foram de 1: 1,641 : 2,25 ($a/agl = 0,45$); 1 : 2,228 : 2,75 ($a/agl = 0,55$) e 1 : 2,815 : 3,25 ($a/agl = 0,65$), determinados a partir do método de dosagem do IPT/EPUSP de Helene e Terzian [25]. O abatimento foi fixado em 100 ± 20 mm, o teor de argamassa adotado foi de 54% e a quantidade de água $H = 9,2\%$. A dosagem e moldagem dos exemplares foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção da UNISINOS, sendo os exemplares submetidos a cura submersa em câmara de cura por 28 dias. Considerando os concretos com e sem ARC, foram executadas seis betonadas de 70 kg cada, resultando assim, em dezoito corpos-de-prova para cada traço (betonada) de relação água/aglomerante 0,45; 0,55 e 0,65. De cada dezoito exemplares, seis foram destinados para cada idade estipulada (7, 28 e 63 dias), sendo dois utilizados para a resistência à compressão, três para os ensaios de Módulo de Elasticidade e um posto de reserva. Os resultados aos sete dias mostraram que, principalmente para os concretos com ARC, há grande variabilidade nos valores de módulo, uma vez que as reações químicas e as condições de hidratação ainda não estão estáveis, e por este motivo desaconselha-se a determinação do módulo de elasticidade nesta idade.

Após a estimativa da resistência à compressão dos concretos (média entre os resultados de três corpos-de-prova), o Módulo de Elasticidade foi determinado seguindo as etapas 1, 2 e 3 descritas no item 6.2.2.1 da norma NBR 8522 [9]. Foram realizadas medições em 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80% da carga última de ruptura para a determinação do comportamento tensão-deformação, sendo respeitados os 60s de intervalo em cada patamar. A medição das cargas foi realizada em uma prensa Controls de 2000 KN automatizada classe I e a das deformações com o auxílio de dois sensores do tipo Clip Gauge modelo ER-25 da empresa MSI, com 100 mm de extensão. A aquisição de dados durante o ensaio de Módulo de Elasticidade Estático foi processada por um data logger Ahlborn modelo ALMEMO® 2490 e registrada em um notebook, junto com os dados da carga aplicada, a cada três segundos de ensaio. As deformações específicas foram obtidas dividindo-se os deslocamentos adquiridos pelo data logger pelo comprimento base dos clip gauges, 100 mm. As correspondentes tensões de compressão aplicadas foram obtidas dividindo-se o valor das cargas aplicadas pela área da seção transversal do corpo-de-prova.

3.2 Obtenção do Módulo de Elasticidade Tangente Inicial

Conforme a NBR 8522 [9], o Módulo de Elasticidade Tangente

Inicial, E_{ci} , em megapascais, deve ser calculado através da equação 1:

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (1)$$

Onde:

σ_b é a tensão maior, em megapascais; ($\sigma_b = 0,3 f_c$);

0,5 é a tensão básica, expressa em megapascais (MPa);

ε_b é a deformação específica média dos corpos-de-prova sob a tensão maior;

ε_a é a deformação específica média dos corpos-de-prova sob tensão básica (0,5 MPa).

A norma estabelece uma tensão básica de 0,5 MPa, a partir da qual os corpos-de-prova são submetidos a tensões crescentes até $0,3 f_c$, permitindo o cálculo do Módulo de Elasticidade. O valor σ_b e ε_b correspondentes a $0,3 f_c$ são obtidos a partir da curva tensão-deformação da NBR 8522 [9], ou seja, são valores obtidos com a tensão mantida estável por um período mínimo de 60s e máximo de 90s. Contudo, nos ensaios realizados, não foi possível estabilizar a tensão aplicada pela prensa a níveis tão baixos como 0,5 MPa para todos os exemplares, uma vez que a prensa apresenta um patamar de linearidade inferior de 20 kN, o que equivale a uma tensão de 2,55 MPa para corpos-de-prova de 10 x 20cm. Além do limite inferior de calibração da prensa, sabe-se que no início do processo de

Table 1

Comparison of MMW obtained using NBR 8522 (9) and regression (concretes without RCA)

