

ESTRATÉGIAS para GESTÃO de INTERVENÇÕES em ESTRUTURAS EXISTENTES APOIADAS no CONCEITO de ANÁLISE de RISCO: DOIS EXEMPLOS PRÁTICOS

THOMAZ RIPPER

JOÃO NUNES FERREIRA



- I- Projeto de RECUPERAÇÃO e REFORÇO do Tabuleiro de uma Ponte Metálica Centenária sobre o Rio Tejo**

- II- ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO para Definição da Estratégia de Intervenção nas Obras Especiais do Adutor de Castelo do Bode, da Empresa Portuguesa de Águas Livres (EPAL)**

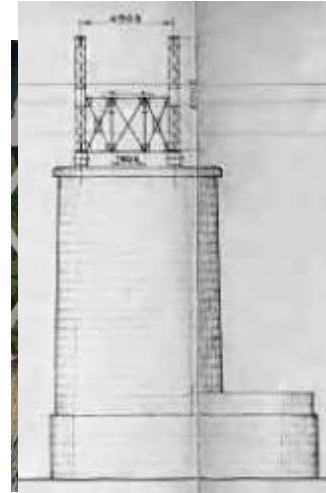
- III- Futuro – Presente: APROVEITAMENTO de TECNOLOGIAS DE PONTA para OTIMIZAÇÃO dos Trabalhos**

PROJETO DE RECUPERAÇÃO E REFORÇO DO TABULEIRO DE UMA PONTE METÁLICA CENTENÁRIA SOBRE O RIO TEJO



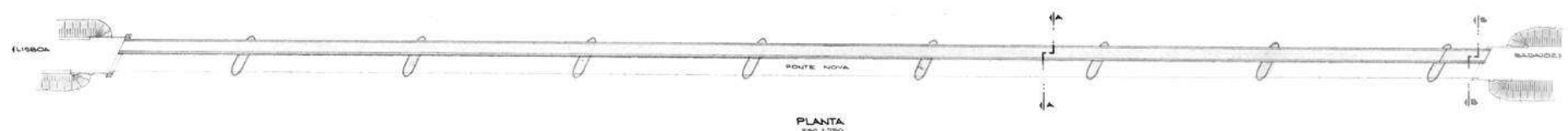
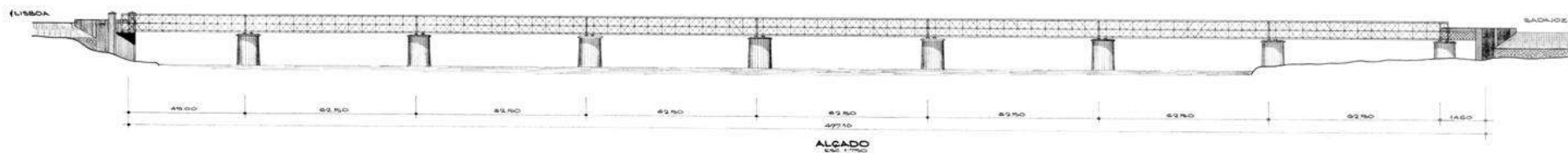
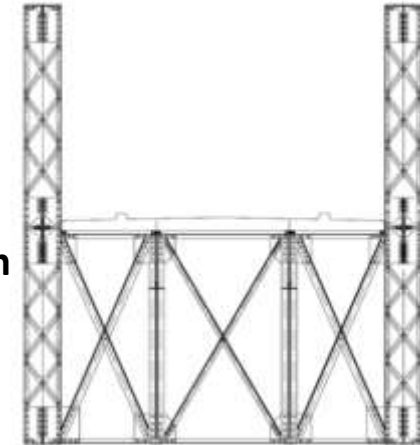
I.1. Historial da Obra

- Construída pela Maison Eiffel em 1893
- Ponte Ferroviária de 1895 a 1979
- Ponte desativada de 1979 a 1984 e construção, ao lado, de um novo tabuleiro ferroviário
- Adaptação a Ponte Rodoviária em 1984
- Interdição ao trânsito em Julho de 2010
- Projeto de Recuperação e Reforço em Julho de 2010
- Aberta ao trânsito em Abril de 2011



I.2. Breve Descrição da Obra de Arte

- Comprimento total de 497,1 m
- 8 tramos contínuos (45 m + 7 × 62,5 m)
- Existe na margem sul mais um tramo, independente e isostático, com 14,6 m
- 8 pilares de alvenaria revestidos a cantaria e 2 encontros
- Aparelhos de apoios fixos sobre o pilar central e móveis nos restantes
- Tabuleiro constituído por duas vigas contínuas, planas e paralelas, com 6 m de altura
- Tabuleiro em laje de concreto assente sobre duas longarinas
- Transversinas em treliças com 2,80 m de altura, com afastamento de 5 m



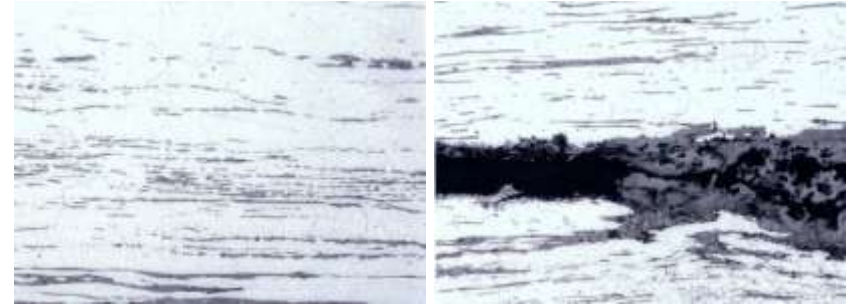
I.3. Principais Anomalias

- Danos provocados pelo impacto mecânico de veículos
- Corrosão g
- Corrosão i
- Delaminaç
- Fissuras/F
- Trincas
- Rebites fra
- Desalinhar



