

2014

Instituto Politécnico de Coimbra

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE COIMBRA

Aspetos do Dimensionamento de Painéis Prefabricados de Fachada em GRC do Tipo Nervurado

**MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL,
ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÃO URBANA**

AUTOR | Juliana Ferreira Duarte

ORIENTADOR | Paulo Maranhã Nunes Tiago

Coimbra, dezembro 2014

**Aspetos do Dimensionamento de Painéis
Prefabricados de Fachada em GRC do Tipo
Nervurado**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil com Especialização em Construção Urbana

Autora

Juliana Ferreira Duarte

Orientador

Paulo Maranhã Nunes Tiago

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, dezembro, 2014

Aos meus pais

*Pessoas conscientes da Natureza e do
Trabalho dos Homens, melhor se irão
preparar para os seus empreendimentos.*

Jorge da Fonseca Lourenço

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho, com todas as dificuldades associadas, só foi possível com ajuda e apoio de várias pessoas a quem pretendo expressar o meu agradecimento.

Estou, de uma forma distinta, agradecida ao Professor Paulo Maranhã Nunes Tiago, pela orientação científica deste trabalho, pelos ensinamentos, conhecimentos transmitidos, pelo incentivo constante, pela disponibilidade e dedicação, pela sua perseverança e, especialmente, pela sua amizade. Devo, ainda, ao Professor Paulo Maranhã, a minha formação na área dos prefabricados, ao longo da qual conseguiu, de uma forma especial, incutir-me o desejo de realizar este trabalho.

Quero agradecer ao Professor Jorge Lourenço pelo profundo conhecimento que me transmitiu ao longo do meu percurso académico, pelas suas palavras, pelos seus ensinamentos e pelos incentivos constantes.

Manifesto também o meu agradecimento ao técnico António Amaral, Técnico do Laboratório de Materiais do DEC-ISEC, pela ajuda indispensável prestada na realização de grande parte dos trabalhos experimentais, dedicação e incentivo.

À empresa Prégia que me disponibilizou todo o material de apoio essencial à realização do programa experimental.

Ao Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV), nomeadamente ao Eng.º Filipe Ferreira pela ajuda prestada na realização dos ensaios experimentais.

À empresa SunsetClimb por me disponibilizar todo o tempo útil à realização deste trabalho.

Aos meus colegas de curso com os quais realizei trabalhos de grupo, cruzei dúvidas e pelas árduas horas de estudo.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram e estiveram presentes.

À minha família, especialmente aos meus queridos pais e irmã Margarida que sempre me apoiaram e incentivaram neste longo caminho, apesar de alguns obstáculos surgidos e finalmente, ao Richard por todo o apoio, incentivo, carinho e pela compreensão da minha ausência durante esta fase.

RESUMO

O recurso a sistemas de fachadas prefabricadas no ramo da Construção Civil tem-se revelado uma opção eficaz, apresentando-se como uma solução de vanguarda no sentido de garantir vantagens ao nível da qualidade e da produtividade. A introdução de painéis de GRC (*Glassfibre Reinforced Concrete*) no mercado da construção trouxe vantagens ao sector uma vez que compatibiliza as vantagens da prefabricação leve, elevados níveis de desempenho e uma grande latitude em termos de formas e acabamentos.

Este compósito é formado por uma matriz de argamassa reforçada com fibra de vidro. A incorporação das fibras permite melhorar as propriedades mecânicas da argamassa, principalmente ao nível da resistência de tração e flexão, fazendo com que os elementos possam ter menores espessuras e conseqüentemente menor peso, comparativamente com peças de betão armado.

No mercado são comercializados três tipos de painéis de GRC, os do tipo nervurado, os do tipo *stud frame* e os do tipo sanduiche. Estes vários tipos de painéis tem as suas particularidades e a seleção depende das exigências e das características da obra.

O estudo teve como alvo diferentes formas e dimensões de painéis de fachada em GRC do tipo nervurado.

No presente trabalho faz-se um estudo comparativo da aplicação de dois métodos de dimensionamento. Comparam-se os resultados obtidos pela teoria clássica da flexão (TCF) e pelo método dos elementos finitos (MEF) e confrontam-se estes valores com os resultados obtidos em ensaios.

Com o estudo efetuado conclui-se pela validade e utilidade da análise através da TCF, cujos resultados se aproximam bastante da análise pelo MEF.

Sugerem-se coeficientes de ajustamento no sentido de adaptar a pratica de projeto em conformidade com os resultados verificados

Palavras-Chave

Painéis de fachada prefabricados, GRC, painel nervurado, nervura, tensões normais LOP, tensões normais MOR, módulo de elasticidade, deformações.

ABSTRACT

Recurring to systems of prefabricated panel systems in the field of Civil Construction has turned out to be an efficient option, presenting itself as a forefront solution which guarantees advantages in quality and productivity. The introduction of GRC (*Glassfiber Reinforced Concrete*) panels in the construction market brought advantages to the field, since it brings together the advantages of light prefabrication, high performance levels and a high skill in shapes and finishes.

This composite is made of mortar reinforced with fiberglass. The incorporation of the fibers allows for the improvement of the mechanical properties of mortar, mainly in what regards tensile and flexural strength, making it possible for the elements to be thinner, and thus lighter when compared to pieces in reinforced concrete.

In the market there are three available types of panels: the ribbed, stud frame and sandwich types. These different panels have different characteristics and their choice depends on the demands and specifics of the work.

This study had as its target different shapes and sizes of GRC façade panels of the ribbed type.

In this essay we present a comparative study of the application of two dimensioning methods. We compare the results we obtained through the classical beam theory and the numeric finite element method, and we confront these values with the results that were obtained in tests.

With the study we reinforce the validity and usefulness of the analysis through (TCF), whose results are very close to the (MEF) analysis.

We suggest coefficients of adjustment in order to adapt the practice of the project in conformity with the verified results.

KEYWORDS

Prefabricated façade panels, GRC, ribbed panel, ribbing, linear pieces, normal LOP tensions, normal MOR tensions, modulus of elasticity, deformities.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e Metodologia de Trabalho.....	1
1.3 Organização do trabalho	2
2. Betão Reforçado com Fibra de Vidro (GRC ou GFRC)	3
2.1 Descrição Geral.....	3
2.2 Desenvolvimento Histórico	3
2.3 Vantagens Económicas e Técnicas	4
2.4 Principais Aplicações.....	5
2.4.1 Betão Reforçado com Fibra de Vidro (GRC ou GFRC) na Arquitectura	5
2.4.2 Betão Reforçado com Fibra de Vidro (GRC ou GFRC) na Engenharia	5
2.4.3 Betão Reforçado com Fibra de Vidro (GRC ou GFRC) na Construção	6
2.5 Materiais	7
2.5.1 Fibra de vidro	7
2.5.2 Cimento	9
2.5.3 Areias.....	10
2.5.4 Água	11
2.5.5 Adjuvantes	11
2.5.6 Pigmentos	12
3. Aplicação do Material GRC em Painéis de Fachada.....	13
3.1 Tipo de painéis.....	13
3.1.1 Painel do tipo casca	13
3.1.2 Painel do tipo nervurado.....	13

3.1.3	Painel do tipo <i>stud frame</i>	14
3.1.4	Painel do tipo sanduíche	16
3.2	Produção.....	17
3.2.1	Equipamento	17
3.2.2	Mistura e dosagem	18
3.2.3	Processos de produção	19
3.3	Cura.....	21
3.4	Armazenamento e montagem.....	22
3.5	Propriedades mecânicas	22
3.5.1	Fatores que afetam as propriedades mecânicas do GRC	22
3.5.2	Resistência à tracção e flexão	24
3.5.3	Resistência à compressão.....	26
3.5.4	Resistência ao impacto.....	27
3.5.5	Resistência ao corte.....	27
3.5.6	Módulo de elasticidade	28
3.5.7	Variações de deformação devido à humidade.....	28
3.5.8	Expansão térmica	29
3.5.9	Deformação na rotura.....	29
3.5.10	Resistência ao fogo	30
3.5.11	Propriedades acústicas	30
3.5.12	Densidade.....	30
3.5.13	Condutibilidade térmica.....	30
3.5.14	Permeabilidade.....	30
4.	Dimensionamento de Painéis Nervurados em GRC	31
4.1	Introdução.....	31
4.2	Dimensionamento pela teoria clássica da flexão em peças lineares	31
4.2.1	Aplicação ao dimensionamento de painéis nervurados	36
4.2.2	Dimensionamento de painéis nervurados	36
4.2.3	Exemplos de aplicação.....	39
4.3	Análise pelo método numérico de elementos finitos.....	43

5.3.1	Análise de nervuras de painéis através do método dos elementos finitos	47
4.4	Estudo comparativo entre a teoria clássica da flexão (TCF) e o método numérico de elementos finitos (MEF)	51
5.	Programa Experimental	61
5.1	Introdução	61
5.2	Campanha de ensaios	61
5.3	Descrição dos ensaios	68
5.3.1	Equipamento e sistema de medição	68
5.3.2	Sistema de aplicação de cargas	70
5.4	Resultados dos ensaios	73
6.	Análise dos Resultados dos Ensaios	85
6.1	Introdução	85
6.2	Resultados dos ensaios dos corpos de prova	85
6.3	Resultados dos ensaios das nervuras do tipo C	88
6.4	Resultados dos ensaios das nervuras do tipo R	90
7.	Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros	95
7.1	Considerações Finais	95
7.2	Principais conclusões	96
7.3	Desenvolvimentos futuros	96
	Referências Bibliográficas	97
	Anexos	99

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Exemplo de aplicação em GRC a nível da engenharia.....	5
Figura 2.2 – Exemplo de aplicação em GRC a nível da engenharia.....	6
Figura 2.3 – Exemplo de aplicação em GRC a nível da construção.....	6
Figura 2.4 – Fibra de vidro em novelo.....	8
Figura 2.5 – Fibra de vidro em manta.....	9
Figura 2.6 – Fibra de vidro pré-cortada, (Fernandes, 2008).....	9
Figura 2.7 – a) Cimento Portland Normal cinzento, b) Cimento Portland Normal branco.....	10
Figura 3.1 – Exemplo de painel do tipo nervurado.....	14
Figura 3.2 – Exemplo de nervura de um painel do tipo nervurado.....	14
Figura 3.3 – a) Estrutura metálica de painel do tipo <i>stud frame</i> . b) Exemplo de painel do tipo <i>stud frame</i>	16
Figura 3.4 – Exemplos de painéis do tipo sanduíche.....	17
Figura 3.5 – Misturadora de argamassa.....	18
Figura 3.6 – a) Pistola de projeção do GRC. b) Fibra de vidro para posterior corte pela pistola.....	18
Figura 3.7 – Projeção da matriz de argamassa e da fibra de vidro em simultâneo.....	20
Figura 3.8 – Metodologia de projeção, (Cem-FIL, TD).....	21
Figura 3.9 – a) Diagrama tensão/deformação do GRC aos 28 dias. b) Diagrama tensão/deformação do GRC envelhecido.....	24
Figura 3.10 – Diagrama carga/deformação do provete relativo ao cimento cinza B2.....	25
Figura 3.11 – Diagrama carga/deformação do provete relativo ao cimento cinza T2.....	26
Figura 3.12 – Diagrama carga/deformação do provete relativo ao cimento cinza T3.....	26
Figura 3.13 - – Representação esquemática das forças de resistência ao corte e compressão (PCI, 1993).....	28
Figura 3.14 – Estabilidade dimensional- movimento do GRC induzido pela humidade, (PCI, 2013).....	29
Figura 4.1 – Sentidos positivos dos esforços internos pela convenção da Resistência dos Materiais, (Silva, 2004).....	32
Figura 4.2 – Comportamento à flexão de uma peça linear, (Silva, 2004).....	32
Figura 4.3 – Cinemática em flexão circular: a) secção transversal e eixo neutro; b) secção deformada; c) diagrama de deslocamentos; d) diagrama de tensões normais; e) deslocamentos da fibra, (Frey, 2000).....	33
Figura 4.4 – Exemplo de diagramas de tensões normais, (Frey, 2000).....	34
Figura 4.5 – Exemplo de diagramas de tensões normais superiores e inferiores, (Frey, 2000).....	35
Figura 4.6 – a) Painel do tipo casca. b) Painel do tipo casca com abas. c) Painel do tipo nervurado.....	36
Figura 4.7 – Peça linear sujeita à flexão, quando aplicada uma carga uniformemente distribuída.....	37
Figura 4.8 – Desenho em planta da nervura com comprimento L	37

Figura 4.9 – Representação da nervura simplesmente apoiada com um carregamento uniforme, q , ao longo de um comprimento L	37
Figura 4.10 – Diagrama de esforço transversal e de momento fletor da peça.....	38
Figura 4.11 – Perspetiva da nervura	38
Figura 4.12 – Secção transversal da nervura no vão	39
Figura 4.13 – Representação em planta da nervura.....	39
Figura 4.14 – Representação da nervura com os respetivos valores de carga e dimensões	40
Figura 4.15 – Centro geométrico da nervura e respetivas distancias ao mesmo	41
Figura 4.16 – Pontos onde são determinadas as tensões normais do painel nervurado	42
Figura 4.17 – a) Elemento finito de barra; b) Elemento finito triangular (placa ou laje); c) Elemento finito quadrangular (placa ou laje); d) Elemento finito sólido, (Carvalho, 2010)....	44
Figura 4.18 – Exemplo de discretização de secção de nervura com a localização de aplicação do carregamento nos nós	47
Figura 4.19 – Exemplo da modelação da nervura pelo MEF	48
Figura 4.20 – Distribuição de tensões normais longitudinais ao longo da nervura.....	48
Figura 4.21 – Pontos nodais onde são determinadas as tensões normais da nervura.....	49
Figura 4.22 – Deformação da nervura quando sujeita a uma carga uniformemente distribuída	50
Figura 4.23 – Avaliação das tensões normais nos pontos de ligação às almas da secção	51
Figura 4.24 – Exemplo dos valores nodais da força axial de membrana no banzo superior da nervura determinados pelo MEF – Nervura N1	54
Figura 4.25 - Exemplo dos valores nodais da força axial de membrana do banzo inferior da nervura determinados pelo MEF – Nervura N1	55
Figura 5.1 – Nervura tipo R em planta	62
Figura 5.2 – Dimensões da nervura do tipo R	62
Figura 5.3 – Identificação das espessuras das nervuras do tipo R.....	62
Figura 5.4 – Nervura do tipo C em planta	63
Figura 5.5 – Dimensões das nervuras do tipo C.....	63
Figura 5.7 – Dimensões dos corpos de prova, tipo T	64
Figura 5.8 – Identificação das espessuras dos corpos de prova.....	64
Figura 5.9 – Pontos de carregamento do ensaio à flexão em nervuras do tipo R.....	66
Figura 5.10 – Aplicação do carregamento de ensaio nas nervuras do tipo R.....	66
Figura 5.11 - Pontos de carregamento do ensaio à flexão em nervuras do tipo C	66
Figura 5.12 - Aplicação do carregamento de ensaio em nervuras do tipo C.....	67
Figura 5.13 – Pontos de carregamento do ensaio à flexão em corpos de prova do tipo T	67
Figura 5.14 – Aplicação do carregamento de ensaio em corpos de prova do tipo T.....	67
Figura 5.15 – a) Nervura do tipo C. b) Nervura do tipo R. e corpos de prova do tipo T	68
Figura 5.16 – Célula de carga de 5kN	69
Figura 5.17 – Célula de carga de 30kN	69
Figura 5.18 – Equipamento de controlo e aquisição de dados	70
Figura 5.19 – Nervura do tipo R preparado para ser ensaiado	71
Figura 5.20 – Nervura do tipo C preparado para ser ensaiado	71

Figura 5.21 – Corpo de prova do tipo T preparado para ser ensaiado	72
Figura 5.22 – Posição dos corpos de prova na máquina de ensaio	72
Figura 5.23 – Posição do defletómetro para medição dos deslocamentos verticais das nervuras	73
Figura 5.24 – Diagrama carga/deformação da nervura C ₁	74
Figura 5.25 – Diagrama carga/deformação da nervura C ₂	74
Figura 5.26 – Diagrama carga/deformação da nervura C ₃	75
Figura 5.27 – Diagrama carga/deformação da nervura C ₄	75
Figura 5.28 – Diagrama carga/deformação da nervura R ₁	76
Figura 5.29 – Diagrama carga/deformação da nervura R ₂	76
Figura 5.30 – Diagrama carga/deformação da nervura R ₃	77
Figura 5.31 – Diagrama carga/deformação da nervura R ₄	77
Figura 5.32 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₁ – T ₁	78
Figura 5.33 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₁ – T ₂	78
Figura 5.34 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₁ – T ₃	79
Figura 5.35 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₂ – T ₁	79
Figura 5.36 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₂ – T ₂	80
Figura 5.37 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₂ – T ₃	80
Figura 5.38 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₃ – T ₁	81
Figura 5.39 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₃ – T ₂	81
Figura 5.40 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₃ – T ₃	82
Figura 5.41 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₄ – T ₁	82
Figura 5.42 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₄ – T ₂	83
Figura 5.43 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C ₄ – T ₃	83
Figura 6.1 – Esquema estrutural de aplicação de cargas em corpos de prova	85
Figura 6.2 – Exemplo da discretização de uma nervura do tipo C pelo MEF	88
Figura 6.3 – Exemplo da deformação de uma nervura do tipo C pelo MEF	88
Figura 6.4 – Discretização de uma nervura do tipo R pelo MEF	90
Figura 6.5 – Deformação de uma nervura do tipo R para a carga de ensaio	91

Índice de Gráficos

Gráfico 4.1 – a) Diagrama de tensões normais pelo MEF da nervura N1. b) Diagrama de tensões normais pela TCF da nervura N1	52
Gráfico 4.2 – a) Diagrama de tensões normais pelo MEF da nervura N2. b) Diagrama de tensões normais pela TCF da nervura N2	52
Gráfico 4.3 – Diagrama de tensões normais pelo MEF da nervura N3. b) Diagrama de tensões normais pela TCF da nervura N3	53
Gráfico 4.4 – a) Diagrama de tensões normais pelo MEF da nervura N4. b) Diagrama de tensões normais pela TCF da nervura N4	53
Gráfico 4.5 – a) Diagrama de tensões normais pelo MEF da nervura N5. b) Diagrama de tensões normais pela TCF da nervura N5	54
Gráfico 4.6 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo superior da nervura N1	56
Gráfico 4.7 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo inferior da nervura N1	56
Gráfico 4.8 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo superior da nervura N2	57
Gráfico 4.9 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo inferior da nervura N2	57
Gráfico 4.10 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo superior da nervura N3	58
Gráfico 4.11 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo inferior da nervura N3	58
Gráfico 4.12 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo superior da nervura N4	59
Gráfico 4.13 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo inferior da nervura N4	59
Gráfico 4.14 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo superior da nervura N5	60
Gráfico 4.15 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo inferior da nervura N5	60

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Composição química da fibra de vidro AR (expresso em percentagem de massa), (Majumdar e Laws, 1991).....	7
Quadro.2.2 – Propriedades das fibras de vidro AR, (Majumdar e Laws, 1991).....	8
Quadro 2.3 – Composição química em percentagem das areias.....	11
Quadro 3.1 – Exemplo de formulação de GRC, (Cem-FIL, TD)	19
Quadro 3.2 – Quadro de resumo dos provetes subtidos ao ensaio de flexão.....	25
Quadro 4.1 – Dimensões dos painéis nervurados estudados	40
Quadro 4.2 – Momentos de inércia segundo a direção x dos painéis nervurados	41
Quadro 4.3 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto y_{1+5}	42
Quadro 4.4 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto y_1	42
Quadro 4.5 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto y_{1-5}	42
Quadro 4.6 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto y_{2-5}	43
Quadro 4.7 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto y_2	43
Quadro 4.8 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto y_{2+5}	43
Quadro 4.9 – Exemplo de elementos finitos mais utilizados em Engenharia, (Carvalho, 2010)	46
Quadro 4.10 – Valores de tensões normais determinadas pelo MEF nos pontos nodais adjacente ao meio-vão na Figura 4.23.....	49
Quadro 4.11 – Média dos valores de tensões normais determinados a partir dos valores do Quadro 4.10.....	50
Quadro 4.12 – Correspondentes forças de membrana determinadas a partir dos valores do Quadro 4.11.....	50
Quadro 5.1 – Dimensões e espessuras das nervuras do tipo R	63
Quadro 5.2 – Dimensões e espessuras das nervuras do tipo C	64
Quadro 5.3 – Dimensões e espessuras dos corpos de prova (T).....	65
Quadro 6.1 – Resultados das tensões verificadas nos corpos de prova	86
Quadro 6.2 – Resultados das deformações verificadas nos corpos de prova.....	87
Quadro 6.3 – Propriedades das nervuras do tipo C.....	89
Quadro 6.4 – Resultados das tensões e deformações verificadas nas nervuras do tipo C	89
Quadro 6.5 – Características das nervuras do tipo R	92
Quadro 6.6 – Resultados das tensões e deformações verificadas nas nervuras do tipo R	92

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

AR – *Alkali-resistant*

ASTM – Norma americana

BOP – *Bend-over-point*

BRE – *British Reseach Establishment*

EPS – Poliestireno expandido

GFRC – *Glassfiber Reinforced Concrete*

GRC – *Glassfiber Reinforce Concrete*

GRCA – *Glassfiber Reinforced Concrete Association*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LOP – *Limit of Proportionality* – Limite de Proporcionalidade

MEF – Método de Elementos Finitos

MOR – *Modulus of Rupture* – Módulo de rotura

NP – Norma Portuguesa

PCI – Precast Concrete Institute

STC – Sound Transmission Class

SAP2000 – Software de modulação numérica por elementos finitos

TCF – Teoria clássica da flexão

UTS – Ultimate Tensile Strength

σ – Tensão normal (MPa)

τ – Tensão tangencial (MPa)

δ – deformação (mm)

1. Introdução

1.1 Enquadramento

O recurso a fachadas prefabricadas tem vindo a aumentar nos últimos anos, devido às vantagens exibidas por este tipo de sistemas, tais como a rapidez de execução em obra aliada à qualidade das peças produzidas. As fachadas em elementos de GRC são um bom exemplo desta evolução, tendo-se adaptado rapidamente no mercado devido às suas particularidades e à sua eficácia.

Existem dois principais institutos a nível mundial, o PCI (Precast Concrete Institute) e o GRCA (Glassfiber Reinforced Concrete Association) que se dedicam ao estudo dos painéis de GRC, estruturando as diretrizes de projeto a adotar na execução de fachadas recorrendo a painéis de GRC.

Um dos problemas inerentes dos painéis do tipo nervurado é a especificidade existente nas nervuras centrais, tratando-se de regiões com maior suscetibilidade de fendilhação e posterior rotura, exigindo assim um estudo detalhado.

1.2 Objetivos e Metodologia de Trabalho

O presente trabalho é dedicado ao estudo dos aspetos de dimensionamento à flexão de painéis prefabricados de fachada em GRC do tipo nervurado. O estudo recai no cálculo de tensões normais de nervuras centrais, determinadas por três métodos distintos: teoria clássica da flexão em peças lineares (TCF), método numérico de elementos finitos (MEF) e programa experimental. Posteriormente é elaborado o estudo comparativo dos valores das tensões normais determinadas pelos métodos atrás nomeados.

Os principais objetivos deste trabalho podem sintetizar-se da seguinte forma:

- Identificação dos pontos críticos das nervuras centrais dos painéis do tipo nervurado.
- Determinação das tensões normais nos pontos críticos identificados pela TCF.
- Determinação das tensões normais nos pontos críticos identificados pelo MEF.
- Análise dos resultados obtidos pelo programa experimental.
- Comparação dos valores das tensões normais obtidos pelos três métodos atrás identificados.
- Determinação de um coeficiente de ajustamento que relacione o método numérico de elementos finitos (MEF) com a teoria clássica da flexão de peças lineares (TCF), bem como de um coeficiente de transformação da resistência em flexão em resistência à tracção.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho está estruturado em sete capítulos.

No capítulo 1 define-se o domínio em estudo e apresenta-se os interesses e objetivos a atingir com a realização do presente trabalho.

No capítulo 2 realiza-se uma breve síntese do estado atual do conhecimento sobre o GRC. A análise incide principalmente no estudo dos constituintes que formam o compósito e em uma breve abordagem histórica da sua evolução. Por fim faz-se uma pesquisa do panorama atual de utilização de painéis de GRC.

O capítulo 3 apresenta os tipos de painéis de GRC disponíveis no mercado e principais características. Posteriormente é mencionado as principais tecnologias utilizadas.

No capítulo 4 apresenta-se a TCF e a sua aplicação à determinação das tensões normais nos pontos centrais da nervura. Faz-se também uma análise recorrendo ao MEF para as nervuras em estudo. Por fim, faz uma análise comparativa entre a TCF e o MEF.

No capítulo 5 descrevem-se os ensaios realizados nas várias nervuras provenientes dos painéis nervurados e faz-se uma análise aos valores provenientes dos mesmos.

No capítulo 6 confrontaram-se os resultados obtidos a partir dos ensaios, do MEF e da TCF. Por fim determinou-se um coeficiente de ajustamento que tem como função ajustar a TCF ao MEF.

No capítulo 7 são sintetizadas as conclusões retiradas deste trabalho e propostos alguns temas para desenvolvimentos futuros.

2. Betão Reforçado com Fibra de Vidro (GRC ou GFRC)

2.1 Descrição Geral

O betão reforçado com fibras de vidro, conhecido como GRC (*Glassfiber Reinforce Concrete*) na Europa e por GFRC (*Glassfiber Reinforced Concrete*) nos Estados Unidos da América, é na realidade um material compósito, constituído por uma argamassa de cimento Portland e de areia monogranular reforçada com fibras de vidro dispostas aleatoriamente nesta matriz. Na realidade a utilização do termo betão não é tecnicamente o mais adequado, embora seja o usual.

As propriedades dos elementos em GRC dependem de diversos fatores, como o método de fabrico, a composição da mistura, comprimento e orientação da fibra, grau de compactação e tipo de cimento. As mesmas podem ser adaptadas para atender a necessidades de aplicações específicas, (Cem-FIL, TD).

Os elementos de GRC são da família dos materiais compósitos com melhoradas propriedades como resistência à tração, à flexão e resistência ao impacto, que lhe são conferidas pelas fibras de vidro.

As peças em GRC apresentam secções relativamente finas comparadas com as de betão, levando assim a um baixo peso e a um fácil manuseamento, armazenamento, transporte e montagem, (Cem-FIL, TD).

Existem, mundialmente, dois principais centros de investigação que estudam este material, como o PCI (*Precast Prestressed Concrete Institute*), nos EUA e a GRCA (*Glassfibre Reinforced Concrete Association*), em Inglaterra.

Os elementos em GRC dão efetivamente, um contributo significativo para o nível tecnológico e estético da construção em todo o mundo.

2.2 Desenvolvimento Histórico

Os primeiros estudos e aplicações de fibra de vidro como reforço de um material compósito ocorreram na indústria de polímeros, nos anos 30, nos Estados Unidos da América, (Faccio, 2004).

Após a guerra Civil Russa (1918 – 1921), o cenário era devastador, daí se ter recorrido a uma alternativa de forma a garantir a rápida reconstrução das fachadas. Esta alternativa foi a prefabricação de painéis de fachada. Contudo, só na década de 50 foram feitas as primeiras tentativas com materiais reforçados com fibras de vidro. Na Rússia, por Byryukovich, em 1964, foi realizado o primeiro estudo de uma mistura reforçada com fibras de vidro, concluindo-se que as fibras do tipo “E” (tipo de fibra de vidro usada na indústria dos plásticos, a denominação “E” deriva da propriedade de isolamento elétrico em ambientes com baixa alcalinidade) não resistiam a ambientes alcalinos, levando a que não se utilizassem em matrizes fortes em hidróxidos de cálcio, (Faccio, 2004).

Os resultados dos estudos realizados pelos Russos foram posteriormente alargados com uma investigação detalhada pelo BRE (*British Research Establishment*), em Inglaterra. Os ingleses procuravam desenvolver uma fibra de vidro resistente aos ataques dos álcalis do cimento, garantindo todas as propriedades de resistência do material ao longo do seu ciclo de vida. Para isso foi necessário uma consolidação da teoria dos materiais fibrosos, do desenvolvimento de técnicas de produção de compósitos, do estudo de diferentes tipos de cimento e da análise das reações químicas entre matriz/fibra, (Faccio, 2004).

Assim, veio a ser produzida uma fibra, designada fibra de vidro AR (*alkali-resistant*), contendo óxido de zircónio (ZrO_2), garantindo resistência ao ataque de alcalis em soluções com ph alto, possuindo um desempenho superior comparativamente com a do tipo E. (PCI, 1993)

No início da década de 70, a empresa britânica Pilkington Brothers patenteou no mercado a primeira fibra AR, registada sob a marca Cem-Fil.

O impacto do GRC no sector da construção foi tão forte ao ponto de, em 1976, ter sido criada uma nova associação, em Inglaterra, designada por GRCA (*Glassfibre Reinforced Concrete Association*). Nos Estados Unidos da América o estudo deste material foi principalmente desenvolvido pelo PCI (*Precast Concrete Institute*), sendo o seu principal objetivo desenvolver a tecnologia de painéis de fachada em GRC.

Na década de 80, a empresa Pilkington Brothers lança uma fibra de vidro que possui um revestimento que permite aumentar ainda mais a estabilidade a nível químico do compósito, esta fibra denomina-se por Cem-Fil AR2.

2.3 Vantagens Económicas e Técnicas

O betão reforçado com fibras de vidro permite obter diversificadas formas de painéis, bem como, diferentes cores, mantendo espessuras reduzidas. Daí ser um material adequado para o revestimento de fachadas comparado com outros tipos de elementos prefabricados.

As vantagens que mais pesam na produção e utilização de painéis em GRC são as seguintes:

- Maior rapidez de execução
- Controlo de qualidade eficaz
- Menor dependência de mão-de-obra no local
- Na produção, pouco sensível aos fatores climáticos
- Libertação de espaço de estaleiro na obra
- Aperfeiçoamento do planeamento da obra

2.4 Principais Aplicações

A aplicação com mais evidência a nível mundial é a produção de painéis de fachadas prefabricados (80%), podendo estes serem utilizados tanto na construção de edifícios novos, como na reabilitação de estruturas antigas.

2.4.1 Betão Reforçado com Fibra de Vidro (GRC ou GFRC) na Arquitectura

O elemento de GRC faculta ao projetista a versatilidade que poucos outros materiais conseguem fornecer, podendo assim ser utilizado em projetos modernos e futuristas, bem como em projetos mais tradicionais. Estes elementos são muito utilizados, pois os painéis são facilmente moldáveis, podendo criar diferentes formas, texturas e pormenores, apresentando componentes de revestimento de espessura reduzida, leves e com elevada resistência comparativamente com materiais de betão convencional. A natureza da superfície do produto permite um acabamento fácil, podendo ser colorido através de pigmentos, tintas, revestimentos de pedra natural ou mesmo a sua cor natural, branco ou cinzento.

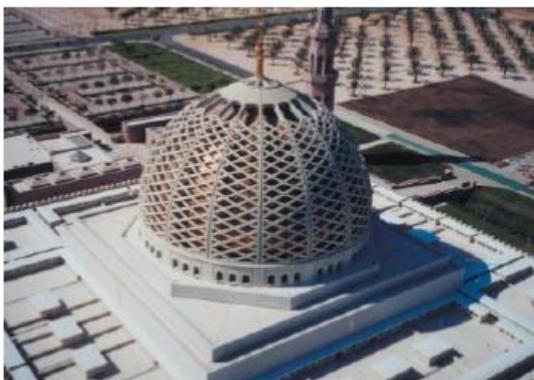


Figura 2.1 – Exemplo de aplicação em GRC a nível da engenharia

2.4.2 Betão Reforçado com Fibra de Vidro (GRC ou GFRC) na Engenharia

Os elementos de GRC são produzidos de forma a se atingir propriedades que satisfaçam as diversas aplicações.

O elemento em GRC é ideal para uso de unidades de cofragem perdida de tabuleiros de pontes, permitindo uma construção rápida e oferecendo um acabamento arquitetónico de qualidade, bem como impedir a corrosão das armaduras nos elementos de betão armado.

A construção de barreiras acústicas é um método eficiente de redução da intensidade do ruído provocado pelo tráfego urbano, existindo uma variedade de perfis e texturas de superfície com diferentes necessidades na engenharia. O reduzido peso do elemento de GRC permite economizar em estruturas com maior desenvolvimento em altura.

O uso deste material também é adequado em sistemas de águas pluviais e em sistemas de drenagem de águas residuais, pois é altamente resistente à penetração de água, ao ataque

químico e à erosão, além de conferir superfícies lisas e regulares às condutas, conseguindo melhor desempenho hidráulico.



Figura 2.2 – Exemplo de aplicação em GRC a nível da engenharia

2.4.3 Betão Reforçado com Fibra de Vidro (GRC ou GFRC) na Construção

Os elementos de GRC podem ser aplicados em coberturas de edifícios devido à sua reduzida espessura, à sua simplicidade de fixação, à resistência a condições ambientais adversas e ao facto de possuírem elevada resistência ao impacto e ao fogo.

Podem ainda ser aplicados na construção de fundações e pavimentos, especialmente nos betonados *in situ*, sendo uma boa solução aliando a economia à aparência final, (GRC In Action, 2003).

Na área da prefabricação ou da construção modular, os elementos de GRC apresentam também vantagens, devido às suas propriedades. Pequenas unidades, tais como módulos de instalações sanitárias e postos de equipamento de telecomunicações podem ser executados apenas numa peça e facilmente encaminhados para o local. Devido à resistência deste material, podem ser projetados pequenos edifícios sem ser necessário recorrer a uma estrutura pesada.

Os elementos de fachada em GRC podem integrar isolamento térmico, se necessário, enquanto a inexistência de reforço em aço pode ser uma vantagem em aplicações elétricas e de telecomunicações, (GRC In Action, 2003).

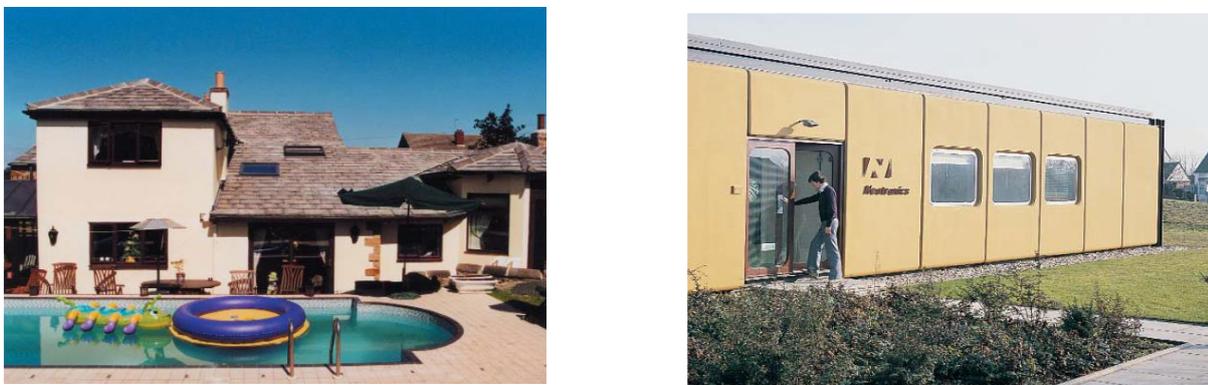


Figura 2.3 – Exemplo de aplicação em GRC a nível da construção

2.5 Materiais

2.5.1 Fibra de vidro

A fibra de vidro AR (Alkali-Resistant) é um filamento contínuo, resistente a ambientes alcalinos, com alta durabilidade, para ser usada em compostos à base de cimento.

É de salientar que as fibras de vidro do tipo E não são resistentes a ambientes alcalinos e não devem ser usadas em associação com ligantes de cimento, (Pereira, 2013).

No Quadro 2.1 destacam-se os elementos que fazem parte da composição química da fibra de vidro AR:

Quadro 2.1 – Composição química da fibra de vidro AR (expresso em percentagem de massa), (Majumdar e Laws, 1991)

Composição	Cem-FIL 2AR
SiO ₂	62,0
TiO ₂	0,1
Al ₂ O ₃	0,8
ZrO ₂	16,7
CaO	5,6
Na ₂ O	14,8

As principais propriedades das fibras de vidro AR são as seguintes:

- Elevada resistência mecânica;
- Elevado módulo de elasticidade;
- Resistência à corrosão;
- Incombustibilidade;
- Manutenção das características a altas temperaturas;
- Estabilidade dimensional;
- Facilidade de manuseamento;

No Quadro 2.2, indicam-se algumas propriedades das fibras de vidro do tipo AR:

Quadro.2.2 – Propriedades das fibras de vidro AR, (Majumdar e Laws, 1991)

Características	Fibra de vidro AR
Resistência à tração de um filamento	3500 MPa
Resistência à tração de um cordão (feixe) de filamentos	1400 a 1700 MPa
Módulo de Elasticidade	72 a 74 GPa
Densidade	2680 kg/m ³
Deformação na rotura	2 a 2,5%
Ponto de fusão	1185°C
Diâmetro de um filamento	14 a 20µm

As fibras de vidro são embaladas e fornecidas em caixas, em sacos ou em remessas a granel. Estas podem ser enroladas e guardadas em novelos de formato troncocónico.

