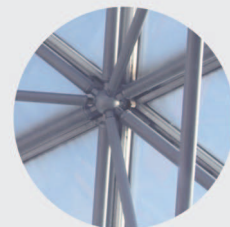
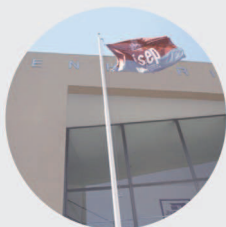
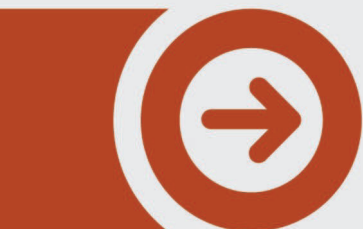




## **Inspeção, Diagnóstico e Projeto no Âmbito da Reabilitação Estrutural**

**JORGE MIGUEL DA SILVA SOARES**

julho de 2016



# **INSPEÇÃO, DIAGNÓSTICO E PROJETO NO ÂMBITO DA REABILITAÇÃO ESTRUTURAL**

**JORGE MIGUEL DA SILVA SOARES**

Julho de 2016



# **INSPEÇÃO, DIAGNÓSTICO E PROJETO NO ÂMBITO DA REABILITAÇÃO**

## **ESTRUTURAL**

JORGE MIGUEL DA SILVA SOARES

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS**

Orientador: Prof. Alexandre Aníbal Meira Guimarães Costa

Co-Orientador: Eng<sup>o</sup> Tiago Ilharco de Moura de Pinho Dias (NCREP - Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património)

**JUNHO DE 2016**



# ÍNDICE GERAL

Índice Geral .....	iii
Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos .....	ix
Índice de texto .....	xi
Índice de figuras.....	xv
Índice de tabelas .....	xix
Símbolos e abreviaturas.....	xxi
1 Introdução .....	1
2 Apresentação do estágio.....	5
3 Inspeção e diagnóstico de estruturas.....	9
4 Caso de estudo I – Armazéns de V.N. de Gaia.....	25
5 Caso de estudo II – Igreja Santa Cruz, Braga .....	75
6 Folha de cálculo de asna tradicional .....	99
7 Conclusões .....	115
Referências Bibliográficas .....	119
Anexos.....	121



## RESUMO

O presente relatório de estágio pretende resumir os trabalhos realizados de inspeção e diagnóstico (I&D), projetos de reabilitação estrutural e desenvolvimento de uma folha de cálculo destinada ao dimensionamento ou verificação de segurança de asnas tradicionais de Palladio.

Este relatório de estágio foi realizado em ambiente empresarial no NCREP - Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, empresa ligada ao ramo da reabilitação estrutural, prestando serviços de consultoria, inspeção, diagnóstico, monitorização e projeto no âmbito da reabilitação de estruturas.

Inicialmente são descritos os trabalhos de I&D realizados nos casos de estudo, incluindo os trabalhos prévios à inspeção, a inspeção visual, os ensaios não destrutivos utilizados e por fim o diagnóstico, onde são apresentadas as verificações de segurança realizadas e seu enquadramento normativo.

Relativamente aos trabalhos de I&D, é apresentado um caso de estudo de armazéns industriais localizados em V.N. de Gaia, tendo-se inspecionado três armazéns. No relatório são apresentados os trabalhos de caracterização construtiva e geométrica, danos estruturais, avaliações de segurança e sugestões de intervenção para cada um dos armazéns inspecionados.

Apresentam-se também trabalhos de projeto de reabilitação e referem-se a um caso de estudo que é a Igreja de Santa Cruz de Braga. De modo a enquadrar as opções tomadas no projeto de reabilitação, primeiramente é apresentado um resumo das atividades de I&D realizadas pelo NCREP. Relativamente ao projeto de reabilitação, são apresentadas as medidas de intervenção e o seu dimensionamento.

Por fim, um dos propósitos da realização do estágio é a identificação e melhoria de um procedimento utilizado pela empresa acolhedora. Neste sentido foi desenvolvida uma folha de cálculo destinada à verificação ou dimensionamento de asnas tradicionais de Palladio. É apresentado no relatório o modo de funcionamento e os métodos utilizados para a determinação de esforços, deslocamentos e rácios de segurança.

**Palavras-chave:** Inspeção e Diagnóstico, Projeto de Reabilitação, Estruturas de Madeira, Reabilitação Estrutural.





## **ABSTRACT**

This internship report aims to summarize the work carried out of inspection and diagnosis (I&D), structural rehabilitation projects and development of a spreadsheet for the design or structural safety assessment of traditional Palladio trusses.

This report was carried out at NCREP - Consultancy on Rehabilitation of Built Heritage, a company linked to the field of structural rehabilitation, consulting services, inspection, diagnosis, monitoring and design within the rehabilitation of structures.

Initially the (I&D) work carried out in the case studies is explained, including actions prior to the inspection, visual inspection, non-destructive testing and, finally, the diagnosis, where structural assessments are carried out and its regulatory framework is presented.

Regarding the works of I&D the case study of industrial warehouses located in VN Gaia, where three warehouses were inspected, is presented. In the report, the works of constructive and geometric characterization, structural damage assessment, structural assessments and intervention suggestions for each of the inspected warehouses are presented.

Another case study presented regards the rehabilitation project of the Church of Santa Cruz of Braga. In order to frame the options of the rehabilitation project, a summary of the I&D activities carried out by NCREP are described. Regarding the rehabilitation project, the intervention measures and their design are presented.

Finally, one of the purposes of the internship is the identification and improvement of a procedure used by the host company. In this sense, a spreadsheet for structural assessment or design of traditional Palladio trusses was developed. The operating mode and the methods used to determine the forces in bars, displacement and safety ratios are analysed in the report.

**Keywords:** Inspection and Diagnosis, Structural Project, Timber Structures, Structural Rehabilitation.



## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste relatório de estágio contou com colaboração de diversas pessoas e entidades as quais devo um agradecimento.

Ao Professor Alexandre Costa, orientador do estágio, agradeço pelo rigor, pela disponibilidade, pelos conhecimentos transmitidos ao longo deste período e pelos constantes incentivos.

Ao Engenheiro Tiago Ilharco, co-orientador do estágio, agradeço pela constante disponibilidade na resolução de problemas, pelos conselhos e conhecimentos transmitidos

A todos os elementos do NCREP, pela forma como me receberam, integraram e ajudaram ao longo do período de estágio através de conselhos e ensinamentos nas diferentes áreas do âmbito da empresa.

Aos meus amigos e colegas de curso que me acompanharam durante o percurso académico, pelo apoio que me deram durante todo este período.

Por fim e não menos importante, aos meus pais, pelo esforço que fizeram para que esta etapa da minha vida fosse alcançada e pela compreensão e incentivos durante todo este período.



# ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Motivação e objetivos.....	2
1.3	Organização do relatório .....	2
2	Apresentação do estágio.....	5
2.1	Apresentação da empresa .....	5
2.2	Apresentação do trabalho desenvolvido no estágio .....	6
3	Inspeção e diagnóstico de estruturas.....	9
3.1	Introdução .....	9
3.2	Trabalhos Prévios à Inspeção.....	9
3.3	Inspeção visual.....	10
3.3.1	Levantamento geométrico e estrutural .....	10
3.3.2	Levantamento de danos .....	11
3.4	Ensaaios não destrutivos .....	11
3.4.1	Introdução .....	11
3.4.2	Martelo, formão e higrómetro .....	12
3.4.3	Resistógrafo .....	13
3.5	Diagnóstico, tratamento e análise dos dados .....	15
3.5.1	Introdução .....	15
3.5.2	Valores de cálculo das propriedades dos materiais .....	16
3.5.3	Avaliação de segurança de estruturas de alvenaria de pedra.....	17
3.5.4	Avaliação de segurança de estruturas de madeira dos casos de estudo .....	17

3.5.5	Quantificação e combinações de ações .....	23
4	Caso de estudo I – Armazéns de V.N. de Gaia .....	25
4.1	Introdução .....	25
4.2	Cobertura F .....	25
4.2.1	Caracterização construtiva e estrutural do edifício .....	25
4.2.2	Danos estruturais.....	28
4.2.3	Avaliação de segurança estrutural.....	32
4.2.4	Sugestão de medidas de intervenção .....	37
4.3	Cobertura K.....	40
4.3.1	Caracterização construtiva e estrutural do edifício .....	40
4.3.2	Danos estruturais.....	44
4.3.3	Avaliação de segurança estrutural.....	50
4.3.4	Sugestão de medidas de intervenção .....	55
4.4	Cobertura O .....	58
4.4.1	Caracterização construtiva e estrutural do edifício .....	58
4.4.2	Paredes de alvenaria.....	59
4.4.3	Cobertura em madeira.....	59
4.4.4	Danos estruturais.....	62
4.4.5	Avaliação de segurança estrutural.....	64
4.4.6	Sugestão de medidas de intervenção .....	70
5	Caso de estudo II – Igreja Santa Cruz, Braga .....	75
5.1	Introdução .....	75
5.2	Trabalhos de inspeção e diagnóstico do caso de estudo II.....	76
5.2.1	Caracterização dos elementos estruturais de madeira.....	76
5.2.2	Caracterização dos danos estruturais .....	78
5.2.3	Avaliação de segurança estrutural.....	79
5.2.4	Sugestão de medidas de intervenção .....	83

5.3	Projeto de execução e estabilidade .....	84
5.3.1	Quantificação e combinações de ações .....	84
5.3.2	Descrição da solução de intervenção.....	85
5.3.3	Dimensionamento estrutural.....	89
6	Folha de cálculo de asna tradicional .....	99
6.1	Introdução .....	99
6.2	Asna de Palladio.....	99
6.3	Apresentação da folha de cálculo .....	100
6.3.1	Introdução de dados.....	100
6.3.2	Cálculo dos esforços ao longo das barras .....	103
6.3.3	Cálculo dos deslocamentos ao longo das pernas da asna.....	105
6.3.4	Dimensionamento/Verificação de segurança .....	107
6.3.5	Resultados .....	112
6.4	Condições de uso .....	113
7	Conclusões .....	115
7.1	Considerações finais .....	115
7.2	Desenvolvimentos futuros .....	117





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplos de casos de estudo do NCREP, (NCREP, 2016a).....	6
Figura 2.2 – Casos de estudo.....	8
Figura 3.1 – Utilização de martelo e higrómetro no âmbito de inspeção e diagnóstico de estruturas. ....	13
Figura 3.2 – Perfis resistógrafo com degradação interna, (NCREP, 2016f).....	14
Figura 3.3 – Utilização do resistógrafo no âmbito de inspeção e diagnóstico de estruturas.....	15
Figura 3.4 – Componentes da flecha segundo o EC5, (CEN, 2004).....	23
Figura 4.1 – Levantamento fotográfico da cobertura em estudo (cobertura F).....	26
Figura 4.2 – Planta estrutural da cobertura do armazém F (sem escala).....	26
Figura 4.3 – Asnas existentes na cobertura F.....	27
Figura 4.4 – Exemplo de zona com entrada de água abundante e conseqüente degradação.....	28
Figura 4.5 – Exemplos de ataque de agentes bióticos em elementos estruturais de madeira.....	29
Figura 4.6 – Exemplo de perfil de resistógrafo da cobertura F.....	29
Figura 4.7 – Deformações dos elementos estruturais de madeira.....	30
Figura 4.8 – Danos em parede de alvenaria e elementos metálicos.....	31
Figura 4.9 - Modelos numéricos das asnas mais solicitadas em ELU.....	34
Figura 4.10 – Pormenor tipo de reforço das pernas e linha das asnas tipo A (sem escala).....	39
Figura 4.11 – Pormenor tipo de ligação entre madre existente e reforço (sem escala).....	40
Figura 4.12 – Levantamento fotográfico da cobertura em estudo (cobertura k).....	41
Figura 4.13 – Planta estrutural da cobertura do armazém K (sem escala).....	41
Figura 4.14 – Pórtico metálico existente na empena B.....	42
Figura 4.15 – Alçados das asnas (sem escala).....	43
Figura 4.16 - Elementos de apoio intermedio dos rincões e cumeeiras.....	44

Figura 4.17 – Presença e ataques de térmitas.....	46
Figura 4.18 – Exemplos de ataque de agentes bióticos em elementos estruturais.....	46
Figura 4.19 – Exemplo de perfil de resistógrafo da cobertura K.....	47
Figura 4.20 – Deformações na cobertura do armazém K. ....	48
Figura 4.21 – Danos em parede de alvenaria: Presença de humidade na parede da empena A. ....	49
Figura 4.22 – Danos em elementos metálicos.....	50
Figura 4.23 - Modelo numérico das asnas de cobertura da cobertura.....	53
Figura 4.24 - Cobertura em estudo: Levantamento fotográfico. ....	58
Figura 4.25 – Planta estrutural da cobertura O. ....	59
Figura 4.26 - Paredes de alvenaria pedra do armazém O.....	59
Figura 4.27 – Alçados das asnas tipo da cobertura O (sem escala). ....	61
Figura 4.28 - Elementos metálicos de ligação entre elementos .....	62
Figura 4.29 – Exemplos de ataque de agentes bióticos em elementos estruturais da cobertura O.....	63
Figura 4.30 – Exemplo de perfil de resistógrafo da cobertura O. ....	63
Figura 4.31 - Modelo numérico das asnas de cobertura O.....	67
Figura 4.32 – Pormenor de reforço de linha e perna das asnas de Menor vão (sem escala).....	71
Figura 4.33 – Pormenor tipo de treliçamento das ansas de maior vão (sem escala).....	72
Figura 4.34 – Pormenor de reforço de madres através de colocação de novo elemento (sem escala).....	72
Figura 4.35 – Pormenor de reforço de cumeeiras através de empalmes laterais (sem escala).....	73
Figura 5.1 - Planta esquemática da igreja com a indicação dos vários espaços que a constituem.....	75
Figura 5.2 – Elementos em madeira existentes na cobertura do corpo anexo.....	76
Figura 5.3 – Alçado tipo das Asnas da capela-mor (sem escala).....	77
Figura 5.4 – Alçado tipo das asnas da nave (sem escala).....	77
Figura 5.5 – Fissuração diagonal observada na parede de alvenaria suportada pelo arco triunfal. ....	78
Figura 5.6 - Danos estruturais observados nos elementos estruturais de madeira da cobertura .....	79
Figura 5.7 – Rotura de perna e apoio na abóbada .....	79
Figura 5.8 - Exemplo de modelo numérico das asnas em madeira existentes na cobertura.....	83

Figura 5.9 – Planta estrutural de intervenção (sem escala).....	85
Figura 5.10 – Esquema de orientação das águas da cobertura (sem escala).....	86
Figura 5.11 – novos elementos estruturais em madeira da nave (sem escala). ....	87
Figura 5.12 – Alçados das asnas da capela-mor (sem escala).....	88
Figura 5.13 – Alçado da asna do corpo anexo com reforço (sem escala) .....	89
Figura 5.14 - Exemplo de modelo numérico das asnas novas .....	92
Figura 5.15 – Modos de rotura J e K (CEN, 2004). ....	95
Figura 5.16 –Pormenor de ligação entre elementos da asna nova na capela-mor (sem escala). ....	98
Figura 6.1 – Configuração e elementos de uma asna de Palladio. ....	100
Figura 6.2 – Introdução do esquema da asna e forças através de coordenadas. ....	101
Figura 6.3 – Introdução de dados das forças.....	102
Figura 6.4 – Introdução de características materiais e geométricas. ....	102
Figura 6.5 – Esquema estrutural da asna de Palladio e representação dos graus de liberdade. ....	104
Figura 6.6 – Diagramas de esforços da perna AC e perna CF.....	105
Figura 6.7 – Deformação das pernas no plano da asna. ....	107
Figura 6.8 – Esforços atuantes nos elementos da asna em ELU (G+Q).....	109
Figura 6.9 – Verificação de segurança da Perna AC.....	109
Figura 6.10 – Verificação de segurança da Perna CF. ....	110
Figura 6.11 - Verificação de segurança das escoras BD e DE.....	111
Figura 6.12 – Verificações de segurança do pendura CD e Linha AF. ....	111
Figura 6.13 –Resumo dos deslocamentos máximos das pernas.....	112
Figura 6.14 – Verificação do estado limite de deformação das pernas da asna. ....	112
Figura 6.15 – Resumo de rácios em ELU para os diferentes elementos da Asna.....	112



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Duração das ações. ....	16
Tabela 3.2 – Valores de $k_{def}$ , definidos pelo EC5.....	22
Tabela 3.3 – Valores limites de deformação definidos pelo EC5, (CEN, 2004). ....	23
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas de cálculo das madeiras existentes. ....	32
Tabela 4.2 - Ações permanentes (Gk) consideradas.....	33
Tabela 4.3 - Rácios de segurança e serviço dos elementos das asnas da cobertura em ELU e ELS. ....	35
Tabela 4.4 - Rácios de segurança das madres e cumeeiras existentes na cobertura para o ELU. ....	35
Tabela 4.5 - Rácios de segurança dos rincões existentes na cobertura para o ELU.....	36
Tabela 4.6 - Rácios de serviço das madres e cumeeiras existentes na cobertura para o ELS. ....	36
Tabela 4.7 - Rácios de serviço dos rincões existentes na cobertura para o ELS.....	37
Tabela 4.8 – Propriedades mecânicas de cálculo das madeiras existentes. ....	51
Tabela 4.9 - Ações permanentes (Gk) consideradas.....	51
Tabela 4.10 - Rácios dos elementos de madeira das asnas para ELU e ELS.....	53
Tabela 4.11 - Rácios de segurança das madres e cumeeiras existentes na cobertura para o ELU.....	54
Tabela 4.12 - Rácios de segurança dos rincões existentes na cobertura para o ELU.....	54
Tabela 4.13 - Rácios de serviço das madres e cumeeiras existentes na cobertura.....	55
Tabela 4.14 - Rácios de serviço dos rincões existentes na cobertura.....	55
Tabela 4.15 – Propriedades mecânicas de cálculo das madeiras existentes. ....	64
Tabela 4.16 - Ações permanentes (Gk) consideradas.....	65
Tabela 4.17 - Rácios dos elementos de madeira das asnas, por tipo de asna e para ELU e ELS. ....	68
Tabela 4.18 - Rácios de segurança das madres e cumeeiras existentes na cobertura para o ELU.....	69
Tabela 4.19 - Rácios de serviço das madres e cumeeiras existentes na cobertura para o ELS. ....	70

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas de cálculo das madeiras existentes. ....	80
Tabela 5.2 - Ações permanentes (Gk) consideradas.....	81
Tabela 5.3 - Rácios de segurança das madres em madeira, em bom estado de conservação, da cobertura do corpo anexo e da capela-mor, para ELU.....	82
Tabela 5.4 - Rácios de segurança das madres em madeira, em bom estado de conservação, da cobertura do corpo anexo e da capela-mor, para ELS. ....	82
Tabela 5.5 - Rácios de segurança dos elementos de madeira das asnas das coberturas, mais solicitadas para ELU e ELS.....	83
Tabela 5.6 – Resistências de cálculo dos elementos de madeira estruturais (existentes e novos) .....	90
Tabela 5.7 - Rácios de segurança dos elementos de madeira das madres mais solicitadas e cumeeiras pelas ações, para o ELU e ELS nas três coberturas. ....	91
Tabela 5.8 - Rácios dos elementos de madeira das Asnas da capela-mor em ELU e ELS.....	92
Tabela 5.9 - Rácios de segurança dos elementos de madeira das Asnas da nave em ELU e ELS. ....	93
Tabela 5.10 - Rácios de segurança dos elementos de madeira das varas das coberturas laterais A e B, para ELU e ELS.....	93
Tabela 5.11 – Contribuição máxima do efeito corda, (CEN, 2004). ....	96
Tabela 5.12 – Rácios de segurança das ligações das asnas da nave. ....	97
Tabela 5.13 – Rácios de segurança das ligações das asnas da capela-mor.....	98
Tabela 7.1 – Resumo do diagnóstico das coberturas dos Armazéns de V.N. de Gaia.....	115
Tabela 7.2 – Resumo das propostas de intervenção nas coberturas.....	116
Tabela 7.3 – Resumo do diagnóstico das coberturas da Igreja Santa Cruz. ....	116

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$A$	Área efetiva secção transversal
RID	Relatório de inspeção e diagnóstico
R. S. A	Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes
I&D	Inspeção e diagnóstico
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço
ELD	Estado limite de deformação
EC	Eurocódigo
$\psi_2$	Coefficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável
$\psi_1$	Coefficiente para a determinação do valor frequente de uma ação variável
$\psi_0$	Coefficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável
$\tau_{sd}$	Valor de cálculo da tensão de corte
$\sigma_{m,y,d}$	Valor de cálculo da tensão de flexão em relação ao eixo y principal
$\sigma_{m,crit}$	Tensão crítica de flexão
$\rho_k$	Valor característico da massa volúmica
$\gamma_m$	Coefficiente parcial relativo a uma propriedade de um material, também cobre incertezas de modelação e desvios nas dimensões.
$w_{net,fin}$	Flecha final útil
$w_{inst}$	Flecha final
$w_{creep}$	Flecha de fluência
$w_c$	Contraflecha
$u_{inst,Q_i}$	Deformação instantânea para os valores acompanhantes das ações variáveis $Q_i$



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$u_{inst,Q1}$	Deformação instantânea para uma ação variável de base da combinação $Q_1$
$u_{inst,G}$	Deformação instantânea para uma ação permanente $G$
$u_{fin}$	Deformação final
$u_{fin,Qi}$	Deformação final para os valores acompanhantes das ações variáveis $Q_i$
$u_{fin,Q1}$	Deformação final para uma ação variável de base da combinação $Q_1$
$u_{fin,G}$	Deformação final para uma ação permanente $G$
$n_{ef}$	Número efetivo de ligadores
$k_{mod}$	Fator de modificação em função da duração da carga e classe de serviço
$k_m$	Fator que considera a redistribuição de tensões de flexão numa secção
$k_{def}$	Fator de deformação
$k_{crit}$	Fator utilizado para o bambeamento
$k_{c,y}$ ou $k_c$	Fator de instabilidade
$k_h$	Fator de profundidade
$f_{v,d}$	valor de cálculo da resistência ao corte
$f_{u,k}$	Valor característico da resistência à tração dos parafusos de porca
$f_{t,0,d}$	Valor de cálculo da resistência à tração do fio
$f_{m,k}$	Valor característico da resistência à flexão
$f_{m,d}$	Valor de cálculo da resistência à flexão
$f_{c,0,d}$	Valor de cálculo da resistência à compressão na direção do fio
$f_{h,k}$	Valor característico da resistência ao esmagamento localizado
$f_{c,90,d}$	Valor de cálculo da resistência à compressão na direção perpendicular ao fio
$M_{y,Rk}$	Valor característico do momento de cedência plástica de um ligador
$F_{v,Rk}$	Valor característico da capacidade resistente por plano de corte e por ligador
$F_{ax,Rk}$	Valor característico da resistência ao arranque do ligador

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO

A reabilitação de edifícios antigos cada vez mais assume um papel importante no setor da construção português. É notório o investimento crescente nesta área por todo o país, mas mais evidente nos centros urbanos das grandes cidades como o Porto. A cidade do Porto, possuidora de um património arquitetónico raro, possui uma malha urbana central bastante degradada e envelhecida, carecendo de intervenções de reabilitação. É de salientar que o centro histórico do Porto foi classificado em 1996 como Património Mundial da Humanidade pela UNESCO. Esta classificação teve por base o critério cultural, considerando que o local apresenta um valor excecional e que os seus edifícios são o testemunho do desenvolvimento, ao longo dos anos, de uma importante cidade europeia. É também de salientar que não são apenas os edifícios nobres, como palácios ou igrejas, considerados como património mundial, mas sim todo o conjunto de edificações, inclusivamente as de carácter mais corrente, do centro histórico do Porto.

Com o crescimento da reabilitação no sector da construção portuguesa, é necessário sensibilizar os intervenientes nas ações de reabilitação da importância de preservar as características dos edifícios. Infelizmente não é raro encontrar casos em que todo o interior do edifício é demolido, deixando apenas a fachada e construindo um novo edifício no interior, apelidando-se esta prática de “fachadismo”. O desconhecimento das estruturas existentes leva a que, muitas vezes, se opte por demolir e construir de novo. Neste sentido é importante investir no estudo das edificações antigas, introduzindo e melhorando as técnicas de inspeção de edifícios, evitando assim que em muitos casos se pratiquem intervenções de substituição desnecessárias.

A inspeção e diagnóstico (I&D) assumem um papel muito importante na reabilitação das edificações. A partir das técnicas de inspeção e da realização de ensaios preferencialmente não destrutivos, é possível aferir as necessidades de intervenção nas estruturas de edifícios antigos. A realização de atividades de I&D permite assim realizar intervenções sustentadas com o conhecimento alargado das estruturas existentes. Na maioria dos casos de edifícios do centro histórico do Porto, as intervenções de reabilitação realizadas com base nas ações de I&D têm menores custos que a demolição e reconstrução, permitindo manter o valor arquitetónico e patrimonial dos edifícios.

## 1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O facto de durante o período académico viver no centro histórico da cidade do Porto, tendo contacto com a realidade da necessidade de reabilitação da maioria dos edifícios, despertou o interesse nesta área da Engenharia Civil. A realização do estágio no NCREP permite alargar os conhecimentos nesta área, dando importância às características arquitetónicas e patrimoniais dos edifícios.

O principal propósito deste trabalho é dar a conhecer as atividades de I&D, realizadas no âmbito da reabilitação de estruturas de construções existentes, explorando e explicando as técnicas utilizadas durante as atividades de I&D.

Além das atividades de I&D, serão apresentados projetos de reabilitação baseados nos resultados das ações de I&D. Como já referido anteriormente é essencial a realização do diagnóstico da estrutura previamente à realização do projeto de reabilitação. Deste modo é possível responder às necessidades da estrutura de forma sustentada.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O presente relatório desenvolve-se em sete capítulos, incluindo este capítulo de “Introdução”, onde se enquadra o tema do relatório, bem como os objetivos que se pretende atingir.

No capítulo 2 é realizada a apresentação da empresa em que teve lugar a realização do estágio curricular assim como a identificação dos casos de estudo e trabalhos desenvolvidos durante o estágio.

No capítulo 3 é realizada uma descrição sobre os trabalhos de inspeção e diagnóstico realizados no âmbito da reabilitação de edifícios antigos, fazendo uma descrição dos trabalhos prévios à inspeção, inspeção visual, ensaios não destrutivos realizados nos casos de estudo. Por fim descreve-se a forma como é realizado o diagnóstico de uma estrutura existente.

No capítulo 4 é realizada a apresentação do primeiro caso de estudo relativo às coberturas dos Armazéns de V.N. de Gaia. Neste capítulo são apresentados os trabalhos de inspeção e diagnóstico realizados nas três coberturas do caso de estudo, e que englobam a caracterização construtiva e estrutural dos edifícios, os danos estruturais existentes, a avaliação de segurança de paredes de alvenaria e estruturas de madeira. Por fim são apresentadas as sugestões de intervenção de cada cobertura.

No capítulo 5 é apresentado o segundo caso de estudo, que consiste na cobertura da Igreja Santa Cruz em Braga, sendo enumerados os principais aspetos dos trabalhos de inspeção e diagnóstico realizados pelo NCREP e apresentada a solução de intervenção e o seu dimensionamento estrutural.

No capítulo 6 faz-se a apresentação da folha de verificação de segurança/dimensionamento de asnas de cobertura tradicionais ou de Palladio, desenvolvida durante o estágio curricular. Primeiramente é

apresentada a asna de Palladio e o seu esquema estrutural, sendo de seguida apresentada a folha de cálculo, incluindo a introdução de dados; o cálculo de esforços e deslocamentos e, por fim, o dimensionamento dos elementos da asna e modos de apresentação de resultados.

No capítulo 7 e último são apresentadas as considerações finais e os desenvolvimentos futuros relativos à folha de cálculo desenvolvida.



## **2 APRESENTAÇÃO DO ESTÁGIO**

### **2.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA**

O NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património é uma empresa ligada ao ramo da reabilitação do património edificado, prestando serviços de consultoria, inspeção e diagnóstico, monitorização e projeto no âmbito da reabilitação de estruturas. A empresa foi criada com base no conhecimento e experiência acumulada pelos seus fundadores no âmbito da inspeção e reabilitação estrutural resultando na produção de centenas de trabalhos científicos e relatórios técnicos, assim como na participação em diversos projetos e protocolos de colaboração com instituições públicas e privadas.

As tipologias construtivas em betão, aço, alvenaria e madeira fazem parte do âmbito de ação do NCREP. Na sua abordagem à reabilitação, o NCREP tem por base o conhecimento detalhado da técnicas e materiais utilizados em cada caso, seguindo deste modo um procedimento de intervenção que primeiramente consiste na realização das atividades de inspeção e diagnóstico (I&D) onde é caracterizada a estrutura e avaliada a segurança estrutural da mesma. Com base nas informações obtidas em I&D são realizados projetos de reabilitação e reforço estrutural.

Durante todo o processo, o NCREP, tem em consideração as mais recentes recomendações internacionais, procurando minimizar o impacto sobre as construções, num compromisso entre a funcionalidade, a segurança e salvaguarda do património, materializado num projeto de reabilitação.

São apresentados de seguida alguns exemplos de estruturas alvo de processos de I&D e projetos de reabilitação elaborados no NCREP.



a) Edifício na Rua São Bento da Vitória, Porto.



b) Armazéns do vinho do Porto, V.N Gaia.



c) Igreja de São Bento, Arcos de Valdevez.



d) Casa da Cultura de Pinhel.

Figura 2.1 - Exemplos de casos de estudo do NCREP, (NCREP, 2016a).

## 2.2 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DESENVOLVIDO NO ESTÁGIO

Ao longo do período de estágio e em cooperação com a equipa do NCREP, foram desenvolvidos relatórios de I&D, projetos de reabilitação e reforço estrutural e uma folha de cálculo para a verificação de segurança de asnas tradicionais (Palladio). Apesar de terem sido analisadas mais construções existentes ao longo do período de estágio, o presente relatório apresenta as atividades de I&D realizadas em três das coberturas dos Armazéns de V.N. de Gaia. Relativamente às atividades de projetos de reabilitação, o caso de estudo escolhido foi a cobertura da Igreja Santa Cruz em Braga.

Os dois casos de estudo apresentados possuem valor histórico elevado e, nesse sentido, as intervenções devem ter em conta o cariz dos edifícios, preservando as suas características e tipologias construtivas.

Os armazéns de Vila Nova de Gaia (Figura 2.2a) são um ícone histórico da região do Douro, tratando-se de armazéns destinados ao armazenamento de vinho do Porto. No caso de estudo são analisadas as coberturas de 3 dos armazéns inseridos num total de 22 armazéns.

A análise dos 3 armazéns deu origem a 3 relatórios de inspeção e diagnóstico, em que foram realizados os seguintes trabalhos:

- Levantamento estrutural/material;
- Levantamento e mapeamento de danos;
- Classificação visual da madeira;
- Realização de ensaios não destrutivos.

Após a compilação de toda a informação recolhida nas inspeções realizadas, foi possível classificar o estado de conservação das estruturas, realizar o diagnóstico e, por fim, definir o nível da intervenção estrutural necessária. Os procedimentos e métodos utilizados no processo de I&D são descritos mais aprofundadamente no capítulo seguinte.

A Igreja Santa Cruz (Figura 2.2b) é um edifício construído na época do estilo barroco maneirista, mais propriamente no século XVII. Possui duas torres sineiras e uma área de implantação de aproximadamente 880 m<sup>2</sup>.

As coberturas da igreja Santa Cruz podem ser divididas em 4 secções distintas: nave, capela-mor, corpo anexo e coberturas laterais. Durante as atividades de projeto de reabilitação foi utilizada esta divisão das coberturas.

Os trabalhos de projeto de reabilitação executados tiveram por base as ações de inspeção e diagnóstico realizadas previamente no edifício, com o objectivo de resultar numa intervenção estrutural o menos intrusiva possível.

A elaboração do projeto de reabilitação das coberturas deu origem a uma memória descritiva e justificativa, onde se apresentam todas as considerações relativas à conceção e dimensionamento do reforço estrutural, dimensionamento estrutural e condições técnicas especiais relativas ao caso em estudo. A memória descritiva e justificativa serviu de base para a realização da apresentação do caso de estudo do presente relatório de estágio.





a) Armazéns de V.N de Gaia



b) Igreja Santa Cruz

Figura 2.2 – Casos de estudo.

Por fim, foi elaborada uma folha de cálculo destinada à verificação de segurança ou dimensionamento estrutural de uma asna de Palladio. A elaboração desta folha de cálculo teve como objectivo agilizar o processo de verificação de segurança ou de dimensionamento de asnas de cobertura tradicionais. Este tipo de asna é muito utilizado em edificações antigas, sendo muitas vezes o esquema estrutural dos casos de estudo do NCREP.

## **3 INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DE ESTRUTURAS**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

Na realização de uma intervenção de reabilitação sustentável e de acordo com os princípios indicados pelo Comité Científico Internacional para a Análise e Restauro de Estruturas do Património Arquitectónico (ICOMOS, 2004), as ações de reabilitação devem ser realizadas após as ações de inspeção e diagnóstico.

A primeira destas fases consiste então na análise detalhada da construção, que é conseguida através de uma inspeção técnica à construção existente. Esta inspeção deve ser exaustiva, procurando analisar a construção tanto ao nível global como ao nível dos pormenores, fornecendo indicações acerca das zonas críticas e dos elementos construtivos com maior necessidade de reparação (Ilharco, et al., 2008).

Segundo (Costa, et al., 2005), o diagnóstico é realizado com base em informações históricas e em abordagens quantitativas e qualitativas. A abordagem quantitativa é feita com base nas informações obtidas através de ensaios das estruturas e dos materiais, monitorização e análise estrutural. A abordagem qualitativa é realizada com base na análise direta dos danos observados nos materiais e estruturas e na investigação histórica e arqueológica. Segundo este autor é imprescindível verificar as causas dos danos existentes antes de tomar qualquer tipo de decisão.

Os resultados da inspeção e diagnóstico dão origem ao normalmente denominado de “Relatório de Inspeção e Diagnóstico”, que é uma ferramenta fundamental para a realização dos projetos de reabilitação, sendo uma base importante para a tomada de decisões e medidas de intervenção a realizar, aumentando o conhecimento sobre a tipologia construtiva, debilidades da estrutura e materiais utilizados, segundo (Ilharco, et al., 2008).

### **3.2 TRABALHOS PRÉVIOS À INSPEÇÃO**

Segundo (Ilharco, et al., 2008), a primeira fase a concretizar na inspeção e diagnóstico é a recolha de toda a informação acerca do objeto de estudo, de forma a conhecer o melhor possível o seu enquadramento histórico, arquitetónico e construtivo. Estas informações são normalmente obtidas através de licenças de obra ou das plantas, nos arquivos municipais. Estas informações históricas juntamente com informações sobre obras ou alterações de projeto posteriores, são essenciais para revelar os sistemas construtivos e

esquemas estruturais que nem sempre são perceptíveis nas campanhas de inspeção realizadas. Em muitos casos a consulta e interpretação dos projetos antigos é decisiva em relação às medidas de intervenção tomadas.

Outro instrumento importante no conhecimento destas construções consiste na consulta de manuais antigos, que transmitem as tecnologias de construção utilizadas na época.

### **3.3 INSPEÇÃO VISUAL**

A inspeção visual é uma das bases fundamentais para a realização de um diagnóstico correto sobre um caso de estudo. Segundo (Ilharco, 2008) “a inspeção visual do edifício tem em vista o levantamento de todos os materiais estruturais e não estruturais e dos danos existentes, ou seja, do estado de conservação do edifício”. A informação obtida através da inspeção visual é normalmente compilada e processada sob a forma de documento escrito, designado por “Relatório de Inspeção e Diagnóstico”. Sendo estes relatórios realizados para transmitir informações acerca dos casos de estudo a pessoas de diversas áreas é importante que o relatório seja redigido de forma simples e clara de modo a que as informações sejam transmitidas facilmente.

A inspeção visual deve procurar realizar uma caracterização exhaustiva em toda a estrutura do caso de estudo, mas é importante ter especial atenção aos locais denominados de zonas de risco, como por exemplo, os apoios de vigas em paredes de alvenaria, locais húmidos, caves e telhados que, devido às suas características, possuem ambientes mais propícios para a ocorrência de ataques de agentes bióticos.

É de salientar a importância do levantamento fotográfico na realização do levantamento de danos e geométrico e registo dos locais. Durante a compilação da informação obtida numa inspeção é necessário, por diversas ocasiões, recorrer a fotografias, pois estas fornecem diversas informações relativas a dimensões e a danos presentes nos casos de estudo, permitindo fazer validações de informação recolhida durante a inspeção.

#### **3.3.1 Levantamento geométrico e estrutural**

Segundo (Ilharco, et al., 2008), um dos resultados da inspeção visual é o levantamento estrutural e geométrico, que consiste na identificação e registo de características dos elementos estruturais, tais como dimensões e materiais, espaçamentos, tipos de apoio, espessuras, materiais das paredes, etc, procurando compreender o funcionamento das estruturas dos casos em estudo.

A informação recolhida durante a inspeção, relativa ao levantamento geométrico é, por norma, sintetizada sob a forma de esquemas e plantas estruturais que são posteriormente utilizadas para efetuar a modelação do edifício ou de alguns elementos estruturais.

### 3.3.2 Levantamento de danos

O levantamento de danos de uma estrutura corresponde ao registo de todos os danos ou patologias encontradas nos casos em estudo. De modo a conseguir uma melhor perceção, é importante organizar o registo de anomalias em plantas, denominadas de plantas de mapeamento de danos, ficando mais fácil perceber as origens, incidência e interações entre os vários danos. Um aspeto importante no levantamento de danos é o registo da presença de humidades, que frequentemente estão associadas a problemas de infiltrações e deficiente impermeabilização (Costa, et al., 2005). A presença de humidade é um fator importante para o aparecimento de ataques de agentes bióticos. No caso dos pavimentos em madeira por exemplo, é importante ter especial atenção a fendas observáveis em paredes de tabique, registando as orientações e localização. A informação relativa às orientações e localizações das fendas permitem compreender melhor o funcionamento estrutural do edifício, sendo que o padrão de fissuração permite concluir acerca das deformações dos pavimentos.

O levantamento de danos deve também incluir a localização, extensão e intensidade de ataques de agentes bióticos. Dada a dificuldade de avaliar a intensidade dos ataques, por exemplo, a profundidade de ataques de caruncho ou degradação interior por ataque de térmitas, é importante realizar ensaios não destrutivos para avaliar com maior rigor os danos apresentados. No próximo capítulo serão referenciados os ensaios não destrutivos mais utilizados em inspeção e diagnóstico.

## 3.4 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

### 3.4.1 Introdução

A caracterização das estruturas em análise é indispensável para a avaliação do estado de conservação material dos elementos estruturais de madeira. Neste sentido, e como a inspeção visual nem sempre é suficiente para a caracterização, torna-se importante a realização de ensaios não destrutivos.

Segundo (Arêde & Costa, 2002), a realização de ensaios não destrutivos em elementos de madeira, tem como principais objetivos:

- Detecção de elementos estruturais ocultos;
- Detecção de vazios e cavidades;
- Detecção de degradação superficial;
- Avaliação de algumas propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Deste modo existe um conjunto de técnicas/ensaios não destrutivos, que permitem a avaliação da extensão dos danos provocados pelos ataques, como por exemplo:

- Martelo;
- Formão;
- Higrómetro;
- Resistógrafo;
- Pylodin;
- Termografia;
- Sismógrafos;
- Entre outros.

Apesar de existirem vários exemplos de ensaios não destrutivos, no presente relatório será feita a descrição dos ensaios realizados nas inspeções aos casos de estudo.

#### **3.4.2 Martelo, formão e higrómetro**

O martelo e formão são elementos simples e permitem a realização de uma avaliação da extensão dos danos de forma expedita. A apreciação do som originado pelo embate do martelo numa peça de madeira, permite perceber se existem degradações (vazios, degradações internas, fendas, etc). A avaliação através deste método é dependente da experiência do utilizador. Com o formão é possível avaliar a dureza superficial, analisando de forma expedita a sua integridade, (Ilharco, 2008).

O higrómetro permite determinar o teor em água da madeira. Um teor em água elevado em peças de madeira pode revelar a existência de pontos de entrada de água no edifício devido, por exemplo, a uma deficiente impermeabilização. O teor em água está relacionado com o potencial de ataque de agentes bióticos. Segundo (Feio & Lourenço, 2005), os fungos cromogéneos desenvolvem-se em madeira com teor em água superior a 25-30% e os fungos de podridão com teores em água acima de 20%. Desta forma, através de leituras periódicas do teor em água nas peças de madeira é possível controlar o potencial de ataque de fungos, intervindo previamente.



(a) Utilização de martelo



(b) Utilização do higrómetro

Figura 3.1 – Utilização de martelo e higrómetro no âmbito de inspeção e diagnóstico de estruturas.

### 3.4.3 Resistógrafo

O resistógrafo tem como principal função a avaliação da integridade das peças de madeira e consiste num instrumento com uma agulha com um diâmetro de cerca 1.5mm, e mais larga na ponta, aproximadamente 3mm, que penetra na madeira através de um sistema de rotação em avanço. À medida que a agulha penetra na madeira o instrumento mede a resistência oferecida pela madeira à penetração da agulha durante o período do ensaio, sendo que no caso da peça ensaiada conter um vazio interior ou degradação interna (ataque de térmitas, fendas, etc) a resistência à penetração da agulha é muito baixa ou nula. Trata-se também de um ensaio utilizado para determinar a profundidade da degradação superficial através do gráfico produzido (perfil resistógrafo), sendo um método mais rigoroso em relação, por exemplo, ao martelo e formão. O registo produzido pelo resistógrafo (perfil resistógrafo) é armazenado automaticamente na memória do aparelho e fisicamente através impressões obtidas aquando da realização do ensaio. Através destas impressões é possível classificar o ensaio como válido, e tirar conclusões durante a inspeção acerca do estado de conservação da peça de madeira.

Segundo (Feio & Lourenço, 2005), os danos provocados pelo ensaio são desprezáveis, não influenciando a resistência das peças de madeira, na medida em que somente provoca um furo de diâmetro reduzido e que em casos que se justifique, é facilmente colmatado com material de preenchimento.

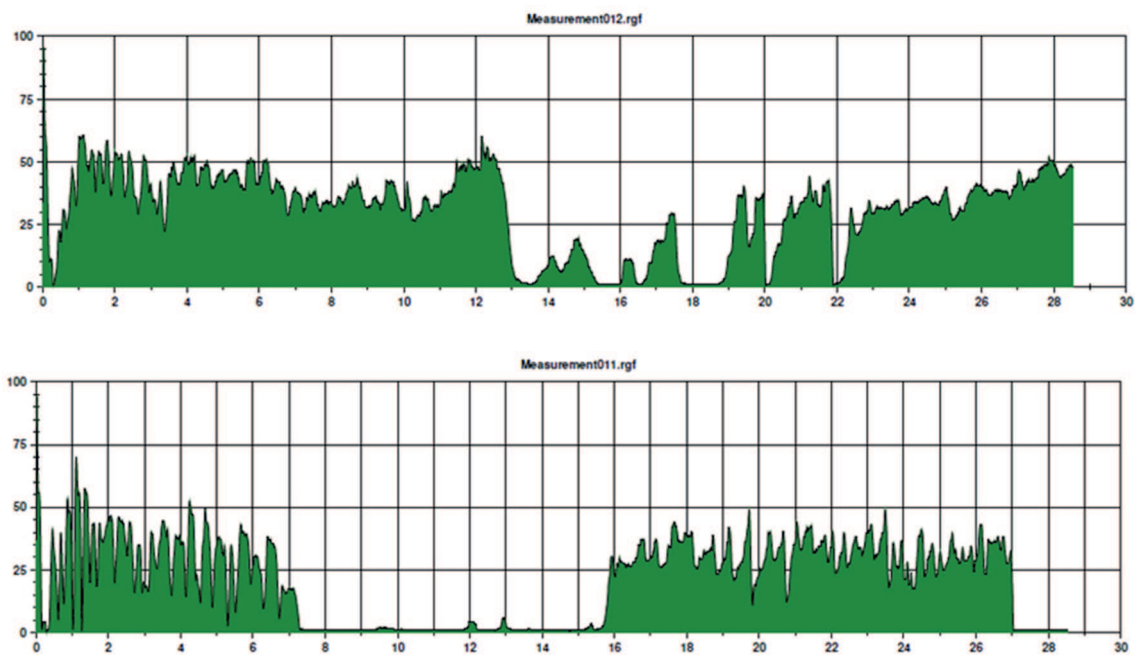


Figura 3.2 – Perfis resistógrafo com degradação interna, (NCREP, 2016f).

Na figura Figura 3.2 são apresentados dois perfis de resistógrafo relativos ao caso de estudo da Igreja Santa Cruz. Através da apreciação dos perfis de resistógrafo foi possível verificar e avaliar a degradação interna dos elementos estruturais de madeira. Estas degradações estão associadas a ataques de térmitas e, em muitos casos, não são observáveis pelo exterior.

Trata-se de um aparelho versátil e de fácil utilização que fornece informações importantes para o conhecimento do estado de conservação de um elemento de madeira.

Apesar de não fornecer informações sobre a resistência mecânica das peças ensaiadas, o resistógrafo relaciona-se com a massa volúmica, permitindo obter um perfil de variação radial desta ao longo da perfuração, nomeadamente as diferenças entre o lenho de primavera e o lenho de verão, (Júnior, 2006).



Figura 3.3 – Utilização do resistógrafo no âmbito de inspeção e diagnóstico de estruturas.

Nos relatórios de inspeção e diagnóstico elaborados pelo NCREP em que sejam realizados ensaios de resistógrafo, é anexado ao relatório os resultados dos ensaios, incluindo os perfis de resistógrafo de todos os ensaios realizados, respetivo comentário e avaliação do estado de conservação dos elementos ensaiados. Em planta, são identificados os locais de ensaio de resistógrafo juntamente com o respetivo código de identificação.

### **3.5 DIAGNÓSTICO, TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS**

#### **3.5.1 Introdução**

As ações de inspeção mencionadas anteriormente, são de elevada importância para o conhecimento estrutural e estado de conservação dos casos de estudo. Com base nas informações recolhidas é realizado o diagnóstico das estruturas.

Segundo (Ilharco, 2008), na realização de um diagnóstico que permita concluir acerca da necessidade e nível de intervenção numa estrutura, é necessário combinar toda a informação recolhida durante os trabalhos de inspeção, analisar os materiais e sistemas estruturais, os danos e interpretar as causas.

No diagnóstico são realizadas as verificações dos Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS) tendo em conta as degradações materiais registadas na fase de inspeção. Os resultados destas verificações permitem concluir sobre a necessidade de intervenção.



### 3.5.2 Valores de cálculo das propriedades dos materiais

Segundo o Eurocódigo 5 (CEN, 2004), a resistência da madeira é obtida em função da duração do carregamento a que esta está sujeita, sendo que no caso de um carregamento de longa duração, a madeira perde aproximadamente 40% da sua capacidade resistente. Esta característica do material exige a consideração de parâmetros particulares, de forma a atender à influência da duração das cargas nas propriedades mecânicas. Deste modo é introduzido o fator de modificação da resistência  $k_{mod}$ , que é definido pelo Eurocódigo 5, para um teor am água de referência de 12%, em função do tipo de madeira, classe de serviço e duração das ações.

A classe de serviço define as condições ambientais em que a estrutura se insere. As condições ambientais influenciam significativamente as propriedades mecânicas da madeira. Deste modo, a classe de serviço é um fator importante para definir as propriedades mecânicas dos materiais e permitir o cálculo das deformações nas diferentes condições atmosféricas. A Classe de serviço 1 é correspondente a um ambiente interior protegido, a Classe de serviço 2 corresponde a um ambiente interior não protegido e, por fim, a Classe de serviço 3 corresponde a um ambiente exterior não protegido.

As durações das ações são definidas no Eurocódigo 5, (CEN, 2004), como permanentes, de longa duração, de média duração, de curta duração e instantâneas, Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Duração das ações.

Classe de duração das ações	Ordem de grandeza da duração acumulada do valor
	característico da ação
Permanente	superior a 10 anos
Longa duração	6 meses – 10 anos
Média duração	1 semana – 6 meses
Curta duração	interior a uma semana
Instantânea	

Nas verificações efetuadas às coberturas dos casos de estudo, foi considerada a classe de serviço 2 devido às condições de humidade associadas ao uso dos edifícios em questão e aos sistemas construtivos das coberturas. Relativamente à duração das ações, foi considerada ação de média duração para as sobrecargas ( $Q_1$ ) e permanente para as cargas permanentes ( $G$ ).

As propriedades mecânicas de cálculo dos materiais são definidas através da fórmula (3.1); o valor de  $\gamma_m$  é definido em função do tipo de madeira, assumindo o valor de 1.3 para madeiras maciças e 1.25 no caso de ser madeira lamelada colada.

$$X_d = \frac{K_{mod} \times X_k}{\gamma_m} \quad (3.1)$$

Em que:

$X_d$  – Valor de cálculo da propriedade da resistência mecânica do material;

$X_k$  – Valor característico da propriedade de resistência mecânica do material;

$K_{mod}$  – Fator de modificação em função da duração da ação e teor em água.

A verificação de segurança dos elementos estruturais de madeira teve em conta a degradação superficial verificada através da inspeção visual e através dos perfis de resistógrafo, tendo sido utilizada para as verificações de segurança a secção transversal efetiva.

### 3.5.3 Avaliação de segurança de estruturas de alvenaria de pedra

As verificações de segurança de alvenarias de pedra são realizadas através do cálculo das tensões nas secções tipo mais desfavoráveis. Nos casos de estudo, a secção tipo mais desfavorável é junto as fundações. As tensões são calculadas através das cargas, em ELU, que a cobertura transmite à parede e através do próprio peso da parede de alvenaria. A verificação de segurança é realizada através da comparação das tensões de compressão instaladas com a resistência média de 2,5MPa e módulos de deformabilidade vertical entre 0,3 e 0,5GPa. A resistência e módulo de deformabilidade vertical adotados, foram obtidos através de ensaios experimentais realizados em alvenaria de pedra típica do Porto, e realizados na FEUP e publicados em (Almeida, et al., 2011).

### 3.5.4 Avaliação de segurança de estruturas de madeira dos casos de estudo

As análises das estruturas das coberturas em madeira dos casos de estudo foram realizadas através do cumprimento das condições preconizadas no Eurocódigo 5, (CEN, 2004) e envolveram a verificação aos Estados Limites Últimos e Estados Limites de Serviço. No que diz respeito aos ELU, foi verificado o comportamento à flexão simples, à flexão desviada, à flexão composta, ao corte e à compressão perpendicular ao fio (na zona dos apoios dos elementos estruturais), tendo sido considerados na análise os fenómenos de instabilidade por encurvadura lateral-torsional (bambeamento) e encurvadura. No que diz respeito aos estados limites de serviço, foi verificada a deformação.

A realização das verificações dos ELU e ELS das asnas das coberturas em estudo foi realizada através da modelação das mesmas em programa de cálculo automático e consequente análise de esforços atuantes em folhas de cálculo do NCREP. Em relação aos elementos como madres, cumeeiras e rincões, a verificação foi realizada apenas através de folhas de cálculo do NCREP, dado que os esforços atuantes são mais facilmente determinados do que em relação a elementos compostos como as asnas.

Nas próximas secções é apresentado o modo de verificação dos principais modos de rotura realizados nos casos de estudo.

#### 3.5.4.1 Verificação à flexão simples (ELU)

A verificação à flexão simples é aplicada, no caso das coberturas em estudo, às cumeeiras. Estes elementos são submetidos predominantemente à flexão.

A verificação de segurança é realizada comparando as tensões atuantes e as tensões resistentes de cálculo através da seguinte fórmula:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (3.2)$$

Em que  $\sigma_{m,y,d}$  são as tensões atuantes calculadas para a fibra mais afastada do eixo neutro e  $f_{m,y,d}$  são as tensões resistentes de cálculo.

Nos casos em que as peças estão submetidas à flexão, o valor resistente de cálculo é afetado pelo parâmetro  $k_h$ . Segundo Eurocódigo 5, (CEN, 2004) este coeficiente pretende representar a probabilidade da peça ter defeitos em função da sua altura (h). O coeficiente é calculado segundo as seguintes fórmulas:

$$k_h = \min \left[ \left( \frac{150}{h} \right)^{0.2} ; 1.3 \right], h \leq 150mm \quad (3.3)$$

$$k_h = \min \left[ \left( \frac{600}{h} \right)^{0.1} ; 1.1 \right], h \leq 600mm \quad (3.4)$$

A expressão (3.3) é referente a madeira maciça e a expressão (3.4) a madeira lamelada colada.

#### 3.5.4.2 Verificação à flexão desviada (ELU)

A verificação à flexão desviada foi aplicada, no âmbito da verificação de segurança das coberturas em estudo, às madres. Estes elementos, devido à sua inclinação são submetidos à flexão segundo os seus dois eixos principais centrais.

O modo de verificação à flexão desviada é idêntico ao modo de cálculo da flexão simples. Neste caso é tida em conta a interação entre a flexão nos dois eixos principais da peça. A verificação é realizada do seguinte modo:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.5)$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.6)$$

Segundo (Costa, 2015), o coeficiente  $k_m$  traduz uma margem para a redistribuição de tensões, assim como o efeito da heterogeneidade do material da secção.

Nas verificações de segurança das coberturas dos casos de estudo foi assumido  $k_m = 0.7$ , relativo a secções retangulares de madeira maciça ou lamelada colada.

### 3.5.4.3 Verificação à instabilidade lateral-torsional (bambeamento) (ELU)

A verificação ao bambeamento é realizada sempre que a peça seja sujeita a esforços de flexão simples segundo o eixo de maior inercia ou sujeita a esforços de flexão simples segundo o eixo de maior inercia e esforços axiais de compressão.

Esta verificação, nos casos de estudo, foi aplicada a madres, cumeeiras e pernas das asnas e consiste na limitação da tensão resistente de cálculo em função das tensões atuantes críticas para uma determinada peça de madeira. Esta limitação é realizada através do parâmetro  $K_{crit}$  que é calculado em função da esbelteza relativa da peça;

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (3.7)$$

Em que:

- $f_{m,k}$  – Valor característico da resistência à flexão;
- $\sigma_{m,crit}$  – Tensão crítica de flexão.

O cálculo da tensão críticas nos casos de estudo foi realizada através da seguinte fórmula:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0.78b^2}{h ml} E_{0.05} \quad (3.8)$$

Em que:

- $b$  e  $h$  – Base e altura da peça de madeira;
- $m$  – Fator de determinação de comprimento efetivo em função do carregamento;
- $l$  – Comprimento da peça;
- $E_{0.05}$  – Valor correspondente ao quantilho de 5% do modulo de elasticidade paralelo ao fio.

Relativamente ao fator  $m$ , na realização das verificações de segurança das peças de madeira das coberturas, foi utilizado o valor correspondente a uma carga uniformemente distribuída,  $m=0.88$  (Álvarez, et al., 2000).

O valor de  $K_{crit}$  é definido pelas seguintes expressões definidas no EC5:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & , \text{para } \lambda_{rel,m} \leq 0.75 \\ 1.56 - 0.75\lambda_{rel,m} & , \text{para } 0.75 < \lambda_{rel,m} \leq 1.4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & , \text{para } 1.4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (3.9)$$

Por fim é realizada a verificação das tensões atuantes com as tensões resistentes de cálculo afetadas do valor de  $k_{crit}$ :

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d} \quad (3.10)$$

#### 3.5.4.4 Verificação à flexão composta com compressão (ELU)

A verificação à flexão composta com compressão foi realizada nas pernas das asnas existentes. Esta verificação avalia a segurança relativamente à interação entre os esforços de flexão e os esforços de compressão.

Dado que nesta verificação os elementos estão sujeitos a esforços de flexão e compressão, esta verificação teve em consideração o risco de encurvadura e encurvadura lateral-torsional (bambeamento).

Relativamente à encurvadura, a verificação de segurança foi realizada tendo em conta a possibilidade das peças encurvarem segundo os dois eixos principais, começando por calcular as esbeltezas das secções e seguidamente a esbelteza relativa. Através da esbelteza relativa é possível calcular os coeficientes de encurvadura  $k_{c,y}$  e  $k_{c,z}$  para os dois eixos principais através das seguintes expressões:

$$k_{c,i} = \frac{1}{k_i + \sqrt{k_i^2 - \lambda_{rel,i}^2}} \quad (3.11)$$

$$k_i = 0.5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,i} - 0.3) + \lambda_{rel,i}^2) \quad (3.12)$$

O valor de  $\beta$  são 0.2 no caso de madeira maciça e 0.1 no caso de madeira lamelada.

Por fim a verificação da interação flexão com compressão, tendo em conta o efeito de encurvadura é realizado através das seguintes expressões:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \\ \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \end{aligned} \quad (3.13)$$

### 3.5.4.5 Verificação ao corte (ELU)

A verificação ao corte é realizada através da comparação das tensões instaladas devido aos esforços transversos nas peças e a tensão resistente de cálculo ao corte. Segundo (Costa, 2015), os esforços de corte originados nas fibras de madeira podem gerar diferentes solicitações, devido à anisotropia do material. O valor mínimo ocorre em superfícies longitudinais, onde a rotura dá-se pelo escorregamento entre planos adjacentes das fibras.

A tensão máxima de corte longitudinal, tensões entre planos adjacentes de fibras, a meia altura da secção é obtida através das seguintes expressões:

$$\tau_{sd} = \frac{3 V_{sd}}{2 A}, \text{ para secções retangulares} \quad (3.14)$$

$$\tau_{sd} = \frac{4 V_{sd}}{3 A}, \text{ para secções circulares} \quad (3.15)$$

A verificação de segurança é realizada a partir da seguinte expressão:

$$\tau_{sd} \leq f_{v,d} \quad (3.16)$$

No caso da peça estar sujeita à flexão, a base da peça deve ser afetada do coeficiente  $k_{cr}$ , obtendo-se assim a base efetiva da peça de madeira. Esta redução da base tem como objetivo ter em conta o efeito prejudicial das fendas. Nos casos de estudo o valor de  $k_{cr}$  assumiu o valor de 0.67, relativo a madeira maciça e madeira lamelada colada.

### 3.5.4.6 Verificação à compressão perpendicular ao fio (ELU)

A verificação da compressão perpendicular ao fio foi realizada essencialmente nas zonas de apoio dos elementos estruturais.

A verificação é realizada através da seguinte expressão:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d} \quad (3.17)$$

Em que:

- $\sigma_{c,90,d}$  – Valor de cálculo da tensão de compressão na zona de contacto perpendicular ao fio;
- $k_{c,90}$  – Fator que tem em conta a configuração do carregamento, a possibilidade de fendimento e o grau de deformação por compressão, definidos no capítulo 6.1.5 do EC5;
- $f_{c,90,d}$  – Valor de cálculo da resistência à compressão perpendicular ao fio.

### 3.5.4.7 Verificação de deformações (ELS)

A madeira, devido à sua natureza visco-elástica, apresenta uma fluência considerável, podendo apresentar deformações finais de aproximadamente o dobro das deformações instantâneas.

Segundo (Costa, 2015), em muitas situações, e devido ao facto da madeira apresentar uma rigidez muito baixa comparativamente às suas resistências mecânicas, o dimensionamento estrutural é condicionado pelos estados limites de serviço. A determinação da deformação final ( $u_{fin}$ ) de uma peça de madeira é dada pelo somatório das deformações dos diferentes carregamentos, tendo em conta os efeitos de fluência.

A deformação final é então calculada através da seguinte expressão:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q1} + u_{fin,Qi} \quad (3.18)$$

Em que:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G}(1 + k_{def}) \quad (3.19)$$

$$u_{fin,Q,1} = u_{inst,Q1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) \quad (3.20)$$

$$u_{fin,Q,i} = u_{inst,Qi}(\psi_{0,i} + \psi_{2,i}k_{def}) \quad (3.21)$$

Os valores de  $u_{inst,G}$ ,  $u_{inst,Q1}$  e  $u_{inst,Qi}$  são as deformações instantâneas para os diferentes carregamentos  $G$ ,  $Q_1$  e  $Q_i$ .

O coeficiente de fluência ( $k_{def}$ ) é definido no EC5, sendo função do tipo de madeira e a classe de serviço em que se insere a estrutura, assumindo os seguintes valores para as madeiras utilizadas nos casos de estudo:

Tabela 3.2 – Valores de  $k_{def}$ , definidos pelo EC5

Material	Classe de Serviço		
	1	2	3
Madeira maciça	0.6	0.8	2
Madeira lamelada	0.6	0.8	2

O Eurocódigo 5 prevê a possibilidade da peça possuir uma contraflecha ( $w_c$ ). O cálculo da flecha final ( $w_{fin}$ ) é obtido através da soma das deformações devidas às cargas permanentes, cargas variáveis e deformações de contraflecha.

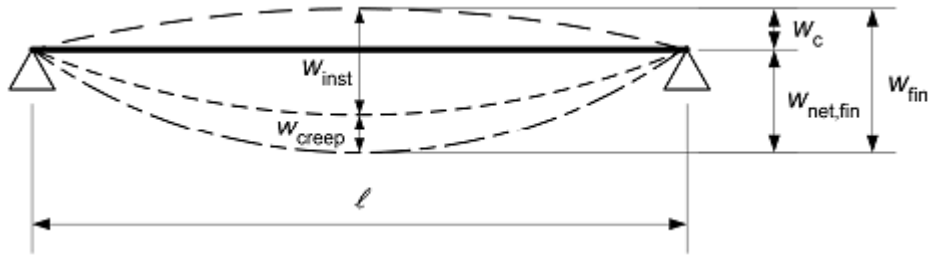


Figura 3.4 – Componentes da flecha segundo o EC5, (CEN, 2004).

