

CONCRETOS CELULARES ESPUMOSOS

Oswaldo Aguiar Rocha Ferreira *

FERREIRA, Oswaldo Aguiar Rocha. Concretos Celulares Espumosos. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1987. 20 p. BT - PCC 10/87..

Dentre os concretos leves, o presente trabalho faz uma análise dos concretos celulares espumosos. Baseia-se numa bibliografia dispersa em artigos técnicos, capítulos e itens de livros da especialidade, nas intervenções práticas, em obra e em laboratório, e nas reflexões pessoais que tais intervenções tem permitido.

Depois de um enquadramento dentro dos concretos leves e de sua definição conceitual, é feita uma análise de suas técnicas de produção, tratamento das misturas e características físico-mecânicas. Posteriormente, fornecem-se subsídios à análise do comportamento estrutural e as principais aplicações onde o material se mostra qualificado. Conclui-se com uma ponderação sobre a significação dos parâmetros característicos do material.

FERREIRA, Oswaldo Aguiar Rocha. Lightweight Concrete: Foam Concrete. São Paulo, Departamento de Construção Civil da EPUSP, 1987. 20 p. BT - PCC 10/87.

This dissertation analyses foam concrete among the existing lightweight concretes. It is based on bibliography from technical articles, chapters and sections of specialized books, on practical applications in construction work and in laboratories, and personal conclusions from such applications.

After the classification of foam concrete in the sphere of lightweight concrete and of definition of its concept, an analysis of made of its production techniques, processing of mixtures, and physical mechanical features. Information is then given for the structural analysis of foam concrete and the main applications for which it is qualified. The conclusion consists of comments on the practical meaning of the characteristic parameters of foam concrete.

* Mestre em Engenharia, Professor Assistente do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção apresentou até há poucos anos, características de uma atividade de predominantemente artesanal, pela impossibilidade de inserir no seu meio produtivo, técnicas que fizeram o progresso de outros setores industriais. Ar "regras da boa arte", a experiência e os conhecimentos transmitidos de geração em geração, eram os condimentos que asseguravam os padrões de qualidade das construções.

Na última década, no entanto, deparamos com uma rápida evolução, não só no processo de construção mas também no surgimento de novos materiais, produto de um intenso aumento do intercâmbio internacional.

Muitos desses produtos, ou por dificuldades de simulação nacional, por inadequação climática ou inadaptação às relações de trabalho nas obras, acabaram sucumbindo e desapareceram do mercado.

Outros desses produtos, ao inverso, tem conhecido uma expansão significativa e tornam-se, cada vez mais, de comum utilização.

Os concretos celulares espumosos estão entre estes últimos. A Revista Dirigente Construtor de setembro do ano passado quantifica o mercado deste material em vinte mil metros cúbicos, fornecidos mensalmente.

É a desproporção existente entre a produção e o grau de conhecimento do material, a razão de ser do presente trabalho.

HISTÓRICO

O concreto celular não é uma idéia nova, embora o seu desenvolvimento seja relativamente recente.

O concreto desde o seu surgimento no século passado, manifestou dificuldades na diminuição da massa específica o que obrigava à introdução de agregados leves para se obter alívio nas estruturas. No entanto, tais alívios de carga ainda não se mostravam satisfatórios. A busca de novos caminhos levou a primeira patente de concreto celular que chegou ao nosso conhecimento. Aconteceu em 1889 e foi realizada por um habitante de Praga (Polónia), de nome Hofman. O processo de produção consistia na criação de poros numa pasta de cimento pela reação química entre o ácido clorídrico e o bicarbonato de sódio. Tratava-se de um concreto celular aerado.

Muito tempo passou após este registro, e só aparece nova patente em 1917, na Holanda, sendo a liberação gasosa feita através de leveduras orgânicas.

Somente em 1919 encontramos uma patente aplicada industrialmente. Foi em Berlim e seu

criador, de nome Grösche, produziu vigas armadas.

A primeira patente suéca foi depositada em 1923 por Eriksson, de Stockholm, que é considerado o pai dos concretos celulares pois foi a partir deste momento que este material começou a ter um grande desenvolvimento (1).

Depois desta data, o número de patentes relativas à fabricação de concretos celulares não parou de crescer e são às centenas. Na verdade, elas surgem ou como melhoramentos de registros anteriores ou como formas diferentes de liberação do gás que dará origem às bolhas de ar dentro da massa.

Mais adiante analisaremos este processo químico com um pouco mais de detalhe. Por agora, queremos apenas registrar que são poucos os processos que vieram a relevar-se como viáveis industrialmente, e destes só uns poucos se mostraram rentáveis economicamente.

A aparição e desenvolvimento dos concretos celulares espumosos aconteceu bastante mais tarde e também mais lentamente. Isto deveu-se, principalmente, ao fato do atrelamento destes ao aprimoramento da química orgânica. A primeira patente surge em 1925 feita pelo sueco E. Chr. Bayer. Até meados da década de sessenta, os agentes espumantes eram quase que exclusivamente à base orgânica, e durante este período surgiram uma grande quantidade de patentes todas procurando solucionar um grave problema: o controle da expansão. Nesta década surgiram os primeiros produtos sintéticos que mostravam espuma de boa estabilidade, porém com dificuldade de dispersão na massa.

Foi só no início da década de setenta que apareceram produtos químicos orgânicos resolvendo o problema da expansão e da estabilidade da massa, e é a partir deste momento que se experimenta nos países industrializados, uma grande expansão na aplicação deste material.

No Brasil, o concreto celular espumoso só começou a ser aplicado industrialmente no final da década de setenta e a partir daí tem sido crescente a sua utilização. Muitos tem sido os fabricantes e aplicadores que, desde então, tem surgido mas realmente raros aqueles que, devido à sua tecnologia, permaneceram no mercado.

1. DEFINIÇÃO DE CONCRETOS CELULARES

É usual entre nós a utilização dos termos concretos aerados e concretos celulares. Trata-se de uma sinonímia, sendo o primeiro mais comumente utilizado nos Estados Unidos (Aerated Concrete) e o segundo na Europa (Cellular Concrete ou Beton Cellulaire). Daremos, neste trabalho uma conotação ampla e abrangente ao termo concreto celular, conforme veremos adiante na classificação.

Não existe, até ao presente, uma definição de consenso geral, do concreto celular, visto não termos limites bem claros para as suas características físico-mecânicas e seus componentes. Por outro lado, não existem dentro da sua classificação, materiais como agregados graúdos, leves ou pesados, o que caracteriza a presença de "argamassas leves".

O Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, publicou em 1949 no seu caderno de encargos uma definição que, sendo incompleta, representa uma primeira aproximação:

"Eles (os concretos celulares) resultam da pega duma mistura de aglomerantes e agregados, que receberam um tratamento mecânico, físico ou químico destinado a criar na sua massa uma percentagem importante de pequenas cavidades fechadas". (1)

A Reunion Internationale des laboratoires d'Essai et de Recherches sur les Matériaux et Constructions (RILEM) oferece duas definições (4), a saber:

1. Concreto celular obtido por reação química (concreto aerado). É um concreto leve onde a diminuição de massa resulta da formação de bolhas de ar, principalmente por reação química durante a fase líquida ou plástica. As bolhas são uniformemente distribuídas e retidas na argamassa durante o processo de cura e endurecimento, o que lhe confere uma estrutura celular.
2. Concreto celular obtido por ação física (concreto espumoso). Concreto leve onde a diminuição de massa é obtida pela introdução de bolhas de ar macroscópicas seja por adição a mistura, no misturador, duma espuma estável, seja por incorporação de ar durante a mistura, devido a um agente espumante. As bolhas de ar são uniformemente distribuídas e retidas na argamassa durante a cura e seu endurecimento, o que lhe confere uma estrutura celular.

Na verdade, há dois pontos fundamentais que a presente deve conter para ser plena de caracterização:

- 1 - objetivação dos agregados;
- 2 - uniformidade de distribuição dos vazios.

Deste modo, somos levados a propor para de finição uma descrição que terá o inconveniente de ser longa mas terá simultaneamente, a vantagem de ser objetiva:

"O concreto celular é um concreto leve que resultou da pega de uma mistura composta de aglomerantes e agregados classificados na categoria de finos, com massa específica aparente seca inferior a 1850 Kg/m³ e superior a 400 Kg/m³. Esta mistura sofre tratamento mecânico, físico e/ou químico, destinado a

criar na sua massa uma alta percentagem de poros esféricos, de dimensão regular e milimétrica, uniformemente distribuídos, que permanecem estáveis, incommunicáveis e indeformáveis durante todo o processo".

Os limites paramétricos no definido advem, por um lado, do limite inferior da massa unitária seca de uma argamassa e, por outro lado, pela menor densidade em que ainda é possível uma dimensão regular e milimétrica dos poros e, consequentemente, constância de características físico-mecânicas. Por tais limites não serem de clara objetivação, alguns autores apresentam números variando de 2000 Kg/m³ a 300 Kg/m³. No entanto, os valores por nós aqui adotados representam o consenso do American Concrete Institute (ACI), Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) e Deutscher Industrie Normen (DIN).

2. CLASSIFICAÇÃO DOS CONCRETOS CELULARES

As classificações são as mais diversas, variando quase de autor para autor. Não seria de esperar outra coisa para algo de difícil definição e nomenclatura por caracterizar.

Em primeira análise, poderemos classificar os concretos celulares em: curados ao ar e autoclavados. Esta classificação, leva em consideração, para além do processo de cura, as diferentes estruturas dos compostos daí resultantes, pois é sabido que uma mistura formada de cálcio e silício em proporções convenientes, quando submetido a uma temperatura variando entre 160°C e 190°C e a pressão da ordem de 6 a 12 Kgf/cm² de uma autoclave, durante cerca de 5 horas, os seus compostos reagem formando o monossilicato de cálcio que também é aglomerante, enquanto que na cura ao ar temos uma reação comum de hidratação, na qual os silicatos duplos de cálcio e os trissilicatos de cálcio do cimento se transformam essencialmente em silicatos duplos e trissilicatos de cálcio hidratados.

Esta é a principal razão pela qual um concreto celular autoclavado em relação aos concretos celulares curados ao ar tem uma resistência à compressão da ordem do dobro e uma retração de cerca de metade (2).

