



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Avaliação da repartição transversal de cargas em tabuleiros mistos madeira-betão com recurso a ensaios experimentais**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas

Autor

**Frederico Melo Baio Dias**

Orientadores

**Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias**

**Sandra Raquel de Sousa Monteiro**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Julho, 2013**

## **Agradecimentos**

Ao orientador e à co-orientadora, Prof. Doutor Alfredo Dias e Professora Sandra Monteiro, pela orientação e todo o apoio prestado durante a realização do trabalho.

Ao Carlos Martins e ao Pedro Gil, por toda a ajuda disponibilizada.

Aos meus pais, irmã e toda a família, pela paciência e afeto em todos os momentos.

Aos meus amigos e à malta do rugby, por estarem presentes tanto nas horas de trabalho, como nas horas de diversão e descontração.

Aos meus colegas pelo auxílio prestado na elaboração do trabalho.

## Resumo

Com este trabalho pretende-se complementar o estudo de estruturas mistas madeira-betão através da avaliação da repartição de cargas em tabuleiros mistos madeira-betão, com recurso a ensaios experimentais.

No estado de arte é dado a conhecer um pouco da história das estruturas mistas madeira-betão. São ainda conhecidos os materiais utilizados nos provetes e é feita uma revisão bibliográfica sobre as estruturas mistas madeira-betão através dos vários estudos já efetuados sobre esse tema.

Na parte experimental foram ensaiados dois tabuleiros mistos madeira-betão com vão semelhante mas com diferentes tipos de materiais: um com uma laje de betão normal e vigas com elementos de madeira lamelada colada de seção retangular e uma laje de betão leve com aglomerados de cortiça e vigas de madeira de pinho bravo de seção circular. Numa primeira fase os tabuleiros foram sujeitos a cargas pontuais atuando sobre cada uma das vigas, a meio-vão e a quarto-de-vão. No âmbito deste ensaio foram monitorizadas as reações de apoio e as deformações sobre cada uma das vigas, por forma permitir a posterior avaliação da distribuição de cargas.

No último capítulo são apresentadas as conclusões dos ensaios experimentais e feita uma recomendação para trabalhos futuros.

## **Abstract**

This thesis is intended to complement the study of timber-concrete composite structures by evaluating the distribution of loads on timber-concrete slabs, using experimental tests.

In state of the art is given to know a little history of timber-concrete composite structures. Are even known materials used in the samples and it is made a literature review on the timber-concrete composite structures through the many studies already made on this subject.

In the experimental tests were tested two timber-concrete slabs with similar span but with different types of materials: one with a normal concrete slab and glued laminated timber beams with rectangular section and other with a lightweight concrete slab with cork agglomerates and maritime pine beams with circular section. Initially, the composites were subjected to local loads acting on each of the beams, half and quarter span. Under this assay, support reactions and load deformations were monitorized for each beam, in order to allow subsequent evaluation of the loads distribution.

The last chapter presents the experimental tests conclusions and makes a recommendation for future work.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos .....	1
1.3	Estrutura da tese.....	2
2	ESTADO DE ARTE.....	3
2.1	Enquadramento Histórico .....	3
2.2	Estrutura mista madeira-betão .....	4
2.3	Materiais .....	5
2.3.1	Lamelado colado.....	5
2.3.2	Madeira de seção circular .....	7
2.3.3	Abeto .....	7
2.3.4	Pinho bravo.....	7
2.3.5	Betão.....	8
2.3.6	Betão leve .....	8
2.3.7	Ligação .....	9
3	MATERIAIS E CONFIGURAÇÃO DOS PROVETES.....	12
3.1	Introdução .....	12
3.2	Madeira .....	12
3.3	Betão .....	13
3.4	Laje de com elementos de madeira de seção retangular .....	14
3.5	Laje de betão leve com elementos de madeira de seção circular.....	15
4	ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	17
4.1	Descrição dos ensaios .....	17
4.2	Laje de betão com elementos de madeira de seção retangular .....	20
4.2.1	Deslocamentos com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico.....	20
4.2.2	Repartição das cargas com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico.....	23

4.2.3	Escorregamento da laje com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico .....	25
4.2.4	Levantamento da laje com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico .....	26
4.3	Laje de betão leve com elementos de madeira de seção circular .....	27
4.3.1	Deslocamentos com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico .....	27
4.3.2	Repartição das cargas com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico .....	31
4.3.3	Escorregamento da laje com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico .....	33
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	35
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	37
ANEXO A	Deslocamentos na laje de betão pronto com elementos de madeira de seção retangular .....	A-1
ANEXO B	Carregamentos na laje de betão pronto com elementos de madeira de seção retangular .....	B-1
ANEXO C	Deslocamentos na laje de betão leve com elementos de madeira de seção circular .....	C-1
ANEXO D	Carregamentos na laje de betão leve com elementos de madeira de seção circular .....	D-1

## **Simbologia**

$E_{m,0}$  – Módulo de elasticidade local

$E_{m,g}$  – Módulo de elasticidade global

$D_{nominal}$  – Diâmetro nominal

$D_{med}$  – Diâmetro médio

W – Teor de água da madeira

$\rho$  – Massa volúmica

## **Abreviaturas**

EC5 – Eurocódigo 5

ELS – Estados Limites de Serviço

KAR - Knot Area Ratio - Rácio de área de nós

MLC – Madeira Lamelada Colada



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

As estruturas mistas de madeira-betão são uma alternativa cada vez mais utilizada na construção. Uma das aplicações mais correntes são os tabuleiros, utilizando-se tanto na reabilitação de pisos de madeira, colocando uma camada de betão por cima do piso de madeira já existente, como na construção de novos pisos, compostos por vigas de madeira e uma laje de betão. Além deste tipo de piso ter um bom comportamento como estrutura, também traz vantagens na fase de construção.

Numa estrutura mista, o comportamento da estrutura, está dependente da interligação dos dois materiais. Ou seja, se os dois materiais funcionarem como um só, a estrutura terá um bom funcionamento, caso funcionem como materiais em separado, o seu comportamento como composto não se verifica. Para que esta interligação seja eficiente, teremos de assegurar uma boa ligação, e para isso teremos que ter em conta a rigidez do ligador. Quanto mais rígido for o ligador, mais efetiva será a ligação e melhor será o funcionamento da estrutura compósita.

Apesar das várias vantagens que esta alternativa traz relativamente à sua utilização e ao seu comportamento, não é um tipo de construção muito usual. Numa tentativa de cativar a procura e utilização deste tipo de estruturas, tem havido um maior número de estudos nesta área.

## 1.2 Objetivos

Tendo em conta o reduzido número de estudos e considerando uma estrutura mista madeira-betão uma boa alternativa às estruturas de betão e às estruturas de madeira, pretende-se avaliar nesta tese o comportamento de duas lajes mistas madeira-betão quando sujeitas a cargas pontuais em vários pontos da laje.

Mais objetivamente, duas lajes mistas, uma de betão corrente com elementos de madeira lamelada colada de abeto e outra de betão leve com aglomerados de cortiça e com elementos de madeira com seção circular pinho bravo, foram sujeitas a carregamentos pontuais a meio-vão e a quarto-de-vão das vigas da laje. Desta forma pretendeu-se estudar a distribuição do carregamento pelos apoios das vigas e analisar as flechas máximas ocorrentes nas vigas.

### **1.3 Estrutura da tese**

A tese é constituída por seis capítulos, no primeiro dos quais, se faz uma breve introdução ao trabalho a realizado, aos seus objetivos e é apresentada a forma como está organizado.

No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os trabalhos já existentes sobre estruturas mistas madeira-betão fazendo uma apresentação às mesmas, assim como ao material utilizado nos provetes.

No capítulo 3 descrevem-se os materiais utilizados e de algumas das suas propriedades, assim como o tipo e a montagem dos provetes que foram ensaiados.

No capítulo 4 descrevem-se os ensaios efetuados, apresentam-se alguns resultados e as conclusões a eles associadas.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros, por forma a complementar ou continuar o presente trabalho.

São ainda reservados quatro capítulos, no final e em forma de anexo, com os restantes resultados dos trabalhos experimentais que não foram colocados no capítulo 4.

## 2 ESTADO DE ARTE

### 2.1 Enquadramento Histórico

Depois da 1ª e da 2ª Guerra Mundial, houve uma escassez de aço para reforçar o betão devido à sua grande utilização em material de guerra. Isto fez iniciar o desenvolvimento das estruturas mistas madeira-betão na Europa, por forma a obter uma solução para reforçar o betão com outro material que não o aço. Muller patenteou, em 1922, um sistema de pregos e braçadeiras de aço para formar a ligação entre a laje de betão e as vigas de madeira. Subsequente, em 1939, Schaub patenteou na Suíça perfis em Z e em I como ligador na interface dos dois materiais. As estruturas mistas madeira-betão foram primeiramente aplicadas como técnica de reabilitação de edifícios históricos em cidades europeias como Leipzig na Alemanha (Holschemacher et al. 2002) (Yeoh et al. 2011).

Segundo o mesmo autor, nos últimos 50 anos, o interesse em estruturas mistas madeira-betão aumentou, resultando na construção de pontes (Estados Unidos da América, Nova Zelândia, Austrália, Suíça, Áustria e países Escandinavos), no reforço de pisos de madeira já existentes (Europa) e na construção de novos edifícios (Natterer et al. 1996). Um grande exemplo é a ponte Vihantasalmi (Figura 2.1) construída em 1999 na Finlândia, com 168 metros de vão, 11 metros de largura de estrada e 3 metros de passeio.



Figura 2.1 - Ponte Vihantasalmi

## 2.2 Estrutura mista madeira-betão

Os tradicionais pisos de madeira podem ter deformações excessivas, suscetibilidade a vibrações, isolamento acústico insuficiente e baixa resistência ao fogo. Estes problemas podem ser significativamente minorados utilizando pisos mistos madeira-betão. Contudo, apesar do estudo das estruturas mistas madeira-betão ainda estar em desenvolvimento, já está suficientemente avançado para que se apliquem estruturas mistas madeira-betão em várias situações (Natterer et al. 1996).

O comportamento de uma estrutura mista está limitado por dois extremos de rigidez, que dependem da ligação entre os dois materiais. No limite inferior, onde não há transmissão de forças horizontais entre os dois materiais, tendo estes comportamentos independentes, cada um apresenta o seu eixo neutro e não há continuidade das extensões na interface entre eles. No limite superior, quando os dois materiais se comportam como um só, a secção transversal possui apenas um eixo neutro e as extensões nos dois materiais na zona da interface são idênticas. Em situações intermédias, quando a estrutura é fletida, pode ocorrer algum escorregamento na interface, afetando a resistência e a rigidez do compósito. Deste modo, para reduzir o escorregamento, de forma a ter um comportamento único no compósito, a primeira consideração é ter uma ligação efetiva, que não permita o escorregamento entre os dois materiais (Gutkowski et al. 2007).

Para que as soluções finais sejam efetivas, três critérios fundamentais, a nível de projeto, têm que ser verificados (Yeoh et al. 2011):

- O eixo neutro da secção mista tem de estar localizado perto da fronteira madeira-betão, para assegurar que ambos os materiais atuem eficazmente: o betão a funcionar essencialmente à compressão e a madeira à tração;
- O sistema de ligação tem que ser forte e rígido o suficiente para resistir à tensão de corte e proporcionar uma ação conjunta da estrutura mista;
- As vigas de madeira têm de resistir aos esforços de flexão induzidos pela gravidade aplicados na estrutura mista, pois a rotura acontece muitas vezes na madeira e menos no betão.

Algumas das vantagens que se podem encontrar neste tipo de sistema são (Ceccotti 2002):

- Mais leve, quando comparado com um sistema idêntico em betão armado, pois a madeira tem uma massa volúmica mais baixa do que o betão;

- Pode ter até três vezes mais capacidade de carga e até seis vezes mais rigidez na flexão do que os tradicionais pisos de madeira, se a madeira e o betão estiverem bem interligados;
- É mais eficiente que o betão armado, tendo em conta que o rácio capacidade de carga por peso próprio é maior;
- Tem boas características de isolamento sonoro. Em relação à transmissão de som aéreo, o isolamento é melhorado em relação aos pisos de madeira, devido ao aumento de massa. Em relação à transmissão de sons de precursão, é melhor em relação aos sistemas de betão armado, devido ao maior amortecimento acústico;
- Tem boa resistência ao fogo. A laje de betão é uma barreira eficiente contra a propagação do fogo, o que aumenta a resistência quando comparado com os sistemas de madeira;
- É um sistema competitivo quando comparado com o betão armado, pelo seu menor custo total, velocidade de construção, menor necessidade de cofragens e escoramentos durante a construção (pois os elementos de madeira podem ter essa função) e redução das fundações devido à diminuição do peso próprio.

Também a nível da reabilitação de pisos antigos, esta técnica tem suscitado bastante interesse e é aplicada por toda a Europa, existindo várias referências à sua utilização. O caso mais relevante é de uma referência de 10 000 m<sup>2</sup> de pavimento na antiga URSS desde 1960 (Jorge 2005).

Na reabilitação de edifícios, adicionando uma laje de betão de aproximadamente 50 mm ao piso de madeira já existente, podem ser tiradas as seguintes vantagens (Yeoh et al. 2011):

- Aumento da rigidez e da capacidade de carga;
- Preservação de edifícios históricos;
- Melhoria do comportamento sísmico através da ação de diafragma.

## **2.3 Materiais**

### **2.3.1 Lamelado colado**

O uso de madeira colada é bastante antigo. No entanto o aparecimento do lamelado-colado, com características semelhantes ao que conhecemos hoje, surgiu no início do século XX (1906) quando o Otto Hetzer obteve uma patente para construções de madeira colada (Dias 2012).

As vigas de madeira lamelada são formadas por lamelas de madeira, (com dimensões relativamente reduzidas quando comparadas às dimensões da peça final assim constituída) de

espessura pré-dimensionada e classificada segundo a sua classe de resistência mecânica. Essas lamelas são fortemente ligadas por sobreposição com colas adequadas à sua resistência: a MUF (Melamina-Urea-Formaldáido), para colagens à prova de água e à intempérie, podendo assim ser usadas no exterior, segundo as normas europeias e a RF (Resorcinol Fenol), para colagens de estruturas de madeira de suporte para interiores e exteriores segundo as normas alemãs. A madeira lamelada colada (MLC) permite obter grandes vãos através da ligação “finger-joint”. Permite ainda proceder a uma escolha criteriosa das peças de madeira e eliminar as deficiências maiores antes da colagem. Esse processo torna as vigas mais homogêneas e evita a fendilhação, uma vez que as tensões geradas por umas lamelas são contrariadas e absorvidas pelas outras [2].

Isto faz da MLC um material ideal para a construção de estruturas de grandes dimensões. É um material arquitetónico extremamente versátil, pois permite uma grande variedade de formas, assim como estruturas com grandes vãos [3].

A escolha de MLC para as estruturas, pode ser de fundamental importância principalmente quando se trata de estruturas expostas a um meio corrosivo, ou quando existir risco de incêndio. Quando se trata de construções sujeitas a riscos de incêndio, a utilização da MLC na componente estrutural é a mais aconselhada pois, embora seja um material de reação inflamável, inicialmente é queimada uma pequena camada da peça e em seguida a velocidade de propagação do fogo para o interior da peça diminui consideravelmente. Isto porque a formação de uma camada de carvão nessa parte externa dificulta o acesso do oxigénio ao seu interior e conseqüentemente a propagação do fogo perde velocidade. Nestas condições, o núcleo interno que resta da peça, é muitas vezes suficiente para resistir mecanicamente cerca de 30 a 40 minutos. Em resumo, as estruturas de madeira são consideradas de reação inflamável mas que apresentam elevada resistência mecânica, mesmo em caso de incêndio [4].

Uma estrutura de MLC apresenta as seguintes características:

- Design flexível: as vigas podem ter um formato retilíneo ou curvo;
- Vasta gama de dimensões e classes de resistência;
- Possibilidade de vencer grandes vãos;
- Fácil de conjugar com outros materiais;
- Montagem fácil no local, sem necessidade de maquinaria pesada ou cuidados climatéricos;
- Excelentes características mecânicas;
- Baixa densidade;

- Baixa condutibilidade térmica;
- Boa desempenho acústico;
- Resistente ao fogo;
- Bom efeito estético pela beleza natural da madeira.

As estruturas de MLC são principalmente aplicadas nos seguintes tipo de utilização:

- Coberturas de grande vão (centros comerciais, pavilhões desportivos, piscinas, etc.);
- Pontes pedonais;
- Habitações.

### **2.3.2 Madeira de seção circular**

Para a utilização da madeira de seção circular, as árvores devem ser abatidas de preferência em época seca, quando o tronco tem menor humidade. Depois de abatidas deve ser tirada a casca e deixar o tronco arejar, mas protegido do sol (Pfeil 1977).

(Domingues 2012), citando (Morgado 2008), afirma que apesar da madeira de seção circular ter uma menor densidade, devido à presença do lenho juvenil e da maior probabilidade de ter defeitos, esta apresenta propriedades superiores às madeira serrada, devido à não ocorrência de corte nas fibras no processo de transformação, ao ângulo das fibras que é melhor quanto mais paralelo for, e ao KAR (Rácio de área de nós, pela área total da superfície) ser mínimo neste tipo de seções.

### **2.3.3 Abeto**

O abeto é uma árvore da família das Pináceas, que pode ser encontrada em grande parte na América do Norte e Central, Europa, Ásia e Norte de África, principalmente em montanhas. Pode chegar a uma altura entre 10 a 80 metros e a diâmetros do tronco entre 0.5 e 4 metros, em fase adulta. É facilmente distinguido entre as outras árvores da família dos pinheiros pelas agulhas e pinhas diferentes. [5]

### **2.3.4 Pinho bravo**

O pinho bravo, pinheiro-bravo ou *pinus pinaster*, é uma árvore da família das Pináceas, originária da região mediterrânica, mas que também se pode encontrar em países como Bélgica, Reino Unido, Austrália, Nova Zelândia e África do Sul, onde foi introduzida pelo homem. É uma árvore de grande porte que pode alcançar 30 a 40 metros de altura. O seu tronco tem uma casca espessa de cor avermelhada, profundamente fissurada [6].

Em Portugal, o Pinhal de Leiria ou Mata do Rei, que é composto por pinheiro-bravo, foi mandado plantar no século XIII com o objetivo de travar a degradação das dunas e proteger os terrenos agrícolas da ação do vento. Mais tarde, a madeira dos pinheiros foi utilizada para a construção das embarcações que participaram nos Descobrimentos Marítimos, assim como o pez (alcatrão vegetal extraído dos pinheiros) foi utilizado para proteger as embarcações [7].

### 2.3.5 Betão

Segundo a norma NP EN 206-1, o betão é um material formado pela mistura de cimento, agregados grossos e finos e água, com ou sem incorporação de adjuvantes e adições, que desenvolve as suas propriedades por hidratação do cimento.

