

## SOLUÇÕES INDUSTRIALIZADAS PARA CASCAS DE BETÃO COM ELEMENTOS CERÂMICOS INCORPORADOS



**P.B. LOURENÇO**  
Prof. Associado  
EEUM  
Guimarães



**J.A.O. BARROS**  
Prof. Auxiliar  
EEUM  
Guimarães



**J.T. OLIVEIRA**  
Doutoranda  
EEUM  
Guimarães

### SUMÁRIO

A presente comunicação apresenta resultados de um projecto em curso, tendo em vista definir uma solução competitiva para cascas de betão armado com elementos cerâmicos incorporados. As soluções tecnológicas consideradas, que incluem pré-fabricação parcial e total são discutidas, os ensaios experimentais e os seus resultados analisados e os protótipos a serem construídos são apresentados. Os resultados já obtidos salientam as potencialidades da pré-fabricação parcial e do bom desempenho da solução proposta.

### 1. INTRODUÇÃO

Em Portugal, é corrente a utilização de lajes com vigotas pré-esforçadas, aligeiradas com abobadilhas cerâmicas. Enquanto a regulamentação espanhola e italiana permite que se considere a resistência das abobadilhas no dimensionamento desse tipo de laje, em Portugal, isso não é recomendável. A resistência dos elementos cerâmicos disponíveis no mercado, fabricados segundo padrão de controlo de qualidade praticados pela melhor indústria, motivou o projecto de investigação no âmbito da concepção e desenvolvimento de uma solução industrializada para casca de betão armado com elementos cerâmicos resistentes incorporados para vãos médios, onde as propriedades de cada elemento constituinte são tidos em conta. O projecto conta com a colaboração de empresas e centros de investigação da Alemanha, Bélgica, Espanha, Itália e Portugal. Em seguida, discutem-se os aspectos tecnológicos envolvidos e os resultados experimentais preliminares, incluindo ensaios de aderência entre o elemento cerâmico e o betão / argamassa, ensaios de corte entre o elemento cerâmico e o betão, bem

como ensaios em rede de metal distendido que é um dos componentes do sistema. Neste momento estão em curso ensaios sobre painéis e faixas de laje.

## 2. ANTECEDENTES

O presente projecto de trabalho tem como base o trabalho desenvolvido por Eladio Dieste [1], engenheiro do Uruguai (1917-2000), que possui ampla obra em cascas de betão com elementos cerâmicos incorporados. Para competir com as coberturas laminares maciças de betão, Dieste introduziu um retículo de elementos cerâmicos que permite a colocação de armadura ortogonal, permite realizar formas inovadoras e permite reutilizar cofragens com velocidades de rotação elevada (12 a 16 horas). A arquitectura das suas coberturas possuía elevada periodicidade pelo que a cofragem de uma fracção da área a cobrir era utilizada várias vezes, o que permitia reduzir significativamente os custos de construção. A utilização de uma directriz catenária permitiu que as cascas de Dieste atingissem vãos de 50 m com espessuras de apenas 12 cm!

As coberturas de Eladio Dieste dividem-se essencialmente em dois grandes grupos: cascas de dupla curvatura atirantadas contínuas (Fig. 1a,b) e descontínuas (Fig. 1c) para um vão elevado, e cascas de curvatura simples não atirantadas para um vão modesto (Fig. 1d).