Somos, no entanto, levados a preferir uma classificação embasada no seu processo de produção. Gyula Rudnai (3) divide em dois grupos, a saber: concretos aerados e microporitas. Os concretos aerados tem em seu seio uma infinidade de poros macroscópicos distribuídos uniformemente na massa. As microporitas tem uma estrutura capilar uniforme, resultante da evaporação da excessiva quantidade de água.

Ele divide ainda os concretos aerados em dois grupos: Os feitos à base de cimento, podendo ser espumosos ou gasosos, e os

feitos à base de cal, podendo ser também espumosos ou gasosos.

A Reunion Internationale des Laboratoires d'Essai et de Recherches sur les Matériaux et Constructions (RILEM) (4) (5) classifica os concretos celulares, como segue:

- por ação química:

- (1) método do alumínio
- (2) método do peróxido de hidrogênio

- por mistura de espuma:

- (1) espuma pré-formada
- (2) espuma formada durante a mistura

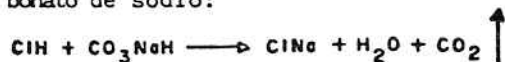
A mesma sistemática de classificação é oferecida por Andrew Short e William Kinniburgh (2), sendo que eles ampliam a presente por combinação destes com qualquer tipo de concreto leve. Esta nova interface só é conclusiva se analisada à luz da aplicação concreta e sob a ótica da viabilização econômica.

Levy (1) considera o concreto celular dividido em dois tipos únicos: espumoso e aerado.

Neste último provoca-se a liberação de um gás, por reação química, através de um dos três seguintes processos:

- a) Incorporar à pasta produtos químicos suscetíveis de reagir entre si.

Como exemplo disso, ácido clorídrico e bicarbonato de sódio:

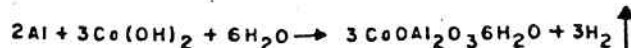
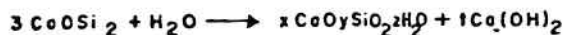


ou ainda água oxigenada com cloreto de cálcio, permanganato de potássio ou cloreto de potássio que provocam a liberação de oxigênio:



- b) Incorporar à pasta um produto, suscetível de reagir, em presença da água, com o ligante hidráulico.

Por exemplo, o pó de alumínio muito fino que reage com o hidróxido de cálcio, desprendendo hidrogênio, de acordo com as seguintes expressões:



É o processo mais econômico e também o

mais utilizado. Eventualmente, se o cimento é pobre em hidróxido de cálcio, pode-se adicionar este à mistura, em proporções convenientes.

- c) Incorporar à massa um produto que fermenta com o calor de hidratação.

Por exemplo, leveduras orgânicas.

Achamos conveniente citar o presente processo, apenas por curiosidade, já que não é utilizado porque tais produtos são nocivos ao cimento.

Nos concretos celulares espumosos, a formação dos poros resulta da adição à pasta de um produto que, por agitação, forma uma espuma abundante de bolhas de ar, com a dimensão desejada. Mais comumente, a espuma é pré-formada e, só após, misturada com a pasta.

Eventualmente, poderemos produzir um concreto leve adicionando ao concreto celular, agregados graúdos como, por exemplo, agregados leves industrializados expandidos (sinterizados): argila, xisto argiloso, ardósia, cinza volante, vermiculita, escória de alto forno, perlita etc. ou outros agregados naturais e leves, como: pedra-pomes, lava ou tufo. Seja qual for o escolhido, ele deverá ter um peso específico inferior ao do concreto celular em presença porque, se assim não for, obteremos um concreto desagregado. É importante observar que o resultado desta mistura é um concreto leve, que poderá ter ressaltada alguma característica especial, mas não se trata de um concreto celular na aceção do termo.

3. O CONCRETO CELULAR ESPUMOSO - DEFINIÇÃO

Tal como anteriormente, não existe uma definição consensual de concreto celular espumoso. Ela se obtém pela particularização da definição geral de concretos celulares:

"O concreto celular espumoso é um concreto leve que resulta da pega de um composto de aglomerantes, com ou sem agregados classificados na categoria de finos, com peso unitário seco inferior a 1850 Kg/m³ e superior a 400 Kg/m³. Esta mistura sofre tratamento mecânico e/ou físico, após ter-se adicionado ou um produto que, por agitação gere espuma, ou espuma pré-formada, destinado a levar para o seio da massa uma alta percentagem de poros esféricos de dimensões regulares e milimétricas, uniformemente distribuídos, que permanecem estáveis, incompressíveis e indeformáveis durante todo o processo."

Também aqui, os limites superior e inferior do definido não são de clara caracterização pois, mais uma vez, o limite superior está ligado a menor massa unitária

seca de uma argamassa, e o limite inferior à massa unitária seca em que ainda é possível uma distribuição e dimensão regular dos poros. Tal como anteriormente, seguimos aqui os valores adotados pelo Centre Scientifique e Technique du Batiment (CSTB) e Deusch Industrie Norme (DIN).

4. COMPOSIÇÃO PRODUÇÃO E TRATAMENTO DA MISTURA

Como dissemos anteriormente a mistura é composta de um ou mais aglomerantes, agregados que geralmente se classificam na categoria de finos, água e aditivos.

Façamos uma análise das características dos materiais componentes:

4.1. Aglomerantes

O mais utilizado é o cimento portland comum. Pode também ser usado o cimento portland de escória de alto forno ou cimento portland pozolânico, sendo que nestes casos existem alterações, tanto nas dosagens como nas características de endurecimento. Quando for necessário o uso destes tipos de aglomerantes é conveniente recorrer-se à análise experimental da mistura para melhor avaliar as suas características.

Sabemos, também da possibilidade de utilização, no concreto celular espumoso, de cal como aglomerante. Não encontramos qualquer referência que nos pudesse transmitir dados concretos sobre o assunto.

Os cimentos de alta resistência inicial são usados com vantagens (6) nestes concretos devido, sobre tudo, à baixa resistência inicial que se obtém com os aglomerantes comuns.

4.2. Agregados

A ótica em que se deve observar os agregados no concreto celular é semelhante à das argamassas convencionais.

A não ser nos concretos celulares de baixas massas específicas, onde é possível a ausência de agregados, este constitui, geralmente, a maior parcela da massa da mistura. A resistência mecânica desta não é significativamente afetada pela resistência mecânica do agregado, já que a rotura quase sempre ocorre na pasta ou na interface pasta-agregado; a resistência mecânica do agregado somente se reflete na do conjunto, quando sua magnitude é inferior a um certo valor que faça com que a rotura se dê inicialmente nos grãos inertes (10).

Interfere, também, no desenvolvimento

da resistência mecânica, a presença de substâncias nocivas ou impurezas trazidas para a mistura pelo agregado.

Entretanto, a granulometria, a forma e a textura dos grãos de areia influenciam, de forma decisiva, na maioria das características físico-mecânicas.

Para obterem um melhor rendimento destas características, observamos que os fabricantes (11), (12), (13) apresentam os parâmetros do gráfico da figura 4.2.1. como os mais adequados.

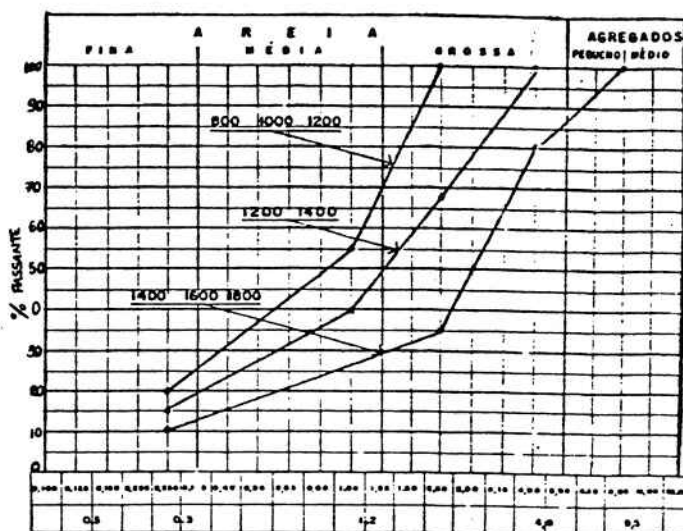


Figura 4.1. Curva Granulométrica de Agregados.

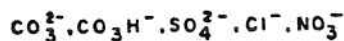
Sua observação, bem como os testes de resistência à compressão analisados no capítulo 5 permitem afirmar que é de valia utilizar-se para massas específicas mais altas, superiores a 1400 Kg/m³ areias mais grossas e para massas específicas mais baixas, inferiores a 800 Kg/m³ um teor de finura maior. No entanto, a percentagem de finos na areia, com dimensão inferior a 250 µm não deve exceder 20% (11), (12), (13).

4.3. Água

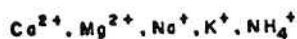
A água da mistura deve ser fresca, limpa e potável. A presença de impurezas na água de amassamento pode influenciar a velocidade de desenvolvimento das características físico-mecânicas e físico-químicas, especialmente da resistência à compressão e tempo de pega. As substâncias em suspensão (silte, argila) interpoem-se entre os cristais em crescimento e em vias de aglutinação, diminuindo por isso a coe

são. Quanto à substâncias em solução, os ions mais comuns são:

os cations



e os anions



Quando se dá fixação do ion cálcio por um radical que forma um sal insolúvel, o pH da solução de contacto baixa e a pega e o endurecimento são retardados ou impedidos; pelo contrário, quando o ion cálcio é separado do seu hidróxido para dar lugar a hidróxidos mais solúveis (exemplo: com ions potácio e sódio), obtém-se uma subida mais rápida do pH da solução, o que acelera a pega. Certos ácidos humicos também podem atuar por absorção sobre as partículas de cimento, isolando-as do concreto com a água e retardando o desenvolvimento das características mecânicas (10).

A preocupação maior deve recair sobre a água onde se adicionam os aditivos espumantes (11), (12), (13), já que:

- 1º. O agente espumante deve se misturar com a água por penetrabilidade e sem reação química.
- 2º. A temperatura da água não deve ser superior a 25°C nem inferior a 10°C, pois, fora destes limites os componentes do aditivo reagem entre si.

4.4. Aditivos

A obtenção de dados esclarecedores sobre a composição dos aditivos espumantes e tanto mais difícil quanto a necessidade dos fabricantes de preservarem suas patentes.

Existem dois tipos destes aditivos:

- agentes espumantes sintéticos e
- agentes espumantes orgânicos.