As fibras de vidro podem ser cortadas nas seguintes formas:

- Os filamentos são cortados e projetados em simultâneo com a matriz de argamassa para produzir elementos que podem ser de carácter complexo.
- Os filamentos são cortados no local para minimizar os custos de transporte.

Estes são cortados com um comprimento idêntico, preservando a integridade da cadeia original, apresentando comprimentos padrão de 12 a 25mm.

Os filamentos cortados são designados pelo seu comprimento, pelo número TEX (massa em gramas de 1000 metros de filamento), e por uma referência à espessura do revestimento. Este revestimento é concebido de modo a preservar os filamentos de dano mecânico ou também de modo a facilitar a dispersão dos filamentos quando contactam com a matriz húmida.



Figura 2.4 – Fibra de vidro em novelo



Figura 2.5 – Fibra de vidro em manta



Figura 2.6 – Fibra de vidro pré-cortada, (Fernandes, 2008)

2.5.2 Cimento

O tipo de cimento mais utilizado na produção de painéis de GRC é o cimento Portland normal. O fabricante de painéis em GRC deverá poder escolher o tipo de cimento a usar de modo a garantir as propriedades especificadas no caderno de encargos, no sentido de assegurar a durabilidade e resistência prevista, tal como a coloração que se pretende obter, (PCI, 1993).

O desempenho do cimento pode ser influenciado pelas condições atmosféricas que, por sua vez, tem influência nas técnicas de acabamento, nos requisitos de projeto para a mistura e no processo de projeção (pulverização). O cimento a usar na mistura para revestimento dos painéis, ou seja, para a face à vista do painel, deve ser controlado de forma a obter uma cor uniforme. Para um dado projeto, o cimento a utilizar deve ser de um só fabricante, tendo uma só cor, marca e tipo. A utilização de cimento Portland de cor branca originará mais uniformidade em termos de cor, (Peruzzi, 2002).

A utilização de cimento Portland branco, com baixo teor de óxido de ferro, é indicado para painéis que apresentam um acabamento branco ou de cores claras. Assim, é exigido um cuidado

acrescido durante o armazenamento, fabrico, cura e manuseamento dos painéis produzidos com este tipo de cimento, para evitar contaminação e descoloração.

Qualquer que seja o tipo de cimento, é importante que este seja armazenado corretamente, devendo-se manter em local seco, pois a humidade do ar pode ser tão prejudicial quanto a humidade direta. O armazenamento em granel nos silos de cimento será a melhor opção por períodos até 3 meses.

Os cimentos em sacos de papel devem ser armazenados em condições adequadas, pois tendem a perder cerca de 20% da sua resistência após 4 a 6 semanas, por isso, o cimento ensacado deve ser utilizado o mais rápido possível.



a)



b)

Figura 2.7 – a) Cimento Portland Normal cinzento, b) Cimento Portland Normal branco

2.5.3 Areias

As areias de sílica estão disponíveis na maioria dos países do Mundo devendo verificar-se os seguintes requisitos:

- 1) Toda a areia deve ser lavada e seca (de preferência) para que fique livre de matéria solúvel e partículas finas e para permitir um mais exato controlo da relação água/cimento.
- 2) A forma das partículas pode ser rodada ou, preferencialmente irregular. Partículas alongadas e em forma de lasca devem ser rejeitadas. A textura superficial das partículas deve ser lisa.
- 3) A composição química das areias deverá estar de acordo com o Quadro 2.3, que se apresenta em seguida:

Quadro 2.3 – Composição química em porcentagem das areias

Composição	Porcentagem
Sílica	>96
Humidade	<2
Sais solúveis (álcalis)	<1
Perda ao fogo	<0.5
Matéria orgânica	Não deve afetar as propriedades do cimento
SO ₃ (óxido de enxofre)	0,4 max.
Cl (cloro)	0,06 max.

O teor de sílica não tem que ser forçosamente superior a 96%. Existem areias de boa qualidade com baixa porcentagem de sílica adequadas para produção de painéis em GRC.

4) Classificação

GRC projetado

- Tamanho das partículas: máximo de 1.2mm (100% passados no peneiro BS14, ASTM 16).
- Fração de finos: máximo (10%, passados no peneiro BSS100, ASTM 100).

GRC Premix

- Tamanho das partículas: A dimensão máxima das partículas é crítica, mas o tamanho máximo das mesmas é 2.4mm (100% passados no peneiro BSS7, ASTM 7).
- Fração de finos: A quantidade deve ser limitada por causa da absorção da água, para não prejudicar a relação água/cimento.

2.5.4 Água

A água deve estar limpa, isenta de matéria contaminada e deve respeitar normas existentes para a produção de betão.

2.5.5 Adjuvantes

Os adjuvantes são adicionados para produzir os seguintes efeitos: (NPCAA, 2006).

No fabrico de GRC:

- Aumentar a trabalhabilidade sem alterar a relação água/cimento;
- Melhorar a coesão;
- Reduzir a segregação;

- Retardar/acelerar o processo de endurecimento;

Nas propriedades do GRC:

- Acelerar o desenvolvimento da resistência inicial;
- Aumentar a resistência;
- Diminuir a permeabilidade;
- Aumentar a resistência ao fogo;

Os adjuvantes são adicionados à mistura, em pequenas quantidades, sendo por isso necessários cuidados que garantam que seja adicionada a dosagem correta conforme o especificado pelo fabricante.

2.5.6 Pigmentos

Os pigmentos podem ser utilizados para oferecer diversas tonalidades aos elementos em GRC. É necessário ter em atenção a adição destes materiais para que se possa alcançar a uniformidade e as cores certas sem ocorrer variações significativas das mesmas. A baixa qualidade dos pigmentos leva à perda ou alteração da cor com o avanço do tempo.

3. Aplicação do Material GRC em Painéis de Fachada

3.1 Tipo de painéis

Estima-se que cerca de 80% da produção mundial de GRC se destina à produção de painéis de fachada prefabricados, (Ferreira *et al*, 2004).

A Inglaterra foi o país pioneiro da produção de elementos de GRC, mas rapidamente este ‘novo material’ se difundiu pelo Mundo, estimando-se atualmente uma produção anual próxima dos 10 mil milhões de metros quadrados, (Silva, 1998).

Os principais tipos de painéis que existem no mercado são: tipo casca, nervurado, *stud frame* e sanduíche.

Embora nenhum destes tipos seja adequado para funções estruturais, todos são autoportantes e resistentes às ações presentes na envolvente dos edifícios (chuva, vento, sismo, etc).

3.1.1 Painel do tipo casca

No painel do tipo casca, não existem nervuras, nem qualquer tipo de reforço, só é composto mesmo pela ‘casca’. Este tipo de painel atinge pequenas dimensões e tem uma função de forra.

3.1.2 Painel do tipo nervurado

O painel do tipo nervurado é constituído por uma face com aproximadamente 12 a 13mm de espessura, na qual são criados no tardo, pequenas nervuras executadas com a introdução de um material de aligeiramento, normalmente poliestireno expandido (EPS), no seu interior. Estas nervuras têm habitualmente uma disposição em grelha e são responsáveis pela transmissão das forças exercidas na face do painel aos órgãos de fixação à estrutura. A criação destas nervuras leva ao aumento da rigidez do painel. Este tipo de painel pode atingir deformações excessivas devido ao facto de possuir espessura reduzida, pelo que este aspeto deve ser controlado. Em alguns painéis maciça-se a parte das nervuras para embeber acessórios de fixação. As nervuras devem ter diretriz reta, caso contrário são praticamente impossíveis de modelar. O espaçamento entre nervuras é condicionado pelos vãos e pelas cargas nos painéis. Maiores vãos e maiores cargas implicam menores espaçamentos entre nervuras. A sua largura deve estar compreendida entre 50 e 200mm e o seu comprimento depende das dimensões do painel, (PCI, 1993).

Este tipo de painel, para além de apresentar alguma complexidade de fabrico, potencia diferenças de coloração superficial, devido à variação da temperatura de cura das diferentes espessuras e pode também assumir deformações diferenciais indesejáveis devido à complexidade de resposta às variações da temperatura, (Sousa, 2010).

São mostrados nas figuras 3.1 e 3.2 exemplos de painéis do tipo nervurado.



Figura 3.1 – Exemplo de painel do tipo nervurado



Figura 3.2 – Exemplo de nervura de um painel do tipo nervurado

3.1.3 Painel do tipo *stud frame*

Na literatura americana, este tipo de painel é habitualmente referenciado como o de custo relativo mais baixo. No entanto, em peças correntes no nosso país não é geralmente esta a situação. Contudo, uma alternativa ao sistema de nervuras pode este painel reforçado no tardo

com uma estrutura metálica, a qual também possibilita o aumento das dimensões e a liberdade de geometria das peças, (Silva, 1998).

Este sistema é composto por quatro partes diferenciadas: a face de GRC, os grampos (âncoras) de ligação da face do GRC ao *stud frame*, o bastidor em elementos metálicos soldados e as fixações que permitem a ligação do *stud frame* ao edifício, (Tiago, 2013).

O *stud frame*, é normalmente executado por uma associação de perfis metálicos tubulares de parede fina, soldados entre si, originando uma estrutura do tipo grelha. Usualmente, os perfis periféricos têm secção mais significativa do que os restantes e são os responsáveis pela transferência dos esforços à estrutura do edifício, através dos acessórios de fixação (Tiago, 2013). Estes perfis, tanto os horizontais, como os verticais devem ter um espaçamento a eixo, na ordem dos 600mm. A estrutura metálica, para além da função de reforço, ainda simplifica a fixação do painel.

Este sistema proporciona um espaço, entre o painel e o edifício que pode ser utilizado para instalação de condutas elétricas, mecânicas, de telecomunicações e de isolamento, conseguindo-se desta forma oferecer vantagens em termos de área útil dos edifícios, (PCI, 1993).

Um aspeto relevante deste tipo de painéis diz respeito à flexibilidade controlada dos grampos, os quais permitem, não só a ligação da face ao *stud frame* mas, também, a sua movimentação de expansão ou contração, conforme a resposta do material às condições ambientais.

Os grampos dispõem-se perpendicularmente à face, segundo uma malha ortogonal de cerca de 0,6m x 0,6m, e permitem que a face do painel diste entre 5 a 10cm do *stud frame*. São normalmente executados em varão de 8mm de aço liso.

A ligação dos grampos à face é concluída introduzindo a sua extremidade dobrada sobre a estrutura de GRC para o tardo e, por soldadura, é feita a ligação ao *stud frame*. Para impedir o deslocamento vertical da face do elemento de GRC, relativamente ao *stud frame* e para limitar a deformação induzida pelo peso próprio, reforçam-se alguns dos grampos simples pela conexão triangulada de outro grampo simples no mesmo ponto, (Tiago, 2013).

Todos os elementos metálicos do sistema deverão ter uma adequada proteção anticorrosiva.

Este tipo de painel permite a realização de elementos de dimensões superiores à solução do tipo nervurado, podendo atingir dimensões máximas, da ordem de 6 a 7m de desenvolvimento. Em termos de peso as peças variam entre 45kg/m² e 65kg/m².



a)



b)

Figura 3.3 – a) Estrutura metálica de painel do tipo *stud frame*. b) Exemplo de painel do tipo *stud frame*

3.1.4 Painel do tipo sanduíche

O painel do tipo sanduíche é composto por duas placas de GRC dispostas paralelamente, a da face e a do tardo, existindo um espaço entre elas que é ocupado por um material de isolamento. Este isolamento, normalmente é em poliestireno expandido (EPS) ou em lã de rocha e pode, ou não, garantir a ligação mecânica entre as faces. De qualquer forma, o efeito de rigidez acrescida é provocada pelo funcionamento conjunto das duas faces, (Tiago, 2013).

O conceito do painel sanduíche pretende harmonizar o isolamento térmico com o aumento de resistência. No entanto, é essencial ter em conta que a prática tem mostrado não ser possível, nomeadamente em painéis de maiores dimensões, antecipar pelo cálculo os efeitos reais das variações térmicas e da própria retração do material, para além das variações dimensionais devidas às flutuações da humidade exterior, (Tiago, 2013).

No tipo comum, em que o GRC envolve todo o painel, os efeitos anteriormente mencionados conduzem, muitas vezes, ao aparecimento de empenos e fissuras que colocam em causa o correto funcionamento do sistema. Nestes painéis é habitual existir uma zona periférica onde o aligeiramento/isolamento é anulado, de forma a permitir a existência de elementos metálicos embebidos no GRC os quais proporcionam a fixação do painel à estrutura do edifício, (Tiago, 2013).

Este tipo de elementos são produzidos em formas planas, podendo atingir 12m^2 de superfície. Uma das dimensões máximas do painel deve ser limitada a 3.5m devido ao transporte das peças. Em termos de peso unitário as peças variam entre os 60kg/m^2 e 80kg/m^2 em função do tipo de acabamento superficial adotado, (Santiago, 2006).



Figura 3.4 – Exemplos de painéis do tipo sanduíche

3.2 Produção

Até se chegar ao produto final tem de se passar por várias fases. Estas são descritas em seguida:

- 1) As diretrizes para a fase de projeto são estabelecidas pelo projetista, segundo os requisitos pretendidos pelo cliente.
- 2) A geometria e a modulação são determinadas através da interação com o fabricante e, com base nessas informações, define-se o tipo de painel mais apropriado.
- 3) Dimensionamento dos painéis tendo por base as ações a que ficarão submetidos ao longo da sua vida útil.
- 4) Produção dos painéis.

3.2.1 Equipamento

Os principais equipamentos utilizados na produção dos painéis em GRC são a misturadora e a pistola de projeção.

A misturadora tem como função fazer a junção e mistura dos vários materiais que a compõem. Existem vários tipos de misturadoras, com diversas funções, velocidades de rotação e capacidades de volume. A Figura 3.5 mostra um exemplo de misturadora.



Figura 3.5 – Misturadora de argamassa

A pistola de projeção tem a particularidade de fazer o corte das fibras de vidro em tamanhos iguais dentro de um tambor integrado, que depois serão projetadas juntamente com a argamassa, por ar comprimido. O rendimento desta máquina é influenciado pela quantidade de argamassa a ser projetada e pelo diâmetro da pistola. A argamassa recebida já vem preparada da misturadora.



a)



b)

Figura 3.6 – a) Pistola de projeção do GRC. b) Fibra de vidro para posterior corte pela pistola

3.2.2 Mistura e dosagem

Os elementos em GRC são constituídos, essencialmente, por uma pasta de cimento, areia e água, contendo adjuvantes e aditivos. As fibras de vidro são adicionadas a esta matriz cimentícia, conferindo assim elevada resistência à tração e a ductilidade atingida no modo de rotura.

O processo de pulverização obriga a uma mistura razoavelmente fluida, de forma a garantir o bombeamento homogéneo, ou seja, esta pulverização deve ser realizada sem bloqueios e com apropriada compactação. Para isso deve ser feita uma adequada formulação do GRC. O Quadro 3.1 apresenta um exemplo dos constituintes e das adequadas dosagens a serem utilizadas na projeção e na pré-mistura e moldagem.

Quadro 3.1 – Exemplo de formulação de GRC, (Cem-FIL, TD)

Constituintes (/m ³)	Projeção (5% fibra)	Pré-mistura e moldagem (3% fibra)
Cimento	724 kg	724 kg
Areia	724 kg	724 kg
Plastificantes	10 kg	10 kg
Polímeros	201 kg	201 kg
Fibras AR	101 kg	60 kg
Água	241 kg	282 kg
Água/Cimento	0.33	0.39

3.2.3 Processos de produção

Os painéis em GRC, usados no revestimento de fachadas de edifícios, devem ser concebidos por fabricantes com experiência, de forma a alcançar a qualidade desejada. Contudo, para a obterem devem dispor do equipamento anteriormente mencionado, bem como, de metodologias de controlo de qualidade necessárias à produção. Em seguida, são detalhados os processos utilizados ao longo de toda a produção deste material, desde a escolha das misturas, passando pelos métodos de fabrico até à aplicação e montagem destes elementos em obra.

Os dois principais métodos de produção de elementos em GRC são o de projeção direta (*spray-up*) e o de pré-mistura (*premix*).

O método mais usado na indústria Portuguesa é a projeção direta (*spray-up*), pois este é um processo de fácil execução, permitindo alcançar elementos com o dobro da resistência mecânica do que aqueles produzidos pela pré-mistura, para além de que, através deste método, a superfície das fibras não é danificada, sendo possível a distribuição de um maior volume de fibras e relações água/cimento mais reduzidas, (Barth, *et al* 2009).

Neste método de projeção direta, a projeção do compósito é feita diretamente contra o molde, através de uma pistola dotada de duas unidades de projeção, uma para a projeção da argamassa e outra para o corte e projeção das fibras de vidro. É de salientar que antes de ser feita a projeção do compósito é realizada a cofragem e deve-se ter o cuidado de se humedecer a superfície de contacto antes de se dar a projeção. Contrariamente ao processo de pré-mistura, a fibra de vidro e a pasta de cimento são mantidas separadamente e só entram em contacto, na superfície do molde, no momento da projeção, (Simões *et al*, 2009).

Este processo tem uma sequência de acontecimentos descritos em seguida:

- 1) O operador move a pistola em faixas retas ao longo do molde de modo a preencher o mesmo, direcionando o fluxo perpendicularmente;
- 2) O primeiro material a ser projetado no molde é uma pequena camada de revestimento (*mist coat*), com espessuras a variar entre 1 e 2mm, que não contém fibra;
- 3) Projetam-se várias camadas, agora com fibra de vidro, com uma espessura de aproximadamente 3mm, e devidamente compactadas normalmente, com rolos metálicos, de modo a evitar vazios;
- 4) A camada inferior de GRC não deve endurecer antes da aplicação da camada seguinte, de forma a evitar a potencial delaminação do elemento;
- 5) Cada camada deve ser projetada na direção perpendicular à anterior, para obter uma distribuição mais uniforme da pasta ao longo do molde;
- 6) Realiza-se a descofragem dos painéis e estes continuam o processo de cura, a qual pode ser, ou não, em ambiente condicionado.

Com este método de projeção pretende-se obter elevada uniformidade e orientação das fibras no plano dos moldes, distribuição bidimensional e painéis de maior complexidade e resistência.



Figura 3.7 – Projeção da matriz de argamassa e da fibra de vidro em simultâneo

O processo de pré-mistura, consiste numa mistura inicial dos materiais que compõem a matriz de argamassa à qual é posteriormente adicionada, na misturadora, a fibra de vidro pré-cortada. Este método satisfaz determinados preceitos, onde se destacam, a quantidade de água que deve ser a mínima possível, o conteúdo de fibra de vidro que deve ser aproximadamente entre 1,5 e

os 3% do peso total da matriz e a relação água/cimento que deve ser inferior a 0.35, de forma a evitar problemas de retração, (Cem-FIL, TD).

Com o processo de pré-mistura é difícil conseguir-se uma distribuição uniforme das fibras na matriz. Este aspeto aliado ao facto de se ter habitualmente um menor teor de fibras, faz com que ele seja utilizado em situações de menor exigência em termos de resistência.

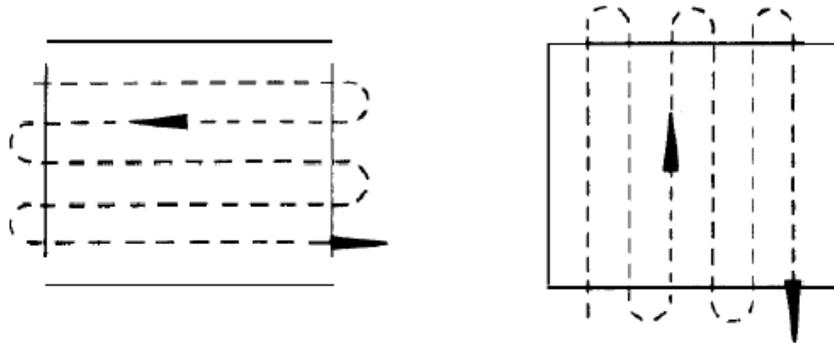


Figura 3.8 – Metodologia de projeção, (Cem-FIL, TD)

3.3 Cura

A cura dos painéis em GRC resulta da adequada hidratação do cimento, sendo esta essencial para alcançar as propriedades pretendidas e dependentes da fibra de vidro e da matriz do composto.

O método de cura exige cuidados para que não ocorram perdas ao nível da resistência mecânica final da peça. De um modo geral os elementos em GRC apresentam uma espessura reduzida. É fundamental garantir que a quantidade de água adicionada à mistura seja suficiente para a hidratação total do cimento, sendo ainda necessário evitar a rápida evaporação da água, retendo o máximo possível da mesma. Caso contrário, vão ocorrer perdas na resistência esperada da peça, (Fernandes, 2008).

São, em geral, aplicados dois tipos de cura no processo de fabrico de GRC: a cura húmida e a cura ao ar.

A cura húmida, como não recorre à adição de polímeros, necessita de uma atmosfera húmida para que a humidade se mantenha, de forma a garantir uma adequada hidratação do cimento, para prevenir o aparecimento de fissuras, o qual pode acontecer pela rápida perda de água. Este método de cura pode ser levado a cabo envolvendo o elemento, logo depois do seu fabrico, num filme de polietileno, para impedir a secagem e obter adequada resistência até ser desmoldado, num ambiente cuja temperatura deve ser mantida acima de 16°C. Posteriormente, o elemento é desmoldado e pode ser curado em câmara húmida, num intervalo de temperatura entre 15-20°C em humidade relativa a 95%, por um período de 7 dias, (PCI, 1993).

A cura ao ar surge como alternativa ao método anterior e consiste na adição de polímeros na mistura, com o objetivo de evitar a saída de água da matriz. O polímero forma um filme em volta do compósito, retendo a humidade no elemento, eliminando assim, a necessidade da cura húmida durante 7 dias, garantindo a hidratação do cimento e impedindo o aparecimento de fissuras superficiais. A temperatura indicada de cura é de 16°C, devendo manter-se ao longo de 12 a 16 horas, (PCI, 1993).

3.4 Armazenamento e montagem

Um aspeto essencial dos métodos de armazenamento e transporte de painéis de GRC é não sujeitar a face do painel a qualquer tipo de carga. Os painéis devem ser suportados e amarrados pela parte estrutural do painel e devem ser acondicionados com cuidados especiais. Estas medidas de prevenção devem ser tidas em conta durante o armazenamento, uma vez em que os painéis, na sua fase inicial de maturação, estão particularmente sensíveis a deformações. Estes precisam de ser armazenados em apoios, em locais específicos, em superfície plana e regular. Os painéis devem de ser cobertos com um material que os proteja das posições de contacto em superfícies normalmente expostas. Todos estes aspetos devem de ser refletidos ao longo do processo de armazenamento e também no processo de fabrico e em obra, (Cem-FIL, TD)

O transporte de painéis planos deve ser realizado de forma que a sua posição de carga e ligações de segurança não impliquem mais do que esforços moderados, (Simões *et al*, 2009).

Uma eficaz montagem dos painéis em obra será consequência da preparação de todas as etapas e da coordenação dos intervenientes, especialmente entre o fabricante, transportador, operador de elevação e montagem e o empreiteiro geral. Antes de se proceder à montagem em obra, é fundamental verificar o acesso do estaleiro a todo o equipamento, confirmar as dimensões da estrutura do edifício e das superfícies de apoio, de modo a evitar atrasos, assim como elaborar um planeamento da montagem que otimize o uso dos equipamentos disponíveis (camiões, plataformas elevatórias, gruas móveis, etc.), (Fernandes, 2008).

Habitualmente, os painéis são elevados, com o auxílio de gruas móveis e plataformas elevatórias diretamente do camião para o edifício/construção em questão, de forma a minimizar riscos e custos de movimentação.

3.5 Propriedades mecânicas

3.5.1 Fatores que afetam as propriedades mecânicas do GRC

A composição da mistura e o processo de produção usado no fabrico dos elementos em GRC são os principais fatores que tem influência nas propriedades mecânicas destes materiais.

A relação cimento/areia mais comum na produção de elementos em GRC varia de 1:1 até 3:1. A granulometria da areia utilizada na mistura é monogranular.

Os agentes de cura mais comuns são as diversas emulsões de polímeros. Deste modo, as proporções da mistura do composto, os constituintes e as propriedades mecânicas são diferentes de um fabricante para outro.

A resistência última à flexão e a resistência inicial à tracção são afetadas maioritariamente pelo comprimento, teor e orientação das fibras. A presença de fibra de vidro irá aumentar simultaneamente a resistência da matriz da argamassa acima do nível habitual.

Em geral, o teor ótimo de fibra de vidro adicionado à matriz do GRC é de cerca de 5% do valor do peso da matriz. Teores inferiores de fibra originam resistências últimas inferiores e teores superiores podem provocar dificuldades na compactação e consolidação do composto. O teor de fibra de vidro do composto é controlado e monitorizado durante o fabrico do GRC por execução dos ensaios do saco, ou do balde, ou de desgaste. No entanto, pela sua simplicidade, o ensaio do saco é o mais corrente.

Outros fatores que similarmente influenciam a resistência última do composto são a sua compactação, consolidação, e o comprimento da fibra, o qual se deve situar entre 25 a 50 mm.

Tal como os aspetos anteriormente mencionados, deve-se ter em conta a orientação das fibras, pois estas devem estar orientadas aleatoriamente e bidimensionalmente de forma a proporcionar a máxima resistência.

De modo a ser obtida uma adequada penetração da fibra, espessura e densidade do composto, deve-se ter em atenção uma adequada compactação e consolidação da mistura, caso contrário, podem ocorrer alterações nas propriedades esperadas do material.

São também muito importantes as questões relacionadas com a temperatura e humidade, condicionantes de uma cura adequada. Esta cura é fundamental para que o óxido de zircónio, que garante a durabilidade da fibra, apresente menor reatividade aos alcalis do cimento.

A resistência à flexão e tracção e o módulo de elasticidade variam com a densidade. Uma deficiente consolidação pode originar deterioração do composto, quando sujeito a ciclos de gelo/degelo, (NPCAA, 2006).

As propriedades mecânicas sofrem variações no tempo uma vez que o compósito GRC padece de degradações bem como da evolução das propriedades como acontece com os restantes materiais que tem como componente base o cimento.

Em resumo, os principais fatores que afetam as propriedades mecânicas do GRC são:

- Teor em fibra de vidro;
- Distribuição da fibra de vidro;
- Relação água/cimento;
- Relação areia/cimento;
- Porosidade do compósito;
- Densidade do compósito;

- Processo de cura;

3.5.2 Resistência à tracção e flexão

As propriedades fundamentais do GRC em condições ideais, aos 28 dias, utilizadas para estabelecer tensões limite de projeto são a resistência à tracção por fendilhação e a resistência por rotura à tracção. Contudo estas propriedades sofrem alterações ao longo do tempo, levando a que ocorram diferenças significativas entre os diagramas típicos de tensão- deformação do GRC, aos 28 dias e do GRC envelhecido.

A Figura 3.9 apresenta os diagramas típicos de tensão-deformação do GRC, aos 28 dias e envelhecido, sujeito a tração e a flexão.

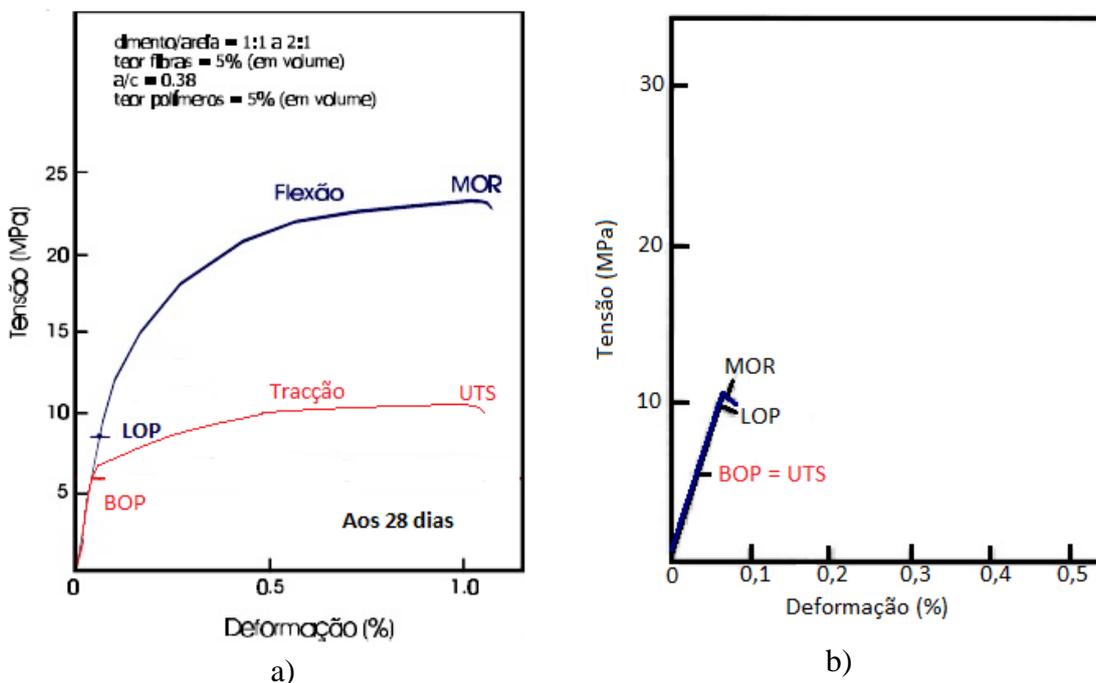


Figura 3.9 – a) Diagrama tensão/deformação do GRC aos 28 dias. b) Diagrama tensão/deformação do GRC envelhecido

O limite elástico à tracção (BOP- *Bend-Over Point*), identificado pela cor vermelha e o limite elástico à flexão (LOP- *Limit of Proportionality*), identificado pela cor azul são afetados, particularmente, pela composição da matriz, mas, similarmente, pela densidade, teor em polímeros e processos de cura. Correspondem ao início da fissuração da matriz.

A resistência por rotura à tracção (UTS- *Ultimate Tensile Strength*) e a resistência por rotura à flexão (MOR- *Modulus of Rupture*) dependem fortemente das características das fibras de vidro, especialmente do seu conteúdo, comprimento e orientação na matriz, assim como do conteúdo de polímeros e da densidade do composto, (Pereira, 2013).

No Quadro 3.2 são apresentadas as características de provetes ensaiados segundo a **NP EN 1170-5:2000** e, nas Figuras 3.10 a 3.12 apresentam-se os correspondentes exemplos de diagramas tensão/deformação.

Os diagramas representados nas Figuras 3.10 e 3.11 dizem respeito a material GRC ensaiado aos 28 dias de idade (ver Quadro 3.2) e, na Figura 3.12, apresenta-se um diagrama correspondente a material GRC já envelhecido. A observação destas figuras permite confirmar o que qualitativamente se representou na Figura 3.9.

Quadro 3.2 – Quadro de resumo dos provetes submetidos ao ensaio de flexão

Provete	Largura (b) (mm)	Espessura (d) (mm)	Distância entre apoios (L) (mm)	Força de rotura (F_{MOR}) (N)	Deformação (δ_{MOR}) (mm)	Extensão de rotura (ϵ_{MOR}) (mm)	Tensão de rotura (σ_{MOR}) (MPa)
B2	47,66	13,51	250,00	365,4	10,02	0,010	10,50
T2	48,13	15,30	250,00	522,0	10,60	0,012	11,58
T3	352	14,00	100,00	607,0	10,90	0,010	30,35

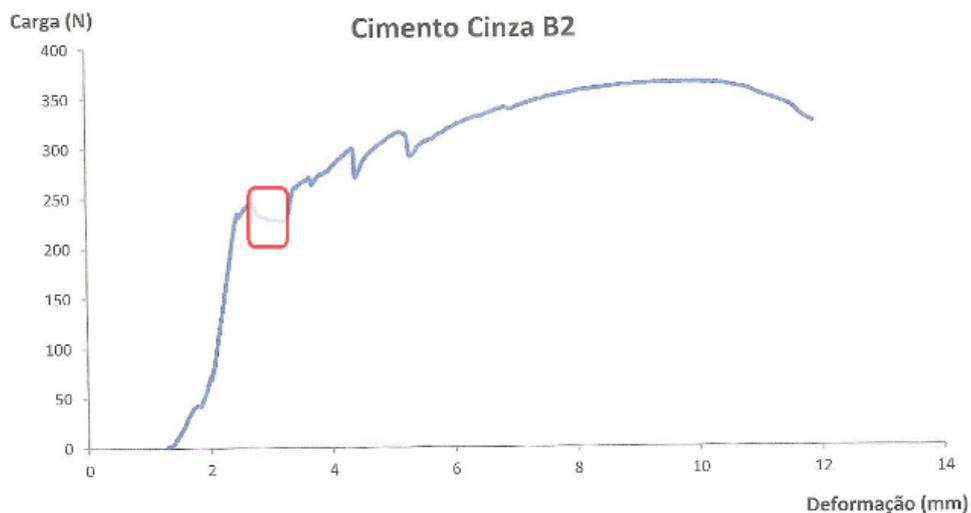


Figura 3.10 – Diagrama carga/deformação do provete relativo ao cimento cinza B2

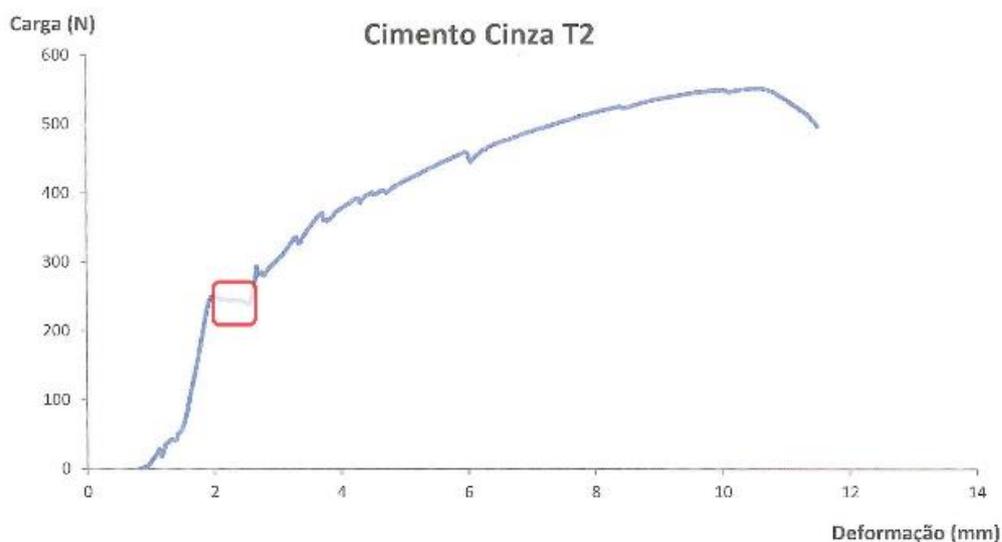


Figura 3.11 – Diagrama carga/deformação do provete relativo ao cimento cinza T2

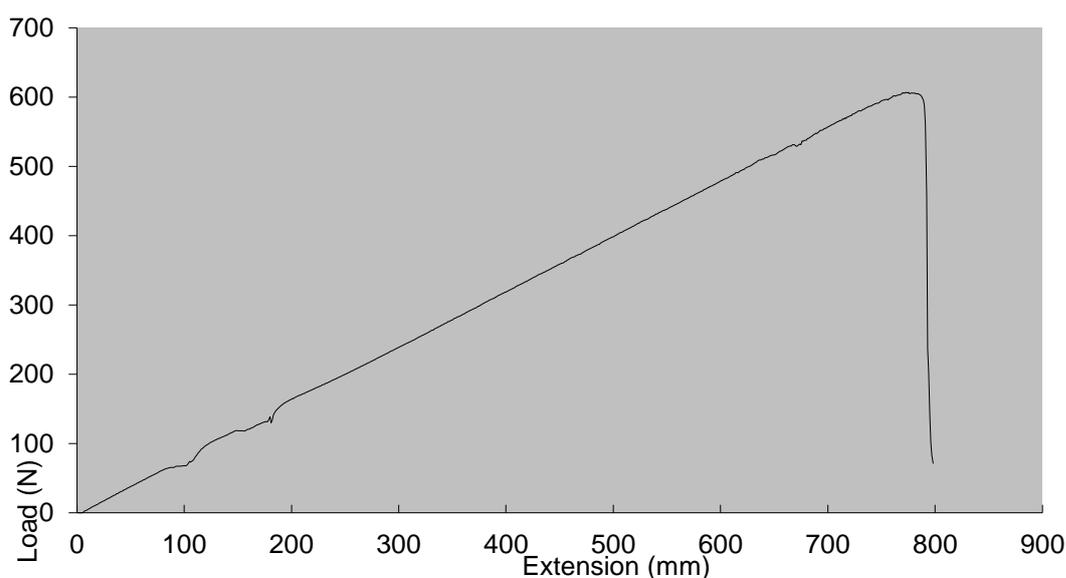


Figura 3.12 – Diagrama carga/deformação do provete relativo ao cimento cinza T3

3.5.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão é influenciada principalmente pelas propriedades da matriz de argamassa. Devido às camadas das fibras de vidro afetarem a continuidade da matriz, a resistência à compressão no plano é um pouco menor do que a no plano perpendicular à mesma, neste último plano a resistência à compressão não é afetada pela presença das fibras de vidro e assemelha-se aos valores da resistência à compressão conseguidos nos ensaios de provetes cúbicos e cilíndricos, (PCI, 1993).

