



MÁRIO RUI MONTEIRO ALVIM DE CASTRO

Trabalho de natureza profissional apresentado ao Instituto Politécnico do Porto para efeitos de prestação de provas para a atribuição do título de especialista em Engenharia e Técnicas Afins, em conformidade com o Decreto-Lei nº206/2009 de 31 de Agosto e o Despacho n.º14093/2011, DR n.º 200, 2ª Série, de 18 de Outubro.

Porto, janeiro de 2014

PERFIS PULTRUDIDOS

**PROCESSO DE FABRICO, CONCEÇÃO E
DIMENSIONAMENTO**

Preâmbulo

Desde a sua licenciatura o signatário tem dedicado a sua atividade profissional à área dos materiais compósitos de matriz polimérica e em especial aos perfis pultrudidos.

A implementação destes perfis em Portugal deve-se em parte ao trabalho realizado pelo signatário na empresa ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda. Esta empresa surgiu de um *spin-off* académico, em 1996, a partir do INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial onde os dois sócios desenvolveram três anos de investigação nesta área.

O signatário assumiu a responsabilidade pelos departamentos financeiro, comercial e de projeto, colaborando na parte produtiva, quer na implementação de novas técnicas de fabrico quer no fabrico em si. A partir de 1999, criou e assumiu a responsabilidade do departamento de obras. Foi a partir desta data que novos desafios apareceram e a realização do projeto de estruturas em perfis pultrudidos teve um grande crescimento.

O signatário contribuiu para a introdução de outros meios de produção na empresa, como a moldação manual, o RTM Light, injeção de poliuretano, equipamentos de comando numérico para maquinagem de modelos, fabrico de moldes, corte de peças e mais recentemente um equipamento de projeção. Todos estes investimentos permitiram um crescimento sustentável da empresa sempre apostando na qualidade. No ano de 2006, a empresa obteve a certificação de acordo com a norma ISO 9001, para a qual muito se empenhou o signatário.

Tendo os perfis pultrudidos ocupado grande parte da experiência profissional do signatário, será sobre este tema que será apresentado este trabalho de natureza profissional.

Neste trabalho é explicado o que são perfis pultrudidos, descreve-se o processo de fabrico, a conceção material do perfil pultrudido, as matérias-primas específicas para este processo, algumas aplicações destes materiais, como se dimensionam e por fim o dimensionamento de uma estrutura constituída com estes perfis, estrutura esta para suporte de um seletor de azeitonas numa indústria alimentar.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
2	PULTRUSÃO	2
3	PROCESSO DE FABRICO	3
4	CONSTITUIÇÃO DO PERFIL	5
4.1	REFORÇO.....	5
4.1.1	<i>Roving</i>	6
4.1.2	<i>Manta</i>	7
4.1.3	<i>Tecido de Superfície</i>	8
4.2	RESINAS	9
4.3	CATALISADORES.....	11
4.4	CARGAS	11
4.5	PIGMENTOS	12
4.6	ADITIVOS.....	12
5	EQUIPAMENTO	12
5.1	SISTEMA DE SUPORTE DO REFORÇO	13
5.2	IMPREGNAÇÃO DAS FIBRAS	16
5.3	GUIAMENTOS.....	17
5.4	FIEIRA E AQUECIMENTO	19
5.5	FASE DE TRAÇÃO.....	24
5.6	CORTE	26
5.7	CONTROLO	27
5.8	HIGIENE E SEGURANÇA	27
6	VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO DE PULTRUSÃO	28
7	CARACTERÍSTICAS DOS PERFIS PULTRUDIDOS	29
7.1	PROPRIEDADES MATERIAIS CARACTERÍSTICAS DOS PERFIS PULTRUDIDOS	31
7.2	ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DE UM PERFIL PULTRUDIDO	32
8	APLICAÇÕES	35
9	DIMENSIONAMENTO DE PERFIS PULTRUDIDOS	39
9.1	COEFICIENTE DE SEGURANÇA PARA A INCERTEZA DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	40
9.2	DIMENSIONAMENTO DOS MEMBROS À TRAÇÃO.....	43
9.3	DIMENSIONAMENTO DOS MEMBROS À COMPRESSÃO	44
9.4	DIMENSIONAMENTO DOS MEMBROS À FLEXÃO	49
9.4.1	<i>Dimensionamento à Resistência (ELU – Estado Limite Último)</i>	50
9.4.2	<i>Dimensionamento à Rigidez (ELS – Estado Limite de Serviço)</i>	51
9.5	DIMENSIONAMENTO AO CORTE	53
9.6	ESTABILIDADE DA SECÇÃO.....	55
9.6.1	<i>Tensão Crítica de Encurvadura na Alma da Viga Devido à Flexão</i>	55
9.6.2	<i>Tensão de Corte Crítica na Alma da Viga</i>	56
9.6.3	<i>Combinação de Corte e Flexão no Plano na Alma da Viga</i>	56

9.6.4	<i>Resistência da Alma às Cargas Transversais</i>	57
9.6.4.1	<i>Comprimento do Apoio Rígido</i>	57
9.6.4.2	<i>Resistência à Rotura da Alma do Perfil</i>	58
9.6.4.3	<i>Resistência à Encurvadura da Alma do Perfil</i>	59
9.6.4.4	<i>Encurvadura da Compressão do Banzo (uma extremidade fixa, uma extremidade livre)</i>	60
9.6.4.5	<i>Encurvadura Lateral Devido à Torção</i>	61
9.7	COMBINAÇÃO DE ESFORÇOS	61
10	DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTRUTURA	63
10.1	REQUISITOS	64
10.2	CONCEÇÃO DA ESTRUTURA	64
10.3	QUANTIFICAÇÃO DAS AÇÕES	66
10.3.1	<i>Ações Permanentes:</i>	66
10.3.2	<i>Sobrecarga</i>	67
10.4	PROPRIEDADES DO MATERIAL	67
10.5	CÁLCULO DOS ESFORÇOS	69
10.5.1	<i>Dimensionamento dos Membros à Tração</i>	70
10.5.2	<i>Dimensionamento dos Membros à Compressão</i>	73
10.5.3	<i>Dimensionamento dos Membros à Flexão</i>	77
10.5.3.1	<i>Dimensionamento à Resistência (ELU – Estado Limite Último)</i>	78
10.5.3.2	<i>Dimensionamento à Rigidez (ELS – Estado Limite de Serviço)</i>	80
10.5.4	<i>Dimensionamento ao Corte</i>	83
10.5.5	<i>Verificação da Estabilidade</i>	85
10.5.5.1	<i>Tensão Normal Crítica na Alma do Perfil devido à Flexão</i>	85
10.5.5.2	<i>Tensão de Corte Crítica na Alma do Perfil</i>	86
10.5.5.3	<i>Combinação de Corte e Flexão no Plano na Alma da Viga</i>	88
10.5.5.4	<i>Resistência da Alma às Cargas Transversais</i>	89
10.5.5.4.1	<i>Comprimento do Apoio Rígido</i>	90
10.5.5.4.2	<i>Resistência à Rotura da Alma do Perfil</i>	90
10.5.5.4.3	<i>Resistência à Encurvadura da alma do Perfil</i>	90
10.5.5.4.4	<i>Encurvadura do Banzo</i>	91
10.5.5.5	<i>Encurvadura Lateral Devido à Torção</i>	92
10.6	IMAGENS DA APLICAÇÃO	98
11	CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
12	REFERÊNCIAS	101
13	BIBLIOGRAFIA	102
ANEXO 1		103
ANEXO 2		115
ANEXO 3		121
ANEXO 4		129

1 Introdução

O processo de pultrusão surgiu nos Estados Unidos nos anos cinquenta, quando Brand Goldsworthy inventou a primeira máquina de pultrusão [1]. Goldsworthy apresentou em 1954, uma descrição detalhada deste processo e os princípios de engenharia aos círculos profissionais nos EUA [2].

Inicialmente esta abordagem foi utilizada para o fabrico de perfis apenas com reforço uniaxial.

Na mesma altura Ernst Kühne desenvolveu o método de pultrusão no laboratório de desenvolvimento tecnológico de Brown Boveri (BBC), em Baden / Suíça (hoje conhecido como ABB). Foi aqui que se produziu de forma automática os primeiros produtos de pultrusão, que foram perfis com resina de epóxico e reforço de fibra de vidro uniaxial (*roving*), o que e levou à conceção, ao fabrico de máquinas e ferramentas de precisão essenciais para o processo.

Inicialmente, as técnicas de pultrusão verticais foram dirigidas especificamente para secções complexas, principalmente para os perfis ocós, em que a alimentação de fibras em torno de um núcleo centralmente suspenso foi menos problemática do que com a abordagem horizontal.

A partir dos anos 60 do século XX, já existia uma ampla gama de secções de perfis pultrudidos.

A experiência de Kühne era na produção de perfis com resina de epóxico enquanto a experiência de Goldsworthy era exclusivamente na área de resinas de poliéster [2].

Este processo tem sofrido uma grande evolução no sentido de melhorar as propriedades dos perfis. Hoje em dia, existe uma variedade de perfis aplicáveis a diversas finalidades, tanto em dimensões como na composição do reforço e resinas.

Em 1960, havia cerca de 20 fabricantes de perfis pultrudidos, localizados principalmente nos Estados Unidos. Atualmente existem 90 fabricantes dispersos pelos EUA, Europa e Extremo Oriente. O volume do mercado na Europa atinge um número estimado de 47.000 toneladas por ano [2]. O consumo de perfis pultrudidos no mercado Europeu é significativamente inferior ao do mercado norte-americano, mas o seu crescimento é bastante promissor, apresentando cada vez mais aplicações.

Em Portugal, este processo é relativamente recente, conhecendo-se a sua aplicação a partir de 1986, com a primeira empresa de fabrico de perfis pultrudidos, que encerrou em 1992.

A ALTO – Perfis Pultrudidos, Lda., surgiu em 1996 e durante muitos anos foi a única empresa produtora de perfis pultrudidos em Portugal.

Devido à potencialidade destes produtos, das quais se destaca a ausência de manutenção e o seu baixo peso específico, quando comparado com os materiais tradicionais de engenharia, os perfis têm tido cada vez mais aplicações em Portugal. No entanto, são ainda desconhecidos por muitos projetistas e engenheiros, não só em Portugal como nos mercados internacionais onde o signatário tem atuado comercialmente, nomeadamente nos mercados Francês, Espanhol, dos países do Magrebe e dos PALOP.

2 Pultrusão

Pultrusão é o nome atribuído ao processo automático para a produção, em contínuo, de produtos de secção constante, sendo a maior parte destes produtos perfis e tubos. Este processo é aplicado exclusivamente a materiais compósitos.

O processo pode ser comparado com a extrusão convencional; com a diferença de que a força para obrigar o material a atravessar a fiação é aplicada após a mesma, através de um sistema de tração que agarra o perfil, enquanto na extrusão a pressão é aplicada antes da fiação.

Como a Pultrusão é um processo contínuo, beneficia de vantagens inerentes da eficiência e controle efetivo do processo, resultando em propriedades uniformes e com boa tolerância dimensional. Dada a continuidade do processo, podem ser produzidos perfis com qualquer comprimento, tendo como única limitação as dimensões para o transporte. É possível a produção de rolos de perfis de pequena secção, podendo assim ter alguns quilómetros de comprimento, o que facilita o transporte.

Pode produzir-se qualquer secção, bastante plana e com elevado brilho, apesar de esta característica não ser solicitada para aplicações industriais.

A Pultrusão é um dos grandes processos utilizado no fabrico de plásticos reforçados com fibra de vidro (PRFV), embora outros tipos de fibra também possam ser utilizados, como por exemplo as fibras de carbono e aramida (*Kevlar*®).

Nos dias de hoje devido à necessidade de aplicação de materiais mais amigos do ambiente começam a surgir aplicações com fibras naturais, como por exemplo as fibras de linho, cânhamo, etc., mas as suas propriedades e quantidades disponíveis são bastante reduzidas. Também neste contexto a substituição dos plásticos termoendurecíveis por termoplásticos

começa a ter procura, embora a utilização dos termoplásticos como perfis estruturais ainda não seja uma realidade.

Este processo tem sido desenvolvido tendo em vista as necessidades dos plásticos estruturais com altas propriedades mecânicas e físicas, para poderem competir com os materiais de engenharia tradicionais (aço, alumínio e betão). Este processo permite obter perfis de secções diversas e complexas, sendo algumas delas impossíveis de obter em perfis metálicos.

3 Processo de Fabrico

O processo de Pultrusão consiste no arrasto de fibras contínuas (*roving*), mantas e/ou tecidos contínuos. Estes são impregnados num banho de resina passando de seguida por um sistema de guiamento e controlo, onde é retirado o excesso de resina e é dada a conformação às fibras, para que estas tenham a forma aproximada à secção a produzir. Estas passam de seguida por uma fieira aquecida com a forma da secção do perfil onde se efetua a cura do compósito. Os materiais são conformados e curados à medida que a secção progride ao longo da fieira aquecida. O avanço do perfil é efetuado através de um sistema de tração que permite o movimento contínuo e controla a velocidade de produção.

A velocidade de produção é controlada para que a cura seja efetuada completamente no tempo em que o produto se encontra dentro da fieira. É nesta fase que o material obtém resistência suficiente para resistir às forças exercidas durante a fase de tração. Depois de passar o sistema de tração, existe um sistema de corte onde os perfis são cortados com o comprimento pretendido.

O processo de Pultrusão, bem como a maioria dos métodos de fabricação dos plásticos de matriz termoendurecível reforçados com fibra, envolve as seguintes fases:

1. Impregnação do reforço de fibra por resina líquida.
2. Consolidação para remover ar e excessos de resina.
3. Conformação e cura no molde.
4. Desmoldação e termo.

A fim de efetuar todas estas fases, as máquinas de Pultrusão são constituídas por:

- - Sistema de suporte do reforço
- - Banho de resina
- - Conformação do reforço e remoção do excesso de resina
- - Fieira aquecida
- - Sistema de tração
- - Sistema de corte

Na figura 1 está indicado como estes passos são integrados no processo automático contínuo.



Figura 1 - Passos essenciais do processo de Pultrusão

Uma disposição esquemática de uma unidade de produção simples de Pultrusão encontra-se na figura 2.

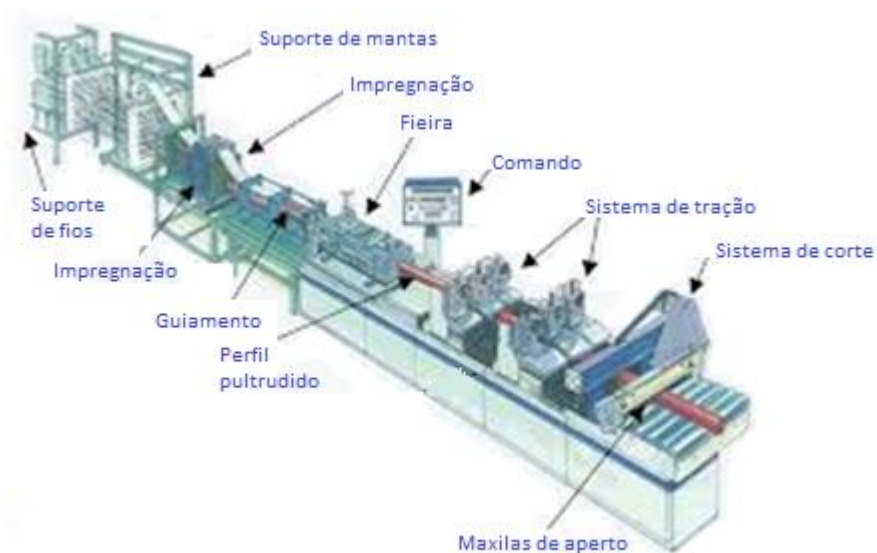


Figura 2 - Diagrama esquemático do processo de Pultrusão

4 Constituição do perfil

Os perfis são constituídos pelo reforço unidirecional denominado *roving*, reforço com fibras na direção transversal denominado manta e/ou tecidos, a matriz normalmente de resinas termoendurecíveis e para melhor acabamento superficial por um tecido de superfície. A figura 3 indica a distribuição destes constituintes.

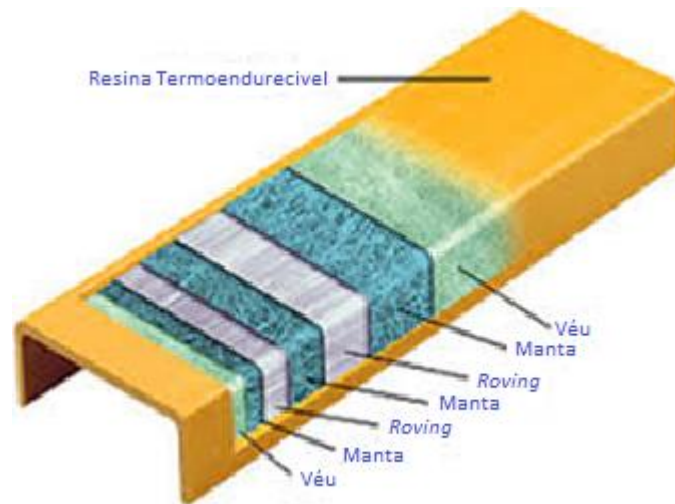


Figura 3 – Constituição do perfil

Podemos dividir os constituintes em três categorias, o reforço, a matriz polimérica e o véu de superfície. O material predominante é o reforço, onde as suas percentagens mássicas variam entre 55 e 75%. Nos pontos seguintes abordamos os diferentes materiais existentes nos perfis pultrudidos e suas propriedades.

4.1 Reforço

O grande mercado do processo de Pultrusão é para os produtos com reforço de fibra de vidro, embora se possa utilizar qualquer outro tipo de fibras ou arame que seja compatível com as condições de cura. Nos produtos pultrudidos as fibras-de-vidro mais utilizadas são produzidas a partir de vidro-E.

A qualidade é importante para todos os processos automáticos, mas a Pultrusão é sensível à qualidade das fibras. O processo é impraticável se o reforço não for consistente. Por esta razão, diversos tipos de reforço têm sido desenvolvidos especificamente para o processo de Pultrusão.

No controlo das propriedades mecânicas do produto, as fibras têm uma enorme relevância no estado de processamento e é essencial para a continuidade do processo que o reforço tenha resistência longitudinal suficiente para agir como um transportador, pois arrasta o material ao longo do processo. As fibras também ajudam a evitar a aderência da resina à superfície da fiação durante a fase de cura. É necessário uma quantidade elevada de fibras para assegurar que as fibras externas sejam pressionadas contra a superfície da fiação e assim efetuarem o movimento contínuo de transporte da resina.

Os reforços tradicionais utilizados no processo de pultrusão são de vidro, carbono e aramida (*Kevlar*®), apesar de começarem a aparecer novos materiais naturais como por exemplo das fibras de linho e cânhamo, etc.

A tabela 1 indica as propriedades típicas dos diferentes tipos de reforço [3].

Propriedade	Vidro-E	Vidro S	Carbono	Aramida
Densidade (g/cm ³)	2,6	2,49	1,47	1,77
Resistência à Tração (MPa)	3450	4585	2750	1900-3100
Módulo de Elasticidade (GPa)	72,4	86,9	62	227-379
Elongação (%)	4,8	5,4	2,3	0,5

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos reforços típicos [3]

Os tipos de reforço mais usuais são caracterizados por terem cores bem diferentes devido aos seus constituintes. A fibra de vidro é caracterizado por ser branca, o carbono preto e aramida amarela.

Os *rovings*, mantas e tecidos estão disponíveis em várias formas. As mantas e tecidos têm que apresentar boas características de processamento e excelente resistência quando impregnados, pois dão ao produto a resistência bidirecional. A resistência ao corte interlaminar entre camadas adjacentes de reforços de tecidos é fraca, sendo então normalmente utilizados em conjunto com outros materiais.

4.1.1 *Roving*

Os fios de fibra (*rovings*) são incorporados na maioria dos perfis pultrudidos para obter resistência longitudinal no processo e no produto final. Quando utilizado como único reforço pode ser conseguido elevadas percentagens de fibra, resultando um produto com

propriedades mecânicas elevadas, mas estas propriedades são essencialmente unidirecionais e a resistência interlaminar ao corte, sendo controlada largamente pela matriz de resina, é relativamente baixa.

Os *spun rovings* são um compromisso útil, combinando a resistência longitudinal com a componente transversal por meio de fios soltos (tipo cordão de sisal), que se interligam com o restante reforço. Como produtos específicos, estes são mais caros do que os *rovings* normais e o seu uso é restringido a algumas aplicações e algumas zonas das secções dos perfis, onde existam variações angulares de geometria.



(a) Roving de fibra de vidro



(b) Spun roving de fibra de vidro



(c) Roving de carbono



(d) Roving de Aramida

Figura 4- Tipos de *roving*

Uma característica deste tipo de reforço é o seu TEX (peso por quilometro linear), havendo TEX de 100 a 9600. Conforme o tipo de perfil, seja de pequena ou grande secção, é escolhido o TEX mais apropriado.

4.1.2 Manta

A manta de filamentos contínuos é a forma de reforço aleatório, mais vulgarmente, utilizado em Pultrusão.

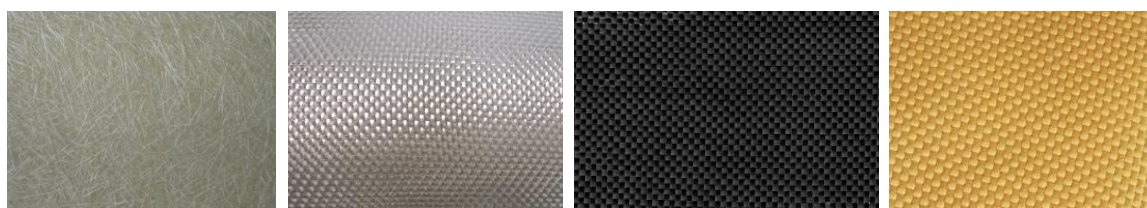
Têm sido desenvolvidos produtos específicos para Pultrusão para fazer face ao problema de arrasto da manta durante a fase de impregnação, pois rasga com facilidade, sobretudo quando utilizada com pequena largura. Deve-se assegurar uma boa impregnação das mantas de forma a eliminar bolhas de ar.

Uma das características das mantas é a sua gramagem (massa por metro quadrado), havendo gramagem de 300 a 900 gr/m². A sua escolha depende do tipo de perfil a produzir, tendo em consideração que para geometrias mais complexas deve-se utilizar uma manta mais flexível, de

forma a facilitar a sua conformação.

Como cada forma tem um perímetro diferente, as mantas e os tecidos têm de ser cortados com larguras diferentes e especificamente para produção desse perfil.

No caso dos tecidos, estes têm uma costura ou borda limite para evitar a desorientação das fibras. Para evitar a costura das bordas dos tecidos, surgiram os tecidos combinados com mantas cosidas, estas combinações costuradas permitem ultrapassar o problema.



(a) Manta de fibra de vidro

(b) Tecido de fibra de vidro

(c) tecido de carbono

(d) Tecido de aramida

Figura 5- Mantas e tecidos

4.1.3 Tecido de Superfície

O tecido de superfície, denominado também como véu de superfície, é utilizado para melhorar a superfície exterior, a resistência aos ultravioletas e a resistência ao fogo dos perfis pultrudidos. O tecido feito de vidro é específico para resistência química e o tecido de poliéster para resistência aos ultravioleta e finalidades decorativas, como por exemplo, imitação de madeira, tecido de carbono, tecidos militares, etc.



Figura 6- Diferentes tipos de tecidos de superfície

4.2 Resinas

No processo convencional de Pultrusão são utilizadas resinas termoendurecíveis. As resinas de poliéster são as mais utilizadas por razões económicas e características de processo. A elevada reatividade e velocidades de cura rápidas, são características necessárias e o poliéster torna-se particularmente desejado para a pultrusão. Dentro destas, são utilizadas resinas do tipo ortoftálicas ou isoftálicas, a escolha depende da resistência química específica do produto.

Uma das resinas mais reativas é a resina acrílica que permitem velocidades de produção maiores e forças de tração significativamente mais baixas, devido à sua baixa viscosidade, que traz vantagens na fase de impregnação, pois assegura uma boa impregnação das fibras e reduz o derrame de resina nos guiamentos. As desvantagens deste tipo de resinas são o custo e a menor resistência química.

Deve existir uma flexibilidade na cura da resina para reduzir as tensões térmicas devido ao rápido ciclo de cura. Existem aditivos para reduzir a contração e dar no final um bom acabamento superficial.

Há outros tipos de resinas específicas para melhorar as propriedades mecânicas, elétricas e aumentar a resistência ao fogo e à corrosão.

As resinas de epóxido têm muitas propriedades atrativas, mas o seu uso é restrito a aplicações específicas devido a problemas de processamento. As velocidades de produção são mais baixas e os custos são mais elevados do que com as resinas de poliéster. As excelentes propriedades adesivas do epóxido também promovem a adesão do material à superfície da feira, aumentando a força de tração na fase de arrasto. Um compromisso útil é encontrado nas resinas de viniléster, que combinam excelentes performances mecânicas e resistência química com as boas características de processamento dos poliésteres.

Propriedade	Poliéster	Viniléster S	Epóxido	Acrílica
Densidade (g/cm ³)	1,13	1,12	1,28	1,08
Resistência à Tração (MPa)	77	81	76	56
Resistência à Flexão (MPa)	123	138	115	132
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,96	3,72	3,24	2,2
Elongação (%)	4,5	5,0	6,3	6,5

Tabela 2 – Propriedades mecânicas das resinas típicas [3]

Resinas fenólicas e de poliuretano são também utilizadas como matriz no processo de pultrusão. As resinas fenólicas são caracterizadas pela sua resistência ao fogo, embora o seu processamento seja complicado no processo de pultrusão devido à condensação de fenóis e formaldeído. Devido à libertação de água há o perigo de aparecerem fissuras e poros durante o processo de cura, este facto causa problemas durante o fabrico.

As resinas de poliuretano, só começaram a ser aplicadas ao processo de pultrusão por volta do ano 2000. Estas resinas de dois componentes e baixo *pot life* só podem ser utilizadas com o processo de injeção na feira. Estas resinas são caracterizadas pela alta resistência ao impacto e à fadiga, também apresentam uma baixa contração e as velocidades de fabrico são mais elevadas. Estas resinas com grandes características estruturais prometem ser uma revolução para os perfis de pequena espessura.

A utilização de matrizes termoplásticas tem problemas especiais de processamento. A maior dificuldade é a obtenção da adequada adesão no estado de impregnação. Tanto a fusão quente como os sistemas de solvência têm sido utilizados, com algum sucesso, em algumas aplicações. Polímeros de alta performance, tais como os poli(éter sulfona) dão boa resistência mecânica e excelente resistência térmica, mas o alto custo destes polímeros associados com técnicas especiais de processamento requeridas têm restringido o campo de aplicações comerciais.

Uma nova técnica de produção de perfis pultrudidos termoplásticos baseia-se na utilização de fibras pré-impregnadas com termoplástico. Estas costumam aparecer em duas formas, os *towpregs*, que consistem em *rovings* impregnados com o termoplástico e a *tape*, que consiste em bandas de fibras impregnadas. Este processo, ainda no seu início, precisa de uma feira aquecida e outra arrefecida, sendo a primeira para fundir o termoplástico e a segunda para arrefecer o perfil de forma a consolidar o termoplástico.

P.J. Novo, J.F. Silva e A.T.Marques [4] têm desenvolvido trabalho nesta área, desde a técnica de impregnação das fibras (*towpreg*) até ao fabrico do perfil pultrudido de matriz termoplástica. A figura 7, mostra o funcionamento de um equipamento de pultrusão para o fabrico destes perfis. Esta matriz apresenta como vantagens uma maior velocidade de produção, maior facilidade de reciclagem, permite conformar os perfis após produção e permite a soldadura entre estes. Como desvantagens temos a menor resistência os U.V., desconhecimento do comportamento a longo prazo e maior dificuldade de impregnação das fibras dada a maior viscosidade da matriz.

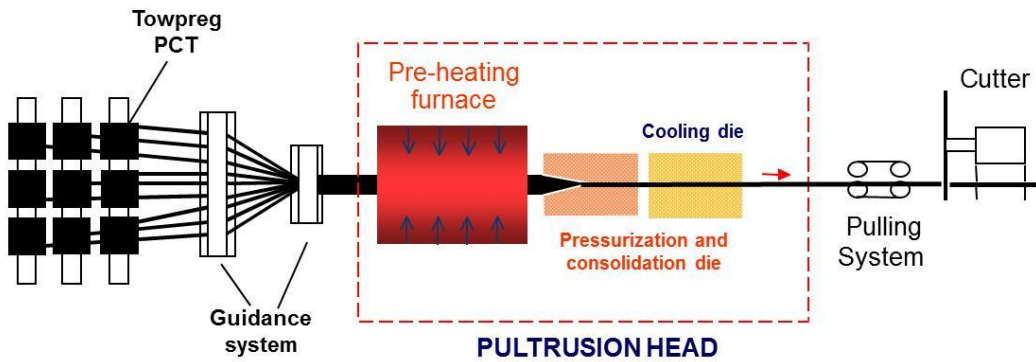


Figura 7- Diagrama esquemático de uma linha de pultrusão com matriz termoplástica

4.3 Catalisadores

Os catalisadores utilizados para o processo de pultrusão são específicos. Estes agentes de cura são de peróxido e são adequados para condições de cura a quente.

Os catalisadores são adicionados à resina aquando da sua preparação e devem ter um tempo de vida (*pot life*) adequado para que a polimerização não ocorra na tina, no processo de impregnação por banho, mas também deve permitir a maior velocidade de produção possível, por razões económicas. Existe uma variedade destes catalisadores e depende essencialmente do tipo de resina e perfil a produzir.

4.4 Cargas

No processo de Pultrusão as cargas são utilizadas como auxiliares do processo, para diminuição dos custos da formulação e aumento do módulo de elasticidade [5].

A viscosidade e a resistência química requerida restringem o nível de cargas, a gama mais comum é 10-40 ppc, embora algumas resinas permitam ir até a 200 ppc, como é o caso das resinas acrílicas.

O tamanho e forma das partículas são importantes, sendo vantajosa a forma esférica e de pequeno diâmetro. A seleção cuidada da distribuição do tamanho das partículas para melhorar as características é importante quando se pretende obter altos níveis de conteúdo de cargas.

A carga mais utilizada é o carbonato de cálcio devido ao menor custo, auxilia o processo e melhora o produto reduzindo a contração.

O talco é utilizado quando se pretende resistência química e cor branca. O trióxido de antimónio e os óxidos de hidratos de alumínio (hidróxido de alumínio) são adicionados para

dar propriedades retardadoras ao fogo, normalmente em conjunto com componente de hidrocarbonato halogenado na resina.

4.5 Pigmentos

Os pigmentos são adicionados em cerca de 2 a 5 ppc para colorir o produto final. Estes podem ser em forma de pasta ou pó.

As cores amarelas e cinzentas são as que mais resistem aos ultravioletas, devido aos constituintes do próprio pigmento colorido, quer sejam em tintas ou em pastas. Esta é uma das razões pela qual a cor amarela é tradicionalmente utilizada em perfis pultrudidos.

4.6 Aditivos

Existe uma enorme diversidade de aditivos para as resinas, como por exemplo aditivos antibolhas, redutores da contração, desmoldantes, etc.

É essencial adicionar agentes desmoldantes na formulação da resina, quer internos quer externos.

Um agente interno desmoldante eficiente é essencial para prevenir a adesão entre a resina e a superfície da fieira na fase de cura. O agente desmoldante externo lubrifica a interface entre o produto sólido e a superfície da fieira, bem como a secção que é arrastada para fora da fieira. Os desmoldantes externos funcionam com o calor, que quando atingem determinadas temperaturas migram para a superfície e assim agem como desmoldante externo.

O polietileno, sob a forma de pó puro, pode também ser incorporado em formulações para baixa contração.

5 Equipamento

Como o equipamento de Pultrusão é operado continuamente, muitas vezes 24 horas por dia, qualquer paragem ocasional poderá ser desastrosa, porque a resina cura e obstrui a fieira, levando a paragens longas para limpeza e novo arranque. Por esta razão, é importante que o equipamento de Pultrusão seja dimensionado e construído para assegurar um alto grau de robustez e confiança.



Figura 8- Equipamento de Pultrusão

5.1 Sistema de Suporte do reforço

O sistema de suporte do reforço tem que suportar bobines de *rovings*, mantas e/ou tecidos e o véu de superfície.

O reforço mais utilizado no processo de pultrusão é de fibra de vidro. Por essa razão será feita referência ao sistema de suporte para este tipo de reforço.

Para a produção de um perfil são necessários dezenas de rolos de *roving*, como cada bobine pesa cerca de 15 kg, a estrutura de suporte deve ser capaz de suportar o considerável peso envolvido. Deve-se encontrar uma solução compacta para que fique no chão uma área livre que permita a substituição dos rolos durante a operação com facilidade.

Uma bobine contém cerca de 1.500 a 3.000 metros lineares, dependendo do *Tex* (9600 e 4800, respetivamente) e pode ser necessário a substituição durante a produção, efetuando-se uma emenda.

Os *rovings* para pultrusão desenrolam, normalmente, pelo seu centro, sendo os filamentos arrastados através de um anel suspenso verticalmente sobre o centro de cada rolo. O manuseamento deve ser cuidado para prevenir estragos por abrasão ou emaranhamento. Embora seja desejada uma ligeira tensão em todos os filamentos, não se aplicada nesta fase porque seria necessário um número grande de unidades. Em vez disso as fibras são arrastadas através de barras de tensão logo à saída da estrutura de suporte.

Os rolos de tecido ou manta de reforço são colocados na estrutura de suporte já cortados com a largura específica para o perfil. Apenas é necessário um eixo central simples para desenrolar o rolo, mas a montagem deve ser cuidadosamente posicionada, para garantir um correto alinhamento com a posição onde se pretende esse reforço. Para alguns tipos de perfis pode ser necessário utilizar diversos rolos, como cada um tem cerca de 180 metros lineares (manta com 450gr/m²), então deve existir espaço para armazenar vários rolos para poderem ser substituídas de uma forma rápida e fácil.

Existe uma variedade de métodos para juntar as mantas, dependendo do tipo de reforço. O tecido pode ser costurado e uma junta dobrada pode muitas vezes ser tolerada. Esta costura é fraca e pouco resistente. Este problema pode ser ultrapassado utilizando fitas adesivas especiais, costuradas a um transportador de tecido ou uma costura com sobreposição. O controlo da tensão em tecidos e mantas é essencial para evitar o enrugamento.

As fibras de vidro estragam-se facilmente e num equipamento que trabalha em contínuo forma-se rapidamente um aglomerado de fibras que obstrui as aberturas dos guiamentos. Embora a velocidade linear do reforço de fibras no equipamento de pultrusão seja muito menor que nos outros processos, como por exemplo o enrolamento filamentar, a correta colocação das fibras nos guiamentos são ainda mais importantes, por causa das enormes quantidades de fibra envolvidas.

A absorção de água pode ser um problema em atmosferas húmidas por causa das grandes superfícies de filamentos expostas. Pode-se implementar a circulação de ar ou pré-aquecimento das fibras antes da impregnação para evitar este problema.

A otimização do sistema de suporte do reforço foi parte do projeto de I&DT “PULTREFICAZ”, financiado pelo QREN e realizado em co-promoção com o Instituto Superior de Engenharia do Porto e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, do qual o signatário foi responsável pelas tarefas de I&DT [6].



Figura 9- Suporte dos *rovings* e mantas

O sistema de suporte de mantas foi objeto de estudo, necessitando de alterações significativas para cumprir as exigências das condições de segurança no trabalho.

Inicialmente, o suporte de manta estava na estrutura de suporte da tina e a manta era colocada sobre um varão apoiada em dois suportes. A operação de substituição de mantas obrigava a que o operador, a determinada altura, tivesse de suportar o rolo com uma só mão, utilizando a outra para colocar o varão no furo do suporte (Figura 10). A figura 11 mostra a solução desenvolvida no âmbito do projeto PULTRAFIZAZ e a figura 9 mostra a implementação do projeto.



Figura 10- Sistema de suporte de mantas utilizado na ALTO antes do projeto PULTRAFIZAZ

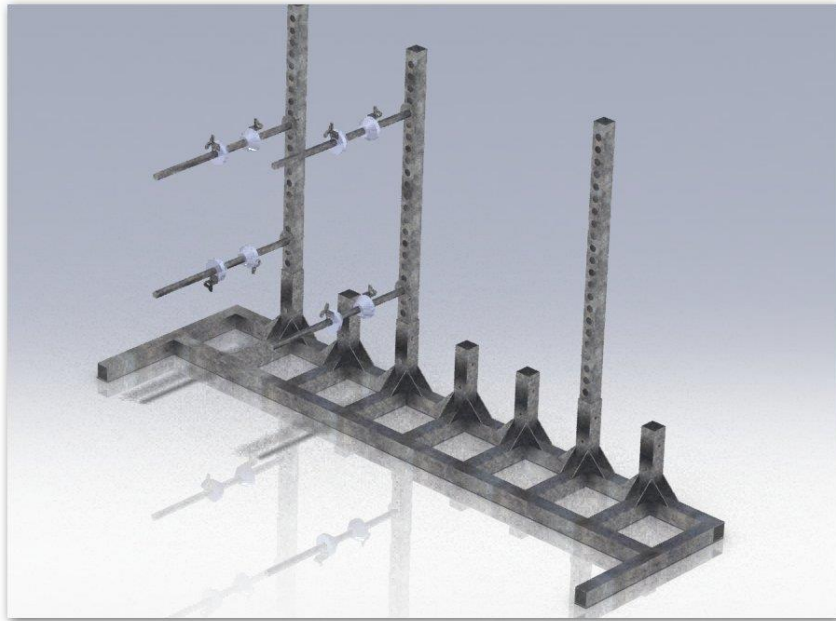


Figura 11 – Solução para suporte de mantas no âmbito do Projeto PULTREFICAZ

A solução encontrada fixa o varão de suporte da manta apenas numa extremidade, ficando a outra livre e permite que o operador coloque o rolo de manta com as duas mãos. Esta solução economiza tempo na substituição do rolo, poupa fisicamente o operador e permite o correto posicionamento da manta através de uns posicionadores de aperto rápido nos varões.