Estes tiveram o seu maior incremento nos anos 60, com a evolução da química orgânica, e são vinculados à neutralização e estabilização de proteínas de origem animal. Por permitirem um melhor controle sobre a expansão da argamassa e uma maior estabilidade volumétrica durante a cura, são os mais utilizados de um modo geral (19).

Os agentes espumantes sintéticos são de mais fácil e econômica obtenção. A gama de produtos espumantes sintéticos é extremamente grande e nada permite "a priori" dizer que um é melhor que o outro do pon-

CONCRETOS CELULARES ESPUMOSOS

to de vista técnico puro (1). Como exemplo poderíamos focalizar os saponáceos, al-bomínoídes ou resinas vinílicas, neutralizados e estabilizados.

Para se obter a espuma pré-formada, é necessário diluir o concentrado espumante em água isenta de qualquer produto químico que altera e/ou reaja com o agente espumante. As proporções de diluição variam com o fabricante do agente.

4.5. Dosagens

A definição das proporções em que cada componente deve entrar na mistura depende, antes de mais, das características desejadas pela aplicação. Assim, para cada uma, há que qualificar, em primeiro lugar, as necessidades de massa específica. Uma vez esta definida, teremos enquadradas as demais características físico-mecânicas, ou seja, com a definição da massa específica nós temos estimativa da resistência à compressão e da condutibilidade térmica; tendo a resistência à compressão, temos marginado o consumo de cimento e o fator água/cimento; tendo a condutibilidade térmica, temos uma estimativa da percentagem de ar incorporado. É evidente que o conhecimento experimental das variações possíveis entre estes elementos levar-nos-á mais rapidamente à decisão da dosagem economicamente adequada à aplicação. É baseado nesta experiência que elaboramos as tabelas 4.5.1.

1. DADOS	unidade	sigla
1.1. Massa unitária úmida do concreto celular	Kg/m ³	f
1.2. Consumo de Cimento	Kg	C
1.3. Fator água/cimento	—	F
1.4. Massa específica absoluta do cimento	Kg/m ³	γ _c
1.5. Massa específica absoluta da areia	Kg/m ³	γ _s
1.6. Massa da espuma	Kg/l	P _s
1.7. Razão de vazão do gerador	—	R
1.8. Unidade da areia	X	H

R é constante e igual a 1,09 nos geradores nacionais

P_E é constante e igual a 0,075 Kg/l nos espumantes nacionais.

2. CÁLCULO DOS COMPONENTES	UNIDADE	SIGLA	EXPRESSÃO DE CÁLCULO
2.1 Cimento (volume)	l	C_1	C/Y_c
2.2. Água	l	M_T	$C \times F$
2.3. Areia Seca (massa)	Kg	A_S	$Y - C - M_T$
2.4. Areia (volume)	l	A_1	A_S / Y_a
2.5. Volume de Materiais	l	V_{MAT}	$A_1 + C_1 + M_T$
2.6. Volume de Ar	l	V_{ar}	$1000 - A_1 - C_1 - M_T$
2.7. Volume de Espuma	l	E	$V_{ar} \times R$

3. CORREÇÕES	UNIDADE	SIGLA	EXPRESSÃO DE CÁLCULO
3.1 Água na espuma	l	M_E	$E \times F_E$
3.2. Água na areia	l	M_a	$\frac{H}{100} \times S$
3.3. Água corrigida	l	M	$M_T - M_E - M_a$
3.4. Areia corrigida	Kg	A	$A_S + M_a$

4. TRACO FINAL	UNIDADE	SIGLA	DEFINIDA NO ITEM
4.1 Cimento	Kg	C	1.2.
4.2. Areia	Kg	A	3.4.
4.3. Água	l	M	3.3.
4.4. Espuma	l	E	2.7.

Tabela 4.5.1. Sequência de cálculo do traco para concreto celular espumoso

A estruturação desta tabela está vinculada a dois fatores principais: a soma dos volumes absolutos dos componentes da mistura (incluindo o ar) deverá ser de um metro cúbico e a soma das massas dos componentes da mistura (excluindo o ar, já que este não pesa) deverá ser igual à massa unitária úmida do concreto celular. Deste modo, após o primeiro quadro onde relacionamos os dados que permitem equacionar o problema, passamos, no segundo quadro, ao cálculo dos volumes e mas

sas que, por simples diferença, nos permitem obter o volume de espuma necessária. E eventualmente, pode-se fazer necessário corrigir a quantidade de espuma pela perda ocorrida do sistema de mistura e de transporte. Nessa oportunidade o item 2.7. da tabela 4.5.1. virá afetado de um fator percentual multiplicador que retrate esta perda. No terceiro quadro da tabela 4.5.1. fazemos as correções da água na areia e na espuma. Finalmente, no quarto campo teremos o traco adequadamente definido.

5. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS

Nos concretos é possível fazer variar a sua massa unitária, a qual, por seu turno, afeta outras características e propriedades, tais como: resistência, módulo de elasticidade, condutibilidade térmica, etc.

Como vimos anteriormente, muitos são os fatores que influenciam a qualidade de mistura, sendo que até a metodologia dos ensaios, pode determinar variações substanciais nos resultados a obter. Não é preocupação nossa, no âmbito deste trabalho, colocar em discussão ou análise tais procedimentos, mas tão somente os resultados obtidos, pois é através destes que poderemos determinar a massa unitária adequada a uma aplicação específica.

5.1. Resistência à Compressão

A resistência à compressão do concreto leve celular espumoso varia com os seguintes fatores:

- 1 - massa específica
- 2 - consumo de cimento
- 3 - tipo de finura do cimento
- 4 - fator água/cimento
- 5 - qualidade e finura da areia
- 6 - idade e temperatura de cura
- 7 - sistema e metodologia de produção

De forma conceitual geral, poderemos dizer que a resistência à compressão varia na razão direta da massa específica, do consumo de cimento e superfície específica deste, ou seja, da finura do cimento. Varia também na razão inversa do volume de espuma, ou seja, da quantidade de ar incorporada na massa.

O processo de cura é decisivo nas resistências finais obtidas pois é sabido (item 2) que a autoclavagem com aumento de pressão e temperatura, pelo surgimento de novo aglomerante, permite obter resultados até duas vezes superiores ao da cura no ar, em apenas meia dúzia de horas. Observando que esta

é a situação mais comum de cura e também devido à falta de dados concretos em relação aquela, os resultados fornecidos a seguir referem-se, de modo sistemático, a concretos leves celulares espumosos curados ao ar.

Os incrementos de resistência à compressão com a idade são, neste caso, menores do que no caso do concreto comum.

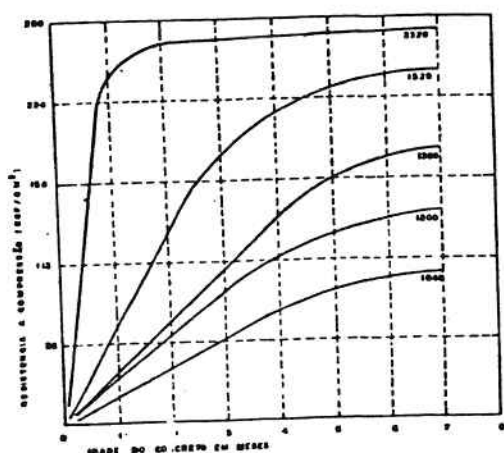


Figura 5.1.1. Relação entre a idade e a resistência à compressão.
Obs: os números nas curvas representam a massa unitária em Kg/m^3 .

A Figura 5.1.1. (20) mostra claramente que os concretos celulares espumosos curados ao ar, mais que dobram a sua resistência à compressão entre o segundo e o sétimo mês, ao contrário do que acontece com um concreto convencional. Por essa razão, a Deustch Industri Norme (D.I.N.) não mais considera a resistência à compressão dos concretos celulares aos 28 dias, mas sim aos 56 dias (12):

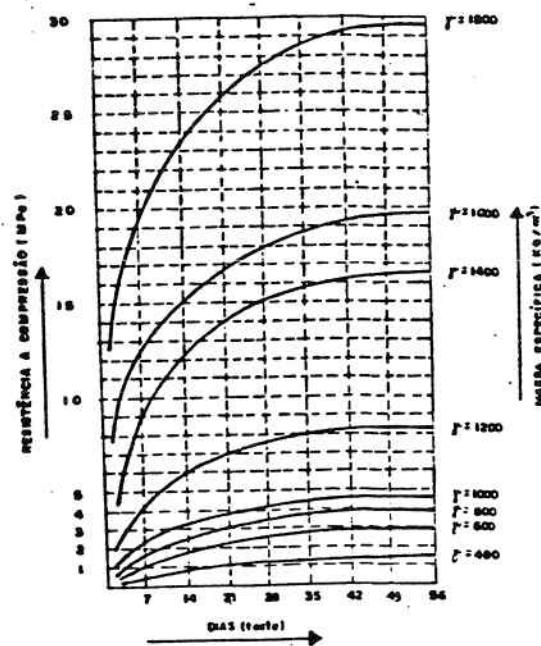


Figura 5.1.2. Variação da resistência à compressão com a massa unitária e a idade (12).

Como poderemos observar na figura 5.1.2. os concretos celulares de massa específica inferior a 1000 Kg/m^3 não tem resistências à compressão apreciáveis. Observamos ainda a enorme influência da percentagem de ar incorporada na resistência final do concreto.

A massa unitária do concreto curado em forno pode ser determinada (21) pela expressão:

$$W = 1,2C + A$$

onde:

W = massa unitária (Kg/m^3)

C = massa de cimento (Kg/m^3)

A = massa de agregado (Kg/m^3)

Recomendamos que os testes de resistência à compressão sejam feitos em cilindros de $150 \times 300 \text{ m.m.}$ e de acordo com NBR 5738/84 (9) da Associação Brasileira de Normas Técnicas, fazendo a ressalva de não apiloar o concreto, mas, tão somente dar umas leves batidas.

das com martelo de borracha enquanto o mol de está sendo preenchido.

5.2. Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto mede a deformação que o material sofre quando submetido a cargas de curta duração. Trata-se por isso, de uma característica físico-mecânica de maior importância no dimensionamento estrutural.

As expressões de cálculo do módulo de elasticidade do concreto E_c são, de um modo geral, obtidas após a análise de uma grande quantidade de resultados práticos.