A resistência à compressão de um provete de GRC, cujo processo de fabrico é o de projeção (*spray*) varia entre os 50 e os 80MPa e a resistência à compressão de um provete em que o processo de fabrico é a pré-mistura e moldagem (*Premix*) varia entre os 40 e os 60MPa.

3.5.4 Resistência ao impacto

As cargas de impacto aplicadas no painel de GRC causam danos em torno de uma área localizada.

A boa resistência ao impacto de um painel em GRC é devida às fibras de vidro presentes na matriz do compósito. Esta resistência aumenta com o aumento do comprimento da fibra. Se as fibras apresentam comprimento relativamente curto, a matriz de compósito pode exibir características frágeis sob cargas de impacto. A resistência ao impacto diminui com a diminuição do teor de fibra.

O comportamento da matriz de GRC é do tipo dúctil, com grande capacidade de absorção de energia.

O ensaio da resistência ao impacto é um método que visa avaliar a resistência e a tenacidade dos materiais. Consiste em submeter uma amostra de 25-50mm de largura e 6-12mm de espessura a uma carga praticamente instantânea, provocando fissuração.

No ensaio da resistência ao impacto o provete é sujeito a uma força exercida por um pêndulo ou por um martelo pesado, que cai de uma distância fixa (energia potencial constante), numa velocidade pré determinada (energia cinética constante). A energia absorvida no impacto é o parâmetro de avaliação da propriedade do material pretendido.

A resistência ao impacto de um provete em GRC, cujo processo de fabrico é o de projeção (*spray*) varia entre os 10 e os 25MPa e a resistência ao impacto de um provete em que o processo de fabrico é a pré-mistura e moldagem (*premix*) varia entre os 10 e os 15MPa, (Cem-FIL, TD).

Normalmente, o valor da resistência ao impacto não é um parâmetro de projeto.

3.5.5 Resistência ao corte

Os painéis executados pelo processo de projeção (*spray*) possuem fibras de vidro distribuídas aleatoriamente e bidimensionalmente ao longo do plano de secção, assim, os valores da resistência ao corte variam com a natureza da carga aplicada. A resistência ao corte interlaminar é mobilizada em flexão, enquanto a resistência no plano pode ser mobilizada pelo impedimento à livre dilatação ou contração da face do painel. A resistência ao corte no plano é da ordem de grandeza da resistência à tracção, (NPCAA, 2006).

A Figura 3.13 procura ilustrar estes conceitos atrás descritos.

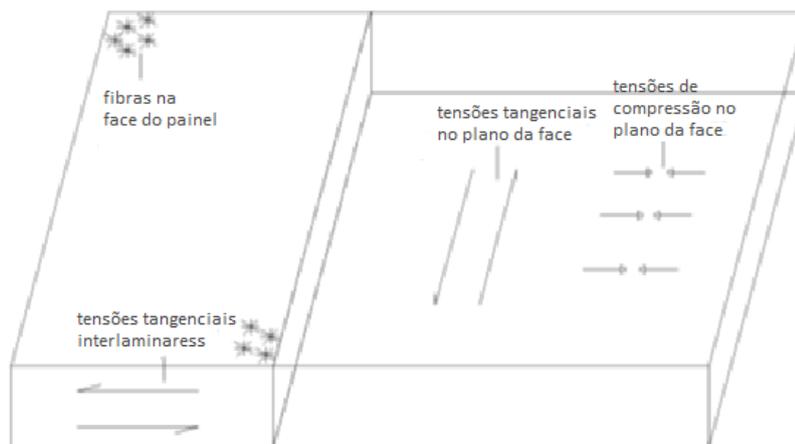


Figura 3.13 - - Representação esquemática das forças de resistência ao corte e compressão (PCI, 1993)

3.5.6 Módulo de elasticidade

Na determinação de valores do módulo de elasticidade, para fins de projeto, recorre-se a curvas de tensão/deformação, à flexão.

O módulo de elasticidade varia com a composição da matriz, conteúdo de polímeros, densidade e processos de cura.

3.5.7 Variações de deformação devido à humidade

O GRC está submetido a retração por secagem e a uma recuperação parcial em ambiente molhado/húmido, tal como acontece nos betões. A deformação induzida pela humidade obedece a diversos fatores, incluindo as relações água/cimento e cimento/areia, o teor de polímeros, o processo de cura, densidade e a idade do composto.

O efeito da variação do teor de humidade no painel e a sua consequência em termos de deformações está representado na Figura 3.14.

A incorporação da areia na matriz faz diminuir a retração. Contudo, a retração é mais elevada no GRC do que na maior parte de produtos em betão, devido à maior quantidade de cimento.

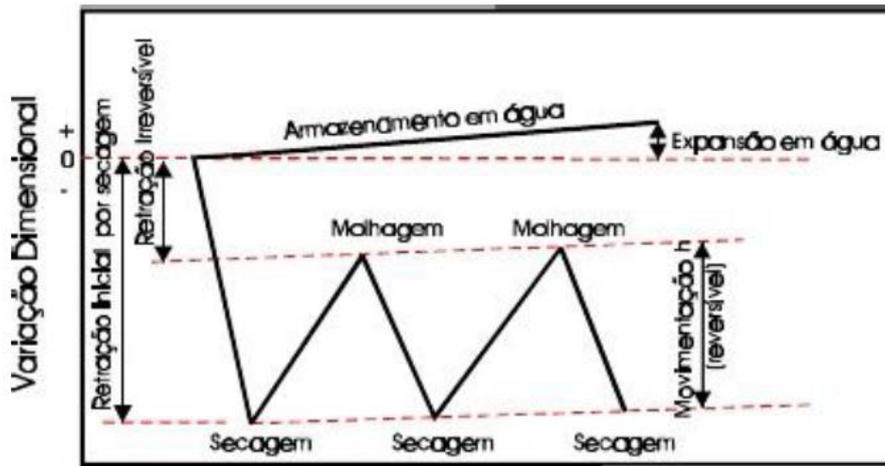


Figura 3.14 – Estabilidade dimensional- movimento do GRC induzido pela humidade, (PCI, 2013)

No caso de existir ligação de materiais de revestimento a elementos em GRC, devem ser realizados ensaios de forma a determinar a retração e as diversas mudanças provocadas pela humidade, para se avaliar se as características de movimento dos dois materiais são compatíveis. Diferenças consideráveis entre elas podem provocar tensões elevadas na casca do painel, em resultado da dificuldade do movimento relativo dos materiais. Portanto, existem determinados materiais de revestimento que não devem ser aplicados sobre GRC, devido à divergência entre variações volumétricas.

3.5.8 Expansão térmica

O coeficiente de dilatação térmico linear varia entre 10×10^{-6} a $20 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Com o aumento da temperatura, o GRC expande, esta expansão térmica pode ser contrariada pela retração provocada pela perda de humidade, durante o processo de cura do material. A retração e expansão térmica são condicionadas pelas características da matriz, como a quantidade de areia, relação areia/cimento e densidade.

3.5.9 Deformação na rotura

Os elementos de GRC conseguem suportar cargas ao longo do tempo. O comportamento da deformação na rotura destes elementos é idêntico ao dos materiais compostos por cimento. A deformação elástica inicial é seguida por uma lenta deformação até à rotura, sob carga constante. A variação da fluência reduz-se ao longo do tempo, sendo este efeito mais evidente quando representado em escala logarítmica.

A deformação na rotura depende das características da matriz e da quantidade de fibra presente na mesma.

3.5.10 Resistência ao fogo

Os elementos de GRC são ignífugos, não combustíveis e cumprem as exigências impostas pela **ASTM E136**. Uma vantagem destes elementos, quando utilizados como materiais de revestimento, é que o seu índice de propagação de chamas é zero.

Quanto à classificação da resistência ao fogo, o GRC é um material de classe A1, segundo as especificações do sistema europeu em vigor (que corresponde à antiga classe M0, classificação das especificações do LNEC), (Pereira, 2013).

3.5.11 Propriedades acústicas

As propriedades físicas que mais influenciam o isolamento acústico de um material homogéneo são: a rigidez, o amortecimento e a massa de superfície, (Cem – FIL, TD).

Para faces à vista idênticas, mas de espessuras crescentes, logo de pesos crescentes, o índice de redução sonora (STC – *sound transmission class*) aumenta aproximadamente 5dB por cada duplicação do peso. Os elementos em GRC de alta densidade exibem boas características de redução sonora. Estes elementos seguem um conjunto de especificações para a atenuação do som, (Cem –FI, TD).

3.5.12 Densidade

A densidade seca dos elementos em GRC produzidos pela técnica de projeção dependem, especialmente, da proporção de fibra, da relação água/cimento, do teor de polímeros, da quantidade de areia, da compactação e das técnicas de projeção. Esta densidade varia entre 1920 e 2240kg/m³, (Cem-FIL, TD).

3.5.13 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica de elementos em GRC depende da densidade do compósito e do teor de humidade. Esta propriedade varia entre 0.5 e 1.0 W/m°C, (Pereira, 2013).

3.5.14 Permeabilidade

Os elementos em GRC conseguem absorver e perder teor de humidade rapidamente.

A permeabilidade ao vapor de água (π) dos elementos em GRC varia entre 7.3 a 16×10^{-12} kg/m.s.Pa, para elementos em GRC produzidos com 0.25 e 0.35 de relação água-cimento, respetivamente. A maioria das formulações deste material apresenta uma permeância ao vapor de água (Pe) inferior a 1.7×10^{-10} kg/m².s.Pa, (Cem – FIL, TD).

A permeância ao ar e ao vapor de água do GRC diminuem em função do da idade, (Cem – FIL, TD).

4. Dimensionamento de Painéis Nervurados em GRC

4.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se fazer uma abordagem por via da teoria clássica da flexão em peças lineares, aplicando a mesma a painéis nervurados de GRC. Dada a tipologia dos painéis em causa, estudar-se-ão nervuras simples através da referida teoria clássica e através de um método numérico de elementos finitos.

No dimensionamento de painéis de fachada em GRC é fundamental considerar as ações às quais estes elementos vão estar sujeitos, as designadas ações de projeto. Os painéis estão submetidos a uma variedade de solicitações e condições ambientais, originando assim, esforços internos e tensões. Deste modo, devem ser estimadas as cargas do painel, devidas ao peso próprio, vento, sismo, e os efeitos da temperatura e humidade.

Uma vez que os painéis de GRC são elementos leves e apresentam baixo peso, o vento é uma ação importante a ser considerada, mais relevante no que no caso de painéis de betão armado, de peso próprio bastante mais elevado.

A ação do vento pode ser simulada através da consideração de conjuntos de cargas uniformemente distribuídas pela superfície dos painéis, gerando, essencialmente, esforços de flexão e esforços transversos.

Assim neste capítulo, estudar-se-á o caso de várias nervuras de painéis sujeitos a carregamentos uniformemente distribuídos.

4.2 Dimensionamento pela teoria clássica da flexão em peças lineares

Em Resistência dos Materiais, a flexão é resultante da ação de carregamentos transversais que tendem a curvar a peça gerando uma distribuição de tensões aproximadamente lineares no seu interior.

O momento fletor provoca tensões normais (σ) sobre as 'fibras' do painel nervurado. Estas tensões determinam a resistência do painel e são, na generalidade, mais importantes que as tensões tangenciais (τ) causadas pelo esforço transversal.

Para determinar as equações necessárias ao estudo deste efeito nos painéis, utiliza-se a convenção de sinais da Resistência de Materiais representado na Figura 4.1.

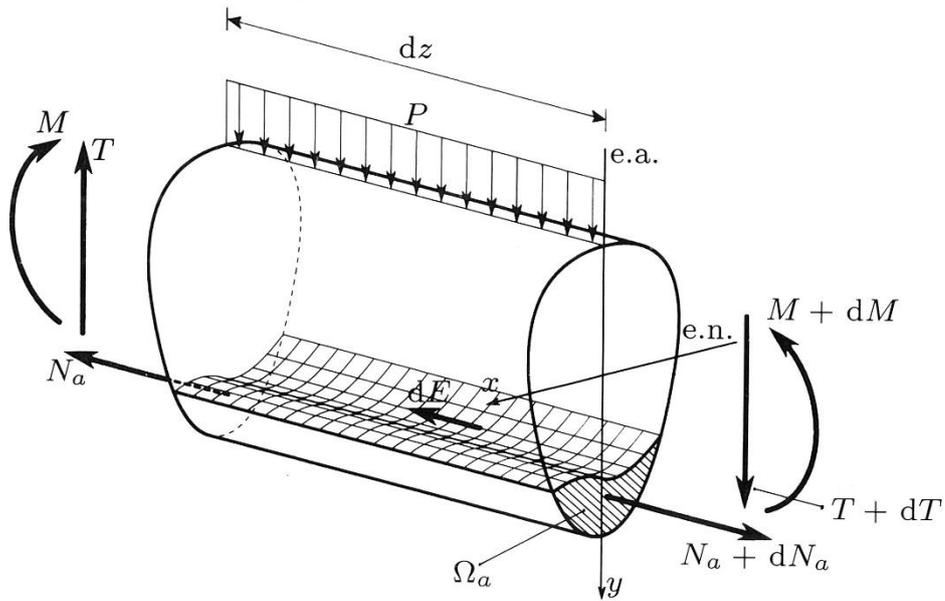


Figura 4.1 – Sentidos positivos dos esforços internos pela convenção da Resistência dos Materiais, (Silva, 2004)

Admitir-se-á que o elemento, a nervura do painel, tem o mesmo comportamento à flexão que o de uma peça linear. Assim sendo, o princípio de comportamento explicado na Figura 4.2 é em tudo idêntico ao de uma viga sujeita à flexão.

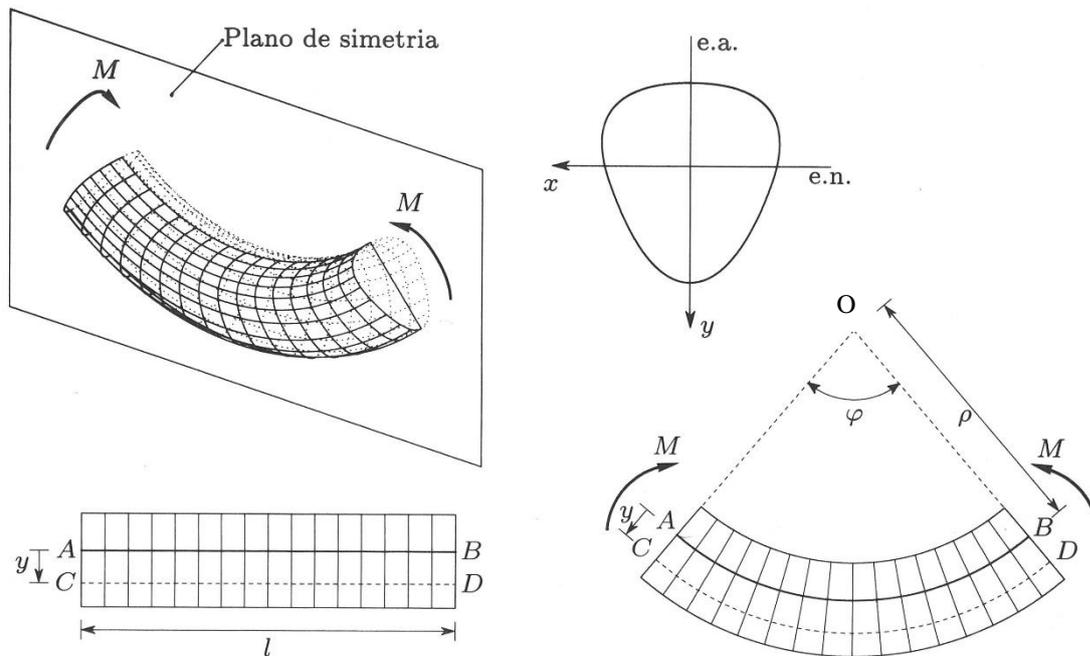


Figura 4.2 – Comportamento à flexão de uma peça linear, (Silva, 2004)

Na teoria da flexão em peças lineares parte-se habitualmente, do caso de flexão circular em que o momento fletor é constante segundo o eixo z. Devido ao facto de o momento fletor ser constante, a deformação em cada troço dz provocada pelo mesmo também é constante, (Silva, 2004).

Por conseguinte, o eixo da peça transforma-se numa curva de curvatura contínua, ou seja, num arco de círculo com centro em O. Por simetria, este arco de círculo está situado no plano médio (z,y), assim sendo, este plano é designado por plano médio de flexão.

As fibras longitudinais adquirem curvatura conforme arcos de círculo sucessivamente paralelos ao anterior. Visto não haver esforço axial de tracção ou de compressão, as fibras não podem estar todas tracionadas, nem todas comprimidas. Assim, na parte côncava do painel as fibras sofrem encurtamento e, na parte convexa, sofrem alongamento. Entre estas fibras existe, a um determinado nível, um conjunto de fibras mantêm o comprimento original. Nestas a tensão normal é igual a zero, designando-se assim por fibras neutras.

Para determinar a distribuição das tensões é essencial analisar a deformação das secções retas da peça com mais precisão.

A secção AD deverá, conservar-se plana e perpendicular ao eixo na configuração da deformada. Na secção BC, a situação deverá ser idêntica. Há evidência experimental e teórica para esta hipótese: trata-se da lei da conservação das secções planas enunciada por Bernoulli, (Silva, 2004).

Na configuração deformada, as secções retas mantêm-se planas e perpendiculares ao eixo fletido bem como a todas as fibras. O plano destas secções passa pelo centro de curvatura O.

Em seguida deduzem-se expressões para as tensões normais produzidas numa determinada secção solicitada em flexão, com base na condição mostrada anteriormente.

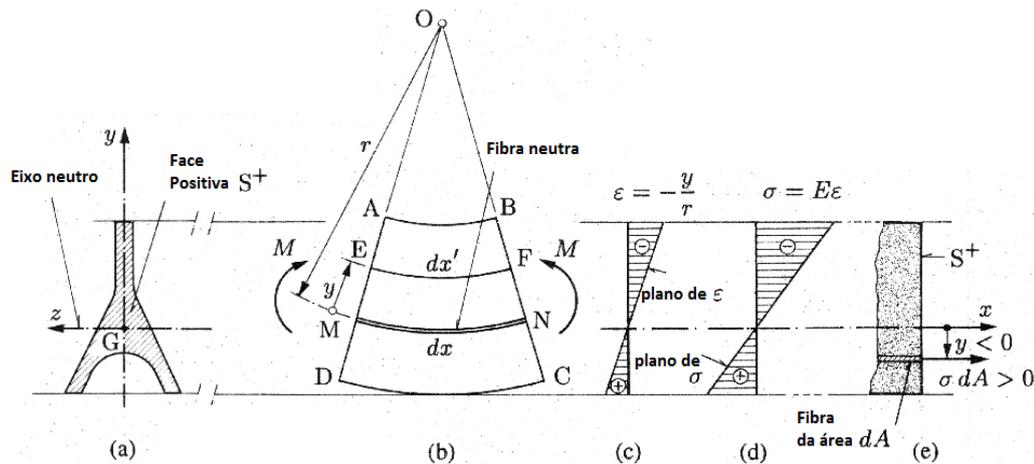


Figura 4.3 – Cinemática em flexão circular: a) secção transversal e eixo neutro; b) secção deformada; c) diagrama de deslocamentos; d) diagrama de tensões normais; e) deslocamentos da fibra, (Frey, 2000)

Na zona demarcada pelas secções AD e BC, considera-se a zona da peça solicitada à flexão, com comprimento dx .

Seja MN uma fibra neutra de comprimento dx , invariável, a orientação exata desta fibra ainda é desconhecida, mas sabe-se que o conjunto das fibras neutras está contido num plano, o plano neutro, perpendicular ao plano médio e paralelo ao eixo da nervura. A intersecção deste plano com a secção reta designa-se por eixo neutro.

Qualquer fibra EF, disposta a uma distância y do plano neutro e de comprimento inicial dx , ao deformar adquire um comprimento dx' .

As fibras de ordenada y^+ estão comprimidas, daí o sinal negativo. Todas as fibras dispostas ao mesmo nível de y da fibra EF sofrem extensões semelhantes, pois esta repartição de extensões é linear ao longo da altura da secção. Esta propriedade é visível uma vez que as fibras se devem manter planas, quando deformam, e devem rodar umas em relação às outras, como apontado pela condição da cinemática.

Se o material for homogéneo e obedecer à lei de Hooke, a repartição das tensões na secção é igualmente linear e proporcional à distância ao eixo neutro, como o indicado na Figura 4.4.

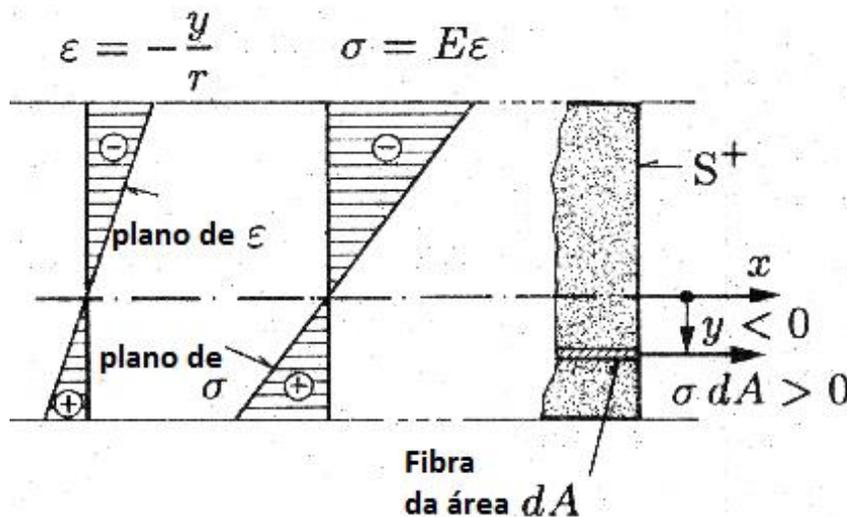


Figura 4.4 – Exemplo de diagramas de tensões normais, (Frey, 2000)

Para determinar a posição do plano neutro e o seu raio de curvatura r , recorre-se a equações determinadas pelo princípio de equivalência entre tensões e esforços internos. Sabe-se que força transmitida por um fibra de área dA vale σdA e que a soma destas forças terá de ser nula visto não existir esforços normais, como o determinado na expressão (1), (Silva, 2004).

$$N = \int_A \sigma dA = -\frac{E}{r} \int_A y dA = -\frac{E}{r} S_z = 0 \quad (1)$$

Sendo:

$$S_z = \int_A y dA \quad (2)$$

Pelo que o eixo neutro terá obrigatoriamente de passar pelo centro geométrico G da secção reta e o plano neutro terá de conter o eixo do painel.

A soma dos momentos provocados pelas forças internas terá de ser igual ao valor do momento M aplicado:

$$M = \int_A \sigma y dA = \frac{E}{r} \int_A y^2 dA = \frac{E}{r} \quad (3)$$

Sendo I_z o momento de inércia da secção reta do painel relativamente ao eixo neutro z:

$$I_z = \int_A y^2 dA \quad (4)$$

A curvatura $1/r$ do eixo do painel determina-se, então com base na expressão (5):

$$M = \frac{E}{r} I \Leftrightarrow \frac{1}{r} = \frac{M}{EI} \quad (5)$$

Apresentando a relação anterior na expressão das tensões obtém-se uma relação entre tensões e momento aplicado M (fórmula de Navier):

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI} \quad e \quad \sigma = -\frac{Ey}{r} \Leftrightarrow \sigma = -\frac{M}{I} y \quad (6)$$

A igualdade acima representada permite determinar a tensão normal em qualquer ponto de uma secção reta. Quanto maior for o afastamento dos pontos relativamente ao eixo neutro, maior é o valor desta tensão, assim sendo, esta será máxima nas fibras extremas onde atinge os seguintes valores: fibra superior – índice superior, $y_{sup} > 0$; fibra inferior – índice inferior, $y_{inf} < 0$.

$$\sigma_{sup} = -\frac{M}{I} y_{sup} \quad (7) \qquad \sigma_{inf} = -\frac{M}{I} y_{inf} \quad (8)$$

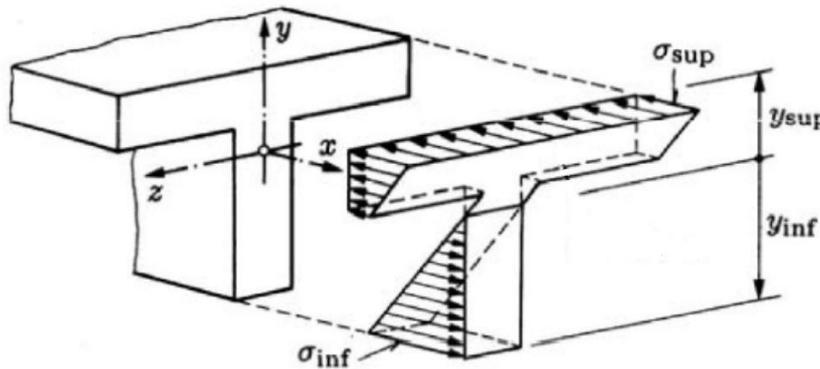


Figura 4.5 – Exemplo de diagramas de tensões normais superiores e inferiores, (Frey, 2000)

Quando uma dada nervura do painel está solicitada por um momento fletor positivo, as fibras superiores ($y > 0$) de uma determinada secção reta estão comprimidas e as fibras inferiores ($y < 0$) estão tracionadas.

Recorrendo à convecção de sinais acima demonstrada, determinam-se as tensões normais na secção, compressão ou tracção, pelas expressões (8) e (9).

$$\sigma_{sup} = \frac{M}{I} y_{sup} \quad (9) \qquad \sigma_{inf} = -\frac{M}{I} y_{inf} \quad (8)$$

Nas expressões (8) e (9) e y_{sup} e y_{inf} são características geométricas da secção.

4.2.1 Aplicação ao dimensionamento de painéis nervurados

Como referido anteriormente, o dimensionamento de nervuras de painéis à flexão é em tudo semelhante ao estudado para o caso de dimensionamento em peças lineares de betão armado.

A orientação da nervura é baseada, essencialmente, em dois princípios: por um lado, no dimensionamento do painel, de modo a que as tensões sejam sempre mantidas abaixo do limite elástico do compósito (LOP – *Limite of Proportionality*) e, por outro, permitir o encaminhamento das cargas para as fixações do painel.

O modelo de cálculo em que se baseia o dimensionamento à flexão deve refletir o comportamento do painel. A idealização de uma estrutura é portanto um passo bastante importante para o dimensionamento.

Para o dimensionamento à flexão de painéis nervurados em GRC considera-se uma secção transversal de material homogéneo, como as indicadas na figura seguinte.

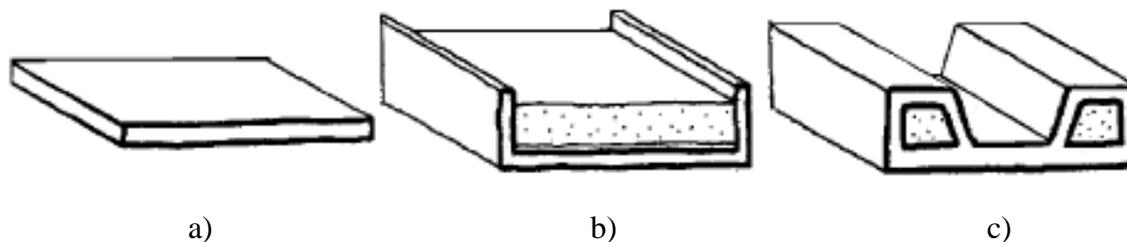


Figura 4.6 – a) Painel do tipo casca. b) Painel do tipo casca com abas. c) Painel do tipo nervurado

4.2.2 Dimensionamento de painéis nervurados

Suponha-se uma nervura simplesmente apoiada em que a carga q atua uniformemente ao longo da nervura gerando tensões de compressão nas fibras superiores e tensões de tração nas fibras inferiores. A superfície neutra é representada por n-n e a distribuição de tensões normais está representada na Figura 4.7. Tal como se pode observar, as tensões são nulas na superfície neutra e crescem no sentido das fibras exteriores.

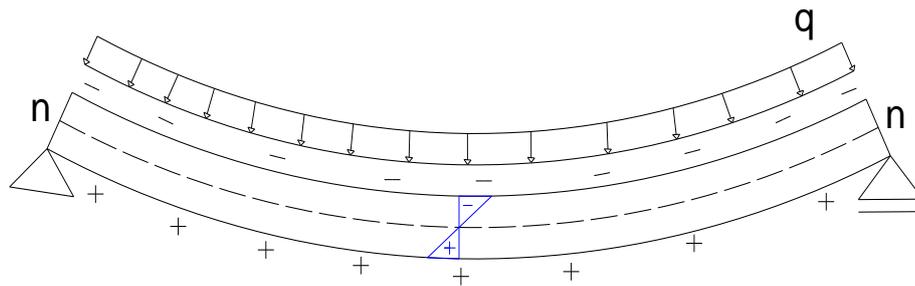


Figura 4.7 – Peça linear sujeita à flexão, quando aplicada uma carga uniformemente distribuída

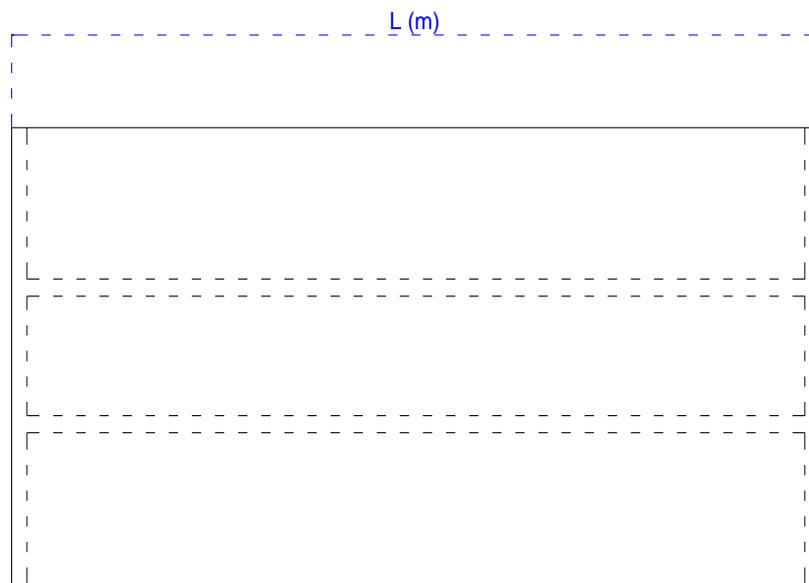


Figura 4.8 – Desenho em planta da nervura com comprimento L

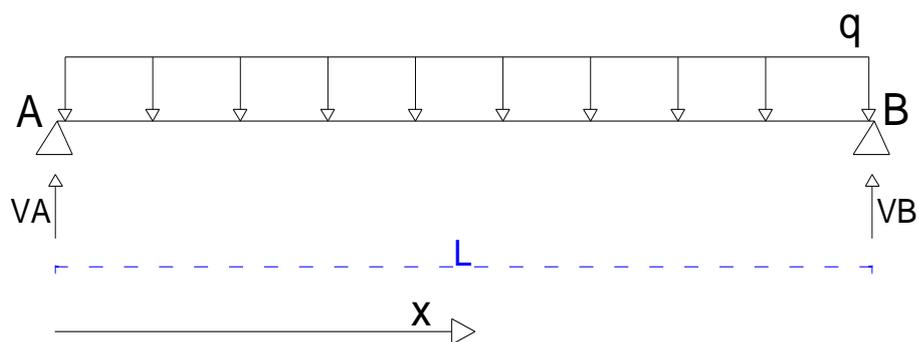


Figura 4.9 – Representação da nervura simplesmente apoiada com um carregamento uniforme, q , ao longo de um comprimento L

Após a quantificação do valor da carga uniformemente distribuída ao longo da nervura, determinam-se as reações verticais que atuam nos apoios, estas são representadas por V_A e V_B .

A configuração da deformada vai corresponder ao diagrama representado pelo momento fletor ao longo da peça.

O valor do momento fletor máximo, representado por $M_{\text{máx}}$ é atingido no meio vão como o representado na Figura 4.10. É nesse ponto que as tensões normais da nervura também vão ser máximas.

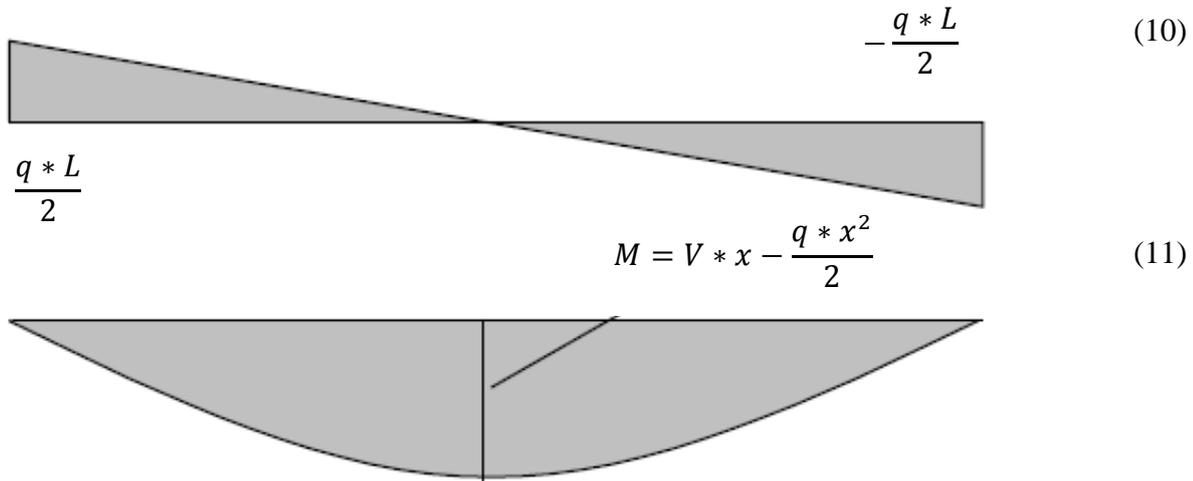


Figura 4.10 – Diagrama de esforço transverso e de momento fletor da peça

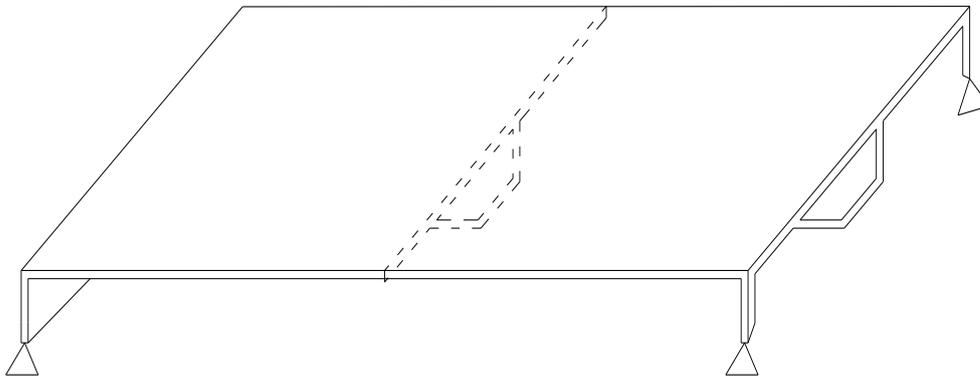


Figura 4.11 – Perspetiva da nervura

Para além do valor do momento fletor é necessária a determinação do momento central de inércia relativamente ao eixo horizontal. Considerando a Figura 4.11 como um exemplo típico da secção de uma nervura, realiza-se a determinação do momento de inércia considerando a secção oca.