I.4. Caracterização dos Materiais

- Elementos estruturais em “Ferro Pudlado”
- Ensaio do Material Estrutural:



- ✓ Ensaio de caracterização mecânica
- ✓ Ensaio de caracterização química

Provede	f_y	f_u	Mínimo		Médio		Máximo		Desvio Padrão		Coef. Var.		Valor Característico 95%	
	(MPa)	(MPa)	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u
T T T	Material:	Amostras				Propriedades afectadas pelo aumento do componente				335				
		AM1	AM2	AM3		Valor Médio								
	Carbono	0,014	0,015	0,009		0,013		Aumento da dureza, resistência e temperabilidade. Diminuição da tenacidade e soldabilidade						
	Sulfatos	0,025	0,048	0,055		0,043		Efeito negativo na resistência e tenacidade.						
	[P] Fósforo	0,074	0,082	0,074		0,077		Aumento na dureza e na fragilidade.						
	Sílica	0,120	0,180	0,200		0,167		Efeito similar ao carbono, aumento do comportamento frágil.		+08 1.E+09				
Manganês	0,022	0,010	0,016		0,016		Aumento na dureza e fragilidade.		a do EC3					

I.5. Ensaios na Estrutura

Objetivo: conhecer o comportamento global da ponte e calibrar os modelos de cálculo

- ✓ Medição da frequência própria vertical do tabuleiro
- ✓ Ensaio de carga e medição de extensões no tabuleiro

Seção Transversal (Total)

Veículo Localizado Junto ao Montante M33 (Meio Vão - 3º Tramo)

Painel	Mira	Fotogrametria		Topografia
		Desl. Vert. (mm)	Precisão (mm)	Desl. Vert. (mm)
57B	1	-11	2	
	2	-12	2	-10
58B	3	-11	2	
	4	-12	2	
59B	5	-11	2	
	6a	-11	2	-9
	6b	-11	2	-9
60B	7	-11	2	
	8	-10	2	
	9	-9	2	-10
	10	-9	2	

Veículo e desl. vert. Tramo 6

nas
ma
nhte

I.6. Metodologia para Verificação e Dimensionamento de Reforços

- Verificação Determinística da Segurança da Estrutura Existente:

$$S_d = \gamma_{sd} S(\gamma_f \times s_k) \leq R_d = \gamma_{rd} R(f_k \times \frac{1}{\gamma_m})$$



estrutura Reforçada (Dimensionamento dos Reforços):

S_d - Valor de dimensionamento dos esforços atuantes;

R_d - Valor de dimensionamento dos esforços resistentes, atendendo aos níveis de danos

S_d^{ST} - Valor de dimensionamento dos esforços atuantes;

R_d^{ST} - Valor de dimensionamento dos esforços resistentes atendendo ao nível de danos, às tensões iniciais nos materiais existentes e à interação destes com os materiais de reforço;

I.7. Análise de Risco

- Para definição dos elementos a intervir, foi realizada uma análise de risco, em que foram considerados todos os cenários de carregamento projetados.

Veículo	Peso Total	Características
	390 kN	Camião Grua de Inspeção [CGI]
	420 kN	Camião Cisterna Bombeiros Constância [CB]
	35 kN	Veículo Leve de Passageiros e Mistos [V1]
	180 kN	Veículo [V2] Equivalente a veículo de dois eixos
	300 kN	Veículo [V3] Equivalente a veículo de três eixos
	400 kN	Veículo [V4] Equivalente a veículo de cinco ou mais eixos

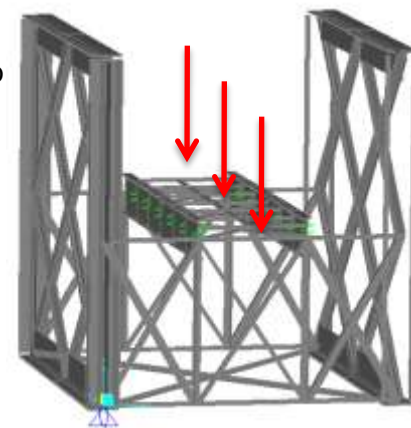
- A verificação realizada compreendeu os estados limites últimos de compressão, tração, cisalhamento e fadiga.

- Veículo de Calibração do Modelo
- Veículo de Calibração do Modelo e de Dimensionamento
- Veículo de Dimensionamento e para Análise de Risco
- Veículo para Análise de Risco

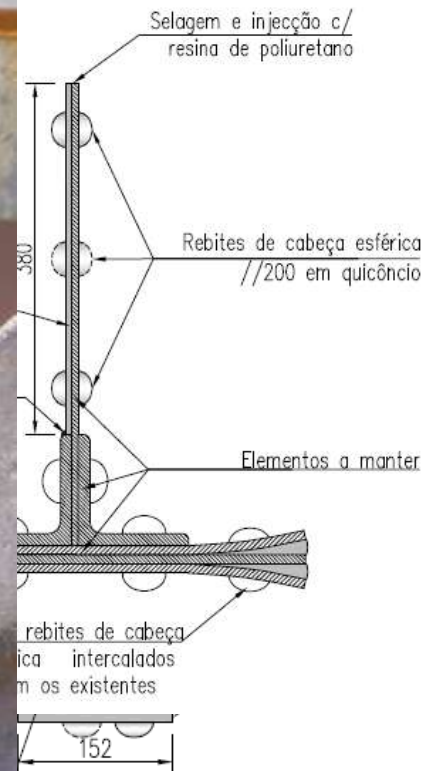
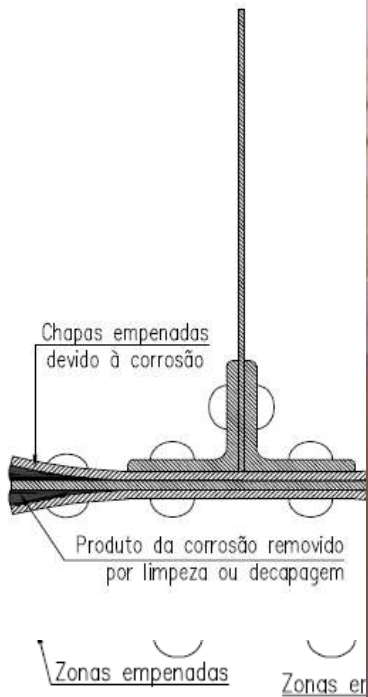
SEM RISCO DE RUÍNA
• Carregamentos aplicados no modelo total em elementos finitos