O Eurocódigo 5, (CEN, 2004) limita os valores máximos das flechas segundo a Tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Valores limites de deformação definidos pelo EC5, (CEN, 2004).

	$W_{inst}$	$W_{net,fin}$	$W_{fin}$
<b>Vigas sobre dois apoios</b>	$\frac{l}{300}$ a $\frac{l}{500}$	$\frac{l}{250}$ a $\frac{l}{350}$	$\frac{l}{150}$ a $\frac{l}{300}$
<b>Vigas em consola</b>	$\frac{l}{150}$ a $\frac{l}{250}$	$\frac{l}{125}$ a $\frac{l}{175}$	$\frac{l}{75}$ a $\frac{l}{150}$

### 3.5.5 Quantificação e combinações de ações

Nesta secção são apresentadas as considerações relativas à quantificação e combinação de ações associadas aos casos de estudo apresentados nos próximos capítulos.

A determinação e combinação das ações para a avaliação estrutural têm por base a regulamentação vigente, nomeadamente:

- R.S.A. - Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes - Dec. Lei n.º 235/83 de 31 de Maio;
- Eurocódigo 0 (EC 0) - Bases para o projecto de estruturas, NP ENV 1990, IPQ, 2009;
- Eurocódigo 1 (EC 1) - Bases para o projecto e acções em estruturas, Parte 1: Bases de projecto, NP ENV 1991-1-4, IPQ, 2009.

#### 3.5.5.1 Ações permanentes

As ações permanentes incluem os pesos próprio dos elementos estruturais e não estruturais, considerando as dimensões nominais, os pesos volúmicos dos materiais e as disposições previstas no R.S.A., (R.S.A., 1983), no Eurocódigo 1, (CEN, 2009a) e na norma EN338, (CEN, 2003).



### 3.5.5.2 Ações variáveis

Foram consideradas as ações devidas à sobrecarga ( $Q_{k1}$ ) nas coberturas e a ação do vento ( $Q_{k2}$ ).

No caso de coberturas tradicionais em madeira, normalmente a ação do vento não é condicionante, devido à configuração da estrutura e à sua permeabilidade ao ar. A ação do vento é considerada como ação de sucção, e como normalmente possui valores de carga inferiores ao peso próprio dos elementos de revestimento da cobertura, não sendo a ação condicionante.

O valor relativo à sobrecarga ( $Q_{k1}$ ) adotado é referente à sobrecarga correspondente a coberturas ordinárias ( $0.3 \text{ KN/m}^2$ ).

A ação do vento ( $Q_{k2}$ ) nas estruturas foi simulada por intermédio de um carregamento estático equivalente, aplicado na estrutura como carga distribuída, em correspondência com o efeito extremo do vento.

### 3.5.5.3 Combinações de ações

As combinações de ações utilizadas são as referenciadas no Eurocódigo 0, (CEN, 2009b) e foram consideradas combinações de ações para os Estados Limites Últimos (ELU) e os Estados Limites de Serviço (ELS):

- Combinações de ações fundamentais em ELU:

$$Comb_{ELU} = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \times G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \times \psi_{0,i} \times Q_{k,i} \quad (3.22)$$

$$\gamma_{G,j} = 1.35$$

$$\gamma_{Q,i} = 1.5$$

- Combinações de ações raras em ELS:

$$Comb_{ELS} = G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{1,i} \times Q_{k,i} \quad (3.23)$$

Com:

- $G_{k,j}$  - valor característico das ações permanentes e peso próprio;
- $Q_{k,1}$  - valor característico da ação variável base;
- $Q_{k,i}$  - valores característicos das ações variáveis que não a ação base;
- $\gamma_{Gj}$  - coeficientes parciais de segurança relativos às ações permanentes;
- $\gamma_{Q,i}$  - coeficientes parciais de segurança relativos às ações variáveis;
- $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  – coeficientes de combinação de ação variável.

## **4 CASO DE ESTUDO I – ARMAZÉNS DE V.N. DE GAIA**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

No presente capítulo apresentam-se os trabalhos de inspeção e diagnóstico (I&D) realizados pelo NCREP em 3 coberturas dos Armazéns de V.N de Gaia, designadas por: cobertura F, cobertura K e cobertura O, que se inserem num conjunto de 22 coberturas, com uma área total de implantação de aproximadamente 7900m<sup>2</sup>.

O caso de estudo deu origem a 3 relatórios de I&D relativos a cada cobertura que contêm os seguintes elementos:

- Caracterização construtiva e estrutural do edifício;
- Danos estruturais;
- Avaliação de segurança estrutural;
- Sugestão de medidas de intervenção.

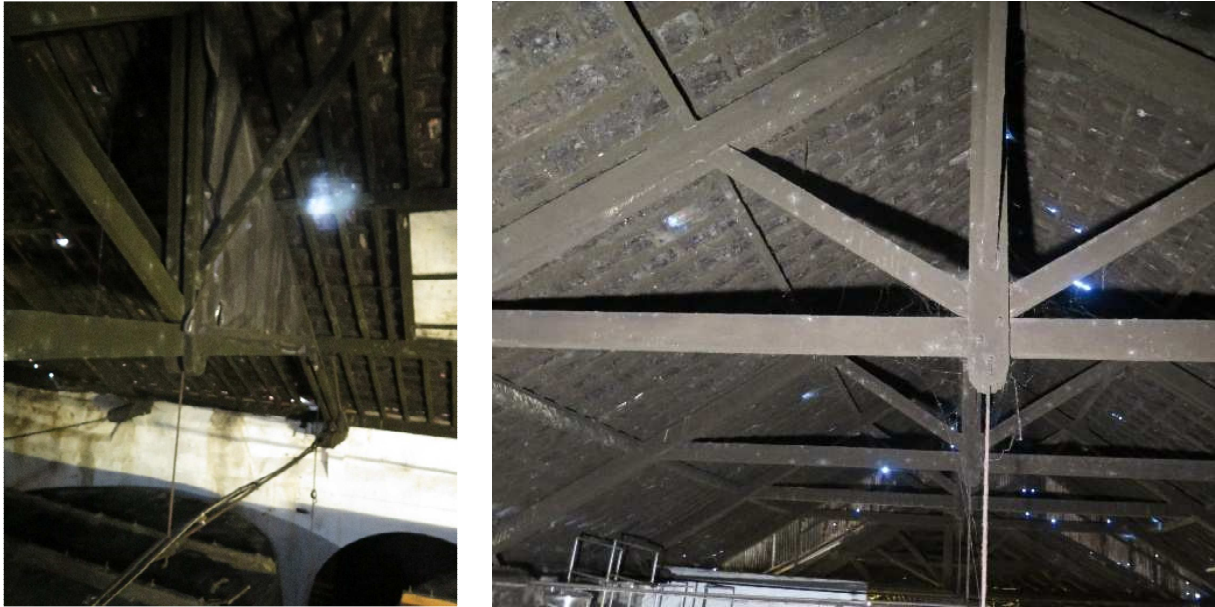
Seguidamente são apresentados os trabalhos de I&D realizados nas 3 coberturas e respetivas paredes de alvenaria (estrutura vertical).

### **4.2 COBERTURA F**

A descrição da análise do caso de estudo da cobertura F é baseada essencialmente no relatório de inspeção e diagnóstico respectivo (NCREP, 2016c), peças desenhadas e elementos fornecidos pelo dono de obra.

#### **4.2.1 Caracterização construtiva e estrutural do edifício**

A cobertura F (Figura 4.1) tem uma área em planta retangular de aproximadamente 13x44m<sup>2</sup>. Construtivamente, a cobertura em estudo tem estrutura resistente em madeira, constituída por 10 asnas dispostas paralelamente entre si, apoiadas nas paredes de alvenaria de pedra das empenas.



(a) Levantamento fotográfico

(b) Levantamento fotográfico

Figura 4.1 – Levantamento fotográfico da cobertura em estudo (cobertura F).

Na Figura 4.2 estão identificados os alinhamentos das 10 asnas, alinhamentos das madres, cumeeiras e rincões e as paredes de empena A e B.

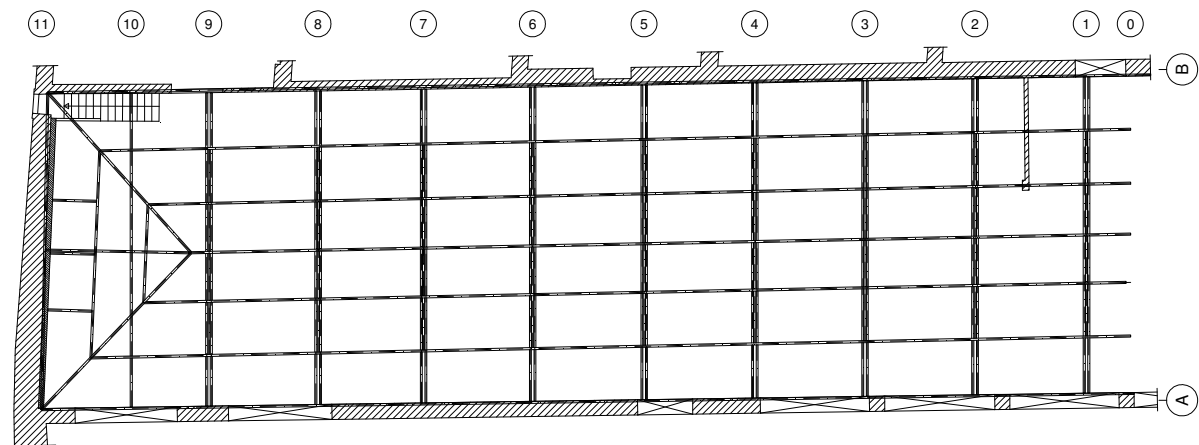


Figura 4.2 – Planta estrutural da cobertura do armazém F (sem escala).

#### 4.2.1.1 Paredes de alvenaria

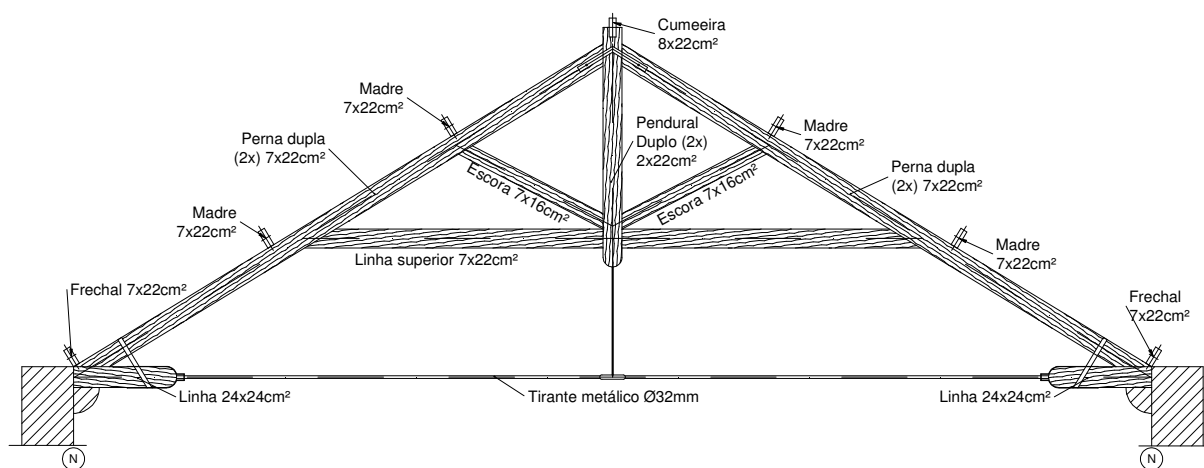
A estrutura resistente vertical das duas empenas é constituída na sua generalidade por paredes de alvenaria de pedra (granito) com elevado número de arcos na parede de empena A. Trata-se de uma alvenaria de granito com características geométricas e construtivas típicas das alvenarias utilizadas nas construções da cidade do Porto: de média qualidade, parcialmente regular, constituída por pedras de grandes dimensões, muito possivelmente assentes sobre calços de pedra e com juntas colmatadas com argamassas originalmente à base de saibro e cal.

As espessuras das paredes são aproximadamente 0.60m, em folha dupla e com espessura constante em altura. O apoio das asnas na parede de alvenaria é materializado, na sua generalidade, através de cachorros de pedra nos topos das empenas.

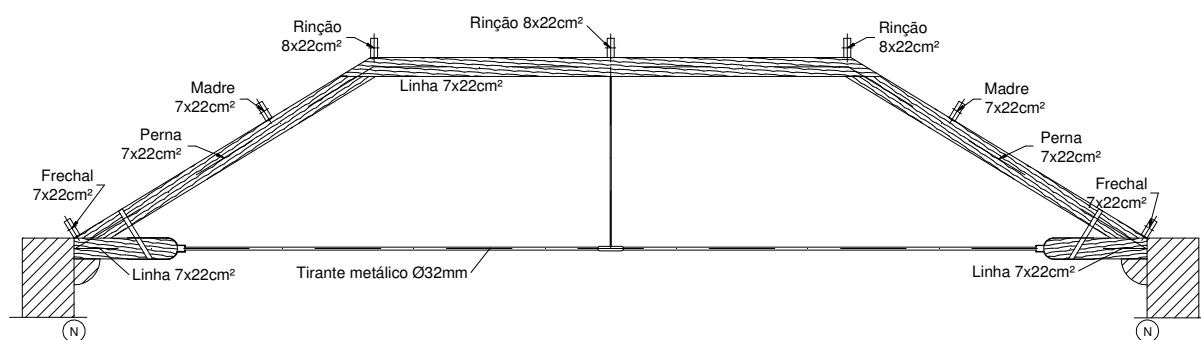
#### 4.2.1.2 Cobertura em madeira

A estrutura principal em madeira da cobertura é constituída por um total de 10 asnas que dão apoio a estrutura secundária: madres, cumeeiras e rincões. Sobre a estrutura secundária apoiam as varas de secção média  $7 \times 7 \text{cm}^2$  e espaçadas de 0,40m, que recebem a camada de guarda-pó. O apoio das varas na parede de alvenaria de pedra é realizado sobre um frechal de secção transversal  $7 \times 22 \text{cm}^2$ .

As asnas da cobertura F apresentam um espaçamento medio de 4,3m, vencem um vão livre de 12,6m e têm uma altura de cerca de 4,05m, sendo simétricas e constituídas por pernas duplas, pendural duplo, escoras e linhas (principal e secundária). Relativamente a sua configuração, existem 2 tipos de asnas referenciados com asna A (Figura 4.3a) e asna B (Figura 4.3b).



(a) Esquema estrutural da asna Tipo A (sem escala)



(b) Esquema estrutural da asna tipo B (sem escala)

Figura 4.3 – Asnas existentes na cobertura F.

As madres e cumeeiras têm secção retangular de  $8 \times 22 \text{cm}^2$ , encontrando-se apoiadas entre asnas. O vão livre das cumeeiras corresponde a metade da distância entre asnas devido às escoras ( $8 \times 10 \text{cm}^2$ ) existentes que unem o ponto central das cumeeiras com a parte inferior do pendural das asnas.

A zona da cobertura correspondente à água de menor dimensão é suportada por 2 rincões com secção transversal de  $8 \times 22 \text{cm}^2$  que apoiam na cumeeira, frechal e na asna A10 (tipo B).

Em termos gerais, a cobertura é constituída por vigas em secção retangular de madeira do tipo resinosa (presumivelmente pinho nacional ou nórdico, *Pinus Pinaster* ou *Pinus Sylvestris*), com secção transversal que varia entre  $7 \times 16 \text{cm}^2$  e  $7 \times 22 \text{cm}^2$ .

No anexo I são apresentadas as peças desenhadas do levantamento estrutural da cobertura F.

#### 4.2.2 Danos estruturais

De uma forma geral, foram identificados diversos pontos de entrada de água e, conseqüentemente, focos de humidade com alguma intensidade, quer em elementos estruturais, quer em elementos secundários, como as varas ou o guarda-pó. Estas entradas de água situam-se maioritariamente na vertente Sul da cobertura, referida como empena A, situação que encontra alguma correspondência com os ataques bióticos identificados, como se verá adiante.



Figura 4.4 – Exemplo de zona com entrada de água abundante e conseqüente degradação.

Nos seguintes pontos são apresentados os danos encontrados nos elementos estruturais de madeira e alvenaria.

##### 4.2.2.1 Danos observados em elementos estruturais de madeira

Os elementos estruturais de madeira apresentam na sua generalidade ataques de agentes bióticos como caruncho e fungos. O ataque de fungos acontece mais pontualmente, enquanto os ataques de caruncho (Figura 4.5b) se manifestam em todos os elementos estruturais com diferentes intensidades, provocando a degradação superficial dos elementos estruturais, e reduzindo a sua secção efetiva. Os ataques de fungos estão presentes essencialmente junta à parede de empena A (zona com maior humidade) e, em alguns casos, a degradação material é elevada, levando ao esmagamento de alguns apoios, (Figura 4.5a).

A campanha de ensaios de resistógrafo permitiu, entre outros, determinar a profundidade de degradação superficial ao longo da estrutura da cobertura do armazém F. Na Figura 4.6, é apresentado um exemplo de perfil de resistógrafo onde foi possível determinar a profundidade de degradação. Note-se que a profundidade de degradação não é medida a partir da ordenada zero, uma vez que o resistógrafo utilizado na realização dos ensaios das coberturas dos Armazéns de V.N. de Gaia possui um delay de aproximadamente 1cm. Este delay está associado à distância inicial de a agulha necessita de percorrer para dar início à perfuração.

A determinação da profundidade de degradação é realizada através da extensão do perfil de resistógrafo em que a curva de relação entre a distância e a resistência medida pelo resistógrafo é ascendente (no início do ensaio) ou descendente (no final do ensaio). No caso de a peça de madeira não possuir degradação superficial, o perfil resistógrafo não terá estes desenvolvimentos ascendentes no início do ensaio ou descendentes no final.



(a) Ataques de fungos

(b) Ataques de caruncho

Figura 4.5 – Exemplos de ataque de agentes bióticos em elementos estruturais de madeira.

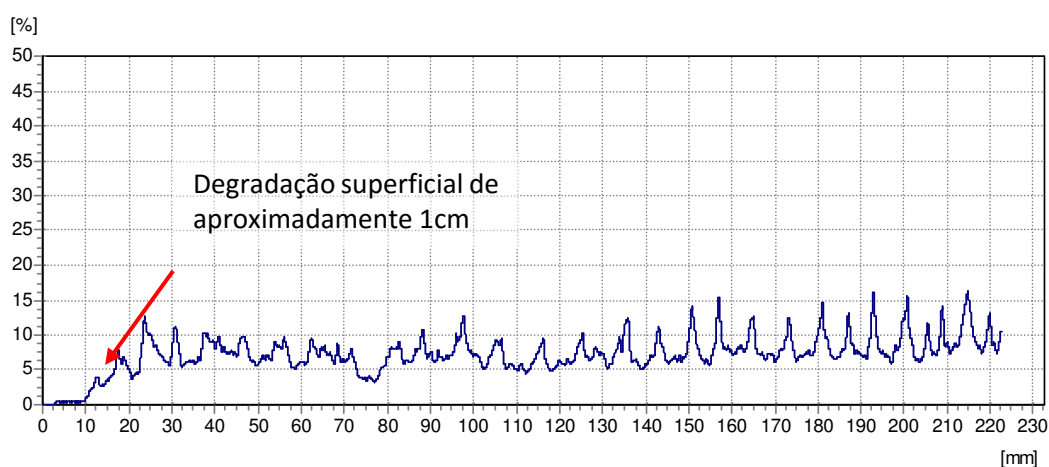
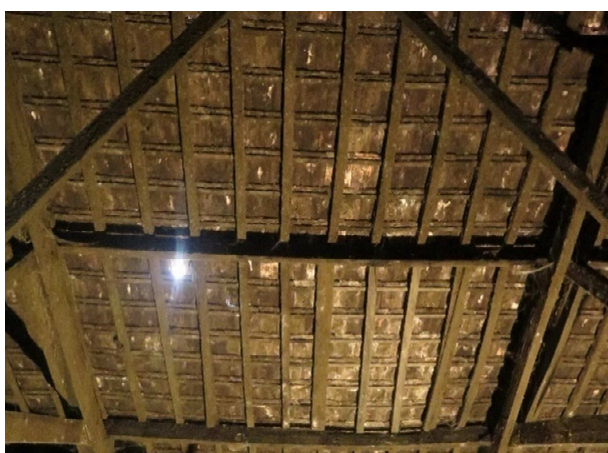


Figura 4.6 – Exemplo de perfil de resistógrafo da cobertura F.

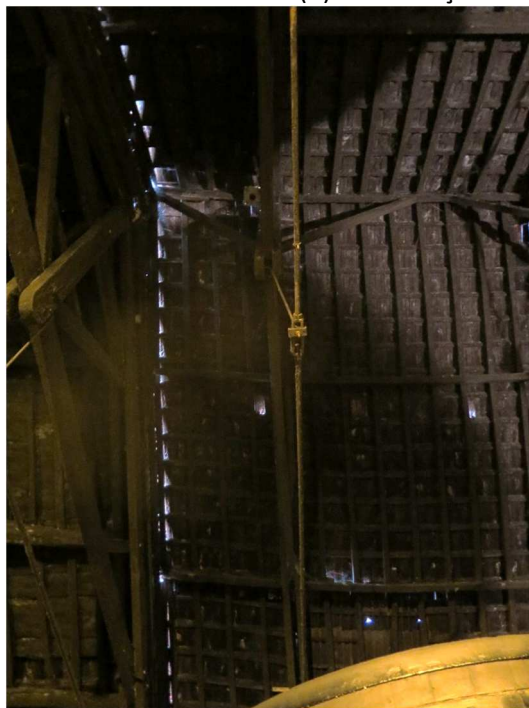
Para além da degradação material observada, foram registados outros danos estruturais associados a uma deficiente conceção estrutural, que levaram a deformações excessivas. Foi registada uma deformação global da estrutura da cobertura, mais acentuadamente na zona da cumeeira. Esta deformação é facilmente observável através da deformação de todas as asnas para fora do seu plano (Figura 4.7c). A não existência de qualquer contraventamento no plano da cobertura justifica o movimento global da parte superior da cobertura, e que é mais acentuado na cumeeira. Este movimento global está associado à assimetria da cobertura (cobertura em três águas apenas em um dos lados), que empurra a cumeeira e consequentemente todos os elementos estruturais interligados. Um outro dano observado e associado à deficiente conceção estrutural consiste na deformação das madres e na deformação da linha superior da asna tipo B, devido ao sub-dimensionamento que estas apresentam.



(a) Deformação das madres



(b) Deformação da linha superior da asna tipo B



(c) Deformação das asnas (A1) fora do plano

Figura 4.7 – Deformações dos elementos estruturais de madeira.

#### 4.2.2.2 Danos observados em elementos estruturais de alvenaria e em elementos metálicos

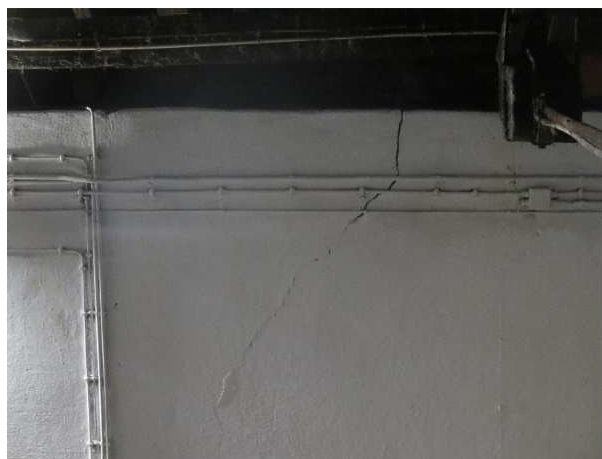
As paredes de alvenaria (paredes e arcos) e os elementos metálicos de ligação entre elementos das asnas não apresentam danos significativos, encontrando-se, de forma geral, em bom estado.

Relativamente às paredes de alvenaria é apenas de registar a existência de zonas com elevada humidade e uma fissura na parede de alvenaria de bloco localizada na parede de empena B.

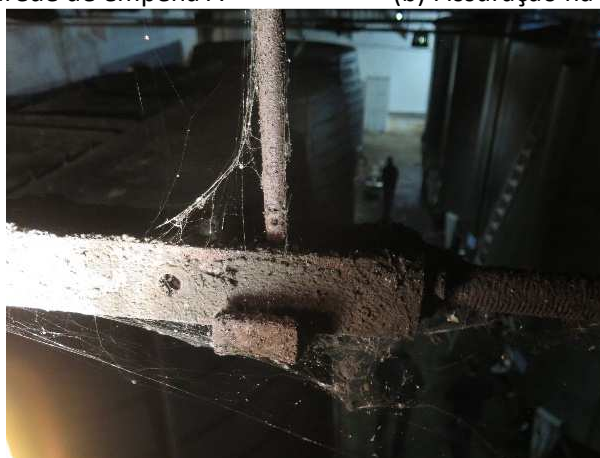
No que diz respeito aos elementos metálicos de ligação entre elementos das asnas, estes apenas apresentam alguma corrosão superficial.



(a) Humidade na parede de empena A



(b) Fissuração na parede de empena B



(c) corrosão dos elementos metálicos de ligação

Figura 4.8 – Danos em parede de alvenaria e elementos metálicos.

No anexo I são apresentadas as peças desenhadas do mapeamento de danos da cobertura F.



### 4.2.3 Avaliação de segurança estrutural

#### 4.2.3.1 Classificação mecânica dos materiais

Numa primeira fase do diagnóstico é realizada a classificação dos materiais existentes, através das informações obtidas nas campanhas de inspeção, nos ensaios realizados in-situ, documentos normativos e publicações sobre ensaios em elementos estruturais equivalentes aos existentes no caso em estudo.

Os ensaios e a inspeção visual realizada permitiram concluir que a madeira encontrada nos elementos estruturais da cobertura é do tipo resinosa. A densidade é um parâmetro correlacionável com a resistência da madeira, se não existirem defeitos ou danos relevantes. No caso da cobertura em análise, foi considerada a classe resistente C18 para a verificação de segurança.

Na seguinte tabela são apresentadas as propriedades mecânicas de cálculo obtidas através da expressão (3.1), considerando a classe de serviço 2.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas de cálculo das madeiras existentes.

Classe Resistente	Cargas	$k_{mod}$	$f_{m,d}$ (MPa)	$f_{t,o,d}$ (MPa)	$f_{c,0,d}$ (MPa)	$f_{c,90,d}$ (MPa)	$f_{v,d}$ (MPa)
C18	Permanentes	0,6	8,31	5,08	8,31	0,23	0,92
	Média duração (sobrecarga)	0,8	11,1	6,77	11,1	0,31	1,23

Relativamente à caracterização mecânica das paredes, apesar dos blocos de granito apresentarem resistência à compressão de valores frequentemente superiores a 20MPa, a alvenaria constituída por estes elementos apresenta características mecânicas bastante inferiores, nomeadamente resistências à compressão médias de 2,5MPa e módulos de deformabilidade vertical entre 0,3 e 0,5GPa, conforme valores obtidos em ensaios experimentais em paredes de alvenaria de pedra típicas do Porto, realizados na FEUP (Almeida, et al., 2011).

#### 4.2.3.2 Quantificação de ações

O seguinte quadro resume as ações permanentes consideradas, determinadas através das características dos materiais.

Tabela 4.2 - Ações permanentes (Gk) consideradas.

<b>Pesos Próprios (PP)</b>	
Peso específico do aço em elementos metálicos	77,00kN/m <sup>3</sup>
Peso específico da alvenaria de pedra	22,00kN/m <sup>3</sup>
Peso específico de madeira maciça resinosa (C18)	3,80kN/m <sup>3</sup>
<b>Restantes cargas permanentes (RCP)</b>	
Peso dos materiais de revestimento (telhas, ripas, varas e guarda-pó) da cobertura	0,80kN/m <sup>2</sup>

O valor relativo à sobrecarga adotado é referente a coberturas ordinárias (0.3  $KN/m^2$ ).

A pressão do vento foi determinada supondo que o edifício se encontra localizado na zona B, com uma rugosidade aerodinâmica do tipo I. Os valores reduzidos a considerar para a ação do vento deverão ser determinados através dos seguintes coeficientes ( $\psi_0=0,4$ ;  $\psi_1=0,2$ ;  $\psi_2=0$ ), (R.S.A., 1983). O valor característico da pressão do vento máximo usado na análise da cobertura em estudo foi 0.59  $KN/m^2$ .

#### 4.2.3.3 Análise das paredes de alvenaria de pedra

O valor das cargas verticais actuantes nas paredes de alvenaria de pedra foi avaliado numa secção tipo representativa da possível condição mais desfavorável de carga, neste caso na base, junto às fundações. Em particular, as cargas transmitidas pela cobertura e pelas paredes de alvenaria de pedra do edifício às fundações correspondem, em ELU, a valores estimados de tensão média inferiores a 1,0MPa, ou seja, inferiores à resistência de compressão expectável para este tipo de paredes, tal como já se referiu em capítulos anteriores. Não se prevê, por isso, que possam ocorrer danos de compressão nas paredes resultantes das cargas verticais. No entanto, não deverá ser descurada a segurança do edifício às ações horizontais. Em particular, deverá providenciar-se uma ligação eficaz entre os diferentes elementos estruturais da cobertura às paredes de alvenaria do edifício.

#### 4.2.3.4 Análise das asnas de cobertura

A verificação de segurança estrutural dos elementos da cobertura, tanto em termos de resistência (Estados Limites Últimos - ELU), como em termos de deformação (Estados Limites de Serviço - ELS) e que se apresenta em seguida, procurou avaliar a sua adequabilidade às cargas actuantes.

A verificação de segurança foi realizada para os elementos estruturais mais solicitadas pelas ações verticais, ilustrando-se alguns dos modelos numéricos de cálculo planos utilizados, nomeadamente para o cálculo estrutural dos esforços instalados nas asnas de cobertura.

Nesta secção apresenta-se o resumo dos rácios de segurança para os elementos de madeira das asnas da cobertura mais solicitadas, por tipo de asna para o ELU e ELS. Através de um sistema de cores (**vermelho** - rácio entre esforços atuantes e resistentes superior a 1; **verde** - rácio entre esforços atuantes e resistentes inferior a 1), na Figura 4.9, é possível verificar, de forma intuitiva e relativamente aos ELU, que na asna tipo A, a linha elevada e as pernas não verificam as condições regulamentares de segurança aos ELU e as escoras, o pendural e a linha inferior (tirante metálico) apresentam rácios inferiores a 1, ou seja, verificam a segurança. Na asna tipo B as duas pernas e a linha elevada não verificam as condições regulamentares de segurança aos ELU e a linha inferior (tirante metálico) verifica as condições regulamentares de segurança.

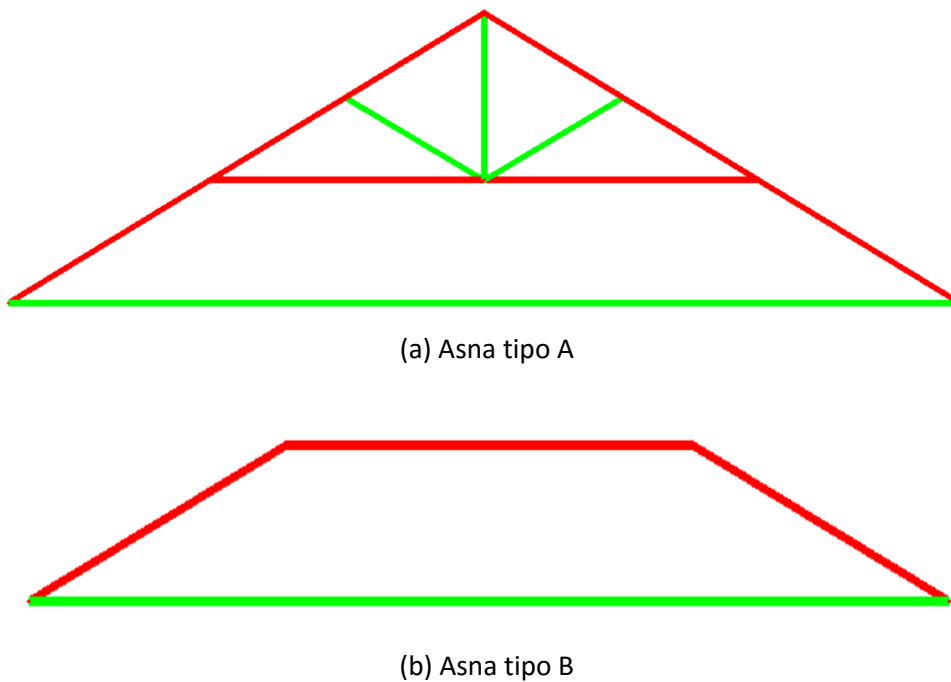


Figura 4.9 - Modelos numéricos das asnas mais solicitadas em ELU.

Tabela 4.3 - Rácios de segurança e serviço dos elementos das asnas da cobertura em ELU e ELS.

Tipo de Asna	Elemento	Rácio ELU		Rácios ELS	
Asna A	Linha principal (tirante metálico)	0.34	OK	0.00	OK
	Linha superior	1.57	KO	0.00	OK
	Escoras	0.42	OK	0.01	OK
	Pendural	0.07	OK	0.00	OK
	Pernas	2.09	KO	0.15	OK
Asnas B	Pernas	5.80	KO	0.82	OK
	Linha inferior (tirante metálico)	0.29	OK	0.00	OK
	Linha superior	35.80	KO	5.37	KO

#### 4.2.3.5 Análise dos restantes elementos da cobertura

Foi igualmente realizada a verificação de segurança estrutural para as madres, cumeeiras e rincões que materializam a cobertura, para os Estados Limites Último (ELU) e os Estados Limites de Serviço (ELS).

A Tabela 4.4 e Tabela 4.5 apresentam os rácios resultantes da avaliação ao Estado Limite Último (ELU), tendo em conta os esforços a que estão sujeitas: flexão simples e (ou) flexão desviada, esforço transversal, compressão perpendicular ao fio e bambeamento. Como é possível observar, os dois rincões existentes e as madres não verificam a segurança para os Estados Limites Últimos (flexão simples sem bambeamento).

Tabela 4.4 - Rácios de segurança das madres e cumeeiras existentes na cobertura para o ELU.

Elemento	Zona	Características geométricas			Carregamento			Características material		Flexão simples	Bambeamento	Corte	Compressão ⊥ fibras	Flexão desviada
		b (m)	h (m)	Vão (m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	L influencia (m)	Tipo de madeira	Maciça					
Madre	Cota superior	0,07	0,22	4,2	0,80	0,3	2,35	Maciça	C18	KO	KO	OK	OK	2,59
	Cota inferior	0,07	0,22	4,2	0,80	0,3	2,61	Maciça	C18	KO	KO	OK	OK	2,87
Cumeeir		0,07	0,22	2,1	0,80	0,3	2,61	Maciça	C18	OK	OK	OK	OK	0,25

Tabela 4.5 - Rácios de segurança dos rincões existentes na cobertura para o ELU.

Edifício Elemento		Características e propriedades das vigas						Flexão Simples (com bambeamento)	Compressão		Flexão composta		Esmagamento do apoio	
		Classe de serviço	Duração da acção	b ou ø (mm)	h (mm)	Vão (m)	M <sub>sdl,y</sub> (kN m)		Rácio	N <sub>sdl</sub> (kN) (+=C, -=T)	Rácio	Flexão Composta (N+T/C)		Flexão Composta (N+T/C), com bambeamento
Cob.F	Rincão	C18	1	Média	80	220	5,5	11,9	1,73	4,1	0,83	2,49	2,56	0,80
Cob.F	Rincão	C18	1	Média	80	220	3,9	4,6	0,65	2,2	0,23	0,88	0,88	0,44

A verificação ao estado limite de deformação, apresentada na Tabela 4.6 e Tabela 4.7 permitiu concluir que as madres e rincões não cumprem os limites regulamentares de estado limite de deformação, e as cumeeiras cumprem devido ao escoramento existente ao pendural das asnas que reduz o vão das cumeeiras para metade do seu comprimento total.

Tabela 4.6 - Rácios de serviço das madres e cumeeiras existentes na cobertura para o ELS.

Elemento Zona		Características geométricas			Carregamento			Características material		Deformação ZZ (Ped,zz para ly)			E.L.S. - Deformação YY (Ped,yy para lz)				
		b(m)	h(m)	Vão (m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	L influencia (m)	Tipo de madeira	Maciça	u <sub>inst,total</sub> (mm)	1º Critério u <sub>instEI/300</sub>	u <sub>fin,total</sub> (mm)	2º Critério u <sub>finEI/250</sub>	u <sub>inst,total</sub> (mm)	1º Critério u <sub>instEI/300</sub>	u <sub>fin,total</sub> (mm)	2º Critério u <sub>finEI/250</sub>
Madre	Cota superior	0,07	0,22	4,2	0,80	0,3	2,35	Maciça	C18	17,1	KO	27,8	KO	98,8	KO	160,9	KO
Madre	Cota inferior	0,07	0,22	4,2	0,80	0,3	2,61	Maciça	C18	18,9	KO	30,8	KO	109,4	KO	178,3	KO
Cumeeir		0,07	0,22	2,1	0,80	0,3	2,61	Maciça	C18	1,6	OK	2,5	OK	0,0	OK	0,0	OK

Tabela 4.7 - Rácios de serviço dos rincões existentes na cobertura para o ELS.

Edifício		Elemento		Características e propriedades das vigas						Deformação					
				Maciça	Classe de serviço	Duração da acção	b ou $\phi$ (mm)	h (mm)	Vão (m)	$u_{inst,G}$ (mm)	$u_{inst,Q}$ (mm)	$u_{inst,total}$ (mm)	1º Critério $u_{instEI}/300$	$u_{fin,G}$ (mm)	$u_{fin,Q}$ (mm)
Cob.F	Rincão	C18	1	Média	80	220	5,5	31,7	11,4	43,1	18,3	50,7	12,8	63,5	22,0
Cob.F	Rincão	C18	1	Média	80	220	3,9	6,4	2,3	8,7	13,0	10,3	2,6	12,8	15,6

#### 4.2.4 Sugestão de medidas de intervenção

A análise efetuada nos pontos anteriores permitiu avaliar o estado de conservação estrutural do armazém, e a segurança estrutural para as cargas verticais. Com base nestas análises são propostas medidas de intervenção nas paredes de alvenaria de pedra e nos elementos estruturais de madeira.

Nas secções seguintes são apresentadas, de forma sumária, as propostas de intervenção resultantes da inspeção e diagnóstico. A elaboração do relatório de inspeção e diagnóstico resultou também na materialização das propostas de intervenção em peças desenhadas. No anexo I são apresentadas as peças desenhadas da proposta de solução de intervenção da cobertura F.

##### 4.2.4.1 Intervenção em elementos estruturais de alvenaria de pedra

As paredes e os arcos de alvenaria de pedra do armazém não apresentam danos relevantes, não se considerando necessário proceder à sua reabilitação e/ou reforço estrutural.

A fenda diagonal na parede da empena B deve ser colmatada com materiais compatíveis com a sua tipologia construtiva e que não ponham em causa a integridade estrutural da parede de alvenaria.

Será também necessário realizar ações de limpeza e remoção dos focos de humidade presentes nas paredes de alvenaria de pedra. De forma a acautelar a correta ventilação e proteção das paredes de alvenaria de pedra, será conveniente não utilizar argamassas de cimento nem revestimentos impermeáveis ao vapor de água, tais como tintas plásticas.

##### 4.2.4.2 Intervenção em elementos estruturais de madeira

O estado de conservação dos elementos de madeira da cobertura, aliado ao seu sub-dimensionamento, aferido nas análises numéricas efetuadas, apontam para a necessidade de soluções de intervenção que terão necessariamente algum grau de intrusividade.

Relativamente aos elementos secundários, como varas, frechais e guarda-pó, deverão ser substituídos por novos elementos, uma vez que o seu estado de degradação é demasiado avançado para ser equacionada a sua manutenção.

A intervenção que se crê necessária na estrutura de madeira da cobertura pretende melhorar o comportamento dos elementos estruturais, dotando-os das características necessárias para cumprir as disposições regulamentares, não pretendendo corrigir as deformações e os empenos instalados, resultantes da encurvadura dos elementos que constituem a cobertura e, por inerência, da estrutura da cobertura em geral. Essa correção poderá ser realizada pontualmente. Trata-se de deformações importantes que se encontram instaladas há largos anos e que obrigaram a estrutura a adaptar-se a novas posições de equilíbrio, por vezes pouco estáveis, que não poderão ser globalmente corrigidas sem que haja o risco de dano, ou mesmo rotura das peças existentes.

Apesar de permitir resolver e/ou conter alguns dos problemas existentes, a solução proposta exige sempre um plano de manutenção apertado para que possa ser assegurada uma durabilidade aceitável. Este facto é particularmente importante, tendo em conta a infestação de térmitas verificada em muitos dos armazéns vizinhos.

Nos pontos seguintes são apresentadas, com maior detalhe, as medidas de reabilitação e (ou) reforço da estrutura:

### **1) Reabilitação e reforço das asnas da cobertura**

Substituição dos elementos estruturais mais degradados, nomeadamente as linhas principais (parte de madeira) mais degradadas. Relativamente às linhas principais das restantes asnas, devem ser colocados empalmes metálicos de reforço.

Reforço dos elementos com rácios de solicitação mais elevados, através da fixação de novos elementos de madeira ou metálicos, com o objetivo de aumentar a sua capacidade resistente e de impedir novos acréscimos de deformação. A ligação adequada entre os elementos de reforço e os elementos originais é essencial para garantir o funcionamento conjunto dos novos elementos reforçados.

Estes reforços englobam:

- Reforço das pernas através da colocação de uma viga no interior do tramo inferiores das pernas, dado que durante as verificações de segurança foi possível verificar que as pernas das asnas do tipo A têm elevados esforços de compressão e possuem elevadas esbeltezas, tendo conseqüente risco elevado de instabilidade por encurvadura. A colocação da viga interior tem como objetivo fazer com que as pernas existentes (perna dupla) trabalhem em conjunto reduzindo assim a esbelteza das pernas em conjunto.

- Reforço das linhas elevadas através da colocação de uma viga de madeira a par da existente e devidamente ligada.

Limpeza e tratamento dos elementos de madeira a manter com um produto contra insetos e fungos xilófagos, e especialmente contra insetos sociais (térmitas). Poderá ser utilizado um produto do tipo Sarpgel 100 ou Xylophene S.O.R. 40 (a definir por empresa da especialidade) no tratamento das madeiras a manter, devendo estas ser injetadas e tratadas superficialmente. A injeção é particularmente importante a zona dos apoios, e não deverá de modo algum ser descurada.

Os novos elementos de madeira deverão receber um tratamento prévio contra agentes bióticos em autoclave de duplo vácuo, com um produto semelhante ao anteriormente referido.

No caso particular da asna do tipo B, esta deverá ser substituída por um novo elemento, com uma estrutura em treliça, devidamente contraventada no seu plano de modo a ter uma configuração compatível com o nível de carregamento a que está sujeito este elemento estrutural.

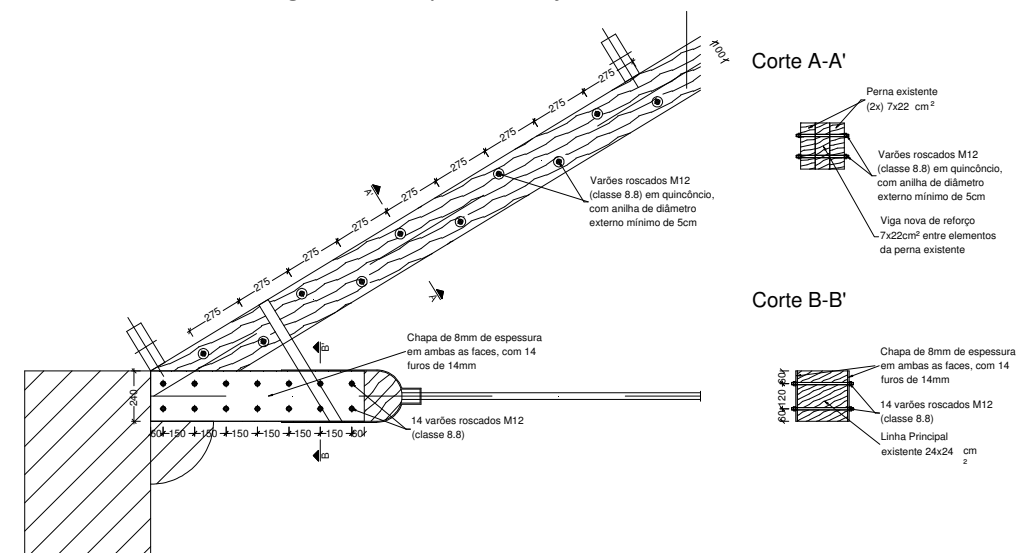


Figura 4.10 – Pormenor tipo de reforço das pernas e linha das asnas tipo A (sem escala).

## 2) Introdução de elementos de contraventamento das asnas

Limitação do risco de encurvadura global das asnas através da introdução de elementos de contraventamento em madeira entre as asnas (ligados de topo às pernas). Esta ação visa limitar o risco de encurvadura global das asnas e a deformação global da cobertura. Na zona dos rincões, deverá igualmente ser introduzido um elemento de contraventamento em forma de treliça de madeira.

## 3) Substituição pontual e reforço estrutural das madres e cumeeiras

Substituição das madres e cumeeiras mais degradadas por novos elementos de madeira com secção transversal adequada às cargas e vãos a vencer. A ligação entre as madres e as pernas das asnas deverá



também ser melhorada através da introdução de parafusos e/ou chapas metálicas, de forma a permitir limitar os fenómenos de encurvadura das pernas.

No caso do reforço estrutural, a proposta consiste na colocação de um novo elemento a par do existente com as dimensões necessárias para que o conjunto, madre ou cumeeira existente e elemento de reforço, seja adequado às cargas e vãos a vencer.

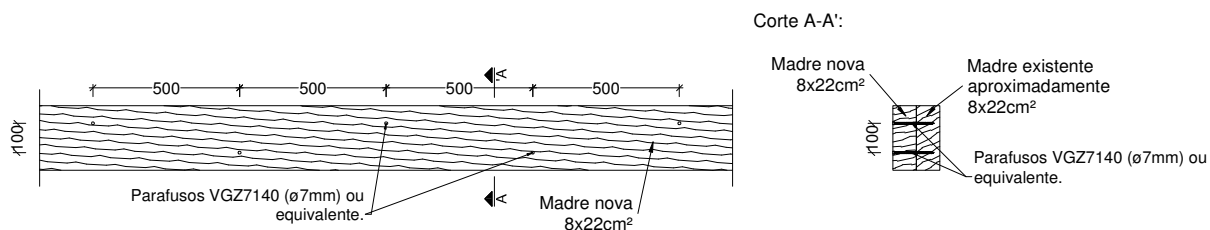


Figura 4.11 – Pormenor tipo de ligação entre madre existente e reforço (sem escala).

#### 4) Melhoria da ligação das linhas das asnas aos elementos de suporte

Reforço da ligação das linhas das asnas às paredes de alvenaria de pedra, procurando uniformizar e melhorar essas condições de apoio e, sobretudo, corrigir os desvios encontrados em alguns dos apoios.

#### 5) Tensionamento dos cabos das asnas

Tensionamento dos tirantes de aço das asnas da cobertura para permitir que as asnas funcionem corretamente, ou seja sem que introduzam impulsos laterais nas paredes onde apoiam. Adicionalmente, estes elementos deverão ser limpos e deverá ser aplicado um tratamento anticorrosivo.

#### 6) Tratamento dos elementos metálicos

Limpeza dos elementos metálicos e das superfícies corroídas, procedendo-se posteriormente à aplicação de um tratamento anticorrosivo.

### 4.3 COBERTURA K

A descrição da análise do caso de estudo cobertura K é baseada essencialmente no relatório de inspeção e diagnóstico da cobertura K (NCREP, 2016d), peças desenhadas e elementos fornecidos pelo dono de obra.

#### 4.3.1 Caracterização construtiva e estrutural do edifício

A cobertura K apresenta uma área em planta de aproximadamente 740m<sup>2</sup>, sendo composta por uma estrutura resistente em madeira, constituída por 11 asnas dispostas paralelamente entre si, apoiadas em

paredes resistentes em alvenaria de pedra nas empenas e num pórtico metálico existente na empena B (Oeste).



Figura 4.12 – Levantamento fotográfico da cobertura em estudo (cobertura k).

A Figura 4.13 (planta estrutural da cobertura K) identifica os alinhamentos das asnas, madres, cumeeiras, rincões e as empenas A e B. As plantas estruturais da cobertura K podem ser analisadas em maior detalhe no Anexo II.

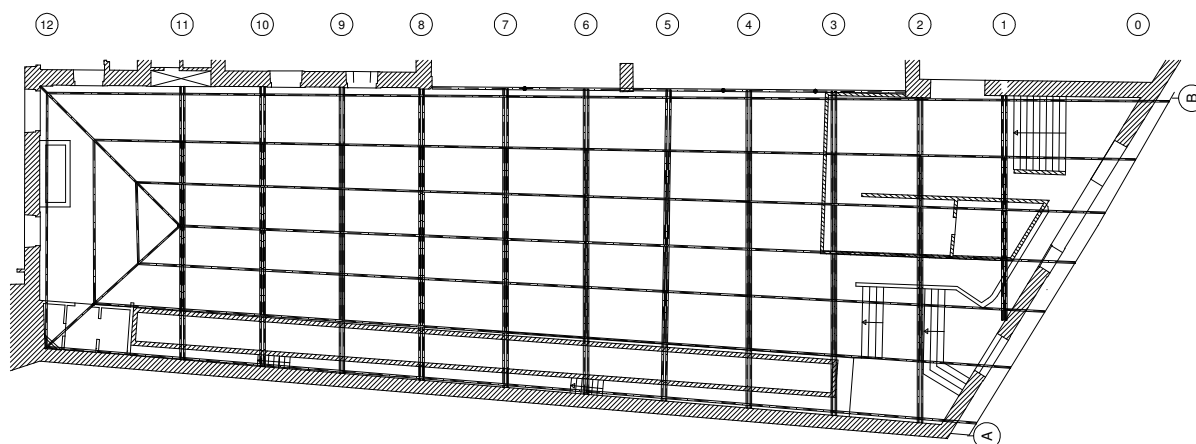


Figura 4.13 – Planta estrutural da cobertura do armazém K (sem escala).

#### 4.3.1.1 Paredes de alvenaria

Assim como no armazém F, a estrutura resistente vertical das duas empenas do armazém K é constituída, na generalidade, por paredes de alvenaria de pedra (granito) com alguns arcos. Tratando-se de uma alvenaria de granito com características geométricas e construtivas típicas das alvenarias utilizadas nas construções da cidade do Porto.

As paredes são em alvenaria de folha dupla com uma espessura de aproximadamente 0,60m constante em altura. O apoio das asnas de cobertura é efetuado, na generalidade, em cachorros existentes de betão e em chapas metálicas na empena A; na empena B as asnas apoiam no pórtico metálico e diretamente na

parede de alvenaria. Note-se que no caso da empena A, os cachorros existentes, quer em betão, quer em estrutura metálica, foram colocados numa fase posterior à execução da estrutura original para resolver alguns problemas de degradação material.

#### 4.3.1.2 Pórtico metálico

Parte da estrutura resistente vertical da empena B é constituída por um pórtico metálico de 4 tramos, em que os apoios centrais são pilares circulares, e por uma parede de alvenaria perpendicular à empena; os apoios extremos deste pórtico são feitos diretamente nas paredes da empena. A estrutura horizontal do pórtico é materializada por um perfil equivalente a um IPE220. Esta estrutura dá apoio às asnas A3, A4, A5, A6 e A7.



(a) Vista geral do pórtico metálico



(b) Apoio na parede perpendicular a empena B

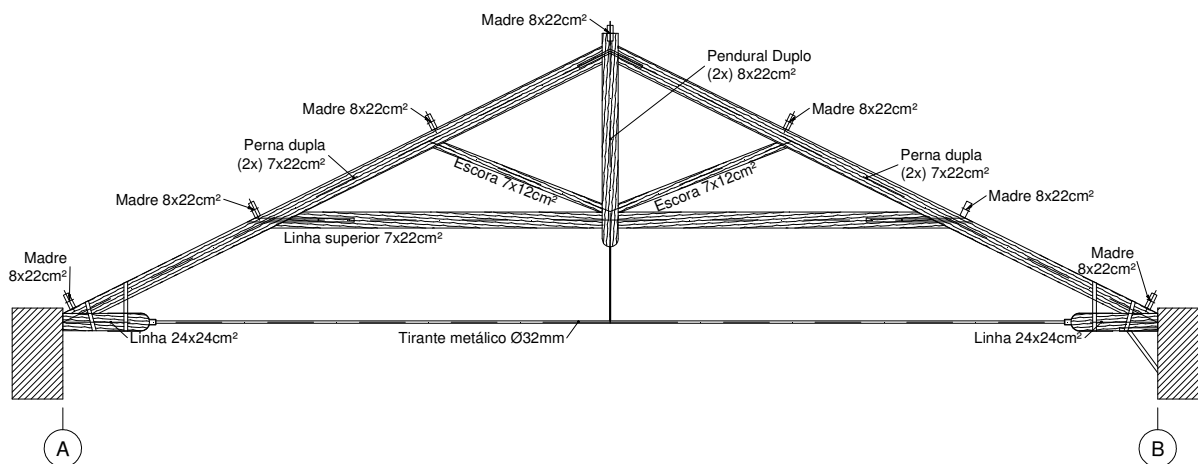
Figura 4.14 – Pórtico metálico existente na empena B

#### 4.3.1.3 Cobertura em madeira

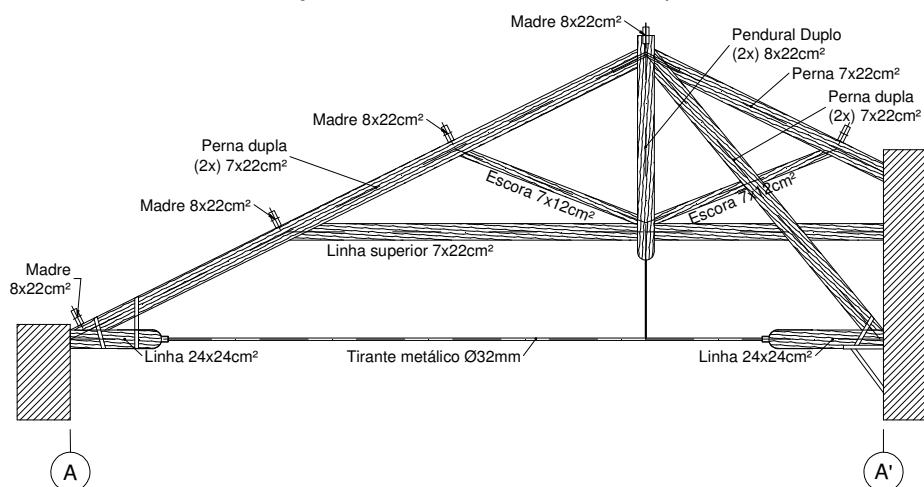
A estrutura em madeira da cobertura é constituída por um conjunto de 11 asnas sobre as quais apoiam os elementos secundários: madres, cumeeira e rincões. Sobre os elementos secundários apoiam as varas de madeira com secção transversal média de aproximadamente  $7 \times 7 \text{cm}^2$  espaçadas de 0,40m, que recebem uma camada de guarda-pó. O apoio das varas na parede de alvenaria é realizado sobre um frechal de madeira de secção transversal  $7 \times 22 \text{cm}^2$ .

As asnas, com espaçamento médio de 4m, vencem um vão livre entre 12,80m e 15,20m e têm uma altura de cerca 3,9m, sendo simétricas e constituídas por pernas, pendural, escoras e linhas (principal e secundária). Relativamente à sua configuração, existem 2 tipos de asnas: Asna tipo A e Asna tipo B.

As asnas A e B são compostas por elementos estruturais de secção transversal retangular, variando entre  $7 \times 16 \text{cm}^2$  e  $7 \times 22 \text{cm}^2$ , conforme apresentado na Figura 4.15 e por um tirante metálico de diâmetro  $\varnothing 35 \text{mm}$  na base.



(a) Alçado das asnas existentes do tipo A

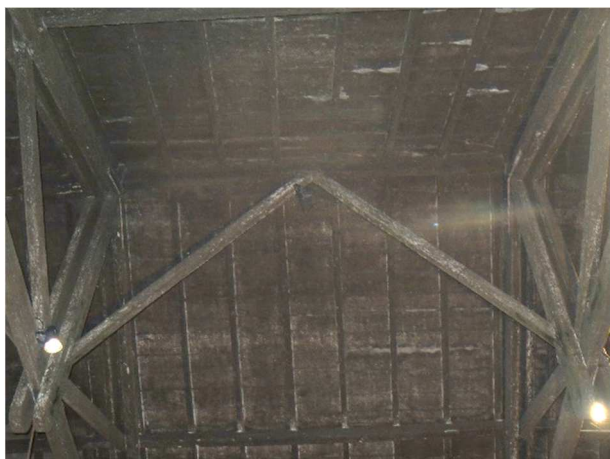


(b) Alçado da asna existente do tipo B

Figura 4.15 – Alçados das asnas (sem escala)

As madres e cumeeira, com secção retangular de  $8 \times 22 \text{ cm}^2$ , encontram-se apoiadas entre asnas. Salienta-se que o vão livre das cumeeiras corresponde a metade da distância entre asnas, já que as secções a meio vão se encontram apoiadas em pares de escoras inclinadas, com secção transversal de  $8 \times 10 \text{ cm}^2$ , ligadas ao pendural das asnas (Figura 4.16a). Para além de reduzirem o vão das cumeeiras, as escoras poderão ter sido introduzidas com o objetivo de contraventar o ponto central das asnas para deslocamentos na direção para fora-do-plano.

A zona de cobertura em três águas é suportada por dois rincões de seção retangular  $8 \times 22 \text{ cm}^2$ , que se encontram apoiados na cumeeira, nas paredes de alvenaria existentes. Na zona de apoio nas paredes de alvenaria, ambos os rincões apresentam já elementos de reforço para fazer face ao grande vão que estes vencem (Figura 4.16b e Figura 4.16c).



(a) Escoras de suporte das cumeeiras



(b) Prumo de suporte do rincão no lado da empina A e perfil metálico



(c) Reforço metálico de apoio ao rincão do lado B

Figura 4.16 - Elementos de apoio intermedio dos rincões e cumeeiras.

Em termos gerais, a cobertura é constituída por vigas em secção retangular de madeira do tipo resinosa (presumivelmente pinho nacional ou nórdico, *Pinus Pinaster* ou *Pinus Sylvestris*), com secções transversais que variam entre 7x16cm<sup>2</sup> e 8x22cm<sup>2</sup>.

No anexo II são apresentadas as peças desenhadas do levantamento estrutural da cobertura K.

### 4.3.2 Danos estruturais

Os elementos obtidos através da inspeção visual, das sondagens e ensaios referidos anteriormente permitiram analisar o estado de conservação dos elementos estruturais do armazém e assim definir as necessidades de intervenção.

Foram identificados diversos pontos de entrada de água e, conseqüentemente, focos de humidade com alguma intensidade, quer em elementos estruturais, quer em elementos secundários, como as varas ou o guarda-pó. Estas entradas de água situam-se maioritariamente na empina A, situação que encontra alguma correspondência com os ataques bióticos identificados, como se verá adiante. De facto, na parede

de empena A é notória a grande quantidade de água que resulta, inclusivamente, na existência de muitos fungos nesta parede. Além de favorecer a degradação dos elementos de revestimento do edifício, a entrada de água cria condições para o ataque de agentes bióticos nos elementos de madeira. Este aspeto sublinha a importância da realização de ações de manutenção regulares, sendo esta a única forma de garantir a integridade de estruturas desta natureza.

No presente capítulo são apresentados e descritos os principais danos encontrados no armazém, sendo esta descrição suportada pelas peças desenhadas onde esta informação se encontra sintetizada.

#### **4.3.2.1 Danos observados em elementos estruturais de madeira**

Os principais danos em elementos de madeira estão associados aos focos de humidade, como referenciado anteriormente, principalmente na parede de empena A. Estas condições criam condições para o aparecimento de ataques de fungos xilófagos e de caruncho em vários elementos estruturais da cobertura. No entanto, são as térmitas o agente biótico mais presente no local e o maior responsável pela degradação material verificada na estrutura de madeira, sobretudo na zona da empena A (Figura 4.17). Estes insetos acedem aos elementos em madeira através do solo, formando pequenas galerias ao longo das paredes de alvenaria, podendo deslocar-se em altura e mesmo entre corpos vizinhos. A existência de teores em água elevados na madeira, associados ao alto teor de humidade relativa do armazém, criam condições ideais para o seu ataque e desenvolvimento.

Os ataques de térmitas têm maior incidência nos apoios das asnas na parede de empena A. Em alguns casos, as peças perderam totalmente a sua secção. Estes danos foram corrigidos através intervenções de reabilitação anteriores que consistiram na execução de cachorros metálicos e de betão e também através de reforços com chapas metálicas na zona do apoio das asnas na parede e na ligação entre as pernas e a linha principal (Figura 4.17b). Estas intervenções de reforço dos apoios junto da empena A em alguns casos já não são suficientes perante os danos que atualmente os elementos das asnas apresentam, uma vez que esta degradação progrediu ao longo do tempo.



(a) Degradação material através de ataques de térmitas



(b) Exemplo de reforço dos apoios com cachorro metálico

Figura 4.17 – Presença e ataques de térmitas.