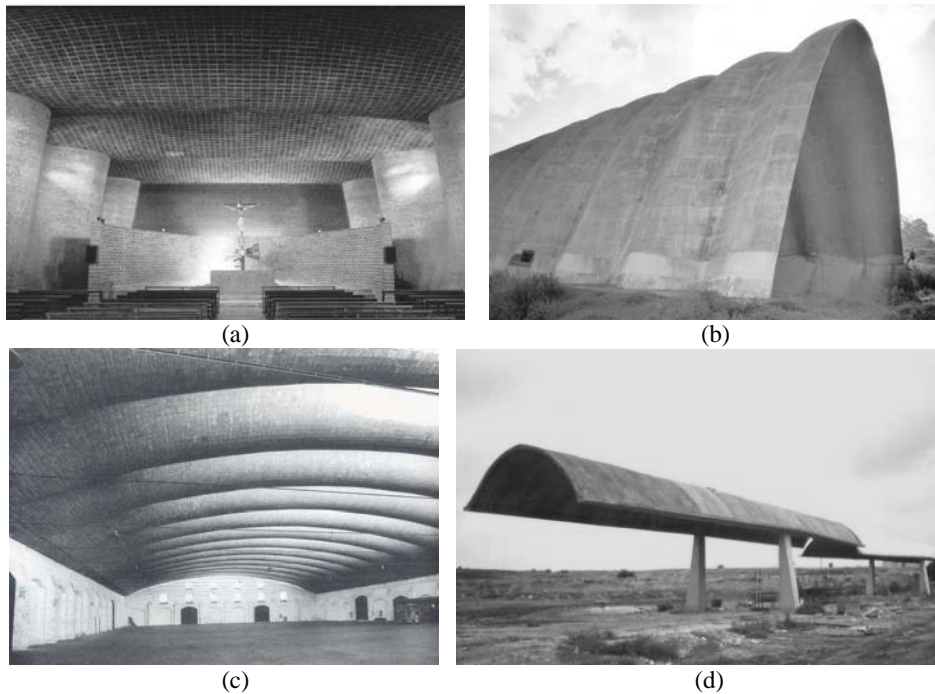


Figura 1: Exemplos das cascas de Eladio Dieste: (a) Igreja da Atlântida, Uruguai; (b) Silo da Cooperativa Agrícola de Young, Uruguai; (c) Armazém Julio Herrera y Obes, Uruguai, (d) Caminho dos Estudantes, Espanha

As cascas de dupla curvatura possuem geratrizes que descrevem uma sinusóide contínua na chave. No caso da Igreja da Atlântida, construída em 1960, a cobertura vence um vão entre 16 e 19 m com uma espessura de 19 cm, ver Fig. 1a. Os tirantes estão colocados no interior dos “vales” que resultam da forma ondulada da cobertura. No caso do silo horizontal da Fig. 1b, construído em 1978, as fundações resistem aos impulsos que resultam da forma da cobertura, com um vão de 28.5 m e uma espessura de 12 cm.

As cascas descontínuas possuem geratrizes que descrevem uma sinusóide descontínua na chave, permitindo criar janelas de iluminação. A forma em dente de serra obtida é atirantada pela parte inferior (por exemplo no caso de armazéns) ou pela parte superior (por exemplo no caso de pavilhões desportivos, em que os tirantes prejudicam a visão dos espectadores ou a prática desportiva). Na Fig. 1c apresenta-se o aspecto da cobertura de um armazém com 50 m de vão e 12 cm de espessura. Os tirantes interiores foram amiúde utilizados para as instalações eléctricas, visíveis na foto, e as tubagens de ar comprimido.

Finalmente, as abóbadas de berço catenárias de Dieste são geralmente justapostas em bateria, permitindo a cobertura de bombas de gasolina, estações de camionagem, etc. Na Fig. 1d ilustra-se um módulo típico construído em 1998. O projecto contempla 42 módulos em  $\Omega$ , dispostos sobre o caminho que liga a Universidade de Alcalá com a estação de comboios. A casca realiza duas vigas-consola pré-esforçadas e simétricas com 15 m de comprimento. O vão da casca é de 4.20 m, com uma espessura de 9 cm.

A nova arquitectura internacional aparecida a partir dos anos 90 apresenta tendências ao retorno dos tectos curvos e a uma formalização de superfícies não convencionais. Por outro lado, em inúmeros países europeus, o valor plástico do tijolo face à vista representa um valor acrescentado. Desta forma, existe mercado apreciável para coberturas curvas e com tijolo face à vista, uma vez resolvidos os problemas de industrialização.

