

## **APLICAÇÃO DE PAINÉIS COMPÓSITOS EM TABULEIROS DE PONTES MISTAS AÇO-BETÃO**

Paulo Carapito<sup>a</sup>, Eduardo Gonçalves<sup>a</sup>, João Zeferino<sup>a</sup>, Nuno Oliveira<sup>a</sup> e Filipe Santos<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *VESAM Engenharia S.A., Zona Industrial de Cantanhede, Lote 69, 3060-197 Cantanhede, Portugal*

**Resumo.** Este artigo apresenta um estudo sobre a aplicação de painéis compósitos em tabuleiros de pontes mistas aço-betão. Pretende-se que este novo produto apresente as mesmas vantagens dos sistemas estruturais correntes, mas também características inovadoras e diferenciadoras que o tornem competitivo como alternativa às soluções tradicionais. Destaca-se particularmente a simplicidade única de fabrico, transporte e instalação em obra, e a incorporação de origem de uma rede de sensores para a monitorização da integridade estrutural. Os resultados obtidos em ensaios mostram as suas potencialidades, apesar das várias dificuldades encontradas no desenvolvimento do material polimérico e sua aplicação em painéis compósitos.

### **1. Introdução**

A execução de pontes metálicas e mistas em locais com escassez de matérias-primas e de mão-de-obra especializada apresenta particulares dificuldades. Em países africanos, como Angola e Moçambique, o custo de execução dos tabuleiros mistos aço-betão para pontes mistas continua a ter um peso significativo no custo total da obra, essencialmente devido ao elevado custo que a produção do betão localmente apresenta. No caso específico das pontes este problema é agravado ainda mais devido à sua localização que, em geral, é em locais remotos afastados dos centros populacionais. Uma forma de reduzir este fenómeno poderá passar pela substituição do betão por outro material e pela adoção de tabuleiros pré-fabricados, modulares, produzidos com elevados padrões de qualidade ao nível dos materiais adotados e controlo dimensional.

O novo elemento estrutural que se pretende desenvolver consiste num painel compósito, do tipo sanduíche, constituído por duas chapas metálicas afastadas entre si por um núcleo central formado por um material polimérico formulado especificamente para apresentar propriedades melhoradas. Realizando uma analogia entre este novo elemento estrutural e uma tradicional secção metálica em I, pode-se afirmar que as chapas metálicas desempenham a função dos

banzos, resistindo fundamentalmente a esforços de compressão e tração, criando um binário que confere ao painel compósito uma elevada resistência ao momento fletor devido à elevada área de secção metálica e ao afastamento desta relativamente ao eixo neutro do painel. Por outro lado, o núcleo central desempenha a função da alma da secção metálica, sendo realizado num material polimérico de propriedades melhoradas, destacando-se a elevada densidade, o qual permitirá manter as chapas metálicas afastadas entre si de modo a criar o binário, conferindo simultaneamente a rigidez necessária para resistir a esforços de corte e um peso próprio reduzido.

O uso de painéis compósitos do tipo sanduíche com função estrutural é bastante antiga em diferentes áreas da engenharia (aeroespacial, aeronáutica, naval, automóvel e mecânica), mas recente em engenharia civil. A prática atual reduz a sua utilização principalmente ao revestimento de fachadas e coberturas. Uma revisão do estado da arte revela que este conceito em sistemas estruturais apresenta vantagens comparativamente às soluções correntes, em particular, rácios resistência/peso e rigidez/peso bastante superiores [1]. Os painéis sanduíche são normalmente constituídos por duas chapas (aço, alumínio ou GFRP) e um núcleo central (espuma, betão leve ou alvéolo vazado) [2,3,4,5].

A monitorização da integridade dos materiais e estrutura adotada é crucial para assegurar o seu adequado comportamento estrutural e a sua sustentabilidade como solução diferenciadora. Nesse sentido, um sistema de monitorização da integridade estrutural baseado num conjunto de sensores permite conhecer o seu comportamento estrutural durante a fase de construção da estrutura e durante toda a sua vida útil [6,7].