### 2.3.6 Betão leve

A NP EN 206-1 define betão leve como um betão com massa volúmica, após secagem em estufa, superior ou igual a  $800 \text{ kg/m}^3$  mas não excedendo  $2\,000 \text{ kg/m}^3$ . Este betão é produzido utilizando parcial ou totalmente agregado leve.

Define ainda que agregado leve é um agregado de origem mineral com massa volúmica, após secagem em estufa, menor ou igual que  $2\,000 \text{ kg/m}^3$ , quando determinada de acordo com a EN 1097-6, ou uma baridade, após secagem em estufa, menor ou igual que  $1\,200 \text{ kg/m}^3$ , quando determinada de acordo com a EN 1097-3.

Segundo (Jorge 2005), um betão leve é vulgarmente associado a uma resistência à compressão inferior à de um betão normal, embora seja possível obter betões leves com a mesma resistência à compressão de betões normais, recorrendo geralmente a um maior consumo de ligante, apesar da massa volúmica dos agregados ser o fator mais importante para a resistência à compressão do betão leve.

Ainda segundo o mesmo autor, estando o módulo de elasticidade relacionado com as quantidades relativas de pasta e agregados e seus módulos de elasticidade, o valor do módulo de elasticidade do betão leve é inferior ao do betão normal.

Embora os agregados leves tenham grande porosidade, este pode ser um fator positivo em relação à durabilidade do betão leve, pois influencia positivamente a permeabilidade ao oxigénio e a absorção capilar da água.

O autor conclui ainda que as grandes vantagens do betão leve em relação ao betão normal, para além de possuir um peso próprio inferior, são ter um bom isolamento acústico, que por ser constituído por agregados mais porosos, forma uma barreira acústica contra os sons de precursão. No entanto não é tão bom isolador de sons aéreos, por ser um material menos



denso. Tem também um bom comportamento face à ação do fogo, por ter uma menor condutibilidade térmica, um menor coeficiente de dilatação térmica e por os seus agregados serem estáveis a temperaturas altas, por volta dos 1 200°C.

Cerca de 20% a 30% da cortiça recebida em fábricas, é rejeitada em forma de pó e de pedaços de pequenas dimensões, podendo alguns destes desperdícios ser utilizados na construção, entre outras formas, como agregados na constituição do betão leve (Branco et al. 2006).

Ainda segundo o mesmo estudo, a cortiça é um material orgânico e leve, de elevada estabilidade dimensional e com uma considerável resistência quando sujeita a cargas de compressão. É ainda um material natural e ecológico que não liberta cheiros nem gases nocivos e se mantém inalterável, conservando a sua eficiência ao longo do tempo.

Sendo Portugal um grande produtor de cortiça, é importante encontrar uma utilização para rentabilizar os desperdícios rejeitados pelas fábricas.

Como material de construção, a cortiça possui um excelente comportamento térmico e uma boa capacidade para absorver vibrações, tornando-se uma boa solução como isolante térmico e de absorção acústica (Branco et al. 2006).

Apesar das resistências mecânicas à compressão e à tensão serem inferiores às do betão corrente, a cortiça tem melhor comportamento que outros agregados constituintes do betão leve (introdutores de ar, sem finos, celular ou com espuma), além de ter melhores propriedades térmicas e menor retração.

Deste modo, a cortiça poderá trazer melhorias no comportamento do betão devido a parâmetros como a sua resistência térmica, o seu comportamento acústico segundo cargas de impacto e o aumento de durabilidade sob condições de gelo-degelo. Apesar de diminuir significativamente a resistência mecânica quando se substitui o mesmo volume de areia por cortiça e mais influência terá se se substituir brita por cortiça, para a mesma quantidade de volume.

### **2.3.7 Ligação**

Uma estrutura mista madeira-betão está intrinsecamente dependente do tipo e da forma de ligador que interliga a madeira e o betão. Uma estrutura mista madeira-betão, só é eficiente quando os dois materiais se comportam como um só, agindo em concordância um com o outro, não havendo escorregamento na interface.

O comportamento dos diferentes tipos de ligadores foi estudado por (Dias 2005) salientando-se o facto do comportamento mecânico das ligações coladas e entalhadas ser completamente diferente do das ligações do tipo cavilha. Por um lado as primeiras ligações têm elevada resistência e rigidez e um comportamento quase linear que ocorre até à rotura, sem aparecerem grandes deformações. Por outro lado, as segundas ligações têm uma resistência e rigidez mais baixas, mas possuem grande capacidade de deformação plástica.

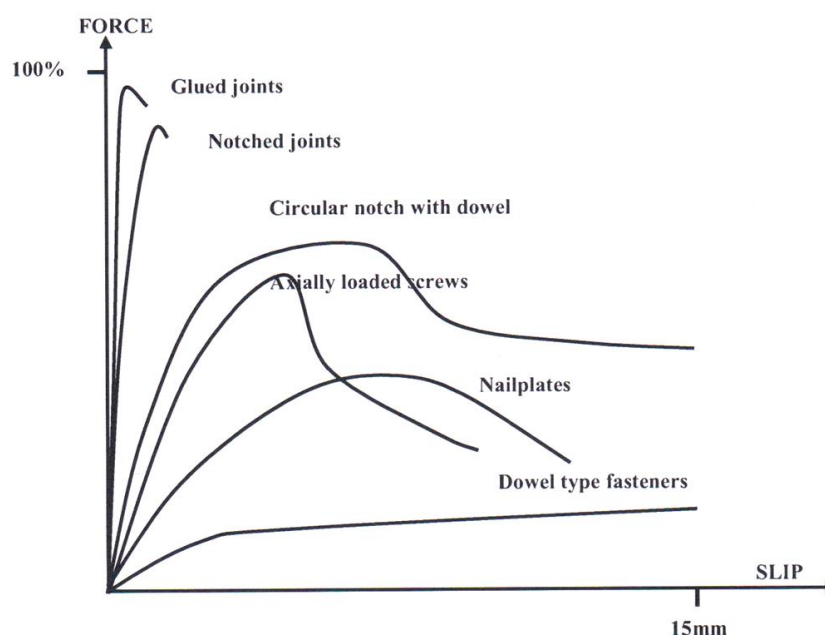


Figura 2.2 – Comportamento de diferentes tipos de ligadores (Dias 2005)

Dias conclui ainda que o comportamento mecânico de estruturas compósitas é frequentemente influenciado pelo módulo de escorregamento da ligação e não pela capacidade de carga da ligação em estados limites últimos. Concluiu ainda que a maior parte das ligações conseguem transmitir esforço transversal da madeira para o betão, embora se possuam elevado módulo de escorregamento (Dias 2005).

Num estudo do comportamento de vários tipos de ligação para tabuleiros mistos de madeira-betão pré-fabricados, verificou-se que é possível a execução de tabuleiros mistos madeira-betão através de elementos pré-fabricados com a laje de betão feita fora do local de montagem e a ligação às vigas de madeira no local. Entre as vantagens associadas estão a redução do custo económico, o aumento da velocidade de construção e a redução da retração do betão (Lukaszewska et al. 2008).

Num estudo sobre o comportamento de vigas mistas madeira-betão com ligação colada no estado limite último, concluiu-se que a ligação deve ser rígida o suficiente para assegurar uma boa eficiência do compósito. Porém, para que a estrutura seja dúctil e permita a plastificação, a ligação não deverá ser demasiado resistente (Ceccotti et al. 2006).

Num piso de madeira para uso doméstico, foi adicionada uma laje de betão leve com 60 mm de altura para reutilizar o piso para uso de escritórios. A laje de betão leve foi ligada às vigas já existentes através de ligadores para formar um piso misto madeira-betão. Através de testes até ao colapso da estrutura. Concluiu-se que a ligação permitiu uma elevada eficácia da estrutura compósita, aproximando-se bastante de uma estrutura inteiramente composta (Fragiacomo 2012).

## 3 MATERIAIS E CONFIGURAÇÃO DOS PROVETES

### 3.1 Introdução

Este trabalho é a continuação de um trabalho anterior, no âmbito do qual foram preparados dois provetes. Nesse trabalho foram seleccionadas as vigas de seção retangular e os toros de madeira, bem como o desenvolvimento e seleção dos betões a utilizar nos provetes.

Foram ainda testados os toros de madeira e as vigas de seção retangular quanto ao seu módulo de elasticidade, densidade da madeira e o teor de água na madeira. O betão foi também ensaiado quanto à sua resistência à compressão e seu módulo de elasticidade.

### 3.2 Madeira

Para a laje mista com vigas de seção retangular foram usadas cinco vigas de lamelado colado, de madeira de abeto de seção 10cm x 20cm com 3.3 metros de comprimento. As propriedades físicas e mecânicas das vigas de seção retangular (GL1, GL2, GL3, GL6 e GL7) que foram determinadas são apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Propriedades físicas e mecânicas das vigas de seção retangular

Viga	$E_{m,o}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (%)
GL 1	12762.6	12732.6	419.88	15.4
GL 2	13731.2	13401.4	429.88	15.2
GL 3	13493.0	12860.3	410.36	14.3
GL 6	12985.7	12511.0	424.16	15.3
GL 7	15010.4	13982.0	425.11	14.8

A classificação da madeira lamelada colada foi feita através da norma EN 1194 e das três propriedades médias do conjunto de amostras de madeira (resistência à flexão, massa volumica e módulo de elasticidade). Neste caso, a classificação não foi feita com exatidão por faltar uma dessas propriedades (resistência à flexão). No entanto assumiu-se que este conjunto pertencia à classe GL28h.

Para a laje mista com toros de seção circular, foram usados sete toros de madeira de pinho bravo (Toro 1, Toro 2, Toro 5, Toro 6, Toro 7, Toro 9 e Toro 12) com 3.3 metros de comprimento. As propriedades físicas e mecânicas dos toros são apresentadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Propriedades físicas e mecânicas dos toros de seção circular

Toro	$E_{m,o}$ (MPa)	$E_{m,g}$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	W (%)	$D_{nominal}$ (mm)	$D_{med}$ (mm)
1	14719.8	16752.1	673.00	20.6	118.0	118.3
2	10128.3	9888.7	622.91	33.5	139.0	133.0
5	14083.8	15784.9	663.53	19.3	130.0	128.5
6	9480.0	10954.3	615.19	50.5	132.0	128.0
7	15928.3	13753.6	545.93	20.0	113.0	115.3
9	11473.8	11164.0	507.34	27.4	122.0	123.0
12	12520.5	13985.2	614.63	22.3	137.8	130.8

Para os toros de madeira maciça a estimativa de classe foi feita segundo a norma EN 338 e as propriedades médias do conjunto de amostras de madeira (resistência à flexão, massa volúmica e módulo de elasticidade local e global). Assim como nas vigas de seção retangular, nos toros também não foi possível concluir, com exatidão, a classe resistente a que pertenciam, por desconhecimento da resistência à flexão dos elementos. No entanto, admitiu-se a classe C30 para este conjunto de toros.

### 3.3 Betão

Para as duas lajes foram considerados dois tipos diferentes de betão. Para a laje com vigas de seção retangular, foi considerado um betão normal fornecido por uma empresa de betão pronto. O betão foi ensaiado em laboratório, tendo sido obtidos os valores da resistência indicados no Quadro 3.3. Estes valores equivalem ao valor médio da resistência à compressão do ensaio dos três cubos pela norma NP EN 206-1.

Para a laje com elementos de madeira de seção circular foi considerado um betão leve constituído por agregados de cortiça. Este betão foi testado no laboratório e foram feitos ensaios de ligação, através do projeto LOG-CORK. Tal como o betão pronto, este betão também foi ensaiado à compressão pelo ensaio de cubos segundo a norma NP EN 206-1. O valor médio da resistência desses ensaios pode ser consultado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Propriedades dos betões

Tipo de Betão	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Betão leve	11.5	14.3
Betão pronto	24.4	31.0

### 3.4 Laje de com elementos de madeira de seção retangular

A laje com elementos de madeira de seção retangular é composta por:

- Cinco vigas de lamelado colado de abeto;
- Um solho de pinho bravo com 2cm de espessura;
- Uma laje de betão com 5cm de espessura;
- Ligadores entre as vigas e a laje de betão;
- Armadura do betão: malhasol.

Tendo em consideração que as vigas centrais da laje são aquelas que irão receber mais carga, optou-se por colocar as vigas com maior módulo de elasticidade global ( $E_{m,g}$ ) no centro da laje e as com o módulo de elasticidade global menor, nos extremos como indica o esquema da Figura 3.1. As vigas foram espaçadas entre si 75cm medidos entre os centros das vigas.

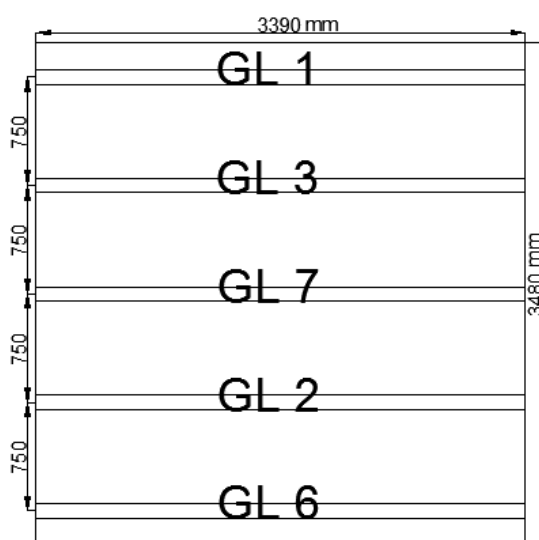


Figura 3.1 - Esquema da laje com elementos de madeira de seção retangular [mm]

A laje de betão tinha uma armadura malhasol com diâmetro  $\Phi 5$  de aço A500 com um espaçamento de 10cm.

Para fazer a ligação madeira-betão, foram colocados ligadores do tipo cavilha com diâmetro  $\Phi 8$  de aço A500 e com um espaçamento de 10 cm. Estes ligadores foram inseridos nas vigas com uma profundidade de 8cm, atravessam o solho e estão embebidos no betão (4cm).

O esquema da seção transversal está pormenorizado na  
Figura 3.2.

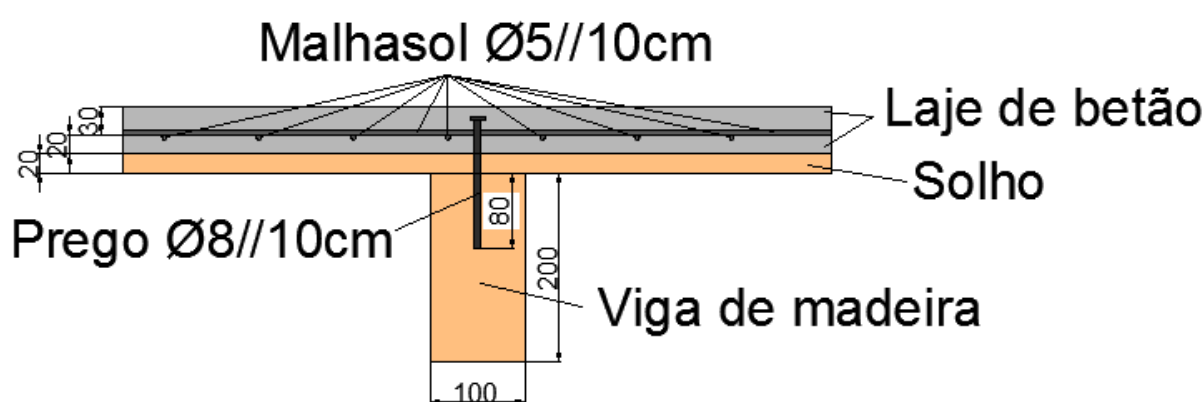


Figura 3.2 - Seção transversal da viga de seção retangular [mm]

### 3.5 Laje de betão leve com elementos de madeira de seção circular

A laje de betão leve com elementos de madeira de seção circular é constituída por:

- Sete toros de seção circular;
- Uma laje de betão leve com aglomerados de cortiça com 5 cm de espessura;
- Ligadores entre os toros e a laje de betão;
- Armadura do betão: malhasol.

O critério de colocação dos toros foi idêntico ao utilizado para a laje com elementos de madeira de seção retangular, ou seja, colocando os toros com maior módulo de elasticidade global ( $E_{m,g}$ ) no centro da laje, e aqueles com menor módulo de elasticidade global nos extremos da laje. Os toros ficaram, assim, os toros organizados em sentido decrescente de módulo de elasticidade do centro da laje em direção às suas extremidades. Esta distribuição é feita para que os toros centrais, que em princípio terão maior resistência, estivessem localizados nas zonas com maior probabilidade de concentração de carga.

O esquema da laje com elementos de madeira de seção circular pode ser consultado na Figura 3.3.

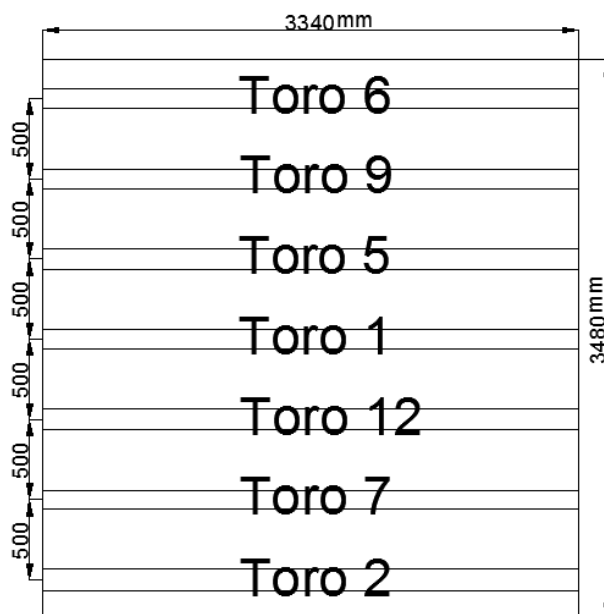


Figura 3.3 - Esquema da laje com elementos de madeira de seção circular [mm]

Os toros foram espaçados entre si 50cm medidos entre os centros dos toros.

Assim como a laje de betão corrente, a laje de betão leve foi munida de uma armadura malhasol com diâmetro  $\Phi 5$  de aço A500 e com um espaçamento de 10cm nas duas direções. Da mesma forma, utilizaram-se ligadores do tipo cavilha com diâmetro  $\Phi 8$  de aço A500 com espaçamento de 10cm na direção dos toros, inseridos no toro com uma profundidade de 8cm e embebidos no betão a 4cm.

O esquema da seção transversal está pormenorizado na Figura 3.4.