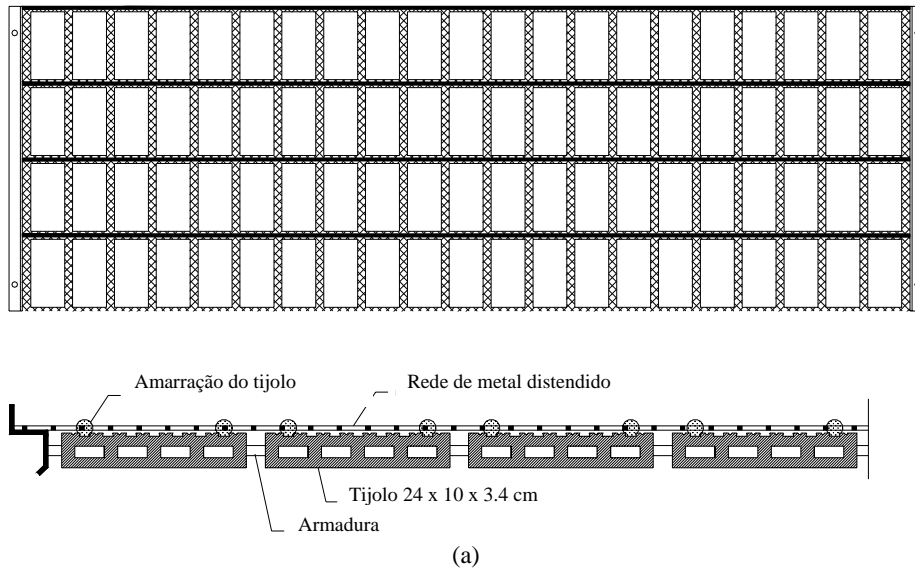
### **3. INDUSTRIALIZAÇÃO**

As condições sócio-económicas dos países desenvolvidos exigem técnicas construtivas de maior industrialização, que sejam mais rápidas e utilizem menos recursos de mão de obra e de cofragem do que as propostas de Eladio Dieste. Nesse contexto, no âmbito do projecto de investigação em curso estão a ser investigadas propostas de pré-fabricação parcial e de pré-fabricação total para abóbadas de berço de curvatura simples, que incluem a optimização de forma e de resistência dos materiais a utilizar.

#### **3.1 Pré-fabricação parcial – Trabalho em curso na Universidade Politécnica da Catalunha**

A pré-fabricação parcial proposta para abóbadas de berço de vão pequeno [2] consiste nas seguintes etapas, ver Fig. 2: (i) pré-fabricação de faixas de casca planas e flexíveis; (ii) justaposição de várias faixas em obra, arqueadas com a forma final pretendida e cofragem ligeira; (iii) betonagem no local pelo extradorso. As faixas pré-fabricadas são constituídas pelos elementos cerâmicos, por uma rede de metal flexível que permite a amarração dos elementos cerâmicos, por armadura longitudinal e por um filme aderente na face exterior. Este

filme de alta aderência é essencial para impedir o betão ou a argamassa de manchar a face visível da casca.



(b)



(c)

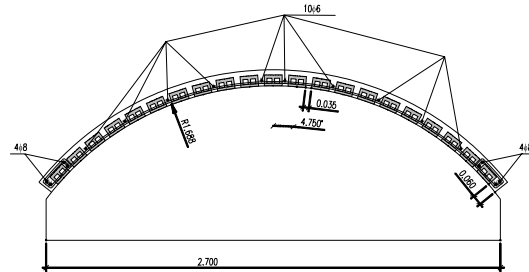
Figura 2: Pré-fabricação parcial: (a) faixas de casca semi pré-fabricadas planas e flexíveis; (b) transporte das faixas; (c) escoramento ligeiro para dar forma à casca.

### 3.2 Pré-fabricação total – Trabalho em curso na Universidade do Minho e na Prégaia, SA

A Universidade do Minho, em parceria com a Prégaia SA, está a desenvolver um modelo de casca de betão com elementos cerâmicos incorporados, com a preocupação de que o método construtivo seja adequado às técnicas de préfabricação. Dos dois modelos a serem estudados um está a ser construído no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da EEUM e o outro está a ser confeccionado na Prégaia SA. O primeiro será executado tendo como forma um molde de madeira, com directriz catenária de 4m de corda, e 1m de flecha. Na confecção do modelo serão utilizados elementos cerâmicos com as mesmas características dos utilizados nos