Neste artigo pretende-se apresentar o desenvolvimento de um novo produto de construção, que consiste num painel compósito com rede de sensores e sistema de monitorização integrado, para ser utilizado como elemento estrutural em tabuleiros. Este produto enquadra-se num projeto individual de investigação e desenvolvimento, designado “Composite Panel with Integrated Sensorial Network for Steel Mixed Bridge Decks” (BRIDE). É apresentada inicialmente a conceção geral do produto. Em seguida, apresenta-se o desenvolvimento do material polimérico e do respetivo painel compósito. Depois, é descrito o sistema de monitorização, incluindo o conjunto de sensores utilizados e a forma de integração dos mesmos no painel compósito. Por fim, são expostas as principais conclusões.

## 2. Conceção Geral

O objetivo do projeto BRIDE é demonstrar e validar um novo conceito relacionado com painéis compósitos para tabuleiros de pontes metálicas e mistas. Este novo conceito compreende duas chapas de aço e um núcleo central de uma espuma de poliuretano de alta densidade (Figura 1).

O painel compósito pretende apresentar as mesmas vantagens das soluções correntes, tais como as lajes de betão armado e pré-esforçado e as lajes mistas aço-betão, superando ao mesmo tempo os seus inconvenientes. O painel compósito idealizado apresenta elevados rácios de resistência/peso, rigidez/peso e peso/custo quando comparado com soluções correntes. O material polimérico é formulado especificamente para atingir elevadas densidades ( $> 1000\text{kg/m}^3$ ).



**Fig. 1:** Exemplo de conceito do painel compósito

De forma a criar um inovador conceito de elemento estrutural em pontes metálicas e mistas, é ainda inserida uma rede sensorial durante o fabrico do painel compósito, permitindo monitorizar o seu comportamento em tempo real e durante toda a sua vida útil. Os sensores instalados em cada painel criam uma rede que fica ligada a um sistema de aquisição de dados. Esses dados são posteriormente transmitidos e tratados de forma a permitir a monitorização. Adotando esta abordagem é possível garantir a integridade estrutural do tabuleiro da ponte durante todo o seu período de vida, incluindo a fase de montagem.

O fabrico, transporte e instalação dos painéis compósitos em tabuleiros de pontes é simples, rápido e não necessita de equipamentos ou mão-de-obra especializada. Além disso, logo após a instalação do painel compósito este fica pronto a receber carga atuando de imediato como elemento estrutural.

### **3. Painel Compósito**

#### **3.1 Desenvolvimento do material polimérico**

Para o desenvolvimento do material polimérico foram testadas várias hipóteses centradas na combinação de diversas matérias-primas. Também o próprio processo de síntese foi avaliado por poder exigir a preparação de pré-polímeros ou corresponder a uma síntese fazendo reagir de uma só vez todos os componentes. Esta tarefa foi executada através da colaboração com o Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Numa primeira fase do trabalho procedeu-se à análise das matérias-primas utilizadas na produção do material polimérico, nomeadamente os isocianatos tolueno di-isocianato (TDI) e os difenilmetano di-isocianato (MDI), e um conjunto de polióis de base poliéter e poliéster. A caracterização das matérias-primas foi feita através de técnicas espectroscópicas de caracterização de compostos orgânicos tais como: ressonância magnética nuclear (RMN) e infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).

Os primeiros ensaios a provetes com diferentes características mostraram que os mesmos apresentavam muitas bolhas de ar, o que prejudicaria seriamente a estrutura do material. Nesse sentido, foram tomadas medidas como a secagem em estufa e realização de vácuo, e posteriormente a introdução na formulação de elementos que baixassem a tensão superficial do pré-polímero e assim facilitassem a saída de ar. Após o teste contínuo de inúmeras combinações de diferentes aspetos foram sendo desenvolvidos dezenas de provetes. Algumas das amostras mostraram propriedades mecânicas muito boas, com módulos de elasticidade e tensões de cedência muito próximos do que estava previsto alcançar. Os resultados de alguns desses testes podem ser visualizados mais à frente neste artigo.

#### **3.2 Desenvolvimento da solução do painel compósito**

A solução correntemente usada em pontes mistas aço-betão corresponde a lajes mista, em que é aplicada uma chapa colaborante. A chapa colaborante é uma chapa perfilada de espessura reduzida que funciona como cofragem da lâmina de betão a aplicar, além de conferir à laje melhor resistência à flexão. O comportamento misto entre laje e estrutura é conferido por conectores que podem assumir diversas formas e podem ter vários modos de ligação.

