



I Congresso Luso-Africano de Construção Metálica Sustentável



ESTADOS DE COACÇÃO

OBRAS DE ARTE DE SECÇÃO MISTA

LUANDA, MAIO 2012

sta

João Tavares

Obras de arte de secção mista: vantagens e desafios

Abordagem proposta: introdução de estados de coacção com caso simplificado

Caso de estudo: viaduto sobre auto-estrada em funcionamento

Análise comparativa com solução corrente

Conclusões

Vantagens

Vantagens

- Rapidez de execução
- Economia de materiais e trabalhos complementares
- Melhoria do serviço
- Solução ecológica e sustentável

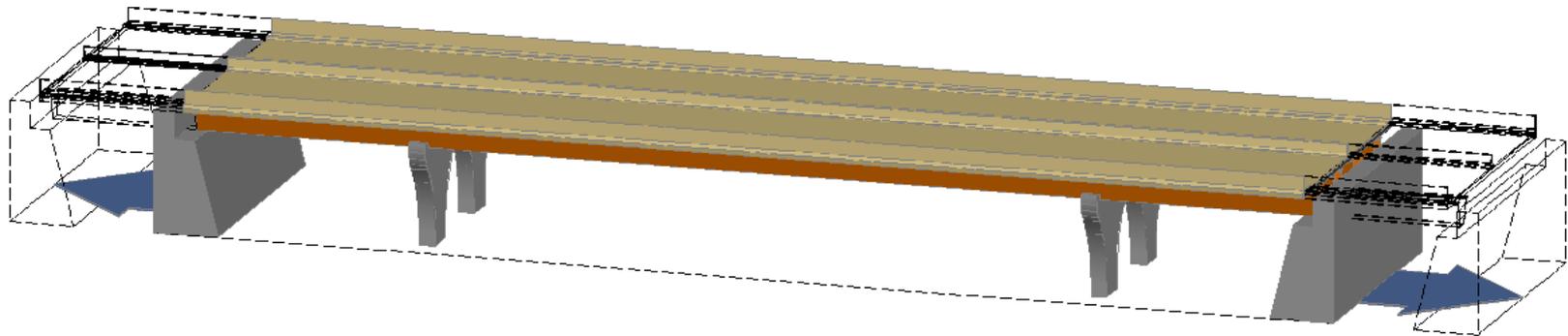
Racional

- Permite fabricação prévia dos elementos metálicos, apenas montados em obra
- Secção mista: dois materiais funcionam em conjunto
- Vigas metálicas autoportantes (incluindo tabuleiro) suprime a necessidade de cimbramento
- Limitação da interrupção das vias em funcionamento
- Grande parte da estrutura (aço) reciclável

A solução mista permite uma execução em obra fácil e rápida e é especialmente vantajosa quando se pretende manter vias existentes em funcionamento

Desafio: limitação do comprimento total

- O vão central é a condicionante funcional mais corrente: vãos de extremidade podem ser reduzidos
- Comportamento estrutural adequado conduz a que vão extremo seja % mínima do central
- \uparrow vão extremo \Rightarrow \uparrow custo da estrutura (\uparrow comprimento) e pode não ser compatível com condicionalismos locais



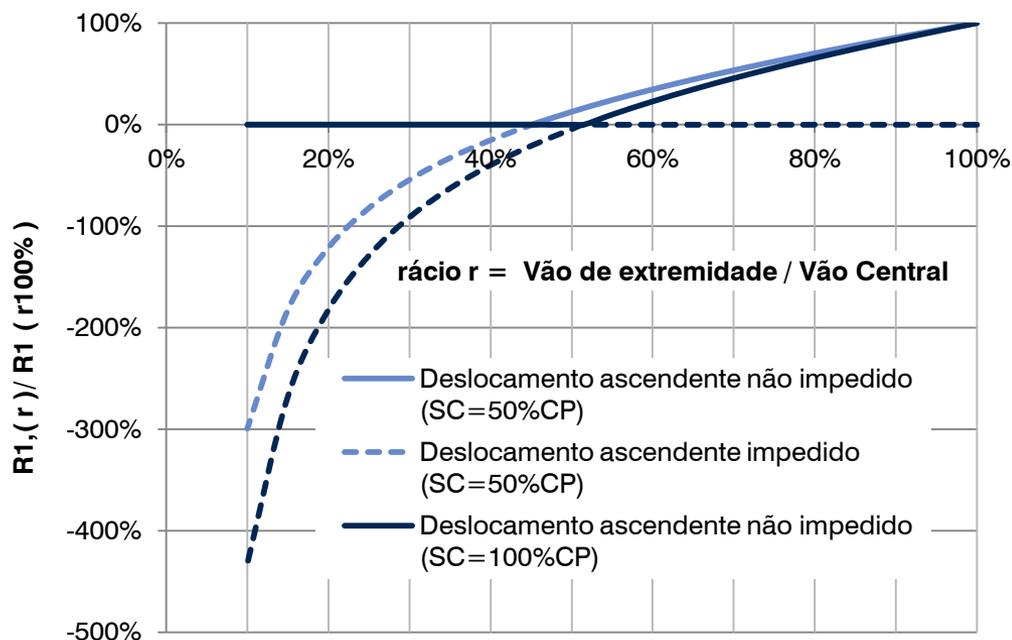
A definição do comprimento ideal é um importante desafio neste tipo de obra

Relevância do vão de extremidade: reacções

Exemplo

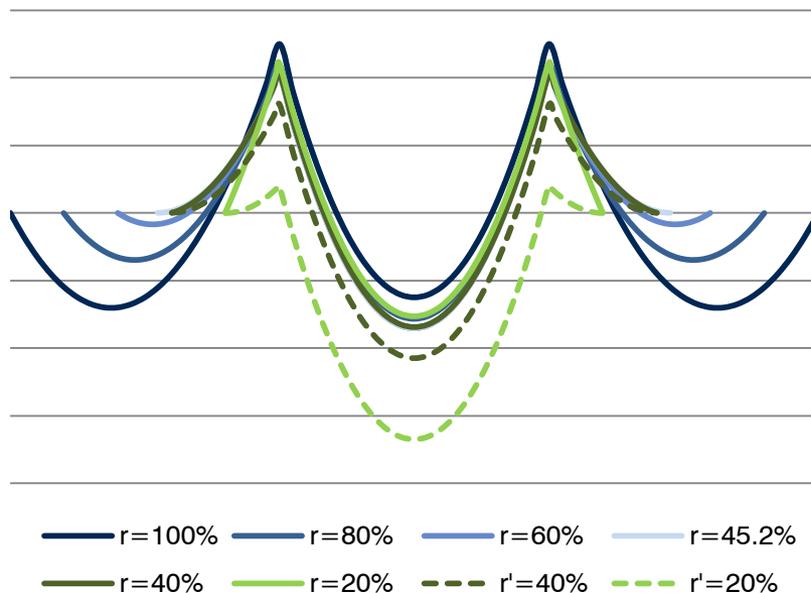
- Viga contínua com 3 tramos
- Cargas variáveis entre 50% e 100% das cargas permanentes
- Cargas variáveis a actuar no tramo central

Variação das reacções nos apoios de extremidade



A redução do vão de extremidade conduz a reacções negativas sobre os apoios

Momentos flectores



Nota: R' - descolamento nos apoios

Observações

- M^+ e M^- próximos para rácios de 70%
- Rácio \downarrow conduz a $M^+ \gg M^-$
- Efeito acentua-se quando deslocamento do apoio não é impedido

Vão extremos curtos conduzem a diagramas de momentos desequilibrados, o que se acentua com o “descolamento” dos apoios sobre os encontros

Obras de arte de secção mista: vantagens e desafios

Abordagem proposta: introdução de estados de coacção com caso simplificado

Caso de estudo: viaduto sobre auto-estrada em funcionamento

Análise comparativa com solução corrente

Conclusões

Descrição geral

Descrição geral

- Faseamento construtivo adequado
- Imposição de assentamentos de apoio (pré-compressão dos apoios)
- Monitorização do comportamento da estrutura e validação/ajustamento da análise estrutural

Objectivos

- Apoios em compressão para a estrutura em serviço
- Possibilidade de redução dos vãos extremos sem “descolamento” nos apoios sobre os encontros

A imposição de um estado de coacção, associado a um faseamento construtivo adequado, permite a redução dos vãos de extremidade

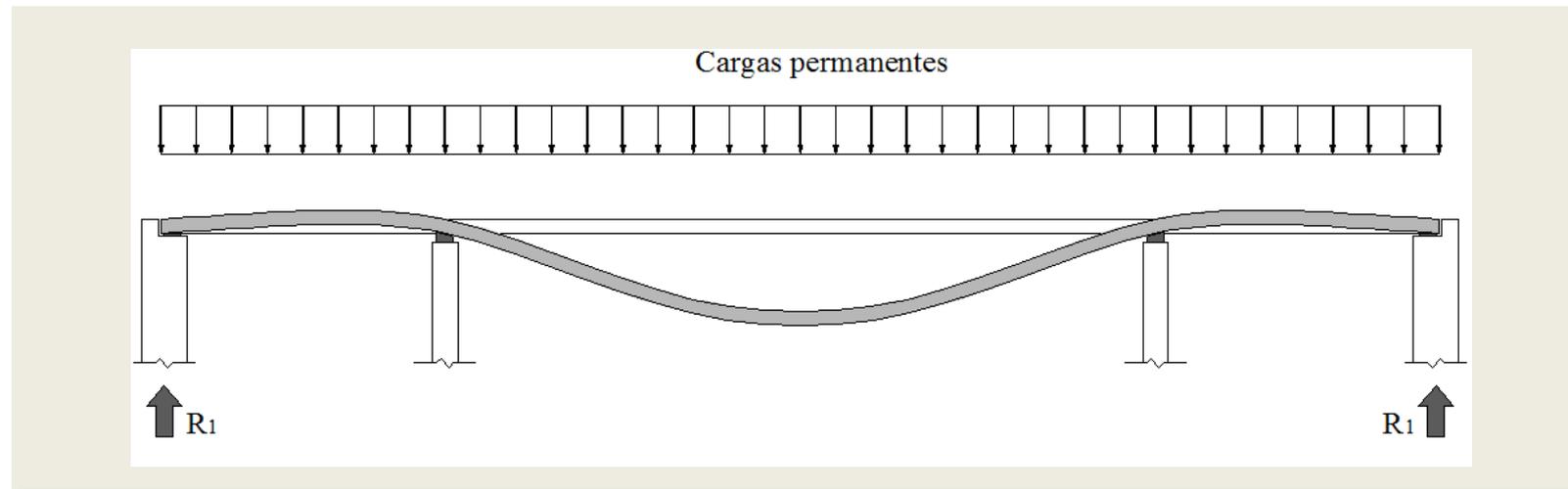
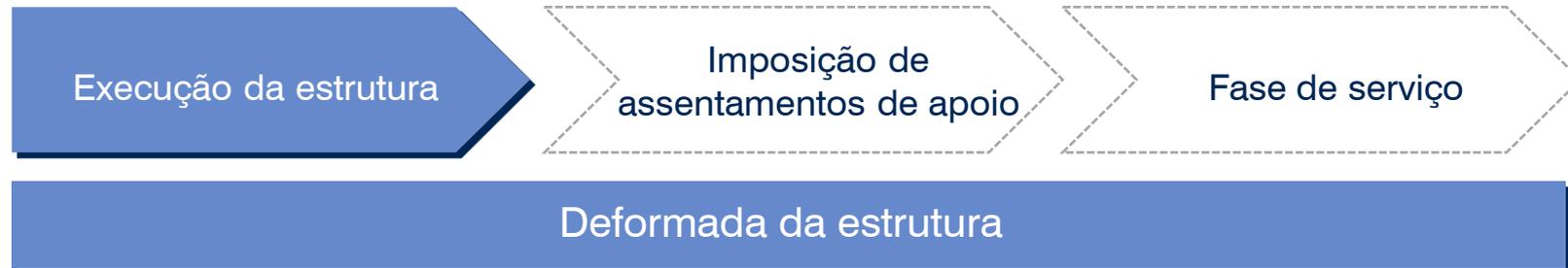
Execução da estrutura e análise estrutural



A estrutura é executada em 3 fases distintas, a considerar na análise estrutural

Abordagem proposta

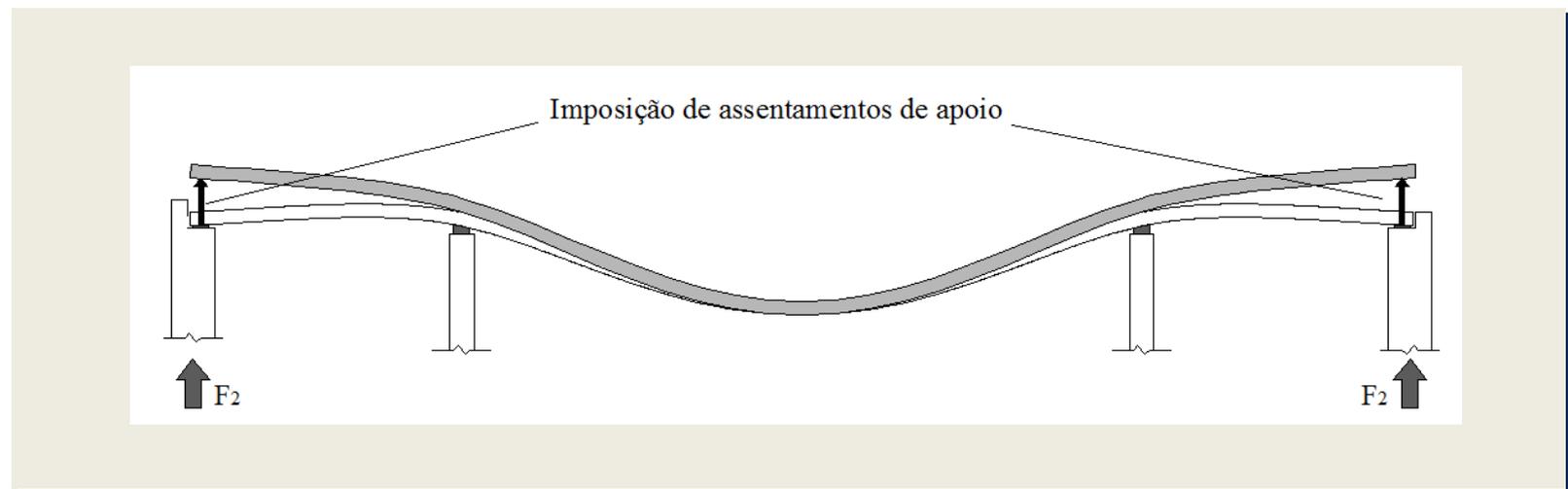
Fases construtivas: execução da estrutura



A estrutura é executada, estando sujeita às acções de carácter permanente



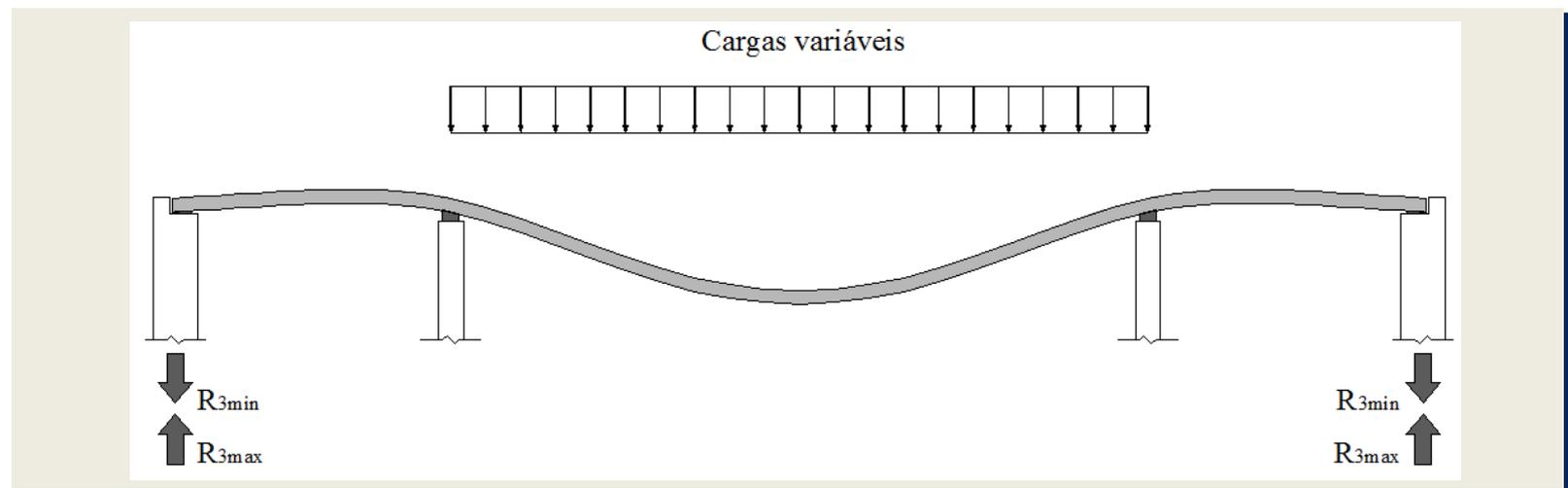
Deformada da estrutura



É introduzindo um estado de coacção, impondo-se assentamentos diferenciais entre as secções dos encontros e as secções dos pilares adjacentes

