

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE BETÕES PRODUZIDOS COM AGREGADOS GROSSOS RECICLADOS

Brito*, J. de; Santos**, J. R.; Gonçalves***, A. P.; Branco****, F. A.

*Professor Associado. DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal

**Assistente. DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal

***Eng.^a Civil, Mestre em Construção (IST)

****Professor Catedrático. DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal



RESUMO

Os agregados reciclados, tanto os utilizados na execução da camada de sub-base em estradas como os usados como substitutos nos agregados naturais no fabrico de betões, podem dar uma contribuição importante na diminuição das repercussões negativas que a produção e deposição dos resíduos da construção e demolição actualmente têm no ambiente. No âmbito da investigação que tem vindo a ser realizada no Instituto Superior Técnico neste domínio, apresentam-se neste artigo os resultados de dois programas de ensaios. No primeiro, visava-se a demonstração da sustentabilidade da reciclagem repetitiva de agregados pétreos grossos obtidos da demolição de betão no fabrico de novo betão sem qualquer introdução de agregados naturais. A segunda campanha de ensaios permitiu obter valores do módulo de elasticidade à compressão de betões com agregados grossos reciclados e compará-los com os valores correspondentes em betões de referência.

1. INTRODUÇÃO

A produção e deposição de resíduos da construção e demolição (vulgarmente designados por RCD) tem-se vindo a acentuar nas últimas décadas, sobretudo em países ainda em ciclo de forte desenvolvimento, como é o caso de Portugal.

Esta situação tem elevados custos ambientais e energéticos. Os vazadouros a céu aberto, com frequência em situação ilegal, são um ataque à estética ambiental, um desrespeito pelo direito público e privado, responsáveis pela diminuição de solo arável e potencialmente conducentes à poluição do ar, água freática e solo (ainda que os RCD

se integrem na classe de resíduos menos prejudicial ao ambiente). Indirectamente, o não aproveitamento dos agregados dos RCD contribui para a continuação da delapidação de recursos naturais nas pedreiras, autênticas feridas na paisagem rural.

Do ponto de vista energético, é desperdiçada toda a energia necessária ao corte e trituração dos agregados naturais.

Um dos grandes objectivos da reciclagem dos RCD é o reaproveitamento da parcela inorgânica não-metálica neles contidos como agregados no fabrico de novos materiais de construção, visando dois intuitos

de carácter ambiental: a redução do volume de resíduos levados a vazadouro e a diminuição da extracção de agregados naturais, um recurso não renovável. Insere-se portanto esta investigação na temática geral da Construção Sustentável.

Tem vindo a ser desenvolvida no Instituto Superior Técnico uma campanha de ensaios experimentais no domínio da reciclagem dos resíduos de construção e demolição, com particular ênfase na produção de betão com agregados grossos reciclados a partir de betão. Deste trabalho resultou já uma Dissertação de Mestrado em Construção, intitulada "Análise do Desempenho de Betões Obtidos a Partir de Inertes Reciclados Provenientes de Resíduos da Construção" [2], cujos resultados serão parcialmente analisados neste artigo.

Deve-se referir aqui que esta investigação não abarca mais do que uma pequena parcela da necessária neste vasto domínio. Sem se pretender ser fastidioso, basta referir que o fabrico de betões não é a única ou sequer a principal utilização dos agregados reciclados, actualmente mais vocacionados para a execução de bases e sub-bases de estradas e para a recuperação paisagística de pedreiras e minas abandonadas. Os agregados podem ser obtidos a partir de resíduos da demolição de peças de betão (o caso aqui apresentado), de elementos de alvenaria cerâmica (tijolos e telhas) não argamassados, de uma mistura de alvenaria com argamassa cimentícia ou de resíduos da demolição não triados. Destas diversas hipóteses resulta o tipo de agregados reciclados: pétreos (caso em estudo), cerâmicos, mistura de ambos ou mistura de elementos cimentícios, cerâmicos com detritos de diversas origens (madeira, plásticos, vidro, etc.).