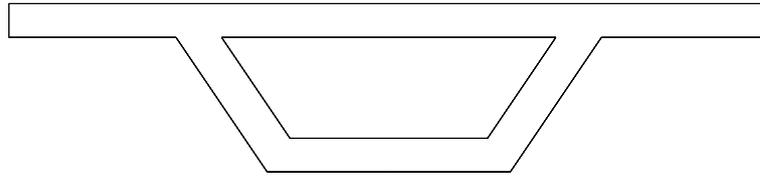


Figura 4.12 – Secção transversal da nervura no vão

De acordo com a expressão da tensão normal da peça:

$$\sigma = \frac{M}{I}y \quad (12)$$

4.2.3 Exemplos de aplicação

No presente subcapítulo, utilizando a TCF, foi estudada a nervura de um painel real para a qual se consideraram cinco larguras diferentes para o banço superior.

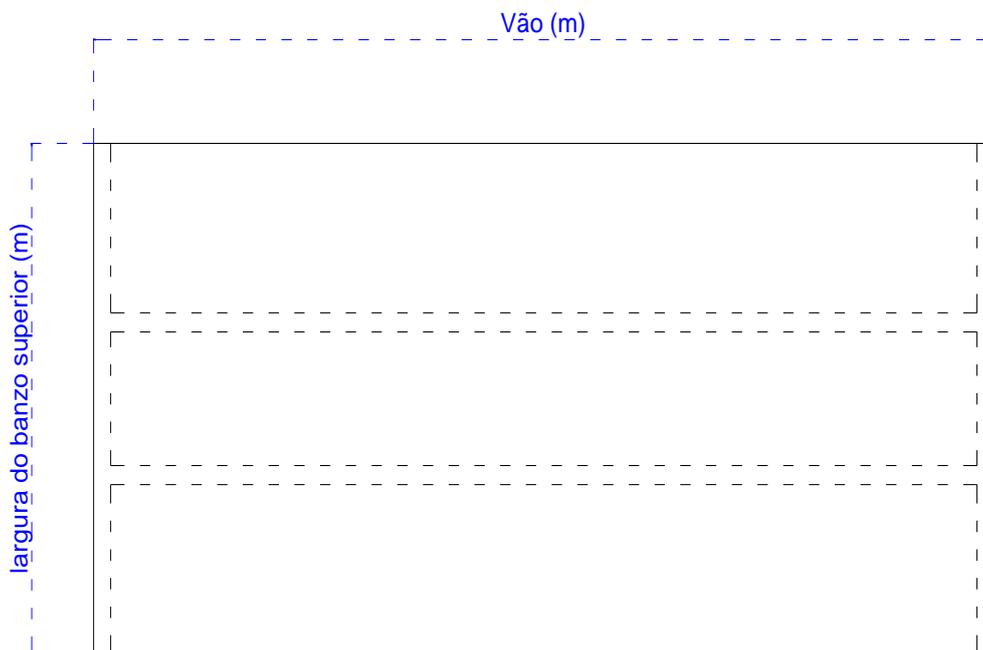


Figura 4.13 – Representação em planta da nervura

Quadro 4.1 – Dimensões dos painéis nervurados estudados

Identificação da nervura	Vão (m)	Largura do banzo superior (m)
N1	3,96	1,15
N2		0,75
N3		0,55
N4		0,45
N5		0,25

Todas as nervuras acima identificadas têm em comum a carga atuante (q), ao longo de um comprimento, e por conseguinte o mesmo momento fletor produzido por esta carga.

A carga total aplicada é 16kN. Esta corresponde a uma carga uniformemente distribuída determinada pela expressão (10).

$$q = \frac{P}{L} \text{ (kN/m)} \quad (10)$$

$$q = \frac{16}{3,96} = 4,04 \text{ (kN/m)}$$

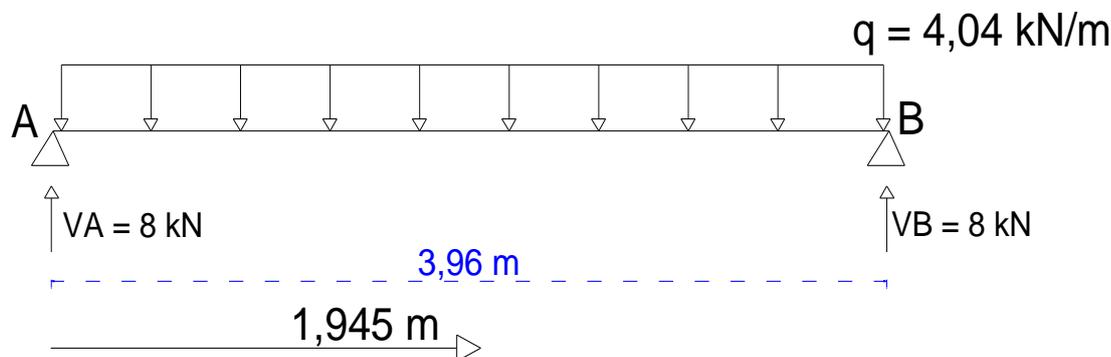


Figura 4.14 – Representação da nervura com os respetivos valores de carga e dimensões

Optou-se por determinar o momento praticamente a meio vão, no ponto $x = 1,945 \text{ m}$, no sentido de se comparar com um ponto do modelo numérico de elementos finitos.

A reação no apoio A e B é dado pela expressão número (13):

$$V = \frac{qL}{2} \text{ (kN)} \quad (13)$$

$$V_A = V_B = \frac{4,04 * 3,96}{2} = 8,0 \text{ (kN)}$$

E o momento fletor no ponto $x = 1,945 \text{ m}$ é determinado a partir da expressão (11):

$$M = V * x - \frac{q * x^2}{2} \tag{11}$$

$$M_{x=1,945} = 8 * 1,945 - \frac{4,04 * 1,945^2}{2} = 7,918 \text{ kN.m}$$

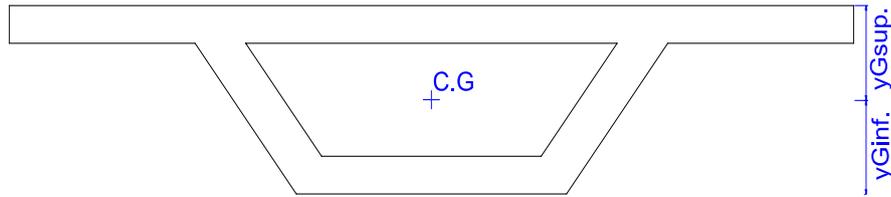


Figura 4.15 – Centro geométrico da nervura e respectivas distancias ao mesmo

A determinação das características geométricas de cada tipo de nervura permite construir o seguinte quadro:

Quadro 4.2 – Momentos de inércia segundo a direção x dos painéis nervurados

Identificação da nervura	Área (mm ²)	yGsup (mm)	yGinf (mm)	I _x (mm ⁴)	W _{xinf} (mm ⁵)	W _{xsup} (mm ⁵)
N1	13275	8,98	41,02	1710021,31	1,54x10 ⁷	7,01x10 ⁷
N2	9275	10,70	39,30	1585861,41	1,70x10 ⁷	6,23x10 ⁷
N3	7275	12,27	37,73	1486327,32	1,82x10 ⁷	5,61x10 ⁷
N4	6275	13,43	36,58	1416751,33	1,90x10 ⁷	5,20x10 ⁷
N5	4275	17,37	32,63	1191644,74	2,07x10 ⁷	3,89x10 ⁷

Com o objetivo de comparar os valores obtidos para as tensões normais longitudinais, pela TCF com os valores obtidos pelo modelo numérico, calcularam-se os valores das tensões nos pontos identificados na Figura 4.15 e listados nos quadros seguintes:

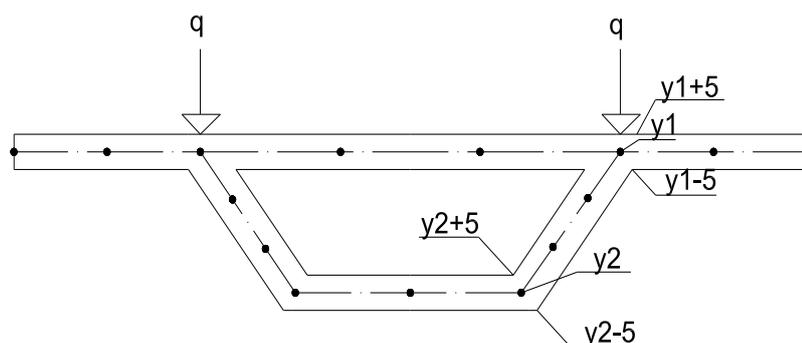


Figura 4.16 – Pontos onde são determinadas as tensões normais do painel nervurado

Quadro 4.3 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto $y1+5$

Identificação da nervura	I_x (mm ⁴)	$y1+5$ (mm)	σ (N/mm ²)	N (N/mm)
N1	1710021,31	8,98	- 41,59	- 415,9
N2	1585861,41	10,70	- 53,44	- 534,4
N3	1486327,32	12,27	- 65,38	- 653,8
N4	1416751,33	13,43	- 75,08	- 750,8
N5	1191644,74	17,37	- 115,45	- 1154,5

Quadro 4.4 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto $y1$

Identificação da nervura	I_x (mm ⁴)	$y1$ (mm)	σ (N/mm ²)	N (N/mm)
N1	1710021,31	3,98	- 18,43	- 184,3
N2	1585861,41	5,70	- 28,47	- 284,7
N3	1486327,32	7,27	- 38,74	- 387,4
N4	1416751,33	8,43	- 47,13	- 471,3
N5	1191644,74	15,37	- 82,21	- 822,1

Quadro 4.5 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto $y1-5$

Identificação da nervura	I_x (mm ⁴)	$y1-5$ (mm)	σ (N/mm ²)	N (N/mm)
N1	1710021,31	-1,02	-4,72	- 47,2
N2	1585861,41	0,70	- 3,50	- 35,0
N3	1486327,32	2,27	- 12,10	- 121,0
N4	1416751,33	3,43	- 19,17	- 191,7
N5	1191644,74	7,37	- 48,98	- 489,8

Quadro 4.6 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto y2-5

Identificação da nervura	I_x (mm ⁴)	y ₂₊₅ (mm)	σ (N/mm ²)	N (N/mm)
N1	1710021,31	41,02	189,99	1899,9
N2	1585861,41	39,30	196,27	1962,7
N3	1486327,32	37,73	201,05	2010,5
N4	1416751,33	36,57	204,44	2044,4
N5	1191644,74	32,63	216,87	2168,7

Quadro 4.7 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto y2

Identificação da nervura	I_x (mm ⁴)	y ₂ (mm)	σ (N/mm ²)	N (N/mm)
N1	1710021,31	36,02	166,83	1668,3
N2	1585861,41	34,30	171,30	1713,0
N3	1486327,32	32,73	174,40	1744,0
N4	1416751,33	31,57	176,48	1764,8
N5	1191644,74	27,63	183,64	1836,4

Quadro 4.8 – Tensões normais e esforços de membrana no ponto y2+5

Identificação da nervura	I_x (mm ⁴)	y ₂₋₅ (mm)	σ (N/mm ²)	N (N/mm)
N1	1710021,31	31,02	143,67	1436,7
N2	1585861,41	29,30	146,33	1463,3
N3	1486327,32	27,73	147,76	1477,6
N4	1416751,33	26,57	148,53	1485,3
N5	1191644,74	22,63	150,41	1504,1

4.3 Análise pelo método numérico de elementos finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo determinar o estado de tensão e deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações externas. Sempre que há necessidade de projetar uma estrutura é comum proceder-se a uma sequência de análises e alterações das suas características, com o objetivo de se obter uma solução satisfatória, quer em termos económicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares. As técnicas descritas em seguida correspondem à fase de análise do comportamento de painéis nervurados cuja geometria, materiais e ações são *a priori* conhecidas, (Carvalho, 2010).

Este tipo de painéis apresentam uma estrutura não reticulada, ou seja vão ser estudados como meios contínuos (exemplos: paredes, lajes, casca, sólidos).

Nas hipóteses usuais da teoria das estruturas considera-se que os deslocamentos provocados pelas ações exteriores são muito pequenos sempre que comparados com as dimensões dos elementos. Nesta situação, admite-se que não há influência da alteração da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões. Esta análise é feita com base na geometria inicial indeformada. É também frequente considerar que, ao nível do material que compõe a estrutura, a correspondência entre tensões e deformações é linear.

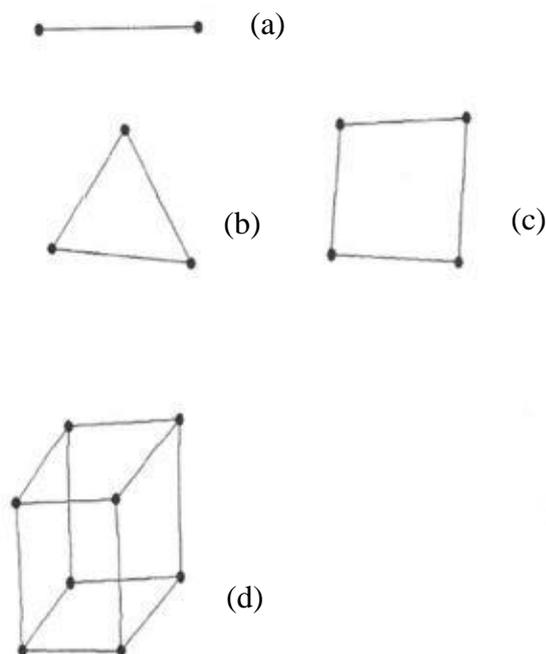


Figura 4.17 – a) Elemento finito de barra; b) Elemento finito triangular (placa ou laje); c) Elemento finito quadrangular (placa ou laje); d) Elemento finito sólido, (Carvalho, 2010)

A evolução e versatilidade do MEF provocou o seu uso muito frequente em detrimento dos demais métodos existentes, sendo exequível aplica-lo a qualquer tipo de estrutura, composta pelos diferentes tipos de materiais e sujeitar a qualquer tipo de carregamento.

O conceito base do MEF consiste em analisar o comportamento de cada elemento isolado que pertence a um sistema, para posteriormente fazer a análise do sistema global de elementos.

Na maioria dos problemas com que um Engenheiro Civil se depara, devido à sua maior complexidade geométrica, comportamento dos materiais ou ações, não é viável em termos práticos determinar uma solução analítica.

Habitualmente, só é possível conseguir soluções analíticas para problemas considerados relativamente simples. Para casos mais complexos é preciso recorrer a métodos numéricos que permitam a resolução do problema designado.

Nestes métodos, quanto maior for o número de elementos finitos em que se divide a estrutura, maior será a precisão da solução numérica obtida, tornando-a assim mais próxima da solução analítica teórica.

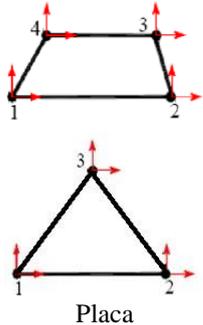
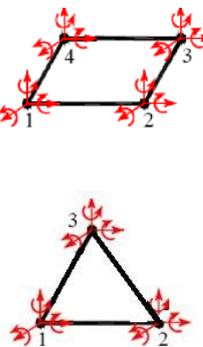
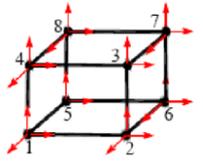
Isto mostra que, para se conseguir uma solução mais aproximada é essencial dividir o domínio da estrutura a analisar (discretização) num maior número de elementos finitos.

Os elementos finitos encontram-se ligados em pontos, denominados pontos nodais ou nós, que são locais onde o comportamento estrutural real é verificado. A extensão de solução para regiões entre nós é conseguida à custa de interpolações numéricas. É essencial a escolha do tipo de elemento finito a utilizar, consoante as características geométricas da peça.

Existem diferentes elementos finitos (laminares, planos e tridimensionais) que podem ser utilizados segundo o tipo e a forma da estrutura analisar.

Para melhor identificar os tipos de elementos finitos que são utilizados na análise estrutural, são apresentados no Quadro 4.9 os elementos finitos mais correntes e a sua respetiva aplicação prática.

Quadro 4.9 – Exemplo de elementos finitos mais utilizados em Engenharia, (Carvalho, 2010)

Elementos finitos mais utilizados				
Tipo Elemento Finito		Graus de Liberdade por nó	Numero de nós por elemento	Tipo de Aplicação
Lineares	 <p>Barra 2D</p>	3 GL/Nó (2 Translações + 1 Rotação)	Barra com 2 nós - 6 GL por elemento Barra com 3 nós - 9 GL por elemento	Estruturas reticulas planas, treliças, grelhas, muros de suporte
	 <p>Barra 3D</p>	6 GL/Nó (3 Translações + 3 Rotações)	Barra com 2 nós - 12 GL por elemento Barra com 3 nós - 18 GL por elemento	Estruturas reticulas tridimensionais, treliças, grelhas e muros de suporte
Laminares Planos	 <p>Placa</p>	2 GL/Nó (2 Translações)	Quadrangulares Placa com 4 nós - 8 GL por elemento Placa com 8 nós - 16 GL por elemento Triangulares Placa com 3 nós - 6 GL por elemento Placa com 6 nós - 12 GL por elemento	Estruturas planas sujeitas a acções segundo o seu plano médio
Laminares Tridimensionais	 <p>Casca Laje</p>	6 GL/Nó (3 Translações + 3 Rotações)	Quadrangulares Casca com 4 nós - 24 GL por elemento Casca com 8 nós - 48 GL por elemento Triangulares Casca com 3 nós - 18 GL por elemento Casca com 6 nós - 36 GL por elemento	Casca
Tridimensionais	 <p>Cubo</p>	3 GL/Nó (3 Translações)	Cubo com 8 nós - 24 GL por elemento Cubo com 20 nós - 60 GL por elemento	Estruturas maciças Tridimensionais, como barragens e túneis

Atendendo ao tipo de painéis em estudo e comparando com o que foi descrito anteriormente, pode-se concluir que o tipo de elemento finito que se pode adequar à geometria em causa é laminar tridimensional (representado em forma de retângulo), tendo assim 6 graus de liberdade por nó, sendo 3 translações e 3 rotações. Trata-se de um elemento finito resultante da associação

de um elemento de placa com um elemento de laje. Estes elementos são por vezes designados como elementos de casca fina (*shell type* na designação corrente anglo-americana).

5.3.1 Análise de nervuras de painéis através do método dos elementos finitos

Para a modelação das nervuras já atrás estudadas e identificadas no Quadro 4.1, recorreu-se ao programa de Elementos Finitos SAP2000, com o objetivo de comparar a modulação numérica com a teoria clássica da flexão.

A discretização de secção das nervuras encontra-se representada na Figura 4.18. Em termos de secção transversal, o banzo inferior foi discretizado em 2 elementos finitos; cada uma das almas, em três elementos finitos; a parte intermédia do banzo superior, também em três elementos e as partes exteriores deste mesmo banzo com um número variável em função da sua dimensão: nervura N1, $b = 1.15\text{m}$, 2×6 elementos; nervura N2, $b = 0.75\text{m}$, 2×6 elementos; nervura N3, $b = 0.55\text{m}$, 2×5 elementos; nervura N4, $b = 0.45\text{m}$, 2×5 elementos; nervura N5, $b = 0.25\text{m}$, 2×2 elementos. Longitudinalmente a nervura foi discretizada em 49 partes (elementos) em espaçamentos, praticamente, regulares. Confronte-se com a Figura 4.19.

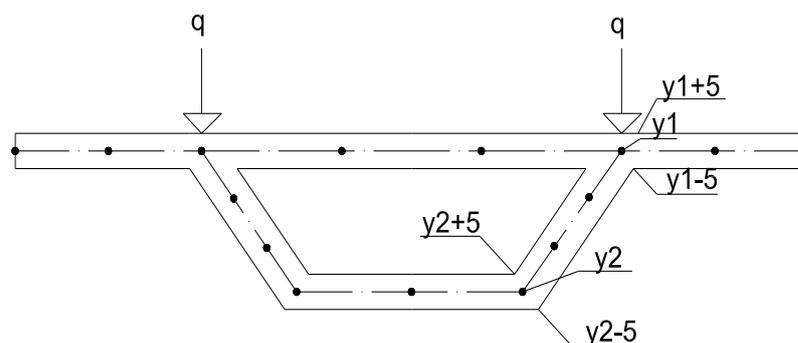


Figura 4.18 – Exemplo de discretização de secção de nervura com a localização de aplicação do carregamento nos nós

Sujeitando-se estas nervuras ao mesmo carregamento que o atrás utilizado na TCF, obtiveram-se os resultados da distribuição das tensões normais longitudinais ao longo da nervura, como representado na Figura 4.20.

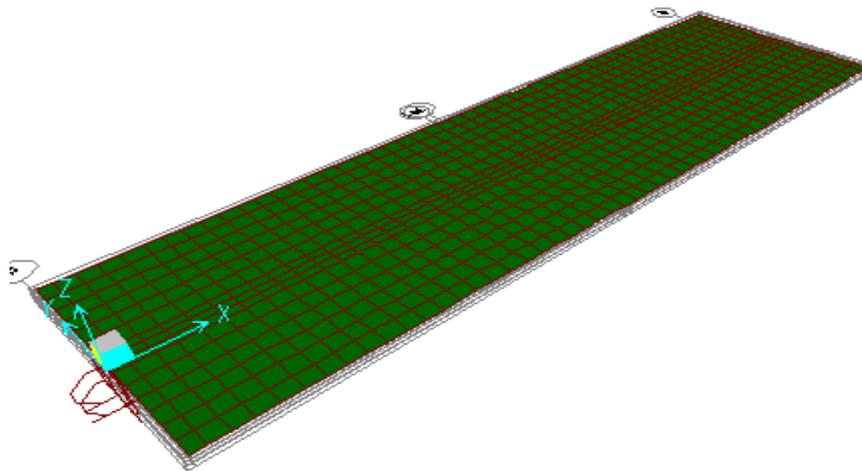


Figura 4.19 – Exemplo da modelação da nervura pelo MEF

A distribuição das tensões normais longitudinais ao longo da nervura encontra-se representada na figura 4.20.

Constatando-se, como é lógico, que os valores máximos das tensões normais ocorrem a meio vão.

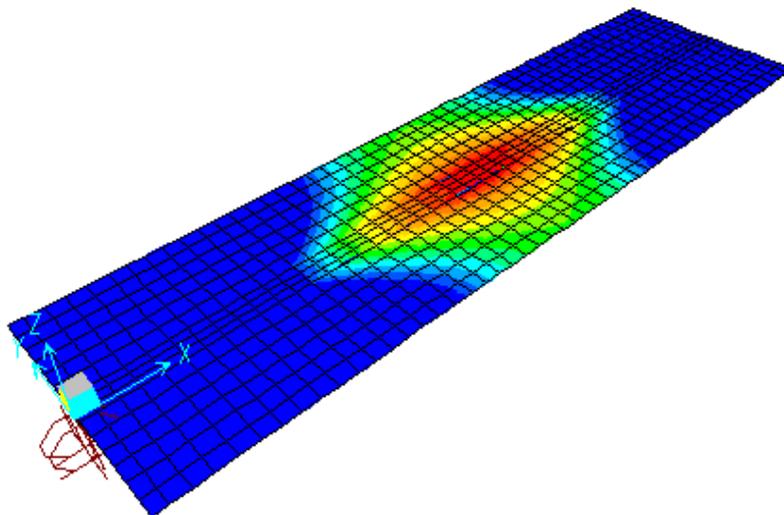


Figura 4.20 – Distribuição de tensões normais longitudinais ao longo da nervura

Para efeitos de comparação, obtiveram-se as tensões normais longitudinais onde foram determinados pela TCF, isto é a meio vão.

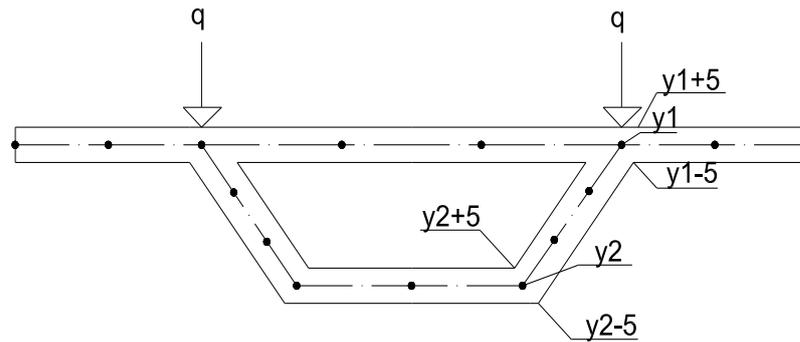


Figura 4.21 – Pontos nodais onde são determinadas as tensões normais da nervura

Dado que na modelação realizada não se tinha pontos nodais exatamente a meio vão, estimaram-se estes valores através da média das tensões obtidas imediatamente antes (x^-) e imediatamente após (x^+) o meio vão. Os valores encontram-se representados no Quadro 4.10

Quadro 4.10 – Valores de tensões normais determinadas pelo MEF nos pontos nodais adjacente ao meio-vão na Figura 4.23

Identificação da nervura	σ topface y1+5 (x^-) (N/mm ²)	σ topface y1+5 (x^+) (N/mm ²)	σ topface y2+5 (x^-) (N/mm ²)	σ topface y1+5 (x^+) (N/mm ²)	σ bottomface y1-5 (x^-) (N/mm ²)	σ bottomface y1-5 (x^+) (N/mm ²)	σ bottomface y2-5 (x^-) (N/mm ²)	σ bottomface y2-5 (x^+) (N/mm ²)	$\sigma_{trac.}$ bottomface y2-5 (x^+) (N/mm ²)
N1	-44733,31	-44179,62	200807,27	201005,58	5459,13	5298,03	154951,33	152995,67	
N2	-55892,64	-55268,62	207416,70	207610,05	-2111,03	-2240,26	158197,32	156120,63	
N3	-66416,43	-66490,36	213148,40	213162,23	-12413,30	-10923,19	159492,56	156967,15	
N4	-77434,63	-76701,40	215765,24	216001,09	-17581,01	-17667,20	160969,93	158662,60	
N5	-118110,2	-118117,2	229477,16	229511,20	-51090,13	-49061,42	162766,77	159680,11	

Calcularam-se também os valores médios de tensões como média dos valores exteriores e interiores nas faces das ‘shells’.

Quadro 4.11 – Média dos valores de tensões normais determinados a partir dos valores do Quadro 4.10

Identificação da nervura	σ y1 (x^-) (N/mm ²)	σ y1 (x^+) (N/mm ²)	σ y2 (x^-) (N/mm ²)	σ y2 (x^+) (N/mm ²)
N1	-19637,09	-19440,80	177879,30	177000,63
N2	-29001,84	-28709,46	182807,01	181865,34
N3	-39414,87	-38706,78	186320,48	185064,69
N4	-47507,82	-47184,30	188367,59	187331,85
N5	-84600,15	-83589,31	196121,97	194595,66

Para efeitos de comparação, calcularam-se as forças de membrana na mesma secção, por integração das tensões nas espessuras dos elementos.

Quadro 4.12 – Correspondentes forças de membrana determinadas a partir dos valores do Quadro 4.11

Identificação da nervura	F_x y1 (x^-) (N/mm)	F_x y1 (x^+) (N/mm)	F_x y2 (x^-) (N/mm)	F_x y2 (x^+) (N/mm)
N1	-196,38	-194,41	1778,79	1770,01
N2	-290,06	-287,54	1828,07	1818,65
N3	-394,35	-387,07	1863,20	1850,65
N4	-475,04	-471,84	1883,68	1873,32
N5	-846,11	-835,89	1961,22	1945,96

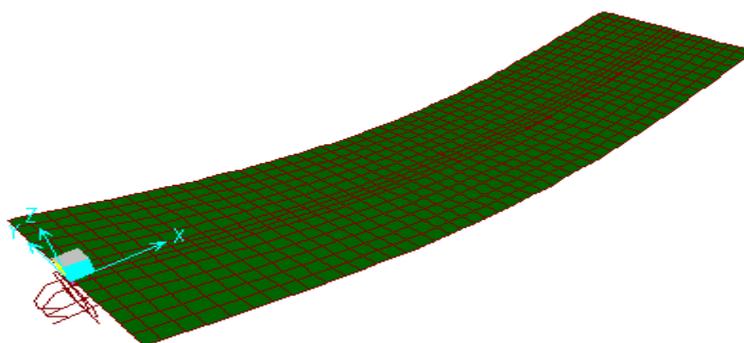


Figura 4.22 – Deformação da nervura quando sujeita a uma carga uniformemente distribuída

4.4 Estudo comparativo entre a teoria clássica da flexão (TCF) e o método numérico de elementos finitos (MEF)

Fez-se uma análise comparativa entre os valores das tensões normais determinados pela TCF e pela MEF.

Em primeiro lugar, procurou-se comparar os valores determinados nos pontos de ligação das almas aos banzos, os quais, por força da deformação das membranas que formam os banzos superiores e os banzos inferiores, possuem os valores mais elevados das tensões.

Estes resultados estão representados nos Gráficos 4.1 a 4.5, dizendo respeito às nervuras N1 a N5, respetivamente.

Como se pode verificar os valores das tensões comparam bem com a TCF. Deve referir-se, que, esta teoria não permite determinar as variações da tensão normal ao longo da largura do banzo, apenas um valor constante para esta grandeza. As diferenças verificadas atingem um valor máximo de cerca de 6,5%, sendo que, em geral, os valores obtidos pelo MEF são superiores aos da TCF.

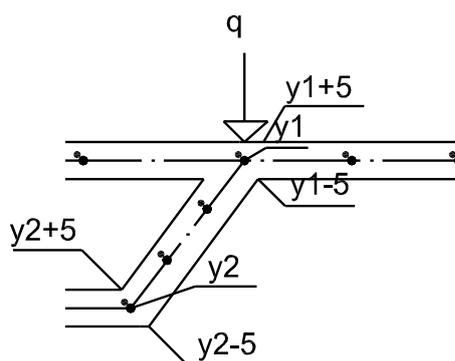


Figura 4.23 – Avaliação das tensões normais nos pontos de ligação às almas da secção

Os diagramas de tensões normais representados por cor azul definem os valores determinados pelo MEF e os valores das tensões normais representados por cor laranja definem os valores determinados pela TCF.

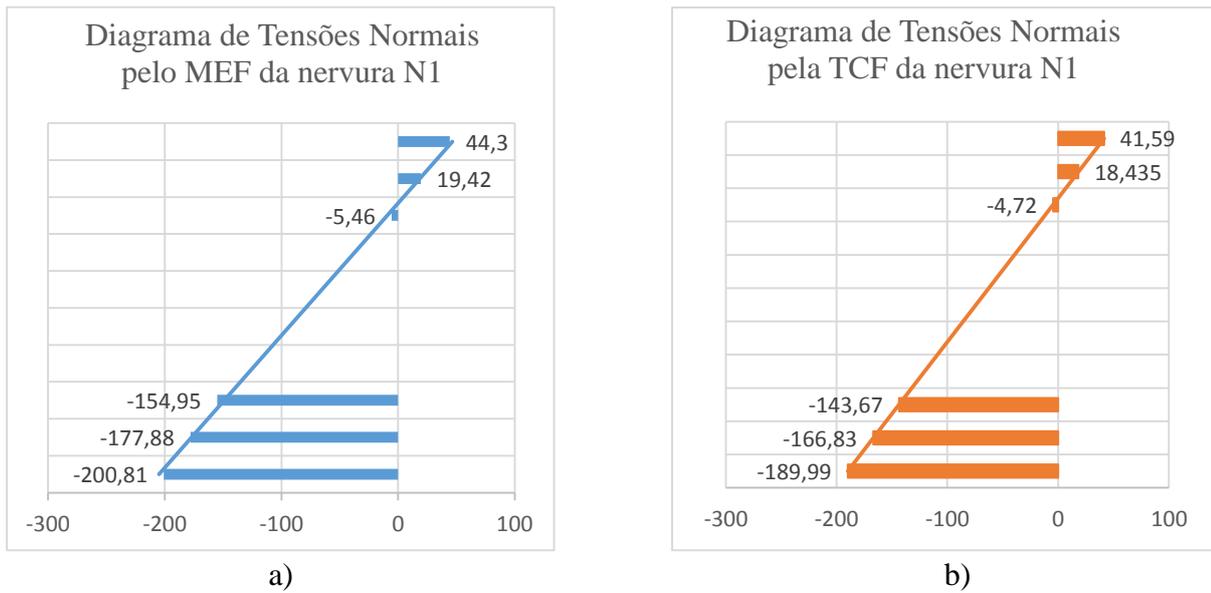


Gráfico 4.1 – a) Diagrama de tensões normais pelo MEF da nervura N1. b) Diagrama de tensões normais pela TCF da nervura N1

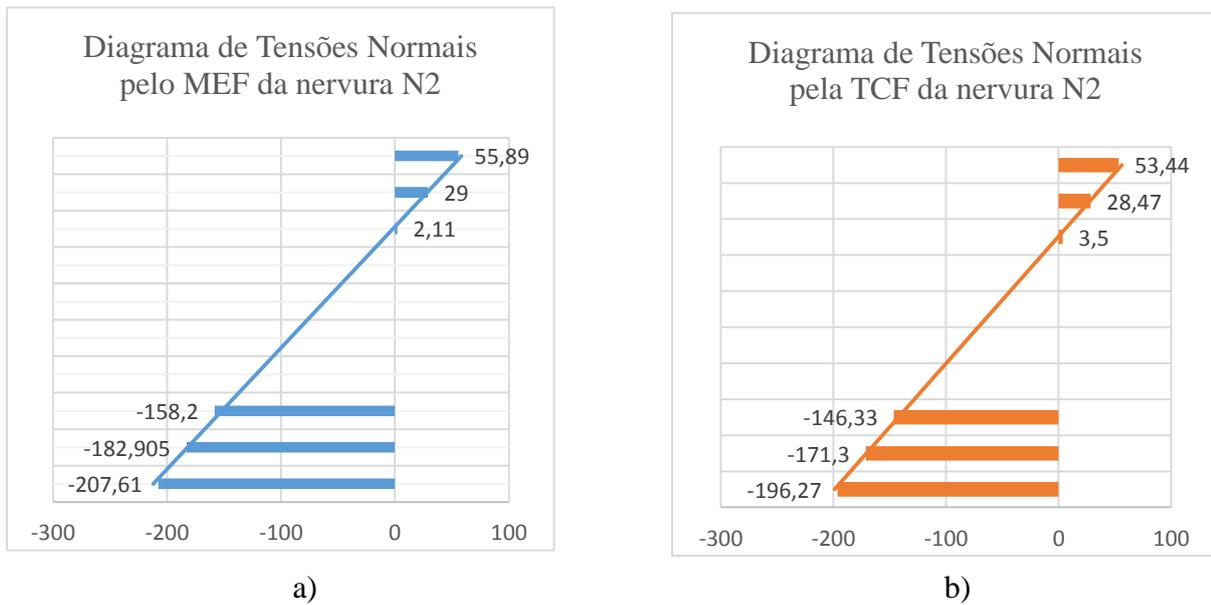
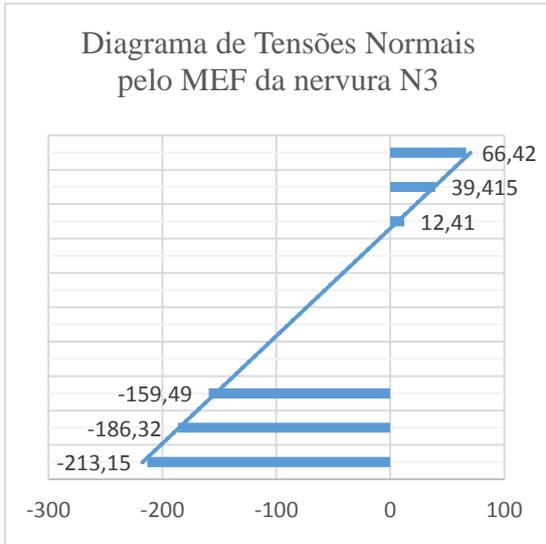
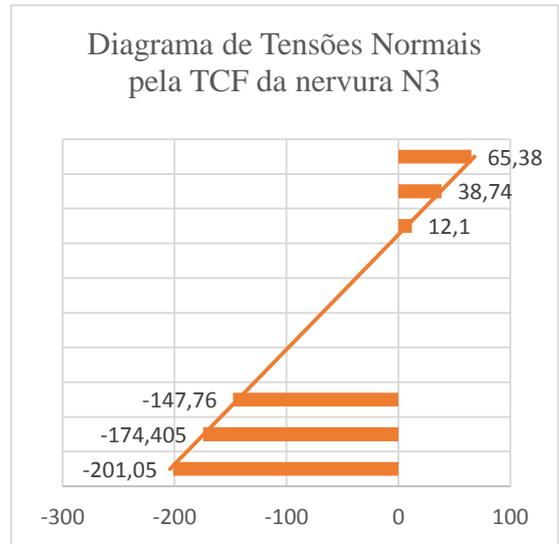


