



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de
Engenharia

Dissertação em estruturas - Mestrado Integrado em Engenharia Civil

José Cristiano Ferreira Moreira

Orientador: Álvaro Azevedo



Universidade do Porto

FEUP Faculdade de
Engenharia

Dissertação em estruturas - Mestrado Integrado em Engenharia Civil

PROJETO DE UMA PONTE RODOVIÁRIA ENTRE AS CIDADES DO PORTO E GAIA

José Cristiano Ferreira Moreira

Orientador: Álvaro Azevedo



Estrutura da Apresentação

- Introdução
- Descrição Geral do Projeto
- Análise e Dimensionamento
- Processo Construtivo
- Estimativa Orçamental
- Impacto Visual
- Comentário Final



Introdução - Motivação





Introdução - Motivação

“Desde há pelo menos uma década que defendemos a necessidade de lançar novas travessias entre as cidades do Porto e Gaia.”

“O tabuleiro inferior da Ponte Luís I é muito incomodo e difícil de atravessar”

Luís Filipe Menezes



Introdução - Motivação

“Desde há pelo menos uma década que defendemos a necessidade de lançar novas travessias entre as cidades do Porto e Gaia.”

“O tabuleiro inferior da Ponte Luís I é muito incomodo e difícil de atravessar”

Luís Filipe Menezes

Freixo e Arrábida têm mais trânsito do que pontes de Lisboa - **Jornal de Notícias**



Introdução - Motivação

“Desde há pelo menos uma década que defendemos a necessidade de lançar novas travessias entre as cidades do Porto e Gaia.”

“O tabuleiro inferior da Ponte Luís I é muito incomodo e difícil de atravessar”

Luís Filipe Menezes

Freixo e Arrábida têm mais trânsito do que pontes de Lisboa - **Jornal de Notícias**

Das cinco novas pontes sabe-se que uma será pedonal e à cota baixa, a ligar as duas ribeiras, e outra à cota média a ligar a zona do Candal (Gaia) à rua D. Pedro V (Porto) que irá chamar-se precisamente Ponte D. Pedro V. - **Autarquia de V. N. Gaia**



Introdução - Motivação

“Desde há pelo menos uma década que defendemos a necessidade de lançar novas travessias entre as cidades do Porto e Gaia.”

“O tabuleiro inferior da Ponte Luís I é muito incomodo e difícil de atravessar”

Luís Filipe Menezes

Freixo e Arrábida têm mais trânsito do que pontes de Lisboa - **Jornal de Notícias**

Das cinco novas pontes sabe-se que uma será pedonal e à cota baixa, a ligar as duas ribeiras, e outra à cota média a ligar a zona do Candal (Gaia) à rua D. Pedro V (Porto) que irá chamar-se precisamente Ponte D. Pedro V. - **Autarquia de V. N. Gaia**



Necessidade de criar novas Pontes



Introdução - Ojetivos





Introdução - Ojetivos

- Ligar as cidades do Porto e Gaia à cota baixa entre Alameda Basílio Teles e o Cais do Cavaco
 - Caraterização do local de implantação





Introdução - Ojetivos

- Ligar as cidades do Porto e Gaia à cota baixa entre Alameda Basílio Teles e o Cais do Cavaco
 - Caraterização do local de implantação
- Pretende-se a análise de várias alternativas de concepção
 - Escolha da solução estrutural
 - Definição da geometria da estrutura
 - Materiais



Introdução - Ojetivos

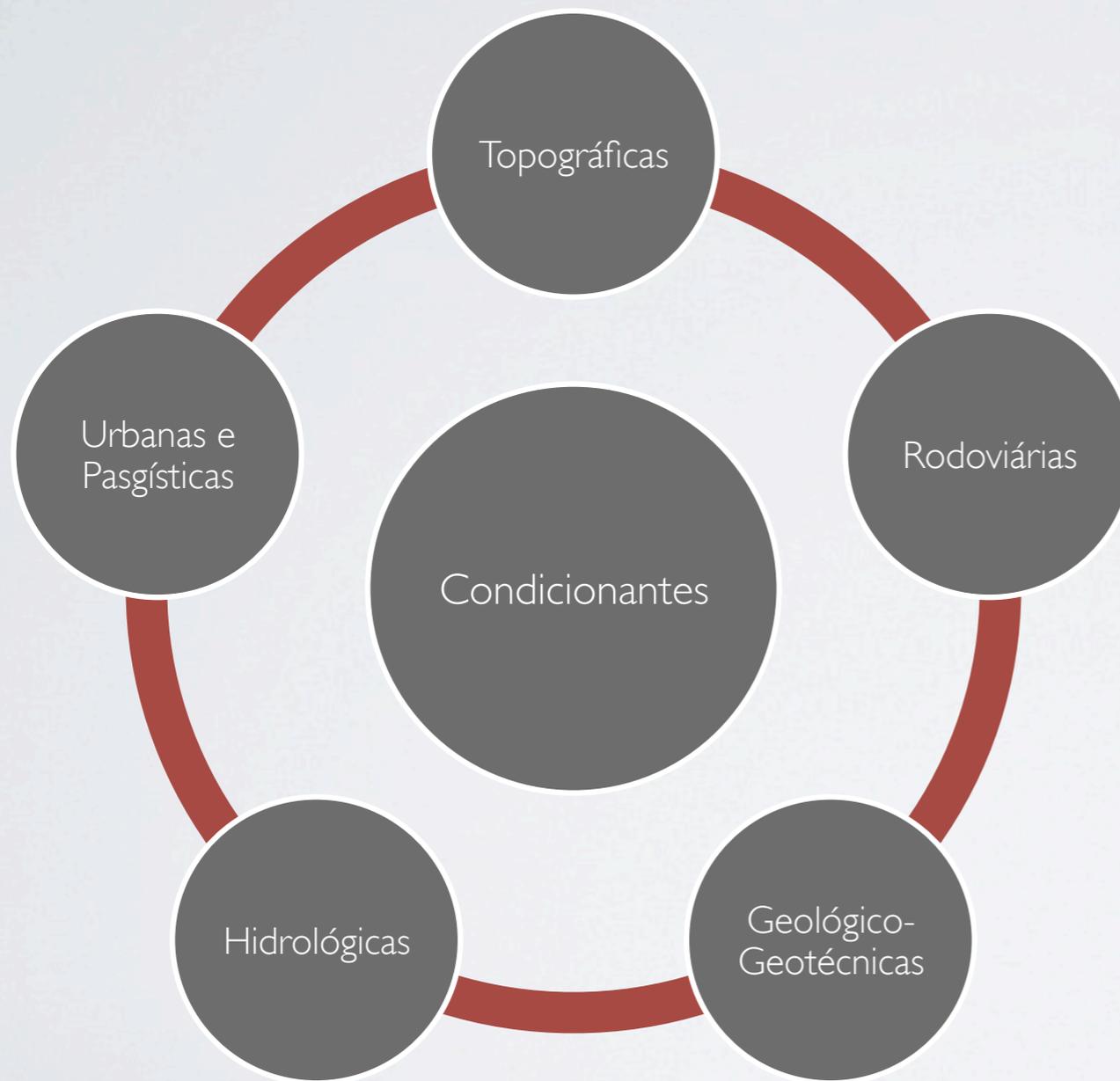
- **Ligar as cidades do Porto e Gaia à cota baixa entre Alameda Basílio Teles e o Cais do Cavaco**
 - Caraterização do local de implantação
- **Pretende-se a análise de várias alternativas de concepção**
 - Escolha da solução estrutural
 - Definição da geometria da estrutura
 - Materiais
- **Projeto da solução adotada**
 - Modelação estrutural
 - Quantificação das ações
 - Verificação da segurança estrutural
 - Processo Construtivo
 - Estimativa orçamental



Descrição Geral do Projeto

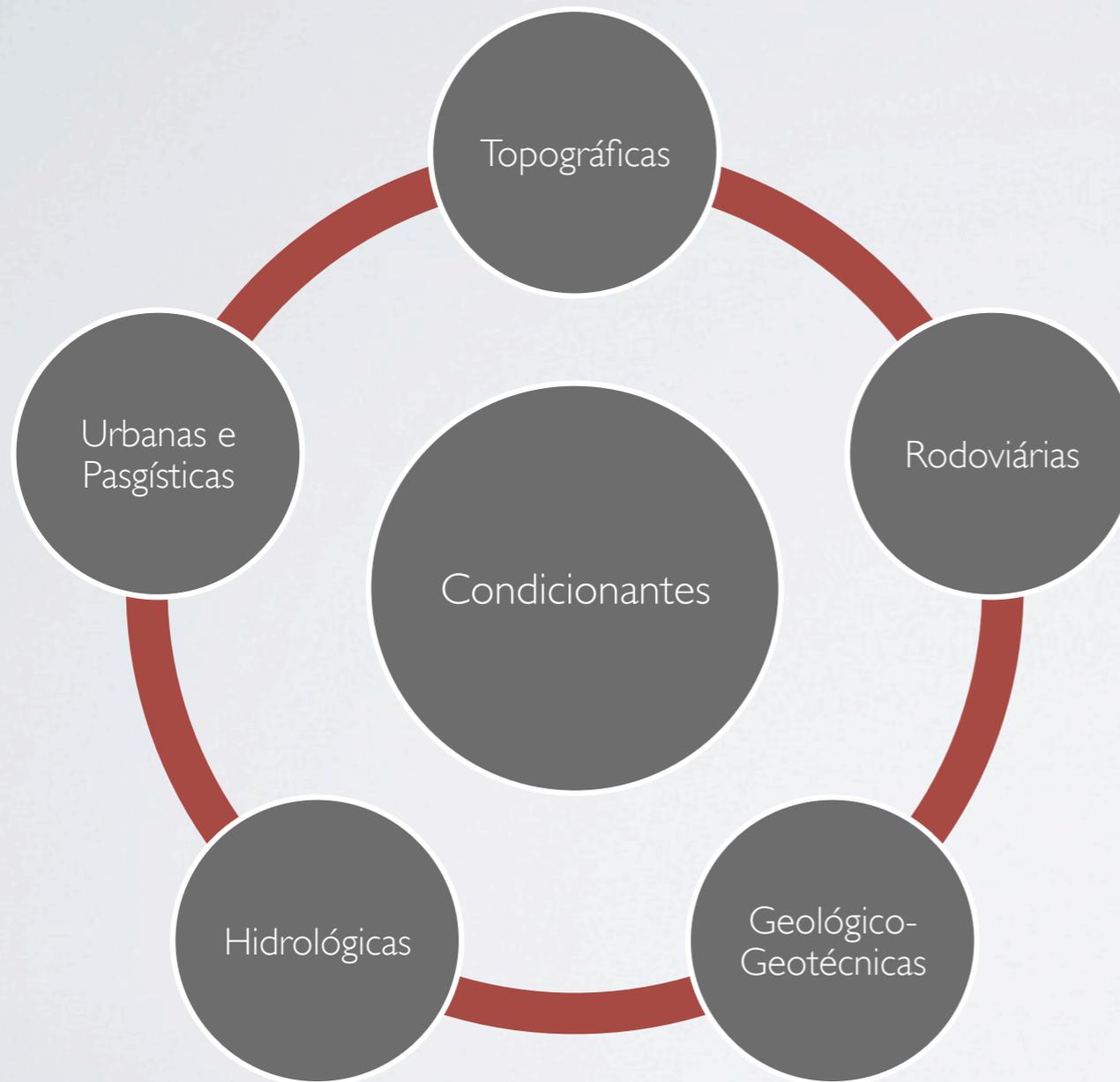


Descrição Geral do Projeto





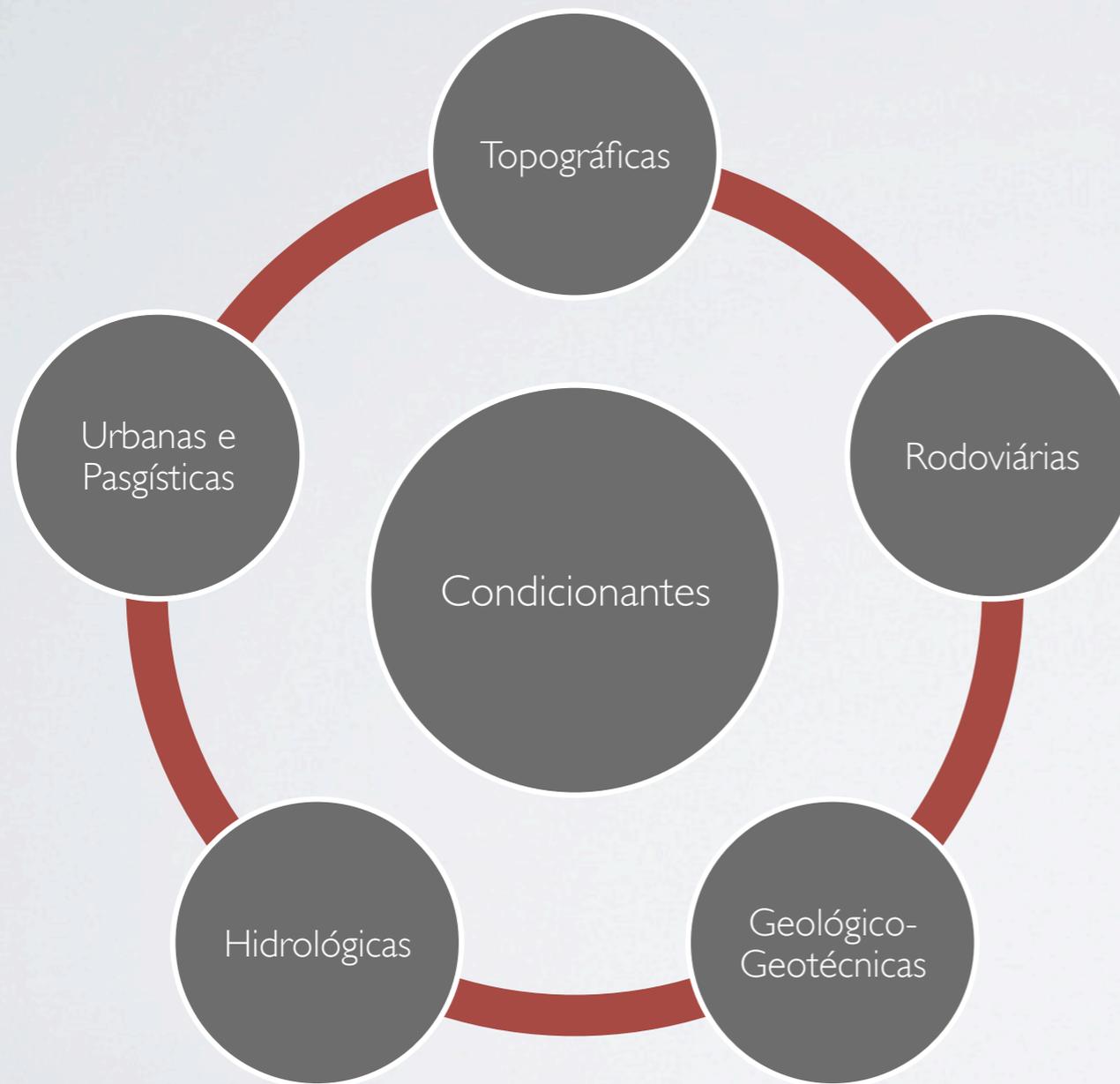
Descrição Geral do Projeto



- Cotas do Porto (+6.5m)
- Cotas de Gaia (+2.5m)
- Cota mínima exigida (+11.8m)