Por sua vez, os agregados reciclados poderão corresponder apenas à parcela de grossos (caso em estudo), dos finos ou a ambos. Finalmente, a substituição dos agre-

gados naturais pela parcela equivalente de agregados reciclados poderá ser total (caso em estudo) ou parcial.

O conhecimento do desempenho técnico dos betões produzidos com agregados reciclados está longe de ter sido atingido ao se investigar as características mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade) dos mesmos, como é reportado no presente artigo. O comportamento térmico, acústico e higrométrico dos betões e argamassas produzidos com este tipo de agregados exige muito trabalho de investigação, o mesmo se passando com a durabilidade dos mesmos, em investigação no IST no âmbito de uma Tese de Doutoramento.

Outros domínios envolvendo os RCD incluem a elaboração de directrizes para a produção e normalização de RCD reciclados, bem como de especificações técnicas e métodos de ensaio específicos para sua aplicação em argamassas e betões, a viabilidade técnica e económica do recurso a agregados reciclados, a definição de uma política de aterros consequente, a questão legislativa (fundamental para a viabilização de uma política sustentável para os RCD) e a sua implementação e fiscalização.

Assim sendo, reporta-se neste artigo unicamente duas campanhas de ensaio em que foram analisadas a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a trabalhabilidade de betões produzidos com uma substituição total dos agregados grossos por agregados pétreos reciclados obtidos da trituração de elementos de betão.

2. RECICLAGEM REPETITIVA DE AGREGADOS

A primeira campanha de ensaios aqui referida visava demonstrar a sustentabilidade técnica da reciclagem repetitiva de betão para a produção de agregados grossos a serem utilizados no fabrico de novos elementos de betão. Para tal, tentou-se reproduzir as condições em que na prática

este tipo de procedimento poderá ser tentado, ou seja, recolheu-se um determinado volume de betão de origem mais ou menos desconhecida, conhecendo-se apenas a sua resistência à compressão, a qual indicava tratar-se de um C32/40. Este material foi triturado e, no fabrico de um conjunto de cubos de ensaio, substituiu-se a totalidade dos agregados grossos naturais por agregados grossos obtidos da trituração.

2.1 Sequência dos ensaios

Um dos preconceitos associados aos betões produzidos com agregados reciclados é o de terem uma fraca resistência mecânica. Para o pôr em causa, recorreu-se deliberadamente a um betão de origem relativamente resistente (C32/40) e estabeleceu-se uma composição do novo betão que desse algumas garantias em relação à sua futura capacidade mecânica. Realce-se, no entanto e desde já, que não era objectivo desta campanha de ensaios estabelecer comparações entre o betão produzido com agregados naturais e o produzido com agregados reciclados.

O betão de origem era constituído por um conjunto de 71 cubos de ensaio com 15 cm de aresta gentilmente cedidos pelo LNEC. A sua capacidade resistente à compressão era conhecida (em todos os cubos entre 40 e 45 MPa), mas não a sua composição, origem dos materiais componentes ou trabalhabilidade, até porque eram originários de mais de uma obra.

Estes cubos foram conduzidos a uma central de reciclagem fixa onde foram triturados, tendo-se recolhido a totalidade dos produtos dessa trituração. Foi determinada a percentagem desse material susceptível de ser reciclada (tendo em conta que apenas os agregados grossos - os retidos no peneiro n.º 4: 4.76 mm - o seriam e que a máxima dimensão do agregado ficou limitada aos 31.1 mm).

Foram retiradas amostras da parcela reciclada para se proceder à sua análise

granulométrica. Traçou-se a respectiva curva granulométrica (Fig. 1) assim como a da areia natural.