Risco de ruína dútil com resistência remanescente

Risco



Corte 6-6'



Redução de 20% da Seção

Elementos Em
Complementação e/c

Elementos Delaminados
Complementação e

Arestas de Contato entre
Selagem e injeção com re

Perda de Seção
Operação => Localizada
ção Integral => Generalizada

Elementos Fraturados
Operação => Localizada
ção Integral => Generalizada

ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO PARA DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE INTERVENÇÃO NAS OBRAS ESPECIAIS DO ADUTOR DE CASTELO DO BODE, DA EMPRESA PORTUGUESA DE ÁGUAS LIVRES (EPAL)



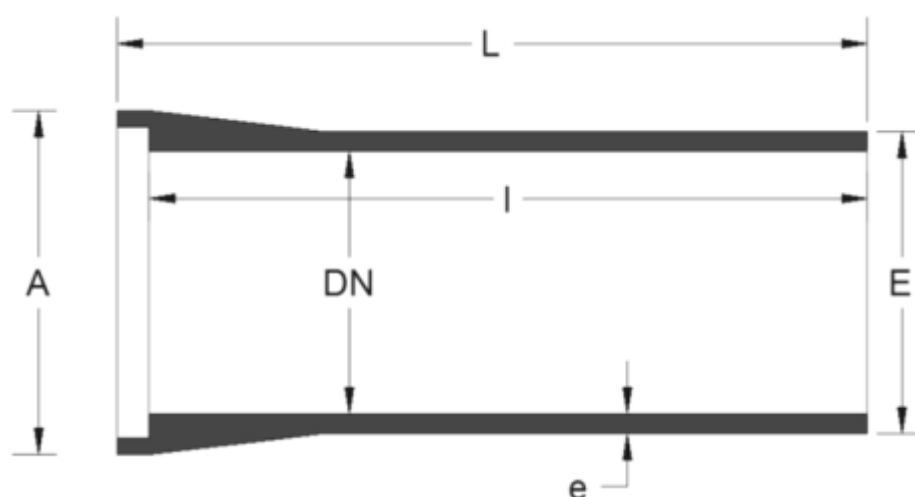
II.1. A Importância do Sistema Analisado

- Principal sistema de abastecimento de água a Lisboa
- 2100 km de extensão de condutas
- Obras concluídas em 1987
- Objetivo do Dono da Obra:

Analisar as hipóteses de intervenção que garantam, com a **confiabilidade** desejada, o abastecimento de água do adutor durante pelo menos **mais 20 anos**.