		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Mean	CV	Relative difference
w:aggl 0.45	MEE (GPa)	37.49	25.26	28.58	26.92	23.50%	3.54%
28 days	MEE (GPa) Regression	39.09	26.53	29.23	27.88	23.70%	3.54%
Without RCA	Relative difference	4.30%	5.00%	2.20%	-	-	-
w:aggl 0.55	MEE (GPa)	29.21	22.97	22.94	22.96	15.70%	6.83%
28 days	MEE (GPa) Regression	27.53	24.68	24.36	24.52	7.10%	6.83%
Without RCA	Relative difference	-5.70%	7.50%	6.20%	-	-	-
w:aggl 0.65	MEE (GPa)	18.16	21.03	20.38	19.86	7.60%	5.88%
28 days	MEE (GPa) Regression	19.17	22.14	21.77	21.03	7.70%	5.88%
Without RCA	Relative difference	5.60%	5.30%	6.80%	-	-	-
w:aggl 0.45	MEE (GPa)	24.02	29.52	24.96	26.17	11.20%	3.67%
63 days	MEE (GPa) Regression	26.06	30.25	25.08	27.13	10.10%	3.67%
Without RCA	Relative difference	8.50%	2.50%	0.50%	-	-	-
w:aggl 0.55	MEE (GPa)	24.69	26.08	24.21	24.99	3.90%	5.43%
63 days	MEE (GPa) Regression	25.04	27.47	26.54	26.35	4.60%	5.43%
Without RCA	Relative difference	1.40%	5.30%	9.60%	-	-	-
w:aggl 0.65	MEE (GPa)	22.11	23.71	23.9	23.24	4.20%	7.94%
63 days	MEE (GPa) Regression	23.217	25.15	24.85	25.08	0.80%	7.94%
Without RCA	Relative difference	5.00%	6.10%	4.00%	-	-	-

CV = Coefficient of variation. Relative difference is between mean MEE and MEE obtained by regression.

aplicação de tensões por parte da prensa, com a acomodação dos corpos-de-prova, a falta de precisão no início da escala de cargas, e outros fatores fazem com que as leituras obtidas não reproduzam com fidelidade o comportamento do material ensaiado sob tensões. Cada corpo-de-prova demandou uma tensão de estabilização diferente, chegando a 3,6 MPa no caso mais crítico. O gráfico tensão-deformação apresentado na Figura 6 ilustra a curva típica obtida nos ensaios até o valor de $0,3 f_c$. Como é possível verificar, a zona de pontos iniciais apresenta um comportamento que não é inerente ao material (uma vez que todos os exemplares, de todas as relações a/aglomerante, com e sem agregado reciclado e de 28 e 63 dias de idade apresentaram o mesmo comportamento), e sim, é relativo à forma como o ensaio

é desenvolvido e também, devido à prensa que possui capacidade muito superior às cargas aplicadas.

Desta forma, o Módulo de Elasticidade foi obtido para todos os corpos-de-prova a partir da expressão modificada (Equação 2):

$$E_{ct} = \frac{\sigma_b - 3,6MPa}{\varepsilon_b - \varepsilon_x} \quad (2)$$

Onde:

ε_x é a deformação em 3,6 MPa.

Se o material é elástico linear ao longo de toda a faixa de tensões abaixo de $0,3 f_c$, o uso da expressão original ou da modificada resulta no mesmo valor de Módulo de Elasticidade.

Table 2

Comparison of MMW obtained using NBR 8522 (9) and regression (concretes with RCA)

		Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Mean	CV	Relative difference
w:aggl 0.45	MEE (GPa)	25.63	20.77	24.74	23.71	10.90%	6.95%
28 days	MEE (GPa) Regression	26.22	23.24	26.61	25.36	7.30%	6.95%
Without RCA	Relative difference	2.30%	11.90%	7.60%	-	-	-
w:aggl 0.55	MEE (GPa)	20.2	27.62	20	20.1	21.60%	-0.16%
28 days	MEE (GPa) Regression	20.16	25.09	19.98	20.07	14.40%	-0.16%
Without RCA	Relative difference	-0.20%	-9.20%	-0.10%	-	-	-
w:aggl 0.65	MEE (GPa)	21.67	23.67	20.83	22.06	6.60%	4.96%
28 days	MEE (GPa) Regression	23.08	24.76	21.63	23.15	6.80%	4.96%
Without RCA	Relative difference	6.50%	4.60%	3.80%	-	-	-
w:aggl 0.45	MEE (GPa)	22.41	19.5	21.11	21.01	6.90%	10.63%
63 days	MEE (GPa) Regression	24.31	20.03	22.79	23.24	14.90%	10.63%
Without RCA	Relative difference	8.50%	2.70%	7.90%	-	-	-
w:aggl 0.55	MEE (GPa)	24.71	28.36	22.02	25.03	12.70%	1.79%
63 days	MEE (GPa) Regression	24.27	28.271	2.56	25.48	9.50%	1.79%
Without RCA	Relative difference	-1.80%	-0.30%	2.50%	-	-	-
w:aggl 0.65	MEE (GPa)	26.39	22.47	23.8	24.22	8.20%	2.93%
63 days	MEE (GPa) Regression	26.71	23.59	24.48	24.93	6.50%	2.93%
Without RCA	Relative difference	1.20%	5.00%	2.90%	-	-	-

CV = Coefficient of variation. Relative difference is between mean MEE and MEE obtained by regression.