5.2 Impregnação das Fibras

São dois os métodos utilizados para impregnar o reforço de fibra com resina termoendurecível. A técnica mais simples é arrastar as fibras através de um banho aberto de resina, as fibras são espaçadas e devem permanecer no banho o tempo suficiente para assegurar uma completa molhagem durante a fase de impregnação.

As fibras podem ser arrastadas à volta de uma série de barras para aumentar o caminho efetivo para um determinado volume de resina.

A impregnação pode ser melhorada através de agitação mecânica.



Figura 12 - Tina de impregnação das fibras

5.3 Guiamentos

Os guiamentos servem para encaminhar a fibra para a feira e pré-conformar o perfil. Esta pré-conformação é efetuada por uma série de guiamentos, os quais são colocados de tal maneira que o excesso de resina seja retirado progressivamente e alimente o feixe de fibras de composição e forma pré-determinada, para a entrada da feira de pultrusão. O excesso de resina é conduzido para a tina por um tabuleiro colocado debaixo dos guiamentos para reutilização.



Figura 13 - Guiamentos

O desfiar, a distorção e o “cotão” que ocorre nos guiamientos são problemas típicos que ocorrem num processo de fabrico contínuo e trazem problemas ao processo. Para fazer face a estes problemas foram desenvolvidos métodos alternativos de impregnação das fibras, como por exemplo a impregnação por injeção da resina.

O sistema de injeção de resina elimina a utilização da tina de resina aberta. Este método consiste em fazer com que o feixe seco do reforço de fibras seja alimentado diretamente para a entrada da fieira e a resina é injetada numa cavidade de impregnação especial, situada a pequena distância da entrada da fieira, onde a temperatura é mais baixa. São utilizadas pressões até 6 atm para assegurar que a resina se infiltre completamente no feixe de fibras e efetue uma boa impregnação. O posicionamento da cavidade de resina é crítico por causa da impregnação das fibras, pois é um fator que depende da velocidade de produção. Durante a produção, a unidade é operada para que a cavidade da resina esteja sempre fluida e uma contracorrente de fluxo de resina retorne através das fibras a uma velocidade tal que evite um gotejamento. Para que estas condições se mantenham, tem que existir um equilíbrio dinâmico entre a pressão, a viscosidade da resina, a percentagem de fibra e a velocidade linear do feixe de fibras.

Outro método alternativo é a injeção da resina a partir de um contentor pressurizado por meio de uma bomba de alta pressão.

É possível fazer o pré-aquecimento da resina para reduzir a viscosidade e aumentar a velocidade de cura mas deve-se ter cuidado para não ocorrer uma cura prematura da resina. A cavidade para a resina pode ser integrada com a fieira ou ser um componente colocado na extremidade de entrada da fieira. O equipamento de impregnação é fácil de parar e o desperdício de resina deve ser limpo com um solvente não inflamável. Este sistema é simples de limpar enquanto o banho de resina necessita de uma limpeza exaustiva. Mais vantagens: níveis reduzidos de estireno na atmosfera, condições de trabalho limpas e poucos desperdícios de resinas, o que torna este processo mais amigo do ambiente.

Por vezes é utilizado um método de impregnação de baixa pressão, no qual um tanque ou câmara substitui a cavidade para a resina. O reforço de fibras passa direito através do tanque e embora a entrada e a saída restrinjam consideravelmente a fuga de resina, esta ocorrerá sempre nestes pontos. As fibras podem ser espaçadas para que facilite a impregnação. A distorção das mantas pode ser um problema difícil de detetar ou corrigir antes da quebra na produção.

O tempo de *setup* na mudança de perfil é em parte gasto no correto posicionamento dos

guiamentos e colocação dos fios nos furos das placas de guiamento. Por esta razão os guiamentos também são alvo do projeto de I&DT PULTREFICAZ [6]. A solução encontrada (figura 14) foi a criação de um suporte único de guiamentos em que as diferentes placas de cada perfil entrassem de “gaveta” ficando automaticamente alinhadas com a fieira. Esta solução eliminou o tempo considerável gasto com o alinhamento dos guiamentos.



Figura 14 - Solução de colocação de guiamentos no âmbito do Projeto PULTREFICAZ

5.4 Fieira e Aquecimento

A maioria dos fabricantes de Pultrusão utiliza fieiras de aço aquecidas para dar forma ao produto. As superfícies de trabalho são normalmente cobertas por uma camada de crómio e polidas para reduzir o desgaste e melhorar o acabamento superficial do produto. São necessárias tolerâncias precisas de maquinagem e excelente acabamento superficial ao longo da secção da fieira de forma a manter o paralelismo e assim reduzir a fricção interna. As cavidades de injeção de resina e a distribuição de resina nos canais devem ser dimensionados de forma a permitir áreas estanques, onde a resina não possa curar e os detritos de fibra se acumulem. A maioria das fieiras é produzida como duas meias fendas ao longo do eixo longitudinal, em parte para facilitar a maquinagem, mas mais importante, para permitir a abertura da fieira para limpeza. As velocidades de produção estão diretamente relacionadas com o comprimento da fieira, para grandes produções a relevância é a utilização de fieiras compridas, com 1-2 metros de comprimento, mas o custo é significativamente elevado.

As secções tubulares são produzidas utilizando um mandril para formar as superfícies interiores. O mandril tem um comprimento superior ao da fieira e é rigidamente suportado a

cerca de um metro da extremidade de entrada da fieira, numa consola que permite o movimento lento do reforço de fibra na fieira em torno do mandril. O custo das fieiras depende das tolerâncias exigidas e do comprimento, mas é baixo quando comparado com outros processos automáticos para a produção de PRFV.

Para secções pequenas são utilizadas aberturas múltiplas, permitindo produzir diversos produtos similares na mesma fieira.



Figura 15 - Fieira

As fieiras de Pultrusão operam a temperaturas que variam entre 130 e 180°C. As resistências elétricas são a fonte de aquecimento mais utilizada, sob a forma de cartuchos inseridos em orifícios maquinados na mesa de suporte da fieira ou sob a forma de placas de aquecimento separadas, as quais são fixadas no lado exterior da fieira. Aquecedores de óleo e de vapor também podem ser utilizados mas as fugas nas ligações flexíveis podem ser um problema. São utilizadas algumas zonas de aquecimento controladas separadamente para permitir o aquecimento progressivo dos materiais e reduzir a temperatura de pico exotérmico, o qual ocorre com a cura da resina.

São feitos testes laboratoriais para estudar o tempo de gel e características exotérmicas da resina. Estas informações fornecem os dados básicos, a partir dos quais se pode otimizar o perfil de temperaturas ao longo do eixo longitudinal da fieira e determinar o tempo necessário para que a cura ocorra a cerca de 65% do comprimento da fieira, relativamente à entrada, e assim estimar a velocidade de produção.

A temperatura de entrada é controlada para evitar a cura prematura da resina na entrada da fieira; no entanto, pode ser incorporado o arrefecimento por água como uma precaução auxiliar. Quando a cavidade de injeção de resina é maquinada na fieira, a temperatura nessa região deve ser controlada para prevenir solidificação da resina na cavidade.



Figura 16 - Fieira com resistências de aquecimento

As velocidades de produção dependem da espessura da secção e do comprimento da zona aquecida da fieira. Para o equipamento convencional descrito, utilizando fieiras de um metro de comprimento, as velocidades de produção variam entre 0.2 e 3 metros por minuto sendo 1 metro por minuto típico para varões ou tubos até 4 mm de espessura com resinas de poliéster e podendo atingir os 3 m/s com resinas acrílicas. Estas velocidades podem ser maiores com o aumento do comprimento da fieira, mas os custos da fieira crescerão significativamente.

Para ultrapassar os problemas de transferência de calor da cura rápida dos PRFV têm sido desenvolvidos [7] métodos de aquecimento por micro-ondas para incorporação em máquinas sofisticadas de Pultrusão. Assim, consegue-se velocidades de produção superiores a 3 m/min, para resinas de poliéster, embora o acabamento superficial possa deteriorar-se à velocidade máxima.

A figura 17 mostra o comportamento da resina dentro da fieira desde a fase líquida até à sua polimerização e a figura 18 mostra a distribuição da temperatura na fieira desde a entrada até à saída.

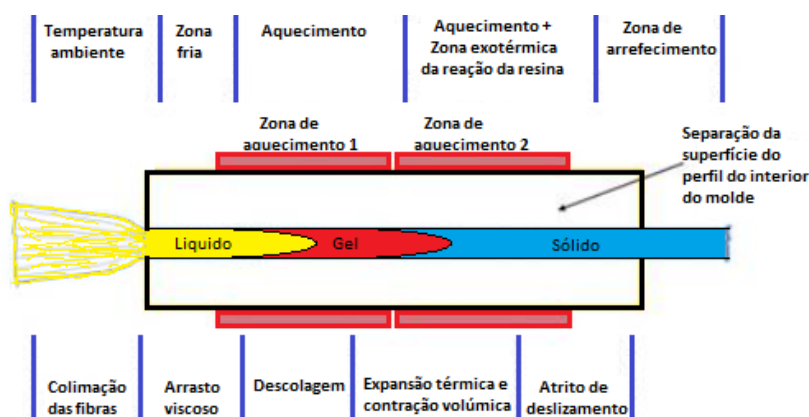


Figura 17 – Comportamento da resina ao longo da fieira

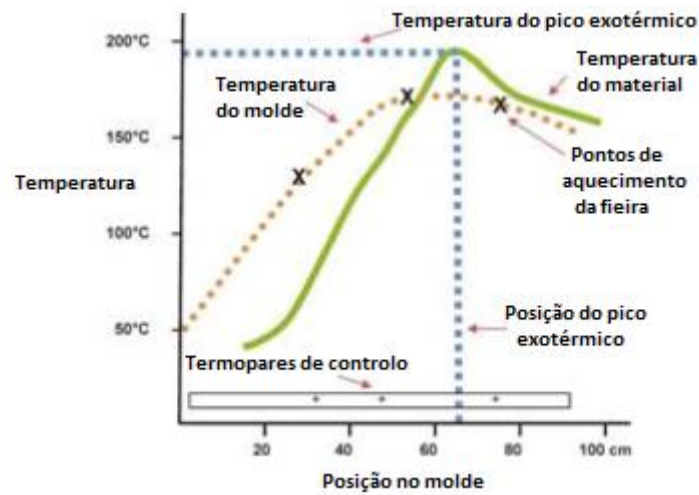


Figura 18 – Distribuição de temperatura ao longo da fieira

O projeto PULTREFICAZ [6], no qual o signatário foi responsável pelas tarefas de I&DT, abordou profundamente o estudo sobre comportamento do aquecimento da fieira e a forma de otimizar o consumo de energia. Foi feito o levantamento por termografia da distribuição da temperatura ao longo da fieira (figura 19 e 20).

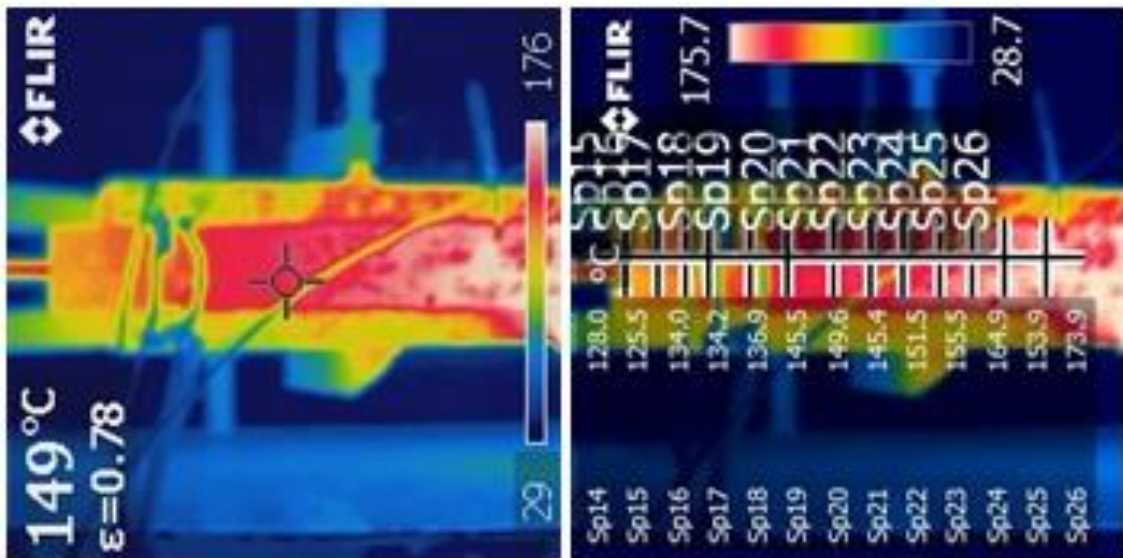


Figura 19 - Imagens de termografia que permitiram, após tratamento informático, converter os dados de cor em níveis de temperatura ao longo da fieira.

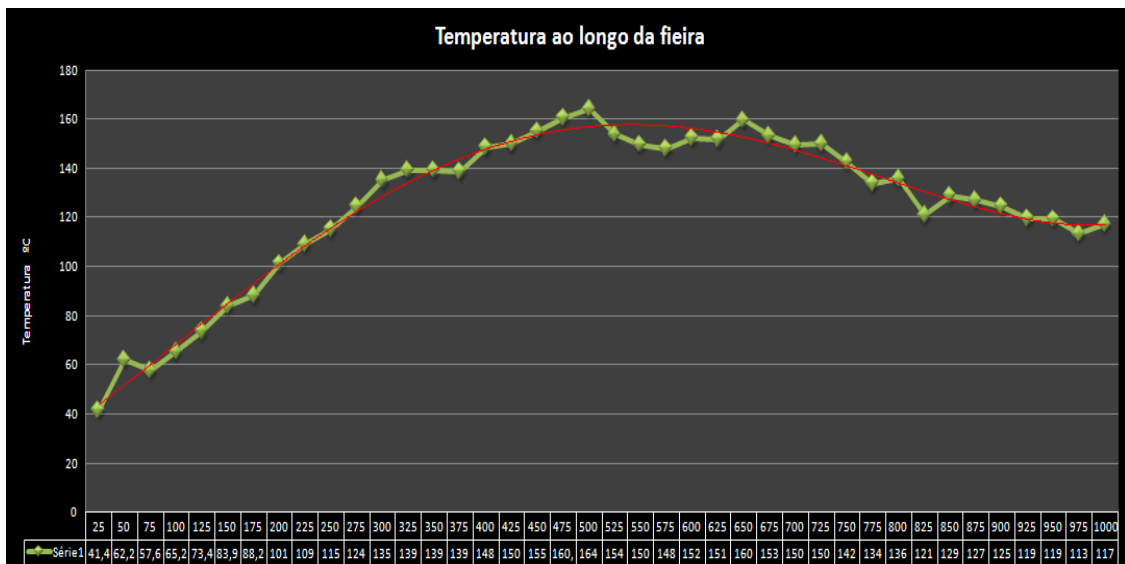


Figura 20 - Perfil de temperatura desenvolvida ao longo da fieira, considerando os 1000 mm do seu comprimento divididos em secções de 25 mm. A verde estão os resultados obtidos e a vermelho a linha de tendência que corresponde à melhor correlação dos resultados obtidos.

Colocar os cartuchos de resistências na própria fieira pareceu ser a solução que levava ao menor desperdício de energia (Figura 21).

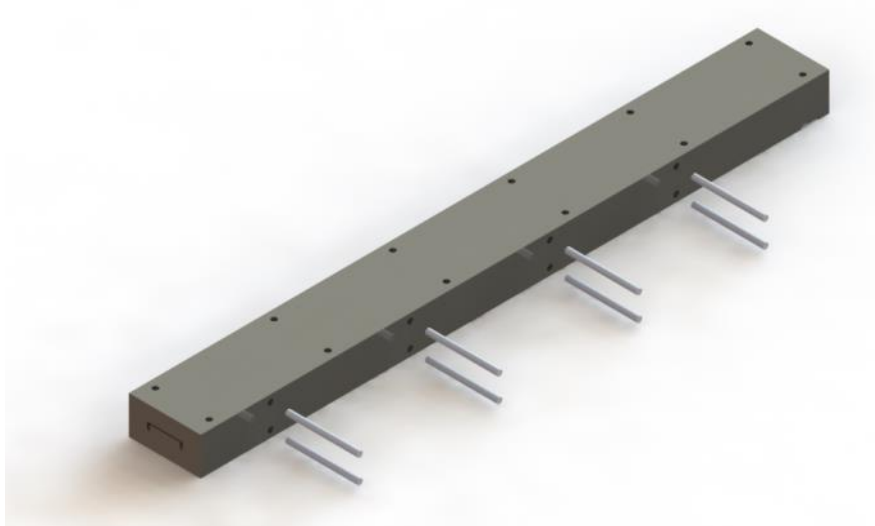


Figura 21. Projeto de implementação do sistema de aquecimento da fieira com oito resistências cilíndricas e controlo de quatro canais.

Foi simulado num *software* de elementos finitos o perfil de temperaturas registado e foi calibrado o modelo (figura 21). De seguida foi simulado a colocação de resistências de cartucho em vários pontos e a melhor solução foi a indicada na figura 22.

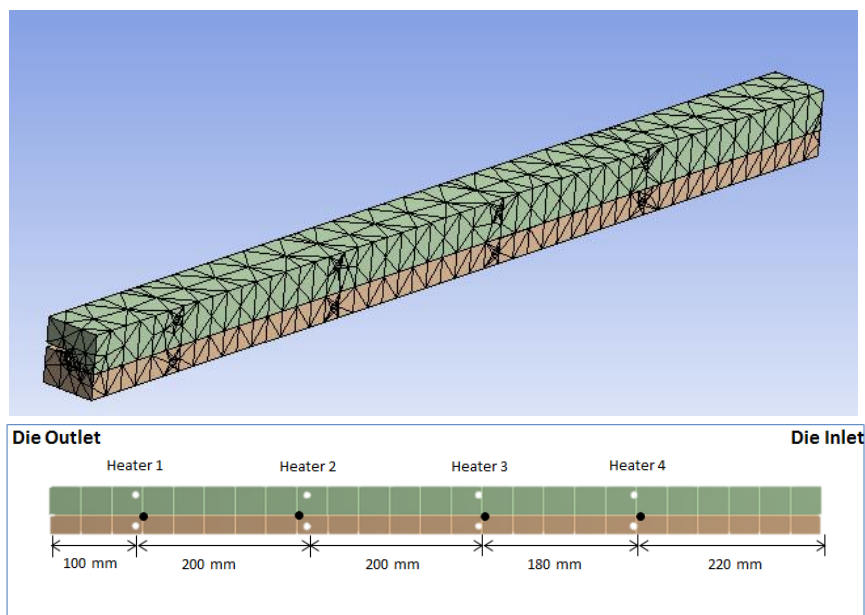


Figura 22. Esquema utilizado para a simulação por elementos finitos do sistema de aquecimento por resistências cilíndricas embebidas na fieira.

O estudo [6] indicou uma poupança de 56,7% no consumo de eletricidade no aquecimento da fieira. A solução final foi testada e confirmada a referida poupança (figura 23).



Figura 23 - Fieira fabricada incorporando já a tecnologia de aquecimento através de resistências cilíndricas embebidas

5.5 Fase de Tração

Esta é a fase mais importante do processo, sendo a responsável pelo nome do processo (*pull*). Ela gera a força motriz para arrastar os materiais ao longo do processo. O seu

dimensionamento é o centro de todas as operações. Embora se possa produzir com sistemas de arrasto intermitentes, é preferível um movimento de arrasto contínuo, o qual impõe um movimento suave e estável ao perfil. As forças de tração geradas durante a cura da resina na fieira podem exceder facilmente milhares de quilogramas e poderá produzir um escorregamento que se pode evitar utilizando pressões de fecho nos carros grandes. No entanto, em perfis tubulares pode ser um problema, originando o esmagamento das paredes do tubo.

Como tal, o equipamento deve ser robusto e de qualidade, que o torna volumoso e dispendioso.

Os tapetes rolantes (tipo lagartas) dão resultados satisfatórios quando se trata de secções sólidas regulares, mas para secções ocas e para a maioria das secções tradicionais nomeadamente, cantoneiras, perfis em U e I é preferível a utilização de um sistema com carros de tração alternados.

Soluções com dois ou mais sistemas de tração no mesmo carro têm sido aplicados na produção de perfis pultrudidos. Este sistema permite um movimento estável de arrasto por sincronismo da operação do mecanismo de amarração com o movimento recíproco dos transportadores.



Figura 24 - Sistema de tração

O movimento alternado dos transportadores, também chamados “carros”, é acionado por sistema mecânico convencional ou hidráulico, enquanto o fecho dos carros pode ser acionado por equipamento hidráulico ou por equipamento pneumático, por sua vez controlados por

válvulas eletromecânicas.

Os equipamentos com mais que um sistema de tração em cada carro têm sido desenvolvidos, para se produzirem até três ou quatro secções diferentes em simultâneo, por preparação de múltiplos conjuntos de amarração. Por exemplo: um tubo, uma cantoneira e seis varões sólidos podem ser produzidos juntos na mesma máquina, resultando uma unidade de produção compacta e eficiente. Saliente-se que todos os sistemas de amarração se movem à mesma velocidade e a velocidade de produção será controlada pela produção mais lenta das secções.

5.6 Corte

A linha de produção de Pultrusão é complementada por um sistema de corte automático com uma serra diamantada.

A serra deve ser montada numa plataforma que se mova à mesma velocidade do perfil enquanto a operação de corte está a ser efetuada.

Para produções onde se produzem mais do que um perfil em simultâneo e se pretende comprimentos diferentes, o corte tem que ser feito manualmente para cada perfil.



Figura 25 - Sistema de corte

5.7 Controlo

As funções de controlo devem estar bem identificadas no painel de controlo central. Neste painel devem constar os seguintes comandos:

- Tração: paragem/arranque; gama de velocidades com progressão contínua; força de arrasto aplicada à secção pultrudida; pressão de fecho aplicada aos mordentes dos carros; abertura e fecho manual dos grampos independentemente da operação automática.
- Aquecimento da fieira: ligado/desligado; controlo da temperatura $\pm 2^{\circ}\text{C}$ para cada zona de aquecimento; amperímetro para medir corrente em cada grupo de elementos de aquecimento (opcional); tempo para pré-aquecimento antes do arranque (opcional).
- Pressão de resina: ligado/desligado; pressão em cada linha de injeção de resina, para sistemas de injeção.
- Serra: paragem/arranque; fechado/aberto; velocidade de corte.

Devem ser colocados botões de emergência na serra e nos dois extremos da máquina.



Figura 26 - Sistema de controlo

5.8 Higiene e segurança

O equipamento de Pultrusão não oferece perigo no seu manuseamento, à exceção das maxilas de aperto nos carros de tração, porque os componentes se movem a velocidades

relativamente baixas.

Deve ser utilizado equipamento de extração de ar, para assegurar uma boa ventilação na saída da fieira, sobre o banho de resina e na área de mistura da resina para que os níveis de vapor de estireno não excedam os níveis recomendados.

A zona deve ser mantida com o menor quantidade de lixo possível. Apesar dos restos de fibra de vidro não apresentarem perigo iminente as poeiras de vidro são bastante prejudiciais para os pulmões.

É necessário um equipamento de aspiração na zona de corte dos perfis para evitar a poeira de resina e fibra de vidro. Os operadores devem estar protegidos com máscaras de proteção adequadas.

O equipamento de corte deve estar devidamente vedado e deve incluir botões de paragem de emergência ligados ao equipamento de corte automático.

Como as resinas são altamente inflamáveis e os produtos de PRFV vão alimentar a combustão, deve-se ter equipamentos de prevenção contra incêndios junto do equipamento de pultrusão.

Os catalisadores e os aceleradores devem ser guardados em zonas separadas numa área fresca e bem ventilada longe da instalação principal.

Nos equipamentos com injeção de resina, não devem ser utilizados solventes inflamáveis para a limpeza.

6 Vantagens e Limitações do Processo de Pultrusão

A Pultrusão é um processo contínuo com inúmeras vantagens inerentes da eficiência e controle efetivo do processo, resultando em propriedades uniformes e boas tolerâncias dimensionais.

Também, como resultado da continuidade do processo, pode-se produzir perfis com qualquer comprimento, tendo como única limitação o transporte do perfil. É também possível produzir rolos de perfis de pequena secção, podendo ter alguns quilómetros de comprimento, facilitando o transporte.

Todas as superfícies são moldadas e podem ser bastante planas e lisas com elevado brilho, embora para aplicações industriais não seja normalmente solicitado.

Na tabela 3 apresenta-se em resumo as vantagens e limitações do processo de Pultrusão.

Vantagens	Limitações
Processo contínuo. É possível produzir perfis de qualquer comprimento, só limitado pelo transporte. Até 15 mm de espessura pode ser enrolado;	Apenas secções constantes e direitas;
Todas as superfícies são moldadas;	Não é possível aplicar <i>gelcoat</i> ;
Exatidão das dimensões;	A compressão no molde não é exata;
É possível controlar o processo a alto nível;	Custos de instalação e desenvolvimento podem ser elevados;
Os custos de produção são mais baixos em comparação com outros processos de fabrico;	Produção mínima para amortização do custo da fieira: 10.000 m;
É possível produzir uma grande variedade de secções;	2.975 mm de largura x 455 mm de altura;
Possibilidade de produzir secções muito pequenas;	1,5 mm de largura x 1,5 mm de altura;

Tabela 3 – Vantagens e Limitações do Processo de Pultrusão

7 Características dos perfis pultrudidos

Os produtos pultrudidos beneficiam de vantagens inerentes do próprio processo. Neste processo o tipo de reforço é essencialmente unidirecional, o que permite obter excelentes propriedades nesta direção (longitudinal). Uma das grandes vantagens dos materiais compósitos consiste no facto de se poder orientar o reforço por camadas, resultando um produto com características anisotrópicas, isto é propriedades diferentes em cada direção. Assim, pode-se orientar o reforço preferencialmente numa direção em detrimento das outras e assim concentrar a maior resistência numa direção bem determinada em função das solicitações que vão ser impostas.

Os perfis pultrudidos apresentam características ortotrópicas e resistência, sobretudo na direção longitudinal, mais elevadas que os materiais tradicionais de engenharia que têm propriedades isotrópicas.

Na tabela 4 comparam-se as características de alguns materiais tradicionais de engenharia com os produtos pultrudidos. Nos perfis pultrudidos a variação das propriedades mecânicas

depende das percentagens de fibra e de carga.

Material	Resistência á tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Peso (g/cm ³)
Aço	300 – 500	210	7,8
Alumínio	250	70	2,7
PVC	50 – 100	0,5 – 3	1,05
Pultrudido	150 – 1000	15 - 40	1,6 – 2,1

Tabela 4 – Comparação de propriedades mecânicas [8]

Uma característica material dos perfis pultrudidos é o comportamento linear elástico até à rotura, para pequenos períodos de carregamento. Quando sujeito a longos períodos de carregamento, o material tem um comportamento linear viscoelástico, com recuperação quando é retirado o carregamento, desde que a deformação não cause deterioração permanente no material.

A figura 27 compara o comportamento dos perfis pultrudidos com os materiais tradicionais. As referências Pul1 identificam os perfis que contêm apenas reforço unidirecional, como é o caso de varões, onde não é necessária resistência na direção transversa ao comprimento do perfil e Pul2 que contém reforços unidirecionais e transversais, como é o caso de geometrias em I,U, L, etc.

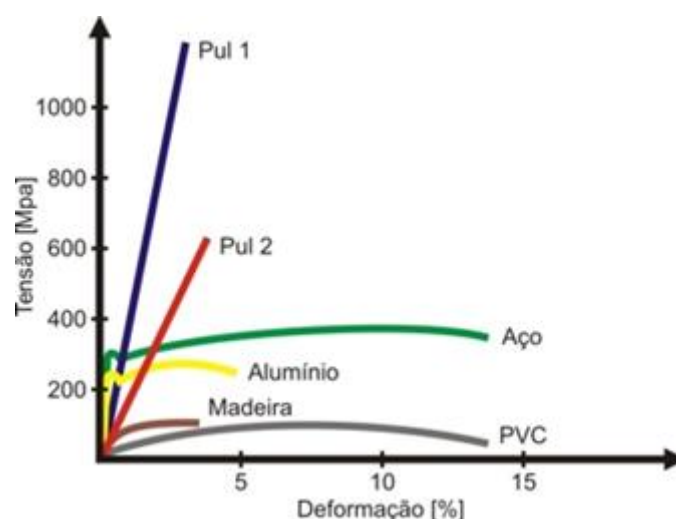


Figura 27 – Gráfico comparativo do comportamento de diferentes materiais [9]

A figura 28 faz a comparação das principais propriedades mecânicas dos perfis pultrudidos com outros materiais, mais tradicionais.

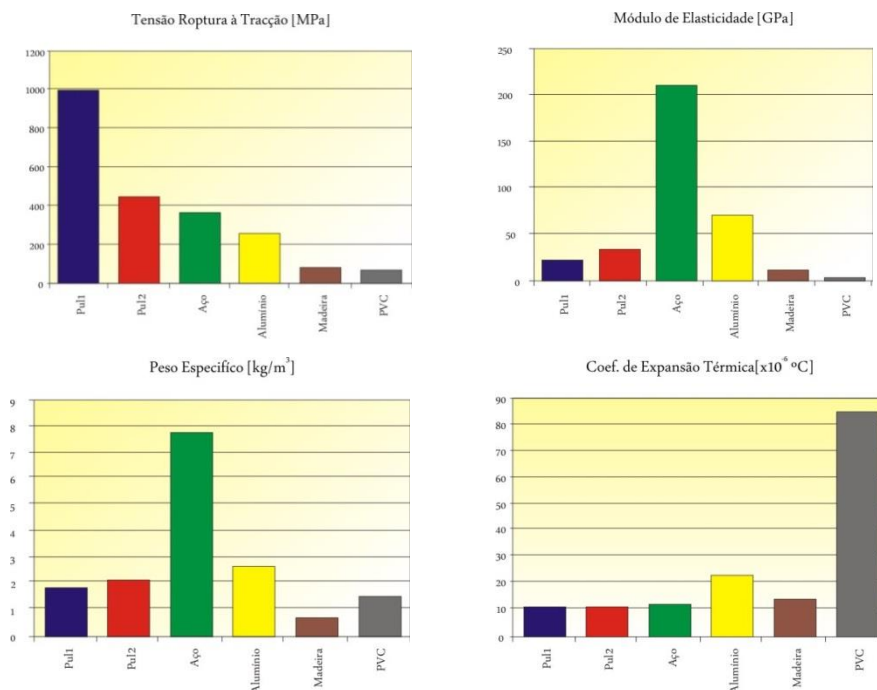


Figura 28 - Comparação das propriedades mecânicas [9]

As características mais importantes são:

- Manutenção: praticamente inexistente.
- Resistência: elevada relação resistência/peso.
- Não corrosivo: resistente a ácidos e muitos produtos químicos corrosivos.
- Isolamento: excelente isolamento elétrico, térmico e magnético.
- Estabilidade dimensional: coeficiente de dilatação térmico baixo; resistência ao calor e ao frio intenso.
- Cor: são adicionados pigmentos às resinas para dar a cor desejada.
- Montagem: os materiais são facilmente ligados através de parafusos, rebites e colagens.

7.1 Propriedades Materiais Características dos Perfis Pultrudidos

A tabela 5 apresenta as propriedades materiais características para um perfil pultrudido com reforço de *roving* e manta de filamentos contínuos em fibra de vidro, na relação de reforço de 1:4 e resina de poliéster. A percentagem mássica é de 65% de fibra de vidro [10].

7.2 Estimativa das Propriedades de um Perfil Pultrudido

As propriedades de um compósito podem ser estimadas utilizando a lei das misturas, com base nas propriedades da resina, da fibra e da percentagem volúmica desta. No entanto, a exatidão destes cálculos dependem em grande parte da colocação, do tipo e do alinhamento do reforço dentro do laminado, embora aplicado a quase todos os compósitos de matriz plástica, é fortemente contrário ao contexto dos perfis pultrudidos.

Propriedade	Unidades	Símbolo	Valor Característico
Resistência á tração (long.)	MPa	$\sigma_{x,t,k}$	410
Resistência á tração (transv.)	MPa	$\sigma_{y,t,k}$	44
Módulo à tração (long.)	GPa	$E_{x,t,k}$	27
Módulo à tração (transv.)	GPa	$E_{y,t,k}$	3,5
Resistência á compressão (long.)	MPa	$\sigma_{x,c,k}$	270
Resistência á compressão (transv.)	MPa	$\sigma_{y,c,k}$	
Módulo à compressão (long.)	GPa	$E_{x,c,k}$	24
Módulo à compressão (transv.)	GPa	$E_{y,c,k}$	4,5
Resistência ao corte (no plano)	MPa	$\tau_{xy,k}$	15
Módulo de corte (no plano)	GPa	$G_{xy,k}$	4,2
Resistência à flexão (long.)	MPa	$\sigma_{x,b,k}$	400
Resistência à flexão (transv.)	MPa	$\sigma_{y,b,k}$	115
Módulo à flexão (long.)	GPa	$E_{x,b,k}$	14
Módulo à flexão (transv.)	GPa	$E_{y,b,k}$	8
Deformação de rotura (long.)	%	-	1,8
Deformação de rotura (transv.)	%	-	1,65
Coeficiente de Poisson (long.)	-	-	0,2
Coeficiente de Poisson (transv.)	-	-	0,1

Tabela 5 – Propriedades materiais características de perfis pultrudidos [10]

As propriedades dos perfis pultrudidos dependem do tipo de fibra utilizada e são divididos

em dois tipos com propriedades bem distintas. Os perfis constituídos por reforço unicamente unidirecional, em que as propriedades estão concentradas numa só direção (varões, barras de pequena secção, etc.) e os perfis que têm necessidade de alguma resistência na direção transversal (perfis I, U, L, etc.). Estes últimos têm normalmente reforço unidirecional (*roving*) e manta de filamentos contínuos, que tem fibras distribuídas de forma aleatória, para dar resistência na direção transversal.

O método mais adequado para estimar as propriedades de um perfil pultrudido é traduzido pela seguinte expressão:

$$X_c = T_1 X_1 + T_m X_m \quad (1)$$

onde,

X_c = propriedade desejada (resistência ou módulo à tração ou à flexão)

T_1 e X_1 = espessura percentual e propriedade do tipo de laminado/reforço num perfil pultrudido (podem ser mais do que dois tipos de reforço/laminado)

T_m e X_m = espessura percentual e propriedade do tipo de laminado/reforço num perfil pultrudido (podem ser mais do que dois tipos de reforço/laminado)

Por exemplo, estimar a resistência à tração para um perfil de 3 mm de espessura, constituído por duas camadas externas de manta de filamentos contínuos de 300g/m² e núcleo em reforço longitudinal de *roving*.

Cálculo:

- Camadas de manta de filamentos contínuos de 300 g/m².

Espessura das camadas = 2x0.508 = 1.016 mm (obtido da tabela 6)

Volume ocupado = 1.016/3x100%= 33.9%

Resistência à tração = 95 MPa (tabela 7)

- Camada de *roving*.

Espessura da camada = 3 – 1.016 = 1,984 mm

Volume Ocupado = 1.984/3x100%= 66.1%

Resistência à tração = 905.88 MPa, obtido por interpolação linear com os valores

limites entre a percentagem de fibra de vidro e a respetiva resistência (50% vidro ⇒

410 MPa e 75% vidro⇒ 1180 MPa) dos valores da tabela 7.

Da expressão (1) temos:

$$\sigma_c = T_l \sigma_l + T_m \sigma_m = 0.339 \times 95 + 0.661 \times 905.88 = 630 \text{ MPa}$$

Gramagem da manta de filamentos contínuos (g/m ²)	Espessura com impregnação em resina de poliéster (mm)
150	0,254
300	0,508
450	0,762
600	1,016

Tabela 6 – Espessuras de laminados com reforço de mantas de filamentos contínuos

Propriedade	Roving/poliéster	MFC/poliéster	Tecido de roving/poliéster
Conteúdo de fibra (% mássica)	50-75	30	45-60
Densidade (g/cm ³)	1,6 – 2,0	1.4	1,5 – 1,8
Resistência à tração (MPa)	410 - 1180	95	230 - 240
Módulo à tração (GPa)	21 - 41	7	13 - 17
Resistência à Flexão (MPa)	690 - 1300	160	200 - 270
Resistência à compressão (MPa)	210 - 480	240 - 310	98 - 140

Tabela 7 – Propriedades materiais características de perfis pultrudidos

A tabela 10 ilustra um desenvolvimento, deste processo, para estimar o módulo à tração de um perfil em U, com 100 mm de largura por 50 mm de altura e uma espessura de 5 mm, que dá uma secção de 950 mm², considerando os cantos sem raios de concordância.

Depois de definidas as camadas que constituem o reforço do perfil e do seu tipo, são introduzidos nas colunas 1 a 4, 6 a 8, 9, 11 e 12 da tabela, os respetivos valores e é calculada a coluna 5. Utilizando a fração de compressibilidade volúmica de cada camada (coluna 8), com os valores indicados na tabela 8, é possível calcular os valores das colunas 9 e 10.