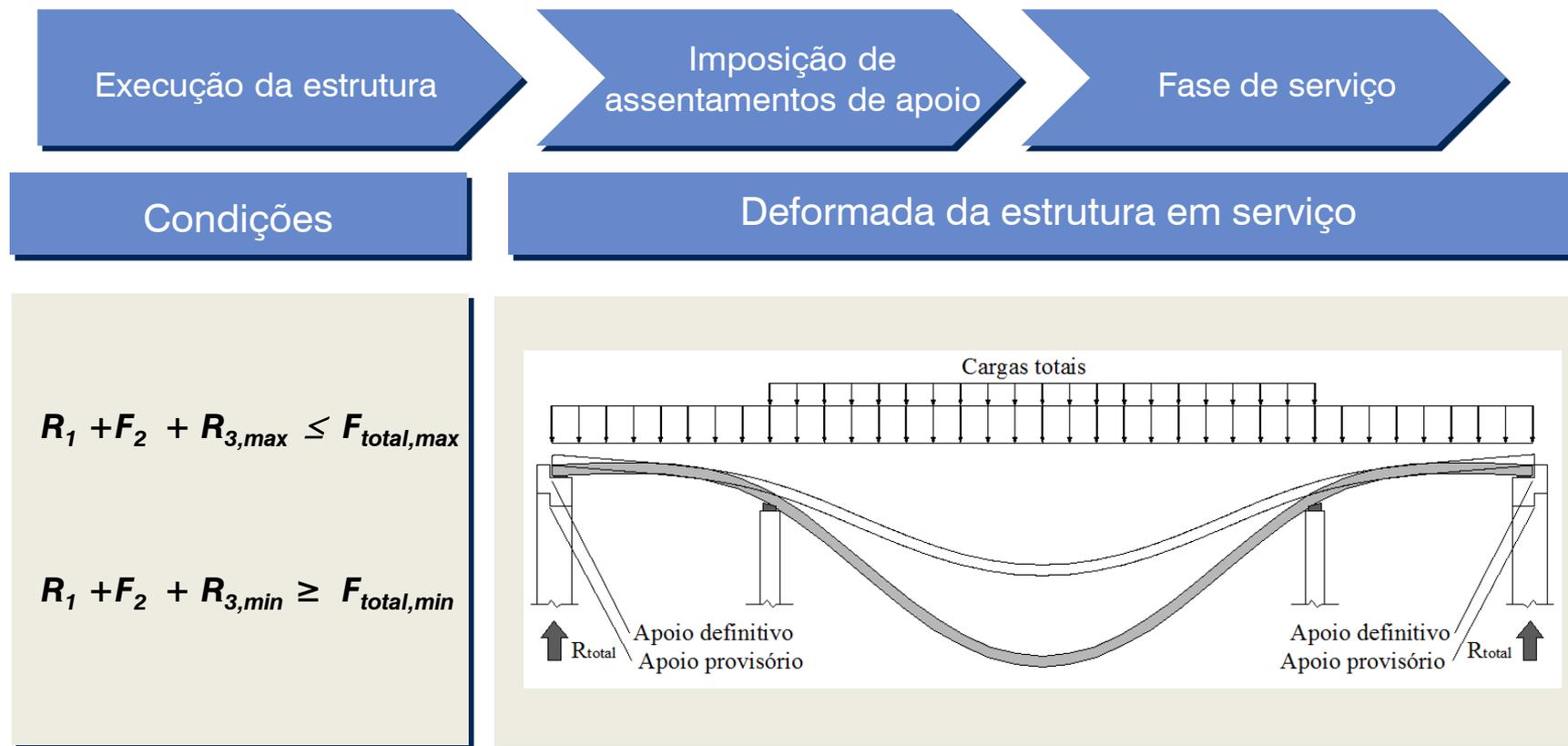


Deformada da estrutura apenas para as cargas variáveis



As reacções são função não só das acções variáveis mas também da sua localização

Fases construtivas: fase final



Os deslocamentos impostos conduzem a que em serviço as reacções se encontrem num intervalo definido em função da capacidade dos aparelhos de apoio

Obras de arte de secção mista: vantagens e desafios

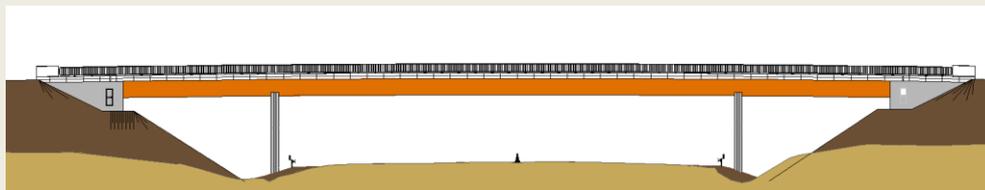
Abordagem proposta: introdução de estados de coacção com caso simplificado

Caso de estudo: viaduto sobre auto-estrada em funcionamento

Análise comparativa com solução corrente

Conclusões

Viaduto do caso de estudo

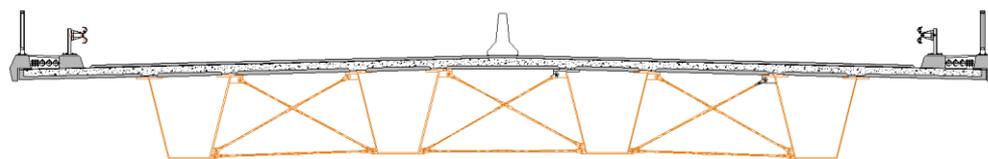


Descrição Geral

- Viaduto contínuo com 3 tramos
- Comprimento total de 70m: 14 + 42 + 14
- Passagem superior sobre via em serviço sujeita a alargamento de 2x2 para 2x3 vias

A concepção proposta apresenta-se como uma solução simples, rápida e compatível com exigências de serviço das vias existentes

Secção mista

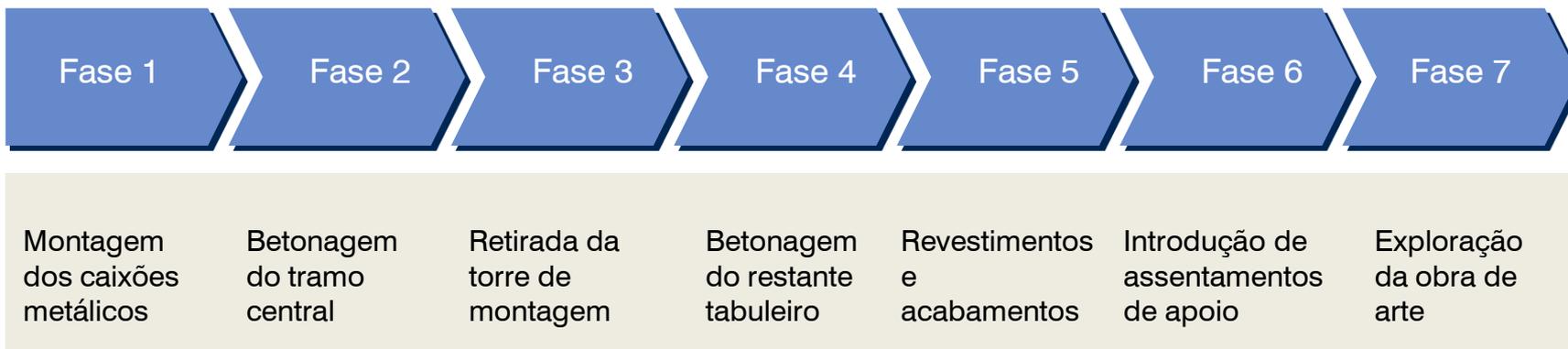


Solução estrutural

- Secção mista de aço betão
 - Caixa: chapas de aço
 - Tabuleiro: betão armado
- Funcionamento monolítico
- Apoio central provisório, retirado após endurecimento do betão do tabuleiro

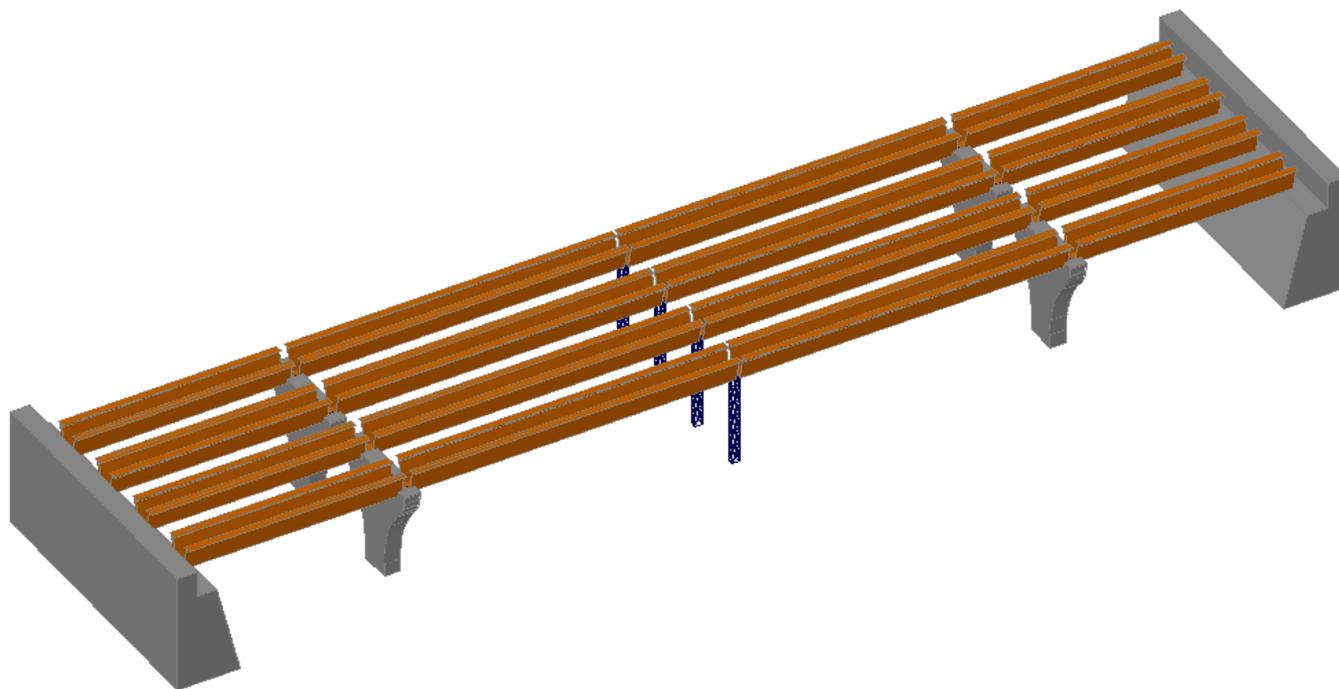
É introduzido um apoio central provisório até existir um comportamento misto da secção

Faseamento construtivo

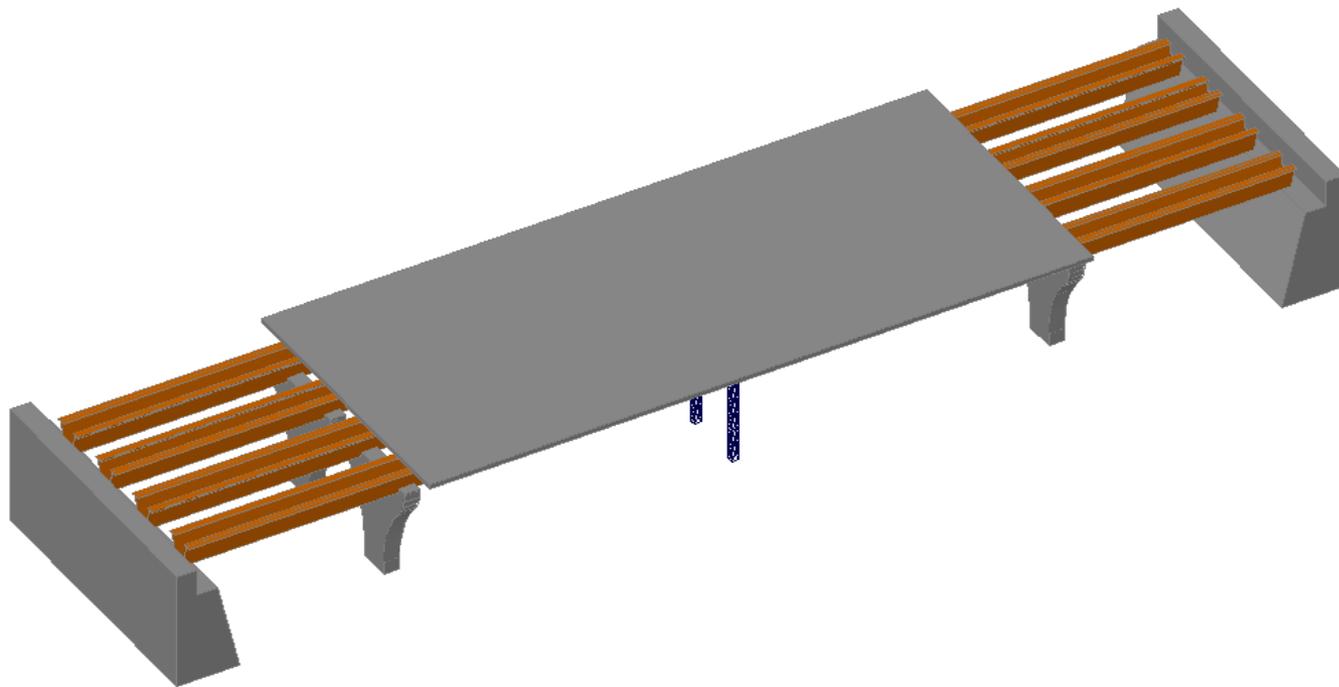


O caso de estudo é mais complexo, exigindo a adoção de um maior número de fases a considerar