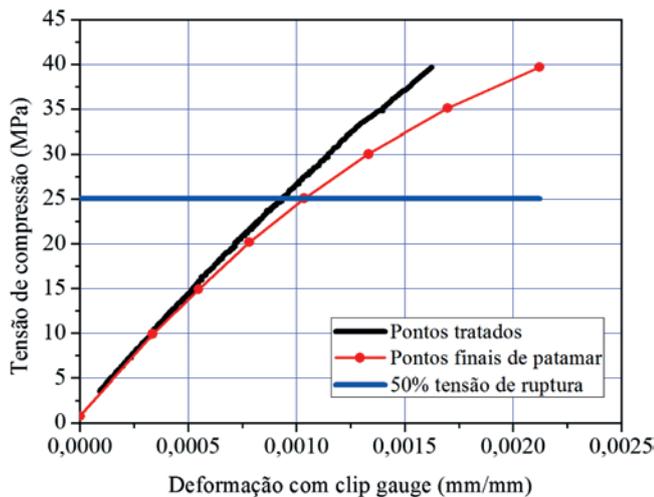


Figura 8

Comparação das curvas de MEE dos dados tratados e com os pontos finais de cada patamar do exemplar com $a/agl. = 0,45$, com agregado reciclado e idade de 28 dias

3.3 Apresentação e Análises de Resultados

3.3.1 Comportamento Elástico e Obtenção do Módulo por Regressão

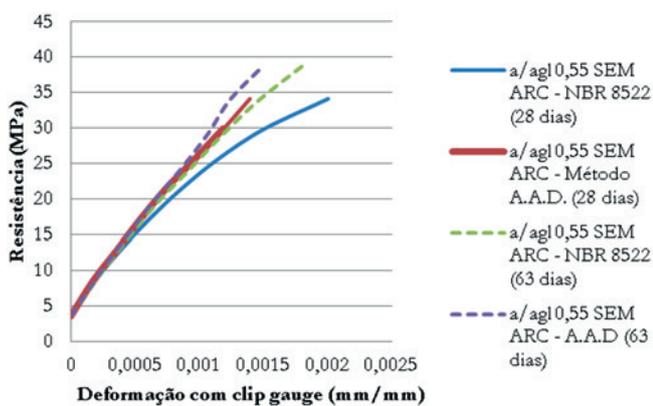
Com o intuito de verificar a influência dos patamares de carga, foi realizada uma simulação de valores tensão-deformação, caso o ensaio fosse realizado de maneira direta (sem patamares e/ou paradas para leitura de deformações). Neste caso, o valor de módulo de elasticidade foi obtido através da inclinação de reta

pela regressão por mínimos quadrados. Um exemplo do resultado final é demonstrado na Figura 7.

A inclinação da reta informa que o valor de Módulo de Elasticidade do concreto ensaiado tem o valor de 26,61 GPa. As Tabelas 1 e 2 demonstram as diferenças entre os valores obtidos através de regressão e através do método da NBR 8522 [9], assim como os coeficientes de variação e as diferenças relativas, onde: CV = Coeficiente de variação. DIFER. REL. = diferença relativa entre a média de MEE e MEE por regressão. Os resultados obtidos por regressão indicam que a execução do ensaio sem patamares e com controle da velocidade de aplicação da carga resulta em menor dispersão dos resultados. Conceitualmente, o módulo deixa de ser definido por apenas dois pares tensão-deformação e passa a ser definido pela totalidade de pares obtidos na faixa de tensões do ensaio, minimizando o efeito de variabilidade de medida em relação aos pares escolhidos e dando mais confiabilidade ao resultado. Observa-se que nos exemplares com agregados naturais há uma diferença clara e relativamente uniforme entre os valores obtidos pelos dois métodos, confirmando a afirmação anterior, enquanto nos exemplares com agregados reciclados a diferença entre os valores de módulo obtidos pelas duas metodologias é muito variável. Este comportamento é explicado pela variabilidade típica dos concretos com agregados reciclados, uma vez que a elevada porosidade da fração de argamassa antiga aderida à brita do agregado reciclado e da antiga zona de transição entre estas fases, aliado a falta de homogeneidade na distribuição dos agregados reciclados no concreto novo, acentua os erros decorrentes de uma pequena quantidade de leituras de tensão-deformação quando utilizado o método preconizado na norma brasileira, e é atenuado pela adoção de medidas contínuas destes valores.