Na Figura 4.18, são identificados exemplos de ataques de agentes bióticos observados na estrutura da cobertura como caruncho e fungos. Os ataques de caruncho estão presentes ao longo de toda a estrutura, provocando degradação superficial dos elementos de madeira. Os ataques de fungos estão presentes essencialmente junto a pontos de entrada de água, locais onde se criam as condições necessárias para o seu desenvolvimento.



a) Ataque de Caruncho



b) Ataque de fungos

Figura 4.18 – Exemplos de ataque de agentes bióticos em elementos estruturais.

Assim como na cobertura F, a campanha de ensaios não destrutivos permitiu confirmar informações obtidas através da inspeção visual. Na Figura 4.19 é mostrado um perfil de resistógrafo de uma peça com degradação superficial de aproximadamente 1 cm.

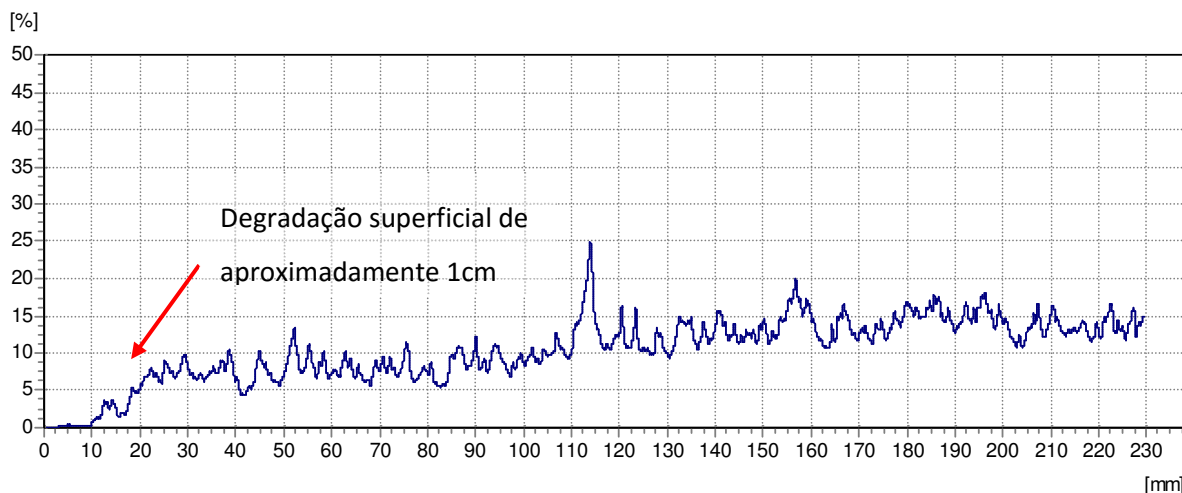


Figura 4.19 – Exemplo de perfil de resistógrafo da cobertura K.

Para além da degradação material observada, foram registados outros danos em elementos de madeira decorrentes de deficiente conceção estrutural que resultaram em deformações excessivas em diversos elementos da cobertura. A não existência de qualquer contraventamento no plano da cobertura ou no plano perpendicular às asnas justifica as deformações observadas.

De facto, constatou-se a ocorrência de um movimento global de toda a zona superior da cobertura, com especial relevância na cumeeira, no sentido da asna 11 para a asna 1. Para além da falta de contraventamento no plano da cobertura, este movimento deve-se à configuração estrutural da cobertura, com 3 águas e com rincões de vãos de 10m que transmitem cargas horizontais à cumeeira; desta forma, dá-se um movimento global da cobertura, nomeadamente da sua parte superior (Figura 4.20a). Para além deste movimento, verificou-se que as zonas de apoio apresentam também deformações acentuadas, nomeadamente de rotação (Figura 4.20b).





(a) Deformação da zona superior da cobertura na zona da asna 11



(b) Deformação/rotação do apoio e deformação do tirante na mesma asna.



c) Deformação da madre entre asna A3 e A4



d) Deformação da perna da asna A11

Figura 4.20 – Deformações na cobertura do armazém K.

#### 4.3.2.2 Danos observados em elementos estruturais de alvenaria

Os elementos de alvenaria que suportam a estrutura da cobertura não apresentam danos significativos, apresentando-se, de uma forma geral, em bom estado, sem deformações ou aberturas de junta.

Foram apenas detetadas zonas com elevado teor em água e forte presença de fungos (Figura 4.21), devido à deficiente impermeabilização da cobertura na empena A. Este problema de impermeabilização é agravado pela ruína do edifício vizinho adjacente à parede de empena A que faz com que esta esteja exposta aos agentes atmosféricos.



Figura 4.21 – Danos em parede de alvenaria: Presença de humidade na parede da empena A.

A presença de humidade e fungos na parede de empena A não representa, por si só, um problema estrutural no que diz respeito à alvenaria de pedra. No entanto, e tal como foi anteriormente descrito, esta humidade tem consequências importantes e com alguma gravidade para as peças de madeira que têm apoio nesta zona.

Relativamente à parede de alvenaria da empena B, não foram identificados danos significativos.

#### **4.3.2.3 Danos observados em elementos metálicos**

Os elementos metálicos presentes no armazém estão, de uma forma geral, em bom estado de conservação, apresentando apenas alguns sinais de corrosão nos elementos de ligação das asnas.

É de salientar a deformação do pórtico metálico para fora do seu plano, presumivelmente devido a impulsos horizontais das linhas das asnas que apoiam no pórtico (Figura 4.22a).

O tirante da linha principal na asna A11 apresenta uma curvatura provocada presumivelmente por algum incidente (Figura 4.22b).

No anexo II são apresentadas as peças desenhadas do mapeamento de danos da cobertura K.



(a) Deformação do pórtico metálico para fora do plano



(b) Corrosão e curvatura da linha principal da asna A11

Figura 4.22 – Danos em elementos metálicos.

### 4.3.3 Avaliação de segurança estrutural

#### 4.3.3.1 Classificação mecânica dos materiais

Assim como na cobertura F, numa primeira fase do diagnóstico da cobertura, foi realizada a classificação dos materiais existentes, através das informações obtidas nas campanhas de inspeção, nos ensaios realizados in-situ, documentos normativos e publicações sobre ensaios em elementos estruturais equivalentes aos existentes no caso em estudo.

Os ensaios e a inspeção visual realizada permitiram concluir que a madeira encontrada nos elementos estruturais da cobertura é do tipo resinosa. A densidade é um parâmetro correlacionável com a resistência da madeira, se não existirem defeitos ou danos relevantes. No caso da cobertura em análise, foi considerada a classe resistente C18 para a verificação de segurança.

Na tabela seguinte são apresentadas as propriedades mecânicas de cálculo obtidas através da expressão (3.1), considerando a classe de serviço 2.

Tabela 4.8 – Propriedades mecânicas de cálculo das madeiras existentes.

Classe Resistente	Cargas	$k_{mod}$	$f_{m,d}$ (MPa)	$f_{t,o,d}$ (MPa)	$f_{c,0,d}$ (MPa)	$f_{c,90,d}$ (MPa)	$f_{v,d}$ (MPa)
C18	Permanentes	0,6	8,31	5,08	8,31	0,23	0,92
	Média duração (sobrecarga)	0,8	11,1	6,77	11,1	0,31	1,23

Relativamente à caracterização mecânica das paredes, apesar da resistência à compressão dos blocos de granito apresentar valores frequentemente superiores a 20MPa, a alvenaria constituída por estes elementos apresenta características mecânicas bastante inferiores, nomeadamente resistências à compressão médias de 2,5MPa e módulos de deformabilidade vertical entre 0,3 e 0,5GPa, conforme valores obtidos em ensaios experimentais realizados na FEUP, (Almeida, et al., 2011).

#### 4.3.3.2 Quantificação de ações

O seguinte quadro resume as ações permanentes consideradas, determinadas através das características dos materiais.

Tabela 4.9 - Ações permanentes (Gk) consideradas.

<b>Pesos Próprios (PP)</b>	
Peso específico do aço em elementos metálicos	77,00kN/m <sup>3</sup>
Peso específico da alvenaria de pedra	22,00kN/m <sup>3</sup>
Peso específico de madeira maciça resinosa (C18)	3,80kN/m <sup>3</sup>
<b>Restantes cargas permanentes (RCP)</b>	
Peso dos materiais de revestimento (telhas, ripas, varas e guarda-pó) da cobertura	0,80kN/m <sup>2</sup>

O valor relativo adoptado para sobrecarga é correspondente a coberturas ordinárias (0.3 KN/m<sup>2</sup>).

A pressão do vento foi determinada supondo que o edifício se encontra localizados na zona B com uma rugosidade aerodinâmica do tipo I. Os valores reduzidos a considerar para a ação do vento deverão ser determinados através dos seguintes coeficientes ( $\psi_0=0,4$ ;  $\psi_1=0,2$ ;  $\psi_2=0$ ), (R.S.A., 1983). O valor característico da pressão do vento máximo usado na análise da cobertura em estudo foi 0.59 KN/m<sup>2</sup>.

#### 4.3.3.3 Análise das paredes de alvenaria

O valor das cargas verticais atuantes nas paredes de alvenaria de pedra foi avaliado numa secção tipo representativa da possível condição mais desfavorável de carga, neste caso na base, junto às fundações. Em particular, as cargas transmitidas pela cobertura e pelas paredes de alvenaria de pedra do edifício às fundações correspondem, em ELU, a valores estimados de tensão média inferiores a 1,0MPa, ou seja, inferiores à resistência de compressão expectável para este tipo de paredes, tal como já se referiu em capítulos anteriores. Não se prevê, por isso, que possam ocorrer danos de compressão nas paredes resultantes das cargas verticais. No entanto, não deverá ser descurada a segurança do edifício às ações horizontais. Em particular, deverá providenciar-se uma ligação eficaz entre os diferentes elementos estruturais da cobertura às paredes de alvenaria do edifício.

#### 4.3.3.4 Análise das asnas de cobertura

As verificações de segurança estrutural realizadas aos elementos da cobertura K, tanto em termos de resistência (Estados Limites Últimos – ELU) como em termos de deformação (Estados Limites de Serviço – ELS) apresentadas nesta secção, procuraram avaliar a adequabilidade da estrutura para as cargas atuantes.

A verificação de segurança, apresentada nos pontos seguintes, foi feita para os elementos estruturais mais solicitados pelas ações verticais, ilustrando-se alguns dos modelos numéricos de cálculo planos utilizados, nomeadamente para o cálculo estrutural dos esforços instalados nas asnas de cobertura.

Na Tabela 4.10 apresenta-se o resumo dos rácios para os elementos de madeira das asnas da cobertura mais solicitadas, por tipo de asna para o ELU e ELS. Através de um sistema de cores (**vermelho** - rácio entre esforços atuantes e resistentes superior a 1; **verde** - rácio entre esforços atuantes e resistentes inferior a 1), na Figura 4.23, é possível verificar para ELU, de forma intuitiva, o seguinte:

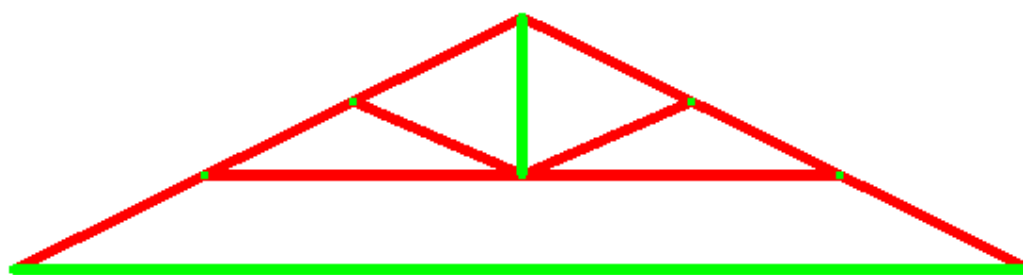
##### Asnas A2 a A7

- A linha superior, pernas e escoras não verificam as condições regulamentares de segurança aos ELU.
- O pendural e a linha principal (tirante metálico) verificam as condições regulamentares de segurança.

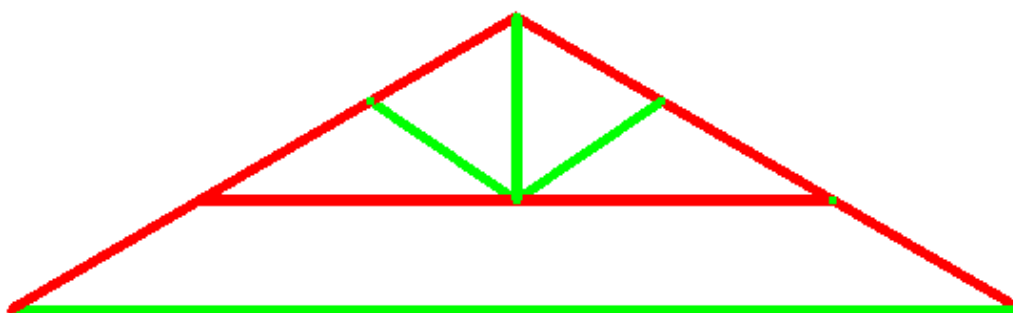
##### Asnas A8 a A11

- As pernas e linha superior não verificam as condições regulamentares de segurança aos ELU.

- As escoras, pendural e linha principal (tirante metálico) verificam as condições regulamentares de segurança.



(a) Asna A2 – verificação de segurança ELU



(b) Asna A11 – verificação de segurança ELU

Figura 4.23 - Modelo numérico das asnas de cobertura da cobertura.

Tabela 4.10 - Rácios dos elementos de madeira das asnas para ELU e ELS.

Tipo de Asna	Elemento	Rácio ELU		Rácio ELS	
Asnas A2 a A7	Linha principal (tirante)	0.32	OK	0.00	OK
	Linha superior	3.28	KO	0.01	OK
	Escoras	1.37	KO	0.03	OK
	Pendural	0.08	OK	0.00	OK
	Pernas	2.60	KO	0.24	OK
Asnas A8 a A11	Linha principal (tirante)	0.33	OK	0.00	OK
	Linha superior	1.87	KO	0.01	OK
	Escoras	0.67	OK	0.01	OK
	Pendural	0.08	OK	0.00	OK
	Pernas	1.62	KO	0.16	OK

#### 4.3.3.5 Análise dos restantes elementos da cobertura

Os restantes elementos estruturais analisados foram as madres, cumeeiras e rincões em Estados limites últimos (ELU) e Estados limites de serviço (ELS).

A Tabela 4.11 e Tabela 4.12 apresenta os rácios resultantes da avaliação ao Estado Limite Último (ELU), tendo em conta os esforços a que estão sujeitas: flexão simples e (ou) flexão desviada, esforço transversal, compressão perpendicular ao fio e bambeamento. Apenas a cumeeira apresenta rácios inferiores a 1, pelo facto de possuir apoios intermédios.

Tabela 4.11 - Rácios de segurança das madres e cumeeiras existentes na cobertura para o ELU.

Elemento		Características geométricas			Carregamento			Características material			Flexão simples	Bambeamento	Corte	Compressão $\perp$ fibras	Flexão desviada
		b(m)	h(m)	Vão (m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	L inflectua (m)	Maciça	Classe de serviço	Duração da acção	Rácio	Rácio	Rácio	Rácio	Rácio
NCR EP CONSULTORIA EM REABILITAÇÃO DO EDIFÍCIO E PATRIMÓNIO	Madre Cota superior	0,07	0,22	3,90	0,80	0,3	2,74	C18	2	Média	KO	KO	OK	OK	2,37
	Madre Cota inferior	0,07	0,22	3,90	0,80	0,3	2,79	C18	2	Média	KO	KO	OK	OK	2,41
	Cumeeira	0,07	0,22	1,95	0,80	0,3	2,76	C18	2	Média	OK	OK	OK	OK	0,23
Madre Cota superior	0,07	0,22	3,90	0,80	0,3	2,28	C18	2	Média	KO	KO	OK	OK	2,12	
Madre Cota inferior	0,07	0,22	3,90	0,80	0,3	2,48	C18	2	Média	KO	KO	OK	OK	2,30	
Cumeeira	0,07	0,22	1,95	0,80	0,3	2,17	C18	2	Média	OK	OK	OK	OK	0,18	

Tabela 4.12 - Rácios de segurança dos rincões existentes na cobertura para o ELU.

Elemento		Características e propriedades das vigas				Flexão simples	Bambeamento	Compressão	Flexão Composta	Esmagamento do apoio			
		Maciça	b ou $\phi$ (mm)	h (mm)	Vão (m)	M <sub>sdy</sub> (kN m)	Rácio	Rácio	N <sub>sdl</sub> (kN)	Rácio (N+T/C)	Rácio (N+T/C), com bambeamento	Rácio	
NCR EP CONSULTORIA EM REABILITAÇÃO DO EDIFÍCIO E PATRIMÓNIO	Cob.F Rincão	C18	80	220	10	41,5	5,80	7,73	7,2	4,83	10,63	12,56	1,53

A verificação ao estado limite de deformação, apresentada na Tabela 4.13 e Tabela 4.14 permitiu concluir que as madres e rincões não cumprem os limites regulamentares de estado limite de deformação. As cumeeiras cumprem devido ao escoramento existente ligado ao pendural das asnas, que reduz o vão das cumeeiras para metade do seu comprimento total.

Tabela 4.13 - Rácios de serviço das madres e cumeeiras existentes na cobertura.

Elemento		Características geométricas			Carregamento			Características material			Deformação ZZ (Ped,zz para ly)			Deformação YY (Ped,yy para lz)				
		b(m)	h(m)	Vão (m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	L influencia (m)	Maciça	Classe de serviço	Duração da ação	u <sub>inst</sub> ,total (mm)	u <sub>fin</sub> ,total (mm)	u <sub>inst</sub> ,total (mm)	u <sub>fin</sub> ,total (mm)	u <sub>inst</sub> ,total (mm)	u <sub>fin</sub> ,total (mm)		
Madre	Cota superior	0,07	0,22	3,90	0,80	0,3	2,74	C18	2	Média	15,6	KO	25,4	KO	72,8	KO	118,6	KO
Madre	Cota inferior	0,07	0,22	3,90	0,80	0,3	2,79	C18	2	Média	15,8	KO	25,8	KO	74,1	KO	120,7	KO
Cumeeira		0,07	0,22	1,95	0,80	0,3	2,76	C18	2	Média	1,2	OK	2,0	OK	0,0	OK	0,0	OK
Madre	Cota superior	0,07	0,22	3,90	0,80	0,3	2,28	C18	2	Média	12,6	OK	20,5	KO	68,6	KO	111,8	KO
Madre	Cota inferior	0,07	0,22	3,90	0,80	0,3	2,48	C18	2	Média	13,6	KO	22,2	KO	74,5	KO	121,4	KO
Cumeeira		0,07	0,22	1,95	0,80	0,3	2,17	C18	2	Média	1,0	OK	1,6	OK	0,0	OK	0,0	OK

Tabela 4.14 - Rácios de serviço dos rincões existentes na cobertura.

Elemento		Características e propriedades das vigas				Deformação							
		Maciça	b ou ø (mm)	h (mm)	Vão (m)	u <sub>inst</sub> ,G (mm)	u <sub>inst</sub> ,Q (mm)	u <sub>inst</sub> ,total (mm)	1º Critério u <sub>inst</sub> El/300	u <sub>fin</sub> ,G (mm)	u <sub>fin</sub> ,Q (mm)	u <sub>fin</sub> ,total (mm)	2º Critério u <sub>fin</sub> El/250
Cob.F	Rincão	C18	80	220	10	360,4	129,9	490,4	33,3	648,8	150,7	799,5	40,0

#### 4.3.4 Sugestão de medidas de intervenção

A análise efetuada nos capítulos anteriores permitiu avaliar o mau estado de conservação estrutural do armazém, tendo sido identificados alguns danos estruturais com bastante gravidade, nomeadamente nos elementos de madeira da cobertura junto da empena A. Em contrapartida, as paredes e os arcos de alvenaria encontram-se em bom estado de conservação, apresentando apenas problemas relacionados com a presença de humidade.

A verificação de segurança estrutural da estrutura para cargas verticais deu indicações importantes em relação ao sub-dimensionamento das asnas, permitindo verificar rácios de estado limite último elevados em todas as asnas da cobertura, mas principalmente em relação às asnas que vencem maiores vãos (cerca de 15m).



#### **4.3.4.1 Intervenção nos elementos estruturais de alvenaria de pedra**

As paredes e os arcos de alvenaria de pedra do armazém K não apresentam danos relevantes, não se considerando necessário proceder à sua reabilitação e/ou reforço estrutural. Apenas será necessário realizar ações de limpeza e remoção dos focos de humidade presentes. No caso da empena A, e dado o elevado teor de humidade verificado, bem como a forte presença de fungos, o tratamento deverá ser mais cuidado recorrendo a um produto fungicida para finalizar as ações de limpeza desta parede. No entanto, a principal intervenção nesta parede deverá ser realizada pelo exterior, dotando-a de uma impermeabilização eficaz de modo a evitar as entradas de água para o interior.

Na face interior, e de forma a acautelar a correta ventilação e proteção das paredes de alvenaria de pedra, será conveniente não utilizar argamassas de cimento nem revestimentos impermeáveis ao vapor de água, tais como tintas plásticas.

#### **4.3.4.2 Intervenção nos elementos estruturais de madeira**

O estado de conservação precário de grande parte dos elementos de madeira da cobertura, aliado às elevadas deformações registadas e ao seu sub-dimensionamento, aferido nas análises numéricas efetuadas, apontam para a necessidade de soluções de intervenção que terão necessariamente um grau de intrusividade muito elevado.

A cobertura apresenta muito mau estado de conservação material, possuindo ataques de térmitas severos junto da empena A. A cobertura apresenta também, à semelhança das restantes, ataques de caruncho e fungos.

A estrutura da cobertura K apresenta vãos significativamente superiores aos das coberturas dos restantes armazéns (cerca de 15m), mantendo ainda assim esquemas estruturais e secções das peças de madeira idênticos às restantes coberturas. No caso desta cobertura é notório o facto das peças serem demasiado esbeltas para as solicitações a que estas estão sujeitas. Um exemplo dessas peças é o caso dos rincões, que vencem vãos na ordem dos dez metros sem nenhum apoio intermédio e com secções de aproximadamente  $8 \times 22 \text{cm}^2$ .

Os danos nos apoios da empena A são de elevada gravidade sendo que, apesar das intervenções de reforço destes elementos realizadas ao longo do tempo, a degradação progrediu e, em vários casos, os reforços já não são eficazes.

Tendo em conta o exposto anteriormente, a cobertura necessitará da substituição integral de toda a estrutura, sendo que deverá ser desenvolvida uma solução que colmate as deficiências estruturais anteriormente expostas. Para além desta intervenção mais definitiva, e tendo em conta a ocupação do armazém em estudo, será aconselhável proceder ao escoramento dos apoios das asnas junto à empena

A, onde a estrutura se encontra mais degradada. Este escoramento deverá ser mantido enquanto a intervenção de substituição da cobertura não for realizada.

#### **4.3.4.3 Intervenção nos elementos estruturais metálicos**

Os elementos estruturais metálicos da cobertura, mais propriamente o pórtico metálico presente na empena B, não apresenta degradação material significativa. Assim, estes elementos (pilares e vigas) deverão ser alvo de uma pintura com proteção anticorrosiva de modo a aumentar a sua longevidade. No que diz respeito às deformações para fora do plano do pórtico, deverão ser contidas através da ligação mais eficaz entre as novas asnas e a viga do pórtico.

## 4.4 COBERTURA O

A descrição da análise do caso de estudo cobertura O é baseada essencialmente no relatório de inspeção e diagnóstico da cobertura, (NCREP, 2016e), peças desenhadas e elementos fornecidos pelo dono de obra.

### 4.4.1 Caracterização construtiva e estrutural do edifício

A cobertura do armazém objeto de estudo (Figura 4.24) apresenta uma área de implantação de aproximadamente 740 m<sup>2</sup>. Construtivamente, a cobertura em estudo é composta por uma estrutura resistente em madeira, constituída por 16 asnas dispostas paralelamente entre si, apoiadas em paredes resistentes em alvenaria de pedra nas empenas.

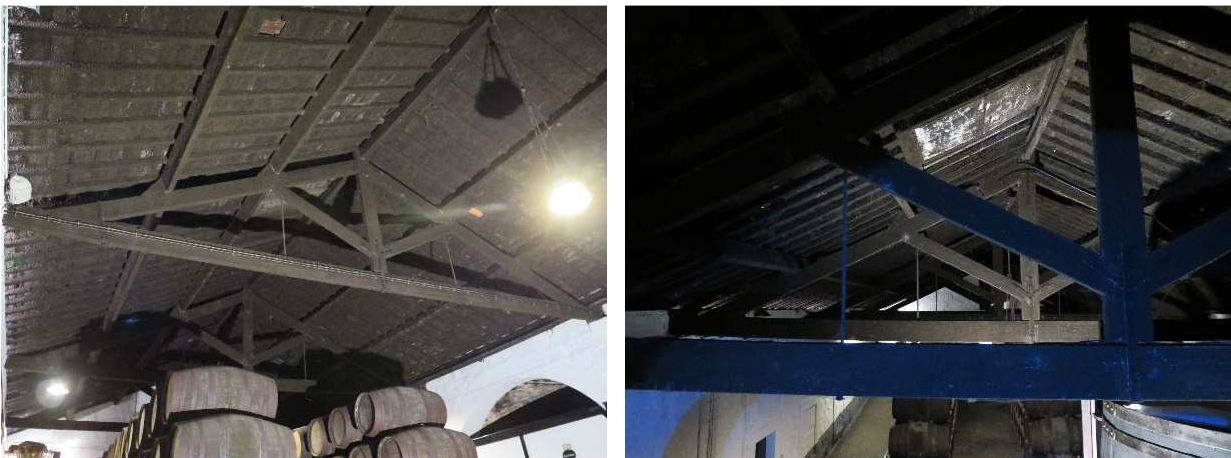


Figura 4.24 - Cobertura em estudo: Levantamento fotográfico.

A Figura 4.25 identifica os alinhamentos das asnas, madres, cumeeiras, rincões e a localização das paredes de empena A e B do armazém O.

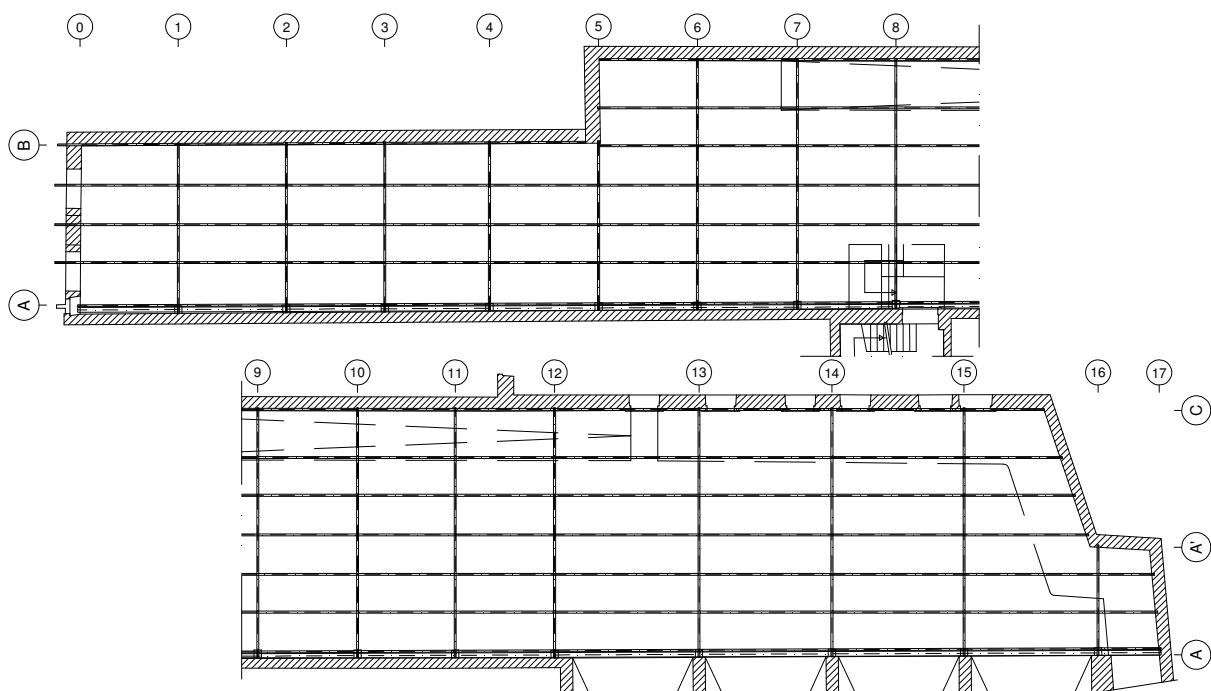
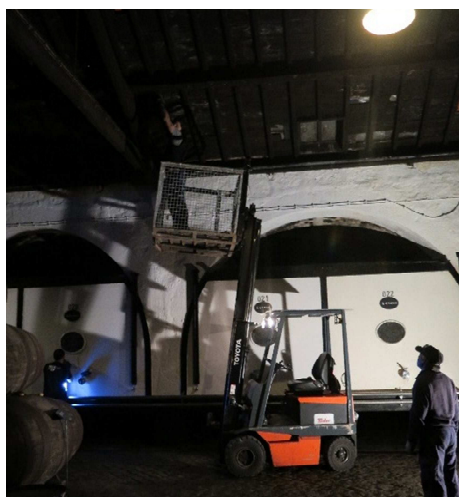


Figura 4.25 – Planta estrutural da cobertura O.

#### 4.4.2 Paredes de alvenaria

A estrutura resistente vertical das duas empenas da cobertura O é constituída, na generalidade, por paredes de alvenaria de pedra (granito) com 4 arcos de volta perfeita na parede de empena A (Figura 4.26a). Como nos restantes armazéns, trata-se de uma alvenaria de granito com características geométricas e construtivas típicas das alvenarias utilizadas nas construções do grande Porto.

As paredes são em alvenaria de folha dupla com uma espessura entre 0,40 e 0,60m constante em altura. O apoio das asnas de cobertura é efetuado, na generalidade, em cachorros de pedra na empena A (Sul); na empena B (Norte) as asnas apoiam diretamente na parede de alvenaria.



(a) Parede de empena A



(b) Cachorro de pedra para apoio das asnas na parede

Figura 4.26 - Paredes de alvenaria pedra do armazém O.

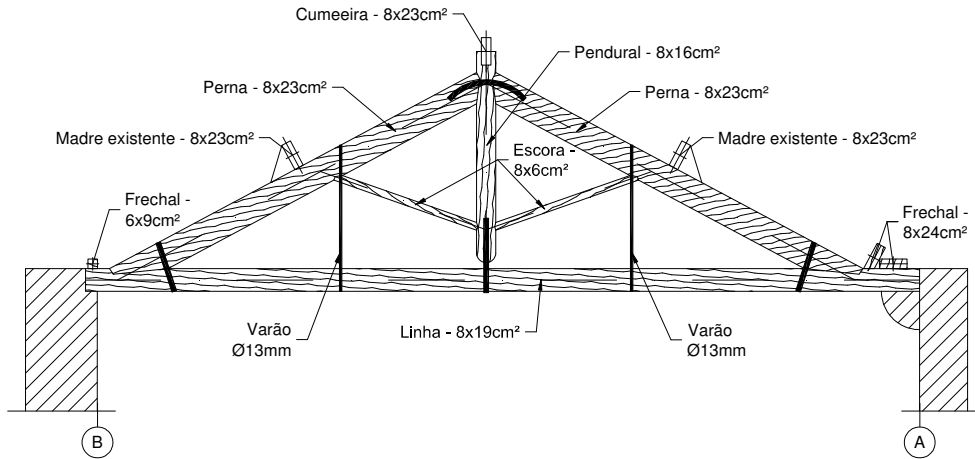
#### 4.4.3 Cobertura em madeira

A estrutura em madeira da cobertura é constituída por um conjunto de 16 asnas sobre as quais apoiam os elementos secundários: madres e cumeeiras. Sobre os elementos secundários apoiam as varas de madeira, com secção transversal média de aproximadamente  $6 \times 9 \text{cm}^2$  espaçadas entre 0,35 a 0,40m, que recebem uma camada de guarda-pó. O apoio das varas na parede de alvenaria é realizado sobre um frechal de madeira de secção transversal  $6 \times 9 \text{cm}^2$  na empena A e  $8 \times 23 \text{cm}^2$  na empena B.

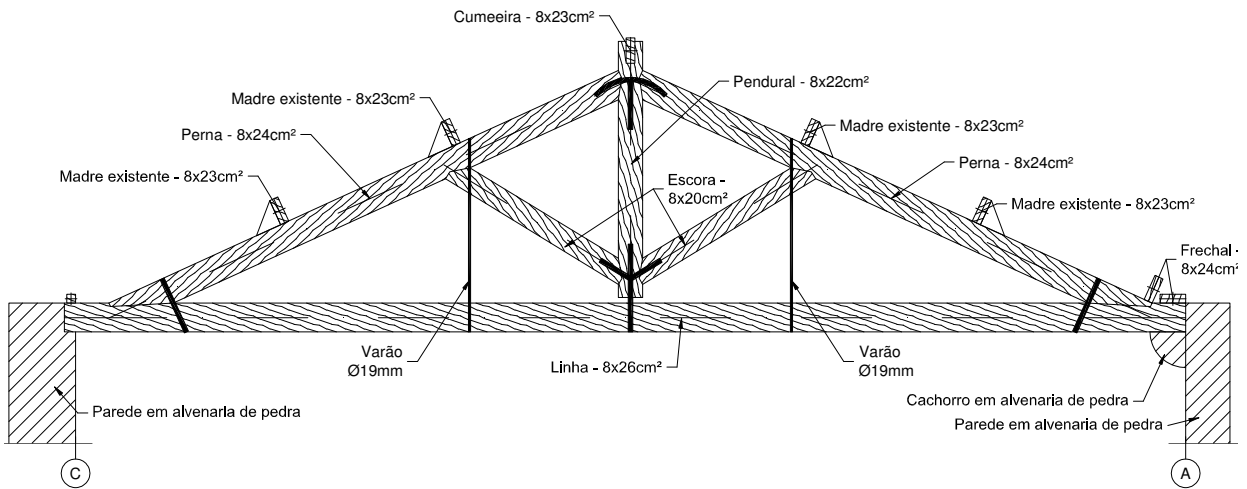
As asnas do tipo 1 (Figura 4.27a) têm espaçamento médio de 4,2m, vencem vãos de aproximadamente 6,60m e têm uma altura de 2,10m. As asnas do tipo 2 (Figura 4.27b) possuem espaçamentos entre 4,00m e 5,90m, vencem vãos de aproximadamente 10,00m e têm uma altura de 2,60m. A transição entre as asnas do tipo 1 (menor vão) e asnas do tipo 2 (maior vão) é materializada pela asna tipo 4 (Figura 4.27d).

Relativamente às secções transversais dos elementos das asnas, as asnas do tipo 1 possuem secções entre  $8 \times 6 \text{cm}^2$  e  $8 \times 23 \text{cm}^2$  e tirantes metálicos com diâmetro de 13mm. As asnas do tipo 2 possuem secções entre  $8 \times 20 \text{cm}^2$  e  $8 \times 26 \text{cm}^2$  e tirantes metálicos com diâmetro de 19mm.

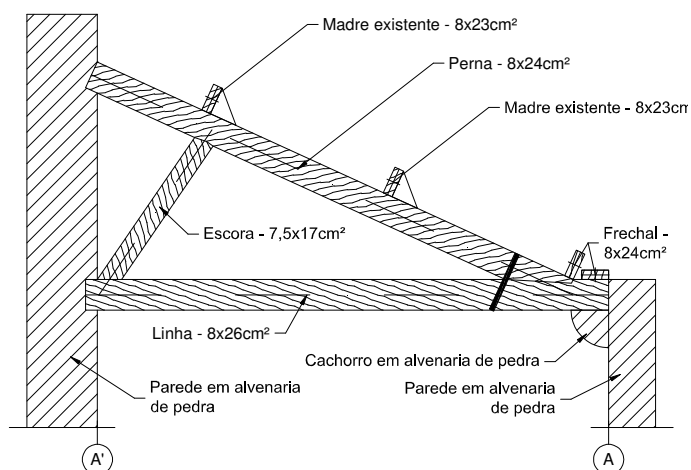
As ligações entre os elementos das asnas são efetuadas com recurso a ligadores metálicos e entalhes, com exceção da ligação entre as escoras e as pernas, materializada apenas por entalhes (Figura 4.28).



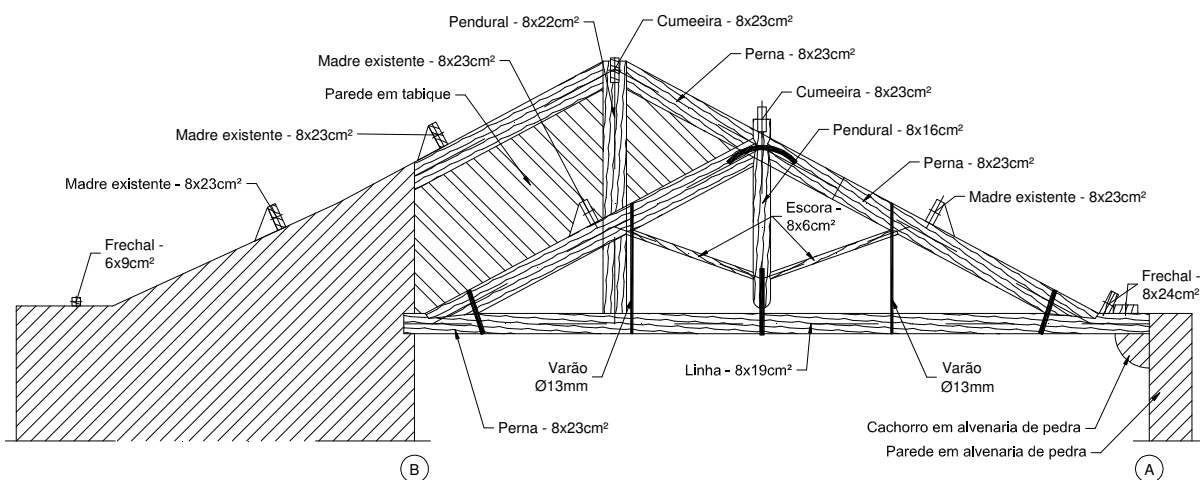
(a) Alçado das asnas existentes do tipo 1



(b) Alçado da asna existente do tipo 2



(c) Alçado da asna existente do tipo 3



(d) Alçado da asna existente do tipo 4

Figura 4.27 – Alçados das asnas tipo da cobertura O (sem escala).

As madres e cumeeira, com secção retangular de  $8 \times 23 \text{cm}^2$ , encontram-se apoiadas entre asnas. Em termos gerais, a cobertura é constituída por vigas em secção retangular de madeira do tipo resinosa (presumivelmente pinho nacional ou nórdico, *Pinus Pinaster* ou *Pinus Sylvestris*), com secção transversal que varia entre  $8 \times 6 \text{cm}^2$  e  $8 \times 26 \text{cm}^2$ .

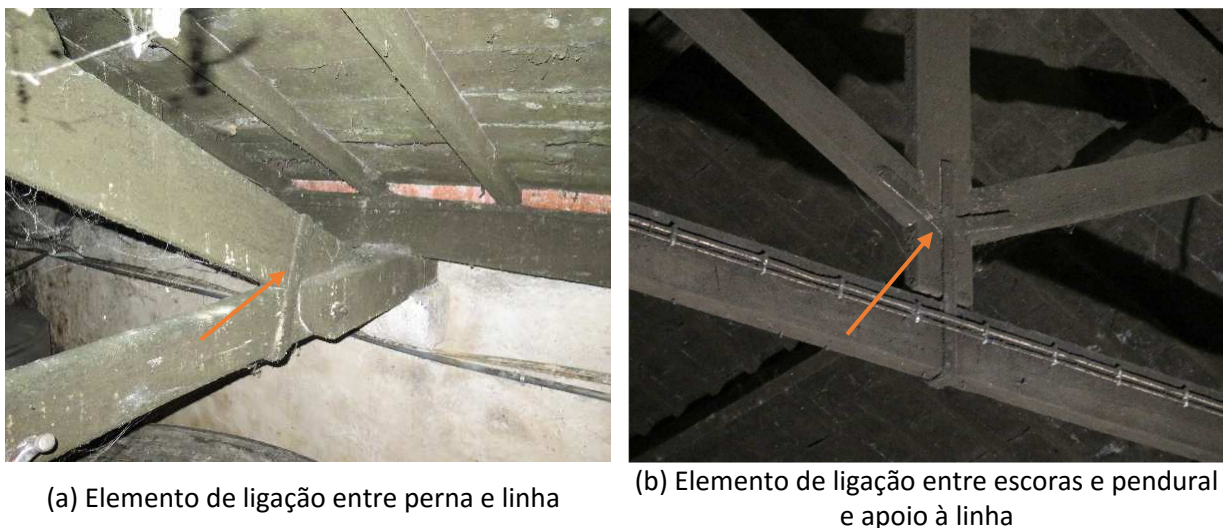


Figura 4.28 - Elementos metálicos de ligação entre elementos

No anexo III são apresentadas as peças desenhadas do levantamento estrutural da cobertura O.

#### 4.4.4 Danos estruturais

De uma forma geral e à semelhança das restantes coberturas em análise, foram identificados diversos pontos de entrada de água e, conseqüentemente, focos de humidade com alguma intensidade, quer em elementos estruturais, quer em elementos secundários, como as varas ou o guarda-pó. Estas entradas de água situam-se maioritariamente na empena A, situação que encontra alguma correspondência com os ataques bióticos identificados, como se verá adiante. Além de favorecer a degradação dos elementos de revestimento do edifício, a entrada de água cria condições para o ataque de agentes bióticos nos elementos de madeira. No presente capítulo são apresentados e descritos os principais danos encontrados no armazém O.

##### 4.4.4.1 Danos observados em elementos estruturais de madeira

O dano mais presente na cobertura O são os ataques de agentes bióticos que causam a degradação das peças de madeira e a conseqüente perda de resistência mecânica.

Na Figura 4.29, são identificados exemplos de ataques de agentes bióticos identificados na estrutura da cobertura como caruncho e fungos. Os ataques de caruncho estão presentes ao longo de toda a estrutura, provocando a degradação superficial dos elementos de madeira. Os ataques de fungos estão presentes essencialmente junto a pontos de entrada de água, onde se criam as condições necessárias para o seu desenvolvimento.

Em algumas zonas mais pontuais foram identificados indícios da presença de térmitas na estrutura, nomeadamente alguns caminhos nas paredes.

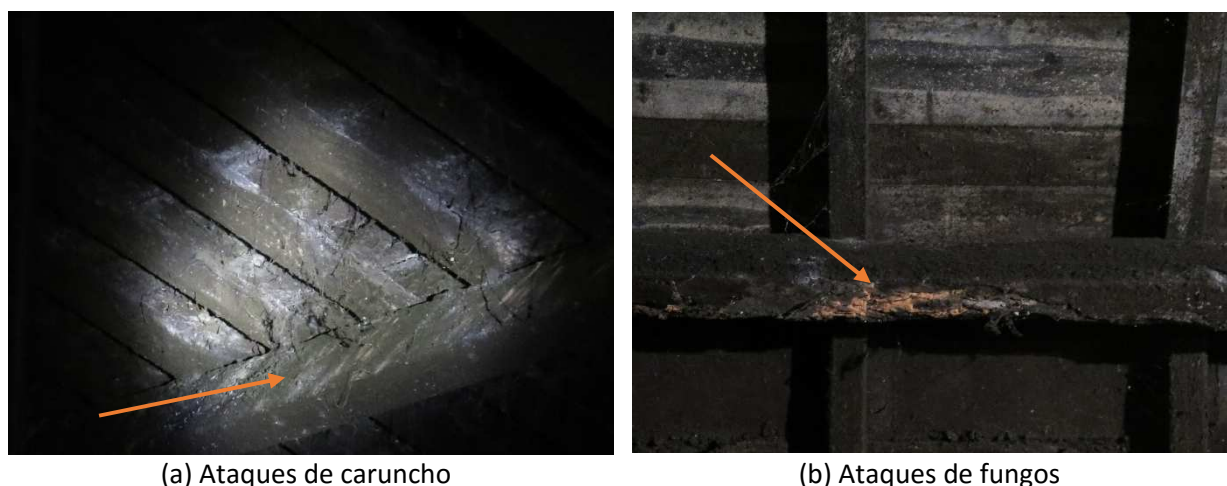


Figura 4.29 – Exemplos de ataque de agentes bióticos em elementos estruturais da cobertura O.

Os apoios das asnas na empena A encontram-se, na sua maioria, reforçados por empalmes em chapa metálica, com espessura reduzida (2mm), e empalmes com elementos de madeira. Estes dados indiciam a existência de pontos de degradação já intervencionados anteriormente. Em alguns desses casos, os ensaios realizados com o Resistógrafo confirmaram a existência de degradações materiais nas secções originais.

Assim como nas restantes coberturas, a campanha de ensaios não destrutivos permitiu validar a inspeção visual. Na Figura 4.30 é verificada, através de ensaios de resistógrafo, a profundidade de degradação superficial de uma peça de madeira em mau estado de conservação material.

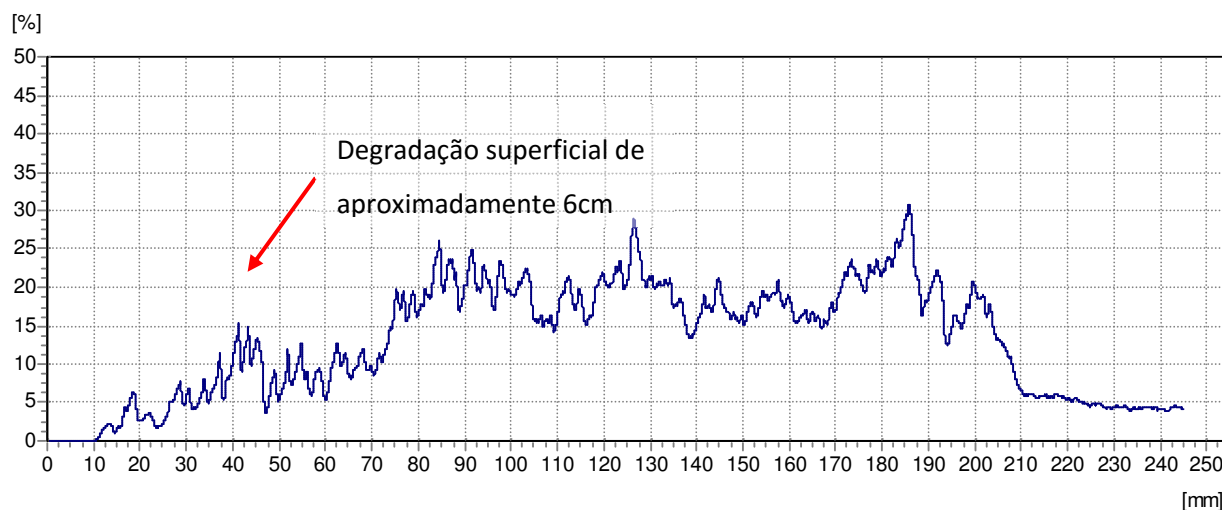


Figura 4.30 – Exemplo de perfil de resistógrafo da cobertura O.



#### 4.4.4.2 Danos observados em elementos estruturais de alvenaria e elementos metálicos

À semelhança dos restantes armazéns, os elementos de alvenaria que suportam a estrutura da cobertura não apresentam danos significativos, apresentando-se, de uma forma geral, em bom estado, sem deformações ou aberturas de junta. Foram apenas detetadas zonas com elevada humidade, devido à deficiente impermeabilização da cobertura junto à empena A. Relativamente à parede de alvenaria da empena B, não foram identificados danos significativos.

No que diz respeito aos elementos de ligação entre elementos das asnas, estes apenas apresentam alguma corrosão superficial.

No anexo III são apresentadas as peças desenhadas do mapeamento de danos da cobertura O.

#### 4.4.5 Avaliação de segurança estrutural

##### 4.4.5.1 Classificação mecânica dos materiais

Durante a fase de diagnóstico é realizada a classificação dos materiais existentes, através das informações obtidas nas campanhas de inspeção, nos ensaios realizados in-situ, documentos normativos e publicações sobre ensaios em elementos estruturais equivalentes aos existentes no caso em estudo.

Os ensaios e a inspeção visual realizados permitiram concluir que a madeira encontrada nos elementos estruturais da cobertura é do tipo resinosa. A densidade é um parâmetro correlacionável com a resistência da madeira, se não existirem defeitos ou danos relevantes. No caso da cobertura em análise, foi considerada a classe resistente C18 para a verificação de segurança.

Na seguinte tabela são apresentadas as propriedades mecânicas de cálculo obtidas através da expressão (3.1), considerando a classe de serviço 2.

Tabela 4.15 – Propriedades mecânicas de cálculo das madeiras existentes.

Classe Resistente	Cargas	$k_{mod}$	$f_{m,d}$ (MPa)	$f_{t,o,d}$ (MPa)	$f_{c,0,d}$ (MPa)	$f_{c,90,d}$ (MPa)	$f_{v,d}$ (MPa)
<b>C18</b>	Permanentes	0,6	8,31	5,08	8,31	0,23	0,92
	Média duração (sobrecarga)	0,8	11,1	6,77	11,1	0,31	1,23

Relativamente à caracterização mecânica das paredes, apesar da resistência dos blocos de granito apresentarem resistência à compressão de valores frequentemente superiores a 20MPa, a alvenaria

constituída por estes elementos apresenta características mecânicas bastante inferiores, nomeadamente resistências à compressão médias de 2,5MPa e módulos de deformabilidade vertical entre 0,3 e 0,5GPa, conforme valores obtidos em ensaios experimentais realizados na FEUP, (Almeida, et al., 2011).

#### 4.4.5.2 Quantificação de ações

O seguinte quadro resume as ações permanentes consideradas, determinadas através das características dos materiais.

Tabela 4.16 - Ações permanentes (Gk) consideradas.

<b>Pesos Próprios (PP)</b>	
Peso específico do aço em elementos metálicos	77,00kN/m <sup>3</sup>
Peso específico da alvenaria de pedra	22,00kN/m <sup>3</sup>
Peso específico de madeira maciça resinosa (C18)	3,80kN/m <sup>3</sup>
<b>Restantes cargas permanentes (RCP)</b>	
Peso dos materiais de revestimento (telhas, ripas, varas e guarda-pó) da cobertura	0,80kN/m <sup>2</sup>

O valor relativo a sobrecarga adotado, é referente à sobrecarga correspondente a coberturas ordinárias (0.3 KN/m<sup>2</sup>).

A pressão do vento foi determinada supondo que o edifício se encontra localizados na zona B com uma rugosidade aerodinâmica do tipo I. Os valores reduzidos a considerar para a ação do vento deverão ser determinados através dos seguintes coeficientes ( $\psi_0=0,4$ ;  $\psi_1=0,2$ ;  $\psi_2=0$ ),(R.S.A., 1983). O valor característico da pressão do vento máximo usado na análise da cobertura em estudo foi 0.59 KN/m<sup>2</sup>.

#### 4.4.5.3 Análise das paredes de alvenaria

O valor das cargas verticais atuantes nas paredes de alvenaria de pedra foi avaliado numa secção tipo representativa da possível condição mais desfavorável de carga, neste caso na base, junto às fundações. Em particular, as cargas transmitidas pela cobertura e pelas paredes de alvenaria de pedra do edifício às fundações correspondem, em ELU, a valores estimados de tensão média inferiores a 1,0MPa, ou seja, inferiores à resistência de compressão expectável para este tipo de paredes, tal como já se referiu em capítulos anteriores. Não se prevê, por isso, que possam ocorrer danos de compressão nas paredes resultantes das cargas verticais. No entanto, não deverá ser descurada a segurança do edifício às ações horizontais. Em particular, deverá providenciar-se uma ligação eficaz entre os diferentes elementos estruturais da cobertura às paredes de alvenaria do edifício.

#### 4.4.5.4 Análise das asnas de cobertura

As verificações de segurança estrutural realizadas aos elementos da cobertura O, tanto em termos de resistência (Estados Limites Últimos – ELU) como em termos de deformação (Estados Limites de Serviço – ELS) apresentadas nesta secção, procuraram avaliar a adequabilidade da estrutura para as cargas atuantes.

A verificação de segurança, apresentada seguidamente, foi realizada para os elementos estruturais mais solicitados pelas ações verticais, ilustrando-se alguns dos modelos numéricos de cálculo planos utilizados, nomeadamente para o cálculo estrutural dos esforços instalados nas asnas de cobertura. Na Tabela 4.17 apresenta-se o resumo dos rácios em ELU e ELS para os elementos de madeira das asnas da cobertura mais solicitadas. Através de um sistema de cores; **vermelho** - rácio superior a 1; **verde** – rácio inferior a 1. Na Figura 4.31 é possível verificar em relação aos ELU, de forma intuitiva, o seguinte:

##### Asnas A1, A2, A3 e A4

- A linha não verifica as condições regulamentares de segurança aos ELU nas secções próximas dos apoios.
- Os restantes elementos das asnas verificam as condições regulamentares de segurança.

##### Asnas A6, A7, A8, A9, A10 e A11

- A linha não verifica as condições regulamentares de segurança aos ELU nas secções próximas dos apoios.
- As pernas não verificam as condições regulamentares de segurança aos ELU.
- Os restantes elementos das asnas verificam as condições regulamentares de segurança.

##### Asnas A12, A13, A14 e A15

- A linha não verifica as condições regulamentares de segurança aos ELU nas secções próximas dos apoios.
- As pernas não verificam as condições regulamentares de segurança aos ELU.
- Os restantes elementos das asnas verificam as condições regulamentares de segurança.

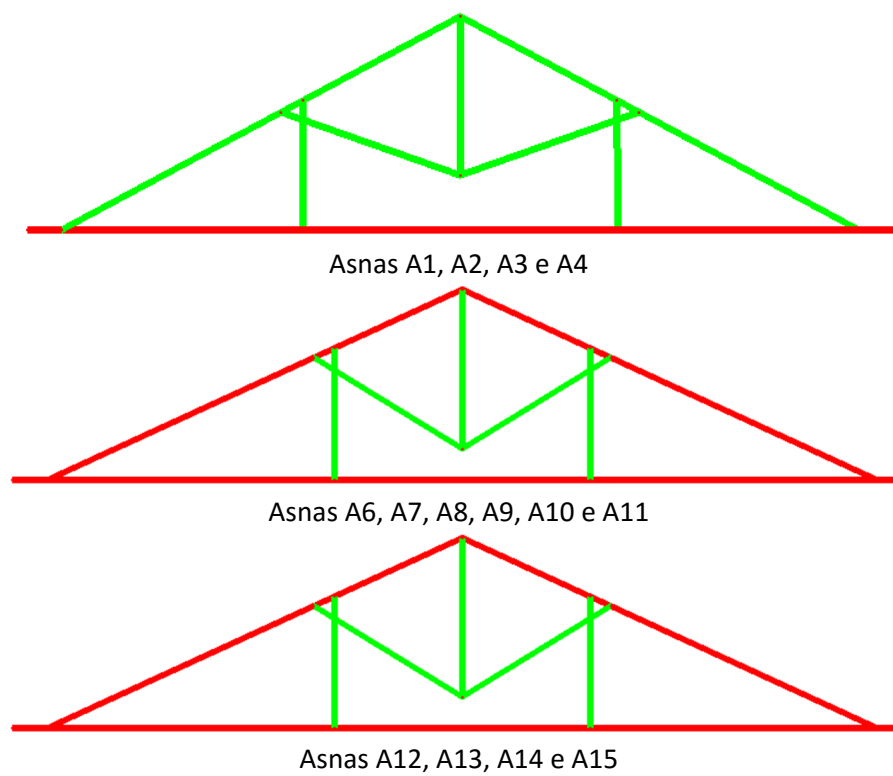


Figura 4.31 - Modelo numérico das asnas de cobertura O.

Tabela 4.17 - Rácios dos elementos de madeira das asnas, por tipo de asna e para ELU e ELS.


Tipo de Asna	Elemento	Rácio ELU		Rácio ELS	
Asnas A1, A2, A3 e A4	Tirantes metálicos	0.11	OK	0.10	OK
	Linha	1.59	KO	0.34	OK
	Escoras	0.84	OK	0.02	OK
	Pendural	0.12	OK	0.00	OK
	Pernas	0.61	OK	0.19	OK
Asnas A6, A7, A8, A9, A10 e A11	Tirantes metálicos	0.06	OK	0.09	OK
	Linha	1.99	KO	0.41	OK
	Escoras	0.40	OK	0.00	OK
	Pendural	0.21	OK	0.00	OK
	Pernas	1.73	KO	0.43	OK
Asnas A12, A13, A14 e A15	Tirantes metálicos	0.08	OK	0.10	OK
	Linha	2.75	KO	0.56	OK
	Escoras	0.55	OK	0.00	OK
	Pendural	0.29	OK	0.00	OK
	Pernas	2.97	KO	0.60	OK

#### 4.4.5.5 Análise dos restantes elementos da cobertura

Nesta secção é apresentada a verificação de segurança estrutural para as madres e cumeeiras que materializam a cobertura, para os Estados Limites Último (ELU) e os Estados Limites de Serviço (ELS).

A Tabela 4.18 apresenta os rácios resultantes da avaliação ao Estado Limite Último (ELU), tendo em conta os esforços a que estão sujeitas: flexão simples e (ou) flexão desviada, esforço transversal, compressão perpendicular ao fio e bambeamento.

Tabela 4.18 - Rácios de segurança das madres e cumeeiras existentes na cobertura para o ELU.

 CONSULTORIA EM REABILITAÇÃO DO EDIFICADO E PATRIMÓNIO Elemento Zona		Características geométricas			Carregamento			Características material			Flexão simples	Bambeamento	Corte	Compressão ⊥ fibras	Flexão desviada
		b(m)	h(m)	Vão (m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	L influencia (m)	Maciça	Classe de serviço	Duração da acção	Rácio	Rácio	Rácio	Rácio	Rácio
Elementos entre as asnas A9 e A10	Madre Cota inferior	0,07	0,24	4,10	0,80	0,3	1,85	C18	2	Média	OK	OK	OK	OK	1,53
		0,08	0,23	4,10	0,80	0,3	1,85	C18	2	Média	OK	OK	OK	OK	1,33
	Madre Cota superior	0,07	0,24	4,10	0,80	0,3	1,77	C18	2	Média	OK	OK	OK	OK	1,46
		0,08	0,23	4,10	0,80	0,3	1,77	C18	2	Média	OK	OK	OK	OK	1,27
	Cumeeira	0,07	0,24	4,10	0,80	0,3	1,83	C18	2	Média	OK	OK	OK	OK	0,57
		0,08	0,23	4,10	0,80	0,3	1,83	C18	2	Média	OK	OK	OK	OK	0,54
Elementos entre as asnas A12 e A13	Madre Cota inferior	0,07	0,24	5,90	0,80	0,3	1,85	C18	2	Média	KO	KO	OK	OK	3,17
		0,08	0,23	5,90	0,80	0,3	1,85	C18	2	Média	KO	KO	OK	OK	2,75
	Madre Cota superior	0,07	0,24	5,90	0,80	0,3	1,77	C18	2	Média	KO	KO	OK	OK	3,03
		0,08	0,23	5,90	0,80	0,3	1,77	C18	2	Média	KO	KO	OK	OK	2,63
	Cumeeira	0,07	0,24	5,90	0,80	0,3	1,83	C18	2	Média	KO	KO	OK	OK	1,18
		0,08	0,23	5,90	0,80	0,3	1,83	C18	2	Média	KO	KO	OK	OK	1,13

A verificação ao estado limite de deformação apresentada na Tabela 4.19, permitiu concluir que as madres e rincões não cumprem os limites regulamentares de estado limite de deformação, sendo que as cumeeiras cumprem devido ao escoramento existente ligado ao pendural das asnas, que reduz o vão das cumeeiras para metade do seu comprimento total.

Tabela 4.19 - Rádios de serviço das madres e cumeeiras existentes na cobertura para o ELS.

Elemento Zona			Características geométricas			Carregamento			Características material			Deformação ZZ (Ped,zz para ly)				Deformação YY (Ped,yy para lz)			
			b(m)	h(m)	Vão (m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	L influéncia (m)	Maíça	Classe de serviço	Duração da acção	u <sub>inst</sub> ,total (mm)	1º Critério u <sub>i,inst</sub> El/300	u <sub>fin</sub> ,total (mm)	2º Critério u <sub>i,fin</sub> El/250	u <sub>inst</sub> ,total (mm)	1º Critério u <sub>i,inst</sub> El/300	u <sub>fin</sub> ,total (mm)	2º Critério u <sub>i,fin</sub> El/250
Elementos entre as asnas A9 e A10	Madre	Cota inferior	0,07	0,24	4,10	0,80	0,3	1,85	C18	2	Média	10,2	OK	16,6	KO	52,1	KO	84,9	KO
			0,08	0,23	4,10	0,80	0,3	1,85	C18	2	Média	10,1	OK	16,5	KO	36,6	KO	59,6	KO
	Madre superior		0,07	0,24	4,10	0,80	0,3	1,77	C18	2	Média	9,8	OK	15,9	OK	49,9	KO	81,4	KO
			0,08	0,23	4,10	0,80	0,3	1,77	C18	2	Média	9,7	OK	15,8	OK	35,0	KO	57,1	KO
Cumeeira		0,07	0,24	4,10	0,80	0,3	1,83	C18	2	Média	11,1	OK	18,1	KO	0,0	OK	0,0	OK	
		0,08	0,23	4,10	0,80	0,3	1,83	C18	2	Média	11,0	OK	17,9	KO	0,0	OK	0,0	OK	
Elementos entre as asnas A12 e A13	Madre inferior		0,07	0,24	5,90	0,80	0,3	1,85	C18	2	Média	42,6	KO	69,4	KO	222,8	KO	363,3	KO
			0,08	0,23	5,90	0,80	0,3	1,85	C18	2	Média	42,3	KO	69,1	KO	156,3	KO	254,9	KO
	Madre superior		0,07	0,24	5,90	0,80	0,3	1,77	C18	2	Média	40,8	KO	66,5	KO	213,4	KO	348,1	KO
			0,08	0,23	5,90	0,80	0,3	1,77	C18	2	Média	40,6	KO	66,2	KO	149,7	KO	244,3	KO
	Cumeeira		0,07	0,24	5,90	0,80	0,3	1,83	C18	2	Média	46,3	KO	75,5	KO	0,0	OK	0,0	OK
			0,08	0,23	5,90	0,80	0,3	1,83	C18	2	Média	46,0	KO	75,1	KO	0,0	OK	0,0	OK

#### 4.4.6 Sugestão de medidas de intervenção

A verificação de segurança da estrutura para cargas verticais deu indicações importantes em relação ao nível de intervenção estrutural necessário nesta cobertura, nomeadamente sobre a necessidade de substituir, reabilitar e/ou reforçar os seus elementos estruturais.

