

PRÉ-FABRICAÇÃO: A SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL PARA PONTES DE BETÃO EM LINHAS DE ALTA VELOCIDADE

José Rui Pinto¹, Luís Gomes², Rui Calçada³, António Abel Henriques⁴

¹ Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal.

Mota – Engil Engenharia e Construção, Porto, Portugal

email: jose.r.pinto@mota-engil.pt

² Mota – Engil Engenharia e Construção, Porto, Portugal

³ CONSTRUCT-LESE, Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal.

⁴ CONSTRUCT-LABEST, Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal.

Sumário

Perspetiva-se que nesta década Portugal dê início à construção da sua rede ferroviária de linhas de alta velocidade (LAV). Os condicionalismos impostos aos traçados das LAV originam o aparecimento de um número muito elevado de obras de arte, que na maioria dos países são executadas através de soluções pré-fabricadas. O aparecimento de novas “famílias” de comboios, cujos efeitos dinâmicos no atravessamento de pontes ferroviárias, podem não estar cobertos pela regulamentação em vigor, obriga a adotar métodos de análise mais sofisticados, como métodos probabilísticos, e incluir variáveis aleatórias relacionadas com os comboios, para cobrir todas as possíveis futuras mudanças do mercado.

Palavras-chave: Alta Velocidade; Pontes; Pré-fabricação; Comboios; Análises Probabilísticas.

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da conceção das linhas ferroviárias de alta velocidade que países como a França, Espanha, Itália, Coreia, Taiwan, Países Baixos, Alemanha, República Popular da China, Inglaterra, entre outros, têm optado por soluções estruturais que recorrem à pré-fabricação para a construção de viadutos e pontes ferroviárias.

A grande qualidade dos produtos associada a um controlo rigoroso dos materiais, bem como a possibilidade da produção em série, permitindo reduzir drasticamente o tempo de execução das obras, tornou a pré-fabricação como uma solução de excelência para vencer vãos até 50m.

A crise climática que o mundo atravessa nos dias de hoje tem levado a uma maior consciencialização, não só dos líderes mundiais, mas também das empresas, no que diz respeito a tornar o mundo mais sustentável.

Duas das necessidades mais básicas do Homem são a habitação e a mobilidade, por isso o setor da construção desempenha um papel vital na diminuição da pegada ecológica.

Mesmo nos dias de hoje a construção infringe danos no ambiente em termos de consumo de energia, consumo de recursos, poluição, ruído e produção de desperdícios. Na indústria da construção, a pré-fabricação é a melhor abordagem para se obter uma construção sustentável

A indústria de betão pré-fabricado está a fazer progressos na construção amiga do ambiente, reduzindo o uso de materiais até 45%, a utilização de energia até 30% e a demolição e desperdícios até 40%.

A reciclagem do betão já começa a ser habitual, e num futuro próximo o objetivo passa pela implementação de um sistema de produção fechado, no qual todo o desperdício de material é processado e reutilizado.

Existe assim a necessidade imperiosa de desenvolver novas soluções ainda mais sustentáveis e amigas do ambiente para a construção de pontes e viadutos para as linhas ferroviárias de alta velocidade.

Aos fabricantes de comboios são colocados cada vez mais desafios no sentido do desenvolvimento de soluções que englobem toda a evolução tecnológica e industrial e, ao mesmo tempo, continuem a dar resposta no que diz respeito às questões ambientais e económicas. Tal facto tem resultado no aparecimento de novas “famílias” de comboios cujos efeitos dinâmicos no atravessamento de pontes ferroviárias, podem não estar cobertos pelos modelos de carga existentes na regulamentação em vigor.

Presentemente já existem comboios a circular nas linhas de alta velocidade cujos parâmetros não cumprem os limites definidos na regulamentação em vigor, pelo que é necessário validar as novas soluções de pontes para estes, ou outros comboios que vierem a ser desenvolvidos.

De forma a dar resposta a estas necessidades desenvolveu-se um trabalho onde foram estudadas pontes contínuas constituídas por cinco tramos (vão máximo entre 20m e 40m, com incrementos de 1m).

