

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/275545252>

A pressão exercida pelo betão auto-compactável (BAC) nas cofragens

Conference Paper · July 2010

DOI: 10.13140/RG.2.1.1543.7845

CITATIONS

3

READS

112

2 authors:



Pedro Raposeiro da Silva
Instituto Politécnico de Lisboa

43 PUBLICATIONS 187 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jorge de Brito
University of Lisbon

1,261 PUBLICATIONS 9,321 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



BESMaintenance_LowerRisks [View project](#)



Energy use and carbon intensity variability in larger retail buildings [View project](#)

A pressão exercida pelo betão auto-compactável (BAC) nas cofragens



Pedro Silva¹



Jorge de Brito²

RESUMO

Pretende-se, neste artigo, apresentar um resumo sobre o estado actual do conhecimento relativamente à avaliação da pressão que o betão auto-compactável (BAC) exerce sobre as paredes das cofragens.

Com o início de uma utilização mais generalizada do BAC, tanto na construção de edifícios e obras de arte, como na pré-fabricação (indústria que tem sabido aproveitar as mais valias desta nova tecnologia), alterou-se significativamente o processo de colocação do betão nas cofragens. Tais alterações aparecem associadas essencialmente às diferenças de comportamento no estado fresco entre um betão convencional (BC) e um BAC. Este último apresenta-se como uma mistura, em suspensão, de partículas com uma extensão em termos de dimensões que pode ir desde o micron até a 2 cm, com a capacidade de, sem precisar de qualquer tipo de vibração, conseguir preencher completamente as cofragens, envolvendo de forma adequada as armaduras sem deixar vazios nem ocorrer qualquer fenómeno de segregação tanto durante a colocação como durante o tempo em que permanece fluido.

A possibilidade de eliminar a fase de vibração, entre outras, permite uma betonagem em contínuo. Não obstante a possibilidade de betonar em contínuo ter claras vantagens em termos do tempo associado à tarefa, a pressão que o BAC irá exercer, essencialmente nas cofragens de elementos verticais, pode, em alguns casos, ser comparável à pressão hidrostática de um líquido com a massa volúmica do betão.

Contudo, logo numa fase inicial de implementação do BAC e depois de analisados alguns resultados práticos de cofragens monitorizadas, chegou-se à conclusão de que, em alguns desses casos, os pressupostos iniciais não eram verificados, tendo mesmo sido observados resultados em que a pressão exercida por um BAC seria igual à de um BC ou até inferior. Por outras palavras, a tixotropia do BAC será um factor importante na pressão do mesmo sobre as cofragens.

PALAVRAS-CHAVE

Pressão sobre as cofragens, betão auto-compactável, reologia, tixotropia.

¹ ISEL, Departamento de Engenharia Civil, 1959-007, Lisboa, Portugal. silvapm@dec.isel.ipl.pt

² IST, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, 1049-001 Lisboa, Portugal. jb@civil.ist.utl.pt

1. INTRODUÇÃO

A utilização de BAC permite atender à necessidade de obter melhorias da durabilidade das estruturas, independentemente da qualidade dos trabalhos de construção e conseqüentemente da intervenção da mão-de-obra na fase de betonagem, uma vez que se trata de um material que dispensa qualquer método de compactação. Devido às alterações necessárias à obtenção da auto-compactabilidade pretendida (aumento / melhoria da trabalhabilidade, capacidade de passagem e resistência à segregação), isto é, necessárias à eliminação do processo de compactação, o impacto da utilização de BAC está essencialmente relacionado com o processo de produção e com a colocação do betão em obra. As principais alterações estão relacionadas com os materiais constituintes, nomeadamente:

- diminuição da relação entre as quantidades de agregado grosso e de argamassa;
- conseqüente aumento do volume de argamassa (mais material ultra-fino tipo cimento e adições);
- adequado controlo da dimensão máxima do agregado;
- utilização de adjuvantes do tipo superplastificantes e/ou moduladores de viscosidade.

Por sua vez são também de salientar as alterações ao nível da produtividade no processo de execução da estrutura, a melhoria das condições de trabalho bem como da envolvente à obra (redução dos níveis de ruído), as potenciais melhorias no estado endurecido como a resistência mecânica, a durabilidade e o aspecto final da superfície de acabamento.

O comportamento do BAC no estado fresco vai provocar alterações significativas no modo como o betão preenche as cofragens. O processo de colocação do BC não tem sofrido alterações relevantes ao longo dos anos. As alterações que se têm verificado nos processos de amassadura, transporte e colocação têm facilitado a sua execução e reduzido o trabalho de compactação, mas genericamente estes têm permanecido sem grandes variações [1].