3.3.2 Curvas Tensão-Deformação

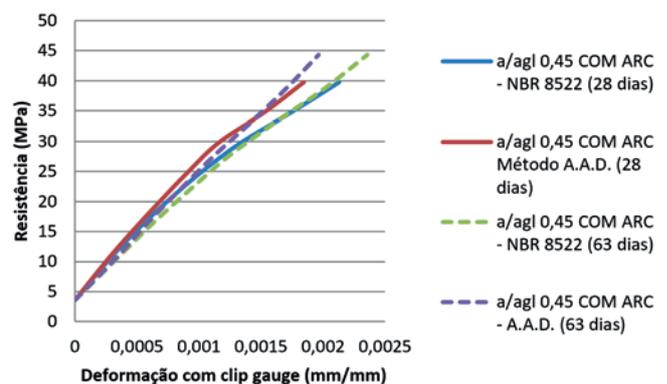
O gráfico da Figura 8 compara as formas de obtenção das curvas



Onde: A.A.D = Aquisição automática de dados.

Figura 9

Curvas médias para concretos de mesma relação $a/agl.$ (28 e 63 dias) – Obtenção de dados conforme a NBR 8522 e por aquisição automática de dados



Onde: A.A.D = Aquisição automática de dados.

Figura 10

Curvas médias para concretos de mesma relação $a/agl.$ com ARC (28 e 63 dias) – Obtenção de dados conforme a NBR 8522 e por aquisição automática de dados

tensão-deformação, e é representativo de todos os resultados obtidos no programa experimental. A curva em vermelho foi obtida a partir do procedimento da NBR 8522 [9], onde os valores representativos são somente os pares tensão-deformação obtidos com a manutenção da tensão constante por um intervalo entre 60 e 90s. A curva em preto é resultante do tratamento dos pontos obtidos pelo sistema automatizado de aquisição de dados utilizado nos ensaios, simulando os dados obtidos em um ensaio com velocidade de aplicação de carga constante e sem patamares de tensão constante.

Pode-se verificar que as curvas tensão-deformação obtidas pelos diferentes métodos diferem consideravelmente a partir de 50% da tensão de ruptura. A região até $0,7 f_c$ é empregada corriqueiramente no projeto de peças de concreto armado, tornando a previsão de deformações para esses níveis de tensão importante. Como esperado, as curvas obtidas pelo procedimento da NBR 8522 [9] são menos rígidas (possuem maiores deformações para os mesmos níveis de tensão) e altamente dependentes do tempo em que as tensões são mantidas constantes em um mesmo patamar (de 60 a 90s). As curvas obtidas com leituras feitas ao final de 60s tendem a ser mais rígidas que as obtidas com a leitura feita ao final de 90s, em função dos efeitos de microfissuração e deformação diferida, amplificados pela manutenção da tensão em níveis constantes.

Conclui-se que havendo disponibilidade de equipamentos de ensaio que permitam a aplicação de cargas a uma velocidade constante e a aquisição das cargas e das respectivas deformações de forma automatizada e com um grande número de leituras, o procedimento de ensaio indicado pela NBR 8522 resulta em deformações maiores do que as reais, e que esta diferença se acentua em maiores níveis de carregamento e em concretos com agregados reciclados.

As curvas das Figuras 9 e 10 foram escolhidas aleatoriamente e é possível observar que o procedimento de aquisição de dados através de sistema automatizado resulta em curvas mais rígidas em relação ao procedimento da norma, uma vez que a aplicação de cargas a velocidade constante sem a manutenção de patamares de tensão constante minimiza os efeitos de fluência e microfissuração (este fator ocorre em todos os concretos, com e sem ARC).