Foram definidas pontes de via dupla com secção transversal constituída por quatro vigas caixão pré-fabricadas em betão armado pré-esforçado, em alternativa à solução tradicional de apenas duas vigas caixão de maiores dimensões. Esta escolha permite obter uma solução mais esbelta e otimizar as três fases de qualquer elemento pré-fabricado: produção, transporte e montagem.

Neste estudo pretendeu-se também estudar a influência que a variação de determinados parâmetros do comboio (variações para além dos limites definidos nos regulamentos) tem na resposta dinâmica da ponte. Deste modo será possível “validar” o fabrico/existência de novos comboios de alta velocidade em termos de cargas, comprimento total e relações entre as diferentes distâncias geométricas existentes.

2 A PRÉ-FABRICAÇÃO DE PONTES PELO MUNDO

Está previsto para o ano de 2023 o início do desenvolvimento dos projetos de execução das obras de arte das linhas ferroviárias de alta velocidade em Portugal. É fundamental que todos os intervenientes no processo, dono de obra, empreiteiros e projetistas, tenham conhecimento das soluções existentes no mercado e habitualmente utilizadas nas redes ferroviárias de alta velocidade em todo o mundo.

O país europeu pioneiro na alta velocidade, a França, tem aplicado ao longo das suas linhas de alta velocidade, soluções pré-fabricadas em betão pré-esforçado, como é o caso dos viadutos de via única (Figura 1), pertencentes ao lote 18 da linha LGV Est-Européenne, realizados com vigas PRAD. Cada tabuleiro, suportando apenas uma via-férrea, encontra-se dividido em troços contínuos com vão máximo de 22,5m e cujo comprimento entre juntas de dilatação não excede os 90m.

Os tabuleiros apresentam 7,0m de largura sendo constituídos por 7 vigas PRAD com uma altura de 1,35m, ligados superiormente por uma laje em betão armado com uma espessura de 25cm.



Figura 1 – Viadutos de via única com secção em vigas PRAD.

A vasta experiência espanhola ao nível da pré-fabricação, fez com que desde a primeira linha ferroviária de alta velocidade, Madrid – Sevilha, fossem utilizados tabuleiros pré-fabricados em betão pré-esforçado.

Os tabuleiros com secção transversal em caixão têm sido os mais utilizados, recorrendo-se à sua pré-fabricação, em fábrica ou no local da obra.

O Viaduto sobre o Rio Manol situado sobre a ribeira D’Alguema, o rio Manol e a estrada GIV-2668 está inserido na LAV Madrid-Barcelona-Fronteira Francesa e pertence à fase 1 da variante ferroviária de Figueras (Girona) para a LAV Barcelona-Portbou.

O Viaduto com 814 m de comprimento (Figura 2) é composto por 20 vãos (26+4x35+12x46+2x35+26). Os vãos de 46m são constituídos por uma viga caixão pré-fabricada de altura variável, em betão armado, ligada a vigas caixão pré-fabricadas de altura constante e betão armado pré-esforçado.



a)



b)



c)

Figura 2 – Vigas caixão pré-fabricadas: a) montagem das vigas; b) transporte das vigas de secção constante em betão pré-esforçado; c) transporte das vigas de secção variável em betão armado.

Em Itália, desde a década de 90, que mais de 90% das pontes e viadutos para as linhas ferroviárias de alta velocidade são constituídos por tabuleiros simplesmente apoiados em betão armado pré-esforçado (Figura 3), na sua maioria executado por empresas de pré-fabricação.



Figura 3 – Tabuleiro constituído por duas vigas caixão pré-fabricadas ligadas por vigas transversais pós-tensionadas.

A linha de alta velocidade que liga Seoul a Pusan tem 100 km de viadutos. Na fase de estudo prévio foi necessário decidir qual a melhor solução a adotar na construção desses viadutos. A opção foi a da utilização de tabuleiros pré-fabricados (Figura 4) porque, como afirmou Malcolm Snody, diretor de Projetos da empresa Bechtel, “The technology is costly, but in this case provided the best combination of quality, safety, and speed”.