Com a introdução do BAC, material que se apresenta com uma elevada trabalhabilidade e é ao mesmo tempo estável e homogéneo em todo o seu volume, passa a ser possível betonar praticamente em contínuo, sem necessidade de interrupções, por exemplo, para compactação, o que pode significar maiores velocidades de betonagem. A possibilidade de aumentar a velocidade de betonagem pode apresentar benefícios em termos de produtividade ou até mesmo relativamente à diminuição do tempo de exposição das juntas de betonagem com vantagens tanto no aspecto final como na qualidade das mesmas. Porém, a pressão que o BAC irá exercer, essencialmente nas cofragens de elementos verticais pode levantar problemas novos. Apresenta-se nos pontos seguintes o modo como a especificidade do comportamento do BAC no estado fresco pode condicionar a pressão sobre as cofragens.

2. ENQUADRAMENTO GERAL

A possibilidade de eliminar a fase de vibração das diversas camadas de BAC conduz à possibilidade de betonar em contínuo, ficando esta apenas condicionada pela capacidade de fazer chegar o BAC ao local. Não obstante a possibilidade de betonar em contínuo ter claras vantagens em termos do tempo associado à tarefa, a pressão que o BAC exercerá sobre as paredes dos moldes (essencialmente cofragens de elementos verticais) pode, em alguns casos, ser comparável à pressão hidrostática de um líquido com a massa volúmica do betão (2400 kg/m^3) [2]. Podendo as velocidades de betonagem mais elevadas conduzir a um aumento na pressão lateral exercida pelo BAC, terá de ser dada uma atenção especial ao dimensionamento das cofragens dado que a sua subvalorização poderá implicar falhas / deformações na estrutura. Inversamente, a sobrevalorização do referido efeito poderá conduzir a um acréscimo no custo global da estrutura. O aumento do peso das cofragens no custo total da execução da estrutura pode implicar prejuízos significativos dado que as mesmas podem representar até 60% do referido custo, ou seja, pode, em alguns casos, representar mais do que o custo do próprio betão [3].

O facto de o BAC apresentar períodos mais longos, após amassadura, com valores aceitáveis de trabalhabilidade para aplicação (podendo em alguns casos atingir 2 horas) levou a que, numa fase inicial de desenvolvimento desta nova tecnologia, fosse assumido que, independentemente das quantidades de amassadura ou até mesmo da velocidade de betonagem, um BAC iria apresentar sempre um comportamento semelhante a um líquido. Contudo, logo numa fase inicial, depois de analisados alguns resultados de estudos a cofragens monitorizadas [2], chegou-se à conclusão de que, em alguns dos casos, os pressupostos iniciais não se verificaram, tendo mesmo sido observados resultados em que a pressão exercida por um BAC sobre as paredes dos moldes seria igual à de um BC ou até inferior. Ficou assim, desde logo, evidente que a pressão do BAC sobre as cofragens não é independente de factores como as quantidades de amassadura ou a velocidade de betonagem, entre outros. O BAC comporta-se, na fase de transporte e colocação nos moldes, de forma análoga a um líquido mas, quando em repouso nos moldes, ganha consistência e endurece [4, 5]. É, no entanto, de referir que resultados obtidos por outros autores concluem que, para alguns tipos de BAC, as pressões exercidas sobre as paredes da cofragem se apresentam muito semelhantes à hidrostática [6]. Nestas circunstâncias, pode concluir-se que a tixotropia do BAC (possível de condicionar tanto pelos materiais constituintes e respectivas quantidades como pela velocidade de betonagem) é um factor importante na pressão do BAC sobre as cofragens [2, 5]. O comportamento tixotrópico de um BAC pode, de um modo simples, ser explicado pelo facto de o esforço que é necessário aplicar à mistura quando em repouso para a tornar novamente fluida poder atingir até duas vezes o valor da tensão de corte medida quando a fluir normalmente [7].

Vários estudos, sobre a correlação do comportamento tixotrópico do BAC com a pressão sobre as paredes das cofragens bem como sobre o desenvolvimento de modelos de previsão do referido comportamento, têm sido realizados por diversos autores, nomeadamente Billberg [2], Assaad et al. [5], Assaad e Khayat [8] e Khayat et al. [9], entre outros.