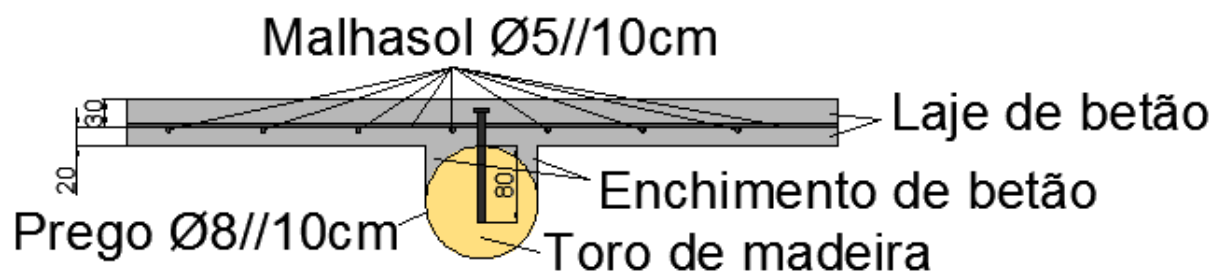


Figura 3.4 - Secção transversal do toro de seção circular [mm]



## 4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Descrição dos ensaios

Para avaliar o comportamento dos tabuleiros quando submetidos a diferentes tipos de carregamento, é importante conhecer as reações de apoio em cada uma das vigas, assim como as flechas verificadas nas várias vigas.

Tanto para a laje com elementos de madeira de seção retangular (Figura 4.1) como para a laje com elementos de madeira de seção circular (Figura 4.2), foram realizados dois ensaios por viga: um com uma carga pontual a meio-vão e outro com uma carga pontual a quarto-de-vão. Totalizando dez carregamentos para a laje com elementos de madeira de seção retangular e catorze ensaios para a laje com elementos de madeira de seção circular.



Figura 4.1 – Pormenores do ensaio da laje com elementos de madeira de seção retangular:  
(a) Esquema de ensaio; (b) Defletómetros de meio-vão; (c) Pormenor do carregamento; (d) Defletómetro de escorregamento e célula de carga (laranja).



Figura 4.2 - Pormenores do ensaio da laje com elementos de madeira de seção circular:  
(a) Defletómetro de escorregamento e célula de carga (laranja); (b) Esquema de ensaio;  
(c) Defletómetros de meio-vão e quarto-de-vão; (d) Pormenor do carregamento.

Para determinar a carga máxima a que uma peça de madeira resiste à flexão, segundo a norma EN 408, o atuador da carga deve ser programado com um movimento constante e a carga máxima, que coincide com o momento da rotura da peça, deverá acontecer entre 180 e 420 segundos após o início do carregamento. Como o objetivo não era alcançar a rotura, optou-se por estabelecer como carga máxima a aplicar, 40% da carga estimada de rotura de cada viga, a qual se procurou que fosse atingida ao cabo de 300 segundos. Estes 40% da carga foram definidos por forma a garantir que as tensões máximas atuantes estivessem dentro do intervalo da relação tensão extensão, no qual a viga ainda se encontra em regime elástico. É importante não ultrapassar deste regime elástico, pois a partir daí, parte das deformações serão irreversíveis, ou seja, quando se proceder à descarga, a viga ficará deformada e com propriedades diferentes das que tinha no início do ensaio.

Para medir os resultados dos ensaios atrás descritos, foi usada a instrumentação, que se pode observar na Figura 4.3 para a laje com elementos de madeira de seção retangular e na Figura 4.4 para a laje com elementos de madeira de seção circular.

- Para medir a carga a que cada viga ou toro foi sujeito, foi colocada uma célula de carga nos seus apoios (C1 a C10 e C1 a C14).
- Para medir o deslocamento vertical da viga e do toro, foram colocados defletómetros verticais a meio-vão (MV1 a MV5 e MV1 a MV7) e a quarto-de-vão (QV1 a QV5e QV1 a QV7). Estes são os locais da viga onde seria possível localizar o deslocamento máximo, por serem os locais onde iria ser aplicada a carga. Apenas se colocaram defletómetros no quarto-de-vão do lado da laje que se aplicaram as cargas.
- Para monitorizar o escorregamento da laje de betão em relação às vigas ou aos toros de madeira, foram colocados defletómetros nas duas extremidades da laje na direção das vigas de madeira (DE1 a DE10 e D1 a D14).
- Foram ainda colocados dois defletómetros em dois cantos da laje como se pode observar na Figura 4.3 (b), para avaliar o eventual levantamento da laje (UP1 e UP2). Apenas foram colocados na laje com elementos de madeira de seção retangular (primeira laje a ser ensaiada), pois os valores obtidos foram muito baixos tendo-se considerado que eram desprezáveis e como tal não existia necessidade de os colocar no ensaio seguinte.

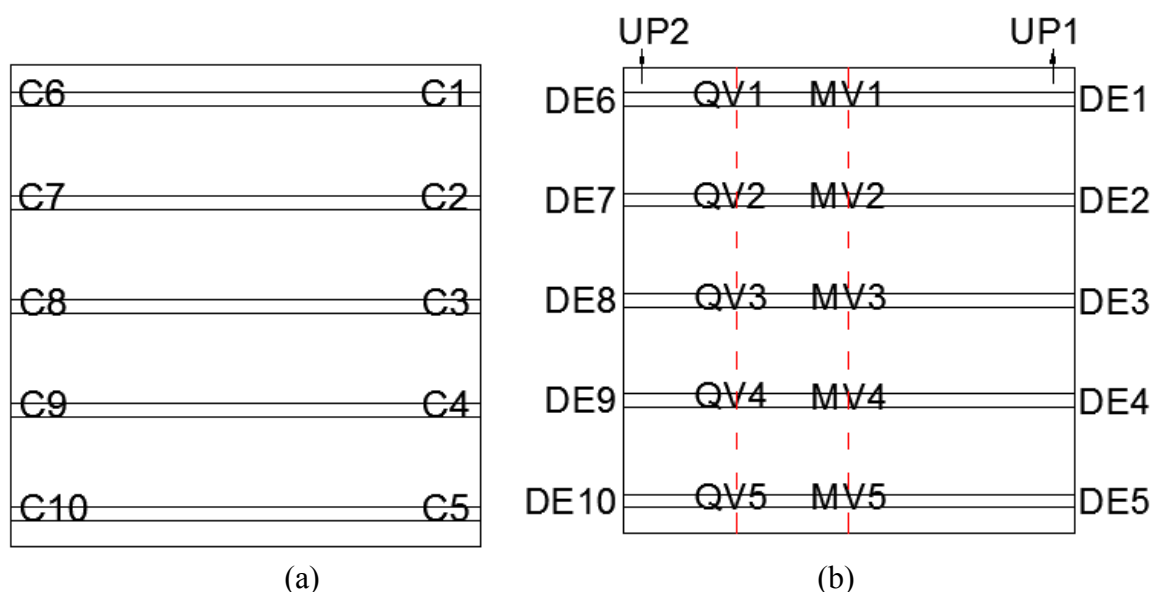


Figura 4.3 - Mapa das células de carga (a) e defletómetros (b) para a laje com elementos de madeira de seção retangular

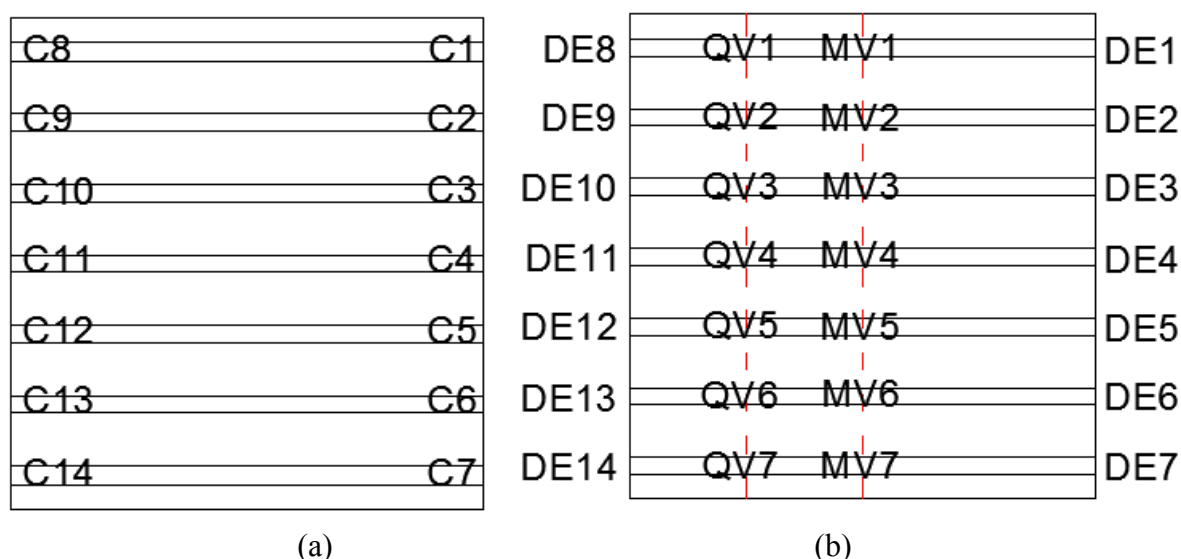


Figura 4.4 - Mapa de células de carga (a) e defletómetros (b) para a laje com elementos de madeira de seção circular

## 4.2 Laje de betão com elementos de madeira de seção retangular

### 4.2.1 Deslocamentos com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico

Antes de proceder ao carregamento da laje foi feito um modelo numérico de forma a calcular a carga de rotura de cada viga para carregamentos a meio-vão e a quarto-de-vão. Através desse modelo foram calculadas as cargas que iriam ser aplicadas nos ensaios, e que tal como referido anteriormente, corresponderiam a 40% da carga estimada de rotura. Essas cargas podem ser consultadas no Quadro 4.1 para os carregamentos a meio-vão e no Quadro 4.2 para os carregamentos a quarto-de-vão.

Quadro 4.1 - Carregamentos a meio-vão

Viga	Percentagem da Carga de Rotura	Carga Atuante [kN]	Velocidade de Carga [kN/s]
GL 1	40%	32	0.107
GL 3	40%	46.8	0.156
GL 7	50%	58	0.193
GL 2	40%	45.6	0.152
GL 6	40%	32.4	0.108

Ao fazer o carregamento na viga GL7, observou-se que no gráfico que relaciona a força com o deslocamento, a reta era sempre linear, o que significa que ainda se poderia ir além dos 40%

da carga de rotura que ainda se continuaria em regime elástico. Sendo assim, optou-se por aplicar uma carga de 50% da carga de rotura nessa viga.

Nos carregamentos a quarto-de-vão pôde-se ir aos 50% da carga de rotura, uma vez que o comportamento ainda se encontrava em regime elástico, pois o gráfico força por deslocamento era bastante linear, não apresentando qualquer curva que significasse a entrada em regime plástico.

Quadro 4.2 - Carregamentos a quarto-de-vão

Nº da Viga	Percentagem da Carga de Rotura	Carga Atuante [kN]	Velocidade de Carga [kN/s]
GL 1	50%	44	0.147
GL 3	50%	65	0.217
GL 7	50%	65	0.217
GL 2	50%	63.5	0.212
GL 6	50%	44	0.147

Os gráficos que relacionam o deslocamento com a força aplicada para a viga com o maior deslocamento para os carregamentos a meio-vão e a quarto-de-vão, vão ser apresentados no 6ANEXO A, mas a título de exemplo, um desses gráficos pode ser observado na Figura 4.5.

Os resultados dos carregamentos das vigas vêm demonstrados em gráficos onde se relaciona a força aplicada no tabuleiro com o maior deslocamento vertical das cinco vigas, que coincidiu sempre com a viga carregada. Assim foi possível estimar a rigidez da viga com maior deslocamento em cada carregamento.

Os valores positivos do deslocamento traduzem a flexão da viga no sentido da força atuada, ou seja, no sentido da força da gravidade.

Cada gráfico corresponde à viga que teve maior deslocamento em cada carregamento. Pois essa será a viga mais condicionante para esse carregamento.

Nos gráficos foi ainda adicionada uma linha de tendência de regressão linear, onde através do declive da equação da reta, se pode estima a sua rigidez da viga.

## Defletómetro MV1

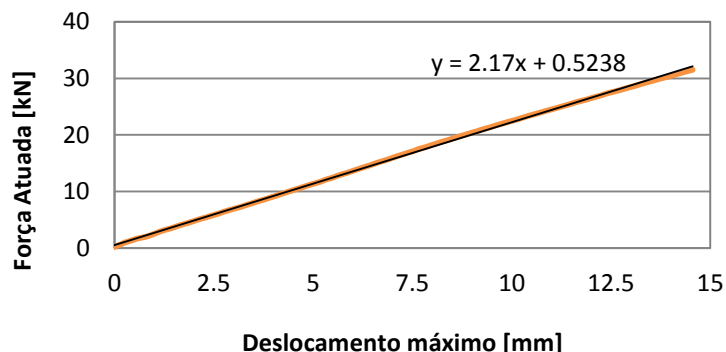


Figura 4.5 - Carregamento a meio-vão na viga GL1

Através dos resultados a meio-vão e a quarto-de-vão foram determinados os deslocamentos máximos e os declives da linha de tendência (rigidez da viga) para cada carregamento, que são apresentados no Quadro 4.3. No Quadro 4.4 pode-se observar os deslocamentos máximos para o ELS segundo o EC5 Parte 1-1.

Quadro 4.3 - Deslocamento e rigidez das vias do carregamento a meio-vão e a quarto-de-vão

	GL 1		GL 3		GL 7		GL 2		GL 6	
	1/2 Vão	1/4 Vão	1/2 Vão	1/4 Vão	1/2 Vão	1/4 Vão	1/2 Vão	1/4 Vão	1/2 Vão	1/4 Vão
<b>Deslocamento Máximo (mm)</b>	14.76	11.70	13.85	10.04	14.24	9.48	10.84	9.57	13.72	10.00
<b>Rigidez da Viga (kN/mm)</b>	2.17	2.98	3.65	5.21	4.08	5.52	4.17	3.35	2.34	3.44

Quadro 4.4 - Deslocamentos máximos segundo o EC5 para o ELS

1/300	1/500
11.3	6.8

Tendo em atenção o dimensionamento aos ELS, onde o limite para o deslocamento máximo a meio-vão estaria entre 1/300 e 1/500 segundo o EC5 Parte 1-1, pode-se verificar que apenas o carregamento sobre a GL2 satisfaz essa verificação. Deste modo, podemos confirmar que para as cargas aplicadas, as deformações não cumprem os limites estabelecidos. Exceto a carga atuante na viga GL2, que corresponde aproximadamente à combinação característica da carga de serviço, pois o seu deslocamento está próximo do limite



Nos carregamentos a quarto-de-vão, o maior deslocamento acontece a quarto-de-vão nas vigas interiores (vigas GL3, GL7, GL2) e encontra-se a meio-vão nas vigas exteriores (vigas GL1 e GL6). Como as vigas internas estão protegidas pelas vigas à sua volta, o que as torna mais estáveis, a maior deformação vai coincidir com o ponto de aplicação da carga, neste caso a quarto-de-vão. As vigas externas por estarem mais isoladas e por possuírem menor módulo de elasticidade global, que significa que são mais flexíveis, faz com que o deslocamento máximo não seja no ponto de aplicação da carga, mas sim no ponto que está mais isolado, ou seja a meio-vão. De realçar que a diferença entre o deslocamento a meio-vão e a quarto-de-vão é mínima, não ultrapassando 1mm.

Em relação ao declive da reta dos gráficos que se relaciona com a rigidez da viga, podemos dizer que a meio-vão, os resultados foram ao encontro do esperado, porque relacionam o maior módulo de elasticidade global à maior inclinação da reta (maior rigidez) e o menor módulo de elasticidade global à reta com menor inclinação (menor rigidez). Ou seja, a ordem crescente do módulo de elasticidade global corresponde à ordem crescente da inclinação da reta. Só para as vigas externas é que a relação não foi correspondida, embora não tenha sido por uma margem muito grande, além disso deve ter sido em atenção que os módulos de elasticidade das duas vigas têm valores próximos.

É possível observar nos gráficos que a linha de tendência de regressão linear se aproxima bastante da função carregamento/deslocamento. Através desta excelente aproximação, pode-se considerar que as vigas têm um comportamento linear

Para carregamentos a quarto-de-vão, os resultados do declive da reta não foram ao encontro do esperado, pois não foi encontrada qualquer relação entre os módulos de elasticidade global e a inclinação da reta.

#### **4.2.2 Repartição das cargas com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico**

Nos ensaios, foram medidas as cargas a que cada viga estava sujeita, através das medições de força em cada uma das células de carga sob os apoios.

Para avaliar a repartição de cargas em cada carregamento, no 6ANEXO B são apresentados os gráficos que relacionam a força medida pelas células de carga com a força aplicada na laje, correspondentes aos carregamentos a meio-vão e a quarto-de-vão. A título de exemplo são apresentadas as curvas demonstrativas na Figura 4.6.

Apresentam-se também os quadros com a carga a que cada célula esteve sujeita desde o início do carregamento até ao carregamento máximo, para os carregamentos a meio-vão e quarto-de-

vão. Nesses quadros é destacada a amarelo a célula onde ocorreu o carregamento máximo (maior valor negativo) e a laranja as células onde ocorreu levantamento da viga (valores positivos). Esses quadros podem encontrar-se no 6ANEXO B sob o gráfico correspondente ao mesmo carregamento, e a título de exemplo, é apresentado o Quadro 4.5.

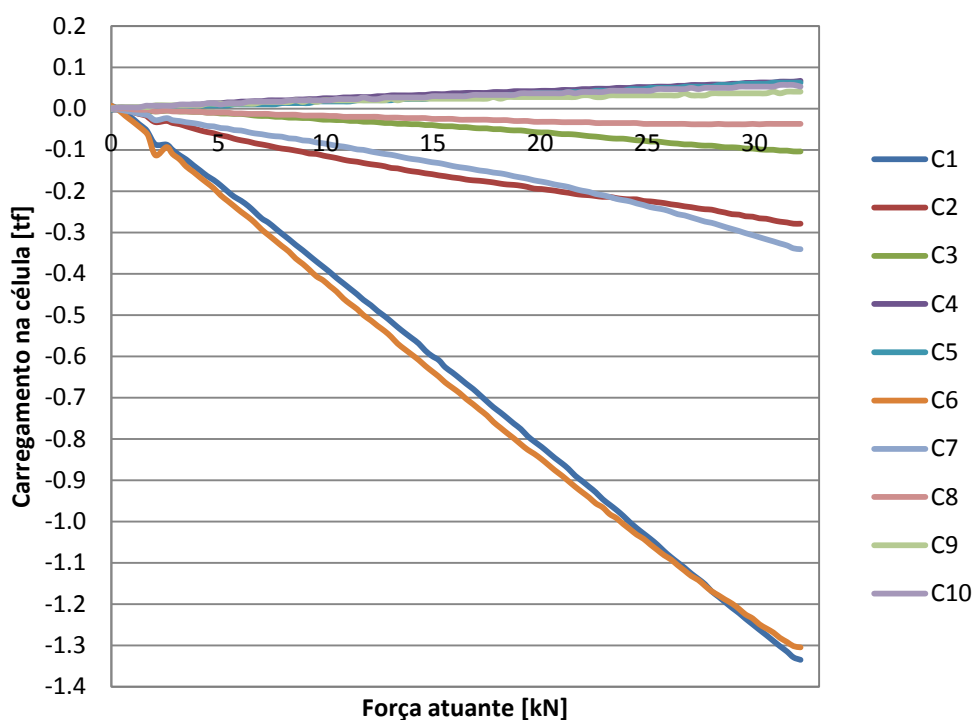


Figura 4.6 - Carregamento a meio-vão na viga GL1

Quadro 4.5 - Carregamento a meio-vão na viga GL1

GL 1					
Células de carga	C1	C2	C3	C4	C5
Varição do carregamento [tf]	-1.342	-0.281	-0.102	0.069	0.066
Células de carga	C6	C7	C8	C9	C10
Varição do carregamento [tf]	-1.312	-0.341	-0.037	0.041	0.053

Embora o carregamento seja a meio-vão, o lado esquerdo da viga (células de carga C6 a C10) recebe sempre mais carregamento que o lado oposto embora com pequena diferença média de 0.1 tf. Isto apenas não se verifica no carregamento da viga GL 1. Tal poderá significar que o lado esquerdo da viga é mais rígido que o lado direito da mesma.



