

## Arco pré-fabricado aterrado como alternativa para passagem subterrânea

Sandro M. Gomes<sup>1</sup>, Francisco R. Lopes<sup>2</sup>, Fernando A. B. Danziger<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Beton Stahl Engenharia / sandro.gomes@betonstahl.com.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE / flopes@coc.ufrj.br

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE / danziger@coc.ufrj.br

### Resumo

Este trabalho apresenta uma solução para passagem viária sob aterros: estrutura em arco de concreto armado pré-fabricado, aterrada. É uma alternativa a estruturas mais usuais formadas por paredes, vigas e lajes. Primeiramente, são expostos de maneira resumida os elementos típicos desse tipo de obra e as metodologias construtivas mais comuns. Em seguida, são apresentados os principais aspectos da análise estrutural dos arcos, como premissas, modelos de cálculo, hipóteses simplificadoras e principais solicitações. O comportamento desse tipo de estrutura depende fundamentalmente de sua interação com o solo (interação solo-estrutura) e, por isso, devem ser contemplados tanto aspectos estruturais como geotécnicos em uma análise adequada. Finalmente, é feita uma comparação entre projetos, para uma passagem inferior típica, com a solução convencional e a alternativa proposta. Apesar de esta solução estrutural ter sido amplamente utilizada na Europa e América do Norte nas últimas três décadas, são raras as aplicações no Brasil. O objetivo é aliar a eficiência estrutural da geometria em arco com a eficiência construtiva dos elementos pré-fabricados. Soluções mais econômicas e rápidas dessas obras de arte são de grande importância para o país devido ao déficit de infraestrutura rodoviária e ferroviária.

### Palavras-chave

Passagem subterrânea; obras-de-arte; arcos aterrados; interação solo-estrutura; falso-túnel.

### Introdução

Desde a década de 1970, obras de arte com arcos de concreto pré-fabricados são utilizadas para vencer pequenos vãos na América do Norte e Europa. Fabricantes industrializaram o processo definindo catálogos com geometrias pré-dimensionadas para diferentes condições de aterro. Para cada obra uma geometria é escolhida, fabricada e montada no local. Além da agilidade que a industrialização gera, o formato em arco e a interação com o aterro geram economia de concreto e aço.

No Brasil são raras e recentes as utilizações dessa solução estrutural (Rodoanel Mario Covas, 2009 e Rodovia Eng. Constâncio Cintra, 2013). Tendo em vista a deficiência de infraestrutura rodoviária e ferroviária na maioria do território nacional, soluções para vencer pequenos vãos com processo construtivo mais industrializado e com menor consumo de materiais devem ser levadas em conta.

Esse trabalho visa apresentar, de maneira resumida, os principais aspectos construtivos e de dimensionamento da solução. A interação solo-estrutura é um fator fundamental para a análise desse tipo de estrutura e algumas abordagens para simular esse comportamento são apresentadas. Ao final um exemplo prático da aplicação é exposto como alternativa a uma passagem inferior convencional recentemente construída em uma rodovia federal.

## Solução de obra de arte em arcos de concreto aterrados

A grande vantagem desse tipo de obra é aliar a eficiência estrutural da forma em arco com a eficiência construtiva de elementos de concreto armado pré-fabricados. A geometria em arco consegue vencer vãos trabalhando, principalmente, a compressão axial e menos à flexão se comparado com estruturas de vigas e lajes. Com isso, necessita de menos inercia e tem menores níveis de tensões de tração, economizando tanto concreto como aço de armadura. Porém, a execução in-loco da superestrutura curva geraria uma complexidade muito grande de formas, escoramentos e concretagem além de inviabilizar a aplicação em obras hidráulicas. Essa desvantagem é resolvida dividindo a superestrutura em segmentos pré-fabricados moldados fora do local da obra e montados com guindaste.

Apesar de existirem variações da metodologia executiva e diferentes detalhes construtivos, os relatos de construções com arcos pré-fabricados aterrados mostram que as principais etapas do processo são constantes:

Etapa 1: O primeiro passo da obra é a execução da fundação que, de maneira geral, inclui a escavação até as elevações de projeto, nivelamento do fundo da cava, instalação das formas e armaduras e concretagem das sapatas corridas. Normalmente, as sapatas contam com um nicho onde entrarão as bases dos arcos pré-moldados e que será preenchido com graute. O fundo do nicho recebe calços nivelados com topografia para que o apoio do pré-fabricado se dê em elevação precisa.

Etapa 2: Os elementos de arco pré-fabricados são produzidos, geralmente, em fábrica com ambiente controlado e maquinário de içamento e manuseio adequado. As formas podem ser metálicas e os elementos são concretados “deitados” para facilitar a execução. As dimensões dos pré-fabricados são definidas para possibilitar o transporte até o local da obra. Com isso, as larguras ficam, geralmente, limitadas a 2,5 m. Para vãos muito grandes os elementos de arco são obrigatoriamente divididos em dois e solidarizados no local.