Dos trabalhos realizados pelos autores referidos, são de salientar algumas conclusões relevantes para o tema em análise. Billberg [2] observou, no seu trabalho, que, quando a colocação do BAC nos moldes é feita pela base dos elementos, a pressão lateral exercida sobre as paredes é idêntica à hidrostática. Conclui ainda o autor que, no caso de o betão ser colocado pelo topo dos moldes, o referido efeito (pressão lateral idêntica à hidrostática) nem sempre se verifica. Já Khayat et al. [9] referem, nas conclusões do seu trabalho sobre a variação da pressão do BAC sobre as paredes dos moldes relativamente à secção transversal das peças e à velocidade de betonagem, que, para secções transversais de dimensão inferior, a pressão lateral máxima deverá ser menor. Os autores referem também que a diminuição da pressão lateral hidrostática é ainda mais significativa com o aumento da altura de queda do betão nos moldes.

Nos dois trabalhos referidos, é de salientar alguma contradição relativamente ao efeito da velocidade de betonagem na pressão lateral exercida sobre as paredes dos moldes [10]. Enquanto Khayat et al. [9] referem que a velocidade de betonagem afecta apenas ligeiramente a pressão lateral, Billberg [2] conclui que a referida velocidade tem um efeito muito significativo na pressão lateral. Analogamente, Ovarlez e Roussel [10], num estudo relacionado com o desenvolvimento de um modelo de previsão da pressão lateral nos moldes devido ao BAC, apresentam uma proposta que correlaciona as consequências do efeito da tixotropia do BAC com a variação da pressão lateral nas cofragens. Do trabalho realizado por estes autores, são de salientar as seguintes conclusões:

- quando a altura de queda na betonagem é elevada ou o enchimento dos moldes é feito pela base dos moldes, a pressão exercida é semelhante à hidrostática;
- para os casos de enchimento pelo topo dos moldes com alturas de queda reduzidas e com velocidades inferiores, a pressão lateral é significativamente menor;
- em qualquer dos casos, assim que termina a colocação nos moldes e o BAC fica em repouso, a pressão lateral sobre as paredes dos moldes diminui rapidamente.

Por último, pode referir-se o estudo de Gregori et al. [11] que apresenta, nas conclusões do seu trabalho sobre simulação experimental da pressão do BAC sobre cofragens, algumas observações que confirmam o referido nos pontos anteriores, nomeadamente:

- a velocidade de betonagem e uma adequada selecção dos constituintes bem como as suas proporções representam as principais variáveis que afectam a pressão do BAC sobre os moldes;
- a utilização de cinzas volantes conjugada com um valor inferior da relação A/C, para uma mesma velocidade de betonagem, implica uma redução da pressão do BAC sobre os moldes bem como uma diminuição dos seus valores máximos;
- as variações nos valores máximos de pressão sobre os moldes para betões sem qualquer adição (só com cimento) e com diferentes relações de A/C são mínimas.

3. PARÂMETROS QUE AFECTAM A PRESSÃO SOBRE AS COFRAGENS

É possível, de um modo sistemático, enumerar / organizar os parâmetros que influenciam a pressão horizontal do BAC sobre as paredes das cofragens. Desse modo, são de referir, como principais factores, a evolução da tensão de corte do betão durante o processo de betonagem e imediatamente após o mesmo, a viscosidade e a sua profundidade nas cofragens enquanto no estado fresco [11]. Não obstante, pode ainda afirmar-se que os referidos factores, por sua vez, são influenciados de modo significativo pelas propriedades constantes do Quadro 1.

Quadro 1. Parâmetros que afectam a pressão sobre as cofragens. Adaptado de [11]

| | |
|--|--|
| Propriedades dos materiais constituintes | <ul style="list-style-type: none">– máxima dimensão dos agregados;– tipo e quantidade de adjuvantes e adições utilizadas;– quantidade de pasta;– consistência do betão no estado fresco;– relação A/C; |
| Características dos moldes | <ul style="list-style-type: none">– forma e dimensão das cofragens;– utilização de óleo descofrante; |
| Processo de colocação | <ul style="list-style-type: none">– altura de queda do betão;– velocidade de betonagem;– método de betonagem;– processo de compactação (inexistente no BAC);– temperatura ambiente na fase de betonagem;– temperatura do betão no momento de betonagem;– tempo de espera do betão (tempo decorrido entre o fabrico e colocação). |

Apresenta-se de seguida uma descrição mais detalhada e sucinta dos parâmetros referidos no Quadro 1.

3.1 Propriedades dos materiais constituintes

De modo a obter a trabalhabilidade necessária, o BAC deverá apresentar-se:

1º com uma tensão de cedência baixa - para a obter um comportamento semelhante a um fluido puramente viscoso de modo a preencher a cofragem sem, no entanto, atingir valores muito baixos ou até inexistentes que podem tender para a ocorrência de segregação devido às diferentes densidades dos materiais constituintes;

2º com uma viscosidade baixa (mas superior à do BC) - betão mais fácil de trabalhar, mas potencialmente mais vulnerável à ocorrência de segregação.