A vantagem da solução corrente é o facto de aumentar significativamente a rigidez da estrutura. Como desvantagens apresenta o seu elevado peso próprio, uma elevada mão de obra de

aplicação e um elevado tempo de presa e cura. O seu custo divide-se entre a chapa colaborante ou pré-laje, o betão armado, e a mão de obra de aplicação de ambos.

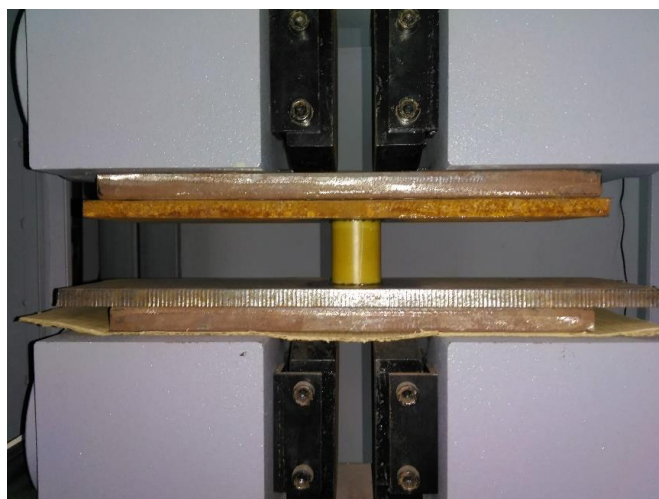
O objetivo da solução de painel compósito adotada é apresentar simultaneamente os melhores rácios de resistência/peso, rigidez/peso e custo face às soluções tradicionais. Após uma análise comparativa entre os custos das soluções correntes e os potenciais custos da solução de painel compósito nota-se que a viabilidade desta solução estará essencialmente condicionada a mercados em que o custo da solução em betão é mais elevado ou o fornecimento e aplicação é condicionado pela distância às centrais de betão. O custo de toda a solução de painel compósito, dependerá da sua geometria final, existindo um balanceamento entre o custo das chapas e do material polimérico. O aumento do afastamento entre as chapas, permitirá redução das suas espessuras, com o inerente aumento do custo do material polimérico. Será por isso necessário trabalhar na otimização da solução, a qual poderá ter por base o perfilamento das chapas, conferindo-lhes maior inércia.

### 3.3 Testes e Ensaios

#### 3.3.1 Material polimérico

Relativamente ao material polimérico, foram efetuados ensaios de compressão a amostras de poliuretano com diferentes formulações, de maneira a obterem-se: o módulo de elasticidade; e a tensão de cedência.

Foram moldados provetes cilíndricos recorrendo a tubo PVC Ø50 com aproximadamente 70mm de altura. No entanto, por falta de paralelismo entre as faces dos cilindros obtidos, por falhas detetadas no enchimento após desmoldagem ou por rotura durante o processo de corte dos topos, foi necessário recorrer a acertos, o que levou a que a dimensão da altura dos provetes tenha variado. Por forma a obter resultados coerentes, os resultados são analisados em gráficos de tensão-extensão, adequando-os assim às variações de secção e altura. As amostras foram submetidas a ensaios com controlo de força, sendo esta crescente até se obter uma deformação aproximadamente igual a 1/5 da altura da amostra. Ou seja, para uma amostra com 50mm de altura, a deformação imposta foi de 10mm. As amostras foram colocadas na máquina de ensaios, entre chapas de aço com espessuras de 25mm, tendo estas sido polidas e lubrificadas na zona de contacto com a amostra (Figura 2).