Figura 4 – Tabuleiro constituído por uma viga caixão pré-fabricada: vão de 25m, peso de 600 ton.

A linha ferroviária de alta velocidade de Taiwan incorpora nas suas obras de arte 140 km de tabuleiros pré-fabricados (Figura 5). Os viadutos foram projetados de modo que as vigas pré-fabricadas tivessem comprimentos entre os 30 e os 35m.



Figura 5 – Vista lateral de um viaduto pertencente à linha C270 da LAV de Taiwan.

A pré-fabricação utilizada nas LAV nos Países Baixos tem-se mostrado muito singular, sendo normalmente utilizada para dar resposta a problemas específicos (Figura 6), de difícil resolução através de soluções betonadas “in situ”.



Figura 6 – Viaduto da LAV dos Países Baixos: a) Escoramento provisório das vigas principais; b) montagem das vigas transversais.

A rede ferroviária de alta velocidade HS2, que se encontra atualmente em construção, é definida como a espinha dorsal da rede de transportes da Grã-Bretanha.

Para além das soluções padronizadas dos tabuleiros em vigas caixão pré-fabricadas, é também utilizada a pré-fabricação na construção de tabuleiros por segmentos.

O viaduto Colne Valley situado em Hillingdon, a oeste de Londres irá constituir a maior ponte ferroviária do Reino Unido, possuindo um comprimento de 3,4 km. O tabuleiro será contruído através de segmentos pré-fabricados. Cada segmento (Figura 7) tem um peso de aproximadamente 140 ton, e são produzidos numa fábrica temporária construída especificamente para o projeto.



Figura 7 – Primeiro segmento dos 1000 que constituem o tabuleiro do viaduto ferroviário de Colne Valley.

Até setembro de 2016, a rede ferroviária de alta velocidade da República Popular da China já tinha ultrapassado os 20 000 km, valor este superior à soma de todas as LAV do resto do mundo.

A necessidade de dar resposta ao elevado nível de pontes e viadutos a construir nas LAV, levou a que fossem definidas pontes padronizadas, sendo a maior parte produzida com recurso à pré-fabricação.

Cerca de 95% das pontes são estruturas simplesmente apoiadas com secção transversal em viga caixão e vãos de 20 m, 24 m, 32 m, 40 m, 56 m e 64 m. Até os 32 m, inclusive, a solução do tabuleiro recai por uma viga caixão pré-fabricada e executada de uma só vez. Para vencer vãos de 40 m a solução é de construção “in situ”. Os maiores vãos, 56 m e 64 m, são novamente pré-fabricados, mas através de segmentos. De referir que 90% destas pontes são com vãos de 32 m.



Figura 8 – Viga caixão pré-fabricada pertencente a LAV Zhengzhou-Wanzhou.

Na figura 8 é apresentado um tabuleiro constituído por uma viga caixão pré-fabricada pertencente à LAV Zhengzhou-Wanzhou, na província de Henan, no centro da China. A rede ferroviária tem 818 quilómetros de comprimento e foi projetada para uma velocidade 350 km/h.

3 CASO DE ESTUDO

Nos capítulos seguintes apresenta-se o caso de estudo com o qual se pretendeu validar uma elevada gama de pontes ferroviárias para alta velocidade, cujo tabuleiro é constituído por quatro vigas caixão pré-fabricadas em betão armado e pré-esforçado. A validação foi efetuada não só para os modelos de carga e comboios reais definidos na regulamentação em vigor, mas também para uma nova gama de comboios que poderão vir a existir no futuro.

3.1 Pontes

Para este estudo, selecionou-se um conjunto variado de pontes pré-fabricadas de betão armado pré-esforçado, constituídas por cinco tramos contínuos, pertencentes a um intervalo entre 20m a 40m, com incrementos de 1,0m.