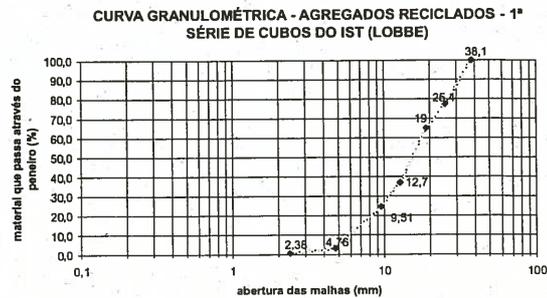


Fig. 1 - Curva granulométrica da parcela de grossos dos agregados reciclados do 1º ciclo



Fig. 2 - Aspecto dos agregados reciclados imersos em água para determinação da sua absorção

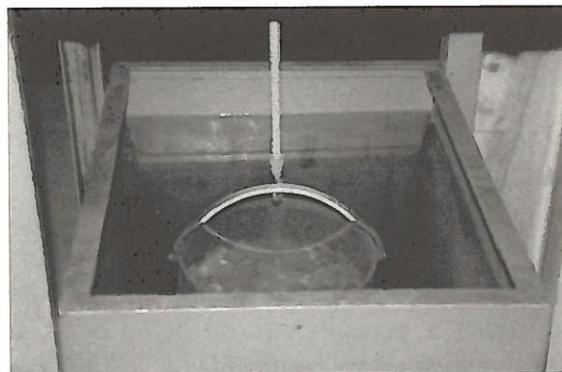


Fig. 3 - Determinação da massa dos agregados mergulhada em água

Um dos problemas identificados mais importantes nos agregados reciclados é a sua absorção de água, substancialmente superior à dos agregados naturais. Por essa razão, determinou-se essa característica seguindo-se a seguinte sequência (NP 581): retirou-se uma amostra de agregados reciclados que foi imersa em água (Fig. 2)



Fig. 4 - Estufa para secagem dos agregados

até à sua saturação; procedeu-se à secagem da sua superfície com um pano seco e à determinação da massa na condição saturado superfície seca (SSS); a amostra foi depois pesada dentro de água (Fig. 3), o que permitiu posteriormente a determinação da massa volúmica; a amostra foi então colocada numa estufa (Fig. 4) a 105 °C até à sua secagem e estabilização da massa; a absorção de água é obtida como uma relação entre as duas massas referidas.

A composição do betão foi feita através do método das curvas de referência de Faury. Nesta composição, para além do objectivo acima referido de obter uma classe de betão semelhante à do betão de origem, pretendia-se também conseguir uma trabalhabilidade aceitável (abaixamento no cone de Abrams entre 20 a 40 mm) sem recorrer a uma relação água / cimento (a/c) muito elevada (para compensar a grande absorção dos agregados). Pretendia-se desta forma acautelar a durabilidade do betão de uma forma indirecta, conhecida a influência negativa que uma relação a/c elevada tem nessa característica.

Após algumas tentativas, conseguiu-se atingir estes vários objectivos com a seguinte composição (por m³ de betão):

- 450 kg de cimento;
- 730 kg de areia natural;
- 1040 kg de agregados grossos reciclados;
- 202.5 l de água (a/c = 0.45);

- 1.6 l de adjuvante plastificante.

Determinou-se a trabalhabilidade das amassaduras (abaixamento no cone de Abrams - Fig. 5), três em cada ciclo de reciclagem, e iniciou-se o preenchimento com o betão fresco de 30 moldes metálicos cúbicos de 15 cm de aresta (previamente limpos e aspergidos com óleo descofrante). Após a compactação da massa até à eliminação de bolhas de ar, os cubos foram deixados no laboratório durante 24 horas, após o que foram marcados para identificação (Fig. 6), descofrados e levados para a câmara de cura, onde foram mantidos durante 27 dias à temperatura de 20 °C e com um teor de humidade de cerca de 100%.



Fig. 5 - Ensaio do cone de Abrams feito ao betão com agregados grossos reciclados



Fig. 6 - Aspecto dos cubos de ensaio após a sua marcação e imediatamente antes da sua descofragem e colocação na câmara de cura



Fig. 7 - Ensaio de rotura à compressão dos cubos

Após esse período, os cubos foram submetidos ao ensaio de determinação da tensão de rotura à compressão numa prensa (Fig. 7) de acordo com a Especificação LNEC E226. Foram determinados os seguintes valores: média, desvio padrão, coeficiente de variação e valor característico, correspondente ao quantil de 5% numa distribuição normal de Gauss. Com isto se encerrou aquilo que se designou por 1º ciclo de reciclagem.