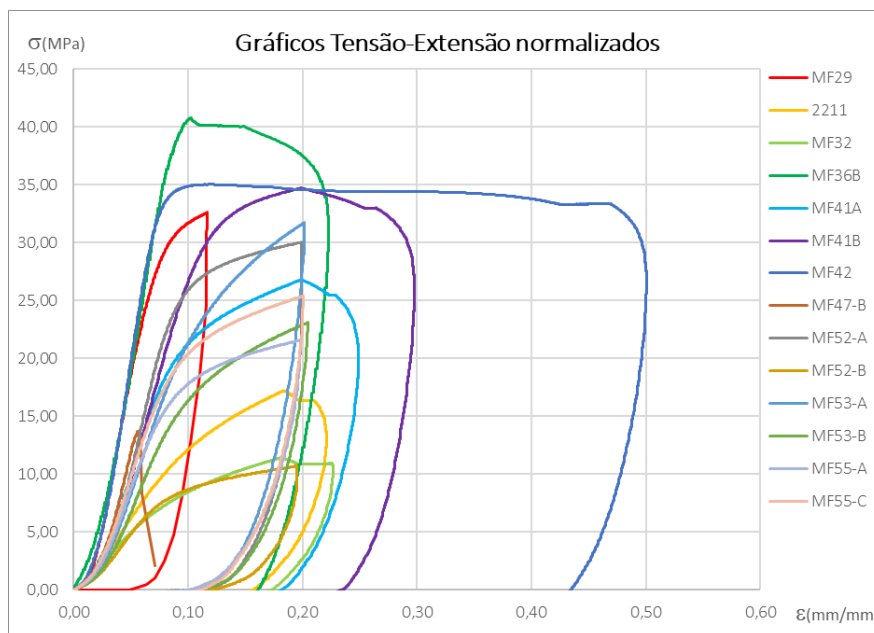
**Fig. 2:** Ensaio a provete de poliuretano

Os resultados obtidos para os provetes elaborados nas fases mais avançadas dos testes de desenvolvimento do material polimérico são apresentados na Tabela 1 e na Figura 3. Estes ma-

teriais apresentam um comportamento diferente do que se verifica habitualmente em Engenharia Civil, ou seja, mesmo quando o ensaio passa à segunda fase com redução de carga, a deformação continua a aumentar durante um período longo. Isto é notório nos gráficos da Figura 3, com o aumento da extensão apesar da redução de tensão.

**Tabela 1:** Valores do módulo de elasticidade e da tensão de cedência para diferentes amostras

Amostra	$E$ (MPa)	$\sigma_{ced}$ (MPa)
MF42	645,28	34,28
MF36B	587,52	43,18
MF29	548,75	29,03
MF52-A	431,08	25,48
MF47-B	414,50	13,49
MF41B	363,30	30,30
MF41A	322,07	20,48
MF55-C	304,16	19,38
MF53-A	294,71	22,88
MF55-A	274,44	16,72
MF53-B	240,55	16,41
2211	149,72	12,67
MF52-B	127,10	8,06
MF32	107,55	8,15



**Fig. 3:** Gráfico Tensão-Extensão normalizados

Os ensaios realizados sobre os provetes cilíndricos de poliuretano permitiram determinar as suas propriedades mais importantes para o comportamento do painel compósito. Os efeitos da temperatura sobre os parâmetros calculados foram avaliados numa fase avançada dos testes. Os valores de módulo de elasticidade e da tensão de cedência apresentaram em alguns casos uma redução acentuada – cerca de 90% – a partir dos 40°C. Tendo em conta que as temperaturas de um pavimento rodoviário exposto à radiação solar facilmente atingem os 60°C, isto seria um fator crítico na implementação deste tipo de material. Este aspeto foi tido em conta na elaboração dos últimos provetes, mas requer futuros estudos e desenvolvimentos.

### 3.3.2 Painel compósito

Foram construídos vários provetes de forma a validar o comportamento composto chapa-poliuretano. Para a construção dos mesmos, havia limitações decorrentes da dimensão máxima do reator (1 litro), e da dimensão da máquina de ensaios universal (600mm x 200mm). Assim, foram definidos provetes com as seguintes dimensões: Comprimento total = 400 mm; Largura total = 80 mm; Altura total = 33mm; Espessura chapas = 4mm; Espessura Poliuretano = 25mm.