II.2. Breve Descrição das Obras de Arte



II.3. Localização Geográfica das Obras de Arte em Estudo



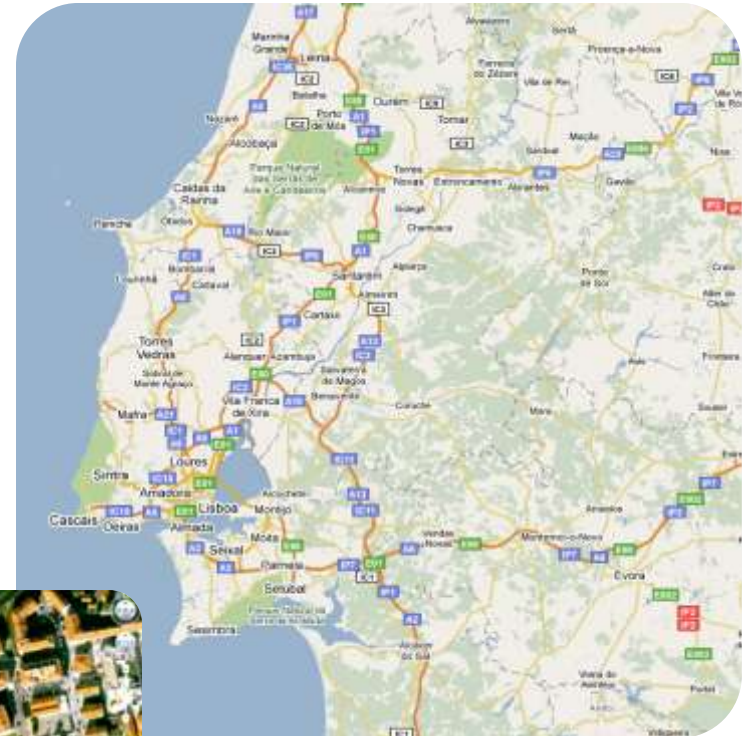
Almonda



Aveiras

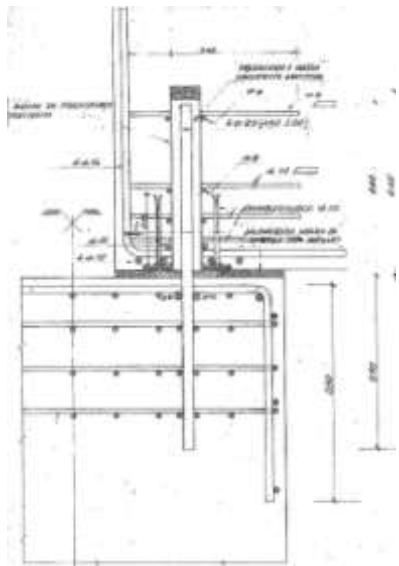


Azambuja

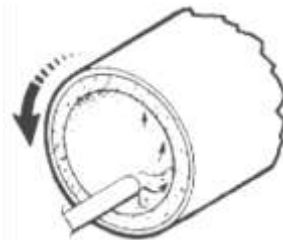


II.4. Recolha de Informação – Histórico da Construção

- Toda informação histórica é fundamental;
- Mais informação resulta em análise mais precisa (confiável)



Projeto de execução



Sistema de execução



Registro de anomalias



Testemunhos de episódios danosos

II.5. Complementação / Ampliação da Informação Disponível

- Principais Anomalias na Superestrutura



Esmaçimento do concreto nos apoios
Espessura do cobrimento insuficiente no tabuleiro
Corrosão de armaduras recentes
cobrimento em locais recentes
Fissuração a meio vão em vigas (0,15 mm // 20cm)

- Principais Anomalias no Adutor



Fissura longitudinal com presença de água no adutor centrífugo
Fissura com presença de água no adutor centrífugo
Deficiente técnica de execução / instalação

• Principais Anomalias no Adutor



Fissura com

com s

ção de material

Ensaio: Medição do Cobrimento das Armaduras na Superestrutura

Equipamento: Hilti PS200 Ferroskan

Ensaio: Medição da Profundidade de Carbonatação na Superestrutura
Ensaio: Medição da Profundidade de Carbonatação na Tubulação
Ensaio: Conformidade Geométrica:



Elemento	Almonda	Aveiras	Azambuja	Mínimo	Médio	Máximo	d.p.	coef. Var.
Pilares	4	21	42	5	44	14	30%	36%
Vigas	4	21	42	5	44	14	30%	36%
Tabuleiro	4	21	42	5	44	14	30%	36%
Pilares	4	21	42	5	44	14	30%	36%
Tabuleiro	4	21	42	5	44	14	30%	36%
Pilares	4	21	42	5	44	14	30%	36%
Vigas	4	21	42	5	44	14	30%	36%
Tabuleiro	4	21	42	5	44	14	30%	36%

Núcleo interior do tubo

Argamassa exterior e zona de transição com a zona recuperada

Profundidade de Carbonatação da Argamassa Exterior

Não foram detectadas alterações relevantes entre a geometria real dos elementos de concreto armado e o registrado no "as-built".

II.6 Avaliação do Desempenho Estrutural

Ação vs Resistência

Esforços Solicitantes (ELU e ELS)

Vigas

Esforços

Não condicionante

Descompressão

Não condicionante

Abertura de Fissuras

Não condicionante

Deformação

Não condicionante

Pilares e

Aparelhos de Apoio

Esforços

Condicionado ao reforço
sísmico de vários pilares e
dos aparelhos de apoio

Deformação e Rotação

Não condicionante

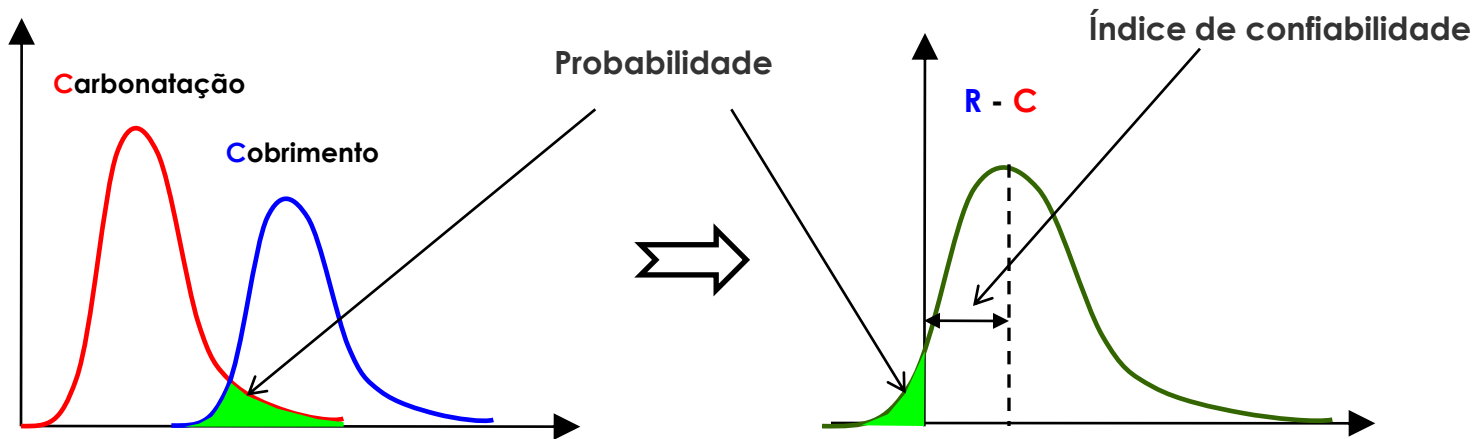
Tubulação

Pressão de Serviço

Não condicionante

II.7 Avaliação da Vida Útil Condicionante - Durabilidade

- Comparação entre agentes agressores (**A**ção) e proteção (**R**esistência);
- Estabelecimento da classe de consequência e índice de confiabilidade associado.