ensaios de corte [3]. A alvenaria será armada longitudinalmente e transversalmente com varões de 8mm e 6mm, respectivamente. As juntas de 25mm de espessura serão em betão de aproximadamente 30MPa de resistência à compressão. Na face superior dos blocos, será posicionada uma rede de aço electrossoldada com fios de 3mm de diâmetro, espaçados de 5mm. Após a colocação da rede proceder-se á a betonagem da casca, de forma a assegurar uma camada de compressão de 30mm. A consistência do betão será adequada, no sentido de impedir o seu escoamento, motivado pela inclinação da casca. Para facilitar o posicionamento dos blocos e para garantir os espaçamentos das juntas de betão, serão acoplados à forma de madeira, alguns espaçadores de madeira, cujas dimensões são iguais às dimensões das juntas de betão. Este sistema requer uma elevada homogeneidade nas dimensões dos blocos cerâmicos. A casca será retirada da forma de madeira, ainda em estado fresco, apenas algumas horas após a sua confecção, para eventuais reparos no acabamento da face à vista.

No modelo a ser confeccionado na Prégia SA, ver Fig. 3a, o posicionamento dos elementos cerâmicos durante a montagem da casca é assegurado por intermédio de um filme adesivo de grande resistência, ver Fig. 3b. Esta solução evita a utilização dos espaçadores de madeira e permite uma certa flexibilidade nas dimensões dos blocos. O micro-betão utilizado nesta solução tem uma resistência a compressão de 30MPa e a sua fluidez foi estudada para assegurar um bom acabamento. Para evitar uma significativa penetração de betão nos furos dos elementos cerâmicos, foram inseridos alguns pedaços de poliestireno expandido em seu interior, antes do preenchimento das juntas. A Fig. 3c ilustra um modelo preliminar de uma parte da casca, após descofragem.



(a)



(b)



(c)

Figura 3: Modelo Prégia:(a) detalhe da casca a ser construída; (b) fixação dos elementos cerâmicos no filme adesivo; (c) vista parcial da casca.

#### 4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS NA UNIVERSIDADE DO MINHO

Na Universidade do Minho estão a ser realizados uma série de ensaios tendo em vista caracterizar mecanicamente os componentes do produto final (já realizados) e caracterizar o comportamento das cascas sob esforços independentes de membrana e de flexão (em curso). Os ensaios em cascas serão realizados parcialmente na Universidade do Minho e parcialmente na Universidade Politécnica da Catalunha, ver também [2].

##### 4.1 Ensaios de tracção

O objectivo destes ensaios é caracterizar os tijolos e a interface tijolo - argamassa / betão, para os tijolos portugueses e espanhóis adoptados nos ensaios e para um leque de argamassas que possam vir a ser seleccionadas na solução final. Em materiais quasi-frágeis, tal como o betão ou o tijolo, é possível obter as curvas tensão – deslocamento, desde que o ensaio seja realizado sob controlo de deslocamento. Os ensaios foram realizados no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da EEUM, utilizando o equipamento de corte CS 7400/S. O equipamento tem dois actuadores independentes, posicionados na direcção vertical e horizontal, ver Fig. 4a.