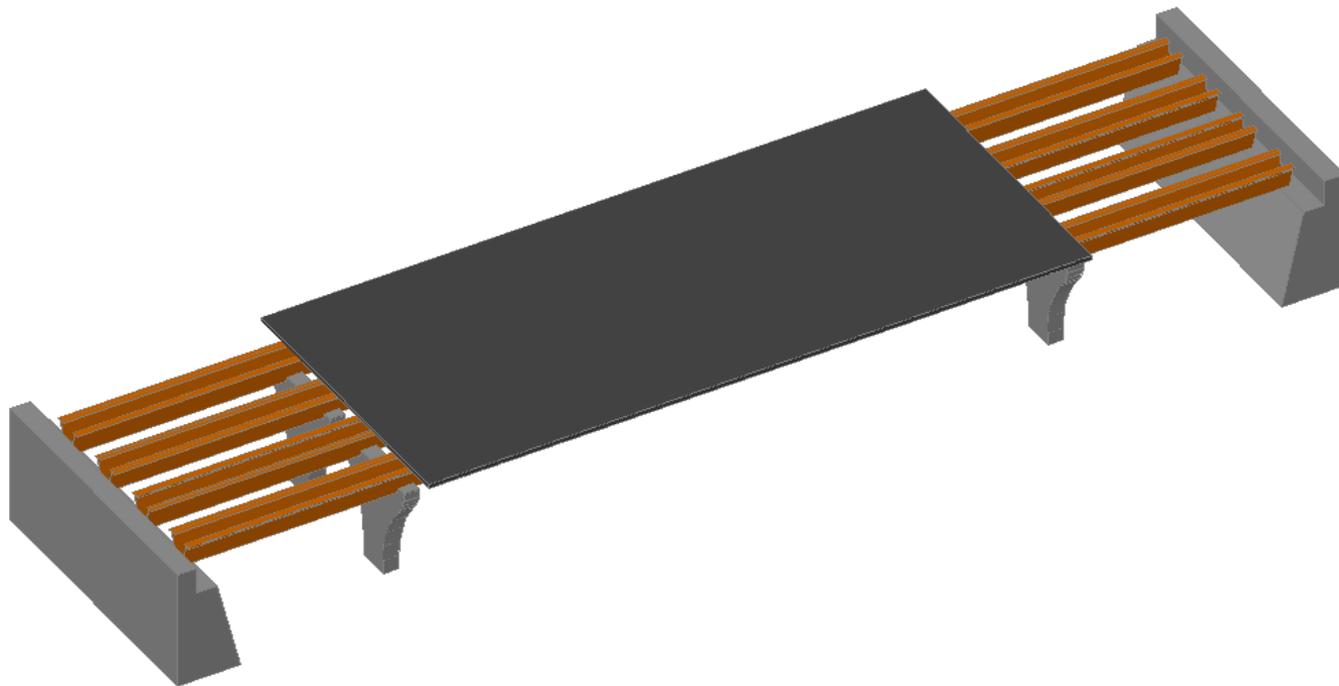
Fase 1: montagem dos caixões metálicos



Fase 2: betonagem do tramo central



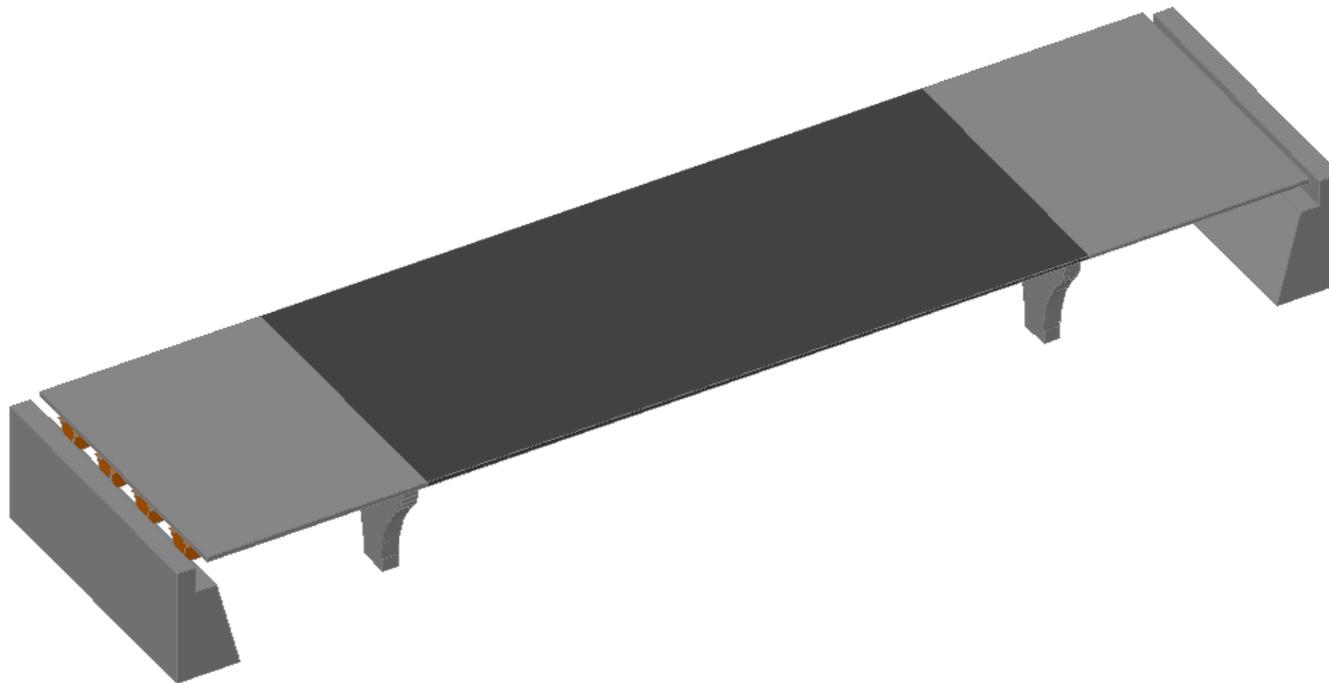
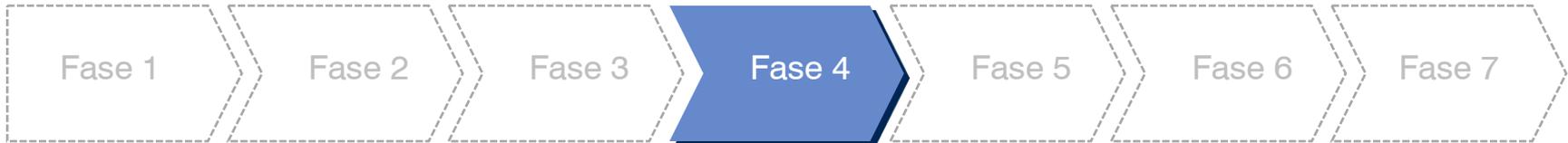
Fase 3: retirada da torre de montagem

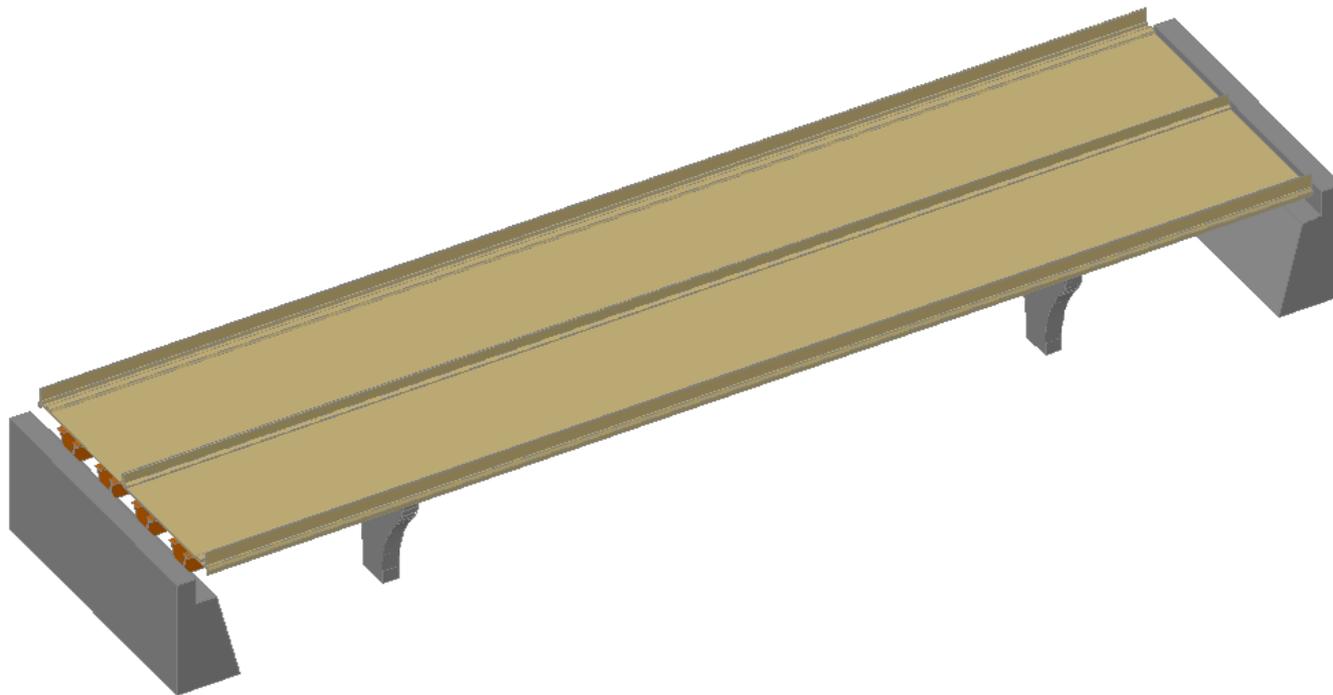


Caso de estudo

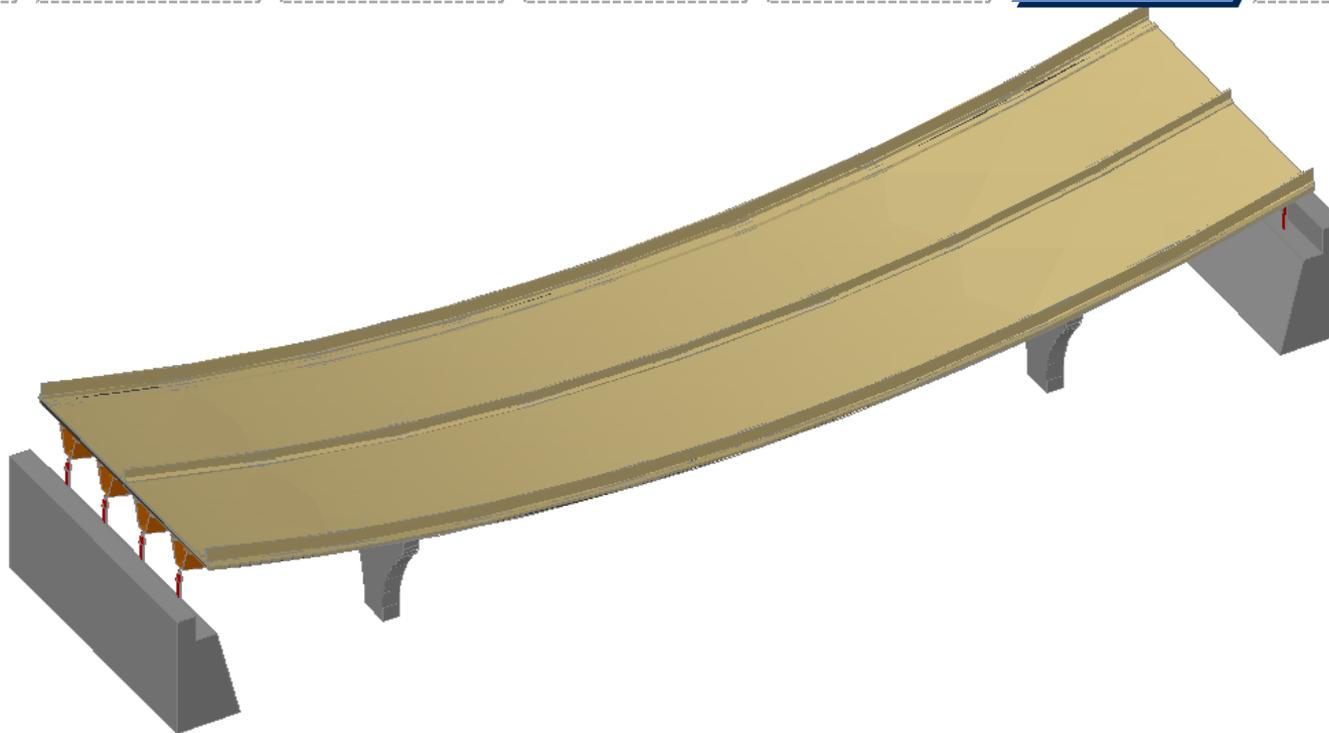
Fase 4: betonagem do restante tabuleiro

sta





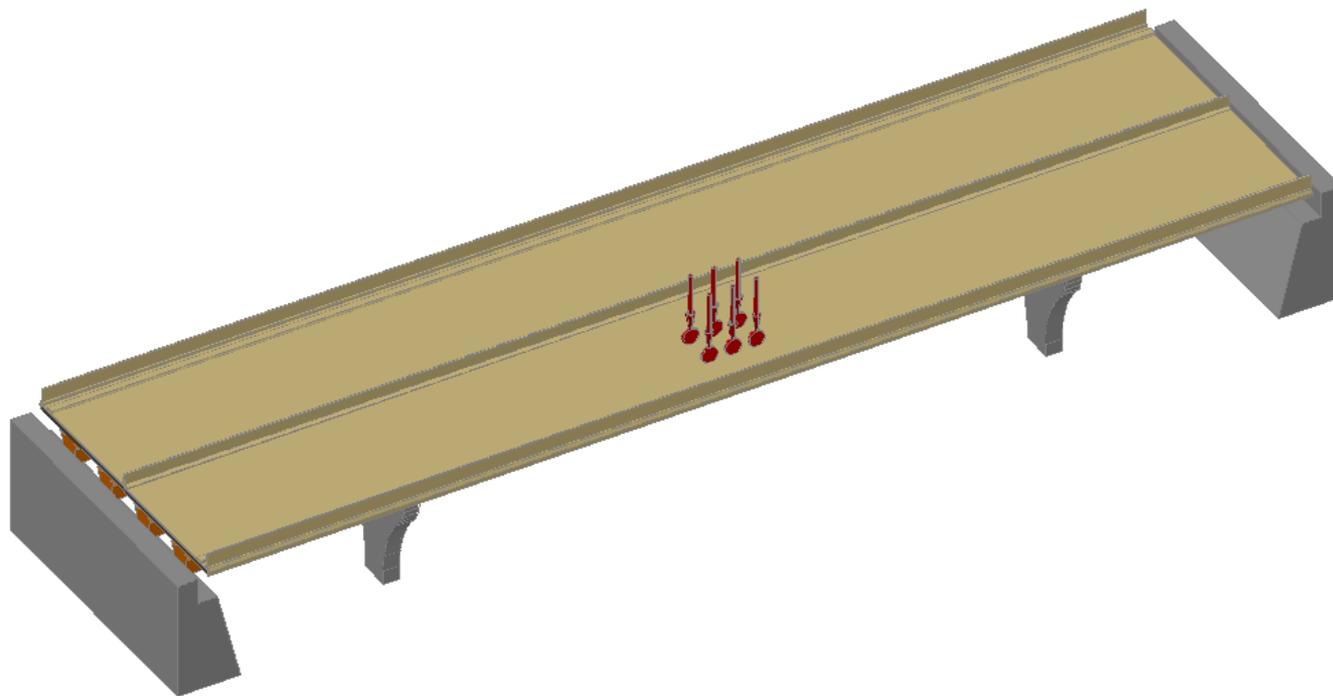
Fase 6: Introdução de assentamentos de apoio



Caso de estudo

Fase 7: exploração da obra de arte

sta



Colocação dos caixões metálicos



Descrição

- Caixões metálicos executados em oficina
- Colocados em obra após construção dos pilares, encontros e torre de montagem, e respectivas fundações
- Geometria, bem como as características mecânicas bem determinada.
- Apenas sujeitas a peso próprio do caixão
- Não solidarizadas entre si pelo tabuleiro: comportamento independente

Cada troço funciona como simplesmente apoiado, sem influência de assentamentos de apoio

Betonagem do tramo central



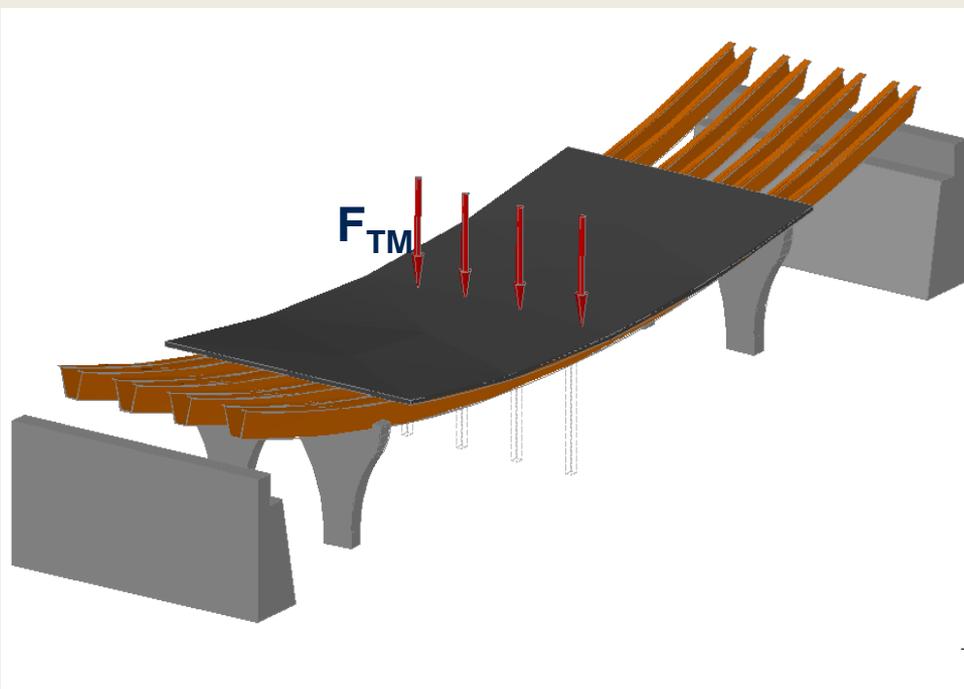
Descrição

- Betonagem após solidarização dos caixões metálicos
- Utilização de moldes perdidos, pré-lajes
- Funcionamento de viga contínua
- Cargas no vão intermédio originam rotações nas secções sobre os pilares e aliviando/anulando as reacções nos encontros
- Assentamentos de apoio dos pilares (deformação / assentamento) minoram efeito
- A betonagem não tem que se limitar ao tramo central

Nesta fase podem já surgir deslocamentos ascendentes (não restringidos) nos apoios dos encontros

Retirada da torre de montagem

Descrição



- Após o endurecimento do betão o corpo central funciona já como estrutura mista de aço-betão
- Tabuleiro tem agora a resistência e rigidez suficientes para vencer o vão entre pilares
- Retirada das torres de montagem corresponde ao alívio das forças de sustentação até que estas se anulem
- Campo elástico determinado pela actuação de uma força inversa à força F_{TM} que a sustentara (reacções)

Deslocamentos ascendentes nos apoios dos encontros: estrutura funciona como simplesmente apoiada nos pilares e os vãos de extremidade como consolas