Quanto mais reduzidos forem os valores das duas propriedades referidas, maior a pressão inicial que o BAC exercerá sobre as paredes das cofragens, ao mesmo tempo que, quanto mais rápido for o endurecimento do betão, mais rápido será igualmente a diminuição dessa pressão. O referido comportamento do BAC depende essencialmente, no caso da tensão de cedência, das características da pasta e da vis-

cosidade da energia dissipada pelos contactos entre as partículas (principalmente do agregado grosso). Desse modo, a quantidade dos materiais constituintes bem como as suas propriedades, afectam significativamente a pressão que o betão irá exercer sobre as cofragens. Sendo que as propriedades do BAC podem variar em função da aplicação ou de outros factores, não existe uma formulação única.

Relativamente ao agregado grosso, é possível afirmar que aumentando tanto a quantidade como a sua dimensão máxima obtém-se uma diminuição da pressão. Como referido por Assaad e Khayat [12], o aumento do agregado grosso em betões muito fluidos pode reduzir a pressão lateral devido essencialmente ao aumento do atrito interno entre as partículas mais grossas que reduz a mobilidade do betão e a consequente pressão lateral. Por outro lado, tanto a utilização de superplastificantes como o aumento da relação A/C aumentam a pressão. Já a utilização de adições (cinzas volantes, fíler calcário, entre outras) pode afectar de modo mais significativo a rapidez da diminuição da pressão sobre as cofragens após betonagem. O comportamento causado pela utilização de plastificantes e pelas alterações da relação A/C pode estar associado ao aumento do efeito de “lubrificação” da pasta, diminuindo o atrito entre as partículas de agregado grosso e, conseqüentemente, aumentando a pressão lateral. Já Khayat e Assaad [13] observaram que alterar a relação A/C iria influenciar tanto a pressão como a própria tixotropia da mistura, ou seja, para uma mesma trabalhabilidade, o aumento de A/C de 0,36 ou até mesmo de 0,40 para 0,46 representa uma diminuição do comportamento tixotrópico do betão e um aumento da pressão inicial sobre as paredes das cofragens.

Num BAC com maior conteúdo de pasta, a pressão lateral é significativamente mais elevada do que a de um BAC com menor conteúdo da mesma. Tal pode ser confirmado no estudo de Assaad e Khayat [14, 15] sobre a variação da pressão exercida pelo BAC nas cofragens com recurso a várias misturas contendo diferentes quantidades de pasta e diversos tipos de ligante. Referem os autores que, para um mesmo tipo de ligante, o aumento do volume de pasta (que provoca uma diminuição do volume total de agregado) implica um aumento da pressão inicial exercida sobre as cofragens.

3.2 Características dos moldes

O efeito das características das cofragens na pressão exercida pelo BAC nas mesmas é um tema ainda pouco estudado, não existindo portanto muita informação. Porém, é possível estabelecer algumas correlações entre a dimensão / forma das cofragens e a referida pressão [16]. Peças de cofragem mais estreitas apresentam pressões máximas inferiores. Este efeito pode ser explicado pelo aumento do “efeito de arco” formado em peças de menores dimensão que, ao alterar o próprio escoamento do betão, acaba por diminuir a pressão lateral sobre as cofragens. No estudo sobre o efeito da variação do diâmetro de pilares (2 pilares estudados $c/200$ e 920 mm) na pressão lateral exercida pelo BAC realizado por Khayat et al. [14], os autores referem, em ambos os casos, que a pressão inicial atinge valores muito semelhantes à pressão hidrostática. No entanto, o pilar de maior diâmetro ensaiado (920 mm) atinge valores de $P_{medida}/P_{hidrostática} = 99\%$, enquanto que, para o mesmo período de tempo decorrido após betonagem, o pilar de menor diâmetro (200 mm) apresenta valores de $P_{medida}/P_{hidrostática} = 96\%$. Porém, as principais diferenças foram observadas na velocidade de abaixamento da pressão lateral. De modo a obter um abaixamento na pressão lateral equivalente de 5% da pressão hidrostática, o pilar de 920 mm necessitou de 20 minutos enquanto que o de 200 mm de 38 minutos.

Cofragens em materiais mais rígidos e lisos (menos rugosos) resultam em níveis de pressão superiores e num maior atraso no abaixamento das mesmas após a betonagem. Tal como acontece com a variação da forma das cofragens, o valor da pressão inicial aproxima-se da pressão hidrostática, variando pouco com a rigidez ou com a superfície. No entanto, o tempo de decréscimo da pressão lateral após betonagem é significativamente diferente. Dominguez e Lange [17] apresentam, no seu trabalho sobre a evolução da pressão de BAC nas paredes de cofragens com materiais diferentes, variações de até 2 horas para abaixamentos na pressão lateral até atingir valores equivalentes a 20% da pressão hidrostática entre cofragens de PVC e de cartão tipo *Sonotube*.