O somatório das áreas das camadas da secção reta é comparado com a área da secção reta do perfil. As camadas de reforço ou pesos são ajustados para dar o preenchimento a 100% da secção.

A coluna 13 é determinada pelo contributo da fibra global, módulo da fibra e do fator de

eficiência (β) da coluna 12. Com o somatório do contributo de cada camada obtemos o módulo de elasticidade à tração estimado.

Reforço	Fração volúmica da fibra (%)
<i>Roving</i> Vidro-E	0,62
Manta de filamentos curtos Vidro-E	0,38
Manta de filamentos compridos vidro-E	0,28
Tecido de <i>roving</i> vidro-E	0,58
Tecido de Carbono unidirecional	0,66
Tecido de carbono com orientação $\pm 45^\circ$	0,56
Tecido de <i>Kevlar</i> ®	0,68

Tabela 8 – Compressibilidade do reforço – fração volúmica

Reforço	β
Unidirecional	1,0
Bidirecional (<i>tecido de roving</i>)	0,5
Manta de filamentos contínuos	0,375

Tabela 9 – Fatores de eficiência da fibra

A equação (1) é útil em análise da viabilidade de perfis. Deve ter-se em atenção que a aproximação empregue é teórica, dado que o perfil pultrudido é um compósito e como tal bastante sensível à localização dos reforços. Atualmente, a maioria dos fabricantes de perfis pultrudidos têm disponível uma base de dados perfil/propriedades ou manuais de dimensionamento dos seus perfis. Estes manuais podem dar ao projetista uma ajuda útil no dimensionamento de perfis, com um nível de estimativa de realização bastante aceitável.

8 Aplicações

As aplicações dos produtos de pultrusão são bastantes diversas, cobrindo áreas desde a construção civil até ao lazer e desporto. Alguns exemplos de aplicação estão classificados na tabela 11.

A figura 29 mostra algumas aplicações de perfis pultrudidos, mas existem muitas outras e como em todas as áreas, a imaginação é o limite.

Camadas	Tipo	Roving		Manta/tecido		Fibra				Secção da camada (mm ²)	Fibra Global V _f ^(*)	Módulo da Fibra (GPa)	β	Módulo à tração (GPa)
		Tex (g/km)	Nº de fios	Massa (g/m ²)	Largura (m)	Peso (g/m)	Densidade	Volume (cm ³ /m)	Fração Volúmica local					
		1	2	3	4	5 ^(a)	6	7 ^(b)	8					
1 ^a	Roving	4800	97			465,6	2,55	182,59	0,62	294,50	0,1826	70	1	12,78
2 ^a	2xMFC			1200	0,3	360	2,55	141,18	0,28	504,20	0,1412	70	0,375	3,71
3 ^a	Carbono UD			600	0,3	180	1,8	100,00	0,66	151,52	0,1000	230	1	23,00
Total						1005,6		453,89		950,21				39,49

(*) Fração volúmica global da fibra ^(a) Coluna 1 x coluna 2 / 1000 ou coluna 3 x coluna 4 ^(b) Coluna 5 / coluna 6. ^(c) Coluna 7 / coluna 8

^(d) Coluna 7 x secção da camada / 1000 ^(e) Coluna 10 x coluna 11 x coluna 12.

Tabela 10 – Matriz para estimar o módulo de elasticidade de um perfil em função da construção material do reforço

Área de atuação	Aplicações
Elétricas	<ul style="list-style-type: none"> - Caminhos de cabos - Esteiras de cabos - Escadas isolantes - Perfis para transformadores - Tirantes - Estruturas não-magnéticas - Postes de iluminação - Postes elétricos - Cabos de ferramentas
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> - Perfis para camiões - Reboques - Prumos para placas de sinalização - Estruturas de contentores e painéis - Barras de amortecimento
Construção Civil/anticorrosivas	<ul style="list-style-type: none"> - Estruturas de edifícios - Estruturas de reservatórios - Beirais de janela - Passadiços - Armaduras de câmaras de frio - Pontes de peões - Guarda-corpos - Escadas
Lazer e Desporto	<ul style="list-style-type: none"> - Varas de salto - Flechas - Bancos de jardim - Mastros para bandeiras - Canas de Pesca - Estrados para piscinas

Tabela 11 – Aplicações de perfis pultrudidos



(a) Guarda-corpos



(b) Escadas verticais



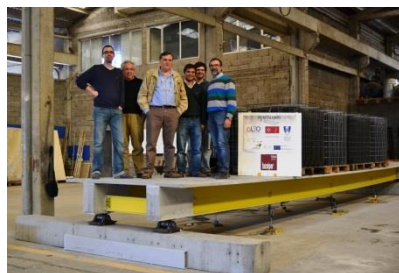
(c) Passadiços



(d) Escadas



(e) Estruturas



(f) Pontes Pedonais



(g) Banco de jardim



(h) Estrados para secagem do bacalhau



(i) Gradil com perfis pultrudidos



(j) Escada com rodas

Figura 29 – Fotografias de aplicações

9 Dimensionamento de Perfis Pultrudidos

Apesar do número crescente de estruturas em perfis pultrudidos, não existem códigos nacionais nem europeus para dimensionamentos de estruturas para estes perfis. Para colmatar essa lacuna os grandes fabricantes de perfis pultrudidos, criaram manuais de dimensionamento específicos para os seus perfis e as respetivas orientações variavam de fabricante para fabricante. Os fabricantes americanos tinham as medidas no sistema de unidades imperial e os europeus no sistema métrico, com a exceção dos britânicos. Também as propriedades eram significativamente diferentes em cada fabricante. Para fazer face a estas dificuldades os fabricantes, Instituições de Ensino e outras entidades ligados a estes materiais, criaram em 1989 um grupo de trabalho denominado “The European Structural Polymeric Composites Group” e editaram um manual de orientação no dimensionamento de materiais compósitos de matriz polimérica, que designaram por “Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP – Design Code and Handbook” [10]. Este manual foi editado pela primeira vez em 1996 e aplica-se no dimensionamento aos materiais compósitos de matriz polimérica, em geral, e não especificamente aos perfis pultrudidos.

Em 2002, surgiu a primeira norma europeia específica para perfis pultrudidos, a EN 13706. Esta norma é dividida em três partes. A primeira indica a forma de designar perfis pultrudidos, a segunda os métodos de ensaios e requisitos gerais e a terceira os requisitos específicos. Nesta norma são identificadas duas categorias de perfis em função do módulo de elasticidade da secção completa, E17 e E23, que representam perfis com módulos de elasticidade à flexão de 17 GPa e 23 GPa, respetivamente.

Com base no EUROCOMP [10] é apresentada a forma de dimensionamento de perfis pultrudidos para as diversas solicitações. Este manual, baseado no anteprojeto das normas do Eurocódigo atual tem sido o guia para o dimensionamento de diversas estruturas em perfis pultrudidos. O livro “Composites for Construction” [11], que é uma referência para o dimensionamento de estruturas em compósitos para a construção civil no mercado norte-americano, também refere este manual como base do dimensionamento de estruturas em materiais compósitos e em especial dos perfis pultrudidos.

A figura 30 indica o sistema de eixos utilizado na nomenclatura indicada nos pontos seguintes. Como os perfis pultrudidos são, na sua maioria, produzidos com reforço de fibra de vidro, a referência a este reforço será usada diversas vezes nos pontos seguintes.

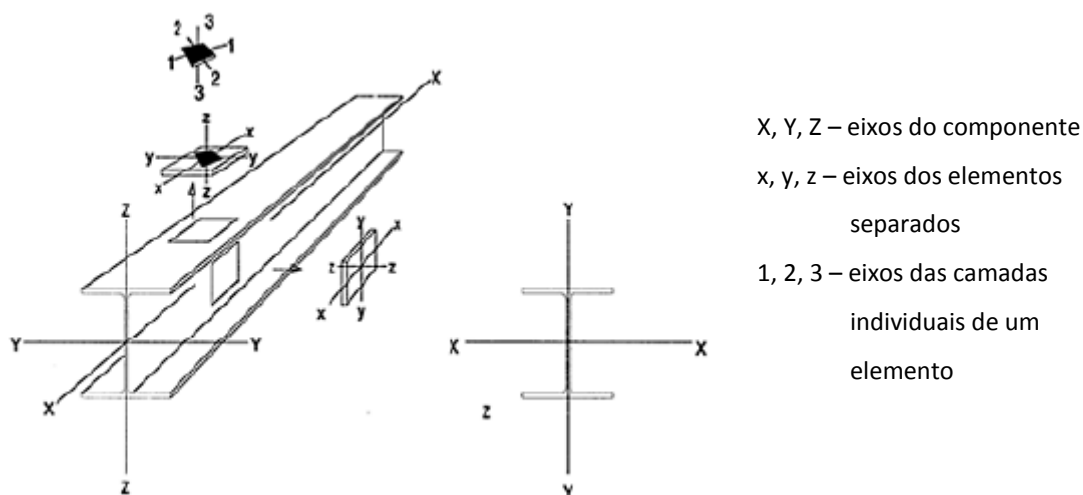


Figura 30 – Sistema de coordenadas

9.1 Coeficiente de Segurança para a Incerteza das Propriedades do Material

O coeficiente de segurança para a incerteza das propriedades do material, γ_m , designado normalmente apenas como coeficiente de segurança é determinado da seguinte expressão:

$$\gamma_m = \gamma_{m,1} \cdot \gamma_{m,2} \cdot \gamma_{m,3} \quad (2)$$

com,

$\gamma_{m,i}$ coeficiente de segurança parcial para a incerteza das propriedades do material (tabelas 13 a 15);

A tabela 12 indica os valores máximos e mínimos para os coeficientes parciais de segurança para a incerteza das propriedades do material.

Coeficiente de segurança parcial	Descrição	Valor de $\gamma_{m,i}$	
		Max	Min
$\gamma_{m,1}$ (Tabela 13)	Desvio das propriedades do material relativamente aos ensaios (nível de incerteza)	2,25	1,0
$\gamma_{m,2}$ (Tabela 14)	Material e processo de produção	2,7	1,1
$\gamma_{m,3}$ (Tabela 15)	Efeitos ambientais e duração do carregamento	3,0	1,0

Tabela 12. – Coeficientes de segurança parciais para os materiais

O coeficiente de segurança parcial ($\gamma_{m,1}$) relacionado com o nível de incerteza obtido de laminados, painéis ou perfis pultrudidos, é obtido a partir da tabela 13, a não ser que informação mais detalhada de dados experimentais justifique um valor menor.

Desvios das propriedades	$\gamma_{m,1}$
Propriedades dos materiais constituintes (fibra e matriz) são obtidas de testes de amostras	2,25
Propriedades de um laminado individual obtidas da teoria	2,25
Propriedades do laminado, painel ou pultrusão obtidas da teoria	2,25
Propriedades de camadas individuais obtidas de testes de amostras	1,5
Propriedades de laminados, painéis ou pultrusão obtidas de testes de amostras	1,15

Tabela 13 – Valores de $\gamma_{m,1}$

O coeficiente de segurança parcial ($\gamma_{m,2}$) relacionado com os materiais e processo de produção deve ser obtido a partir da tabela 14, a não ser que informação mais detalhada de dados experimentais justifique um valor menor.

Método de fabrico	$\gamma_{m,2}$	
	Completamente pós-curada na aplicação	Não completamente pós-curada na aplicação
Aplicação por pulverização manual	2,2	3,2
Aplicação por pulverização controlada por máquina	1,4	2,0
Moldação manual	1,4	2,0
RTM	1,2	1,7
Pré-impregnados	1,1	1,7
Enrolamento filamentar controlado por máquina	1,1	1,7
Pultrusão	1,1	1,7

Tabela 14 – Valores de $\gamma_{m,2}$

O coeficiente de segurança parcial ($\gamma_{m,3}$) relacionado com os efeitos ambientais e durante o carregamento deve ser o indicado na tabela 15, a não ser que informação mais detalhada de dados experimentais justifique um valor menor.

Temperatura de dimensionamento de operação ⁽²⁾ (°C)	HDT ⁽¹⁾ (°C)	$\gamma_{m,3}$	
		Carregamento de curto prazo	Carregamento de longo prazo
25-30	55-80	1.2	3.0
	80-90	1.1	2.8
	> 90	1.0	2.5
0-25	55-70	1.1	2.7
	70-80	1.0	2.6
	> 80	1.0	2.5

Tabela 15 - Valores de $\gamma_{m,3}$,⁽¹⁾ Temperatura de distorção por aquecimento; ⁽²⁾ Temperaturas de trabalho. Fora desta gama procurar conselho de especialistas.

De acordo com o Eurocódigo, norma NP EN 1990 de 2002, que refere as bases do dimensionamento (no ponto 6.5.4.), o valor do coeficiente de segurança parcial do material no

cálculo ao estado limite de utilização deve ser considerado igual a 1 nas normas EN 1992 e EN 1999, salvo indicação em contrário.

No cálculo ao estado limite último, o coeficiente de segurança parcial do material nunca poderá ser inferior a 1,5 nem superior a 10.

9.2 Dimensionamento dos Membros à Tração

Como os materiais compósitos com reforço de fibra de vidro têm um módulo de elasticidade relativamente baixo, as deformações axiais podem ser significativas. Por este motivo, é necessário dimensionar ao estado limite de serviço. Existe um limite de deformação permitido para assegurar que a resina não estale, que é de 2%.

$$\varepsilon_{t,Sd} \leq 2\%$$

onde, $\varepsilon_{t,Sd}$, é deformação longitudinal à tração, obtido por.

$$\varepsilon_{t,Sd} = \frac{N}{\frac{E_{x,d} \cdot A}{\gamma_m}} \times 100 \quad (3)$$

O dimensionamento do esforço à tração $N_{t,Sd}$ deve satisfazer:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (4)$$

onde $N_{t,Rd}$ é a resistência à tração do perfil na direção longitudinal, assumindo o mais pequeno dos seguintes pontos:

- resistência à tração da secção reta

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot \sigma_{x,t,k}}{\gamma_m} \quad (5)$$

- resistência à tração da secção reta que contém os furos

$$N_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot \sigma_{x,t,k}}{\gamma_m} \quad (6)$$

onde

- A área da secção do perfil;
 A_{net} área da secção reta que contém furos;
 $\sigma_{x,t,k}$ resistência à tração da secção na direção longitudinal;

9.3 Dimensionamento dos Membros à Compressão

O dimensionamento aqui apresentado é aplicado a membros sujeitos a compressão axial, com ou sem flexão e que tenham a carga aplicada coincidente com o centróide do membro, para os quais os efeitos de torção podem ser desprezados. Se a aplicação da carga for excêntrica, então ocorrerão tensões de flexão além das tensões axiais. O efeito de flexão e compressão axial combinadas será tratado no ponto 9.6.

Os efeitos globais (Euler) e encurvadura local dominam o dimensionamento dos membros em compressão em qualquer material. Isto é particularmente importante quando se dimensiona membros em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) à compressão, porque o relativo baixo módulo inerente aos PRFV requerem uma completa consideração de todos os possíveis modos de encurvadura.

A encurvadura global de um membro é considerada com o pressuposto de que o material é isotrópico e que o módulo elástico relevante é o do eixo fraco do membro.

A encurvadura local de elementos individuais será abordada no ponto 9.5 e requer um conhecimento da rigidez longitudinal e da flexão transversal do elemento.

Se os efeitos de primeira ordem excederem 10%, devido ao aumento do deslocamento transversal (flecha), ocorrem os efeitos de segunda ordem. O dimensionamento para a estabilidade estrutural, tendo em conta os efeitos de segunda ordem, deve assegurar que para as combinações mais desfavoráveis das ações no estado limite último, a perda de equilíbrio estático (local ou para a estrutura como um todo) não ocorre ou que a resistência individual de cada secção reta, sujeitas a flexão e forças longitudinais não é excedida.

O comportamento estrutural deve ser considerado em qualquer direção na qual a rotura,

devido a efeitos de segunda ordem, possa ocorrer.

As ligações nas extremidades e uniões devem ser devidamente dimensionadas para que as forças compressivas sejam devidamente transferidas.

Para membros em compressão axial, o valor da força de compressão $N_{c,Sd}$ em cada secção reta deve satisfazer a seguinte condição:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (7)$$

onde $N_{c,Rd}$ é a resistência à compressão de cada secção reta, tomando o valor mais pequeno dos seguintes cálculos:

- resistência relativamente ao estado limite último da secção reta

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot \sigma_{c,Rd}}{\gamma_m} \quad (8)$$

onde $\sigma_{c,Rd}$ é a tensão resistente de compressão;

- resistência à encurvadura do membro

$$N_{c,Rd} = \frac{\pi^2 E_{x,d} \cdot I_{zz}}{(kL)^2 \gamma_m} \quad (9)$$

onde,

I_{zz} momento de inércia (em volta do eixo fraco do z);

$E_{x,d}$ módulo de elasticidade à compressão;

kL Comprimento efetivo

L comprimento do membro;

k = fator do comprimento efetivo, obtido da figura 31;

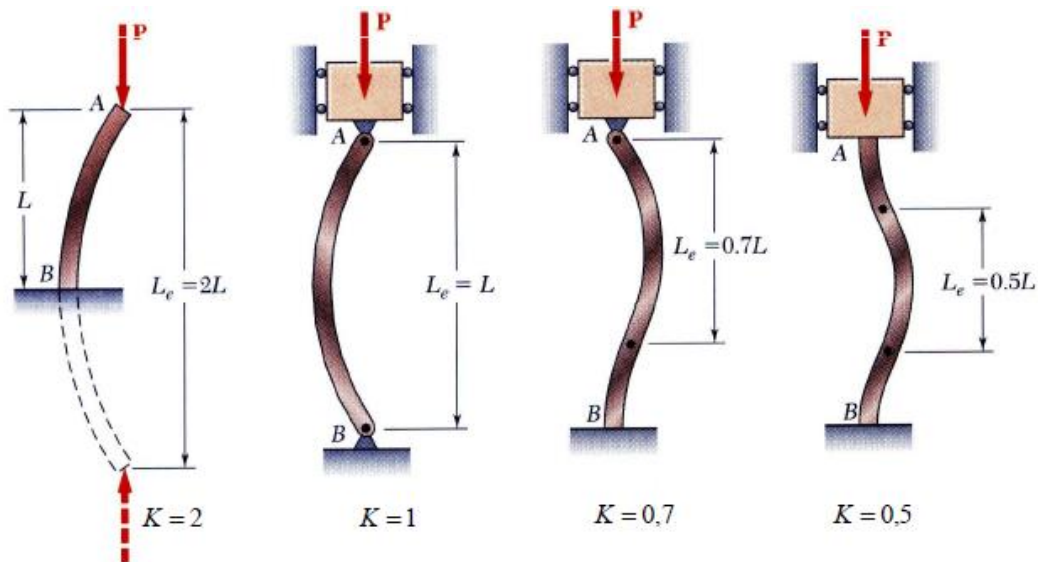


Figura – 31 – Fator do comprimento efetivo

➤ resistência à encurvadura local da secção

Os perfis pultrudidos são bastante suscetíveis à encurvadura local, quando sujeito a forças de compressão axiais, devido ao seu baixo módulo no plano e à esbelteza (relação largura/espessura) dos elementos placa (paredes) que constituem um perfil de paredes finas. A figura 32 mostra os feitos da encurvadura local nos banzos devido à compressão concentricamente carregada de um perfil H. É de salientar a encurvadura em ambos os banzos.

Em perfis I e H os banzos são particularmente susceptíveis à encurvadura, porque um dos lados está livre enquanto o outro lado está restringido elásticamente na união alma-banzo.

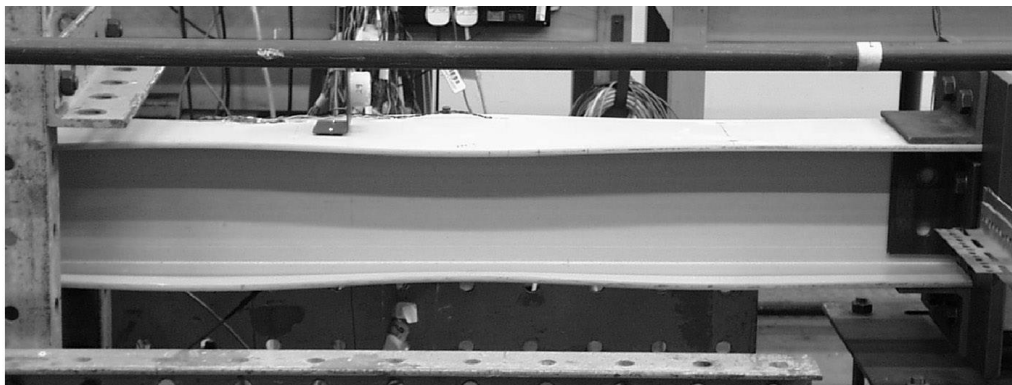


Figura 32 – Encurvadura local nos banzos devido a carregamento axial de compressão

A encurvadura local pode ocorrer na alma ou nos banzos e cada uma destas partes deve satisfazer a seguinte condição:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \sigma_{c,cr}}{\gamma_m} \quad (10)$$

onde,

A_{eff} é a área efetiva da secção reta;

$\sigma_{c,cr}$ é a menor resistência crítica de encurvadura de um elemento individual da secção, determinada da seguinte maneira:

- A alma de um elemento da secção pode ser definida como uma longa placa retangular com as duas extremidades simplesmente apoiadas:

$$\sigma_{c,cr,y} = \frac{2\pi^2 (\sqrt{D_x D_y} + H_0)}{tb^2} \quad (11)$$

onde,

$$H_0 = \frac{1}{2} (\nu_{xy} D_y + \nu_{yx} D_x) + 2 \left(\frac{G_{xy} t^3}{12} \right) \quad (12)$$

b largura efetiva do elemento placa;

t espessura do elemento placa;

D_x e D_y são as rigidezes da alma indicadas na tabela 16;

ν_{xy} , ν_{yx} Coeficiente de Poisson, maior e menor, respetivamente;

G_{xy} módulo de corte;

- Os banzos de um elemento da secção pode ser definido como uma longa placa retangular com uma das extremidades apoiada e a outra livre:

$$\sigma_{c,cr,y} = \frac{\pi^2}{tb^2} \left[D_x \left(\frac{b}{a} \right)^2 + \frac{12D'_{xy}}{\pi^2} \right] \quad (13)$$

onde,

- a a metade do comprimento de onda da encurvadura e é tido como o comprimento da placa;
- b Largura efetiva do elemento placa;
- t espessura do elemento placa;
- D_x, D_y e D'_{xy} são as rigidezes dos banzos e são dadas na tabela 16;

Anisotropia	Equação
Placas isotrópicas	$D = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \nu^2)}$
Placas ortotrópicas	$D_x = \frac{E_x \cdot t^3}{12(1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})}$ $D_{xy} = D_{yx} = \frac{\nu_{yx} \cdot E_x \cdot t^3}{12(1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})}$ $D'_{xy} = \frac{G_{xy} \cdot t^3}{12}$ $D_y = \frac{E_y \cdot t^3}{12(1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})}$

Tabela 16 - Equação de rigidez de placas

onde:

- t espessura do laminado;
- D_{xy} rigidez à flexão;
- E módulo de elasticidade à flexão;
- E_x módulo de elasticidade à flexão na direção x;
- E_y módulo de elasticidade à flexão na direção y;
- G_{xy} módulo de corte no plano;
- ν_{xy} coeficiente de Poisson maior;
- ν_{yx} coeficiente de Poisson menor;

9.4 Dimensionamento dos Membros à Flexão

No dimensionamento à flexão de perfis pultrudidos com reforço de fibra de vidro, a flecha da viga imposta pelo carregamento é normalmente o fator crítico de dimensionamento. A flecha é função da relação $(vão/altura\ da\ viga)^3$. Da análise desta relação verifica-se que o aumento da altura da viga tem grandes benefícios na redução da flecha.

Para a mesma rigidez de um perfil pultrudido e de um perfil em aço, em que o módulo de elasticidade do perfil pultrudido é cerca de dez vezes inferior ao de aço, a altura do perfil pultrudido tem que ser 2,1 vezes a do aço.

Para vigas com uma relação $(vão / altura\ da\ viga)$ pequena, a flecha devido ao efeito de corte pode ser da mesma magnitude que a flecha devido à flexão. Isto acontece porque a viga com reforço de fibra de vidro tem uma altura relativamente elevada e o módulo de corte é relativamente baixo.

Regra geral, as vigas pultrudidas com reforço de fibra de vidro com relação $(vão / altura\ da\ viga > 25)$ têm uma flecha devido ao corte desprezável em comparação com a flecha devido à flexão, mas para pequenas relações a flecha devido ao efeito de corte não pode ser desprezada.

É preciso ter em atenção que o módulo de elasticidade à flexão não é necessariamente igual ao módulo em tração ou compressão. Deve ser obtido por ensaios de flexão e assegurar que o vão é suficiente para que o efeito do corte na flecha ocorra.

No dimensionamento à flexão, a resistência do perfil pultrudido dever ser igual ou superior aos seguintes estados limites últimos:

- resistência à flexão;
- resistência axial;
- resistência ao corte;
- tensão de contacto nos furos das ligações;
- encurvadura da alma devido à flexão;
- encurvadura da alma devido ao corte;
- encurvadura da alma devido à flexão e corte;
- enrugamento da alma;
- encurvadura da compressão no banzo;
- encurvadura de torção lateral;

Para os últimos 6 pontos deve ser verificada a Estabilidade, apresentado no ponto 9.5.

A resistência deve ser igual ou superior ao estado limite de serviço da deformação devido à flexão mais a deformação devido ao corte.

O momento de inércia, I , e a área de corte devem ser determinados para que a deformação máxima admissível devido à flexão e ao corte não seja excedida.

O módulo de resistência da secção, W , deve ser determinado de tal forma que as tensões máximas de tração e compressão da secção não sejam excedidas.

A menor relação da largura do banzo com a espessura do mesmo deve ser determinada para suportar a tensão de compressão deste sem encurvadura local.

A menor relação da altura da alma com a espessura desta deve ser determinada para suportar a tensão ao corte requerida na mesma sem encurvadura local.

A resistência do membro deve ser adequada para prevenir encurvadura à torção lateral.

9.4.1 Dimensionamento à Resistência (ELU – Estado Limite Último)

O momento interno máximo, M_{Sd} , deve satisfazer a condição:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (14)$$

onde M_{Rd} , é o momento resistente da secção, tomando o valor mais pequeno de:

➤ Momento resistente último

$$M_{Rd} = \frac{W_t \sigma_{t,k}}{\gamma_m} \quad (15)$$

onde,

W_t , é o módulo da secção à tração;

$\sigma_{t,k}$, é a tensão de tração característica;

- Resistência local à encurvadura

$$M_{Rd} = \frac{M_{c,cr}}{\gamma_m} = \frac{W_c \cdot \sigma_{c,k}}{\gamma_m} \quad (16)$$

onde,

$M_{c,cr}$ é momento crítico da encurvadura local

W_c é o módulo da secção resistente à compressão;

$\sigma_{c,k}$ é a tensão de compressão característica;

- Encurvadura lateral torsional

$$M_{Rd} = \frac{M_{b,cr}}{\gamma_m} \quad (17)$$

onde,

$M_{b,cr}$ é o momento crítico à encurvadura devido à torção lateral;

9.4.2 Dimensionamento à Rigidez (ELS – Estado Limite de Serviço)

A deformação de um membro deve ser tal que não influencie de modo adverso a sua própria função ou aspeto.

As equações convencionais para flexão de vigas isotrópicas e homogéneas podem ser utilizadas para os materiais compósitos. Para vigas simples tomam a forma:

$$\text{Deslocamento transversal (flexão)} = \frac{k_1 F_v L^3}{EI} \quad (18)$$

onde:

EI = rigidez à flexão de toda a secção, sendo E o módulo de elasticidade e I o momento de inércia;

F_v = carregamento vertical total na viga;

k_1 = um fator dependente do tipo de carregamento e das condições fronteira. Um conjunto de fatores é dado na tabela 17;

Condições Fronteira	Tipo de Carregamento	k_1	k_2
Encastrado numa extremidade	Pontual na extremidade	1/3	1
Encastrado numa extremidade	Uniformemente distribuída	1/8	1/2
Apoiada nas extremidades	Pontual ao centro	1/48	1/4
Apoiada nas extremidades	Uniformemente distribuída	5/384	1/8
Encastrado nas extremidades	Uniformemente distribuída	1/384	1/24

Tabela 17 – Valores para k_1 e k_2 .

A tabela 18 apresenta os valores limites recomendados para a flecha, tendo em conta a natureza e funcionalidade da estrutura.

Condições típicas	Limites (Fig. 32)	
	$\delta_{m\acute{a}x}$	δ_2
Passadiços sem acesso a público	L/150	L/175
Sem aplicações específicas em geral	L/175	L/200
Com acesso público em geral	L/250	L/300
Piso e telhados suportando reboco outro acabamento frágil ou partições não flexíveis	L/250	L/350
Piso suportando colunas (a menos que o deslocamento transversal tenha sido incluído na análise global para o estado limite último)	L/400	L/500
Onde $\delta_{m\acute{a}x}$ possa enfraquecer o aspeto da estrutura	L/250	-

Tabela 18 – Valores limites recomendados para a flecha

A figura 33 ilustra as flechas indicadas na tabela anterior, com referência a uma viga simplesmente apoiada, onde:

- $\delta_{m\acute{a}x}$ é a flecha máxima da deformada devido ao carregamento, deduzida da contraflecha;
- δ_1 é variação da flecha da viga imediatamente a seguir a ser retirado o carregamento;
- δ_2 , variação da flecha da viga devido a carregamento variável mais as deformações dependentes devido ao carregamento permanente;
- δ_0 , contraflecha no elemento estrutural não carregado;

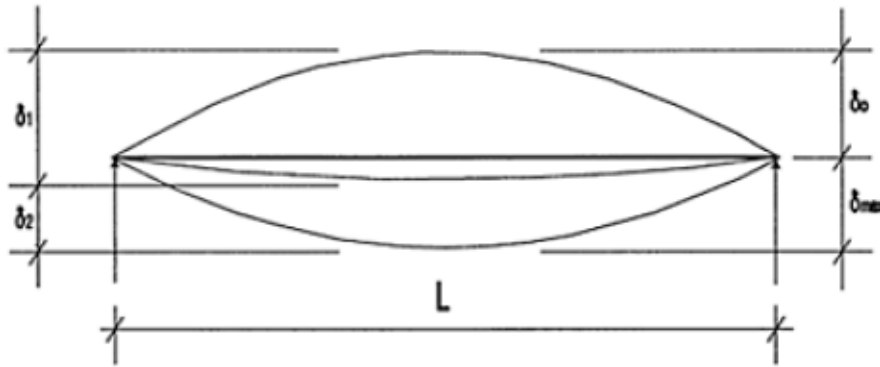


Figura 33 – Definição dos deslocamentos transversais

Em vigas com relação (*vão / altura* < 25) o deslocamento transversal devido ao corte deve ser tomado em consideração.

As equações para o deslocamento transversal devido ao corte tomam a forma:

$$\text{Deslocamento transversal (corte)} = \frac{k_2 F_v L}{A_v G_{xy}} \quad (19)$$

onde

k_2 = um fator dependente do tipo de carregamento e das condições das extremidades. Um conjunto destes fatores é dado na tabela 17;

F_v = carga vertical total;

A_v = área de corte da alma;

G_{xy} = módulo de corte no plano da alma;

9.5 Dimensionamento ao Corte

O valor da força de corte, V_{Sd} , em cada secção reta deve satisfazer:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (20)$$

onde, V_{Rd} é força de corte resistente, dado por:

$$V_{Rd} = \frac{A_v \tau_{xy,k}}{\gamma_m} \quad (21)$$

onde, $\tau_{xy,k}$ é tensão de corte característica;

A área de corte, A_v , é calculada da seguinte forma:

- Para perfis I, H e secções ocas carregados paralelamente à alma:

$$A_v = \Sigma(d_w t_w) \quad (22)$$

onde

d_w é a altura da alma da viga

t_w é a espessura da alma da viga

- Para perfil I, H e U carregados paralelamente aos banzos:

$$A_v = A - \Sigma(d_w t_w) \quad (23)$$

- Para secções tubulares de espessura uniforme:

$$A_v = \frac{2A}{\pi} \quad (24)$$

- Para placas e barras sólidas:

$$A_v = A \quad (25)$$

Para outros casos, A_v , deve ser determinado de maneira idêntica às mencionadas anteriormente. No caso de secções que possam ser constituídas a partir de secções conhecidas podemos fazer a construção da mesma.

Quando a espessura da alma, t_w , não é constante deve ser considerada a espessura menor.

A resistência de encurvadura ao corte deve ser verificada conforme indicado no ponto 9.6.2.

9.6 Estabilidade da Secção

9.6.1 Tensão Crítica de Encurvadura na Alma da Viga Devido à Flexão

A figura 34 mostra os efeitos da encurvadura local nos banzos devido à flexão de um perfil H. Este tipo de encurvadura difere da encurvadura devido à compressão axial, dado que apenas o banzo que está sujeito à compressão é que entra em instabilidade. A figura 35 mostra a rotura devido à encurvadura do banzo que está sujeito à compressão.

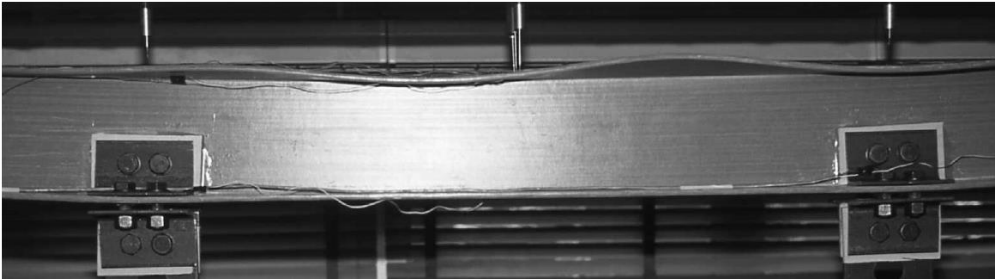


Figura 34 – Encurvadura local no banzo à compressão devido à flexão

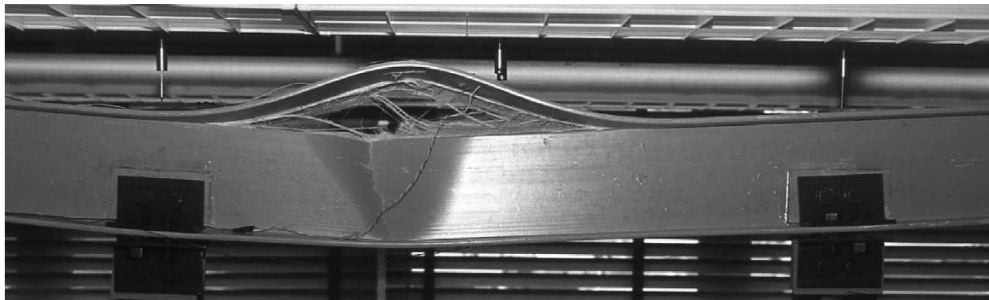


Figura 35 – Rotura devido à encurvadura do banzo devido à flexão

A tensão de flexão no plano, $\sigma_{x,b}$, deve satisfazer a relação:

$$\sigma_{x,b} \leq \sigma_{x,cr,b} \quad (26)$$

sendo $\sigma_{x,cr,b}$ a tensão crítica de encurvadura. Esta é considerada como placas retangulares

sujeitos a flexão no plano. Para materiais ortotrópicos é calculada da seguinte forma:

$$\sigma_{x,cr,b} = \frac{k\pi^2 D_x}{d_w^2 t_w} \quad (27)$$

onde,

$k = 20$, para a ligação banzo/alma simplesmente apoiada (caso geral de vigas);

$k = 50$, para ligação banzo/alma fixa. Neste caso a relação $D_x/D_y = 1$;

D_x e D_y são calculadas das equações da tabela 16;

9.6.2 Tensão de Corte Crítica na Alma da Viga

A tensão de corte na alma da viga, τ_{xy} , deve satisfazer a relação:

$$\tau_{xy} \leq \tau_{xy,cr,b} \quad (28)$$

sendo $\tau_{xy,cr,b}$ a tensão crítica de encurvadura de placas retangulares sujeitas a tensões de corte no plano. Para materiais ortotrópicos é calculada da seguinte forma:

$$\tau_{cr} = \frac{4k(D_x D_y^3)^{0.25}}{d_w^2 t_w} \quad (29)$$

onde:

$k = 8$;

D_x e D_y são calculadas das equações da tabela 16;

9.6.3 Combinação de Corte e Flexão no Plano na Alma da Viga

As almas das vigas sujeitas à combinação de flexão e de corte devem ser dimensionadas de forma que:

$$\left(\frac{\tau_{xy}}{\tau_{xy,cr,b}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{x,b}}{\sigma_{x,cr,b}} \right)^2 \leq 1 \quad (30)$$

A tensão de encurvadura pode ser aumentada colocando rigidificadores na alma da viga, para que a tensão no plano não seja maior que a resistência no plano. Estes rigidificadores devem estar devidamente espaçados e não devem deformar-se excessivamente.

Os rigidificadores na alma da viga, com propriedades isotrópicas e com as mesmas propriedades elásticas da viga onde vão ser colocados, devem ser dimensionados de forma a que o momento de inércia mínimo do rigidificador no plano da alma, I_s , satisfaça a relação:

$$I_s = 0.34d_w^4 \left(\frac{t_w}{b_s} \right)^3 \quad (31)$$

onde,

b_s , é o espaçamento longitudinal entre rigidificadores

9.6.4 Resistência da Alma às Cargas Transversais

A resistência de uma alma não reforçada para forças na direção transversal, aplicadas através do banzo, deve ser verificada para os seguintes modos de rotura:

- rotura da alma;
- encurvadura da alma;

Deve ser feita a distinção entre dois tipos de aplicação de carga, como se indica:

- forças aplicadas através de um banzo e suportadas por forças de corte na alma;
- forças aplicadas a um banzo e transmitidas através da alma diretamente ao outro banzo;

Também deve ser considerado o efeito da força transversal no cálculo do momento resistente do membro.