Betonagem do tabuleiro entre encontro e pilares

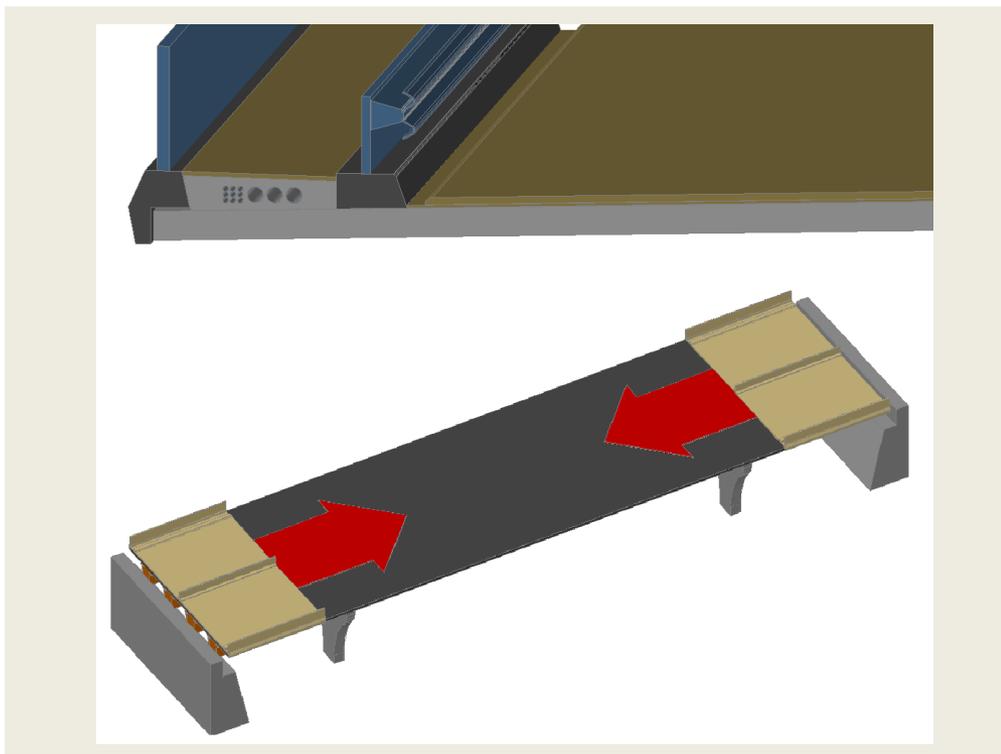


Descrição

- Ajustamento dos aparelhos de apoio provisórios sobre os encontros e, apenas então, betonagem dos tramos de extremidade
- Troços de extremidade funcionam como simplesmente apoiados mas com ligações de continuidade ao tabuleiro já construído

Ajustamento dos aparelhos de apoio provisórios sobre encontros permite limitar os momentos negativos sobre os pilares

Revestimentos e acabamentos



Descrição

- Trabalhos de revestimentos e acabamentos, ou sejam camadas de revestimento e de desgaste nas faixas viárias e passeios, guardas de segurança e guarda-corpos nos bordos
- Para evitar que longarinas descolem dos aparelhos de apoio provisórios a operação deverá começar obrigatoriamente das extremidades para o meio vão

É importante assegurar um correcto procedimento construtivo

Introdução do estado de coacção



Descrição

- Utilização de macacos hidráulicos calibrados
- Dotados de manómetros com sensibilidade capaz de medir com alguma precisão (erros inferiores a 5%) o valor das forças instaladas
- Acertam-se as tolerâncias para implantação dos aparelhos de apoio
- Elevação, aparelho a aparelho, da base das longarinas para instalação do aparelho de apoio na sua posição definitiva

A elevação de um dado aparelho de apoio conduz a alterações das reacções nos restantes

Objectivos

- Garantir funcionamento eficiente e durabilidade dos aparelhos de apoio:
 - as reacções máximas inferiores à sua capacidade de serviço
 - reacções mínimas ser inferiores a 10% da sua capacidade
- Garantir funcionamento estrutural adequado (evitar consolas entre pilares e encontros)

Condições

- Satisfação do sistema de desigualdades :

$$\{R\}^4 + \{R\}^5 + 1,10 \{R\}^6 + \{R\}^7_{max} \leq \{S\}$$

$$\{R\}^4 + \{R\}^5 + 0,90 \{R\}^6 + \{R\}^7_{min} \geq 0.10 \{S\}$$

$\{S\}$: capacidade nominal do aparelho)

$\{R\}^n$: reacção sobre encontro na fase n

- Os deslocamento a impor determinados com base na matriz de flexibilidade condensada:

$$\{\delta\}_{max} = [F] \cdot \{R\}_{max}$$

$$\{\delta\}_{min} = [F] \cdot \{R\}_{min}$$

O valor dos assentamentos forçados deverá garantir um intervalo das reacções nos encontros e depende do funcionamento em fase de exploração do tabuleiro

Exploração da obra de arte

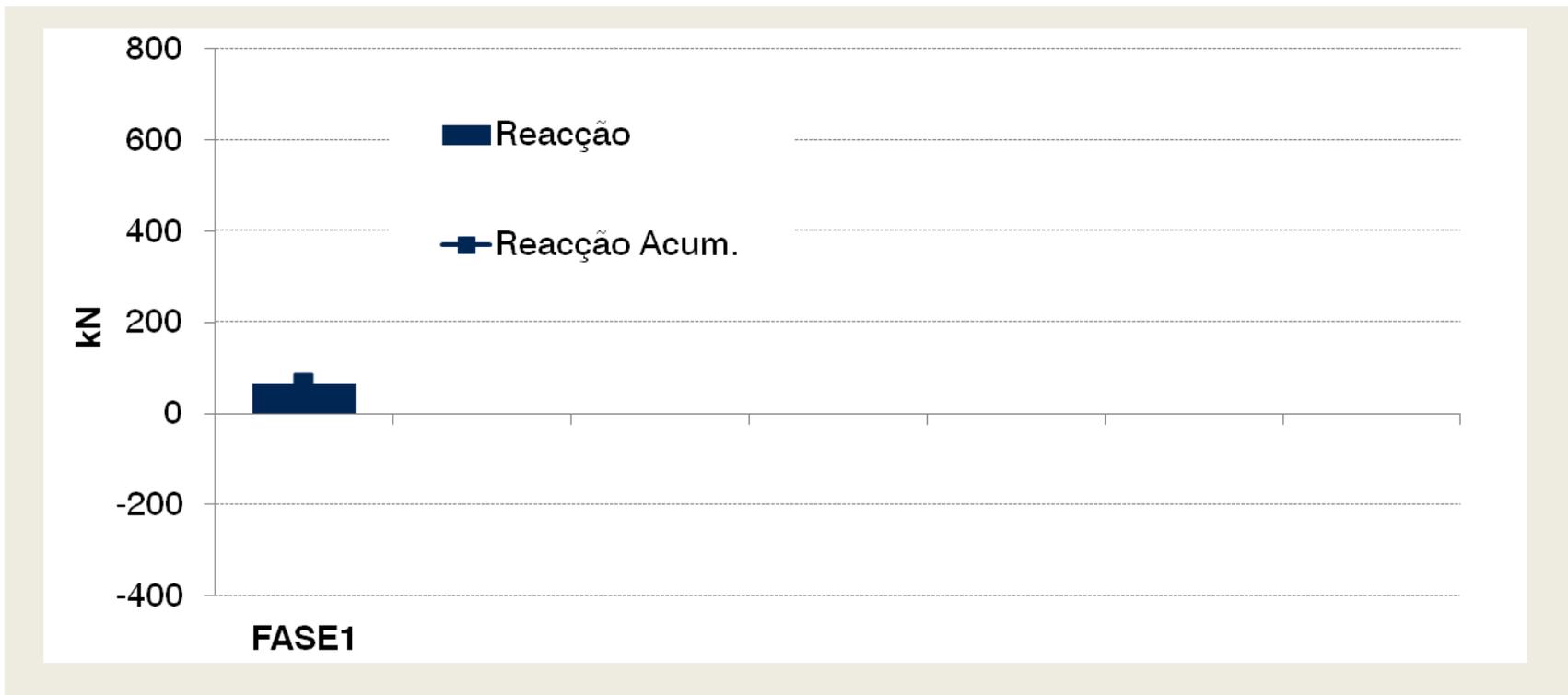


Descrição

- A estrutura completa: secção mista de aço e betão em toda a sua extensão
- Comportamento estrutural afectado pelos deslocamentos impostos
- É necessário circular a sobrecarga viária, obtendo-se envolventes de esforços, deslocamentos e reacções
- As tensões e deslocamentos dependem da “história” da estrutura

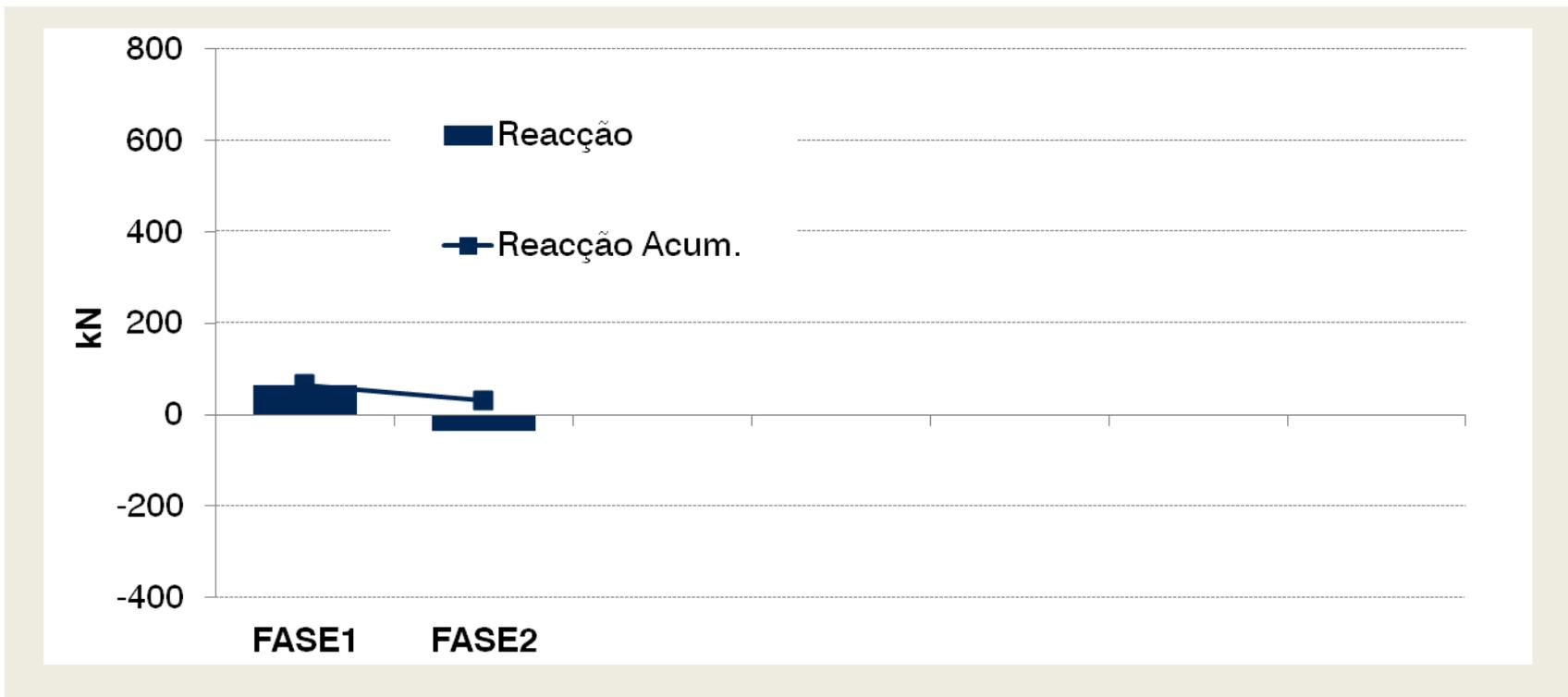
A análise estrutural e a respectiva verificação da segurança deve ser feita para cada fase e considerando a sua história (efeitos acumulados)

Reacções nos apoios dos encontros (vigas interiores)



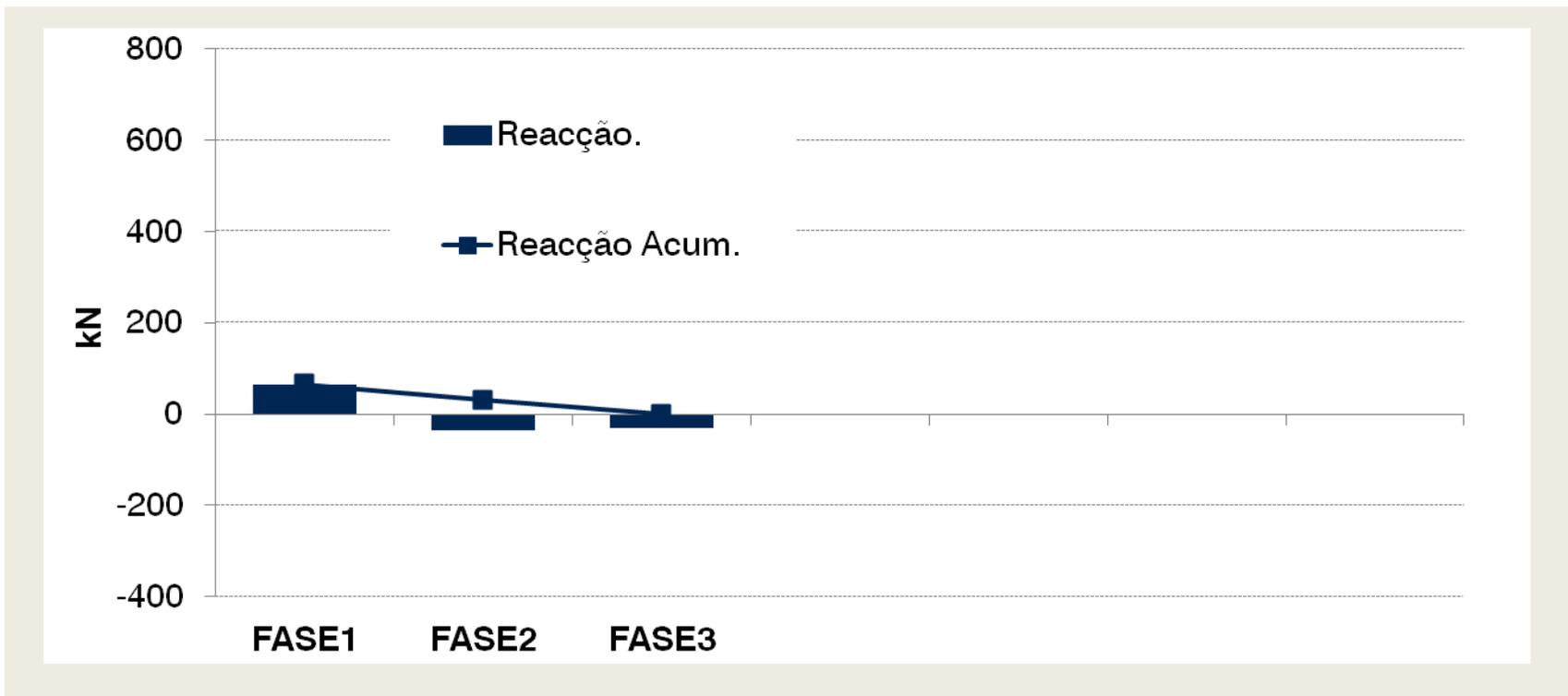
A estrutura é isostática sendo as reacções facilmente determinadas

Reacções nos apoios dos encontros (vigas interiores)