A seção 8.3.1. do American Concrete Institute (A.C.I.) 318-85 fornece a seguinte expressão para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal (22):

$$E_c = 0,136 (W^3 f_{c28})^{1/2}$$

onde W representa a massa específica do concreto seco ao forno e f_{c28} é a resistência à compressão do corpo de prova de concreto aos 28 dias. Embora a presente fórmula tenha sido estabelecida para massas específicas variando entre 1440 Kg/m³, ela pode também ser empregada satisfatoriamente para valores entre 400 e 1440 Kg/m³.

Alguns autores utilizam, para a mesma finalidade, a expressão apresentada em 1960 por H. Shaffler, em Gothenberg, no RILEM Symposium on Steam - Cured Lightweight Concrete (23):

$$E_c = 6000 (W^3 f_{c28})^{1/2}$$

Verificamos que os valores obtidos por sua aplicação são bem diferentes dos experimentais.

Os concretos celulares, de um modo geral, para além das deformações elásticas, sofrem também deformações plásticas, sob a ação de cargas de longa duração. O pesquisador Bave (23) relatou testes realizados em lajes e prismas armados, de concreto celular, com massa específica 500 Kg/m³, os quais foram submetidos a cargas durante dois anos e meio. Os resultados destes testes comparados com os testes feitos com concreto comum, em idênticas condições de carregamento, mostram que os efeitos da deformação plástica são praticamente os mesmos

em ambos os tipos de concreto.

O manual técnico da NEOPOR (12) apresenta para a deformação elástica de curta duração

$$E_c = 5000 f_{c28}^{1/2}$$

e para a deformação plástica de longa duração

$$E_c = 3000 f_{c28}^{1/2}$$

A análise experimental leva-nos aos seguintes resultados para concretos celulares sem armadura.

Massa específica (Kg/m ³)	f_{c28} (MPa)	Módulo de elasticidade (Kg/cm ²)	
		curta duração	longa duração
1200	5,5	37.000	22.000
1400	10,0	50.000	30.000
1600	15,0	61.000	36.000
1800	21,0	75.000	45.000

Tabela 5.2.1. Valores do módulo de elasticidade

No entanto, os valores da tabela 5.2.1. ou os obtidos pelas expressões anteriores podem ser diferentes dos reais, já que o valor de E_c é ligeiramente alterado com a composição da mistura. Quanto mais rica é a mistura, mais baixo é o valor do módulo de elasticidade E_c (2).

5.4. Retração

A retração é uma manifestação física que deve ser encarada com seriedade na análise das características de um concreto celular espumoso. Ela expressa-se pela variação dimensional das peças de cimento, argamassa ou concreto, que se verifica desde o final da compactação até ao estado limite de equilíbrio com o ambiente, a temperatura constante, e na ausência de qualquer tensão aplicada, aqui se incluindo a expansão que se observa quando o concreto é conservado em meio úmido (10).

As causas destas variações de volume, a temperatura constante, são:

a) Antes da pega

A fissuração neste estado é provocada por duas causas, a saber:

- 1 - assentamento;
- 2 - evaporação rápida de água de amassamento.

b) Após a pega

- 1 - volume dos produtos da reação dos componentes do cimento com a água, inferior à soma dos volumes desta com o dos componentes anidros;
- 2 - movimento da água, que pode sair por evaporação ou entrar por capilaridade, permeabilidade ou ainda condensação capilar (retração de secagem);
- 3 - passagem da água livre do interior da pasta, argamassa ou concreto, combinada, absorvida e zeolítica, devido à hidratação contínua do cimento e que se verifica na ausência de trocas de umidade com o exterior (retração autogênica);
- 4 - combinação do anidrido carbonico da atmosfera com os componentes hidratados do cimento, especialmente o hidróxido de cálcio, a qual origina produtos sólidos com volume inferior à soma dos volumes do anidrido carbonico com os componentes hidratados (retração por carbonatação) (10).

Esta sistematização leva-nos a compreender, sobretudo tendo presente a quantidade de fluídos que temos no concreto celular espumoso, a importância da retração no comportamento deste material, particularmente as suas causas, quais sejam a alteração das tensões capilares da água de amassamento, e as ações físico-químicas que se desenvolvem durante o processo de hidratação (23). Objetivando, surge um desequilíbrio higroscópico provocado por condições ambientais adversas, a saber: umidade, temperatura e pressão.

Elas provocam a evaporação ou condensação da água superficial, originando o rompimento das moléculas de água interior, que se deslocam na procura do seu novo equilíbrio higroscópico. A evaporação da água interior inicia-se quando o teor da umidade

atmosférica circundante é menor do que a correspondente pressão de vapor na água (24).

Para se ter uma idéia da importância deste fenômeno, a taxa de evaporação da água é de 3,6 Kg/m².h na situação de 32°C de temperatura, 40 Km/h de velocidade do vento de 10% de umidade relativa (24).

Esta perda da água dispersa na massa provoca uma deformação por redução de volume, que é aquilo o que chamamos retração plástica ou inicial. Simultaneamente, está se desenvolvendo o processo de hidratação dos componentes do cimento, que acontece com liberação de calor.

Estas ações conjuntas provocam o surgimento de tensões internas de tração tendentes a aproximar os grãos dos agregados, tensões estas que ao ultrapassarem a resistência à tração do concreto, ainda jovem, provocam o aparecimento de fissuras.

Os concretos celulares curados ao ar tem ainda um outro fator adverso que aumenta sua retração: É o ataque do gás carbonico da atmosfera aos produtos do cimento. Neste caso, devido à sua estrutura porosa, o gás carbônico tem fácil acesso ao interior da massa, provocando a carbonatação, o que agrava mais o processo de retração.

Estas ações são tanto mais prejudiciais, quanto menor for a massa unitária, e por isso, a necessidade de resistência do concreto celular. Também, com o aumento de massa unitária, existe uma diminuição do número de poros e um aumento da resistência do concreto. Por isso, a retração varia na razão inversa da massa unitária dos concretos celulares.

Na figura 5.4.1. (20), podemos observar a relação entre a retração de concretos celulares curados ao ar e a sua massa unitária.

É importante notar que os valores percentuais obtidos para massas unitárias superiores a 1200 Kg/m³ se aproximando dos normalmente verificados nos concretos comuns.

A retração nos concretos celulares espumosos de baixa massa unitária é alta mas não é crítica pois são mais usualmente utilizados como enchimento ou isolamento (ver item 6).

Para minimizar este problema, existem algumas formas de controle, a saber:

- 1 - quantidade e tipo do agregado
- 2 - processo de cura
- 3 - juntas de controle
- 4 - fibras

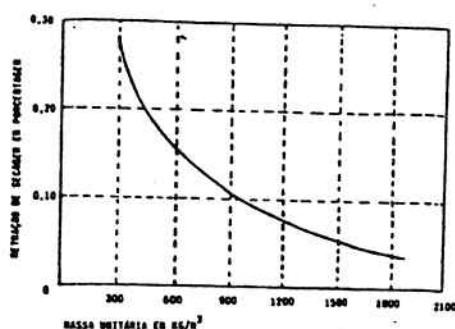


Figura 5.4.1. Relação entre a retração de secagem e a massa unitária.

No concreto convencional, a existência de agregado graúdo, como pedrisco e a pedra britada, aumenta a rigidez do conjunto, limitando a níveis aceitáveis os movimentos de retração plástica e, mais ainda, os de longa duração.

Nos concretos celulares feitos somente com pasta de cimento, massa unitária seca até 500 Kg/m^3 , a retração é muito alta, cerca de 0,25 a 0,65% (35).

A introdução de areia de boa granulometria reduz a retração, conforme se pode observar na tabela 5.4.1. onde fizemos o ensaio de retração por secagem com base na norma ASTM C 157/80 (21) obedecendo o seguinte esquema:

- 1 - Os corpos de prova prismáticos de 25,4 mm x 25,4 mm x 286 mm foram moldados com concreto celular espumoso de massas unitárias, respectivamente, 800, 1000 e 1200 Kg/m^3 com a areia descrita em 4.2 e cimento descrito em 4.1;
- 2 - Após 24 horas foram colocados em câmara úmida (temperatura de $22 \pm 1^\circ \text{C}$ e umidade relativa do ar de 98%) imersos em água potável saturada de cal até a idade de 28 dias, quando foi feita a primeira leitura, após um banho termo regulador durante 15 minutos em água potável;
- 3 - Utilizando o mesmo procedimento, realizamos as leituras aos 32, 35, 42 e 56 dias, e ainda, 12 e 36 semanas;
- 4 - Após a trigésima sexta semana os corpos de prova foram armazenados em câmara seca, com temperatura de $27^\circ \text{C} \pm 5^\circ \text{C}$ e umidade relativa do ar de $70 \pm 18\%$, quando foi feita a última leitura.

Nesta tabela podemos observar o aumento substancial do índice de retração até a idade de 56 dias e ainda a variação da retração na razão inversa do aumento da massa unitária do concreto celular espumoso.

BT PCC 10/87

Idade	RETRAÇÃO POR SECAGEM (%)									
	IDADE									
	28 DIAS		35 DIAS		56 DIAS		20 SEMANAS		36 SEMANAS	
Massa unitária	absol.	relat.	absol.	relat.	absol.	relat.	absol.	relat.	absol.	relat.
800	-0,860	-0,002	-0,710	-0,214	-0,732	-0,235	-0,745	-0,249	-0,777	-0,274
1000	-0,807	+0,009	-0,180	-0,102	-0,342	-0,206	-0,236	-0,236	-0,262	-0,257
1200	-0,008	-0,008	-0,133	-0,137	-0,150	-0,157	-0,170	-0,173	-0,191	-0,195

Tabela 5.4.1. Valores da retração para as massas unitárias 800, 1000 e 1200 Kg/m^3

Uma forma de minimizar a retração inicial antes da pega é manter o equilíbrio higroscópico da água de amassamento. Para tanto, é conveniente manter sua superfície permanentemente úmida, de preferência com uso de um pulverizador.

Devemos ter neste caso, cuidado com a introdução de movimentos reversíveis devido às expansões e contrações que aparecem na sucessão de operações de molhar e secar o concreto. Estes movimentos dependem do consumo de cimento, mas principalmente, da diminuição da massa unitária. Sabe-se (22) que para massas específicas superiores a 1200 Kg/m^3 estes movimentos não diferem substancialmente dos verificados no tijolo ou em concreto comum, ou seja, não excedem 0,018 a 0,026% para as variações de temperatura normalmente observadas nas estruturas dos edifícios.