4. Conclusões

Ao se analisar o procedimento de ensaio para determinação do Módulo de Elasticidade Estático preconizado pela norma NBR 8522 [9], pode-se intuir claramente que a metodologia prevista pela norma foi desenvolvida para uso em equipamentos de ensaio não instrumentados, com leitura manual de valores de carga e deslocamento. Entretanto, ao se utilizar instrumentação que permita a aquisição instantânea de dados e a manutenção da aplicação de carga constante, as deficiências decorrentes da adoção de patamares (que resultam na inserção do efeito da microfissuração e de deformações diferidas geradas durante o tempo de estabilização de carregamento) se tornam visíveis, e em níveis de carregamento superiores a 50% da carga última de ruptura distorcem fortemente o traçado da curva. Nos ensaios realizados, observa-se que o procedimento de aquisição de dados através de sistema automatizado resulta em curvas mais rígidas em relação ao procedimento da norma. Deste modo, propõe-se que para o traçado

da curva tensão-deformação sejam utilizados equipamentos automatizados, com aplicação de carga a uma velocidade constante (de carregamento ou de deformação) ao longo de todo o ensaio - sem patamares - e se determine o módulo de elasticidade e a curva tensão-deformação utilizando-se os valores obtidos por regressão por mínimos quadrados. As curvas obtidas mostram que os concretos com ARC têm comportamento similar aos concretos sem ARC, mas são menos rígidos (maiores deformações para as mesmas tensões). Os concretos com ARC, em função de suas características, apresentam maior coeficiente de variação entre os resultados obtidos adotando-se a metodologia da norma NBR 8522 [9] e a proposta.

Em prensas com elevada capacidade de carga verifica-se que a estabilização da tensão aplicada pela prensa a níveis tão baixos como 0,5 MPa pode gerar imprecisão na medição, portanto propõe-se que um novo patamar de estabilização (em um valor superior a este) seja adotado. Considerando-se que neste trecho a curva apresenta comportamento linear, não há impedimentos para tal prática.

A geração da curva que representa o comportamento tensão-deformação do concreto, quando se realiza a coleta de dados automatizada, e a aplicação de cargas de forma monotonicamente crescente, com velocidade constante e sem a manutenção de patamares de tensão constante para a leitura dos resultados, resulta em curvas tensão-deformação mais rígidas (com menores deformações para os mesmos níveis de tensão) em relação às curvas preconizadas pela norma NBR 8522 [9].

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, FINEP, PreConcretos e Votorantim pelos auxílios concedidos.

6. Referências bibliográficas

- [1] MELO NETO, A. A.; HELENE, P. R. L., Módulo de Elasticidade: Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, Brasil, 2002. Anais... IBRACON, 2002.
- [2] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3 ed. Ibracon: São Paulo, 2008.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimentos. Rio de Janeiro, 2007.
- [4] KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 5, p. 703-711, 2003.
- [5] ZEGA, C. J.; VILLAGRAN-ZACCARDI, Y. A.; DI MAIO, A. A. Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Materials and Structures*, v. 43, n. 1-2, p. 195-202, 2010.
- [6] LIMBACHIYA, M. C. et. al. Performance of recycled aggregate concrete. In: RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development, 2004, Londres, Inglaterra. Anais... RILEM, 2004.

- [7] BUTTLER, A. M. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influencia da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de pós graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [8] BENETTI, J. K. Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8522: Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2004.
- [10] FONSECA, N.; BRITO, J. de; EVANGELISTA, L. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, p. 637-643, 2011.
- [11] MEHTA K, MONTEIRO P. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw Hill; 2005. p. 665.
- [12] NEVILLE A. *Properties of concrete*. London: Pitman International Text; 1981.
- [13] RAMAN S, SAFIUDDIN MD, ZAIN M. Effect of different curing methods on the properties of microsilica concrete. *Australian Journal of Basic Applied Science* 2007.
- [14] LI, G. The effect of moisture content on the tensile strength properties of concrete. Dissertação (Mestrado em Engenharia), The University of Florida, 2004.
- [15] SHOUKRY S.N., WILLIAM G.W., DOWNIE B., RIAD M.Y. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v 25 (2), p. 688–96, 2011.
- [16] LIU, B.D.; LV, W.J.; LI L.; LI. P.F. Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 69, p. 133–142, 2014.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.
- [18] SALVADOR, P. F. Influência dos ciclos de execução nas deformações das estruturas de concreto armado de edifícios de andares múltiplos. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- [19] XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 6, p. 1187-1194, 2005.
- [20] LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- [21] XIAO, J.; LI, W.; POON, C. Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China – a review. *Science China Technological Science*, v. 55, n. 6, p. 1463-1480, 2012.
- [22] DOMINGO, A. et. al. Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*, v. 43, n. 8, p. 1147-1160, 2010.
- [23] BRITO, J. de; ALVES, F. Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. *Materials and Structures*, v. 43, p. 35-51, 2010.
- [24] TOPÇU, I. B.; GUNÇAN, N. F. Using waste concrete as aggregate. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 7, p. 1385-1390, 1995.
- [25] HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI. 349f. 1992.