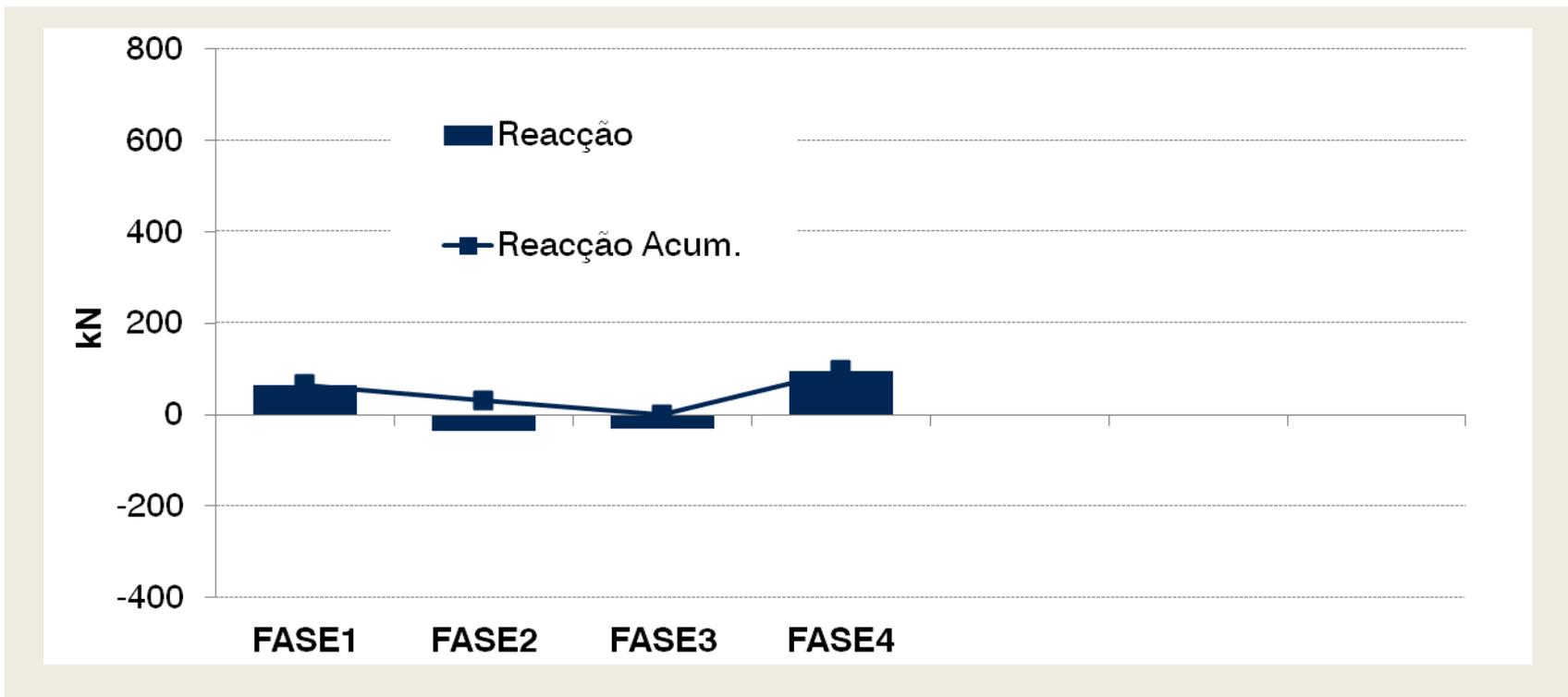
As reacções nos apoios de extremidade são negativas, embora não haja ainda “descolamento” dos apoios, dadas as reacções devido à fase anterior

Reacções nos apoios dos encontros (vigas interiores)



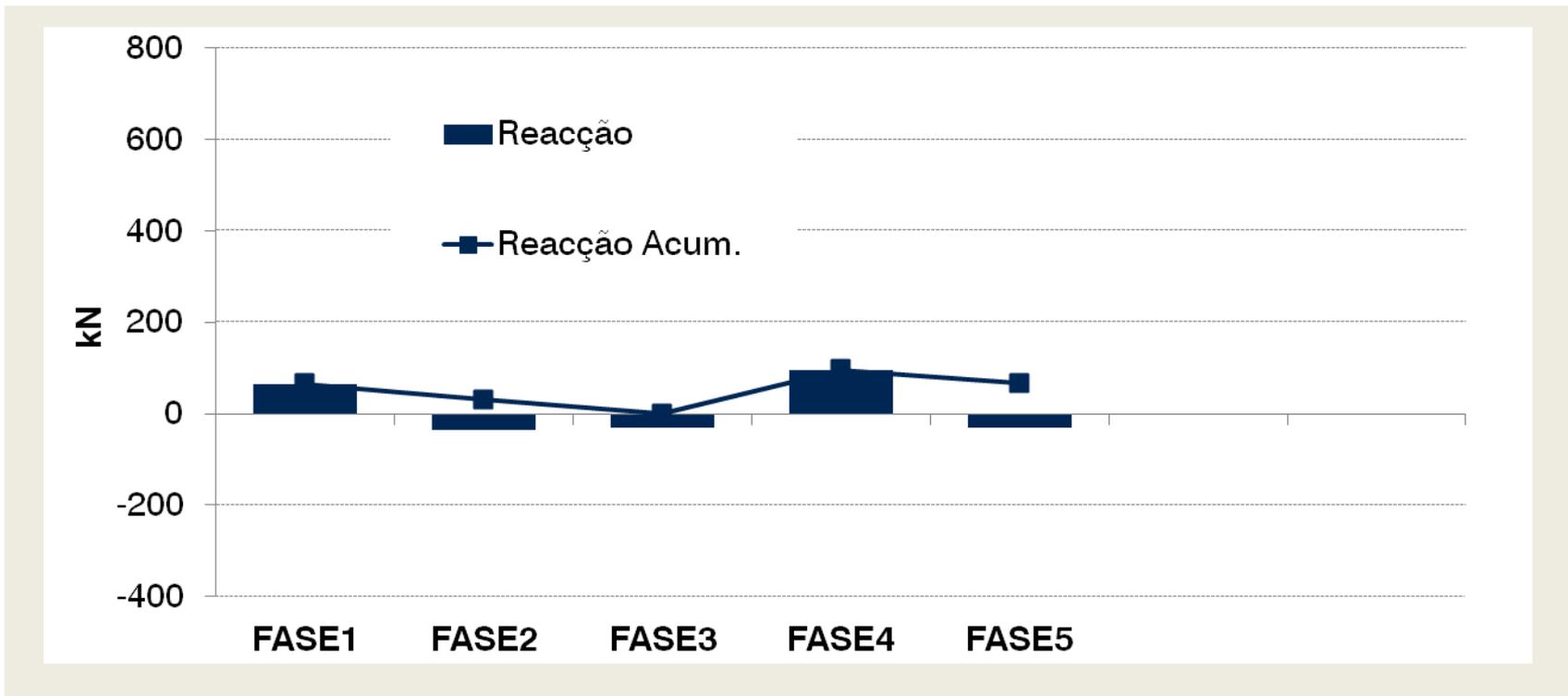
Longarinas levantam-se dos apoios nos encontros, anulando assim as reacções

Reacções nos apoios dos encontros (vigas interiores)



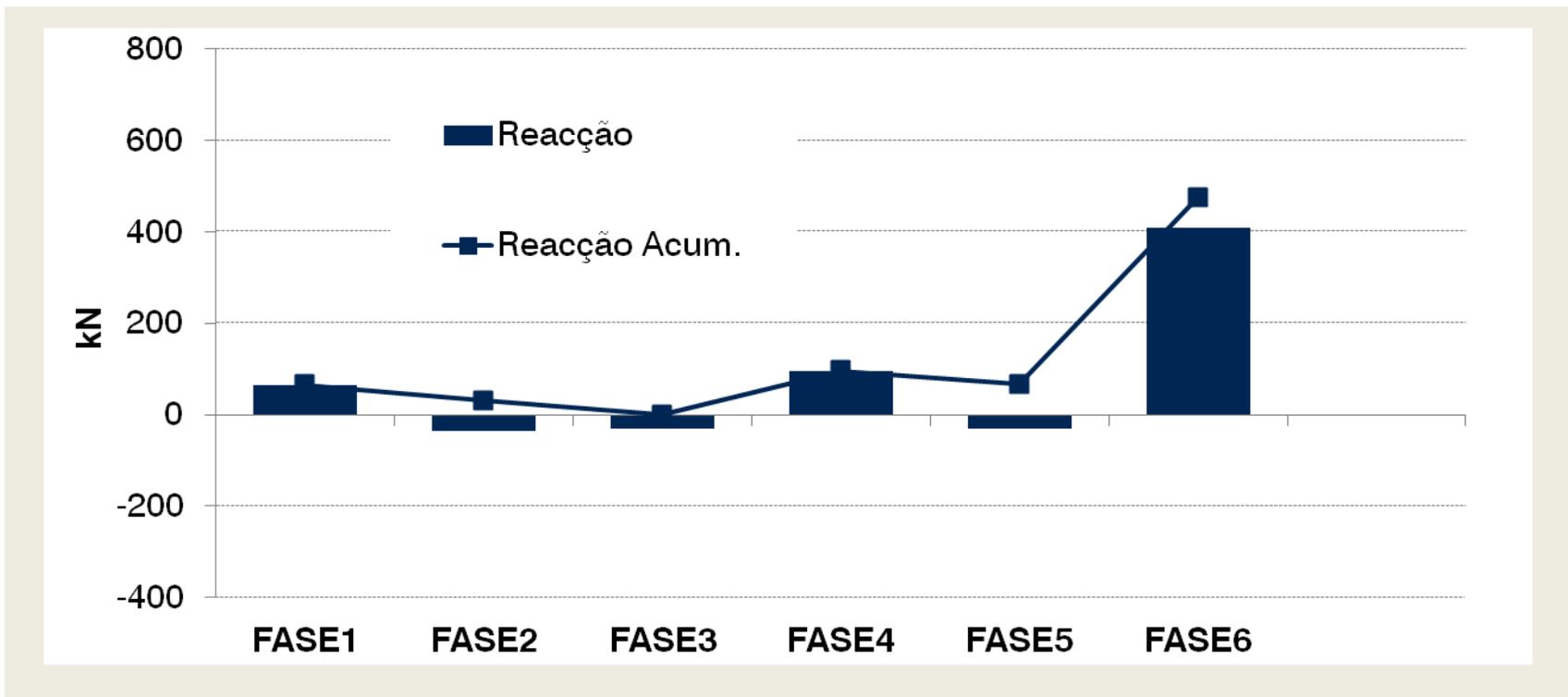
Elevação dos apoios sobre encontros conduz a reacções positivas

Reacções nos apoios dos encontros (vigas interiores)



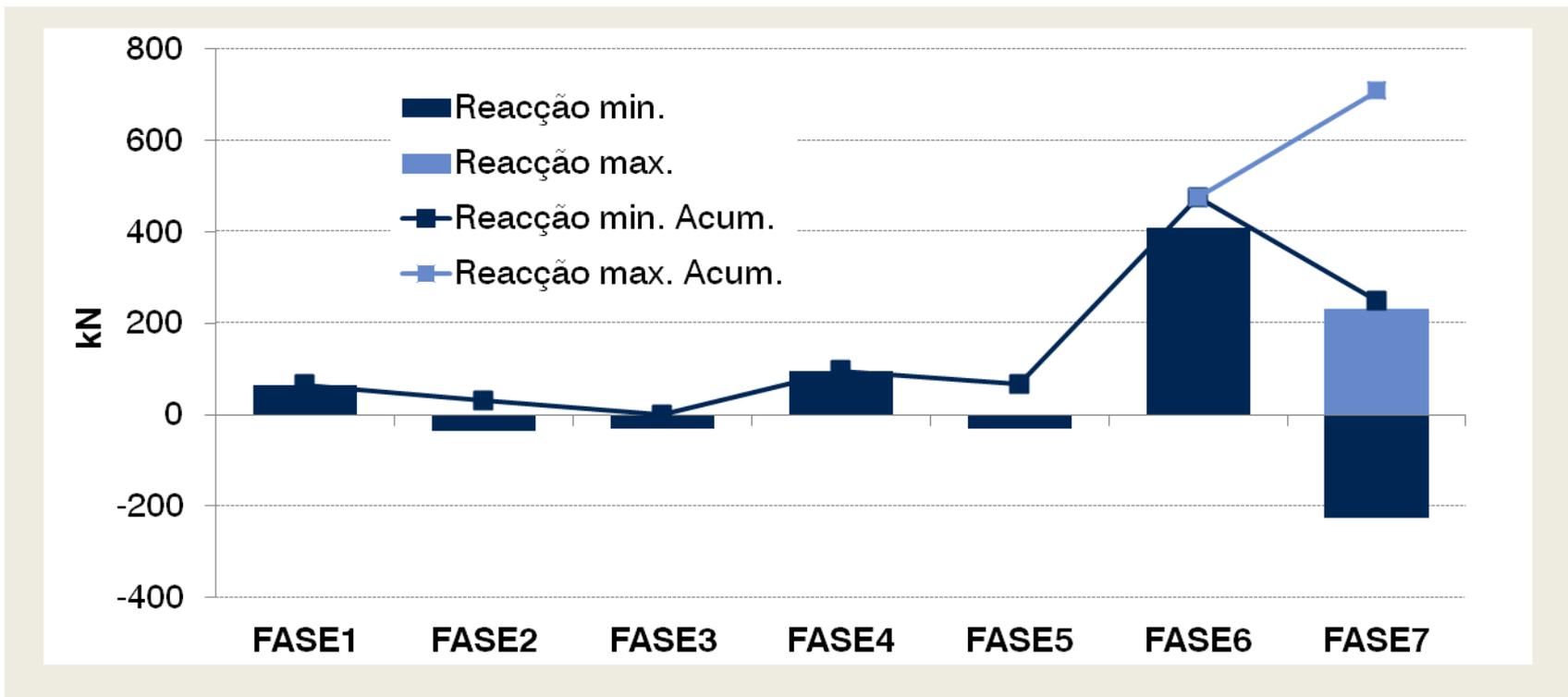
Reacções para esta fase negativas mas não sem inversão do sinal das reacções totais

Reacções nos apoios dos encontros (vigas interiores)



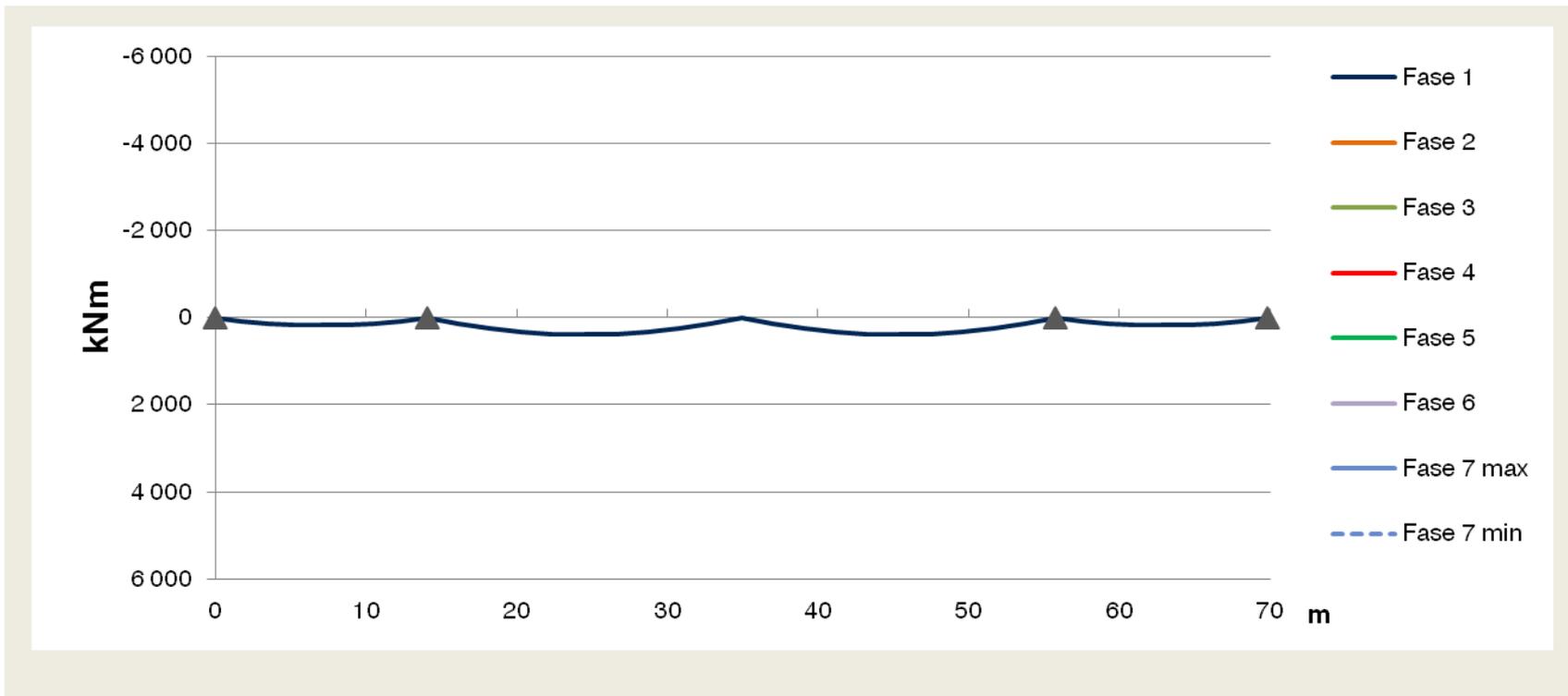
As forças a aplicar nos macacos equivalentes às reacções nos apoios dos encontros

Reacções nos apoios dos encontros (vigas interiores)