Também para o carregamento a quarto-de-vão da viga que é mais próximo do lado esquerdo da laje, esse lado será ainda mais carregado que o lado direito e com uma diferença média de 1.2tf.

Observou-se levantamento nas vigas da extremidade oposta à da aplicação do carregamento (cargas positivas a cor-de-laranja nas tabelas). À medida que as vigas se tornam mais centrais, o levantamento começa a acontecer nos dois lados extremos da laje.

Apesar de no carregamento a quarto-de-vão o valor da carga nos apoios da viga mais carregada ser maior, o valor de levantamento é menor, mesmo que por vezes, no lado oposto ao carregamento levantem maior número de vigas, quando comparado com o mesmo carregamento a meio-vão.

Através da observação dos gráficos, pode-se concluir que quanto mais centrada na laje for a viga, melhor será a distribuição da carga pelas restantes vigas.

No carregamento a meio-vão, este é distribuído maioritariamente para os dois apoios dessa viga, especialmente nas vigas externas.

No carregamento a quarto-de-vão, este é maioritariamente distribuído para a célula mais próxima do carregamento da viga carregada, principalmente para as vigas externas.

#### **4.2.3 Escorregamento da laje com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico**

No Quadro 4.6 são apresentados os escorregamentos máximos da laje para cada carregamento. Os escorregamentos máximos ocorreram sempre na viga carregada.

Quadro 4.6 - Escorregamento da laje

Escorregamento [mm]		
Viga	1/2 Vão	1/4 Vão
GL1	1.50	1.79
GL3	1.36	1.66
GL7	1.46	1.44
GL2	1.02	1.47
GL6	1.65	1.63

No carregamento a meio-vão, os escorregamentos foram idênticos à direita e à esquerda da laje, enquanto para quarto-de-vão foram maiores junto ao lado mais carregado, como era esperado.

Apesar de no carregamento a quarto-de-vão os resultados serem maiores, o escorregamento continua a ser relativamente pequeno.

#### **4.2.4 Levantamento da laje com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico**

Para os carregamentos a meio-vão e a quarto-de-vão apresentam-se os valores do levantamento da laje no Quadro 4.7 e no Quadro 4.8, respetivamente.

Os valores positivos representam que a extremidade da laje onde estão colocados os defletómetros levantou da sua cota inicial e os valores negativos que a extremidade da laje baixou.

Seria de esperar que os valores do levantamento fossem negativos no carregamento da viga GL1, pois é junto a esta viga que se encontram os defletómetros que medem o levantamento da laje e sendo essa viga a carregada, o levantamento é negativo. Esperava-se em seguida que os valores comesçassem a aumentar, pois o ponto de aplicação da carga começaria a afastar-se dos defletómetros, chegando à viga GL6 com o maior levantamento de entre as cinco vigas.

Para o carregamento a meio-vão esperavam-se valores simétricos para UP2 e UP1.

Para o carregamento a quarto de vão esperavam-se valores maiores em módulo para o defletómetro UP2, pois é mais próximo dele que acontece o carregamento a quarto-de-vão.

Quadro 4.7 - Levantamento da laje a meio-vão

Carregamento a meio-vão [mm]		
Viga	UP 2	UP 1
GL1	-1.95	-1.28
GL3	0.06	0.32
GL7	-	-
GL2	0.55	1.70
GL6	0.17	0.15

Quadro 4.8 - Levantamento da laje a quarto-de-vão

Carregamento a quarto-de-vão [mm]		
Viga	UP 2	UP 1
GL1	-3.61	-0.72
GL3	0.59	-0.07
GL7	0.70	0.24
GL2	0.19	0.29
GL6	0.06	0.04

No carregamento a meio-vão houve um erro de medição durante o carregamento da viga GL7, onde por razão não conhecida não foram transmitidos os resultados.

Depois de analisados os quadros, verifica-se que para o carregamento a meio-vão da primeira viga houve um abaixamento da laje, seguido de um levantamento no carregamento da segunda viga, que aumenta até ao carregamento da quarta viga. Já no carregamento da quinta viga, há um abaixamento em relação ao carregamento da quarta viga, pelo que se pode concluir que a deformação da laje no sentido perpendicular às vigas tem uma concavidade virada para baixo.

Os resultados de UP2 e UP1 são aproximadamente simétricos para o carregamento a meio-vão, como se tinha esperado.

Para o carregamento a quarto-de-vão a análise é a mesma, mas com maior levantamento em módulo do lado onde a viga é carregada no defletómetro UP2.

### **4.3 Laje de betão leve com elementos de madeira de seção circular**

#### **4.3.1 Deslocamentos com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico**

Assim como para o tabuleiro anterior, também para este foram calculadas as cargas de rotura para cada toro quando sujeitos a carregamentos a meio-vão e a quarto-de-vão. Dessas cargas, foram obtidas as cargas a aplicar que deveriam equivaler a 40% da carga estimada de rotura. Após o primeiro ensaio, e verificando que a curva que relaciona a força aplicada com o deslocamento, já não era linear, concluiu-se que para a carga aplicada o toro já não se encontrava em regime elástico. Tendo em consideração que o objetivo não era entrar em regime plástico, mas permanecer em regime elástico, optou-se por estabelecer como carga máxima a aplicar seria igual a 30% da carga estimada de rotura, mas mantendo a velocidade

de carregamento, que pretendia atingir os 40% da carga estimada de rotura ao fim de cinco minutos.

Essas cargas podem ser consultadas no Quadro 4.9 para os carregamentos a meio-vão e no Quadro 4.10 para os carregamentos a quarto-de-vão.

Quadro 4.9 - Carregamentos a meio-vão

Toro	40% da carga de rotura [kN]	Carga Atuada [kN]	Percentagem da Carga de Rotura	Velocidade de Carga [kN/s]
6	32.70	24.87	30%	0.109
9	44.70	29.72	27%	0.149
5	39.00	39.45	40%	0.130
1	38.10	38.58	40%	0.127
12	42.60	32.39	30%	0.142
7	37.80	29.00	31%	0.126
2	35.40	25.97	29%	0.118

Quadro 4.10 - Carregamentos a quarto-de-vão

Toro	40% da carga de rotura [kN]	Carga Atuada [kN]	Percentagem da Carga de Rotura	Velocidade de Carga [kN/s]
6	35.70	23.88	27%	0.119
9	49.80	31.20	25%	0.166
5	43.20	32.87	30%	0.144
1	41.40	31.48	30%	0.138
12	46.80	35.55	30%	0.156
7	42.30	29.22	28%	0.141
2	38.70	29.36	30%	0.129

Os gráficos dos deslocamentos em relação à força aplicada para o toro com o maior deslocamento são apresentados no 6ANEXO C, mas a título de exemplo é apresentada a **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Os resultados dos carregamentos das vigas mostram-se em gráficos onde se relaciona a força aplicada no tabuleiro com o maior deslocamento vertical das cinco vigas, de forma a estimar a rigidez da viga com maior deformação para cada carregamento.

Cada figura corresponde ao toro que teve maior deslocamento em cada carregamento. Pois será esse o toro mais condicionante para o referido carregamento.

Nos gráficos com carregamento a meio-vão foi reduzida a carga aplicada, pois esta já entrava no patamar plástico. Caso não se tivesse reduzido a carga nos gráficos, os resultados da rigidez elástica seriam afetados por alguma não linearidade que acabou por se observar para as cargas aplicadas. No Quadro 4.11 podem-se observar as cargas máximas para regime linear dos toros sujeitos ao carregamento a meio-vão e a respetiva percentagem relativamente à carga de rotura.

Quadro 4.11 - Cargas máximas dos toros em regime linear com carga a meio-vão

Toro	Máximo de carga nos gráficos	Percentagem da Carga de Rotura
6	20.06	22%
9	10.7	9%
5	20.2	19%
1	24.87	24%
12	25.01	21%
7	19.95	19%
2	15.11	16%

### Defletómetro MV1

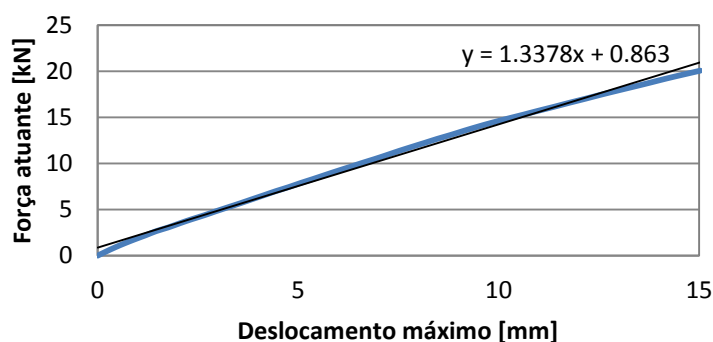


Figura 4.7 - Carregamento a meio-vão no Toro 6

Através dos resultados a meio-vão e a quarto-de-vão foram retirados os deslocamentos máximos e o declive da linha de tendência (rigidez o toro) para cada carregamento sendo construído o Quadro 4.12 e Quadro 4.13. No Quadro 4.14 pode-se observar os deslocamentos máximos para o ELS segundo o EC5 Parte 1-1.

Quadro 4.12 - Deslocamento e rigidez dos carregamentos a meio-vão e a quarto-de-vão

	Toro 6		Toro 9		Toro 5		Toro 1	
	1/2 Vão	1/4 Vão	1/2 Vão	1/4 Vão	1/2 Vão	1/4 Vão	1/2 Vão	1/4 Vão
<b>Deslocamento Máximo (mm)</b>	15.03	13.85	4.06	14.77	7.42	13.51	8.54	13.44
<b>Rigidez do Toro (kN/mm)</b>	1.34	1.69	2.48	2.14	2.71	2.42	2.89	2.38

Quadro 4.13 - Deslocamento e rigidez dos carregamentos a meio-vão e a quarto-de-vão  
(continuação)

	Toro 12		Toro 7		Toro 2	
	1/2 Vão	1/4 Vão	1/2 Vão	1/4 Vão	1/2 Vão	1/4 Vão
<b>Deslocamento Máximo (mm)</b>	11.00	14.06	9.40	13.67	11.34	19.48
<b>Rigidez do Toro (kN/mm)</b>	2.23	2.57	2.08	1.83	1.34	1.52

Quadro 4.14 - Deslocamentos máximos segundo o EC5 para os ELS

l/300	l/500
11.1	6.7

Para o ELS, onde o limite para o deslocamento máximo a meio-vão estaria entre l/300 e l/500 segundo o EC5 Parte 1-1, podemos verificar que apenas o Toro 6 e o Toro 2, este último toro por uma diferença pouco relevante, não verificam esta segurança. No entanto, podemos confirmar que as cargas de todos os toros, menos a do Toro 6, presentes do Quadro 4.11 correspondem aproximadamente à combinação característica da carga de serviço, estando o seu deslocamento máximo dentro do limite estabelecido.

Os deslocamentos a meio-vão são menores que os deslocamentos a quarto-de-vão, porque a percentagem de carga aplicada a meio-vão também é menor que a percentagem de carga aplicada a quarto-de-vão.

Nos carregamentos a quarto-de-vão, o maior deslocamento acontece sempre no toro carregado e a quarto-de-vão, menos para o Toro 6 que o deslocamento máximo acontece a meio-vão. Tal como foi explicado no piso anterior, este acontecimento aparece nas vigas com módulo de

elasticidade global baixo e principalmente nas vigas externas, pois estão menos apoiadas que as vigas internas, que torna as vigas flexíveis mais desprotegidas.

Em relação ao declive da linha de tendência do gráfico, que se relaciona com a rigidez da viga, podemos dizer que a meio-vão, tal como no tabuleiro anterior, os resultados foram bastante próximos do esperado, pois relacionam o maior módulo de elasticidade global com o maior declive da reta. Só o Toro 9 não se encontra na ordem correta, mas por excesso de declive da reta e não por defeito, o que é favorável na análise.

Assim como no piso anterior, os resultados do declive da reta para o carregamento a quarto-de-vão não coincidiram com o esperado, pois não foi encontrada qualquer relação entre os módulos de elasticidade global e a inclinação da reta.

Através da linha de tendência de regressão linear dos gráficos, é possível observar que a linha de tendência se aproxima bastante da função carregamento/deslocamento. Não tão perfeita como no piso anterior, mas ainda com uma boa linearidade, mesmo que para cargas abaixo do esperado através do modelo.

#### **4.3.2 Repartição das cargas com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico**

Assim como no tabuleiro anterior, também neste se vão apresentar as cargas a que cada toro esteve sujeito quando aplicadas as cargas a meio-vão e a quarto-de-vão, através dos resultados traduzidos pelas células de carga colocadas nas extremidades dos toros, servidas como apoios.

Para avaliar esse carregamento, no 6ANEXO D são apresentados figuras dos carregamentos a meio-vão e a quarto-de-vão, com a variação do carregamento a que cada célula esteve sujeita, à medida que a carga era aumentava. Como exemplo está representado a baixo o Figura 4.1.

Também são apresentados os quadros suplementares com a carga líquida a que cada célula esteve sujeita desde o início do carregamento até ao carregamento máximo para os carregamentos a meio-vão e a quarto-de-vão, para uma melhor compreensão dos gráficos. Nesses quadros está amarelo a célula onde ocorreu o carregamento máximo (maior valor negativo) e a laranja as células onde ocorreu levantamento da viga (valores positivos). Por baixo do gráfico correspondente, foi colocado o Quadro 4.15 como exemplo.

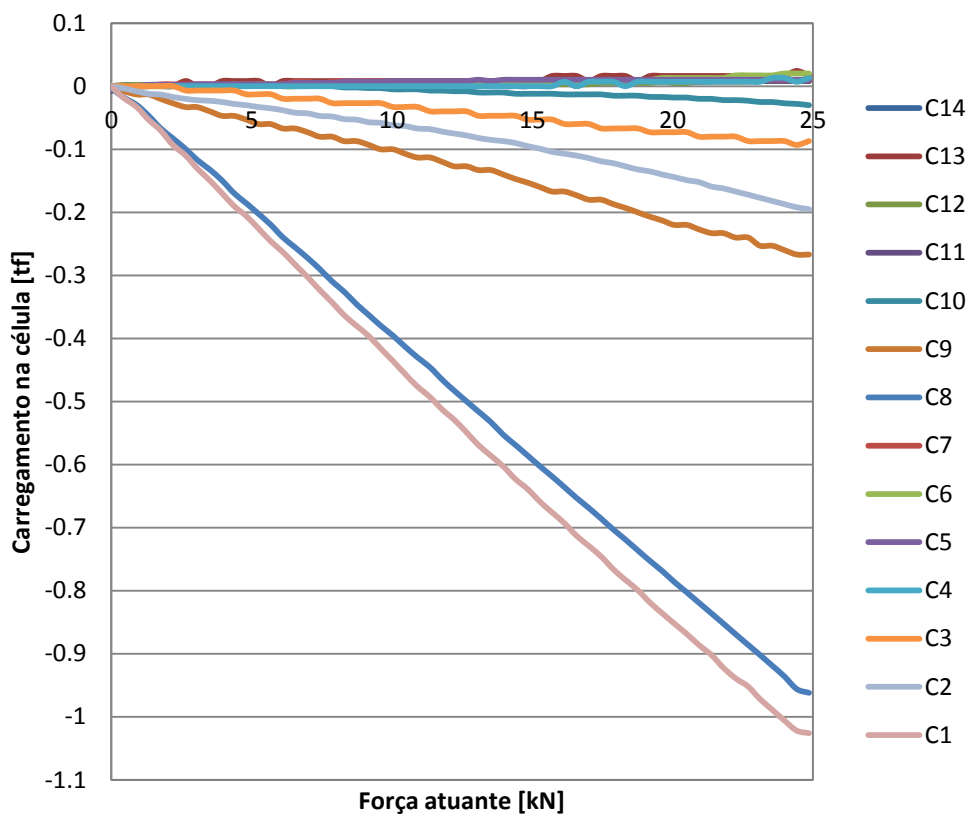


Figura 4.1 - Carregamento a meio-vão no Toro 6

Quadro 4.15 - Carregamento a meio-vão no Toro 6

Toro 6							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Variação do carregamento [tf]	0.008	0.016	0.008	0.016	-0.03	-0.267	-0.959
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Variação do carregamento [tf]	0.01	0.02	0.01	0.013	-0.087	-0.195	-1.026

A análise feita para este piso é bastante semelhante à análise feita para o piso anterior.

Ao contrário do tabuleiro anterior onde a carga se distribuía mais para o lado esquerdo, neste tabuleiro as cargas são distribuídas mais equilibradamente para ambos lados, notando que a carga máxima tanto se localiza numa célula de carga situada à esquerda como numa célula de carga situada à direita.



Observa-se levantamento da laje nos toros opostos ao carregamento (cargas positivas a cor-de-laranja nas tabelas). À medida que o toro se centralizava na laje, começa a haver levantamento em ambos os toros de extremidade.

Quando o carregamento é feito no quarto-de-vão, o lado esquerdo é sempre mais carregado que o lado direito, pois o carregamento está mais próximo do lado esquerdo.

Observa-se que quanto mais centrado na laje for o toro, melhor será a distribuição das cargas pelos restantes toros.

No carregamento a quarto-de-vão, este é maioritariamente distribuído para a célula mais próxima do carregamento do toro carregado, principalmente para os toros externos, embora para os toros internos com já foi dito atrás, a distribuição seja um pouco mais uniforme.

Comparando as curvas de distribuição do carregamento deste tabuleiro com o tabuleiro anterior, podemos observar que existe uma maior linearidade no tabuleiro anterior.

### 4.3.3 Escorregamento da laje com carregamento pontual a meio-vão e quarto-de-vão em regime elástico

O valor dos escorregamentos traduz o afastamento da laje das vigas.