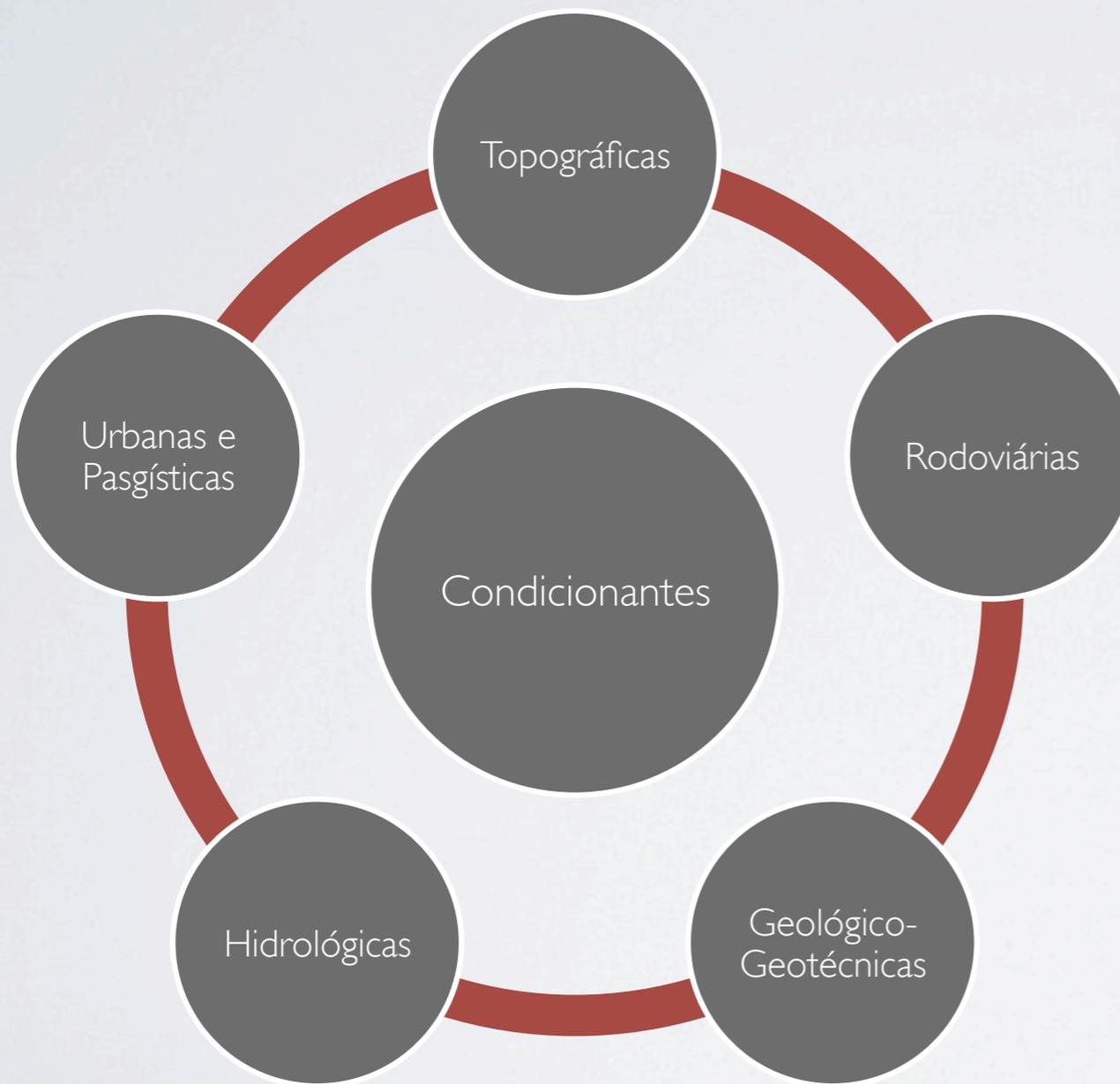
Descrição Geral do Projeto



- Cotas do Porto (+6.5m)
- Cotas de Gaia (+2.5m)
- Cota mínima exigida (+11.8m)
- Inclinação máxima admissível (7%)
- Perfil transversal tipo



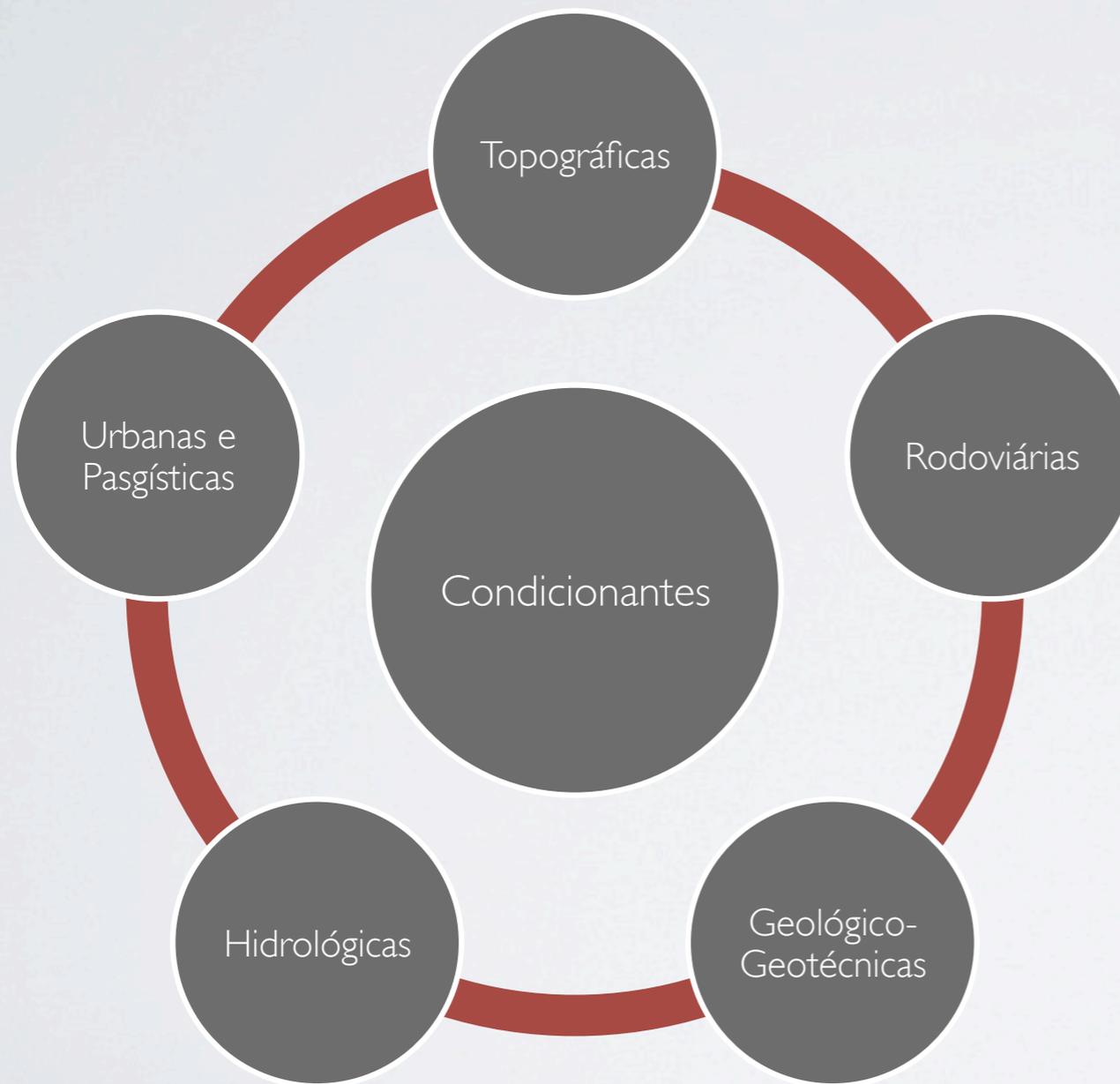
Descrição Geral do Projeto



- Cotas do Porto (+6.5m)
- Cotas de Gaia (+2.5m)
- Cota mínima exigida (+11.8m)
- Inclinação máxima admissível (7%)
- Perfil transversal tipo
- Características do Solo



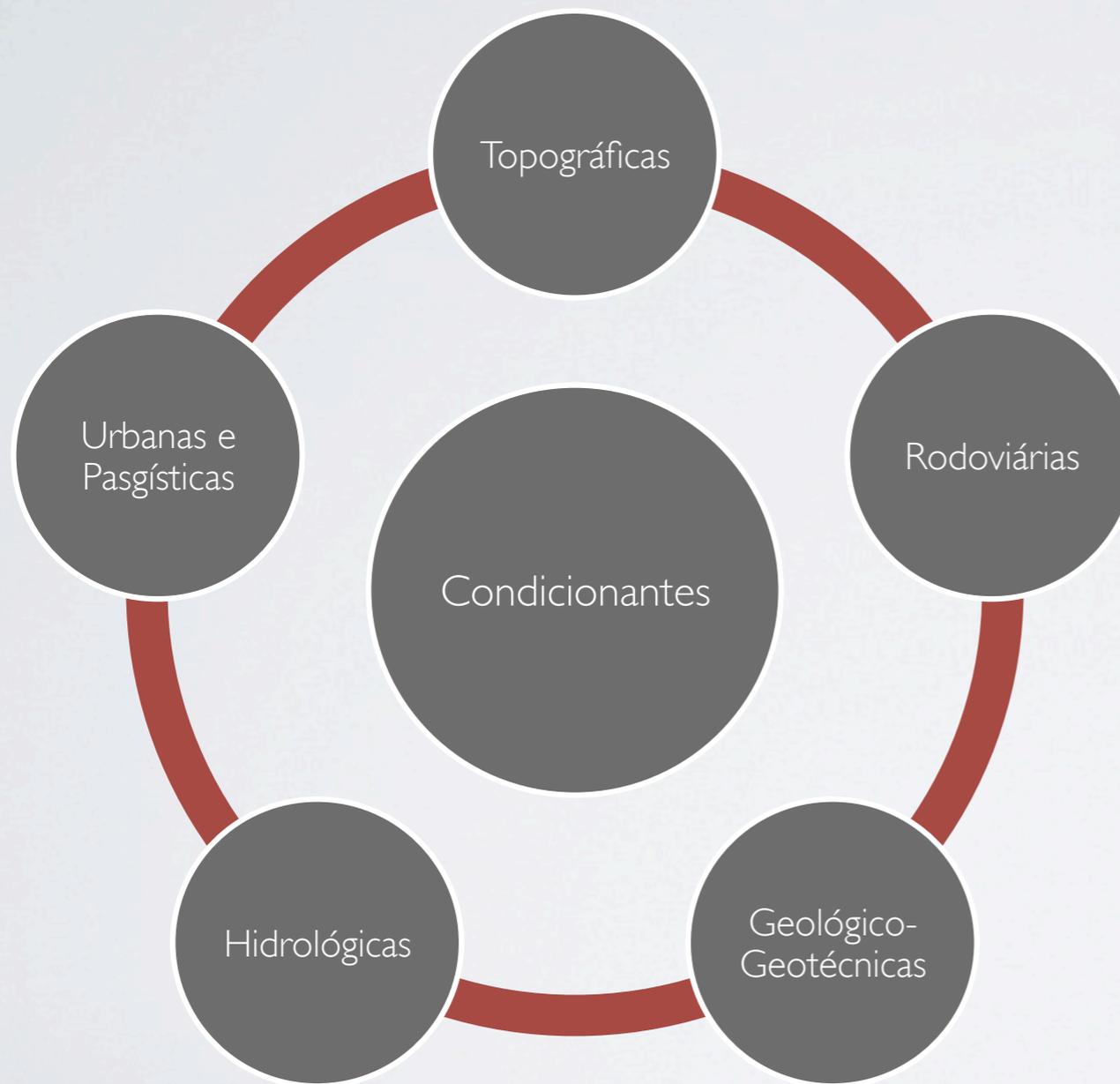
Descrição Geral do Projeto



- Cotas do Porto (+6.5m)
- Cotas de Gaia (+2.5m)
- Cota mínima exigida (+11.8m)
- Inclinação máxima admissível (7%)
- Perfil transversal tipo
- Características do Solo
- Navegabilidade existente (40-60m)
- Caudal do rio Douro



Descrição Geral do Projeto



- Cotas do Porto (+6.5m)
- Cotas de Gaia (+2.5m)
- Cota mínima exigida (+11.8m)
- Inclinação máxima admissível (7%)
- Perfil transversal tipo
- Características do Solo
- Navegabilidade existente (40-60m)
- Caudal do rio Douro
- Impacto da obra na envolvente



Descrição Geral do Projeto



- Cotas do Porto (+6.5m)
- Cotas de Gaia (+2.5m)
- Cota mínima exigida (+11.8m)
- Inclinação máxima admissível (7%)
- Perfil transversal tipo
- Características do Solo
- Navegabilidade existente (40-60m)
- Caudal do rio Douro
- Impacto da obra na envolvente



Descrição Geral do Projeto



- Cotas do Porto (+6.5m)
- Cotas de Gaia (+2.5m)
- Cota mínima exigida (+11.8m)
- Inclinação máxima admissível (7%)
- Perfil transversal tipo
- Características do Solo
- Navegabilidade existente (40-60m)
- Caudal do rio Douro
- Impacto da obra na envolvente



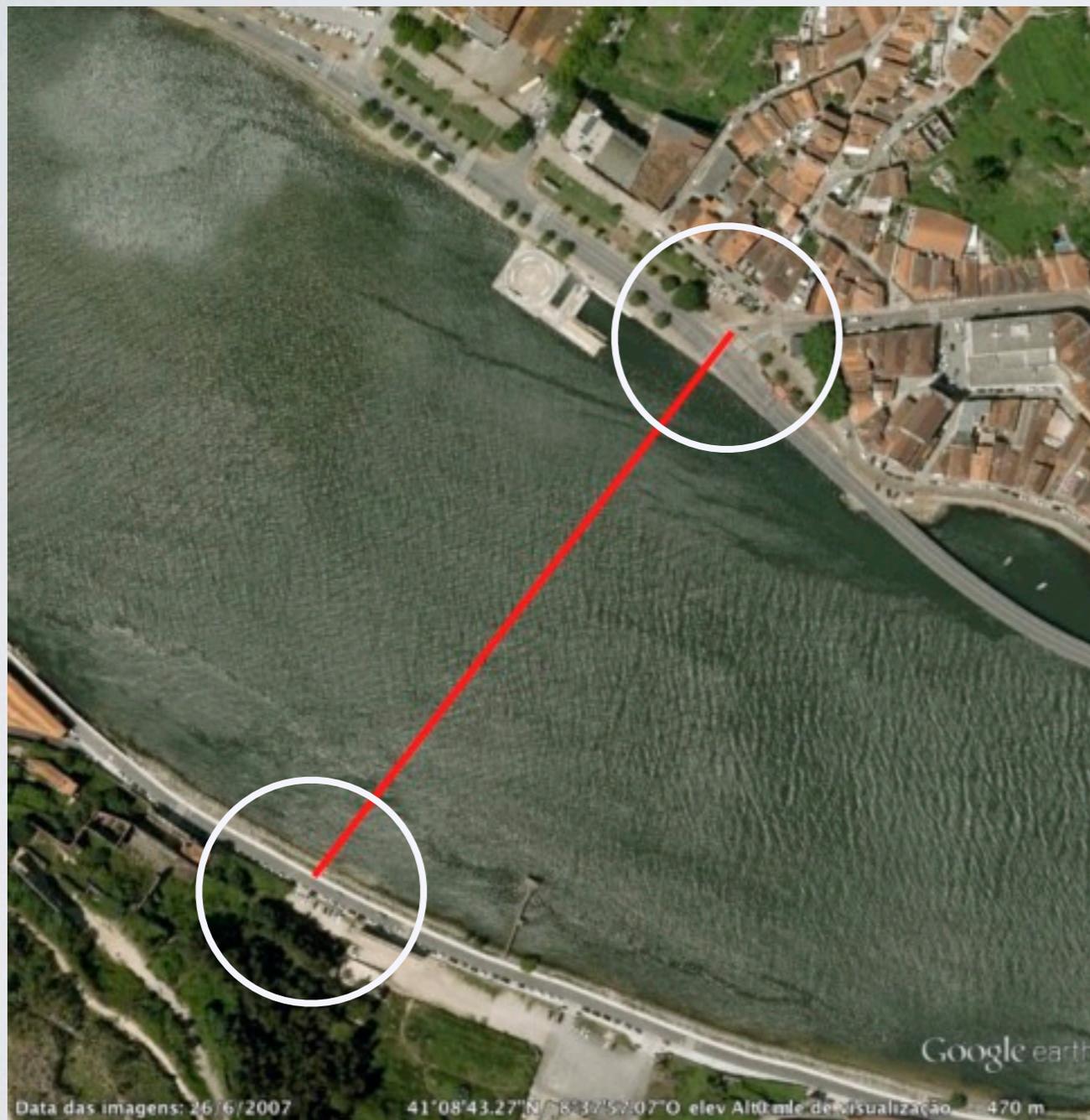
Descrição Geral do Projeto



- Cotas do Porto (+6.5m)
- Cotas de Gaia (+2.5m)
- Cota mínima exigida (+11.8m)
- Inclinação máxima admissível (7%)
- Perfil transversal tipo
- Características do Solo
- Navegabilidade existente (40-60m)
- Caudal do rio Douro
- Impacto da obra na envolvente



Descrição Geral do Projeto



- Cotas do Porto (+6.5m)
- Cotas de Gaia (+2.5m)
- Cota mínima exigida (+11.8m)
- Inclinação máxima admissível (7%)
- Perfil transversal tipo
- Características do Solo
- Navegabilidade existente (40-60m)
- Caudal do rio Douro
- Impacto da obra na envolvente