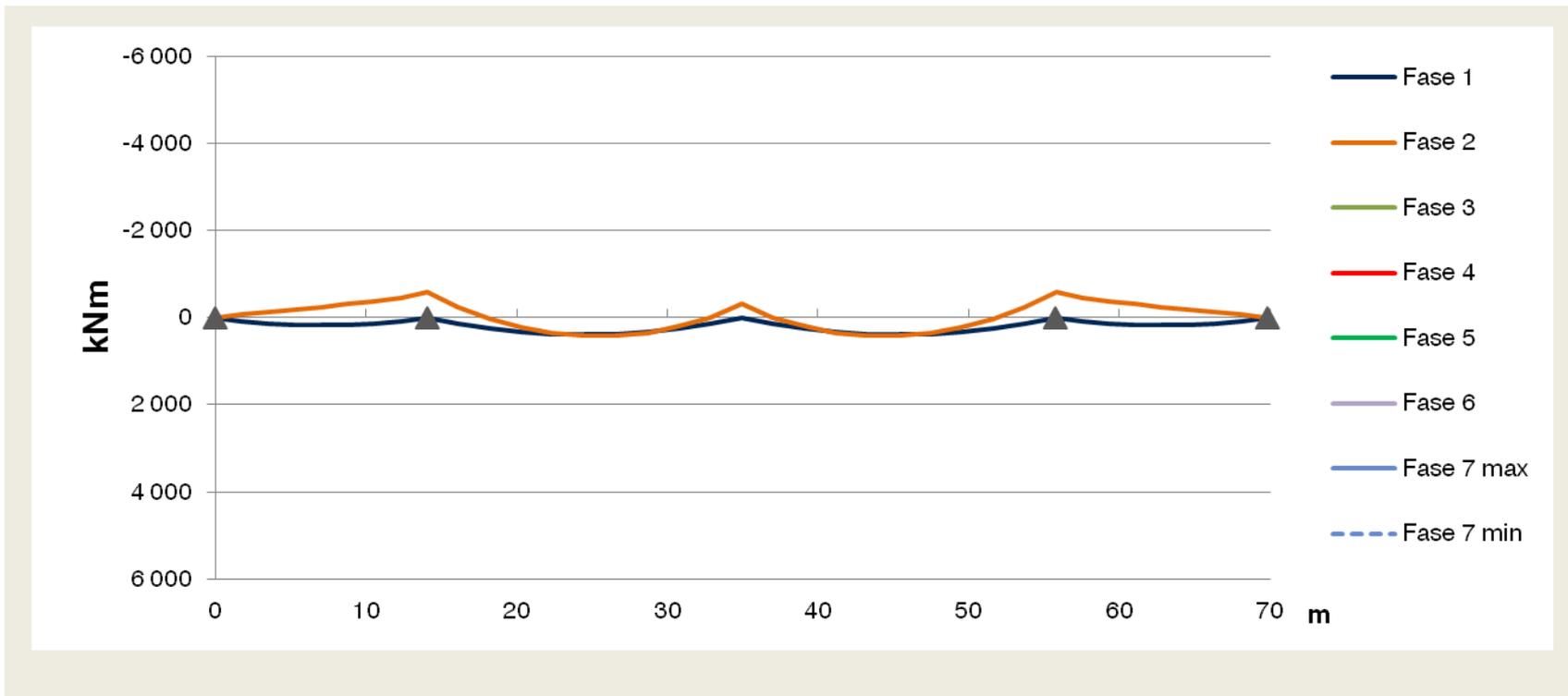
As reacções máximas a mínimas respeitam os limites dos aparelhos de apoio

Momentos flectores nas vigas interiores



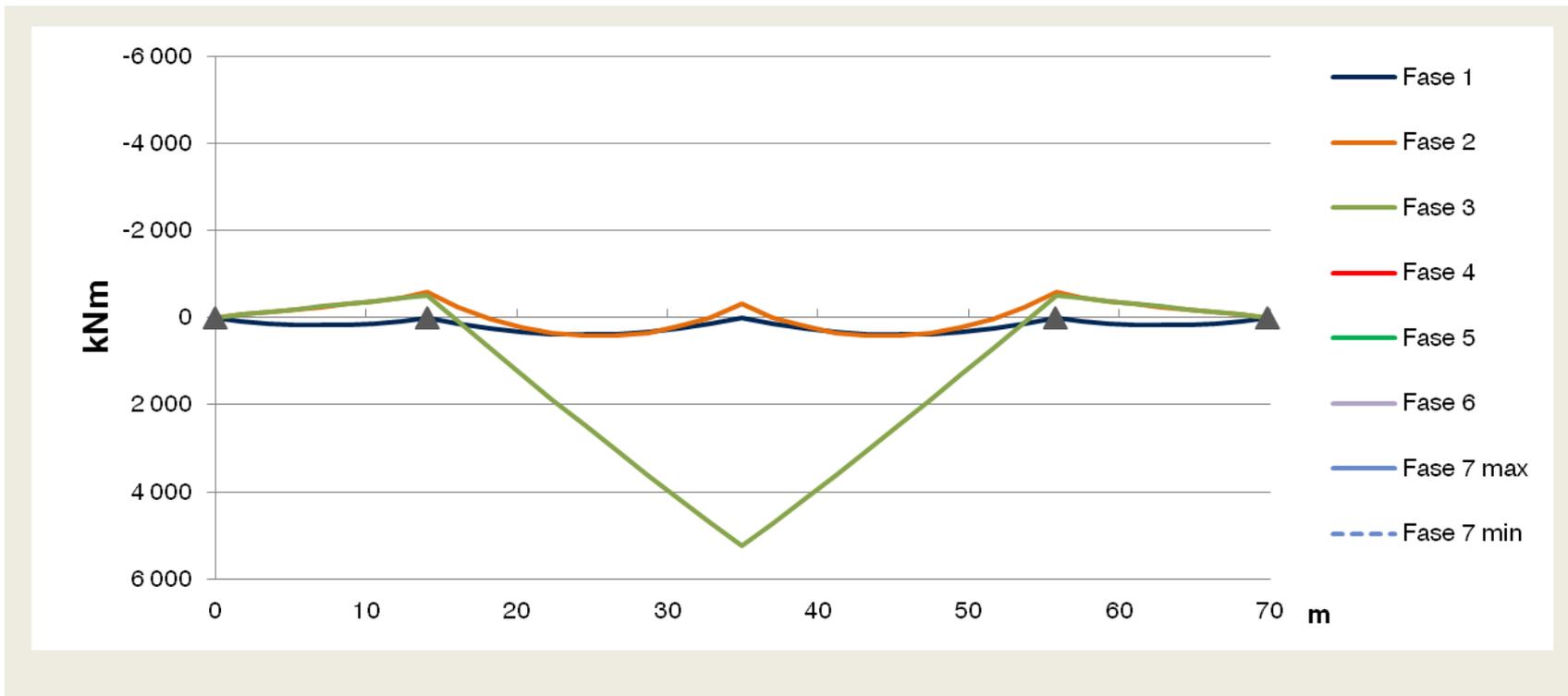
Nesta fase cada um dos tramos funciona como simplesmente apoiado

Momentos flectores nas vigas interiores



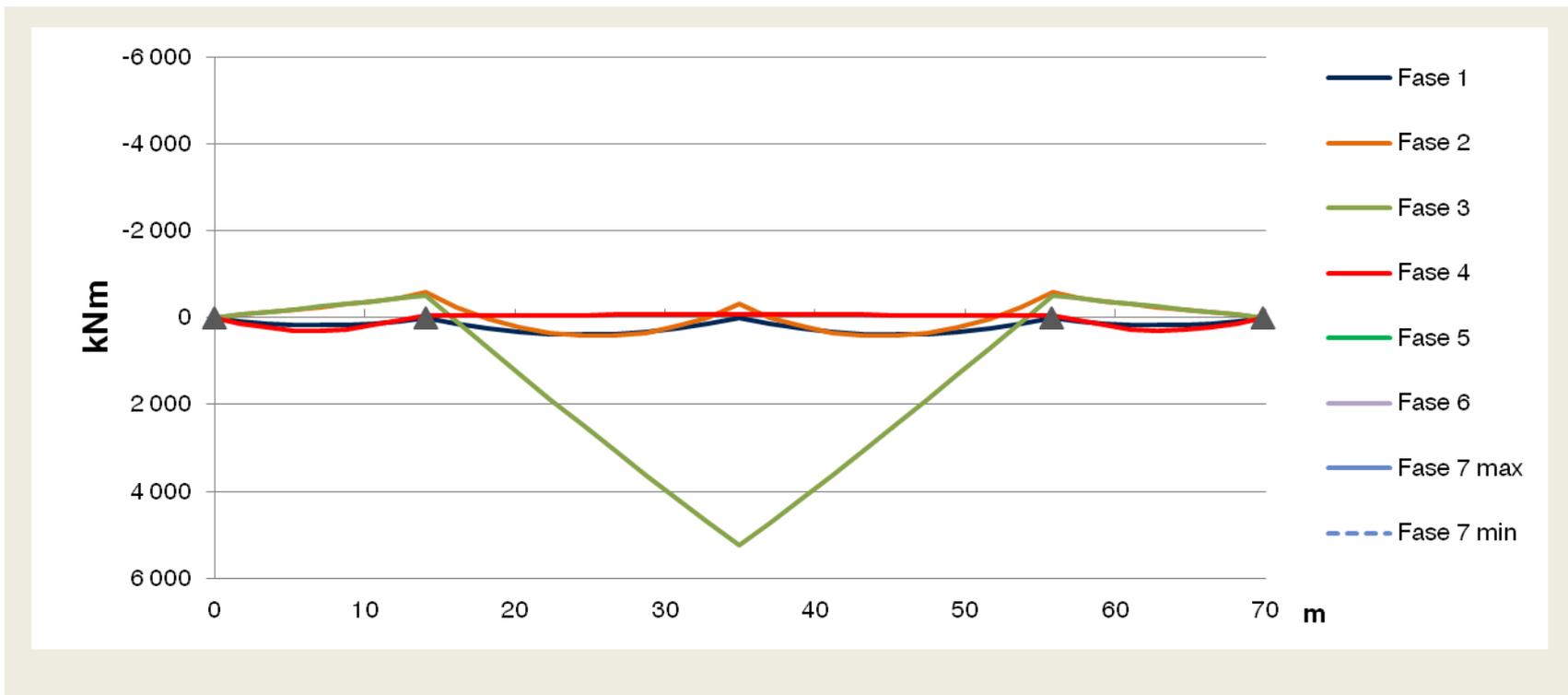
Na fase 2 as vigas já têm continuidade

Momentos flectores nas vigas interiores



Na fase 3 é eliminado o apoio central e a força equivalente a meio vão conduz a um elevado valor os M^+ a meio vão

Momentos flectores nas vigas interiores



A sequência construtiva adoptada permite limitar superiormente os M^- sobre os pilares

Momentos flectores nas vigas interiores

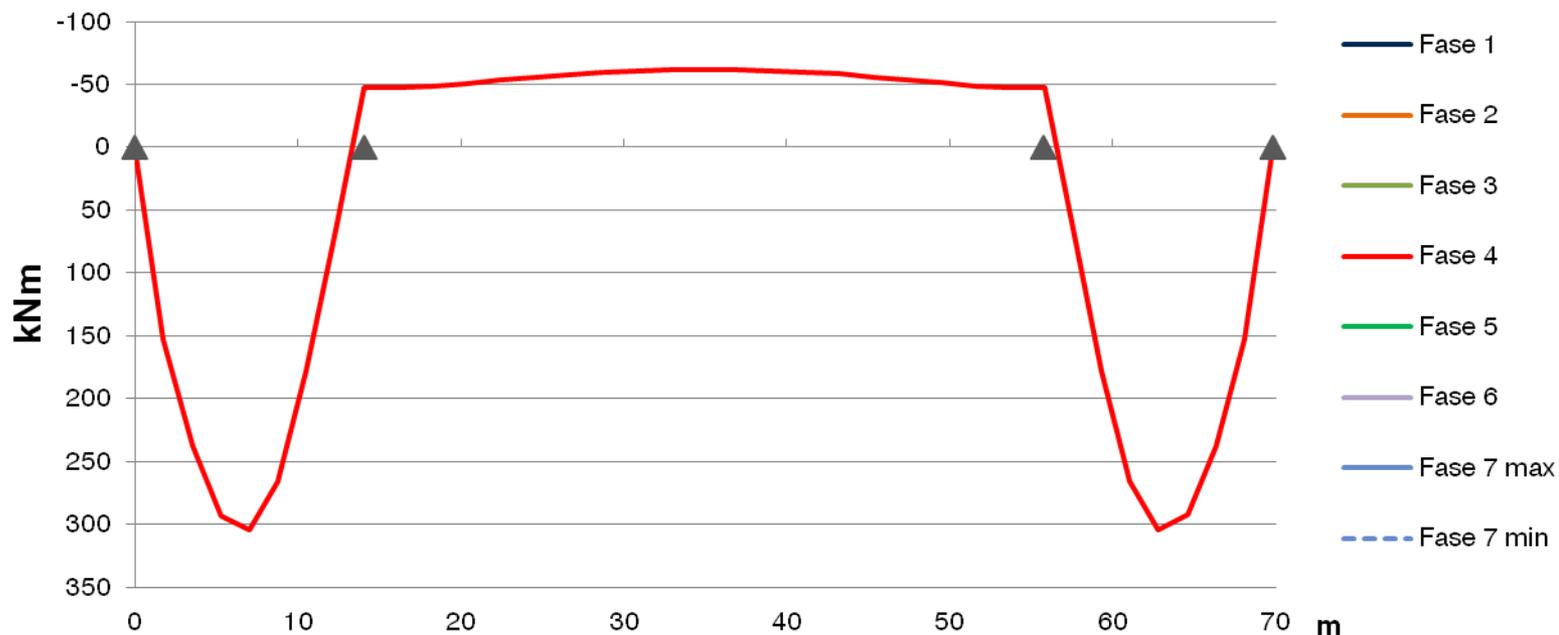
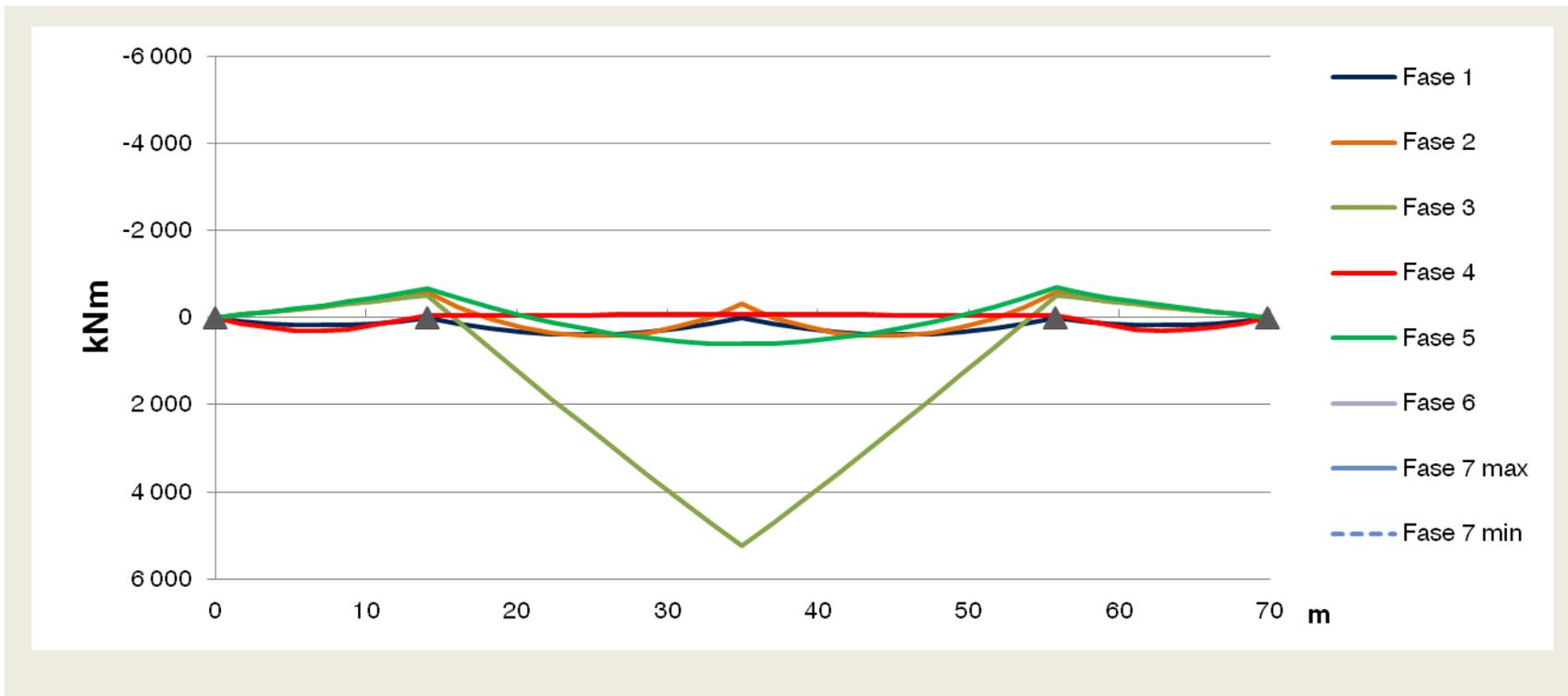