Nas seguintes secções são apresentadas, de forma sumária, as propostas de intervenção resultantes da inspeção e diagnóstico. A elaboração do relatório de inspeção e diagnóstico resultou também na materialização das propostas de intervenção em peças desenhadas. No anexo III são apresentadas as peças desenhadas da proposta de solução de intervenção da cobertura O.

##### 4.4.6.1 Intervenção nos elementos estruturais de alvenaria de pedra

À semelhança dos restantes armazéns, as paredes e os arcos de alvenaria de pedra do armazém não apresentam danos relevantes, não se considerando necessário proceder à sua reabilitação e/ou reforço estrutural.

Apenas será necessário realizar ações de limpeza e remoção dos focos de humidade presentes. De forma a acautelar a correta ventilação e proteção das paredes de alvenaria de pedra, será conveniente não utilizar argamassas de cimento nem revestimentos impermeáveis ao vapor de água, tais como tintas plásticas.

#### 4.4.6.2 Intervenção nos elementos estruturais de madeira

O estado de conservação de grande parte dos elementos de madeira da cobertura, aliado ao subdimensionamento de parte dos elementos, aferido nas análises numéricas efetuadas, apontam para a necessidade de soluções de intervenção medianamente intrusivas.

Tendo em conta o exposto, as ações de reforço estrutural que se consideram mais importantes são as seguintes: a) substituição dos elementos estruturais que se encontram mais danificados; b) reforço dos elementos estruturais das asnas por forma a aumentar a sua capacidade resistente, melhorando o seu comportamento global; c) melhoria da ligação entre os elementos das asnas e entre as asnas e as madres; d) melhoria das condições de apoio das asnas nas paredes e nos arcos, de modo a dotar a cobertura de um comportamento mais uniforme.

Nos pontos seguintes são apresentadas, com maior detalhe, as medidas de reabilitação e (ou) reforço estrutural descritas anteriormente:

##### 1) Reabilitação e reforço das asnas da cobertura

Será necessário proceder ao reforço dos elementos com rácios de sollicitação mais elevados, através da fixação de novos elementos de madeira ou metálicos, com o objetivo de aumentar a sua capacidade resistente e de impedir novos acréscimos de deformação. A ligação adequada entre os elementos de reforço e os elementos originais é essencial para garantir o funcionamento conjunto dos novos elementos reforçados.

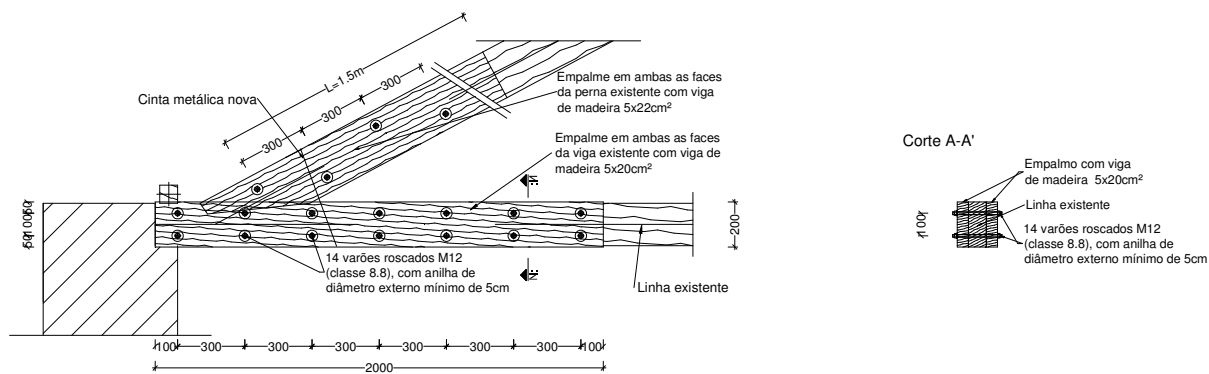


Figura 4.32 – Pormenor de reforço de linha e perna das asnas de Menor vão (sem escala).

Prevê-se ainda a implementação de um conjunto de novas peças nas asnas de maior vão (A6 a A15), formando uma treliça mais densa, de acordo com as peças desenhadas. O principal objetivo desta ação é o de conter os esforços atuantes nas pernas das asnas, conferindo-lhes assim uma maior rigidez e fazendo com que estes elementos verifiquem a segurança estrutural.



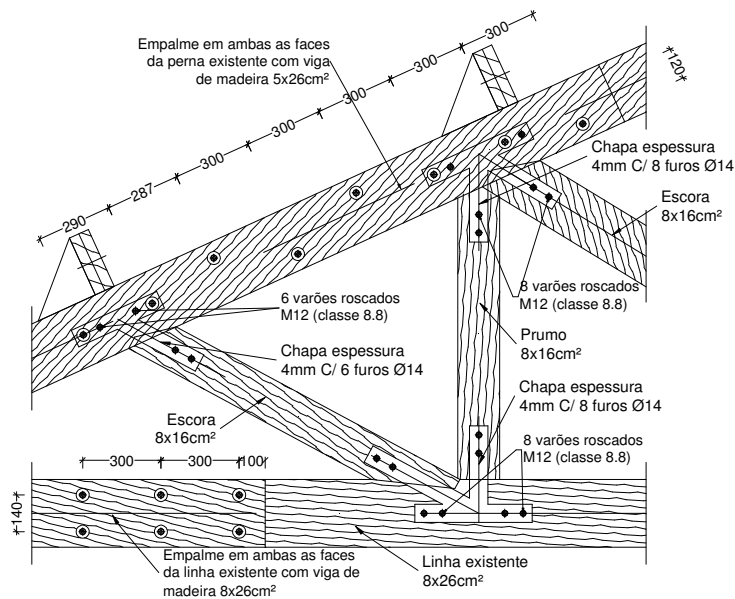


Figura 4.33 – Pormenor tipo de treliçamento das ansas de maior vão (sem escala).

Nos elementos da estrutura existente a manter, será necessário efetuar a sua limpeza e tratamento com um produto contra insetos e fungos xilófagos, e contra insetos sociais (térmitas). Poderá ser utilizado um produto do tipo Sarpgel 100 ou Xylophene S.O.R. 4 no tratamento das madeiras a manter, devendo estas ser injetadas e tratadas superficialmente. A injeção é particularmente importante a zona dos apoios, e não deverá de modo algum ser descuidada.

Os novos elementos de madeira deverão receber um tratamento prévio contra agentes bióticos em autoclave de duplo vácuo, com um produto semelhante ao referido anteriormente.

**2) Introdução de elementos de contraventamento das madres**

Face aos vãos que as madres vencem, será necessário introduzir elementos de contraventamento em madeira entre as madres (ligados de topo). Esta ação visa limitar o risco de encurvadura das madres para fora do seu plano.

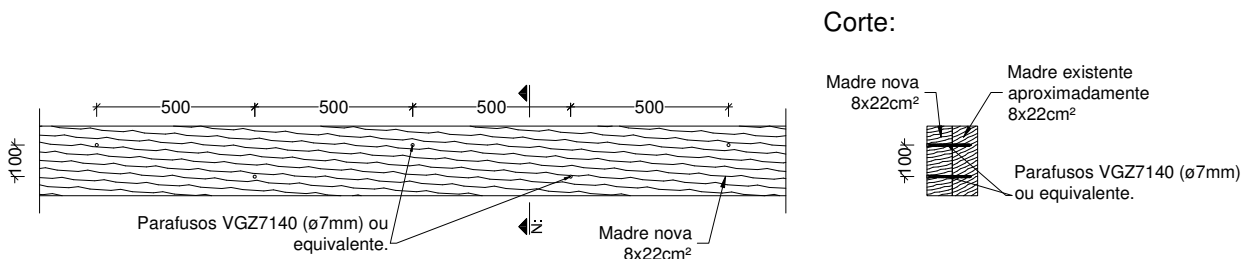


Figura 4.34 – Pormenor de reforço de madres através de colocação de novo elemento (sem escala).

**3) Substituição pontual e reforço estrutural das madres e cumeeiras**

As madres e cumeeiras mais degradadas deverão ser substituídas por novos elementos de madeira com secção transversal adequada às cargas e vãos a vencer, devidamente ligados às asnas.

O reforço das cumeeiras deverá ser realizado através do método proposto para o reforço das linhas das asnas, mas em toda a extensão das cumeeiras assinaladas nas peças desenhadas.

Para o reforço das madres é proposta a colocação de um novo elemento a par do existente com as dimensões necessárias para satisfazer as condições de segurança.

A ligação entre todas as madres e pernas das asnas deverá também ser melhorada através da introdução de parafusos e/ou chapas metálicas, de forma a permitir controlar os fenómenos de encurvadura das pernas.

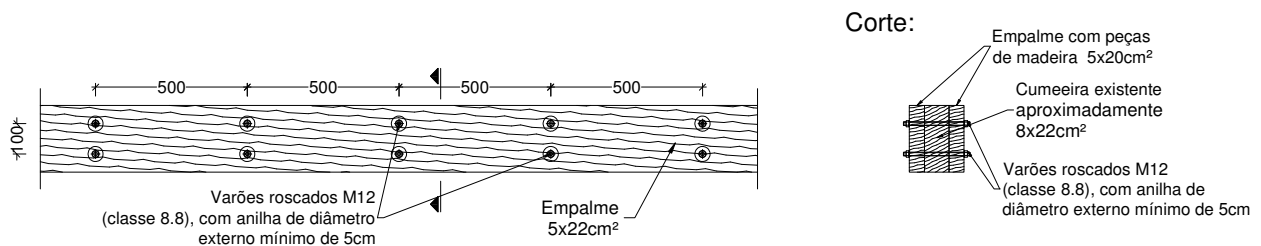


Figura 4.35 – Pormenor de reforço de cumeeiras através de empalmes laterais (sem escala).

#### 4) Tratamento dos elementos metálicos

Os elementos metálicos de ligação em asnas deverão ser limpos, removendo a camada superficial corroída, procedendo-se posteriormente à aplicação de um tratamento anticorrosivo.



## 5 CASO DE ESTUDO II – IGREJA SANTA CRUZ, BRAGA

### 5.1 INTRODUÇÃO

A Igreja de Santa Cruz localiza-se no Largo Carlos Amarante, em Braga. Possui uma planta retangular com cerca de 600m<sup>2</sup> e é composta por uma nave, capela-mor e vários compartimentos junto às empenas e à fachada posterior. A fachada principal da igreja apresenta duas torres sineiras.

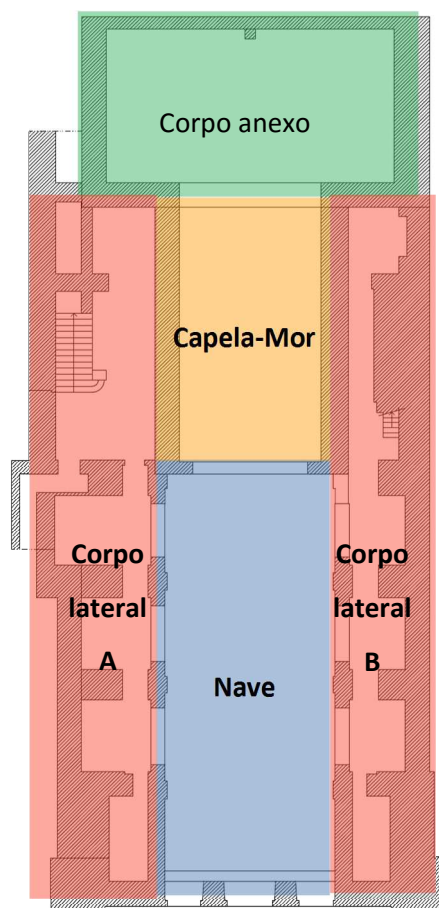


Figura 5.1 - Planta esquemática da igreja com a indicação dos vários espaços que a constituem.

A estrutura resistente vertical da igreja é constituída por paredes resistentes em alvenaria de granito nas fachadas, nas empenas e no interior, e por uma estrutura resistente em madeira na cobertura. As coberturas da nave e da capela-mor são de duas águas, constituídas por uma estrutura de asnas de

madeira apoiadas nas paredes interiores de alvenaria. O teto destes espaços é materializado por abóbadas de berço nervuradas, igualmente apoiadas nas paredes interiores de alvenaria.

O edifício em questão foi primeiramente alvo de trabalhos de inspeção e diagnóstico (I&D) realizados pelo NCREP, resultando destes trabalhos o relatório de inspeção e diagnóstico (RID) (NCREP, 2016f), contendo informações sobre o sistema construtivo, danos estruturais, avaliação de segurança estrutural e sugestão de medidas de intervenção.

## 5.2 TRABALHOS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DO CASO DE ESTUDO II

Nas próximas secções serão apresentados os aspetos mais importantes relativamente aos trabalhos de inspeção e diagnóstico do caso de estudo da Igreja de Santa Cruz, nomeadamente a caracterização dos elementos estruturais, a caracterização de danos estruturais, a avaliação de segurança e sugestões de medidas de intervenção. A descrição dos próximos capítulos teve por base o RID do caso de estudo (NCREP, 2016f).

### 5.2.1 Caracterização dos elementos estruturais de madeira

A cobertura em estudo divide-se em 4 espaços distintos (Figura 5.1). Durante as ações de I&D não foi possível aceder às coberturas dos corpos anexos, e por sua vez que não foi possível de realizar o levantamento estrutural. Deste modo presume-se que a estrutura resistente das coberturas dos corpos laterais seja realizada por um conjunto de madres e/ou varas, apoiadas nas paredes de alvenaria de pedra.

A estrutura da cobertura existente no corpo anexo é constituída por um conjunto de madres e cumeeira em madeira do tipo folhosa de secção transversal circular com diâmetro entre os 23cm e os 29cm, falqueadas nas quatro faces (Figura 5.2a). Estas vigas encontram-se apoiadas na parede posterior em alvenaria de pedra e na asna localizada na transição do corpo anexo para a capela-mor (Figura 5.2b).



(a) Madre de cobertura



(b) Apoio das madres e cumeeira na asna.

Figura 5.2 – Elementos em madeira existentes na cobertura do corpo anexo.

A estrutura resistente da cobertura da capela-mor é constituída por um conjunto de cinco asnas apoiadas nas paredes em alvenaria de pedra, vencendo um vão de aproximadamente 7,0m, servindo de suporte às madres e cumeeira. As asnas desta cobertura são constituídas por duas pernas e por duas linhas (principal e secundária) em madeira folhosa.

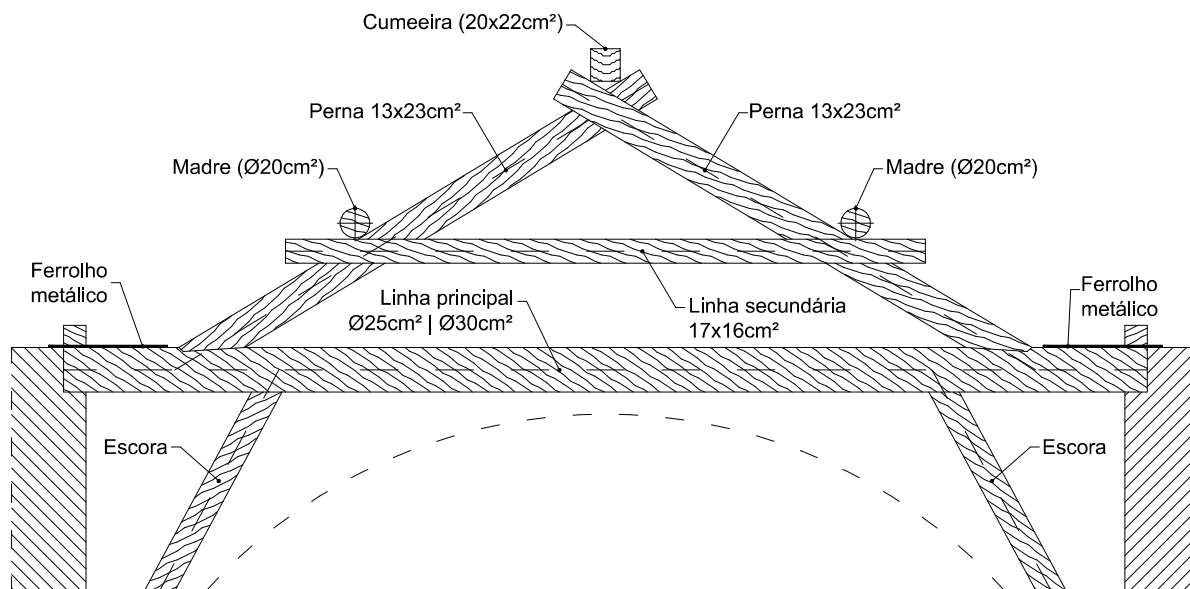


Figura 5.3 – Alçado tipo das Asnas da capela-mor (sem escala).

A cobertura da nave é igualmente materializada por uma estrutura em madeira folhosa, sendo constituída por um conjunto de nove asnas apoiadas nas paredes interiores de alvenaria. Estas asnas vencem um vão médio de 8,40m e suportam as madres e cumeeira. As asnas desta cobertura são constituídas por duas pernas e por uma linha elevada. As secções transversais dos elementos das asnas compreendem-se entre 10x14cm² e 17x20cm².

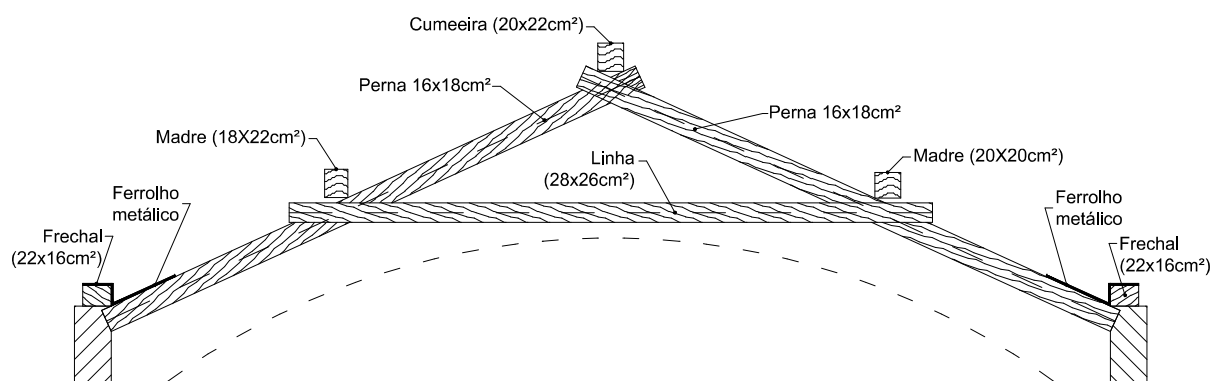


Figura 5.4 – Alçado tipo das asnas da nave (sem escala).

No que diz respeito à classe resistente das peças da cobertura, as informações das inspeções e dos ensaios de resistógrafo permitiram definir a classe resistente D30 para todos os elementos de madeira.

## 5.2.2 Caracterização dos danos estruturais

### 5.2.2.1 Danos estruturais em elementos de alvenaria de pedra

As paredes de alvenaria de pedra da igreja, que suportam a estrutura da cobertura e do teto apresentam, de uma forma geral, um bom estado de conservação.

Os topos das paredes que suportam a estrutura de madeira da cobertura não apresentam danos relevantes. É de notar, no entanto, a existência de fissuração diagonal na parede de alvenaria suportada pelo arco triunfal, como observado na Figura 5.5.



Figura 5.5 – Fissuração diagonal observada na parede de alvenaria suportada pelo arco triunfal.

### 5.2.2.2 Danos estruturais em elementos de madeira

Durante as ações de inspeção, nomeadamente através da realização dos ensaios in-situ, foram detetados danos nos elementos estruturais de madeira da cobertura dos diferentes espaços, que serão descritos em seguida. Note-se que os dados e comentários seguintes refletem também os resultados obtidos na campanha de ensaios realizada nos elementos de madeira, nomeadamente com o resistógrafo e o higrómetro.

A estrutura em madeira da cobertura apresenta-se, na generalidade, num estado de conservação precário, salientando-se que a estrutura existente na cobertura da nave se encontra em pior estado de conservação quando comparado com as restantes.

De um modo geral, toda a cobertura apresenta danos relacionados com ataques de agentes bióticos (fungos, caruncho e insetos sociais - térmitas). Estes danos existentes nos elementos em madeira relacionam-se, de uma forma geral, com a entrada de água para o interior da cobertura associado à falta de manutenção do revestimento cerâmico da cobertura e de acessórios de drenagem de águas pluviais. A maioria das degradações encontradas nas peças de madeira têm profundidades superiores a 1,5cm e nas zonas com entrada de água as peças de madeira apresentam um teor em água elevado.



(a) Ataque de térmitas e caruncho na cobertura da capela-mor



(b) Ataque de térmitas na cobertura da nave.

Figura 5.6 - Danos estruturais observados nos elementos estruturais de madeira da cobertura

Foram detetadas roturas de pernas de algumas asnas na cobertura da nave. Esta rotura está presumivelmente associada a degradações por ataques de agentes bióticos generalizados por toda a cobertura. Em consequência da rotura, os elementos das asnas apoiam de forma desadequada na abóbada da nave.



Figura 5.7 – Rotura de perna e apoio na abóbada

## 5.2.3 Avaliação de segurança estrutural

### 5.2.3.1 Classificação mecânica dos materiais

Numa primeira fase do diagnóstico foi realizada a classificação dos materiais existentes, através das informações obtidas nas campanhas de inspeção, nos ensaios realizados in-situ, documentos normativos e publicações sobre ensaios em elementos estruturais equivalentes aos existentes no caso em estudo.



Os ensaios e a inspeção visual realizada permitiram concluir que a madeira encontrada nos elementos estruturais da cobertura é do tipo resinosa. A densidade é um parâmetro correlacionável com a resistência da madeira, se não existirem defeitos ou danos relevantes. No caso da cobertura em análise, foi considerada a classe resistente C18 e D30 para a verificação de segurança.

Na seguinte tabela são apresentadas as propriedades mecânicas de cálculo obtidas através da expressão (3.1), considerando a classe de serviço 2.

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas de cálculo das madeiras existentes.

Classe	Cargas	$k_{mod}$	$f_{m,d}$ (MPa)	$f_{t,o,d}$ (MPa)	$f_{c,o,d}$ (MPa)	$f_{c,90,d}$ (MPa)	$f_{v,d}$ (MPa)
<b>C18</b>	Permanentes	0,6	8,31	5,08	8,31	0,23	0,92
	Média duração (sobrecarga)	0,8	11,1	6,77	11,1	0,31	1,23
<b>D30</b>	Permanentes	0,6	13,8	8,30	10,6	3,69	1,38
	Média duração (sobrecarga)	0,8	18,5	11,0	14,15	4,92	1,85

Relativamente à caracterização mecânica das paredes, apesar da resistência dos blocos de granito apresentarem resistência à compressão de valores frequentemente superiores a 20MPa, a alvenaria constituída por estes elementos apresenta características mecânicas bastante inferiores, nomeadamente resistências à compressão médias de 2,5MPa e módulos de deformabilidade vertical entre 0,3 e 0,5GPa, conforme valores obtidos em ensaios experimentais realizados na FEUP, (Almeida, et al., 2011).

### 5.2.3.2 Quantificação de ações

O seguinte quadro resume as ações permanentes consideradas, determinadas através das características dos materiais.

Tabela 5.2 - Ações permanentes (Gk) consideradas.

<b>Pesos Próprios (PP)</b>	
Peso específico do aço em elementos metálicos	77,00kN/m <sup>3</sup>
Peso específico da alvenaria de pedra	22,00kN/m <sup>3</sup>
Peso específico de madeira maciça resinosa (C18)	3,80kN/m <sup>3</sup>
Peso específico de madeira maciça folhosa (D30)	6,40kN/m <sup>3</sup>
<b>Restantes cargas permanentes (RCP)</b>	
Peso dos materiais de revestimento (telhas, ripas, varas e guarda-pó) da cobertura	0,80kN/m <sup>2</sup>

O valor relativo a sobrecarga adotado é referente a coberturas ordinárias ( $0.3 \text{ KN/m}^2$ ).

A pressão do vento foi determinada supondo que o edifício se encontra localizado na zona A com uma rugosidade aerodinâmica do tipo I. Os valores reduzidos a considerar para a ação do vento deverão ser determinados através dos seguintes coeficientes ( $\psi_0=0,4$ ;  $\psi_1=0,2$ ;  $\psi_2=0$ ), (R.S.A., 1983). O valor característico da pressão do vento máximo usado na análise da cobertura em estudo foi  $0.79 \text{ KN/m}^2$ .

### 5.2.3.3 Análise de elementos estruturais de madeira

As verificações de segurança realizadas no RID apenas abrangeram os elementos em bom estado de conservação, com potencialidade de serem mantidos.

A verificação de segurança estrutural dos elementos da cobertura, tanto em termos de resistência (ELU) como em termos de deformação (ELS), procurou avaliar a adequabilidade das asnas, madres e cumeeiras as cargas atuantes para as condições existentes.

Na Tabela 5.3 são apresentadas as verificações de segurança para ELU das madres em bom estado de conservação da capela-mor e corpo anexo e na Tabela 5.4 são apresentadas as verificações realizadas para o ELS.

Tabela 5.3 - Rádios de segurança das madres em madeira, em bom estado de conservação, da cobertura do corpo anexo e da capela-mor, para ELU.

Cobertura	Elemento	Carregamento			Características e propriedades das vigas			Flexão (sem bamb.)		Flexão (com bamb.)	E.L.U. Corte	E.L.U. Esmag. apoio	
		Vão (m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	Maciça	b (mm)	h ou ø (mm)	Secção Transversal	Rácio (G+Q)	Rácio (G)	Rácio	Rácio	Rácio
Corpo anexo	Madre	7,60	0,65	0,3	D30		220	Circ.	1,37	1,27	0,00	0,39	0,10
		7,60	0,65	0,3	D30	300	280	Rect.	0,40	0,39	0,40	0,22	0,08
Corpo anexo	Cumeeira	7,10	0,65	0,3	D30		235	Circ.	0,91	0,85	0,00	0,30	0,08
Corpo anexo	Madre	7,60	0,65	0,3	D30		245	Circ.	1,05	0,98	0,00	0,34	0,09
Capela-mor	Madre	3,10	0,65	0,3	D30		195	Circ.	0,26	0,24	0,00	0,16	0,04
Capela-mor	Cumeeira	4,20	0,65	0,3	D30	200	205	Rect.	0,23	0,22	0,23	0,17	0,05

Tabela 5.4 - Rádios de segurança das madres em madeira, em bom estado de conservação, da cobertura do corpo anexo e da capela-mor, para ELS.

Cobertura	Elemento	Carregamento			Características e propriedades das vigas			E.L.S. - Deformação								
		Vão (m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	Maciça	b (mm)	h ou ø (mm)	Secção Transversal	K <sub>def</sub> G e P.P.	K <sub>def</sub> Q e VV	U <sub>inst</sub> ,G (mm)	U <sub>inst</sub> ,Q (mm)	U <sub>inst</sub> ,total (mm)	1º Critério u <sub>inst</sub> E/300	U <sub>fin</sub> ,total (mm)	2º Critério u <sub>fin</sub> E/250
Corpo anexo	Madre	7,60	0,65	0,3	D30		220	Circ.	0,60	0,60	71,95	28,71	100,7	25,3	147,3	30,4
		7,60	0,65	0,3	D30	300	280	Rect.	0,60	0,60	17,53	6,07	23,6	25,3	34,8	30,4
Corpo anexo	Cumeeira	7,10	0,65	0,3	D30		235	Circ.	0,60	0,60	39,70	15,35	55,1	23,7	80,7	28,4
Corpo anexo	Madre	7,60	0,65	0,3	D30		245	Circ.	0,60	0,60	50,00	19,48	69,5	25,3	101,8	30,4
Capela-mor	Madre	3,10	0,65	0,3	D30		195	Circ.	0,60	0,60	2,70	1,08	3,8	10,3	5,5	12,4
Capela-mor	Cumeeira	4,20	0,65	0,3	D30	200	205	Rect.	0,60	0,60	4,21	1,58	5,8	14,0	8,5	16,8

Por análise das tabelas anteriores, verifica-se que as madres e cumeeira existentes na capela-mor verificam a segurança ao ELU. Contudo, existem madres do corpo anexo que não verificam a segurança ao ELU. Quanto ao ELS, as madres da cobertura do corpo anexo não verificam os limites máximos de deformação impostos pela regulamentação vigente.

Relativamente às asnas, foi avaliada a segurança estrutural das asnas localizadas na transição do corpo anexo para a capela-mor e para a asna seguinte da capela-mor. Na Figura 5.8 são apresentados os modelos numéricos das duas asnas.

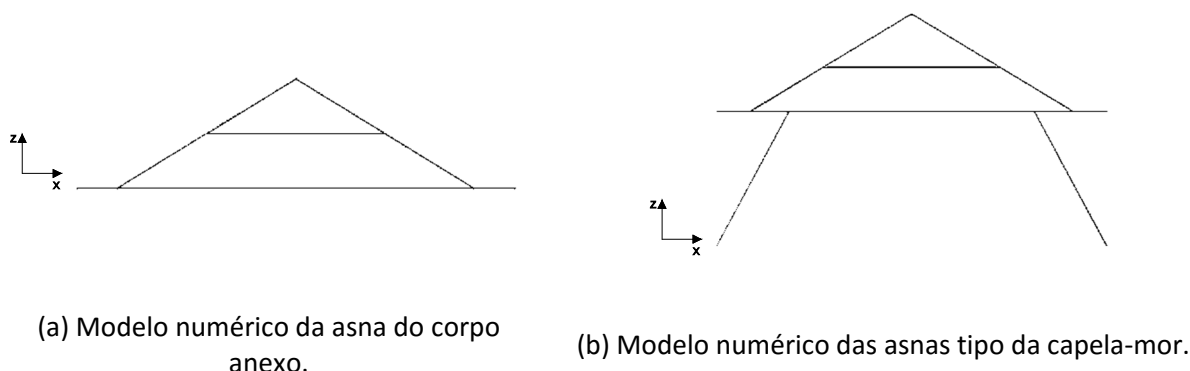


Figura 5.8 - Exemplo de modelo numérico das asnas em madeira existentes na cobertura.

Tabela 5.5 - Rácios de segurança dos elementos de madeira das asnas das coberturas, mais solicitadas para ELU e ELS.

Asna / Elemento	Material	Rácio (ELU   ELS)
Asna A1	Pernas	D30 0.17   0.05 <b>OK</b>
	Linha principal	D30 0.21   0.41 <b>OK</b>
	Linha secundária	D30 0.23   0.04 <b>OK</b>
Asnas A5	Pernas	D30 0.21   0.05 <b>OK</b>
	Linha principal	D30 0.14   0.02 <b>OK</b>
	Linha secundária	D30 0.22   0.04 <b>OK</b>
	Escoras	D30 0.36   0.04 <b>OK</b>

A avaliação das asnas (Tabela 5.5) permitiu concluir que de forma geral, os elementos das asnas na transição do corpo anexo para a capela-mor e a asna seguinte da capela-mor verificam a segurança estrutural aos ELU e ELS.

#### 5.2.4 Sugestão de medidas de intervenção

A avaliação efetuada permitiu verificar, com algumas exceções, o mau estado de conservação material da cobertura, apontando para uma intervenção de elevada intrusividade.

Do ponto de vista do estado de conservação dos elementos de madeira, conclui-se que será necessário proceder à substituição de grande parte da estrutura existente na cobertura da nave, devido à elevada degradação generalizada por agentes bióticos e a rotura de algumas pernas de asnas. Assim, e tendo em conta a elevada percentagem de elementos degradados, a cobertura desta zona deverá ser integralmente

substituída por uma nova estrutura, preferencialmente em madeira, com características semelhantes, mantendo-se, entre outros aspetos, o nível de carga nas paredes.

No caso das coberturas do corpo anexo e da capela-mor, a percentagem de elementos degradados é menor. Juntado este aspeto aos resultados da avaliação de segurança efetuada, conclui-se que existem nestas coberturas elementos que se podem manter, reforçando-se e substituindo-se pontualmente algumas peças. Contudo, e tendo em conta que grande parte da estrutura carece de ações de reforço/substituição, justifica-se que apenas sejam mantidos os elementos em que o reforço é mais facilmente exequível.

Em relação às coberturas dos corpos laterais A e B, apesar da impossibilidade de inspecionar essa área, prevê-se que seja necessário proceder a ações de reforço e/ou substituição dado que grande parte dos elementos das coberturas vizinhas se encontram em muito mau estado de conservação.

Relativamente às paredes de alvenaria de pedra, não apresentam danos relevantes, devendo ser mantidas e reabilitadas. Na colmatação das juntas e de eventuais fissuras deverão ser usadas argamassas compatíveis com as características das paredes, salvaguardando o seu correto funcionamento. Para além disso, as paredes deverão ser devidamente ligadas aos elementos estruturais da cobertura, de modo a melhorar a capacidade resistente e o comportamento da igreja, em particular às ações horizontais. Convém ainda referir que, de forma a acautelar a correta ventilação das paredes, será conveniente não utilizar revestimentos impermeáveis, tais como argamassas de cimento e tintas plásticas.

No entanto, tendo em conta a fissuração diagonal existente na parede de alvenaria de pedra suportada pelo arco triunfal deve-se proceder ao preenchimento das juntas com argamassa a base de cal. Pontualmente poderá ser necessário proceder ao gateamento de algumas das fissuras que se apresentem com aberturas mais pronunciadas.

### **5.3 PROJETO DE EXECUÇÃO E ESTABILIDADE**

Esta secção apresenta os trabalhos realizados no âmbito da realização do projeto de execução de estabilidade da cobertura da Igreja Santa Cruz em Braga, tendo por base a memória descritiva e justificativa do presente caso de estudo, (NCREP, 2016b).

#### **5.3.1 Quantificação e combinações de ações**

A quantificação e combinações de ações foram realizadas consoante as descrições apresentadas anteriormente no capítulo 3.5.5, onde é mencionada toda a regulamentação vigente, e os procedimentos para a determinação das combinações de ações.

### 5.3.2 Descrição da solução de intervenção

Dado o nível de degradação por ataques agentes bióticos nos elementos de madeira da estrutura da cobertura, a intervenção estrutural terá um nível de intrusividade elevado. No caso da nave, como referido anteriormente, é necessário realizar a substituição integral de todos os elementos estruturais. Relativamente à capela-mor, serão mantidas duas asnas realizando reforços pontuais, os restantes elementos estruturais serão substituídos. Relativamente ao corpo anexo, a asna localizada na zona de transição para a capela-mor é mantida com o reforço pontual de alguns elementos, três madres existentes serão mantidas e as restantes substituídas.

Na planta de intervenção (Figura 5.9) estão identificados a azul os novos elementos de madeira e a castanho os elementos existentes a manteres através de reforços pontuais.

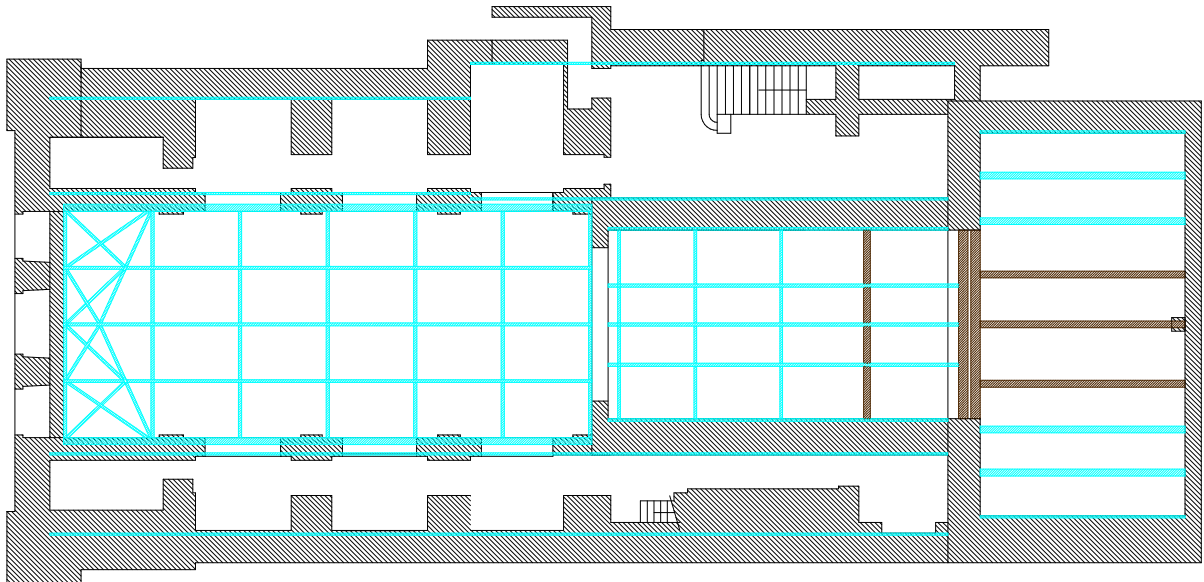


Figura 5.9 – Planta estrutural de intervenção (sem escala).

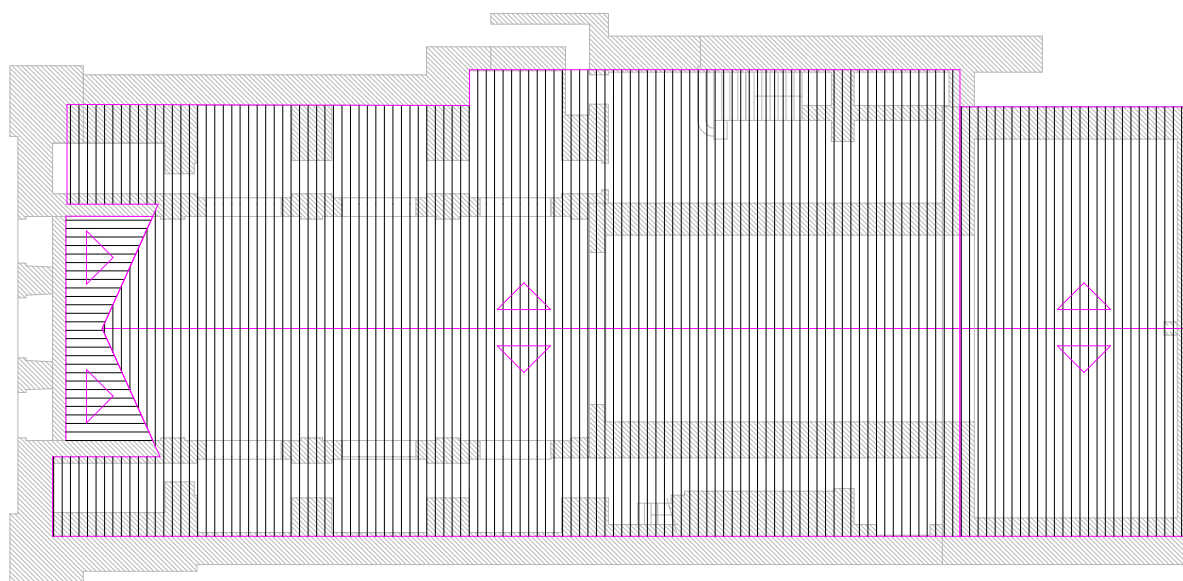


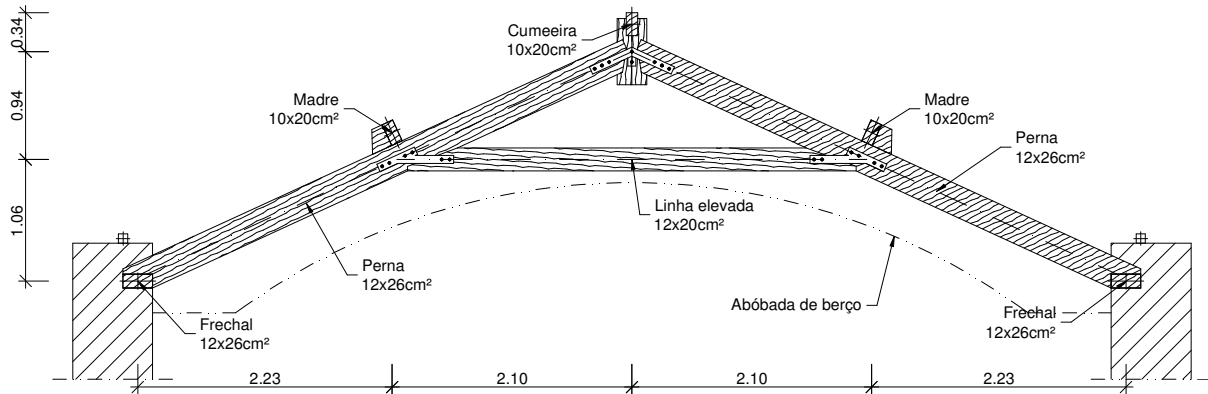
Figura 5.10 – Esquema de orientação das águas da cobertura (sem escala)

### 5.3.2.1 Estrutura em madeira da nave

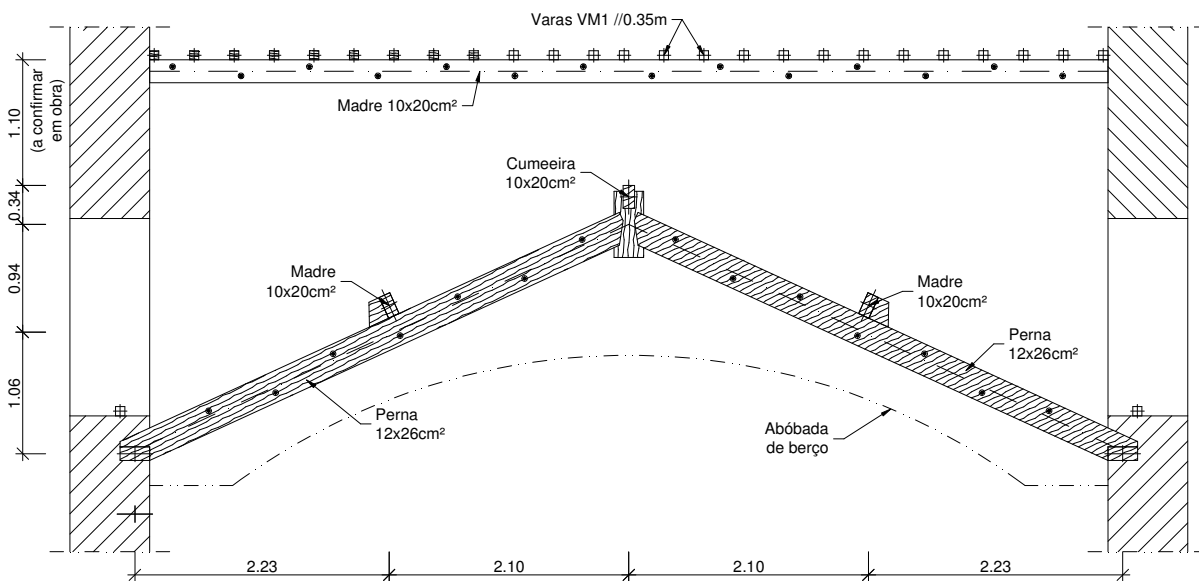
A estrutura em madeira da cobertura da nave possui, originalmente, 9 asnas com espaçamentos diferentes entre elas, sendo que entre asnas existem vigas a ligar as madres da cota intermédia. Dada a necessidade de substituição integral dos elementos estruturais, foi realizado um reajuste do número de asnas e espaçamento entre elas de modo a ter uma malha de elementos estruturais mais regular, passando a ter 6 asnas (Figura 5.11a) espaçadas de aproximadamente 3,25m e duas pernas chumbadas na parede da fachada principal e uma viga superior (Figura 5.11b). Junto da fachada principal, a cobertura tem uma configuração diferente, em três águas, para permitir o acesso às torres sineiras (Figura 5.10).

As asnas apoiavam num frechal de secção transversal igual ao das pernas das asnas. Foi adotado um frechal de grandes dimensões uma vez que algumas asnas apoiam sobre arcos de alvenaria de pedra, tendo por isso o frechal a função de distribuir mais uniformemente as cargas por toda a parede de alvenaria.

Junto da fachada principal do edifício será colocado um contraventamento no plano da cobertura com o objetivo de impedir deformações no plano da cobertura e conferir maior resistência à fachada principal e à cobertura relativamente a esforços horizontais.



(a) Alçado tipo da nova asna da nave



(b) Alçado das pernas e viga de topo chumbadas na parede de alvenaria da fachada principal

Figura 5.11 – novos elementos estruturais em madeira da nave (sem escala).

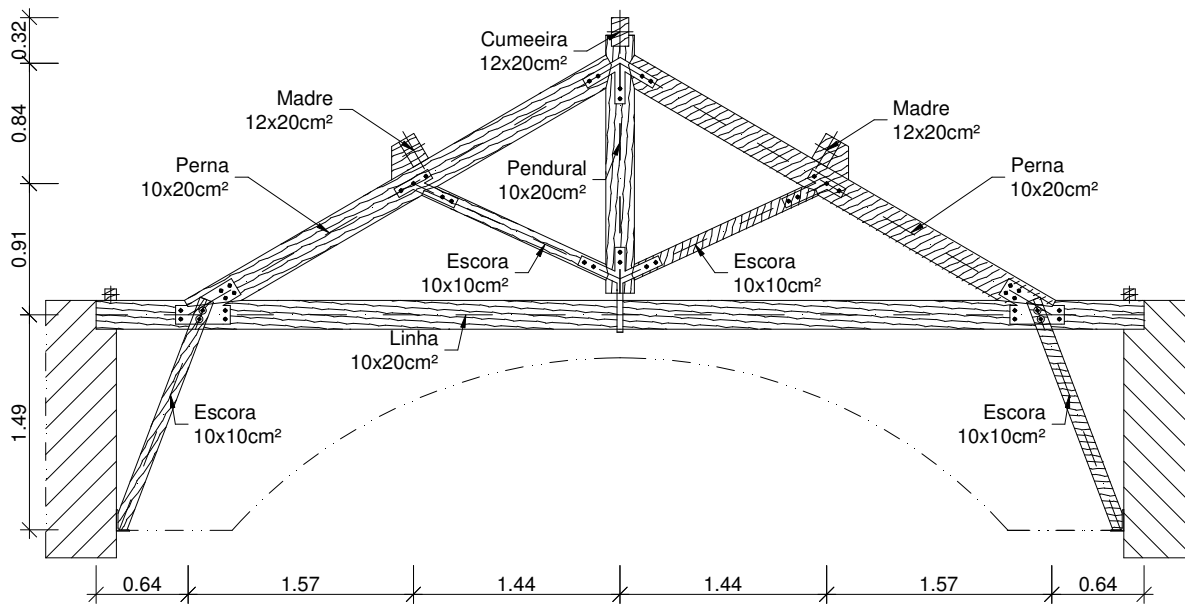
### 5.3.2.2 Estrutura em madeira da capela-mor

A estrutura da capela-mor originalmente possui cinco asnas dispostas paralelamente entre si e com diferentes espaçamentos. Como referido anteriormente, os trabalhos de inspeção e diagnóstico indicaram que duas asnas podem ser mantidas através de reforço estrutural.

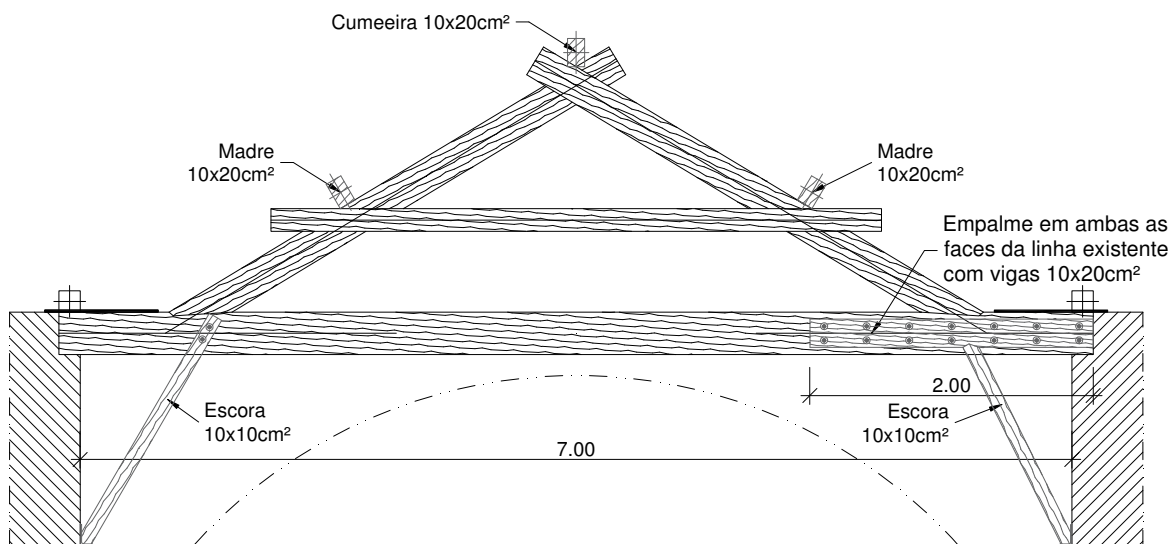
As novas asnas terão uma configuração diferente das asnas existentes (Figura 5.12a). A decisão de alterar a configuração das asnas foi tomada devido à maior estabilidade da nova configuração.

As linhas das asnas existentes, no lado sudeste, serão reforçadas com empalmes de madeira ou em chapa, ligados através de varões roscados (Figura 5.12b) de modo a colmatar alguns problemas de degradação material das mesmas.





(a) Alçado tipo asna nova



(b) Alçado tipo de asna com reforço.

Figura 5.12 – Alçados das asnas da capela-mor (sem escala)

### 5.3.2.3 Estrutura em madeira do corpo anexo

O corpo anexo possui uma estrutura constituída por madres de grande dimensão vencendo vãos de 7.6m e uma asna na zona de transição para a cobertura da capela-mor. Os trabalhos de inspeção e diagnóstico revelaram a necessidade de substituir duas madres devido ao seu estado de conservação, sendo cada madre substituída por duas de modo a reduzir a largura de influência e conseqüente secção da nova peça. A asna existente será mantida com a realização do reforço da linha com recurso a empalmes de chapas metálicas ligadas por varões roscados de modo a colmatar algumas degradações materiais registadas.

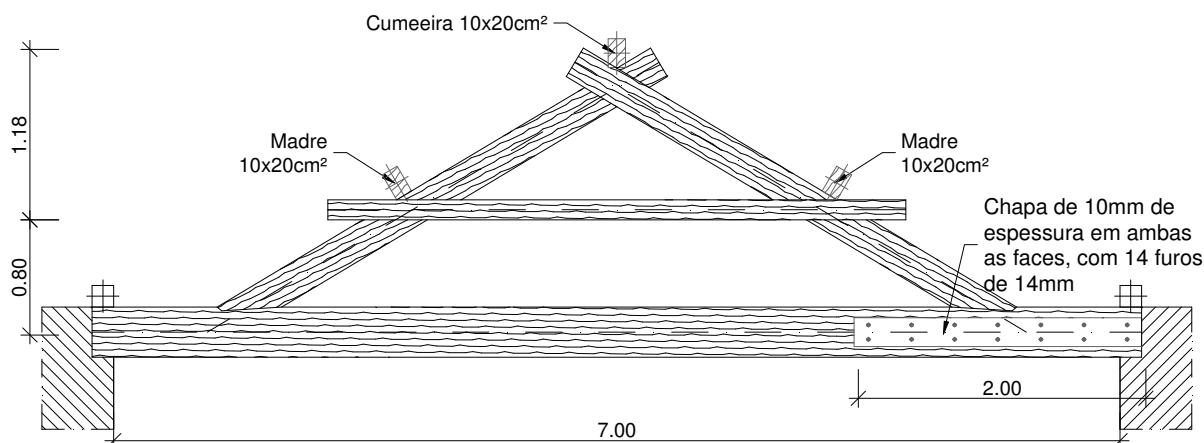


Figura 5.13 – Alçado da asna do corpo anexo com reforço (sem escala)

### 5.3.3 Dimensionamento estrutural

As intervenções estruturais envolveram, sempre que possível, a utilização de materiais e técnicas tradicionais, de forma a garantir a preservação da identidade do edifício e, simultaneamente, o respeito pelos princípios ditados pelas Cartas e Recomendações Internacionais, (ICOMOS, 2004), nomeadamente a reversibilidade, a compatibilidade e a baixa intrusividade das soluções. Sendo assim, a solução estrutural preconizada, para além de ter sido concebida de forma a cumprir exigências técnicas e económicas e os requisitos arquitetónicos, procurou ter em conta os materiais e sistemas estruturais existentes.

#### 5.3.3.1 Estrutura em madeira

O cálculo das estruturas de madeira, envolveu a verificação dos estados limites últimos - ELU e dos estados limites de utilização – ELS.

Os ELU verificados contemplaram a flexão simples, a flexão desviada nos elementos inclinados das coberturas, os fenómenos de instabilidade por encurvadura lateral-torsional (bambeamento), o corte e a compressão perpendicular ao fio na zona dos apoios dos elementos estruturais. No que diz respeito aos ELS, foram verificadas a deformação de todos os elementos estruturais.

O dimensionamento e a verificação de segurança estrutural foram realizados através do cumprimento das condições preconizadas no Eurocódigo 5, (CEN, 2004) e mencionadas neste relatório no capítulo 3.5.4.

Em casos particulares foram realizados estudos mais aprofundados, através de programas de cálculo automático, de forma a validar os cálculos inicialmente realizados.

Refere-se que foram consideradas as classes de serviço 2 para os elementos de madeira na cobertura. As características da ligação viga/parede de alvenaria materializam um apoio que nesta verificação será considerado simples.

As resistências de cálculo, como referido no capítulo 3.5.2, dependem da duração das cargas e da classe de serviço.

Foi escolhida a madeira lamelada colada para a realização da reabilitação da cobertura. A madeira lamelada colada apresenta inúmeras vantagens em relação a madeira maciça. As principais vantagens são o controlo de qualidade, elevada gama de secções existentes e também ser possível obter peças de grandes comprimentos. Este tipo de madeira, assim como o nome sugere, é composto por lamelas de madeira que são coladas e paralelamente entre si dando origem a secção final.

A utilização da madeira lamelada colada no caso de estudo viabilizou as opções tomadas. No caso das madres novas do corpo anexo, seria complicado realizar a cobertura com madeira maciça. Os elevados vãos que estas madres vencem inviabiliza a utilização de madeira maciça, uma vez que seria necessário um elemento com secção transversal muito elevada, não disponível do mercado.

Na tabela seguinte refere-se as propriedades mecânicas utilizadas no cálculo estrutural para os elementos de madeira nova de classe resistente G24h.

Tabela 5.6 – Resistências de cálculo dos elementos de madeira estruturais (existentes e novos)

Classe Resistente	Cargas	$k_{mod}$	$f_{m,d}$ (MPa)	$f_{t,o,d}$ (MPa)	$f_{c,0,d}$ (MPa)	$f_{c,90,d}$ (MPa)	$f_{v,d}$ (MPa)
G124h	Permanentes	0,6	11,5	7,9	11,5	1,3	1,3
	Média duração (sobrecarga)	0,8	15,4	10,6	15,4	1,7	1,7

### 5.3.3.2 Dimensionamento das novas cumeeiras e madres

Na tabela seguinte apresenta-se o dimensionamento das novas madres e cumeeiras, tendo a verificação sido efetuada para flexão simples, encurvadura lateral-torsional ou bambeamento, corte, compressão perpendicular ao fio, flexão desviada e deformação.

Em relação as madres a manter no corpo anexo, a sua verificação já foi realizada e apresentada no capítulo 5.2.3.

Tabela 5.7 - Rácios de segurança dos elementos de madeira das madres mais solicitadas e cumeeiras pelas ações, para o ELU e ELS nas três coberturas.

Zona		Características geométricas			Carregamento			Características material		Flexão simples	Bambeamento	Corte	fibras	Flexão desviada		
		Apoio parede (m)	b(m)	h(m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	L influencia (m)	Tipo de madeira	Lamelada Colada					Rácio	Rácio	Rácio
Corpo	Madre	0,10	0,16	0,30	0,80	0,3	1,60	Lamelada	GL24h	OK	OK	OK	OK	0,0	0,49	0,34
Capela-mor	Madre	0,10	0,12	0,20	0,80	0,3	1,80	Lamelada	GL24h	OK	OK	OK	OK	30,3	0,52	0,53
Capela-mor	Cumeeira	0,10	0,12	0,20	0,80	0,3	1,50	Lamelada	GL24h	OK	OK	OK	OK	0,0	0,29	0,20
Nave	Madre	0,10	0,10	0,20	0,80	0,3	2,15	Lamelada	GL24h	OK	OK	OK	OK	24,8	0,62	0,62
Nave	Cumeeira	0,10	0,10	0,20	0,80	0,3	2,10	Lamelada	GL24h	OK	OK	OK	OK	0,0	0,39	0,27

a) Tabela ELU

Zona		Características geométricas			Carregamento			Características material		Deformação ZZ (Ped,zz para ly)		Deformação YY (Ped,yy para lz)					
		Apoio parede (m)	b(m)	h(m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	L influencia (m)	Tipo de madeira	Lamelada Colada	1º Critério u <sub>i,instEI</sub> /300	2º Critério u <sub>i,finEI</sub> /250	1º Critério u <sub>i,instEI</sub> /300	2º Critério u <sub>i,finEI</sub> /250				
Corpo	Madre	0,10	0,16	0,30	0,80	0,3	1,60	Lamelada	GL24h	25,3	OK	38,0	OK	25,3	OK	30,4	OK
Capela-mor	Madre	0,10	0,12	0,20	0,80	0,3	1,80	Lamelada	GL24h	12,0	OK	14,4	OK	12,0	OK	14,4	OK
Capela-mor	Cumeeira	0,10	0,12	0,20	0,80	0,3	1,50	Lamelada	GL24h	12,0	OK	14,4	OK	12,0	OK	14,4	OK
Nave	Madre	0,10	0,10	0,20	0,80	0,3	2,15	Lamelada	GL24h	10,8	OK	13,0	OK	10,8	OK	13,0	OK
Nave	Cumeeira	0,10	0,10	0,20	0,80	0,3	2,10	Lamelada	GL24h	10,8	OK	13,0	OK	10,8	OK	13,0	OK

b) Tabela ELS

### 5.3.3.3 Dimensionamento das novas asnas da capela-mor e nave

O dimensionamento dos elementos que compõem as asnas das coberturas, foi efetuado um modelo numérico, usando o *software* de análise estrutural SAP2000 (Figura 5.14) que contemplou as mesmas verificações descritas no parágrafo anterior e onde os elementos de madeira foram modelados como elementos de barra. Na Tabela 5.8 e Tabela 5.9, são expostos os rácios de segurança obtidos para os elementos das novas asnas.

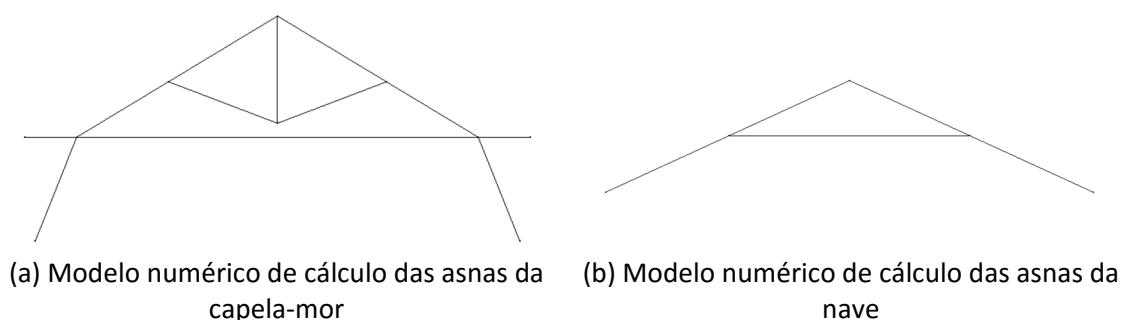


Figura 5.14 - Exemplo de modelo numérico das asnas novas

A estrutura das asnas novas da nave não é totalmente autoportante, isto é, as asnas com configuração idêntica às asnas da capela-mor (Figura 5.14a) transferem os esforços para a parede de alvenaria, maioritariamente através de esforços verticais. Este tipo de asnas pode ser classificado de autoportantes uma vez que os esforços horizontais são resistidos internamente. A configuração das asnas da nave (Figura 5.14b) não é autoportante e transmite esforços horizontais para as paredes de alvenaria quando se deforma. Quanto mais resistentes forem os elementos que constituem a asna, menores serão os esforços transmitidos. De modo a encontrar um equilíbrio entre os esforços horizontais transmitidos para as paredes de alvenaria e os esforços horizontais resistidos pela estrutura da asna, foi simulada a resistência das paredes de alvenaria aos esforços horizontais no modelo de cálculo, introduzindo um apoio horizontal no modelo de cálculo com uma rigidez semelhante à rigidez espectável para o tipo de paredes de alvenaria do caso de estudo a esforços horizontais. Note-se que a introdução de um frechal de secção transversal igual às pernas das asnas melhora significativamente a capacidade resistente a esforços horizontais, uma vez que este permite uma degradação das cargas horizontais mais uniformemente ao longo das paredes de alvenaria.