No Quadro 4.16 apresentam-se os escorregamentos máximos da laje para cada carregamento. Esses escorregamentos máximos ocorreram sempre no toro carregado.

Quadro 4.16 - Escorregamento da laje

Escorregamento [mm]		
Toro	1/2 Vão	1/4 Vão
6	0.98	1.40
9	1.63	1.35
5	1.07	1.36
1	1.17	1.35
12	0.71	1.43
7	0.88	1.66
2	1.56	2.15

No carregamento a meio-vão, os escorregamentos foram idênticos à direita e à esquerda da laje, enquanto para quarto-de-vão fossem maiores junto ao lado mais carregado.

Da mesma forma que aconteceu no tabuleiro anterior, apesar de no carregamento a quarto-de-vão os resultados serem maiores, o escorregamento continua a ser relativamente pequeno.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Através deste trabalho foi possível concluir que em ambos os tabuleiros o escorregamento entre os dois materiais não foi relevante. Pode-se admitir que os dois materiais funcionaram em conjunto, contribuindo para a estrutura tivesse o comportamento de um compósito.

Houve uma maior linearidade nos gráficos que relacionam força-deslocamento na laje com elementos de madeira de seção retangular do que na laje com elementos de madeira de seção circular.

Houve também uma maior linearidade nos gráficos de distribuição de carga pelos apoios das vigas na laje com elementos de seção retangular do que na outra.

Em ambas as lajes, o carregamento é melhor distribuído quando aplicado nas vigas centrais, do que nas vigas externas.

Apesar de uma laje ter mais vigas que outra, o carregamento concentra-se principalmente em três vigas, na viga carregada e nas duas vigas adjacente a ela, independentemente do número total das vigas que constituem a laje.

Para idênticos módulos de elasticidade global médios das vigas nos dois tabuleiros, a laje com elementos de madeira de seção retangular tem uma capacidade de carga muito maior em valor absoluto em fase elástica que a laje com elementos de madeira de seção circular, principalmente no carregamento a meio-vão.

Como trabalhos futuros, seria interessante estudar isoladamente as vigas compõem as lajes, através de ensaios destrutivos e não destrutivos, efetuando uma comparação dos resultados obtidos nos ensaios com os resultados estimados com base nos modelos de dimensionamento regulamentados no Eurocódigo 5.

Seria também interessante estudar um caso idêntico ao estudado, com o intuito de comparar o comportamento dos materiais, mantendo o tipo de laje e alternando o material das vigas e o inverso. Exemplos:

**Erro! A origem da referência não foi encontrada.** CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

- Comparar duas lajes de betão normal, uma com vigas de lamelado colado e outra com vigas de madeira de seção circular
- Comparar duas lajes com vigas de lamelado colado, uma com laje de betão normal e outra com betão leve
- Comparar duas lajes com vigas de madeira de seção circular, uma com uma laje de betão normal e outra com uma laje de betão leve.

Através destes trabalhos, seria possível definir os materiais do tabuleiro ideal através do melhor comportamento mecânico, considerando também a relação custo-benefício.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Branco, F. G., Reis, M. L. B. e Tadeu, A. (2006). "Utilização da Cortiça como Agregado em Betões" Encontro Nacional sobre Qualidade e Inovação na Construção, Lisboa, Portugal.

Ceccotti, A. (2002). "Composite concrete–timber structures." *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3).

Ceccotti, A., Fragiaco, M. e Giordano, S. (2006). "Behavior of a Timber-Concrete Composite Beam with Glued Connection at Strength Limit State" 9th World Conference on Timber Engineering, Portland, OR, USA.

CEN. EN 338. Structural timber – Strength classes. 2003.

CEN. EN 408. Timber Structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. 2012.

CEN. EN 1995. Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. 2004.

Dias, A. M. P. G. (2005). "Mechanical behavior of timber-concrete joints". Technische Universiteit Delf.

Dias, A. M. P. G. (2012). "Estruturas de Madeira". Apontamentos de apoio 2012/2013.

Domingues, J. (2012). "Uso de soluções mistas Madeira-Betão leve para reabilitação e reforço de pavimentos". Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

Frangiaco, M. (2012). "Experimental behaviour of a full-scale timber-concrete composite floor with mechanical connectors." *RILEM(Materials and Structures)*.

Gutkowski, R., Brown, K., Shigidi, A. e Natterer, J. (2007). "Laboratory tests of composite wood–concrete beams." *ELSEVIER(Construction and Building Materials)*.

Holschemacher, K., Klotz, S. e Weibe, D. (2002). "Application of steel fibre reinforced concrete for timber-concrete composite constructions." LACER, 7, 161-170.

IPQ. NP EN 206-1. Betão. Parte 1: Especificação, desempenho , produção e conformidade. 2005.

Jorge, L. (2005). "Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves". Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

Lukaszewska, E., Johnsson, H. e Fragiaco, M. (2008). "Performance of connections for prefabricated timber-concrete composite floors." RILEM(Materials and Structures).

Morgado, T. (2008). "Aplicação estrutural da madeira de secção circular de Pinheiro Bravo". Departamento de Engenharia Civil.

Natterer, J., Hamm, J. e Favre, P. (1996). "Composite wood-concrete floors for multi-story buildings." Int. Wood Engineering Conf., Vol. 3, Nova Orleães, 431-435.

Pfeil, W. (1977). "Estruturas de Madeira". Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro.

Yeoh, D., Fragiaco, M., Franceschi, M. D. e Boon, K. H. (2011). "State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review." Journal of Structural Engineering.

[1] <http://www.flickr.com/photos/arihaaga/4582250020/>

[2] <http://www.imowood.pt/madeira-lamelada/caracteristicas/>

[3] <http://www.imowood.pt/madeira-lamelada/caracteristicas/>

[4] <http://portaldamadeira.blogspot.pt/2010/03/madeira-lamelada-colada-mlc.html>

[5] <https://en.wikipedia.org/wiki/Fir>

[6] <http://naturlink.sapo.pt/article.aspx?menuid=55&cid=3631&bl=1>

[7] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Pinhal\\_de\\_Leiria](http://pt.wikipedia.org/wiki/Pinhal_de_Leiria)

## ANEXO A Deslocamentos na laje de betão pronto com elementos de madeira de seção retangular

### Defletómetro MV2

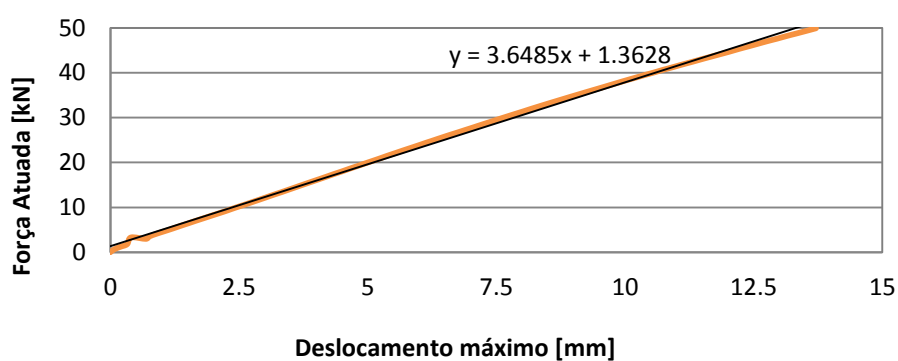


Figura A.1 - Carregamento a meio-vão na viga GL3

### Defletómetro MV3

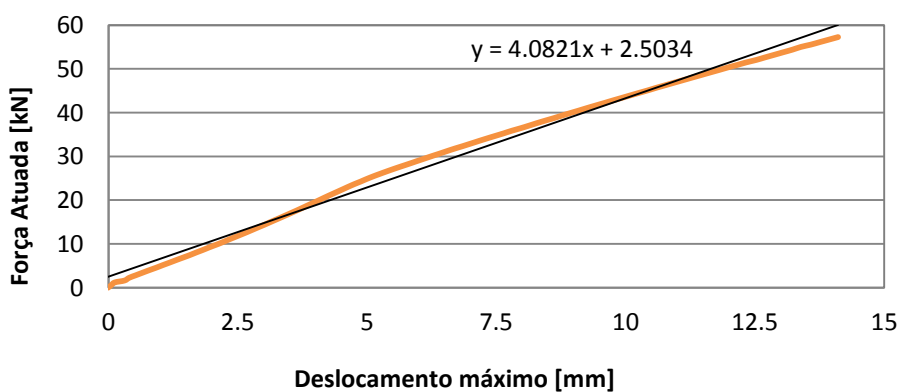


Figura A.2 - Carregamento a meio-vão na viga GL7

### Defletómetro MV4

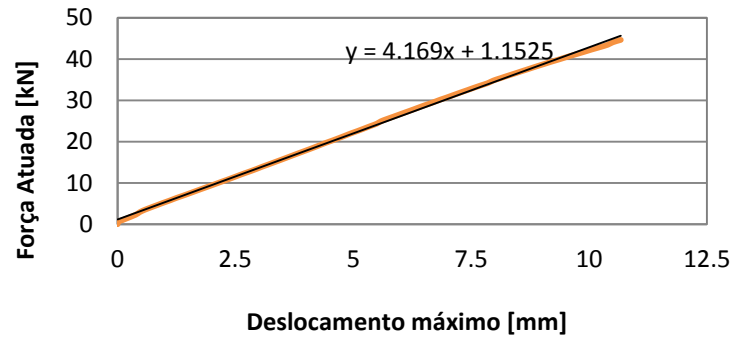


Figura A.3 - Carregamento a meio-vão na viga GL2

### Defletómetro MV5

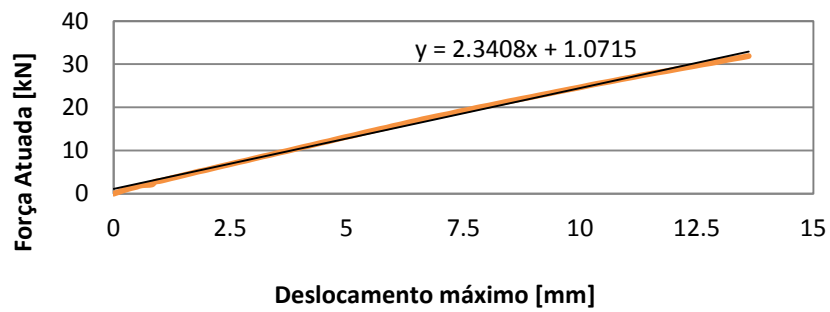


Figura 6.4 - Carregamento a meio-vão na viga GL6

### Defletómetro MV1

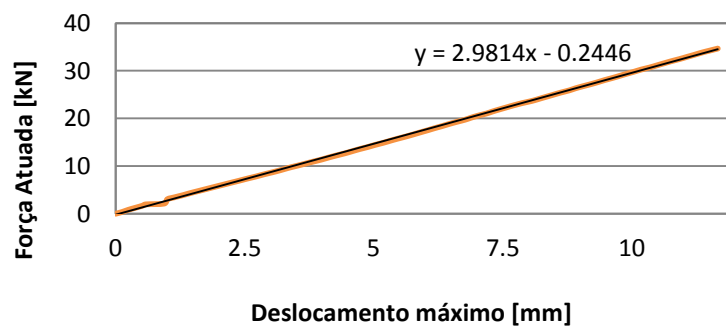


Figura 6.5 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL1



### Defletómetro QV2

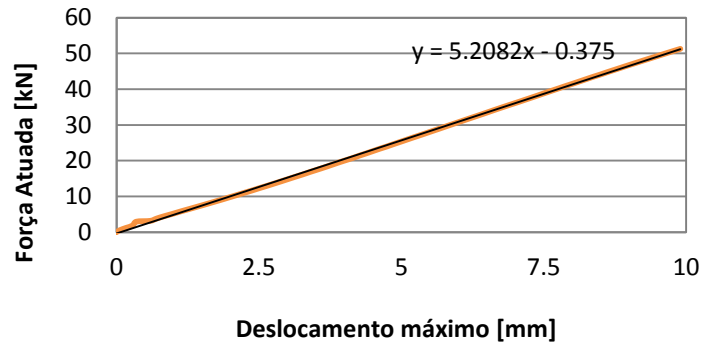


Figura 6.6 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL3

### Defletómetro QV3

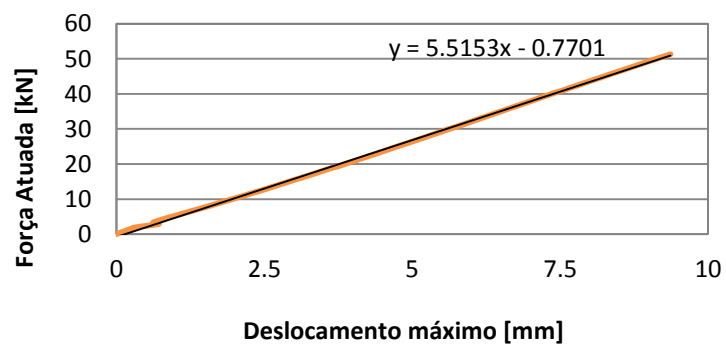


Figura 6.7 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL7

### Defletómetro QV4

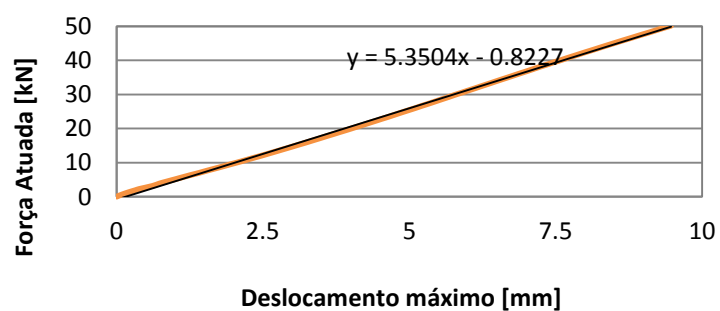


Figura 6.8 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL2

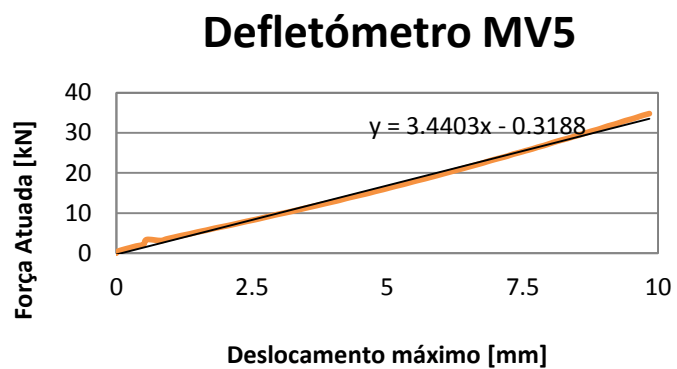


Figura 6.9 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL6

## ANEXO B Carregamentos na laje de betão pronto com elementos de madeira de seção retangular

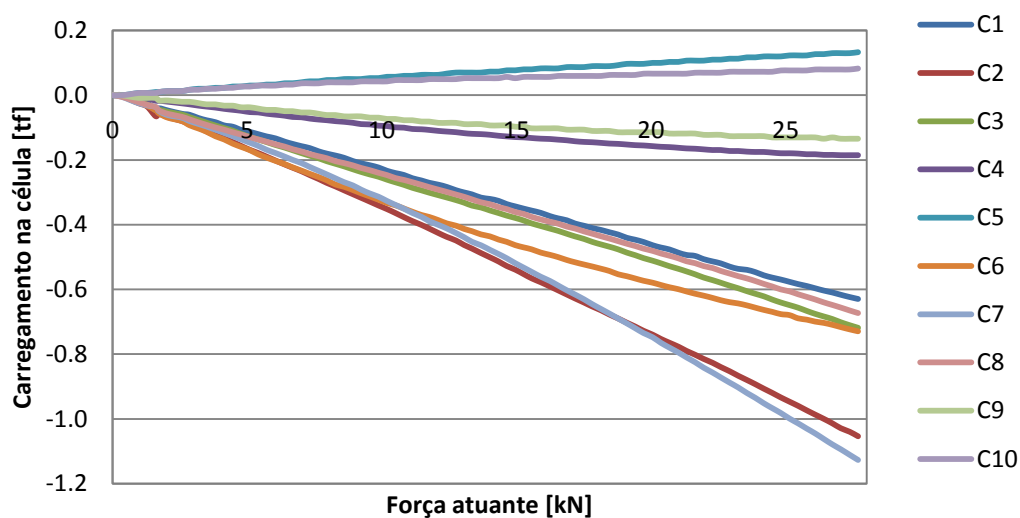


Figura B.1 - Carregamento a meio-vão na viga GL3

Quadro B.1 - Carregamento a meio-vão na viga GL3

GL 3					
Células de carga	C1	C2	C3	C4	C5
Varição do carregamento [tf]	-0.629	-1.054	-0.718	-0.185	0.133
Células de carga	C6	C7	C8	C9	C10
Varição do carregamento [tf]	-0.729	-1.127	-0.673	-0.134	0.083

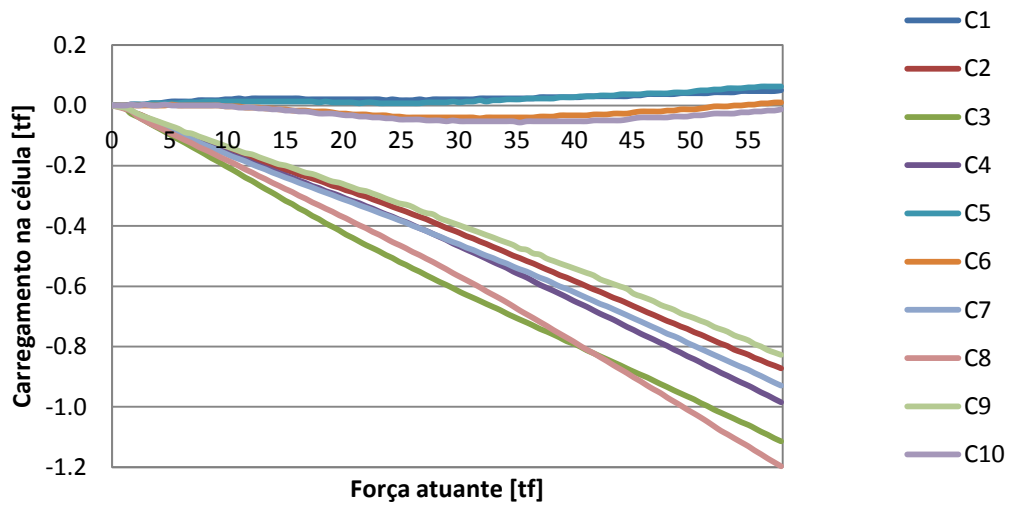


Figura 6.10 - Carregamento a meio-vão na viga GL7

Quadro 6.2 - Carregamento a meio-vão na viga GL7

GL 7					
Células de carga	C1	C2	C3	C4	C5
Varição do carregamento [tf]	0.05	-0.872	-1.116	-0.985	0.063
Células de carga	C6	C7	C8	C9	C10
Varição do carregamento [tf]	0.01	-0.931	-1.197	-0.828	-0.013