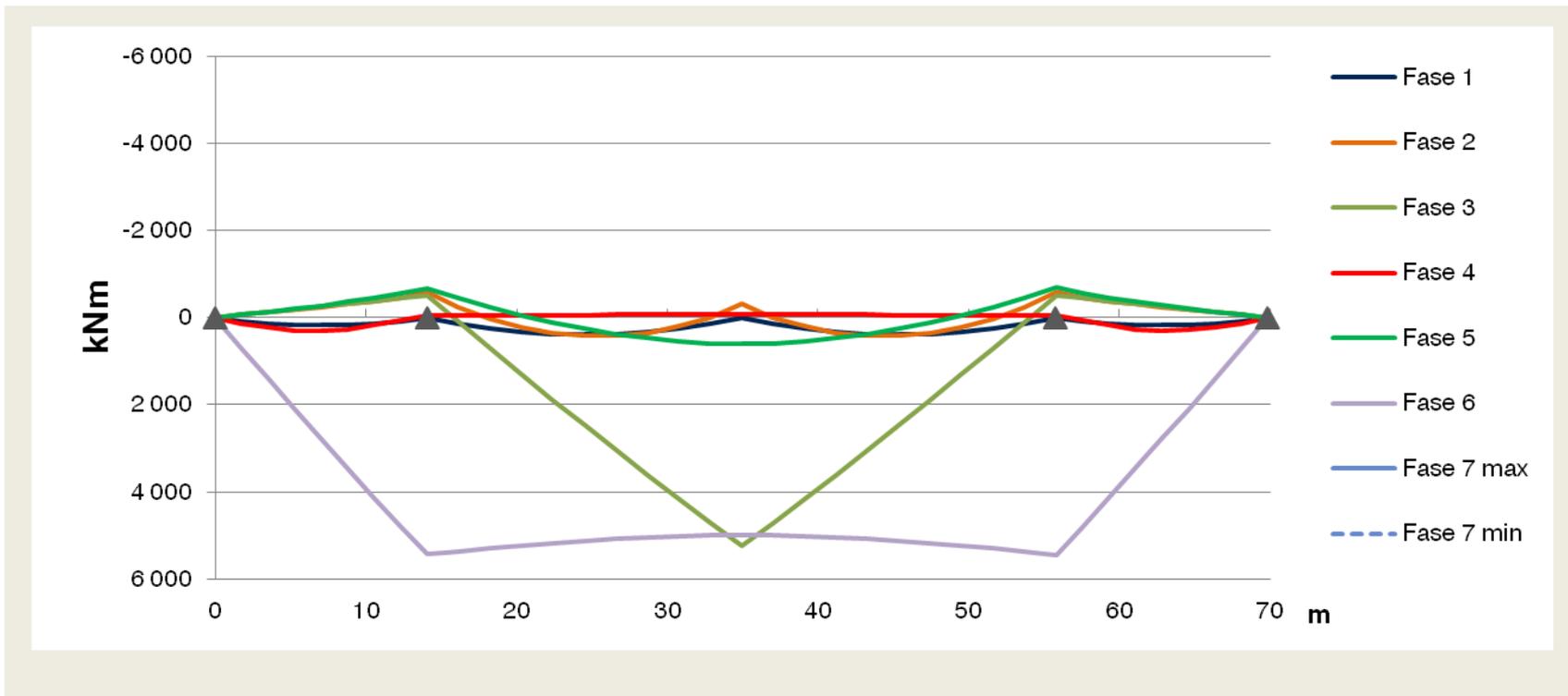
Diagrama de momento corresponde praticamente a vigas simplesmente apoiadas

Momentos flectores nas vigas interiores



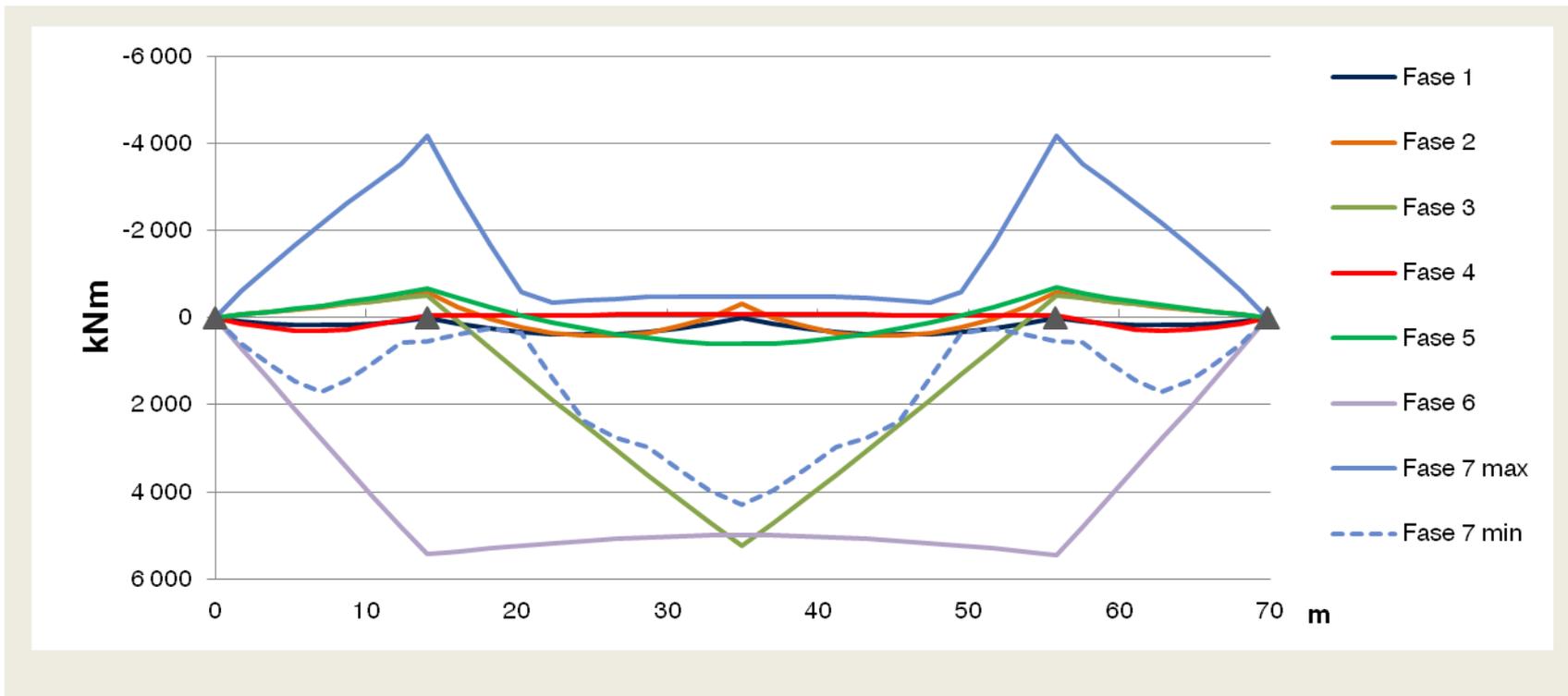
Considerando a fase 5 isoladamente existem reacções negativas nos vãos de extremidade, aumentando os M^- sobre os pilares e reduzindo os M^+ a meio vão

Momentos flectores nas vigas interiores



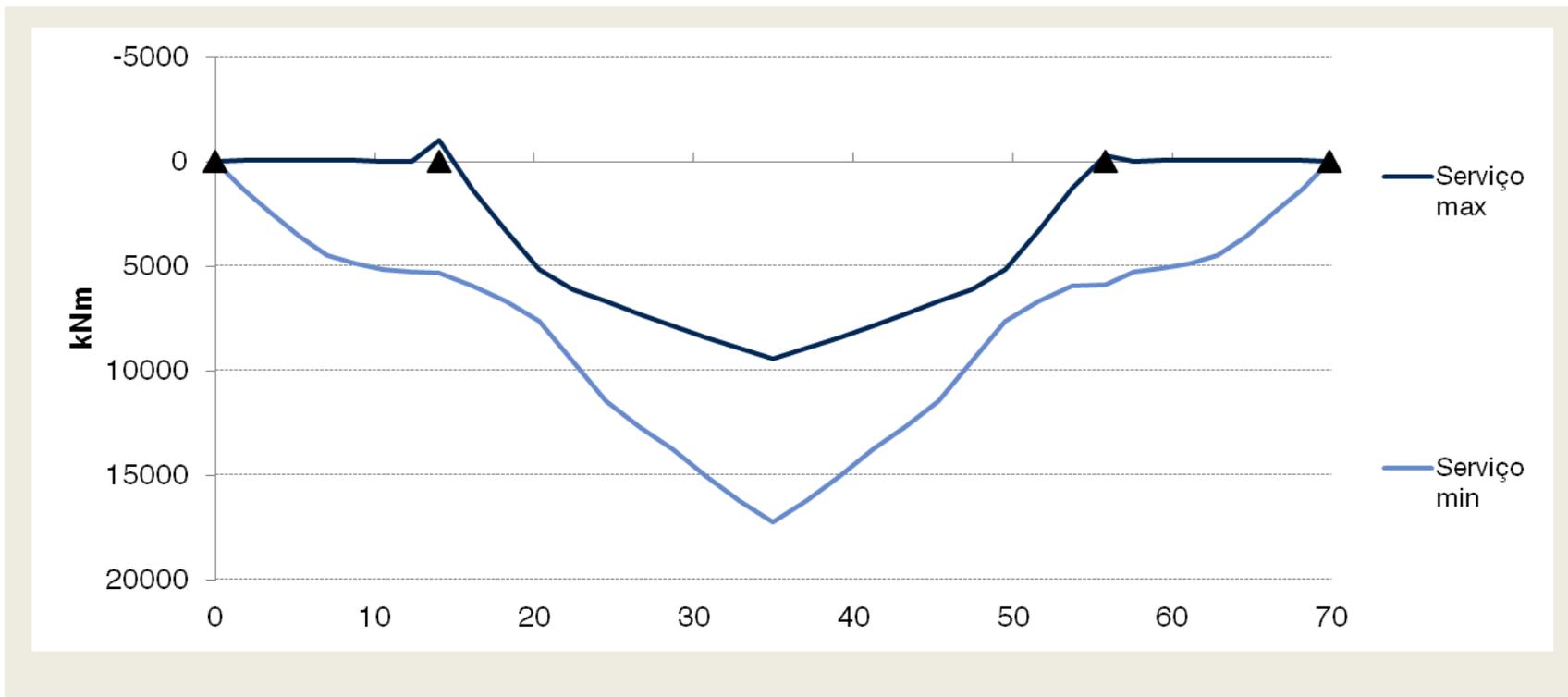
Os momentos a meio vão não são constantes pois existe redistribuição de esforços entre as vigas interiores e exteriores

Momentos flectores nas vigas interiores



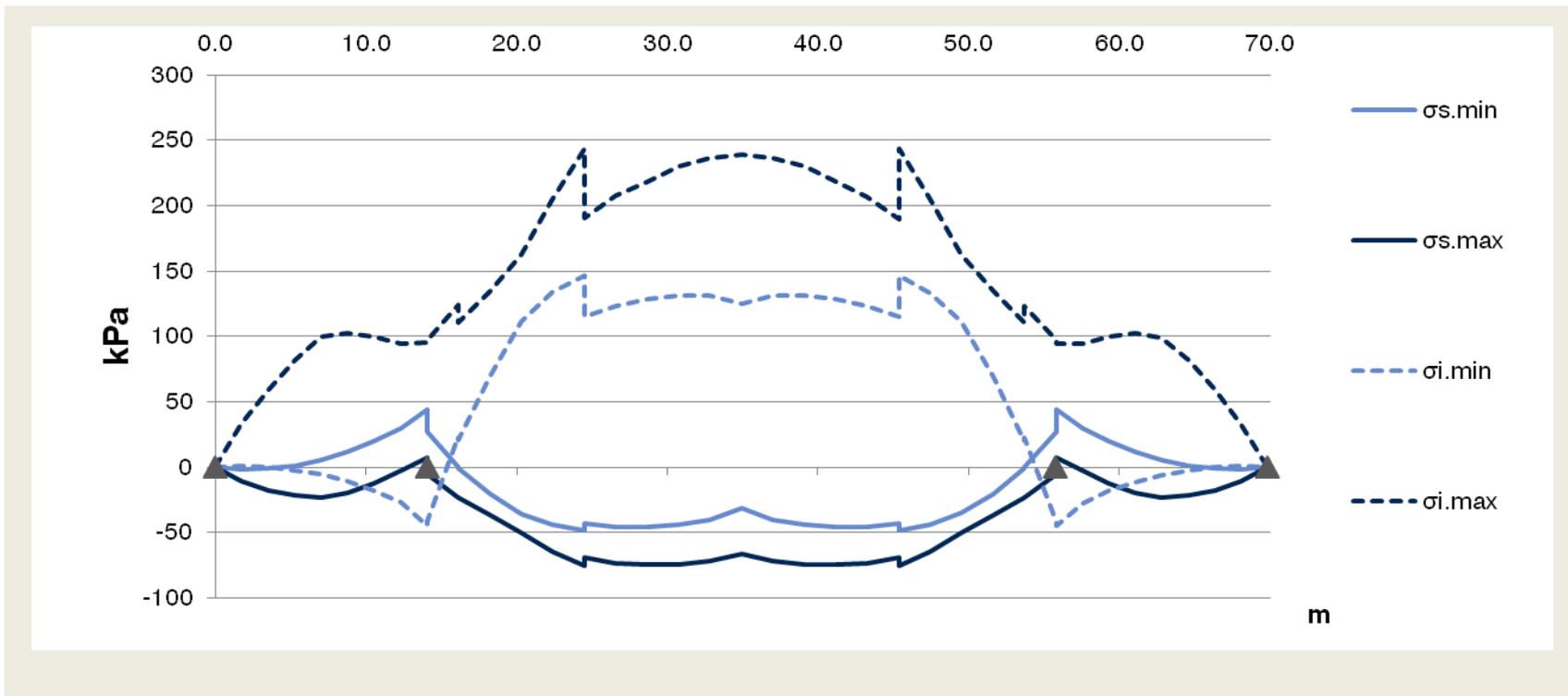
A posição das cargas variáveis vai determinar a envolvente de os M^+ e M^-

Momentos flectores nas vigas interiores



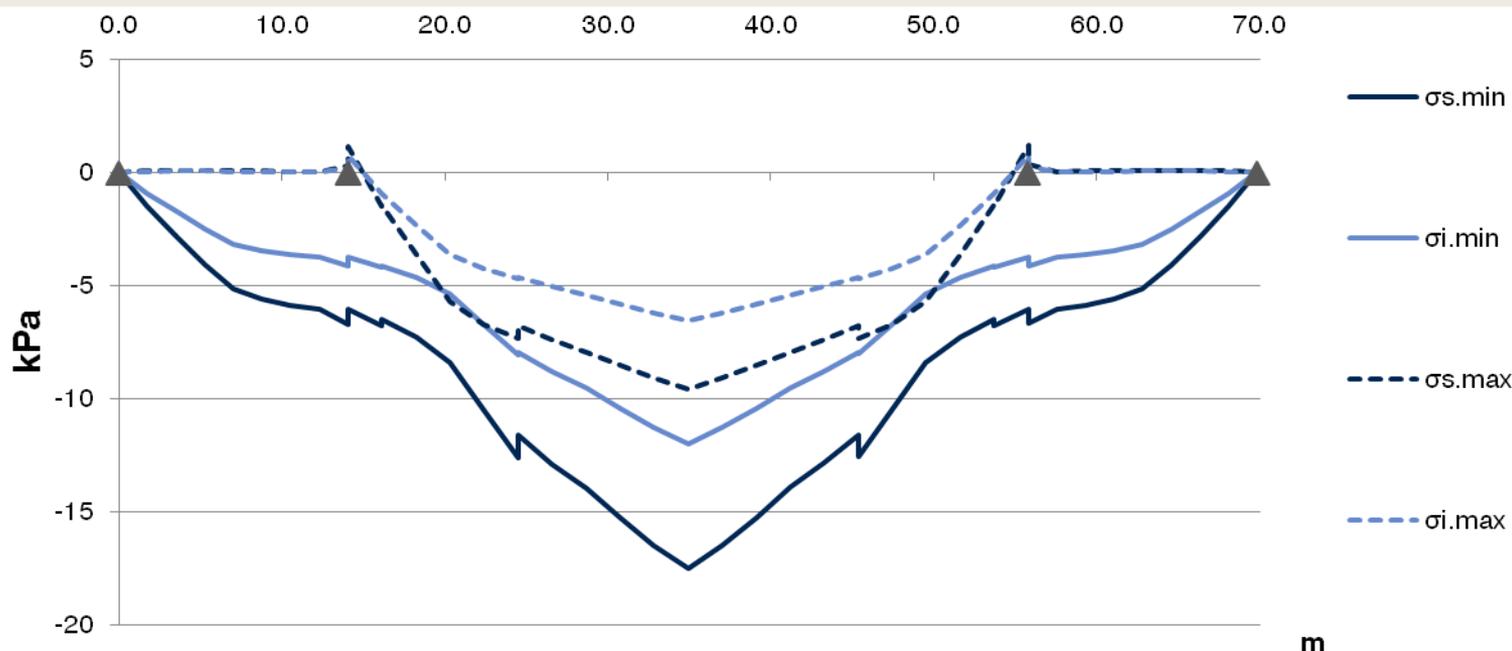
Os momentos flectores finais serão função das acções existentes e dos deslocamentos impostos