Na Tabela 1 apresentam-se os comprimentos dos cinco tramos que constituem as pontes e o seu comprimento total. A altura das vigas caixão pré-fabricadas de betão armado pré-esforçado varia entre 1,0m e 2,3m, o que conduz a uma relação de esbeltez (L/H) entre 15,0 e 16,0.

Tabela 1. Características geométricas das pontes.

Bridge	1ª, 5ª S (m)	2ª, 3ª, 4ª S (m)	L (m)	H _{1,5} (m)	H _{2,5} (m)	L/H
B20	15.0	20.0	90.0	1.0	1.3	15.4
B21	16.0	21.0	95.0	1.1	1.4	15.0
B22	17.0	22.0	100.0	1.1	1.4	15.7
B23	18.0	23.0	105.0	1.2	1.5	15.3
B24	19.0	24.0	110.0	1.2	1.5	16.0
B25	19.0	25.0	113.0	1.3	1.6	15.6
B26	20.0	26.0	118.0	1.4	1.7	15.3
B27	21.0	27.0	123.0	1.4	1.7	15.9
B28	22.0	28.0	128.0	1.5	1.8	15.6
B29	22.0	29.0	131.0	1.6	1.9	15.3
B30	23.0	30.0	136.0	1.6	1.9	15.8
B31	24.0	31.0	141.0	1.7	2.0	15.5
B32	25.0	32.0	146.0	1.8	2.1	15.2
B33	25.0	33.0	149.0	1.8	2.1	15.7
B34	26.0	34.0	154.0	1.9	2.2	15.5
B35	27.0	35.0	159.0	2.0	2.3	15.2
B36	28.0	36.0	164.0	2.0	2.3	15.7
B37	29.0	37.0	169.0	2.1	2.4	15.4
B38	29.0	38.0	172.0	2.1	2.4	15.8
B39	30.0	39.0	177.0	2.2	2.5	15.6
B40	31.0	40.0	182.0	2.3	2.6	15.4

Cada secção transversal do tabuleiro é composta por quatro vigas caixões pré-fabricadas em betão armado pré-esforçado e por uma laje betonada “in situ”. A largura do tabuleiro, de dupla via, é de 14,0m. Os eixos das vias estão separados entre si de 4,70m e de 2,35m ao eixo do tabuleiro.

Na Figura 9 e a Figura 10 apresentam-se as secções transversais das pontes com vão máximo de 20m e 40m, respetivamente.

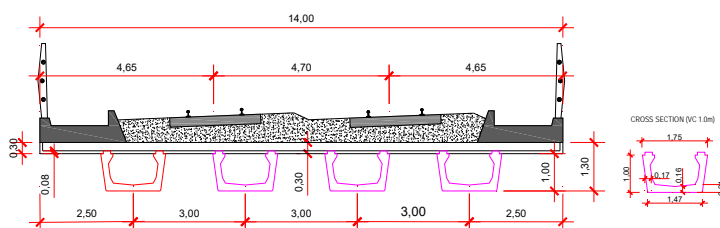


Figura 9 – Secção transversal da ponte com vão máximo de 20m.

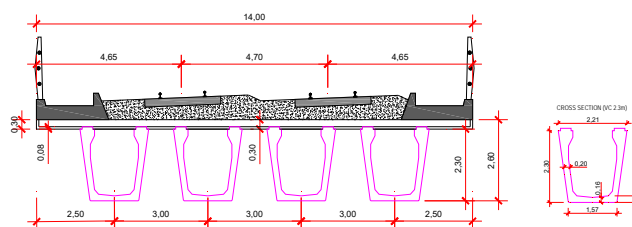


Figura 10 – Secção transversal da ponte com vão máximo de 40m.

A escolha da secção transversal da ponte, constituída por quatro vigas caixão pré-fabricadas, teve por objetivo otimizar as três fases de qualquer elemento pré-fabricado: produção, transporte e montagem. Esta opção permite ainda obter uma solução com maior esbelteza que as pontes constituídas por apenas duas vigas caixão.