Todavia, a forma ideal de controlar o equilíbrio higroscópico e a carbonatação é através da cura sob vapor de alta pressão em autoclave.

Na figura 5.4.2. podemos observar a redução que se observa na retração, quando se passa do sistema de cura ao ar para concreto celular espumoso curado em autoclave. Podemos mesmo afirmar que, para uma mesma matriz, concreto celular curado em autoclave é um material básica e estruturalmente diferente do curado ao ar.

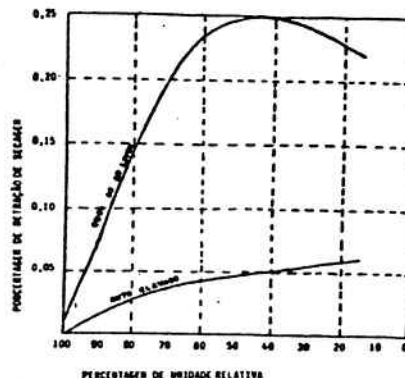


Figura 5.4.2. Relação entre a retração de secagem e a umidade relativa do ar para concreto celular curado ao ar livre e autoclave (40).

Observa-se ainda na figura 5.4.2. que os produtos autoclavados mostram uma relação quase linear entre o nível de umidade e a retração de secagem, enquanto que os produtos curados ao ar, tem uma retração que cresce muito mais rapidamente com a diminuição do teor de umidade, atingindo o seu máximo entre 40% e 50% de umidade relativa.

Claro está que, uma forma eficiente de combater o surgimento de fissuras de retração devido, principalmente, a variações de temperatura e umidade e através da introdução de juntas de controle de variação de volume, posicionadas e espessadas de distâncias que permitam um surgimento de tensões admissíveis, compatíveis com os valores da taxa de variações de volume previamente conhecidos, para um dado concreto celular.

A introdução de fibras com alto módulo de elasticidade, principalmente em aplicações onde a espessura da camada celular seja grande, e também uma forma de minimizar as fissuras por retração. As fibras mais utilizadas são as de polipropileno, as fibras de aço, e as de vidro resistentes as substâncias alcalinas do cimento (10). Entre nós, as mais comuns são as sintéticas de polipropileno, sendo que as de vidro inexistem. Não temos conhecimento de publicações que se refiram a aplicações de concretos celulares com fibras. No entanto, a experiência prática mostrou-nos que só com sucessivos testes práticos e a obtenção dos respectivos resultados, é possível encontrar a fibra mais adequada, sua quantidade e o primário mais conveniente a cada aplicação.

5.5. Absorção

A absorção de água manifesta-se pela necessidade de equilíbrio higroscópico entre o material e o fluido circulante. No concreto celular, o sistema capilar comumente encontrado nos concretos, encontra-se intercalado por pequenas, numerosas e regulares bolhas de ar que não comunicam entre si. Deste modo a absorção de água por capilaridade ocorre somente em pequenas quantidades na superfície do material.

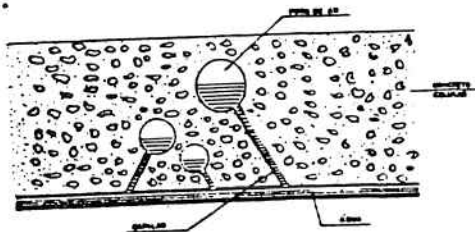


Figura 5.5.1. Absorção por Capilaridade interrompida (25).

CONCRETOS CELULARES ESPUMOSOS

É um efeito que se pode comparar ao que se verifica num vidro rachado, em que na extremidade da rachadura se faz um furo (25); isso impede que ela progrida. O gráfico da figura 5.5.2. (26) mostra que o equilíbrio dos teores de umidade do concreto celular são baixos, 1 a 3%, mesmo com a umidade relativa alta, 70 a 90%.

Estes baixos teores de umidade verificam-se mesmo quando se estabelece um gradiente térmico através da espessura da massa dando origem a um ponto de condensação dentro do material. A razão disso é que o concreto celular é um material de superfície fortemente ativa, ou seja, ela perde umidade por capilaridade e evaporação muito mais depressa do que a recebe por permeabilidade do vapor de água.

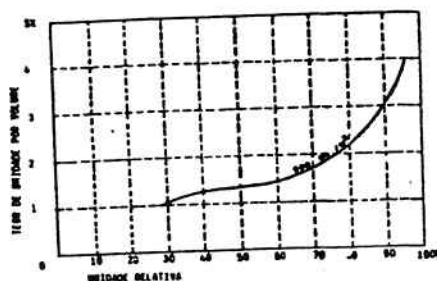


Figura 5.5.2. Relação entre a umidade relativa e o teor de umidade por volume

Obs: o número sobre a curva representa a massa específica do concreto celular espumoso.

O Bundesanstalt Für Material Prüfung (12) realizou testes de observação de acordo com a German Standards DIN 4164 (27) cujos resultados se encontram no gráfico da figura 5.5.3.

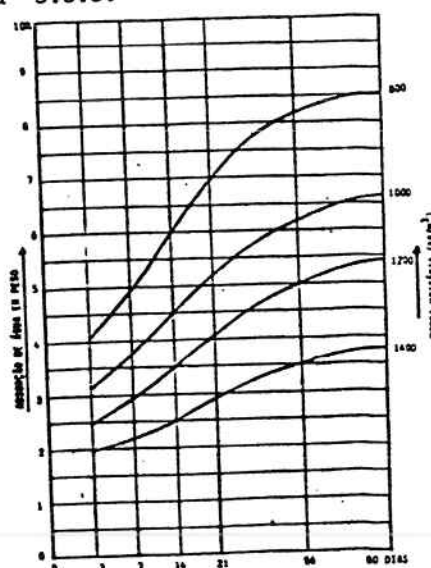


Figura 5.5.3. Percentagem de absorção para as massas unitárias 800, 1000, 1200 e 1400 Kg/m³.

5.6. Transmissão de Calor

Como vimos no item 1, o concreto celular é uma estrutura multicelular fechada, devido à distribuição uniforme de células de ar na sua massa. Esta incomunicabilidade da estrutura interna da massa de ar acrescido do ar ser um condutor pobre, especialmente quando em estado de repouso, confere ao concreto celular notáveis características de isolamento térmico, de modo que se torna da maior importância fazermos uma análise desta característica física e compará-la com outros materiais.

Na transmissão de calor, como em outros ramos da engenharia, a solução de um problema requer algumas premissas e idealizações. É quase impossível descrever exatamente os fenômenos físicos e, para exprimir um problema na forma de uma equação que possa ser resolvida, são necessárias algumas aproximações.

É importante manter presente as hipóteses, idealizações e aproximações feitas no decorrer de uma análise durante a interpretação final dos resultados (28).

Será dentro destes parâmetros que deveremos encarar as formulações e resultados fornecidos nesta seção.

5.6.1. Condutibilidade térmica (K)

A condutibilidade térmica K (29), é uma propriedade física intrínseca de cada material e indica a quantidade de calor que fluirá através de uma área unitária se o gradiente de temperatura for unitário. Dimensionalmente, expressa-se como sendo a quantidade de calor em quilo calorias que passa através de um metro quadrado de superfície de um material homogêneo, com o metro de espessura, em uma hora, para uma diferença de um grau de face a face.

$$[K] = [Kcal / h.m.^{\circ}C]$$

No sistema SI (Sistema Internacional de Unidades), as unidades de condutibilidade térmica são watts por metro quadrado, por unidade de temperatura em graus Celsius por metro, isto é:

$$[K] = [W / m.^{\circ}C]$$

De acordo com as normas B.S. 5874 e a ASTM C177-76 (30) sua determinação é feita com o material seco ao forno. No entanto, o teor de umidade existente no interior do material, altera consideravelmente o coeficiente de condutibilidade térmica, o que torna aconselhável, ou sua determinação no teor de umidade em que o material vai ser usado, ou a sua correlação se o material é testado com a massa seca ao forno e usado em outro teor de umidade.

Na figura 5.6.1. podemos observar um diagrama de valores médios da condutibilidade térmica, para diferentes massas unitárias, em ensaios realizados em cubos secos a forno (12):

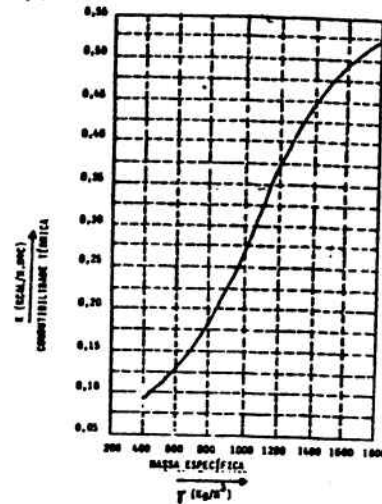


Figura 5.6.1. Valores da condutibilidade térmica para diferentes massas unitárias (12).

O ACI Committee 523 (31) apresenta, no gráfico da figura 5.6.2., o fator m pelo qual o valor da condutibilidade térmica K , obtido com o concreto seco em estufa, deve ser multiplicado para se obter o valor corrigido do concreto normalmente seco ao ar com um teor de umidade constante e igual a 5% em volume.

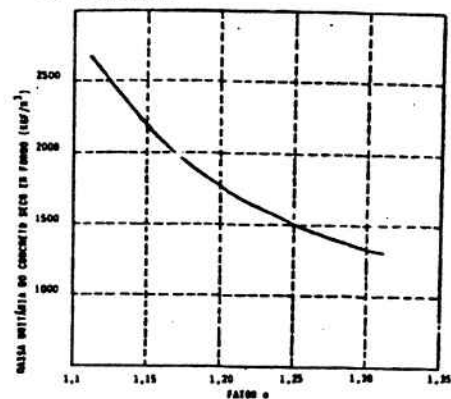


Figura 5.6.2. Relação entre o fator m e a massa unitária do concreto seco em forno.