Tabela 5.8 - Rácios dos elementos de madeira das Asnas da capela-mor em ELU e ELS.

Elemento	Material	Rácio ELU   ELS	
Pernas	GL24h	0.65	OK
Linha	GL24h	0.02	OK
Prumos	GL24h	0.13	OK
Restantes elementos da asna	GL24h	<0.13	OK

Tabela 5.9 - Rádios de segurança dos elementos de madeira das Asnas da nave em ELU e ELS.

Elemento	Material	Rácio ELU   ELS	
Pernas	GL24h	0.70	OK
Linha Elevada	GL24h	0.10	OK

### 5.3.3.4 Dimensionamento das coberturas laterais (varadas)

Dado que não foi possível aceder às coberturas laterais durante os trabalhos de inspeção e diagnóstico, foi considerada a possibilidade de substituição integral. No dimensionamento das novas coberturas, foram considerados os vãos medidos nas peças desenhadas.

Na tabela seguinte apresenta-se o dimensionamento das varas das coberturas laterais A e B, tendo a verificação sido efetuada para flexão simples, encurvadura lateral-torsional ou bambeamento, corte, compressão perpendicular ao fio e deformação.

Tabela 5.10 - Rádios de segurança dos elementos de madeira das varas das coberturas laterais A e B, para ELU e ELS.

Zona	Apoio parede (m)	Características geométricas			Carregamento			Características material			Flexão simples		Bambeamento	Corte		Compressão ⊥ fibras
		b(m)	h(m)	Vão (m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	L influéncia (m)	Maciça	Classe de serviço	Duração da acção	Msd (kNm)	Rácio	Rácio	Ved	Rácio	Rácio
Varas L=3 Cob. Lat. B	0,10	0,08	0,12	3,00	0,7	0,3	0,50	C18	2	Média	0,84	OK	OK	1,12	OK	OK
Varas L=3,55 Cob. Lat. A	0,10	0,08	0,14	3,55	0,7	0,3	0,50	C18	2	Média	1,19	OK	OK	1,34	OK	OK
Varas L=5,05 Cob. Lat. A	0,10	0,10	0,18	5,05	0,7	0,3	0,50	C18	2	Média	2,50	OK	OK	1,98	OK	OK

a) Tabela ELU

Zona	Características geométricas				Carregamento			Características material			Deformação					
	Apoio parede (m)	b(m)	h(m)	Vão (m)	Revestimentos (kN/m <sup>2</sup> )	Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	L influencia (m)	Maciça	Classe de serviço	Duração da acção	u <sub>inst,total</sub> (mm)	1º Critério u <sub>instEI</sub> /300	u <sub>fin,total</sub> (mm)	2º Critério u <sub>finEI</sub> /250		
Varas L=3 Cob. Lat. B	0,10	0,08	0,12	3,00	0,7	0,3	0,50	C18	2	Média	5,58	10,00	OK	9,05	12,00	OK
Varas L=3,55 Cob. Lat. A	0,10	0,08	0,14	3,55	0,7	0,3	0,50	C18	2	Média	6,97	11,83	OK	11,31	14,20	OK
Varas L=5,05 Cob. Lat. A	0,10	0,10	0,18	5,05	0,7	0,3	0,50	C18	2	Média	11,15	16,83	OK	18,20	20,20	OK

b) Tabela ELS

### 5.3.3.5 Dimensionamento das ligações entre elementos das asnas novas

O cálculo das ligações entre elementos das asnas novas envolveu a verificação aos estados limites últimos, agilizando as necessidades de resistência e as condições construtivas.

O dimensionamento e verificação de segurança das ligações foram realizados através do cumprimento das condições preconizadas no Eurocódigo 5, (CEN, 2004), contemplando os modos de rotura por esmagamento da madeira, rotura em bloco e rotura do varão por flexão.

No dimensionamento de ligações, o Eurocódigo 5 rege-se pela teoria de Johansen. Este método estabelece as equações de equilíbrio para ligações madeira-madeira ou madeira-aço, abrangendo os diferentes modos de rotura.

No caso de estudo da cobertura da Igreja Santa Cruz, o tipo de ligação utilizado é a madeira-aço através de corte duplo. Para este tipo de ligação, a teoria de Johansen faz a distinção entre chapa fina e chapa espessa através das seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
 &\text{chapa fina: } 0.5d \leq t \\
 &\text{chapa espessa: } t \geq d
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Em que ( $d$ ) é o diâmetro do furo na chapa para a colocação do varão e ( $t$ ) é a espessura da chapa.

No caso de estudo, os modos de rotura corresponderam sempre aos modos de rotura com chapa fina, correspondentemente os modos de rotura J e K indicados no Eurocódigo 5 que correspondem, respetivamente ao esmagamento da madeira e formação de rótula plástica no varão. Nos seguintes tópicos é indicado o modo de dimensionamento das ligações do caso de estudo verificando os modos de rotura J e K:

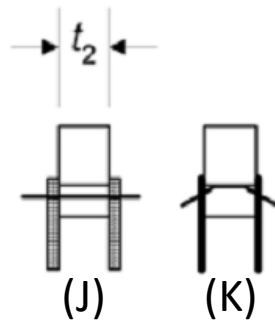


Figura 5.15 – Modos de rotura J e K (CEN, 2004).

▪ Modo de rotura J

A resistência de um ligador por plano de corte no modo de rotura J é dado pela seguinte expressão:

$$F_{v,Rk} = 0.5 \times f_{h,2,k} \times t_2 \times d \quad (5.2)$$

em que:

- $f_{h,2,k}$  é a resistência ao esmagamento da madeira;
- $t_2$  é a espessura da peça de madeira;
- $d$  é o diâmetro do furo para a passagem do ligado.

A resistência ao esmagamento da madeira é dada pelas seguintes expressões:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (5.3)$$

$$f_{h,0,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho_k \quad (5.4)$$

Com:

$$k_{90} = \begin{cases} 1.35 + 0.015d & \text{para resinosas} \\ 0.90 + 0.015d & \text{para folhosas} \end{cases} \quad (5.5)$$

Em que:

- $f_{h,0,k}$  é a resistência ao esmagamento da madeira segundo um ângulo paralelo ao fio;
- $f_{h,\alpha,k}$  é a resistência ao esmagamento da madeira segundo um ângulo ( $\alpha$ ) em relação ao fio.

▪ Modo de rotura K

A resistência de um ligador por plano de corte de uma ligação no modo de rotura K é dada pela seguinte expressão:

$$1.15 \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,2,k} \times d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \quad (5.6)$$



Em que:

- $M_{y,Rk}$  é o valor característico do momento de cedência plástica do ligador;
- $F_{ax,Rk}$  é o valor característico da resistência ao arranque axial do ligador.

O valor de  $M_{y,Rk}$  é obtido em função das características mecânicas e geométricas do ligador, sendo calculado através da seguinte expressão:

$$M_{y,Rk} = 0.3 \times f_{u,k} \times d^{2.6} \quad (5.7)$$

Em que  $f_{u,k}$  é o valor característico da resistência à tração do ligador e  $d$  é o diâmetro.

O valor de  $F_{ax,Rk}$  é obtido em função da geometria da anilha e resistência à compressão perpendicular ao fio, sendo calculado através da seguinte expressão:

$$F_{ax,Rk} = 3 \times f_{c,90,k} \times \frac{\pi}{4} (d_{anilha}^2 - d^2) \quad (5.8)$$

Em que:

- $f_{c,90,k}$  é o valor característico da resistência a compressão perpendicular ao fio;
- $d_{anilha}$  é o diâmetro exterior da anilha;
- $d$  é o diâmetro do furo.

O valor de  $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$  nunca poderá ser superior à multiplicação da primeira parcela do modo de rotura K ( $1.15 \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,2,k} \times d}$ ) com a contribuição máxima do efeito corda que assume os valores apresentados na Tabela 5.11 em função do tipo de ligador. No caso de estudo as ligações foram dimensionadas com parafusos de porca.

Tabela 5.11 – Contribuição máxima do efeito corda, (CEN, 2004).

Pregos redondos lisos	15%
Pregos quadrados lisos	25%
Outros pregos	50%
Parafusos de enroscar	100%
Parafusos de porca	25%
Cavilhas	0%

A resistência característica da ligação é obtida através da seguinte expressão:

$$F_{v,Rk,ligação} = F_{v,Rk} \times n_{ef} \times n_{fiadas} \tag{5.9}$$

Com:

$$n_{ef} = \min \left\{ n, n^{0,9} \sqrt{\frac{a_1}{13d}} \right\} \tag{5.10}$$

Em que:

- $n_{ef}$  é o número de ligadores efetivo;
- $n$  é o número de ligadores real;
- $n_{fiadas}$  é o número de fiadas de ligadores
- $F_{v,Rk}$  é a resistência característica ao corte de um ligador por plano de corte.

No caso de estudo o valor de  $F_{v,Rk}$  é o mínimo entre o modo de rotura J e K proposta por Johansen. O valor de  $F_{v,Rd,ligação}$  é obtido segundo a expressão (3.1) do capítulo 3.5.2. Nas tabelas seguintes são apresentados os rácios de segurança das ligações das diferentes asnas:

Tabela 5.12 – Rácios de segurança das ligações das asnas da nave.

Nome ligação	N <sub>sd</sub> (kN)		Classe Resistente Parafusc	Classe Resistente Chapa	t <sub>2</sub> (mm)	t <sub>chapa</sub> (mm)	F <sub>chapa</sub> (mm)	Modo k - Parcela Johansen (N)	Modo m - Parcela Johansen (N)	Modo k - Parcela Johansen + Efeito corda (N)	Modo m - Parcela Johansen + Efeito corda (N)	Resistência de 1 ligador em corte duplo (N)	n parafusos por f	a <sub>1</sub> (mm)	a <sub>2</sub> (mm)	a <sub>3</sub> (mm)	a <sub>4</sub> (mm)	n <sub>ef</sub>	Fiadas	F <sub>v,Rd,ligação</sub> (kN)	Resistência rotura por bloco				RÁCIO RESISTÊNCIAS
	N <sub>Rd,2 chapas</sub> (kN)	F <sub>Rd,2 chapas</sub> (kN)																			N <sub>Rd,2 chapas</sub> (kN)	F <sub>Rd,2 chapas</sub> (kN)			
Pernas	28	12	8,8	S275	GL24h	120	5	70	11558	16346	14448	19741	28895	3	70	50	60	130	2,20	1	41	95	180	103	0,68
linha	6	12	8,8	S275	GL24h	120	5	70	11558	16346	14448	19741	28895	2	70	80	80	90	1,53	1	28	15,2	180	103	0,21

Tabela 5.13 – Rádios de segurança das ligações das asnas da capela-mor

Nome ligação	CONSULTORIA EM REABILITAÇÃO DO EDIFÍCIO E PATRIMÓNIO																RÁCIO RESISTÊNCIAS								
	$N_{Rd}$ (kN)	d (mm)	Classe Resistente Parafusos	Classe Resistente Chapa	$t_2$ (mm)	tchapa (mm)	hchapa (mm)	Modo j - Parcela Johansen (N)	Modo k - Parcela Johansen + Efeito corda (N)	Modo m - Parcela Johansen + Efeito corda (N)	Resistência de 1 ligador em corte duplo (N)	n parafusos por fit	$a_1$ (mm)	$a_2$ (mm)	$a_3$ (mm)	$a_4$ (mm)	$n_{ef}$	Fiadas	$F_{v,Rd}$ ligacao (kN)	Resistência rotura por bloco (kN)	$N_{Rd}$ 2 chapas (kN)	$F_{u,Rd}$ 2 chapas (kN)			
Pernas	16	12	8,8	S275	GL24h	100	5	70	11558	16346	14448	19741	28895	2	70	80	80	35	1,53	1	28	127	180	103	0,56
Pendural	8	12	8,8	S275	GL24h	120	5	70	11558	16346	14448	19741	28895	2	70	80	80	35	1,53	1	28	152	180	103	0,27
Perna	28	12	8,8	S275	GL24h	120	5	130	11558	16346	14448	19741	28895	2	80	60	80	35	1,58	1	29	114	358	103	0,94
Escoras	11	12	8,8	S275	GL24h	120	5	70	11558	16346	14448	19741	28895	2	70	80	80	35	1,53	1	28	152	180	103	0,37
Pendural	8	12	8,8	S275	GL24h	120	5	70	11558	16346	14448	19741	28895	2	70	80	80	35	1,53	1	28	152	180	103	0,27

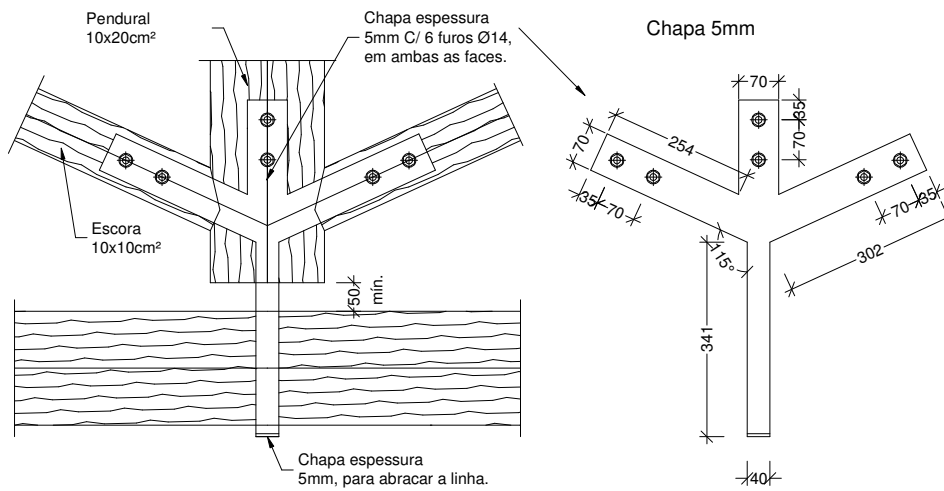


Figura 5.16 –Pormenor de ligação entre elementos da asna nova na capela-mor (sem escala).

No anexo IV são apresentadas as peças desenhadas da planta estrutural da cobertura e pormenores de execução.

## **6 FOLHA DE CÁLCULO DE ASNA TRADICIONAL**

### **6.1 INTRODUÇÃO**

Um dos propósitos da realização do estágio curricular foi a identificação e melhoria de um processo de cálculo estrutural realizado pelo NCREP. Neste sentido, durante o estágio curricular, e em consequência dos trabalhos desenvolvidos nos casos de estudo apresentados anteriormente, foi elaborada uma folha de cálculo que permite realizar as verificações de segurança e deformação de uma asna tradicional (ou de Palladio) de acordo com o preconizado pelo Eurocódigo 5.

Nos dias de hoje, em que o tempo para a realização de projetos é cada vez mais escasso, é importante possuir ferramentas que permitam o dimensionamento rápido, seguro e económico das estruturas. Neste sentido, torna-se importante a criação de ferramentas que agilizem todo o processo de dimensionamento ou de verificação de segurança.

### **6.2 ASNA DE PALLADIO**

A configuração da asna de Palladio é muito utilizada para materializar as estruturas de madeira das coberturas de edifícios antigos. Segundo (Branco, et al., 2010), as asnas de Palladio surgiram no século XVI, constituídas por linha, pernas, pendural e por duas escoras apoiadas na base do pendural, ficando a perna dividida em duas partes (Figura 6.1). As escoras, trabalhando à compressão, contribuem para melhorar o comportamento à flexão das pernas, permitindo ao mesmo tempo, solicitações de valor superior. O vão deste tipo de asna está normalmente limitado a 8m. Geralmente as ligações entre elementos das asnas de Palladio são realizadas por entalhes. No entanto, em muitos casos as ligações são realizadas por entalhes e elementos metálicos como por exemplo as braçadeiras ou esquadros nas ligações perna-linha, o pé-de-galinha nas ligações perna-pendural e pendural-escoras e os T's nas ligações perna-escora (Figura 6.1). É de referir que a colocação destes elementos permite minimizar eventuais defeitos na execução dos entalhes.

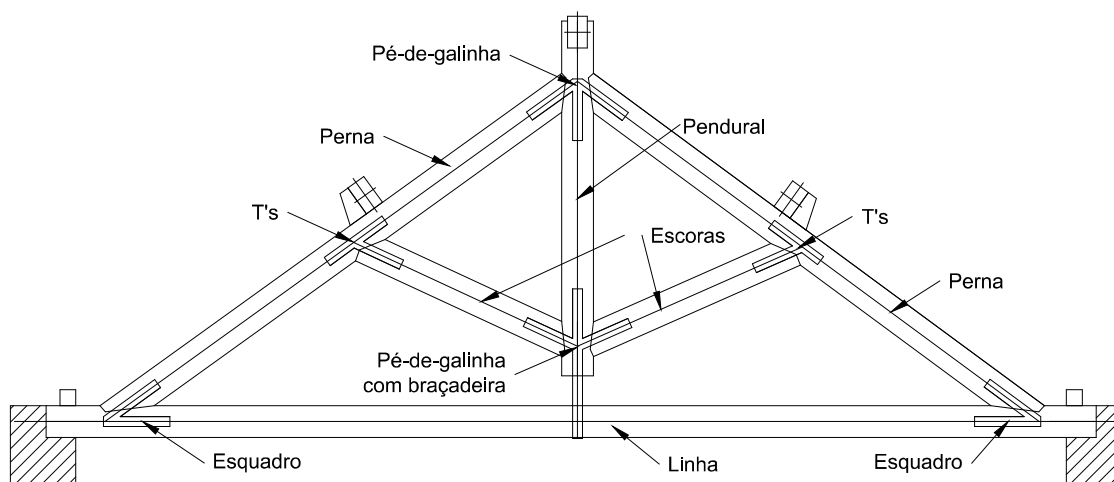


Figura 6.1 – Configuração e elementos de uma asna de Palladio.

### 6.3 APRESENTAÇÃO DA FOLHA DE CÁLCULO

Durante a apresentação da folha de cálculo serão indicados os passos utilizados para realizar a verificação de segurança ou dimensionamento de uma asna de Palladio. De modo a uma melhor compreensão do seu funcionamento, no decorrer da apresentação será ilustrado um caso de verificação de segurança de uma asna de Palladio não simétrica, com secções e classes resistentes diferentes entre elementos. Esta configuração, características materiais e geométricas foram pensadas com o propósito de mostrar as potencialidades da folha.

#### 6.3.1 Introdução de dados

A folha de cálculo realizada no período de estágio procura ser de fácil uso e fácil perceção dos resultados. Na sua primeira folha denominada de “Dados-Resultados” é realizada a introdução de todos os dados necessários para o dimensionamento/verificação de segurança da estrutura.

##### 6.3.1.1 Introdução da configuração da asna

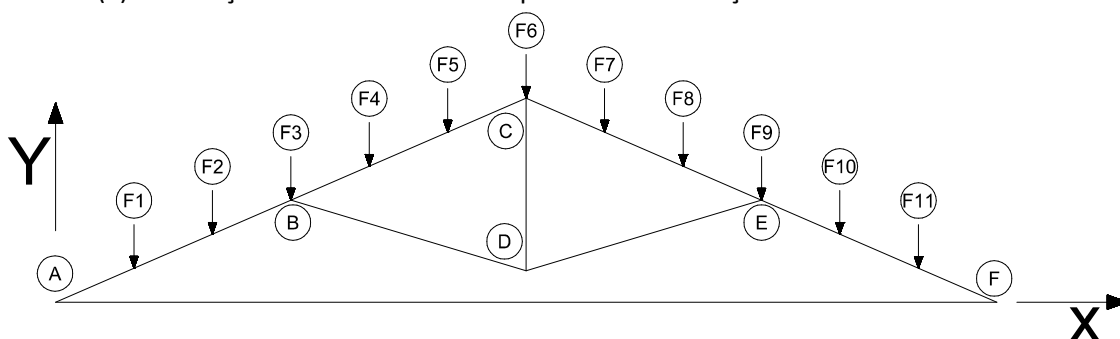
A introdução da configuração da estrutura da asna é feita através de um sistema de coordenadas (X e Y) dos pontos de cruzamento de elementos isolados da asna enumerados de A a F na Figura 6.2b. Através destas coordenadas (Figura 6.2a) a folha é capaz de desenhar os diferentes elementos de modo a que o utilizador tenha uma melhor perceção dos dados introduzidos, podendo assim facilmente verificar se os dados estão corretos (Figura 6.2c).

A estrutura pode ter qualquer configuração sendo que o pendural tem de ser vertical e a linha horizontal. Os restantes elementos não possuem qualquer impedimento relativamente à sua configuração.

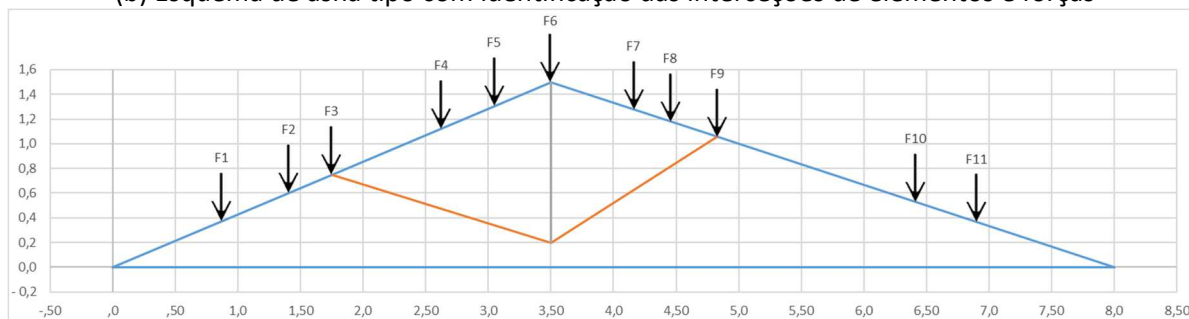
O sistema de coordenadas é também utilizado para a introdução dos pontos de aplicação das forças nas pernas da asna. É de salientar que, mesmo não sendo necessário utilizar o número máximo de forças (onze forças), todas as forças precisam de ter coordenadas no respetivo tramo e com a mesma ordem indicada na Figura 6.2b. A representação da localização das cargas também é indicada juntamente com a representação da estrutura (Figura 6.2b).

Cordenadas dos pontos:		
	X (m)	Y (m)
A	0,000	0,000
B	1,750	0,750
C	3,500	1,500
D	3,500	0,200
E	4,830	1,057
F	8,000	0,000

(a) Introdução de coordenadas dos pontos de interceção de elementos da asna



(b) Esquema de asna tipo com identificação das interceções de elementos e forças



(c) Exemplo de configuração de asna e carregamento obtido através da introdução de coordenadas

Figura 6.2 – Introdução do esquema da asna e forças através de coordenadas.

### 6.3.1.2 Introdução de dados das cargas

A folha calcula automaticamente o valor das cargas permanentes (G) e variáveis (Q) de cálculo, mediante a colocação do espaçamento entre asnas, a largura de influência, o valor das cargas permanentes ( $G_k$ ) por metro quadrado e as cargas da sobrecarga ( $Q_k$ ) por metro quadrado. Na Figura 6.3 é ilustrada a tabela da folha de cálculo destinada à introdução dos dados relativos às cargas atuantes na estrutura.

Coordenadas das forças		Espaçamento entre asnas	Largura de influência	Cargas Permanentes (Gk)	Sobrecarga (Qk)	Psd, ELU (G+Q)	Psd, ELU (G)	Psd, ELS, G	Psd, ELS, Q	
	X (m)	Y (m)	(m)	(m)	(KN/m <sup>2</sup> )	(KN/m <sup>2</sup> )	(KN)	(KN)	(kN)	
F1	0,875	0,375	3,500	0,950	0,800	0,300	5,087	3,591	2,660	0,998
F2	1,409	0,604	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F3	1,750	0,750	3,500	0,950	0,800	0,300	5,087	3,591	2,660	0,998
F4	2,625	1,125	3,500	0,950	0,800	0,300	5,087	3,591	2,660	0,998
F5	3,050	1,307	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F6	3,500	1,500	3,500	0,800	0,800	0,300	4,284	3,024	2,240	0,840
F7	4,165	1,278	3,500	0,700	0,800	0,300	3,749	2,646	1,960	0,735
F8	4,458	1,181	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F9	4,830	1,057	3,500	1,200	0,800	0,300	6,426	4,536	3,360	1,260
F10	6,415	0,528	3,500	1,700	0,800	0,300	9,104	6,426	4,760	1,785
F11	6,905	0,365	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Figura 6.3 – Introdução de dados das forças.

### 6.3.1.3 Introdução de características materiais, geométricas e dados para o dimensionamento

A introdução dos dados relativos às características dos materiais e geométricas dos diferentes elementos é realizada numa tabela na folha “Dados-Resultados” onde é seleccionada a classe resistente da madeira e introduzida a secção dos elementos.

Barras	Elemento	Tipo de madeira				Secção	b ou ø (mm)	h (mm)
		Maciça	C22	GL24h	C22			
AB	Perna	Maciça	C22	GL24h	C22	Circular	130	0
BC	Perna	Maciça	C22	GL24h	C22	Circular	130	0
BD	Escora	Maciça	C18	GL24h	C18	Rectangular	80	100
DC	Pendural	Maciça	C18	GL24h	C18	Rectangular	100	100
DE	Escora	Maciça	C18	GL24h	C18	Rectangular	70	100
CE	Perna	Lamelada	C18	GL24h	GL24h	Rectangular	80	220
EF	Perna	Lamelada	C18	GL24h	GL24h	Rectangular	80	220
AF	Linha	Maciça	D30	GL24h	D30	Circular	150	0

Figura 6.4 – Introdução de características materiais e geométricas.

A madeira pode ser do tipo maciça ou lamelada colada. No caso da madeira maciça, a folha de cálculo possui as características mecânicas relativas a madeira resinosa e folhosa. No que diz respeito as secções dos elementos, podem ser circulares ou retangular.

### 6.3.1.4 Introdução de dados para o dimensionamento/verificação de segurança

A folha de cálculo é capaz de calcular todos os dados necessários para o dimensionamento ou verificação de segurança que dependam da geometria dos elementos, características mecânicas ou das cargas. No caso da verificação do risco de instabilidade das peças devido à instabilidade lateral/torsional (bambeamento) e a encurvadura, a folha não é capaz de calcular os comprimentos efetivos, uma vez que estes não dependem apenas dos parâmetros indicados anteriormente. Em muitos casos a ligação entre madres e pernas pode consistir num travamento à perna, sendo assim, os comprimentos efetivos para o cálculo do risco de instabilidade por encurvadura ou bambeamento das pernas são um input da responsabilidade do utilizador.

### 6.3.2 Cálculo dos esforços ao longo das barras

O cálculo dos esforços nos elementos da asna é realizado pelo método dos deslocamentos dos nós. Segundo (Freitas & Fernandes, 2015), o método dos deslocamentos baseia-se essencialmente em substituir a estrutura a analisar por um sistema de elementos cinematicamente determinados, designados por “estrutura-base”. As incógnitas do método dos deslocamentos, são como sugere o próprio nome, os deslocamentos dos nós inseridos na estrutura em estudo. O autor refere ainda que na conceção do método dos deslocamentos, a resposta da estrutura é consequência da ação simultânea de dois grupos de solicitações, nomeadamente o deslocamento independente e o carregamento.

O método dos deslocamentos está intrinsecamente ligado a Lei de Hooke que refere:

$$F = K \times \Delta l \quad (6.1)$$

Em que

– $F$  é a força;

– $K$  é a rigidez;

– $\Delta l$  é o deslocamento.

Segundo (Trigo, et al., 2012), o método dos deslocamentos é mais demorado para a resolução manual de estruturas, mas trata-se de um método adequado para a resolução através de cálculo automático computadorizado.

Em termos práticos o método consiste na determinação da matriz de rigidez global da estrutura, e a partir da qual, com equações de equilíbrio, são determinados os deslocamentos dos nós e as reações de apoio. A matriz de rigidez da estrutura é obtida através de assemblagem das várias matrizes de rigidez os elementos (estrutura-base) que constituem a estrutura.



No caso da asna de Palladio cada elemento (pernas, linha, escoras e pendural) foi considerado como biarticulado. As pernas são divididas em dois tramos, possuindo continuidade de momentos entre os dois tramos. Esta condição implicou a consideração de um grau de liberdade de rotação nos pontos B e E.

No total a estrutura possui 11 graus de liberdade representados na Figura 6.5.

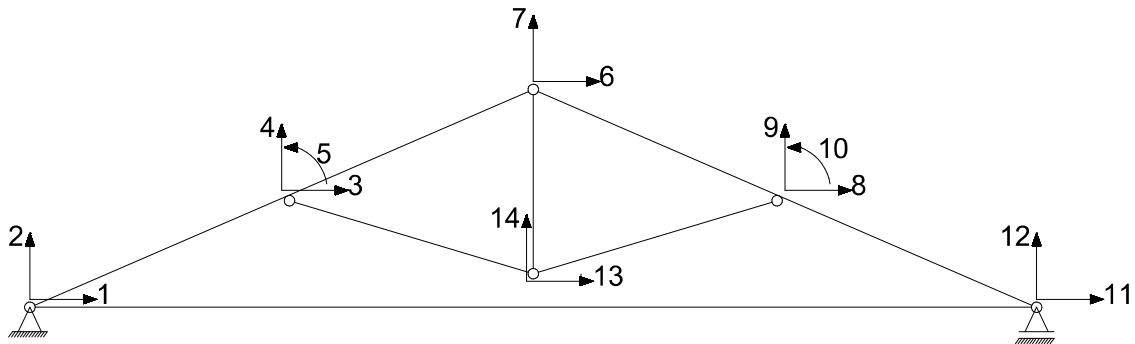


Figura 6.5 – Esquema estrutural da asna de Palladio e representação dos graus de liberdade.

A estrutura da asna de Palladio representada na Figura 6.5, possui então uma matriz de rigidez com onze linhas e onze colunas que é calculada automaticamente para cada geometria, características dos materiais ou carregamentos impostos pelo utilizador.

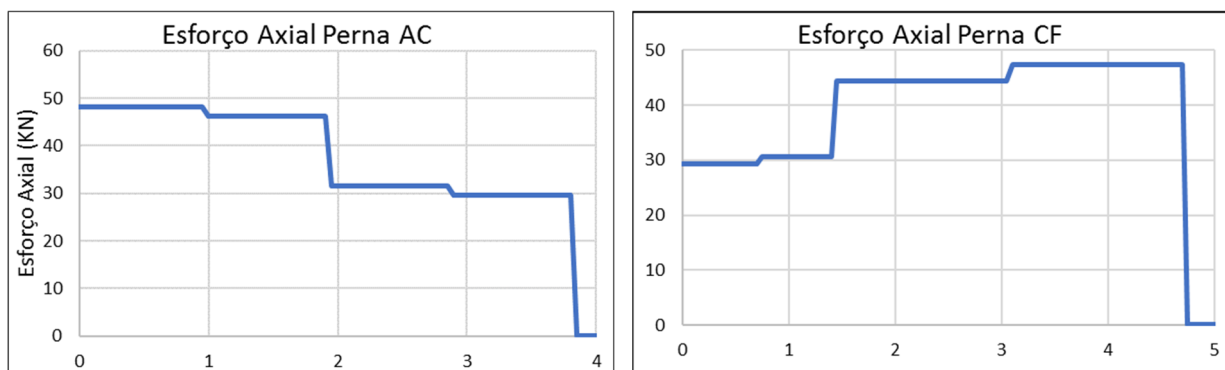
Através da resolução do sistema da expressão (6.2) a folha de cálculo obtém os deslocamentos dos nós e as reações.

$$[K][\Delta] = [F] + [R] \quad (6.2)$$

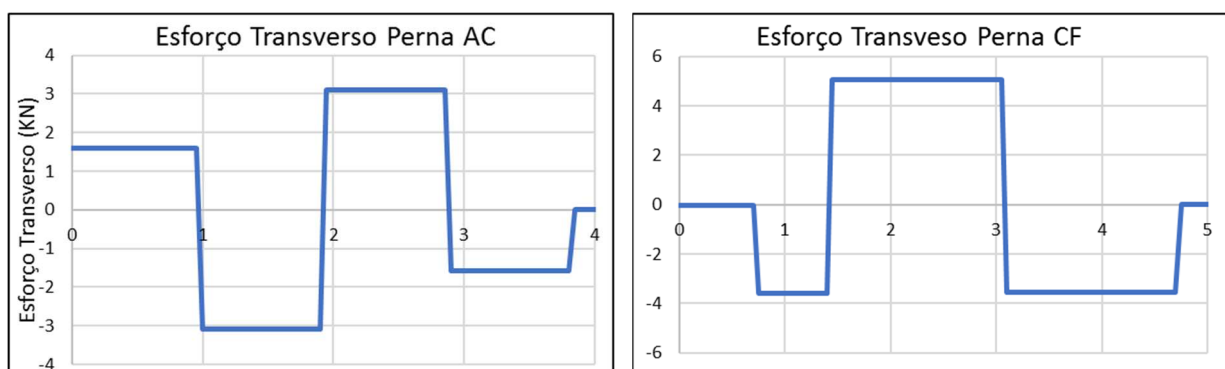
Em que:

- $[K]$  é a matriz de rigidez da estrutura;
- $[\Delta]$  é o vetor de deslocamentos;
- $[F]$  é o vetor das forças equivalentes nodais;
- $[R]$  é o vetor das reações.

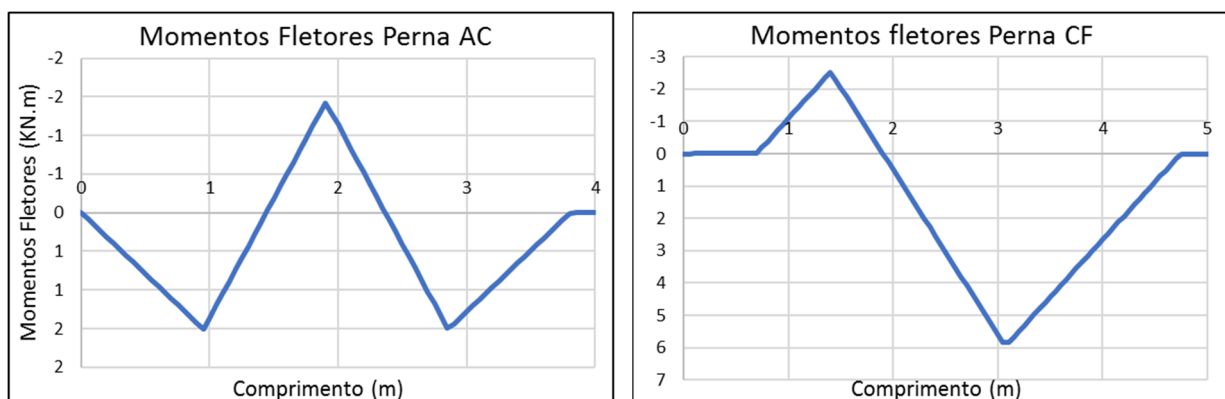
Após a obtenção dos deslocamentos nodais é possível obter os esforços ao longo das barras desenhando assim os gráficos de esforços axiais, esforços transversos e momentos. Seguidamente serão apresentados os diagramas de esforços das pernas AC e CF referentes as propriedades dos materiais indicadas na Figura 6.4 e a geometria da asna indicada na Figura 6.2 e Figura 6.3.



(a) Diagramas de esforços axiais



(b) Diagramas de esforços transversos



(c) Diagramas de momentos fletores

Figura 6.6 – Diagramas de esforços da perna AC e perna CF

### 6.3.3 Cálculo dos deslocamentos ao longo das pernas da asna

O cálculo dos deslocamentos é apenas realizado para as pernas da asna, uma vez que são o único elemento com momentos fletores relevantes. A linha da asna também possui momentos fletores, mas neste caso são de reduzido valor, uma vez que são relativos apenas ao peso próprio do elemento. Neste tipo de configuração de asna, a linha está ligada ao pendural com a função de limitar os deslocamentos verticais da linha. Relativamente aos restantes elementos da asna, como pendural e escoras, possuindo apenas esforços axiais e não possuindo momentos fletores, não se prevê que se deformem. Neste sentido, a folha de cálculo apenas faz a verificação aos estados limites de serviço (ELS) para as pernas, sendo este o elemento mais condicionante.

O cálculo dos deslocamento ao longo das barras das pernas é realizado nas folhas “Desl,ELS\_(Gk)” e “Desl,ELS\_(Qk)”. Para a determinação do deslocamento final máximo ( $W_{\text{net,fin}}$ ) é necessário conhecer separadamente os deslocamentos devido às cargas permanentes e variáveis características.

Através do método dos deslocamentos referenciando anteriormente, são obtidos deslocamentos nos graus de liberdade indicados na Figura 6.5, mas no caso da asna de Palladio, se a estrutura possuir cargas aplicadas nas barras, os deslocamentos máximos poderão localizar-se ao longo das barras e não nos nós da estrutura. Deste modo, torna-se importante caracterizar os deslocamentos ao longo das pernas da asna de Palladio.

A determinação dos deslocamentos ao longo das pernas da asna de Palladio na folha de cálculo é realizada através do método da integração da elástica, que com base nos deslocamentos dos nós da estrutura e os diagramas de momentos fletores obtidos pelo método dos deslocamentos, calcula as deformações ao longo da barra.

$$y''(x) = -\frac{M}{EI}(z) \quad (6.3)$$

Através da primeira integração da expressão (6.3) são obtidas as rotações ao longo da barra:

$$\theta(x) = \theta_i \pm \int_{x=0}^x \frac{M}{EI}(x) dx \quad (6.4)$$

Em que  $\theta_i$  é a rotação inicial da barra obtida pelo método dos deslocamentos.

Integrando a função das rotações são obtidos os deslocamentos ao longo da barra:

$$y(x) = y_i \pm \int_{x=0}^x \theta(x) dx \quad (6.5)$$

Em que  $y_i$  é o deslocamento inicial da barra obtido pelo método dos deslocamentos.

A utilização do método dos deslocamentos e o método da integração da elástica na folha de cálculo permite calcular os deslocamentos das pernas no plano da asna. Os deslocamentos ao longo da barra obtidos pelo método da integração da elástica têm inerentes o deslocamento do nó C, dado que o método utiliza os deslocamentos e rotações dos elementos da estrutura. Na verificação do ELD é necessário conhecer o deslocamento máximo apenas da perna. Neste sentido foi necessário calcular a expressão da reta auxiliar ( $y = mx + b$ ) que passa nos deslocamentos iniciais e finais da barra. Esta reta é representada a laranja na Figura 6.7b. Subtraindo as ordenadas do gráfico de deslocamentos as ordenadas da reta auxiliar, são obtidas as deformações apenas da barra.

Nas seguintes figuras são apresentados os gráficos de deformação das pernas referentes ao caso descrito anteriormente. Os deslocamentos apresentados nas seguintes figuras são relativos às cargas permanentes características ( $G_k$ ).

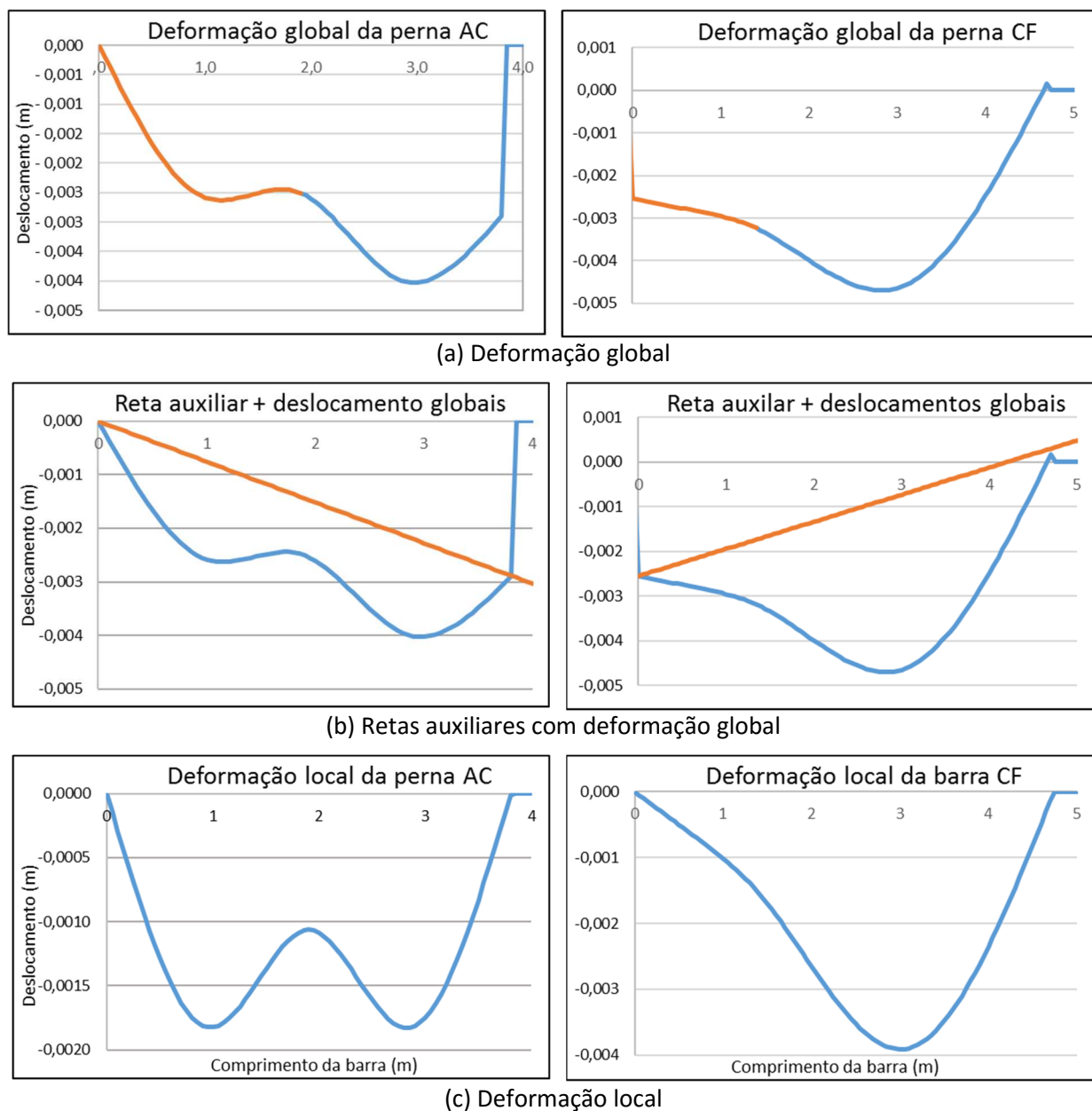


Figura 6.7 – Deformação das pernas no plano da asna.

### 6.3.4 Dimensionamento/Verificação de segurança

O dimensionamento/verificação de segurança é realizado nas folhas denominadas de “Dim,ELU\_(G+Q)”, “Dim,ELU\_(G)” e “Dim,ELS” segundo o Eurocódigo 5. As verificações de segurança de ELU e ELS realizadas pela folha de cálculo já foram referenciadas e apresentadas anteriormente no capítulo 3.5.4 do presente relatório.

A verificação de segurança em ELU é realizada para as seguintes combinações de ações:

$$Comb_{ELU(G+Q)} = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \times G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} \quad (6.6)$$

$$\gamma_{G,j} = 1.35$$

$$\gamma_{Q,i} = 1.5$$

$$Comb_{ELU(G)} = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \times G_{k,j} \quad (6.7)$$

$$\gamma_{G,j} = 1.35$$

Na verificação de segurança da asna de Palladio é utilizada uma combinação de ações com cargas permanentes e sobrecargas e uma combinação de ações com apenas cargas permanentes. As características mecânicas da madeira são determinadas em função da duração das ações de mais curta duração, sendo que, quanto mais curta a duração da ação, maiores são as características mecânicas da madeira. No caso das sobrecargas serem muito reduzidas em relação aos pesos próprios, a combinação de ações com apenas cargas permanentes, pode ser condicionante. Neste sentido, na folha de cálculo são consideradas as duas combinações de ações descritas acima.

A folha seleciona automaticamente os esforços para a verificação de segurança dos diferentes elementos da asna. No caso das pernas, a folha verifica a segurança em dois pontos de cada perna da asna, o primeiro nos tramos inferiores das pernas (AB e EF) e o segundo nos tramos superiores (BC e CE). A seleção dos esforços para o cálculo é realizada em função do momento máximo em cada tramo. A folha determina máximo momento atuante absoluto e esforço axial correspondente para a verificação da segurança à flexão composta com compressão.

No caso das escoras, pendural e linha, como os esforços são constantes ao longo destas barras, a verificação de segurança é realizada apenas em um ponto por elemento.

G+Q			
<b>Perna AC Tramo 1</b>		<b>Perna AC tramo 2</b>	
Momento máximo	1,51	Momento máximo	1,49
Axial correspondente	48,29	Axial correspondente	31,64
Transverso correspondente	1,58	Transverso correspondente	3,09
Axial máximo	48,29	Axial máximo	31,64
Transverso máximo	3,09	Transverso máximo	3,09
<b>Perna CF tramo 1</b>		<b>Perna CF tramo 2</b>	
Momento máximo	2,53	Momento máximo	5,85
Axial correspondente	30,56	Axial correspondente	47,32
Transverso correspondente	3,59	Transverso correspondente	3,56
Axial máximo	30,56	Axial máximo	47,32
Transverso máximo	3,59	Transverso máximo	5,08
<b>Escora BD</b>		<b>Escora DE</b>	
Axial máximo	16,67	Axial máximo	18,92
<b>Pendural CD</b>		<b>Linha</b>	
Axial máximo	-15,25	Axial máximo	-43,76
		momento ( $pl^2/8$ )	0,12

Figura 6.8 – Esforços atuantes nos elementos da asna em ELU (G+Q).

Nas seguintes figuras são apresentadas as tabelas de verificação de segurança de todos os elementos da estrutura em análise para a combinação ELU (G+Q).

Perna AC tramo 1					Perna AC tramo 2						
Compressão			Flexão		Compressão			Flexão			
Nsd =	48,29	KN	Msd,y =	1,51	KN.m	Nsd =	31,64	KN	Msd,y =	1,49	KN.m
$\sigma_{sd,z}$ =	3,64	MPa	$\sigma_{sd,y}$ =	6,98	MPa	$\sigma_{sd,z}$ =	2,38	MPa	$\sigma_{sd,y}$ =	6,91	MPa
NRd =	163,36	KN	MRd,y =	2,92	KN.m	NRd =	163,36	KN	MRd,y =	2,92	KN.m
Rácio =	0,44		Rácio =	0,52	OK	Rácio =	0,29		Rácio =	0,51	OK
$l_{v,y}$ =	1,90		$l_{ef}$ =	1,00		$l_{v,y}$ =	1,90		$l_{ef}$ =	1,00	
$l_{v,z}$ =	1,90		$\sigma_{crit}$ =	Não se aplica	MPa	$l_{v,z}$ =	1,90		$\sigma_{crit}$ =	Não se aplica	MPa
$i_y$ =	32,50		$\lambda_{rel,m}$ =	Não se aplica		$i_y$ =	32,50		$\lambda_{rel,m}$ =	Não se aplica	
$i_z$ =	32,50		$k_{crit}$ =	Não se aplica		$i_z$ =	32,50		$k_{crit}$ =	Não se aplica	
$\lambda_y$ =	58,46		$\sigma_{Rd,y}$ =	Não se aplica	MPa	$\lambda_y$ =	58,46		$\sigma_{Rd,y}$ =	Não se aplica	MPa
$\lambda_z$ =	58,46		Rácio =	Não se aplica	OK	$\lambda_z$ =	58,46		Rácio =	Não se aplica	OK
<b>Flexão composta F+C</b>					<b>Flexão composta F+C</b>						
$\lambda_0$ =	57,50		Sem Bambeamento:		$\lambda_0$ =	57,50		Sem Bambeamento:			
$\lambda_{rel,y}$ =	1,02		Rácio =	0,95		$\lambda_{rel,y}$ =	1,02		Rácio =	0,80	
$\lambda_{rel,z}$ =	1,02		Com Bambeamento		$\lambda_{rel,z}$ =	1,02		Com Bambeamento			
$\beta$ =	0,20		Rácio =	Não se aplica		$\beta$ =	0,20		Rácio =	Não se aplica	
$k_y$ =	1,09		<b>Corte</b>					$k_y$ =	1,09		
$k_z$ =	1,09		Vsd =	3,09	KN	$k_z$ =	1,09		Vsd =	3,09	KN
$k_{c,y}$ =	0,68		$\tau_{sd}$ =	0,310516141	MPa	$k_{c,z}$ =	0,68		$\tau_{sd}$ =	0,310516141	MPa
$k_{c,z}$ =	0,68		Rácio =	0,21		$N_{Rd,x}$ =	110,58		Rácio =	0,21	
$N_{Rd,x}$ =	110,58					$N_{Rd,y}$ =	110,58				
$N_{Rd,y}$ =	110,58					Rácio <sub>x</sub> =	0,29				
Rácio <sub>x</sub> =	0,44					Rácio <sub>y</sub> =	0,29				
Rácio <sub>y</sub> =	0,44										

(a) Verificação de segurança do tramo 1

(b) Verificação de segurança do tramo 2

Figura 6.9 – Verificação de segurança da Perna AC.

Perna CF tramo 1						Perna CF tramo 2					
Compressão			Flexão			Compressão			Flexão		
Nsd =	30,56	KN	Msd,y =	2,53	KN.m	Nsd =	47,32	KN	Msd,y =	5,85	KN.m
$\sigma_{sd,z}$ =	1,74	MPa	$\sigma_{sd,y}$ =	3,920677487	MPa	$\sigma_{sd,z}$ =	2,69	MPa	$\sigma_{sd,y}$ =	9,064168064	MPa
NRd =	270,34	KN	MRd,y =	10,903552	KN.m	NRd =	270,34	KN	MRd,y =	10,903552	KN.m
Rácio =	<b>0,18</b>		Rácio =	<b>0,23</b>	<b>OK</b>	Rácio =	<b>0,29</b>		Rácio =	<b>0,54</b>	<b>OK</b>
lv,y =	3,30		lef =	1,70		lv,y =	3,30		lef =	1,70	
lv,z =	1,70		$\sigma_{crit}$ =	125,47	MPa	lv,z =	1,70		$\sigma_{crit}$ =	125,47	MPa
iy =	63,51		$\lambda_{rel,m}$ =	0,44		iy =	63,51		$\lambda_{rel,m}$ =	0,44	
iz =	23,09		kcrit =	1,00		iz =	23,09		kcrit =	1,00	
$\lambda_y$ =	51,96		$\sigma_{Rd,y}$ =	16,90	MPa	$\lambda_y$ =	51,96		$\sigma_{Rd,y}$ =	16,90	MPa
$\lambda_z$ =	73,61		Rácio =	<b>0,23</b>	<b>OK</b>	$\lambda_z$ =	73,61		Rácio =	<b>0,54</b>	<b>OK</b>
			Flexão composta F+C						Flexão composta F+C		
$\lambda_0$ =	62,17		Sem Bambeamento:			$\lambda_0$ =	62,17		Sem Bambeamento:		
$\lambda_{rel,y}$ =	0,84		Rácio =	<b>0,42</b>		$\lambda_{rel,y}$ =	0,84		Rácio =	<b>0,82</b>	
$\lambda_{rel,z}$ =	1,18		Com Bambeamento			$\lambda_{rel,z}$ =	1,18		Com Bambeamento		
$\beta$ =	0,10		Rácio =	<b>0,42</b>		$\beta$ =	0,10		Rácio =	<b>0,82</b>	
ky =	0,88					ky =	0,88				
kz =	1,25		Corte			kz =	1,25		Corte		
kc,y =	0,88					kc,y =	0,88				
kc,z =	0,61		Vsd =	3,59	KN	kc,z =	0,61		Vsd =	5,08	KN
NRd,x =	237,43		$\tau_{sd}$ =	0,456434648	MPa	NRd,x =	237,43		$\tau_{sd}$ =	0,645789634	MPa
NRd,y =	165,81					NRd,y =	165,81				
Rácio <sub>x</sub> =	0,13		Rácio =	<b>0,26</b>		Rácio <sub>x</sub> =	0,20		Rácio =	<b>0,37</b>	
Rácio <sub>y</sub> =	0,18					Rácio <sub>y</sub> =	0,29				

(a) Verificação de segurança do tramo 1

(b) Verificação de segurança do tramo 2

Figura 6.10 – Verificação de segurança da Perna CF.

No caso da peça ser circular, como é o caso da perna AC da estrutura apresentada, a folha não realiza a verificação de fenómenos de instabilidade torsional-lateral (bambeamento), uma vez que este fenómeno só acontece em peças retangulares que possuem momento atuante segundo o eixo de maior inercia. Sendo assim a folha define como não aplicável esta verificação.

Escora BD		
Compressão		
Nsd =	16,67	KN
$\sigma_{m,sd,z}$ =	2,08	MPa
NRd =	88,62	KN
Rácio =	0,90	
$l_{v,y}$ =	2,75	
$l_{v,z}$ =	2,75	
$i_y$ =	28,87	
$i_z$ =	23,09	
$\lambda_y$ =	95,32	
$\lambda_z$ =	119,15	
$\lambda_0$ =	57,35737	
$\lambda_{rel,y}$ =	1,66	
$\lambda_{rel,z}$ =	2,08	
$\beta$ =	0,20	
$k_y$ =	2,02	
$k_z$ =	2,84	
$k_{c,y}$ =	0,32	
$k_{c,z}$ =	0,21	
$N_{Rd,x}$ =	28,04	
$N_{Rd,y}$ =	18,60	
Rácio <sub>x</sub> =	0,59	
Rácio <sub>y</sub> =	0,90	

(a) Verificação de segurança da escora BD

Escora DE		
Compressão		
Nsd =	18,92	KN
$\sigma_{m,sd,z}$ =	2,70	MPa
NRd =	77,54	KN
Rácio =	1,13	
$l_{v,y}$ =	2,37	
$l_{v,z}$ =	2,37	
$i_y$ =	28,87	
$i_z$ =	20,21	
$\lambda_y$ =	82,21	
$\lambda_z$ =	117,45	
$\lambda_0$ =	57,35737	
$\lambda_{rel,y}$ =	1,43	
$\lambda_{rel,z}$ =	2,05	
$\beta$ =	0,20	
$k_y$ =	1,64	
$k_z$ =	2,77	
$k_{c,y}$ =	0,41	
$k_{c,z}$ =	0,22	
$N_{Rd,x}$ =	31,79	
$N_{Rd,y}$ =	16,72	
Rácio <sub>x</sub> =	0,60	
Rácio <sub>y</sub> =	1,13	

(b) Verificação de segurança da escora DE

Figura 6.11 - Verificação de segurança das escoras BD e DE.

Pendural CD		
tração		
Nsd =	-15,25	kN
$\sigma_{m,sd,z}$ =	-1,52	Mpa
NRd =	67,69	KN
Rácio =	0,23	

(a) Verificação de segurança do pendural CD

Linha					
tração		Flexão			
Nsd =	-43,76	kN	Msd, y =	0,12	KN.m
$\sigma_{m,sd,z}$ =	-4,38	Mpa	$\sigma_{m,sd,y}$ =	0,37	MPa
NRd =	195,75	KN	MRd, y =	6,12	KN.m
Rácio =	0,22		Rácio =	0,02	OK
Flexão composta N+T					
Rácio =	0,24				

(b) Verificação de segurança da linha AF

Figura 6.12 – Verificações de segurança do pendura CD e Linha AF.

A determinação das deformações instantâneas ( $u_{inst}$ ) é realizada com base na combinação característica das ações permanentes e variáveis separadamente. A determinação das deformações finais ( $u_{fin}$ ) é realizada com base na combinação de ações quase-permanente.

Os valores de  $u_{inst,G}$  e  $u_{inst,Q}$  são calculados conforme descrito no capítulo 6.3.3. A folha de cálculo seleciona automaticamente os máximos deslocamentos instantâneos em cada elemento e calcula o deslocamento final em função da classe de serviço e o tipo de madeira.



	Perna AC	Perna CF
Uinst G (mm)=	1,83	3,91
Uinst Q (mm)=	0,69	1,47
Ufin G (mm)=	3,29	7,04
Ufin Q (mm)=	0,79	1,70

Figura 6.13 –Resumo dos deslocamentos máximos das pernas.

A verificação é realizada através da comparação dos deslocamentos totais com o limite imposto pelo Eurocódigo.

	uinst,G (mm)	uinst,Q (mm)	uinst,total (mm)	1º Critério u <sub>inst</sub> ≤l/300	u <sub>fin</sub> ,G (mm)	u <sub>fin</sub> ,Q (mm)	u <sub>fin</sub> ,total (mm)	2º Critério u <sub>fin</sub> ≤l/250
Perna AC	1,83	0,69	2,51	12,69	3,29	0,79	4,08	15,23
Perna CF	3,91	1,47	5,38	15,81	7,04	1,70	8,74	18,97

Figura 6.14 – Verificação do estado limite de deformação das pernas da asna.

### 6.3.5 Resultados

Na folha “Dados-Resultados” é apresentado um quadro resumo dos rácios de segurança da estrutura para facilitar o dimensionamento ao utilizador uma vez que é nesta mesma folha que são introduzidos os dados da asna. Na seguinte figura, é apresentado o resumo relativo a estrutura em análise.

ELU (G+Q)								
	Flexão simples	Flexão simples (com bambeamento)	compressão	Flexão composta F+C (sem bambeamento)	Flexão composta F+C (com bambeamento)	tração	flexão composta F+T	Corte
Perna AC	0,52	-	0,44	0,95	-	-	-	0,21
Perna CF	0,54	0,54	0,29	0,82	0,82	-	-	0,37
Escora DB	-	-	0,90	-	-	-	-	-
Escora DE	-	-	1,13	-	-	-	-	-
Pendural	-	-	-	-	-	0,23	-	-
Linha	0,02	-	-	-	-	0,22	0,24	-
ELU (G)								
Perna AC	0,49	-	0,41	0,90	-	-	-	0,15
Perna CF	0,50	0,50	0,27	0,77	0,77	-	-	0,26
Escora DB	-	-	0,84	-	-	-	-	-
Escora DE	-	-	1,07	-	-	-	-	-
Pendural	-	-	-	-	-	0,21	-	-
Linha	0,03	-	-	-	-	0,21	0,24	-

Figura 6.15 – Resumo de rácios em ELU para os diferentes elementos da Asna.

## 6.4 CONDIÇÕES DE USO

Algumas das condições de uso da folha de cálculo da asna de Palladio, foram enumeradas ao longo da sua apresentação. Neste capítulo são novamente enumeradas e completadas.

- O pendural tem de ser vertical e a linha horizontal;
- As forças têm de obedecer à ordem descrita na Figura 6.2b, sendo obrigatório possuírem sempre coordenadas dentro da barra, podendo qualquer força ser nula;
- As forças nas barras podem assumir qualquer posição dentro da própria barra, com a condição de ser mantida a ordem exposta na Figura 6.2b;
- As forças F3, F6 e F9 são forças nodais e só podem ser aplicadas nos pontos B, C e E respetivamente;
- Dado a complexidade e variação das condições de travamento das pernas de caso para caso, os comprimentos efetivos para a verificação da instabilidade por bambeamento ou encurvadura são inputs fornecidos pelo utilizador.



## 7 CONCLUSÕES

### 7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estão resumidas neste relatório de estágio as atividades desenvolvidas ao longo do estágio, nomeadamente a realização de trabalhos de inspeção e diagnóstico nas coberturas dos Armazéns de V.N. de Gaia, que procuraram caracterizar devidamente as estruturas das coberturas em madeira e as paredes de alvenaria dos três armazéns em estudo, avaliando posteriormente a segurança estrutural e realizando propostas de intervenção para cada cobertura. A realização dos trabalhos de I&D das coberturas permitiu estudar e compreender melhor as diferentes fases dos trabalhos de I&D, a dependência entre elas e a importância que estas atividades têm para a realização de projetos de reabilitação devidamente fundamentados e com elevado conhecimento sobre as estruturas existentes. É importante referir que a organização de toda a informação da inspeção e ensaios realizados foi muito importante para a realização de um diagnóstico cuidado e devidamente fundamentado. Após a realização dos trabalhos de diagnóstico foi possível definir, com base no estado de conservação e segurança estrutura, o grau de intrusividade necessário para as intervenções nas três coberturas apresentado na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Resumo do diagnóstico das coberturas dos Armazéns de V.N. de Gaia.

	<b>Cobertura F</b>	<b>Cobertura K</b>	<b>Cobertura O</b>
<b>Estado de conservação material</b>	Razoável/mau estado de conservação	Mau estado de conservação	Razoável/mau estado de conservação
<b>Segurança estrutural</b>	Razoável/mau estado	Mau estado	Razoável/mau estado
<b>Grau de intrusividade</b>	Médio	Muito elevado	Médio/elevado

O caso de estudo permitiu o contacto com vários danos estruturais comuns em construções materializadas em madeira e alvenaria de pedra, como o caso de ataques de agentes bióticos e insetos sociais, compreendendo as degradações causadas e debilidades que estes causam nas estruturas.

Os trabalhos de I&D do caso de estudo deram origem a propostas de intervenção definidas com a finalidade de restabelecer as condições de segurança das coberturas, apresentadas resumidamente na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Resumo das propostas de intervenção nas coberturas.