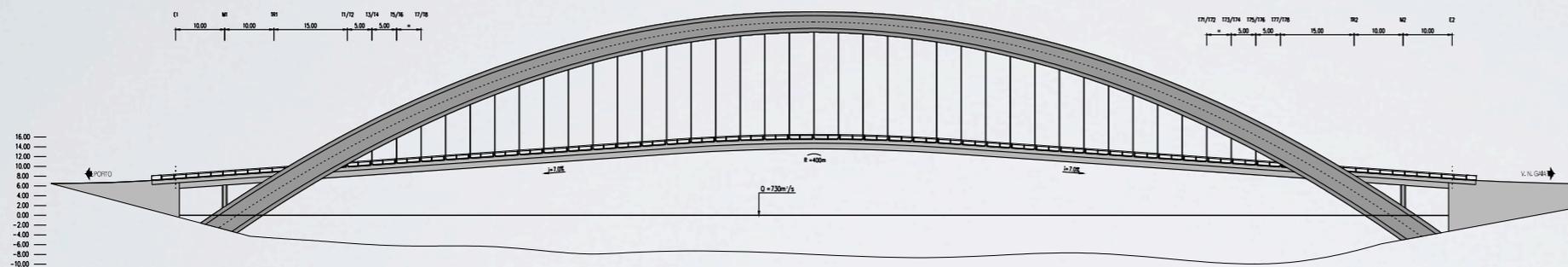
Descrição Geral do Projeto



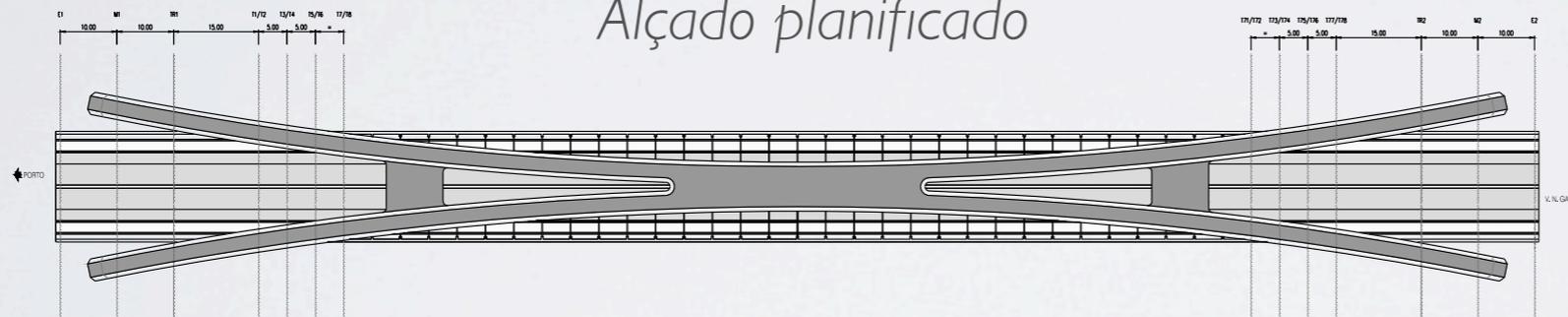
- Cotas do Porto (+6.5m)
- Cotas de Gaia (+2.5m)
- Cota mínima exigida (+11.8m)
- Inclinação máxima admissível (7%)
- Perfil transversal tipo
- Características do Solo
- Navegabilidade existente (40-60m)
- Caudal do rio Douro
- Impacto da obra na envolvente



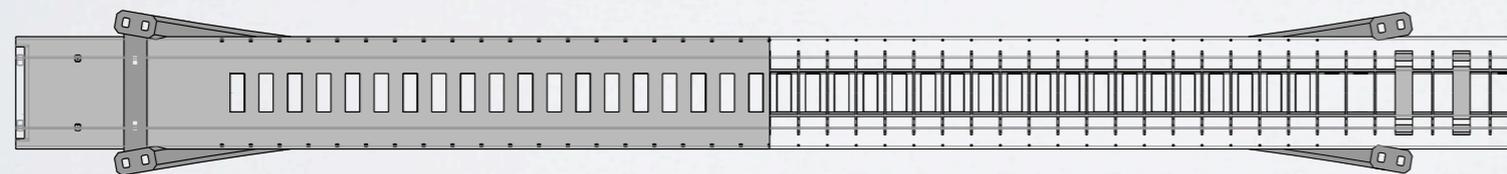
Descrição Geral do Projeto



Alçado planificado



Planta



Cortes

Arco

- vão = 260m
- Flexa = 52m
- Betão armado

Tabuleiro

- Extensão = 260m
- $h = 1.96m$
- Betão armado pré-esforçado

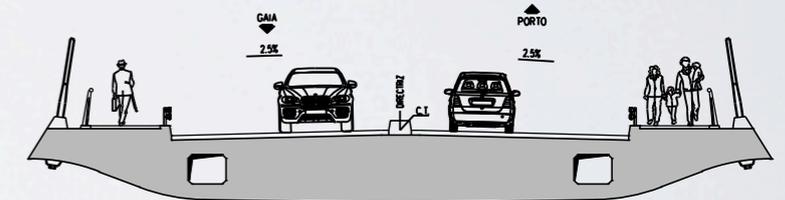
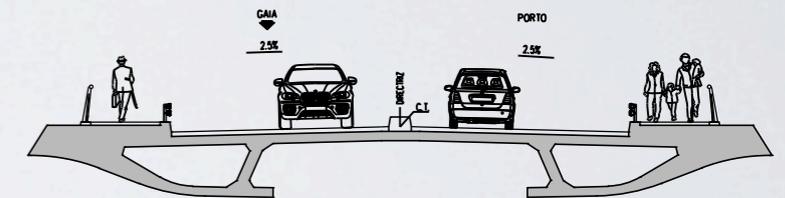
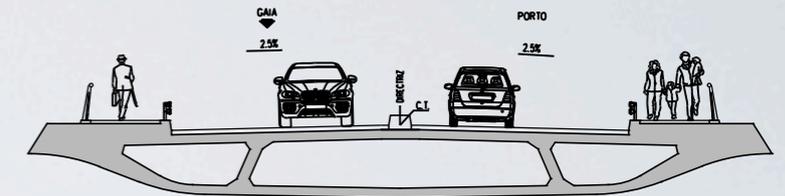
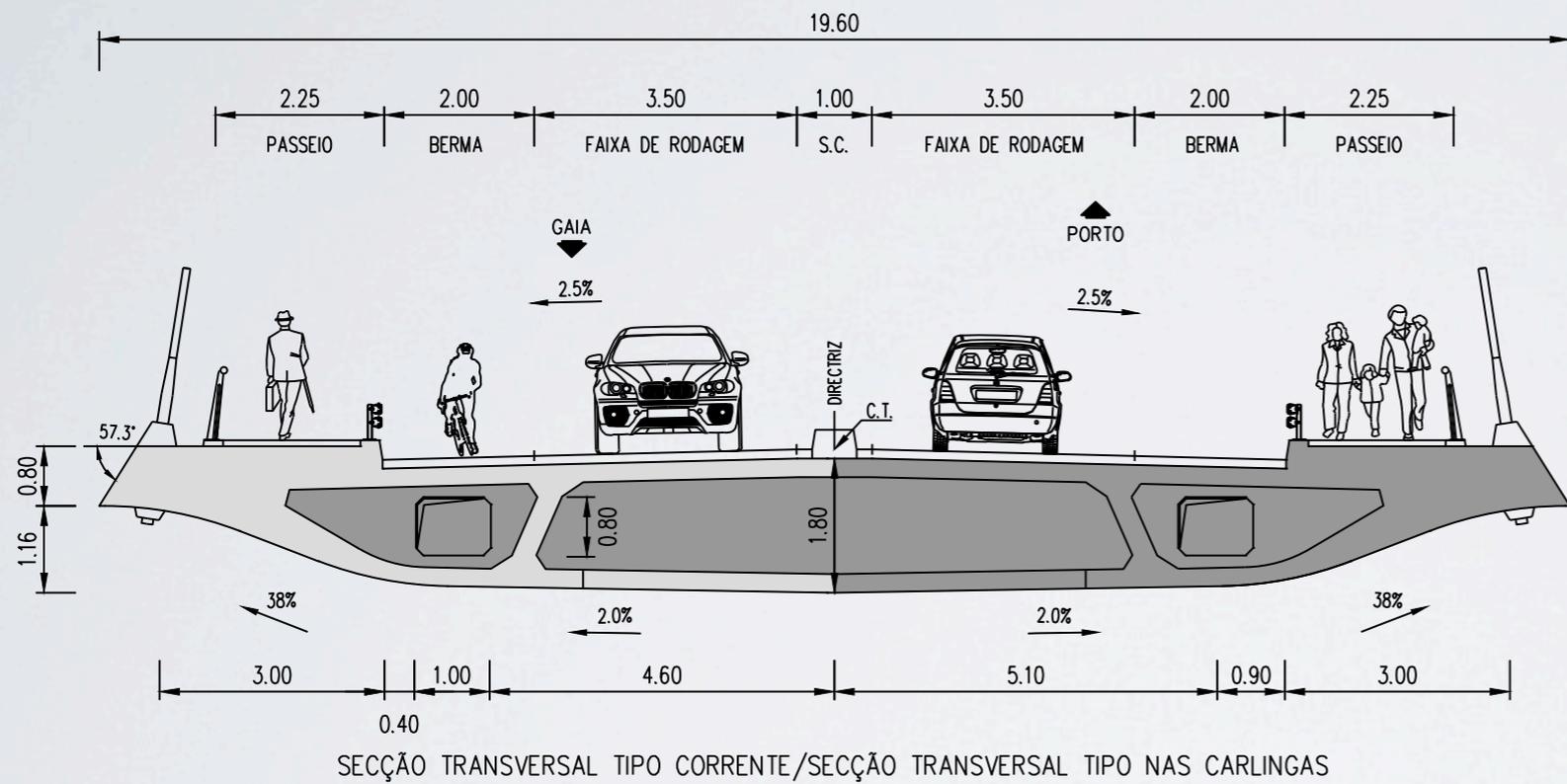
Sistema de atirantamento

- 78 tirantes ativos

Cabos de pré-esforço

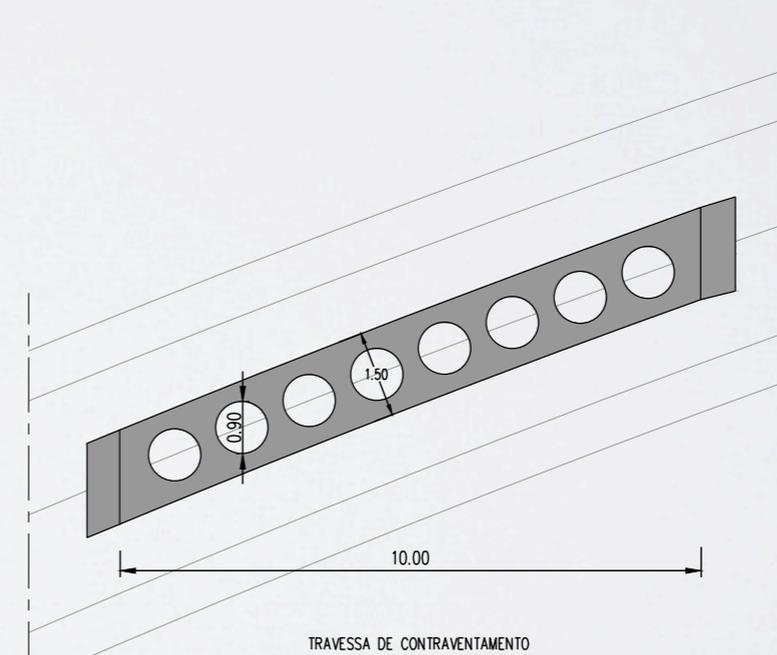
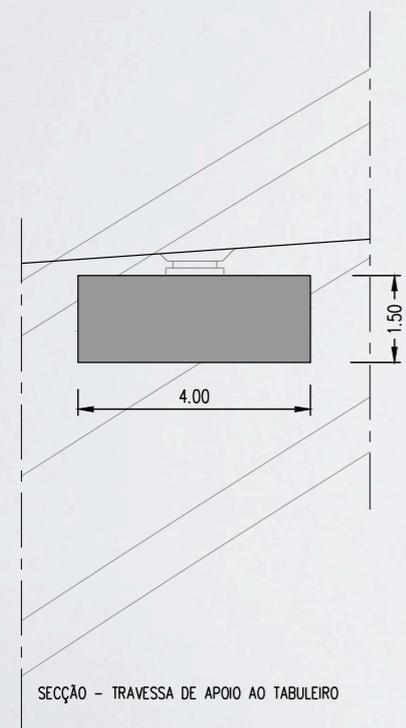
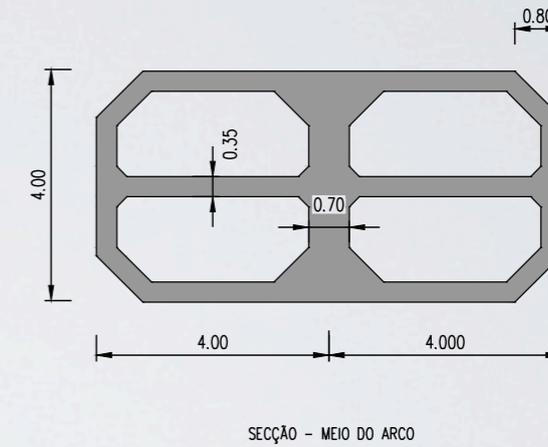
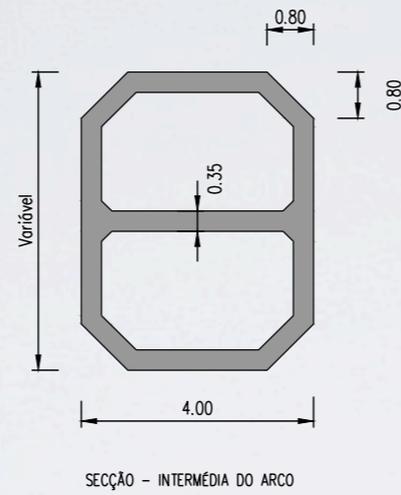
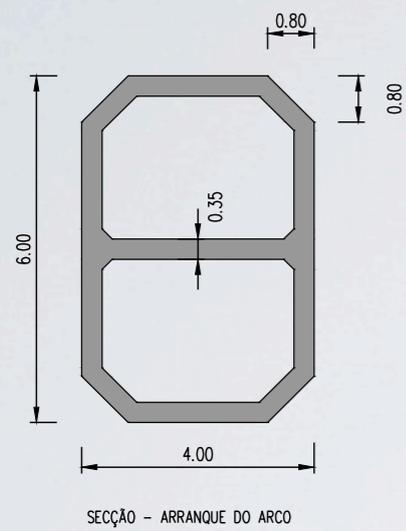


Descrição Geral do Projeto





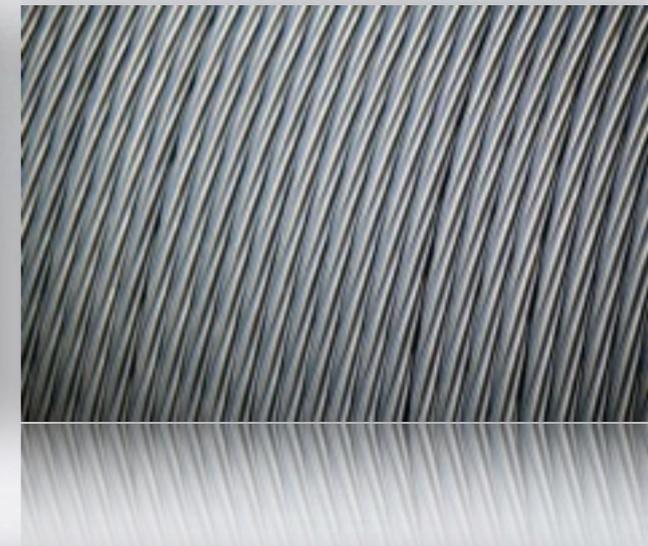
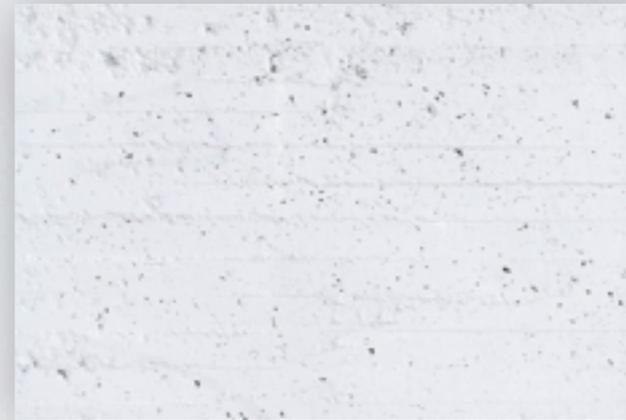
Descrição Geral do Projeto





Materiais

- Betão Estrutural
- Armaduras
- Tirantes





Análise e Dimensionamento

Modelação → MEF → Elementos Barra

Programas usados:





Análise e Dimensionamento

Modelação → MEF → Elementos Barra

Programas usados: **Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012**





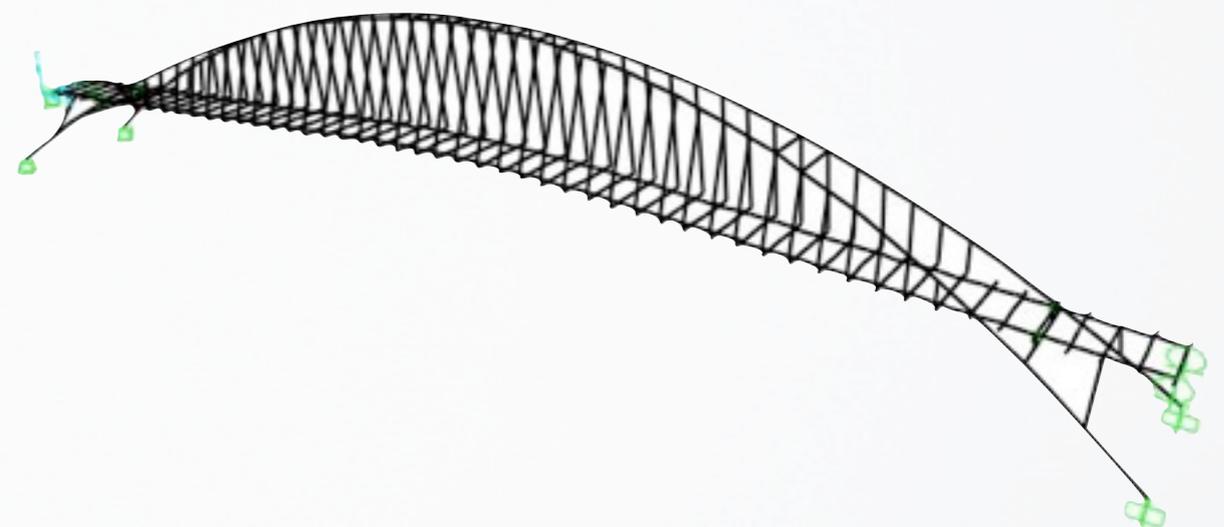
Análise e Dimensionamento

Modelação → MEF → Elementos Barra

Programas usados: **Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2012**

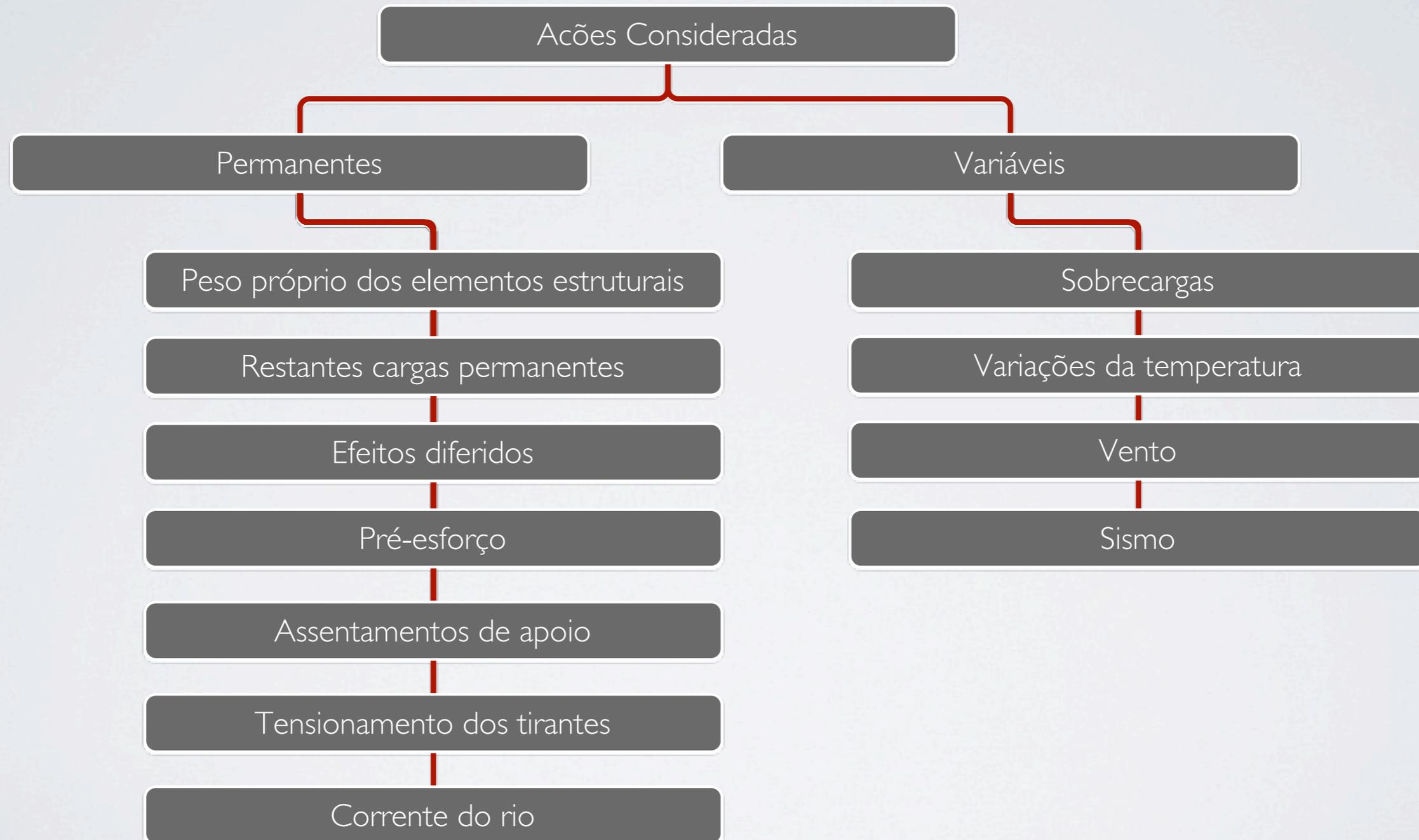
Validação

SAP 2000 - v.15.0.0



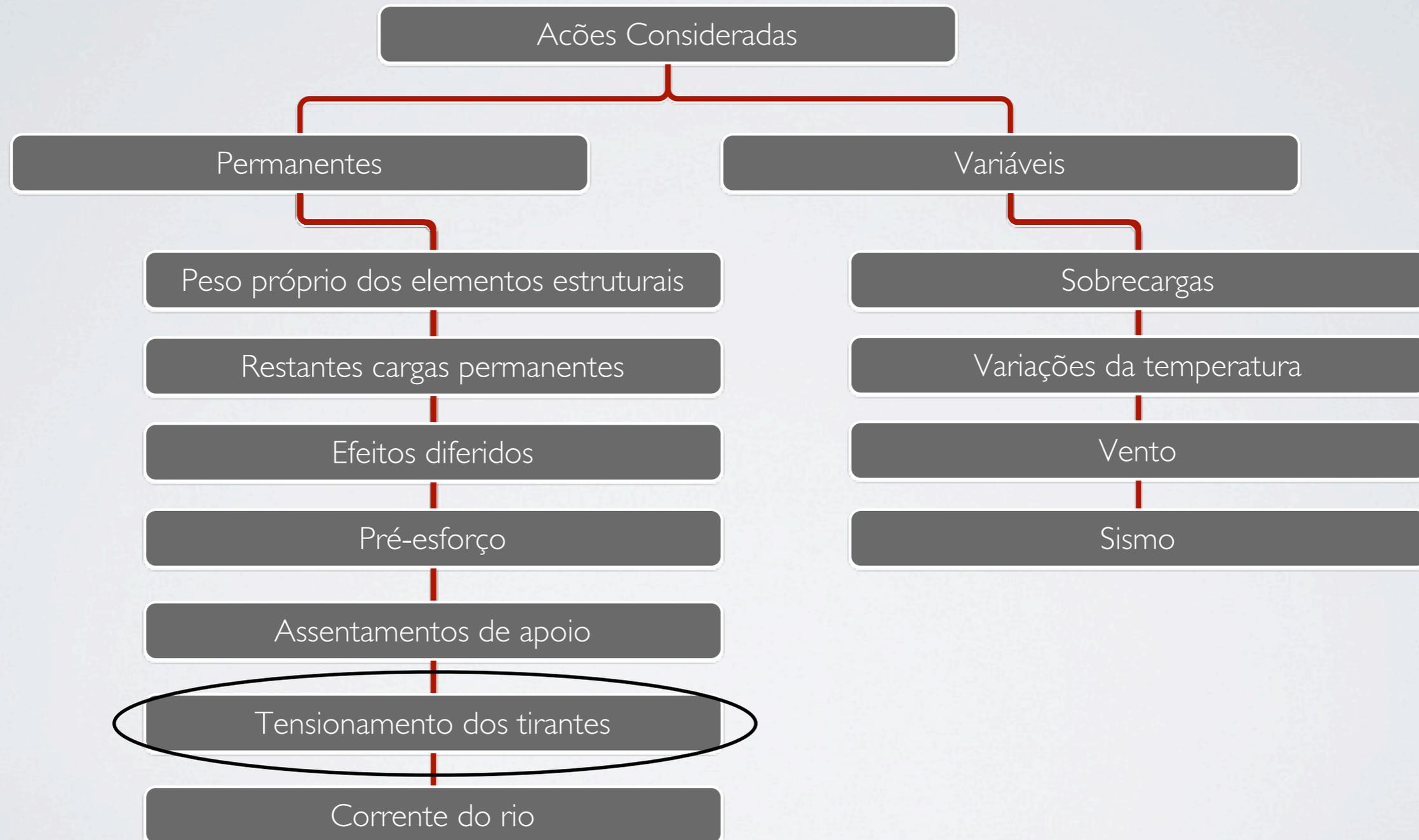


Análise e Dimensionamento





Análise e Dimensionamento





Análise e Dimensionamento

Tensionamento dos tirantes



Análise e Dimensionamento

Tensionamento dos tirantes



Matriz de Influencia



Análise e Dimensionamento

Tensionamento dos tirantes



Matriz de Influencia



$$f_j^{PP+RCP} + \sum_{i=1}^n f_{ji}^{Ti} x_i = b_j$$



Análise e Dimensionamento

Tensionamento dos tirantes



Matriz de Influencia



$$f_j^{PP+RCP} + \sum_{i=1}^n f_{ji}^{Ti} x_i = b_j$$



Força a aplicar nos tirantes
Área dos tirantes



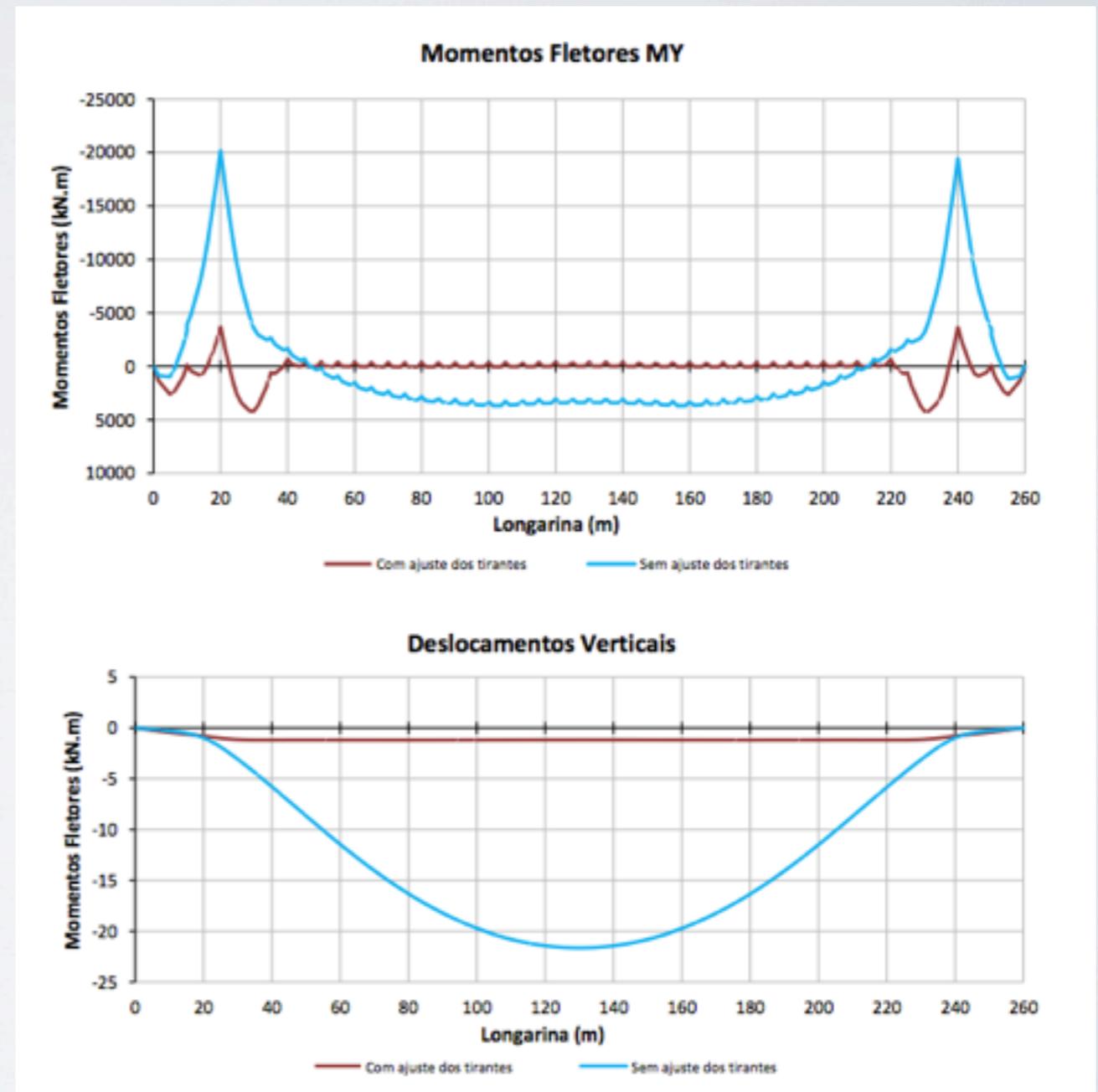
Análise e Dimensionamento

Tensionamento dos tirantes

Matriz de Influencia

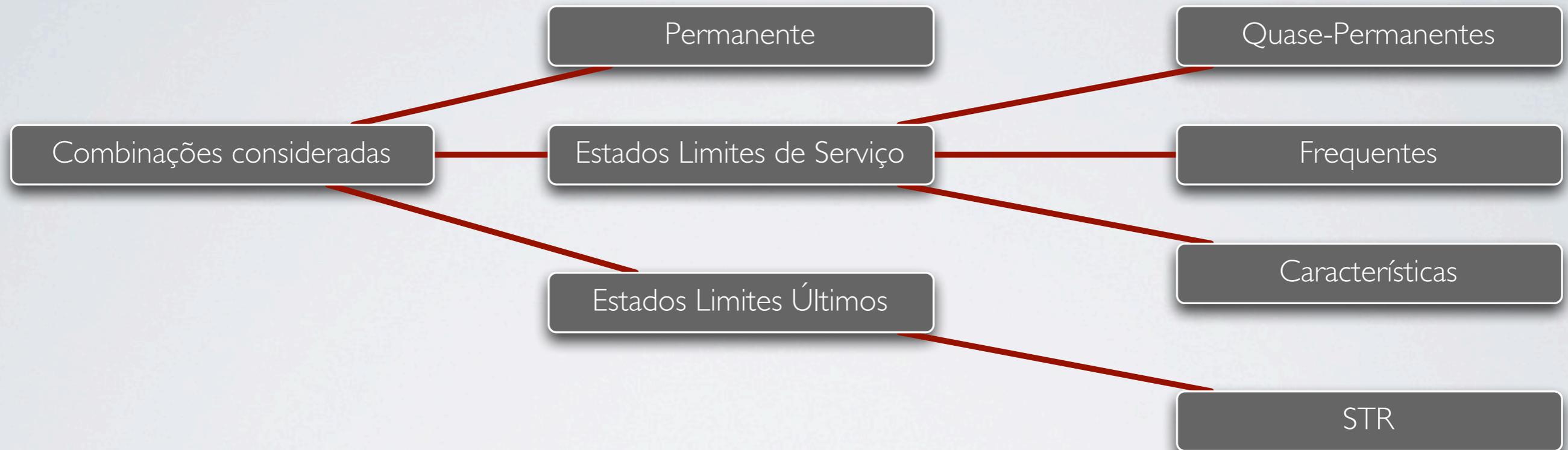
$$f_j^{PP+RCP} + \sum_{i=1}^n f_{ji}^{Ti} x_i = b_j$$