Tensões no caixão das vigas interiores



As tensões no final desta fase correspondem às tensões em serviço e são calculadas tendo em conta a “história” da estrutura

Tensões no tabuleiro na zona das vigas interiores



O tabuleiro de betão está praticamente sempre comprimido, conduzindo a uma taxa de armadura baixa

Obras de arte de secção mista: vantagens e desafios

Abordagem proposta: introdução de estados de coacção com caso simplificado

Caso de estudo: viaduto sobre auto-estrada em funcionamento

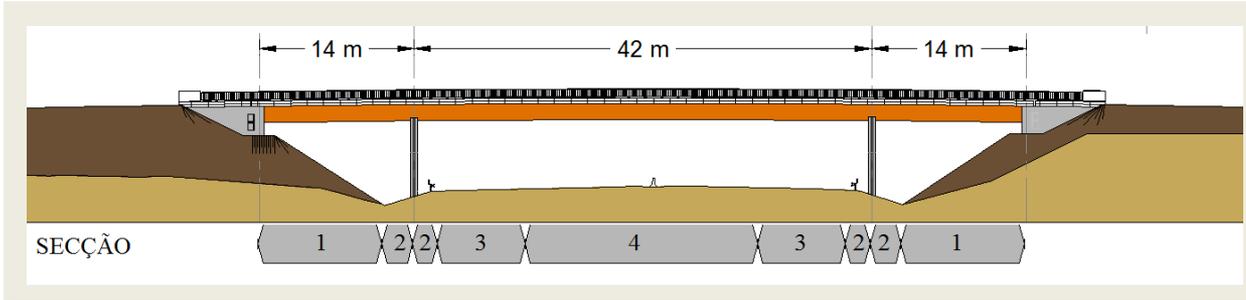
Análise comparativa com solução corrente

Conclusões

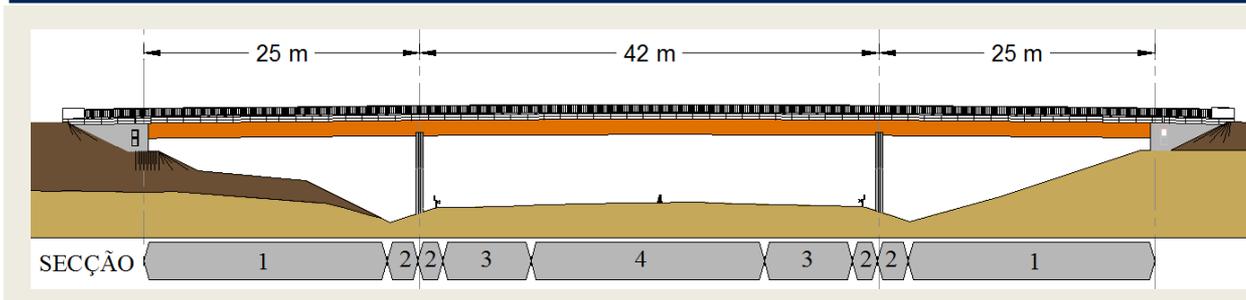
Critérios

- Mesmo vão central (via a alargar) : 42m
- Compressão mínima (e máxima) nos aparelhos de apoio assegurada
- Secções idênticas, apenas variando a espessura das chapas do caixão

Solução proposta com 70m: 14 + 42 + 14

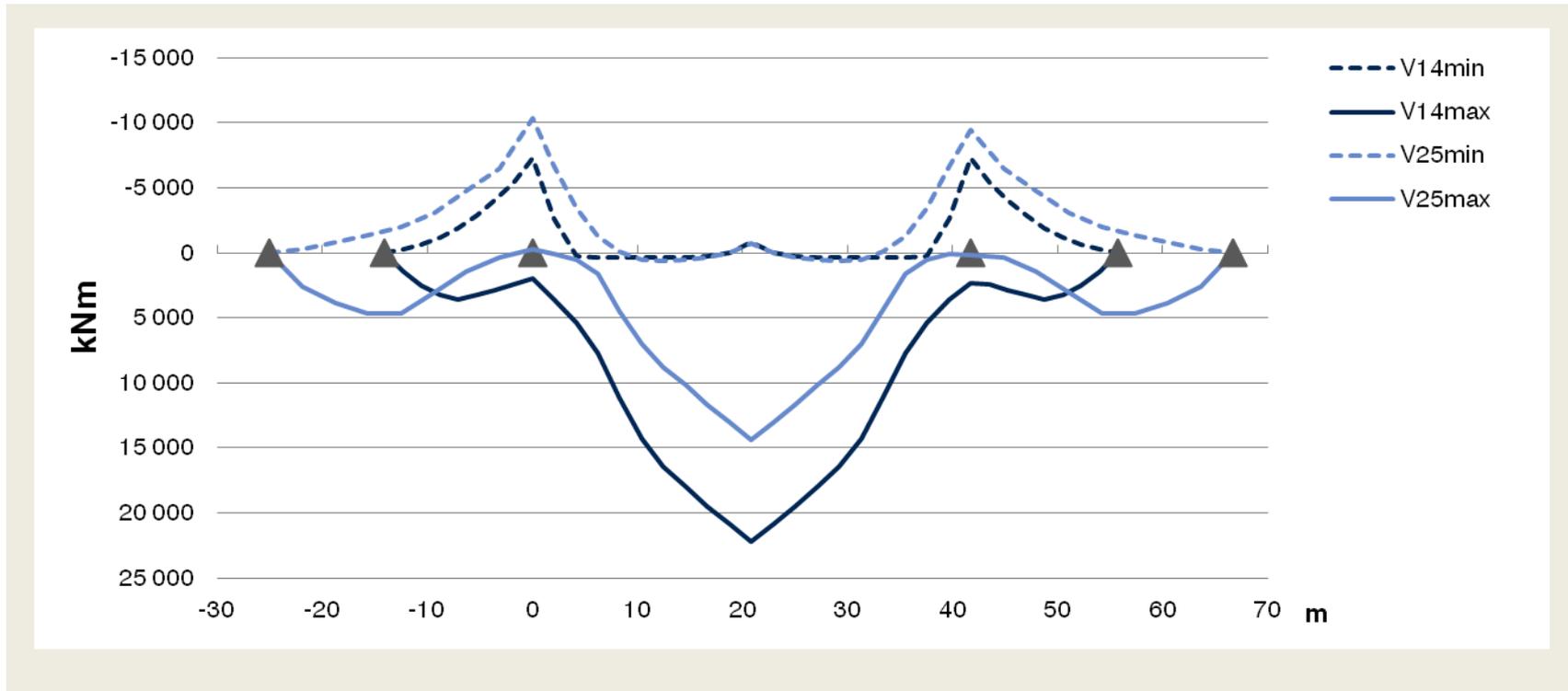


Solução corrente com 90m: 25 + 42 + 25



Para uma solução corrente, a necessidade de evitar o “descolamento” dos aparelhos de apoio conduziria a um comprimento total da obra de arte 24% superior

Envolvente de momento flectores (média das vigas)



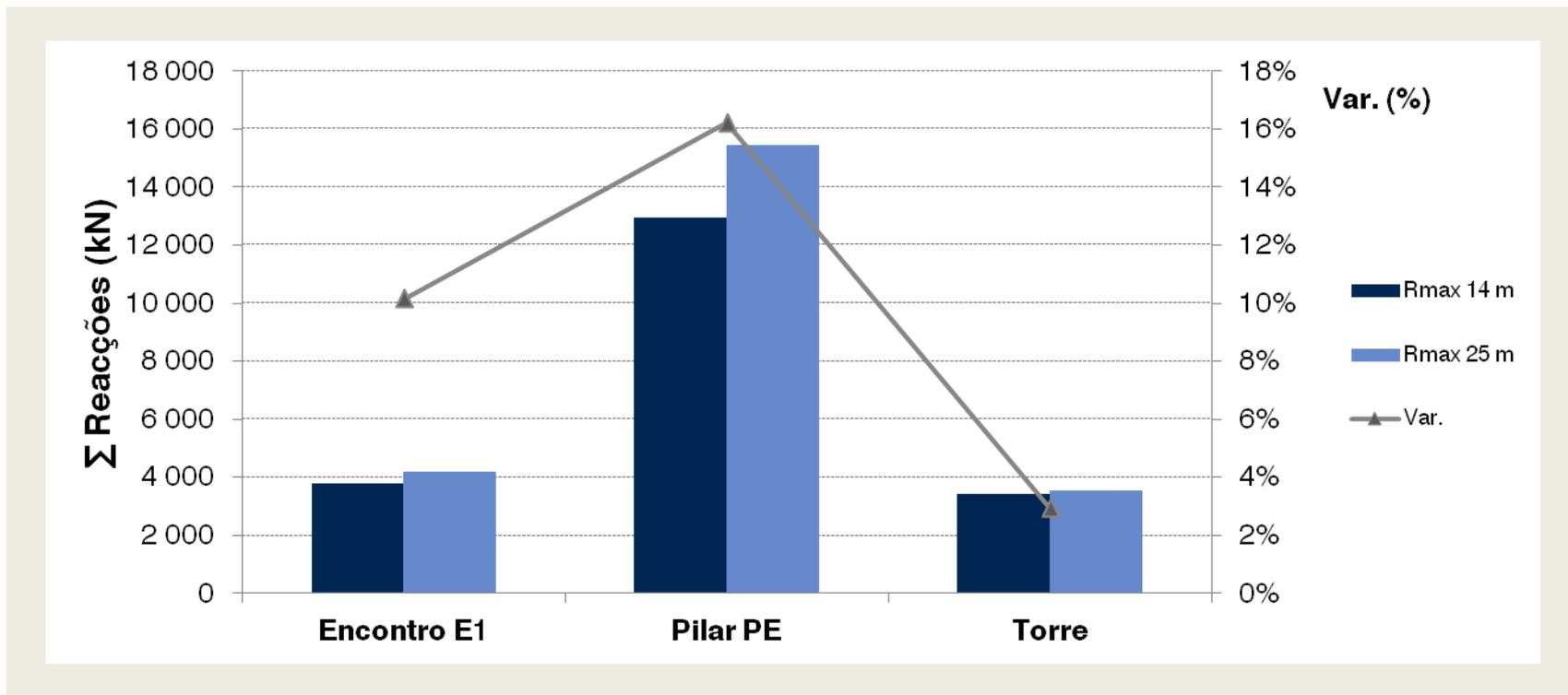
A solução com 14 metros conduz a maiores M^+ no vão central mas menores M^- sobre os apoios ...

Secções dos caixões metálicos e taxas de armadura

Solução	Secção	Espessura das chapas (mm)			Taxas de armadura (kg/m ³)
		Banzo inferior (a=800mm)	Almas (h=1500mm)	Abas (b=500 mm)	
L _{ext} =14 m	1	20	15	20	470
	2	20	15	20	
	3	25	15	20	
	4	40	15	20	
L _{ext} =25 m	1	20	15	20	520
	2	20	15	20	
	3	20	15	20	
	4	25	15	20	

... o que se traduz num caixão mais pesado por metro linear no vão central mas menor taxa de armadura

Descarga nas fundações (valores característicos)



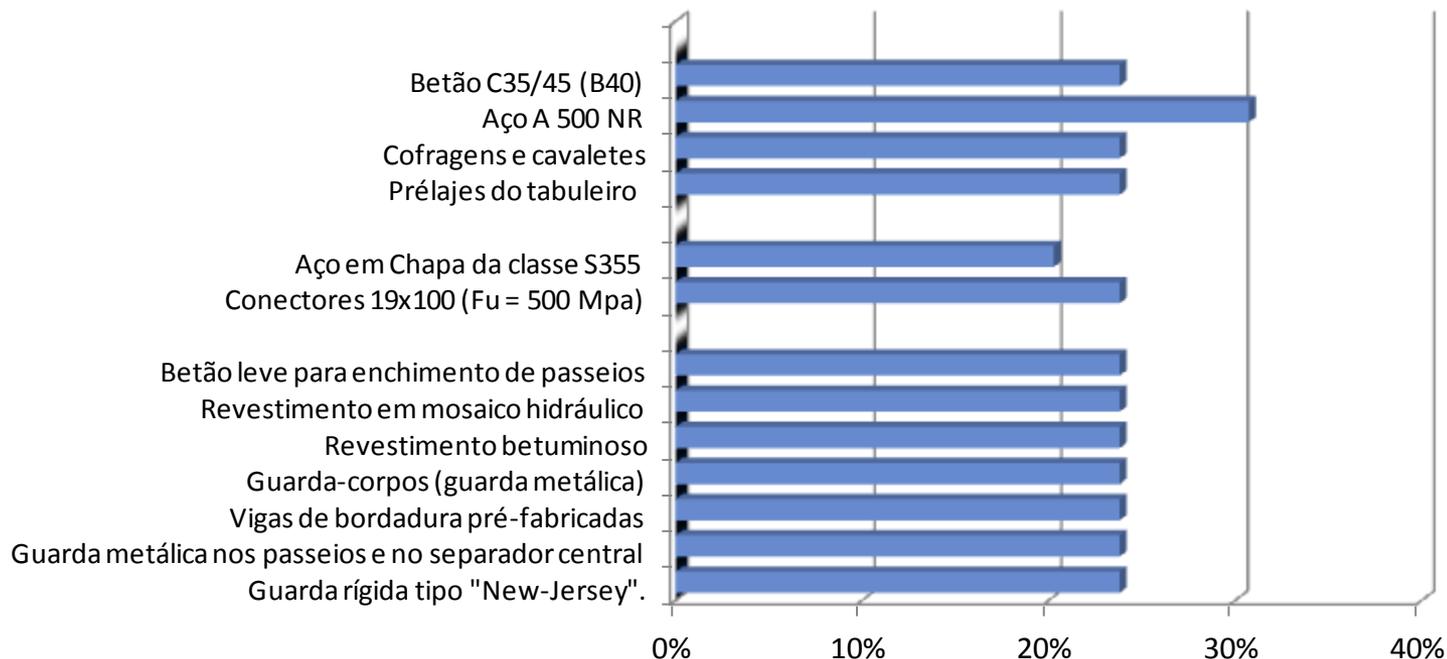
A solução proposta conduz a uma redução das descargas nas fundações e assim a um potencial de poupança considerável também nestes elementos

Comparação de quantidades divergentes (não inclui fundações)

Designação dos Trabalhos	Un	L_{ext}=14 m	L_{ext}=25 m
Tabuleiro: elementos de betão armado			
Betão C35/45 (B40)	m ³	182	239
Aço A 500 NR	kg	122 675	177 094
Cofragens e cavaletes	m ²	34	44
Prélajes do tabuleiro	m ²	1 108	1 454
Vigas Caixaão metálico			
Aço em Chapa da classe S355	kg	233 835	293 314
Conectores 19x100 (Fu = 500 Mpa)	unid.	2 664	3 496
Revestimentos e acabamentos			
Betão leve para enchimento de passeios	m ³	21	28
Revestimento em mosaico hidráulico	m ²	231	304
Revestimento betuminoso	m ²	1 094	1 435
Guarda-corpos (guarda metálica)	m	175	230
Vigas de bordadura pré-fabricadas	m	140	184
Guarda metálica nos passeios e no separador central	m	175	230
Guarda rígida tipo "New-Jersey".	m	70	92

Como esperado a maior redução encontra-se na armadura do tabuleiro e a menor no aço do caixaão

Redução de quantidades com redução do vão (%)



Independentemente do peso relativo de cada artigo, função dos preços praticados em cada mercado, é possível balizar a redução do custo do tabuleiro entre os 20% e 31%.

Obras de arte de secção mista: vantagens e desafios

Abordagem proposta: introdução de estados de coacção com caso simplificado

Caso de estudo: viaduto sobre auto-estrada em funcionamento

Análise comparativa com solução corrente

Conclusões

1. A concepção estrutural de **secção mista aço-betão** proporciona uma solução de **fácil e rápida execução, limitando a interrupção** de vias em serviço
2. A imposição de um **estado de coacção** permite **reduzir** os vãos de extremidade e assim o **comprimento total** das obras de arte;
3. Aplicação em obra **não implica trabalhos altamente especializados** mas a simples utilização de macacos hidráulicos devidamente calibrados e dotados de manómetros adequados;
4. Encurtar vãos extremos pode tornar a **solução viável** em situações em que existam **condicionalismos externos**
5. Redução do comprimentos pode conduzir a **economias** substanciais no tabuleiro, no caso em estudo **entre 20% e 31%** (tipicamente 80% do custo total)

É assim importante sensibilizar os decisores quanto às vantagens de soluções inovadoras e à sua aplicabilidade em qualquer parte do Mundo.

- A todos os presentes
- Aos Eng^o Segadães Tavares e Eng^o Manuel Pereira
- À BRISA que aceitou o desafio de colocar em prática a solução proposta