O 2º ciclo iniciou-se com a trituração dos cubos na mesma central de reciclagem, tendo-se repetido os passos descritos para o 1º ciclo. Realça-se o facto de ter sido mantida a composição do betão, não obstante o aumento registado na absorção à água dos agregados grossos reciclados (pela 2ª vez). Uma vez que a capacidade da betoneira obrigava à realização de três amassaduras por ciclo, ensaiaram-se algumas variações em relação à composição de base, ainda que com resultados pouco conclusivos.

Houve ainda um 3º ciclo de reciclagem, idêntico aos anteriores excepto no facto de se terem triturado os cubos do ciclo anterior numa trituradora de menores dimensões do Laboratório do Departamento de Minas do IST (Fig. 8).

2.2 Análise dos resultados principais

Os resultados principais dos três ciclos de reciclagem são a trabalhabilidade das amassaduras (traduzida pelo abaixamento



Fig. 8 - Trituradora de menores dimensões usada apenas no 3º ciclo de reciclagem

respectivo no cone de Abrams, Δ), a resistência à compressão do betão (traduzida pelo valor característico da tensão de rotura à compressão, f_{ck} , e pela classe de resistência atribuída) e a absorção de água dos agregados grossos reciclados (traduzida em percentagem por c_{aa}). Passa-se à apresentação e justificação dos valores obtidos.

O valor médio de Δ nas três amassaduras foi de 2.8, 5.3 e 3.3 cm, respectivamente no 1º, 2º e 3º ciclos. Tendo-se mantido a composição do betão e nomeadamente a relação água / cimento aparente ($a/c = 0.45$) nos três ciclos, e tendo em conta que, como se verá de seguida, a absorção de água dos agregados reciclados foi sempre aumentando, seria de esperar que a trabalhabilidade das amassaduras e, conseqüentemente, o valor de Δ fosse diminuindo de ciclo para ciclo. O valor do 2º ciclo foge claramente desta tendência, o que é explicado pelas condições atmosféricas do dia da respectiva betonagem, particularmente húmidas, o que poderá ter influenciado o teor de água contido, quer na brita, quer na areia (neste caso, o teor superficial, em face da baixa capacidade de absorção das areias).

Os valores de f_{ck} obtidos sequencialmente nos três ciclos foram de 42, 40 e 46 MPa, correspondendo às seguintes classes de resistência do betão: C32/40 (idêntica à do betão de origem só com agregados naturais), C32/40 e C35/45.

Registou-se portanto alguma oscilação, ainda que não muito significativa, em torno do valor de 42 MPa, ou seja, a resistência do betão tendeu a manter-se constante ao longo dos ciclos de reciclagem. Pensa-se que essa tendência só foi ligeiramente alterada pelas condições atmosféricas, às quais as características dos betões produzidos com agregados reciclados parecem ser bastante sensíveis. Esta sensibilidade teria sido provavelmente eliminada, ou pelo menos fortemente atenuada, se se tivesse mantido a relação água / cimento efectiva constante, ou seja, tendo em conta a absorção crescente dos agregados reciclados, por os mesmos terem sido utilizados na condição seco ao ar. Existe um outro factor que poderá ter afectado os resultados do 3º ciclo: a variação na curva granulométrica, mais bem distribuída, resultado do diferente processo de trituração.

Um aspecto muito interessante a registar e que contradiz um pouco alguma bibliografia sobre esta matéria que reporta uma variabilidade significativa das resistências obtidas com agregados reciclados, foi o facto do coeficiente de variação obtido nos ensaios de resistência à compressão nos três ciclos terem sido particularmente baixos (não obstante corresponderem a duas ou três betonagens): 3.4%, 2.6% e 1.8%. Mesmo tratando-se de betonagens efectuadas em condições de laboratório, estes resultados vêm demonstrar que os betões produzidos com agregados reciclados podem ser tão fiáveis como os produzidos apenas com agregados naturais.