Para a execução dos provetes foi idealizado um sistema de molde que permitisse simplificar o enchimento dos provetes com poliuretano e que permitisse a sua reutilização (Figura 4). Este sistema incorpora uma cofragem em madeira com 4 peças, 2 laterais e 2 nos topos, sendo que uma destas tem aberturas para enchimento e purga de ar. Para evitar a aderência entre o poliuretano e a madeira foi utilizada película de celofane.



a) Esquema do sistema molde

b) Molde construído

**Fig. 4:** Projeto do sistema de molde

Durante a elaboração dos primeiros provetes surgiram alguns problemas, tais como: descolagem do poliuretano das chapas ainda durante o processo de cura; e não homogeneidade da reação química com surgimento de escorrimentos de poliuretano no painel.

Relativamente aos protótipos de painel compósito, foram efetuados diferentes ensaios a provetes, como forma de validar o comportamento compósito da solução. O ensaio consistiu na colocação do provete sobre 2 apoios rotulados com afastamento de 380mm entre eles e aplicação de uma carga pontual a meio vão de forma incremental. A máquina de ensaios universal utilizada possui transdutor de força e deslocamento, permitindo o controlo do ensaio em função destas grandezas. Pretendia-se avaliar o comportamento em termos de compressibilidade do painel, deformação a meio vão, integridade do poliuretano e adesão entre chapas e poliuretano.

Nos primeiros ensaios realizados, com as versões iniciais de poliuretano, verificou-se que existiu descolamento entre as chapas e o poliuretano quase imediatamente após o início do ensaio. Noutros casos, houve uma não homogeneidade no processo de cura do poliuretano, tendo-se verificado expansão deste, aumentando significativamente o afastamento da chapa superior.

Após os desenvolvimentos no poliuretano, foi produzido um novo painel compósito, usando poliuretano denominado MF29, com o qual se realizou o ensaio à flexão aqui apresentado. O principal objetivo seria quantificar as melhorias projetadas nos ensaios anteriores. Como se pode verificar pelo gráfico da Figura 5, assim como pelas fotografias apresentadas na Figura 6, pouco após os 8mm de deslocamento e ao se atingir cerca de 30KN de força, existiu uma rotura repentina do poliuretano, tendo este quebrado junto ao apoio esquerdo, vincando a chapa superior.

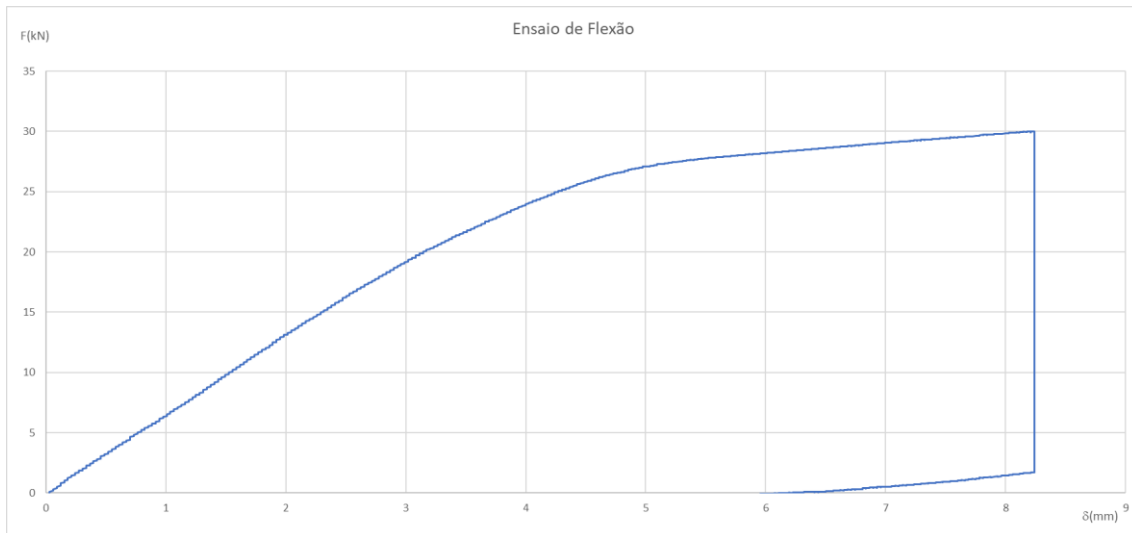
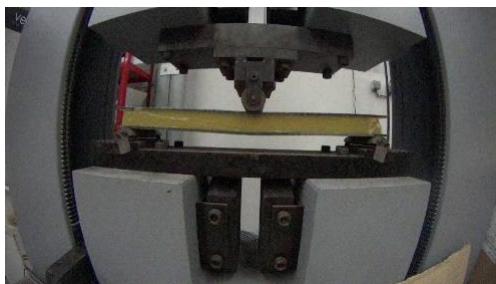