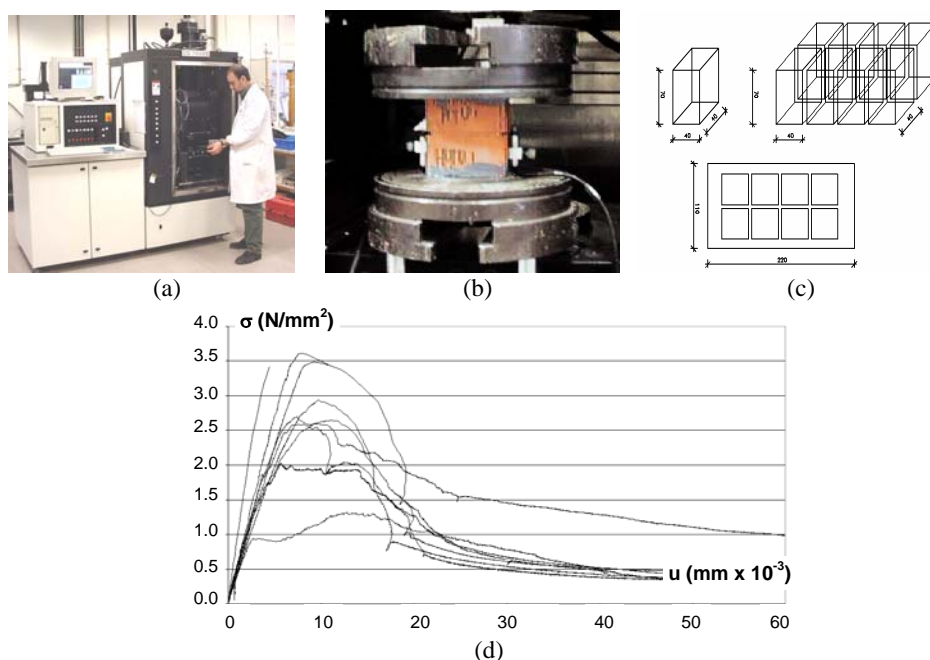


Figura 4: Ensaios de tracção directa: (a) equipamento de ensaio; (b) pormenor dos provetes de tijolo; (c) obtenção dos provetes; (d) curvas tensão-deslocamento típicas obtidas nos ensaios.

No total foram realizados cerca de 90 ensaios em provetes de tijolo, ver Fig. 4b,c, sem e com junta. A resposta típica obtida nos ensaios está ilustrada na Fig. 4d, sendo possível obter desta

forma a resistência à tracção e a energia de fractura dos materiais. Em [4] estes ensaios estão pormenorizadamente descritos e os resultados obtidos estão devidamente apresentados.

#### 4.2 Ensaio de corte

Os ensaios realizados para a caracterização ao corte incluíram apenas um tipo de elemento cerâmico perfurado (produzido na empresa J. Monteiro e Filhos, Lda). As juntas de 25mm de espessura foram realizadas com micro-betão com características próximas do betão a ser utilizado na pré-fabricação total em desenvolvimento com a empresa Prégaia, SA. Os ensaios realizados estão de acordo com a EN 1052-4, sendo os painéis constituídos por três fiadas de blocos, ligados por duas juntas verticais e duas juntas horizontais, ver Fig. 5a.

Para se determinar os parâmetros que definem a Lei de Coulomb, o sistema de ensaio foi concebido de forma a minimizar o efeito de flexão e o nível de tensão de pré-compressão não deve exceder 2 MPa. Os painéis foram submetidos a uma pré-compressão de 0,2, 0,6 e 1,0 MPa (3 ensaios para cada nível de pré-compressão). Os ensaios foram instrumentados com 7 LVDTs e duas células de carga. Nas Figs. 5b,c ilustram-se os aspectos típicos de um painel na rotura e a curva força horizontal vs. deslizamento. A Fig. 5d apresenta a lei de Coulomb que caracteriza o comportamento das juntas.