Classes de Consequência	Classe de confiabilidade	RC3	RC2	RC1	Instruções na Engenharia Civil
CC3	Elevadas consequências para perda de vida humana, ou consequências econômicas, sociais ou ambientais muito elevadas.	2,3%	6,7%	12%	Edifícios altos, pontes principais, edifícios públicos onde as consequências de ruína são elevadas
CC2	Médias consequências para perda de vida humana, consequências econômicas, sociais ou ambientais consideráveis.				Edifícios de habitação, industriais e de escritórios onde as consequências de ruína são médias
CC1	Pequenas consequências para perda de vida humana, e consequências econômicas, sociais ou ambientais pequenas ou negligenciáveis.				Armazéns e edifícios pouco frequentados

• Caracterização Ambiental: Classe de Exposição

Azambuja				
	2030	2060	2080	
Pilares	$\beta=1,48$	$\beta=1,30$	$\beta=1,12$	Interior do tubo: XC2
Vigas	$\beta=2,02$	$\beta=1,84$	$\beta=1,66$	Exterior do tubo: XC4
Tabuleiro	$\beta=2,23$	$\beta=2,09$	$\beta=1,95$	
Aveiras				
	2030	2060	2080	
Pilares	$\beta=1,08$	$\beta=0,85$	$\beta=0,64$	XC4
Vigas	$\beta=1,78$	$\beta=1,52$	$\beta=1,27$	
Tabuleiro	$\beta=2,98$	$\beta=2,80$	$\beta=2,63$	
Almonda				
	2030	2060	2080	
Pilares	$\beta=2,09$	$\beta=1,74$	$\beta=1,42$	XC2
Vigas	$\beta=1,11$	$\beta=0,77$	$\beta=0,47$	XC4
Tabuleiro	$\beta=4,85$	$\beta=4,42$	$\beta=3,99$	
Tubagem	$\beta=5,68$	$\beta=4,68$	$\beta=3,68$	

Concreto armado exposto a ciclos de molhagem/secagem.
Superfícies exteriores de concreto armado expostas à chuva.

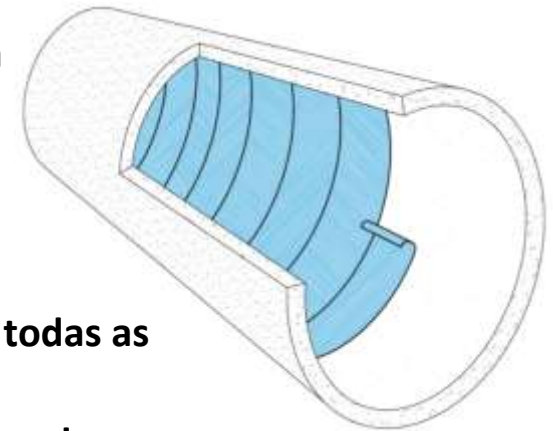
Ação vs Resistência - Durabilidade (ELU)

Vigas e Pilares	Carbonatação Significativa e Deficiente Espessura de Cobrimento das Barras	Condicionante
	Cloretos	Não condicionante
	Ataque Químico	Não condicionante
	Outros	Não condicionante
Aparelhos de Apoio	Corrosão das Barras de Travamento	Condicionante
Tubagem	Corrosão de Armaduras por Carbonatação	Não condicionante
	Corrosão de Armaduras pela Existência de Fissuras Abertas	Condicionante
	Corrosão de Armaduras por Intervenções Recuperação Mal Executadas (Pilhas por Diferença de Potencial entre o Material de Recuperação e o Concreto Original)	Condicionante
	Juntas e Estanquicidade	Não condicionante

II.8 Opções de Intervenção

• Opção A

- ✓ Aproveitamento dos tubos existentes com reforço interior com tecido epóxico armado com fibras de carbono
- ✓ Recuperação da tubulação, pelo exterior
- ✓ Recuperação da estrutura de suporte
- ✓ Proteção pela aplicação de inibidor de corrosão migratório em todas as superfícies, recuperadas ou não
- ✓ Revestimento em tinta permeável ao vapor de água e retardador da entrada de CO₂.



• Opção B1 e B2

- ✓ Substituição dos tubos existentes por tubulação metálica
 - ✓ B1 - Recuperação e proteção da estrutura de suporte
 - ✓ B2 – Demolição da estrutura de suporte e colocação de nova tubulação enterrada

II.9. Estudo Técnico-Econômico

- A escolha da melhor alternativa de intervenção passa pela **seleção da opção mais eficiente, do ponto de vista técnico-econômico.**
- Usar como critério de seleção apenas **o custo inicial de intervenção é geralmente ilusório.** Soluções com custos iniciais inferiores **não são**, necessariamente, mais económicas ao longo da vida útil da estrutura.

Expressão utilizada para o cálculo do custo do ciclo durante a vida útil tendo em conta o valor equivalente atual:

$$CCV = CP + CC + CM + CRS + CU$$

CCV = Custo de Ciclo de Vida; **CP** = Custo de Projeto; **CC** = Custo de Construção;
CM = Custo de Manutenção; **CRS** = Custo de Recuperação ou Substituição; **CU** = Custo de Utilização.