3.3 Processo de colocação

Relativamente aos parâmetros relacionados com o processo de colocação do betão que podem afectar a pressão sobre as cofragens referidos no Quadro 1, são de salientar a velocidade de betonagem, o método de betonagem, a temperatura ambiente e do betão na fase de betonagem e o início do endurecimento [16].

3.3.1 Velocidade de betonagem

De todos os parâmetros referidos, será talvez um dos que mais condiciona a pressão. Para velocidades de betonagem muito elevadas (possíveis com a utilização de BAC), toda a cofragem ficará devidamente preenchida sem que o endurecimento do betão se tenha iniciado mantendo, deste modo, uma consistência mais fluida e, conseqüentemente, pressões iniciais consideravelmente superiores.

Existem vários estudos que comprovam a influência da velocidade de betonagem na pressão lateral sobre as cofragens [16]. Pode-se referir o trabalho de Billberg [2] que avalia a pressão exercida pelo BAC com velocidades de betonagem entre 1,0 e 2,5 m/h (usual em estruturas com grandes secções) e concluiu que, para um mesmo tipo de BAC, a relação $P_{\text{medida}}/P_{\text{hidrostática}}$ varia entre 20 e 70%, respectivamente. Já para BAC colocado com velocidades superiores, é possível observar que uma redução de 25 para 5 m/h pode representar um abaixamento da pressão máxima inicial em 15%, sem no entanto alterar de modo significativo, após betonagem, o tempo de abaixamento da pressão. Os mesmos autores estudaram igualmente o efeito da interrupção do processo de betonagem na pressão inicial e observaram que tais interrupções entre descargas podem contribuir para a redução da referida pressão. Será, no entanto, de tomar em consideração os possíveis efeitos, indesejáveis, provocados por camadas de betão com tempos de espera entre si demasiado longos. É de referir ainda o efeito visual da separação das várias camadas e, mais grave, a possível má ligação entre as mesmas.

Em resumo, pode afirmar-se que, para velocidades de betonagem mais elevadas (acima de $\cong 5$ m/h e dependendo da secção), obtêm-se maiores pressões laterais sobre as cofragens, sendo que, a partir de determinados valores, alterações de velocidade acabam por ter um menor impacto na pressão inicial. Analogamente, menores velocidades de betonagem (abaixo de $\cong 5$ m/h e dependendo da secção) vão implicar igualmente menores pressões. É nestas gamas de valores que mais se acentuam as variações da pressão com pequenas alterações de velocidade de betonagem.

3.3.2 Método de betonagem

Observam-se diferenças significativas na pressão sobre as cofragens em função da betonagem dos elementos pelo topo ou pela base. Betonar pela base, para uma igual velocidade de betonagem, representa maiores pressões do que pelo topo.

É de referir o estudo realizado por Wolfgang e Stephan [18] para o qual betonaram diversos elementos verticais de cofragem com BAC e BC recorrendo a diferentes velocidades de enchimento (Figura 1). Do referido trabalho, são de salientar as seguintes conclusões:

- a pressão lateral do BAC colocado pela base das cofragens aproxima-se da pressão hidrostática;
- a colocação de BAC pelo topo representa um decréscimo significativo na pressão lateral exercida;
- para uma determinada velocidade de enchimento, um BAC colocado pelo topo das cofragens apresenta aproximadamente metade da pressão lateral, até mesmo do BC de referência;
- betonar pela base com velocidades mais baixas ($\cong 2$ m/h) pode necessitar de mais pressão de bombagem para conseguir preencher adequadamente as cofragens.

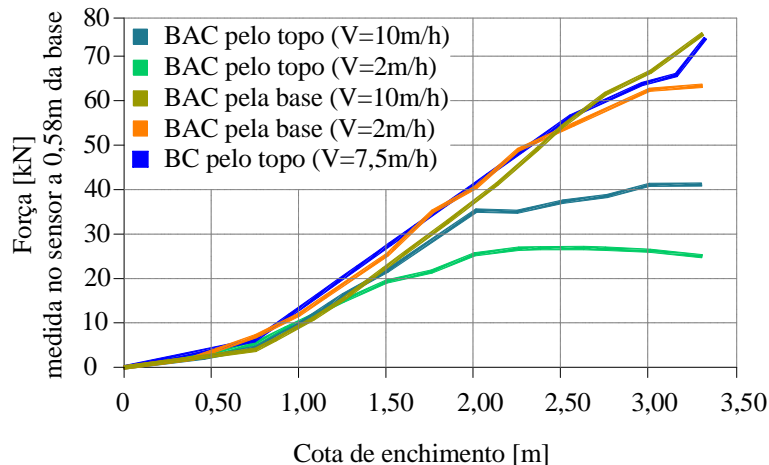


Figura 1 - Força medida no sensor a 0,58 m da base em função do nível de enchimento. Adaptado de [18]