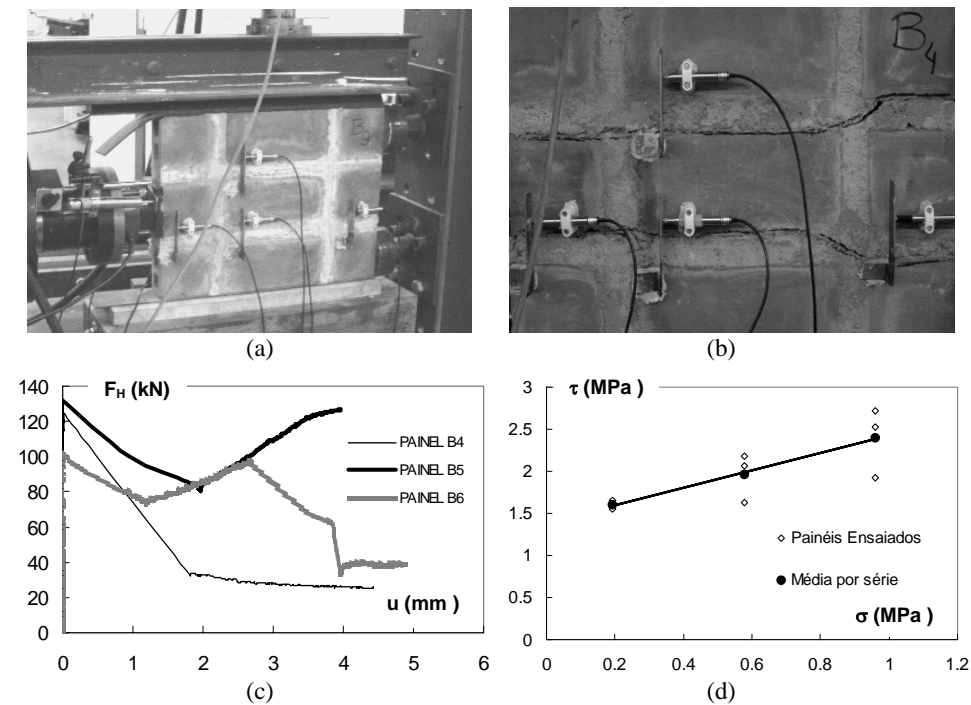


Figura 5: Ensaio de corte: (a) esquema de ensaio e painel; (b) aspecto típico da rotura do painel; (c) curva tensão-deslocamento típica obtida nos ensaios; (d) lei de atrito de Coulomb.

### 4.3 Ensaio na rede de metal distendido

Para caracterizar a rede de metal distendido, inicialmente prevista na solução de pré-fabricação parcial para amarração entre os elementos cerâmicos, foram realizados ensaios de tracção directa em 4 séries de 3 provetes cada. Foram efectuados ensaios com 0°, 30°, 60° e 90° entre a direcção de carga e a direcção da rede. Borracha vulcanizada, de rigidez apropriada, foi aplicada nas extremidades da rede, de modo a evitar ocorrência de concentração de tensões nas zonas de sua fixação às amarras da prensa, e consequentemente a sua rotura precoce junto às amarras, ver Fig. 6a. Os ensaios foram realizados no Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. Os ensaios permitiram verificar o comportamento diversificado da rede para as diferentes posições solicitadas, e verificar uma grande acomodação na geometria da rede, devido à baixa relação área de metal / vazios.

Além dos ensaios realizados com a rede de metal distendido trabalhando isoladamente, foram também realizados 9 ensaios de tracção, em 3 direcções, 0°, 30° e 60°, com as redes preenchidas com argamassa de composição 1 : 3.6 : 12 (água : cimento : areia). Estes ensaios tiveram o objectivo de avaliar a capacidade de reforço que a rede pode proporcionar quando embecida num material de matriz cimentícia, ver Fig. 6b. Para evitar a ruptura precoce pelas extremidades dos provetes, nestas zonas foi adicionada uma armadura suplementar, grelha de varões de 100mm de diâmetro. Os painéis (rede + argamassa) apresentaram diferentes tipos de ruptura e resistências diferentes, dependendo da direcção do provete em relação à direcção da carga. O gráfico da Fig. 6c ilustra os resultados dos ensaios da rede de metal distendido, submetida uma força de tracção aplicada a 30°. Nota-se que a rede de metal não foi eficaz no sentido de reforçar o painel, portanto decidiu-se utilizar, na sequência do projecto, uma malha electrossoldada no lugar da rede de metal. Na Tabela 1 apresentam-se os resultados registados nos ensaios efectuados, donde se pode concluir que o comportamento da rede é bastante afectado pela direcção de actuação da carga, tanto para os ensaios com rede isolada como para os ensaios com rede preenchida.

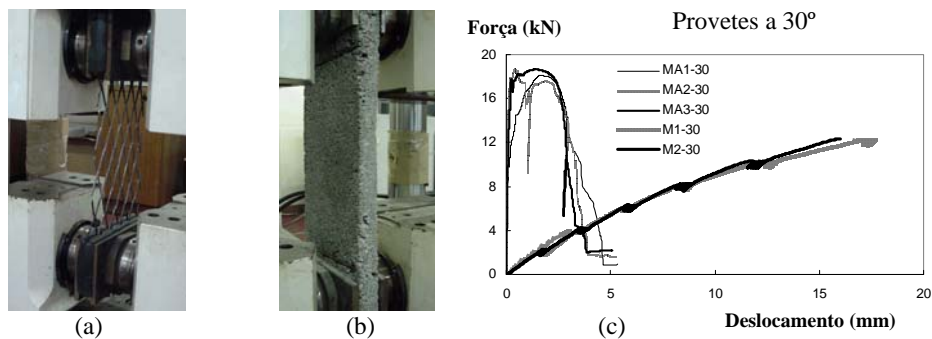


Figura 6: Ensaio com a rede de metal distendido: (a) ensaios com a rede isolada; (b) ensaios com a rede preenchida com argamassa; (c) gráfico força-deslocamento para a rede, sem e com preenchimento, posicionada a 30° da direcção da aplicação da carga.