Estudo Técnico-Econômico para Definição da Estratégia de Intervenção nas Obras Especiais do Adutor de Castelo do Bode, da Empresa Portuguesa de Águas Livres (EPAL)

Solução A - Recuperação da Superestrutura e da Tubulação

<p style="text-align: center;">Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> • solução mais sustentável; • menor produção de resíduos; • menor consumo de energia; • muito pouco sensível à variação do preço da sua tarefa principal; • menor custo global ao longo da vida útil; • rapidez de execução; • não necessita da interrupção permanente do abastecimento durante a totalidade dos trabalhos. 	<p style="text-align: center;">Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> • necessidade de inspeções periódicas; • pouca confiabilidade dos elementos estruturais existentes; • maior incerteza na quantificação de áreas e preços; • maior dificuldade na eventual necessidade futura de substituição de tubulações; • dificuldade na boa tradução, em obra, dos pressupostos de projeto; • incerteza no desempenho dos aparelhos de apoio; • desempenho sísmico inferior.
<p style="text-align: center;">Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • desenvolvimento de novas tecnologias; • facilmente adaptável a outras obras; • história de uma evolução favorável de preços nos materiais de reforço tecnologicamente avançados. 	<p style="text-align: center;">Ameaças</p> <ul style="list-style-type: none"> • poucas empresas especializadas; • a extrapolação da confiabilidade da solução para mais de vinte anos não é linear.

Solução A - Recuperação da Superestrutura e da Tubulação

<p style="text-align: center;">Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> • maior fiabilidade no funcionamento das tubulações, pela introdução de componentes novos; • maior facilidade na substituição pontual e eventuais recuperações; • melhoria do comportamento sísmico, pela redução de peso do sistema; • maior confiabilidade dos aparelhos de apoio, que seriam novos; • facilidade de inspeção; • possibilidade de implementação de sistemas de manutenção. 	<p style="text-align: center;">Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> • menos sustentável; • custo global de intervenção mais elevado; • necessidade de implantação de sistemas de proteção catódica; • menor confiabilidade nos elementos estruturais da superestrutura; • incerteza na quantificação das áreas a recuperar; • tempo de execução elevado.
<p style="text-align: center;">Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • vida útil mais alargada para a tubulação; • solução adaptável a outras Obras Especiais. 	<p style="text-align: center;">Ameaças</p> <ul style="list-style-type: none"> • variação de preço das tubulações metálicas; • poucas empresas especializadas.

Solução B2 - Demolição e Construção de Tubulação Enterrada

<p style="text-align: center;">Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> • maior confiabilidade no conhecimento dos materiais, que são inteiramente novos; • reduzido impacto visual; • versátil; • facilmente transportável; • vida útil expectável superior, em média, aos vinte anos; • melhor desempenho sísmico. 	<p style="text-align: center;">Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> • custo global de intervenção muito elevado; • intervenção menos sustentável; • produção elevada de resíduos; • muito sensível à variação do preço da tarefa principal; • muita dependência do tipo de solo no custo final; • necessidade de implantação de sistemas de proteção catódica; • grande influência do pH do solo na durabilidade da tubulação.
<p style="text-align: center;">Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • compatibilização de soluções enterradas. 	<p style="text-align: center;">Ameaças</p> <ul style="list-style-type: none"> • variação de preço das tubulações metálicas.

APROVEITAMENTO DE TECNOLOGIAS DE PONTA PARA OTIMIZAÇÃO DOS TRABALHOS

III.1. Inspeções e Ensaios

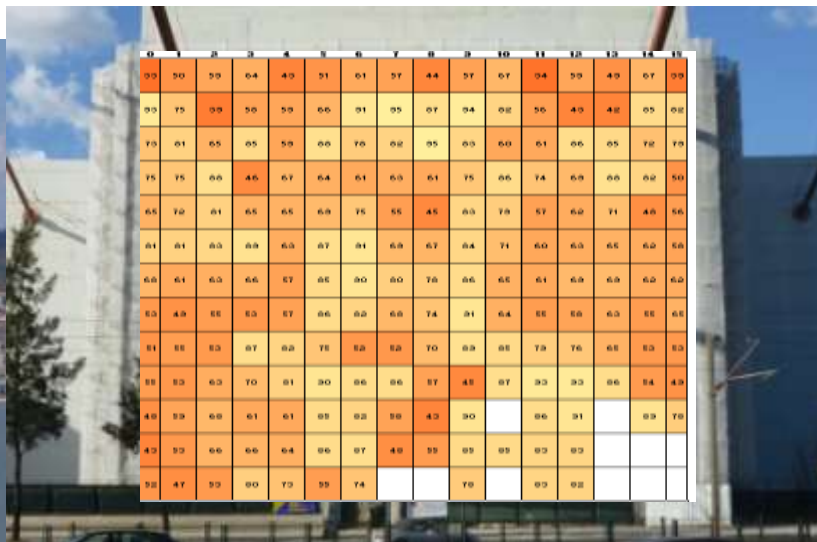
III.2. Projetos de Recuperação

III.3. Gerenciamento de Obras

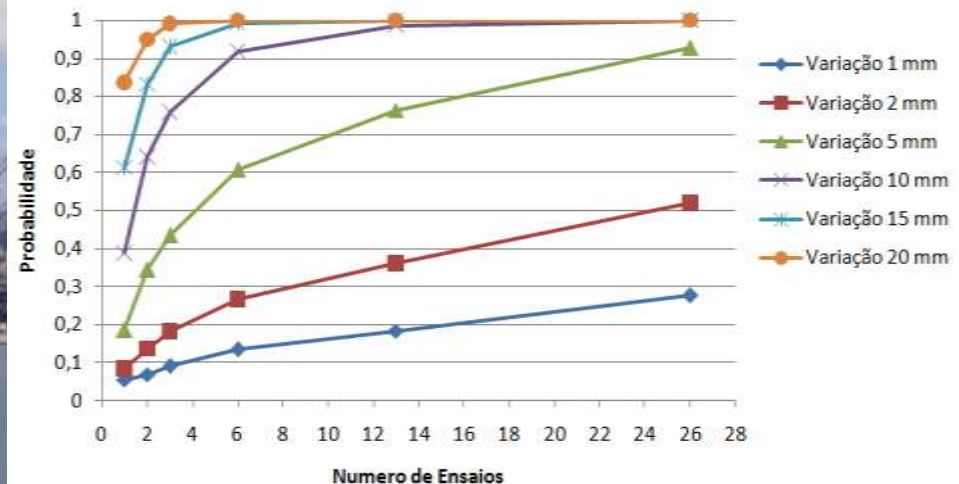
OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE ENSAIOS E A SUA REPRESENTATIVIDADE