3.3.3 Temperatura ambiente e do betão na fase de betonagem

A temperaturas iniciais mais elevadas, observa-se uma redução da pressão sobre as cofragens. Considerando que, a temperaturas iniciais superiores, o processo de hidratação e endurecimento é mais rápido (desenvolvendo mais rapidamente uma maior coesão), será possível que o tempo que leva à diminuição da pressão seja igualmente inferior. No entanto, o principal efeito da temperatura pode ser observado na velocidade de abaixamento da pressão após betonagem, que para temperaturas superiores, poderá representar uma redução de tempo até 25% [16].

3.3.4 Início do endurecimento

Para tempos de presa superiores, a velocidade a que a pressão baixa, após a betonagem, é inferior. Tal como no parâmetro anterior, este efeito estará associado ao processo de hidratação e endurecimento.

4. REOLOGIA, TIXOTROPIA E PRESSÃO SOBRE AS COFRAGENS

De acordo com o descrito no capítulo anterior, os principais parâmetros que afectam a pressão do BAC sobre as cofragens podem-se subdividir em 2 grupos:

- 1º factores “externos” ao BAC ou à tecnologia do BAC: associados tanto às características das cofragens como ao processo de colocação do BAC nas mesmas;
- 2º factores “internos” ao BAC: específicos das suas características (do BAC) e, como tal, associados às propriedades dos materiais constituintes.

Considerando os factores “externos” independentes da tecnologia do BAC no sentido de que poderão ser facilmente alterados (dependendo obviamente da especificidade de cada projecto), importa reflectir mais especificamente sobre o modo como, através da referida tecnologia, será então possível alterar / condicionar a pressão sobre as cofragens. Dos factores referidos como “internos”, evidencia-se o seu efeito no comportamento do BAC no estado fresco ou, por outras palavras, na sua reologia. Por sua vez, o comportamento reológico do BAC encontra-se interligado com a sua tixotropia, ou seja, à necessidade de uma tensão de corte e de uma viscosidade baixas em termos reológicos, por oposição ao seu comportamento tixotrópico e provocando um efeito negativo relativamente à pressão.

4.1 Reologia

O betão no estado fresco, relativamente à sua reologia, pode ser descrito como um material de consistência plástica que, até determinado valor de tensão de corte, apresenta pouco ou nenhum tipo de deformação e que, acima da sua tensão de cedência, adquire uma consistência fluida. A referida tensão limite mínima (tensão de cedência), a partir da qual adquire uma consistência fluida e por conseguinte

se inicia o escoamento, pode definir a capacidade de deformabilidade do betão que, por sua vez, pode ser um dos parâmetros definidores da sua trabalhabilidade. Já a sua viscosidade está associada à velocidade com que o betão flui após o início do escoamento [21].

Relativamente ao comportamento no estado fresco, é possível, através da variação da trabalhabilidade, afectar outras propriedades que, no caso do BAC, podem assumir um papel essencial no seu adequado desempenho. São, desse modo, de salientar os riscos de bloqueio das partículas mais grossas (agregado grosso), a correcta interligação entre as diversas camadas de betão e a pressão exercida sobre as cofragens [18]. Quanto à possibilidade de bloqueio, factor de extrema relevância para o BAC, será necessário ainda diferenciar entre a simples acumulação ou encravamento físico do agregado grosso e o bloqueio da mistura fluida (com o consequente preenchimento incompleto das cofragens) devido à falta de trabalhabilidade. Já para a trabalhabilidade, será necessário tomar em consideração, não só a quantidade de agregado grosso e a sua máxima dimensão, como também a quantidade de pasta que funcionará, neste caso, como lubrificante. No caso do BAC, o comportamento da referida pasta assume uma particular relevância dado que influencia directamente a viscosidade da mistura. Com valores de viscosidade mais elevados, limita-se o risco de segregação. No entanto, obtém-se uma mistura mais difícil de trabalhar. No caso de valores de viscosidade mais baixos, poderá existir a tendência para a ocorrência de segregação, o que pode obrigar a trabalhar com tensões de cedência superiores como forma de obviar o problema [21].