9.6.4.1 Comprimento do Apoio Rígido

O comprimento do apoio rígido, S_s , ao longo da qual a força aplicada é efetivamente distribuída, deve ser determinado pela dispersão para um declive 1:1 da carga através do

material compósito fixo de forma apropriada no local (ver figura 36).

O comprimento mínimo do apoio rígido deve ser determinado de:

$$S_s = \frac{R_u}{t_w \sigma_{y,c,k,w}} \quad (32)$$

onde:

R_u , é a reação no suporte;

$\sigma_{y,c,k,w}$, é tensão resistente característica à compressão na alma do perfil

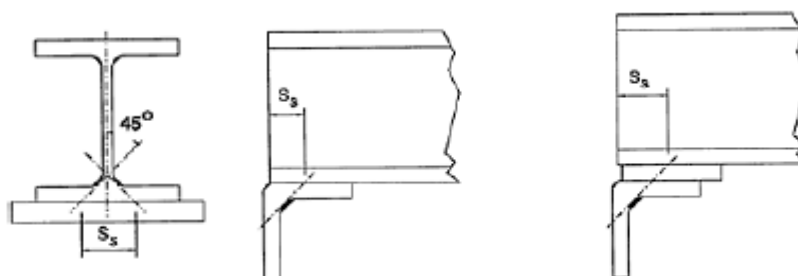


Figura 36 – Comprimento do apoio

9.6.4.2 Resistência à Rotura da Alma do Perfil

O dimensionamento da resistência à rotura, $V_{y,Rd}$, da alma de uma secção em I, H ou U pode ser obtida de:

$$V_{y,Rd} = \frac{(S_s + S_n) t_w \sigma_{y,c,k,w}}{\gamma_m} \quad (33)$$

sendo:

S_s = comprimento do apoio rígido (ver figura 36);

S_n = comprimento obtido pela dispersão a 45° através da metade da altura da secção (figura 37);

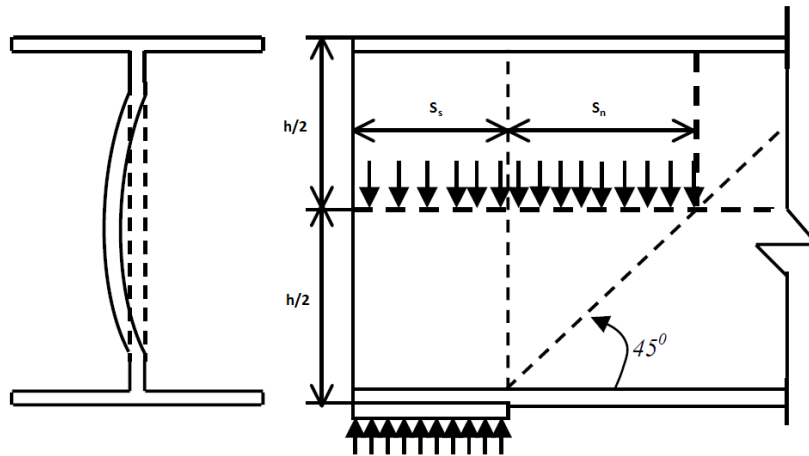


Figura 37 – Encurvadura da alma e indicação de S_s e S_n .

9.6.4.3 Resistência à Encurvadura da Alma do Perfil

A resistência à encurvadura, da alma de uma seção I, H ou U pode ser calculada considerando a mesma como um membro virtual em compressão com uma largura, b_{eff} , obtida por:

$$b_{eff} = \sqrt{h^2 + S_s^2} \quad (34)$$

sendo h a altura total da viga.

Perto dos extremos do membro ou de aberturas na alma, a largura efetiva, b_{eff} , não deve ser considerada maior do que a largura atualmente disponível, medida a partir do meio da altura.

A tensão crítica de encurvadura (σ_{cr}) pode ser determinada por:

$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2 \sqrt{D_x \cdot D_y}}{b_{eff}^2 t_w} \quad (35)$$

onde:

$$k = 2 \left(1 + \frac{H_0}{\sqrt{D_x \cdot D_y}} \right)$$

e

$$H_o = \frac{1}{2}(\nu_{xy} \cdot D_y + \nu_{yx} \cdot D_x) + \frac{G \cdot t_w^3}{6}$$

Para os casos isotrópicos $D_x = D_y = H_o$ e $k = 4$.

9.6.4.4 Encurvadura da Compressão do Banzo (uma extremidade fixa, uma extremidade livre)

A compressão longitudinal do banzo deve satisfazer a seguinte relação em todos os pontos do membro:

$$\sigma_{c,x} \leq \frac{\sigma_{x,cr,c}}{\gamma_m} \quad (36)$$

onde $\sigma_{x,cr,c}$ é a tensão crítica de encurvadura.

Para o caso isotrópico, no qual o banzo é consideravelmente mais comprido do que a sua largura, na ausência de uma análise mais rigorosa a tensão crítica de encurvadura, $\sigma_{x,cr,c}$ no banzo pode ser determinada por:

$$\sigma_{x,cr,c} = G_{xy,d} \left(\frac{2t_f}{b_f} \right)^2 \quad (37)$$

sendo:

G_{xy} = módulo de corte no plano do banzo

Para casos de material ortotrópico, como é o caso dos perfis pultrudidos, a tensão de encurvadura local para uma placa longa com uma extremidade longitudinal livre e uma fixa é:

$$\sigma_{x,cr,b} = \frac{\pi^2}{t_f \cdot b_f^2} \left[D_x \left(\frac{b_f}{a} \right)^2 + \frac{12 \cdot D'_{xy}}{\pi^2} \right] \quad (38)$$

sendo:

a = metade do comprimento de onda da curva = comprimento do banzo.

9.6.4.5 Encurvadura Lateral Devido à Torção

O momento crítico de encurvadura pode ser obtido de:

$$M_{b,cr} = C_1 P_{ey} \sqrt{\frac{C_w}{I_{zz}} + \frac{GJ}{P_{ey}}} \quad (39)$$

P_{ey} é a carga de encurvadura de Euler de uma coluna carregada na direção do eixo fraco:

$$P_{ey} = \frac{\pi^2 E_{z,b,d} I_{zz}}{(kL)^2} \quad (40)$$

onde,

L , comprimento da viga entre dois pontos que têm restrições laterais;

I_{zz} , momento de inércia na direção do eixo fraco;

J , constante de torção;

C_w , constante de deformação à torção;

$E_{z,b,d}$, módulo de elasticidade, flexão no eixo menor;

G_{xy} , módulo de corte do material do banzo;

k , fator do comprimento efetivo referente à rotação final em volta do eixo menor. É 0,5 para fixação total e 1,0 para a não existência de fixações (figura 31);

C_1 , um fator dependente do carregamento e condições de restrição das extremidades;

Para uma viga simplesmente apoiada na direção do eixo forte:

- Carregamento uniformemente distribuído e k é 1,0, $C_1 = 1,132$;
- Carregamento uniformemente distribuído e k é 0,5, $C_1 = 0,972$;
- Carregamento concentrado num ponto central e k é 1,0, $C_1 = 1,365$;
- Carregamento concentrado num ponto central e k é 0,5, $C_1 = 1,070$;

9.7 Combinação de Esforços

Esta secção é aplicada a membros sujeitos a compressão axial ou tracção, paralelamente ao eixo longitudinal do membro e flexão, em volta de cada um dos eixos ou de ambos os eixos.

Para o dimensionamento ao estado limite último de um elemento sujeito à tracção e flexão , devem ser satisfeitas, em cada secção recta as seguintes condições:

$$\frac{N_{t,Sd,x}}{N_{t,Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} + \frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} \leq 1 \quad (41)$$

$$\frac{N_{t,Sd,x}}{N_{t,Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{b,cr,y}} + \frac{M_{Sd,z}}{M_{b,cr,z}} \leq 1 \quad (42)$$

Para o dimensionamento ao estado limite de serviço de um elemento sujeito à tracção e flexão, a deformação máxima à tração, combinada em cada secção recta do membro, não deve exceder os valores apropriados para a tracção de um membro sujeito a condições ambientais e de serviço semelhantes.

Para o dimensionamento à compressão e flexão ao estado limite último, as condições seguintes devem ser satisfeitas:

$$\frac{N_{c,Sd,x}}{N_{c,Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{Rd,y}} + \frac{M_{Sd,z}}{M_{Rd,z}} \leq 1 \quad (43)$$

$$\frac{N_{c,Sd,x}}{N_{c,Rd,x}} + \frac{M_{Sd,y}}{M_{c,cr,y}} + \frac{M_{Sd,z}}{M_{c,cr,z}} \leq 1 \quad (44)$$

$$X_x + X_y + X_z \leq 1 \quad (45)$$

sendo,

$$X_x = \text{MAX} \left(\begin{array}{c} \frac{N_{c,Sd,x}}{0.7N_{cr,y}} \\ \frac{N_{c,Sd,x}}{0.7N_{cr,z}} \end{array} \right) \quad (46)$$

nos quais,

$N_{cr,y}$ = carga crítica de encurvadura com flexão em torno do eixo x (maior);

$N_{cr,z}$ = carga crítica de encurvadura com flexão em torno do eixo y (menor);

$$X_y = \text{MAX} \left(\begin{array}{l} M_{Sd,y} / M_{Rd,y} \left(1 - \frac{N_{c,Sd,x}}{N_{cr,y}} \right) \\ M_{Sd,y} / M_{b,cr,y} \left(1 - \frac{N_{c,Sd,x}}{N_{cr,y}} \right) \end{array} \right) \quad (47)$$

e

$$X_z = \text{MAX} \left(\begin{array}{l} M_{Sd,z} / M_{Rd,z} \left(1 - \frac{N_{c,Sd,x}}{N_{cr,z}} \right) \\ M_{Sd,z} / M_{b,cr,z} \left(1 - \frac{N_{c,Sd,x}}{N_{cr,z}} \right) \end{array} \right) \quad (48)$$

Os efeitos de fluência nos valores das cargas críticas de encurvadura utilizados nas expressões anteriores devem ser tidos em consideração.

No caso das condições anteriores serem satisfeitas, devem ser considerados deslocamentos devidos á fluência, apenas no dimensionamento em relação ao estado limite de deslocamento transversal. Não é necessário considerar o estado limite de dano local para elementos sujeitos à compressão e flexão.

10 Dimensionamento de uma Estrutura

Neste ponto será abordado a conceção e o dimensionamento de uma estrutura, em perfis pultrudidos, para suporte de um equipamento classificador de azeitonas.

Esta estrutura em perfis pultrudidos substituiu uma estrutura metálica já existente (figura 38), mas que apresentava um estado de corrosão significativo e por se tratar de uma indústria alimentar, com a agravante de estar situada junto ao mar, levava ao incumprimento de requisitos para o ramo alimentar.



Figura 38 – Estrutura existente

A estrutura foi dimensionada tendo em consideração o estado limite último e o estado limite de serviço com base nas indicações do EUROCOM – Design Code and Handbook [10], conforme indicado anteriormente.

10.1 Requisitos

Os requisitos pretendidos para a estrutura foram:

- Suportar o peso do classificador de azeitonas cujo peso é de 1000 kgf.
- Não fazer qualquer alteração ao equipamento classificador existente, mantendo os mesmos apoios.
- Conter um passadiço, ao longo do comprimento da estrutura, para acesso de um supervisor e pessoal de manutenção. O mesmo deve pertencer á estrutura e tem que suportar o peso destes.

10.2 Conceção da estrutura

Como a estrutura foi instalada numa indústria alimentar, seleccionou-se uma resina de poliéster compatível com o ramo alimentar. A estrutura foi colocada no cimo dos depósitos de azeitona, está num espaço exterior e exposta ao sol. Perante estas condições, foi necessária a utilização de aditivo de U.V. e véu de superfície em poliéster. Estes requisitos de produção são correntes na empresa ALTO – Perfis Pultrudidos, onde o signatário desenvolve a atividade profissional.

Todos os elementos de ligação, parafusos, porcas e anilhas utilizados são compatíveis com o ramo alimentar e resistem à corrosão, característica intrínseca dos perfis pultrudidos. De

acordo com estes requisitos, optou-se por aplicar os elementos de ligação em aço Inox A4, de acordo com a norma DIN.

A estrutura foi aplicada na placa de betão que está por cima dos reservatórios e se encontra a cerca de 2,5 metros do nível do chão. Como uma das características dos perfis pultrudidos é serem cerca de 4 vezes mais leves do que o aço, a maior parte destas estruturas são instaladas recorrendo apenas à força humana.

Neste sentido, projetou-se uma estrutura modular, ou seja, que permitisse a montagem por módulos separados com reduzido trabalho de instalação e recorrendo à força humana. Sendo o local de instalação da estrutura a cerca de 120 km das instalações da ALTO, os custos de deslocação acrescem ao montante da obra. Estes aspetos foram considerados para diminuir o custo de instalação.

Na conceção da estrutura, propriamente dita, tendo em consideração que se vai instalar uma escada inclinada e guarda-corpos com fixação lateral à estrutura, optou-se por utilizar perfis que permitissem a ligação direta destes elementos, sem necessidade de outros acessórios, que implicariam maiores custos. O perfil U colocado ao alto foi a solução ideal para a fixação dos guarda-corpos e da escada.

A ALTO fabrica 2 perfis U, para estruturas com as dimensões de 200x60x8 mm e 150x40x6 mm. Como o comprimento da estrutura tem cerca de 8 metros tem que levar um apoio intermédio ao chão. Tendo em atenção os fatores de leveza e custos foi utilizado o perfil U150x40x6 mm, que suporta o vão de cerca de 4 metros para a sobrecarga imposta. Este perfil foi aplicado nos topos e duas laterais onde se fixam os guarda-corpos.

Para os restantes elementos estruturais da plataforma da estrutura a ALTO dispõe de perfis I100x50x8, I150x75x8 e I200x100x10 mm. O perfil I100x50x8 mm tem pouca largura para apoio dos pés do equipamento cuja base é de 60x60 mm, como tal utilizou-se o perfil I150x75x8 mm. No anexo 1 encontra-se os desenhos de produção referentes à estrutura.

As dimensões da plataforma, sem as colunas, são 8140x2190x1200 mm que permite, com a licença de transporte especial para viaturas ligeiras que a empresa dispõe, transportar esta estrutura, ou seja, com 8140x2190 mm de área de estrado e altura acima deste de 1200 mm. A plataforma em perfis pultrudidos, sem colunas, escada e gradil pesa cerca de 200kgf e foi manualmente colocada em cima dos reservatórios. As colunas de suporte foram montadas posteriormente.

Para as colunas de suporte da estrutura foram utilizados perfis I150x75x8 mm. O perfil I100x50x8 mm não permitia estabilidade da estrutura no seu comprimento, enquanto o perfil I

150x75x8 mm permite. O perfil I200x100x10 mm não é boa opção pela exagerada dimensão para a aplicação em questão e para as cargas envolvidas, além do custo ser superior.

O travamento das colunas na direção do eixo mais fraco foi feito com cantoneiras de 60x60x8 mm.

A figura 39 mostra a estrutura modelada no *software* de cálculo dos esforços.

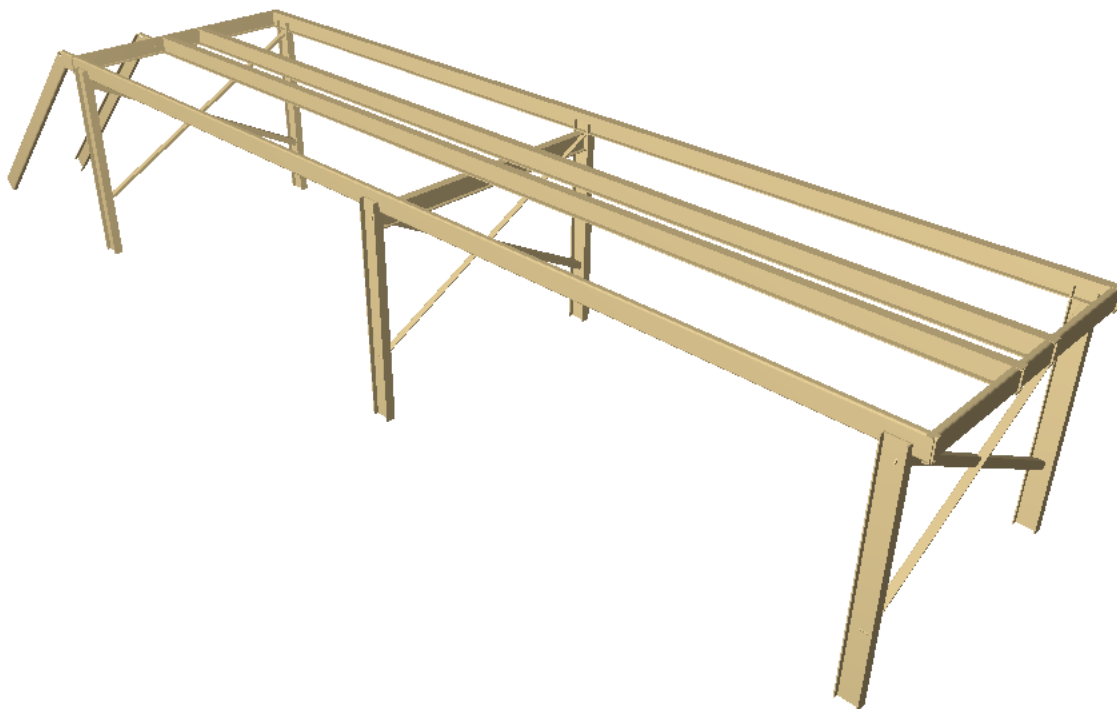


Figura 39 – Visualização da estrutura

As fichas técnicas dos perfis pultrudidos utilizados na estrutura estão no anexo 2.

10.3 Quantificação das Ações

As ações que atuam sobre a estrutura dividem-se em: ações permanentes e a sobrecarga.

10.3.1 Ações Permanentes:

Como ações permanentes temos o peso próprio da estrutura e o do equipamento do classificador de azeitonas. Este equipamento tem 10 pés de suporte e apresenta uma

distribuição dos pés e geometria mássica mais ou menos uniforme. Assim, a ação de cada pé sobre a estrutura é de 1/10 do peso do equipamento.

O peso da estrutura é cerca de 1.000kgf e a ação que cada pé provoca sobre a estrutura será de 1/10, ou seja, 100kgf (1kN).

10.3.2 Sobrecarga

O cliente solicitou uma sobrecarga de 2 kN/m², dado que apenas circularão pessoas para supervisão e manutenção.

Esta carga será distribuída ao longo de 2 perfis, o perfil U 150x40x6 mm, onde foi aplicado o guarda-corpos, e o perfil I 150x75x8 mm, que estão colocados paralelamente mas afastados 933 mm. A carga distribuída nestes perfis é calculada da seguinte forma:

$$p = \frac{q \times b}{n} = \frac{2,0 \times 0,933}{2} = 0,933 \text{ kN/m}$$

sendo,

q , é a sobrecarga imposta;

b , é a largura do patamar;

n , é o número vigas sobre o qual a sobrecarga q é distribuída;

10.4 Propriedades do Material

No anexo 2 encontram-se as fichas técnicas dos perfis utilizados na estrutura que contém informações como: a área, momentos de inércia e módulo de resistência, necessários para os cálculos da estrutura. A tabela 19 apresenta o resumo destas.

Perfil	A (mm ²)	t (mm)	I _x (mm ⁴)	I _y (mm ⁴)	W _x (mm ³)	W _y (mm ³)
U150x40x6 mm	1282	6	3664506	150935	48860	49162
I150x75x8 mm	2290	8	7733313	563462	103101	15026
L60x60x8 mm	878	8	289968	289968	6937	6937

Tabela 19 – Características dos perfis pultrudidos utilizados na estrutura

As propriedades mecânicas dos perfis pultrudidos diferem de perfil para perfil. O tipo de reforço, a sua distribuição e composição da resina é diferente em cada perfil. Esta liberdade permite adequar cada perfil à sua função estrutural. Por exemplo, na cantoneira 60x60x8 mm que também é utilizada para os elementos de ligação de perfis, utiliza-se mais *spun roving*, tecidos bidirecionais e formulação da resina com maior rigidez, o que permite ter menor resistência à tração e maior módulo de elasticidade na direção transversal.

Pelos motivos indicados, encontram-se no anexo 3 os ensaios de tração e flexão dos perfis I150x75x8 mm, L 60x60x8 e U 150x40x6 mm. Para as propriedades materiais que não foram obtidas dos ensaios utilizaram-se as indicadas na tabela 5.

Perfil	Tração		Flexão	
	$\sigma_{Rot,x}$ (MPa)	E_x (GPa)	$\sigma_{Rot,x}$ (MPa)	E_x (GPa)
U150x40x6 mm	404	38	439	22
I150x75x8 mm	397	34	326	26
L60x60x8 mm	292	38	335	36

Tabela 20 – Propriedades e rigidez dos perfis pultrudidos utilizados na estrutura.

Para determinação do coeficiente de segurança para a incerteza material,

- coeficiente de segurança para a incerteza material relacionado com o nível de incerteza de perfis pultrudidos obtidos de testes de amostras, $\gamma_{m,1} = 1,15$ (tabela 13);
- coeficiente de segurança para a incerteza material relacionado com o nível de incerteza dos materiais pelo processo de pultrusão, $\gamma_{m,2} = 1,10$ (tabela 14)
- coeficiente de segurança para a incerteza material relacionado com os efeitos ambientais e carregamento longo prazo, $\gamma_{m,3} = 2,50$ (tabela 15);

O coeficiente de segurança para a incerteza material é:

$$\gamma_m = 1,15 \times 1,10 \times 2,50 = 3,1625$$

10.5 Cálculo dos Esforços

Para o cálculo dos esforços envolvidos nas barras da estrutura utilizou-se o *software* Metal 3D da Cype. Este *software* não permite o cálculo automático da estrutura para perfis pultrudidos, mas o módulo clássico deste permite o cálculo dos esforços para perfis genéricos. Assim, definiu-se diferentes perfis genéricos, para cada secção com a correspondente geometria e com as propriedades materiais dos perfis pultrudidos definidas no ponto anterior.

A figura 40 mostra o desenho esquemático tridimensional da estrutura introduzida no *software* de cálculo.

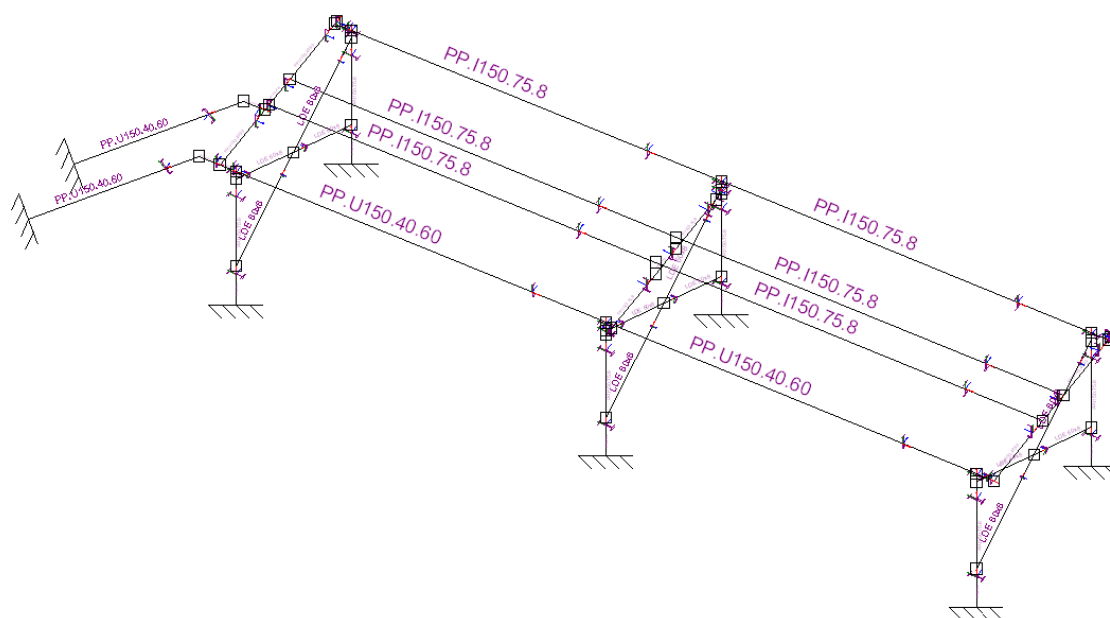


Figura 40 – Modelação das barras e nós da estrutura

A figura 41 indica o carregamento imposto á estrutura devido ás acções permanentes e sobrecarga.

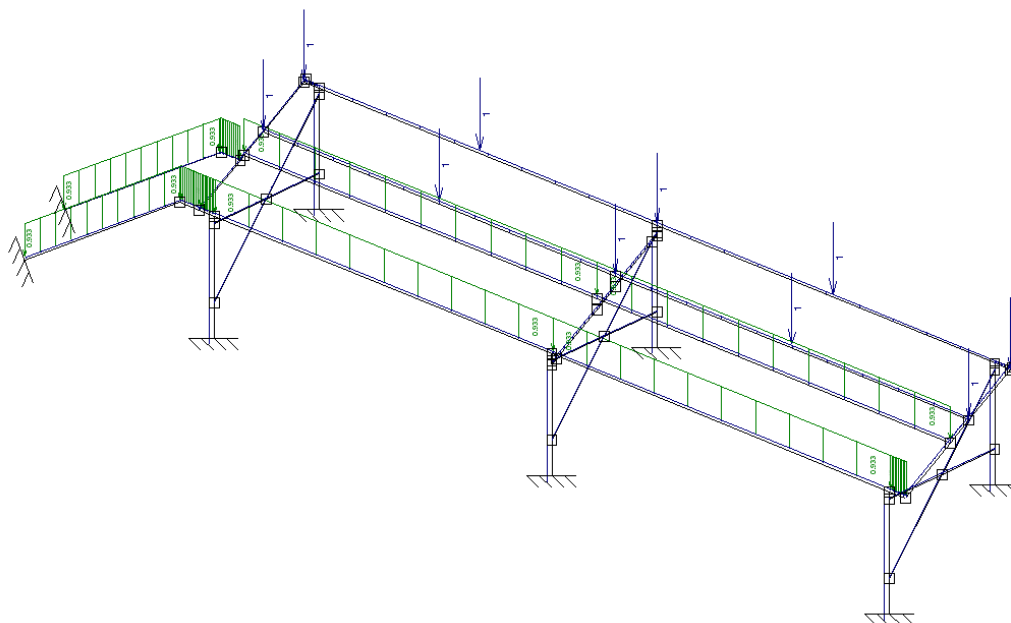


Figura 41 – Carregamento imposto à estrutura

O resumo dos resultados do cálculo dos esforços obtidos pelo *software* de cálculo está no anexo 4.

10.5.1 Dimensionamento dos Membros à Tração

Para o dimensionamento à tração a condição $N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}$, equação (4), tem que ser verificada.

A figura 42 mostra o diagrama de esforços axiais na estrutura.

No dimensionamento à tração vamos considerar a equação (6), pois é a que dá menor valor de resistência e o valor da deformação é calculado da equação (3).

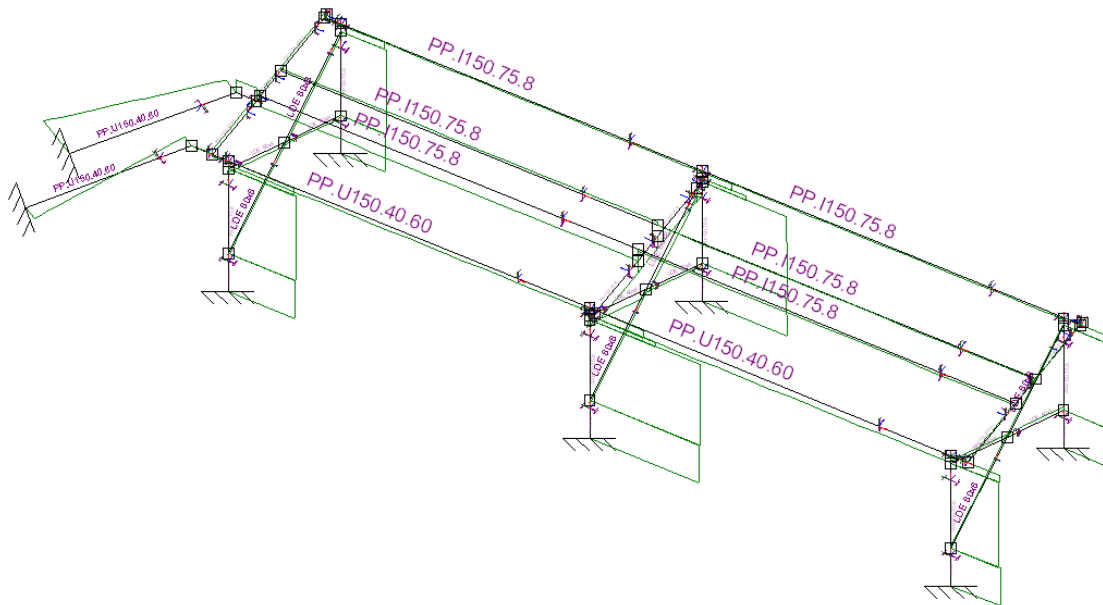


Figura 42 – Diagrama de esforços axiais

Perfil Pultrudido U150x40x4 mm

Considerando no máximo 2 furos de 9 mm na mesma secção, temos:

$$A_{net} = 1282 - 2 \times 9 \times 6 = 1174 \text{ mm}^2$$

O esforço máximo que o perfil suporta é calculado pela equação (6):

$$N_{t,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \sigma_{x,t,k}}{\gamma_m} = \frac{0,9 \times 1174 \times 404}{3,1625} \times 10^{-3} = 135 \text{ kN}$$

Da análise da figura 42 e da listagem do anexo 4, o esforço de tração máximo instalado no perfil é de 1,1331 kN (barra 1/3), logo a condição imposta é verificada.

Como condição de deformabilidade máxima, $\varepsilon_{t,Sd}$, para que a resina não estale temos

$$\varepsilon_{t,Sd} < 2\% .$$

Da equação (3), temos:

$$\varepsilon_{t,Sd} = \frac{N}{\frac{E_{x,d} \cdot A}{\gamma_m}} \times 100 = \frac{1,133 \times 10^3}{\frac{38 \times 10^3 \times 1282}{3,1625}} \times 100 = 0,007\%$$

A condição imposta é verificada.

Perfil Pultrudido I150x75x8 mm

Considerando no máximo 2 furos de 9 mm na mesma secção, temos:

$$A_{net} = 2290 - 2 \times 9 \times 8 = 2146 \text{ mm}^2$$

O esforço máximo que o perfil suporta é:

$$N_{t,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \sigma_{x,t,k}}{\gamma_m} = \frac{0,9 \times 2146 \times 397}{3,1625} \times 10^{-3} = 242 \text{ kN}$$

Da análise da figura 42 e da listagem do anexo 4, o esforço de tração máximo instalado no perfil é de 0,3423 kN (barra 8/30), logo a condição imposta é verificada.

Como condição de deformabilidade máxima, $\varepsilon_{t,Sd}$, para que a resina não estale temos $\varepsilon_{t,Sd} < 2\%$.

Da equação (3), temos:

$$\varepsilon_{t,Sd} = \frac{N}{\frac{E_{x,d} \cdot A}{\gamma_m}} \times 100 = \frac{0,3423 \times 10^3}{\frac{34 \times 10^3 \times 2290}{3,1625}} \times 100 = 0,001\%$$

A condição imposta é verificada.

Perfil Pultrudido L60x60x8 mm

Considerando no máximo 1 furo de 9 mm na mesma secção, temos:

$$A_{net} = 878 - 9 \times 8 = 806 \text{ mm}^2$$

O esforço máximo que o perfil suporta é:

$$N_{t,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \sigma_{x,t,k}}{\gamma_m} = \frac{0,9 \times 806 \times 292}{3,1625} \times 10^{-3} = 67 \text{ kN}$$

Da análise da figura 42 e da listagem do anexo 4, o esforço de tração máximo instalado no perfil é de 0,9350 kN (barra 28/31), logo a condição imposta é verificada.

Como condição de deformabilidade máxima, $\varepsilon_{t,Sd}$, para que a resina não estale temos $\varepsilon_{t,Sd} < 2\%$.

Da equação (3), temos:

$$\varepsilon_{t,Sd} = \frac{N}{\frac{E_{x,d} \cdot A}{\gamma_m}} \times 100 = \frac{0,935 \times 10^3}{\frac{38 \times 10^3 \times 878}{3,1625}} \times 100 = 0,009\%$$

A condição imposta é verificada.

10.5.2 Dimensionamento dos Membros à Compressão

Para o dimensionamento à tração a condição $N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$, equação (7), tem que ser verificada.

A figura 42 mostra o diagrama de esforços axiais na estrutura.

Os perfis que estão sujeitos a esforço de compressão axial coincidente com o centróide são as colunas (perfis I150x40x6 mm) e os travamentos (perfil L60x60x8 mm).

O perfil U 150x40x6 mm apresenta esforços de compressão, mas apenas devido á flexão e

não a compressão axial. Por este motivo não será verificada a resistência á compressão deste perfil neste ponto.

Perfil Pultrudido I150x75x8 mm

- A resistência à compressão da coluna é calculada da equação (8),

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot \sigma_{c,Rd}}{\gamma_m} = \frac{2290 \times 270}{3,1625} \times 10^{-3} = 196 \text{ kN}$$

- A resistência à encurvadura da coluna é calculada da equação (9),

$$N_{c,Rd} = \frac{\pi^2 E_{x,d} \cdot I_{zz}}{(kL)^2 \gamma_m} = \frac{\pi^2 \times 24 \times 10^3 \times 563462}{(0,5 \times 1070)^2 \times 3,1625} \times 10^{-3} = 147 \text{ kN}$$

- A resistência à encurvadura local da coluna

- Na alma, equação (10),

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot \sigma_{c,cr}}{\gamma_m} = \frac{134 \times 8 \times 121}{3,1625} \times 10^{-3} = 41 \text{ kN}$$

com,

$$D_x = \frac{E_{x,c} \cdot t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} = \frac{24 \times 10^3 \times 8^3}{12(1 - 0,2 \times 0,1)} = 1044898 \text{ Nmm}$$

$$D_y = \frac{E_{y,c} \cdot t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} = \frac{4,5 \times 10^3 \times 8^3}{12(1 - 0,2 \times 0,1)} = 195918 \text{ Nmm}$$

$$\begin{aligned} H_0 &= \frac{1}{2} (\nu_{xy} D_y + \nu_{yx} D_x) + \frac{2G_{xy} t^3}{12} = \\ &= \frac{1}{2} (0,2 \times 195918 + 0,1 \times 1044898) + \frac{2 \times 4,2 \times 10^3 \times 8^3}{12} = 430237 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Da equação (11), temos:

$$\begin{aligned}\sigma_{c,cr,y} &= \frac{2\pi^2}{tb^2} \left[\sqrt{D_x D_y} + H_0 \right] = \\ &= \frac{2\pi^2}{8 \times 134^2} \left[\sqrt{1044898 \times 195918} + 430237 \right] = 121 \text{MPa}\end{aligned}$$

- No banco equação (10),

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \sigma_{c,cr}}{\gamma_m} = \frac{33,5 \times 8 \times 241}{3,1625} \times 10^{-3} = 20 \text{kN}$$

com,

$$D_x = \frac{E_{x,c} \cdot t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} = \frac{24 \times 10^3 \times 8^3}{12(1 - 0,2 \times 0,1)} = 1044898 \text{Nmm}$$

$$D'_{xy} = \frac{G_{xy} t^3}{12} = \frac{4,2 \times 10^3 \times 8^3}{12} = 179200 \text{Nmm}$$

Da equação (13), temos:

$$\begin{aligned}\sigma_{c,cr,y} &= \frac{\pi^2}{tb^2} \left[D_x \left(\frac{b}{a} \right)^2 + \frac{12D'_{xy}}{\pi^2} \right] = \\ &= \frac{\pi^2}{8 \times 33,5^2} \left[1044898 \left(\frac{33,5}{1070} \right)^2 + \frac{12 \times 179200}{\pi^2} \right] = 241 \text{MPa}\end{aligned}$$

O valor mínimo de resistência é o menor destes três, que é 41 kN.

Da análise da figura 42 e da listagem do anexo 4, o esforço de compressão máximo instalado no perfil é de 11,6950 kN (barra 21/22), logo a condição imposta é verificada.

Perfil Pultrudido L60x60x8 mm

- A resistência do travamento é calculado da equação (8),

$$N_{c,Rd} = \frac{A\sigma_{c,Rd}}{\gamma_m} = \frac{878 \times 270}{3,1625} \times 10^{-3} = 75 \text{ kN}$$

➤ A resistência à encurvadura do travamento é calculdo através da equação (9),

$$N_{c,Rd} = \frac{\pi^2 E_{x,d} \cdot I_{zz}}{(kL)^2 \gamma_m} = \frac{\pi^2 \times 24 \times 10^3 \times 189968}{(1 \times 1189)^2 \times 3,1625} \times 10^{-3} = 15 \text{ kN}$$

➤ A resistência à encurvadura local da secção reta

- Na alma, equação (10),

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot \sigma_{c,cr}}{\gamma_m}$$

com,

$$D_x = \frac{E_{x,c} \cdot t^3}{12(1 - \nu_{xy}\nu_{yx})} = \frac{24 \times 10^3 \times 8^3}{12(1 - 0,2 \times 0,1)} = 1044898 \text{ Nmm}$$

$$D_y = \frac{E_{y,c} \cdot t^3}{12(1 - \nu_{xy}\nu_{yx})} = \frac{4,5 \times 10^3 \times 8^3}{12(1 - 0,2 \times 0,1)} = 195918 \text{ Nmm}$$

$$\begin{aligned} H_0 &= \frac{1}{2}(\nu_{xy}D_y + \nu_{yx}D_x) + \frac{2G_{xy}t^3}{12} = \\ &= \frac{1}{2}(0,2 \times 195918 + 0,1 \times 1044898) + \frac{2 \times 4,2 \times 10^3 \times 8^3}{12} = 430237 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Da equação (11), temos:

$$\begin{aligned} \sigma_{c,cr,y} &= \frac{2\pi^2}{tb^2} \left[\sqrt{D_x D_y} + H_0 \right] = \\ &= \frac{2\pi^2}{8 \times 52^2} \left[\sqrt{1044898 \times 195918} + 430237 \right] = 805 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Este valor é superior ao valor de rotura, logo nunca ocorrerá encurvadura local à compressão na alma deste perfil.