Gráfico 4.2 – a) Diagrama de tensões normais pelo MEF da nervura N2. b) Diagrama de tensões normais pela TCF da nervura N2

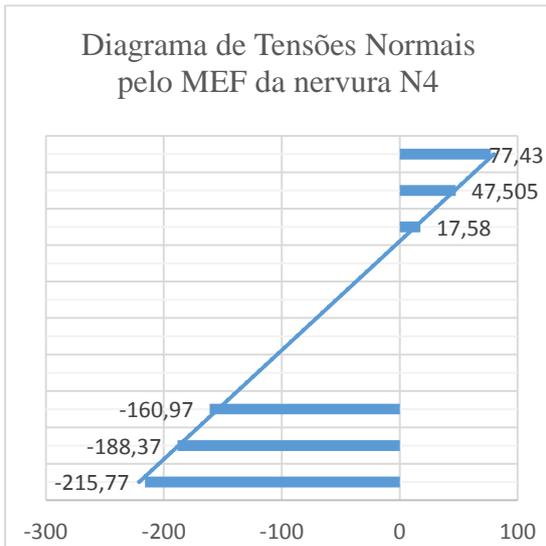


a)

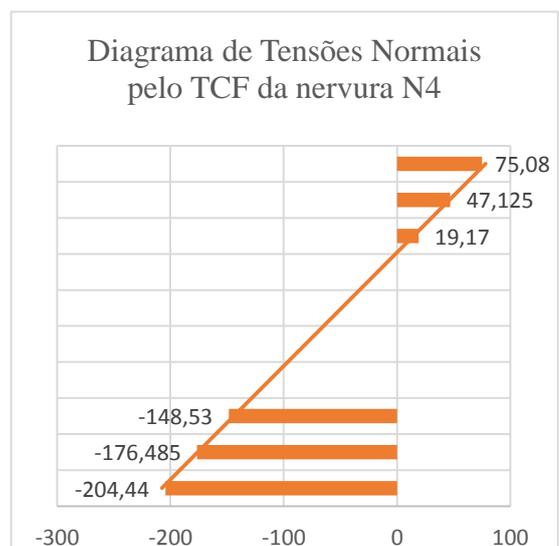


b)

Gráfico 4.3 – Diagrama de tensões normais pelo MEF da nervura N3. b) Diagrama de tensões normais pela TCF da nervura N3



a)



b)

Gráfico 4.4 – a) Diagrama de tensões normais pelo MEF da nervura N4. b) Diagrama de tensões normais pela TCF da nervura N4

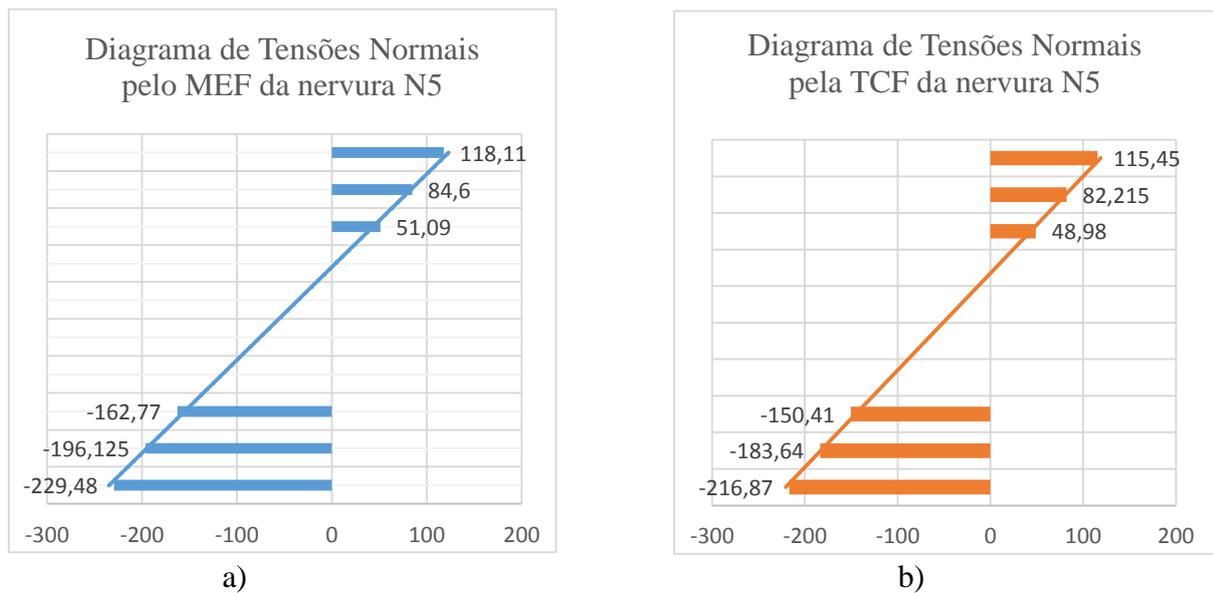


Gráfico 4.5 – a) Diagrama de tensões normais pelo MEF da nervura N5. b) Diagrama de tensões normais pela TCF da nervura N5

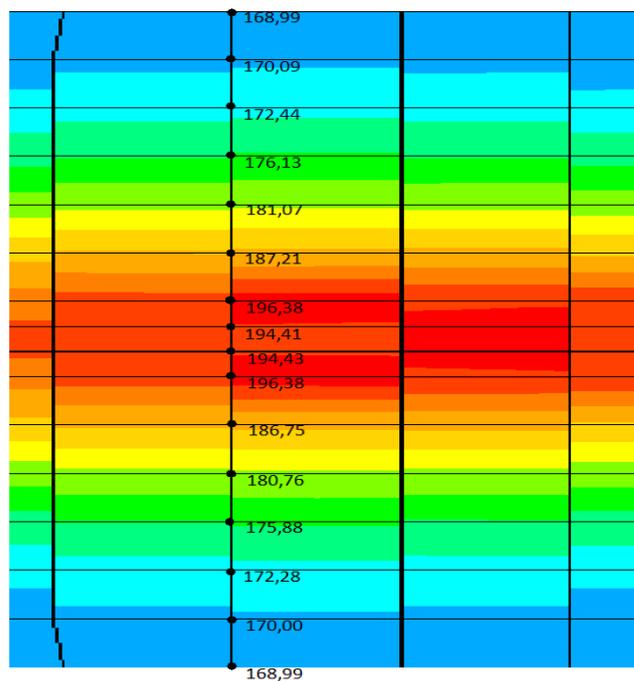


Figura 4.24 – Exemplo dos valores nodais da força axial de membrana no banzo superior da nervura determinados pelo MEF – Nervura N1

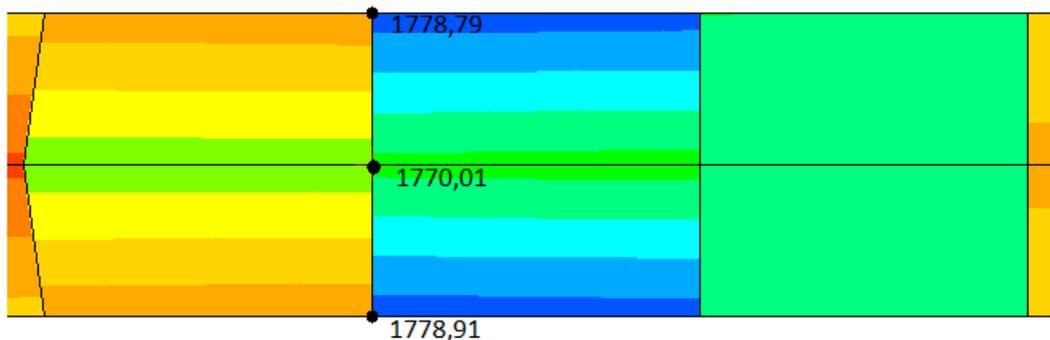


Figura 4.25 - Exemplo dos valores nodais da força axial de membrana do banzo inferior da nervura determinados pelo MEF – Nervura N1

Em segundo lugar, procurou-se comparar a variação das tensões (ou das forças de membrana) na largura dos banzos. Esta análise foi desenvolvida em termos de forças axiais de membrana, as quais são resultado da integração das tensões. Dito de outra forma, a força de membrana traduz a tensão média na espessura dos banzos.

Relativamente aos banzos inferiores, cuja largura é constante em todas as nervuras, verificou-se que as tensões obtidas pelo MEF são praticamente constantes na sua largura, com uma ligeira variação, maior à medida que a largura do banzo superior diminui, mas nunca excedendo 0,5%. Relativamente aos resultados da TCF, confirmou-se um desvio para valores superiores, da ordem de 6%.

As variações obtidas nos banzos superiores das nervuras, com as seguintes relações largura/vão 0.29; 0.19; 0.14; 0.12 e 0.06, permitiram constatar que, com exceção da nervura N5 (a de menor relação largura/vão), os valores médios das forças de membrana dados pelo MEF são ligeiramente inferiores aos valores obtidos pela TCF. Sendo que esta diferença diminui de 1,5% até 0.5% para as relações largura/vão de 0.19L até 0.12L.

Verificou-se também que os valores máximos e mínimos da força de membrana ao longo do vão oscilam em torno do valor da TCF numa gama de desvios entre os 7% e 1%.

Constata-se também que, no máximo, a variação da tensão nos banzos não oscila mais de 8% em torno do valor médio dado pela TCF.

Assim e, em resumo, pode dizer-se que será possível com a TCF estimar com um desvio inferior a 10% as tensões máximas encontradas neste tipo de elementos.

Nos diagramas apresentados em seguida, a linha azul representa os valores absolutos das tensões normais em pontos definidos da nervura determinados pelo MEF. A cor laranja representa o valor absoluto da tensão normal pelo MEF. A cor verde representa o valor absoluto da tensão normal determinada pela TCF

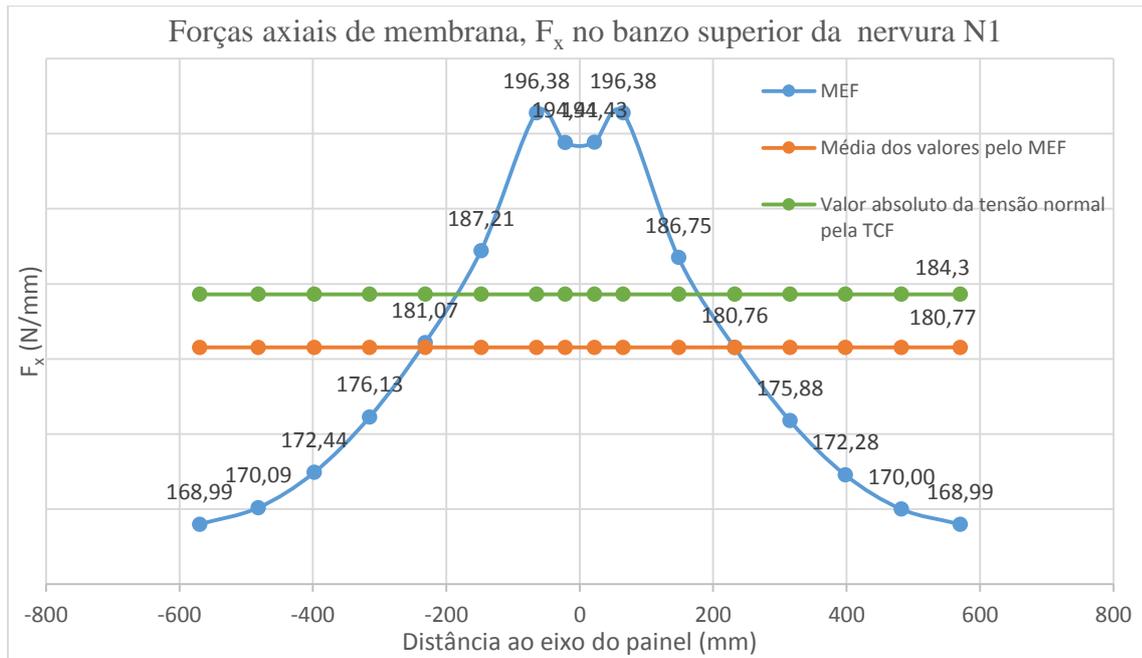


Gráfico 4.6 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo superior da nervura N1

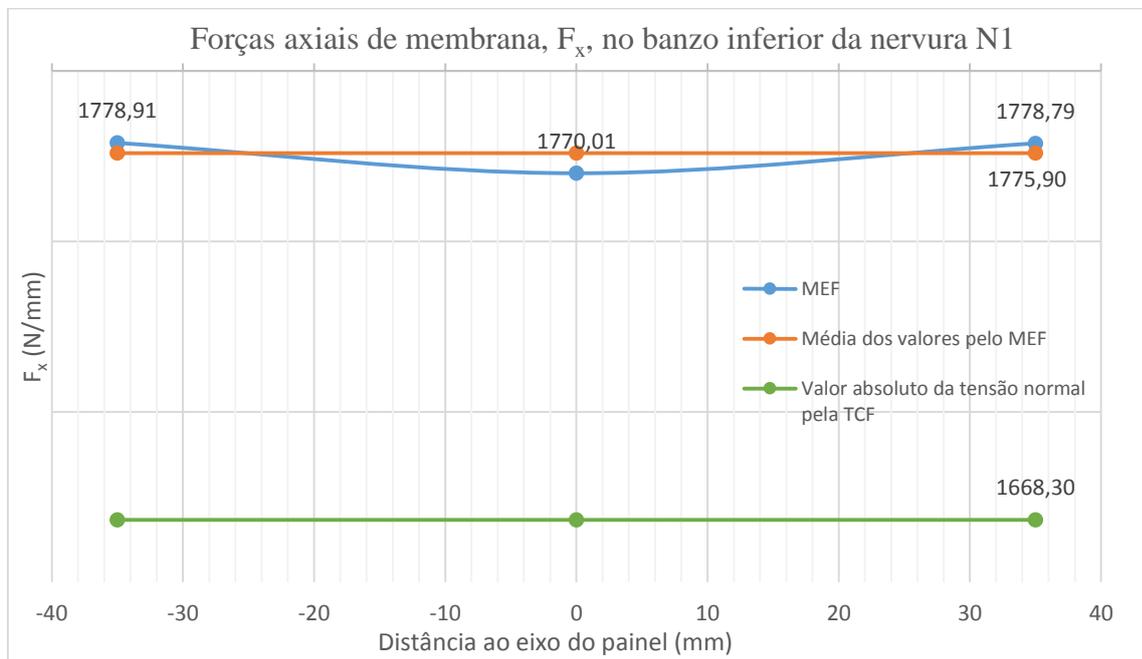


Gráfico 4.7 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo inferior da nervura N1

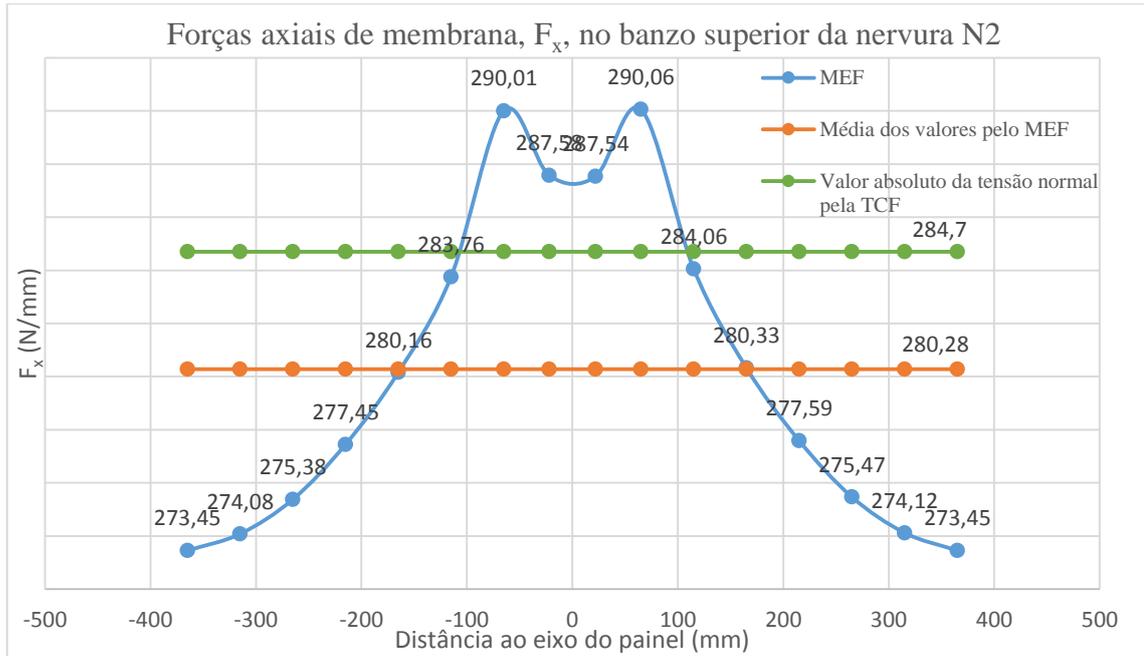


Gráfico 4.8 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo superior da nervura N2

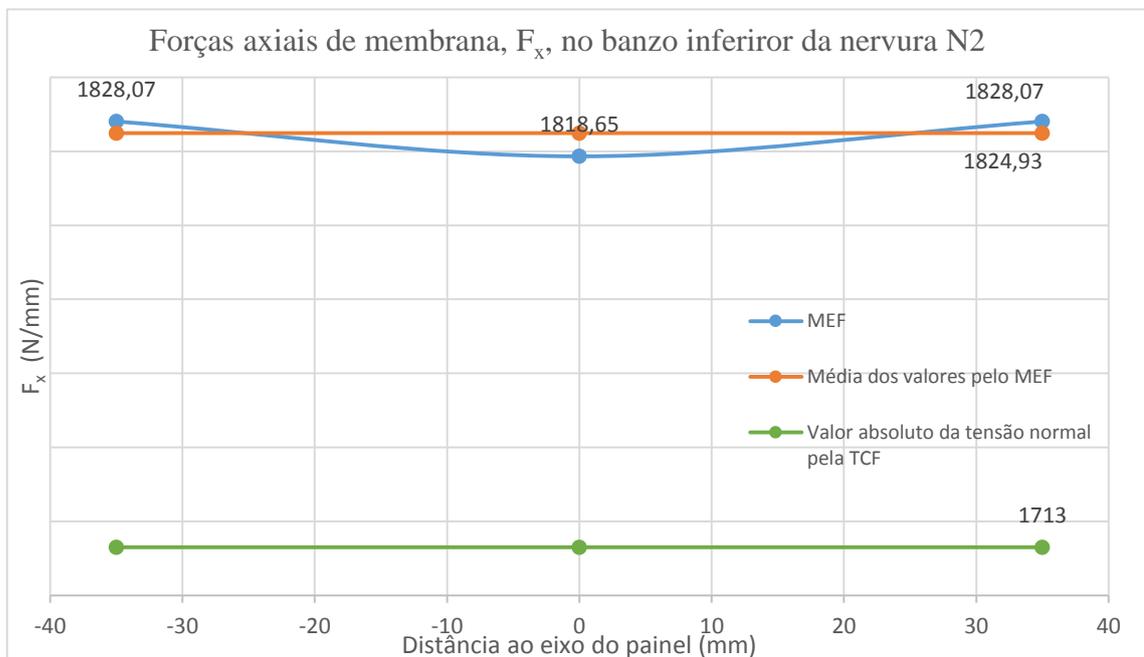


Gráfico 4.9 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo inferior da nervura N2

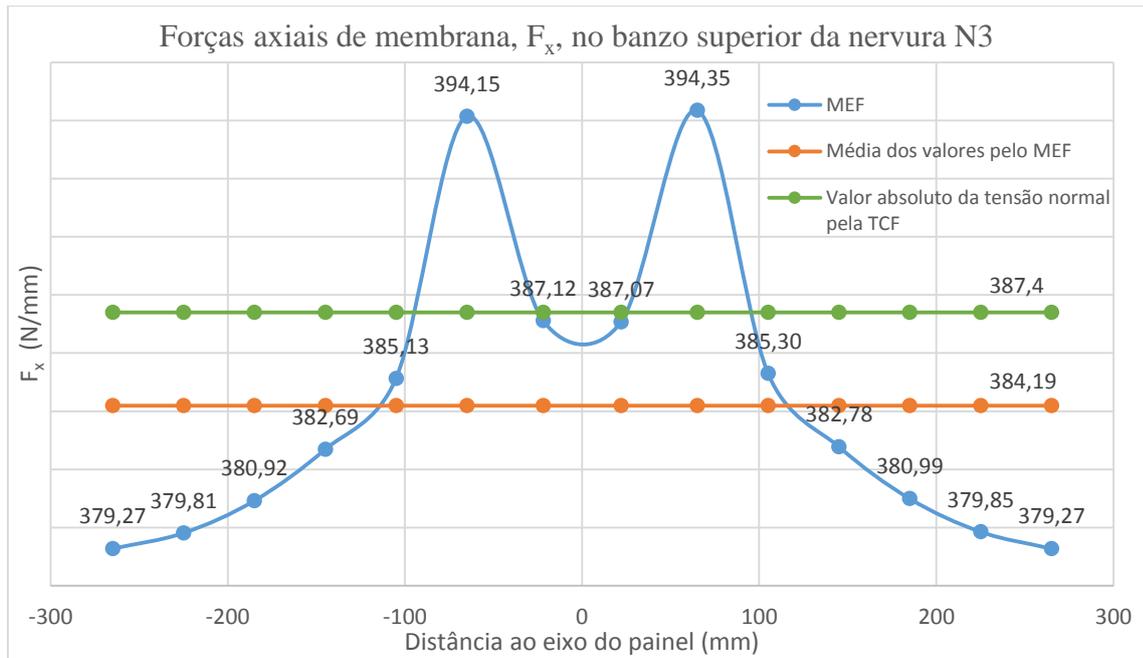


Gráfico 4.10 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo superior da nervura N3

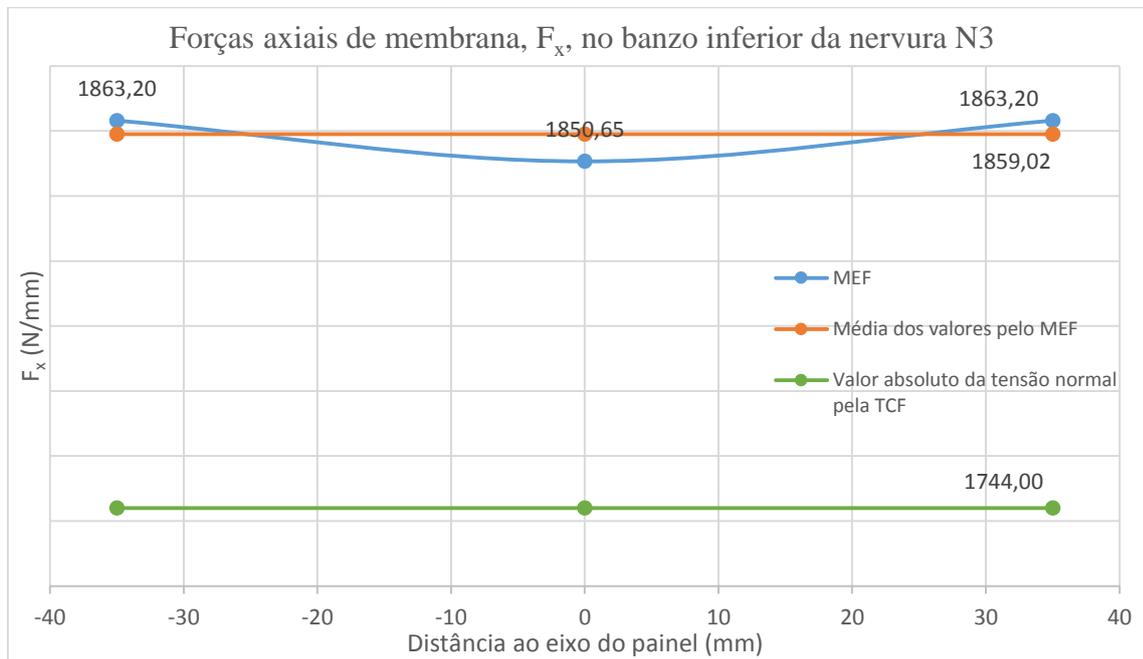


Gráfico 4.11 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo inferior da nervura N3

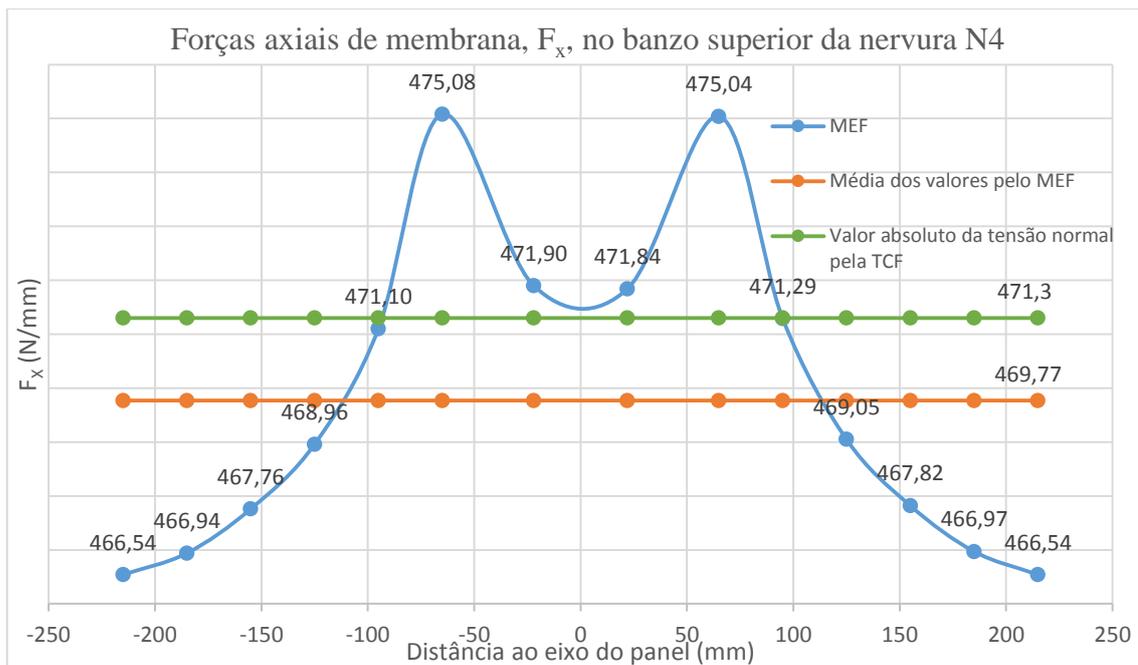


Gráfico 4.12 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo superior da nervura N4

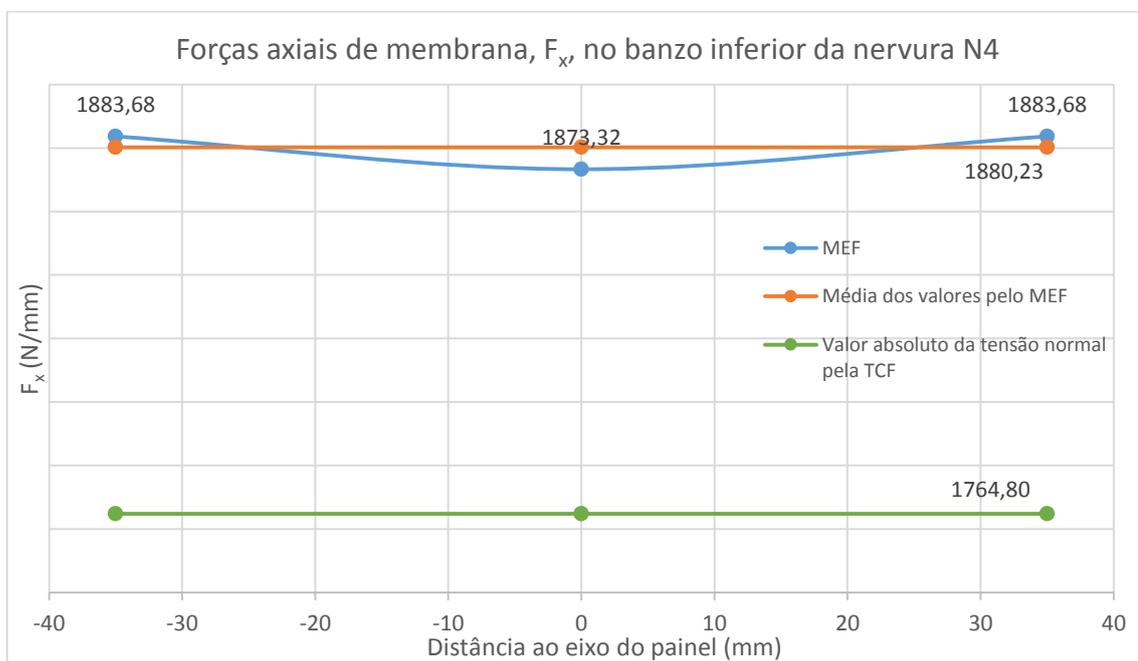


Gráfico 4.13 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo inferior da nervura N4

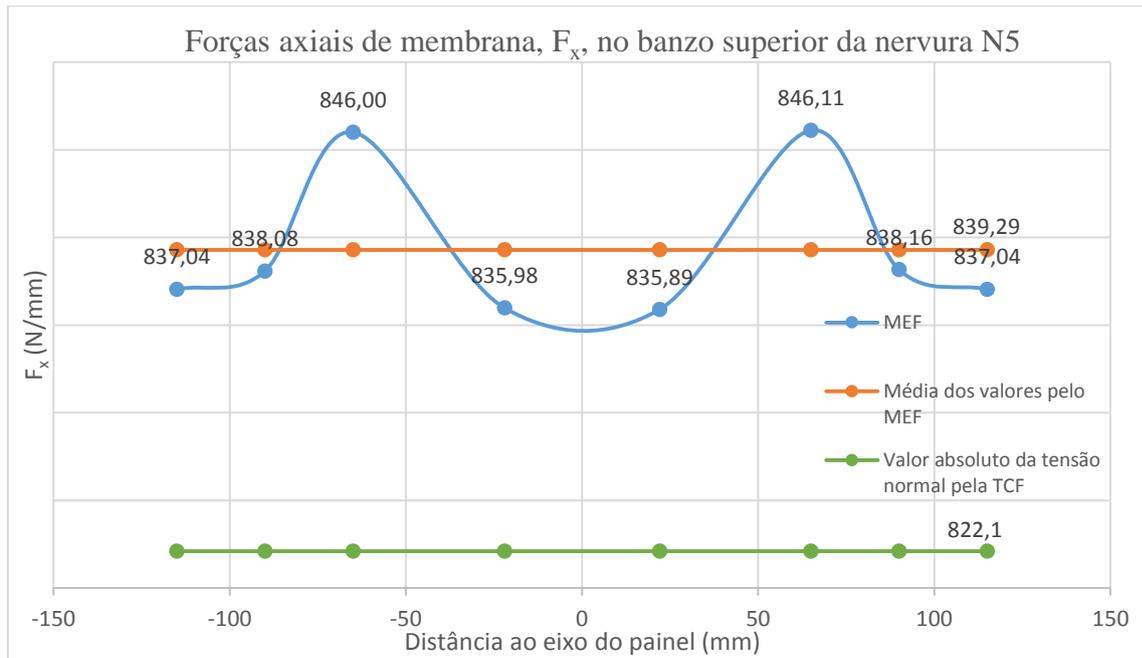


Gráfico 4.14 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo superior da nervura N5

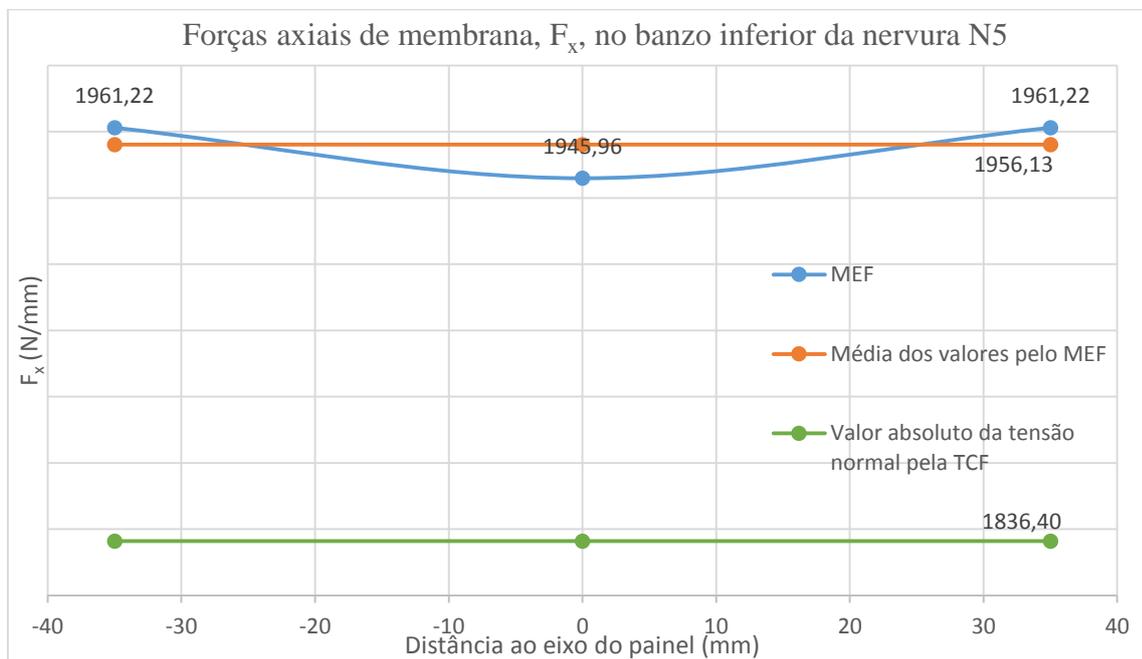


Gráfico 4.15 – Valores absolutos das forças axiais de membrana, F_x , no banzo inferior da nervura N5

5. Programa Experimental

5.1 Introdução

O trabalho experimental realizado teve como principal objetivo estudar a resistência à flexão de nervuras de painéis em GRC e identificar os valores de LOP e MOR obtidos nos ensaios.

A análise experimental sobre o comportamento destas estruturas consiste tanto na observação como na quantificação dos efeitos estruturais que resultam da aplicação das ações previstas, definidas no capítulo anterior. Com o registo de determinados parâmetros, como as reações nos apoios, os deslocamentos e a tensão normal em certas secções do elemento, podem quantificar-se os efeitos resultantes das ações aplicadas. A observação do tipo e do local onde ocorre fendilhação é importante.

O estudo experimental tem a vantagem de permitir analisar um determinado fenómeno em condições reais, sem a interferência de processos ou modelos de carácter teórico. Porém, é de salientar que existem imperfeições e erros humanos e técnicos que podem afetar as medições das grandezas em estudo, embora se tente minimizar estes inconvenientes.

Foram ensaiados três tipos de amostras diferentes, sendo quatro do tipo C, quatro do tipo R e doze corpos de prova. Estas nervuras/corpos de prova foram ensaiadas em condições de simples apoio. Foi-lhes imposto um carregamento simétrico, constituído por duas forças concentradas de igual valor, afastadas de uma determinada distância. Assim sendo, foi possível obter uma região central submetida a flexão circular.

A fendilhação das amostras ocorreu sempre por flexão na zona central, entre as forças aplicadas, embora a localização da secção fendilhada variasse aleatoriamente nessa região. As variáveis consideradas no ensaio foram as cargas aplicadas e a velocidades de carregamento.

Foram medidas forças e deslocamentos a meio vão, ao longo do ensaio, tendo-se identificado os valores de máxima carga aplicada e dos deslocamentos máximos.

5.2 Campanha de ensaios

As nervuras ensaiadas são provenientes de painéis em GRC, cujo processo de fabrico utilizado foi o de projeção. Os dois tipos de nervuras ensaiadas diferem principalmente na forma e dimensões, mas também na sua idade, dado que as nervuras do tipo C foram obtidas, por corte, a partir de painéis com cerca de 4 anos de idade, nunca sujeitos a carregamento, enquanto que as nervuras do tipo R foram fabricadas para este estudo. À data dos ensaios as nervuras do tipo R tinham cerca 3 meses de idade.

As dimensões médias das nervuras submetidas ao ensaio de flexão estão representadas nas figuras seguintes. As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 são referentes às nervuras do tipo R, as Figuras 5.4, e 5.5 e 5.6, referentes às nervuras do tipo C. As Figuras 5.7 e 5.8 são dizem respeito aos corpos de prova, tipo T.