Etapa 3: No caso de vãos pequenos onde apenas um pré-fabricado vence o vão, um guindaste é suficiente para executar a montagem dos arcos no local da obra (Fig. 1). No caso de vão grandes ou de arcos tri-articulados, o vão é vencido por dois pré-fabricados e são necessários dois guindastes para montagem simultânea dos pares. Com um encaixe macho-fêmea, assim que os elementos se encostam a estrutura está teoricamente autoportante e os cabos podem ser soltos para montagem do par seguinte. Por segurança, muitas vezes, barras roscadas são utilizadas para travar a ligação macho-fêmea, antes de soltar os cabos do guindaste.



**Figura 1 – Montagem dos elementos de arco pré-fabricados. Retirado de BEBO Arch International AG (2011) e Terre Armée Group (2018).**

Etapa 4: Um dos detalhes que mais varia entre as diferentes propostas é a solidarização da chave dos arcos que são divididos em pares. Algumas são realizadas com emenda por transpasse das armaduras internas e externas dentro de nichos nas cabeças do pré-moldados, caracterizando uma ligação completa e desfazendo a rótula superior do arco. Em outras propostas, esperas são deixadas sobre as partes superiores do arco e uma viga é concretada para fazer a ligação dos elementos, porém sem ter o intuito de resistir a momentos, mantendo a rótula superior. Há ainda, propostas que lançam mão de cordoalhas e barras roscadas protendidas para fazer a solidarização.

Etapa 5: Após a finalização dos elementos de arco, deve-se executar a contenção do aterro nas laterais da obra. As três formas mais comuns de fazê-lo são: A primeira é composta por muros de concreto em L para as alas podendo ser pré-fabricados ou moldados in-loco. Nesse caso, *muros de enjunta* (de fechamento lateral sobre os arcos) são geralmente pré-fabricados e se apoiam nos muros de ala e nas extremidades dos últimos elementos de arco. A segunda é composta por muros de solo reforçado em ambas as laterais acompanhando a geometria dos arcos e do terreno. A terceira opção é a que demanda menor custo de material, porém, tem a execução mais complicada. Nela, o aterro não é contido e as laterais da obra de arte acompanham o talude da rodovia na forma de um bisel. Para isso ser possível, os elementos que não formam o arco completo devem ser engastados a sapata.

Etapa 6: Antes da execução do aterro, deve-se vedar as juntas entre pré-fabricados com manta asfáltica para evitar a perda de material do aterro e infiltração de água. No caso de obras hidráulicas a infiltração de água não é necessariamente um problema e a manta asfáltica pode ser substituída por geotêxtil.

Etapa 7: Nesse ponto a estrutura já está pronta para receber o aterro e posteriormente a pavimentação. O procedimento para execução do aterro envolve, geralmente, controle de granulometria e grau de compactação em zonas próximas a estrutura. Além disso, desníveis máximos entre aterros nos dois lados da obra e distância mínima para compactadores pesados também são prescritos.



**Figura 2 – Exemplo de aterros executados. Retirado de BEBO Arch International AG (2011).**

Como pode ser visto, todas as etapas são de rápida execução e demandam pouca mão de obra. A parte mais trabalhosa (construção dos pré-fabricados em formato de arco) é feita fora do local da obra.

### **Análise de tensões e deformações em arcos aterrados**

As principais solicitações que geram esforços nos arcos de concreto armado são três: peso próprio do arco, pressões devidas ao peso do aterro e pressões devidas a cargas móveis sobre o aterro. Os esforços causados pela primeira podem ser obtidos por uma simples análise de estruturas reticuladas planas. Já as pressões de contato do aterro são de complexa determinação e dependem de várias variáveis como propriedades do solo, procedimento e energia de compactação, deformações do conjunto e distribuições das tensões devidas a sobrecargas pontuais.

Bastick et al. (1998) divide em três as abordagens de análise possíveis para se obter os esforços e deformações devidas às pressões de terra. Em todas, considera-se um estado plano de deformações, ou seja, a análise é feita apenas para uma seção longitudinal à via superior de dimensão unitária (para uma seção transversal à passagem de dimensão unitária). Essa premissa é razoável para as pressões devidas ao peso do aterro e sobrecargas uniformemente distribuídas, porém, perde precisão no cálculo de sobrecargas concentradas (cargas das rodas).