Em termos de absorção de água dos agregados grossos, foram os seguintes os valores de c_{aa} obtidos ao longo dos três ciclos: 6.3, 7.6 e 8.5. Verifica-se portanto que a parcela de argamassa que fica aderente aos agregados pétreos em cada trituração faz com que a absorção dos mesmos vá aumentando. Não é possível, com o número de ciclos efectuados, concluir defini-

tivamente se esta tendência crescente se vai ou não manter indefinidamente. É, no entanto, claro tratar-se este do problema principal da utilização dos agregados reciclados, já que a absorção dos agregados grossos naturais raramente ultrapassa 1%.

Ao condicionar a trabalhabilidade do betão fresco, a absorção de água pelos agregados conduz a uma de duas consequências, se se pretender manter a fluidez da amassadura: mantendo os restantes componentes, haverá que aumentar a quantidade de água, com todas as consequências negativas que o aumento da relação água / cimento tem nas resistências a longo prazo e, sobretudo, na durabilidade; para manter a relação água / cimento, terá de se aumentar a dosagem de cimento, recorrer a plastificantes ou superplastificantes ou tomar ambas as medidas (como foi feito nesta campanha de ensaios, o que explica a forte dosagem de cimento utilizada - 450 kg/m^3 - e o recurso a um plastificante). Pensa-se que esta segunda estratégia é a mais adequada, se bem que implique custos acrescidos na produção do betão. Realce-se que, na reciclagem repetitiva, esta necessidade, válida na passagem de apenas agregados naturais para a substituição mesmo que parcial por agregados reciclados, não se faz sentir, pelo menos de uma forma tão evidente. As quantidades adicionais de cimento e adjuvante poderão ser diminuídas recorrendo a um cimento de melhor qualidade e a um superplastificante.

2.3 Algumas variações aos ensaios

No decurso dos ciclos de reciclagem e uma vez que cada um correspondia a três amassaduras, foram feitas algumas variações em relação aos dados padrão. Assim, no 2º ciclo e em face do elevado abaixamento registado no cone de Abrams, fez-se duas das amassaduras com uma posologia menor de adjuvante: 1.6 l/m^3 . Ao contrário do que seria de esperar, não se registou uma diminuição na trabalhabilidade.

Registou-se, no entanto, uma redução mais fácil de explicar, de f_{ck} de 40 MPa para 38 MPa. Como se referiu, as condições atmosféricas, muito húmidas, terão afectado os resultados, pelo que a influência deste factor necessita de ser melhor investigada.

No 3º ciclo de reciclagem, tentou-se na 3ª amassadura analisar a influência da redução da dosagem de cimento de 450 para 400 kg/m³ (para manter a relação adjuvante / cimento, a dosagem do primeiro passou de 2.4 l/m³ para 2.13 l/m³). Se a diminuição do valor de Δ de 3.3 cm para 1.0 cm era esperada (a necessidade de uma vibração mais cuidada prenunciava-o), já a manutenção do valor de f_{ck} em 46 MPa não tem uma explicação evidente.

Como já referido anteriormente, houve uma alteração no processo de trituração no 3º ciclo de reciclagem, tendo-se recorrido a uma trituradora de menores dimensões. O processo implicava o recurso a duas triturações com diferentes aberturas da mandíbula e originava aparentemente uma maior percentagem de agregados de menores dimensões dentro dos grossos. Na prática, a curva granulométrica não se revelou muito diferente da obtida com o processo de trituração (2ª série de cubos IST na Fig. 9), mas trata-se de um factor que certamente merece uma investigação mais aprofundada.