3.2 Comboio

As análises dinâmicas foram realizadas através da metodologia de cargas móveis, utilizando os valores característicos dos modelos de carga referentes a todas as tipologias de comboios em circulação (comboios articulados (AT), comboios regulares (RT), comboios convencionais (CT), com e sem limites definidos na EN1991-2 [1]). Foram definidos vários cenários com intervalos de variação para cada um dos parâmetros geométricos definidos na EN1991-2.

Na Figura 11 apresenta-se o modelo de carga representativo dos AT, RT, CT atualmente existentes na rede europeia de alta velocidade.

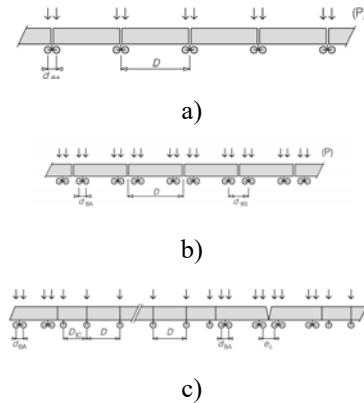


Figura 11 – Tipologia de comboios: a) AT; b) CT; c) RT.

Foram utilizados dois tipos de comboios convencionais: comboio convencional com o limite (CT(WL)) definido pela equação 1 na EN 1991-2 e comboio convencional sem esse limite (CT(WoL))

(1)

$$4P \cos\left(\frac{\pi d_{BS}}{D}\right) \cos\left(\frac{\pi d_{BA}}{D}\right) \leq 2P_{HSLMA} P \cos\left(\frac{\pi d_{HSLMA}}{D_{HSLMA}}\right)$$

Todas as características geométricas que definem os AT, CT e RT foram consideradas como variáveis aleatórias [2]. Todas as variáveis aleatórias consideradas possuem distribuições uniformes nos intervalos apresentados na Tabela 2. Seis grupos com intervalos de variação foram definidos para cada uma das variáveis aleatórias. O primeiro grupo diz respeito aos intervalos definidos na EN1991-2, os restantes foram definidos para avaliar a influência na resposta dinâmica da estrutura quando são considerados valores de parâmetros fora desses intervalos.

Tabela 2 – Cenários considerados para: a) AT; b) CT; c) RT.

Type of train	P (kN)	D (m)	d_{BA} (m)
D1	170	$18 \leq D \leq 27$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$
D2	170	$27 \leq D \leq 30$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$
D3*	170	$27 \leq D \leq 30$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$
D4	170	$15 \leq D \leq 18$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$
D5	170	$18 \leq D \leq 27$	$2.0 \leq d_{BA} \leq 2.5$
D6	170	$18 \leq D \leq 27$	$3.5 \leq d_{BA} \leq 4.0$

* $L_{max} = 22 \times D$, without $L_{max} = 404.0$ m

a)

Type of train	P (kN)	D (m)	d_{BA} (m)	d_{BS} (m)
D1	170	$18 \leq D \leq 27$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$
D2	170	$27 \leq D \leq 30$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$
D3*	170	$18 \leq D \leq 27$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$
D4	170	$15 \leq D \leq 18$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$
D5	170	$18 \leq D \leq 27$	$2.0 \leq d_{BA} \leq 2.5$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$
D6	170	$18 \leq D \leq 27$	$3.5 \leq d_{BA} \leq 4.0$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$

* $L_{max} = 404.0$ m, without $P_{max} = 10\ 000$ kN

b)