A primeira abordagem para consideração das pressões do solo na estrutura é a simples aplicação das componentes verticais e horizontais dessas pressões, segundo premissas e simplificações pré-estabelecidas. As pressões verticais  $p_v$  podem ser assumidas como as pressões geostáticas devidas ao peso próprio do solo. Ou seja, o peso específico do solo vezes a profundidade do ponto:

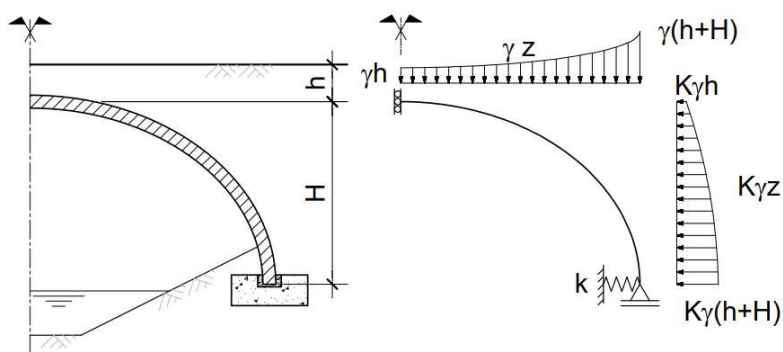
$$p_v = \gamma z \quad (1)$$

Aqui, já se observa uma primeira simplificação: o efeito de arqueamento do solo é desprezado. Quando as camadas de aterro vão sendo executadas, as camadas inferiores deformam. Como o arco de concreto é mais rígido do que o aterro, ele tende a “puxar a carga para si” causando um efeito de arqueamento que é tanto mais importante quanto mais rígido for o solo de fundação.

As pressões horizontais  $p_h$  podem ser adotadas como iguais às pressões verticais multiplicadas por um coeficiente de empuxo  $K$  (Fig. 3). Esse coeficiente pode ser constante ou variável com a profundidade e depende de propriedades do solo, do seu histórico de tensões e das deformações laterais.

$$p_h = K p_v \quad (2)$$

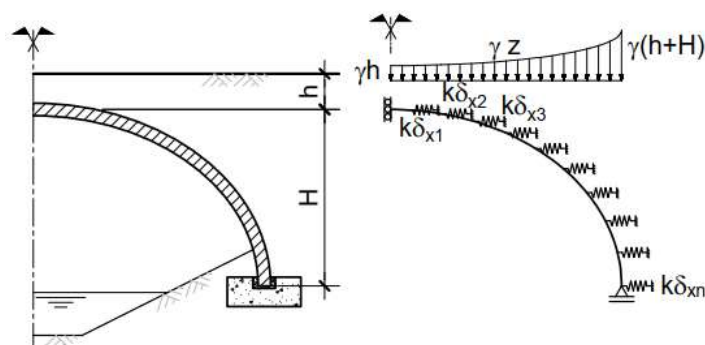
Uma segunda simplificação usual nos cálculos de empuxo é supor uma condição de empuxo no repouso,  $K_0$ . Com isso, os parâmetros que influenciam o coeficiente de empuxo do aterro são as propriedades intrínsecas do solo e sua compactação.



**Figura 3 - Aplicação das pressões de terra pela abordagem estática.**

A principal simplificação dessa abordagem é que os empuxos de terra são adotados como independentes da deformação da estrutura, ou seja, a interação solo-estrutura é desconsiderada. Para exemplificar o efeito dessa simplificação, imagine que depois de construído o aterro, se aplique uma carga vertical sobre a chave do arco. A tendência de deformação interna da estrutura será vertical para baixo na parte superior do arco e lateral para fora na parte inferior do arco, como se o mesmo tendesse a abrir. Essa deformação lateral para fora nas partes mais inferiores comprime o solo, que reage aumentando o empuxo. Esse aumento de pressão horizontal não é levado em conta nessa abordagem estática.

Bastick et al. (1998) descrevem uma segunda abordagem de análise. Nela as componentes verticais das pressões de terra são aplicadas como cargas distribuídas e as componentes horizontais são consideradas por reações de molas (Fig. 4). Em outras palavras, as cargas verticais devidas ao peso próprio do aterro e da carga móvel são as mesmas da abordagem estática, porém, as cargas horizontais serão proporcionais a deslocamentos laterais provocados pelas cargas verticais.



**Figura 4 - Aplicação das pressões de terra pela abordagem com molas.**

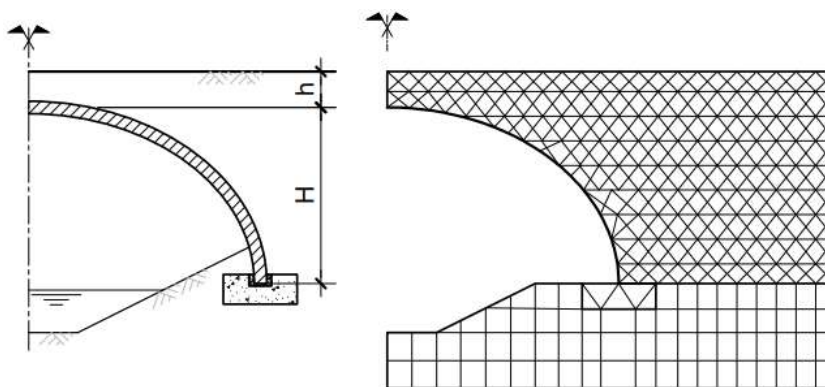
A principal vantagem dessa abordagem em relação à estática é que ela leva em conta a interação solo-estrutura, mesmo que de uma maneira simplificada. Quanto mais a estrutura se deforma lateralmente comprimindo o solo, maior será a reação horizontal do solo na estrutura. Essa hipótese é mais condizente com a realidade do que supor uma condição  $K_0$ .