Em resumo, no que diz respeito ao risco de bloqueio do agregado mais grosso, será necessário prestar uma atenção especial, não só à trabalhabilidade do BAC, mas também à quantidade de pasta e conteúdo de agregado grosso (quantidade e dimensão máxima). Fica, deste modo, explicada a influência do agregado grosso na variação da viscosidade do BAC (associado à energia dissipada pelo contacto entre as partículas). Já no caso da tensão de cedência dos BAC no estado fresco, esta depende essencialmente das propriedades da pasta ligante. É possível afirmar que o aumento do teor de pasta (e consequente diminuição do teor de agregado) pode provocar uma diminuição da tensão de cedência (e também da viscosidade).

4.1 Tixotropia

Um betão tixotrópico, quando em repouso, ganha coesão / consistência de forma rápida e, quando colocado em movimento, retoma, de modo reversível, um comportamento do tipo fluido. Um betão muito tixotrópico apresenta uma capacidade de alterar o referido comportamento de forma rápida (em repouso elevada coesão e em movimento recupera a fluidez). Por outras palavras, quando deixado em repouso ganha coesão / consistência em alguns minutos e inverte esse comportamento em apenas alguns segundos quando colocado em movimento [21].

Um BAC deverá apresentar-se o mais tixotrópico possível de modo a garantir o comportamento no estado fresco pretendido (dado que, ao contrário de um BC, o BAC não é vibrado). Quanto mais tixotrópico for, menor será a pressão exercida sobre as paredes das cofragens uma vez que quando em repouso ganha coesão / consistência de forma rápida. No entanto, no caso de um BAC muito tixotrópico, e em determinadas condições, poderá ocorrer uma menor interligação nas juntas de betonagem com implicações directas tanto em termos do aspecto final (relevante para betão à vista) como até na própria resistência mecânica final da estrutura. A elevada tixotropia poderá ainda condicionar a pressão necessária para bombear o BAC sendo, neste caso, necessária mais pressão. Tal como acontece com outras propriedades do BAC no estado fresco (nomeadamente escoamento, viscosidade, fluidez e segregação), o comportamento tixotrópico deverá corresponder a um “valor óptimo” para determinado tipo de BAC, processo de colocação e até mesmo em função do elemento a betonar.

Como referido, o comportamento tixotrópico do BAC afecta a pressão nas cofragens. Pode, do mesmo modo, afirmar-se que um dos principais elementos condicionantes da tixotropia é o volume de pasta ligante [20]. Quanto mais “rica” for a pasta ligante, maior será o comportamento tixotrópico do BAC. Para BAC com cimento como único constituinte do tipo ultra-fino, a tixotropia será significativamen-

te inferior à de outro com combinações do tipo binária ou ternária (sendo a última a mais tixotrópica). Quanto aos adjuvantes, é de referir que os aceleradores de presa aumentam a tixotropia enquanto que os retardadores diminuem-na. Já os modificadores de viscosidade tendem a aumentar o referido efeito. Um BAC irá apresentar valores superiores de pressão nas cofragens quando comparado com um BC devido essencialmente ao facto de demorar mais tempo a atingir a referida coesão / consistência (associada ao comportamento tixotrópico) ficando fluido durante maiores períodos de tempo. Um BC tem a possibilidade / necessidade de ser vibrado (compactado) não necessitando de se apresentar com valores de fluidez tão elevados e durante tanto tempo como um BAC nem mesmo de ter um comportamento tixotrópico. É, no entanto, possível obter valores de pressão inicial sobre as cofragens muito mais baixos do que a pressão hidrostática já que o tempo necessário para o BAC obter coesão (comportamento tixotrópico) pode ser reduzido essencialmente através do seu comportamento reológico.

5. CONCLUSÕES

Para uma velocidade de betonagem igual, é possível observar que normalmente um BAC apresenta valores de pressão sobre as paredes das cofragens superiores aos de um BC vibrado. Diversos factores influenciam o referido efeito, desde o seu comportamento no estado fresco (condicionado pela dosagem dos constituintes), ao próprio processo de colocação e até mesmo ao tipo de cofragem utilizada. A utilização de quantidades significativas tanto de adições como de adjuvantes (desde superplastificantes a moduladores de viscosidade), que indirectamente podem provocar algum atraso no processo de hidratação e consequente endurecimento, faz com que o betão fique durante mais tempo num estado fluido e exerça maior pressão sobre as cofragens.