Fig. 5: Esquema de ensaio



a) Ensaio a decorrer



b) Provete após ensaio

Fig. 6: Ensaio a painel composto

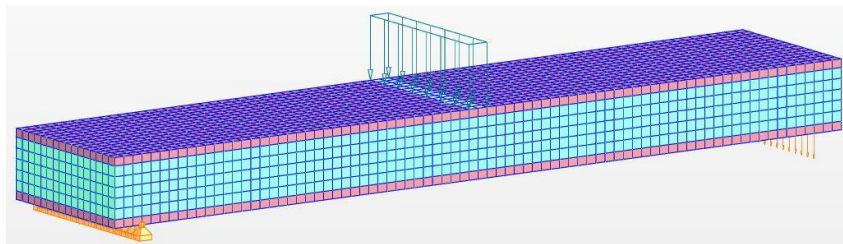
Foram também realizados ensaios cíclicos sobre outros provetes, verificando-se um ligeiro deslocamento dos ciclos, algo que pode ser justificado pelo comportamento viscoelástico do poliuretano. Consta-se por isso que a força aplicada para se atingir as mesmas deformações vai sendo cada vez menor.

Os ensaios efetuados nos painéis, confirmam a importância do bom desempenho do poliuretano no comportamento global da solução, sendo extremamente importante melhorar no futuro as propriedades do poliuretano, nomeadamente: adesão ao aço; módulo de elasticidade; e tensão de cedência. Além disso, deve ser mantido o custo de produção previsto relativamente baixo por forma a conseguir-se um produto final competitivo com as soluções correntes.

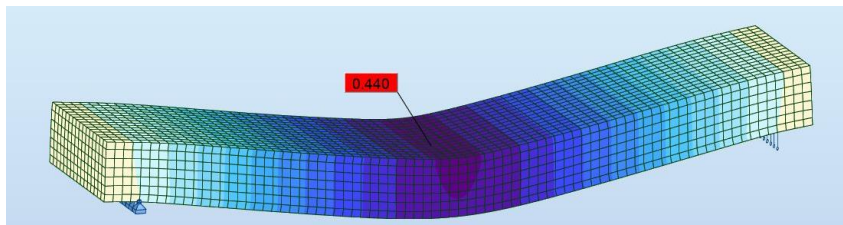
### 3.4 Modelação Numérica

Foi desenvolvido um modelo 3D de elementos finitos de forma a fazer uma modelação numérica da solução. Numa fase inicial, a modelação foi usada para definir as condições dos ensaios experimentais. Desta forma, foi analisado o comportamento em flexão simples para uma carga pontual a meio vão e painel simplesmente apoiado até ao limite da fase elástica com cedência das fibras inferiores da chapa inferior.

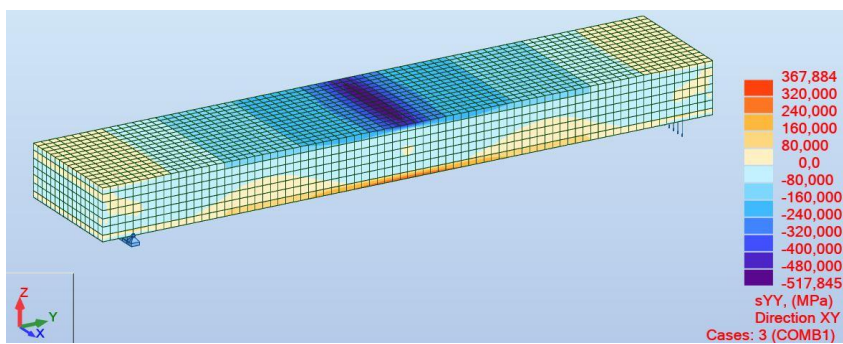
Para o modelo em causa foram feitas algumas considerações relativas à geometria e às propriedades dos materiais. Os valores são bem conhecidos no que diz respeito à chapa de aço, não se verificando o mesmo no que concerne ao material polimérico. Assim, foram usados os resultados obtidos nos ensaios de compressão em provetes moldados mencionados anteriormente. Analisando o modelo desenvolvido, como seria de esperar verifica-se grande concentração de tensões na zona de aplicação de carga, assim como junto aos apoios (Figuras 7, 8 e 9).