Entretanto, a abordagem também tem limitações. A primeira é não ter controle sobre o estado de tensões dos pontos na massa de solo, já que as tensões horizontais são independentes das tensões verticais em cada ponto. Por exemplo, um ponto no meio da massa de solo com deformação lateral nula terá tensão horizontal nula, quando na verdade, esta deveria ser igual à tensão vertical multiplicada por um coeficiente  $K$ . Isso desrespeita, inclusive, o empuxo teórico mínimo correspondente ao estado ativo. Outra limitação é não conseguir levar em conta o efeito residual da compactação no estado de tensões do solo, e esse efeito pode ter impactos importantes nesse tipo de obra.

Além dessas simplificações, algumas já citadas na abordagem estática, também são válidas na abordagem com molas: não considerar o arqueamento do solo do aterro e não ter controle sobre as componentes das pressões de terra tangenciais ao eixo do arco.

A terceira abordagem de análise utiliza modelos de elementos finitos que conseguem levar em conta a interação solo-estrutura de maneira mais completa. A simulação consegue levar em conta mecanismos que as anteriores não conseguem e por isso, as pressões de terra nos arcos podem ser estimadas de maneira mais próxima da realidade (Bastick et al., 1998).

Para análise dos arcos aterrados com essa abordagem, são modelados o aterro, o solo de fundação e o próprio arco discretizados em um número finito de elementos ligados por nós (Fig. 5). Quanto menores e mais numerosos os elementos, mais refinada fica a análise. O arco é modelado com elementos de barra e o solo e as sapatas como elementos planos.



**Figura 5 – Exemplo de um modelo de elementos finitos para arcos aterrados (caso de geometria e carregamento simétricos).**

O programa de computador calcula os deslocamentos dos nós e as tensões em cada elemento a partir das condições de contorno e cargas informadas. Nos modelos mais básicos, o comportamento de todos os elementos é regido por equações elásticas lineares. Porém, é interessante que as formulações dos elementos que representam o solo levem em conta a variação de rigidez como função do estado de tensões, a histerese na carga e descarga e a plastificação. Isso é particularmente interessante para modelar o aterro na análise em questão.

A principal vantagem dessa abordagem em relação as anteriores é a simulação mais completa da interação solo-estrutura. Quando se ativa uma dada camada de aterro na lateral ou sobre o arco, os elementos dessa camada causam empuxo na estrutura, além de surgirem nesses elementos um estado de tensões da compactação.

Essa abordagem permite levar em conta os efeitos da compactação com rolos pesados no empuxo (assim como a estática), caso o modelo constitutivo dos elementos de aterro leve em conta a histerese de carga e descarga. A relação entre tensão tangencial e normal no contato aterro-arco pode ser controlada por elementos de

interface com formulação plástica. Geralmente, a resistência da interface é definida como uma porcentagem da resistência do solo.

As pressões de terra no arco devidas às cargas das rodas sobre o aterro são um problema mais complexo e requerem mais simplificações. A distribuição das tensões na massa de aterro ocorre de maneira tridimensional e os modelos de análise supõem um estado plano de deformações (ou seja, são bidimensionais). Com isso, independentemente da abordagem de análise adotada, é necessária uma simplificação para considerar o espraio das cargas das rodas no sentido transversal à via superior (longitudinal à obra de passagem). Uma abordagem simples considera um espraio uniforme com determinado ângulo, como recomendado por AASTHO (2012) e ilustrado na Figura 6. Outra abordagem é adotar uma distribuição pela teoria da elasticidade e verificar a estrutura pelo pico de tensões. Como a superfície da estrutura é curva e com profundidade variável, ambos métodos descritos acima são grosseiramente aproximados. No caso do plano do arco, a distribuição das tensões devidas a cargas sobre o aterro é calculada de maneira mais precisa numa abordagem por elementos finitos.