Type of train	P (kN)	D (m)	D_{1C} (m)	e_c (m)	D_1 (m)	d_{BA} (m)	d_{BS} (m)
D1	170	$10 \leq D \leq 14$	$8 \leq D_{1C} \leq 11$	$7 \leq e_c \leq 10$	$15.5 \leq D_1 \leq 18.5$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$
D2	170	$14 \leq D \leq 16$	$8 \leq D_{1C} \leq 11$	$7 \leq e_c \leq 10$	$15.5 \leq D_1 \leq 18.5$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$
D3	170	$8 \leq D \leq 10$	$8 \leq D_{1C} \leq 11$	$7 \leq e_c \leq 10$	$15.5 \leq D_1 \leq 18.5$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$
D4	170	$14 \leq D \leq 16$	$10 \leq D_{1C} \leq 13$	$7 \leq e_c \leq 10$	$15.5 \leq D_1 \leq 18.5$	$2.5 \leq d_{BA} \leq 3.5$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$
D5	170	$10 \leq D \leq 14$	$8 \leq D_{1C} \leq 11$	$7 \leq e_c \leq 10$	$15.5 \leq D_1 \leq 18.5$	$2.0 \leq d_{BA} \leq 2.5$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$
D6	170	$10 \leq D \leq 14$	$8 \leq D_{1C} \leq 11$	$7 \leq e_c \leq 10$	$15.5 \leq D_1 \leq 18.5$	$3.5 \leq d_{BA} \leq 4.0$	$5.5 \leq d_{BS} \leq 8.5$

c)

A “assinatura do comboio” ($S_0(\lambda)$) representa as características dinâmicas de um determinado comboio e é independente das características das estruturas [3], sendo função apenas do espaçamento dos eixos e das cargas dos eixos, onde λ é o comprimento de onda em m ($\lambda = v / f_0$).

A Figura 12 apresenta as “assinatura do comboio” para os 6 cenários de todas as tipologias de comboios consideradas.

É possível observar que a distância D [m] correspondente ao comprimento da distância entre eixos regularmente espaçados tem grande importância para as formas das curvas da “assinatura do comboio”.

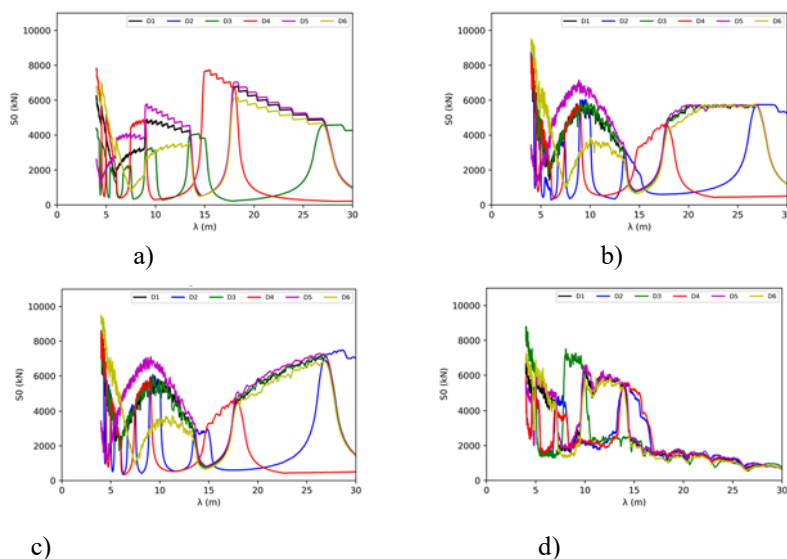


Figura 12 – “Assinatura do comboio” para os seis cenários considerados: a) AT; b) CT(WL); c) CT(Wol) ; d) RT.

3.3 Modelo numérico

Para ter em conta o previsível aumento da velocidade máxima alcançada pelos comboios de alta velocidade num futuro próximo, o estudo foi realizado numa gama de velocidades de [140; 500] km/h em intervalos de 10 km/h.

Para cada velocidade e para cada uma das situações apresentadas anteriormente foram realizadas 100.000 simulações, retirando-se o valor máximo da aceleração vertical em dois pontos de controle: ponto médio do 2º vão (2S) e ponto médio do 3º vão (3S), sob a carga definida e considerando os comboios a circular em apenas uma das vias e nas duas vias (cruzamento de comboios em sentidos opostos).

Para a realização das análises dinâmicas foi utilizado o programa de elementos finitos SAP 2000. A ponte foi modelada através elementos finitos de casca (figura 13).



Figura 13 – Modelo de elementos finitos da ponte.

Devido ao elevado número de cálculos que foi necessário realizar, foram desenvolvidos diversos pré-processadores e pós-processadores na linguagem Python.