Com o objetivo de avaliarmos os valores da condutibilidade térmica apresentados na figura 5.6.1. foram realizados ensaios em corpos de prova com dimensões aproximadas de 150 mm x 150 mm x 250 mm. Para tanto, foram utilizados o cimento e a areia definidos nos itens 4.1 e 4.2, respectivamente, e o traço como caracterizado em

4.5. Os ensaios foram realizados segundo a norma BS 5874 e utilizando-se para medida de condutibilidade térmica uma sonda, uma fonte de alimentação Hewlett Packard modelo 6205B e um termômetro digital marca Fluke, modelo 2190A. A temperatura média de ensaio foi de 39,6° C.

A tabela 5.6.1. a seguir, mostra para os valores médios das massas unitárias dos corpos de prova, os valores médios das condutibilidades térmicas resultantes.

MASSA UNITÁRIA SECA (KG/M ³)	CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (Kcm/m.h.°C)
418	0.052
535	0.135
615	0.147
788	0.185
995	0.277
1215	0.375
1398	0.458
1625	0.498
1758	0.558

Tabela 5.6.1. Valores de condutibilidade térmica para diferentes valores da massa unitária seca.

5.6.2. Coeficiente global de transmissão térmica (U)

É prática comum comparar as condutibilidades de vários materiais de isolamento. É verdade que valores baixos de condutibilidade térmica significam maiores resistências ao fluxo de calor, mas apenas a condutibilidade não oferece uma base segura de comparação. Para se obter uma comparação real dos valores de isolamento dos diferentes tipos de construção, devem-se levar em consideração, através do coeficiente global de transmissão térmica U, os outros fatores que influem no isolamento, tais como espessuras dos materiais, condutâncias de superfície e efeitos de cavidades.

O coeficiente global de transmissão térmica é a quantidade de calor que atravessa, em uma hora um metro quadrado de um sistema de parede, cobertura, piso ou outro sistema composto, quando a temperatura do ar nos dois lados difere de um grau centígrado.

O valor de U para qualquer tipo de construção pode ser determinado por testes laboratoriais. Todavia, seria impossível realizar testes individuais para cada tipo possível de construção com o número quase ilimitado de materiais que podem compor sua estrutura. Em vista disto, o valor de U geralmente é calculado através de fórmulas apropriadas, desde que se conheçam isoladamente as condutibilidades, K_1 , K_2 ,

CONCRETOS CELULARES ESPUMOSOS

... K_n , espessuras, X_1 , X_2 , ... X_n e coeficientes de convecção h_1 , h_e , dos componentes do sistema:

$$U^{-1} = \frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{K_i} + \frac{1}{h_e}$$

Os valores dos coeficientes de convecção dependem da natureza da superfície, da velocidade do ar passando sobre ela, sua posição, da direção do fluxo de calor, da temperatura da superfície e da diferença de temperatura entre a superfície e o ar circulante. Os métodos para sua determinação variam de autor para autor, pelo que achamos conveniente apresentar aqui alguns valores práticos medidos experimentalmente pelo CSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment) (29):

Ainda de acordo com a mesma fonte de referência, com o ar parado, normalmente h_1 é igual a 7,13 em paredes e painéis verticais. O valor de h_e é 29,29 (vento com velocidade de 24 Km/h), não importando a direção do fluxo de calor.

O fluxo de calor por condução através de uma parede de concreto celular, pode, numa primeira aproximação, ser considerado como um regime permanente, sendo obtido pela expressão:

$$Q = U.S.\Delta t$$

$$[Q] = [Kcal/h]$$

INCLINAÇÃO DAS PAREDES E SENTIDO DO FLUXO DE CALOR	UNIDADES	PAREDES EXTERNAS		PAREDES INTERNAS		
		$\frac{1}{h_1}$	$\frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_1}$	$\frac{1}{h_e}$
PAREDES VERTICAIS 	(m ² .°C/W)	0,11	0,08	0,17	0,12	0,12
	(m ² .h.°C/KCAL)	(0,13)	(0,27)	(0,20)	(0,23)	(0,28)
PAREDES HORIZONTAIS (FLUXO ASCENDENTE) 	(m ² .°C/W)	0,09	0,08	0,14	0,10	0,10
	(m ² .h.°C/KCAL)	(0,11)	(0,06)	(0,17)	(0,11)	(0,12)
PAREDES HORIZONTAIS (FLUXO DESCENDENTE) 	(m ² .°C/W)	0,17	0,08	0,22	0,17	0,17
	(m ² .h.°C/KCAL)	(0,20)	(0,06)	(0,26)	(0,20)	(0,20)

Tabela 5.6.2. Valores do coeficiente de convecção h.

5.6.3. Análise comparativa com outros materiais

O concreto celular é um dos poucos materiais disponíveis na construção civil que possui boa resistência mecânica aliada a uma baixa massa unitária e condutibilidade térmica.

Com base em dados fornecidos em (12) (23) e (29) estruturamos o gráfico da figura 5.6.5., onde podemos observar as condutibilidades térmicas de diferentes massas unitárias de concreto celular espumoso e de diferentes materiais normalmente utilizados na construção civil.

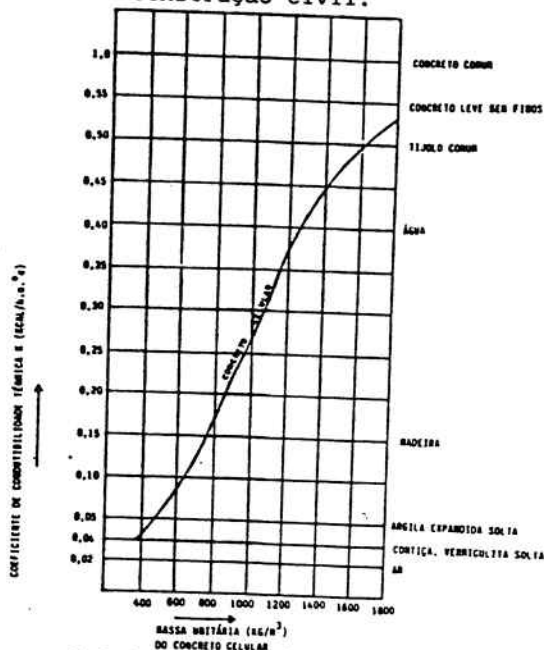


Figura 5.6.5. Comparação da condutibilidade térmica do concreto celular espumoso e de outros materiais.

5.8. Durabilidade

Achamos conveniente abordar o tema da durabilidade pela importância de conhecermos a habilidade do material resistir às agressões do meio ambiente.

A durabilidade será analisada por três ângulos, a saber: durabilidade a ataques mecânicos, durabilidade a ataques físicos e, ainda, durabilidade a ataques químicos.

5.8.1. Durabilidade a ataques mecânicos

Os ataques mecânicos advêm de cargas excessivas para as quais a peça não está preparada para resistir. As que mais afetam a durabilidade do concreto celular são as tensões de corte, abrasão impacto e flexão. Em (11), (12) e (13) podemos observar que as tensões admissíveis de corte e abrasão do concreto celular são, nas massas específicas inferiores a 1000 Kg/m³ muito baixas. É, por isso, conveniente evitar tais solicitações. Caso contrário, é necessária a introdução de uma armação suplementar que resista aos esforços de corte ou proteger a superfície com um material resistente à abrasão.

O risco principal de ocorrerem danos de impacto surgem no transporte e manuseio de peças pré-moldadas. Sobretudo, no caso de peças de massa unitária inferior a 1200 Kg/m³, é conveniente a introdução de medidas suplementares de proteção.

Para peças de massa unitária superior a 1200 Kg/m³ deverá ser feita uma análise do comportamento estrutural de modo a limitar as deformações devidas a esforços de flexão.

As cargas de longa duração não têm influência especial na capacidade de resistência das peças estruturais ou semi-estruturais de concreto celular espumoso, ou seja, os efeitos da deformação lenta são semelhantes aos verificados no concreto comum (23).

5.8.2. Durabilidade a ataques físicos

As tensões físicas que atuam sobre o concreto celular espumoso são, principalmente, as provenientes das ações de retração e movimentos térmicos já analisados nos itens 5.4. e 5.6. deste capítulo, e ainda congelamento e degelo que não achamos pertinente avaliar no âmbito deste trabalho.

5.8.3. Durabilidade a ataques químicos

Os ataques químicos ao concreto celular espumoso, verificam-se quando este está exposto à ação de meios agressivos.

Estas ações podem ser classificadas em três grandes grupos (10):

- ações dos gases e vapores corrosivos da atmosfera;
- ação corrosiva das águas de contacto;
- ação de agentes biológicos;

A estrutura porosa dos concretos celulares, torna-os mais afetos a estas ações pelo que se deve compatibilizar a sua proteção com a durabilidade, no meio em que vai ser utilizado.

5.8.3.1. ação dos gases e vapores corrosivos

A ação dos gases sobre o concreto é geralmente desprezível, a menos da existência de condições particularmente adversas como: em chaminés, fábricas de produtos químicos, centrais térmicas, etc.

O anidrido sulfuroso e o anidrido carbonico são, geralmente, em conjunto com a umidade, os responsáveis pelo ataque.

O limite inferior da quantidade de anidrido sulfuroso existente na atmosfera e contra o qual já é necessário alguma proteção é cerca de 0,02 mg de enxofre por litro de ar (10).

O concreto celular pode sofrer o ataque pelo anidrido sulfuroso, que sendo oxidado e, em presença de umidade, se transforma em ácido sulfúrico o que obriga ao emprego de cimento pozolânico ou de alto forno.

5.8.3.2. ação corrosiva de águas de contato

Dos componentes do concreto é o cimento o elemento vulnerável, aquele que sofre a ação corrosiva que leva ao desaparecimento das propriedades ligantes.

Como a ação corrosiva do concreto é de natureza exclusivamente química, as suas causas fundamentais são duas:

- reações com o hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação dos componentes do cimento, incluindo nestas a sua dissolução, que provocam desagregação;
- reações do ion sulfato com o aluminato tetracálcio hidratado do cimento, ou com a alumina do inerte, no seio de uma solução saturada de hidróxido de cálcio, que provocam expansão (10).

Nas reações com o hidróxido de cálcio há a considerar as que dão origem a produtos solúveis e as que ocasionam compostos insolúveis. Apenas as primeiras conduzem a verdadeira corrosão. Por isso, a causa indicada na alínea b, reação do ion sulfato, não existe isolada; somente se manifesta quando não haja reações que precipitem o cálcio na superfície do concreto.