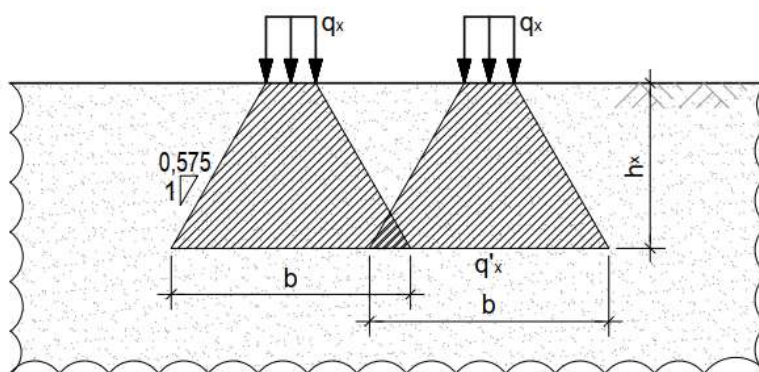


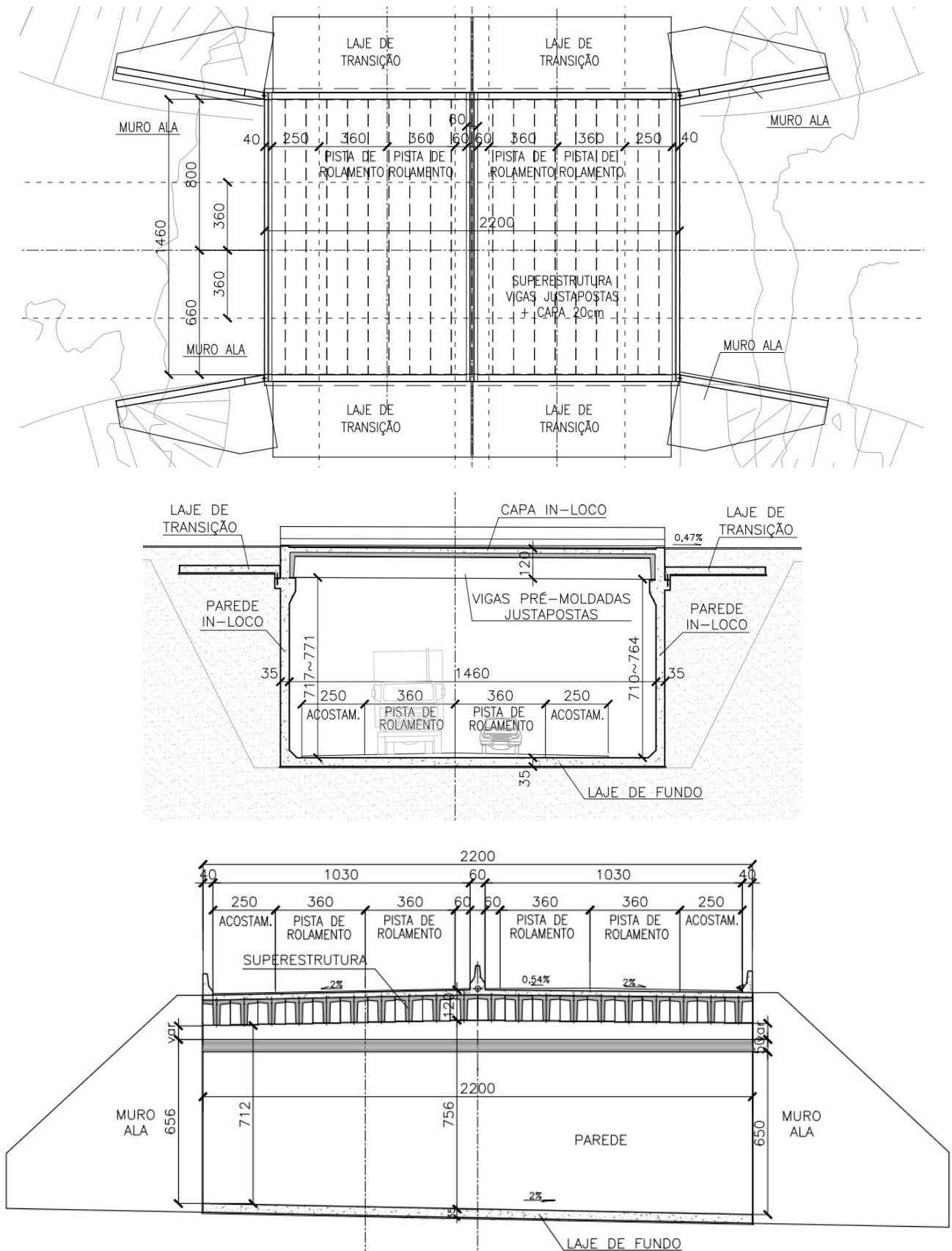
Figura 6 – Espraio das cargas das rodas do TB450.