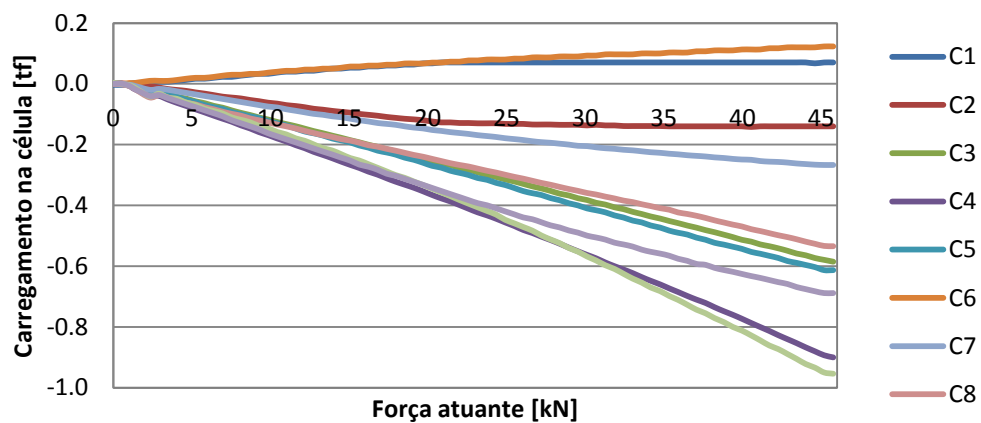


Figura 6.3 - Carregamento a meio-vão na viga GL2

Quadro 6.3 - Carregamento a meio-vão na viga GL2

GL 2					
Células de carga	C1	C2	C3	C4	C5
Varição do carregamento [tf]	0.073	-0.142	-0.585	-0.9	-0.613
Células de carga	C6	C7	C8	C9	C10
Varição do carregamento [tf]	0.123	-0.267	-0.534	-0.958	-0.689

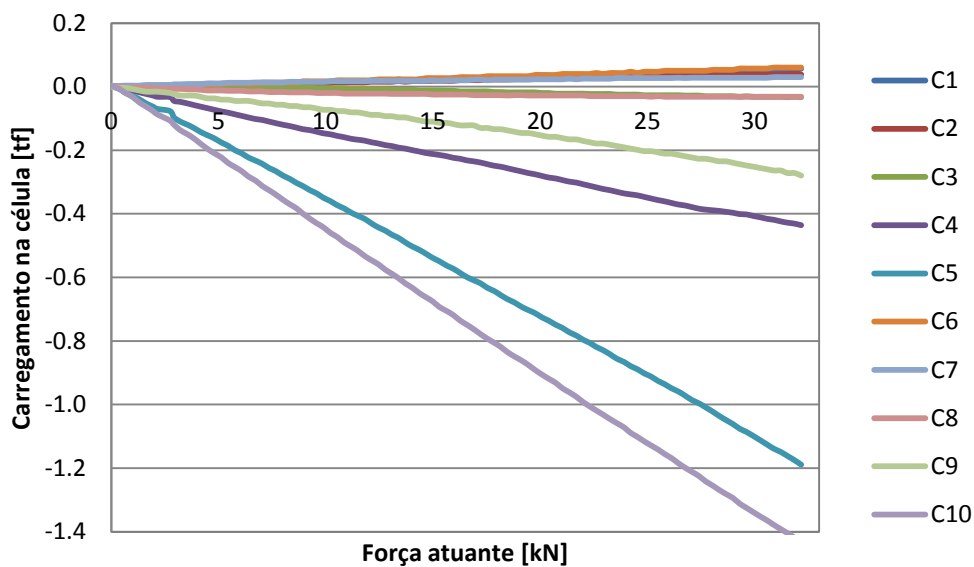


Figura 6.4 - Carregamento a meio-vão na viga GL6

Quadro 6.4 - Carregamento a meio-vão na viga GL6

GL 6					
Células de carga	C1	C2	C3	C4	C5
Varição do carregamento [tf]	0.057	0.038	-0.033	-0.436	-1.189
Células de carga	C6	C7	C8	C9	C10
Varição do carregamento [tf]	0.06	0.028	-0.032	-0.28	-1.435

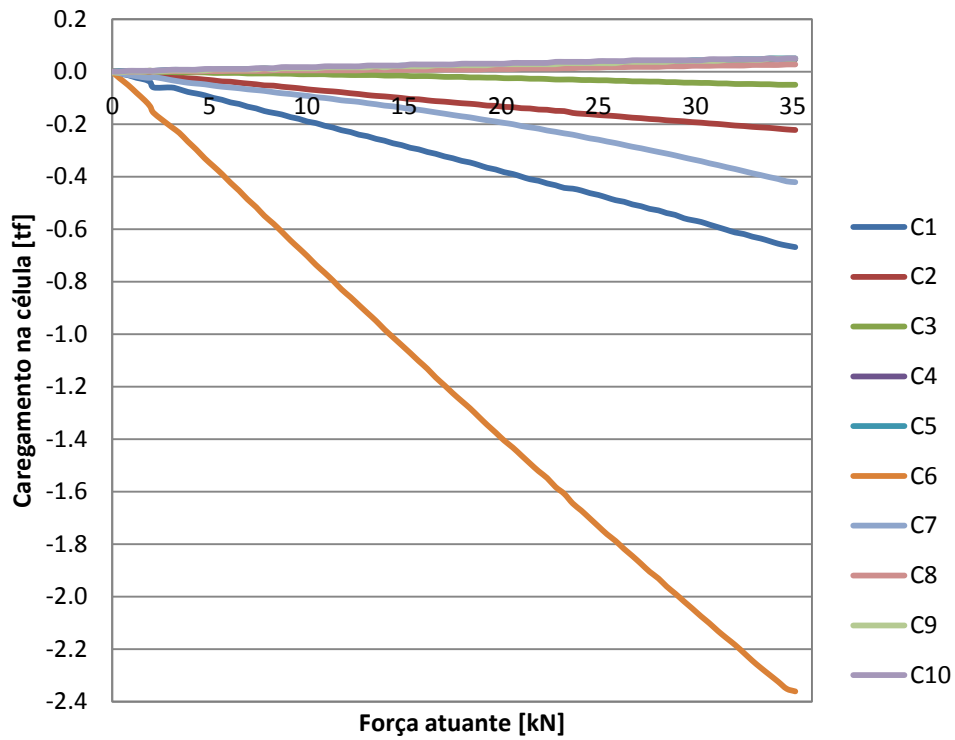


Figura 6.5 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL1

Quadro 6.5 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL1

GL 1					
Células de carga	C1	C2	C3	C4	C5
Varição do carregamento [tf]	-0.669	-0.222	-0.052	0.047	0.05
Células de carga	C6	C7	C8	C9	C10
Varição do carregamento [tf]	-2.361	-0.421	0.027	0.053	0.05

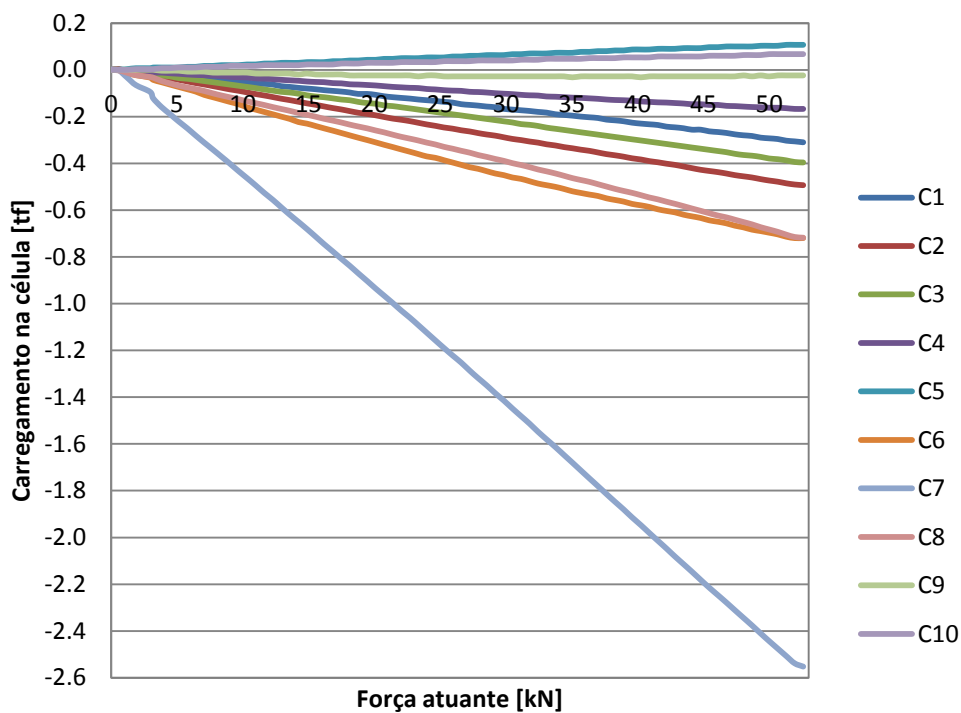


Figura 6.6 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL3

Quadro 6.6 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL3

GL 3					
Células de carga	C1	C2	C3	C4	C5
Variação do carregamento [tf]	-0.31	-0.494	-0.396	-0.167	0.107
Células de carga	C6	C7	C8	C9	C10
Variação do carregamento [tf]	-0.719	-2.554	-0.718	-0.024	0.067



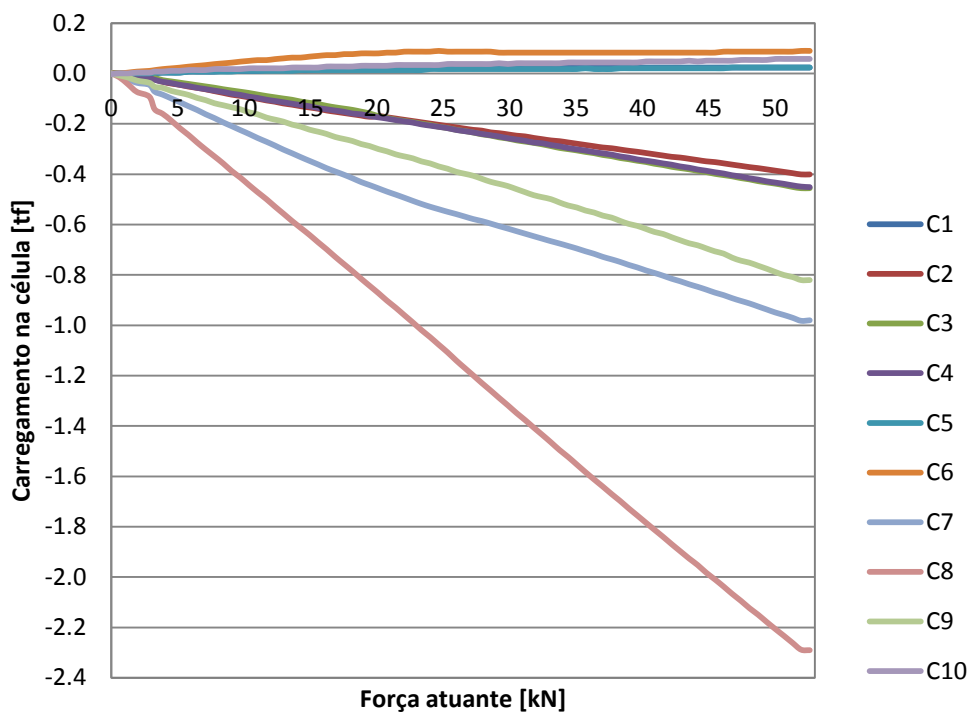


Figura 6.7 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL7

Quadro 6.7 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL7

GL 7					
Células de carga	C1	C2	C3	C4	C5
Varição do carregamento [tf]	0.023	-0.401	-0.458	-0.451	0.023
Células de carga	C6	C7	C8	C9	C10
Varição do carregamento [tf]	0.09	-0.98	-2.29	-0.82	0.06

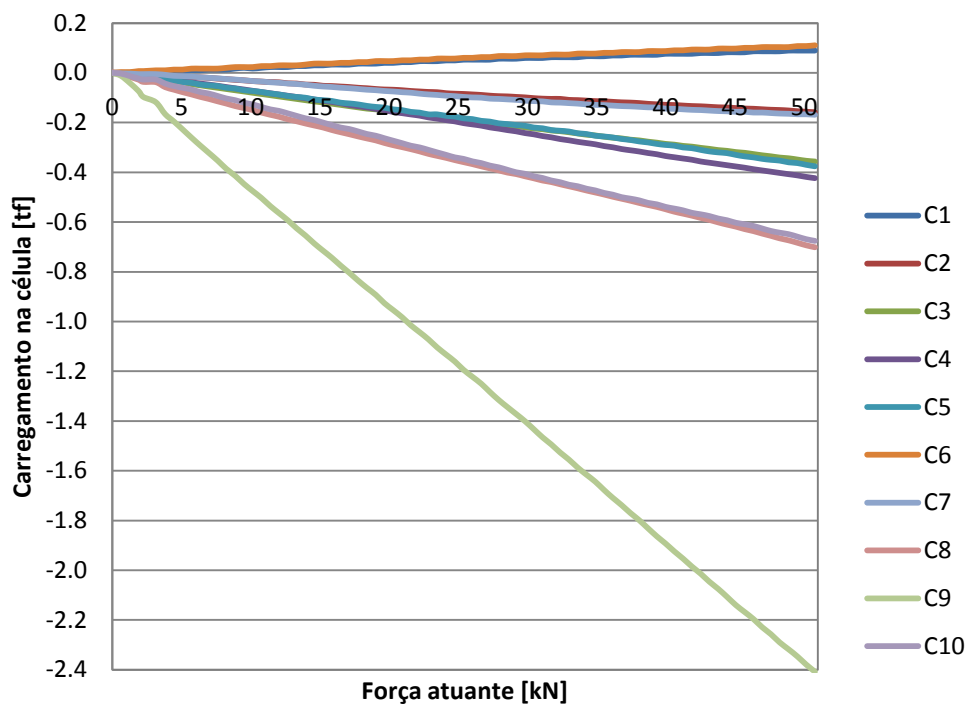


Figura 6.8 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL2

Quadro 6.8 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL2

GL 2					
Células de carga	C1	C2	C3	C4	C5
Varição do carregamento [tf]	0.09	-0.159	-0.355	-0.423	-0.376
Células de carga	C6	C7	C8	C9	C10
Varição do carregamento [tf]	0.11	-0.169	-0.703	-2.408	-0.676

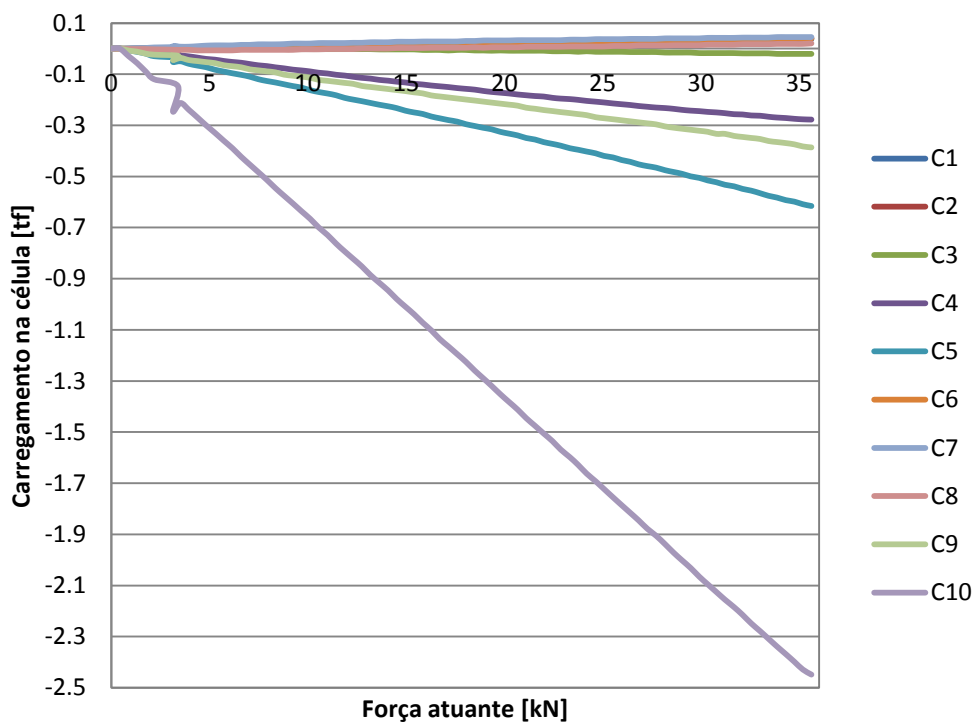


Figura 6.9 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL6

Quadro 6.9 - Carregamento a quarto-de-vão na viga GL 6

GL 6					
Células de carga	C1	C2	C3	C4	C5
Varição do carregamento [tf]	0.037	0.04	-0.02	-0.277	-0.616
Células de carga	C6	C7	C8	C9	C10
Varição do carregamento [tf]	0.04	0.045	0.02	-0.386	-2.448