4 RESULTADOS

Devido à grande quantidade de casos analisados neste trabalho, apresenta-se apenas um pequeno resumo dos resultados mais representativos, juntamente com as principais conclusões obtidas.

Para analisar a importância de considerar novas soluções geométricas para as carruagens, locomotivas e comboios, as figuras 14 e 15 apresentam os gráficos da aceleração vertical máxima em função da velocidade para o cenário

1 (parâmetros do comboio D1 definidos na EN1991-2) e o máximo obtido considerando D2 a D6 (intervalos definidos para estudar a influência de determinados parâmetros do comboio). Para maior facilidade de interpretação são apresentados apenas os comboios articulados e as pontes S20 e S40.

Os valores obtidos são comparados com os valores de aceleração vertical máxima calculados pela passagem do modelo de carga, HSLMA, e comboios reais definidos na EN1991-2.

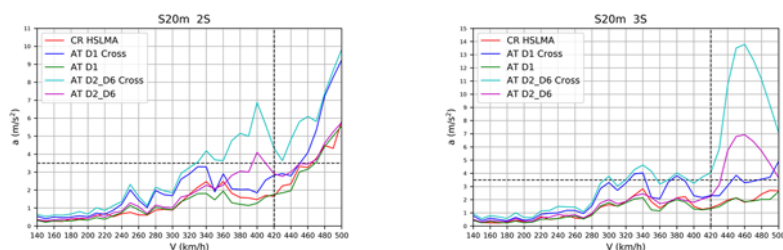


Figura 14 – Aceleração vertical máxima: a) 2º vão; b) 3º vão.

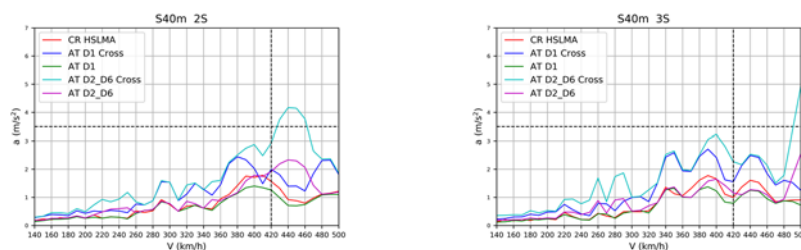


Figura 15 - Aceleração vertical máxima: a) 2º vão; b) 3º vão.

É possível observar que para algumas velocidades, os resultados obtidos com a passagem dos “novos comboios” são superiores aos valores obtidos com os comboios definidos na EN1991-2 e mesmo superiores ao valor máximo de $3,5\text{m/s}^2$ [4].

As Figuras 16 e 17 apresentam os gráficos da aceleração vertical máxima, em função da velocidade, para o máximo dos 6 cenários considerados (parâmetros do comboio D1 definidos na EN1991-2; D2 a D6, intervalos definidos para estudar a influência de certos parâmetros do comboio), para toda a tipologia de comboios.

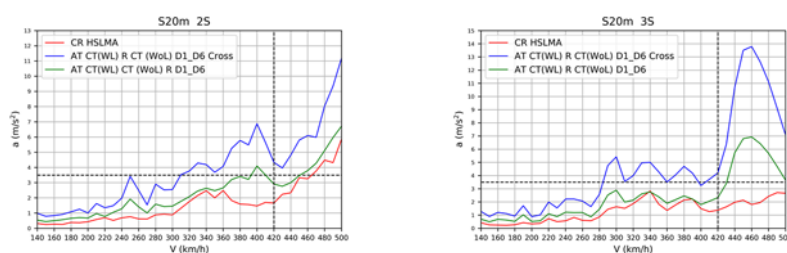


Figura 16 - Aceleração vertical máxima: a) 2º vão; b) 3º vão.