### Exemplo de alternativa a passagem inferior convencional

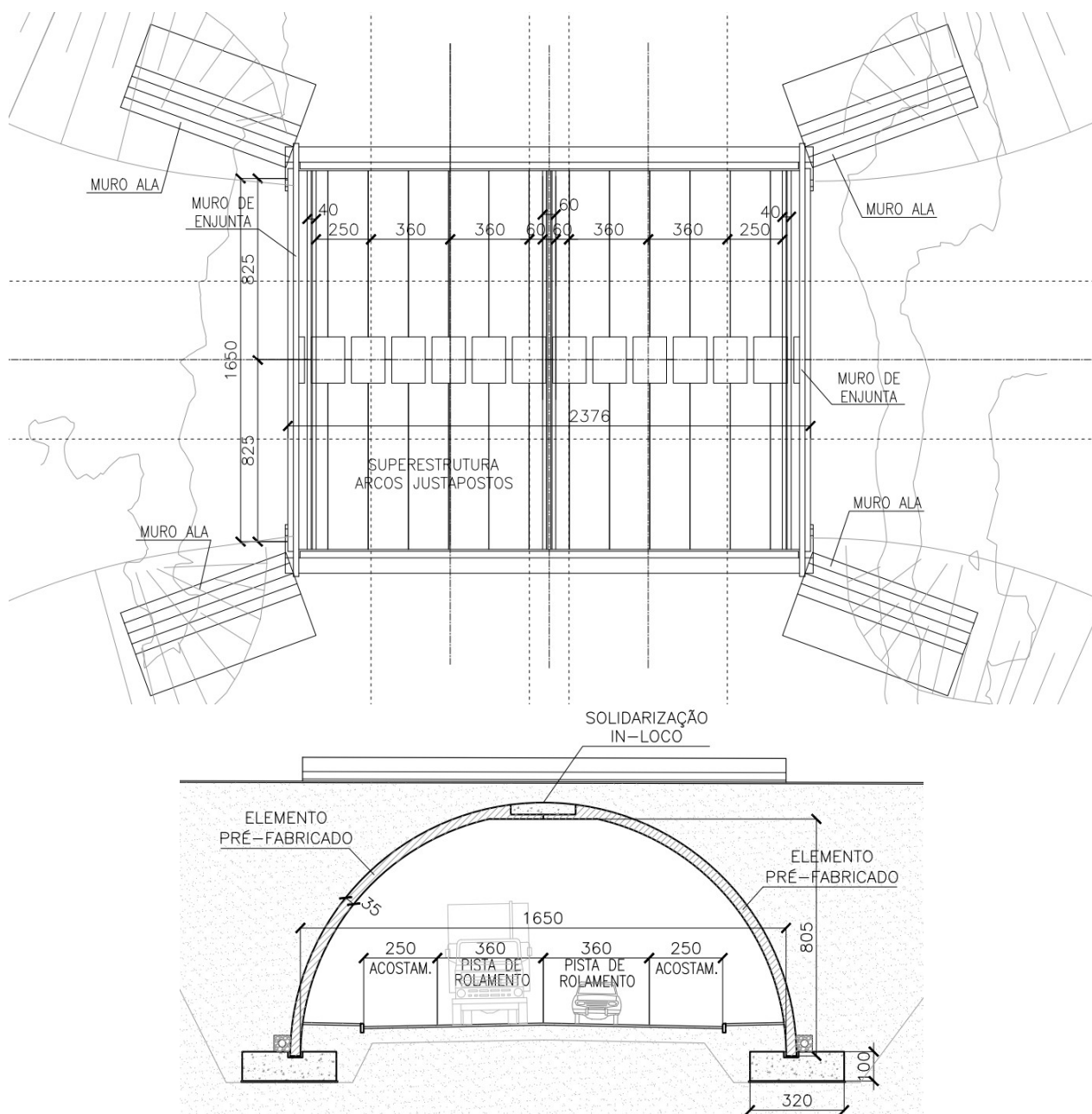
Como exemplo prático da aplicação de obras de arte em arcos aterrados, são apresentados, a seguir, os principais aspectos de uma passagem inferior utilizando arco circulares em alternativa a uma solução convencional. A Figura 7 ilustra o projeto de uma passagem inferior executada em uma rodovia federal. A via principal superior tem pista dupla com seção total de 22,0 m, incluindo faixas de rolamento, acostamento, afastamentos e barreiras. A via secundária inferior tem pista simples com acostamento e passeio.

A solução estrutural escolhida e executada foi a de um quadro fechado em concreto armado com vão interno de 14,6 m e altura livre de aproximadamente 7,4 m. A laje de fundo e as paredes tem 35 cm de espessura. A laje superior é formada por vigas pré-fabricadas justapostas com 100 cm de altura e uma capa in-loco de 20 cm, totalizando 1,2 m de altura do tabuleiro. A estrutura conta ainda com lajes de transição e muros de ala. A laje de fundo se encontra assente sobre solo residual com  $N_{SPT}$  médio de aproximadamente 50 e a cerca de 4 m do limite impenetrável a percussão.

A solução alternativa é composta por elementos de arco circular pré-fabricados com 16,5 m de vão interno, 35 cm de espessura e 180 cm de largura cada. O arco é dividido em dois pré-fabricados que são solidarizados na chave por um trecho com armaduras de espera e concreto in-loco. Os arcos se apoiam em sapatas corridas de 100 cm altura e 320 cm de largura. A altura mínima de aterro sobre a chave do arco é de 60 cm. Nas laterais da obra, muros pré-moldados se apoiam nas extremidades dos últimos elementos de arco e fazem contenção do aterro (também chamados de *muros de enjunta*). Além disso, os mesmos muros ala da solução original podem ser adotados.