- No banzo equação (10),

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \sigma_{c,cr}}{\gamma_m} = \frac{52 \times 8 \times 100}{3,1625} \times 10^{-3} = 13 \text{ kN}$$

com,

$$D_x = \frac{E_{x,c} \cdot t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} = \frac{24 \times 10^3 \times 8^3}{12(1 - 0,2 \times 0,1)} = 1044898 \text{ Nmm}$$

$$D'_{xy} = \frac{G_{xy} t^3}{12} = \frac{4,2 \times 10^3 \times 8^3}{12} = 179200 \text{ Nmm}$$

Da equação (13), temos:

$$\begin{aligned} \sigma_{c,cr,y} &= \frac{\pi^2}{tb^2} \left[D_x \left(\frac{b}{a} \right)^2 + \frac{12D'_{xy}}{\pi^2} \right] = \\ &= \frac{\pi^2}{8 \times 52^2} \left[1044898 \left(\frac{52}{1189} \right)^2 + \frac{12 \times 179200}{\pi^2} \right] = 100 \text{ MPa} \end{aligned}$$

O valor mínimo de resistência é o menor destes valores calculados, que é 13 kN.

Da análise da figura 42 e da listagem do anexo 4, o esforço de compressão máximo instalado no perfil é de 0,3446 kN (barra 43/41), logo a condição imposta é verificada.

10.5.3 Dimensionamento dos Membros à Flexão

A figura 43 mostra o diagrama de momentos fletores na estrutura no plano.

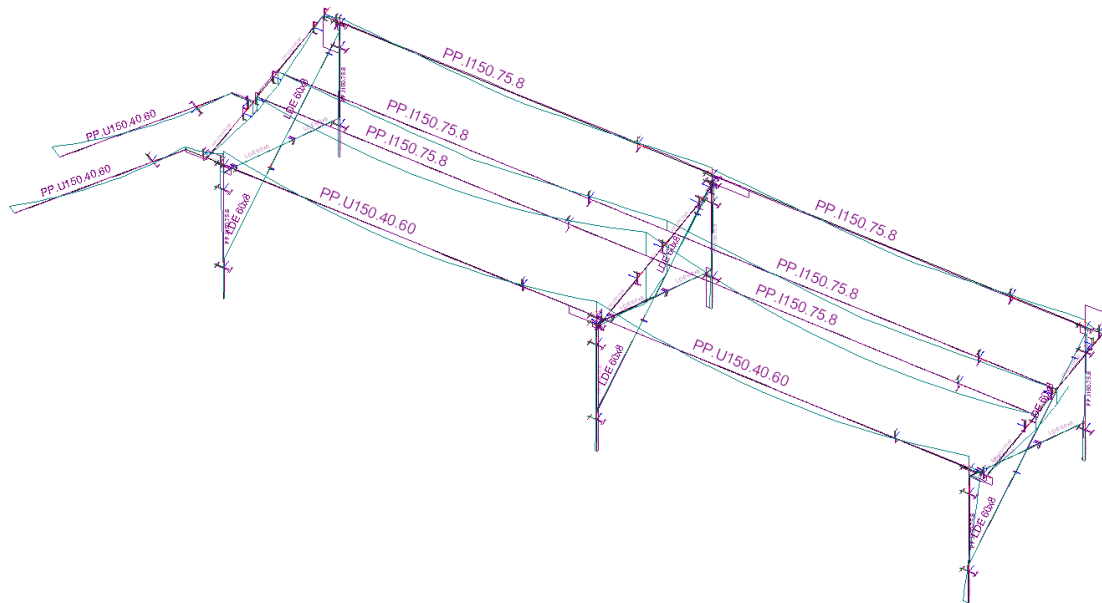


Figura 43 – Diagrama de momentos fletores

10.5.3.1 Dimensionamento à Resistência (ELU – Estado Limite Último)

O momento interno máximo, M_{Sd} , deve satisfazer a condição $M_{Sd} \leq M_{Rd}$, equação (12).

Perfil Pultrudido U150x40x6 mm

- O momento resistente último é calculado da equação (15),

$$M_{Rd} = \frac{W_t \cdot \sigma_{t,k}}{\gamma_m} = \frac{48860 \times 404}{3,1625} \times 10^{-6} = 6 \text{ kNm}$$

- A resistência local à encurvadura é calculada da equação (16),

$$M_{Rd} = \frac{W_c \cdot \sigma_{c,k}}{\gamma_m} = \frac{48.860 \times 270}{3,1625} \times 10^{-6} = 4 \text{ kNm}$$

- Encurvadura lateral devido à torção

$$M_{Rd} = \frac{M_{b,cr}}{\gamma_m}$$

Analisado na estabilidade da secção, ponto 11.1.5.5.

Da análise da figura 43 e da listagem do anexo 4, o momento fletor máximo instalado no perfil U150x40x6 mm é de 1,8944 kN (barra 14/24), logo a condição imposta é verificada.

Perfil Pultrudido I150x75x8 mm

- O momento resistente último é calculado da equação (15),

$$M_{Rd} = \frac{W_t \cdot \sigma_{t,k}}{\gamma_m} = \frac{103.11 \times 397}{3,1625} \times 10^{-6} = 13 \text{ kNm}$$

- A resistência local à encurvadura é calculada da equação (16),

$$M_{Rd} = \frac{W_c \cdot \sigma_{c,k}}{\gamma_m} = \frac{103.11 \times 270}{3,1625} \times 10^{-6} = 9 \text{ kNm}$$

- Encurvadura lateral devido à torção

Analisado na estabilidade da secção, ponto 11.1.5.5.

Da análise da figura 43 e da listagem do anexo 4, o momento fletor máximo instalado no perfil I150x75x8 mm é de 2,9666 kN (barra 7/27), logo a condição imposta é verificada.

Perfil Pultrudido L60x60x8 mm.

- O momento resistente último é calculado da equação (15),

$$M_{Rd} = \frac{W_t \cdot \sigma_{t,k}}{\gamma_m} = \frac{289968 \times 292}{3,1625} \times 10^{-6} = 27 \text{ kNm}$$

- A resistência local à encurvadura é calculada da equação (16),

$$M_{Rd} = \frac{W_c \cdot \sigma_{c,k}}{\gamma_m} = \frac{289968 \times 270}{3,1625} \times 10^{-6} = 25 \text{ KNm}$$

- Encurvadura lateral devido à torção

Analisado na estabilidade da secção, ponto 11.1.5.5.

Da análise da figura 43 e da listagem do anexo 4, o momento fletor máximo instalado no perfil L60x60x8 mm é de 0,3077 kN (barra 28/25), logo a condição imposta é verificada.

10.5.3.2 Dimensionamento à Rigidez (ELS – Estado Limite de Serviço)

A estrutura pode ser considerada com duas partes e com finalidades bem distintas. O passadiço, permitindo o acesso para manutenção e supervisão do funcionamento do equipamento e a estrutura de suporte do equipamento.

No caso do passadiço a flecha máxima permitida é de L/150 enquanto que para a estrutura da máquina a flecha máxima permitida é L/250, conforme consta na tabela 18.

A figura 44 mostra a deformada da estrutura. Apesar deste *software* de cálculo não entrar em conta com a flecha devido ao corte, os valores obtidos são próximos dos finais, porque os vãos são grandes e o efeito de corte tem uma menor expressão quando comparado com a flecha devido à flexão.

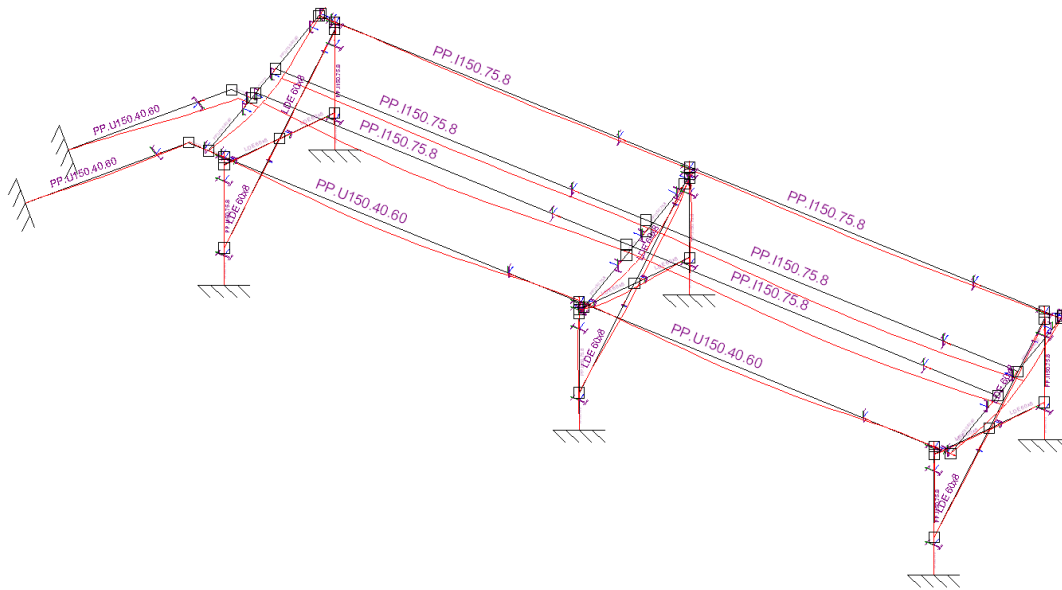


Figura 44 – Deformada

Perfil Pultrudido U150x40x6 mm

A flecha devido à flexão é calculada da equação (18),

$$\text{Deslocamento transversal (flexão)} = \frac{k_1 F_v L^3}{EI} = \frac{1}{384} \times (0,933 \times 3894) \times 3894^3 = 6,9 \text{ mm}$$

A flecha devido ao corte é calculada da equação (19),

$$\text{Deslocamento transversal (corte)} = \frac{k_2 F_v L}{A_v G_{xy}} = \frac{1}{24} \times (0,933 \times 3894) \times 3894 = 1,0 \text{ mm}$$

O deslocamento transversal total é a soma dos dois deslocamentos anteriores, ou seja,

$$\delta_{m\acute{a}x} = 6,9 + 1,0 = 7,9 \text{ mm}$$

A flecha máxima permitida é $L/150 = 3894/150 = 26 \text{ mm}$, logo a condição de resistência à rigidez é verificada.

Do *software* de cálculo, o valor da flecha máxima neste perfil é 7,79 mm (barra 14/24). Esta diferença, apesar de ser muito pequena para estruturas, deve-se ao facto de não se ter entrado em conta com a flecha do perfil transversal, onde esta viga está apoiada. Como a relação altura da viga/vão é em geral maior do que 25, o efeito de corte é pequeno quando comparado com a flecha devido à flexão e como tal a utilização deste *software*, criando perfis genéricos com as propriedades dos perfis pultrudidos é uma boa solução.

Perfil Pultrudido I150x75x8 mm (passadiço)

A flecha devido à flexão é calculada da equação (18),

$$\text{Deslocamento transversal (flexão)} = \frac{k_1 F_v L^3}{EI} = \frac{1}{384} \times (0,933 \times 4068) \times 4068^3 = 3,3 \text{ mm}$$

A flecha devido ao corte é calculada da equação (19),

$$\text{Deslocamento transversal (corte)} = \frac{k_2 F_v L}{A_v G_{xy}} = \frac{1}{24} \times (0,933 \times 4068) \times 4068 = 1,1 \text{ mm}$$

O deslocamento transversal total é a soma dos dois deslocamentos anteriores e o seu valor é:

$$\delta_{m\acute{a}x} = 3,3 + 1,1 = 4,4 \text{ mm}$$

A flecha máxima permitida é $L/150 = 4068/150 = 27$ mm, logo a condição de resistência à rigidez é verificada.

Do *software* de cálculo, o valor da flecha máxima neste perfil é 8,78 mm (barra 7/27).

Perfil Pultrudido I150x75x8 mm (Suporte equipamento)

A flecha devido à flexão é calculada da equação (18),

$$\text{Deslocamento transversal (flexão)} = \frac{k_1 F_v L^3}{EI} = \frac{1}{384} \times 1,1801 \times 10^3 \times 4068^3 = 1,6 \text{ mm}$$

O esforço transversal máximo para este perfil (barra 8/30) é de 1,1801 kN, conforme análise da figura 45 e anexo 4.

A flecha devido ao corte é calculado da equação (19),

$$\text{Deslocamento transversal (corte)} = \frac{k_2 F_v L}{A_v G_{xy}} = \frac{1}{24} \times 1,1801 \times 10^3 \times 4068 = 0,5 \text{ mm}$$

O deslocamento transversal total é a soma dos dois deslocamentos anteriores e o seu valor é:

$$\delta_{máx} = 1,6 + 0,5 = 2,1 \text{ mm}$$

A flecha máxima permitida é $L/400 = 4068/400 = 10,2 \text{ mm}$, logo a condição de resistência à rigidez é verificada.

Do *software* de cálculo, o valor da flecha máxima neste perfil é 4,32 mm (barra 8/30).

10.5.4 Dimensionamento ao Corte

Para o dimensionamento ao corte a condição $V_{Sd} \leq V_{Rd}$, equação (20) tem que ser verificada.

A figura 45 mostra o diagrama de esforços transversos na estrutura.

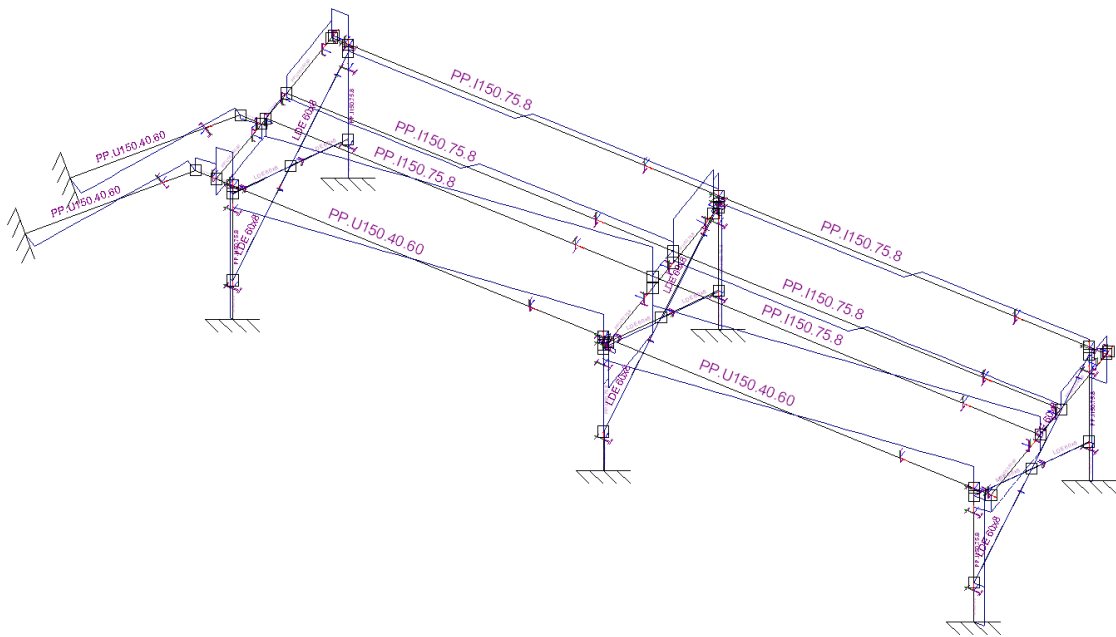


Figura 45 – Diagrama de esforços transversos

Perfil Pultrudido U150x40x6 mm

Da equação (19), podemos calcular o esforço máximo que o perfil pode suportar.

$$V_{Rd} = \frac{A_v \cdot \tau_{xy,k}}{\gamma_m} = \frac{828 \times 15}{3,1625} \times 10^{-3} = 4 \text{ kN}$$

$$A_v = \Sigma(d_w \cdot t_w) = 6 \times (150 - 2 \times 6) = 828 \text{ mm}^2$$

Da análise da figura 45 e da listagem do anexo 4, o esforço transversal máximo instalado no perfil é de 2,8627 kN (barra 24/40), logo a condição imposta é verificada.

Perfil Pultrudido I150x75x8 mm

Da equação (19), podemos calcular o esforço máximo que o perfil pode suportar.

$$V_{Rd} = \frac{A_v \cdot \tau_{xy,k}}{\gamma_m} = \frac{1072 \times 15}{3,1625} \times 10^{-3} = 5 \text{ kN}$$

$$A_v = \Sigma(d_w \cdot t_w) = 8 \times (150 - 2 \times 8) = 1072 \text{ mm}^2$$

Da análise da figura 45 e da listagem do anexo 4, o esforço transversal máximo instalado no perfil é de 3,6933 kN (barra 27/47), logo a condição imposta é verificada.

Perfil Pultrudido L60x60x8 mm

Da equação (19), podemos calcular o esforço máximo que o perfil pode suportar.

$$V_{Rd} = \frac{A_v \cdot \tau_{xy,k}}{\gamma_m} = \frac{416 \times 15}{3,1625} \times 10^{-3} = 1,97 \text{ kN}$$

$$A_v = \Sigma(d_w \cdot t_w) = 8 \times (60 - 8) = 416 \text{ mm}^2$$

Da análise da figura 45 e da listagem do anexo 4, o esforço transversal máximo instalado no perfil é de 0,1217 kN (barra 33/28), logo a condição imposta é verificada.

10.5.5 Verificação da Estabilidade

10.5.5.1 Tensão Normal Crítica na Alma do Perfil devido à Flexão

Para determinar a tensão normal crítica e verificar a estabilidade da secção, a condição $\sigma_{x,b} \leq \sigma_{x,cr,b}$ (equação 26) tem que ser verificada.

Perfil Pultrudido U150x40x6 mm

Da equação (27) podemos calcular a tensão crítica na alma do perfil.

$$\sigma_{x,cr,b} = \frac{k \pi^2 D_x}{d_w^2 t_w} = \frac{20 \cdot \pi^2 \times 404082}{138^2 \times 6} = 698 \text{ MPa}$$

Com D_x para a alma do perfil calculado por:

$$D_x = \frac{E_x t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} = \frac{22 \times 10^3 \times 6^3}{12(1 - 0,2 \times 0,1)} = 404082 \text{ Nmm}$$

O valor crítico calculado é superior ao valor de rotura à flexão (352 MPa), logo a imposição no dimensionamento não é da encurvadura da alma do perfil.

Perfil Pultrudido I150x75x8 mm

Da equação (27) podemos calcular a tensão crítica na alma do perfil.

$$\sigma_{x,cr,b} = \frac{k\pi^2 D_x}{d_w^2 t_w} = \frac{20\pi^2 \times 1044898}{134^2 \times 8} = 1436 \text{ MPa}$$

O valor de D_x foi calculado em 10.5.2.

O valor crítico calculado é superior ao valor de rotura à flexão deste perfil (326 MPa), logo nunca ocorrerá encurvadura na alma do perfil.

Perfil Pultrudido L60x60x8 mm

Este perfil apenas está sujeito a esforços axiais.

10.5.5.2 Tensão de Corte Crítica na Alma do Perfil

Para determinar a tensão de corte crítica e verificar a estabilidade da secção, a condição $\tau_{xy} \leq \tau_{xy,cr,b}$ (equação 28) tem que ser verificada.

Perfil Pultrudido U150x40x6 mm

Da equação (29) podemos calcular a tensão crítica na alma do perfil.

$$\tau_{cr} = \frac{4k(D_x D_y^3)^{0.25}}{d_w^2 t_w} = \frac{4 \times 8 \times (404082 \times 146939^3)^{0.25}}{138^2 \times 6} = 53 \text{ MPa}$$

O valor de D_x foi calculado em 10.5.5.1, $D_x = 477551$.

$$D_y = \frac{E_y t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} = \frac{8 \times 10^3 \times 6^3}{12(1 - 0,2 \times 0,1)} = 146939 \text{ Nmm}$$

A tensão de corte máxima instalada na alma é obtida por:

$$\tau_{xy} = \frac{T_{\text{máx},z}}{A_w} = \frac{28447}{138 \times 6} = 3 \text{ MPa}$$

O maior esforço transversal instalado nos perfis U 150x40x6 mm é de 2,8447 kN (barra 14/24), conforme se pode analisar a figura 45 e anexo 4.

A tensão de corte instalada não excede a tensão de corte crítica.

Perfil Pultrudido I150x75x8 mm

Da equação (29) podemos calcular a tensão crítica na alma do perfil.

$$\tau_{cr} = \frac{4k(D_x D_y^3)^{0.25}}{d_w^2 t_w} = \frac{4 \times 8 \times (1131973 \times 348299^3)^{0.25}}{134^2 \times 8} = 104 \text{ MPa}$$

Com D_x para a alma do perfil calculado em 11.1.5.5.1, $D_x = 1131973$.

$$D_y = \frac{E_y t^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})} = \frac{8 \times 10^3 \times 8^3}{12(1 - 0,2 \times 0,1)} = 348299 \text{ Nmm}$$

A tensão de corte máxima instalada na alma é obtida por:

$$\tau_{xy} = \frac{T_{máx,z}}{A_w} = \frac{3695,4}{134 \times 8} = 3 \text{ MPa}$$

O maior esforço transversal instalado nos perfis I 150x75x8 mm é de 3,6954 kN (barra 7/27), conforme se pode analisar a figura 45 e anexo 4.

A tensão de corte instalada não excede a tensão de corte crítica.

Perfil Pultrudido L60x60x8 mm

Este perfil apenas está sujeito aos esforços axiais.

10.5.5.3 Combinação de Corte e Flexão no Plano na Alma da Viga

A combinação dos esforços de flexão e de corte devem satisfazer a equação (30).

Perfil Pultrudido U150x40x6 mm

O nó onde ocorre o maior esforço deste perfil é o nó 24, verificando-se na barra 14/24 o momento fletor máximo, $M_{máx} = 1,8944 \text{ kNm}$, e na barra 24/40 o esforço transversal máximo, $T_{máx} = 2,8627 \text{ kN}$.

Para a alma do perfil temos:

$$\sigma_{x,b} = \frac{M_{máx} \cdot y}{I_w} = \frac{1894,4 \times 69}{\frac{6 \times 138^3}{12}} = 0,10 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{T_{máx}}{A_w} = \frac{28627}{6 \times 138} = 3,46 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\tau_{xy}}{\tau_{xy,cr,b}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{x,b}}{\sigma_{x,cr,b}}\right)^2 \leq 1 \Leftrightarrow \left(\frac{3,46}{55}\right)^2 + \left(\frac{0,10}{825}\right)^2 \leq 1 \Leftrightarrow 0,004 \leq 1$$

Logo a condição é verificada.

Perfil Pultrudido I150x75x8 mm

O nó onde ocorre o maior esforço deste perfil é o nó 27, verificando-se na barra 7/27 o momento fletor máximo, $M_{máx} = 2,9666$ kNm e o esforço transversal máximo, $T_{máx} = 3,6954$ kN.

Para a alma do perfil temos:

$$\sigma_{x,b} = \frac{M_{máx} \cdot y}{I_w} = \frac{2966,6,4 \times 67}{\frac{8 \times 134^3}{12}} = 0,12 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{T_{máx}}{A_w} = \frac{3695,4}{8 \times 134} = 3,45 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\tau_{xy}}{\tau_{xy,cr,b}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{x,b}}{\sigma_{x,cr,b}}\right)^2 \leq 1 \Leftrightarrow \left(\frac{3,45}{1555}\right)^2 + \left(\frac{0,12}{104}\right)^2 \leq 1 \Leftrightarrow 6 \times 10^{-6} \leq 1$$

Logo a condição é verificada.

Perfil Pultrudido L60x60x8 mm

Este perfil apenas está sujeito a esforços axiais.

10.5.5.4 Resistência da Alma às Cargas Transversais

Este ponto tem como objetivo o cálculo à encurvadura dos esforços transmitidos pelos banzos à alma do perfil. Este fenómeno acontece onde a viga está apoiada, isto é, sobre um dos banzos. Nesta estrutura apenas os perfis I 150x75x8 mm longitudinais estão apoiados a meio vão (nó 27 da barra 27/47).

10.5.5.4.1 Comprimento do Apoio Rígido

O comprimento do apoio rígido é calculado da equação (32).

$$S_s = \frac{R_u}{t_w \sigma_{y,c,k,w}} = \frac{3,6933 \times 10^3}{8 \times 240} = 2 \text{ mm}$$

O perfil está apoiado ao longo do banzo do perfil I 150x75x8 mm transversal com 75 mm de apoio. Logo o comprimento de apoio rígido é suficiente.

10.5.5.4.2 Resistência à Rotura da Alma do Perfil

O valor do esforço transversal máximo é determinado pela equação (33).

$$V_{y,Rd} = \frac{(S_s + S_n) t_w \sigma_{y,c,k,w}}{\gamma_m} = \frac{(75 + 75) \times 8 \times 240}{3,1625} \times 10^{-3} = 91 \text{ kN}$$

com,

$$S_s = 75 \text{ mm};$$

$$S_n = 150/2 = 75 \text{ mm}.$$

O valor do esforço transversal máximo instalado nas vigas I 150x75x8 mm é de 3,6933 kN (barra 27/47), logo não existe rotura na alma da viga devido ao esforço transversal.

10.5.5.4.3 Resistência à Encurvadura da alma do Perfil

A tensão crítica de encurvadura devido ao esforço transversal é determinada da equação (35):

$$\sigma_{cr} = \frac{k \pi^2 \sqrt{D_x \cdot D_y}}{b_{eff}^2 t_w} = \frac{3,9 \times \pi^2 \sqrt{1044898 \times 195918}}{167,7^2 \times 8} = 77 \text{ MPa}$$

O valor $D_x = 1044898 \text{ Nmm}$, $D_y = 195918 \text{ Nmm}$ e $H_0 = 430237 \text{ Nmm}$, determinados em 10.5.2

$$k = 2 \left(1 + \frac{H_0}{\sqrt{D_x \cdot D_y}} \right) = 2 \left(1 + \frac{430237}{\sqrt{1044898 \cdot 195918}} \right) = 3,9$$

$$b_{eff} = \sqrt{h^2 + S_s^2} = \sqrt{150^2 + 75^2} = 167,7 \text{ mm}$$

A tensão instalada na viga sobre o apoio rígido é calculada para o esforço transversal máximo:

$$\sigma_y = \frac{V}{A_s} = \frac{3,6933 \times 10^3}{75 \times 8} = 6 \text{ MPa}$$

Como a tensão instalada é inferior à tensão crítica, não ocorrerá encurvadura da alma.

10.5.5.4.4 Encurvadura do Banzo

Para dimensionamento dos banzos à compressão a equação (36), $\sigma_{c,x} \leq \frac{\sigma_{x,cr,c}}{\gamma_m}$, deve ser verificada. Para podermos comparar a tensão instalada com a tensão utilizar-se-á a equação:

$$\sigma_{c,x} \leq \frac{\sigma_{x,cr,c}}{\gamma_m} \Leftrightarrow \frac{N}{A_f} \leq \frac{\sigma_{x,cr,c}}{\gamma_m}$$

Como os perfis têm a mesma espessura na alma e nos banzos, as rigidezes calculadas e cujos resultados estão na tabela 21 são iguais, quer para a alma quer para os banzos.

Perfil Pultrudido I 150x75x8 mm

Dos perfis I 150x75x8 mm, o que tem maior esforço de compressão instalado é a barra 21/22 que tem 1070 mm de comprimento.

Como a compressão da alma é devido à flexão, utilizamos a equação (38):

$$\sigma_{x,cr,b} = \frac{\pi^2}{t_f \cdot b_f^2} \left[D_x \left(\frac{b_f}{a} \right)^2 + \frac{12 \cdot D'_{xy}}{\pi^2} \right] = \frac{\pi^2}{8 \times 33,5^2} \left[1131973 \left(\frac{33,5}{1070} \right)^2 + \frac{12 \times 179200}{\pi^2} \right] = 241 \text{ MPa}$$

$$\frac{N}{A_f} \leq \frac{\sigma_{x,cr,c}}{\gamma_m} \Leftrightarrow \frac{11695}{33,5 \times 8} \leq \frac{241}{3,1625} \Leftrightarrow 43,3 \leq 76,2, \text{ logo a condição é verificada.}$$

10.5.5.5 Encurvadura Lateral Devido à Torção

Para o dimensionamento à encurvadura lateral devido à torção é calculado o valor máximo admitido pelo perfil, equação (39) e comparado como valor instalado.

A figura 46 mostra o diagrama de momentos torsões na estrutura.

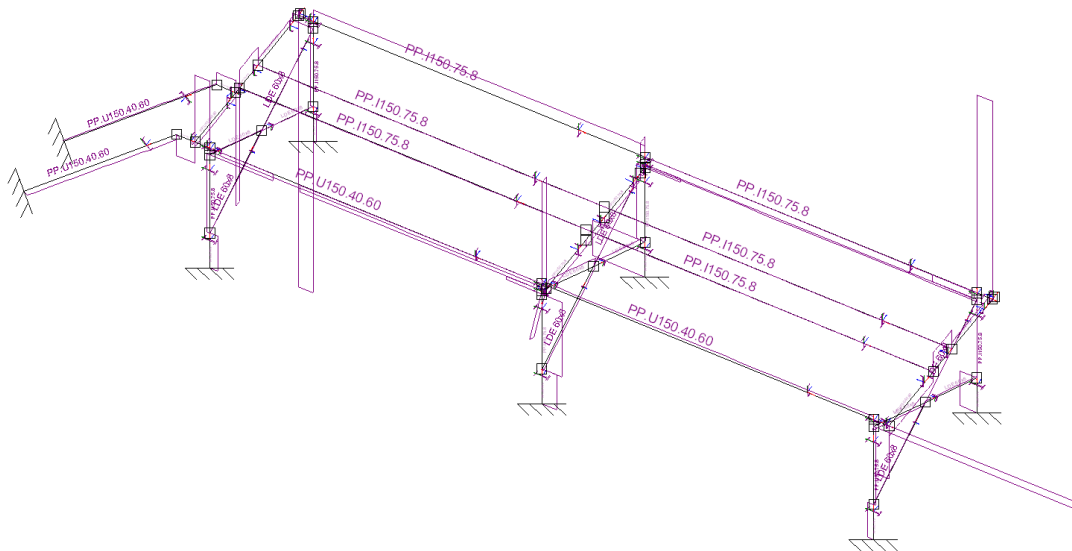
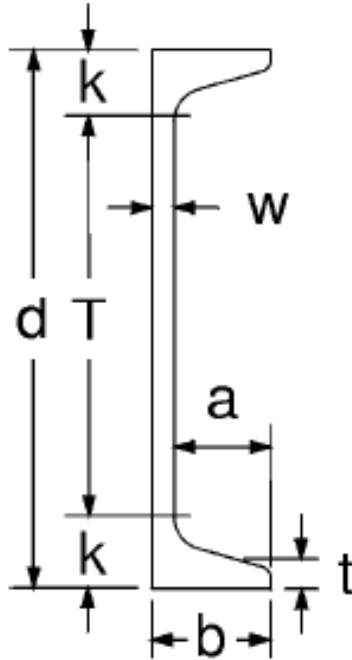


Figura 46 – Diagrama de momentos torsões

Perfil Pultrudido U 150x40x6 mm

Como o momento crítico de encurvadura lateral devido à torção é dependente do comprimento da viga ou do comprimento do trecho sem apoio, da análise da figura 46 e anexo 4, dos perfis U 150x4x6 mm, o perfil que está a ser mais solicitado à torção é o perfil exterior onde fixa o guarda-corpos. Assim, terá de ser feita a análise a 2 treços, um de comprimento menor (barra 7/8) com 367 mm de comprimento e outro de comprimento maior (barra 1/3) com 3894 mm de comprimento.

De acordo com a referência [12], a constante de torção e a constante de deformação torsional para o perfil I são calculadas como a seguir se indica.



$$J = \frac{2 \cdot b' \cdot t^3 + d' \cdot w^3}{3} = \frac{2 \times 37 \times 6^3 + 144 \times 6^3}{3} = 15696 \text{ mm}^4$$

$$C_w = (d')^2 \cdot (b')^3 \cdot t \cdot \left[\frac{1 - 3 \cdot \alpha}{6} + \frac{\alpha^2}{2} \left(1 + \frac{d' \cdot w}{6 \cdot b' \cdot t} \right) \right] =$$

$$= 144^2 \times 37^2 \times 6 \times \left[\frac{1 - 3 \times 0,303}{6} + \frac{0,303^2}{2} \left(1 + \frac{144 \times 6}{6 \times 37 \times 6} \right) \right] =$$

$$= 1547357 \text{ mm}^6$$

$$\alpha = \frac{1}{2 + \frac{d' \cdot w}{3 \cdot b' \cdot t}} = \frac{1}{2 + \frac{144 \times 6}{3 \times 37 \times 6}} = 0,303$$

$$d' = d - t = 150 - 6 = 144 \text{ mm}$$

$$b' = b - w/2 = 40 - 6/2 = 37 \text{ mm}$$

Como temos cargas distribuídas ao longo da viga e considerando a viga apoiada na direção do eixo forte, considera-se $k=0,5$ e $C_1 = 0,972$

Da equação (39) e (40), calculamos o momento crítico de encurvadura lateral devido à torção para cada troço.

Troço menor (barra 7/8)

$$M_{b,cr} = C_1 P_{ey} \sqrt{\frac{C_w}{I_{zz}} + \frac{GJ}{P_{ey}}} =$$

$$= 0,972 \times 199081 \times \sqrt{\frac{15473571}{150935} + \frac{4,2 \times 10^3 \times 15696}{199081}} \times 10^{-6} = 4 \text{ kNm}$$

$$P_{ey} = \frac{\pi^2 E_{z,b,d} I_{zz}}{(kL)^2} = \frac{\pi^2 \times 4,5 \times 10^3 \times 150935}{(0,5 \times 367)^2} = 199081 \text{ N}$$

Da equação (17), calculamos o momento resistente da secção para o perfil U150x40x6 mm,

$$M_{Rd} = \frac{M_{b,cr}}{\gamma_m} = \frac{4}{3,1625} = 1,26 \text{ kNm}$$

O valor momento crítico de encurvadura lateral devido à torção instalado nas vigas U 150x40x6mm no troço menor é de 0,0025 kNm (barra 7/8), logo a viga resiste ao esforço.

Troço maior (barra 1/3)

$$M_{b,cr} = C_1 P_{ey} \sqrt{\frac{C_w}{I_{zz}} + \frac{GJ}{P_{ey}}} =$$

$$= 0,972 \times 4332 \times \sqrt{\frac{15473571}{150935} + \frac{4,2 \times 10^3 \times 15696}{4332}} \times 10^{-6} = 0,5 \text{ kNm}$$

$$P_{ey} = \frac{\pi^2 E_{z,b,d} I_{zz}}{(kL)^2} = \frac{\pi^2 \times 4,5 \times 10^3 \times 150935}{(0,5 \times 2488)^2} = 4332 \text{ N}$$

Da equação (17), calculamos o momento resistente da secção para o perfil U150x40x6 mm,

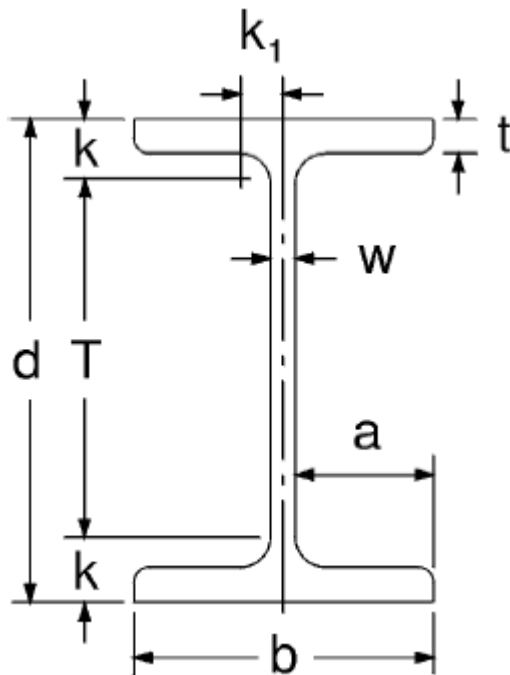
$$M_{Rd} = \frac{M_{b,cr}}{\gamma_m} = \frac{0,5}{3,1625} = 0,16 \text{ kNm}$$

O valor momento crítico de encurvadura lateral devido à torção instalado nas vigas U 150x40x6mm no troço menor é de 0,0006 kNm (barra 1/3), logo a viga resiste ao esforço.

Perfil Pultrudido I 150x75x8 mm

Como o momento crítico de encurvadura lateral devido à torção é dependente do comprimento da viga ou do comprimento do troço sem apoio, da análise da figura 46 e anexo 4, dos perfis I 150x75x8 mm, o perfil que está a ser mais solicitado à torção é o perfil exterior do apoio do seletor. Assim, terá de ser feita a análise a 2 troços, um de comprimento menor (barra 9/19) com 171 mm de comprimento e outro de comprimento maior (barra 19/36) com 3894 mm de comprimento.