Força a aplicar nos tirantes
Área dos tirantes



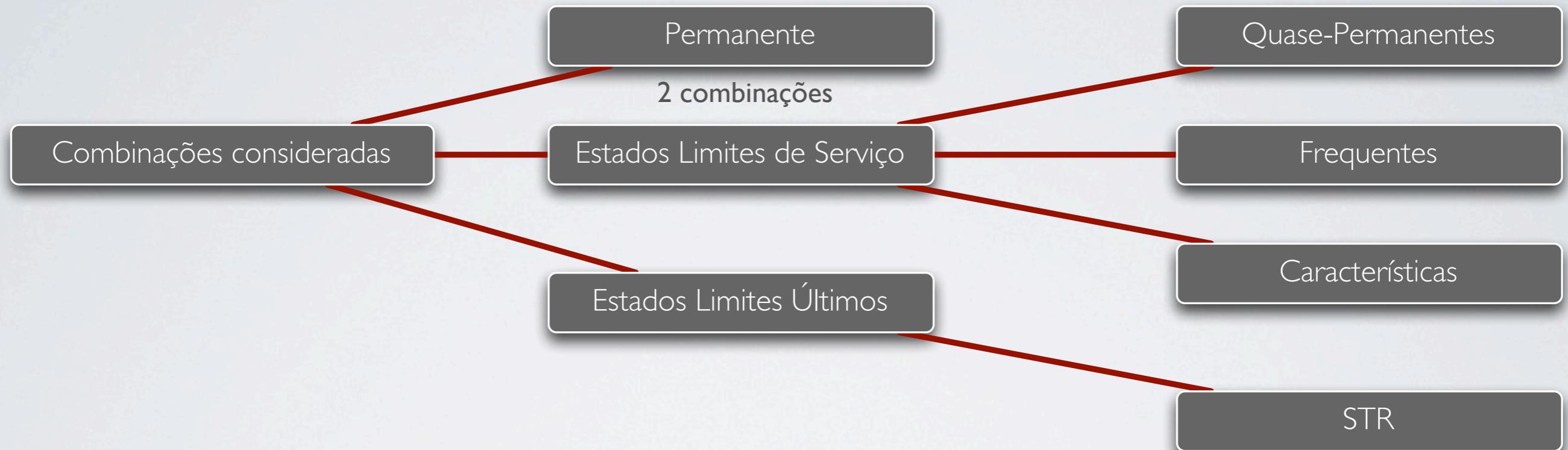


Análise e Dimensionamento



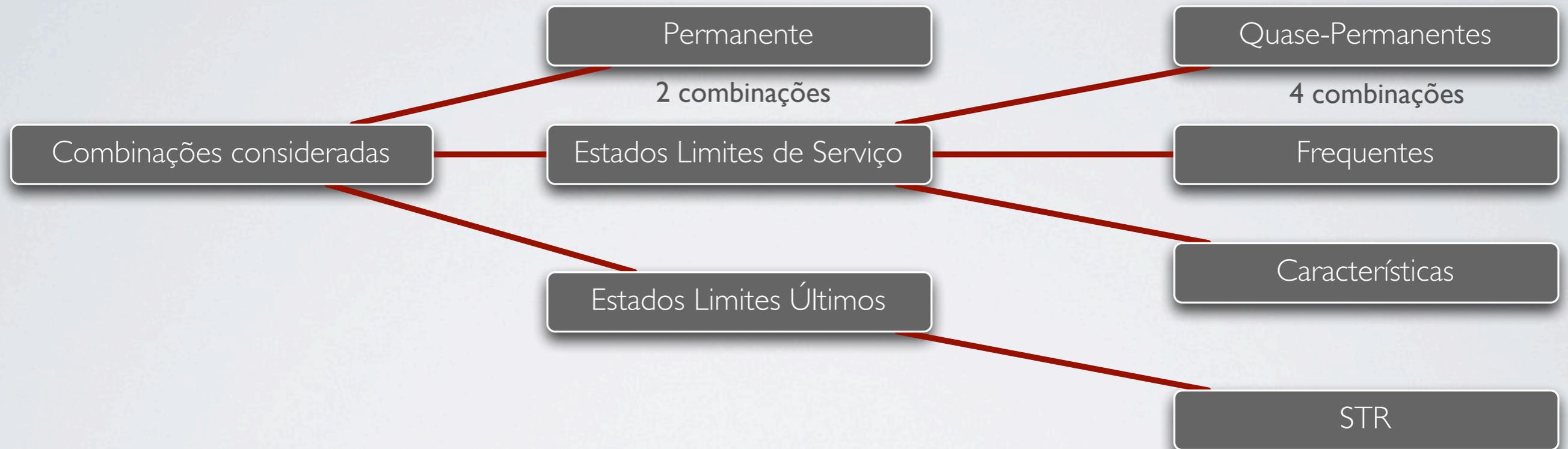


Análise e Dimensionamento



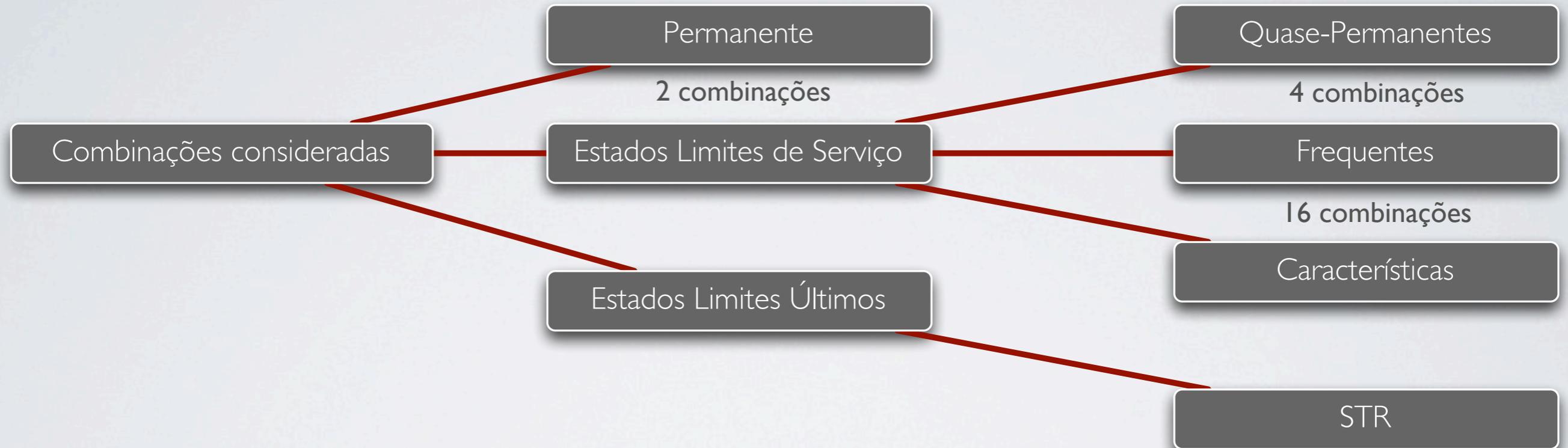


Análise e Dimensionamento



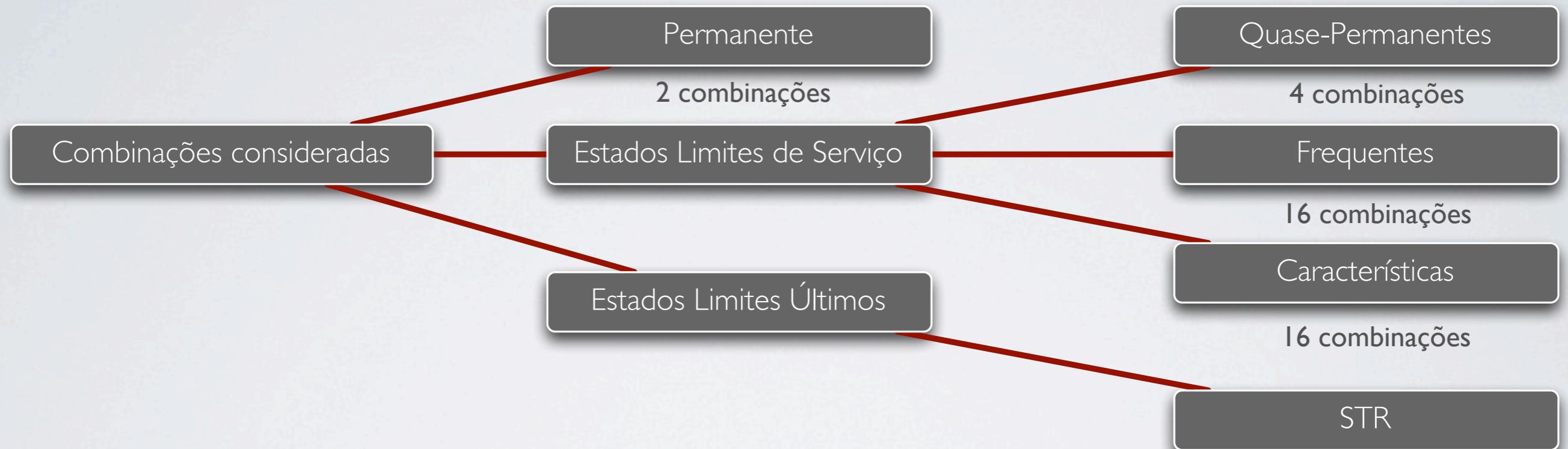


Análise e Dimensionamento



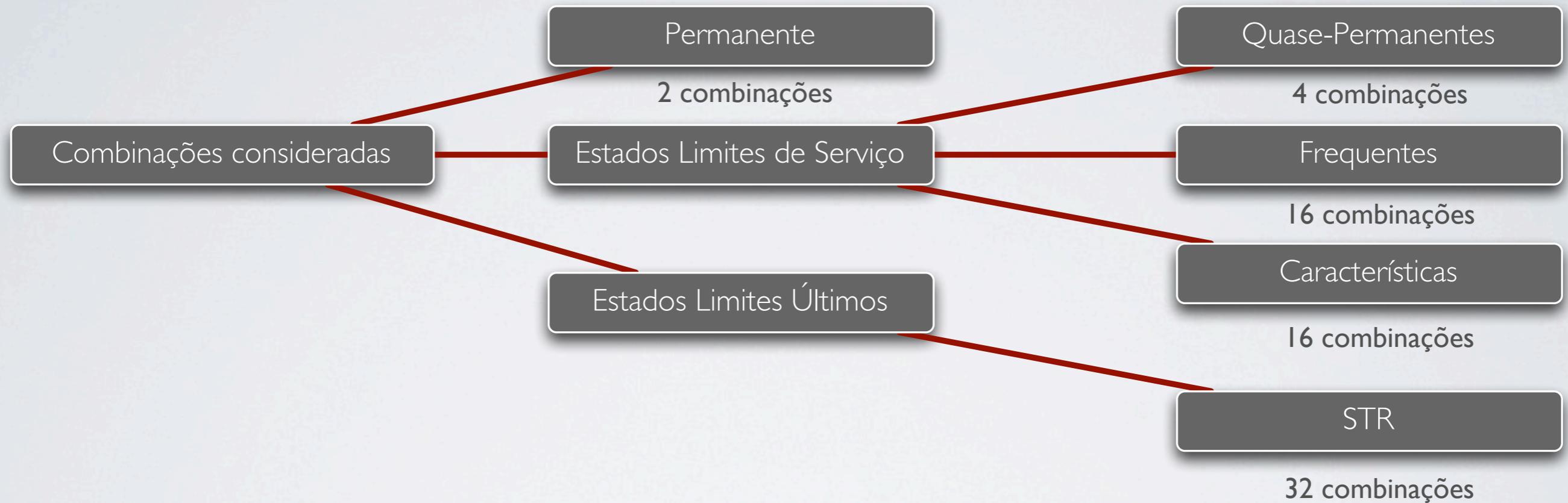


Análise e Dimensionamento



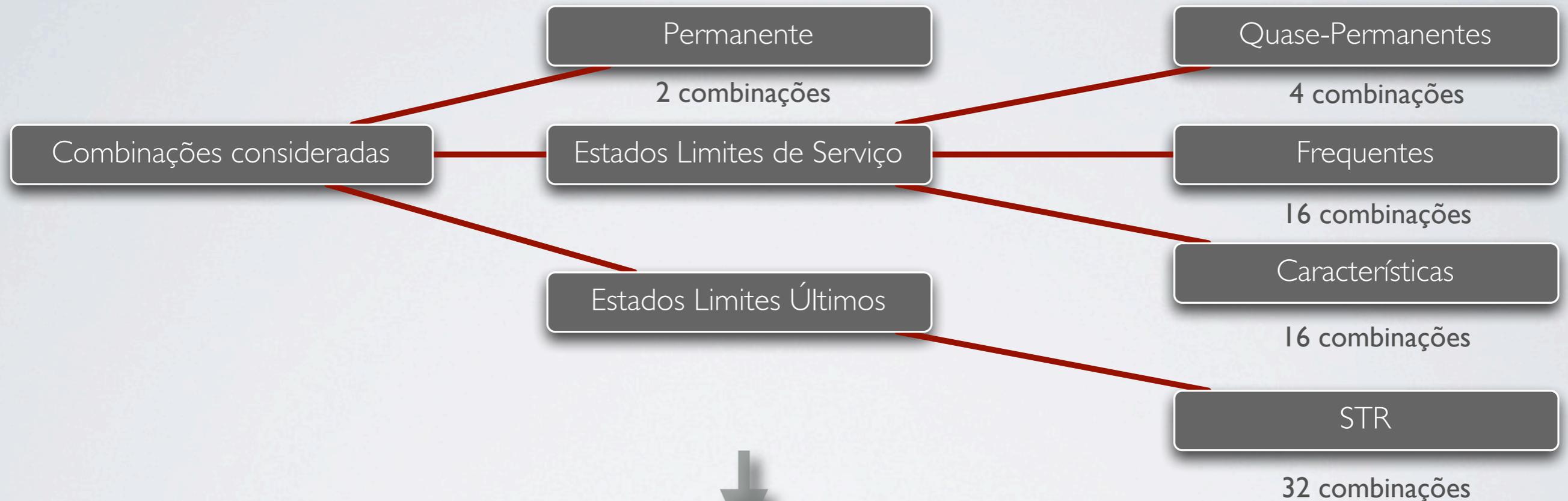


Análise e Dimensionamento





Análise e Dimensionamento



Esforços Máximos
Tensões
Deformações



Análise e Dimensionamento

Esforços Máximos

Verificação dos estados limites últimos

Programas usados: **Fagus 4.0 - Cubus; Cálculo manual**

Tabuleiro

Secção	Med (kN.m)	Armadura de flexão	Mrd/Med
Zona de vão suspenso (As+)	11717	2planos $\varnothing 12/0.20$	1.58
Zona de vão suspenso (As-)	-9263	2planos $\varnothing 12/0.20$	1.30
Zona de vão Apoiado (As+)	15182	2planos $\varnothing 20/0.15$	1.30
Zona de vão Apoiado (As-)	-17042	2planos $\varnothing 12/0.20$	1.28

Arcos

Secção	Medy (kN.m)	Medz (kN.m)	Ned (kN)	Armadura de flexão	Mrd/Med
Encontro do arco (x=0m)	-188409	-30531	1.58	$\varnothing 25/0.20 + \varnothing 25/0.20$ (reforço)	1.15
x=80m	46060	-3384	-83727	$\varnothing 20/0.20$	1.98
Meio vão (x=130m)	41730	2620	-163624	$\varnothing 20/0.20$	2.14

Sistema de atiramento

Secção	Ned (kN)	Armadura de tração	Nrd/Ned
tirantes	3750	21 cordões	1.10



Análise e Dimensionamento

Esforços Máximos → Verificação dos estados limites últimos

Programas usados: **Fagus 4.0 - Cubus; Cálculo manual**

Tabuleiro

Secção	Med (kN.m)	Armadura de flexão	Mrd/Med
Zona de vão suspenso (As+)	11717	2planos $\varnothing 12/0.20$	1.58
Zona de vão suspenso (As-)	-9263	2planos $\varnothing 12/0.20$	1.30
Zona de vão Apoiado (As+)	15182	2planos $\varnothing 20/0.15$	1.30
Zona de vão Apoiado (As-)	-17042	2planos $\varnothing 12/0.20$	1.28

Arcos

Secção	Medy (kN.m)	Medz (kN.m)	Ned (kN)	Armadura de flexão	Mrd/Med
Encontro do arco (x=0m)	-188409	-30531	1.58	$\varnothing 25/0.20 + \varnothing 25/0.20$ (reforço)	1.15
x=80m	46060	-3384	-83727	$\varnothing 20/0.20$	1.98
Meio vão (x=130m)	41730	2620	-163624	$\varnothing 20/0.20$	2.14

Sistema de atiramento

Secção	Ned (kN)	Armadura de tração	Nrd/Ned
tirantes	3750	21 cordões	1.10



Análise e Dimensionamento

Esforços Máximos

Verificação dos estados limites últimos

Programas usados: **Fagus 4.0 - Cubus; Cálculo manual**

Tabuleiro

Secção	Ved (kN)	Armadura de esf. trans.
Zona de vão suspenso	5906	3 ramos $\varnothing 16/0.10$
Zona de vão Apoiado	3483	2 ramos $\varnothing 16/0.10$

Arcos

Secção	Vedy (kN)	Vedz (kN)	Ted (kN.m)	Armadura de esf. trans.
Encontro do arco (x=0m)	6205	2421	3352	2 ramos $\varnothing 12/0.20$
x=80m	1195	1132	1007	2 ramos $\varnothing 12/0.20$
Meio vão (x=130m)	378	1450	65	2 ramos $\varnothing 12/0.20$



Análise e Dimensionamento

Esforços Máximos → *Verificação dos estados limites últimos*

Programas usados: **Fagus 4.0 - Cubus; Cálculo manual**

Tabuleiro

Secção	Ved (kN)	Armadura de esf. trans.
Zona de vão suspenso	5906	3 ramos $\varnothing 16/0.10$
Zona de vão Apoiado	3483	2 ramos $\varnothing 16/0.10$

Arcos

Secção	Vedy (kN)	Vedz (kN)	Ted (kN.m)	Armadura de esf. trans.
Encontro do arco (x=0m)	6205	2421	3352	2 ramos $\varnothing 12/0.20$
x=80m	1195	1132	1007	2 ramos $\varnothing 12/0.20$
Meio vão (x=130m)	378	1450	65	2 ramos $\varnothing 12/0.20$