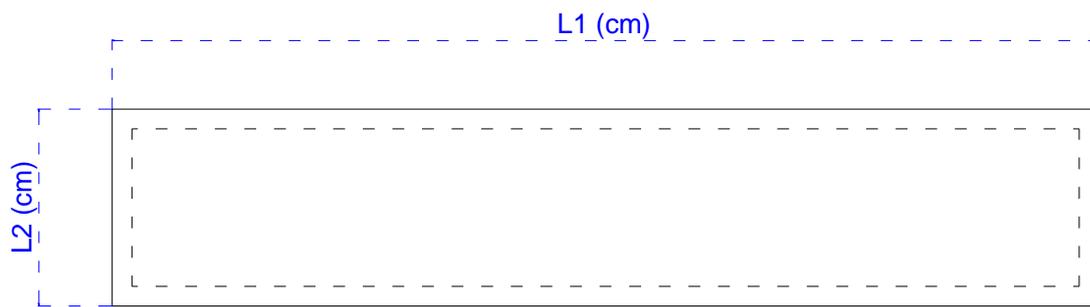


Figura 5.1 – Nervura tipo R em planta

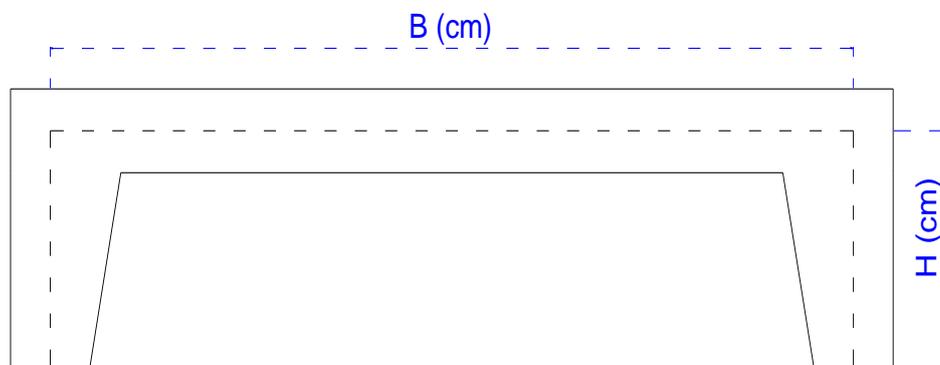


Figura 5.2 – Dimensões da nervura do tipo R

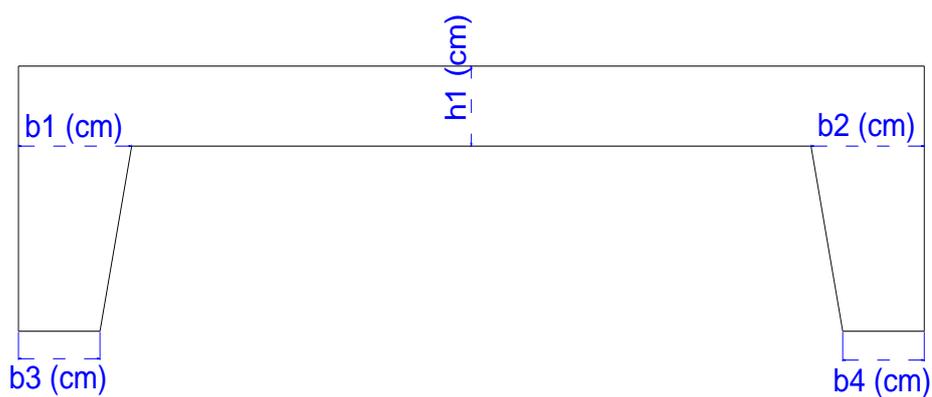


Figure 5.3 – Identificação das espessuras das nervuras do tipo R

Quadro 5.1 – Dimensões e espessuras das nervuras do tipo R

Identificação da nervura	B (cm)	H (cm)	b1 (cm)	b2 (cm)	b3 (cm)	b4 (cm)	h1 (cm)
R ₁	17,85	4,5	2,5	2,5	1,85	1,8	1,6
R ₂	17,55	3,95	2,4	2,5	2,4	2,2	2,1
R ₃	17,50	4,0	2,7	3,1	2,3	1,9	2,2
R ₄	17,60	4,25	2,4	2,7	2,2	2,3	1,7

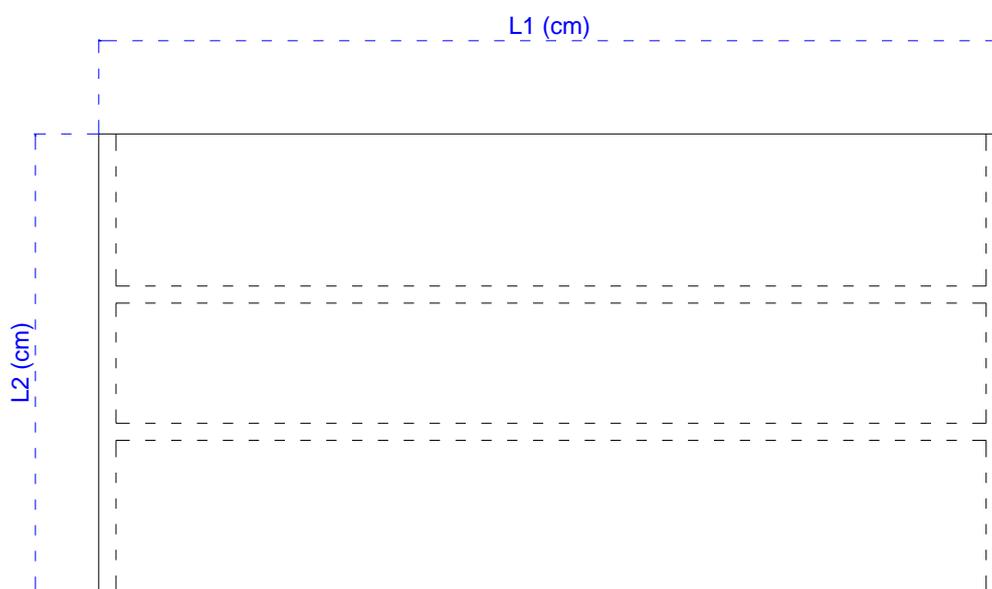


Figura 5.4 – Nervura do tipo C em planta

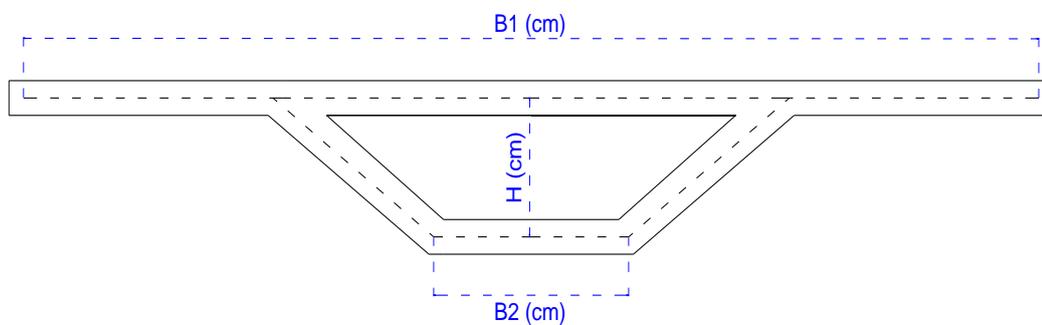


Figura 5.5 – Dimensões das nervuras do tipo C

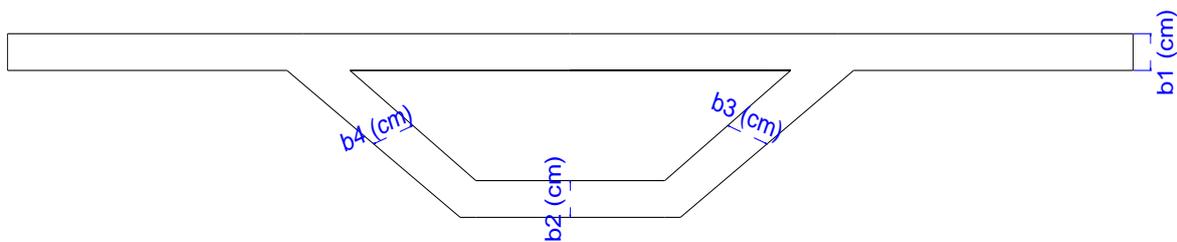


Figura 5.6 – Identificação das espessuras das nervuras do tipo C

Quadro 5.2 – Dimensões e espessuras das nervuras do tipo C

Identificação da nervura	B1 (cm)	B2 (cm)	H (cm)	b1 (cm)	b2 (cm)	b3 (cm)	b4 (cm)
C ₁	53,5	6,28	4,0	1,1	1,5	1,2	0,8
C ₂	54,0	6,02	3,78	1,2	1,1	1,9	1,6
C ₃	53,0	7,18	3,75	1,2	1,1	1,4	1,3
C ₄	53,0	6,20	3,75	1,1	1,2	1,6	1,6

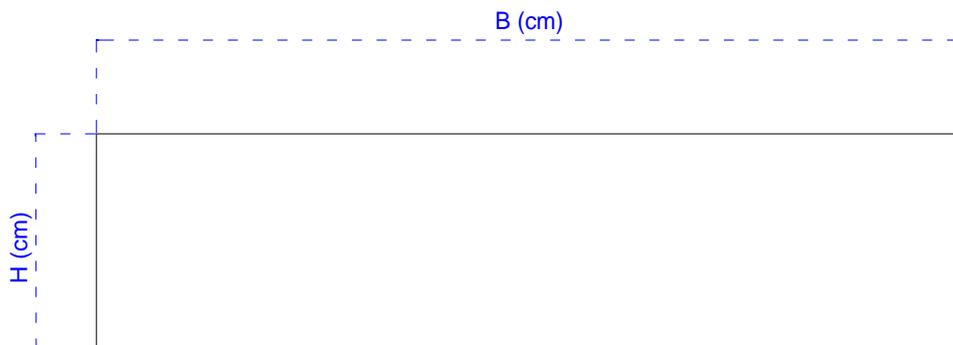


Figura 5.7 – Dimensões dos corpos de prova, tipo T

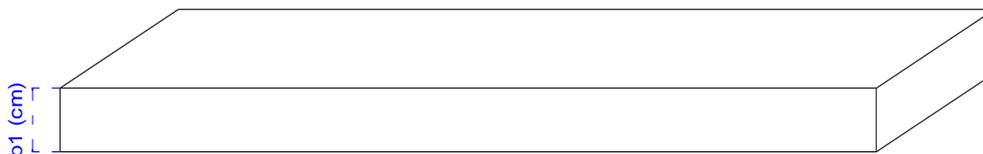


Figura 5.8 – Identificação das espessuras dos corpos de prova

Quadro 5.3 – Dimensões e espessuras dos corpos de prova (T)

Identificação do corpo de prova	B (cm)	H (cm)	b1 (cm)
C ₁ - T ₁	35,2	5,4	1,4
C ₁ - T ₂	35,8	5,3	1,1
C ₁ - T ₃	35,2	5,1	1,3
C ₂ - T ₁	35,7	5,5	1,0
C ₂ - T ₂	35,6	4,8	1,4
C ₂ - T ₃	35,6	5,1	1,1
C ₃ - T ₁	35,2	5,4	1,1
C ₃ - T ₂	35,2	5,2	1,6
C ₃ - T ₃	35,1	5,4	1,3
C ₄ - T ₁	35,5	5,4	1,4
C ₄ - T ₂	35,6	5,2	1,3
C ₄ - T ₃	35,3	5,2	1,0

As dimensões representadas nos Quadros 5.1 a 5.3 correspondem à secção das peças onde se verificou a fendilhação e posteriormente a rotura.

Os corpos de prova acima identificados foram obtidos a partir dos banzos das nervuras ensaiadas do tipo C, por corte a disco após o ensaio das mesmas.

Por limitações de tempo e de geometria das peças não foi possível cortar corpos de prova a partir das nervuras do tipo R.

Na campanha experimental foram ensaiados quatro nervuras do tipo R, quatro nervuras do tipo C e doze corpos de prova do tipo T.

Nas Figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 estão representadas as forças concentradas, aplicadas ao longo do ensaio. Na distribuição apresentada não estão incluídas as forças introduzidas pelo peso próprio, mas para efeitos de cálculo estas irão ser consideradas. A disposição das cargas aplicadas permite, assim, obter uma zona central, predominantemente em flexão circular, limitada pelos pontos de aplicação das cargas. Este carregamento foi aplicado na superfície superior da peça.

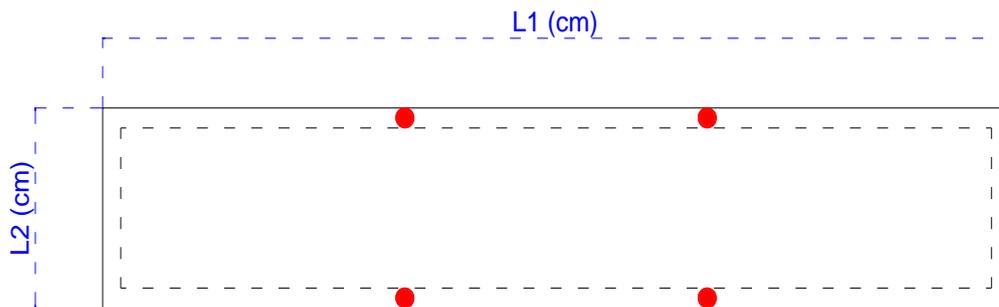


Figura 5.9 – Pontos de carregamento do ensaio à flexão em nervuras do tipo R

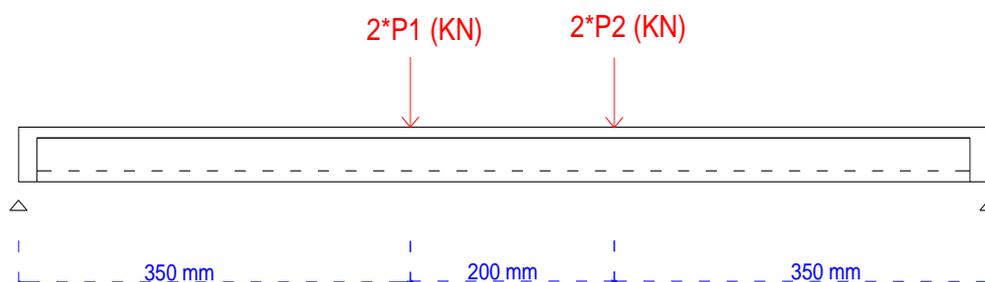


Figura 5.10 – Aplicação do carregamento de ensaio nas nervuras do tipo R

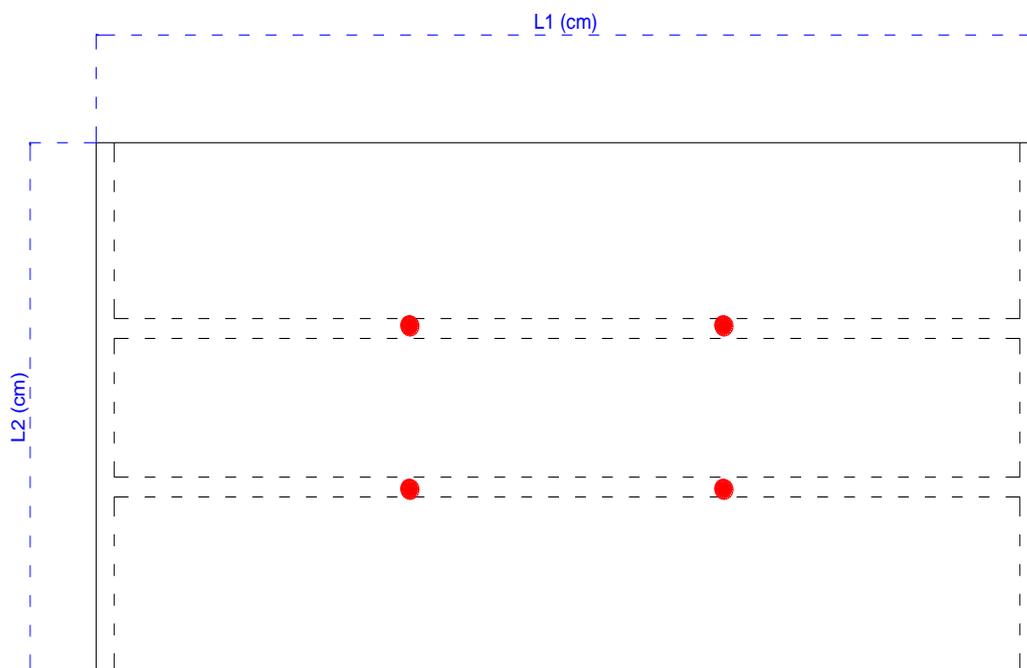


Figura 5.11 - Pontos de carregamento do ensaio à flexão em nervuras do tipo C

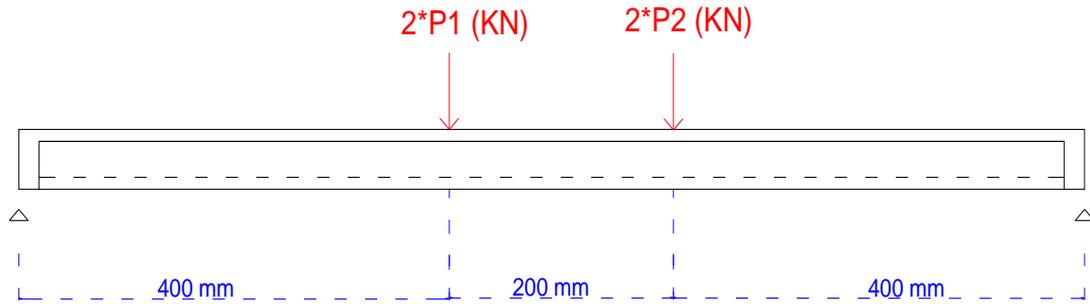


Figura 5.12 - Aplicação do carregamento de ensaio em nervuras do tipo C

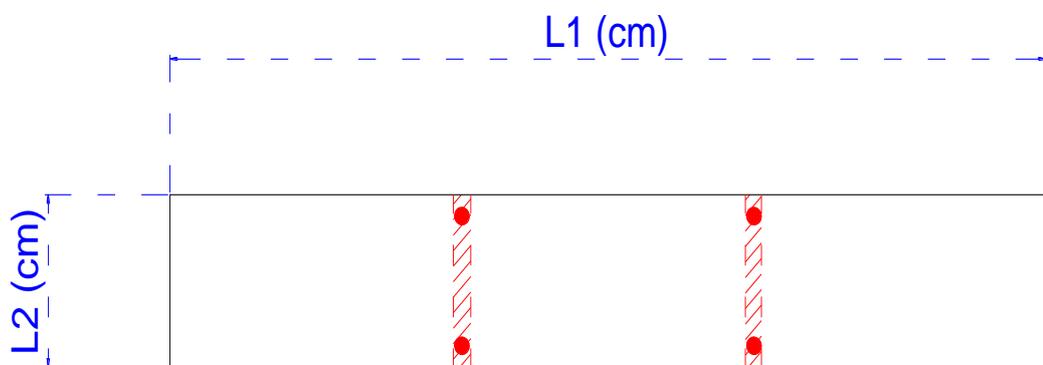


Figura 5.13 – Pontos de carregamento do ensaio à flexão em corpos de prova do tipo T

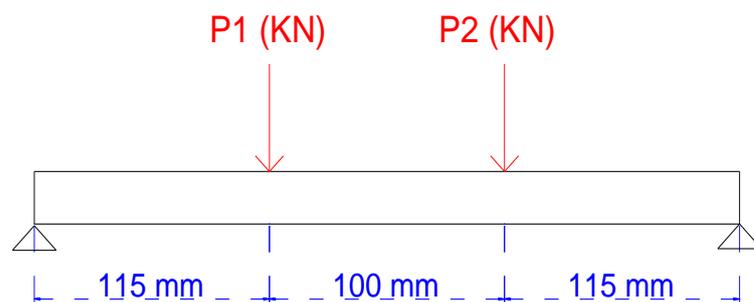


Figura 5.14 – Aplicação do carregamento de ensaio em corpos de prova do tipo T

Apresentam-se na Figura 5.15 fotografias das nervuras ensaiadas.



Figura 5.15 – a) Nervura do tipo C. b) Nervura do tipo R. e corpos de prova do tipo T

5.3 Descrição dos ensaios

5.3.1 Equipamento e sistema de medição

Dadas as dimensões das peças e os valores previsíveis das cargas de ensaio utilizaram-se duas prensas de diferentes capacidades.

Assim, para as nervuras do tipo C e do tipo R, recorreu-se a uma prensa de 30kN de capacidade e, para os corpos de prova, tipo T, a uma prensa de 5kN de capacidade.

Em ambos os ensaios foi utilizado o atuador hidráulico das prensas, equipado com células de carga e transdutores de deslocamentos, cujas leituras foram sendo registadas nos sistemas de aquisição de dados.

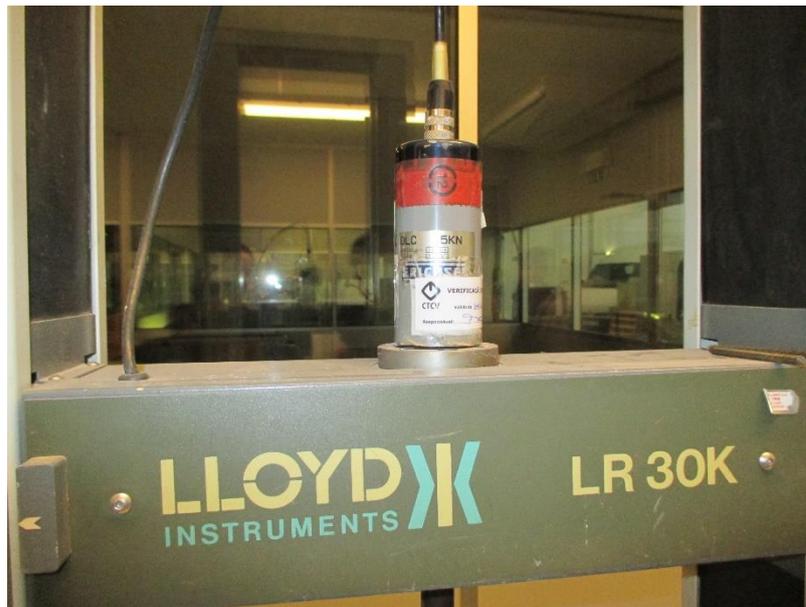


Figura 5.16 – Célula de carga de 5kN



Figura 5.17 – Célula de carga de 30kN

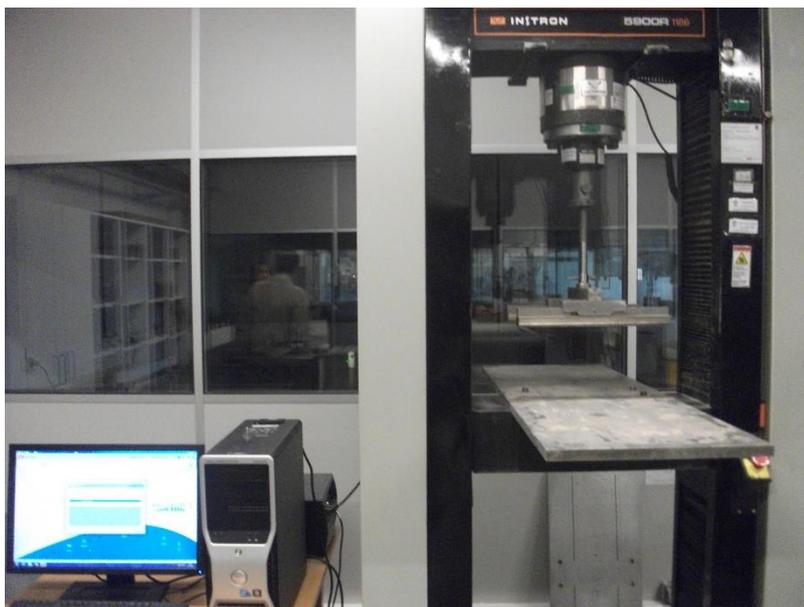


Figura 5.18 – Equipamento de controlo e aquisição de dados

5.3.2 Sistema de aplicação de cargas

Os ensaios são controlados através do *software* de computador dedicado, podendo ser definidas, entre outras variáveis, o tipo e a velocidade de aplicação de carga ou deslocamento.

Para os ensaios em causa, optou-se por fazer a aplicação das forças mediante o seu controlo, e não através do controlo de deslocamentos. Esta forma de proceder pode ser utilizada sem problemas dado o baixo nível de carga dos ensaios.

A velocidade de carregamento selecionada foi de 10N/s.

No caso da prensa de maior capacidade, a carga foi aplicada através de dois cutelos metálicos, dispostos simetricamente em relação ao meio-vão, afastados entre si 200mm.

No caso da prensa de menor capacidade, a carga foi aplicada também através de dois cutelos metálicos dispostos simetricamente em relação ao meio-vão, afastados entre si 100mm.

Em todas as situações as peças foram apoiadas sobre roletes metálicos, distanciados 900mm no caso das nervuras do tipo R, 1000mm no caso das nervuras do tipo C e 330mm no caso dos corpos de prova.

Devido ao comprimento das nervuras tipo C e R, foi necessário utilizar uma plataforma de extensão capaz de abranger, com folga, os roletes de apoio. Desta modo, fica a plataforma em consola, para ambos os lados da prensa, o que, com a aplicação do carregamento, leva a uma deformação no sentido descendente. Para se quantificar esta deformação, que conduz a um abaixamento dos apoios, utilizou-se um defletómetro elétrico, sob a plataforma metálica, como se representa na Figura 5.23.



Figura 5.19 – Nervura do tipo R preparado para ser ensaiado



Figura 5.20 – Nervura do tipo C preparado para ser ensaiado



Figura 5.21 – Corpo de prova do tipo T preparado para ser ensaiado

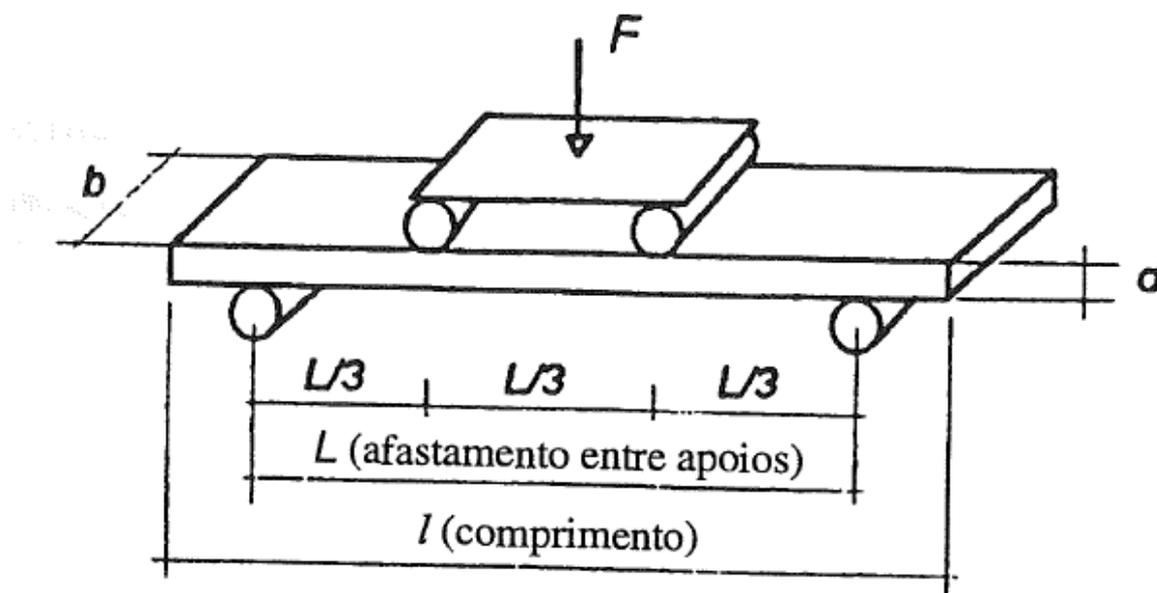


Figura 5.22 – Posição dos corpos de prova na máquina de ensaio



Figura 5.23 – Posição do defletómetro para medição dos deslocamentos verticais das nervuras

5.4 Resultados dos ensaios

A seguir são apresentados os resultados obtidos nestes ensaios. Os resultados foram devidamente processados por forma a corrigir a deformação do apoio das nervuras do tipo C e R atrás referida.

Os gráficos aqui apresentados representam a relação carga aplicada/deslocamento sob os pontos de aplicação da carga.

Em anexo são apresentados os gráficos originais sem a correção da deformação devido ao apoio.

Para cada gráfico foram identificados e assinalados os valores das tensões normais correspondentes ao início da fendilhação (LOP), portanto o limite do comportamento linear, e os correspondentes à carga máxima na rotura (MOR).

No capítulo 6 será feita a análise destes resultados dos ensaios.

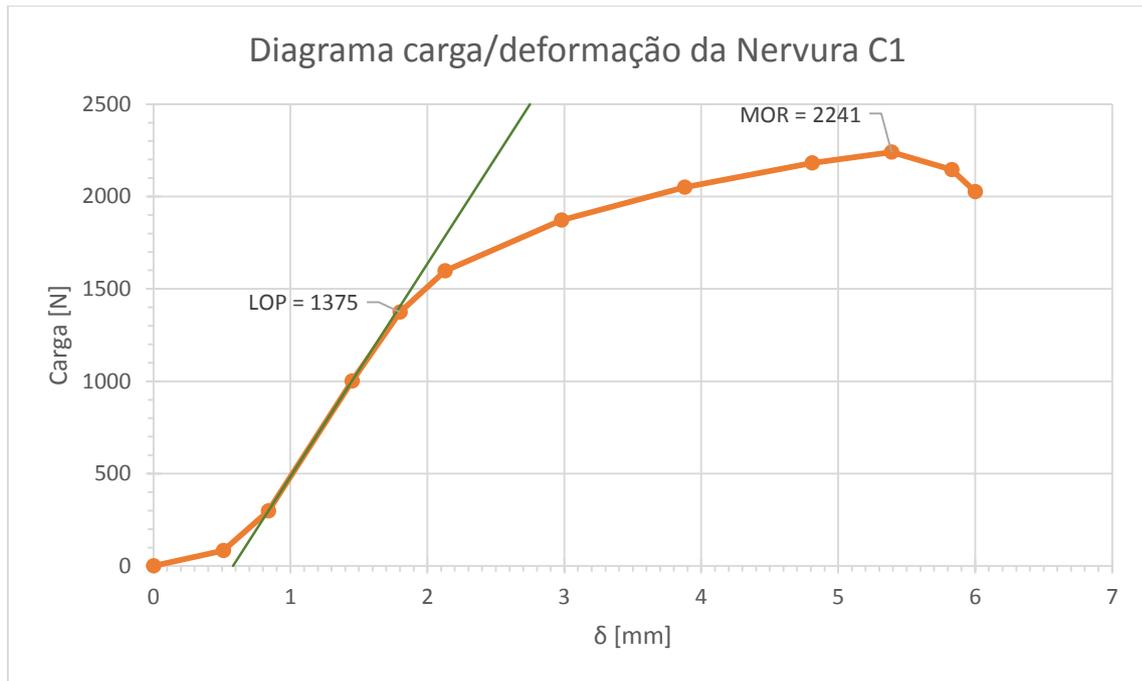


Figura 5.24 – Diagrama carga/deformação da nervura C₁

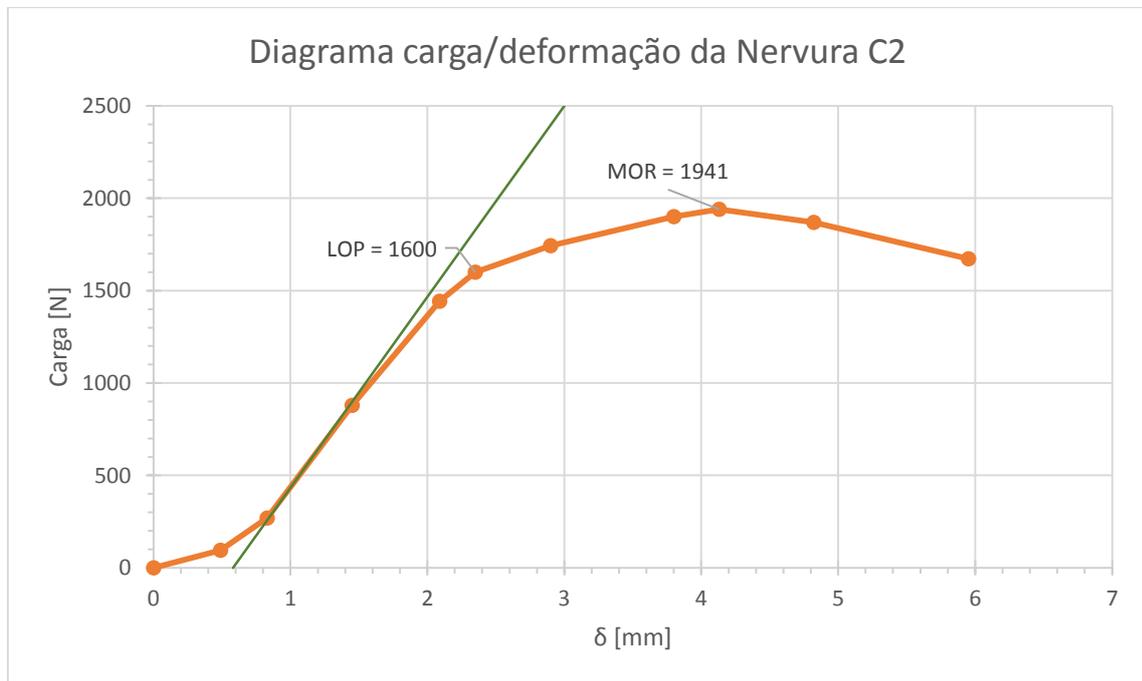
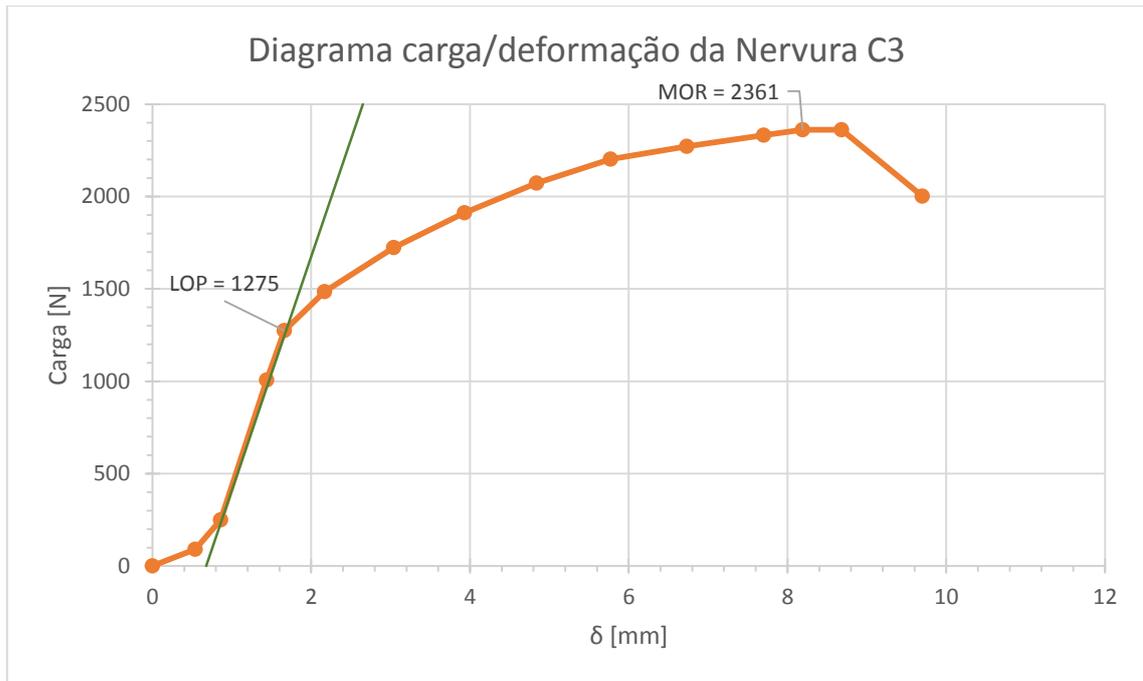
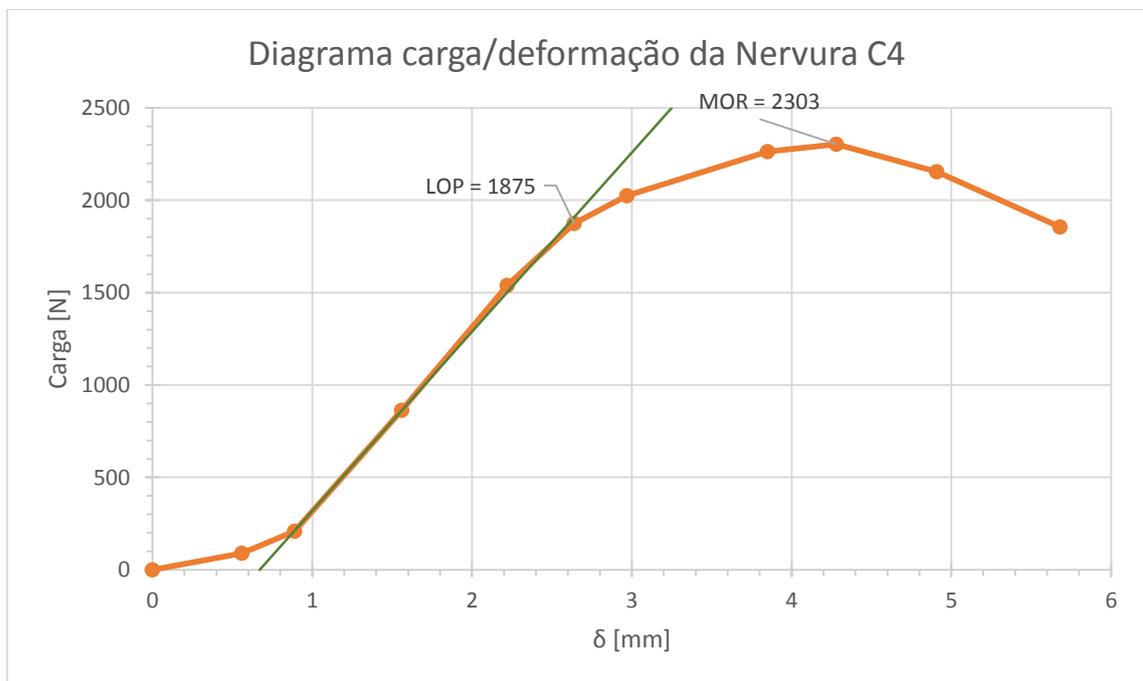