De acordo com a referência [12], a constante de torção e a constante de deformação torsional para o perfil I são calculadas como a seguir se indica.



$$J = \frac{2 \cdot b \cdot t^3 + d' \cdot w^3}{3} =$$

$$= \frac{2 \times 75 \times 8^3 + 142 \times 8^3}{3} = 49835 \text{mm}^4$$

$$C_w = \frac{(d')^2 \cdot b^3 \cdot t}{24} =$$

$$= \frac{142^2 \times 75^3 \times 8}{24} = 2835562500 \text{mm}^6$$

$$d' = 150 - 8 = 142 \text{mm}$$

Como temos cargas concentradas na viga e considerando a viga apoiada na direção do eixo forte, considera-se $k=0,5$ e $C_1 = 1,365$

Da equação (39) e (40), calculamos o momento crítico de encurvadura lateral devido à torção para cada troço.

Troço menor (barra 9/19)

$$M_{b,cr} = C_1 P_{ey} \sqrt{\frac{C_w}{I_{zz}} + \frac{GJ}{P_{ey}}} =$$

$$= 1,070 \times 3423298 \times \sqrt{\frac{2835562500}{563462} + \frac{4,2 \times 10^3 \times 49835}{3423298}} \times 10^{-6} = 261 \text{kNm}$$

$$P_{ey} = \frac{\pi^2 E_{z,b,d} I_{zz}}{(kL)^2} = \frac{\pi^2 \times 4,5 \times 10^3 \times 563462}{(0,5 \times 171)^2} = 3423298 \text{N}$$

Da equação (17), calculamos o momento resistente da secção para o perfil I150x75x8 mm,

$$M_{Rd} = \frac{M_{b,cr}}{\gamma_m} = \frac{261}{3,1625} = 83 \text{kNm}$$

O valor momento crítico de encurvadura lateral devido à torção instalado nas vigas I150x75x8 mm no troço menor é de 0,038 kNm (barra 9/10), logo o viga resiste ao esforço.

Troço maior (barra 19/36)

$$M_{b,cr} = C_1 P_{ey} \sqrt{\frac{C_w}{I_{zz}} + \frac{GJ}{P_{ey}}} =$$

$$= 1,070 \times 6602 \times \sqrt{\frac{2835562500}{563462} + \frac{4,2 \times 10^3 \times 49835}{6602}} \times 10^{-6} = 1,35 \text{ kNm}$$

$$P_{ey} = \frac{\pi^2 E_{z,b,d} I_{zz}}{(kL)^2} = \frac{\pi^2 \times 4,5 \times 10^3 \times 563462}{(0,5 \times 3894)^2} = 6602 \text{ N}$$

Da equação (17), calculamos o momento resistente da secção para o perfil U150x40x6 mm,

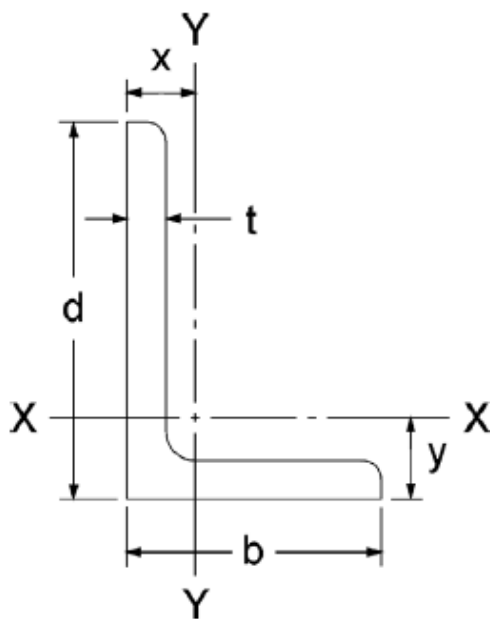
$$M_{Rd} = \frac{M_{b,cr}}{\gamma_m} = \frac{1,35}{3,1625} = 0,43 \text{ kNm}$$

O valor momento crítico de encurvadura lateral devido à torção instalado nas vigas I150x75x8 mm no troço maior é de 0,002 kNm (barra 10/36), logo o viga resiste ao esforço.

Perfil Pultrudido L 60x60x8 mm

Da análise da figura 46 e anexo 4, dos perfis L 60x60x8 mm, o perfil que está a ser mais solicitado à torção é o perfil do travamento do meio. Assim, será feita a análise (barra 28/25) com 1189 mm de comprimento.

De acordo com a referência [12], a constante de torção e a constante de deformação torsional para o perfil I são calculadas como a seguir se indica.



$$J = \frac{(d' + b') \cdot t^3}{3} = \frac{(56 + 56) \times 8^3}{3} = 19115 \text{ mm}^4$$

$$C_w = \frac{t^3}{36} [(d')^3 + (b')^3] =$$

$$= \frac{8^3}{36} [56^3 + 56^3] = 89202 \text{ mm}^6$$

$$d' = d - t/2 = 60 - 8/2 = 56 \text{ mm}$$

$$b' = b - t/2 = 60 - 8/2 = 56 \text{ mm}$$

Como temos cargas concentradas na viga e considerando a viga apoiada na direção do eixo forte, considera-se $k=0,5$ e $C_1 = 1,365$

Da equação (39) e (40), calculamos o momento crítico de encurvadura lateral devido à torção para cada troço.

$$M_{b,cr} = C_1 P_{ey} \sqrt{\frac{C_w}{I_{zz}} + \frac{GJ}{P_{ey}}} =$$

$$= 1,070 \times 14124 \times \sqrt{\frac{89202}{112396} + \frac{4,2 \times 10^3 \times 19115}{14124}} \times 10^{-6} = 1,14 \text{ kNm}$$

$$P_{ey} = \frac{\pi^2 E_{z,b,d} I_{zz}}{(kL)^2} = \frac{\pi^2 \times 4,5 \times 10^3 \times 112396}{(0,5 \times 1189)^2} = 14124 \text{ N}$$

Da equação (17), calculamos o momento resistente da secção para o perfil U150x40x6 mm,

$$M_{Rd} = \frac{M_{b,cr}}{\gamma_m} = \frac{1,14}{3,1625} = 0,36 \text{ kNm}$$

O valor momento crítico de encurvadura lateral devido à torção instalado no perfil L 60x60x8 mm no troço maior é de 0,0009 kNm (barra 28/25), logo a viga resiste ao esforço.

10.6 Imagens da Aplicação

A figura 47 mostra a pré-montagem da estrutura no armazém e a figura 48 mostra a estrutura montada nas instalações do cliente.



Figura 47 – Pré-montagem da estrutura



Figura 48 – Estrutura aplicada

11 Considerações Finais

Os perfis pultrudidos têm vindo a afirmar-se como uma alternativa aos materiais tradicionais em diversas áreas, nomeadamente, onde é requerida resistência á corrosão, leveza e diminuição de custos de manutenção.

A maioria dos arquitetos, projetistas, engenheiros e construtores desconhecem o produto. Alguns dos que conhecem, mas ainda não os utilizaram nas suas obras, estão céticos acerca das capacidades destes materiais, mas após a sua utilização acreditam no seu desempenho e compreendem as suas vantagens.

A estrutura do seletor de azeitonas apresentada neste trabalho é uma prova das vantagens da utilização destes materiais. O seu cálculo é em tudo idêntico ao dimensionamento das estruturas de aço, com a particularidade dos perfis terem comportamento ortotrópico e assim apresentarem propriedades bem distintas em cada uma das três direções principais.

Os perfis com reforço de fibra de vidro, sendo os mais competitivos em preço, apresentam um módulo de elasticidade muito baixo, quando comparados com os perfis metálicos. Em situações de concorrência direta, onde as vantagens dos perfis pultrudidos não são valorizadas, apenas o seu custo é uma desvantagem.

Para obtermos a mesma rigidez à flexão de um perfil em aço temos que ter cerca de 2,1 vezes a altura deste em perfil pultrudido, o que aumenta o custo da solução. Muitas vezes, para cumprir com o dimensionamento ao estado limite de serviço (dimensionamento à rigidez), temos tensões instaladas nos perfis muito pequenas, ou seja, podemos reduzir a secção sem comprometer a resistência. No entanto, não podemos ter perfis de paredes muito finas, por estes poderem ter problemas com a estabilidade da secção. A utilização de perfis híbridos, com núcleos de cortiça, poliuretano, ou outros materiais para preencher parte da secção e a combinação de reforço de carbono, poderão ser uma solução alternativa, quer para baixar o custo quer para aumentar a rigidez. A solução de utilização de fibra de carbono, está atualmente comprometida devido ao seu custo elevado, mas se o seu custo diminuir vamos assistir a uma maior utilização destes perfis.

Uma nova aplicação está surgir, que é a utilização dos perfis pultrudidos na reabilitação de habitações antigas, onde as estruturas metálicas obrigam, devido ao seu peso, a um reforço das paredes das mesmas. Também a aplicação destes perfis na substituição de perfis metálicos em construções de habitações novas e armazéns é um mercado promissor. No entanto, a

resistência ao fogo tem que ser melhorada. A nova regulamentação de resistência ao fogo, está a ser um travão na aplicação destes e muitos outros materiais.

Estes perfis têm uma elevada resistência mecânica específica e surgem cada vez mais soluções e aplicações inovadoras, o que levará a um incremento nesta área de produção.

O futuro e desenvolvimento desta área passam pela nossa criatividade. É preciso arranjar novas aplicações para estes materiais, desenvolver novas matérias-primas visando a diminuição do seu custo e melhorando as propriedades mecânicas.

De forma alguma estes materiais substituirão completamente os materiais tradicionais, mas são sem dúvida alguma uma forte alternativa em situações específicas.

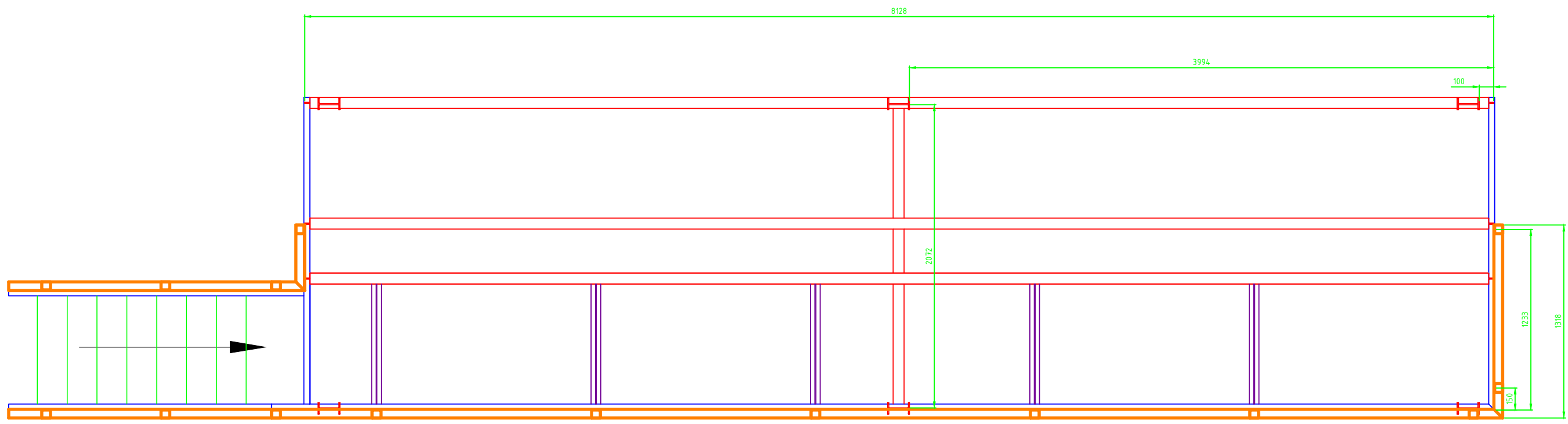
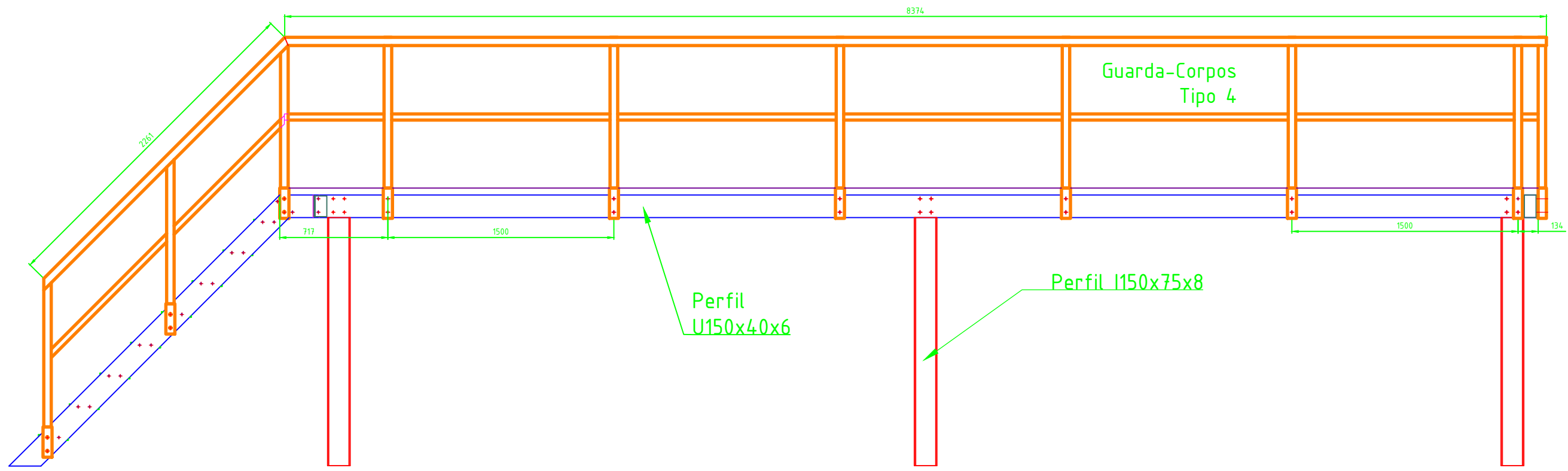
12 Referências


- [1] Reinforced Plastics, October 1994, pp. 26-28.
- [2] EPTA, European Pultrusion Technology Association
<http://www.pultruders.com/en/pultrusion.html>, 10/01/2014, 21H08.
- [3] Starr, T., "Pultrusion for Engineers", Woodhead Publishing Limited, 2000
- [4] P. J. Novo, J. P. Nunes, J. F. Silva, V. Tinoco, and A. T. Marques, "Optimizing the Production and Processing of Fibre Reinforced Thermoplastic Pre-impregnated Materials", ICCM19, Montréal, Canada, July 28 – August 2, 2013.
- [5] Mário Rui Monteiro Alvim de Castro, "Estudo do Comportamento de Perfis Pultrudidos Sujeitos a Impacto de Baixa Velocidade", Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica – Opção em Engenharia Estrutural, 1996.
- [6] Relatório de conclusão do projeto PULTRIFICAZ, com o apoio do QREN e realizado em co-promoção com o Instituto Superior de Engenharia do Porto e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, apresentado à Agência de Inovação em janeiro de 2012.
- [7] US Patent No. 2,781,911 (1953)
- [8] Mário Rui Alvim Castro, António Torres Marques, Pedro P. Camanho, António Nicolau Viana da Costa, "Design, Quality Control and Quality Assurance of Structures made with Pultruded Profile", 6th World Pultrusion Conference of EPTA European Pultrusion Technology Association, Prague, Czech Republic, 4-5 de Abril, 2002.
- [9] Site ALTO Perfis pultrudidos, Lda.,
http://www.alto.pt/?1&it=produto_reg&co=66&cop=15&mop=2, 17 de janeiro 2014, 11:05
- [10] John L. Clarke, "Structural Design of Polymer Composites – Eurocomp Design Code and handbook", E & FN Spon, First Edition, 1996.
- [11] Lawrence C. Bank, "Composites for Construction, Structural Design with FRP Materials", John Wiley & sons Inc., 2006, pp 403.
- [12] Canadian Institute of Steel Construction, "Torsional Section Properties of Steel Shapes", 2002

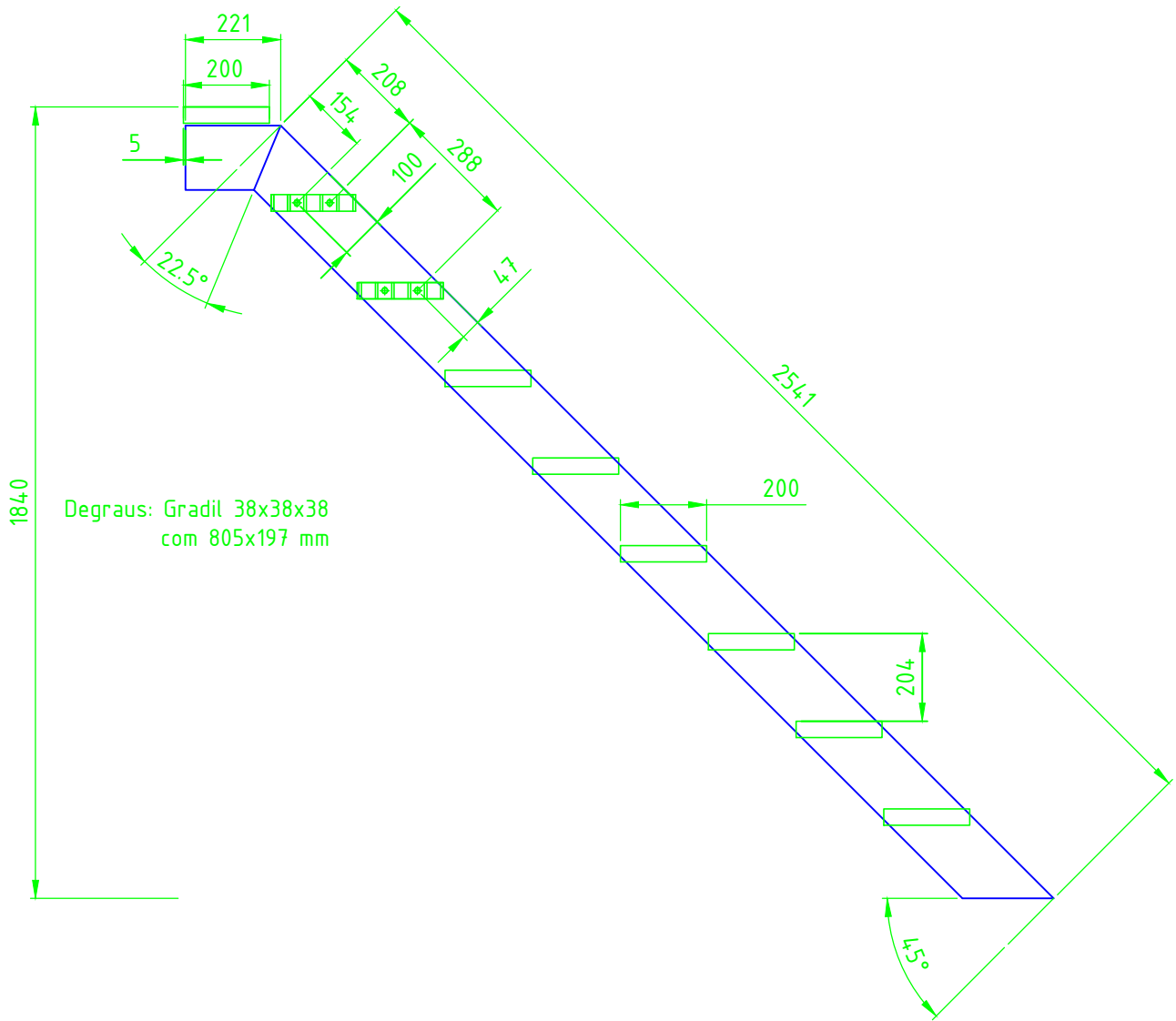
13 Bibliografia


- Meyer, Raymond W. Meyer, "Handbook of Pultrusion Technology, Chapman and Hall, 1985.
- Starr, T., "Pultrusion for Engineers", Woodhead Publishing Limited, 2000.
- Freger, Garry E., Kestelman, Vladimir N., Freger, Dmitry G., "Braiding Pultrusion Technology", McGraw-Hill Engineering Reference, 2005.
- James A. Quinn, "Composites Design Manual", James Quinn Associates Ltd, 3rd Edition, 2002.
- Lawrence C. Bank, "Composites for Construction, Structural Design with FRP Materials", John Wiley & sons Inc., 2006.
- Marcelo F.S.F de Moura, Alfredo B. de Morais, António G. de Magalhães, "Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico", 2005.
- Strongwell, "Design Manual", Rev.0502, 2007.
- Creative Pultrusion, "The Pultex Pultrusion Global design Manual", revision 3, 2000.
- Fiberline, "The Fiberline Design Manual", 2nd Edition, 2003.
- Starr, T., "Pultrusion for Engineers", Woodhead Publishing Limited, 2000.
- John L. Clarke, "Structural Design of Polymer Composites – Eurocomp Design Code and handbook", E & FN Spon, First Edition, 1996.
- Lászlo P. Kollár, George S. Springer, "Mechanics of Composite Structures", Cambridge University Press, 2003.
- EN 13706-1, "Reinforced plastics composites - Specifications for pultruded profiles - Part 1: Designation", novembro de 2002.
- EN 13706-2, "Reinforced Plastics Composites - Specifications for Pultruded Profiles - Part 2: Methods of test and general requirements", outubro de 2002.
- EN 13706-3, "Reinforced Plastics Composites - Specifications for Pultruded Profiles - Part 3: Specific requirements", outubro de 2002.

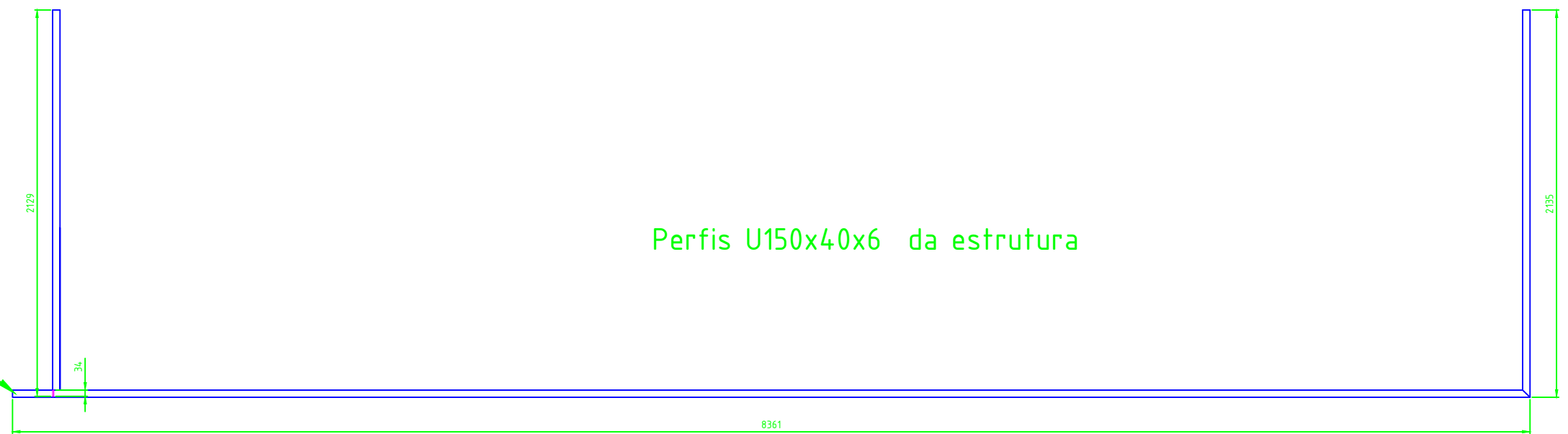
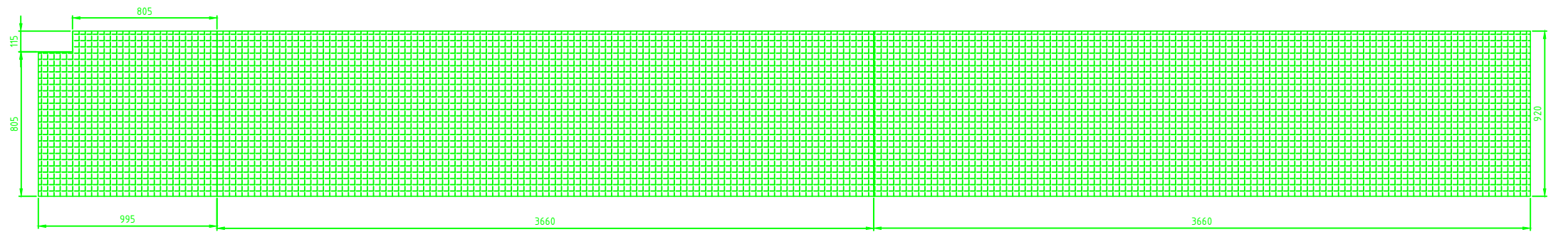
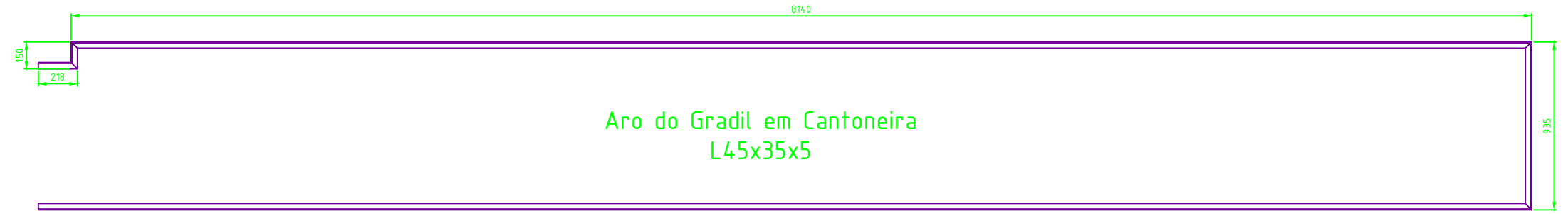
ANEXO 1




Desenhou	9/06/2010	Mário Alvim	Indústria Alimentar	 Perfis Pultrudidos Lda.
Projectou	9/06/2010	Mário Alvim		
Aprovou	9/06/2010	Mário Alvim		
Escala	1:30	Guarda-Corpos Tipo 4; Posição dos Pés da estrutura		2010.77.01_MA
Tol. geral	EN 13706-2	Material Plástico reforçado com fibra de vidro		Substituído:

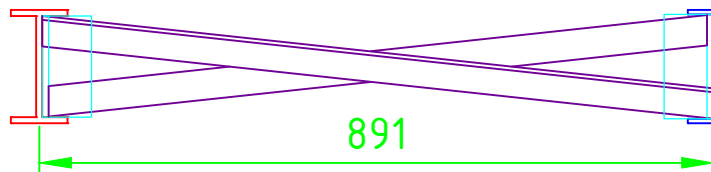
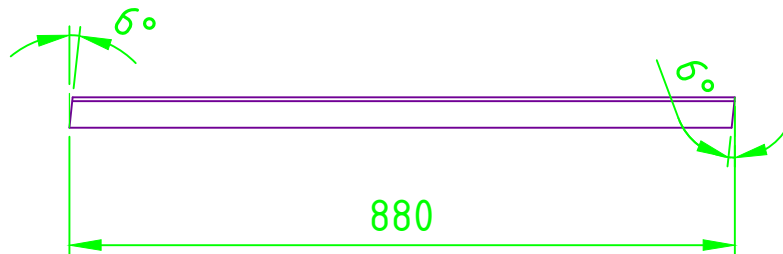
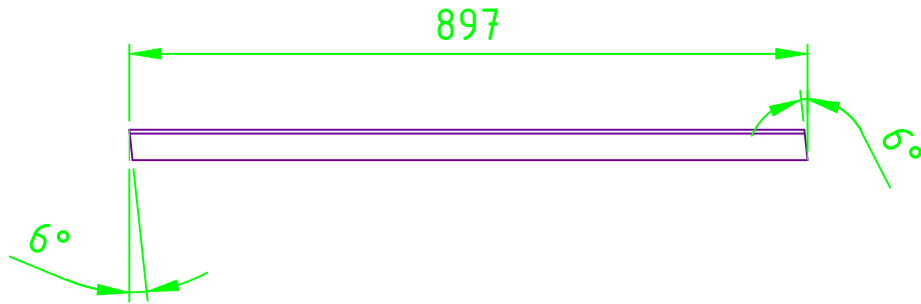


	Data	Nome	Indústria Alimentar	
Desenhou	9/06/2010	Mário Alvim		
Projectou	9/06/2010	Mário Alvim		
Aprovou	9/06/2010	Mário Alvim		
Escala	1:16		Escada Inclinada	2010.77.02_MA
Tol. geral	EN 13706-2		Material	Substituído: ----
			Plástico reforçado c/ fibra de vidro	Substituído: ----




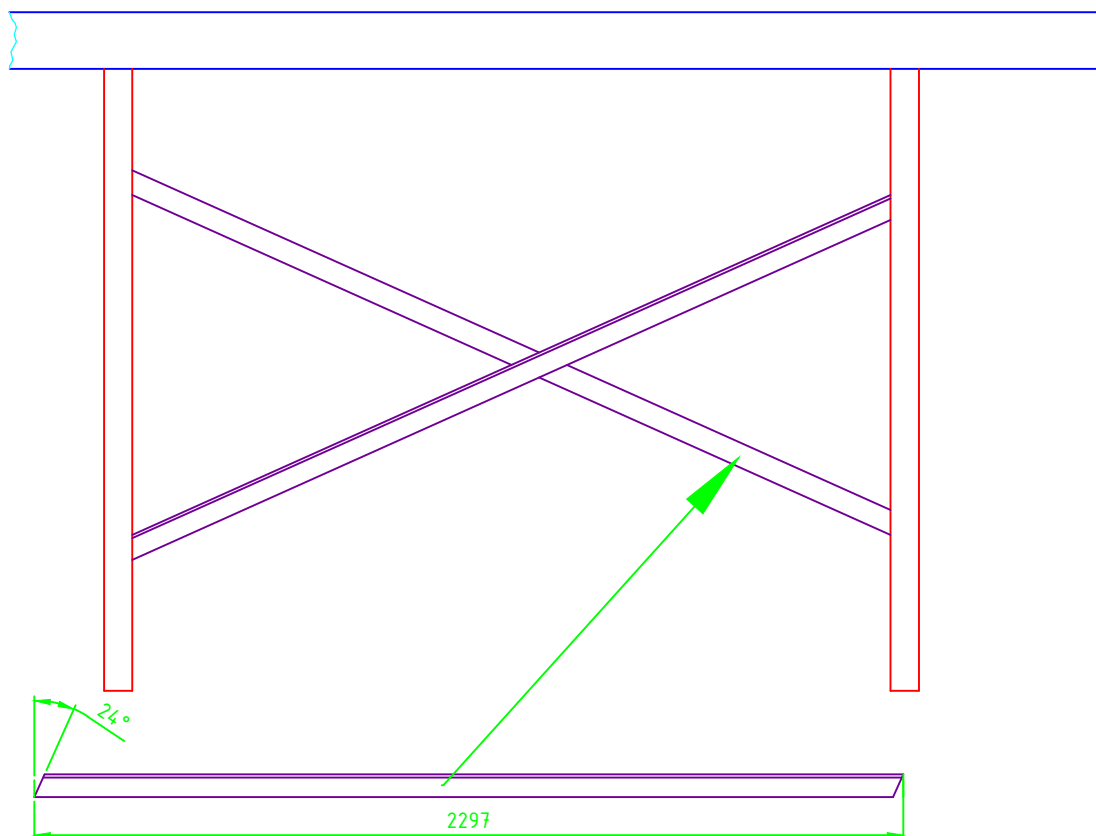
Anteção!! ângulo de 22.5°
para ligação à escada

	Data	Nome	Indústria Alimentar	 ALTO Perfis Pultrudidos Lda.
Desenhou	9/06/2010	Mário Alvim		
Projectou	9/06/2010	Mário Alvim		
Aprovou	9/06/2010	Mário Alvim		
Escala	1:30		Perfis U150x40x6 da estrutura; gradil e aro do mesmo	2010.77.03_MA
Tol. geral	EN 13706-2			
	Material		Plástico reforçado com fibra de vidro	Substituído:




5 Unidades

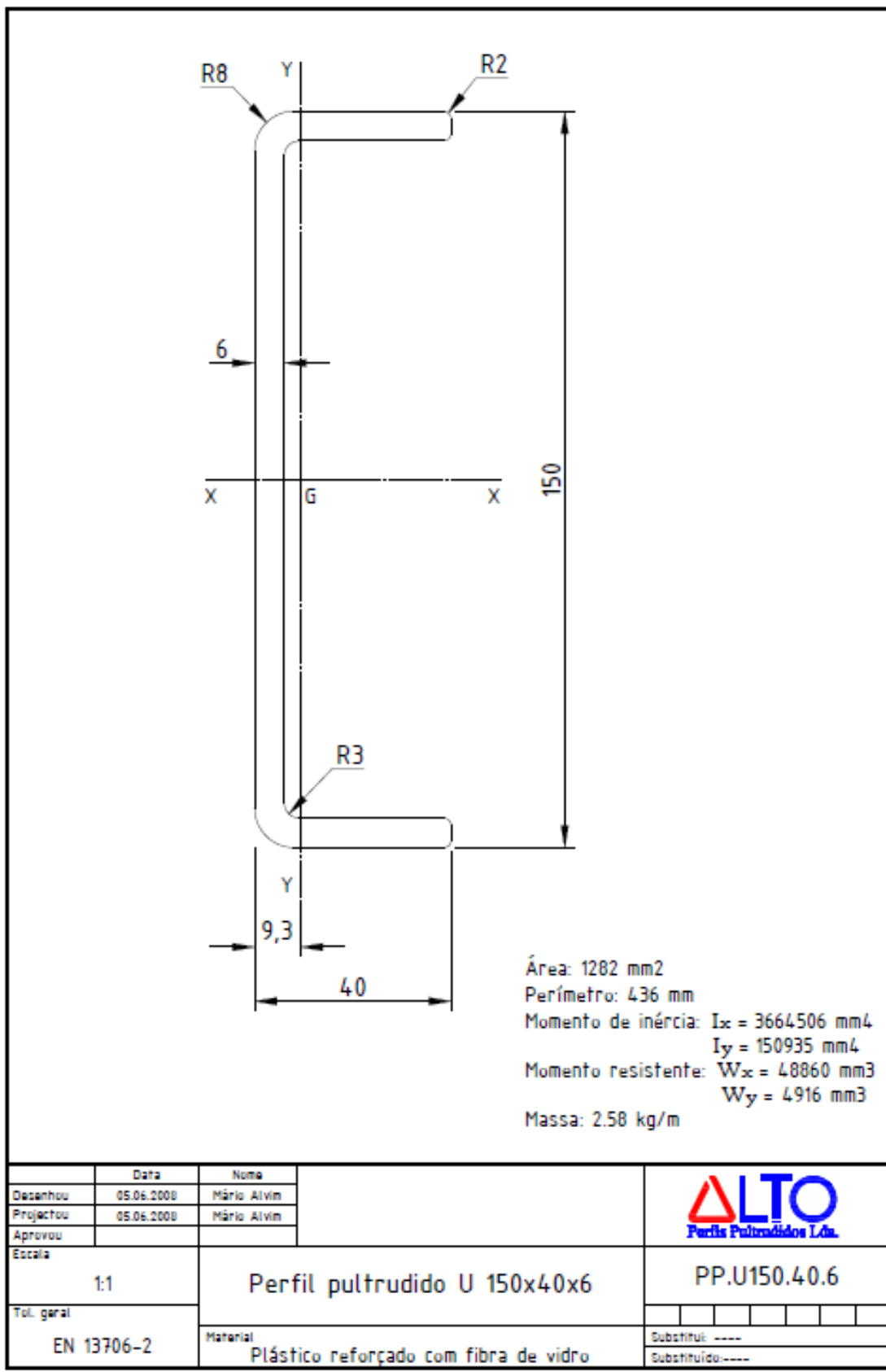
	Data	Nome	Indústria Alimentar	 Perfis Pultrudidos Lda.
Desenhou	9/06/2010	Mário Alvim		
Projectou	9/06/2010	Mário Alvim		
Aprovou	9/06/2010	Mário Alvim		
Escala	1:10		Treliças para travamento do passadiço em gradil	2010.77.04_MA
Tol. geral	EN 13706-2		Material	Substituído:
			Plástico reforçado com fibra de vidro	Substituído:




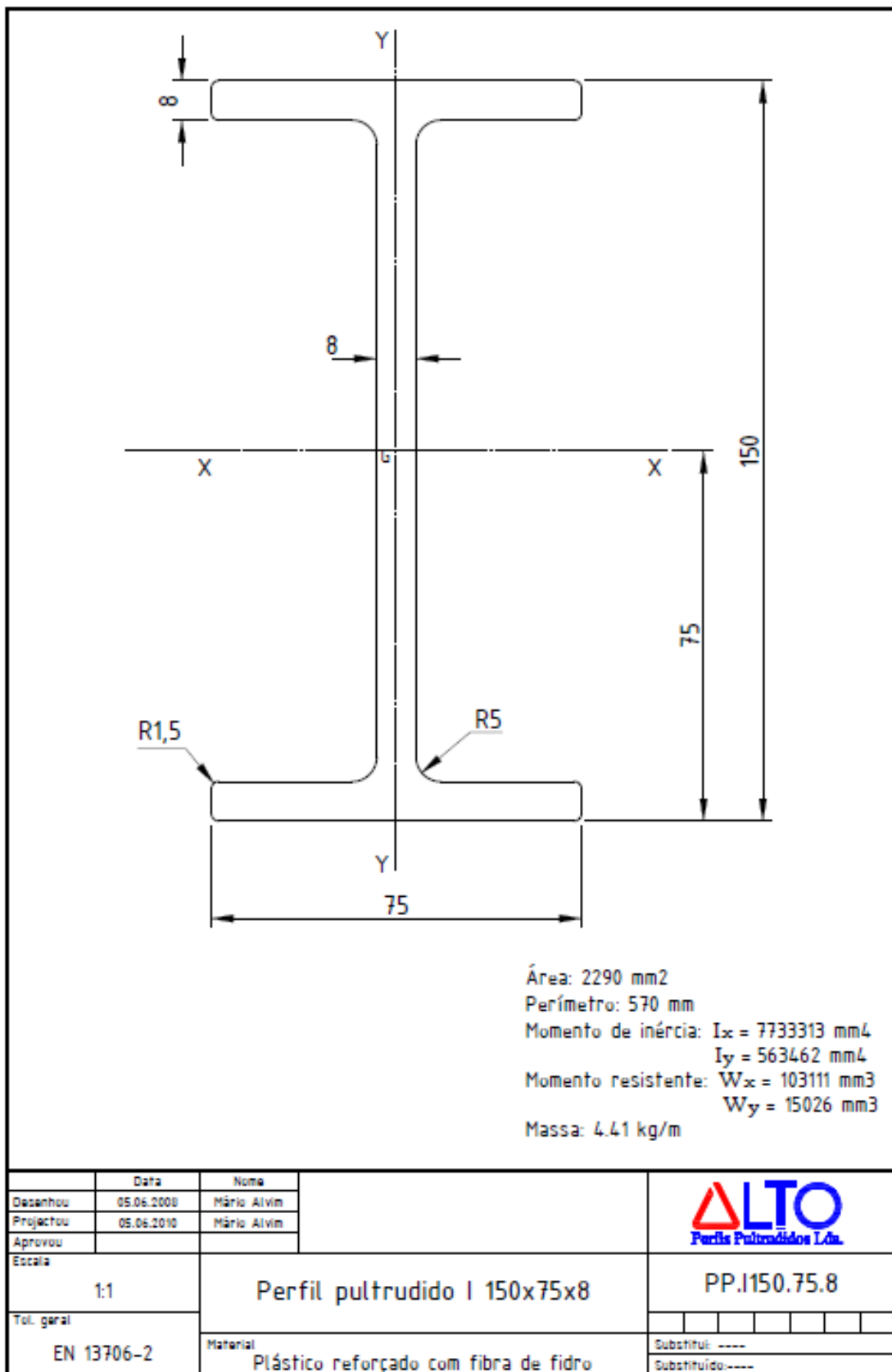
Cortar 6 Perfis L60x60x8 para os travamentos dos pés

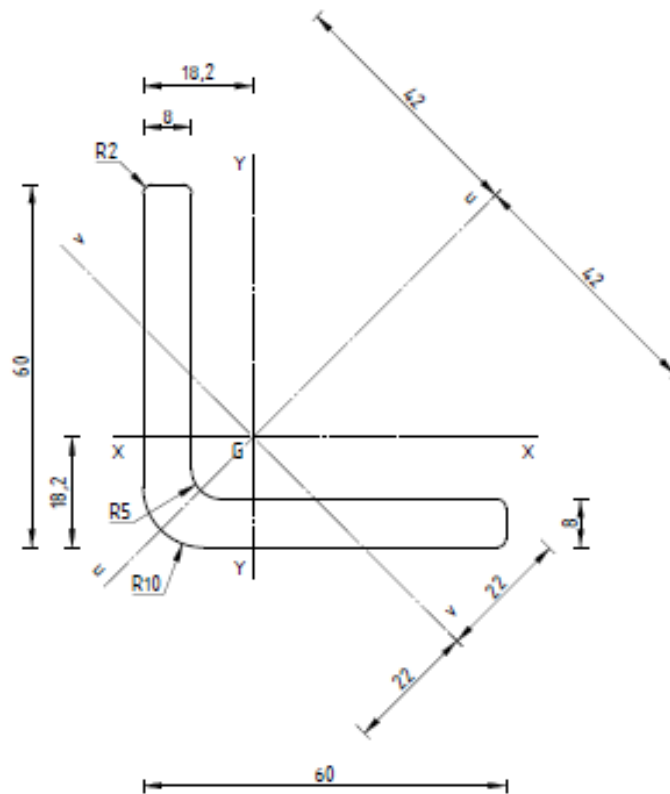
	Data	Nome	Indústria Alimentar	
Desenhou	9/06/2010	Mário Alvim		
Projectou	9/06/2010	Mário Alvim		
Aprovou	9/06/2010	Mário Alvim		
Escala	1:20	Trelças para travamento dos pés da estrutura		2010.77.05_MA
Tol. geral	EN 13706-2	Material	Plástico reforçado com fibra de vidro	Substituído:

ANEXO 2




	Data	Nome	 LTO Perfis Pultrudidos Lda.
Desenhou	05.06.2008	Mário Alvim	
Projectou	05.06.2008	Mário Alvim	
Aprovou			
Escala	1:1		Perfil pultrudido U 150x40x6
Tol. geral	EN 13706-2		PP.U150.40.6
	Material		Substitui: ----
	Plástico reforçado com fibra de vidro		Substituído: ----





Área: 878 mm²
 Perímetro: 231 mm
 Momento de inércia: $I_x = 289968 \text{ mm}^4$
 $I_y = 289968 \text{ mm}^4$
 $I_{xx} = 467589 \text{ mm}^4$
 $I_{yy} = 112356 \text{ mm}^4$
 Momento resistente: $W_x = 6937 \text{ mm}^3$
 $W_y = 6937 \text{ mm}^3$
 Massa: 1.73 kg/m

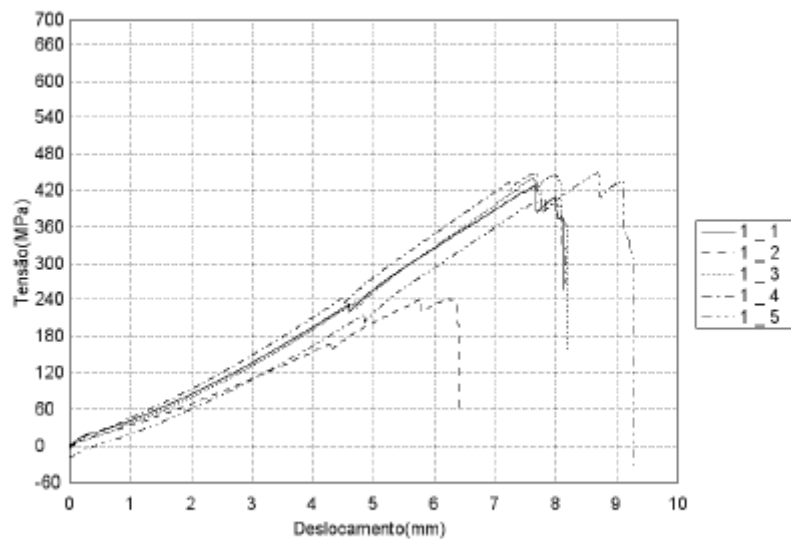
	Data	Nome	
Desenhou	05.06.2008	Mário Alvim	
Projectou	05.06.2008	Mário Alvim	
Aprovou			
Escala	1:1		Cantoneira pultrudida L 60x60x8
Tol. geral	EN 13706-2		Material Plástico reforçado com fibra de vidro
			Substitui: ----
			Substituído: ----

ANEXO 3

ALTO - Perfis Pultrudidos

Norma	ISO 527-4:1997	Nome do produto	U 150x40x6
Dimensões da amostra	250mmx25mmx6mm	Corte das amostras	Disco diamantado
Condicionamento das amostras	8°C, 50% humidade, 24 horas	Data do relatório	25-01-2013
Data do ensaio	25-01-2013	Temperatura	8
Humidade:	50%	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	5mm/min	Batch No:	1
Sub-batch No:	5	OBS	Teste realizado na direcção das fibras de vidro

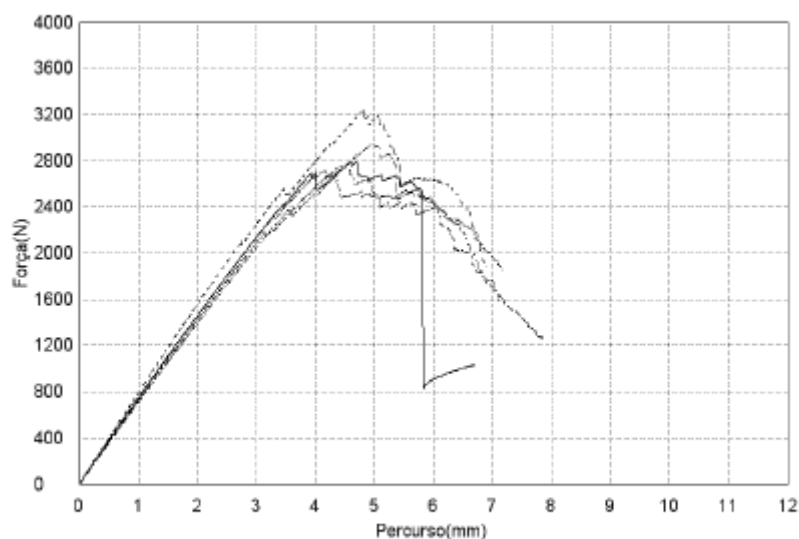
Nome	Máx_Força	Máx_Tensão	Elástico	Máx_Deforção
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Ext. 1 (Deformação) 0,05 - 0,25 %	Cálculo de áreas completas
Unidade	N	MPa	GPa	%
1_1	66402,4	428,956	39,4518	5,11194
1_2	33724,7	242,067	28,9997	4,16356
1_3	69602,0	446,167	40,7594	5,33635
1_4	70122,2	449,502	41,5500	5,11801
1_5	69806,2	450,944	39,9395	5,80967
Média	61931,5	403,527	38,1401	5,10791
Desvio Padrão	15839,4	90,6866	5,17188	0,59928
Máximo	70122,2	450,944	41,5500	5,80967
Mínimo	33724,7	242,067	28,9997	4,16356



ALTO - Perfis Pultrudidos

Norma	EN ISO 1415:1998	Nome do produto	U 150x40x6
Dimensões da amostra	120mmx15mmx6mm	Corte das amostras	Disco diamantado
Condicionamento das amostras	20°C, 50% humidade, 24 horas	Data do relatório	19-08-2013
Data do ensaio	19-08-2013	Temperatura	25°
Humidade:	50%	Tipo de ensaio	Dobr.3ptos
Velocidade	5mm/min	Batch No:	1
Sub-batch No:	5	Distância entre apoios	96mm

Nome	Máx_Força	Máx_Tensão	Máx_Deslocamento	Elástico
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Tensão 10 - 50 MPa
Unidade	N	MPa	mm	GPa
1_1	2788,74	423,321	4,60303	22,8933
1_2	3245,79	492,699	4,82472	24,3065
1_3	2713,04	414,420	4,16134	23,0064
1_4	2938,55	446,061	4,95135	22,2705
1_5	2760,97	419,104	4,51305	21,8347
Média	2889,42	439,121	4,61070	22,8623
Desvio Padrão	216,310	32,3235	0,30552	0,93723
Máximo	3245,79	492,699	4,95135	24,3065
Mínimo	2713,04	414,420	4,16134	21,8347





Rua dos Plátanos, 197
4100-414 Porto - Portugal

Estrada do Paço do Lumiar -
Campus do Lumiar - Edifício Q
1649-038 Lisboa - Portugal

C.I.P.C.n.º 501630473

LABORATÓRIO DE ENSAIOS
Tests Laboratory

ENSAIO DE TRACÇÃO
TENSILE TEST

RELATÓRIO DE ENSAIO N.º: 2010/6000912-10.11
Testing Report

Página 1 de 1
Page 1 of 1

Data: 2010-11-16
Date

Processo: 2010/6000912-10
Process

REQUERENTE: ALTO - PERFIS PULTRUDIDOS, LDA
Customer
RUA FREI ANTÓNIO MONTENEGRO, 190-A
4465-572 LEÇA DO BALIO

Pedido: Correio electrónico
Request
Data: 2010-10-11
Date
Data do ensaio: 2010-11-16
Testing date

EQUIPAMENTO: Máquina universal de ensaios INSTRON 5500R - Catim n.º 04.40482
Equipment
Paquímetro MITUTOYO - Catim n.º 08.501015
Micrómetro MITUTOYO - Catim n.º 91.50043.13
Extensómetro INSTRON, Le=50mm - Catim n.º 4.187.07

NORMA ENSAIO: EN ISO 527-4: 1997
Reference Standard
NORMA DO PROVETE: EN 13706-2: 1998
Test Piece Standard

PRODUTO: Perfil pultrudido
Product
DATA DE RECEPÇÃO DAS AMOSTRAS: 2010-09-30
Sampling Reception Date

TENSÃO DE ROTURA E MODULO DE YOUNG (entre 0,05% e 0,25%)
Tensile strength and Young's Modulus (between 0,05% and 0,25%)

Ref. dos Provetes SAMPLE REFERENCE	VALORES LIDOS MEASURED VALUES			VALORES CALCULADOS CALCULATED VALUES			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Força máxima F _M (N)	Secção inicial S ₀ (mm ²)	Tensão de rotura σ _M (N / mm ²)	Módulo Et (GPa)	Obs. NOTES
I150x75x8 - 1	7,90	24,3	70405	191,97	367	31,7	1, 2
I150x75x8 - 2	7,83	25,4	95049	198,88	478	36,4	1, 2
I150x75x8 - 3	7,87	24,8	69493	195,18	356	28,4	1, 2
I150x75x8 - 4	7,96	24,6	80235	195,82	410	35,3	1, 2
I150x75x8 - 5	7,92	24,3	72044	192,46	374	37,2	1, 2

OBSERVAÇÕES:
NOTES

- 1 - O modo de obtenção do provete é da responsabilidade do cliente.
Sampling is customer's responsibility
- 2 - Ensaio realizado à velocidade 2 mm/min (separação das garras)
Speed of testing 2 mm/min (crosshead)

Nota: Os resultados obtidos referem-se apenas às amostras ensaiadas.
This report refers only to the sample tested

TÉCNICO
Technician

(José M. Fernandes)

RESPONSÁVEL TÉCNICO
Technical responsible

(Pedro Castro)

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do CATIM



Rua dos Plátanos, 197
4100-414 Porto - Portugal

Estrada do Paço do Lumiar -
Campus do Lumiar - Edifício Q
1649-038 Lisboa - Portugal

C.L.P.C. nº 501630473

LABORATÓRIO DE ENSAIOS
Tests Laboratory

ENSAIO DE FLEXÃO (4 PONTOS)
BENDING TEST (FOUR POINTS)

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 2010/6000912-20.11
Testing Report

Página 1 de 1
Page 1 of 1

Data: 2010-12-23
Date

Processo: 2010/6000912-20
Process

REQUERENTE: ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, LDA
Customer
RUA FREI ANTÓNIO MONTENEGRO, 190-A
4465-572 LEÇA DO BALIO

Pedido: Correio electronico
Request
Data: 2010-10-11
Date
Data do ensaio: 2010-12-22
Testing date

EQUIPAMENTO: Máquina universal de ensaios INSTRON 5969 - Catim nº 10.40.776
Equipment
Dispositivo de ensaios de flexão – Catim nº 4.218.08
Paquímetro MITUTOYO – Catim nº 08.501015

NORMA ENSAIO: ISO 14125: 1998, método B
Reference Standard
NORMA DO PRODUTO: EN 13706-2: 1998
Product Standard

CONDIÇÕES DE ENSAIO: Condições de acordo com anexo A da ISO 14125 para materiais classe IV:
Test conditions
Distância entre apoios inferiores: 330 mm; Raio dos apoios superiores: 5 mm
Distância entre apoios superiores: 110 mm; Raio dos apoios inferiores: 5 mm

PRODUTO: Perfil pultrudido
Product
DATA DE RECEPÇÃO DAS AMOSTRAS: 2010-09-30
Sampling Reception Date

RESISTÊNCIA À FLEXÃO E MODULO DE YOUNG (entre 0,05% e 0,25%)
Flexural strength and Young's Modulus (between 0,05% and 0,25%)

Ref. dos Provetes SAMPLE REFERENCE	VALORES LIDOS MEASURED VALUES			VALORES CALCULADOS CALCULATED VALUES			
	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força máxima F _M (N)	Secção inicial S ₀ (mm ²)	Tensão de rotura em flexão σ _r (N / mm ²)	Módulo E _f (GPa)	Obs. NOTES
I 150x75x8 – 1	15,0	7,8	791	117,0	286	22,3	1, 2
I 150x75x8 – 2	15,1	7,9	1084	119,3	380	28,2	1, 2
I 150x75x8 – 3	15,1	8,0	801	120,8	274	23,2	1, 2
I 150x75x8 – 4	15,2	8,0	1057	121,6	359	25,7	1, 2
I 150x75x8 – 5	15,0	8,0	968	120,0	333	28,5	1, 2

OBSERVAÇÕES:

NOTES

- 1 - O modo de obtenção do provete é da responsabilidade do cliente (dimensões de acordo previstas para Materiais classe IV, com espessura do produto final).
Sampling is customer's responsibility – According ISO 14125 – samples with others thickness
- 2 - Ensaio realizado à velocidade 5 mm/min (separação das garras)
Speed of testing 5 mm/min (crosshed)

Nota: Os resultados obtidos referem-se apenas às amostras ensaiadas.
This report refers only to the sample tested

TÉCNICO
Technician

(Avelino Lopes)

RESPONSÁVEL TÉCNICO
Technical responsible

(Pedro Castro)

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do CATIM



Rua dos Plátanos, 197
4100-414 Porto - Portugal
Estrada do Paço do Lumiar -
Campus do Lumiar - Edifício Q
1649-038 Lisboa - Portugal

C.I.P.C.nº 501630473

LABORATÓRIO DE ENSAIOS
Tests Laboratory

ENSAIO DE TRACÇÃO
TENSILE TEST

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 2010/6000912-10.9
Testing Report

Página 1 de 1
Page 1 of 1

Data: 2010-11-16
Date

Processo: 2010/6000912-10
Process

REQUERENTE: ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, LDA
Customer
RUA FREI ANTÓNIO MONTENEGRO, 190-A
4465-572 LEÇA DO BALIO

Pedido: Correo electrónico **Data:** 2010-10-11 **Data do ensaio:** 2010-11-16
Request Date Testing date

EQUIPAMENTO: Máquina universal de ensaios INSTRON 5500R - Catim nº 04.40482
Equipment
Paquímetro MITUTOYO - Catim nº 08.501015
Micrómetro MITUTOYO – Catim nº 91.50043.13
Extensómetro INSTRON, Le=50mm - Catim nº 4.187.07

NORMA ENSAIO: EN ISO 527-4: 1997 **NORMA DO PROVETE:** EN 13706-2: 1998
Reference Standard Test Piece Standard

PRODUTO: Perfil pultrudido **DATA DE RECEPÇÃO DAS AMOSTRAS:** 2010-09-30
Product Sampling Reception Date

TENSÃO DE ROTURA E MODULO DE YOUNG (entre 0,05% e 0,25%)
Tensile strenght and Young's Modulus (between 0,05% and 0,25%)

Ref. dos Provetes SAMPLE REFERENCE	VALORES LIDOS MEASURED VALUES			VALORES CALCULADOS CALCULATED VALUES			
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Força máxima F _M (N)	Secção inicial S ₀ (mm ²)	Tensão de rotura σ _M (N / mm ²)	Módulo Et (GPa)	Obs. NOTES
L60x60x8 - 1	7,98	24,8	48407	197,90	245	36,9	1, 2
L60x60x8 - 2	7,94	25,1	60946	199,29	306	43,1	1, 2
L60x60x8 - 3	7,89	24,8	57744	195,67	295	35,3	1, 2
L60x60x8 - 4	7,88	25,0	59564	197,00	302	40,6	1, 2
L60x60x8 - 5	7,94	24,9	62099	197,71	314	33,4	1, 2

OBSERVAÇÕES:

NOTES

- 1 - O modo de obtenção do provete é da responsabilidade do cliente.
Sampling is customer's responsibility
- 2 - Ensaio realizado à velocidade 2 mm/min (separação das garras)
Speed of testing 2 mm/min (crosshead)

Nota: Os resultados obtidos referem-se apenas às amostras ensaiadas.
This report refers only to the sample tested

TÉCNICO
Technician

(José M. Fernandes)

RESPONSÁVEL TÉCNICO
Technical responsible

(Pedro Castro)

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do CATIM



Rua dos Plátanos, 197
4100-414 Porto - Portugal

Estrada do Paço do Lumiar -
Campus do Lumiar - Edifício Q
1649-038 Lisboa - Portugal

C.I.P.C.n.º 501630473

LABORATÓRIO DE ENSAIOS
Tests Laboratory

ENSAIO DE FLEXÃO (4 PONTOS)
BENDING TEST (FOUR POINTS)

RELATÓRIO DE ENSAIO N.º: 2010/6000912-20.9
Testing Report

Página 1 de 1
Page 1 of 1

Data: 2010-12-23
Date

Processo: 2010/6000912-20
Process

REQUERENTE: ALTO – PERFIS PULTRUDIDOS, LDA
Customer RUA FREI ANTÓNIO MONTENEGRO, 190-A
4465-572 LEÇA DO BALIO

Pedido: Correio electronico
Request

Data: 2010-10-11
Date

Data do ensaio: 2010-12-22
Testing date

EQUIPAMENTO: Máquina universal de ensaios INSTRON 5969 - Catim n.º 10.40.776
Equipment Dispositivo de ensaios de flexão – Catim n.º 4.218.08
Paquímetro MITUTOYO – Catim n.º 08.501015

NORMA ENSAIO: ISO 14125: 1998, método B **NORMA DO PRODUTO:** EN 13706-2: 1998
Reference Standard Product Standard

CONDIÇÕES DE ENSAIO: Condições de acordo com anexo A da ISO 14125 para materiais classe IV:
Test conditions
Distância entre apoios inferiores: 330 mm; Raio dos apoios superiores: 5 mm
Distância entre apoios superiores: 110 mm; Raio dos apoios inferiores: 5 mm

PRODUTO: Perfil pultrudido **DATA DE RECEÇÃO DAS AMOSTRAS:** 2010-09-30
Product Sampling Reception Date

RESISTÊNCIA À FLEXÃO E MODULO DE YOUNG (entre 0,05% e 0,25%)
Flexural strenght and Young's Modulus (between 0,05% and 0,25%)

Ref. dos Provetes SAMPLE REFERENCE	VALORES LIDOS MEASURED VALUES			VALORES CALCULADOS CALCULATED VALUES			
	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força máxima F _M (N)	Secção inicial S ₀ (mm ²)	Tensão de rotura em flexão σ _r (N / mm ²)	Módulo E _f (GPa)	Obs. NOTES
L 60x60x8 – 1	15,3	8,0	915	122,4	308	35,5	1, 2
L 60x60x8 – 2	15,3	8,0	1084	122,4	365	39,1	1, 2
L 60x60x8 – 3	15,1	8,0	1048	120,8	358	34,8	1, 2
L 60x60x8 – 4	15,4	8,0	925	123,2	310	36,6	1, 2
L 60x60x8 – 5	15,5	8,0	1005	124,0	334	35,4	1, 2

OBSERVAÇÕES:

NOTES

1 - O modo de obtenção do provete é da responsabilidade do cliente (dimensões de acordo previstas para Materiais classe IV, com espessura do produto final).

Sampling is customer's responsibility - According ISO 14125 - samples with others thickness

2 - Ensaio realizado à velocidade 5 mm/min (separação das garras)

Speed of testing 5 mm/min (crosshed)

Nota: Os resultados obtidos referem-se apenas às amostras ensaiadas.
This report refers only to the sample tested

TÉCNICO
Technician

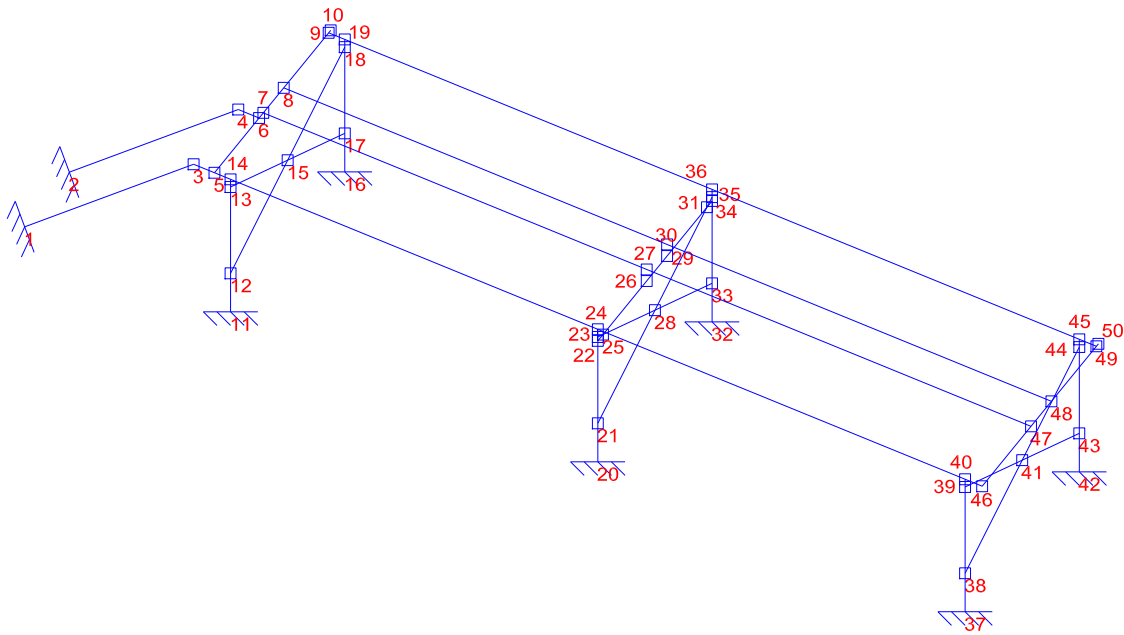
(Avelino Lopes)

RESPONSÁVEL TÉCNICO
Technical responsible

(Pedro Castro)

Este documento não pode ser reproduzido, excepto integralmente, sem autorização por escrito do CATIM

ANEXO 4



1.- Nós

Nós	Coordenadas (m)			Apoios										Ligações
	X	Y	Z	DX	DY	DZ	GX	GY	GZ	L0	EP	DX/DY/DZ	Dep.	
1	0.000	0.000	0.000	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	Encastado
2	0.000	0.820	0.000	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	Encastado
3	1.797	-0.010	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
4	1.797	0.810	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
5	2.018	-0.010	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
6	2.018	0.810	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
7	2.018	0.888	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
8	2.018	1.262	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
9	2.018	2.088	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
10	2.018	2.125	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
11	2.189	-0.010	0.000	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	Encastado
12	2.189	-0.010	0.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
13	2.189	-0.010	1.620	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
14	2.189	-0.010	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
15	2.189	1.039	1.060	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
16	2.189	2.088	0.000	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	Encastado
17	2.189	2.088	0.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
18	2.189	2.088	1.620	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
19	2.189	2.088	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
20	6.083	-0.010	0.000	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	Encastado
21	6.083	-0.010	0.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
22	6.083	-0.010	1.570	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
23	6.083	-0.010	1.620	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
24	6.083	-0.010	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
25	6.083	0.084	1.570	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
26	6.083	0.888	1.570	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado
27	6.083	0.888	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastado

Nós	Coordenadas (m)			Apoios								Ligações		
	X	Y	Z	DX	DY	DZ	GX	GY	GZ	L0	EP		DX/DY/DZ Dep.	
28	6.083	1.039	1.060	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
29	6.083	1.262	1.570	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
30	6.083	1.262	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
31	6.083	1.994	1.570	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
32	6.083	2.088	0.000	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	Encastrado
33	6.083	2.088	0.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
34	6.083	2.088	1.570	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
35	6.083	2.088	1.620	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
36	6.083	2.088	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
37	9.977	-0.010	0.000	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	Encastrado
38	9.977	-0.010	0.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
39	9.977	-0.010	1.620	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
40	9.977	-0.010	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
41	9.977	1.039	1.060	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
42	9.977	2.088	0.000	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	Encastrado
43	9.977	2.088	0.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
44	9.977	2.088	1.620	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
45	9.977	2.088	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
46	10.158	-0.010	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
47	10.158	0.888	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
48	10.158	1.262	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
49	10.158	2.088	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado
50	10.158	2.125	1.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Encastrado

2.- Cargas (Nós)

Nós	Hipót.	Tipo	Cargas				Direcção		
			P1	P2	L1 (m)	L2 (m)	X	Y	Z
8	1 (PP 1)	Pontual	1.000 kN	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
9	1 (PP 1)	Pontual	1.000 kN	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
30	1 (PP 1)	Pontual	1.000 kN	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
36	1 (PP 1)	Pontual	1.000 kN	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
48	1 (PP 1)	Pontual	1.000 kN	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
49	1 (PP 1)	Pontual	1.000 kN	-	-	-	0.000	0.000	-1.000

3.- Cargas (Barras)

Barras	Hipót.	Tipo	Cargas				Direcção		
			P1	P2	L1 (m)	L2 (m)	X	Y	Z
1/3	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
1/3	2 (SC 1)	Uniforme	0.933 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
2/4	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
2/4	2 (SC 1)	Uniforme	0.933 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
3/5	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
3/5	2 (SC 1)	Uniforme	0.933 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
4/6	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
4/6	2 (SC 1)	Uniforme	0.933 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
5/6	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000

Barras	Hipót.	Tipo	Cargas				Direcção		
			P1	P2	L1 (m)	L2 (m)	X	Y	Z
5/14	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
5/14	2 (SC 1)	Uniforme	0.933 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
6/7	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
7/8	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
7/27	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
7/27	2 (SC 1)	Uniforme	0.933 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
8/9	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
8/30	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
8/30	1 (PP 1)	Pontual	1.000 kN	-	2.030	-	0.000	0.000	-1.000
9/10	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
9/19	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
11/12	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
12/13	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
12/15	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
13/14	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
15/13	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
14/24	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
14/24	2 (SC 1)	Uniforme	0.933 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
17/15	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
15/18	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
16/17	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
17/18	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
18/19	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
19/36	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
19/36	1 (PP 1)	Pontual	1.000 kN	-	1.850	-	0.000	0.000	-1.000
20/21	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
21/22	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
21/28	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
22/23	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
22/25	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
23/24	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
25/23	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
24/40	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
24/40	2 (SC 1)	Uniforme	0.933 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
25/26	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
28/25	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
26/29	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
27/47	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
27/47	2 (SC 1)	Uniforme	0.933 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
28/31	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
33/28	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
29/31	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
30/48	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
30/48	1 (PP 1)	Pontual	1.000 kN	-	2.030	-	0.000	0.000	-1.000
31/34	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
31/35	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
32/33	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
33/34	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000

Barras	Hipót.	Tipo	Cargas				Direcção		
			P1	P2	L1 (m)	L2 (m)	X	Y	Z
34/35	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
35/36	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
36/45	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
36/45	1 (PP 1)	Pontual	1.000 kN	-	2.030	-	0.000	0.000	-1.000
37/38	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
38/39	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
38/41	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
39/40	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
41/39	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
40/46	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
40/46	2 (SC 1)	Uniforme	0.933 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
43/41	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
41/44	1 (PP 1)	Uniforme	0.016 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
42/43	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
43/44	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
44/45	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
45/49	1 (PP 1)	Uniforme	0.041 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
46/47	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
47/48	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
48/49	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000
49/50	1 (PP 1)	Uniforme	0.023 kN/m	-	-	-	0.000	0.000	-1.000

4.- Esforços

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
1/3		0.000 m	0.622 m	1.244 m	1.866 m	2.488 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-1.3326	-0.7162	-0.0998	0.5167	1.1331
	Ty	-0.0025	-0.0025	-0.0025	-0.0025	-0.0025
	Tz	-1.4801	-0.8361	-0.1921	0.4520	1.0960
	Mt	-0.0006	-0.0006	-0.0006	-0.0006	-0.0006
	My	-0.7148	0.0054	0.3251	0.2442	-0.2371
	Mz	-0.0005	0.0010	0.0026	0.0041	0.0056
2/4		0.000 m	0.622 m	1.244 m	1.866 m	2.488 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-3.9584	-3.3419	-2.7255	-2.1091	-1.4927
	Ty	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014
	Tz	1.7384	1.0944	0.4503	-0.1937	-0.8377
	Mt	-0.0002	-0.0002	-0.0002	-0.0002	-0.0002
	My	1.1950	0.3142	-0.1661	-0.2459	0.0748
	Mz	0.0007	-0.0002	-0.0011	-0.0020	-0.0029
3/5		0.000 m	0.055 m	0.111 m	0.166 m	0.221 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.0607	0.0607	0.0607	0.0607	0.0607
	Ty	-0.0028	-0.0028	-0.0028	-0.0028	-0.0028
	Tz	1.5752	1.6545	1.7337	1.8129	1.8921
	Mt	-0.0030	-0.0030	-0.0030	-0.0030	-0.0030