<b>Cobertura F</b>	<b>Cobertura K</b>	<b>Cobertura O</b>
Reforço da linha elevada e pernas das asnas através da colocação de novos elementos de madeira ou chapas metálicas	Substituição integral	Treliçamento e reforço das linhas e pernas das asnas através de colocação de novos elementos de madeira
Contraventamento no plano da cobertura		Tarugamento de todas as madres a meio vão
Substituição/reforço de madres e cumeeiras		Substituição/reforço de madres e cumeeiras

Na realização do projeto de reabilitação para as coberturas da Igreja Santa Cruz em Braga, o segundo caso de estudo, procurou-se manter as características da estrutura, dotando-a da capacidade resistente adequada às cargas que esta suporta. A estrutura apresentava diversos danos estruturais causados por agentes bióticos e insetos sociais. Através dos trabalhos de inspeção e diagnóstico realizados pelo NCREP, foi possível concluir que a estrutura necessitava de intervenções com um grau de intrusividade muito elevado (Tabela 7.3).

Tabela 7.3 – Resumo do diagnóstico das coberturas da Igreja Santa Cruz.

	<b>Nave</b>	<b>Capela-mor</b>	<b>Corpo Anexo</b>
<b>Estado de conservação material</b>	Muito mau estado de conservação	Mau estado de conservação	Mau estado de conservação
<b>Segurança estrutural</b>	-	Razoável estado	Razoável estado
<b>Grau de intrusividade</b>	Muito elevado	Elevado	Elevado

Na nave, dado o seu estado de conservação, não se considerou viável realizar intervenções de reforço, neste sentido foi dimensionada uma nova estrutura em madeira. Relativamente a estrutura da capela-mor, foram mantidas duas asnas através de reforços pontuais de elementos estruturais e dimensionadas novas asnas com uma configuração mais estável e adequada aos níveis de carga a que estes elementos estão sujeitos. No corpo anexo foram mantidas três das cinco madres existentes e introduzidas quatro novas madres. A integração na realização de projetos de reabilitação permitiu

estimular a capacidade de adaptação aos problemas que normalmente surgem na realização da atividade de um engenheiro projetista.

Por fim, no presente relatório foi apresentado o desenvolvimento da folha de cálculo de verificação de segurança estrutural de asnas de Palladio, que procura ser uma mais-valia para o NCREP em trabalhos futuros que possuam coberturas com este tipo de esquema estrutural. A folha de cálculo determina os esforços nas barras através do método dos deslocamentos, fazendo as verificações de segurança em estado limite último para duas combinações de ações e segundo o EC5 (CEN, 2004). A folha calcula também as deformações ao longo das pernas através do método da integração da elástica, fazendo a verificação em estado limite de serviço para estes elementos segundo o EC5 (CEN, 2004).

## **7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Na sequência da realização da folha de cálculo de asnas de Palladio, surgiram alguns aspetos que se consideram interessantes para desenvolvimentos futuros:

- Estender a folha de cálculo a novos esquemas estruturais de asnas comuns em estruturas de madeira, como por exemplo asnas compostas;
- Considerar níveis de encastramento nas ligações entre elementos. As ligações entre elementos das asnas não são completamente rotuladas. Quando reforçadas com parafusos ou com chapas metálicas estas possuem rigidez que pode e deve ser considerada no cálculo dos esforços atuantes;
- Aumentar o número de pontos de verificação de segurança nas pernas da asna. A atual verificação de segurança é realizada em dois pontos considerados mais representativos da condição de carregamento mais desfavorável. Contudo a verificação de mais pontos através de um sistema interativo ou imposto pelo utilizador levaria a um maior rigor na determinação dos rácios máximos de verificação de segurança.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, R., Martitegui, F. e Calleja, J. – Estructuras de madera: diseño y cálculo 2ª ed. Madrid: Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho. AITIM, 2000. ISBN 84-87381-17-0.
- ALMEIDA, C., GUEDES, J., ARÊDE, A. e COSTA, A. – Caracterização geométrica e mecânica de paredes em perpiano de granito. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. 2011, pp. 67-78. [Consult. 8 Jun. 2016]. Disponível em: [http://www-ext.lnec.pt/APAET/pdf/Rev\\_19\\_A7.pdf](http://www-ext.lnec.pt/APAET/pdf/Rev_19_A7.pdf). ISSN 1646-7078.
- ARÊDE, A. e COSTA, A. – Inspeção e Diagnóstico Estrutural de Construções Históricas. A intervenção no Património. *Práticas de Conservação e Reabilitação*. 2002, pp. 55-88. [Consult. 10 Jun. 2016]. Disponível em: [https://sigarra.up.pt/flup/pt/pub\\_geral.show\\_file?pi\\_gdoc\\_id=332947](https://sigarra.up.pt/flup/pt/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=332947).
- BRANCO, J., SANTOS, A. e CRUZ, P. – Asnas Tradicionais de Madeira: Evolução, Comportamento e Reforço com Materiais Compósitos. 2010. [Consult. 19 Jun. 2016]. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/9210/1/RN%2015.pdf>.
- CEN. EN 338 – Structural timber – Strength classes. Brussels, Belgium: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- CEN. Eurocódigo 5 – Projecto de estruturas de Madeira – Parte 1-1: Regras gerais – Regras comuns e regras para edifícios, NP EN 1995-1-1. Norma Europeia. Portugal: IPQ, 2004.
- CEN. Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-1: Acções gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios, NP EN 1991-1-1. Norma Europeia. Portugal: IPQ, 2009a.
- CEN. Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas, NP EN 1990. Norma Europeia. Portugal: IPQ, 2009b.
- COSTA, A. – Apontamentos da disciplina de Estruturas de Madeira e Alvenaria, Versão 2.0. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2015
- COSTA, A., ARÊDE, A., GUEDES, J. e PAUPÉRIO, E. – Metodologia de Intervenção no Património Edificado. 2005, pp. 117-138. [Consult. 9 Jun. 2016]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/67490/2/43511.pdf>.
- FEIO, A. e LOURENÇO, P. B. – Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos. Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres. 2005. [Consult. 15 Jun. 2016]. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/4894>.
- FREITAS, J. e FERNANDES, C. – Análise Elástica de Estruturas Reticuladas. 2015. [Consult. 18 Jun. 2016]. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~ctf/AEI/AEER.pdf>.
- ICOMOS. – Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico do ICOMOS. 2004.
- ILHARCO, T. – Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Diagnóstico e intervenção estrutural. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. Tese de mestrado



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ILHARCO, T., GUEDES, J., COSTA, A. e PAUPÉRIO, E. – Análise de pavimentos de madeira através de ensaios in situ. O caso dos edifícios antigos do Porto. Porto, 2008.

JÚNIOR, J. – Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006. Tese de mestrado.

NCREP. – Apresentação e Portfolio. [consult. 03 Jun. 2016]. Disponível em <http://www.ncrep.pt/section.php?id=1431>, 2016a

NCREP. – Projecto de Estabilidade e Memória Descritiva e Justificativa - Igreja Santa Cruz, Braga. Porto, 2016b

NCREP. – Relatório de Inspeção e Diagnóstico Estrutural - Armazéns de V.N. de Gaia, Cobertura F. Porto, 2016c

NCREP. – Relatório de Inspeção e Diagnóstico Estrutural - Armazéns de V.N. de Gaia, Cobertura K. Porto, 2016d

NCREP. – Relatório de Inspeção e Diagnóstico Estrutural - Armazéns de V.N. de Gaia, Cobertura O. Porto, 2016e

NCREP. – Relatório de Inspeção e Diagnóstico Estrutural - Igreja Santa Cruz, Braga. Porto, 2016f

R.S.A. – Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes - Dec. Lei n.º 235/83 de 31 de Maio. 1983.

TRIGO, J., NEVES, M. e SANTOS, R. – Teoria de Estruturas: Apontamentos das Aulas Teóricas, 2º MÓDULO. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2012.

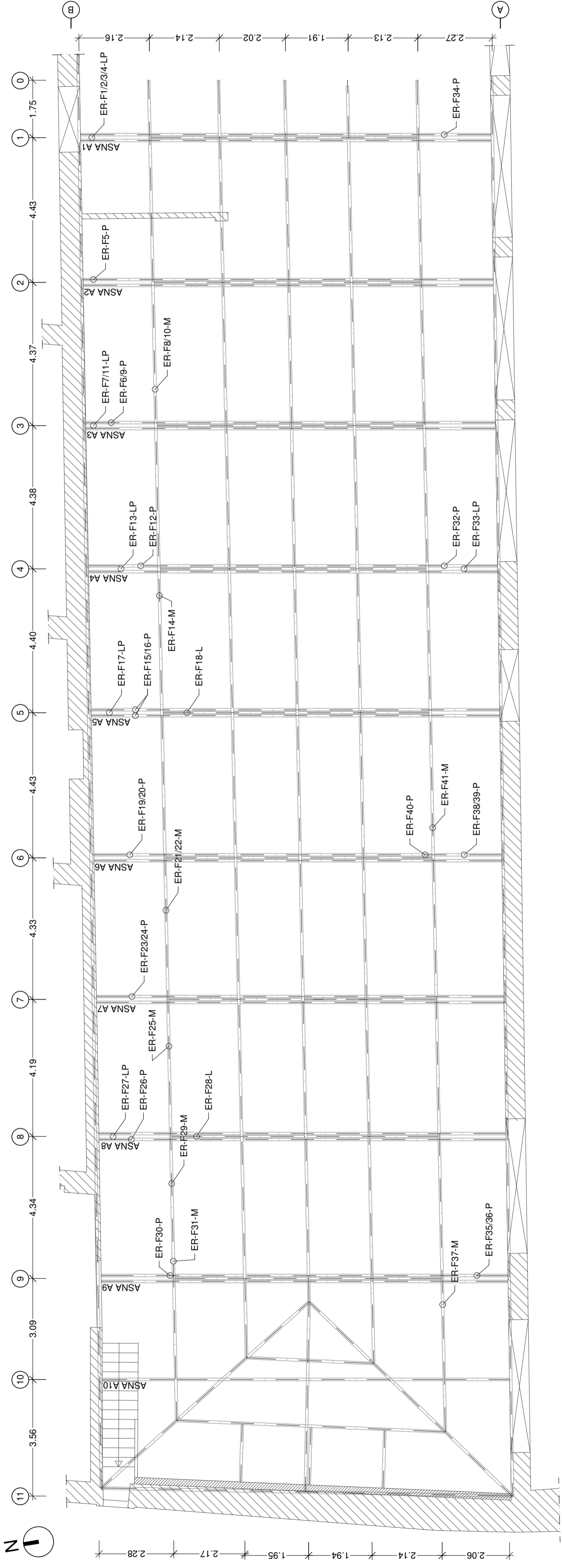
## **ANEXOS**



## **ANEXO I – ARMAZÉNS V.N. DE GAIA, COBERTURA F**

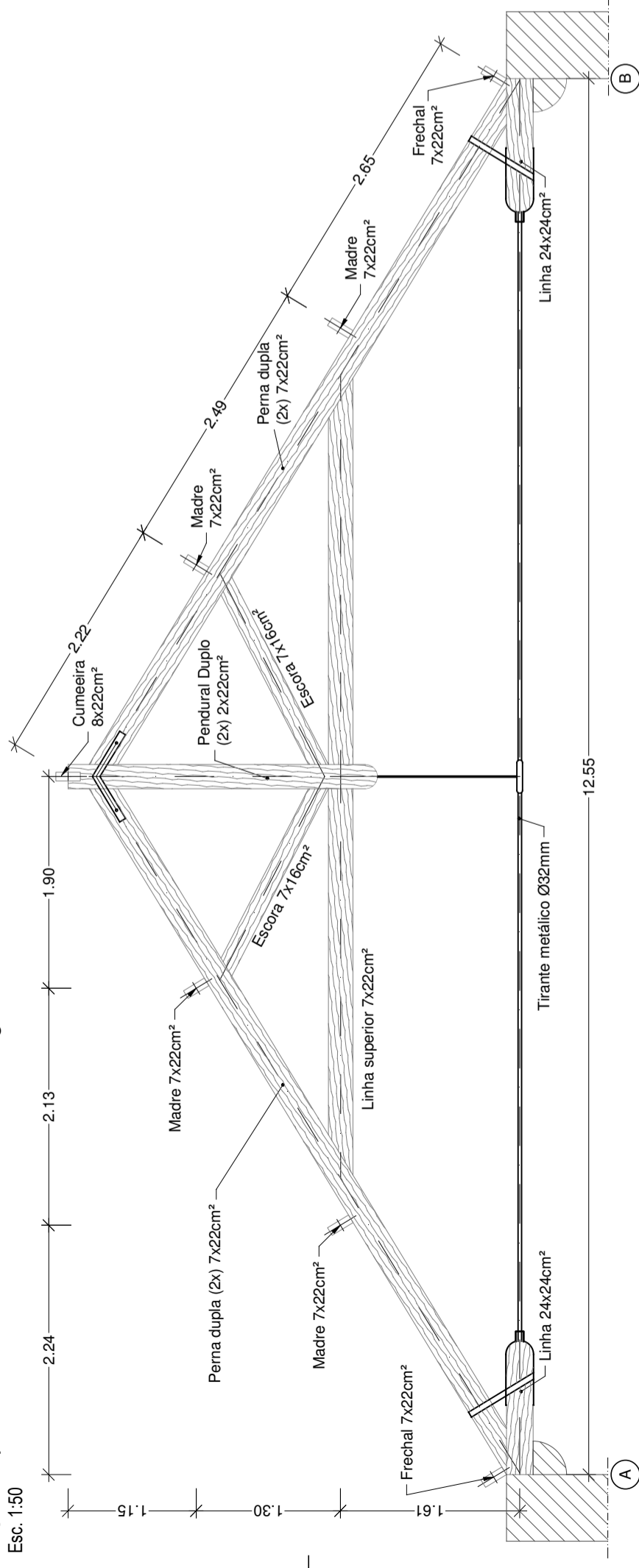
Planta estrutural da cobertura "F"

Esc. 1:100



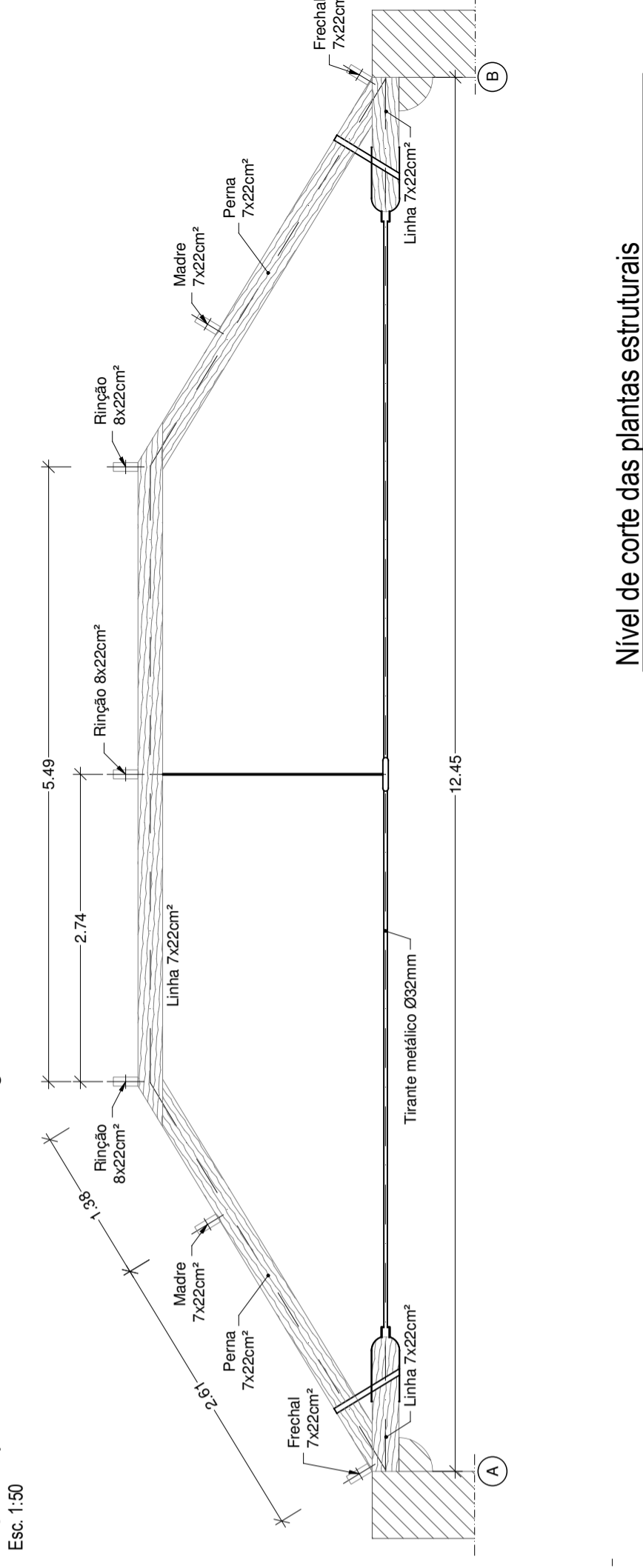
Alçado tipo da Asna A1 a A9 - Levantamento geométrico

Esc. 1:50



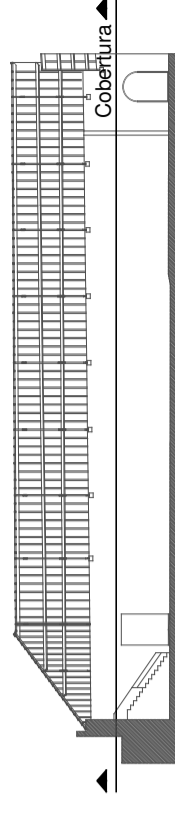
Alçado tipo da Asna 10 - Levantamento geométrico

Esc. 1:50



Nível de corte das plantas estruturais

Sem escala



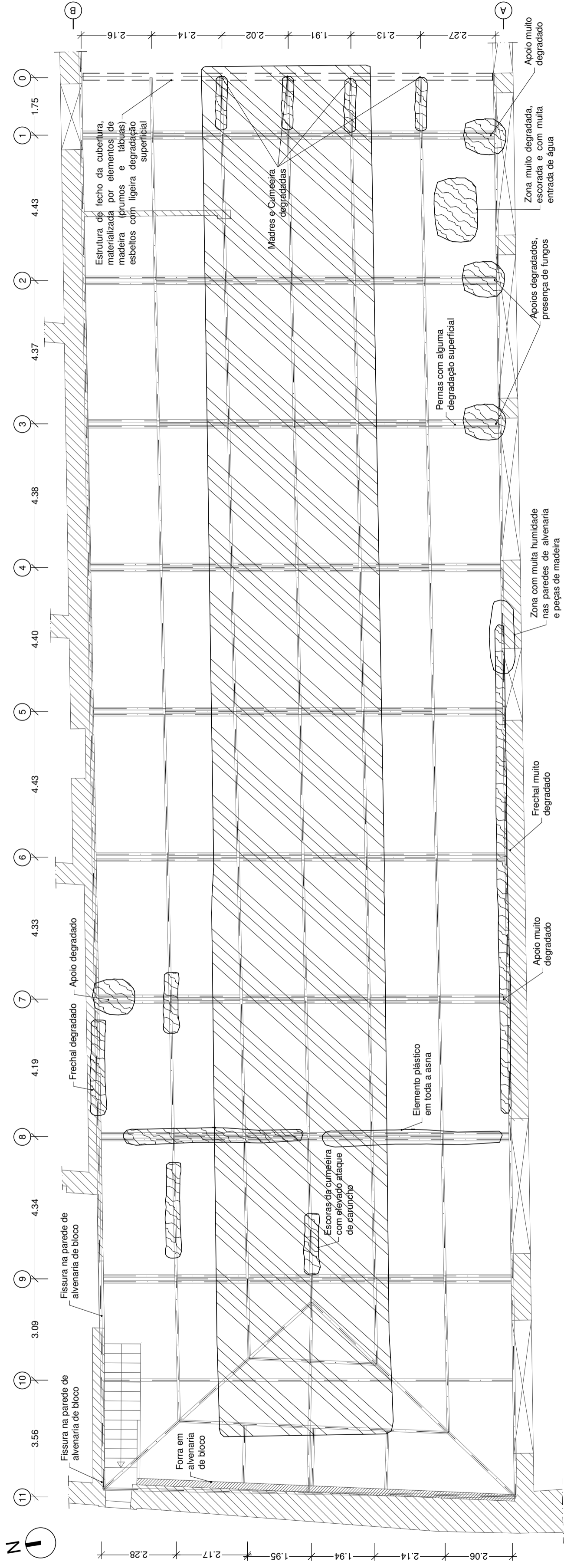
OBRA	Armazéns de V.N de Gaia, Cobertura "F"	FASE DO PROJECTO	RID
PROJECÇÃO	VL, JS	DATA	05/2016
DESENHO	VL, JS	PROCESSO	NCREP_0527A1115
APROVADO	TI, VL	ESCALA	Várias
VERIFICADO	TI, VL	RESENHO Nº	01
LEVANTAMENTO	Levantamento estrutural	REVISÃO Nº	



Este documento é propriedade de NCREP - Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda, não podendo ser copiado, reproduzido no todo ou em parte ou comunicado a terceiros sem a sua expressa autorização e deverá ser devolvido quando solicitado.

### Mapeamento de danos da cobertura "F"

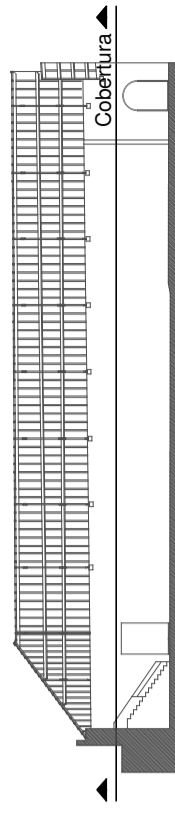
Esc. 1:100



### Danos estruturais Esc. 1:100

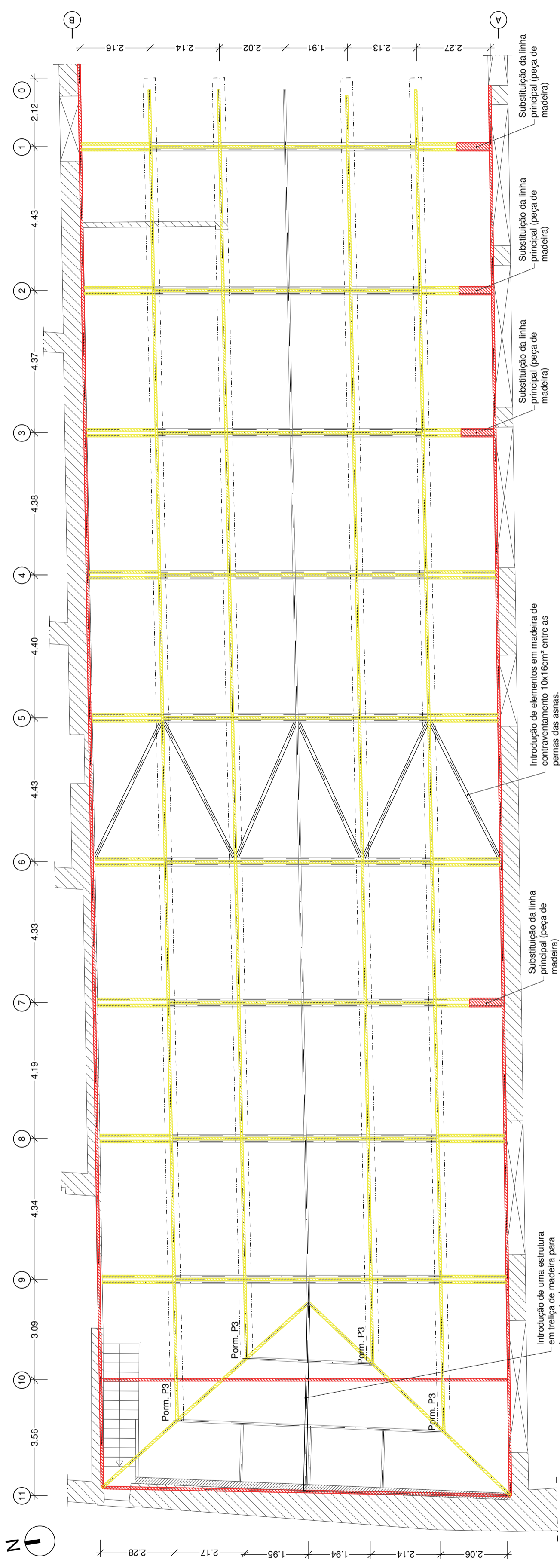
DANOS ESTRUTURAIS	
Deformação das madres	
Degradação dos elementos estruturais de madeira (fungos e/ou caruncho)	
Deformação estrutural	

### Nível de corte das plantas estruturais Sem escala



# Planta estrutural de intervenção da cobertura "F"

Esc. 1:100



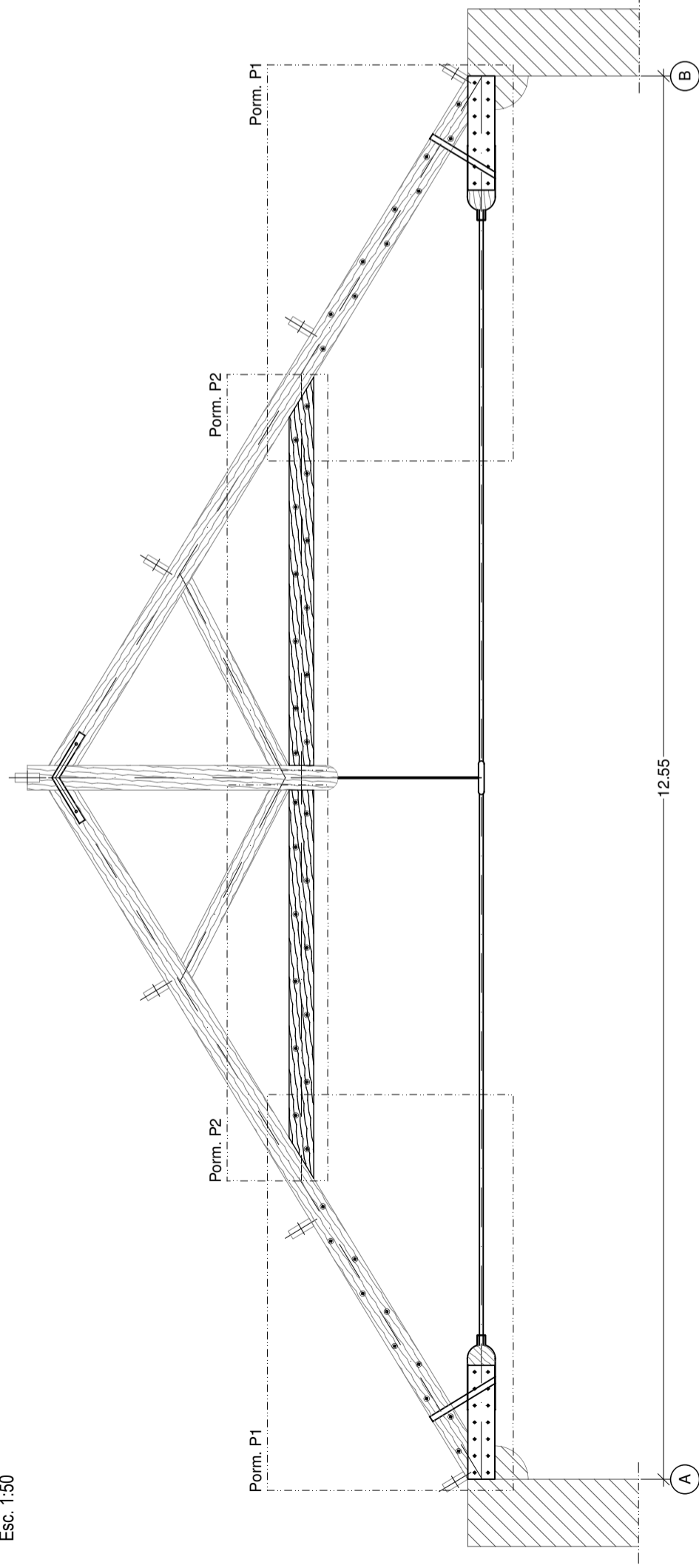
## Legenda

- Elementos estruturais, em mau estado de conservação, a substituir
- Elemento estrutural a manter com reforço

Nota: Todos os elementos de madeira secundários (varas e frechais) são para substituir.

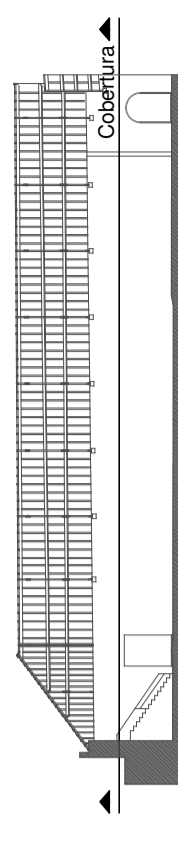
## Alçado tipo - Proposta de intervenção

Esc. 1:50



## Nível de corte das plantas estruturais

Sem escala



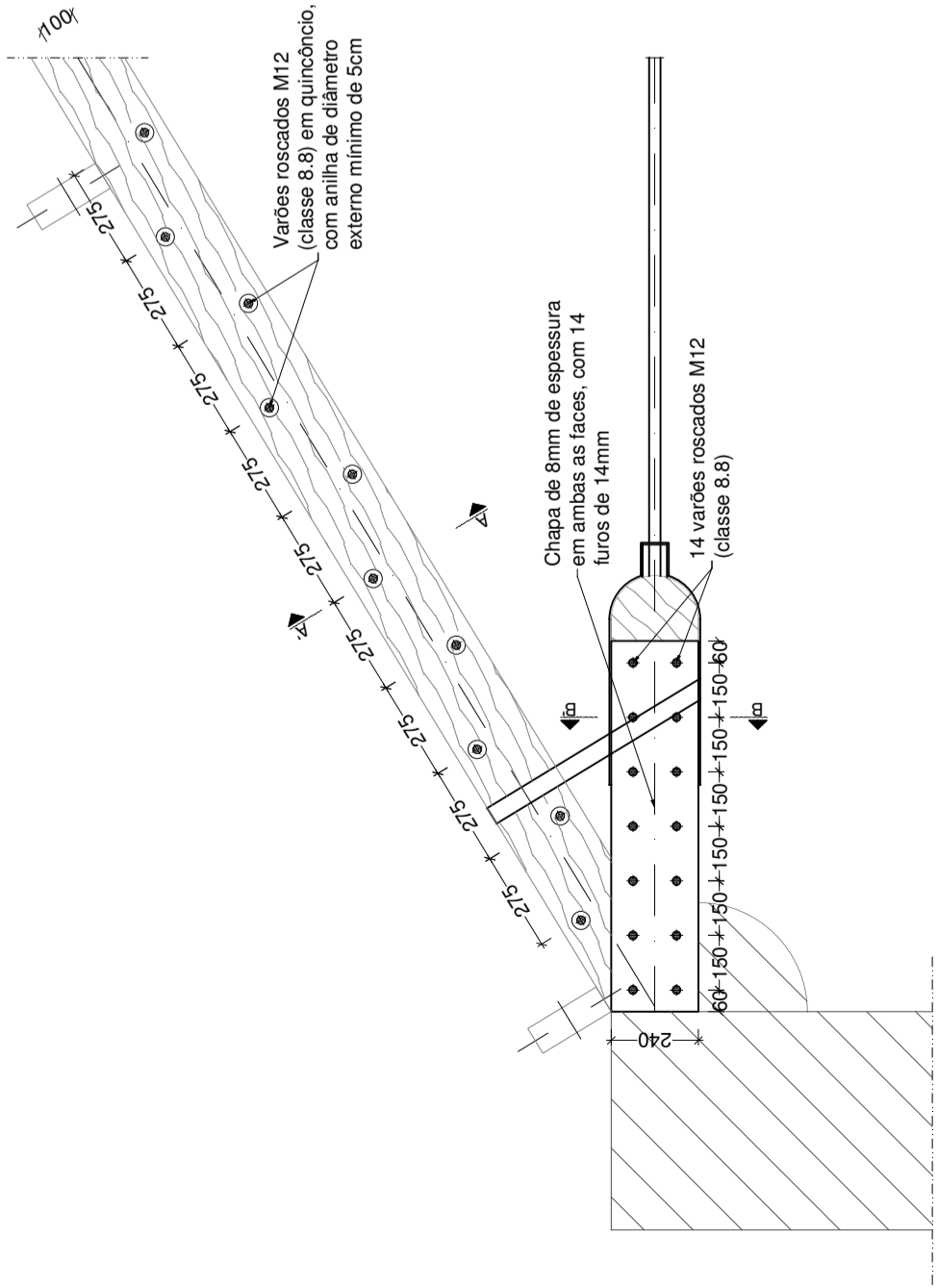
OBRA	Armazéns de V.N de Gaia, Cobertura "F"	DATA	05/2016	FASE DO PROJECTO	RID
DESCRIÇÃO	Relatório de Inspeção e Diagnóstico	PROCESSO	NCREP_0527A1115	ESCALA	RESENHO Nº
PROJECTO	VL, JS	DESENHO	VL, JS	VERIFICOU	TI, VL
Proposta de solução de intervenção		APROVOU	TI, VL	RESENHO Nº	03
		VERIFICOU	TI, VL	ESCALA	Várias



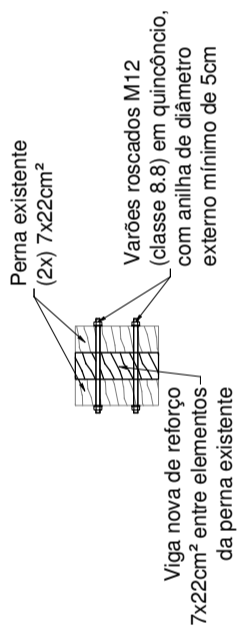
Este documento é propriedade de NCREP - Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda, não podendo ser copiado, reproduzido no todo ou em parte ou comunicado a terceiros sem a sua expressa autorização e deverá ser devolvido quando solicitado.

### Pormenor P1 - Reforço da linha principal e pernas

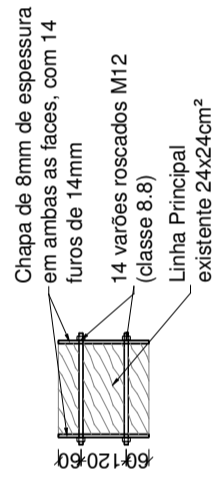
Esc. 1:20



#### Corte A-A'

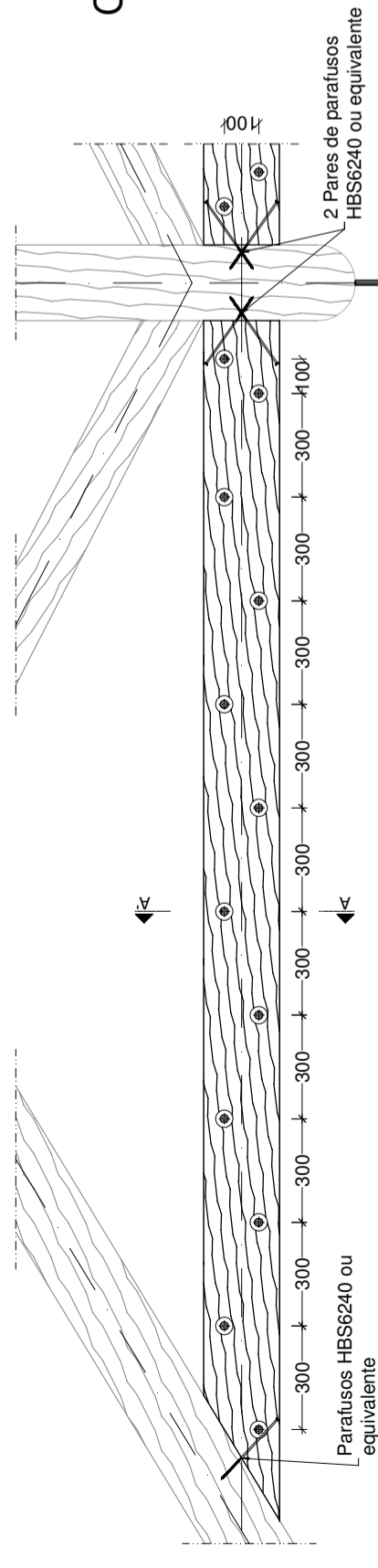


#### Corte B-B'

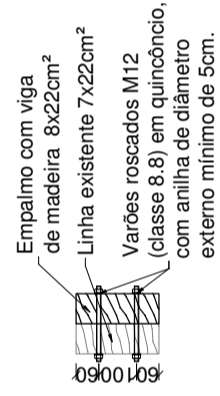


### Pormenor P2 - Reforço da linha

Esc. 1:20



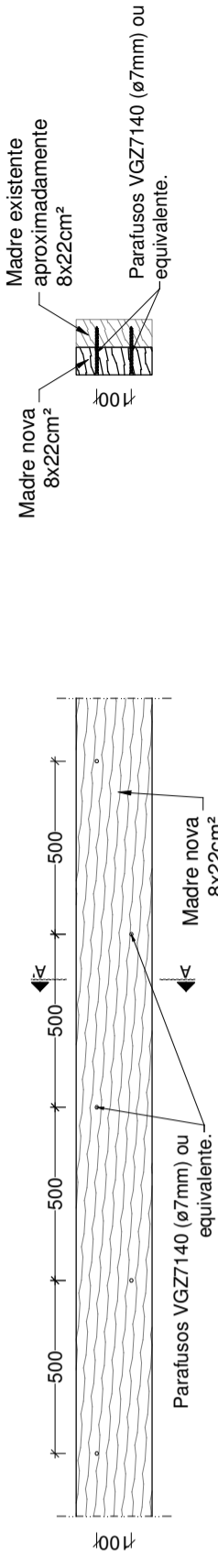
#### Corte A-A'



### Pormenor P3 - Reforço das madres

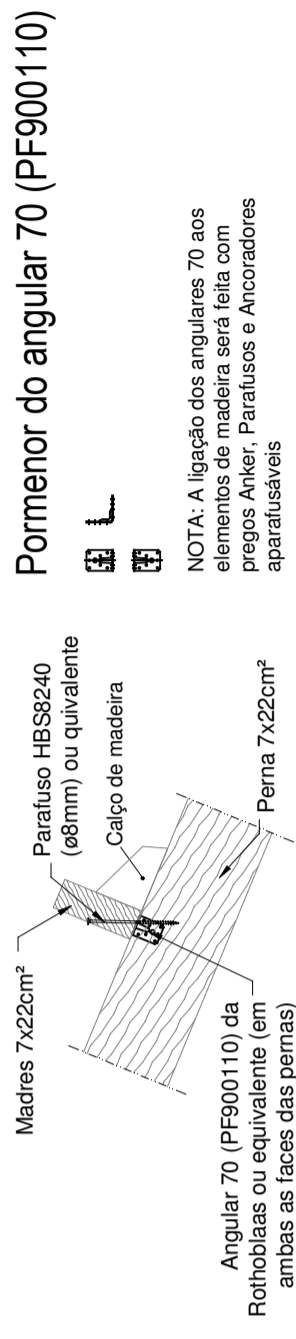
Esc. 1:20

#### Corte A-A'



### Pormenor P4 - Pormenor fixação madres / pernas das asnas

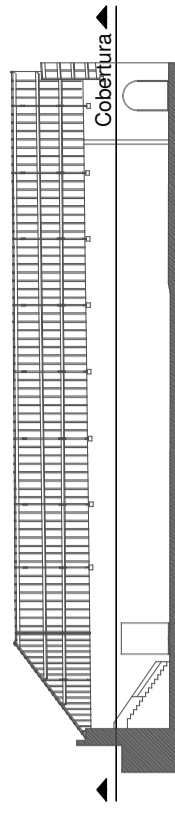
Esc. 1:20



#### Pormenor do angular 70 (PF900110)

### Nível de corte das plantas estruturais

Sem escala



OBRA	Armazéns de V.N de Gaia, Cobertura "F"	DATA	05/2016	FASE DO PROJECTO	RID
DESIGNAÇÃO	Relatório de Inspeção e Diagnóstico	PROCESSO	NCREP_0527A1115	ESCALA	1:20
PROJECTO	VL, JS	DESIGNOU	VL, JS	RESENHO Nº	04
APROVADO	TI, VL	VERIFICOU	TI, VL	REVISÃO Nº	04
Este documento é propriedade de NCREP - Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda. não podendo ser copiado, reproduzido no todo ou em parte ou comunicado a terceiros sem a sua expressa autorização e deverá ser devolvido quando solicitado.					

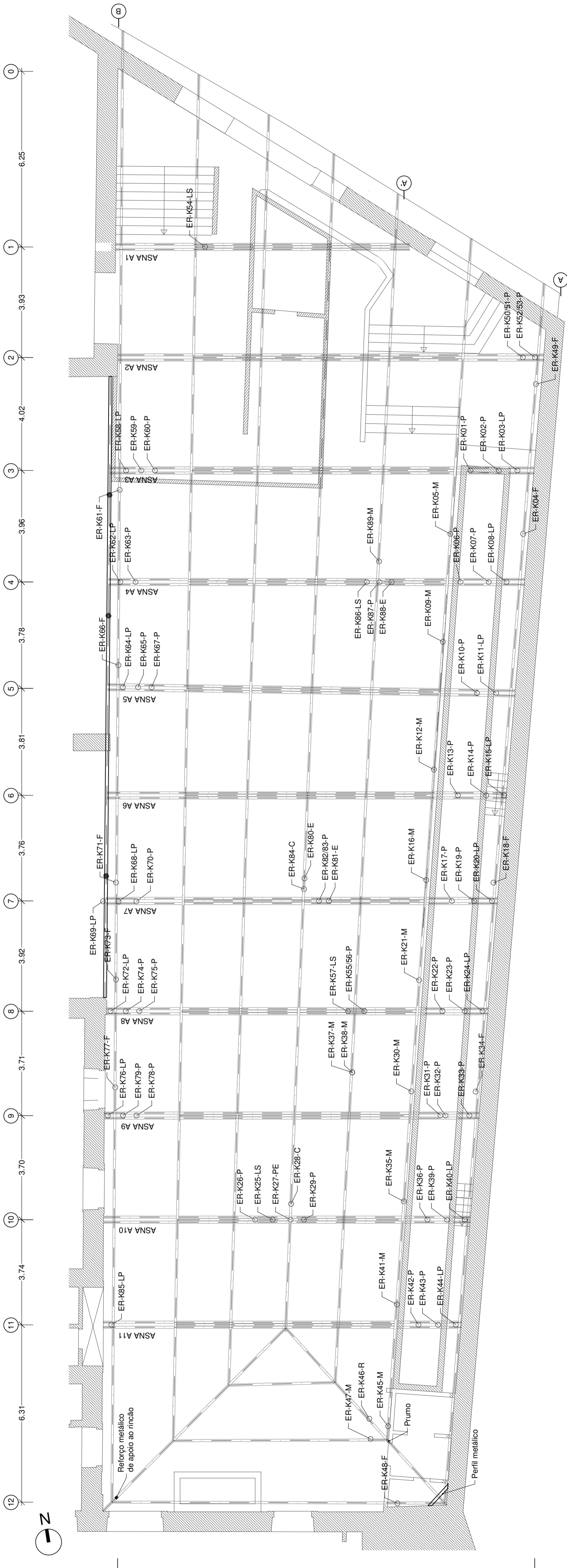




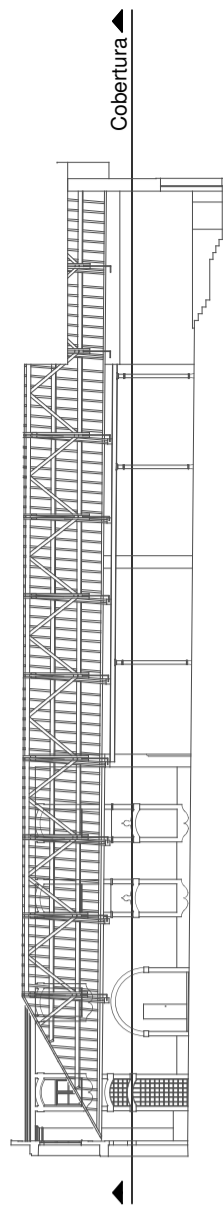
## **ANEXO II – ARMAZÉNS V.N. DE GAIA, COBERTURA K**

Levantamento estrutural

Esc. 1:100



Nível de corte das plantas estruturais  
Sem escala

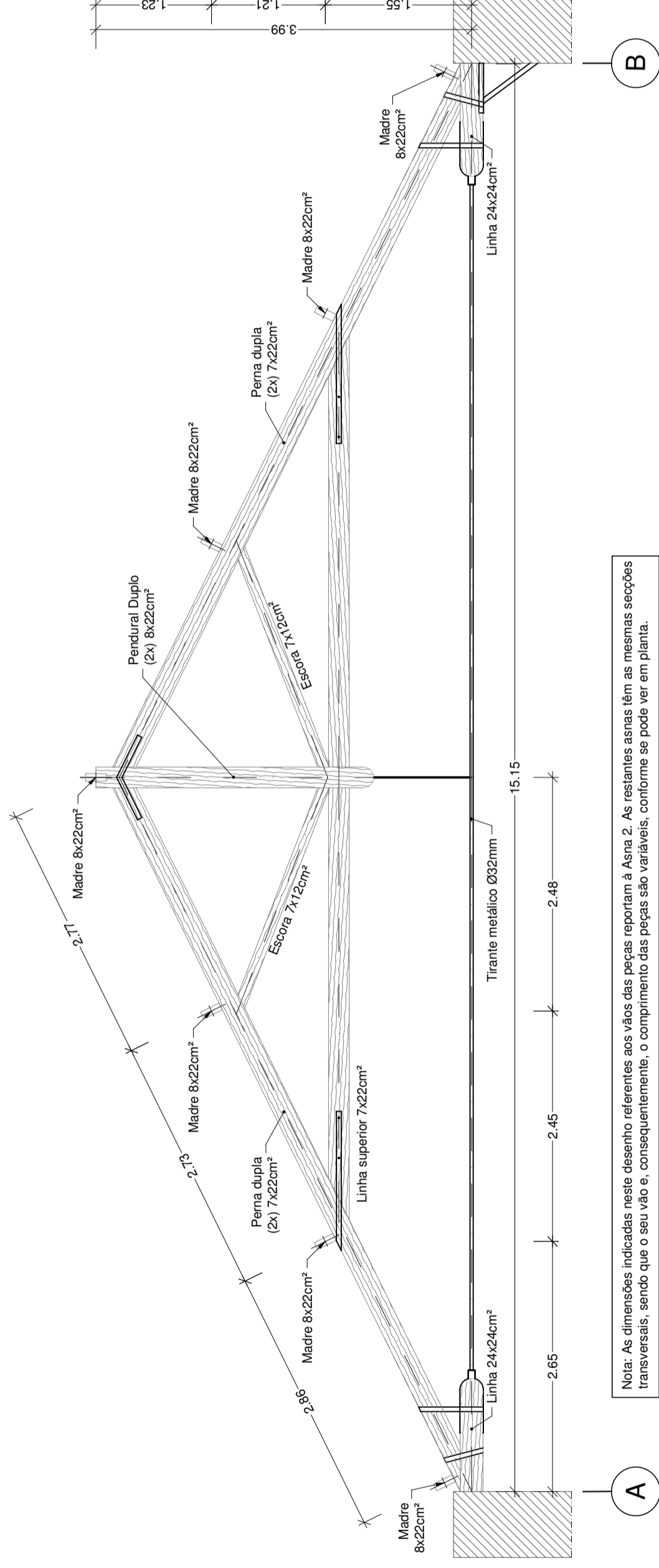


OBRA	Armazéns V.N. de Gaia, Cobertura "K"	DATA	05/2016	FASE DO PROJECTO	RID
REVISÃO	Relatório de Inspeção e Diagnóstico	PROCESSO	NCREP_0527A1115	ESCALA	1:100
DESIGNAÇÃO	Levantamento estrutural	RESENHA Nº	01	REVISÃO Nº	01
PROJECTO	VL, JS	APROVOU	TI, VL	VERIFICOU	TI, VL
Este documento é propriedade de NCREP - Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda. Não podendo ser copiado, reproduzido no todo ou em parte ou comunicado a terceiros sem a sua expressa autorização e deverá ser devolvido quando solicitado.					



### Alçado tipo da Asna 2 à Asna 11 - Levantamento geométrico

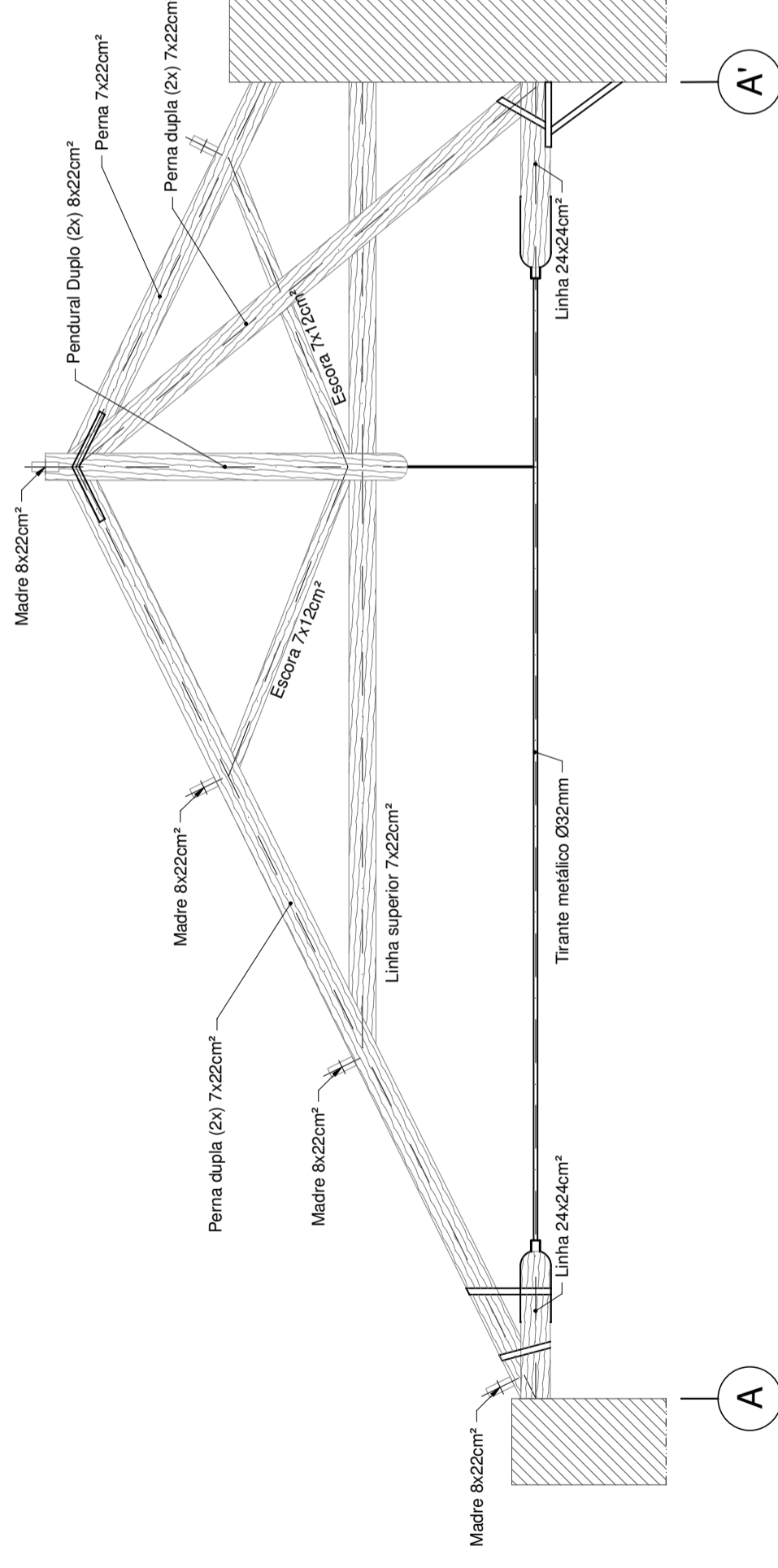
Esc. 1:50



Nota: As dimensões indicadas neste desenho referentes aos vãos das peças reportam à Asna 2. As restantes asnas têm as mesmas secções transversais, sendo que o seu vão e, consequentemente, o comprimento das peças são variáveis, conforme se pode ver em planta.

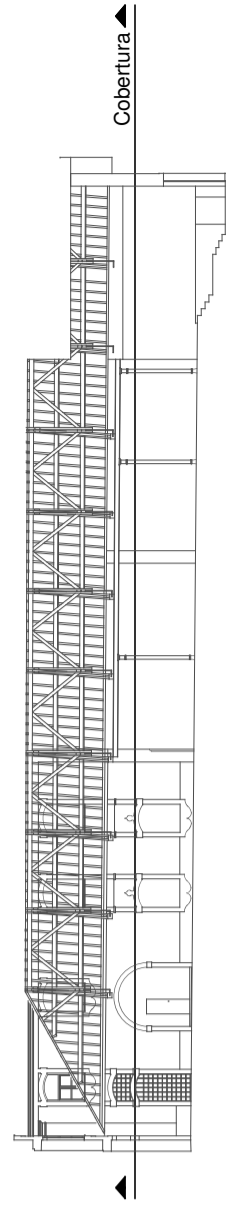
### Alçado tipo da Asna 1 - Levantamento geométrico

Esc. 1:50



### Nível de corte das plantas estruturais

Sem escala



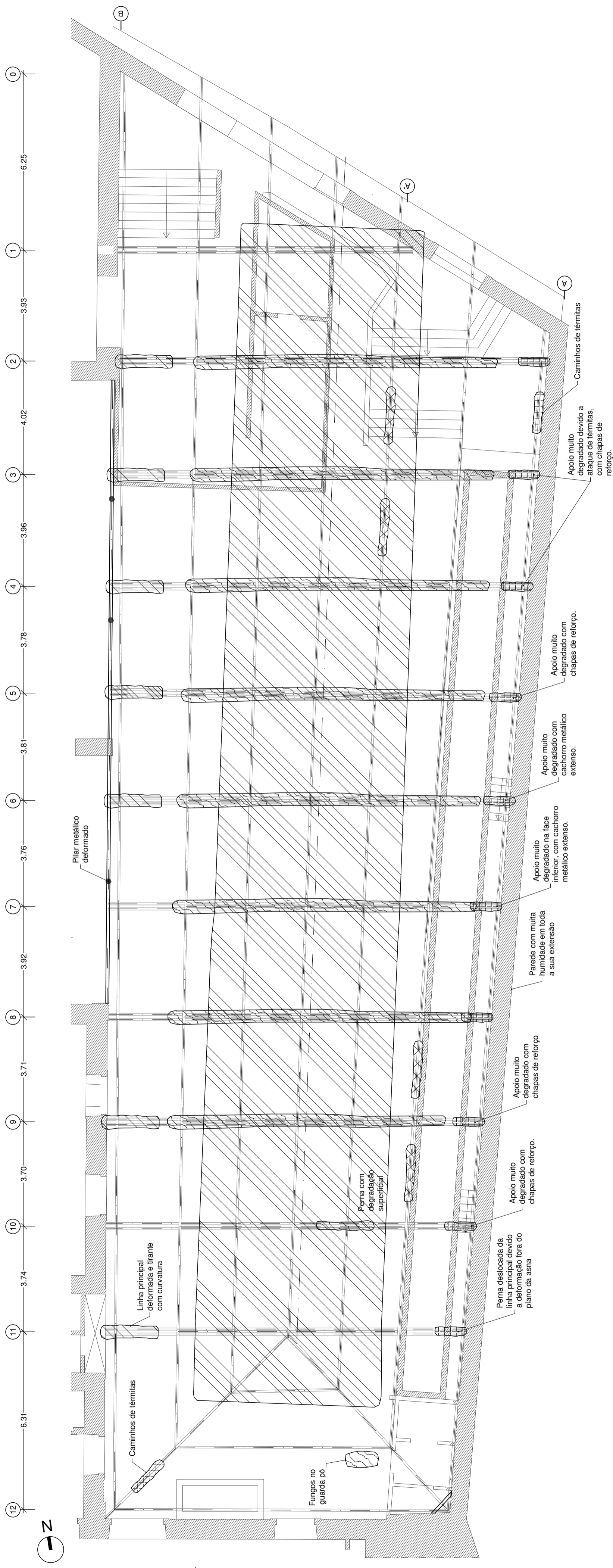
OBRA	Armazéns V.N. de Gaia, Cobertura "K"	FASE DO PROJECTO	DATA	05/2016	RID
DESCRIÇÃO	Relatório de Inspeção e Diagnóstico	PROCESSO	NCREP_0527A1115	ESCALA	1:50
PROJECTO	VL, JS	APROVOU	TI, VL	RESENHO Nº	02
VERIFICOU	TI, VL	VERIFICOU	TI, VL	REVISÃO Nº	

Este documento é propriedade de NCREP - Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda. Não podendo ser copiado, reproduzido no todo ou em parte ou comunicado a terceiros sem a sua expressa autorização e deverá ser devolvido quando solicitado.