## ANEXO C Deslocamentos na laje de betão leve com elementos de madeira de seção circular

### Defletómetro MV2

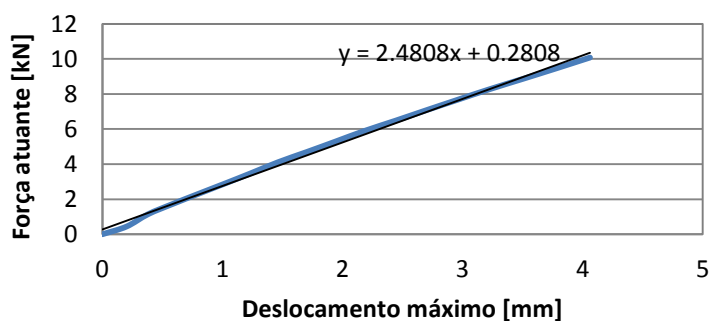


Figura 6.1 - Carregamento a meio-vão no Toro 9

### Defletómetro MV3

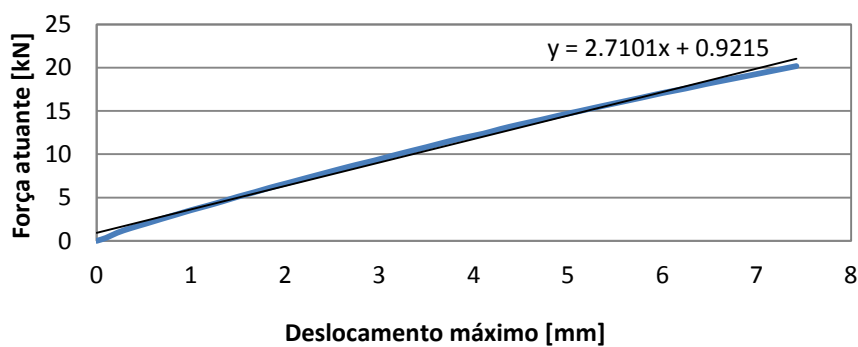


Figura 6.11 - Carregamento a meio-vão no Toro 5

### Defletómetro MV4

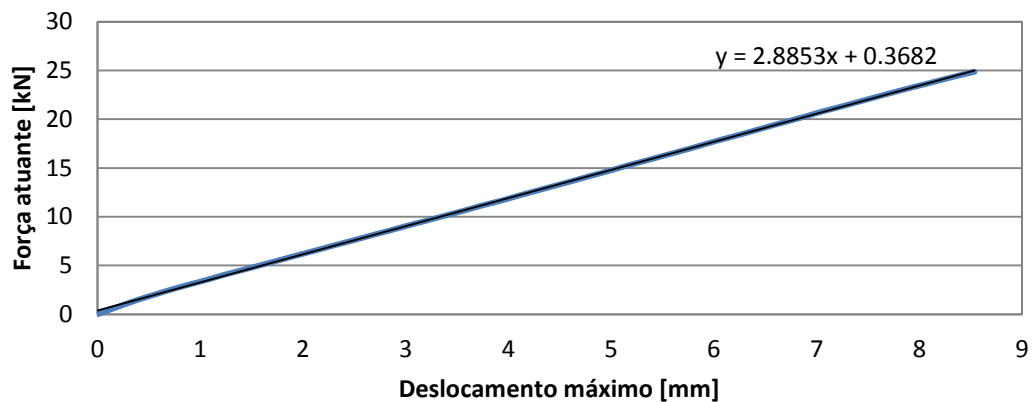


Figura 6.3 - Carregamento a meio-vão no Toro 1

### Defletómetro MV5

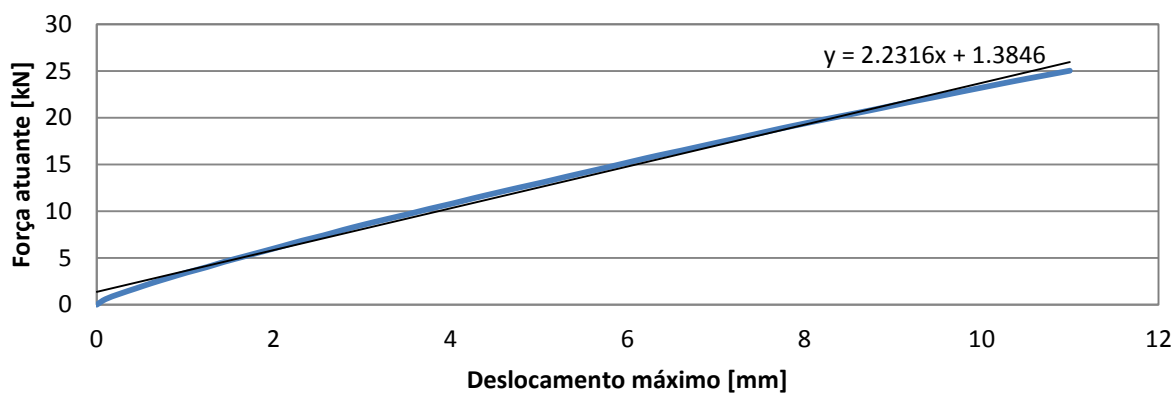


Figura 6.4 - Carregamento a meio-vão no Toro 12

### Defletómetro MV6

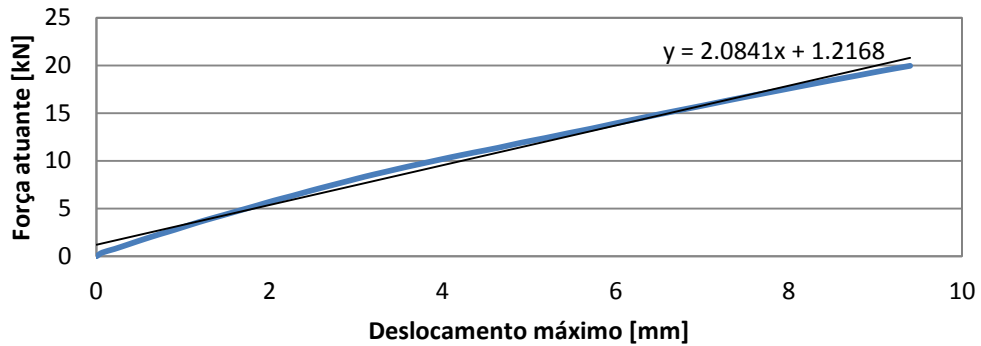


Figura 6.5 - Carregamento a meio-vão no Toro 7

### Defletómetro MV7

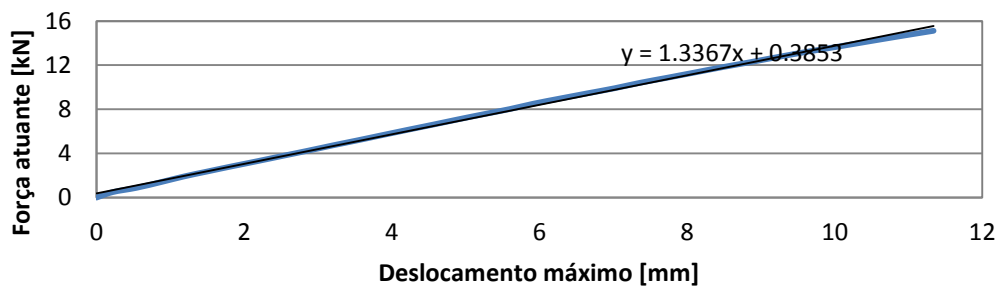


Figura 6.6 - Carregamento a meio-vão no Toro 2

### Defletómetro MV1

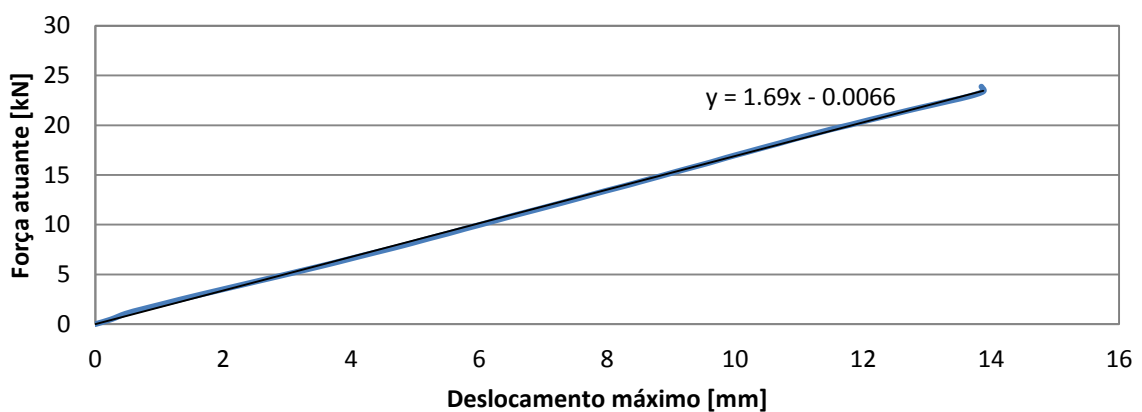


Figura 6.7 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 6

### Defletómetro QV2

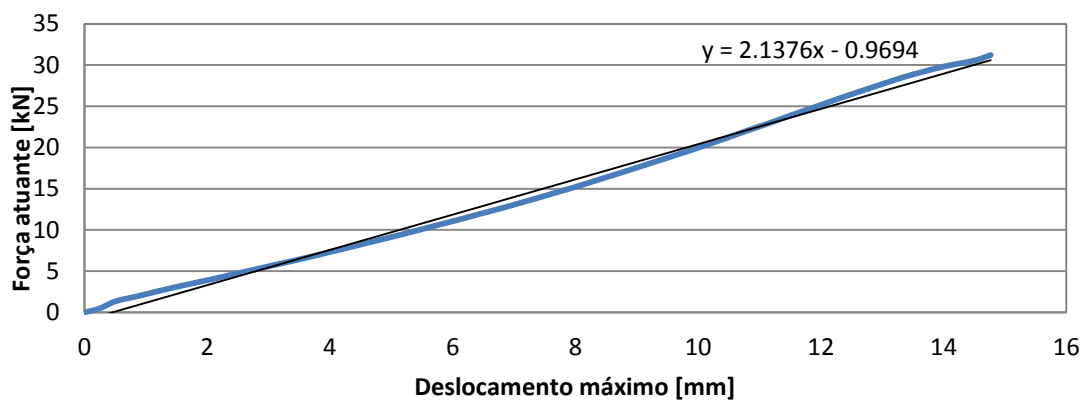


Figura 6.8 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 9

### Defletómetro QV3

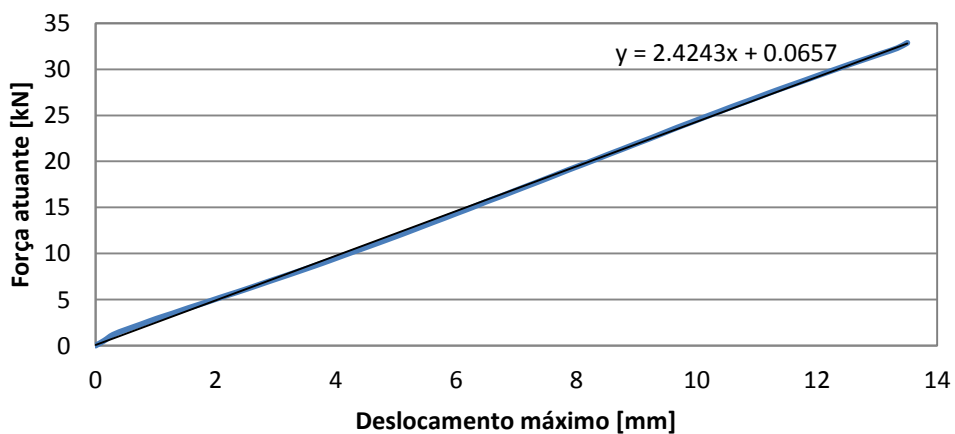


Figura 6.9 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 5

### Defletómetro QV4

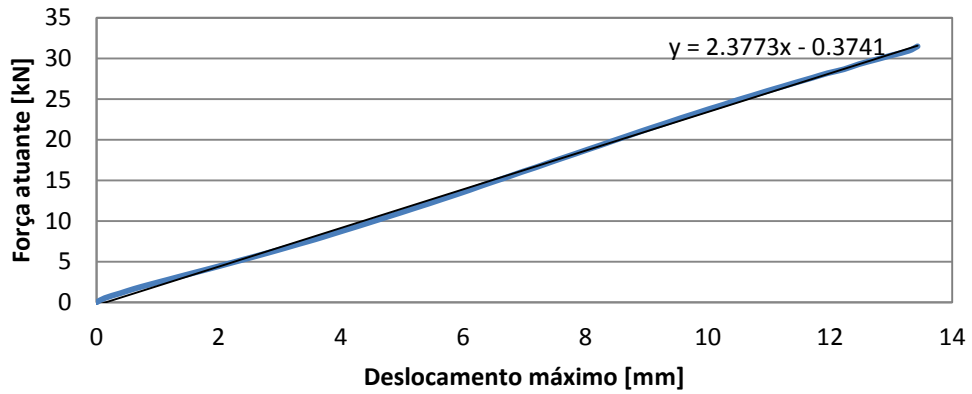


Figura 6.10 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 1

### Defletómetro QV5

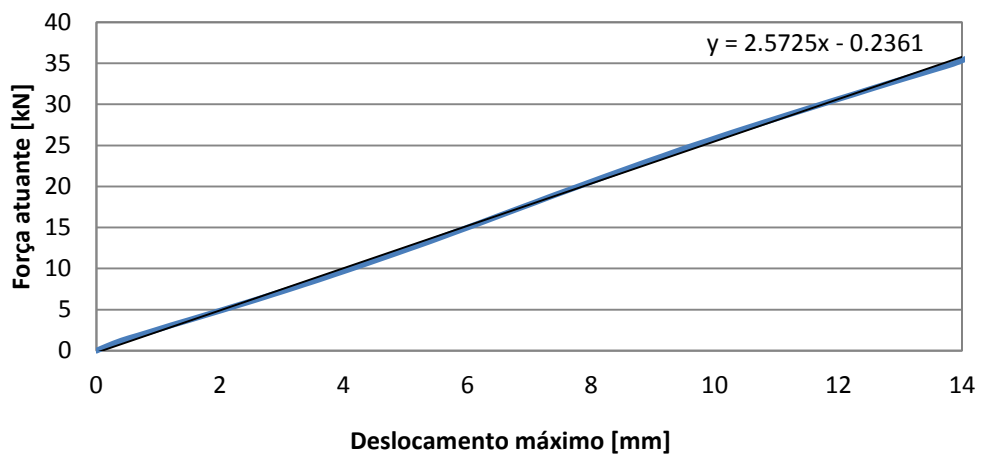


Figura 6.11 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 12



### Defletómetro QV6

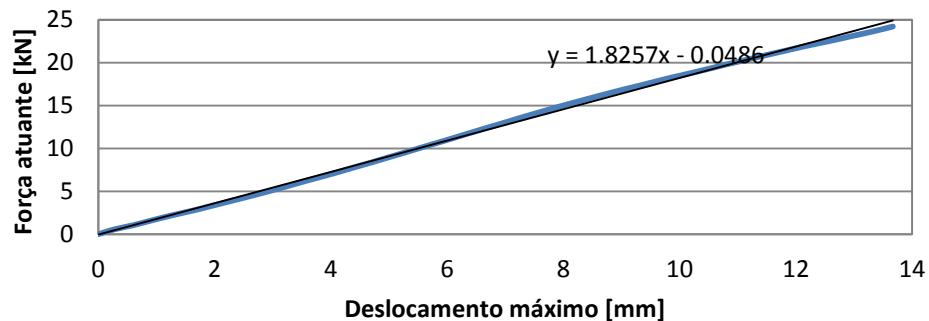


Figura 6.12 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 7

### Defletómetro QV7

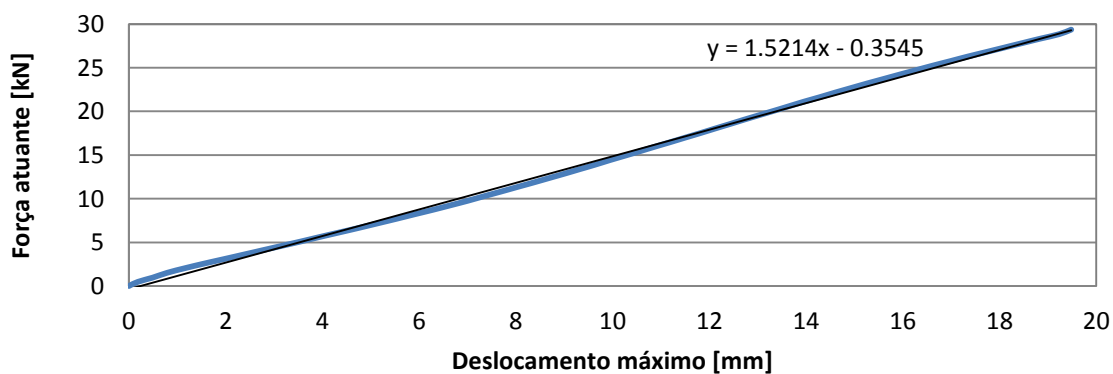


Figura 6.13 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 2

## ANEXO D Carregamentos na laje de betão leve com elementos de madeira de seção circular

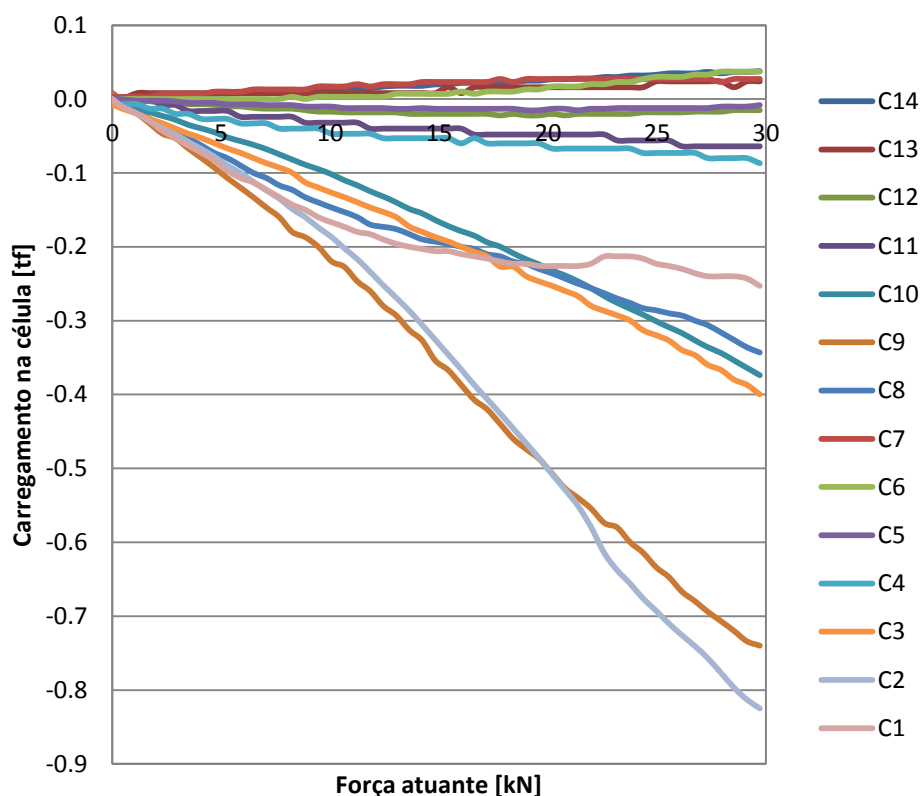


Figura 6.1 - Carregamento a meio-vão no Toro 9

Quadro 6.1 - Carregamento a meio-vão no Toro 9

		Toro 9						
Células de carga		C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]		0.038	0.024	-0.015	-0.072	-0.374	-0.747	-0.343
Células de carga		C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]		0.024	0.04	-0.008	-0.08	-0.393	-0.825	-0.253