**Fig. 7:** Representação da modelação numérica preliminar



**Fig. 8:** Representação das deformações obtidas



**Fig. 9:** Representação das tensões equivalentes de Von-Mises no modelo

O modelo calibrado obteve uma deformação de 4,40mm para uma carga aplicada de 24,4 KN. Comparando com os valores obtidos nos ensaios efetuados, nomeadamente no ensaio ao painel com MF29, onde para a mesma carga se verificou uma deformação de 4,12mm, os valores são muito próximos. Portanto, verifica-se que os efeitos de compressibilidade do poliuretano, com a conseqüente redução de altura útil, redução do momento de inércia e aumento de flecha, estão bem calibrados.

## 4. Sistema de Monitorização

### 4.1 Sensores

O sistema de monitorização a utilizar é baseado no sistema SIGMA, inteiramente desenvolvido pelo Grupo VESAM pelo seu Departamento de Investigação, Desenvolvimento e Inovação (I&D+i).

A gestão da rede de sensores é efetuada por uma Gateway, a qual é também responsável pelo pré-processamento e envio da informação recolhida dos sensores para os servidores, de forma a ser tratada e posteriormente visualizada numa plataforma dedicada (Figura 10). Pretende-se que cada painel seja instrumentado com sensores que permitam conhecer o estado de deformação (extensão), aceleração, temperatura, entre outros parâmetros que possam vir a ser identificados como relevantes. A rede sensorial inserida durante o fabrico do painel compósito permite monitorizar o seu comportamento em tempo real e durante toda a sua vida útil, incluindo na fase construtiva desde a colocação do primeiro painel do tabuleiro da ponte.





**Fig. 10:** Diagrama representativo da recolha, tratamento e visualização de dados

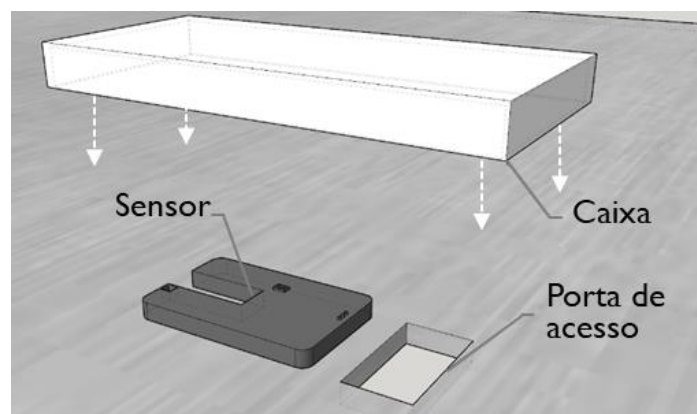
## 4.2 Conceção da integração dos sensores

Após análise das condicionantes existentes à instalação dos sensores no interior do painel, encaminhamento de cablagem e acessibilidade ao sensor para eventual manutenção e/ou substituição, foi decidido que os sensores se localizariam no centro geométrico dos painéis, com os devidos ajustes para garantir que o seu posicionamento não interfere com pontos de apoio ou outras condicionantes locais da estrutura e que em simultâneo se mantém a desejada acessibilidade ao sensor.

Assim, foi prevista uma “janela” de acesso ao sensor, por onde passará também a sua cablagem de ligação. A cablagem continuará a ser externa ao painel, pois simplifica significativamente todo o processo de fabrico do painel e execução do sistema de monitorização já *in-situ*. Esta opção, permite ainda a flexibilidade de execução dos painéis com e sem sistema de monitorização.