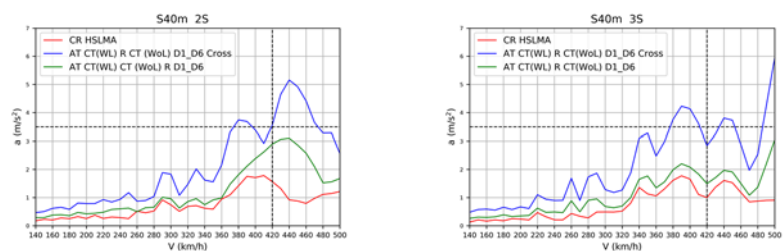


Figura 17 - Aceleração vertical máxima: a) 2º vão; b) 3º vão.

Para algumas velocidades, os valores obtidos com o cruzamento de comboios são aproximadamente duas vezes os valores obtidos com a passagem por apenas uma das vias. Outra conclusão importante é que o valor máximo da aceleração obtida com o cruzamento de comboios é superior ao valor de $7,0\text{m/s}^2$ [5] (valor limite, se for aplicado um fator de segurança de um, ao Estado Limite de Utilização da aceleração vertical).

5 CONCLUSÕES

A construção de novas linhas ferroviárias de alta velocidade e a evolução do material circulante representam novos desafios para os projetistas de pontes. É necessário adotar métodos de análise mais sofisticados, como métodos probabilísticos, e incluir mais variáveis aleatórias relacionadas com os comboios, para cobrir todas as possíveis mudanças futuras do mercado.

Neste trabalho foi possível analisar a importância da variação de determinados parâmetros do comboio na resposta dinâmica de uma grande faixa de pontes pré-fabricadas de betão armado pré-esforçado. A definição de novas soluções geométricas para comboios exige que todos os cenários possíveis de variação sejam contemplados, por isso o estudo foi realizado com recursos a simulações.

É possível observar que para algumas velocidades os resultados obtidos com a passagem dos “novos comboios” são superiores aos obtidos com os comboios definidos na EN1991-2 e mesmo superiores ao valor máximo de $3,5\text{m/s}^2$.

Na regulamentação europeia atual, quando a velocidade máxima de circulação é superior aos 200 km/h, é necessário a realização de análises dinâmicas, utilizando os modelos de carga HSLM e os comboios reais em circulação. Nas análises dinâmicas apenas uma das vias (a mais desfavorável) na estrutura deve ser carregada. O cruzamento de comboios a circular em sentidos opostos não é considerado.

Neste trabalho pode-se observar que para algumas velocidades os valores obtidos através do cruzamento de comboios são cerca de duas vezes os valores obtidos com apenas uma via carregada. Outra conclusão importante é que o valor máximo da aceleração obtido com o cruzamento de comboios é superior ao valor de $7,0\text{m/s}^2$ (acima do valor limite, se for aplicado um fator de segurança de um ao Estado Limite de Utilização da aceleração vertical).

A metodologia desenvolvida neste estudo pode ser utilizada para prever o desempenho estrutural de pontes existentes e novas pontes, tendo em vista o desenvolvimento de novos comboios de alta velocidade em termos de cargas, comprimento total, relações entre diferentes distâncias geométricas e cruzamento de comboios.

6 AGRADECIMENTOS

O 3º e o 4º autor agradecem o apoio do Financiamento Base – UIDB/04708/2020 do CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

7 REFERÊNCIAS

1. EN 1991-2 (2003) – “Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges”, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
2. Rocha, J., Henriques, A. A., Calçada, R. (2016) – “Probabilistic assessment of the train running safety on a short-span high-speed railway bridge”, Structure and Infrastructure Engineering, 12:1 78-92
3. ERRI D214/RP9 (2001) – “Railway bridges for speeds >200 km/h”, European Rail Research Institute (ERRI), Final Report, Utrecht.
4. EN1990-A2 (2005) – “Basis of Structural Design – Annex A2: Applications for bridges (normative)”, European Committee for Standardization (CEN), Final PT Draft, Brussels.
5. Zacher M, Baebler M. Dynamic behaviour of ballast on railway bridges. In: Proceedings of dynamics of high-speed railway bridges. London: Taylor & Francis; 2009.