A ação corrosiva, tanto se pode dar quando o líquido é obrigado a percorrer os poros do concreto celular espumoso, por simples contato com o líquido, se este se renovar, promovendo a saída do hidróxido de cálcio, por difusão, ou a entrada de outros ions, os quais poderão reagir assim com os componentes do cimento portland hidratado, de acordo com as leis de equilíbrio químico (10).

O assunto é complexo, e não é intensão deste trabalho a sua discussão, mas, tão somente alertar para a necessidade de proteção do concreto celular espumoso no caso de utilização em tais meios agressivos.

5.8.3.3. ação de agentes biológicos

A corrosão provocada por organismos vivos, consequência da sua ação física, química ou físico-química, não oferece grande perigo, exceto na ação dos esgotos, mas é prudente contar, por vezes com ela. As ações fundamentais resultam especialmente do metabolismo dos organismos vivos e da sua decomposição quando morrem. Os principais organismos vivos que tem ação sobre o concreto são certas bactérias, como as

tiobactérias, determinadas algas certos fungos e alguns roedores marinhos (10).

Finalmente, o concreto celular compartilha com o concreto comum grande resistência ao ataque por roedores, cupins, vermes, fungos e insetos (23).

5.8.4. Corrosão da armadura

A utilização de armadura no concreto celular espumoso está ligada, tal como nos concretos comuns, à necessidade de se obter características de resistência para as quais o material não está capacitado. Como vimos neste capítulo, nos itens anteriores, os concretos celulares espumosos com massas específicas inferiores a 1200 Kg/m³, são utilizados em aplicativos não estruturais. Isto significa que estamos em presença de um material com uma percentagem de ar incorporada inferior a 30% (capítulo 4 item 4.5.).

Também no concreto celular espumoso, a principal proteção do aço é a película de pasta de cimento de elevada alcalinidade (pH de 12 a 13,5) que o envolve. Para que haja corrosão é necessário, em primeiro lugar, que a proteção seja rompida, total ou parcialmente, considerando-se que no processo de lançamento não ficaram bolhas de ar macroscópicas na região da película de pasta, o que equivale a criar heterogeneidade sob o ponto de vista eletroquímico, nas proximidades do aço. Em situação bem menos provável, tal heterogeneidade pode também ser provocada pelo contato elétrico de aços com naturezas diferentes (23).

5.8.4.1. variação da concentração do eletrolito da água dos capilares

A situação mais frequente da corrosão das armaduras pode ser devido a duas causas principais:

- armaduras em contato simultâneo com dois concretos de alcalinidades diferentes, por exemplo, um cimento portland que dá origem a soluções saturadas de hidróxido de cálcio e cimentos pozolânicos ou de escória, com quantidades de escória superiores a 60% dão origem a soluções menos ricas de hidróxido de cálcio. É uma situação pouco comum.
- Eletrolito com concentrações variáveis em contato com armadura que é o caso de peças em contato com o solo e/ou com águas mineralizadas. Esta contém sempre uma maior ou menor concentração de sais minerais alcalinos, alcalino-terrosos, ácidos minerais ou orgânicos, etc. que em virtude da evaporação da água nos locais onde ela seja possível, podem penetrar no concreto por ascensão

capilar. O mecanismo de evaporação vai provocando um gradiente da concentração do eletrolito, a qual é maior na face em contato com a água.

Por outro lado, a presença da armadura a distâncias de aproximadamente 2 cm da superfície, modifica a concentração salina, pois, o fenômeno de difusão apresenta uma descontinuidade no contato da parte da armadura voltada para a superfície do concreto. obter-se-á assim uma concentração mais elevada de sal entre o ferro e a superfície do concreto. Pelo contrário, a outra face da armadura fica em contato com uma água capilar muito menos carregada de sais. Estes gradientes de concentrações salina são notáveis nos dois ou três primeiros centímetros de concreto, a partir da superfície de contato com o meio úmido, e podem originar a corrosão nas armaduras (23).

5.8.4.2. variação da concentração do oxigênio que chega ao contato com a armadura

O oxigênio também se introduz por um mecanismo idêntico ao dos sais. No entanto, se o oxigênio não puder penetrar muito longe através dos capilares, mesmo que haja formação de pilhas, estas polarizam-se devido à falta de oxigênio para as alimentar, e a corrosão anódica é contida.

5.8.4.3. outros tipos de corrosão

Nos casos analisados anteriormente, a corrosão acontecia com expansão, ou seja, com aumento de volume por surgimento da ferrugem.

No entanto, a corrosão pode surgir por ação fragilizante sobre as moléculas do aço, diminuindo sua coesão e o colapso se dá por baixamento das propriedades mecânicas do material.

5.8.4.4. como evitar a corrosão das armaduras

No estado atual do conhecimento, não parece ser possível dar ainda quaisquer valores para os teores mínimos de gases ou sais, existentes na atmosfera e na água, a partir dos quais este começam a ser prejudiciais à armadura.

No entanto, existem algumas precauções que permitem evitar ou, pelo menos, minimizar a corrosão nas armaduras:

- utilizar concretos celulares de estrutura mais compacta ou seja massa específica superior a 1400 Kg/m³;
- limitar as deformações (capítulo 6) de modo a evitar fissuração.

- proteger, obrigatoriamente, as armaduras com materiais anticorrosivos ou que evitem a corrosão.

A introdução de agentes inibidores da corrosão ou proteger catodicamente a armadura parecem-nos soluções de mais difícil execução e menor viabilidade prática.

6. APLICAÇÕES

O aproveitamento das propriedades anteriormente analisadas, permite-nos dividir as áreas de atuação dos concretos celulares espumosos em dois grandes subsistemas, a saber:

- 1 - Aplicações com concretagem "in loco";
- 2 - Aplicações em pré-moldados.

Em qualquer dos casos, a diminuição da massa unitária e consequente redução das cargas úteis, a diminuição do fator de condutibilidade térmica e ainda a sua plasticidade são os elementos primordiais que caracterizam a sua escolha em cada uma das aplicações possíveis.

6.1. Aplicações com concretagem "in loco"

São, sem dúvida as mais comuns devido, principalmente, à facilidade de sua execução no canteiro. Aplica-se o concreto celular espumoso como:

- 1 - Isolante térmico de lajes de cobertura e terraços;
- 2 - Isolante térmico de linhas subterrâneas de água fria e quente;
- 3 - Isolante térmico de frigoríficos;
- 4 - Isolante térmico de tanques de armazenamento de gasolina, gás liquefeito, amônia, metano, propano, etileno, etc.;
- 5 - Isolante térmico de fornos de alta temperatura;
- 6 - Isolante térmico em paredes corta fogo;
- 7 - Construção de paredes monolíticas, lajes e coberturas de unidades habitacionais;
- 8 - Enchimento de pisos (contra pisos);
- 9 - Enchimento de lajes nervuradas e de lajes rebaixadas;
- 10 - Enchimento e regularização do calçamento e lajes de cobertura para posterior impermeabilização;
- 11 - Revestimento de estruturas metálicas;
- 12 - Construção de barreiras para suavizar choques e absorver energias;
- 13 - Construção de pisos flutuantes;
- 14 - Assentamento de canalizações subterrâneas;
- 15 - Grautamento de túneis abrigos e câmaras subterrâneas contra choques e movimentos do solo;
- 16 - Concreto projetado.

As aplicações como isolante térmico exigem a utilização de concretos celulares de massa unitária seca inferior a 1200 Kg/m^3 , devido ao fato de serem nas baixas massas unitárias que se obtém as melhores características de condutibilidade térmica (46).

Nas aplicações de concreto celular espumoso onde se fizer necessário dar ao acabamento da superfície, declividades acentuadas, é conveniente diminuir a plasticidade pela introdução de agregados ou fibras que além do mais, aumentam a resistência à tração.

Na aplicação em enchimentos de contra piso deve-se ter especial cuidado com a ausência de resistência ao atrito dos concretos celulares espumosos de baixas massas específicas. Desse modo, se oferecem duas opções:

- 1 - Utilização de um concreto com massa unitária superior a 1400 Kg/m^3 , caso em que é possível por exemplo a aplicação de um carpete direto;
- 2 - Utilização de um concreto com massa unitária inferior a 1000 Kg/m^3 , e, por cima, fazer um capeamento com um material que absorva tais esforços.

O revestimento de linhas subterrâneas de canalizações feito com concreto celular espumoso, evita a rotura dos tubos, pois elimina recalques diferenciais, servindo de almofada e magavel contra movimentos do solo, forma um berço sólido e isola os tubos de impactos e tensões térmicas.

Neste tipo de aplicações, em sistemas de condução de água quente ou refrigeração, os tubos são primeiramente revestidos com papel corrogado ou mastique betuminoso para evitar aderência entre os tubos e a camada de concreto celular, permitindo que aqueles se expandam livremente. É comum também que o bloco de isolamento de concreto celular seja "envelopado" por uma capa de concreto comum e/ou uma tela de aço.

Em todas as aplicações em que se fizer necessário o uso de formas, particularmente na construção de paredes e lajes monolíticas, é conveniente que sejam suficientemente estanques devido ao caráter fluido do concreto celular espumoso. O grau de estanqueidade das formas depende da massa unitária em questão. De um modo geral quanto menor for a massa unitária e mais alta a peça a concretar, tanto mais sujeito se fica a vazamentos indesejáveis.

6.2. Aplicações em Pré Moldados

Ainda é de limitada utilização, em nosso meio, os pré moldados produzidos em concreto celular espumoso. Isto deve-se a vários fatores de que é predominante os altos custos em formas. De um modo geral temos as seguintes aplicações:

- 1 - Blocos de alvenaria para vedação ou função auto portante;

- 2 - Blocos para lajes nervuradas ou de caixa perdido;
- 3 - Blocos e placas para isolamento térmico;
- 4 - Placas para divisórias com ou sem função auto-portante;
- 5 - Placas para "brise-soleil";
- 6 - Placas para pisos falsos;
- 7 - Placas para forros;
- 8 - Painéis armados para construção de paredes, pisos e coberturas;
- 9 - Elementos decorativos.

Os painéis divisórias em concreto celular têm sido muito utilizados fundamentalmente devido ao seu baixo peso, o que permite uma maior velocidade de execução, e ainda as suas qualidades térmicas.

Devido à absorção (capítulo/item 5.5.), deve-se ter especial cuidado com o recobrimento da armadura de peças estruturais. No caso de ser necessário o uso de uma massa unitária seca baixa, a armadura deve ser protegida com um tratamento antiferruginoso ou a peça revestida.