# Mapeamento de danos

Esc. 1:100



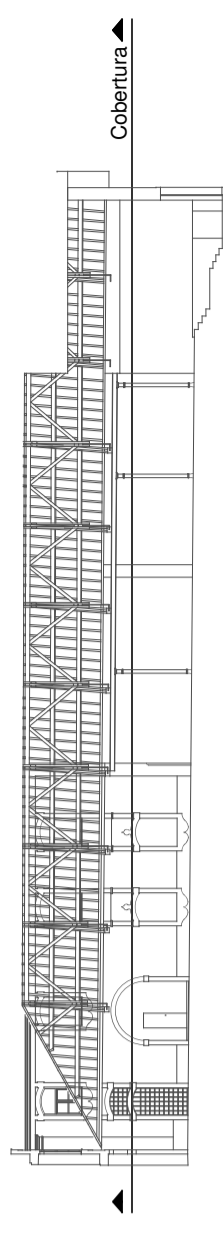
# Danos estruturais

Esc. 1:100

DANOS ESTRUTURAIS	
Deformação das madeiras	
Degradação dos elementos estruturais de madeira (fungos e/ou caruncho)	
Deformação estrutural	
Ataque de térmitas	

# Nível de corte das plantas estruturais

Sem escala

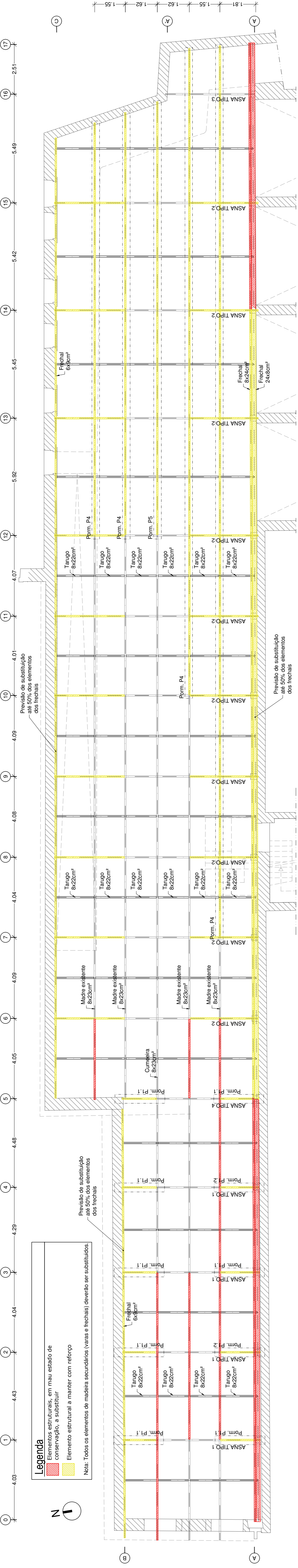


## **ANEXO II – ARMAZÉNS V.N. DE GAIA, COBERTURA O**



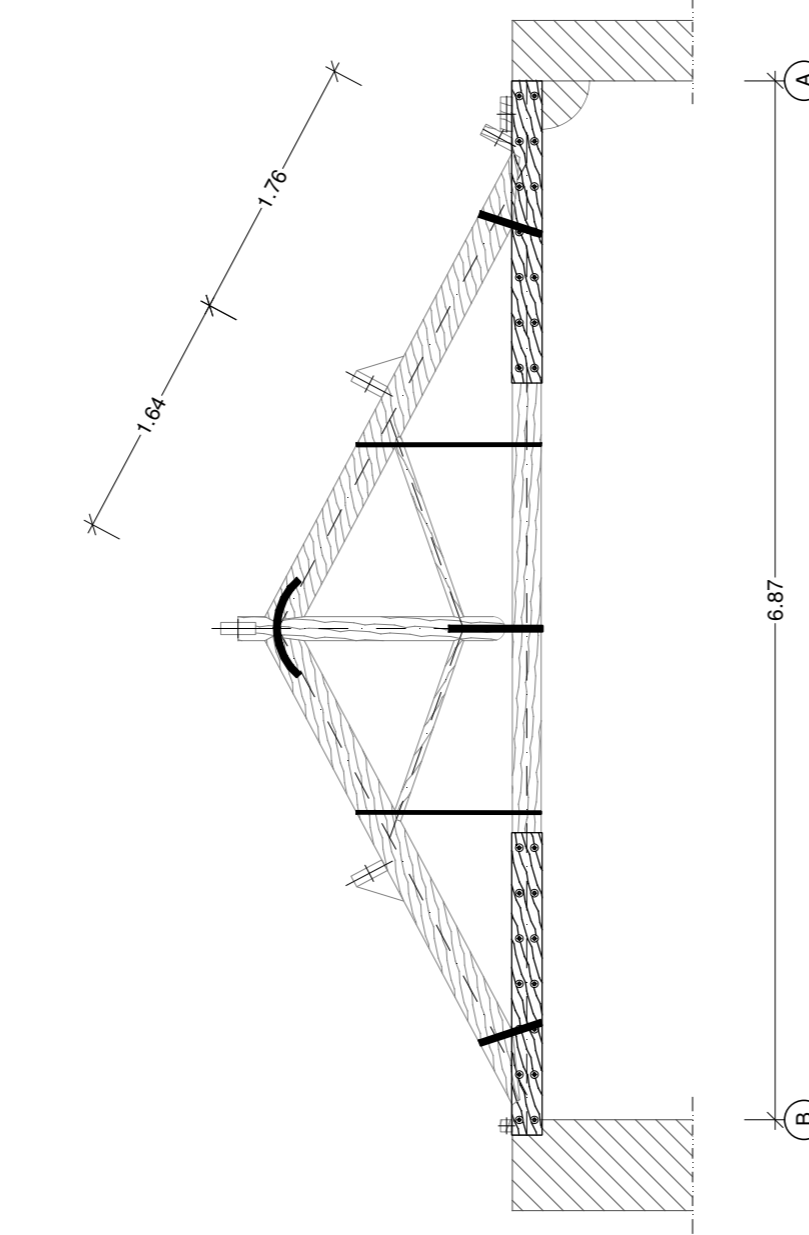
**Levantamento estrutural**

Esc. 1:100



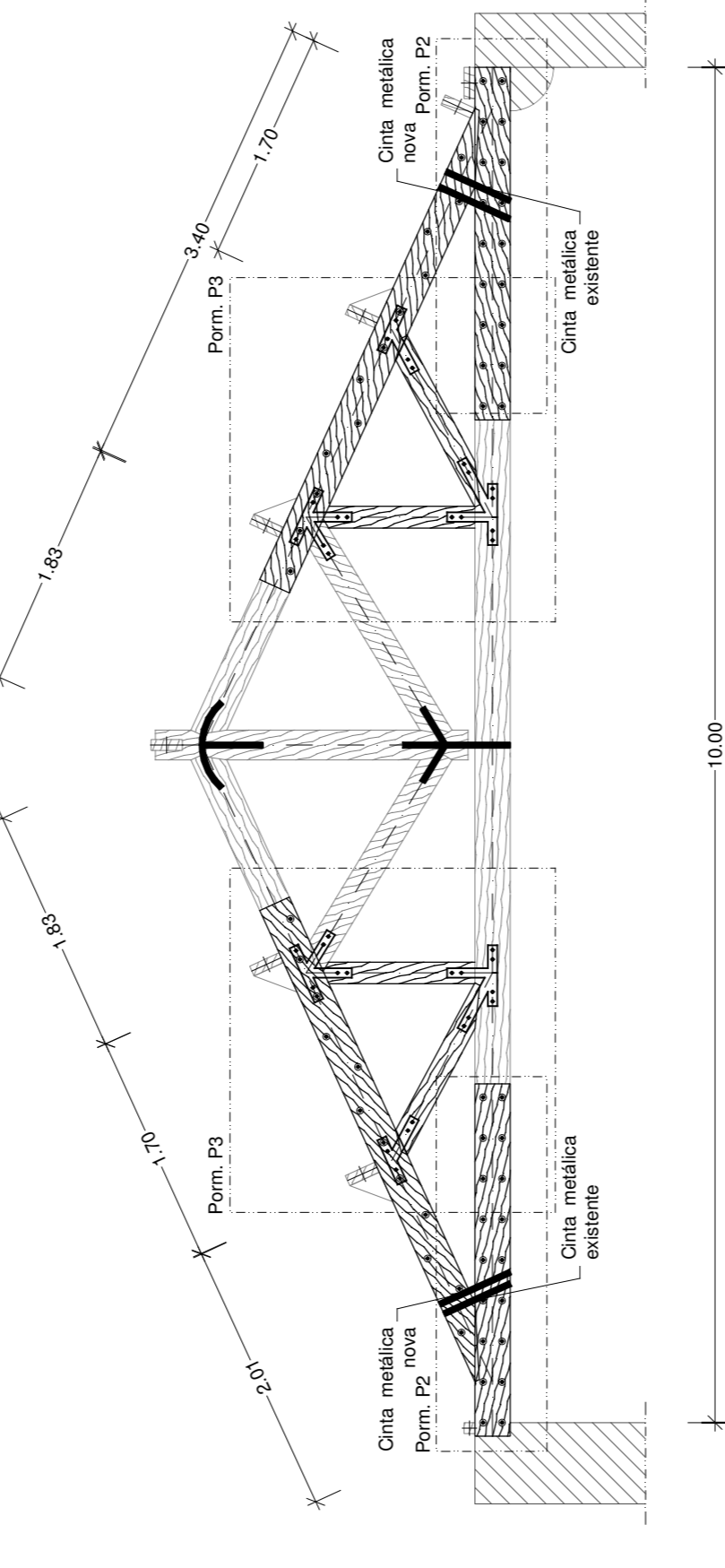
**Alçado Asnas A1 a A5**

Esc. 1:50



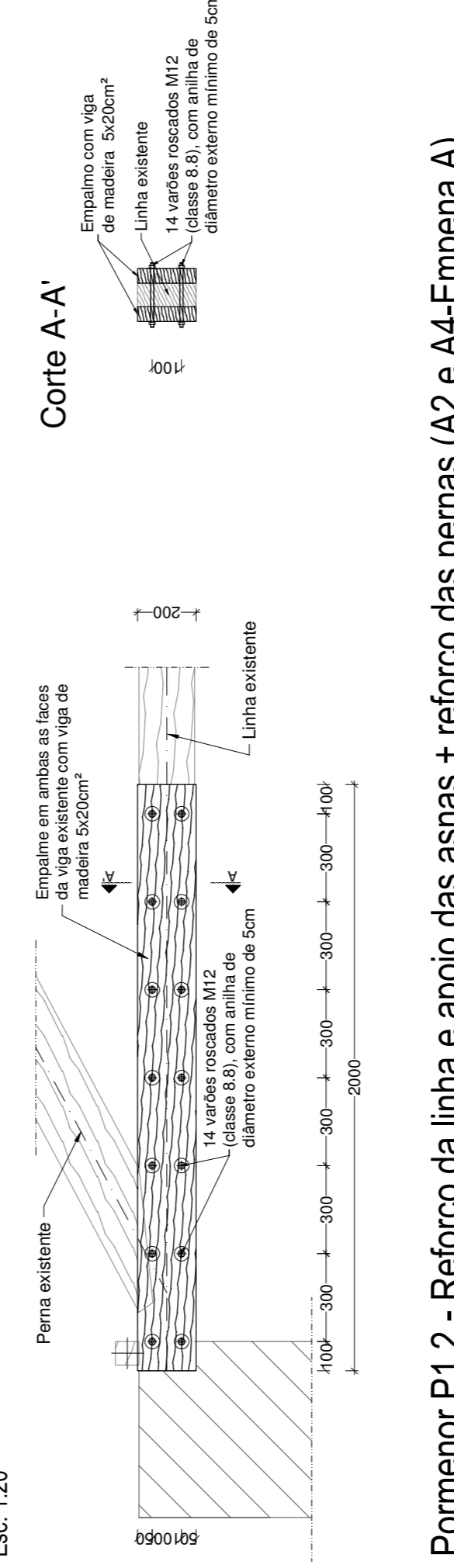
**Alçado Asnas A6 a A15**

Esc. 1:50



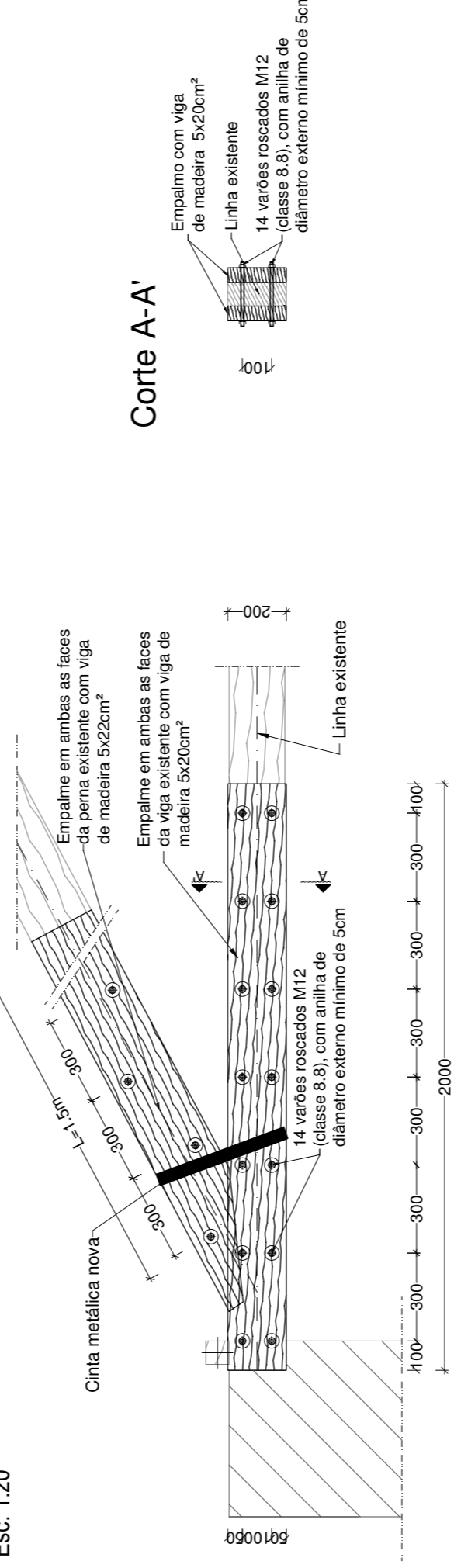
**Pormenor P1.1 - Reforço da linha e apoio das asnas Tipo 1**

Esc. 1:20



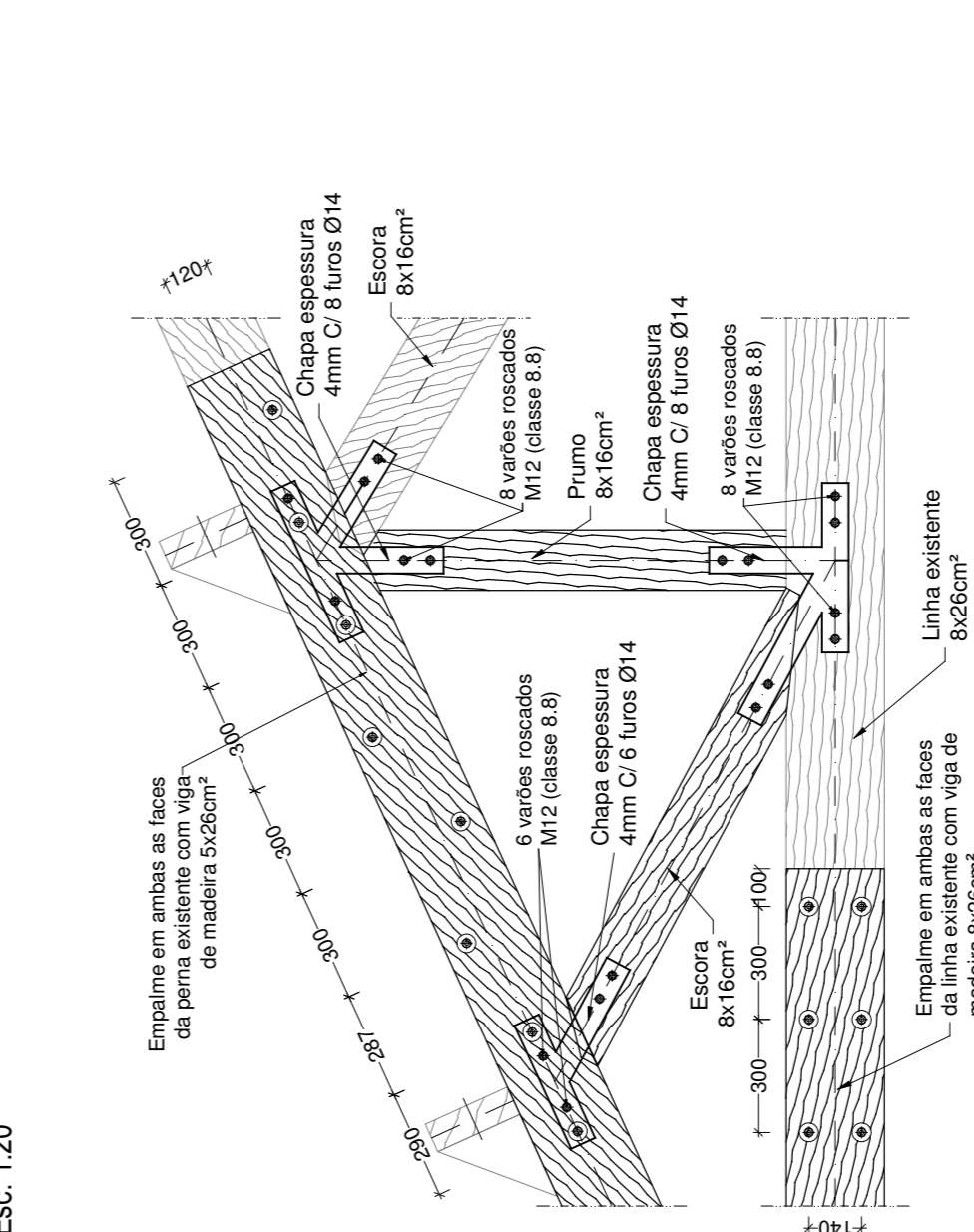
**Pormenor P1.2 - Reforço da linha e apoio das asnas + reforço das pernas (A2 e A4-Empena A)**

Esc. 1:20



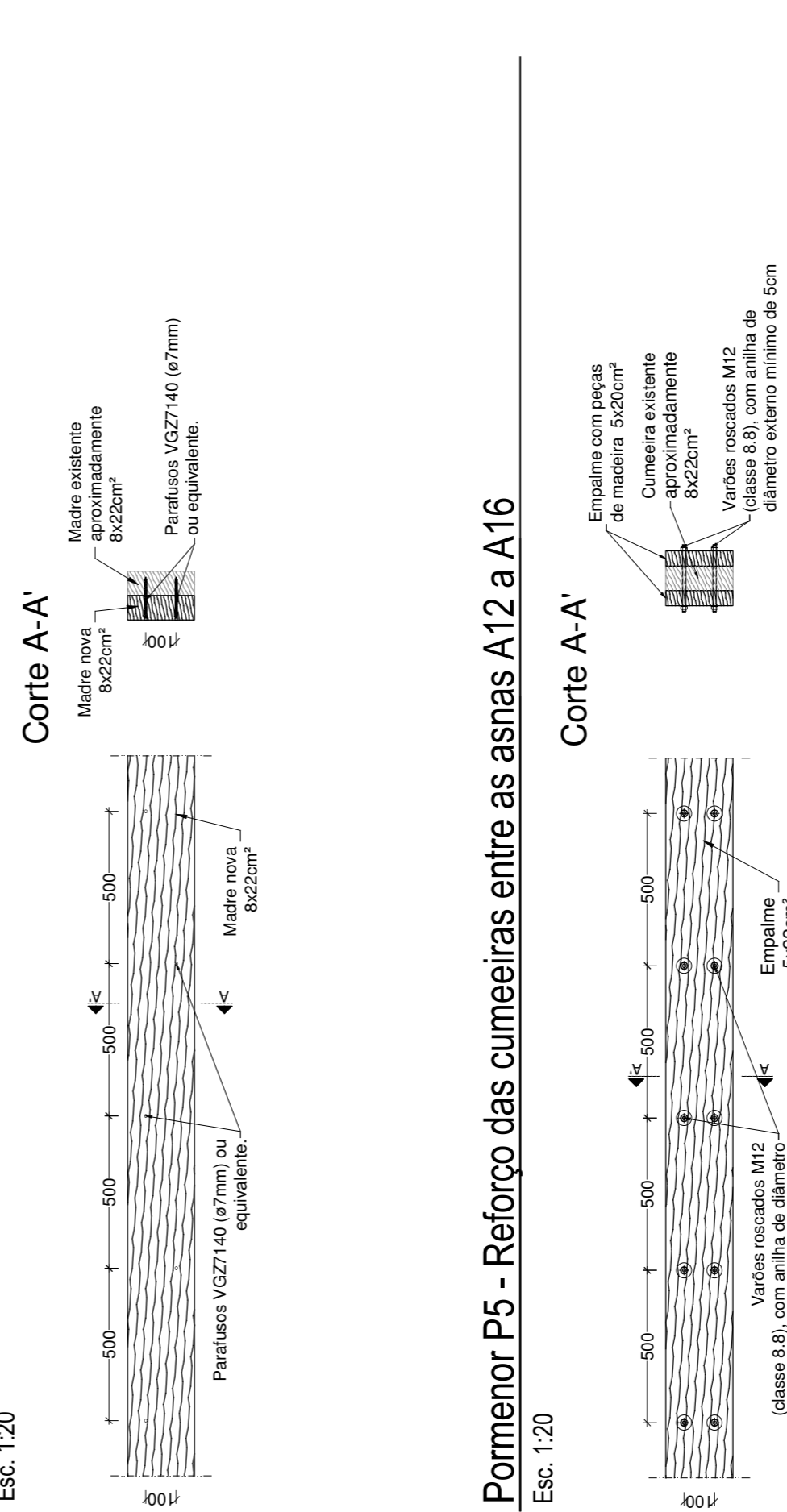
**Pormenor P3 - Treliça aplicada as asnas A6 a A15**

Esc. 1:20



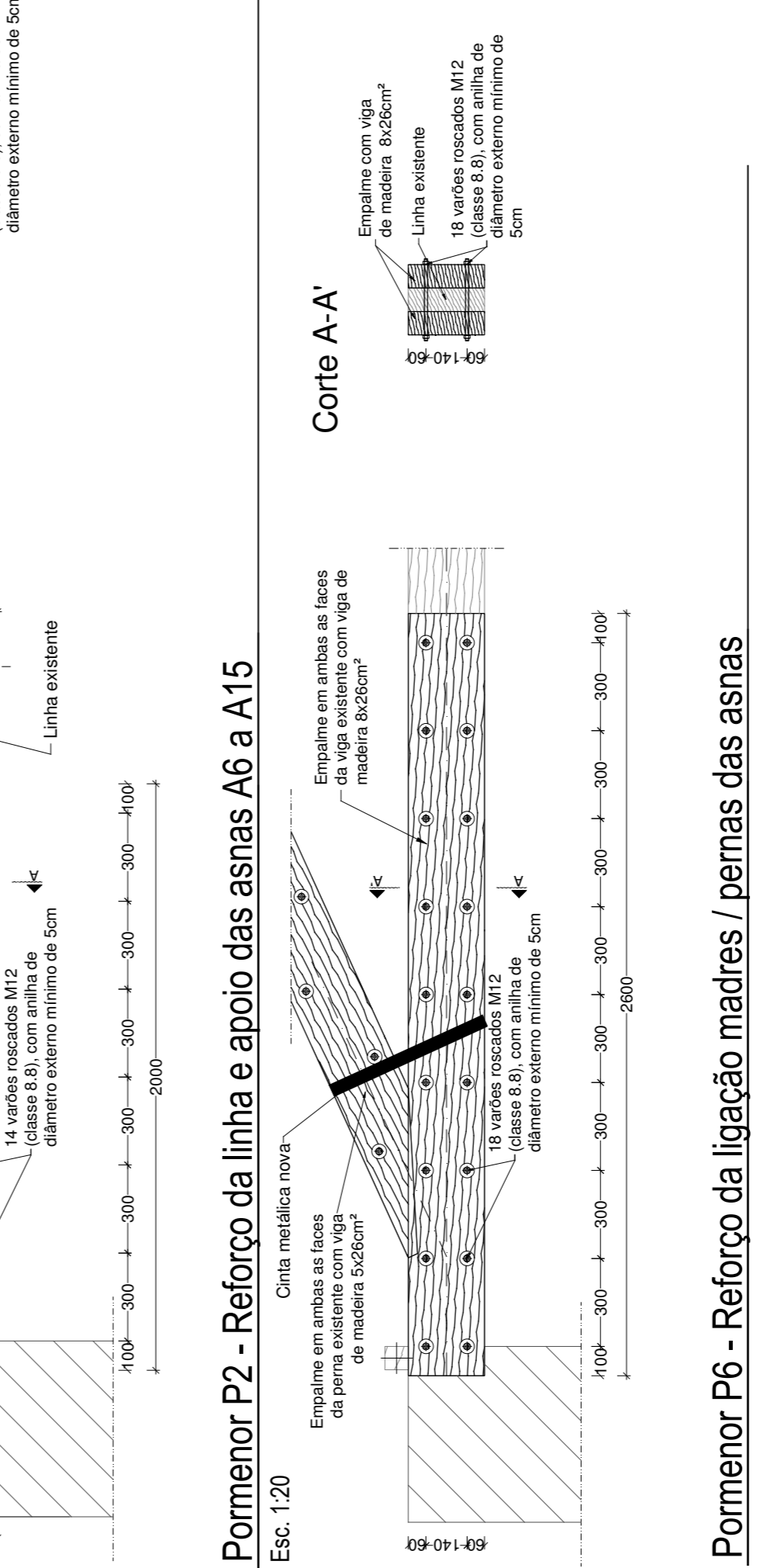
**Pormenor P4 - Reforço das madeiras entre as asnas A12 a A16**

Esc. 1:20



**Pormenor P2 - Reforço da linha e apoio das asnas A6 a A15**

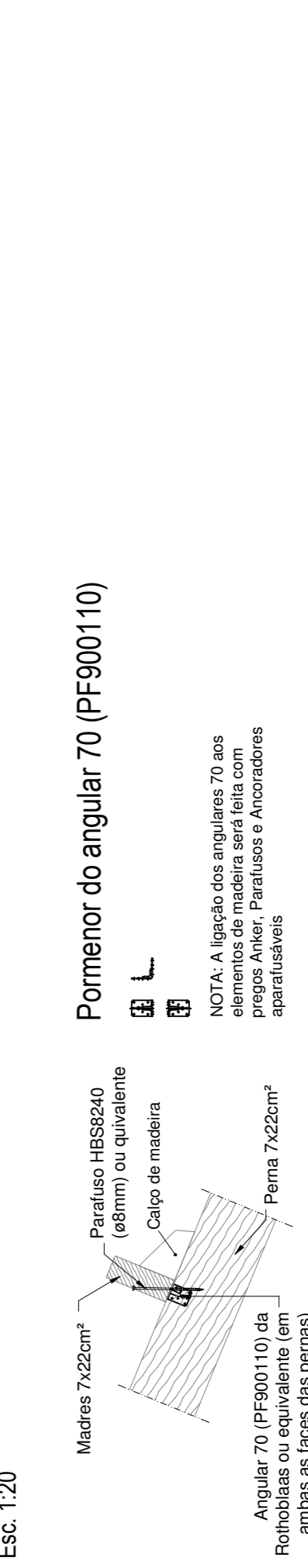
Esc. 1:20



Nota 1: As chapas metálicas de ligação entre elementos da arma na zona das pernas 4 e 5, bem como as chapas metálicas de ligação entre elementos da arma na zona das pernas 6 e 7, deverão ser substituídas por chapas metálicas de ligação com anilha maior (5cm de diâmetro) atravessando os empalmes, as chapas e a perna existente.

**Pormenor P6 - Reforço da ligação madeiras / pernas das asnas**

Esc. 1:20



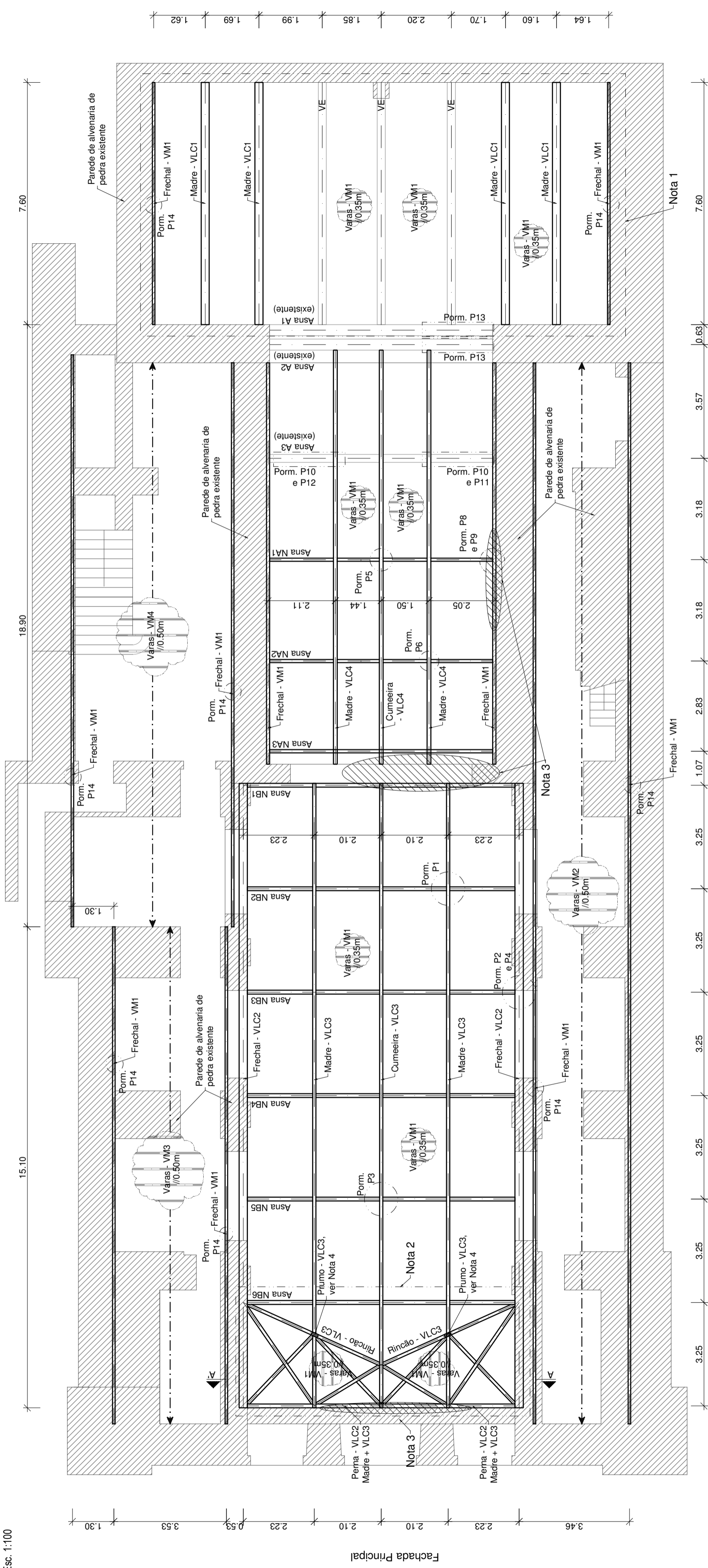




## **ANEXO II – IGREJA SANTA CRUZ, BRAGA**

# Planta estrutural da cobertura

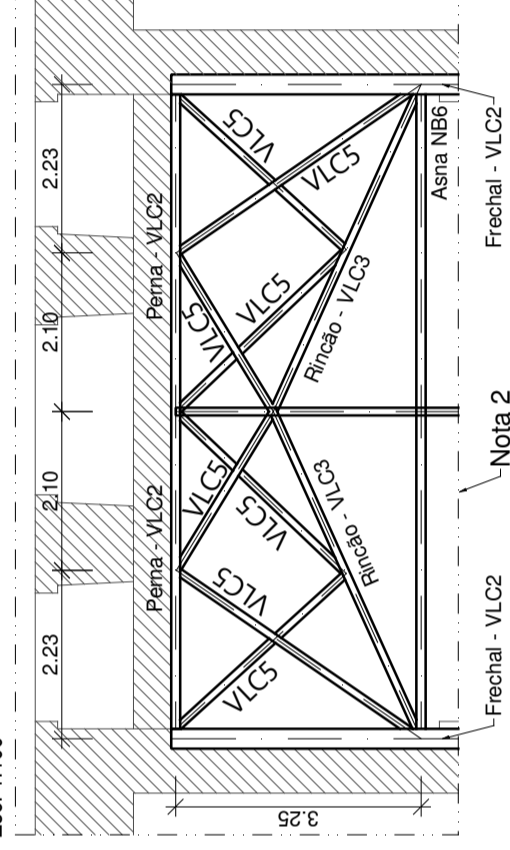
Esc. 1:100



- Nota 1 - Na materialização da ligação das varas com as madres novas no corpo anexo, devem ser utilizados calços, não criando entalhes na secção das madres.
- Nota 2 - Reforço da ligação entre a cobertura e a parede de fachada com estrutura de contraventamento realizada com vigas VLC5 entre os ríncoes e madre fixada na parede da fachada principal.
- Nota 3 - Consolidação das paredes de alvenaria em pedra existentes ao nível da cobertura, nas zonas assinaladas na planta estrutural, recorrendo a argamassas compatíveis, do tipo SECIL REABILITA Cal Consolidação ou equivalente. Antes das operações de consolidação devem ser introduzidos calços de pedra por forma a colmatar essas aberturas. Previamente à consolidação deve-se efectuar a limpeza das paredes de alvenaria de pedra e dos elementos de pedra existentes com recursos a meios e produtos compatíveis não agressivos, que não ponham em causa a integridade da alvenaria, nas zonas assinaladas a consolidar na planta estrutural da cobertura.
- Nota 4 - O Prumo - VLC3 efectua o apoio do rínco na madre. A ligação entre Rincão/Prumo e Prumo/Madre será com 2 Parafusos VG29200 (ø9mm) ou equivalente, por ligação.

## Planta estrutural da cobertura - Contraventamento ao nível da cobertura

Esc. 1:100



Nota 1: A ligação entre as vigas em madeira VLC5 da estrutura de contraventamento será ligada a restante estrutura em madeira da cobertura com 2 Parafusos VG27140 (ø7mm, l=140mm) da Rothoblaatt ou equivalente, por cada ligação.

## NOVOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM MADEIRA

Designação	Secção	Classe resistente
VLC1	16x30cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC2	12x26cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC3	10x20cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC4	12x20cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC5	10x10cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VM1	8x8cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM2	8x12cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM3	8x14cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM4	10x18cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)

VLC - Nova Viga de madeira estrutural Lamelada Colada  
VM - Nova Viga de madeira estrutural Lamelada Colada

## NOTAS GERAIS

- Todas as cotas de implantação de elementos estruturais devem ser confirmadas no local de obra.
- ### MATERIAIS - ESTRUTURAS DE MADEIRA
- Tratamento: Os elementos estruturais de madeira lamelada colada (com classe resistente G124h) serão da espécie *Pinus Sylvestris*, enquanto os elementos estruturais de madeira maciça (com classe resistente C18) deverão ser da espécie *Pinus Finaster*. Ambas deverão receber um tratamento em autoclave de duplo vácuo com um produto do tipo Xyliphene S.O.R.40 ou equivalente (INCOLOR). Os elementos de madeira existentes deverão receber um tratamento com o mesmo produto, aplicado por aspersão ou pincelagem.
- ### CRIAÇÃO BARRERAS QUÍMICAS ANTI-TÉRMITAS - ESTRUTURAS DE MADEIRA
- Criação de barreiras químicas anti-térmitas em todas as estruturas em madeira (existentes e novas) da cobertura. Este tratamento deverá ser definido e aplicado por uma empresa de especialidade.

## MATERIAIS - ESTRUTURAS METÁLICAS

ACOES	ESQUEMAS DE PINTURA
Perfis e Chapas em Geral	S275JR (NP EN 10025)
Parafusos	DIN 931 - 8.8
Porcas	DIN 934 - 8
Anilhas	DIN126/DIN434 - Aço
Chumbadores (em geral)	S355J0
Varões Roscados	Aço da Classe 8.8 (Varões de ancoragem)

**ESQUEMA DE PINTURA PARA ELEMENTOS METÁLICOS ENTERRADOS**

- Os elementos estruturais enterrados deverão levar um esquema de pintura para protecção anticorrosiva de alta durabilidade para categoria de imersão em solo lim3, de acordo com a NP EN ISO 12944-5, à base de Epoxy de Alcatrão de acordo com as especificações preconizadas pelo C-POX CT940 de CIN, ou equivalente.

**PINTURA DE PROTECÇÃO CONTRA INCÊNDIO**

- Decapagem a jacto abrasivo grau SA 2.5
- Camada de Primário anti corrosivo epoxy de Zinco - 60 µ
- Camada de tinta anti-fogo
- Acabamento em poliuretano - 125 µ

NOTA: A espessura da camada de tinta anti-fogo será definida de modo a garantir a protecção ao fogo requerida na zona em causa, devendo o Empregatário submeter a mesma à aprovação da Fiscalização.

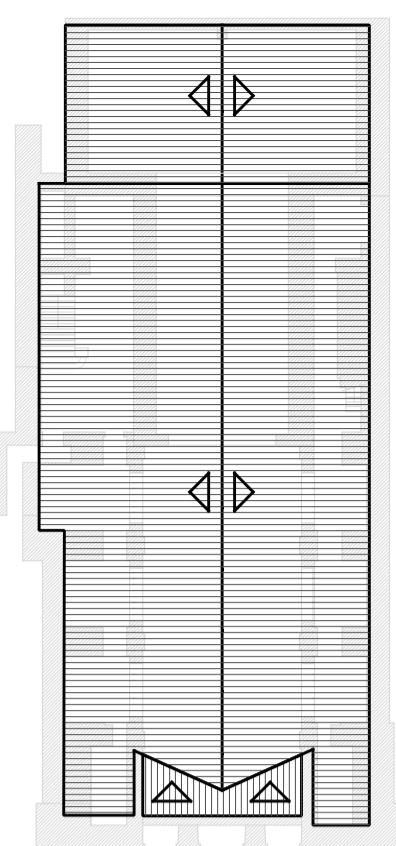
**PINTURA ESQUEMA EPOXY**

- Decapagem a jacto abrasivo grau Sa 2(1/2)
- Camada de Primário anticorrosivo epoxy em Zinco - 90% na película seca - de dois componentes 40µm
- Subcapa intermédia de resina epoxy de dois componentes de alta espessura - 110 µ
- Esmalte de acabamento epoxy de dois componentes - 50 µ

## SOLDADURA

- Soldadura:
    - O valor do cordão de soldadura será 0,7 da menor espessura a soldar.
    - O eléctrodo de soldadura a utilizar deverá ser do tipo E.7018-G (AWS).
- ### FABRICO DA ESTRUTURA METÁLICA
- Antes de se iniciar o fabrico da estrutura, todas as dimensões relativas a elementos existentes deverão ser confirmadas no local de obra.
  - Todas as cotas de implantação das estruturas metálicas devem ser confirmadas no local de obra.

## Esquema de orientação da águas da cobertura da igreja



OBRA: Igreja Santa Cruz, Braga  
 Projecto de Execução de Estabilidade

PROCESSO: NCREP\_0534A1215  
 Várzas

PLANTA: Planta estrutural da cobertura

PROJECÇÃO: VL, FO, JS  
 DESINHO: VL, FO, JS

APROVADO: VL  
 VERIFICADO: VL

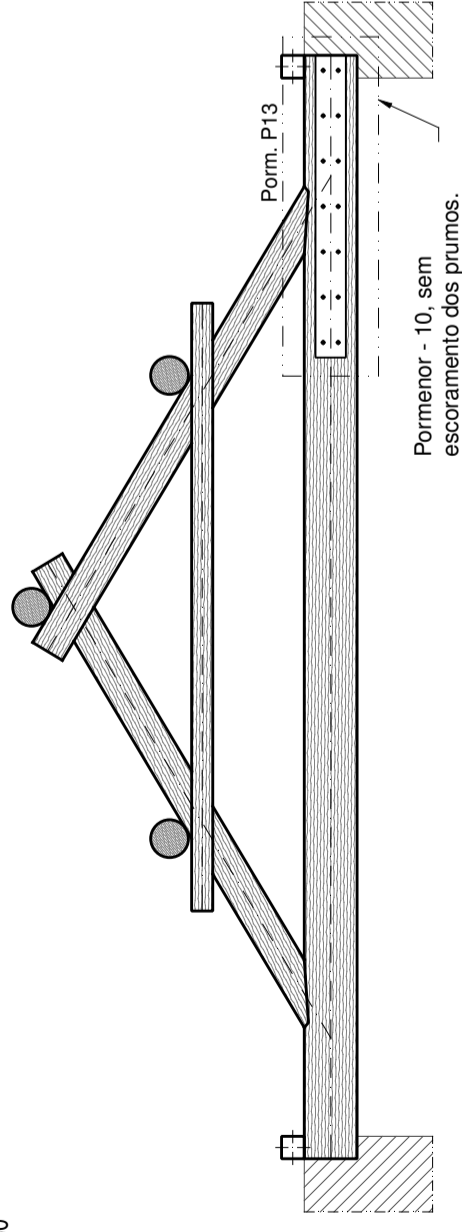
ESCALA: Escala  
 RESENHO Nº: 01

DATA: Maio de 2016  
 FASE DO PROJECTO: EXE

CONSELHO DE ENGENHARIA E ARQUITECTURA: NCRP  
 NCRP  
 OEP

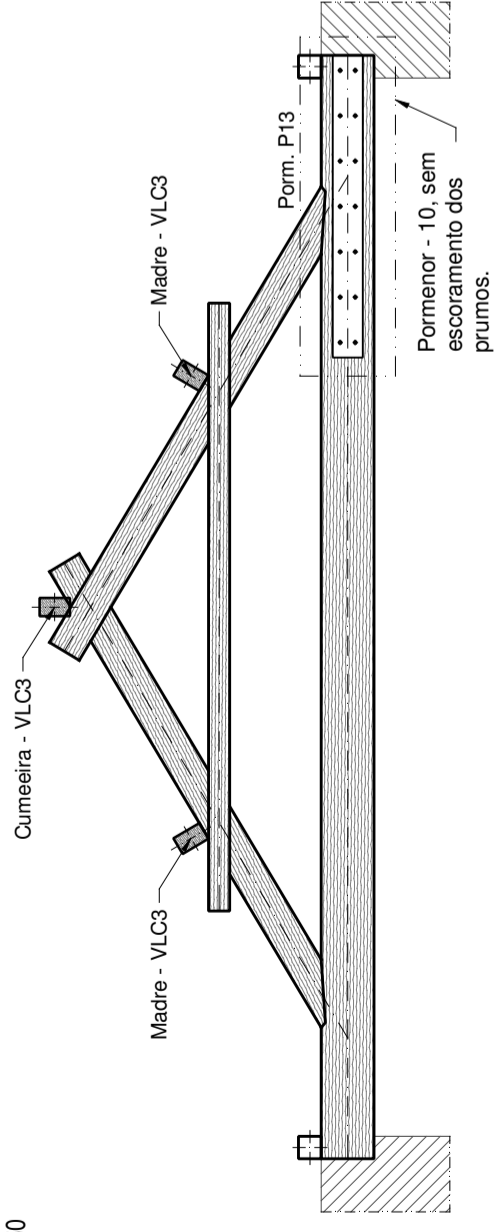
### Asna existente A1

Esc. 1:50



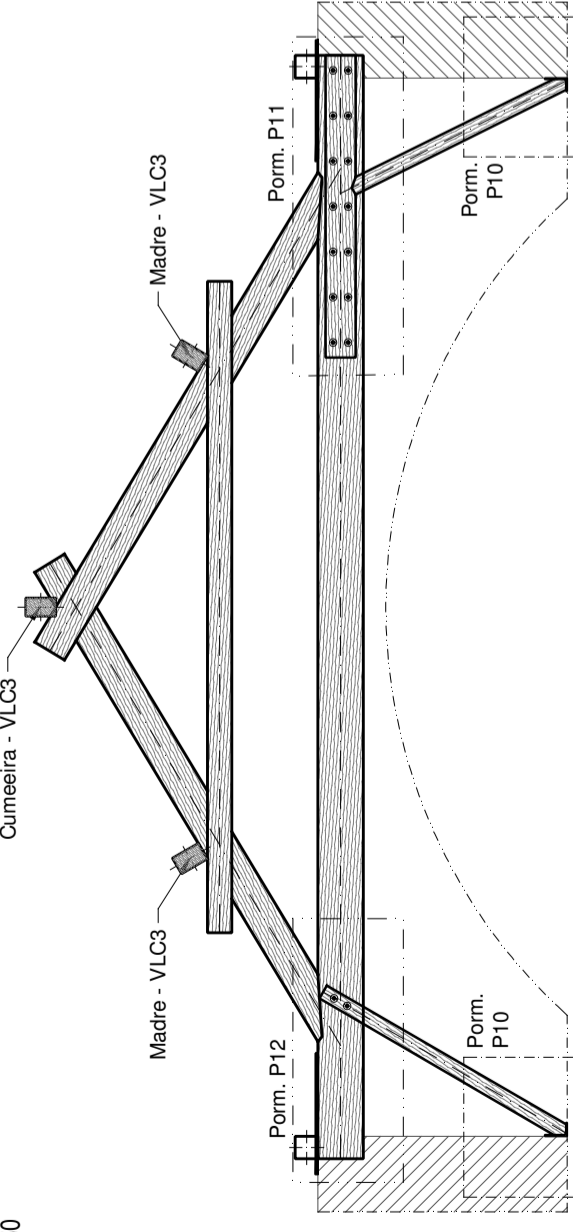
### Asna existente A2

Esc. 1:50



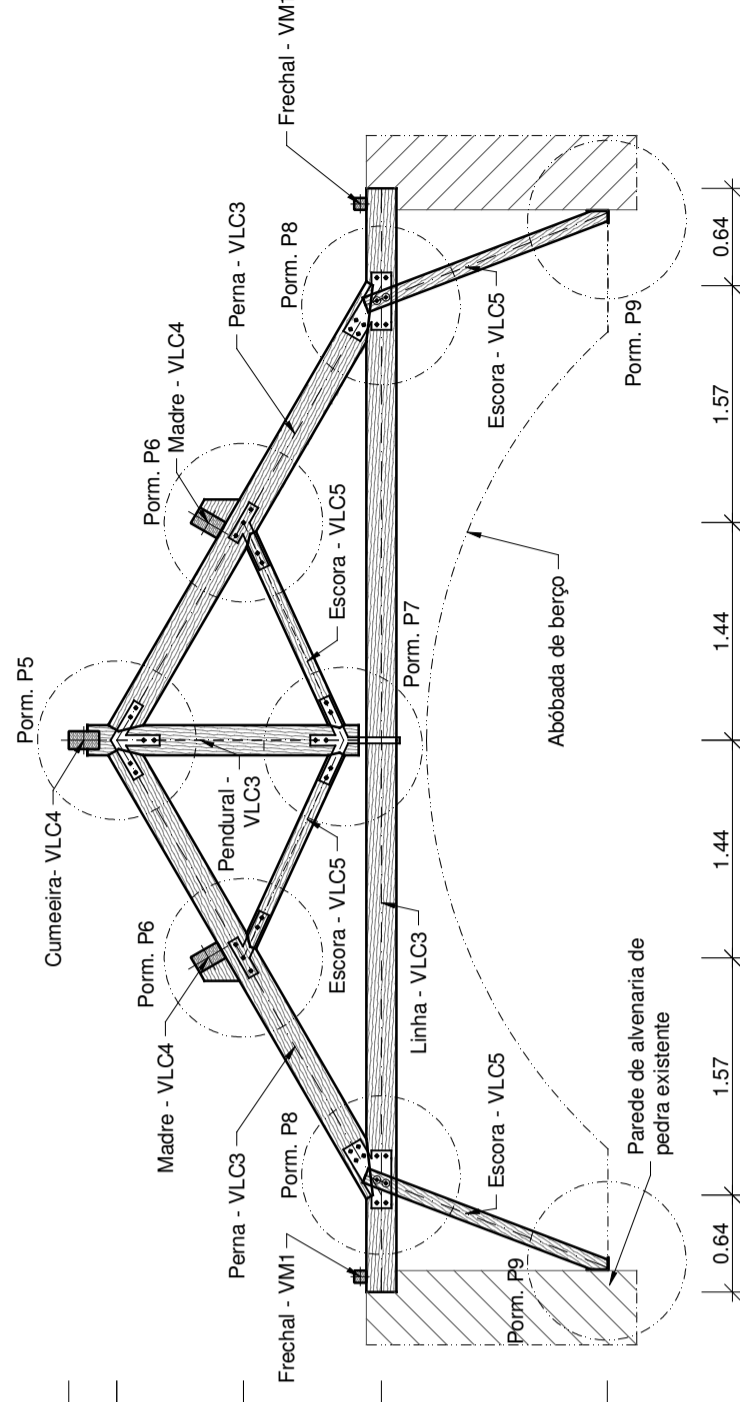
### Asna existente A3

Esc. 1:50



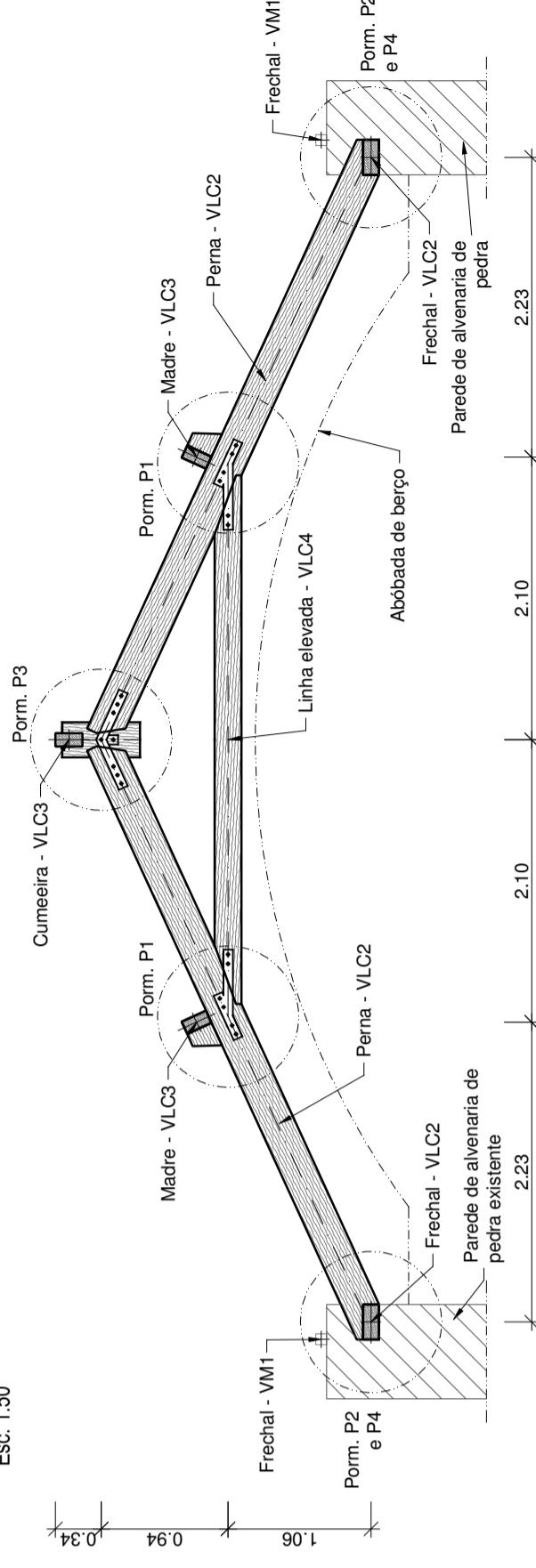
### Asnas NA

Esc. 1:50



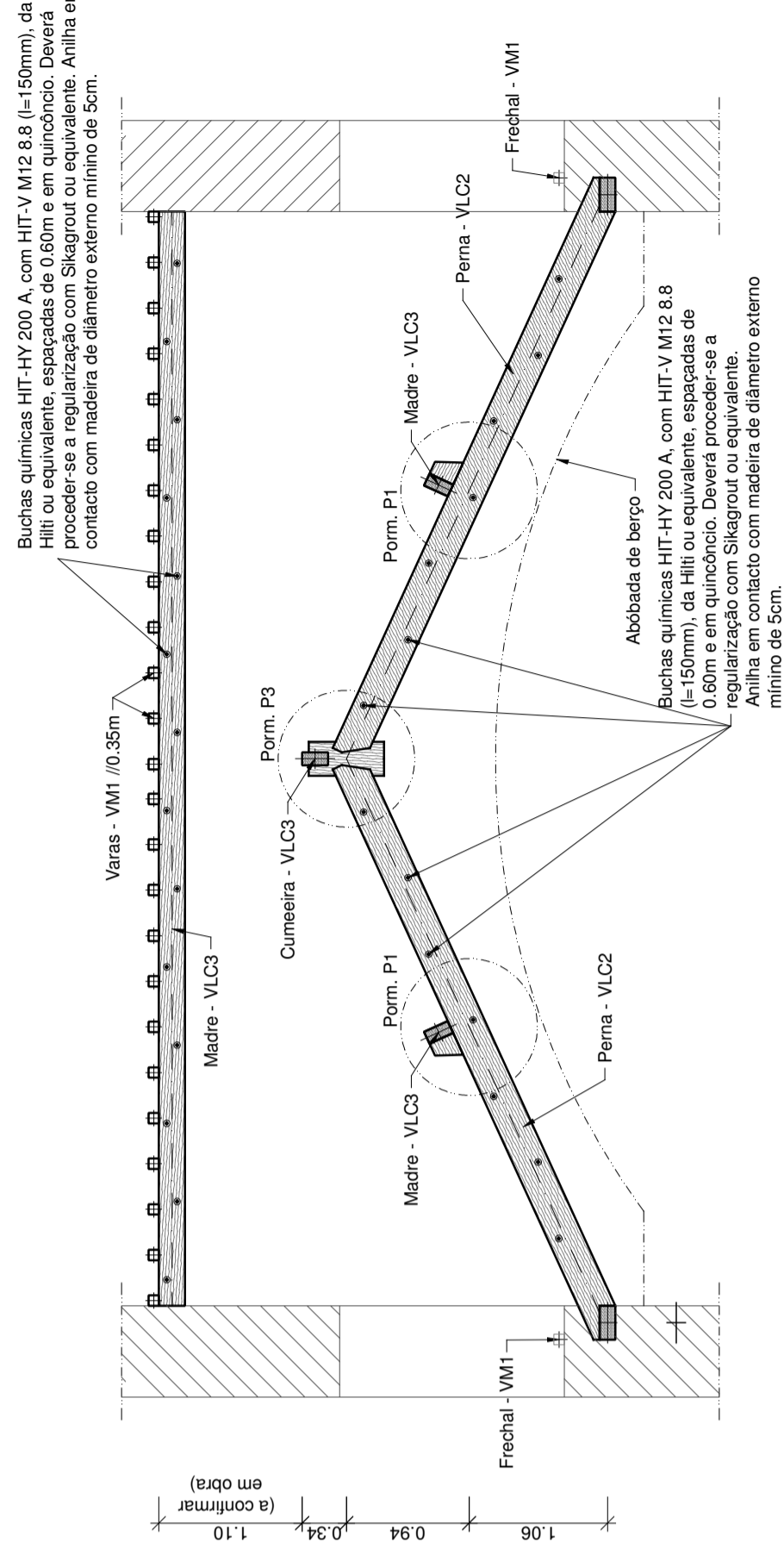
### Asnas NB

Esc. 1:50



### Corte AA'

Esc. 1:50



NOVOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM MADEIRA	
Designação	Seção
VLC1	16x30cm <sup>2</sup>
VLC2	12x26cm <sup>2</sup>
VLC3	10x20cm <sup>2</sup>
VLC4	12x20cm <sup>2</sup>
VLC5	10x10cm <sup>2</sup>
VM1	8x8cm <sup>2</sup>
VM2	8x12cm <sup>2</sup>
VM3	8x14cm <sup>2</sup>
VM4	10x18cm <sup>2</sup>
VLC - Nova Viga de madeira estrutural Lamelada Colada	
VM - Nova Viga de madeira estrutural Maciça	

MATERIAIS - ESTRUTURAS METÁLICAS	
<b>AÇOS</b>	<p><b>ESQUEMAS DE PINTURA</b></p> <p>ESQUEMA DE PINTURA PARA ELEMENTOS METÁLICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Os elementos estruturais entreados deverão levar um esquema de pintura para protecção anticorrosiva de alta durabilidade para categoria de imersão em solo Im3, de acordo com a NP EN ISO 12944-5, à base de Epoxy de Alcatrão de acorço com as especificações preconizadas pelo C-POX CT940 da CIN, ou equivalente.</li> <li>- Pintura de Protecção CONTRA INCENDIO</li> <li>- Decapagem a jacto abrasivo grau SA 2.5</li> <li>- Camada de Primário anti corrosivo epoxy de Zinco - 60 µ</li> <li>- Camada de tinta anti-fogo</li> <li>- Acabamento em poliuretano - 125 µ</li> </ul> <p>NOTA: A espessura da camada de tinta anti-fogo será definida de modo a garantir a protecção ao fogo requerida na zona em causa, devendo o Empreiteiro submeter a mesma a aprovação da fiscalização.</p>
<b>SOLDADURA</b>	<p>PINTURA ESQUEMA EPOXY</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Decapagem a jacto abrasivo grau Sa.2(1/2)</li> <li>- Camada de Primário anticorrosivo epoxy em Zinco - 90% na película seca - de dois componentes 40µm</li> <li>- Subcapa primária de resina epoxy de dois componentes de alta resistência - 110µm</li> <li>- Esmalte de acabamento epoxy de dois componentes - 50 µ</li> </ul> <p>será 0.7 da menor espessura a soldar.</p> <p>O electrodo de soldadura a utilizar deverá ser do tipo E-7018-G (AWS).</p>
<b>FABRICO DA ESTRUTURA METÁLICA</b>	<p>Antes de se iniciar o fabrico da estrutura, todas as dimensões relativas a elementos existentes deverão ser confirmadas no local da obra.</p> <p>Todas as cotas de implantação das estrutura metálicas devem ser confirmadas no local da obra.</p>

### NOTAS GERAIS

- Todas as cotas de implantação de elementos estruturais devem ser confirmadas no local de obra.

### MATERIAIS - ESTRUTURAS DE MADEIRA

Todas as cotas de implantação de elementos estruturais devem ser confirmadas no local de obra.

Os elementos estruturais de madeira lamelada colada (com classe resistente GL24h) serão da espécie *Pinus Sylvestris*, enquanto os elementos estruturais de madeira maciça (com classe resistente C18) deverão ser da espécie *Pinus Pinaster*. Ambas deverão receber um tratamento em autoclave de duplo vácuo com um produto do tipo Xylophene S.O.R.40 ou equivalente (INCOLOR). Os elementos de madeira existentes deverão receber um tratamento com o mesmo produto, aplicado por aspersão ou pincelagem.

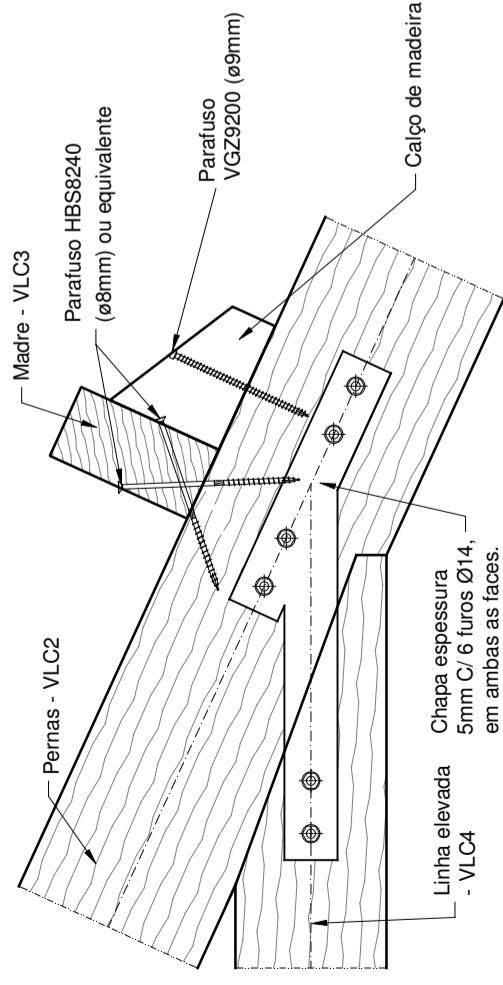
### CRIAÇÃO BARRERAS QUÍMICAS ANTI-TÉRMITAS - ESTRUTURAS DE MADEIRA

- Criação de barreiras químicas anti-térmitas em todas as estruturas em madeira (existentes e novas) da cobertura. Este tratamento deverá ser definido e aplicado por uma empresa da especialidade.