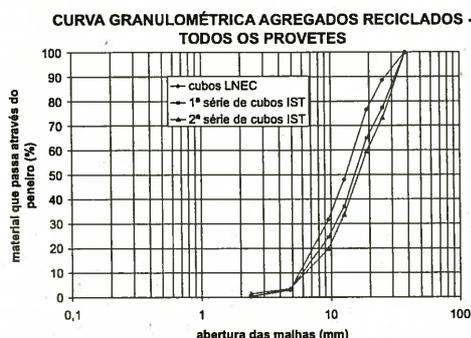


Fig. 9 - Curvas granulométricas dos agregados reciclados utilizados nos ciclos de reciclagem

Ainda relacionado com o processo de trituração, constatou-se que este afecta a

percentagem de aproveitamento dos agregados (aqueles que têm entre o mínimo de 4.76 mm e o máximo de 31.1 mm): esta passou de cerca de 60% na central de reciclagem para cerca de 70% no Laboratório do Departamento de Minas do IST. Mais relevante é o facto de esta percentagem ser mais do que suficiente para produzir um volume de betão idêntico ao de origem.

3. AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

3.1 Considerações gerais

Nos materiais homogéneos, existe uma relação directa entre massa volúmica e módulo de elasticidade. Já em materiais heterogéneos multifásicos como o betão, a fracção volumétrica, a massa volúmica e o módulo de elasticidade dos principais constituintes e as características da zona de transição determinam o comportamento elástico do compósito. Sendo a massa volúmica inversamente proporcional à porosidade, os factores que afectam a porosidade do agregado grosso, da matriz da pasta de cimento e da zona de transição influenciam também o módulo de elasticidade do betão.

Segundo Mehta e Monteiro [4], é a rigidez do agregado grosso que controla a capacidade de restrição da deformação da matriz de cimento e esta rigidez é determinada pela porosidade do mesmo.

Os agregados grossos reciclados de betão apresentam uma camada de argamassa antiga aderida às partículas do agregado reciclado, tornando-os menos densos, mais porosos e menos rígidos que os naturais e, consequentemente, também mais deformáveis.

Com base nas características anteriormente descritas, pode-se concluir que os betões com agregados grossos reciclados de betão apresentam maior deformabilidade

que os produzidos com agregados grossos naturais. Salem e Burdette [5] concluíram nos seus estudos que os valores do módulo de elasticidade de betões com agregados grossos reciclados de betão eram cerca de 9% (7 dias) e 16% (28 dias) inferiores, aos obtidos em betões convencionais.

Hansen e Boegh [3] avaliaram, através de ensaios, o módulo de elasticidade aos 47 dias de betões com agregados grossos reciclados de betão, obtendo valores 14 a 28% inferiores aos obtidos em betões de referência, produzidos com agregados naturais.

3.2 Ensaios de laboratório

Na amassadura referente ao 2º ciclo de ensaios, foram moldados provetes cilíndricos com 0.15 m de diâmetro e 0.60 m de altura, para posterior ensaio para avaliação do módulo de elasticidade do betão. Além daqueles, foram também moldados provetes cilíndricos com um betão de referência, apresentando este a mesma composição do reciclado, a menos da substituição, em volume, dos agregados grossos por naturais.

Após a retirada da cofragem, os provetes cilíndricos passaram por um processo de cura húmida até a data do ensaio. A avaliação no laboratório do módulo de elasticidade do betão foi feita segundo a especificação de ensaio LNEC E 397.

32 dias após a betonagem, os provetes cilíndricos foram posicionados numa prensa para aplicação da força de compressão (Fig. 10). As extensões foram registadas através de extensómetros de resistência com base de 10 mm de comprimento, os quais foram colados superficialmente ao betão em duas geratrizes opostas do cilindro. A força de compressão foi registada por intermédio de uma célula de carga colocada junto a uma

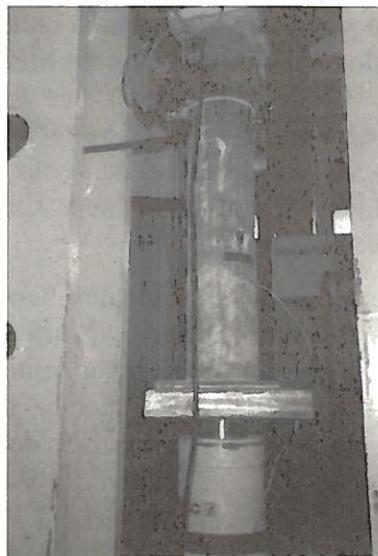


Fig. 10 - Provetes cilíndrico posicionado na prensa

das extremidades do provete. Os extensómetros e a célula de carga foram ligados a um *data logger* do tipo HBM *Spider 8*.