**Figura 7 – Planta, seção longitudinal e transversal da passagem inferior construída.**

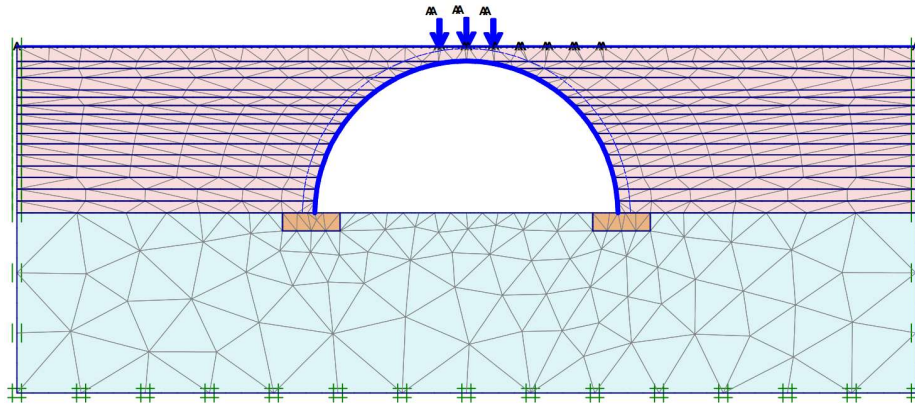


**Figura 8 – Planta e seção da passagem inferior alternativa.**

A análise estrutural do arco foi feita com o Método dos Elementos Finitos utilizando o software geotécnico Plaxis (Brinkgreve, 2019). Foram usados elementos de barra para simular os arcos de concreto armado e elementos planos para as sapatas, ambos com comportamento elástico linear. O solo abaixo da fundação foi simulado como elasto-plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Para o aterro, se adotou um modelo constitutivo elasto-plástico não linear com rigidez dependente do estado de tensões e consideração da histerese de carga e descarga, chamado “Hardening Soil Model”. Foram modeladas camadas de aterro em uma análise em etapas, que incluiu a simulação da compactação por meio de aplicação de tensão vertical de compressão de 200 kPa em cada camada. A Tabela 1 resume as propriedades adotadas para os elementos de solo. Os parâmetros do aterro foram estimados a partir da tabela de referência proposta por Selig (1988) para um solo silto arenoso compactado a 95% do Proctor Normal.

A carga móvel de projeto é o TB450 da norma NBR7188:2003 com seu respectivo coeficiente de impacto. O espriamento das cargas das rodas no sentido transversal à via superior foi considerado conforme AASTHO (2012). Cinco posições do trem tipo foram a partir do meio do vão em direção a um dos apoios.





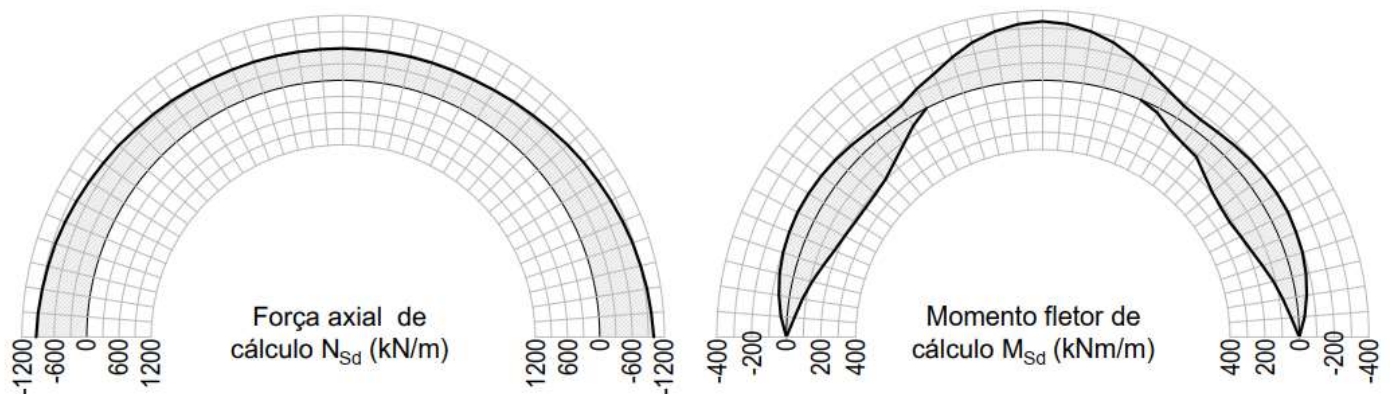
**Figura 9 – Modelo de elementos finitos.**

**Tabela 1 – Propriedades dos elementos de solo.**

	$\gamma$	$E_{50,ref}$	$E_{oed,ref}$	$E_{ur}$	$m$	$c'$	$\phi'$	$\psi$	$v_{ur}$	$K_0$
	kN/m <sup>3</sup>	MPa	MPa	MPa		kPa	°	°		
ATERRO	20	20	20	60	0,4	10	35	5	0,2	0,426
	$g$	$E$	$\nu$	$c'$	$\phi'$	$\psi$				
	kN/m <sup>3</sup>	MPa		kPa						
NATURAL	20	50	0,25	10	35	5				

A Figura 10 apresenta as envoltórias de esforços de compressão axial e momentos fletores para as diversas etapas construtivas (camadas de aterro) e diferentes posições de carga móvel. Como pode ser visto, a espessura de 35 cm se mostra adequada ao nível de esforços encontrados. Por se tratar de uma geometria circular com pouco aterro sobre a chave, os empuxos laterais geram mais flexão do que o peso do aterro e a sobrecarga somados. Com isso, os momentos fletores encontrados geram sempre tração da face externa da chave e na face interna das laterais do arco.