6.3. Escolha da Massa Unitária Seca

Como podemos observar, a escolha da massa unitária seca é um elemento primordial em cada aplicação. Há a efetiva necessidade de compatibilizar as características físico-mecânicas do material com as necessidades técnicas de eficiência do material aplicado.

MASSA UNITÁRIA	400/600	800/1000	1200	1400/1600	1800
APLICAÇÃO					
PAINÉIS PRÉ-MOLDADOS					
PAREDES RESISTENTES	*	Δ	o	o	o
LAJES	*	*	Δ	o	o
PAREDES DE VEDAÇÃO	*	o	Δ	Δ	*
ESTRUTURAS MOLDADAS IN SITU	*	Δ	o	o	o
ISOLANTE TÉRMICO ENCHIMENTO DE PISOS	o	o	Δ	Δ	*
BLOCOS	Δ	o	Δ	Δ	Δ
CONCRETO PROJETADO	*	Δ	o	o	Δ

o muito apropriado

Δ apropriado em certas condições

* não é apropriado

Tabela 7.3.1. Escolha da massa unitária seca apropriada a cada aplicação (12).

Na tabela 7.3.1. podemos observar os seguintes critérios gerais:

- 1 - Nas aplicações em que se exija do material características térmicas, utilizam-se massas unitárias secas inferiores a 1000 Kg/m^3 ;
- 2 - Nas aplicações em que se exija do material características estruturais, utilizam-se massas unitárias secas superiores a 1200 Kg/m^3 ;

- 3 - Nas peças moldadas "in situ" e nos blocos de concreto celular, a massa unitária será definida de acordo com as solicitações a que o material vai estar sujeito.

7. CONCLUSÕES

A apresentação dos aspectos considerados de maior relevância relativamente às características notáveis que definem o comportamento do material, concreto celular espumoso, nos parece de valia pois permitem, antes de mais, uma conclusão de caráter comparativo, qual seja: os resultados dos testes até agora realizados permitem observar uma semelhança constante com os mesmos obtidos em outros países, para idênticos métodos de ensaio.

Da mesma forma, uma análise pormenorizada de cada comportamento do material perante as mais diversas solicitações, permite complementar: O concreto celular espumoso é um material com características físico-mecânicas "sui generis" que lhe enseja um campo de aplicações próprio e bem específico.

Ele é, ainda, um material que tendo produção simples e um fácil manuseio, pelo número elevado de condicionantes, obriga a uma tecnologia aprimorada e rigorosa na aplicação. Por isso, sugerimos aqui, a quem pretende utilizar este material, ter dois cuidados:

1. Verificar e testar a capacidade técnica do aplicador bem como a origem e características do produto químico a utilizar.
2. Ensaaiar corpos de prova e testar protótipos que permitam, em relação à aplicação específica, saber se o material satisfaz as exigências mínimas de projeto.

Observamos no decorrer de nosso estudo, uma necessidade de análise, por insuficiência de dados técnicos, da habilidade do material resistir às agredões do meio ambiente, e nestas, mais concretamente, a durabilidade a ataques químicos.

Observamos ainda, a nível mundial, a inexistência de uma metodologia consolidada de análise estrutural, tanto em componentes moldados no local quanto em componentes pré-fabricados.

Este fato leva-nos a sugerir, particularmente nestes últimos, que cada fabricante teste os seus elementos construtivos, fornecendo para o usuário as tensões admissíveis e respectivos coeficientes de segurança.

Finalmente, gostaríamos de sugerir a criação de uma comissão de estudos, dentro do âmbito da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para estruturar uma normalização adequada ao melhor aproveitamento das características físico-mecânicas do concreto celular espumoso.

BIBLIOGRAFIA

01. LEVY, J.P. Les Beton Legers: confection, propriétés, emplois. Paris, Eyrolles, 1955.
02. SHORT, A. & KINNIBURG, W. The Structural Use of Aerated Concrete. The Structural Engineer, London 39 (1): 1-16, jan. 1961.
03. RUDNAI, G. Lightweight Concretes. Budapest, Kladó, 1963.
04. RILEM Lightweight Concrete Committee. Terminology and Definition. Matériaux et Construction, Paris, 3 (13): 60-69, jan./fev., 1970.
05. _____. Classification Fonctionnelle des Betons Legers. Matériaux et Construction, Paris, 5 (27): 171-172 may/juni, 1972; 11 (64): 281-282, jul./out, 1978.
06. GRAF, O. Hormigon Gasoso, Espumoso, a Cal Livia no. Buenos Aires, Libreria del Colegio, 1951.
07. ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Análise Química de Cimento Portland - Disposições Gerais; NBR 5740/77. São Paulo, 1977.
08. _____. Ensaio de Cimento Portland; NBR 7215/82. São Paulo, 1982.
09. _____. Moldagem e Cura e Corpos de Prova de Concreto, Cilíndricos ou Prismáticos; NBR 5732/84. São Paulo, 1984.
10. COUTINHO, A.S. Fabrico e Propriedades do Betão. Lisboa, NNEC, 1974. 2v.
11. CONDAT, S.A. Chryso Beton. Caracteristiques e Processus de Fabrication de Beton Cellulaire Resi Mouss. Boletim Técnico de fabricante. s.l.p., s.d.
12. NEOPOR Verfahrenstechnik GmbH. Lightweight Concrete Engineering Manual. Nürtingen, s.d.
13. MEARLCRETE Foam Concrete. Boletim Técnico de fabricante, 1985. (R 411 E).
14. ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnica (ABNT) Agregados para Concreto; NBR 7211/84. SP, 1984.
15. _____. Agregado - determinação da composição granulométrica; NBR 7217/82. São Paulo, 1982.
16. _____. Agregado - determinação do teor de argila em torrões; NBR 7218/82. São Paulo, 1982.
17. _____. Agregado - determinação do material pulverulento; NBR 7219/82. São Paulo, 1982.
18. _____. Areia para Concreto - avaliação das impurezas orgânicas; NBR 7220/82. São Paulo, 1982.
19. MIGLIACCI, A. & MOSCA, A. & SCIROCCO, F. Mechanical and Elastic Characteristics of Lightweight Concretes Made With "LECA" of Italian Production. Milan, Milan Polytechnic, 1974.
20. CHEECOL Processes Limited. Boletim Técnico do fabricante. s.l.p., s.d.
21. AMERICAN Society for Testing Materials (ASTM). 1974 annual book of ASTM Standards Philadelphia, 1974. v. 04-02.
22. AMERICAN Concrete Institute (ACI). Commentary for Building Code Requirements for Reinforced Concrete. In: _____. ACI Manual of Concrete

- Practice. Detroit, 1985, v.3.
23. SERVIÇO Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI). Concreto Celular. Brasília, Departamento Regional do Distrito Federal, 1976.
 24. FERREIRA, O. R. Análise Geral dos Concretos Leves: O Concreto Celular. São Paulo, Associação Brasileira de Construção Industrializada, 1982.
 25. BAUER, L.A.F. & NORONHA, M.A.A. Uso de Aditivo no Preparo do Concreto. São Paulo, s.d. (Bol. Bauer n. 5).
 26. SIPOREX S.A. Boletim Técnico do Fabricante. Suécia, s.l.p., s.d.
 27. DEUTSCH Industrie Norme (DIN). Cellular Concrete; DIN - 4164. Berlin, s.d.
 28. KREUTH, F. Princípios de Transmissão de Calor. São Paulo, Edgard Blucher, 1977.
 29. CENTRE Cientifique et Techniques du Batiment (CSTB). Documentation Technique Unifie (DTU), Paris, 1971.
 30. AMERICAN Society for Testing Material (ASTM). 1983 Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1983. v. 04-06.
 31. AMERICAN Concrete Institute (ACI). Guide for Cellular Concretes Above 50 pcf. and for Aggregate Concrete Above 50 pcf. With Compressive Strengths Less Than 2500 psi. In: _____. ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, 1985. v.5.
 32. RYAN, J.V. & BENDER, E.W. Fire tests of precast cellular Concrete Floors and Roofs. Washington, National Bureau of Standards, 1962. (monog. 45).
 33. LEONHARDT, F. & MONNIG, E. Construções de Concreto: casos especiais de dimensionamento de estruturas de Concreto Armado. São Paulo, Interciência, 1978, v.2.
 34. MCCORMICK, F.C. Rational Proportioning of Preformed Foam Cellular Concrete. American Concrete Institute, Proc. Detroit, 64 (2): 104-109, feb. 1967.
 35. ROSSO, T. Concretos Leves na Construção Civil. In: Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON). Colóquio sobre Concretos Leves, SP, 1973.
 36. COMITE Euro - International du Beton (CEB). Manual of Autoclaved Aerated Concrete: Design and Technology. Lancaster, Construction Press, 1978.
 37. AMERICAN Concrete Institute (ACI). Guide for low Density Precast Concrete Floor, Roof, and Wall Units. In: _____. ACI Manual of concrete practice. Detroit, 1985. v. 5.
 38. _____. Guide for Cast-in-place Low Density Concrete. In: _____. ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, 1968. v. 3.
 39. BRITISH Standard Institution. Structural Recommendations for load - Bearing Wall. C.P. n. 111. London, s.d.
 40. KINNIBURGH, W. Comparison of Drylong Shrinkage of Autoclaved and air-cured Concrete at Different Humidities. In: reunion Internationale des Laboratoires d'Essai et de Recherches sur les Matériaux et Constructions (RILEM). Symposium on Steam-cured Lightweight Concrete, Gothenburg, 1960.
 41. SKARNE System International. Neopor Lightweight Concrete. Stockholm, 1982.
 42. YTONG. Boletim Técnico do Fabricante, Stockholm, s.l.p., s.d.
 43. BERGSTROM. Preparation of Standards for reinforced Lightweight Concrete in Sweden. In: Reunion Internationale des Laboratoires d'Essai et de Recherches sur les Matériaux et Constructions (RILEM). Lightweight Concrete. Paris, 1960.
 44. AMERICAN Society for testing Materials (ASTM). 1974 Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1974. v. 04-07.
 45. _____. 1983 Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1983. v.04-01.
 46. HOFF, G.C. Porosity - Strength Considerations for Cellular Concrete. Cement and Concrete Research, Elmsford, 2 (1): 91-100, jan. 1972.