Figura 5.25 – Diagrama carga/deformação da nervura C₂

Figura 5.26 – Diagrama carga/deformação da nervura C₃Figura 5.27 – Diagrama carga/deformação da nervura C₄

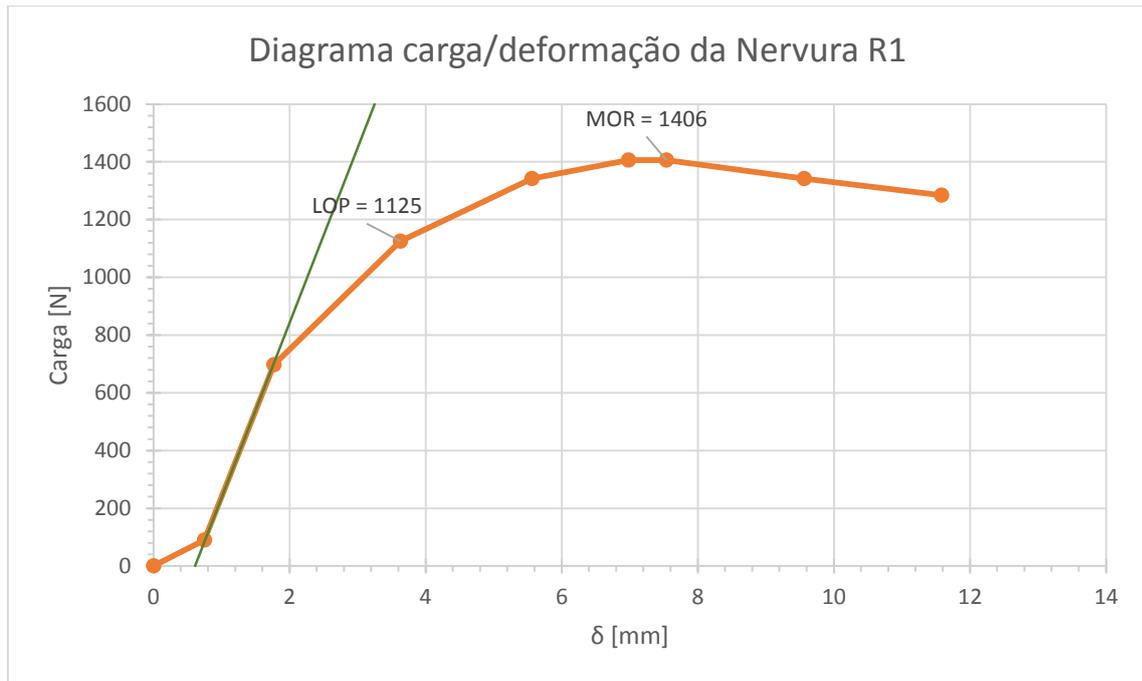


Figura 5.28 – Diagrama carga/deformação da nervura R₁

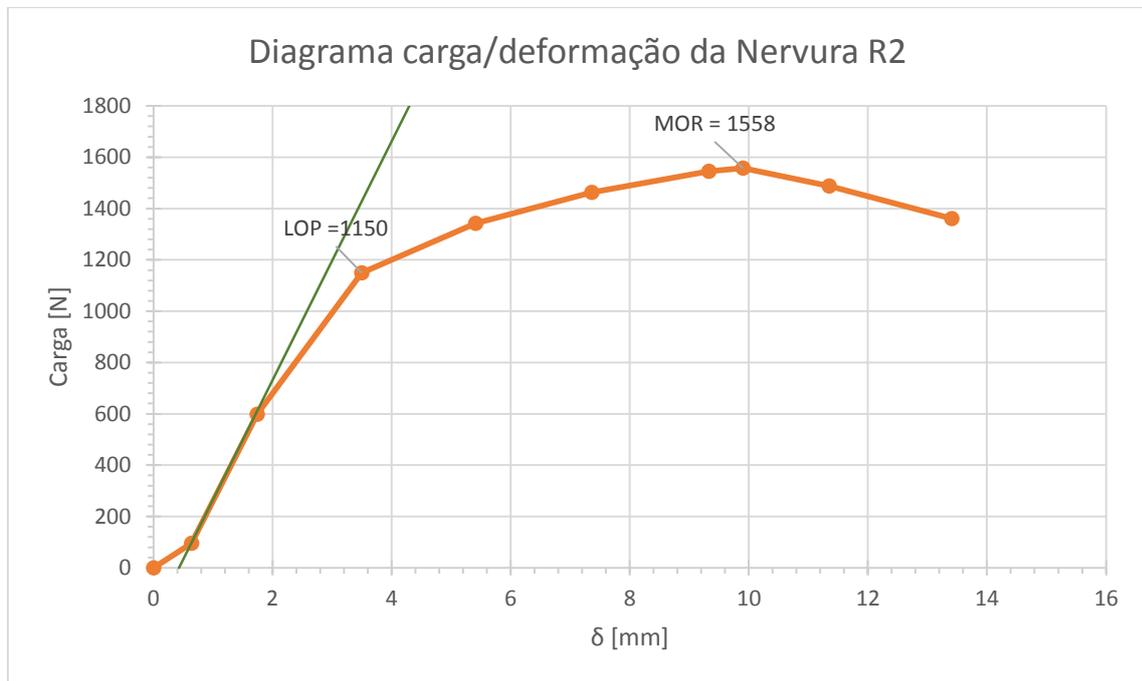
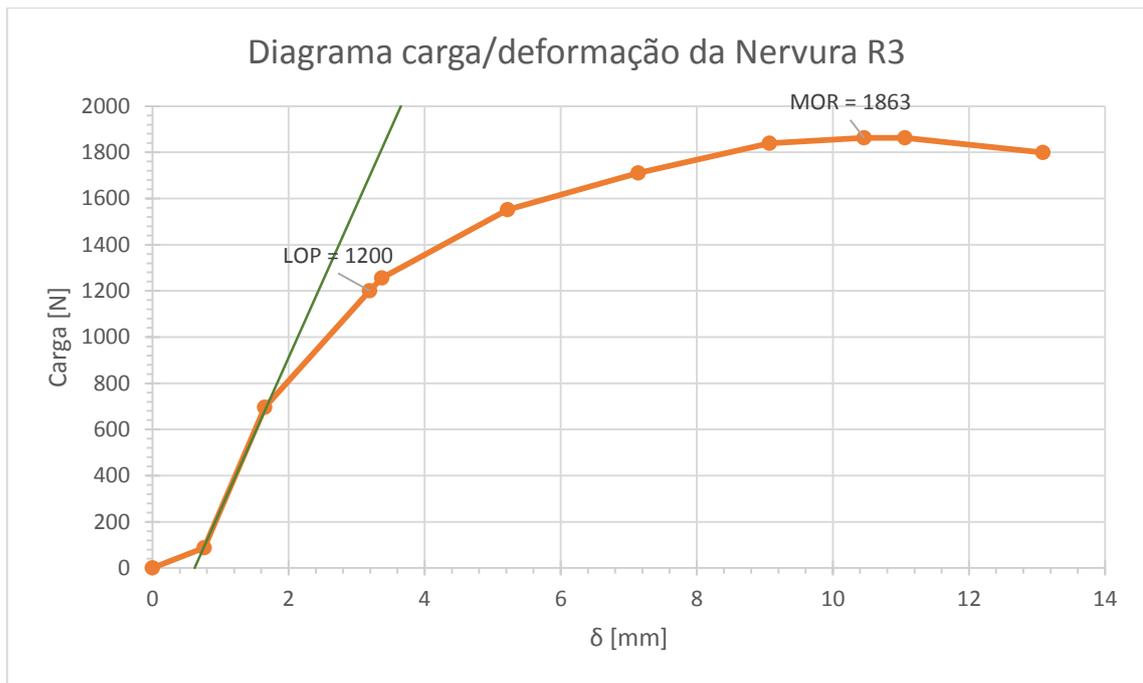
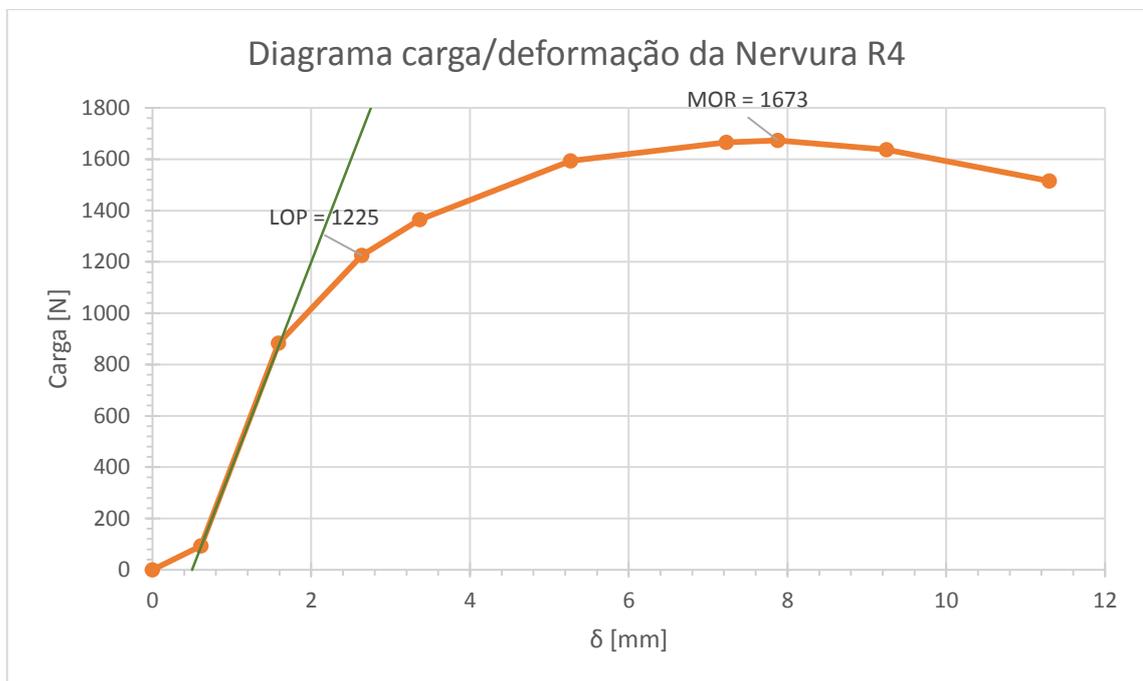


Figura 5.29 – Diagrama carga/deformação da nervura R₂

Figura 5.30 – Diagrama carga/deformação da nervura R₃Figura 5.31 – Diagrama carga/deformação da nervura R₄

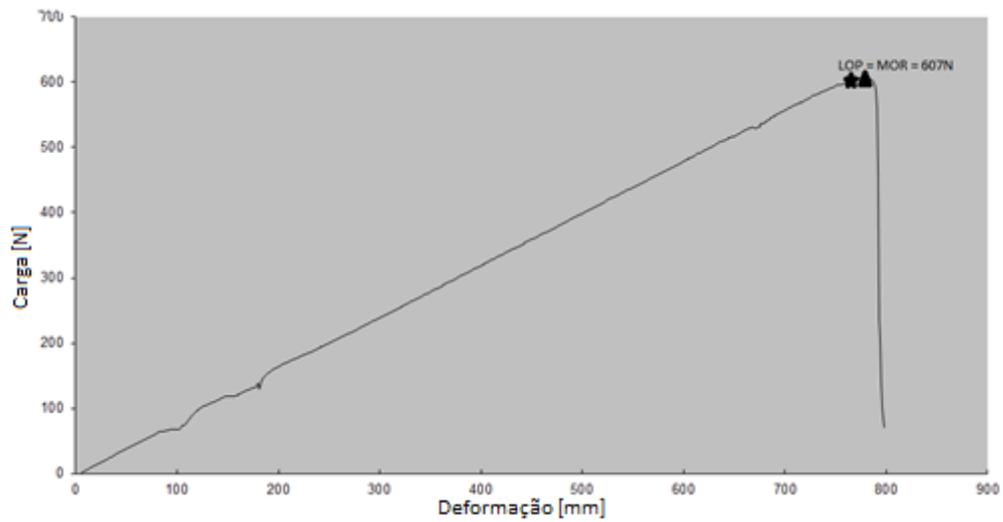


Figura 5.32 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C₁ – T₁

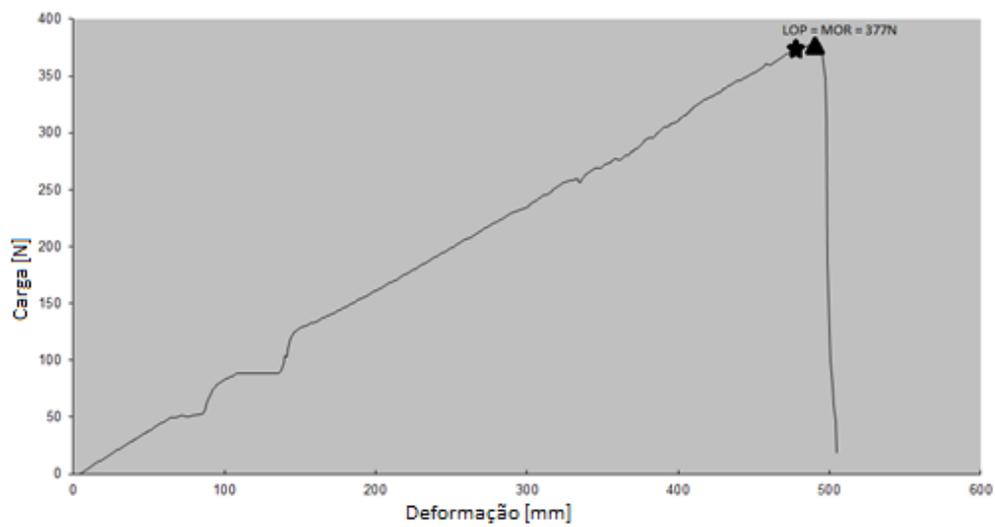
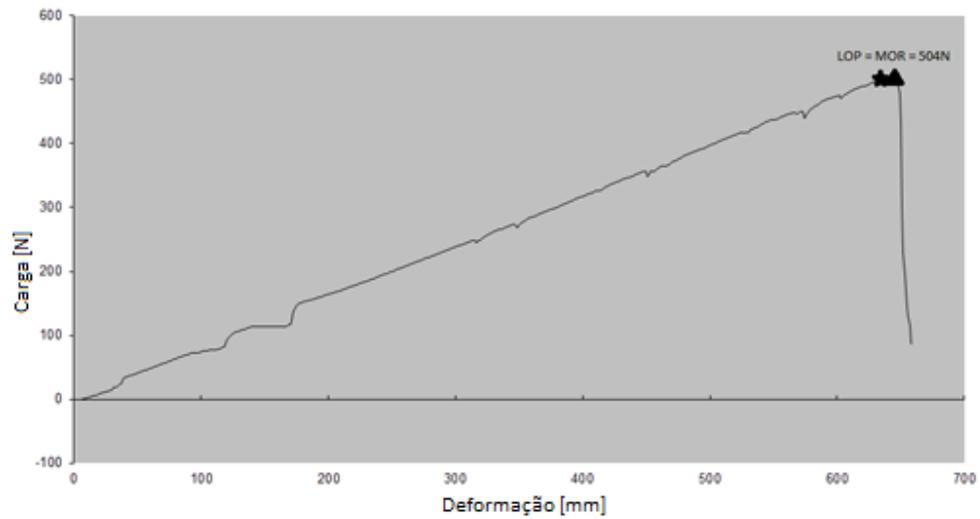
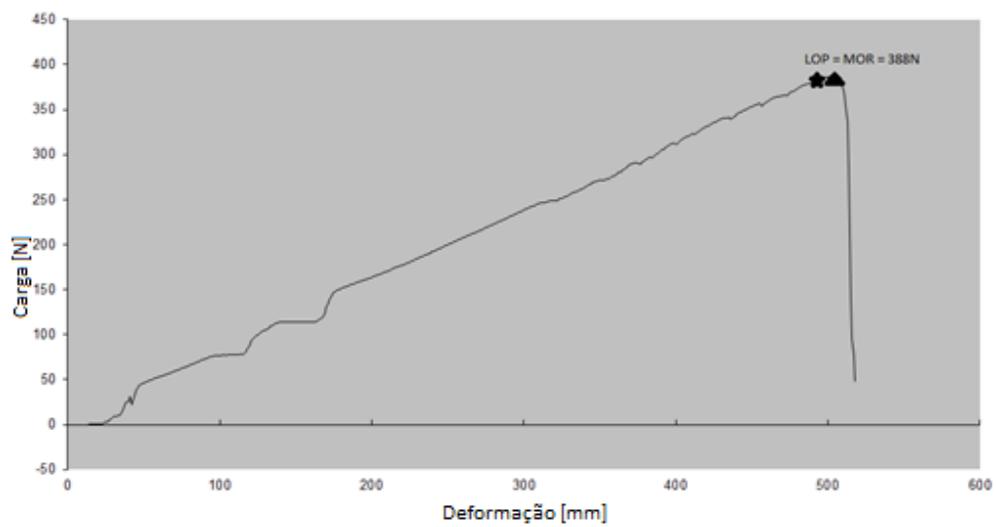


Figura 5.33 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C₁ – T₂

Figura 5.34 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C₁ – T₃Figura 5.35 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C₂ – T₁

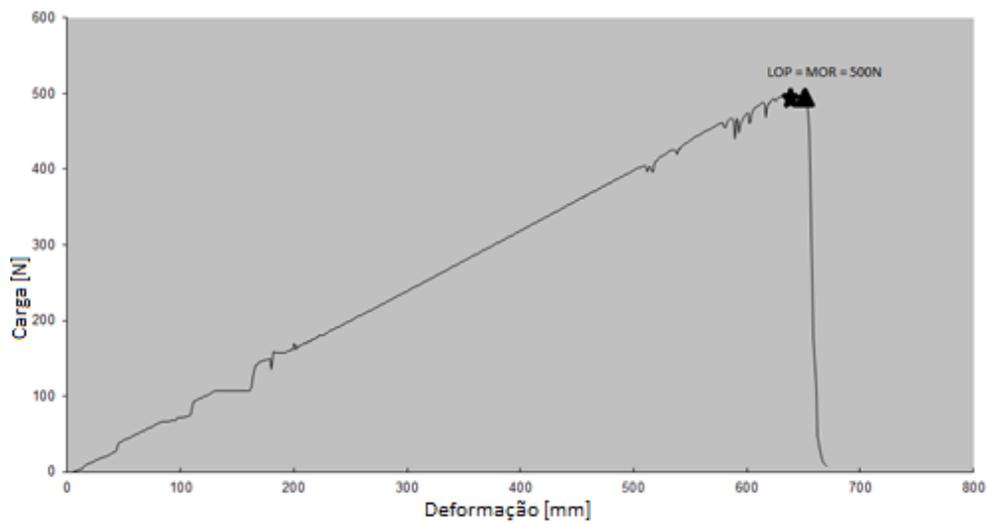


Figura 5.36 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C₂ – T₂

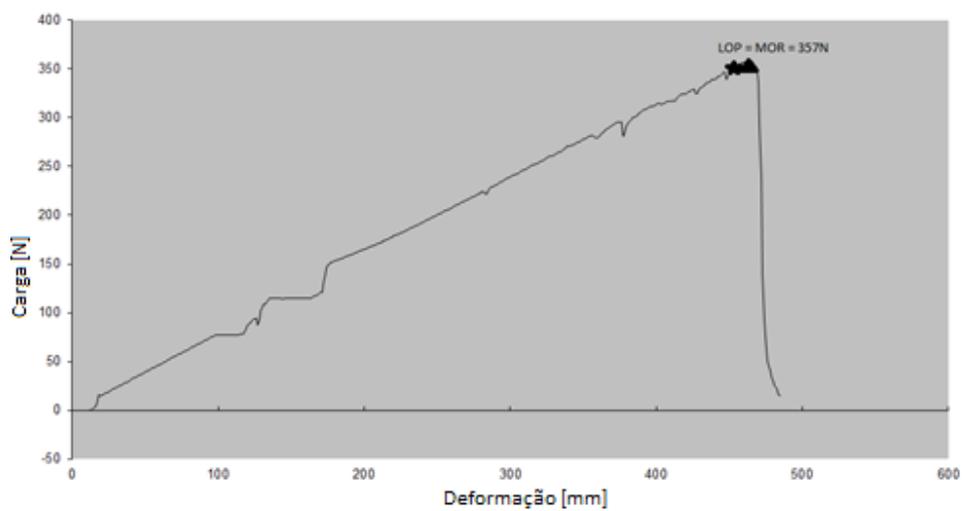
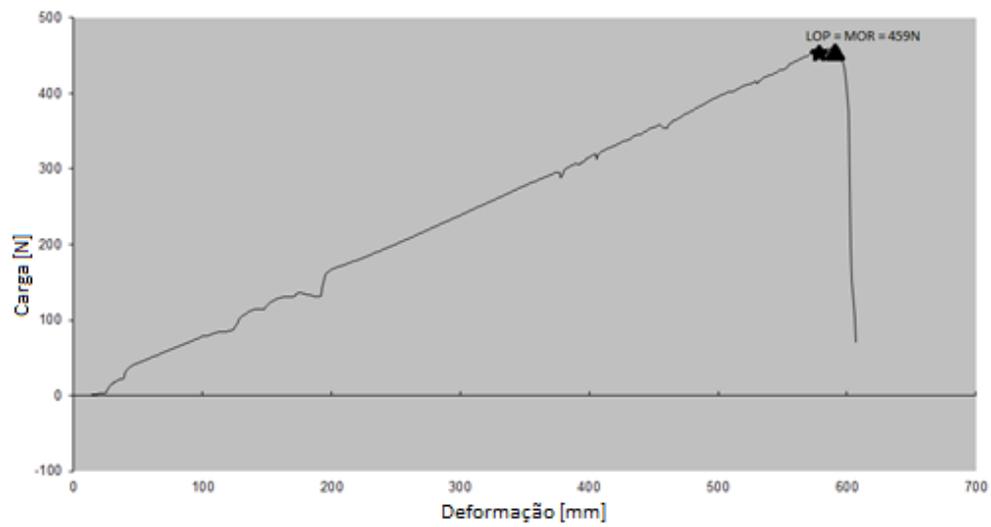
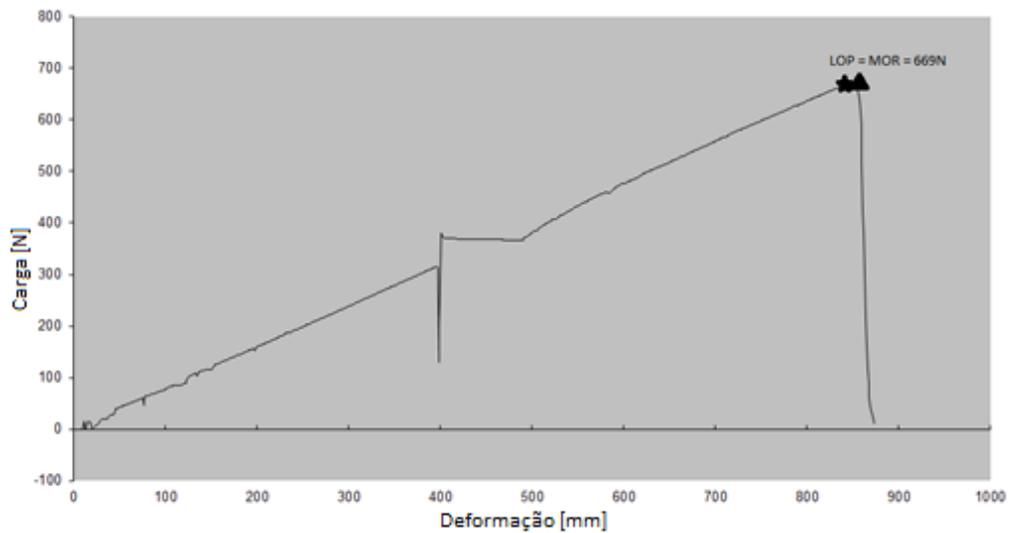


Figura 5.37 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C₂ – T₃

Figura 5.38 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C₃ – T₁Figura 5.39 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C₃ – T₂

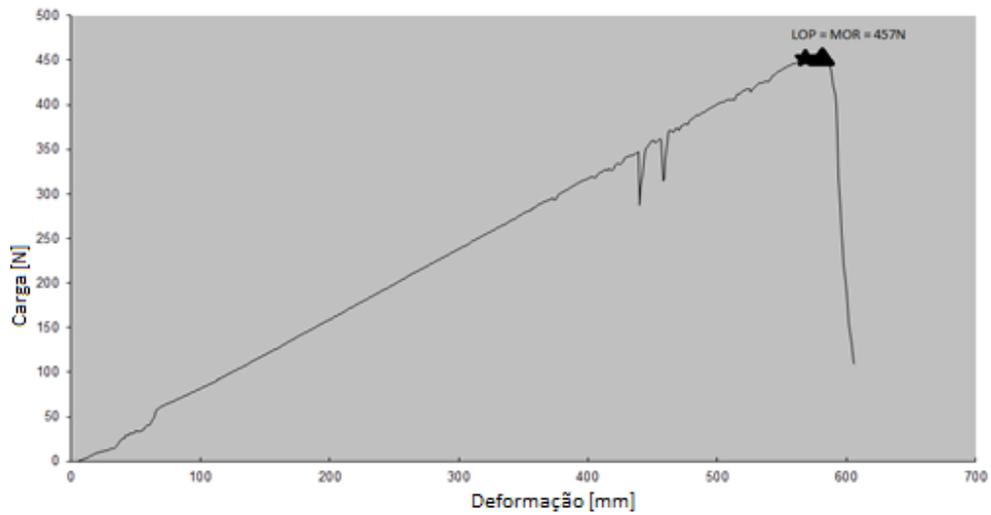


Figura 5.40 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C₃ – T₃

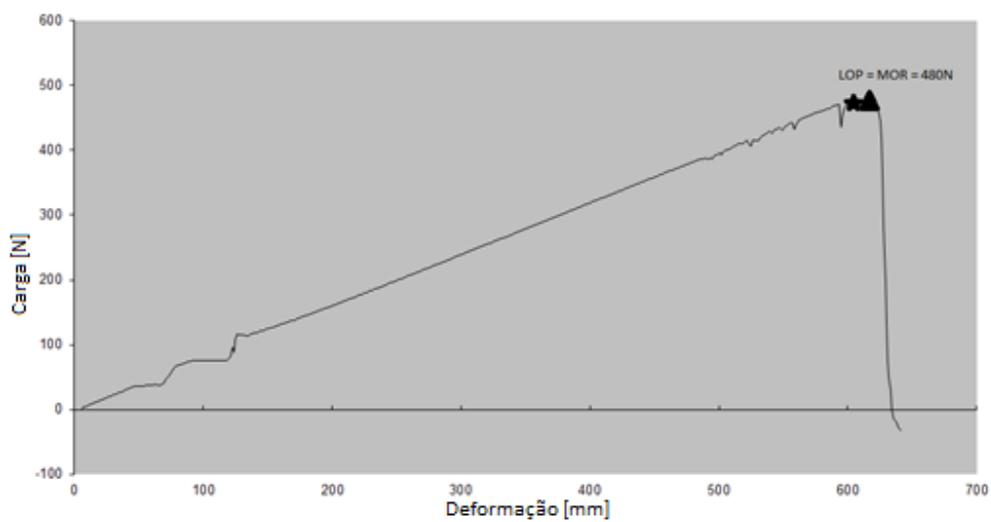
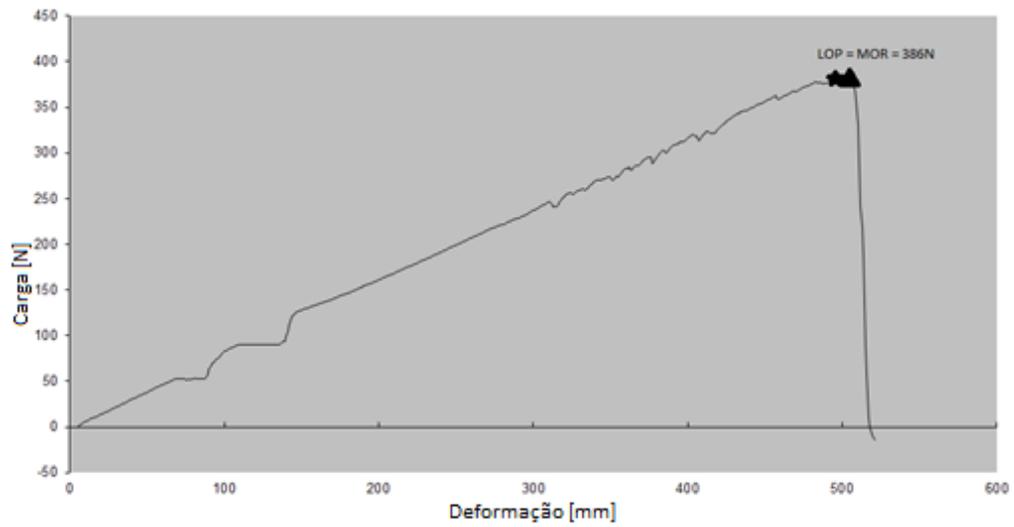
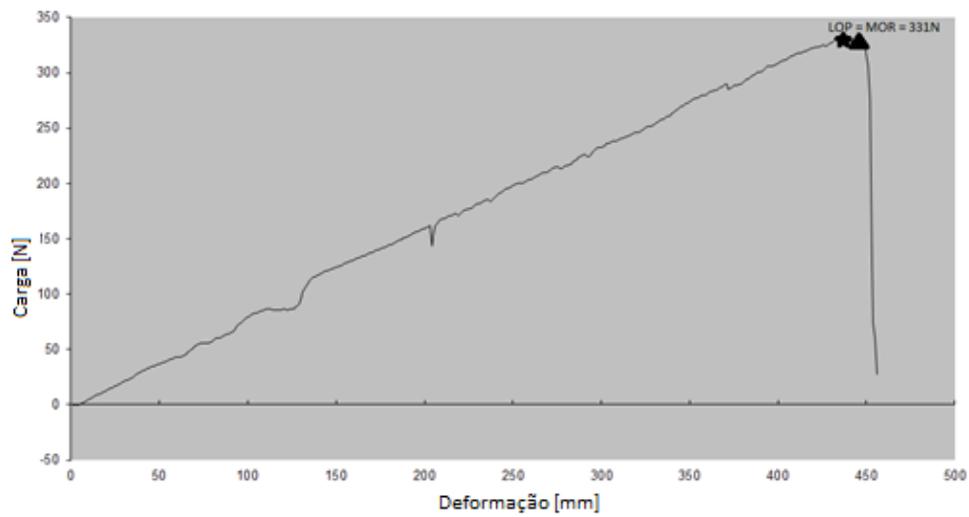


Figura 5.41 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C₄ – T₁

Figura 5.42 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C4 – T₂Figura 5.43 – Diagrama carga/deformação do corpo de prova C4 – T₃

6. Análise dos Resultados dos Ensaios

6.1 Introdução

Neste capítulo procura-se fazer a interpretação dos resultados dos ensaios em termos de tensões limite de proporcionalidade (LOP) e de deformabilidade das peças. Confrontam-se os resultados experimentais com os obtidos, quer através do MEF, quer da TCF.

6.2 Resultados dos ensaios dos corpos de prova

Nos Quadros 6.1 e 6.2 encontram-se reunidos os resultados dos ensaios dos corpos de prova bem como da determinação das tensões nas secções de rotura/fissuração.

Da relação carga/deslocamento no ponto LOP retirou-se o valor do módulo de elasticidade, através das relações simples da mecânica estrutural. Na Figura 6.1 apresenta-se o correspondente esquema estrutural ao qual se aplicou a expressão (15), (Roark's, 2002).

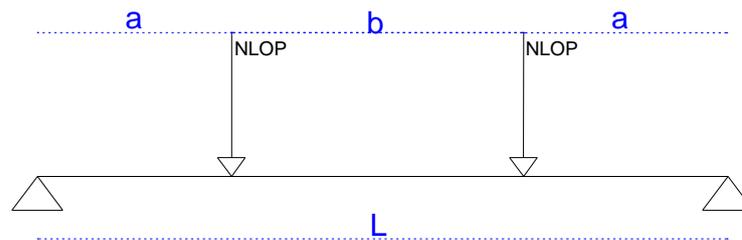


Figura 6.1 – Esquema estrutural de aplicação de cargas em corpos de prova

$$y = \frac{Q}{6EI} \left[-(2L - a)(L - a) \frac{x}{L} + (L - a) \frac{x^3}{L} - (x - a)^3 \right] \quad \text{se } x > a \quad (14)$$

$$y = \frac{Q}{6EI} \left[-\frac{(2L - a)(L - a)}{L} x + \frac{L - a}{L} x^3 \right] \quad \text{se } x \leq a \quad (15)$$

Quadro 6.1 – Resultados das tensões verificadas nos corpos de prova

Identificação dos corpos de prova	M_{LOP} (N.mm)	M_{MOR} (N/mm)	Distância do meio vão da nervura à secção de rotura (mm)	W (mm ³)	σ_{LOP} (N/mm ²)	σ_{MOR} (N/mm ²)
C ₁ – T ₁	30350	30350	48	1764	17,21	17,21
C ₁ – T ₂	18850	18850	30	1068,83	17,64	17,64
C ₁ – T ₃	25200	25200	5	1436,50	17,54	17,54
C ₂ – T ₁	19400	19400	36	916,67	21,16	21,16
C ₂ – T ₂	25000	25000	0	1568	15,94	15,94
C ₂ – T ₃	17850	17850	49	1028,5	17,36	17,36
C ₃ – T ₁	22950	22950	2	1089	21,07	21,07
C ₃ – T ₂	33450	33450	42	2218,67	15,08	15,08
C ₃ – T ₃	22850	22850	40	1521	15,02	15,02
C ₄ – T ₁	24000	24000	10	1764	13,61	13,61
C ₄ – T ₂	19300	19300	44	1464,67	13,18	13,18
C ₄ – T ₃	16550	16550	10	866,67	19,10	19,10

Quadro 6.2 – Resultados das deformações verificadas nos corpos de prova

Identificação dos corpos de prova	$P_{LOP}/2$ (N)	I (mm ⁴)	L (mm)	δ (mm)	E (GPa)
C ₁ – T ₁	303,5	12348	330	0,77	37,5
C ₁ – T ₂	188,5	5879	330	0,49	76,7
C ₁ – T ₃	252,0	9337	330	0,64	49,5
C ₂ – T ₁	194,0	4583	330	0,50	99,2
C ₂ – T ₂	250,0	10976	330	0,65	41,2
C ₂ – T ₃	178,5	5657	330	0,46	80,2
C ₃ – T ₁	229,5	5990	330	0,59	76,6
C ₃ – T ₂	332,5	17749	330	0,86	25,6
C ₃ – T ₃	228,5	9887	330	0,57	47,6
C ₄ – T ₁	240,0	12348	330	0,60	38,0
C ₄ – T ₂	193,0	9520	330	0,50	47,6
C ₄ – T ₃	165,5	4333	330	0,44	101,8

Os resultados permitem constatar uma relativa homogeneidade do comportamento, verificando-se que o valor médio de tensão σ_{LOP} é de 17.0 N/mm².