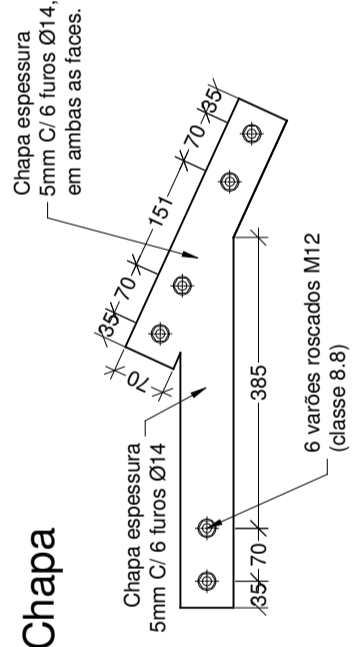
OBRA	IGreja Santa Cruz, Braga	DATA	Maio de 2016	FASE DO PROJECTO	EXE
PROJECTO	VL, FO, JS	PROCESSO	NCREP_0534A1215	ESCALA	RESENHO N°
DESIGNAÇÃO	Alçados tipo das asnas de cobertura	VERIFICOU	VL	RESENHO N°	REV. N°
APROVOU	VL, FO, JS	VERIFICOU	VL	ESCALA	1:50
DESIGNOU	VL, FO, JS	VERIFICOU	VL	RESENHO N°	02

### Pormenor P1 Ligação das madres nas pernas das asnas e ligação entre pernas e linha elevada das Asnas NB

Esc. 1:10

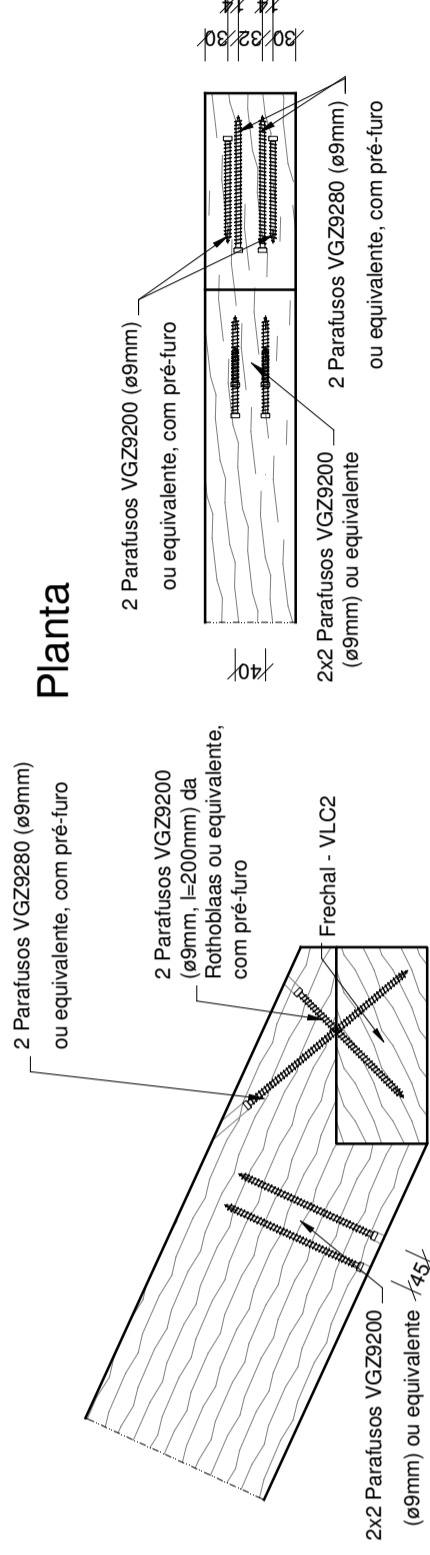


### Chapa

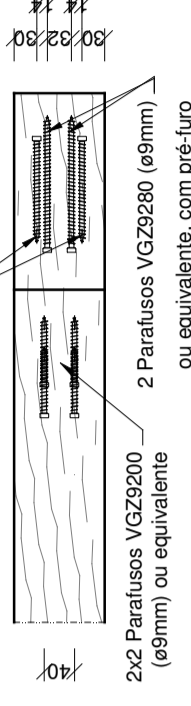


### Pormenor P2 - Ligação das pernas das Asnas NB no frechal

Esc. 1:10

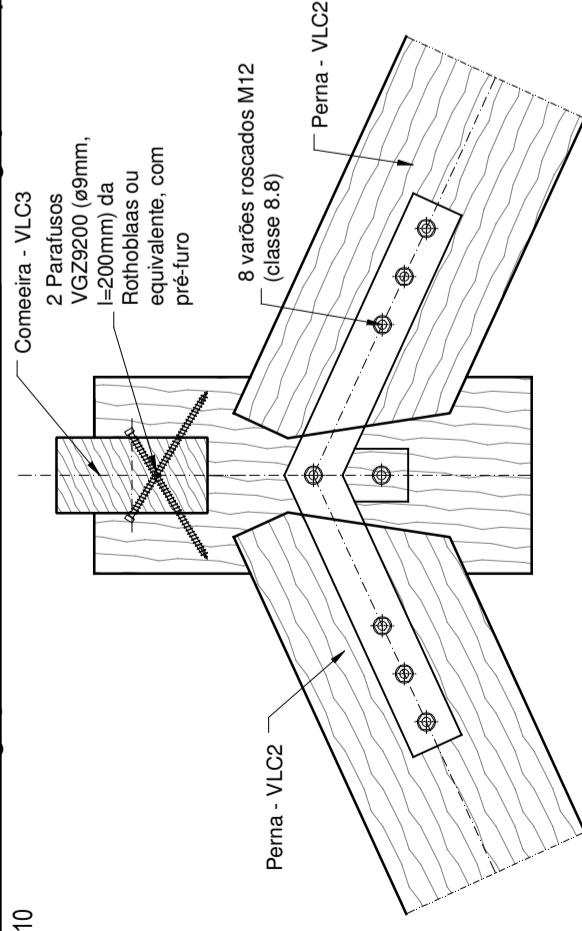


### Planta



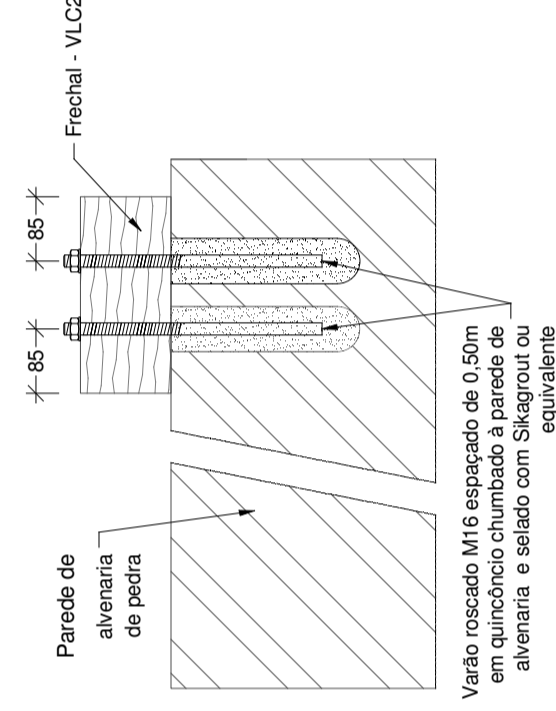
### Pormenor P3 Ligação da comeira nas Asnas NB e ligação das pernas

Esc. 1:10

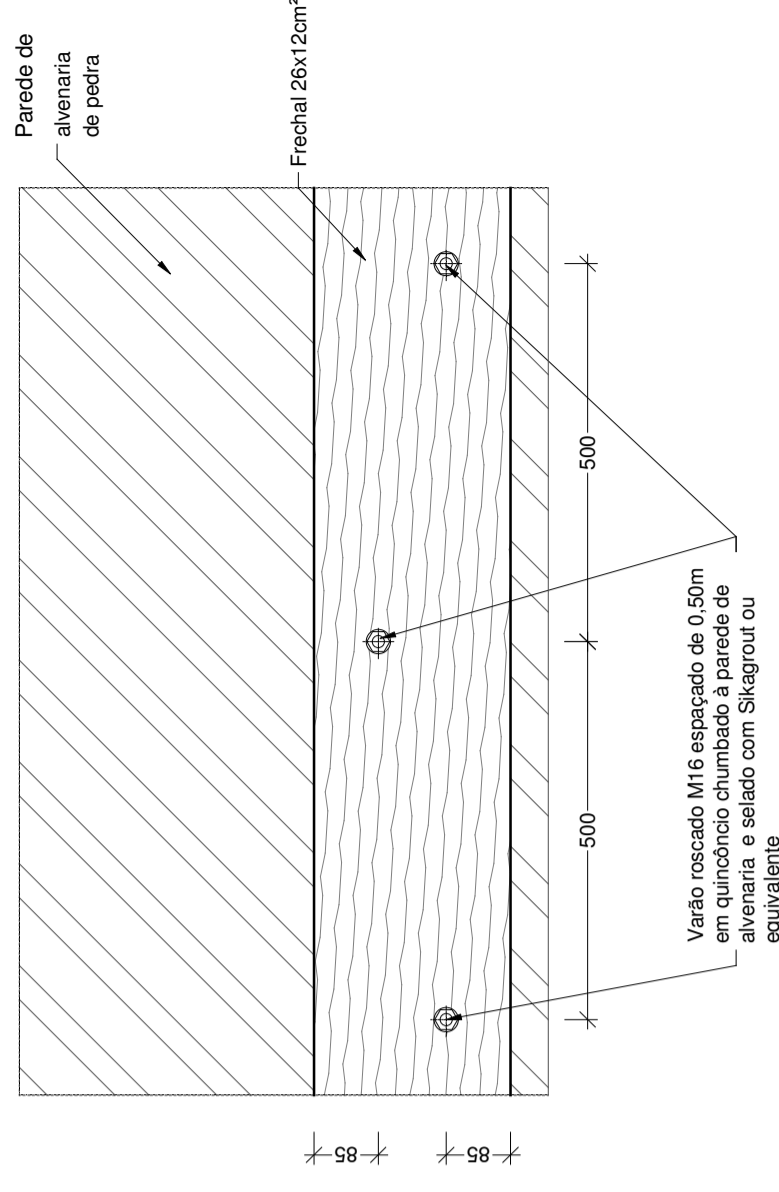


### Pormenor P4 Fixação do frechal às paredes de alvenaria

Esc. 1:10



### Planta



### Pormenor P1 Ligação das madres nas pernas das asnas e ligação entre pernas e linha elevada das Asnas NB

Esc. 1:10

### Pormenor P2 - Ligação das pernas das Asnas NB no frechal

Esc. 1:10

### Pormenor P3 Ligação da comeira nas Asnas NB e ligação das pernas

Esc. 1:10

### Pormenor P4 Fixação do frechal às paredes de alvenaria

Esc. 1:10

NOVOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM MADEIRA		
Designação	Seção	Classe resistente
VLC1	16x30cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC2	12x26cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC3	10x20cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC4	12x20cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC5	10x10cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VM1	8x8cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM2	8x12cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM3	8x14cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM4	10x18cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VLC - Nova Viga de madeira estrutural Lamelada Colada		
VM - Nova Viga de madeira estrutural Maciça		

MATERIAIS - ESTRUTURAS METÁLICAS	
<b>AÇOS</b>	<p><b>ESQUEMAS DE PINTURA</b></p> <p>ESQUEMA DE PINTURA PARA ELEMENTOS METÁLICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Os elementos estruturais enterrados deverão levar um esquema de pintura para proteção anticorrosiva de alta durabilidade para categoria de imersão em solo Im3, de acordo com a NP EN ISO 12944-5, à base de Epoxy de Alcatrão de acóro com as especificações preconizadas pelo C-POX CT940 da CIN, ou equivalente.</li> </ul> <p><b>PINTURA DE PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Decapagem a jacto abrasivo grau SA 2.5</li> <li>- Camada de Primário anti corrosivo epoxy de Zinco - 60 µ</li> <li>- Camada de tinta anti-fogo</li> <li>- Acabamento em poliuretano - 125 µ</li> </ul> <p>NOTA: A espessura da camada de tinta anti-fogo será definida de modo a garantir a proteção ao fogo requerida na zona em causa, devendo o Empreiteiro submeter a mesma a aprovação da fiscalização.</p> <p><b>PINTURA ESQUEMA EPOXY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Decapagem a jacto abrasivo grau Sa 2(1/2)</li> <li>- Camada de Primário anticorrosivo epoxy em Zinco - 90% na película seca - de dois componentes 40µµ</li> <li>- Subcapa primária de resina epoxy de dois componentes de alta resistência - 110µµ</li> <li>- Esmalte de acabamento epoxy de dois componentes - 50 µ</li> </ul>
<b>SOLDADURA</b>	<p><b>FABRICO DA ESTRUTURA METÁLICA</b></p> <p>Soldadura:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- O valor do cordão de soldadura será 0.7 da menor espessura a soldar.</li> <li>- O electrodos de soldadura a utilizar deverá ser do tipo E-7018-G (AWS).</li> </ul>

### NOTAS GERAIS

- Todas as cotas de implantação de elementos estruturais devem ser confirmadas no local de obra.

### MATERIAIS - ESTRUTURAS DE MADEIRA

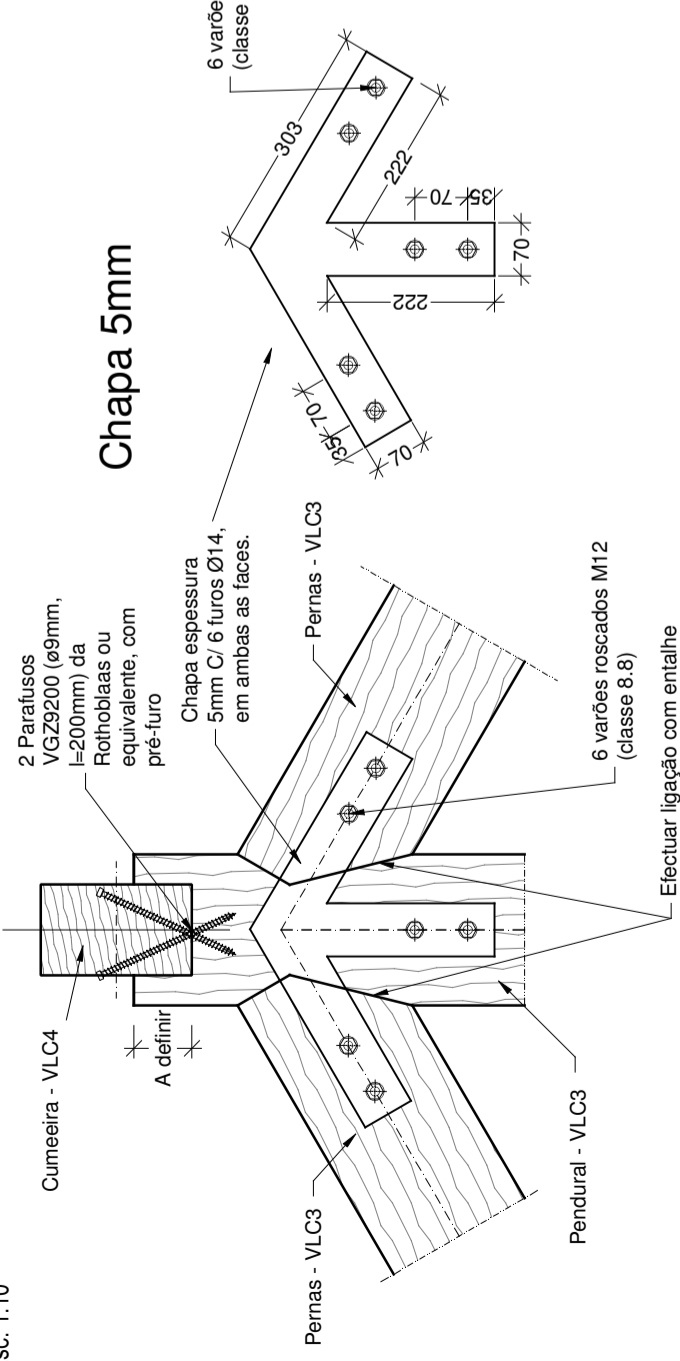
Treatmento: Os elementos estruturais de madeira lamelada colada (com classe resistente GL24h) serão da espécie *Pinus Sylvestris*, enquanto os elementos estruturais de madeira maciça (com classe resistente C18) deverão ser da espécie *Pinus Pinaster*. Ambas deverão receber um tratamento em autoclave de duplo vácuo com um produto do tipo Xylophene S.O.R.40 ou equivalente (INCOLOR). Os elementos de madeira existentes deverão receber um tratamento com o mesmo produto, aplicado por aspersão ou pincelagem.

### CRIAÇÃO BARRERAS QUÍMICAS ANTI-TÉRMITAS - ESTRUTURAS DE MADEIRA

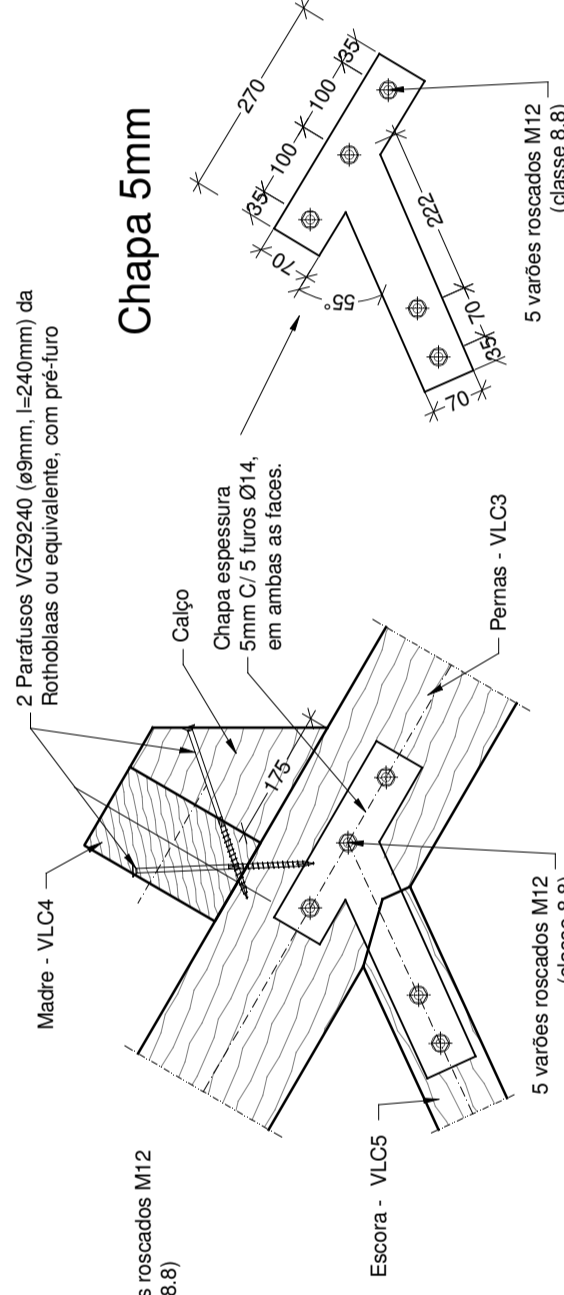
- Criação de barreiras químicas anti-térmitas em todas as estruturas em madeira (existentes e novas) da cobertura. Este tratamento deverá ser definido e aplicado por uma empresa da especialidade.

OBRA	IGreja Santa Cruz, Braga	DATA	Maio de 2016	FASE DO PROJECTO	EXE
PROJECTO	VL, FO, JS	PROCESSO	NCREP_0534A1215	ESCALA	1:10
DESIGNAÇÃO	Pormenores de ligação	RESENHO Nº	03	REVISÃO Nº	03
VERIFICOU	VL, FO, JS	APROVOU	VL	VERIFICOU	VL
Este documento é propriedade de NCREP - Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda, não podendo ser copiado, reproduzido no todo ou em parte ou comunicado a terceiros sem a sua expressa autorização e deverá ser devolvido quando solicitado.					

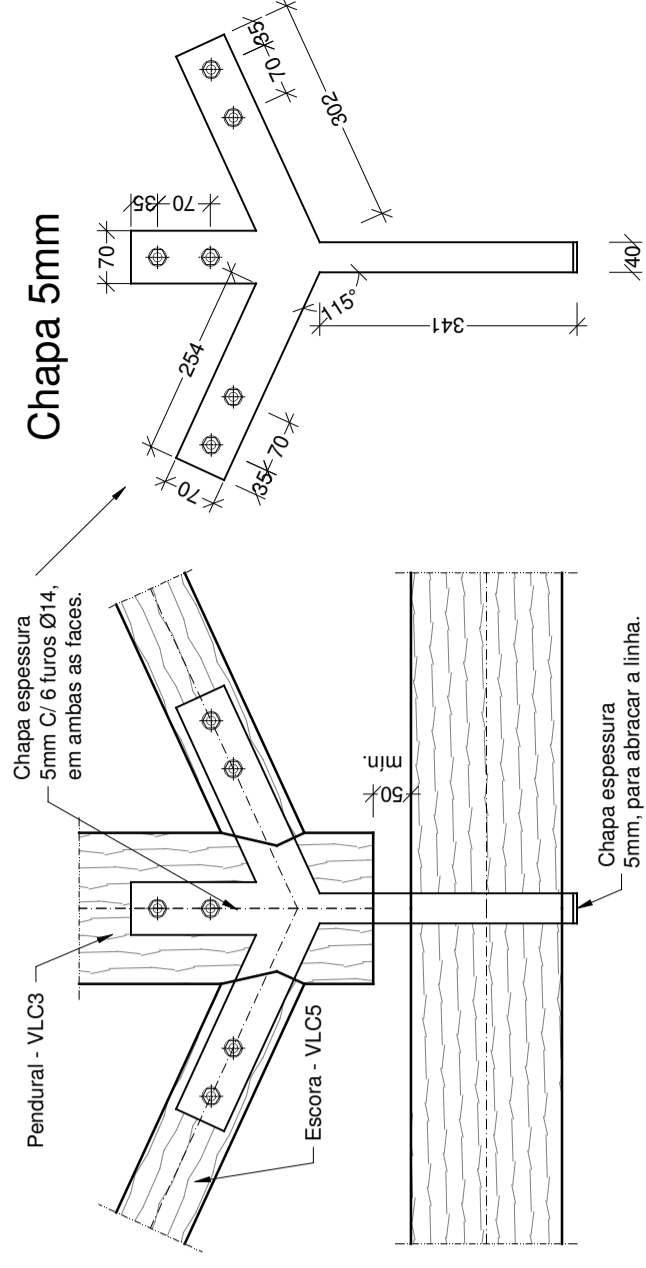
**Pormenor P5 Ligação das pernas com o pendural das Asnas NA**  
Esc. 1:10



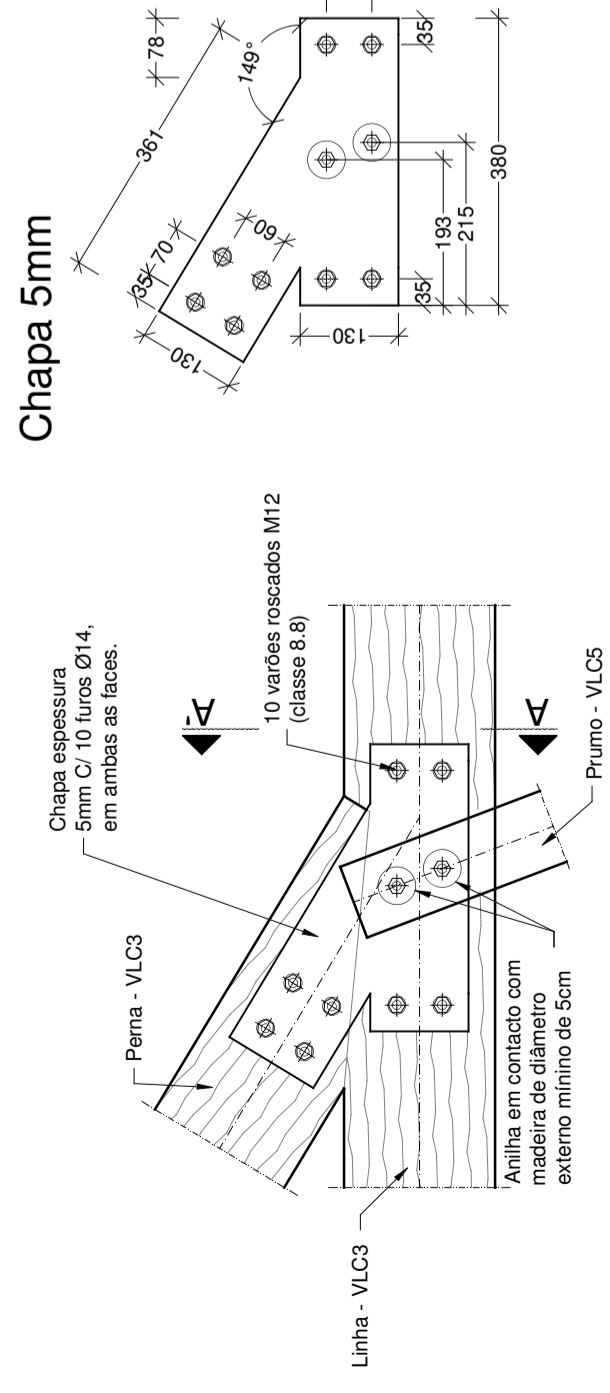
**Pormenor P6 Ligação das escoras com as pernas das Asnas NA**  
Esc. 1:10



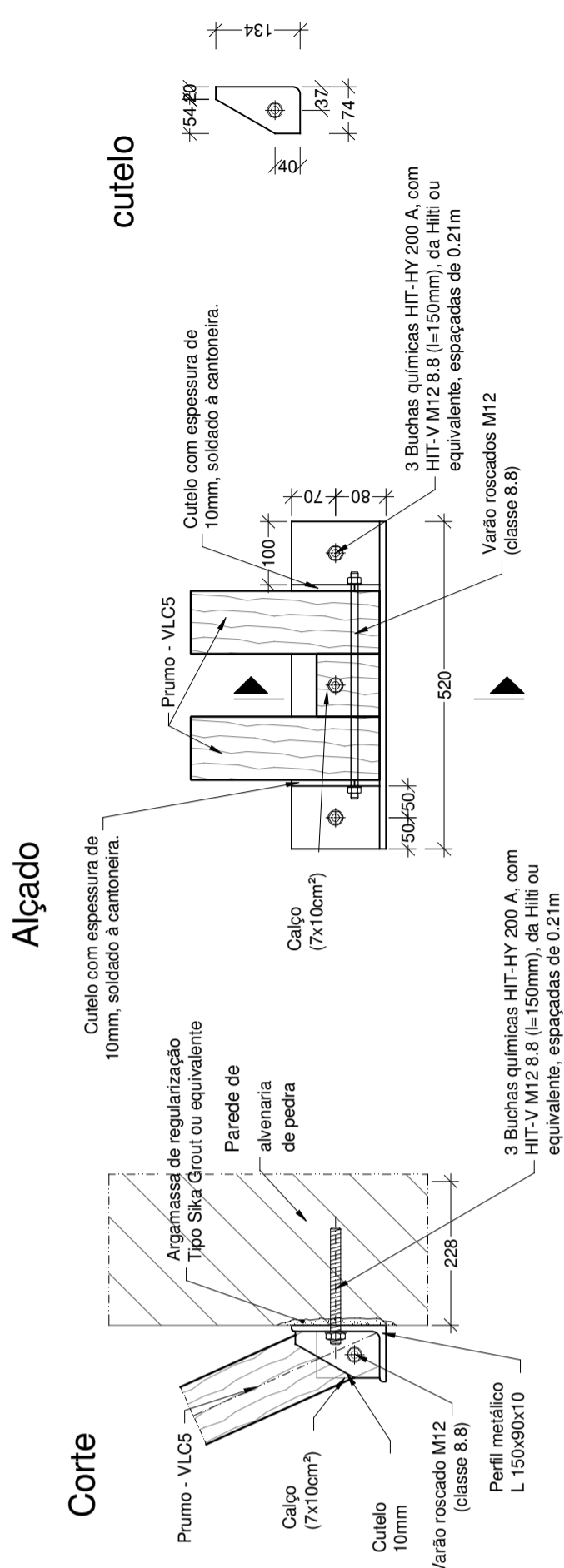
**Pormenor P7 Ligação das escoras com o pendural das Asnas NA**  
Esc. 1:10



**Pormenor P8 Ligação entre pernas, linha e prumos das Asnas NA**  
Esc. 1:10

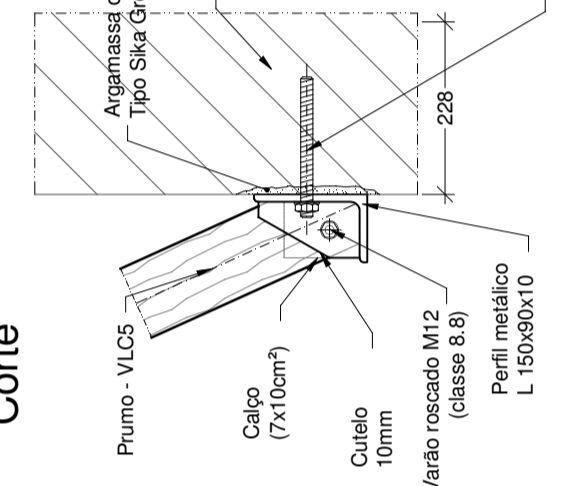


**Pormenor P9 Ligação dos prumos na parede de alvenaria de pedra**  
Esc. 1:10



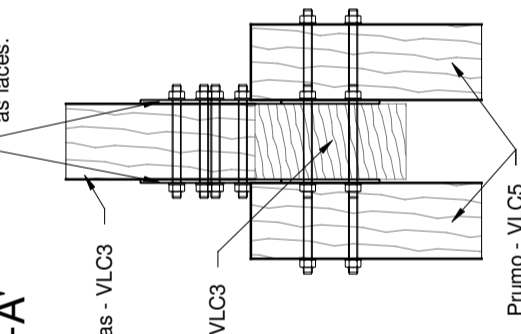
**Alçado**

**Corte**

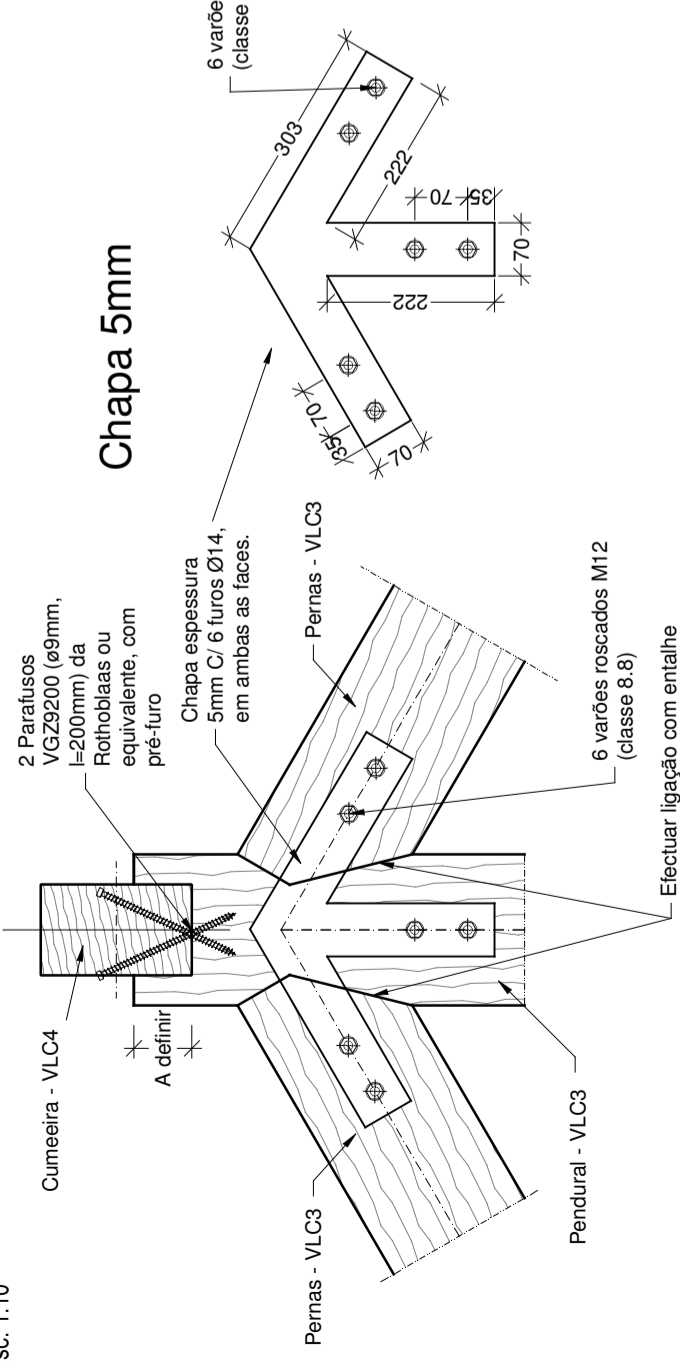


**Corte A-A'**

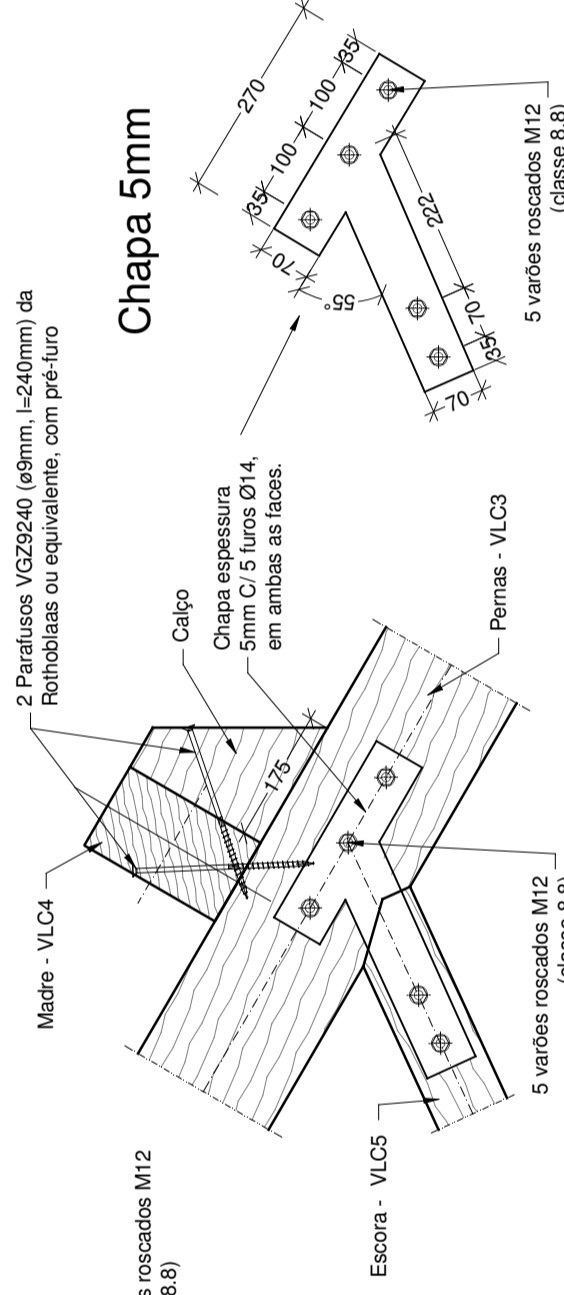
Chapa espessura 5mm C/ 10 furos Ø14, em ambas as faces.



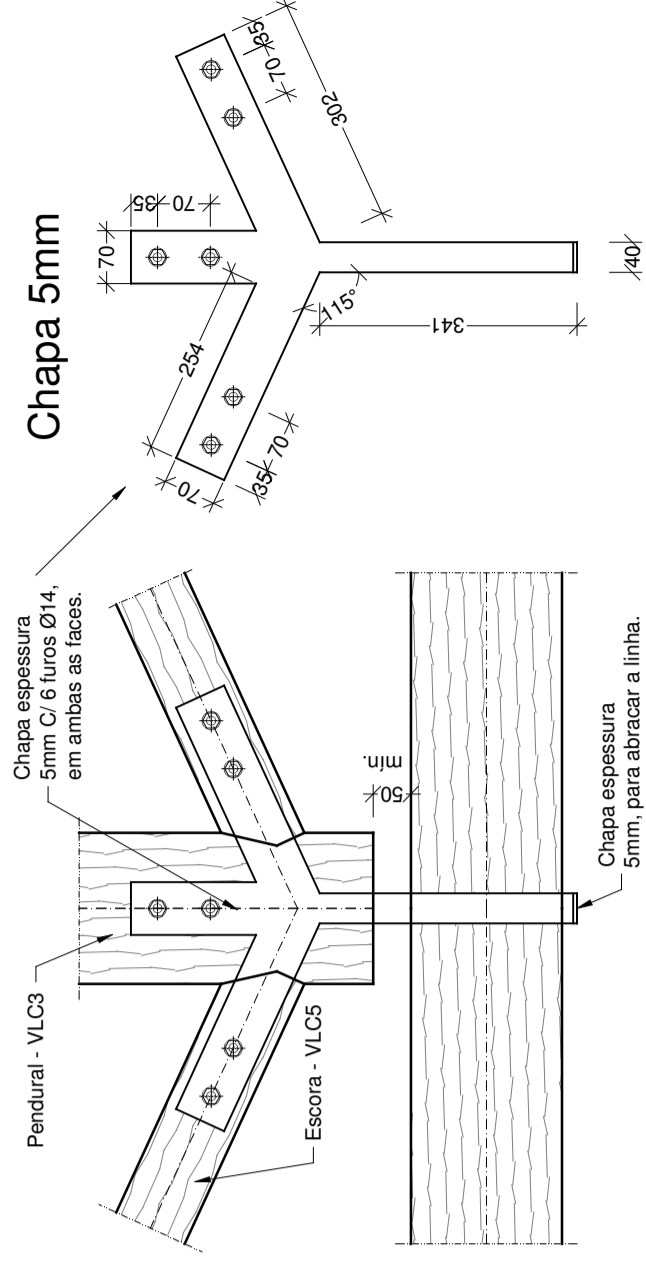
**Pormenor P5 Ligação das pernas com o pendural das Asnas NA**  
Esc. 1:10



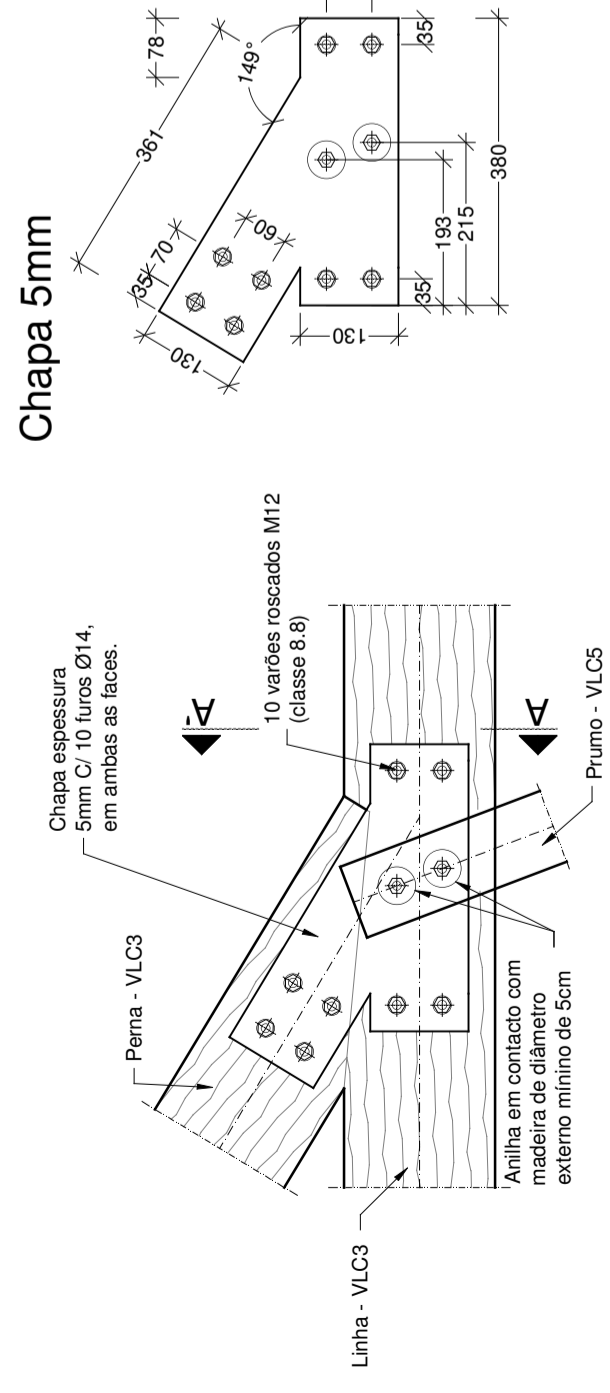
**Pormenor P6 Ligação das escoras com as pernas das Asnas NA**  
Esc. 1:10



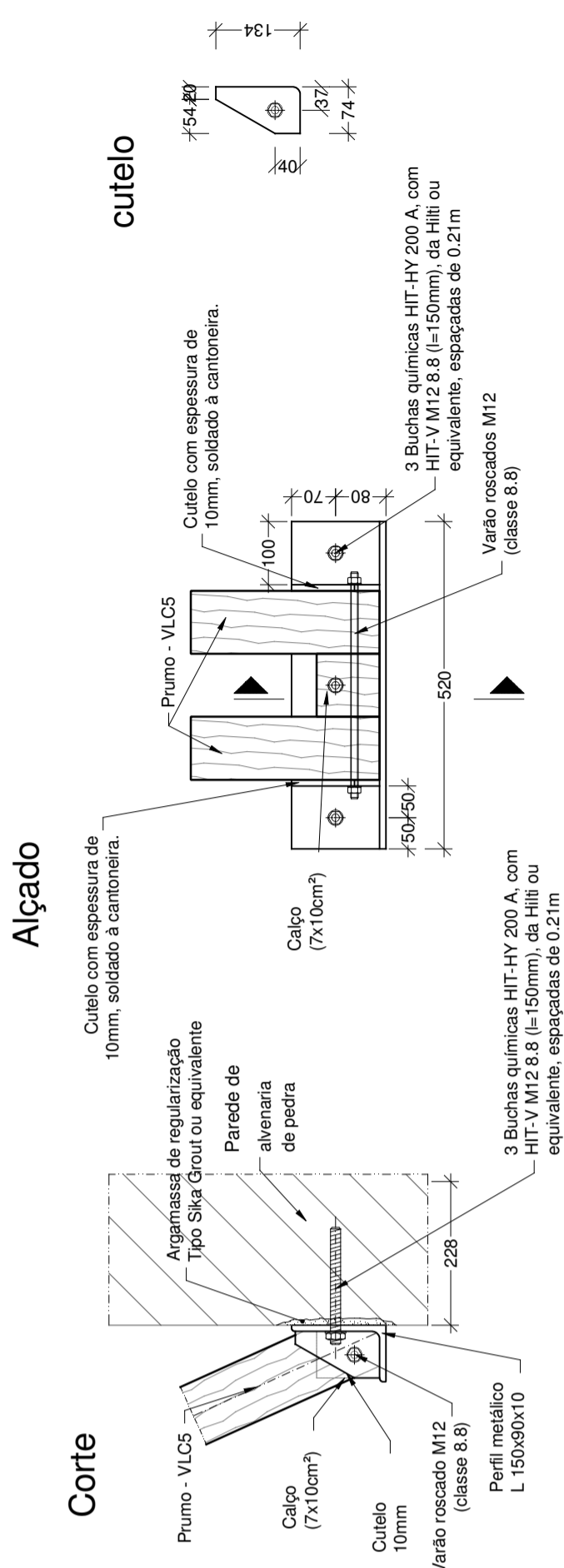
**Pormenor P7 Ligação das escoras com o pendural das Asnas NA**  
Esc. 1:10



**Pormenor P8 Ligação entre pernas, linha e prumos das Asnas NA**  
Esc. 1:10

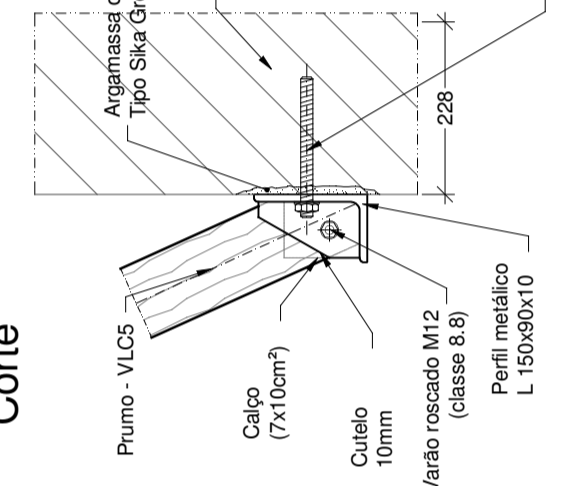


**Pormenor P9 Ligação dos prumos na parede de alvenaria de pedra**  
Esc. 1:10



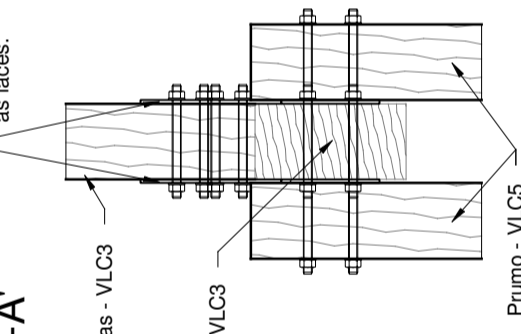
**Alçado**

**Corte**



**Corte A-A'**

Chapa espessura 5mm C/ 10 furos Ø14, em ambas as faces.



**NOVOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM MADEIRA**

Designação	Seção	Classe resistente
VLC1	16x30cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC2	12x26cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC3	10x20cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC4	12x20cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC5	10x10cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VM1	8x8cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM2	8x12cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM3	8x14cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM4	10x18cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)

VLC - Nova Viga de madeira estrutural Lamelada Colada  
VM - Nova Viga de madeira estrutural Maciça

**NOTAS GERAIS**

- Todas as cotas de implantação de elementos estruturais devem ser confirmadas no local de obra.
- MATERIAIS - ESTRUTURAS DE MADEIRA**
- Treatmento: Os elementos estruturais de madeira lamelada colada (com classe resistente GL24h) serão da espécie *Pinus Sylvestris*, enquanto os elementos estruturais de madeira maciça (com classe resistente C18) deverão ser da espécie *Pinus Pinaster*. Ambas deverão receber um tratamento em autoclave de duplo vácuo com um produto do tipo Xylophene S.O.R.40 ou equivalente (INCOLOR). Os elementos de madeira existentes deverão receber um tratamento com o mesmo produto, aplicado por aspersão ou pincelagem.
- CRIAÇÃO BARREIRAS QUÍMICAS ANTI-TÉRMITAS - ESTRUTURAS DE MADEIRA**
- Criação de barreiras químicas anti-térmitas em todas as estruturas em madeira (existentes e novas) da cobertura. Este tratamento deverá ser definido e aplicado por uma empresa da especialidade.

**MATERIAIS - ESTRUTURAS METÁLICAS**

AÇOS		ESQUEMAS DE PINTURA
Pertis e Chapas em Geral	S275JR (NP EN 10025)	<p><b>ESQUEMA DE PINTURA PARA ELEMENTOS METÁLICOS</b></p> <p>O tratamento anticorrosivo deve ser aplicado antes da montagem. O esquema de pintura deve ser aplicado em todas as partes da estrutura, incluindo as partes ocultas. A pintura deve ser aplicada em duas camadas, com uma camada de preparação e uma camada de acabamento. O produto de pintura deve ser aplicado de acordo com as especificações do fabricante.</p> <p><b>ESQUEMA DE PINTURA PARA ELEMENTOS METÁLICOS</b></p> <p>O tratamento anticorrosivo deve ser aplicado antes da montagem. O esquema de pintura deve ser aplicado em todas as partes da estrutura, incluindo as partes ocultas. A pintura deve ser aplicada em duas camadas, com uma camada de preparação e uma camada de acabamento. O produto de pintura deve ser aplicado de acordo com as especificações do fabricante.</p>
Parafusos	DIN 931 - 8.8	
Porcas	DIN 934 - 8	
Anilhas	DIN126/DIN434 - Aço	
Chumbadouros (em geral)	S355/J0	
Varões Rosçados	Aço da Classe 8.8 (Varões de ancoragem)	
<p>NOTA: A espessura da camada de tinta anti-fogo será definida de modo a garantir a proteção ao fogo requerida na zona em causa, devendo o Empreiteiro submeter a mesma a aprovação da fiscalização.</p> <p><b>PINTURA ESQUEMA EPOXY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Decapagem a jacto abrasivo grau Sa.2(1/2)</li> <li>- Camada de Primário anticorrosivo epoxy em Zinco - 90% na película seca - de dois componentes 400µ</li> <li>- Subcapa imediata de resina epoxy de dois componentes de alta resistência - 110µ</li> <li>- Esmalte de acabamento epoxy de dois componentes - 50 µ</li> </ul>		
<p><b>SOLDADURA</b></p> <p>Soldadura: - O valor do cordão de soldadura será 0.7 da menor espessura a soldar. - O electrodo de soldadura a utilizar deverá ser do tipo E/7018-G (AWS).</p>		
<p><b>FABRICO DA ESTRUTURA METÁLICA</b></p> <p>- Antes de se iniciar o fabrico da estrutura, todas as dimensões relativas a elementos existentes deverão ser confirmadas no local da obra. - Todas as cotas de implantação das estruturas metálicas devem ser confirmadas no local de obra.</p>		

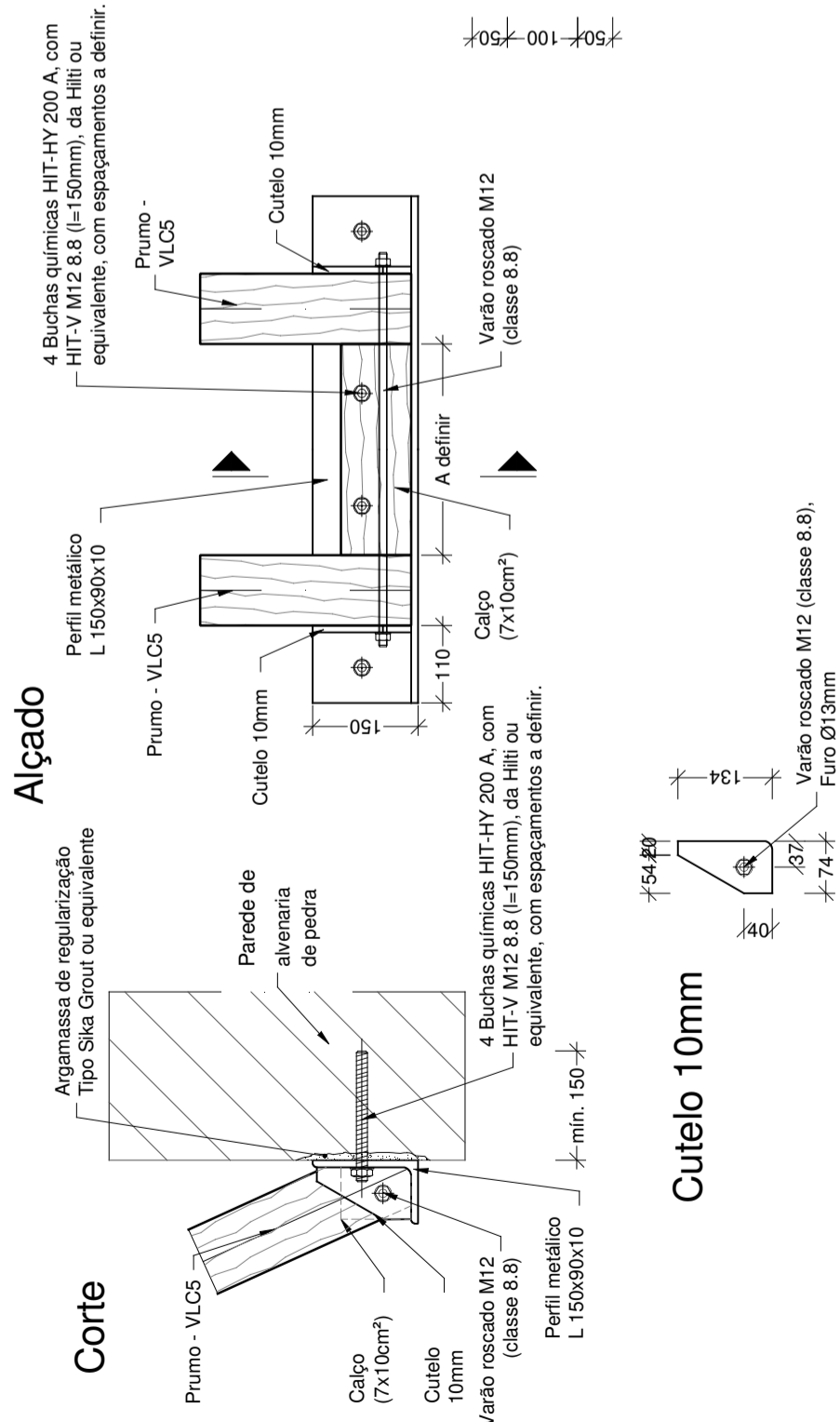
OBRA	DATA	FASE DO PROJECTO
Obra Santa Cruz, Braga Projecto de Execução de Estabilidade	Maio de 2016	EXE
DESIGNAÇÃO	ESCALA	RESENHO Nº
Pormenores de ligação	1:10	04
PROJECÇÃO	DESIGNADO	VERIFICOU
VL, FO, JS	VL, FO, JS	VL

Este documento é propriedade de NCREP - Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda, não podendo ser copiado, reproduzido no todo ou em parte ou comunicado a terceiros sem a sua expressa autorização e deverá ser devolvido quando solicitado.

**NCREP**  
CONSULTORIA EM REABILITAÇÃO DO EDIFICADO E PATRIMÓNIO, LDA

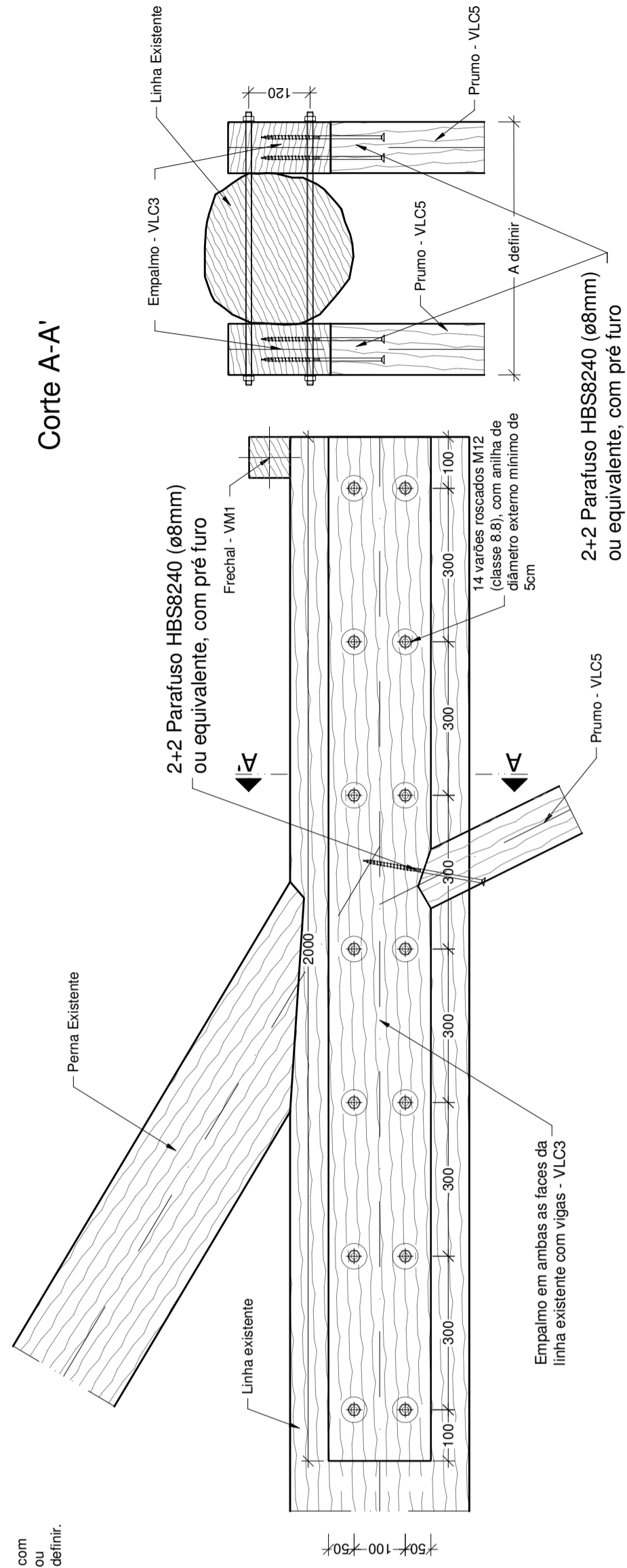
### Pormenor P10 Ligação dos prumos na parede de alvenaria de pedra

Esc. 1:10



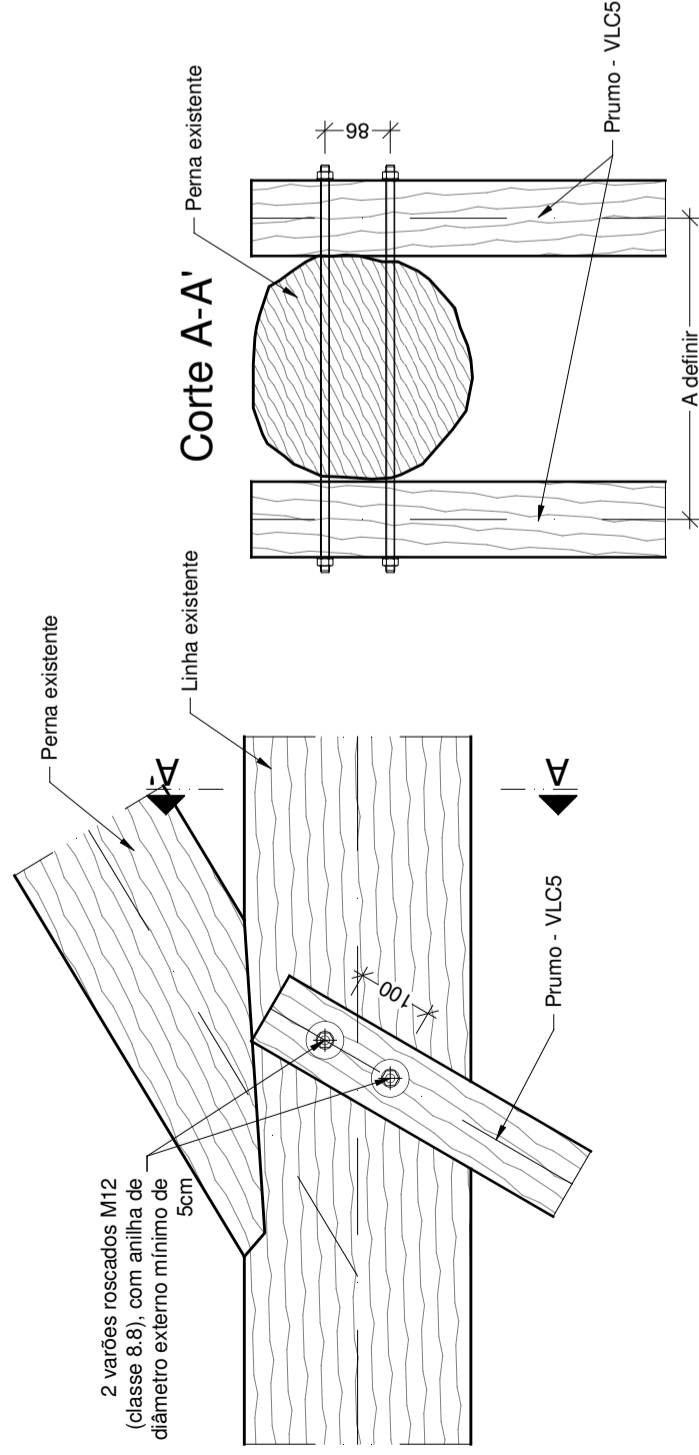
### Pormenor P11 Ligação dos empalmos na linha da asna A3 (existente) e ligação dos prumos nos empalmos

Esc. 1:10



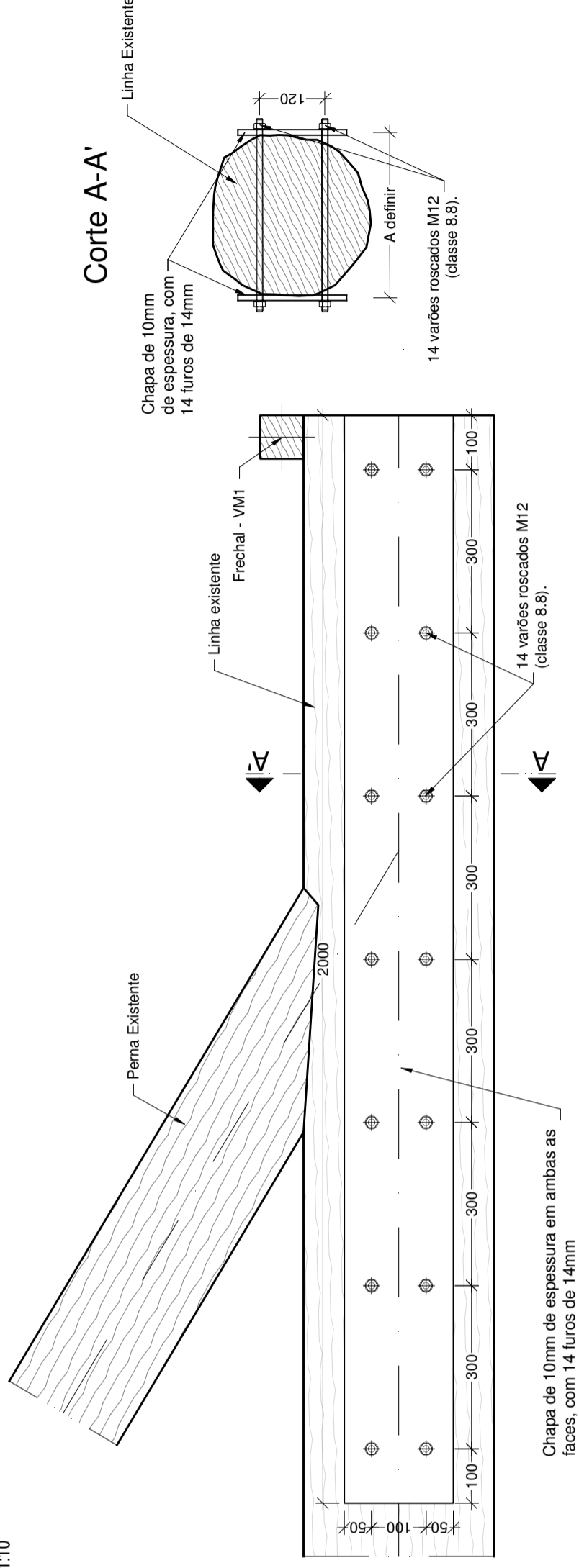
### Pormenor P12 Ligação dos prumos na linha A3, na extremidade sem empalmos

Esc. 1:10



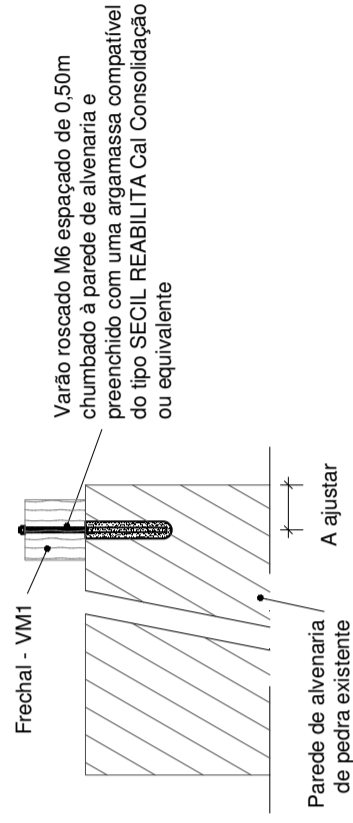
### Pormenor P13 Ligação dos empalmos em chapa nas linhas das asnas A1 e A2 (existentes)

Esc. 1:10



### Pormenor P14 - Fixação dos frechais às paredes de alvenaria de pedra

Esc. 1:10



### NOVOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM MADEIRA

Designação	Secção	Classe resistente
VLC1	16x30cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC2	12x26cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC3	10x20cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC4	12x20cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VLC5	10x10cm <sup>2</sup>	GL24h (lamelada)
VM1	8x8cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM2	8x12cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM3	8x14cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VM4	10x18cm <sup>2</sup>	C18 (maciça)
VLC - Nova Viga de madeira estrutural Lamelada Colada		
VM - Nova Viga de madeira estrutural Maciça		

### NOTAS GERAIS

- Todas as cotas de implantação de elementos estruturais devem ser confirmadas no local de obra.

### MATERIAIS - ESTRUTURAS DE MADEIRA

Treatmento: Os elementos estruturais de madeira lamelada colada (com classe resistente GL24h) serão da espécie *Pinus Sylvestris*, enquanto os elementos estruturais de madeira maciça (com classe resistente C18) deverão ser da espécie *Pinus Pinaster*. Ambos deverão receber um tratamento em autoclave de duplo vácuo com um produto do tipo Xylophene S.O.R.40 ou equivalente (INCOLOR). Os elementos de madeira existentes deverão receber um tratamento com o mesmo produto, aplicado por aspersão ou pincelagem.

### CRIAÇÃO BARRERAS QUÍMICAS ANTI-TÉRMITAS - ESTRUTURAS DE MADEIRA

- Criação de barreiras químicas anti-térmitas em todas as estruturas em madeira (existentes e novas) da cobertura. Este tratamento deverá ser definido e aplicado por uma empresa da especialidade.

### MATERIAIS - ESTRUTURAS METÁLICAS

ACOÇOS	ESQUEMAS DE PINTURA
Perfis e Chapas em Geral	S275JR (NP EN 10025)
Parafusos	DIN 931 - 8.8
Porcas	DIN 934 - 8
Anilhas	DIN126/DIN434 - Aço
Chumbadouros (em geral)	S355J0
Varões Roscados	Aço da Classe 8.8 (Varões de ancoragem)
<b>SOLDADURA</b>	
Soldadura:	PINTURA ESQUEMA EPOXY
- O valor do cordão de soldadura será 0.7 da menor espessura a soldar.	- Decapagem a jacto abrasivo grau Sa.2(1/2)
- O electrodos de soldadura a utilizar deverá ser do tipo E.7018-G (AWS).	- Camada de Primário anticorrosivo epoxy em Zinco - 90% na película seca - de dois componentes 40µm
	- Subcapa primária de resina epoxy de dois componentes de alta espessura - 110µm
	- Esmalte de acabamento epoxy de dois componentes - 50 µ
<b>FABRICO DA ESTRUTURA METÁLICA</b>	

- Antes de se iniciar o fabrico da estrutura, todas as dimensões relativas a elementos existentes deverão ser confirmadas no local da obra.

- Todas as cotas de implantação das estrutura metálicas devem ser confirmadas no local de obra.