Exemplo: Ponte 25 de Abril

- Foram realizados 197 pontos de ensaios de medição de cobrimento no maciço de ancoragem Norte.
- No total foram registradas mais de 1400 leituras.
- Foi estudada a influência do número de ensaios a realizar nos restantes elementos de modo a garantir a representatividade desejada.



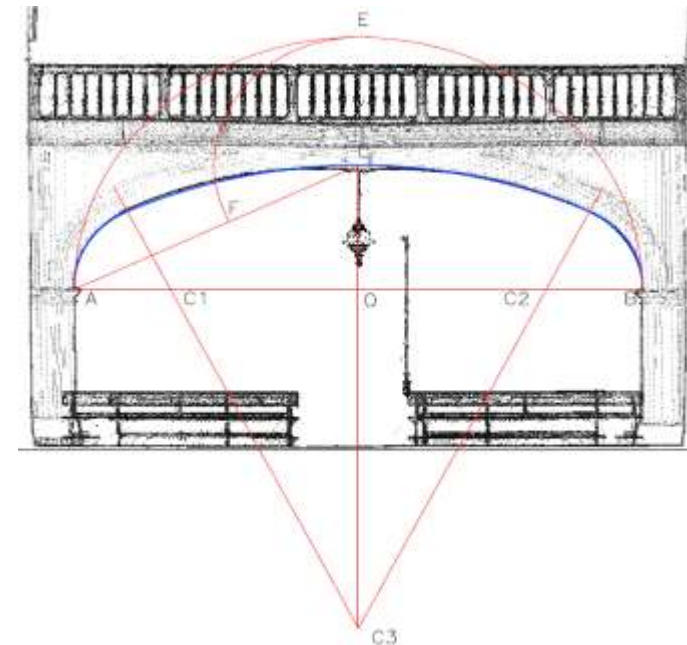
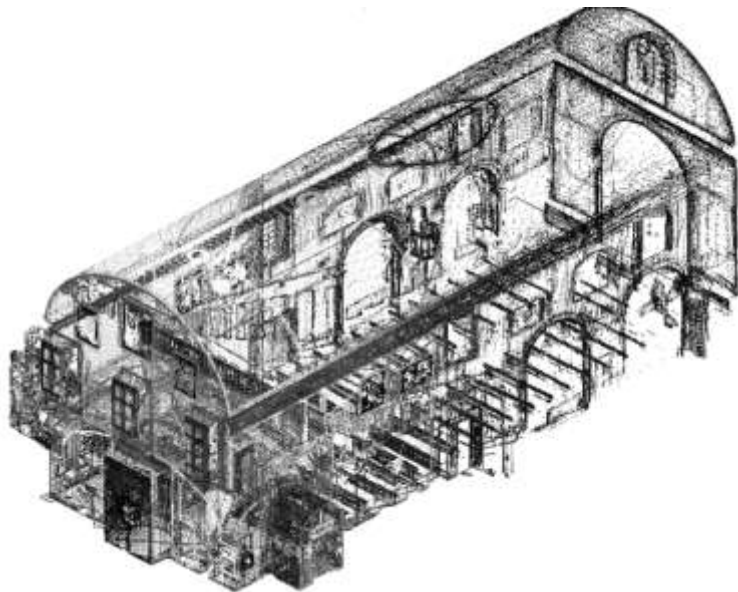
INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE ENSAIOS NA REPRESENTATIVIDADE DOS VALORES DE RECOBRIMENTO