Procurando um valor médio para o módulo de elasticidade, encontra-se o valor 60 GPa.

Constata-se que os valores da tensão σ_{LOP} são relativamente elevados, embora concordantes com as médias referidas na literatura, (PCI, 1993; NPCAA, 2006; GRCP, 1995).

Relativamente aos valores do módulo de elasticidades, e na mesma perspetiva, estes assumem valores demasiado elevados. Digamos mais do dobro dos valores expectáveis.

Seria desejável repetir estes ensaios como uma verificação independente da deformação nos pontos de carga, no sentido de se esclarecer esta aparente diferença.

É de realçar que estes resultados da resistência à fendilhação na secção, com um acentuado gradiente, da extensão são devidos à flexão simples da secção.

6.3 Resultados dos ensaios das nervuras do tipo C

Nas Figuras 6.2 e 6.3 apresenta-se a discretização das nervuras do tipo C pelo MEF e a respetiva deformação para a carga que produziu a σ_{LOP} .

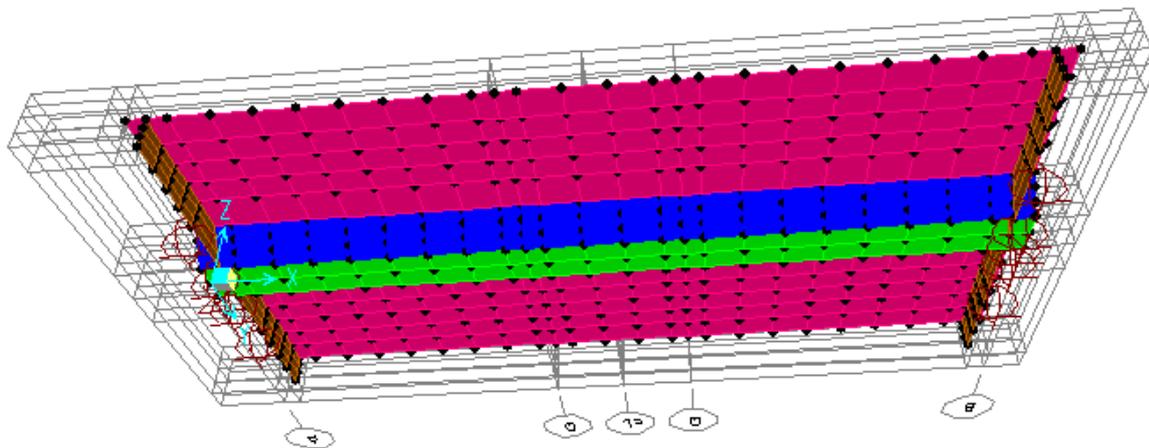


Figura 6.2 – Exemplo da discretização de uma nervura do tipo C pelo MEF

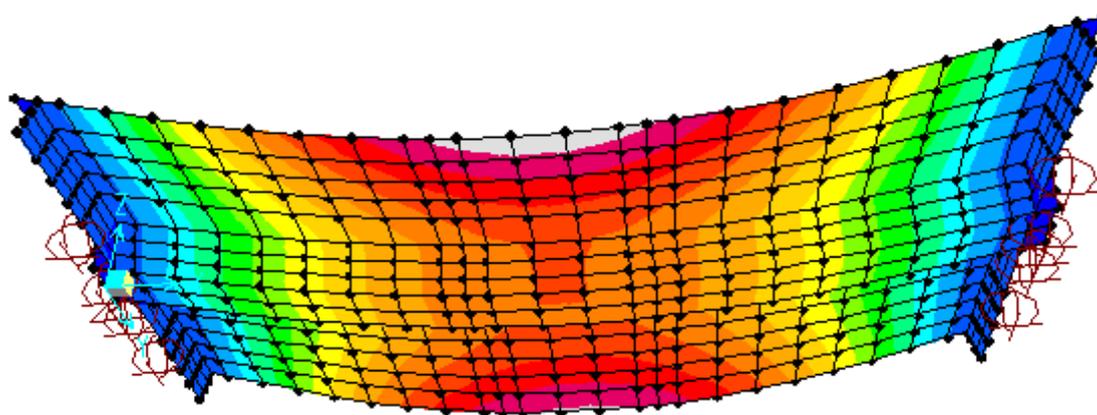


Figura 6.3 – Exemplo da deformação de uma nervura do tipo C pelo MEF

No Quadro 6.3 e 6.4 estão reunidos os resultados do ensaio, bem como a sua confrontação com os valores obtidos através do MEF e da TCF.

Dado que se pretende comparar os resultados dos ensaios no regime linear, portanto até se atingir σ_{LOP} , com os resultados obtidos analítica e numericamente, procedeu-se a uma correção dos deslocamentos dos ensaios, no sentido de eliminar os efeitos de acomodação dos apoios e dos dispositivos de aplicação das cargas. Esta correção foi traçada nos diagramas de ensaio representados nas figuras 5.24 a 5.27. Assim, os deslocamentos correspondentes a σ_{LOP}

indicados no Quadro 6.4 procuram traduzir a situação “ideal” de ensaio em que os apoios e pontos de aplicação das cargas não sofreriam qualquer ajustamento.

A identificação das parcelas retiradas faz-se em função da rigidez exibida pela peça até ao ponto LOP.

As deformações assim corrigidas permitiram ajustar no modelo de elementos finitos o valor do módulo de elasticidade por forma a fazer coincidir os deslocamentos nos dois casos.

Refira-se que este ajustamento não tem, praticamente, influência no valor das tensões obtidas pelo MEF.

Este valor ajustado do módulo de elasticidade (E) foi também utilizado no cálculo através da TCF.

Quadro 6.3 – Propriedades das nervuras do tipo C

Identificação da nervura	M_{LOP} (N.mm)	M_{MOR} (N.mm)	Distância do meio vão da nervura à secção da rotura (mm)	I_x (mm ⁴)	$Y_{sup.}$ (mm)	$Y_{inf.}$ (mm)
C ₁	299798	472998	45	1748370	39,8	24,8
C ₂	343678	411878	115	1580295	35,8	24,7
C ₃	279952	497152	22	1502925	36,6	25,6
C ₄	399938	485538	25	1539297	35,9	23,8

Quadro 6.4 – Resultados das tensões e deformações verificadas nas nervuras do tipo C

Identificação da nervura	Ensaio			MEF			TCF	
	N_{LOP} (N)	estimativa de σ_{LOP} (N/mm ²)	δ_{LOP} (mm)	σ_{LOP} (N/m ²)	δ_{LOP} (mm)	E (GPa)	σ_{LOP} (N/mm ²)	δ_{LOP} (mm)
C ₁	1375	5,54	1,30	5,58	1,30	14,1	5,54	1,04
C ₂	1600	6,58	1,94	6,89	1,94	11,7	6,58	1,62
C ₃	1275	5,80	1,20	5,85	1,20	16,0	5,80	0,99
C ₄	1875	7,75	2,07	7,79	2,07	12,7	7,75	1,79

Dos resultados obtidos ressalta a boa concordância (discrepâncias inferiores a 5%) entre os resultados experimentais e os resultados dados pelos cálculos. Aqui, o aspeto mais relevante é o das tensões, dado que os deslocamentos foram ajustados através do módulo de elasticidade.

Um aspeto importante tem a ver com a diferença verificada entre os valores de σ_{LOP} das nervuras e os valores de σ_{LOP} dos corpos de prova, obtidos a partir do material destas mesmas nervuras.

A comparação dos valores médios mostra que a estimativa da tensão nas nervuras se cifra em valores que são, em termos médios, cerca de 2.6 vezes inferiores aos dos corpos de prova.

A explicação para esta discrepância de valores pode ser justificada pelo facto, conhecido e relatado, (PCI, 1993; NPCAA, 2006; GRCP, 1995), de que uma distribuição de tensões de tracção mais uniforme na altura da secção (reduzido gradiente) conduz a resistências que são cerca de metade das verificadas em flexão, portanto com fortes gradientes de tensão. No caso em análise esta diferença é ainda mais pronunciada.

Relativamente aos módulos de elasticidade estimados a partir das deformações dos ensaios, cujos valores estarão a um nível inferior ao habitualmente referido (PCI, 1993; NPCAA, 2006; GRCP, 1995), a sua confrontação com os valores determinados nos corpos de prova, acentua mais esta discrepância,

No entanto, sem a confirmação das deformações obtidas nos corpos de prova e, desejavelmente, a da deformação obtida nas nervuras ensaiadas, não será correto retirar qualquer conclusão.

6.4 Resultados dos ensaios das nervuras do tipo R

Nas Figuras 6.4 e 6.5 apresenta-se a discretização das nervuras do tipo R pelo MEF e respetiva deformação para a carga que produziu σ_{LOP} .

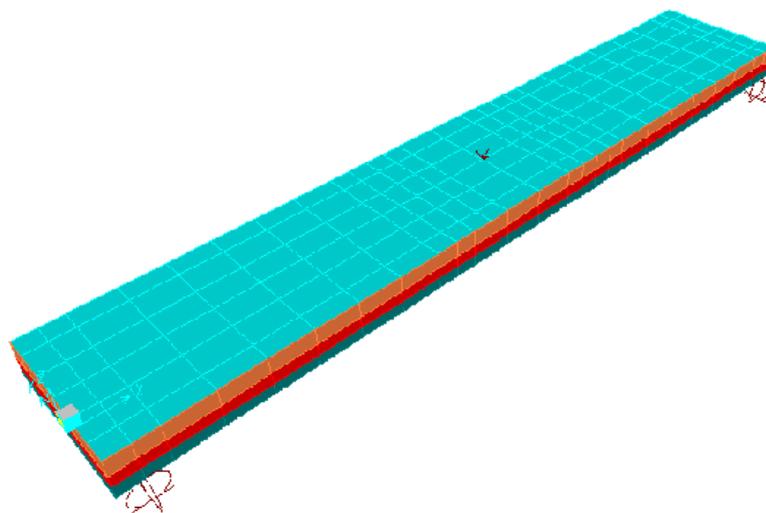


Figura 6.4 – Discretização de uma nervura do tipo R pelo MEF

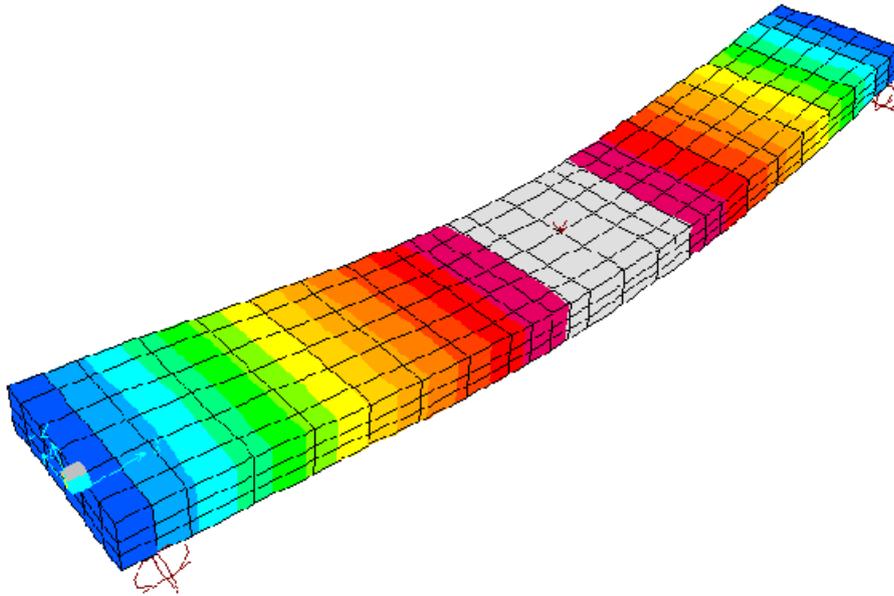


Figura 6.5 – Deformação de uma nervura do tipo R para a carga de ensaio

Nos Quadros 6.5 e 6.6 estão reunidos os resultados do ensaio, bem como a sua confrontação com os valores obtidos através do MEF e da TCF.

Neste tipo de nervuras, pretende-se comparar os resultados dos ensaios no regime linear, com os resultados obtidos pelo MEF e pela TCF, tal como o que foi feito para as nervuras do tipo C. Contudo, também neste tipo de nervuras houve uma correção dos deslocamentos dos ensaios, no sentido de se eliminar os efeitos de acomodação dos apoios e dos dispositivos de aplicação de cargas. Esta correção foi traçada nos diagramas de ensaio representados nas Figuras 5.28 a 5.31. Assim como o que acontece nas nervuras do tipo C, os deslocamentos correspondentes a σ_{LOP} indicados no Quadro 6.6 procuram traduzir a situação “ideal” de ensaio, em que os apoios e pontos de aplicação de cargas não sofreriam qualquer ajustamento.

Comparativamente com o que ocorre nas nervuras do tipo C, aqui também as deformações foram corrigidas de forma a ajustar, no MEF, o valor do módulo de elasticidade por forma a fazer coincidir os deslocamentos nos dois casos. Este valor ajustado também é utilizado no cálculo através da TCF.

Quadro 6.5 – Características das nervuras do tipo R

Identificação da nervura	M_{LOP} (N.mm)	M_{MOR} (N.mm)	Distância do meio vão da nervura à secção da rotura (mm)	I_x (mm ⁴)	$Y_{sup.}$ (mm)	$Y_{inf.}$ (mm)
R ₁	216965	266140	40	940167	16,0	0,0
R ₂	221140	292540	60	891274	16,6	4,4
R ₃	230250	346275	0	945021	17,1	4,9
R ₄	233625	312025	100	936148	16,7	0,3

Quadro 6.6 – Resultados das tensões e deformações verificadas nas nervuras do tipo R

Identificação da nervura	Ensaio			MEF			TCF	
	N_{LOP} (N)	estimativa de σ_{LOP} (N/mm ²)	δ_{LOP} (mm)	σ_{LOP} (N/mm ²)	δ_{LOP} (mm)	E (GPa)	σ_{LOP} (N/mm ²)	δ (mm)
R ₁	1125	1,85	3,68	2,17	3,68	4,53	1,85	3,51
R ₂	1150	2,60	4,03	2,87	4,03	3,68	2,60	4,65
R ₃	1200	2,66	2,58	2,71	2,58	5,85	2,66	2,88
R ₄	1225	2,12	2,35	3,33	2,35	6,73	2,12	2,58

Comparativamente com o que acontece nas nervuras do tipo C, nas nervuras do tipo R também ocorre concordância entre os resultados experimentais e os resultados dados pela MEF, apesar das discrepâncias serem superiores às verificadas nas nervuras do tipo C (cerca de 10%, em média, para as nervuras R₁, R₂ e R₃, e um valor mais elevado de cerca de 37% para a nervura R₄).

À semelhança do que ocorre nas nervuras do tipo C, aqui o aspeto mais importante também é o das tensões, visto que os deslocamentos foram ajustados através do módulo de elasticidade.

Neste tipo de nervuras não foi possível ensaiar os corpos de prova provenientes do material das mesmas, assim sendo não se conclui nada acerca da relação entre tensões nestes dois tipos de elementos.

Relativamente aos módulos de elasticidade estimados a partir das deformações de ensaio, verifica-se que os seus valores são significativamente mais baixos do que os valores habitualmente referidos na literatura, (PCI, 1993; NPCAA, 2006; GRCP, 1995).

7. Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros

7.1 Considerações Finais

O betão reforçada com fibra de vidro (GRC) é um material que fornece características muito atrativas a vários níveis, nomeadamente para a engenharia, arquitetura e construção. A tecnologia do GRC encontra-se difundida a nível mundial, principalmente na execução de fachadas prefabricadas, sob a forma de painéis de revestimento.

Este trabalho incidiu nos aspetos de dimensionamento de painéis prefabricados de fachada em GRC do tipo nervurado, tendo-se estudado pormenorizadamente tensões normais devidas à flexão, as deformações e valores do módulo de elasticidade, comparando procedimentos numéricos (MEF) e procedimentos analíticos (TCF) com resultados experimentais.

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi a inexistência de estudos que abordassem o dimensionamento dos painéis do tipo nervurado no sentido de se compreender melhor o funcionamento dos mesmos à flexão.

Para a clara perceção do problema, o desenvolvimento deste trabalho exigiu inicialmente uma recolha teórica que incidiu principalmente nos seguintes temas:

- Caracterização do compósito GRC.
- Abordagem à teoria clássica da flexão em peças lineares (TCF).
- Modulação numérica pelo método dos elementos finitos, (MEF).

O estudo mais aprofundado incidiu na análise das tensões normais LOP e na análise das deformações, nos pontos de aplicação da carga, de forma a relacionar os resultados obtidos pelo MEF e pela TCF em peças lineares.

As principais dificuldades encontradas no decorrer deste trabalho residiram nos seguintes aspetos:

- Adaptabilidade das soluções às diversas especificidades.
- Modelação numérica das nervuras no programa SAP2000.

Considera-se que os objetivos fundamentais foram atingidos e espera-se que este trabalho possa contribuir para o melhoramento dos aspetos de dimensionamento de painéis prefabricados em GRC do tipo nervurado.

7.2 Principais conclusões

Constatou-se que os resultados da aplicação da TCF ao dimensionamento das nervuras com secção oca não diferem significativamente dos resultados dados para uma modelação com elementos finitos. Os valores médios das tensões nos banzos determinados pela TCF situaram-se em valores inferiores aos dados pelo MEF, mas não ultrapassando um desvio relativo de 6,5%.

Confirmou-se o aspeto descrito na literatura de que o envelhecimento do GRC modifica claramente as suas propriedades, aumentando a sua rigidez e resistência no tempo, mas diminuindo grandemente a ductilidade.

Verificou-se que a atenuação do gradiente de tensões normais limita especialmente a resistência das nervuras (com a forma habitual de secção oca) tendo-se verificado reduções superiores às indicadas na literatura.

Assim, e de um modo geral, é possível utilizar um dimensionamento das nervuras recorrendo à TCF, desde que se admita que estes resultados devem ser majorados por um coeficiente corretivo. Sugere-se, em função dos resultados, um valor entre 1,05 e 1,10.

Sugere-se também que a interpretação dos resultados dos ensaios de flexão dos corpos de prova sejam modificados, por forma a incorporarem o efeito da ausência de gradiente, no caso de dimensionamento de nervuras de secção oca. Sugere-se para esta situação a utilização de um coeficiente entre 2,5 e 3,0.

7.3 Desenvolvimentos futuros

Espera-se que o presente trabalho traga uma contribuição para o melhoramento do estudo deste tipo de painéis prefabricados.

Como ficou patente no trabalho, alguns resultados não puderam ser cabalmente explicados, o que deixa ainda em aberto algumas questões. Nomeadamente, será necessário verificar a fidedignidade das deformações reproduzidas pelos sistemas de aquisição de dados. Este aspeto permitirá clarificar, em especial, os valores dos módulos de elasticidade a longo prazo.

O comportamento a nível de tensões tangenciais, não parecendo condicionante em termos dos resultados obtidos, será um dos pontos a necessitar de desenvolvimento.

Será importante estudar o comportamento no cruzamento de nervuras de igual altura, situação frequente na prática.

Será também conveniente propor uma sistemática de tratamento dos resultados de ensaio dos corpos de prova, com fundamentação estatística, de modo a transformá-los em valores de cálculo para projeto.

Referências Bibliográficas

- PCI (1993) Recommended Practice for Glass Fiber Reinforced Concrete Panels, Precast/Prestressed Concrete Institute. U.S.A (em Inglês).
- Cem-FIL Technical Data*. Cem-FIL International Limited.(em Inglês).
- Faserbeton, F e. V., (1995) *Glassfibre Reinforced Concrete. Practical Design and Structural Analysis*. Die Deutsche Bibliothek – CIP, Einheitsaufnahme, Berlin (em Inglês).
- Faccio, J. (2004), *Fachadas Prefabricadas em GRC*. Dissertação de Conclusão do Curso de Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GRC In Action. Today's GRC for Architects and Engineers*, (2003) Liguorice Suite, England.
- Pereira, A., (2013). *A utilização de GRC na renovação de edifícios*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.
- Majundar, A., Laws, V, (1991). *Glass Fibre Reinforced Cement*, BSP Professional Books, Oxford (em Inglês).
- Fernandes, J., (2008). *Tratamento de juntas em painéis de GRC*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.
- Sapo (2014) <http://casa.sapo.mz/Noticias/Living-Foz-vence-premio-internacional-dearquitectura-Leaf-Awards-2011/?ID=17468> (página de internet oficial), Portugal.
- PCI (2014) <http://www.pci.org/> (página de internet oficial).
- Stonewear (2014) <http://www.stonewear.com/tech/history.htm> (página de internet oficial)
- Peruzzi, A. d. P, (2002). *Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em Matriz de Cimento Portland Modificada com Látex e Adição de Sílica Ativa*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Paulo, São Paulo.
- NPCAA (2006) - *National Precast Concrete Association Australia*, GRC Industry Group, (em Inglês).
- Ferreira, J., Branco, F, (2004). *Aplicação Estrutural do Betão Reforçado com Fibras de Vidro*. Seminário de Mestrado, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa.
- Silva, M., John, V, (1998). *Painéis em Cimento Reforçado com Fibras de Vidro (GRC)*, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Sousa, F. M. F. D., (2010). *Fachadas Ventiladas de Edifícios. Tipificação de Soluções e Interpretação do Funcionamento Conjunto de Suporte/Acabamento*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.

Tiago, P. M. N., (2013). Apontamentos da disciplina ‘Tecnologias da Envolvente dos Edifícios’, Instituto Politecnico de Coimbra. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra.

Santiago, M., (2006). *Hormigones Reforzados com Fibras*, Departamento de Construcciones Arquitectónicas da Universidad de Sevilla, Sevilla.

Barth, F., Vetago, L. H. M., (2009). *Fachadas com Painéis de GRC no Brasil*. Revista Internacional Construlink, nº 8, Portugal.

Simões, I., Branco, F. G., Tiago, P. M., (2009). *Painéis de Fachada em GRC*. Revista Internacional Construlink, nº 12, Portugal.

NP EN 1170-5:2000, *Produtos Prefabricados de Betão. Método de Ensaio para Cimento Reforçado com Fibra de Vidro. Parte 5: Medição da Resistência por Flexão, Método “ensaio completo de flexão”*. Diretiva 89/106/EEC.

Silva, V. D., (2004) *Mecânica e Resistência dos Materiais*. Universidade de Coimbra. Departamento de Engenharia Civil. 3ª Edição, Coimbra.

Frey, François, (2000). *Mécanique des Structures. Analyse des structures et milieux continus*. Traité de Génie Civil, de l’Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Volume 2, Lausanne (em Francês).

Coelho, A. M. G., (2014). Apontamentos da disciplina “Resistência dos Materiais I”. Instituto Politécnico de Coimbra. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra.

Carvalho, N. M. V., (2010) *Cálculo Automático de Estruturas. Análise Estrutural de Pórticos Planos Utilizando o Método dos Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Lisboa. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Young, W. C., Budynas, R. G., (2002). *Roark’s Formulas for Stress and Strain*. Seventh Edition, MCGraw-Hill, (em Inglês).

Pregaia (2014) <http://www.pregaia.com/index.php> (página de internet oficial).

Computers & Structures, SAP2000 User Manual, Berkley, (2008).

Anexos

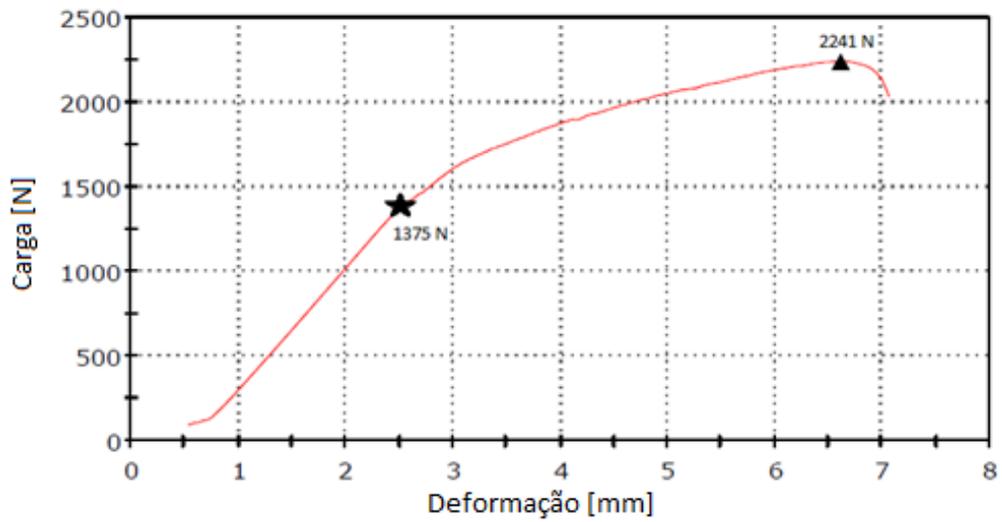


Diagrama carga/deformação da nervura C₁.

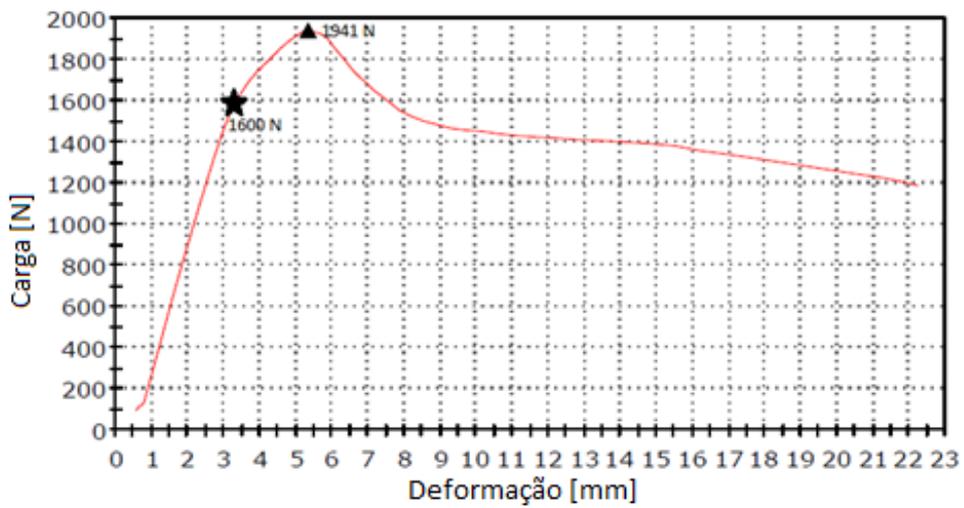


Diagrama carga/deformação da nervura C₂.

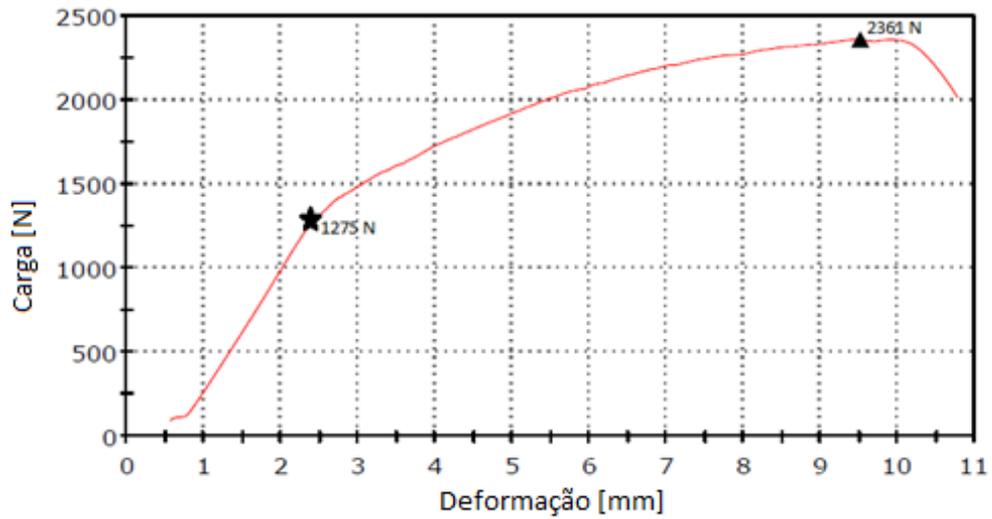


Diagrama carga/deformação da nervura C₃.

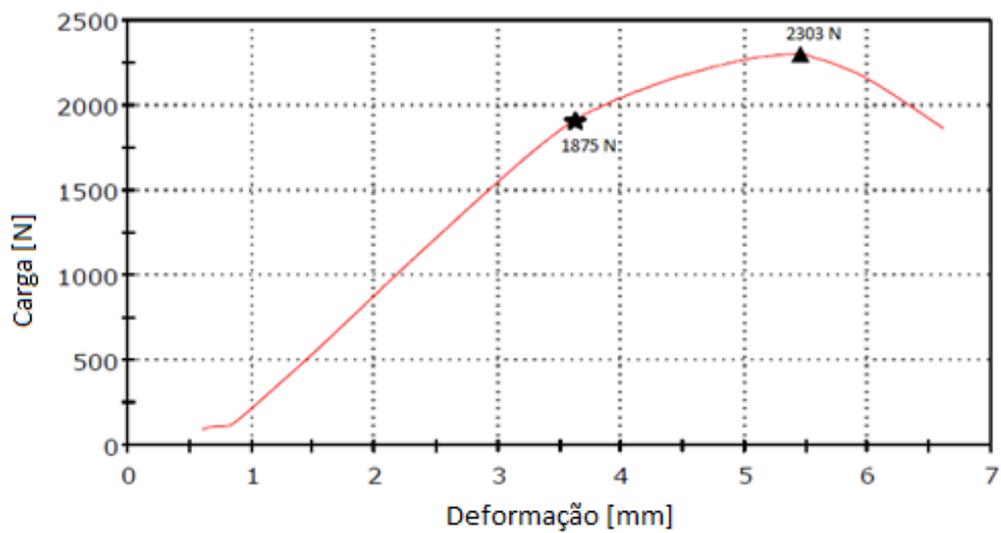
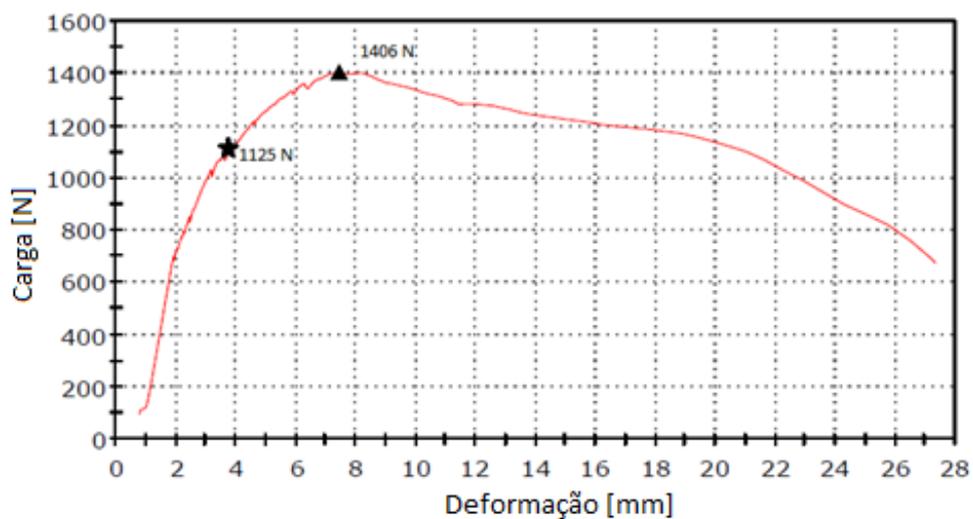
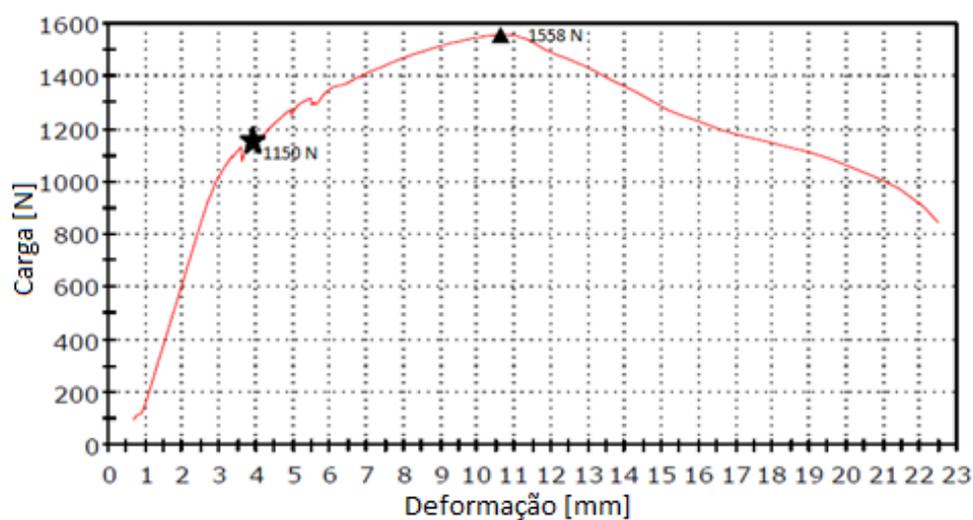


Diagrama carga/deformação da nervura C₄.

Diagrama carga/deformação da nervura R₁.Diagrama carga/deformação da nervura R₂.

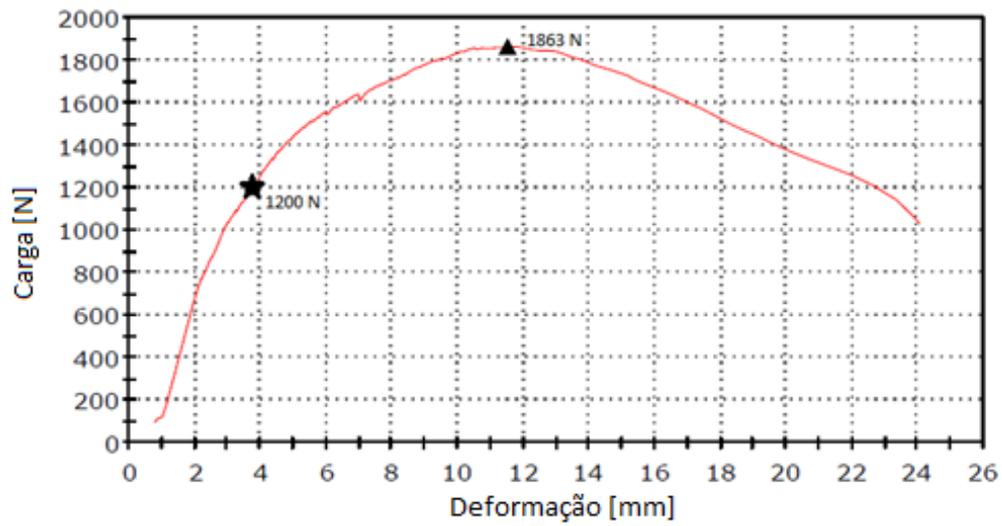


Diagrama carga/deformação da nervura R₃.

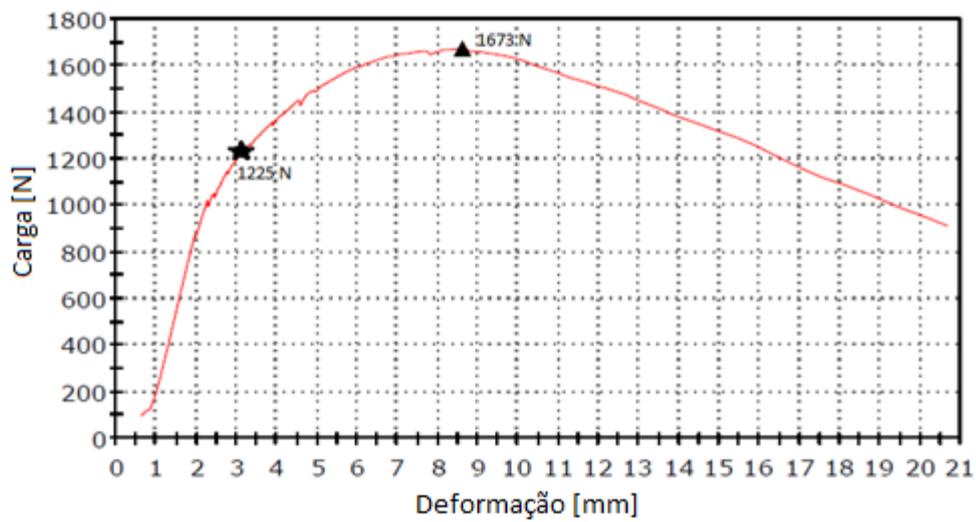


Diagrama carga/deformação da nervura R₄.