A partir dos resultados da análise estrutural, foram elaborados desenhos de armadura dos elementos de arco pré-fabricados, da solidarização in-loco da chave, das sapatas e dos muros de enjunta. As principais quantidades para ambas soluções foram calculadas e estão resumidas na Tabela 2. Pode ser visto que a solução em arco aterrado requer um pouco mais de terraplenagem, porém levou a considerável economia de concreto e aço. Isso leva a crer que a solução pode ser competitiva em várias situações práticas considerando ainda que a estrutura é majoritariamente pré-fabricada, permitindo uma construção mais rápida. Um outro aspecto positivo da solução é a ausência de juntas, descontinuidade no pavimento ou aparelhos de apoio, gerando menos custo de manutenção.



**Figura 10 – Envoltórias dos diagramas de força axial e momento fletor de cálculo.**

**Tabela 2 - Comparativo entre quantidades dos dois projetos.**

		ARCO	QUADRO	
ESCAVAÇÃO	m <sup>3</sup>	4500	3300	36%
FORMA	m <sup>2</sup>	1750	1870	-6%
Forma in-loco	m <sup>2</sup>	250	870	
Forma pré-moldados	m <sup>2</sup>	1500	1000	
CONCRETO	m <sup>3</sup>	420	525	-20%
Concreto in-loco	m <sup>3</sup>	180	400	
Concreto pré-moldados	m <sup>3</sup>	240	125	
AÇO	kg	45000	80000	-44%
REATERRO	m <sup>3</sup>	145	60	142%

## Conclusões

O trabalho sugere que a solução construtiva em arcos pré-fabricados aterrados para pequenos vãos é vantajosa. A geometria em arco aliada com a interação solo-estrutura leva a economia de concreto e aço em relação a soluções que trabalham principalmente a flexão. A maior parte da estrutura é pré-fabricada e os elementos in-loco demandam pouco trabalho de formas e nenhum de escoramento, levando a uma obra rápida e com pouca mão de obra. Não há juntas ou descontinuidades no pavimento e nem aparelhos de apoio, levando a pouca necessidade de manutenção.

## Referências

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). LRFD bridge design specifications. Washington, 2012.
- BASTICK, M. J., GUILLOUX, A., JENKINS, D., “Comportement, conception et dimensionnement des voûtes enterrées”, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. v. 218, pp. 25-37, Nov-Dez. 1998.
- BEBO ARCH INTERNATIONAL AG, The BEBO® System. Folheto comercial, 2011. Disponível em <<http://shawprecastolutions.ca/spans-crossings/bebo-arch-system/>>. Acessado em 30 de dezembro de 2019.
- BERNINI, J., FITZSIMONS, N., HEIERLI, W., “Overfilled precast concrete arch bridge structures”. In: Proceedings of 16<sup>th</sup> Congress of International Association for Bridge and Structural Engineering, pp 380-387. Lucene. 2000.
- BRINKGREVE, R. B. J., ZAMPICH, L. M., MANOJ, N. R. “Plaxis connect edition V20”, Plaxis software manual. Delft, 2019.
- DUNCAN, J. M., SEED, R. B. “Compaction-induced earth pressures under K0-conditions”, Journal of Geotechnical Engineering v. 112, n. 1, pp. 1-22, Jan. 1986.
- DUNCAN, J. M., WILLIAMS, G. W., SEHN, A. L., SEED, R. B. “Estimation earth pressures due to compaction”, Journal of Geotechnical Engineering v. 119, n. 7, pp. 1171-1177, Dez. 1991.
- EHRlich, M., MITHCELL, J. K., “Working stress design method for reinforced soil mass”, Journal of Geotechnical Engineering v. 120, n. 4, pp. 625-645, Abr. 1994.
- LOPES, F. R. “Métodos Numéricos em Geotecnia”. Notas de aula do curso de mesmo nome. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- MCGRATH, T. J., MOORE, I. D., SELIG, E. T., WEBB, M. C., TALEB, B., “Recommended specifications for large-span culverts”. NCHRP Report 473, Transportation Research Board. Washington, 2002.
- PETERSEN, D. L., NELSON, C. R., MCGRATH, T. J., KITANE, Y. “Recommended design specifications for live load distribution to buried structures”. NCHRP Report 647, Transportation Research Board. Washington, 2010.
- SELIG, E. T. “Soil Parameters for Design of Buried Pipelines”. In: Proceedings of the Pipeline Infrastructure Conference, pp 99-116, Reston. Junho 1988.
- TERRE ARMÉE GROUP, TechSpan® Precast Arches, funicular shape series. Folheto comercial, 2018. Disponível em: <<https://www.precastarches.com/en/catalogue>>. Acessado em 30 de dezembro de 2019.