LEVANTAMENTO E GEOMÉTRICO E MEDIÇÃO DE DEFORMADAS COM LASERSCANNING 3D

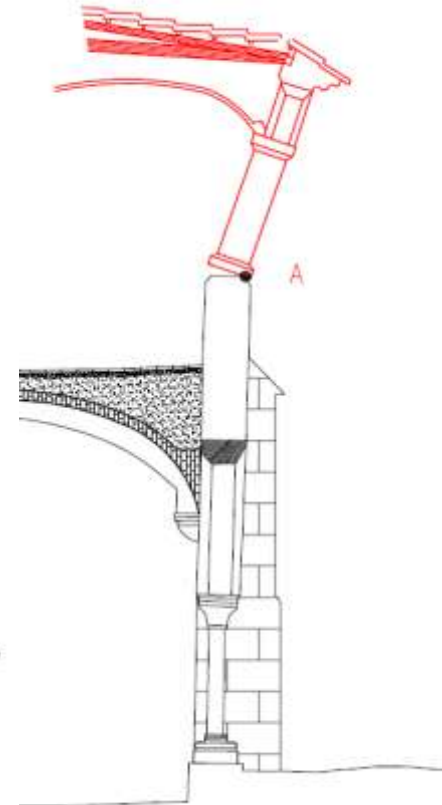
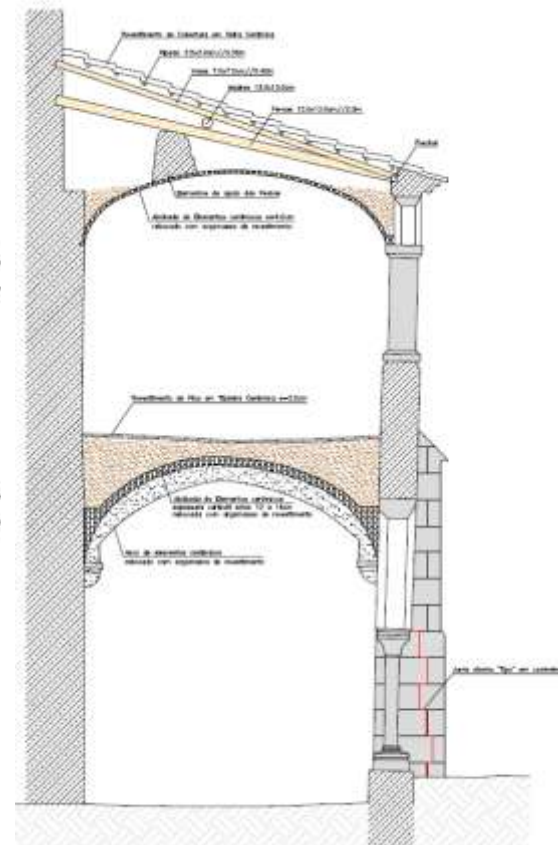
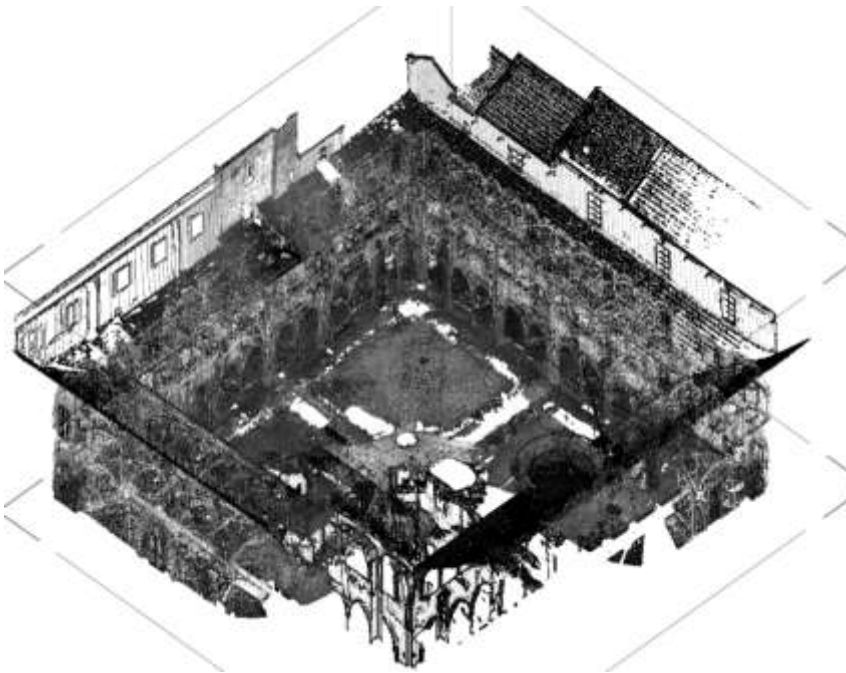
Exemplo: Igreja Matriz de Cascais (calibração dos modelos computacionais)

- Levantamento total da construção em poucos minutos.
- Medição de deformação estruturais total e com grande precisão.
- Versatilidade na elaboração de peças desenhadas.



LEVANTAMENTO E GEOMÉTRICO E MEDIÇÃO DE DEFORMADAS COM LASERSCANNING 3D

Exemplo: Convento das Maltezas, em Estremoz (calibração dos modelos computacionais e ajuste dos macro-blocos de ruptura)



LEVANTAMENTO E INSPEÇÃO DE ANOMALIAS COM QUADCÓPTERO INSTRUMENTADO

O quadrcóptero é uma plataforma aérea não tripulada com as seguintes características principais:

- levantamento e aterrissagem verticais;
- autonomia média de 30 minutos;
- reduzido tempo de preparação para voo (5 minutos);
- exige controle por anemômetro;
- plataforma estabilizada, leve, com modos automáticos de controle de altitude e posição;
- sistema complementar de auxílio ao piloto para evitar colisão com obstáculos (sensores ultrassônicos);
- nível de precisão de um GPS, dependente da constelação de satélites existente;
- programado para garantir grande aproximação à estrutura a inspecionar, possibilitando a obtenção de imagens (fotografias convencionais ou térmicas), vídeos, scanners (detecção de metais), transmitidas em tempo real ao engenheiro que comanda o aparelho.

Exemplo: Ponte de Porto de Mós



ANÁLISE DE RISCO COM RECURSO À LÓGICA FUZZY, REDES NEURONAIS E ALGORITMOS GENÉTICOS

Análise de Risco:

- Ferramenta auxiliadora para a tomada de decisão de entidades gerenciadoras e Donos de obras.
- Baseada na construção de matrizes de risco: **PROBABILIDADE X DANO.**

Lógica Fuzzy:

- Permite a contabilização de variáveis qualitativas e quantitativas na elaboração da matriz de risco, considerando a subjetividade e incerteza inerente a cada atividade.

Redes Neurais e Algoritmos Genéticos:

- Permite a adaptabilidade do sistema fuzzy pelo meio da aprendizagem dos sistemas de informação, tendo por base a criação de um sistema de “inteligência artificial”.

Recuperação do Patrimônio Construído: Uma Profissão, Um Desafio, Uma Paixão

- a importância de valorizar a arte de bem intervir na Construção Civil
- there is a fun piece of me
in a crack in the floor,
an innocent piece,
who walked at the door.
call me a doctor,
or a structural engineer,
draft me a past and a future,
that consent to adhere.