Por forma a compatibilizar o sensor com o polímero foram pesquisados materiais que pudessem ser utilizados para isolar o sensor do polímero, permitindo em simultâneo ter resistência a teores de humidade ambiente elevados. Foi encontrada uma resina comercial bi-componente com base de silicone que permite proteger o sensor. Esta solução é não condutora e permite a sua aplicação direta na eletrónica em estado líquido, tornando-se sólida após alguns minutos.

Durante a execução de provetes, detetou-se que as forças expansivas do poliuretano durante o processo de cura são extremamente elevadas, pelo que muito provavelmente danificariam o sensor, caso este já se encontrasse no interior do painel para o processo de injeção do poliuretano. Nesse sentido, optou-se por desenhar uma caixa protetora ao sensor, a qual o irá isolar do poliuretano aquando do processo de cura deste, bem como de eventuais tensões existentes em fase de serviço (Figura 11).



**Fig. 11:** Concepção da integração sensor/painel

Após aplicação do sensor, a caixa protetora será fixa à chapa inferior do painel através de soldadura por pontos por forma a reduzir a carga térmica associada a este processo e não introduzir alterações no aço junto ao sensor. Esta concepção permite rápida aplicação dos sensores em fase de produção dos painéis e rápida instalação do sistema de monitorização *in situ*. Adicionalmente, permite o acesso aos sensores para manutenção ou substituição dos mesmos.

## 5. Conclusões

Neste artigo foi apresentado um estudo sobre a aplicação de painéis compósitos em tabuleiros de pontes mistas aço-betão. As principais conclusões são:

1. Ensaio Poliuretano: é importante procurar refinar as características das últimas composições testadas para o poliuretano, de forma a otimizar os módulos de elasticidade e tensões de cedência, incluindo em diferentes temperaturas; é necessário executar ensaios adicionais para comparação com valores *benchmark*; a validação de resultados para o polímero permitirá maior rigor na modelação dos painéis;
2. Painel Compósito: O custo de toda a solução de painel compósito, dependerá da sua geometria final, existindo um balanceamento entre o custo das chapas e do material polimérico. O aumento do afastamento entre as chapas, permitirá redução das suas espessuras, com o inerente aumento do custo do material polimérico. Será por isso necessário trabalhar na optimização da solução;
3. Deve ser validado o comportamento global dos painéis; a ligação entre estes e a longarina e a capacidade de mobilização de efeito misto painel/longarina;
4. Produto Final: deve ser desenvolvida e validada a produção industrial do painel, em particular no que diz respeito aos reatores para o poliuretano de maior capacidade e à optimização do processo de fabrico; devem ser efetuados testes ao painel à escala real.

## Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto individual “BRIDE – Painel Compósito com Rede Sensorial Integrada para Tabuleiros de Pontes Mistas Aço-Betão”, com referência 11309, financiado através do Programa Operacional Regional do Centro, a quem os autores agradecem.

## Referências

- [1] Prisacariu, C. *Polyurethane elastomers: from morphology to mechanical aspects*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [2] Kennedy, SJ. "Composite steel structural plastic sandwich plate systems", *U.S. Patent 5778813*, 1998.
- [3] Dawood, M, Taylor, E, Rizkalla, S. “Two-way bending behavior of 3-D GFRP sandwich panels with through-thickness fiber insertions”, *Composite Structures*, 92(4), 950-963, 2010.
- [4] Lombardi, N, Liu, J. “Glass fiber-reinforced polymer/steel hybrid honeycomb sandwich concept for bridge deck applications”, *Composite Structures*, 93(4):1275-1283, 2011.
- [5] Sohel, KMA, Liew JYR., Yan, JB, Zhang, M., Chia, KS. “Behavior of steel–concrete–steel sandwich structures with lightweight cement composite and novel shear connectors”. *Composite Structures*, 94(12), 3500-3509, 2012.
- [6] Yan, R, Chen, X, Mukhopadhyay, SC. *Structural health monitoring*, Berlin, Germany: Springer, 2017.
- [7] Santos, P, Gonçalves, E., Martins, G, Santos, F. “A monitorização de pontes e edifícios metálicos em África: desafios e dificuldades”, *Atas do X Congresso de Construção Metálica e Mista*, Coimbra, Portugal, 143-152, 2015.