Análise e Dimensionamento



Análise e Dimensionamento

Tensões



Verificação dos estados de serviço

	Arcos	Tabuleiro	Tirantes
Quase-Permanentes	$\sigma \leq 0$	$\sigma \leq 0$	$\sigma \leq 0.45f_{pk}$
Frequentes	$\sigma \leq f_{ctm}$	$\sigma \leq 0$	—
Características	$\sigma \leq 0.60f_{ck}$	$\sigma \leq 0.60f_{ck}$	$\sigma \leq 0.50f_{pk}$



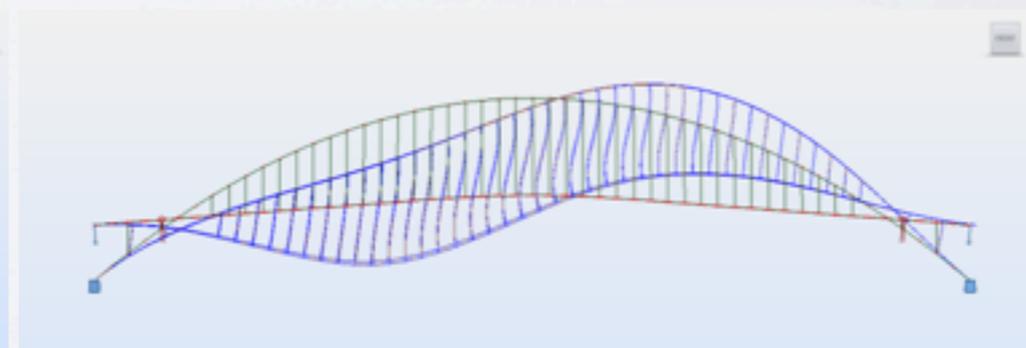
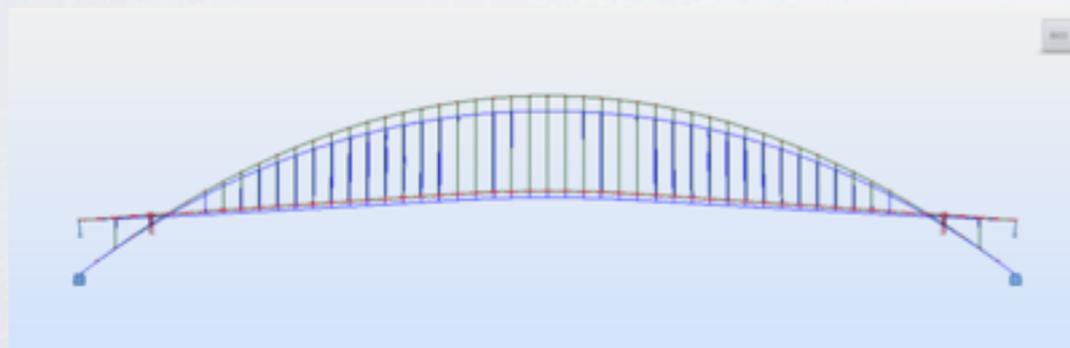
Análise e Dimensionamento

Tensões → *Verificação dos estados de serviço*

	Arcos	Tabuleiro	Tirantes
Quase-Permanentes	$\sigma \leq 0$	$\sigma \leq 0$	$\sigma \leq 0.45f_{pk}$
Frequentes	$\sigma \leq f_{ctm}$	$\sigma \leq 0$	—
Características	$\sigma \leq 0.60f_{ck}$	$\sigma \leq 0.60f_{ck}$	$\sigma \leq 0.50f_{pk}$

Deformações → *Verificação dos estados de serviço*

	d	Delta/vao	delta/vao limite
Quase-Permanentes	3.7cm	7027	600
Frequentes (parcela rodoviária)	2.4cm	10833	1000





Análise e Dimensionamento

Análise Sísmica

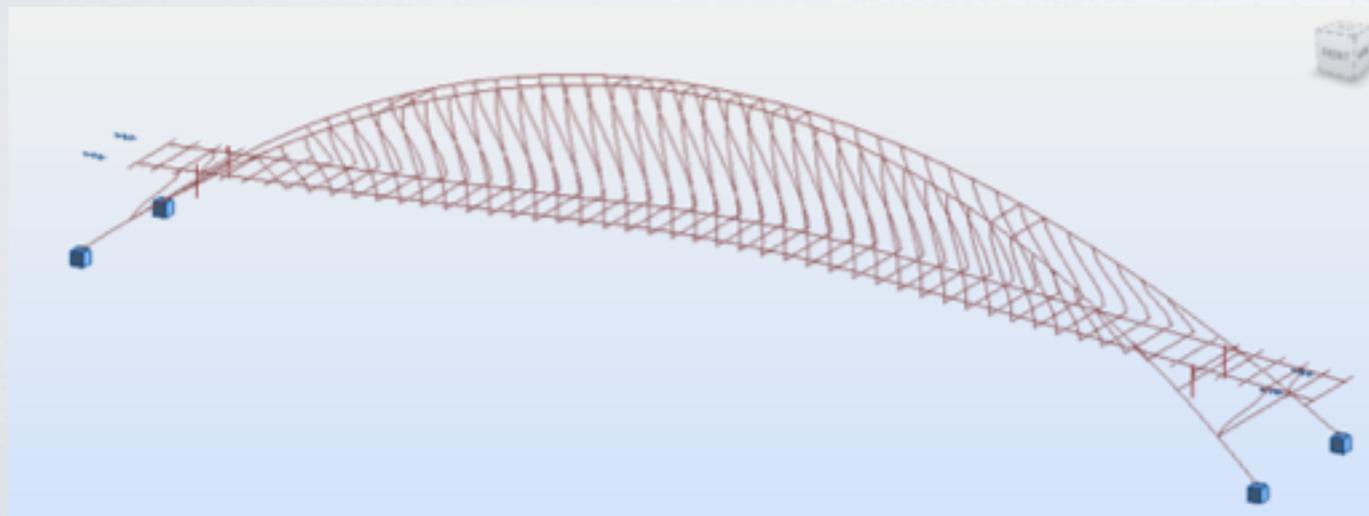


Análise e Dimensionamento

Análise Sísmica

Modos de vibração

Modo	Periodo	Frequência
1	4.55	0.22
2	1.58	0.63
3	1.54	0.65
4	1.19	0.84



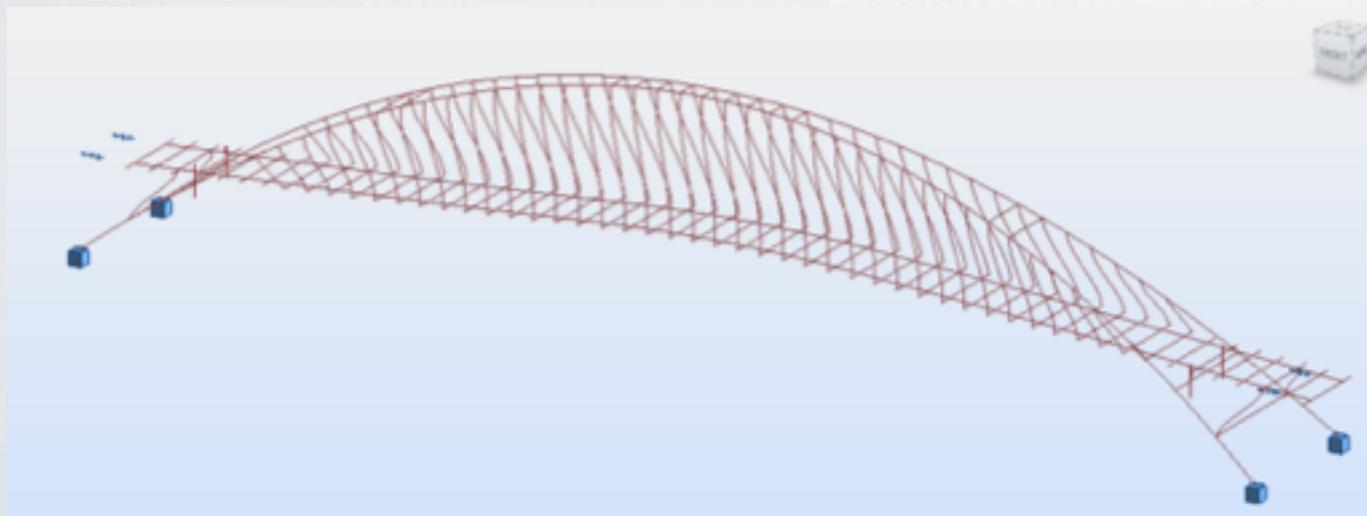
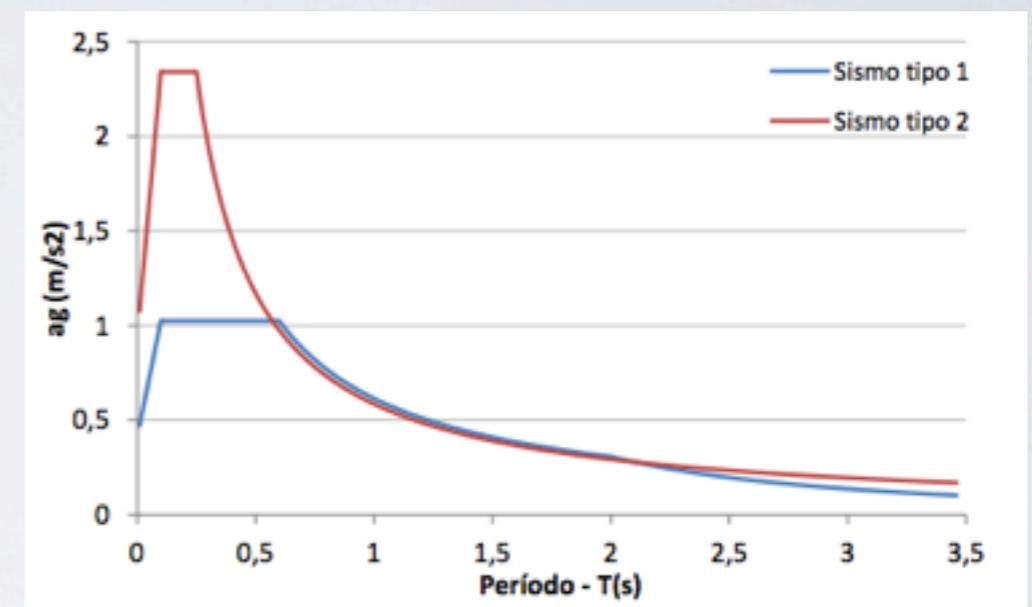


Análise e Dimensionamento

Análise Sísmica

Modos de vibração

Modo	Periodo	Frequência
1	4.55	0.22
2	1.58	0.63
3	1.54	0.65
4	1.19	0.84



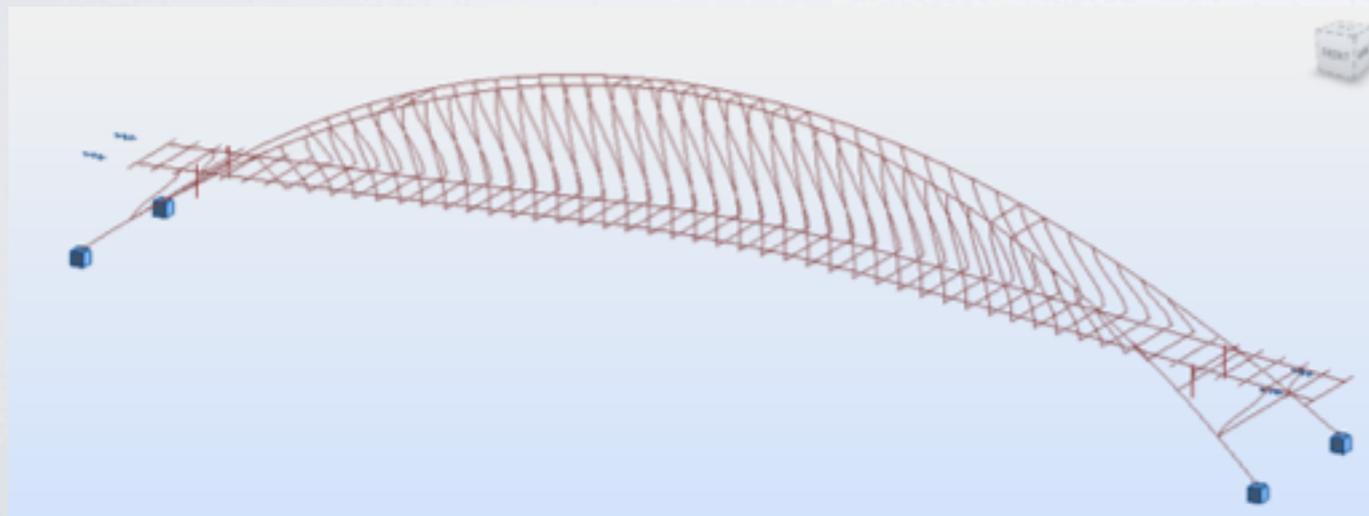
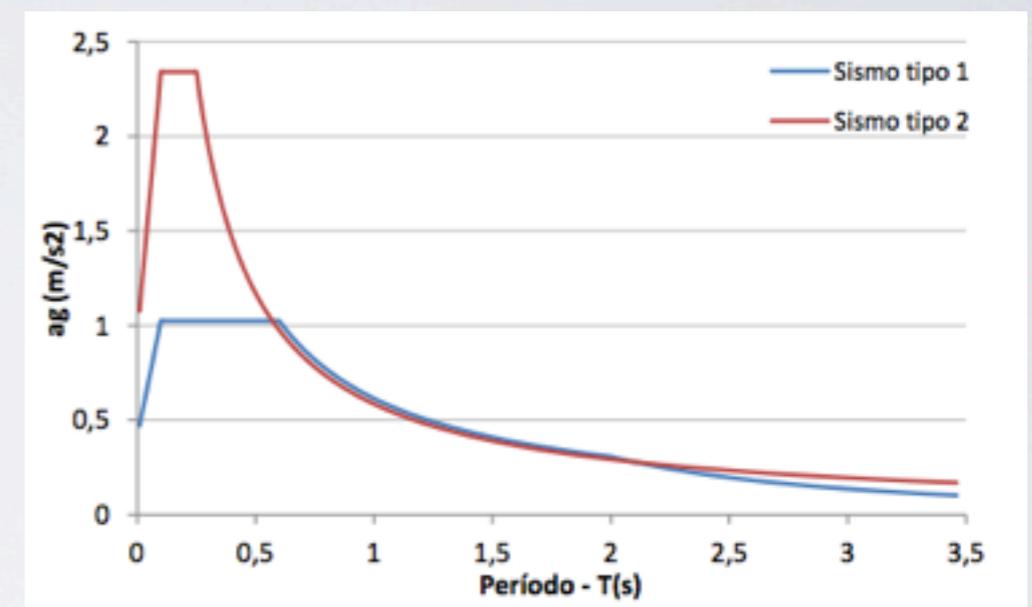


Análise e Dimensionamento

Análise Sísmica

Modos de vibração

Modo	Periodo	Frequência
1	4.55	0.22
2	1.58	0.63
3	1.54	0.65
4	1.19	0.84



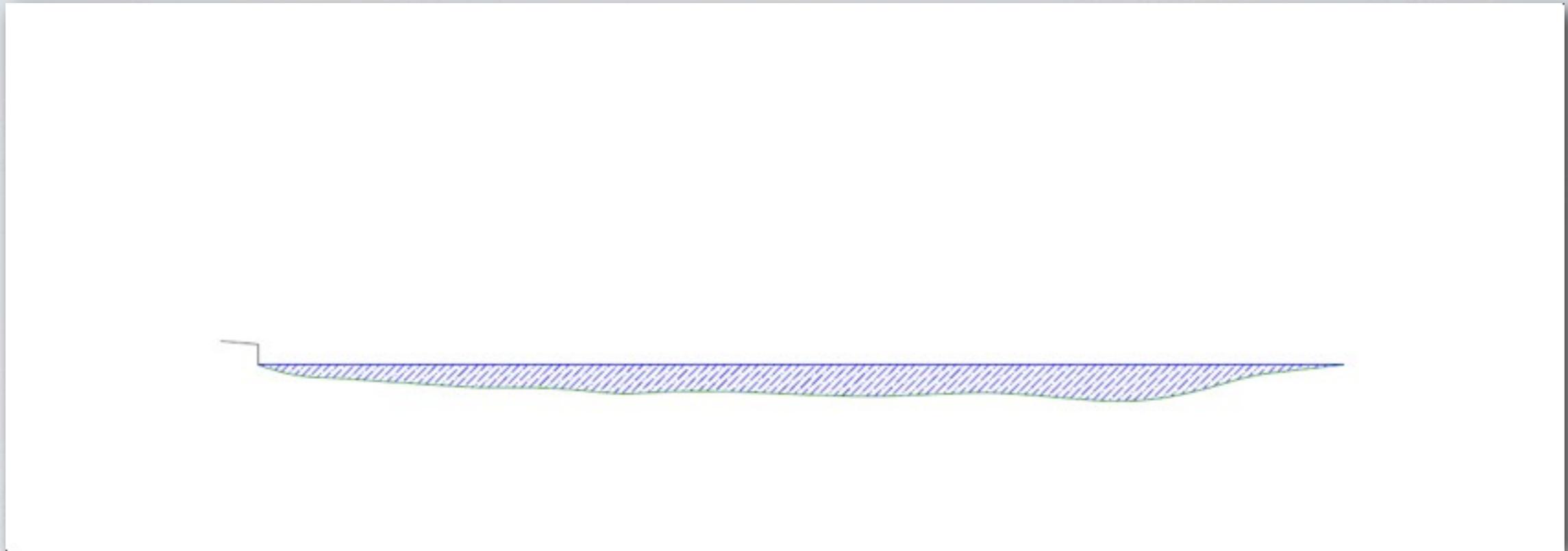
Necessidade de utilizar sistemas de amortecimento