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	My	-0.2369	-0.3262	-0.4198	-0.5178	-0.6202
	Mz	0.0037	0.0038	0.0040	0.0042	0.0043
4/6		0.000 m	0.055 m	0.111 m	0.166 m	0.221 m
	Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1					
	N	-1.6576	-1.6576	-1.6576	-1.6576	-1.6576
	Ty	-0.0078	-0.0078	-0.0078	-0.0078	-0.0078
	Tz	0.4269	0.3477	0.2685	0.1893	0.1100
	Mt	-0.0017	-0.0017	-0.0017	-0.0017	-0.0017
	My	0.0747	0.0533	0.0363	0.0236	0.0154
	Mz	-0.0020	-0.0016	-0.0012	-0.0007	-0.0003
5/6		0.000 m	0.205 m	0.410 m	0.615 m	0.820 m
	Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1					
	N	-0.5161	-0.5161	-0.5161	-0.5161	-0.5161
	Ty	0.3183	0.3183	0.3183	0.3183	0.3183
	Tz	2.0749	2.0680	2.0610	2.0540	2.0470
	Mt	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
	My	0.0539	-0.3708	-0.7940	-1.2158	-1.6361
	Mz	0.1135	0.0482	-0.0170	-0.0823	-0.1475
5/14		0.000 m	0.043 m	0.086 m	0.128 m	0.171 m
	Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1					
	N	-0.2576	-0.2576	-0.2576	-0.2576	-0.2576
	Ty	0.5133	0.5133	0.5133	0.5133	0.5133
	Tz	3.9671	4.0284	4.0897	4.1509	4.2122
	Mt	0.0094	0.0094	0.0094	0.0094	0.0094
	My	-0.6195	-0.7904	-0.9639	-1.1401	-1.3188
	Mz	0.1114	0.0895	0.0676	0.0456	0.0237
6/7		0.000 m	0.019 m	0.039 m	0.058 m	0.078 m
	Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1					
	N	-0.5083	-0.5083	-0.5083	-0.5083	-0.5083
	Ty	-1.3392	-1.3392	-1.3392	-1.3392	-1.3392
	Tz	2.1571	2.1564	2.1557	2.1551	2.1544
	Mt	0.0160	0.0160	0.0160	0.0160	0.0160
	My	-1.6366	-1.6784	-1.7202	-1.7619	-1.8037
	Mz	-0.1147	-0.0887	-0.0628	-0.0368	-0.0109
7/8		0.000 m	0.094 m	0.187 m	0.281 m	0.375 m
	Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1					
	N	-0.5049	-0.5049	-0.5049	-0.5049	-0.5049
	Ty	0.0938	0.0938	0.0938	0.0938	0.0938
	Tz	-0.0905	-0.0937	-0.0969	-0.1001	-0.1033
	Mt	-0.0025	-0.0025	-0.0025	-0.0025	-0.0025
	My	-1.8037	-1.7951	-1.7861	-1.7769	-1.7674
	Mz	-0.0174	-0.0262	-0.0350	-0.0438	-0.0526
7/27		0.000 m	1.016 m	2.033 m	3.049 m	4.065 m
	Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1					
	N	-1.4331	-1.4331	-1.4331	-1.4331	-1.4331
	Ty	-0.0034	-0.0034	-0.0034	-0.0034	-0.0034
	Tz	-2.2449	-0.7599	0.7252	2.2103	3.6954
Mt	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	My	-0.0186	1.5082	1.5258	0.0342	-2.9666
	Mz	-0.0065	-0.0031	0.0004	0.0038	0.0073
8/9		0.000 m	0.206 m	0.413 m	0.619 m	0.825 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.4949	-0.4949	-0.4949	-0.4949	-0.4949
	Ty	-0.2485	-0.2485	-0.2485	-0.2485	-0.2485
	Tz	-2.1745	-2.1815	-2.1885	-2.1955	-2.2026
	Mt	-0.0008	-0.0008	-0.0008	-0.0008	-0.0008
	My	-1.7674	-1.3182	-0.8675	-0.4154	0.0382
	Mz	-0.0929	-0.0416	0.0096	0.0609	0.1121
8/30		0.000 m	1.016 m	2.033 m	3.049 m	4.065 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.3423	0.3423	0.3423	0.3423	0.3423
	Ty	-0.0100	-0.0100	-0.0100	-0.0100	-0.0100
	Tz	-0.5712	-0.5084	1.0544	1.1173	1.1801
	Mt	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
	My	0.0018	0.5503	1.0313	-0.0722	-1.2396
	Mz	-0.0403	-0.0301	-0.0199	-0.0097	0.0005
9/10		0.000 m	0.009 m	0.019 m	0.028 m	0.038 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Ty	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
	Tz	0.0013	0.0010	0.0006	0.0003	0.0000
	Mt	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	My	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Mz	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
9/19		0.000 m	0.043 m	0.086 m	0.128 m	0.171 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.2485	-0.2485	-0.2485	-0.2485	-0.2485
	Ty	-0.4949	-0.4949	-0.4949	-0.4949	-0.4949
	Tz	3.7038	3.7065	3.7091	3.7118	3.7144
	Mt	-0.0382	-0.0382	-0.0382	-0.0382	-0.0382
	My	0.0008	-0.1576	-0.3161	-0.4747	-0.6335
	Mz	-0.1121	-0.0910	-0.0698	-0.0487	-0.0275
11/12		0.000 m	0.125 m	0.250 m	0.375 m	0.500 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-7.0696	-7.0619	-7.0541	-7.0464	-7.0387
	Ty	0.2049	0.2049	0.2049	0.2049	0.2049
	Tz	0.2523	0.2523	0.2523	0.2523	0.2523
	Mt	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
	My	0.0710	0.0395	0.0079	-0.0236	-0.0551
	Mz	0.0479	0.0222	-0.0034	-0.0290	-0.0546
12/13		0.000 m	0.280 m	0.560 m	0.840 m	1.120 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-7.2095	-7.1922	-7.1749	-7.1576	-7.1403
	Ty	-0.1105	-0.1105	-0.1105	-0.1105	-0.1105
	Mt	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	My	-0.0543	-0.1272	-0.2000	-0.2729	-0.3458
	Mz	-0.0504	-0.0194	0.0115	0.0425	0.0734
12/15		0.000 m	0.297 m	0.594 m	0.892 m	1.189 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.3588	0.3620	0.3653	0.3686	0.3718
	Ty	0.0079	0.0079	0.0079	0.0079	0.0079
	Tz	-0.0021	-0.0082	-0.0143	-0.0205	-0.0266
	Mt	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	My	-0.0042	-0.0027	0.0007	0.0058	0.0128
	Mz	0.0015	-0.0009	-0.0032	-0.0056	-0.0079
13/14		0.000 m	0.025 m	0.050 m	0.075 m	0.100 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-6.9559	-6.9544	-6.9528	-6.9513	-6.9497
	Ty	-0.5079	-0.5079	-0.5079	-0.5079	-0.5079
	Tz	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506	0.2506
	Mt	-0.0073	-0.0073	-0.0073	-0.0073	-0.0073
	My	-0.3418	-0.3481	-0.3544	-0.3606	-0.3669
	Mz	0.0981	0.1108	0.1235	0.1362	0.1489
15/13		0.000 m	0.297 m	0.594 m	0.892 m	1.189 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.4243	0.4276	0.4308	0.4341	0.4374
	Ty	-0.0097	-0.0097	-0.0097	-0.0097	-0.0097
	Tz	0.0490	0.0429	0.0368	0.0307	0.0246
	Mt	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001
	My	0.0191	0.0054	-0.0064	-0.0165	-0.0247
	Mz	-0.0029	-0.0000	0.0029	0.0057	0.0086
14/24		0.000 m	0.974 m	1.947 m	2.921 m	3.894 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.5082	-0.5082	-0.5082	-0.5082	-0.5082
	Ty	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054	0.0054
	Tz	-2.7375	-1.3420	0.0536	1.4491	2.8447
	Mt	-0.0005	-0.0005	-0.0005	-0.0005	-0.0005
	My	-1.6857	0.2999	0.9270	0.1956	-1.8944
	Mz	0.0113	0.0061	0.0009	-0.0043	-0.0095
17/15		0.000 m	0.297 m	0.594 m	0.892 m	1.189 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.2973	0.3006	0.3039	0.3071	0.3104
	Ty	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031
	Tz	-0.0141	-0.0202	-0.0264	-0.0325	-0.0386
	Mt	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	My	-0.0134	-0.0083	-0.0014	0.0074	0.0179
	Mz	0.0007	-0.0002	-0.0011	-0.0020	-0.0029
15/18		0.000 m	0.297 m	0.594 m	0.892 m	1.189 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.5080	0.5113	0.5146	0.5178	0.5211
	Ty	-0.0048	-0.0048	-0.0048	-0.0048	-0.0048
	Tz	0.0194	0.0132	0.0071	0.0010	-0.0051
	Mt	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	My	0.0140	0.0091	0.0061	0.0049	0.0055
	Mz	-0.0080	-0.0066	-0.0052	-0.0038	-0.0023
16/17		0.000 m	0.125 m	0.250 m	0.375 m	0.500 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-4.7712	-4.7634	-4.7557	-4.7480	-4.7402
	Ty	-0.2298	-0.2298	-0.2298	-0.2298	-0.2298
	Tz	-0.0624	-0.0624	-0.0624	-0.0624	-0.0624
	Mt	-0.0004	-0.0004	-0.0004	-0.0004	-0.0004
	My	-0.1470	-0.1392	-0.1314	-0.1236	-0.1158
	Mz	-0.0695	-0.0408	-0.0120	0.0167	0.0454
17/18		0.000 m	0.280 m	0.560 m	0.840 m	1.120 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-4.8927	-4.8754	-4.8581	-4.8408	-4.8235
	Ty	0.0258	0.0258	0.0258	0.0258	0.0258
	Tz	-0.0655	-0.0655	-0.0655	-0.0655	-0.0655
	Mt	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
	My	-0.1162	-0.0979	-0.0795	-0.0612	-0.0429
	Mz	0.0320	0.0247	0.0175	0.0103	0.0030
18/19		0.000 m	0.025 m	0.050 m	0.075 m	0.100 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-4.5735	-4.5720	-4.5704	-4.5689	-4.5674
	Ty	0.4831	0.4831	0.4831	0.4831	0.4831
	Tz	-0.0607	-0.0607	-0.0607	-0.0607	-0.0607
	Mt	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024
	My	-0.0418	-0.0403	-0.0388	-0.0373	-0.0358
	Mz	0.0085	-0.0036	-0.0156	-0.0277	-0.0398
19/36		0.000 m	0.974 m	1.947 m	2.921 m	3.894 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.1878	-0.1878	-0.1878	-0.1878	-0.1878
	Ty	-0.0118	-0.0118	-0.0118	-0.0118	-0.0118
	Tz	-0.8529	-0.7927	0.7674	0.8276	0.8878
	Mt	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016
	My	-0.6692	0.1318	0.7287	-0.0477	-0.8827
	Mz	-0.0251	-0.0137	-0.0022	0.0093	0.0207
20/21		0.000 m	0.125 m	0.250 m	0.375 m	0.500 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-11.6132	-11.6055	-11.5977	-11.5900	-11.5823
	Ty	-0.1790	-0.1790	-0.1790	-0.1790	-0.1790
	Tz	-0.0835	-0.0835	-0.0835	-0.0835	-0.0835
	Mt	-0.0017	-0.0017	-0.0017	-0.0017	-0.0017
	My	-0.1018	-0.0913	-0.0809	-0.0705	-0.0600
	Mz	-0.1246	-0.1023	-0.0799	-0.0575	-0.0351
21/22		0.000 m	0.268 m	0.535 m	0.802 m	1.070 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-11.6950	-11.6784	-11.6619	-11.6454	-11.6288
	Ty	-0.5744	-0.5744	-0.5744	-0.5744	-0.5744
	Tz	-0.0415	-0.0415	-0.0415	-0.0415	-0.0415
	Mt	-0.0023	-0.0023	-0.0023	-0.0023	-0.0023

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	My	-0.0596	-0.0485	-0.0374	-0.0263	-0.0152
	Mz	-0.1079	0.0458	0.1994	0.3531	0.5068
21/28		0.000 m	0.297 m	0.594 m	0.892 m	1.189 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.4019	0.4052	0.4084	0.4117	0.4150
	Ty	0.0419	0.0419	0.0419	0.0419	0.0419
	Tz	0.0868	0.0807	0.0746	0.0685	0.0624
	Mt	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
	My	0.0727	0.0478	0.0247	0.0035	-0.0160
	Mz	-0.0003	-0.0128	-0.0253	-0.0377	-0.0502
22/23		0.000 m	0.012 m	0.025 m	0.037 m	0.050 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-7.0125	-7.0118	-7.0110	-7.0102	-7.0095
	Ty	0.6310	0.6310	0.6310	0.6310	0.6310
	Tz	-1.1978	-1.1978	-1.1978	-1.1978	-1.1978
	Mt	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041
	My	0.0005	0.0154	0.0304	0.0454	0.0603
	Mz	0.1368	0.1289	0.1210	0.1131	0.1052
22/25		0.000 m	0.023 m	0.047 m	0.070 m	0.094 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-1.2054	-1.2054	-1.2054	-1.2054	-1.2054
	Ty	1.1562	1.1562	1.1562	1.1562	1.1562
	Tz	-4.6163	-4.6148	-4.6134	-4.6119	-4.6105
	Mt	0.0157	0.0157	0.0157	0.0157	0.0157
	My	-0.3700	-0.2619	-0.1539	-0.0459	0.0620
	Mz	-0.0064	-0.0335	-0.0606	-0.0876	-0.1147
23/24		0.000 m	0.025 m	0.050 m	0.075 m	0.100 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-5.7135	-5.7120	-5.7104	-5.7089	-5.7073
	Ty	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017
	Tz	0.4088	0.4088	0.4088	0.4088	0.4088
	Mt	0.0278	0.0278	0.0278	0.0278	0.0278
	My	0.0537	0.0435	0.0333	0.0231	0.0128
	Mz	0.1135	0.1134	0.1134	0.1134	0.1133
25/23		0.000 m	0.027 m	0.053 m	0.080 m	0.106 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	1.1643	1.1646	1.1649	1.1652	1.1655
	Ty	1.6066	1.6066	1.6066	1.6066	1.6066
	Tz	-0.8446	-0.8451	-0.8457	-0.8462	-0.8468
	Mt	0.0053	0.0053	0.0053	0.0053	0.0053
	My	-0.0980	-0.0756	-0.0532	-0.0307	-0.0083
	Mz	0.1465	0.1039	0.0612	0.0186	-0.0240
24/40		0.000 m	0.973 m	1.947 m	2.920 m	3.894 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.9170	-0.9170	-0.9170	-0.9170	-0.9170
	Ty	0.0071	0.0071	0.0071	0.0071	0.0071
	Tz	-2.8627	-1.4671	-0.0716	1.3240	2.7195
	Mt	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	My	-1.8816	0.2259	0.9749	0.3653	-1.6029
	Mz	0.0101	0.0032	-0.0037	-0.0106	-0.0175
25/26		0.000 m	0.201 m	0.402 m	0.603 m	0.804 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-1.5181	-1.5181	-1.5181	-1.5181	-1.5181
	Ty	-0.6156	-0.6156	-0.6156	-0.6156	-0.6156
	Tz	-5.7971	-5.7846	-5.7722	-5.7598	-5.7474
	Mt	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010
	My	-0.1477	1.0161	2.1773	3.3361	4.4923
	Mz	-0.1591	-0.0354	0.0883	0.2120	0.3357
28/25		0.000 m	0.271 m	0.541 m	0.812 m	1.083 m
		Combinação 1 (Genérica): PP1				
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.8694	0.8724	0.8753	0.8783	0.8813
	Ty	-0.1653	-0.1653	-0.1653	-0.1653	-0.1653
	Tz	0.3717	0.3661	0.3606	0.3550	0.3494
	Mt	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
	My	0.0827	-0.0172	-0.1156	-0.2124	-0.3077
	Mz	0.0146	0.0594	0.1041	0.1488	0.1936
26/29		0.000 m	0.094 m	0.187 m	0.281 m	0.375 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-1.5288	-1.5288	-1.5288	-1.5288	-1.5288
	Ty	0.5519	0.5519	0.5519	0.5519	0.5519
	Tz	1.6414	1.6472	1.6530	1.6588	1.6646
	Mt	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010
	My	4.4924	4.3382	4.1835	4.0283	3.8725
	Mz	0.3357	0.2840	0.2322	0.1805	0.1288
27/47		0.000 m	1.019 m	2.038 m	3.056 m	4.075 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.2655	-0.2655	-0.2655	-0.2655	-0.2655
	Ty	0.0072	0.0072	0.0072	0.0072	0.0072
	Tz	-3.6933	-2.2046	-0.7159	0.7728	2.2616
	Mt	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
	My	-2.9666	0.0377	1.5253	1.4963	-0.0493
	Mz	0.0073	-0.0001	-0.0075	-0.0149	-0.0222
28/31		0.000 m	0.271 m	0.541 m	0.812 m	1.083 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.9231	0.9261	0.9290	0.9320	0.9350
	Ty	-0.1056	-0.1056	-0.1056	-0.1056	-0.1056
	Tz	0.3280	0.3224	0.3169	0.3113	0.3057
	Mt	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	My	0.1226	0.0345	-0.0520	-0.1370	-0.2205
	Mz	-0.0502	-0.0216	0.0069	0.0355	0.0641
33/28		0.000 m	0.297 m	0.594 m	0.892 m	1.189 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.3529	0.3562	0.3594	0.3627	0.3660
	Ty	-0.0177	-0.0177	-0.0177	-0.0177	-0.0177
	Tz	0.1217	0.1156	0.1095	0.1034	0.0972

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	Mt	-0.0006	-0.0006	-0.0006	-0.0006	-0.0006
	My	0.0743	0.0390	0.0056	-0.0261	-0.0559
	Mz	-0.0060	-0.0007	0.0045	0.0098	0.0151
29/31		0.000 m	0.183 m	0.366 m	0.549 m	0.731 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-1.5294	-1.5294	-1.5294	-1.5294	-1.5294
	Ty	0.1227	0.1227	0.1227	0.1227	0.1227
	Tz	5.5178	5.5291	5.5404	5.5517	5.5630
	Mt	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010
	My	3.8725	2.8626	1.8506	0.8366	-0.1796
	Mz	0.1288	0.1063	0.0839	0.0615	0.0390
30/48		0.000 m	1.019 m	2.038 m	3.056 m	4.075 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.0870	-0.0870	-0.0870	-0.0870	-0.0870
	Ty	-0.0094	-0.0094	-0.0094	-0.0094	-0.0094
	Tz	-1.1731	-1.1102	0.4528	0.5158	0.5788
	Mt	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
	My	-1.2396	-0.0765	1.0111	0.5177	-0.0398
	Mz	0.0005	0.0102	0.0198	0.0294	0.0390
31/34		0.000 m	0.023 m	0.047 m	0.070 m	0.094 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-1.7978	-1.7978	-1.7978	-1.7978	-1.7978
	Ty	0.3444	0.3444	0.3444	0.3444	0.3444
	Tz	4.3161	4.3175	4.3189	4.3204	4.3218
	Mt	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043
	My	-0.0239	-0.1249	-0.2260	-0.3271	-0.4283
	Mz	0.0272	0.0191	0.0111	0.0030	-0.0051
31/35		0.000 m	0.027 m	0.053 m	0.080 m	0.106 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	1.7591	1.7594	1.7597	1.7600	1.7603
	Ty	0.1161	0.1161	0.1161	0.1161	0.1161
	Tz	-0.6678	-0.6684	-0.6689	-0.6695	-0.6700
	Mt	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
	My	-0.0648	-0.0471	-0.0294	-0.0116	0.0062
	Mz	0.0512	0.0481	0.0450	0.0419	0.0388
32/33		0.000 m	0.125 m	0.250 m	0.375 m	0.500 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-8.9712	-8.9635	-8.9557	-8.9480	-8.9403
	Ty	0.1897	0.1897	0.1897	0.1897	0.1897
	Tz	-0.3061	-0.3061	-0.3061	-0.3061	-0.3061
	Mt	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060
	My	-0.2778	-0.2395	-0.2013	-0.1630	-0.1247
	Mz	0.1242	0.1005	0.0768	0.0531	0.0294
33/34		0.000 m	0.268 m	0.535 m	0.802 m	1.070 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-8.9991	-8.9826	-8.9661	-8.9495	-8.9330
	Ty	0.5583	0.5583	0.5583	0.5583	0.5583
	Tz	-0.2884	-0.2884	-0.2884	-0.2884	-0.2884

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	Mt	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
	My	-0.1214	-0.0443	0.0329	0.1100	0.1872
	Mz	0.1036	-0.0457	-0.1951	-0.3444	-0.4938
34/35		0.000 m	0.012 m	0.025 m	0.037 m	0.050 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-4.6111	-4.6104	-4.6096	-4.6088	-4.6080
	Ty	-1.2394	-1.2394	-1.2394	-1.2394	-1.2394
	Tz	0.0560	0.0560	0.0560	0.0560	0.0560
	Mt	-0.0041	-0.0041	-0.0041	-0.0041	-0.0041
	My	0.1828	0.1821	0.1814	0.1807	0.1800
	Mz	-0.0655	-0.0500	-0.0345	-0.0190	-0.0035
35/36		0.000 m	0.025 m	0.050 m	0.075 m	0.100 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-3.1879	-3.1863	-3.1848	-3.1832	-3.1817
	Ty	-0.0022	-0.0022	-0.0022	-0.0022	-0.0022
	Tz	-0.0601	-0.0601	-0.0601	-0.0601	-0.0601
	Mt	-0.0379	-0.0379	-0.0379	-0.0379	-0.0379
	My	0.1609	0.1624	0.1639	0.1654	0.1669
	Mz	0.0026	0.0027	0.0028	0.0028	0.0029
36/45		0.000 m	0.973 m	1.947 m	2.920 m	3.894 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.1277	-0.1277	-0.1277	-0.1277	-0.1277
	Ty	-0.0140	-0.0140	-0.0140	-0.0140	-0.0140
	Tz	-0.7938	-0.7337	-0.6735	0.8867	0.9469
	Mt	-0.0012	-0.0012	-0.0012	-0.0012	-0.0012
	My	-0.7158	0.0277	0.7127	0.0032	-0.8893
	Mz	-0.0172	-0.0035	0.0102	0.0238	0.0375
37/38		0.000 m	0.125 m	0.250 m	0.375 m	0.500 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-5.2502	-5.2425	-5.2347	-5.2270	-5.2193
	Ty	-0.2771	-0.2771	-0.2771	-0.2771	-0.2771
	Tz	-1.0758	-1.0758	-1.0758	-1.0758	-1.0758
	Mt	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
	My	-0.6308	-0.4963	-0.3618	-0.2274	-0.0929
	Mz	-0.0927	-0.0581	-0.0235	0.0112	0.0458
38/39		0.000 m	0.280 m	0.560 m	0.840 m	1.120 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-5.0430	-5.0257	-5.0084	-4.9911	-4.9738
	Ty	-0.0638	-0.0638	-0.0638	-0.0638	-0.0638
	Tz	-1.0764	-1.0764	-1.0764	-1.0764	-1.0764
	Mt	-0.0003	-0.0003	-0.0003	-0.0003	-0.0003
	My	-0.0935	0.2079	0.5093	0.8107	1.1121
	Mz	0.0150	0.0328	0.0507	0.0686	0.0864
38/41		0.000 m	0.297 m	0.594 m	0.892 m	1.189 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.2712	-0.2679	-0.2647	-0.2614	-0.2581
	Ty	-0.0007	-0.0007	-0.0007	-0.0007	-0.0007
	Tz	0.0550	0.0489	0.0428	0.0366	0.0305

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	Mt	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001
	My	0.0308	0.0154	0.0018	-0.0100	-0.0200
	Mz	-0.0011	-0.0009	-0.0007	-0.0005	-0.0003
39/40		0.000 m	0.025 m	0.050 m	0.075 m	0.100 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-5.1433	-5.1417	-5.1402	-5.1386	-5.1371
	Ty	0.2017	0.2017	0.2017	0.2017	0.2017
	Tz	-1.0857	-1.0857	-1.0857	-1.0857	-1.0857
	Mt	-0.0234	-0.0234	-0.0234	-0.0234	-0.0234
	My	1.1249	1.1520	1.1792	1.2063	1.2335
	Mz	0.1308	0.1258	0.1207	0.1157	0.1106
41/39		0.000 m	0.297 m	0.594 m	0.892 m	1.189 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.3271	-0.3238	-0.3206	-0.3173	-0.3140
	Ty	-0.0093	-0.0093	-0.0093	-0.0093	-0.0093
	Tz	0.0489	0.0428	0.0367	0.0306	0.0245
	Mt	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
	My	-0.0007	-0.0144	-0.0262	-0.0362	-0.0444
	Mz	0.0154	0.0181	0.0209	0.0237	0.0264
40/46		0.000 m	0.045 m	0.091 m	0.136 m	0.181 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.1688	0.1688	0.1688	0.1688	0.1688
	Ty	0.2088	0.2088	0.2088	0.2088	0.2088
	Tz	-2.4176	-2.3527	-2.2878	-2.2230	-2.1581
	Mt	-0.0075	-0.0075	-0.0075	-0.0075	-0.0075
	My	-0.3695	-0.2615	-0.1565	-0.0545	0.0446
	Mz	-0.0192	-0.0287	-0.0381	-0.0476	-0.0570
43/41		0.000 m	0.297 m	0.594 m	0.892 m	1.189 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.3446	-0.3413	-0.3381	-0.3348	-0.3315
	Ty	-0.0151	-0.0151	-0.0151	-0.0151	-0.0151
	Tz	0.0557	0.0496	0.0435	0.0374	0.0312
	Mt	-0.0002	-0.0002	-0.0002	-0.0002	-0.0002
	My	0.0264	0.0108	-0.0030	-0.0151	-0.0253
	Mz	-0.0024	0.0021	0.0066	0.0111	0.0155
41/44		0.000 m	0.297 m	0.594 m	0.892 m	1.189 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-0.2410	-0.2377	-0.2344	-0.2312	-0.2279
	Ty	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051
	Tz	0.0244	0.0182	0.0121	0.0060	-0.0001
	Mt	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	My	0.0045	-0.0018	-0.0063	-0.0090	-0.0099
	Mz	0.0002	-0.0013	-0.0028	-0.0043	-0.0058
42/43		0.000 m	0.125 m	0.250 m	0.375 m	0.500 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-4.9236	-4.9159	-4.9082	-4.9005	-4.8927
	Ty	0.2862	0.2862	0.2862	0.2862	0.2862
	Tz	-0.3214	-0.3214	-0.3214	-0.3214	-0.3214

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	Mt	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020
	My	-0.2843	-0.2441	-0.2039	-0.1637	-0.1235
	Mz	0.0878	0.0520	0.0162	-0.0196	-0.0554
43/44		0.000 m	0.280 m	0.560 m	0.840 m	1.120 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	-4.6813	-4.6639	-4.6466	-4.6293	-4.6120
	Ty	0.0085	0.0085	0.0085	0.0085	0.0085
	Tz	-0.3063	-0.3063	-0.3063	-0.3063	-0.3063
	Mt	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
	My	-0.1223	-0.0365	0.0493	0.1350	0.2208
	Mz	-0.0289	-0.0313	-0.0337	-0.0361	-0.0384
	44/45		0.000 m	0.025 m	0.050 m	0.075 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
N		-4.7192	-4.7177	-4.7162	-4.7146	-4.7131
Ty		-0.1926	-0.1926	-0.1926	-0.1926	-0.1926
Tz		-0.3114	-0.3114	-0.3114	-0.3114	-0.3114
Mt		0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051
My		0.2235	0.2313	0.2391	0.2469	0.2546
Mz		-0.0483	-0.0435	-0.0387	-0.0339	-0.0291
45/49			0.000 m	0.045 m	0.091 m	0.136 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.1837	0.1837	0.1837	0.1837	0.1837
	Ty	-0.2066	-0.2066	-0.2066	-0.2066	-0.2066
	Tz	-3.7661	-3.7633	-3.7605	-3.7578	-3.7550
	Mt	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279	0.0279
	My	-0.6346	-0.4643	-0.2941	-0.1240	0.0460
	Mz	0.0426	0.0519	0.0613	0.0706	0.0800
	46/47		0.000 m	0.224 m	0.449 m	0.673 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
N		0.2088	0.2088	0.2088	0.2088	0.2088
Ty		-0.1688	-0.1688	-0.1688	-0.1688	-0.1688
Tz		-2.1581	-2.1505	-2.1428	-2.1352	-2.1275
Mt		-0.0015	-0.0015	-0.0015	-0.0015	-0.0015
My		-0.0507	0.4327	0.9143	1.3943	1.8725
Mz		-0.0562	-0.0183	0.0195	0.0574	0.0953
47/48			0.000 m	0.094 m	0.187 m	0.281 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.2160	0.2160	0.2160	0.2160	0.2160
	Ty	0.0967	0.0967	0.0967	0.0967	0.0967
	Tz	0.1340	0.1372	0.1404	0.1436	0.1468
	Mt	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026	0.0026
	My	1.8725	1.8598	1.8467	1.8334	1.8198
	Mz	0.0732	0.0641	0.0550	0.0460	0.0369
	48/49		0.000 m	0.206 m	0.413 m	0.619 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
N		0.2066	0.2066	0.2066	0.2066	0.2066
Ty		0.1837	0.1837	0.1837	0.1837	0.1837
Tz		2.2256	2.2326	2.2396	2.2467	2.2537

Barras	Esf.	ESFORÇOS (EIXOS LOCAIS) (kN)(kN·m)				
		0 L	1/4 L	1/2 L	3/4 L	1 L
	Mt	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
	My	1.8198	1.3601	0.8989	0.4362	-0.0279
	Mz	0.0757	0.0378	-0.0001	-0.0380	-0.0759
49/50		0.000 m	0.009 m	0.019 m	0.028 m	0.038 m
		Combinação 4 (Genérica): 1.5·PP1+1.5·SC1				
	N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Ty	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Tz	-0.0013	-0.0010	-0.0006	-0.0003	-0.0000
	Mt	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
	My	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
	Mz	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000

5.- Flechas (Barras)

Barra s	Flecha máxima Absoluta y		Flecha máxima Absoluta z		Flecha activa Absoluta y		Flecha activa Absoluta z	
	Flecha máxima Relativa y		Flecha máxima Relativa z		Flecha activa Relativa y		Flecha activa Relativa z	
	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)
1/3	1.493	0.40	1.368	1.39	1.493	0.28	1.368	1.29
	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)
2/4	1.493	0.18	1.244	0.58	1.493	0.07	1.617	1.02
	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)
3/5	0.221	0.77	0.000	0.11	0.221	0.49	0.221	0.09
	-	L/(>1000)	0.000	L/488	-	L/(>1000)	0.000	L/444
4/6	-	0.00	0.221	0.07	-	0.00	0.221	0.04
	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)
5/6	0.820	4.58	0.820	6.07	0.820	3.05	0.820	3.74
	0.820	L/458	0.820	L/350	0.820	L/686	0.820	L/567
5/14	0.171	1.09	0.103	0.13	0.171	0.68	0.077	0.11
	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)
6/7	0.019	4.58	0.078	6.33	0.019	3.06	0.078	3.87
	0.019	L/457	0.078	L/336	0.019	L/686	0.078	L/549
7/8	0.000	4.56	0.187	6.54	0.000	3.04	0.094	3.92
	0.000	L/459	0.187	L/325	0.000	L/689	0.094	L/542
7/27	3.049	0.14	1.829	8.78	3.252	0.11	1.829	8.62
	-	L/(>1000)	1.829	L/927	-	L/(>1000)	1.829	L/943
8/9	0.000	4.06	0.000	6.23	0.000	2.71	0.000	3.59
	0.000	L/515	0.000	L/341	0.000	L/774	0.000	L/591
8/30	1.626	2.12	1.829	4.32	1.626	1.42	4.065	0.76
	-	L/(>1000)	1.829	L/964	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)
9/10	0.000	0.05	0.000	0.33	0.000	0.03	0.000	0.19
	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)
9/19	0.171	0.13	0.171	0.05	0.171	0.09	0.171	0.02
	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)
11/1 2	0.500	0.16	0.500	0.14	0.500	0.09	0.500	0.13
	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)
12/1 3	0.840	0.16	0.560	0.22	0.840	0.19	0.560	0.24
	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)

Barra s	Flecha máxima Absoluta y		Flecha máxima Absoluta z		Flecha activa Absoluta y		Flecha activa Absoluta z	
	Flecha máxima Relativa y		Flecha máxima Relativa z		Flecha activa Relativa y		Flecha activa Relativa z	
	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)
12/1 5	0.892 -	0.16 L/(>1000)	1.189 -	0.39 L/(>1000)	1.040 -	0.13 L/(>1000)	1.189 -	0.25 L/(>1000)
13/1 4	0.000 -	0.10 L/(>1000)	0.000 -	0.07 L/(>1000)	0.000 -	0.10 L/(>1000)	0.000 -	0.08 L/(>1000)
15/1 3	0.000 -	0.23 L/(>1000)	0.000 -	0.41 L/(>1000)	0.000 -	0.16 L/(>1000)	0.000 -	0.29 L/(>1000)
14/2 4	0.584 -	1.40 L/(>1000)	1.947 -	7.79 L/(>1000)	0.584 -	0.82 L/(>1000)	1.947 -	7.68 L/(>1000)
17/1 5	1.189 -	0.23 L/(>1000)	1.189 -	0.41 L/(>1000)	1.189 -	0.16 L/(>1000)	1.189 -	0.29 L/(>1000)
15/1 8	0.000 -	0.14 L/(>1000)	0.149 -	0.40 L/(>1000)	0.000 -	0.12 L/(>1000)	0.149 -	0.27 L/(>1000)
16/1 7	0.500 -	0.28 L/(>1000)	0.500 -	0.12 L/(>1000)	0.500 -	0.19 L/(>1000)	0.375 -	0.04 L/(>1000)
17/1 8	0.280 -	0.34 L/(>1000)	0.560 -	0.13 L/(>1000)	0.280 -	0.24 L/(>1000)	0.840 -	0.03 L/(>1000)
18/1 9	0.000 -	0.06 L/(>1000)	0.000 -	0.04 L/(>1000)	0.000 -	0.05 L/(>1000)	0.000 -	0.02 L/(>1000)
19/3 6	3.699 -	1.41 L/(>1000)	1.947 -	2.31 L/(>1000)	3.699 -	0.90 L/(>1000)	2.531 -	0.07 L/(>1000)
20/2 1	0.500 -	1.02 L/(>1000)	0.500 -	0.06 L/(>1000)	0.500 -	0.66 L/(>1000)	0.500 -	0.04 L/(>1000)
21/2 2	0.669 0.669	2.72 L/632	0.268 -	0.06 L/(>1000)	0.669 0.669	1.81 L/915	0.268 -	0.05 L/(>1000)
21/2 8	1.040 -	2.30 L/(>1000)	1.189 -	1.17 L/(>1000)	1.040 -	1.62 L/(>1000)	1.189 -	0.76 L/(>1000)
22/2 3	0.000 -	1.28 L/(>1000)	0.000 -	0.01 L/(>1000)	0.000 -	0.86 L/(>1000)	0.000 -	0.01 L/(>1000)
22/2 5	0.094 -	0.45 L/(>1000)	0.094 -	0.87 L/(>1000)	0.094 -	0.31 L/(>1000)	0.094 -	0.58 L/(>1000)
23/2 4	0.000 -	0.86 L/(>1000)	0.000 -	0.01 L/(>1000)	0.000 -	0.59 L/(>1000)	0.000 -	0.01 L/(>1000)
25/2 3	0.000 -	0.45 L/(>1000)	0.000 -	0.98 L/(>1000)	0.000 -	0.31 L/(>1000)	0.000 -	0.65 L/(>1000)
24/4 0	2.531 -	2.52 L/(>1000)	1.947 1.947	8.82 L/898	2.531 -	1.82 L/(>1000)	1.947 1.947	8.68 L/947
25/2 6	0.804 0.804	4.50 L/465	0.804 0.804	6.67 L/314	0.804 0.804	3.02 L/686	0.804 0.804	4.32 L/485
28/2 5	0.271 0.271	2.60 L/915	0.677 0.677	2.46 L/783	0.135 -	1.81 L/(>1000)	0.677 -	1.61 L/(>1000)
26/2 9	0.094 0.094	4.57 L/459	0.141 0.141	6.81 L/307	0.094 0.094	3.06 L/676	0.094 0.094	4.35 L/482
27/4 7	2.649 -	0.85 L/(>1000)	2.241 2.241	8.79 L/925	2.649 -	0.55 L/(>1000)	2.241 2.241	8.66 L/940
28/3 1	0.000 -	2.29 L/(>1000)	0.677 0.677	2.43 L/796	0.000 -	1.62 L/(>1000)	0.677 -	1.46 L/(>1000)
33/2	1.189	2.39	1.189	1.15	1.189	1.69	1.189	0.70

Barra s	Flecha máxima Absoluta y		Flecha máxima Absoluta z		Flecha activa Absoluta y		Flecha activa Absoluta z	
	Flecha máxima Relativa y		Flecha máxima Relativa z		Flecha activa Relativa y		Flecha activa Relativa z	
	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)
8	1.189	L/994	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)	-	L/(>1000)
29/3 1	0.000 0.000	4.09 L/512	0.000 0.000	6.35 L/330	0.000 0.000	2.73 L/758	0.000 0.000	3.91 L/536
30/4 8	2.241 -	2.17 L/(>1000)	2.241 2.241	4.19 L/990	2.241 -	1.49 L/(>1000)	0.000 -	0.76 L/(>1000)
31/3 4	0.000 -	0.58 L/(>1000)	0.000 -	0.85 L/(>1000)	0.000 -	0.38 L/(>1000)	0.000 -	0.51 L/(>1000)
31/3 5	0.000 -	0.58 L/(>1000)	0.000 -	0.96 L/(>1000)	0.000 -	0.38 L/(>1000)	0.000 -	0.58 L/(>1000)
32/3 3	0.500 -	1.00 L/(>1000)	0.437 -	0.06 L/(>1000)	0.500 -	0.61 L/(>1000)	0.437 -	0.04 L/(>1000)
33/3 4	0.669 0.669	2.63 L/654	0.000 -	0.06 L/(>1000)	0.669 -	1.59 L/(>1000)	0.000 -	0.04 L/(>1000)
34/3 5	0.000 -	1.20 L/(>1000)	0.000 -	0.02 L/(>1000)	0.000 -	0.72 L/(>1000)	0.000 -	0.02 L/(>1000)
35/3 6	0.000 -	0.80 L/(>1000)	0.000 -	0.02 L/(>1000)	0.000 -	0.48 L/(>1000)	0.000 -	0.01 L/(>1000)
36/4 5	2.336 -	1.93 L/(>1000)	1.947 -	2.19 L/(>1000)	2.336 -	1.22 L/(>1000)	2.920 -	0.27 L/(>1000)
37/3 8	0.500 -	0.46 L/(>1000)	0.500 -	0.19 L/(>1000)	0.500 -	0.31 L/(>1000)	0.500 -	0.23 L/(>1000)
38/3 9	0.560 -	0.75 L/(>1000)	0.700 -	0.49 L/(>1000)	0.560 -	0.53 L/(>1000)	0.700 -	0.54 L/(>1000)
38/4 1	1.189 -	0.47 L/(>1000)	1.189 -	0.60 L/(>1000)	1.189 -	0.34 L/(>1000)	1.189 -	0.41 L/(>1000)
39/4 0	0.000 -	0.23 L/(>1000)	0.000 -	0.17 L/(>1000)	0.000 -	0.17 L/(>1000)	0.000 -	0.19 L/(>1000)
41/3 9	0.149 -	0.66 L/(>1000)	0.446 -	0.68 L/(>1000)	0.149 -	0.51 L/(>1000)	0.594 -	0.45 L/(>1000)
40/4 6	0.000 -	0.68 L/(>1000)	0.000 -	0.45 L/(>1000)	0.000 -	0.48 L/(>1000)	0.000 -	0.43 L/(>1000)
43/4 1	1.189 -	0.65 L/(>1000)	1.189 -	0.60 L/(>1000)	1.189 -	0.50 L/(>1000)	1.189 -	0.39 L/(>1000)
41/4 4	0.297 -	0.47 L/(>1000)	0.000 -	0.60 L/(>1000)	0.000 -	0.34 L/(>1000)	0.000 -	0.41 L/(>1000)
42/4 3	0.500 -	0.40 L/(>1000)	0.375 -	0.06 L/(>1000)	0.500 -	0.26 L/(>1000)	0.500 -	0.07 L/(>1000)
43/4 4	0.420 -	0.55 L/(>1000)	0.700 -	0.09 L/(>1000)	0.420 -	0.35 L/(>1000)	0.280 -	0.08 L/(>1000)
44/4 5	0.000 -	0.14 L/(>1000)	0.000 -	0.04 L/(>1000)	0.000 -	0.08 L/(>1000)	0.000 -	0.02 L/(>1000)
45/4 9	0.000 -	0.43 L/(>1000)	0.000 -	0.09 L/(>1000)	0.000 -	0.28 L/(>1000)	0.000 -	0.09 L/(>1000)
46/4 7	0.898 0.898	4.59 L/461	0.898 0.898	6.58 L/323	0.898 0.898	3.10 L/681	0.898 0.898	3.40 L/625
47/4 8	0.094 0.094	4.64 L/456	0.187 0.187	6.79 L/313	0.094 0.094	3.13 L/675	0.094 0.094	3.44 L/617

Barra s	Flecha máxima Absoluta y Flecha máxima Relativa y		Flecha máxima Absoluta z Flecha máxima Relativa z		Flecha activa Absoluta y Flecha activa Relativa y		Flecha activa Absoluta z Flecha activa Relativa z	
	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)	Pos. (m)	Flecha (mm)
	48/4 9	0.000 0.000	4.18 L/506	0.000 0.000	6.46 L/329	0.000 0.000	2.81 L/752	0.000 0.000
49/5 0	0.000 -	0.11 L/(>1000)	0.000 -	0.34 L/(>1000)	0.000 -	0.07 L/(>1000)	0.000 -	0.16 L/(>1000)