No entanto, é possível uma redução efectiva da referida pressão através da correcta / adequada selecção dos materiais constituintes, cálculo das quantidades de amassadura bem como do controlo das condições de colocação (nomeadamente da velocidade de betonagem). Em muitos dos casos estudados, com um controlo dos parâmetros descritos (essencialmente materiais constituintes, propriedades no estado fresco e processo de colocação), foi possível observar pressões relativamente mais baixas do que a pressão hidrostática (equivalente à de um betão). Por outras palavras, um controlo efectivo das propriedades tixotrópicas do BAC será o caminho a seguir com vantagens evidentes não só no problema específico da pressão lateral sobre as cofragens mas também no controlo do comportamento reológico do mesmo e necessário à obtenção da requerida auto-compactabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] RILEM Technical Committee - Final report of RILEM TC 188-CSC, Casting of self compacting concrete, Materials and Structures, 2006, DOI 10.1617/s11527-006-9186-9;
- [2] BILLBERG, P. - Form pressure generated by self-compacting concrete, 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM PRO33, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 271-280;
- [3] ACI Committee 347 - Guide to formwork for concrete (347R-03), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2004, 32 p.;
- [4] VANHOVE, Y.; DJELAL, C. - Formwork pressure with self-compacting concrete, Concrete, June 2002, pp. 22-23;
- [5] ASSAAD, J.; KHAYAT, K.H.; MESBAH, H.- Variation of formwork pressure with thixotropy of self-consolidating concrete, ACI Materials Journal, V. 100, No. 1, 2003, pp. 29-37;
- [6] MIURA, N.; TAKEDA, N.; CHIKAMATSU, R.; SOGO, S. - Application of super workable concrete to reinforced concrete structures with difficult construction conditions, High-performance concrete in severe environments, SP-140, Paul Zia, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1993, pp. 163-185;

- [7] ROUSSEL, N. - Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes, *Cement and Concrete Research*, V. 35, No. 9, 2005, pp. 1656 - 1664;
- [8] ASSAAD, J., KHAYAT, K.H. - Variations of lateral and pore water pressure of self-consolidating concrete at early age, *ACI Materials Journal*, V. 101, No. 4, 2004, pp. 310-317;
- [9] KHAYAT, K.H., ASSAAD, J.; MESBAH, H.; LESSARD, M. - Effect of section width and casting rate on variations of formwork pressure of self-consolidating concrete, *RILEM Materials and Structures*, V. 38, No. 1, 2005, pp. 73-78;
- [10] OVARLEZ G., ROUSSEL N. - A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork, *RILEM Materials and Structures*, DOI:10.1617/*****, Ref. MS1878;
- [11] GREGORI, A.; FERRON, R.P.; SUN, Z.; SHAH, S.P. - Experimental simulation of self-consolidating concrete formwork pressure, *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 1, 2008, pp. 97-104;
- [12] ASSAAD, J., KHAYAT, K.H. - Effect of coarse aggregate characteristics on lateral pressure exerted by self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, V. 102, No. 3, 2005a, pp. 145-153;
- [13] KHAYAT, K. H., ASSAAD, J. - Effect of w/cm and high-range water-reducing admixture on formwork pressure and thixotropy of self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*, V. 103, No. 3, 2006, pp. 186-193;
- [14] ASSAAD, J., KHAYAT, K. H. - Formwork pressure of self-consolidating concrete made with various binder types and contents, *ACI Materials Journal*, V. 102, No. 4, 2005, pp. 215-223;
- [15] ASSAAD, J., KHAYAT, K. H. - Kinetics of formwork pressure drop of SCC containing various types and contents of binder, *Cement and Concrete Research*, V. 35, No. 8, 2005, pp. 1522-1530;
- [16] KHAYAT, K.H.; BONEN, D.; Shah, S.; Taylor, P. - State-of-the art review of formwork pressure exerted by self-consolidating concrete, submitted to the National Ready-mix Concrete Research Foundation and the Strategic Development Council, American Concrete Institute, 2007, 139 p.;
- [17] DOMINGUEZ, F.; LANGE, D. A. - Effect of formwork material on laboratory measurements of SCC formwork pressure, 2nd North American conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC 2005) and 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Evanston, IL, 2005, pp. 525-532;
- [18] WOLFGANG B.; AND STEPHAN U. - Investigation on the formwork pressure using self-compacting concrete, 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 281-287;
- [19] GRAM A. - Numerical modelling of self-compacting concrete flow-discrete and continuous approach, Royal Institute of Technology (KTH) Department of Civil and Architectural Engineering, Bulletin 99, 2009, 72 p., ISSN 1103-4270;
- [20] ROUSSEL, N.; CUSSIGH, F. - Steady Distinct-layer casting of SCC: The mechanical consequences of thixotropy, *Cement and Concrete Research*, V. 38, No. 5, 2008, pp. 624 - 632;
- [21] VIEIRA, M.G. - Betões auto-compactáveis - Reologia do betão no estado fresco. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008, 357 p.