Alteração da rigidez da estrutura



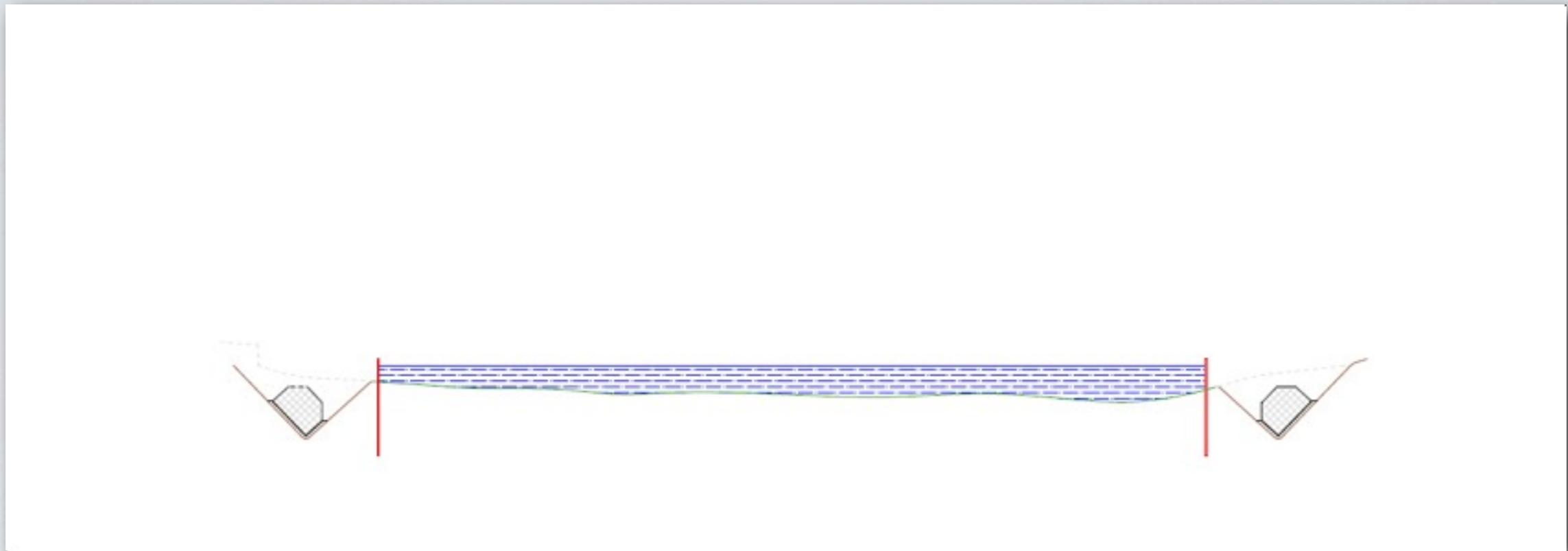
Processo Construtivo



- Desmatação e decapagem do local



Processo Construtivo



- Instalação das ensecadeiras para fundações
- Escavação do material necessário para posterior execução das fundações
- Execução das fundações dos arcos e encontros do tabuleiro



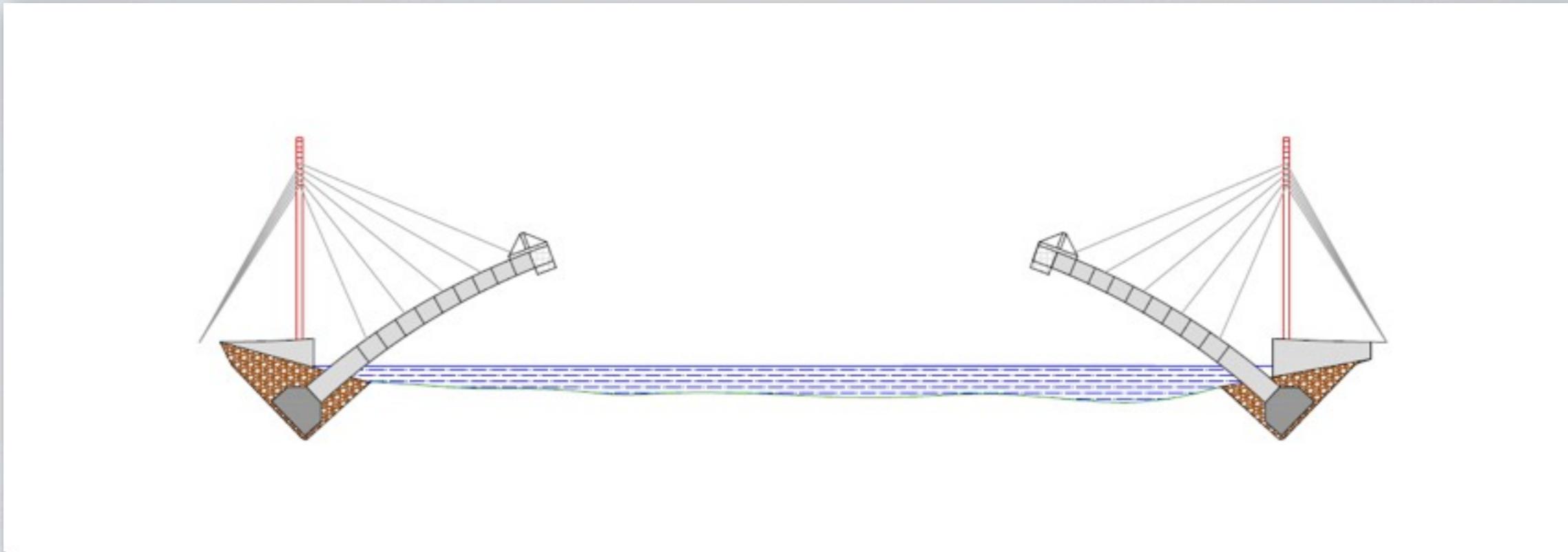
Processo Construtivo



- Reposição do terreno com material de aterro
- Construção do cimbre ao solo para execução dos arranques do arco
- Execução dos arranques do arco



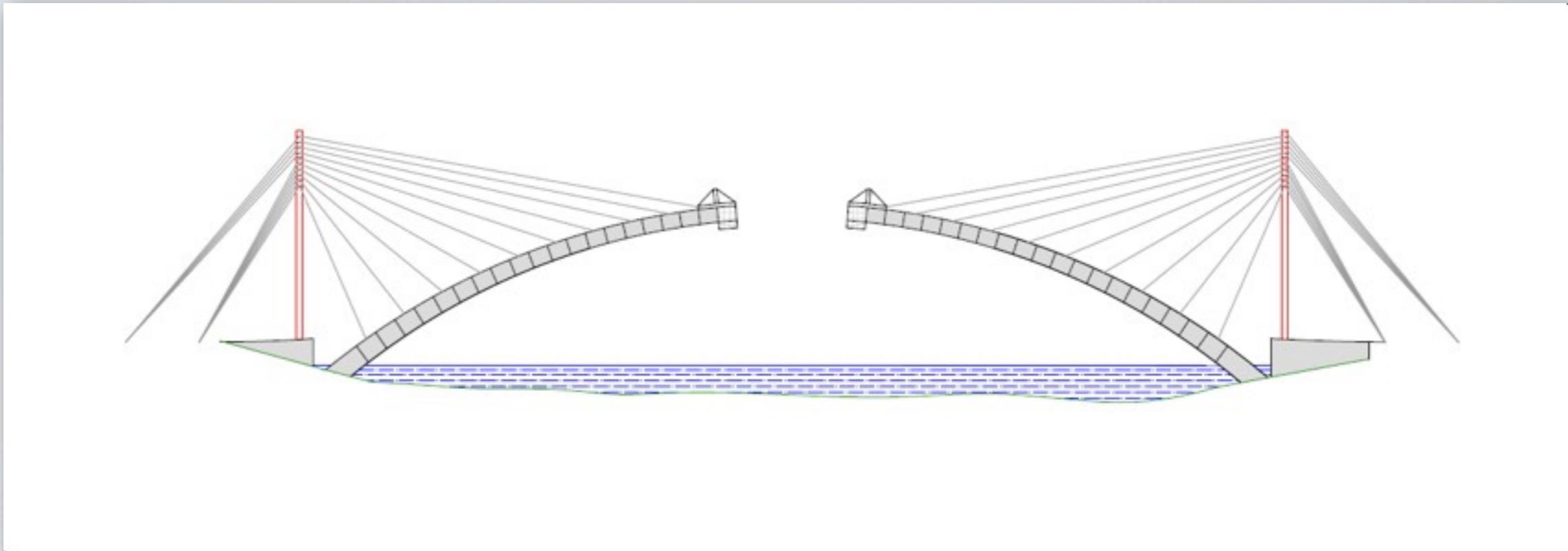
Processo Construtivo



- Retirada dos cimbres e colocação do restante material de aterro
- Montagem dos carrinhos de avanços
- Retirada das ensecadeiras e reposição do escoamento natural do rio



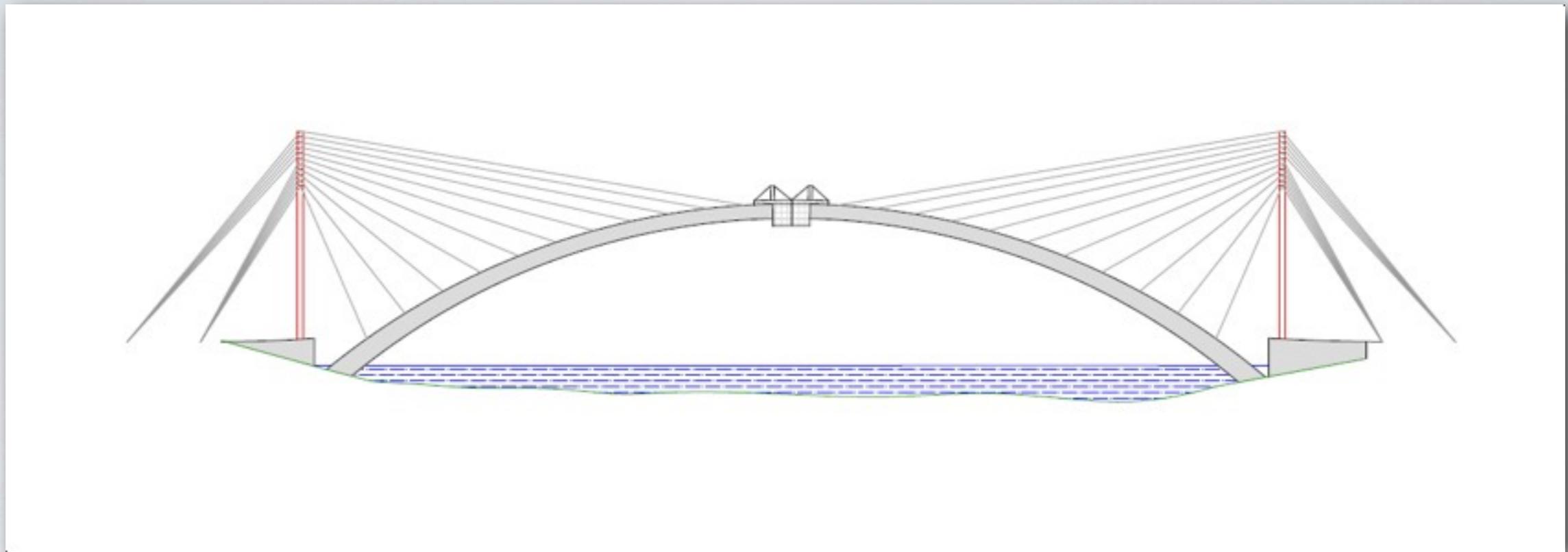
Processo Construtivo



- Montagem de torres provisórias e execução do sistema de atirantamento provisório
- Montagem das cofragens e colocação das armaduras seguida da betonagem da aduela
- Aplicação do pré-esforço nos cabos provisórios



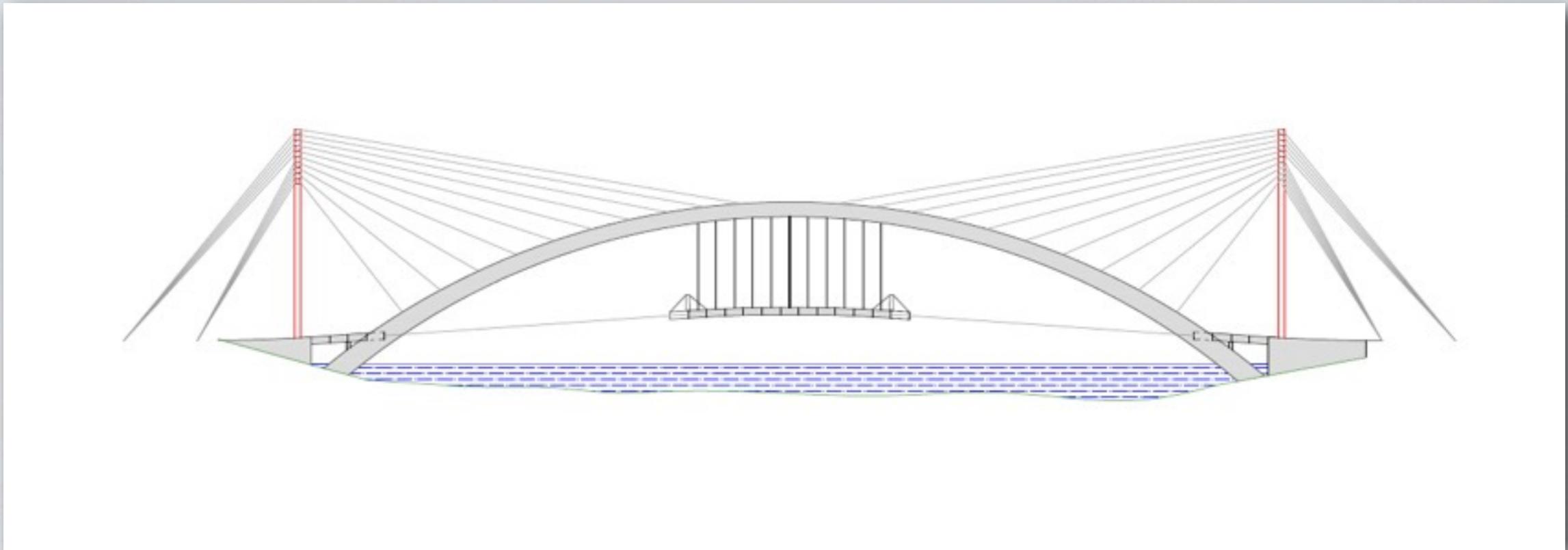
Processo Construtivo



- Repetição dos dois anteriores procedimentos até ao fecho do arco



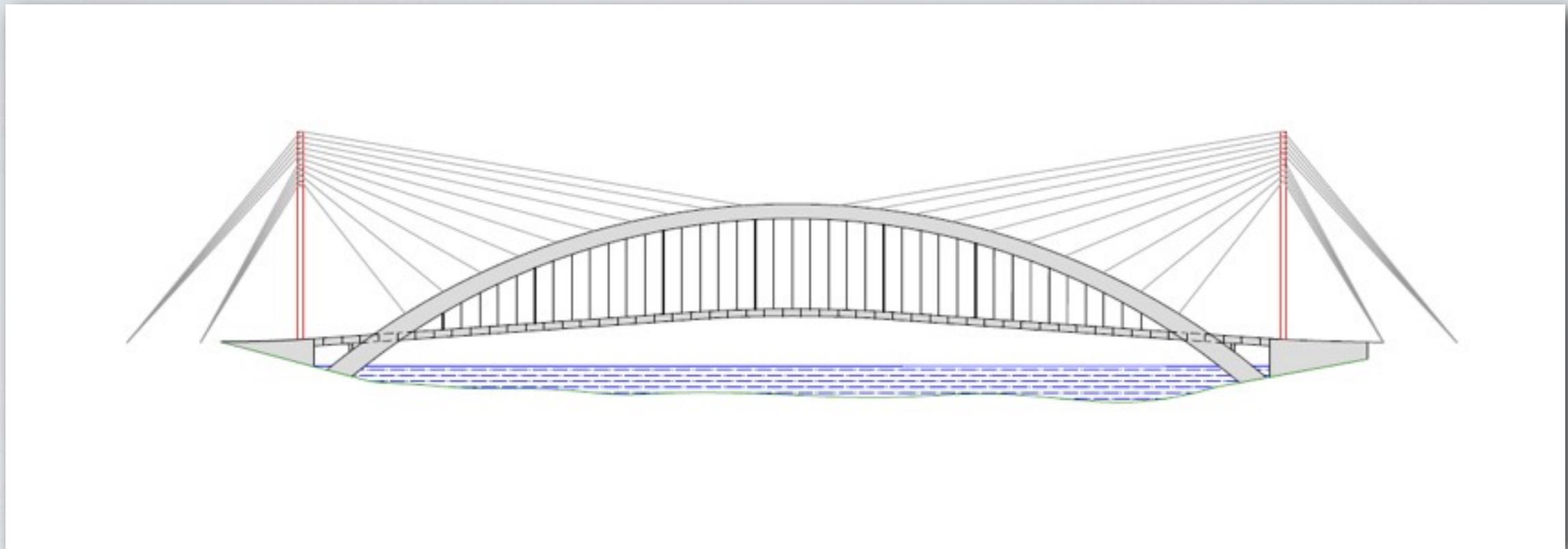
Processo Construtivo



- Montagem das armaduras e betonagem da aduela
- Aplicação do pré-esforço provisório nos cabos do tabuleiro
- aplicação do pré-esforço nos tirantes