3.3 Análise dos resultados

Para o betão produzido com agregados grossos reciclados, obteve-se um valor para o módulo de elasticidade de 29.5 GPa, enquanto que, para o betão de referência, se alcançou 39.9 GPa, ou seja, cerca de 35% mais. Com os valores registados, quer para as extensões quer para a força de compressão, construiu-se um diagrama tensão deformação para os dois tipos de betão (Fig. 11).

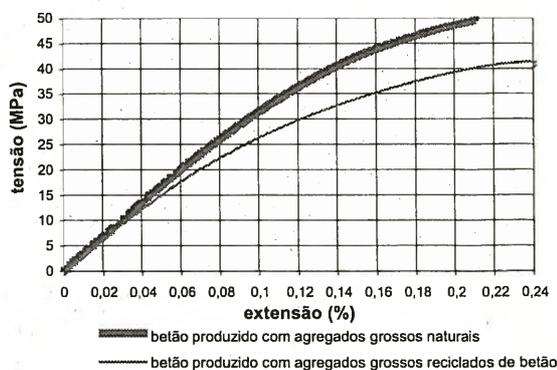


Fig. 11 - Diagrama tensão deformação para o betão produzido com agregados grossos reciclados e o betão de referência

No diagrama da Fig. 11, nota-se claramente, a partir de uma tensão aplicada de 10 MPa, a maior deformabilidade dos betões com agregados grossos reciclados, sendo a mesma resultante dos conceitos anteriormente mencionados.

4. CONCLUSÕES

O processo de reciclagem repetitiva dos agregados pétreos grossos reciclados de peças de betão para fabrico de novo betão tem todas as condições para ser auto-sustentável sem limitações temporais. Em termos de resistência, é possível mantê-la num patamar mais ou menos constante sem alterar a composição.

A trabalhabilidade é também susceptível de se manter sem recurso a um aumento da relação água / cimento. Este último facto dá boas indicações em relação à durabilidade expectável, ainda que para tal se demonstrar seja necessária investigação específica. Finalmente, a sustentabilidade económica está demonstrada num outro artigo [1], não obstante a necessidade de, no 1º ciclo (introdução pela primeira vez de parte dos agregados reciclados), se recorrer a maiores dosagens de cimento e a plastificantes.

No tocante ao módulo de elasticidade, a menor deformabilidade dos agregados grossos reciclados, aliada a também menor resistência a deformação da pasta imposta pelos mesmos (devido à rigidez inferior), implicam num valor inferior daquele para betões com agregados grossos reciclados, quando comparados com um betão de referência produzido com agregados grossos convencionais.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Brito, J. de; Gonçalves, A. P. - "Viabilidade Económica de Betão com Agregados Grossos Reciclados", *Ingenium*, II Série, n.º 63, 2001.
- [2] Gonçalves, A. P. - "Análise do Desempenho de Betões Obtidos a Partir de Inertes Reciclados Provenientes de Resíduos da Construção", Dissertação de Mestrado em Construção, IST, 2001.
- [3] Hansen, T. C. - "Recycling of Demolished Concrete and Masonry", RILEM TC Report 6, 316 p., Chapman & Hall, London, 1992.
- [4] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. - "Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais", 573 p., Ed. Pini, São Paulo, 1994.
- [5] Salem, R. M.; Burdette, E. G. - "Role of Chemical and Mineral Admixtures on Physical Properties and Frost-resistance of Recycled Aggregate Concrete", *ACI Materials Journal*, v. 95, nº5, pp 558-563, 1998.