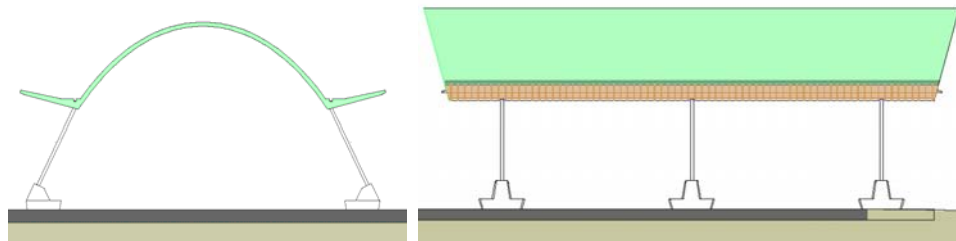


Tabela 1 – Resultados dos ensaios com a rede de metal distendido.

Direcção Rede Isolada	F <sub>máx</sub> (kN)	Deslocamento médio (mm)	Direcção Rede Preenchida	F <sub>máx</sub> (kN)	Deslocamento médio (mm)
0°	13.67	48.90	0°	32.00	0.70
30°	12.45	16.85	30°	17.00	0.80
60°	3.43	249.93	60°	12.05	0.08
90°	4.43	335.27	–	–	–

#### 4. PROTÓTIPOS

O projecto prevê a construção de dois protótipos em Itália durante 2003. Um primeiro projecto é uma pavilhão aberto num parque verde, com uma cobertura de vão livre igual a 10 m e 20 m de comprimento, apoiada em pilares exteriores afastados de 10 m e com uma viga-pala rígida de contorno, ver Fig. 7a. O segundo projecto é uma pavilhão de apoio a um parque de exposições com um desenvolvimento de 11 m e vão de 8m, ver Fig. 7b.



(a)



(b)

Figura 7: Protótipos a construir em 2003, Itália: (a) alçado e corte do Pavilhão em Agrate; (b) alçado do Pavilhão Eladio Dieste.

## 5. CONCLUSÕES

Na presente comunicação é descrito um trabalho de investigação associado a um projecto em curso cujo objectivo essencial é desenvolver uma solução industrializada para cascas de betão com elementos cerâmicos incorporados. Os resultados obtidos nesta fase permitem concluir que é possível adoptar um sistema de pré-fabricação parcial para obter uma solução competitiva e com elevado valor estético. Os ensaios de caracterização mecânica em curso irão possibilitar o estabelecimento de disposições construtivas adequadas à solução e a sua homologação junto das entidades nacionais.

## 6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado parcialmente pelo projecto GROWTH GROW – 1999 – 70420 “ISO BRICK”, da Comunidade Europeia. O terceiro autor agradece ainda o financiamento pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através da bolsa BD/7106/2001.

Os autores agradecem também o valioso apoio do Dr. Luís Ferreira da J. Monteiro e Filhos, Lda, e do Eng. Carlos Sampaio da Prégaia, SA, ao projecto em curso.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Dieste, E. – “*Estética y diseño en ingeniería*”. Vol. 7/8, 1988
- [2] Sarrablo, V. – “*Contribución a la viabilidad de cubiertas laminares de cerámica armada mediante soluciones semiprefabricadas. Propuesta para láminas cilíndricas de pequeña luz*”. Tese de doutoramento, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, 2002, 200 p.
- [3] Oliveira, J.T., Lourenço, P.B., Barros, J.A. – “Painéis de alvenaria cerâmica com juntas de concreto submetidos a ensaio de cisalhamento”, *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Seminar on Structural Masonry*, 2002, Belo Horizonte, Brasil, pp. 185-192.
- [4] Almeida, J.C., Lourenço, P.B., Barros, J.A. – “Characterization of brick and brick–mortar interface under uniaxial tension”, *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Seminar on Structural Masonry*, 2002, Belo Horizonte, Brasil, pp. 67-76.