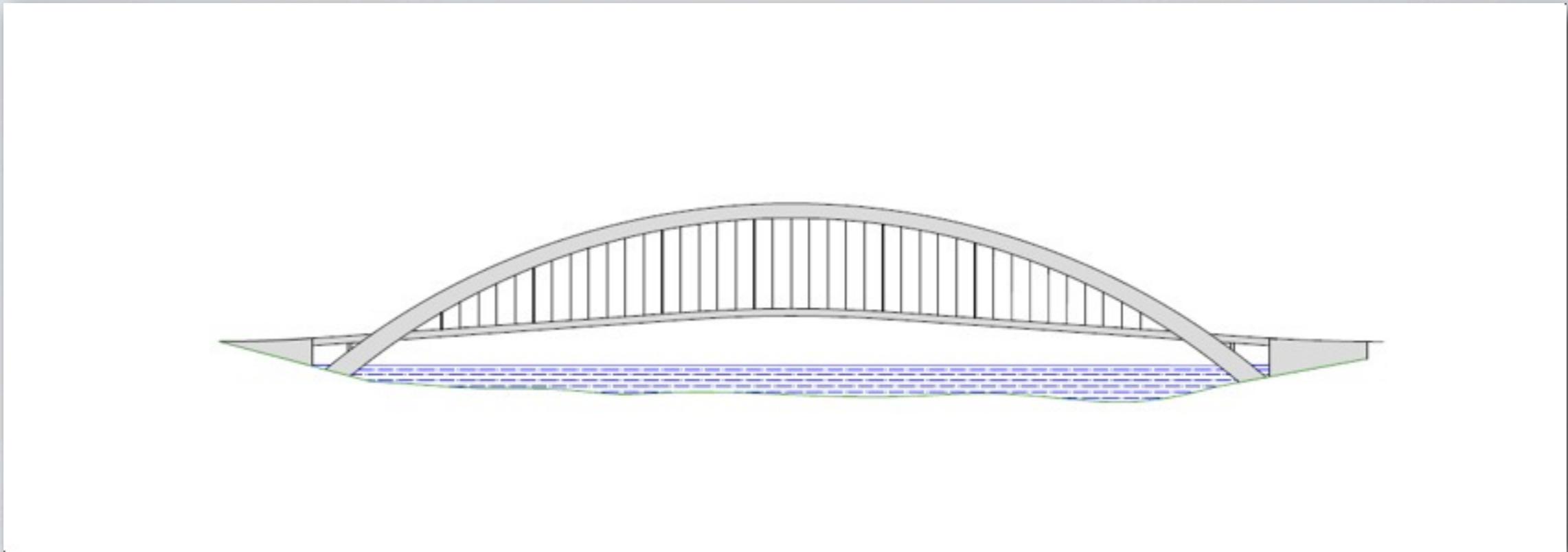
Processo Construtivo



- Avanço dos carrinhos
- Inicia-se novo ciclo com a betonagem da aduela seguinte
- Aplicação do pré-esforço final de continuidade e ajuste do pré-esforço nos tirantes



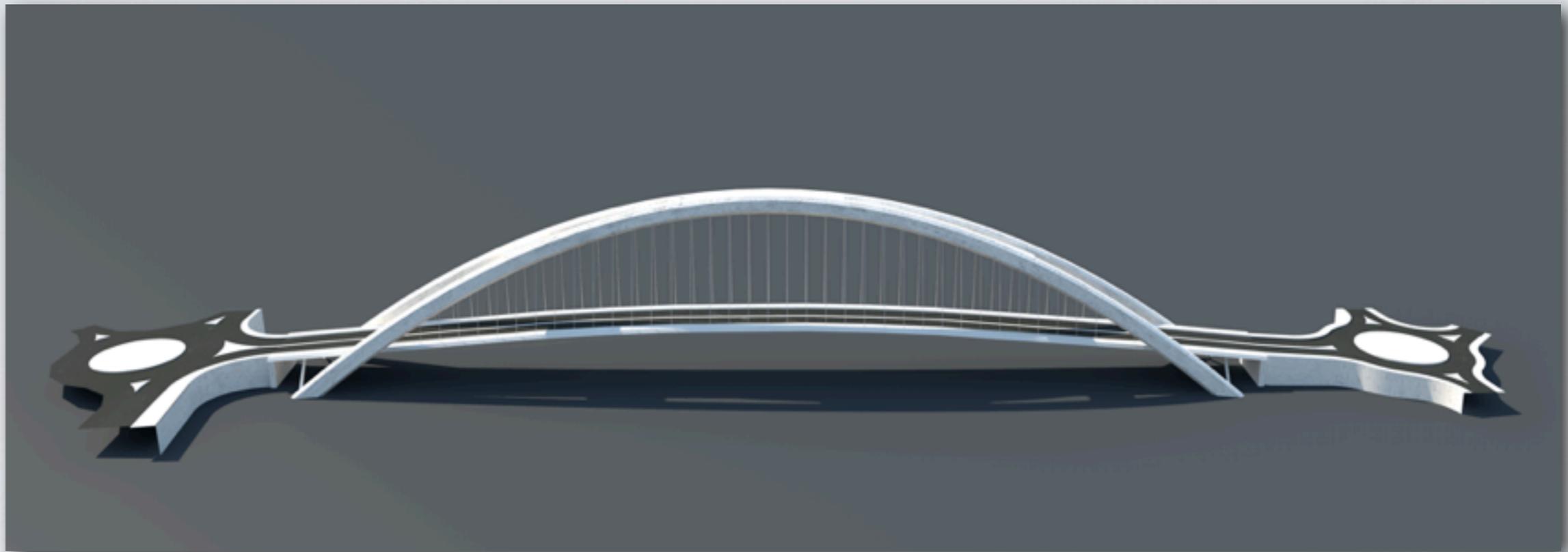
Processo Construtivo



- Remoção dos carrinhos de avanços e torres provisórias
- verificação da qualidade estrutural
- Execução dos acabamentos finais e acessos



Processo Construtivo





Estimativa Orçamental

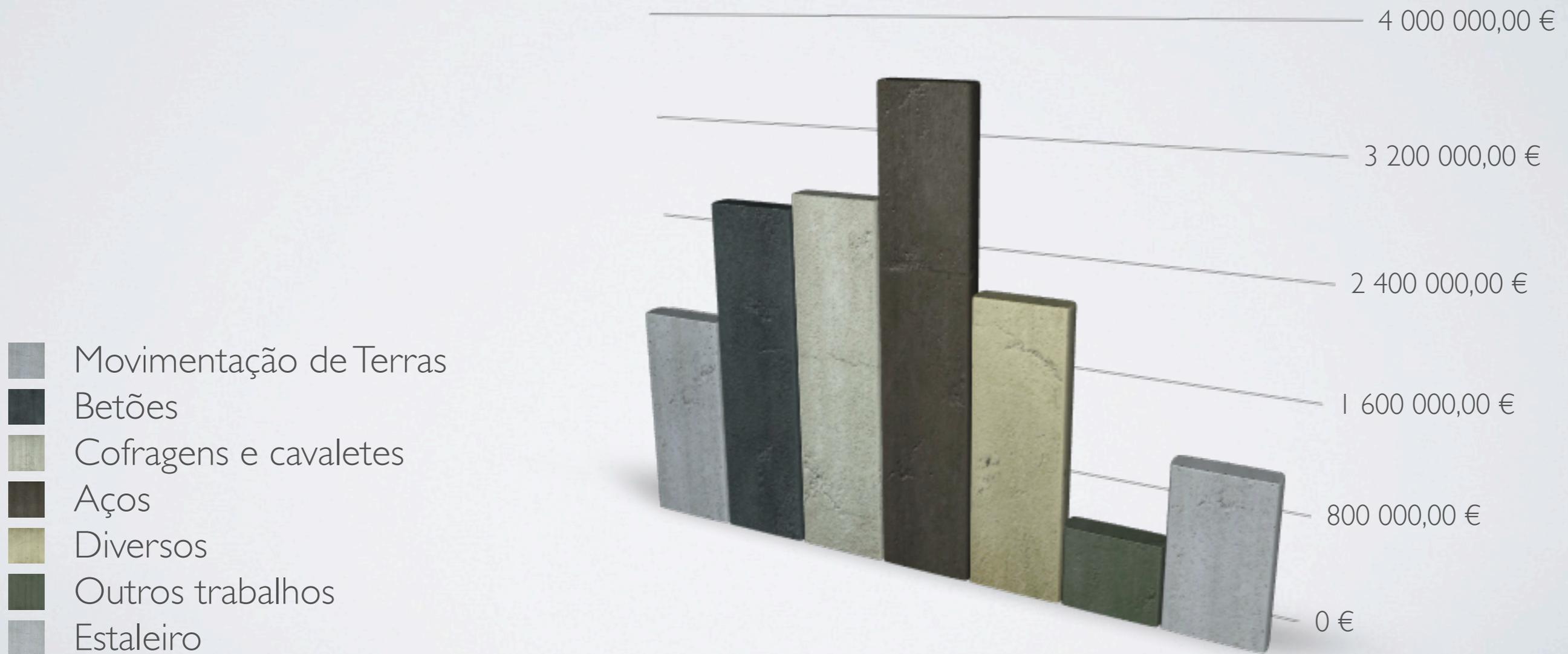
- Custo total da Obra: 15.000.000,00€

- Movimentação de Terras
- Betões
- Cofragens e cavaletes
- Aços
- Diversos
- Outros trabalhos
- Estaleiro



Estimativa Orçamental

- Custo total da Obra: 15.000.000,00€





Estimativa Orçamental

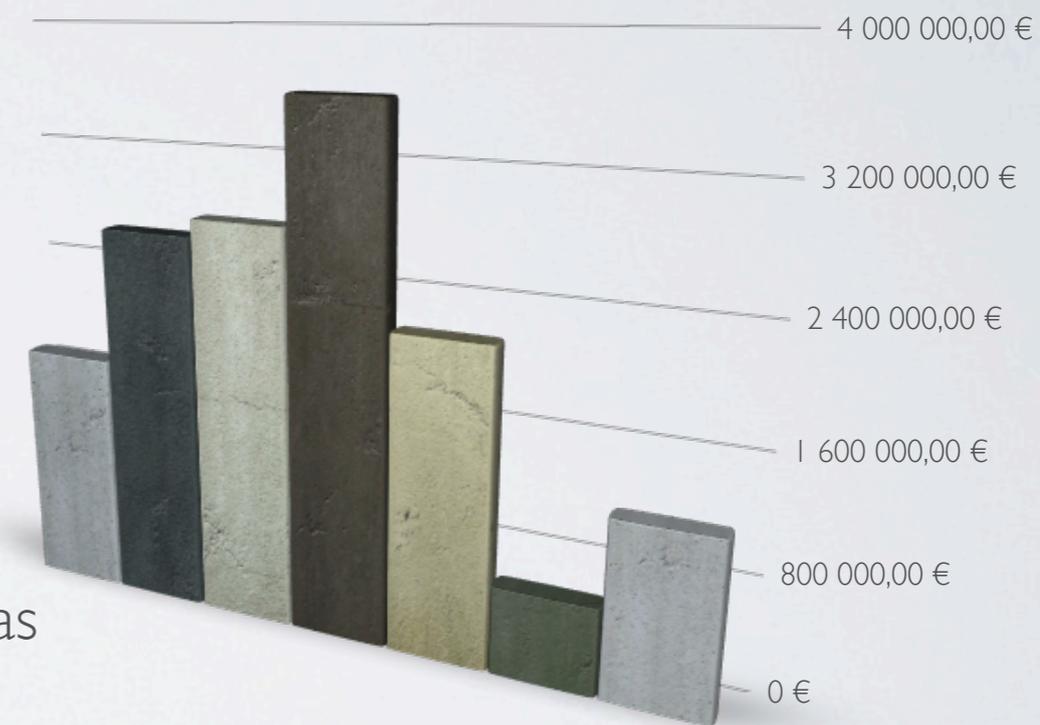
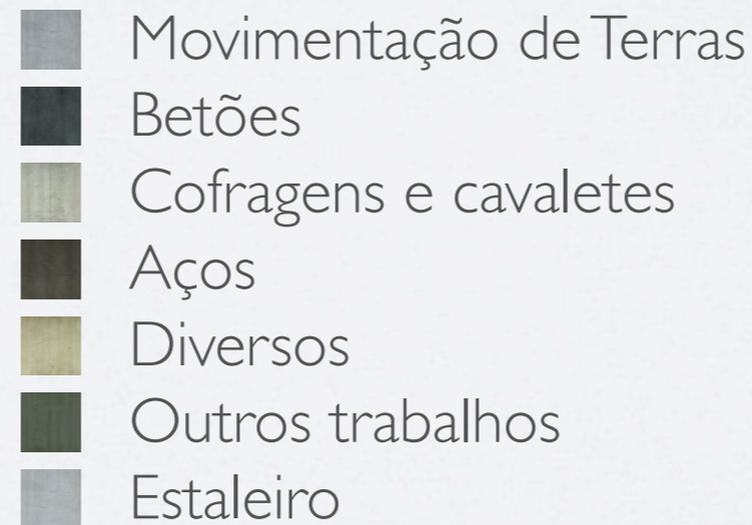
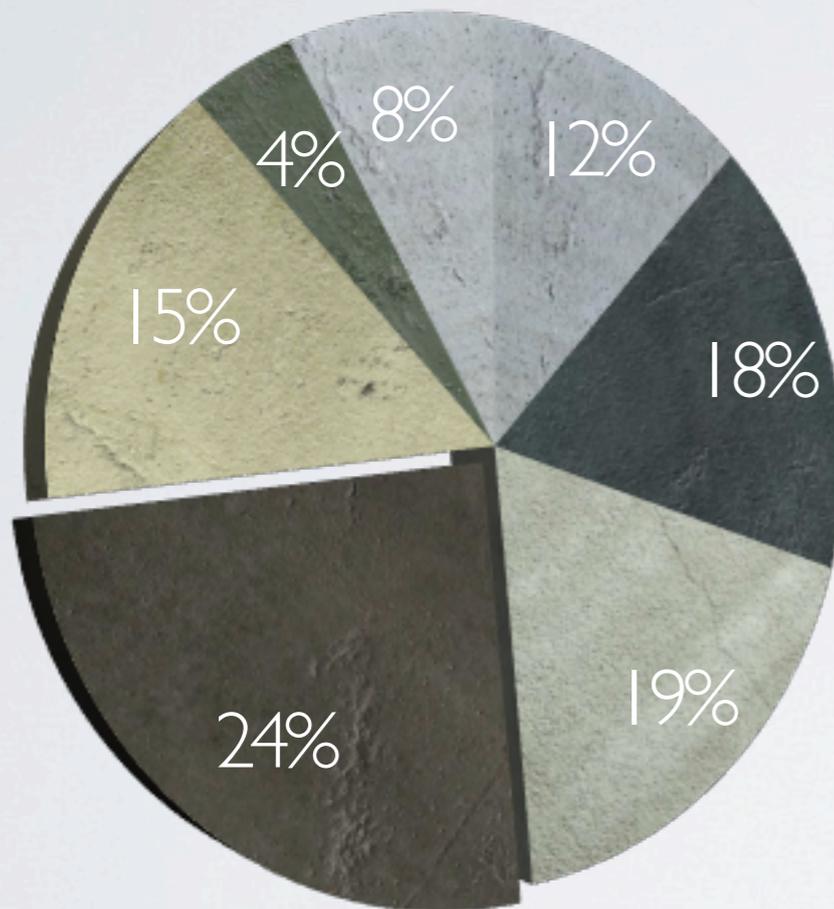
- Custo total da Obra: 15.000.000,00€





Estimativa Orçamental

- Custo total da Obra: 15.000.000,00€





Impacto Visual





Comentário Final

- Solução possível e exequível
- Tráfego rodoviário e pedonal assegurado a baixa cota
- Incentivo ao desenvolvimento urbano local
- Impacto positivo na envolvente paisagística
- Navegabilidade assegurada



Desenvolvimentos Futuros

- No âmbito da geotécnica
 - Ensaios de campo - informações rigorosas do solo
- No âmbito da Construção
 - Obtenção das redistribuições de esforços inerentes ao processo construtivo
 - Comportamento reológico dos materiais
- Análise dinâmica mais aprofundada
- Pormenorização de todas as peças desenhadas



OBRIGADO PELA ATENÇÃO