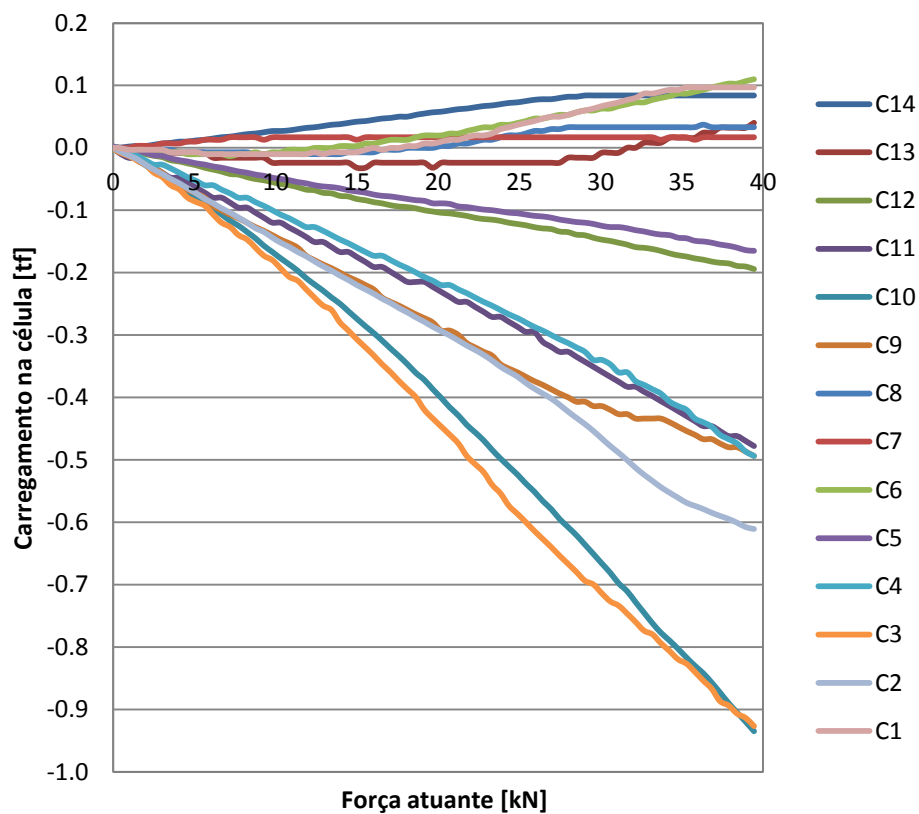


Figura 6.2 - Carregamento a meio-vão no Toro 5

Quadro 6.2 - Carregamento a meio-vão no Toro 5

Toro 5							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]	0.084	0.04	-0.194	-0.478	-0.937	-0.494	0.033
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]	0.017	0.113	-0.167	-0.494	-0.927	-0.611	0.097

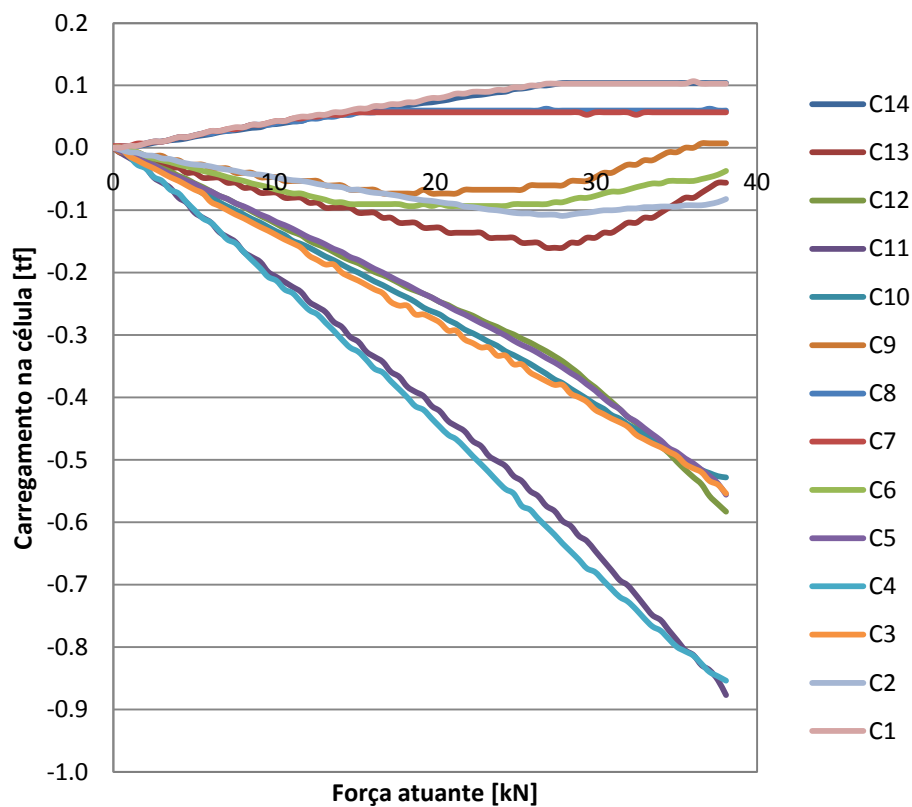


Figura 6.3 - Carregamento a meio-vão no Toro 1

Quadro 6.3 - Carregamento a meio-vão no Toro 1

		Toro 1						
Células de carga		C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]		0.104	-0.056	-0.583	-0.877	-0.528	0.007	0.06
Células de carga		C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]		0.054	-0.037	-0.556	-0.854	-0.554	-0.082	0.103

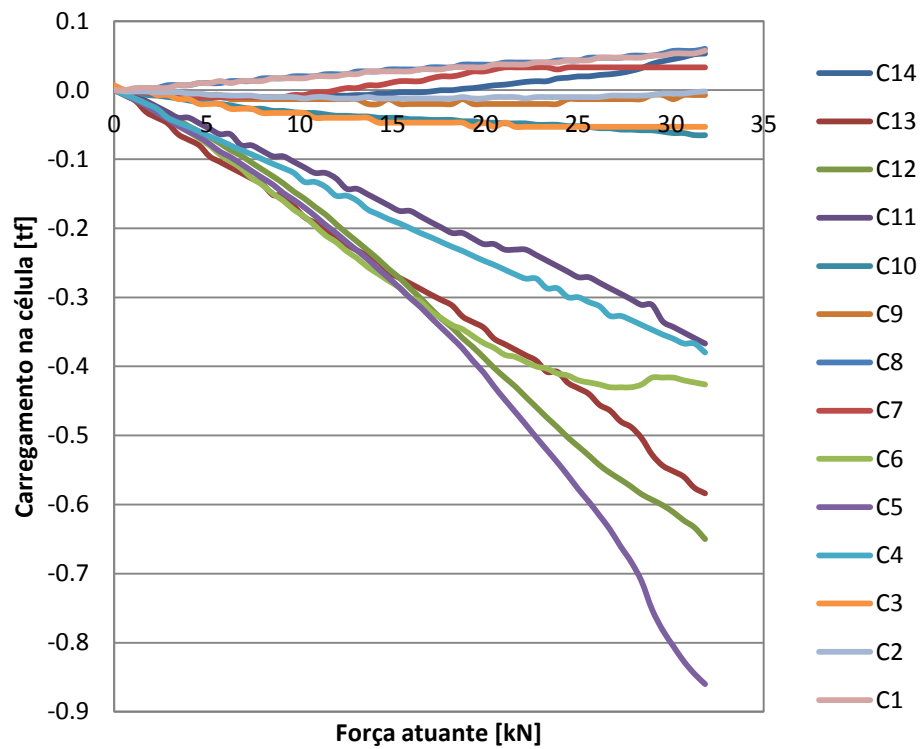


Figura 6.4 - Carregamento a meio-vão no Toro 12

Quadro 6.4 - Carregamento a meio-vão no Toro 12

Toro 12							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]	0.053	-0.584	-0.65	-0.367	-0.065	-0.007	0.06
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]	0.033	-0.429	-0.86	-0.38	-0.06	-0.002	0.057

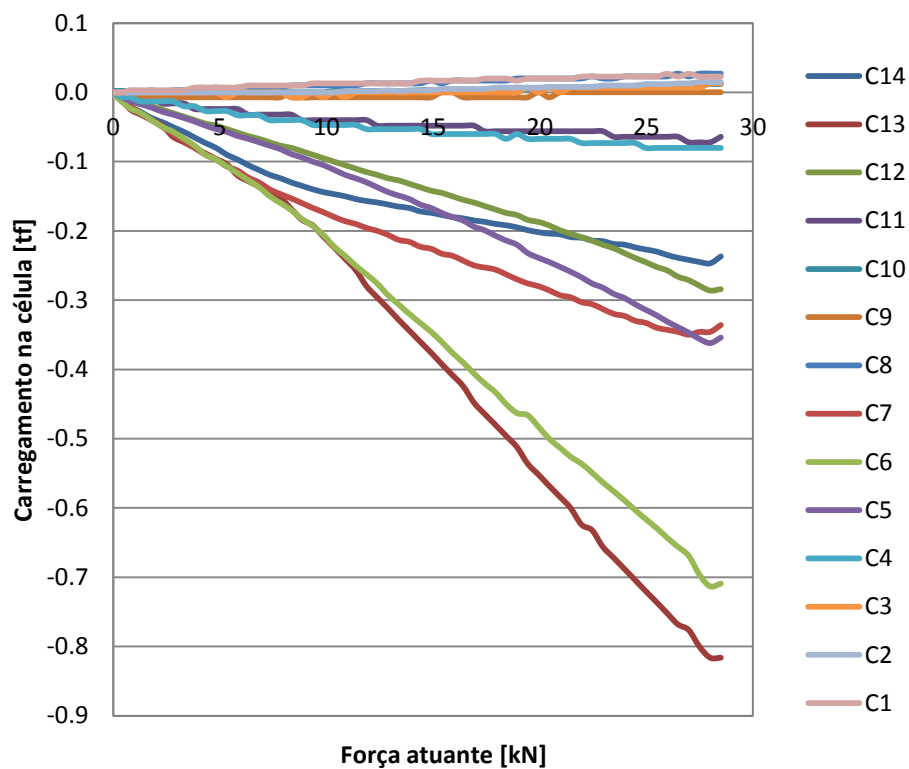


Figura 6.5 - Carregamento a meio-vão no Toro 7

Quadro 6.5 - Carregamento a meio-vão no Toro 7

Toro 7							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]	-0.239	-0.816	-0.284	-0.064	0.01	0	0.027
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]	-0.336	-0.706	-0.354	-0.08	0.013	0.015	0.023

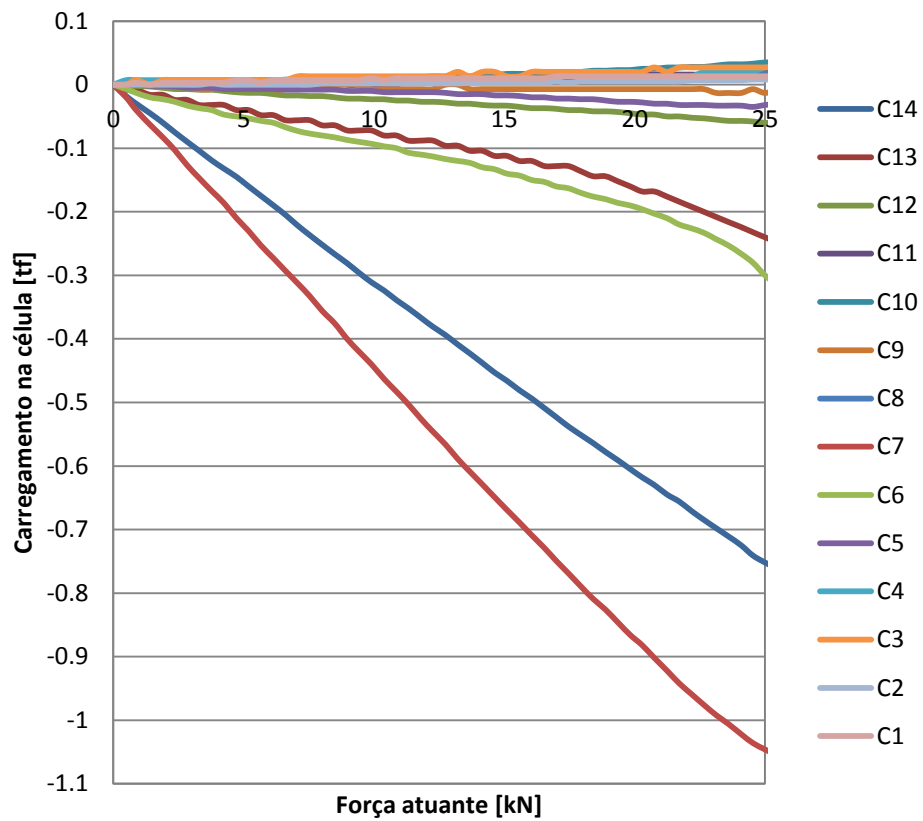


Figura 6.6 - Carregamento a meio-vão no Toro 2

Quadro 6.6 - Carregamento a meio-vão no Toro 2

Toro 2							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]	-0.762	-0.248	-0.06	0.024	0.035	-0.007	0.016
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]	-1.056	-0.316	-0.03	0.027	0.027	0.008	0.013

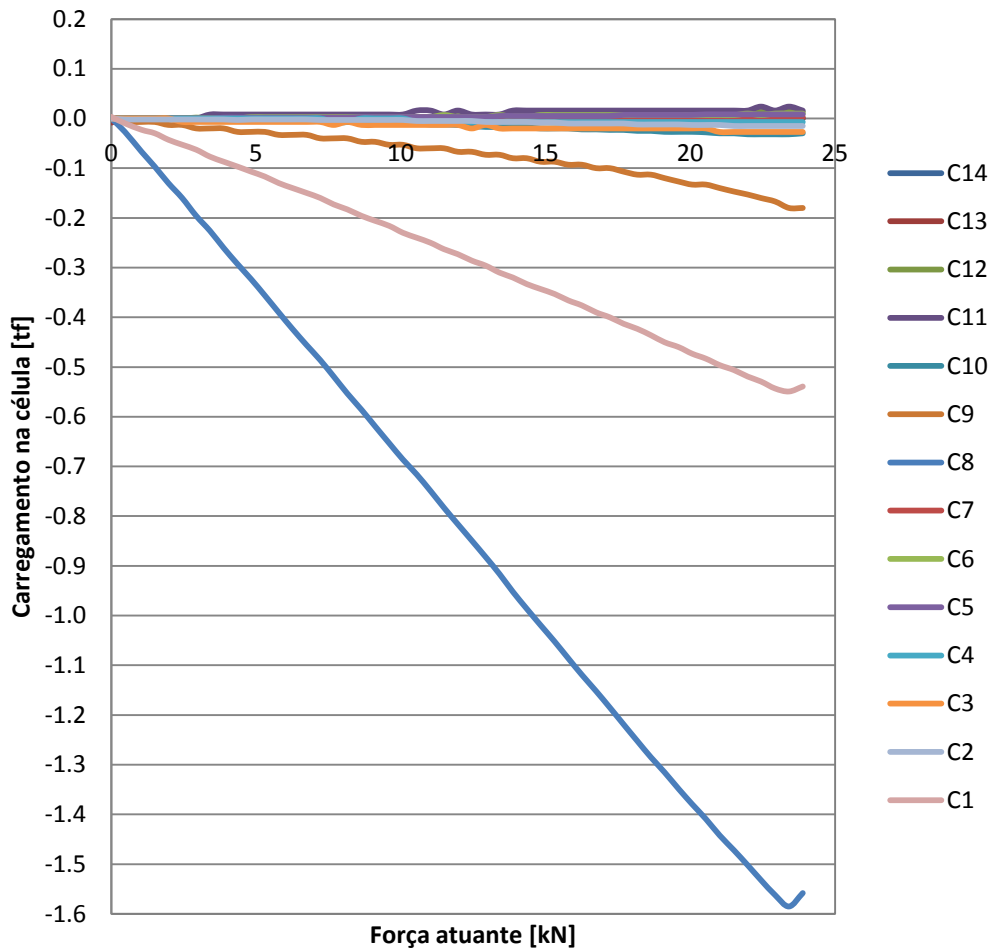


Figura 6.7 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 6

Quadro 6.7 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 6

		Toro 6						
Células de carga		C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]		0	0.008	0.013	0.016	-0.03	-0.18	-1.558
Células de carga		C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]		0.003	0.01	0.008	-0.007	-0.027	-0.015	-0.542



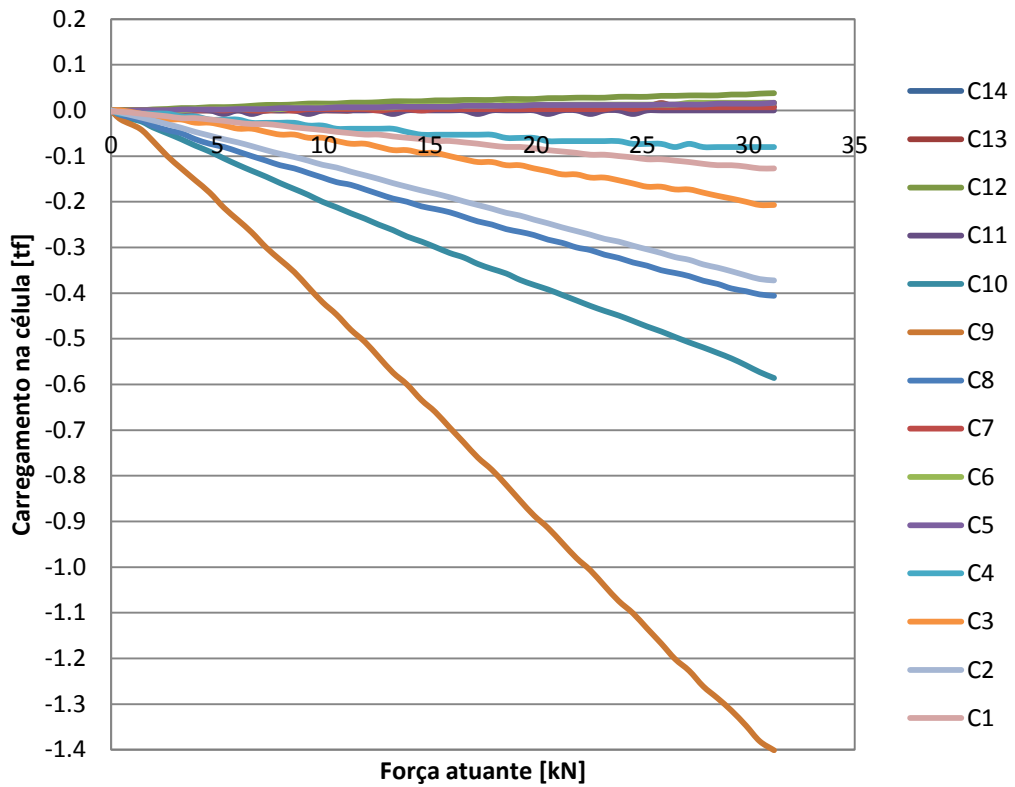


Figura 6.8 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 9

Quadro 6.8 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 9

Toro 9							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]	0.008	0.016	0.038	0	-0.584	-1.401	-0.406
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]	0.007	0.017	0.019	-0.08	-0.207	-0.372	-0.124

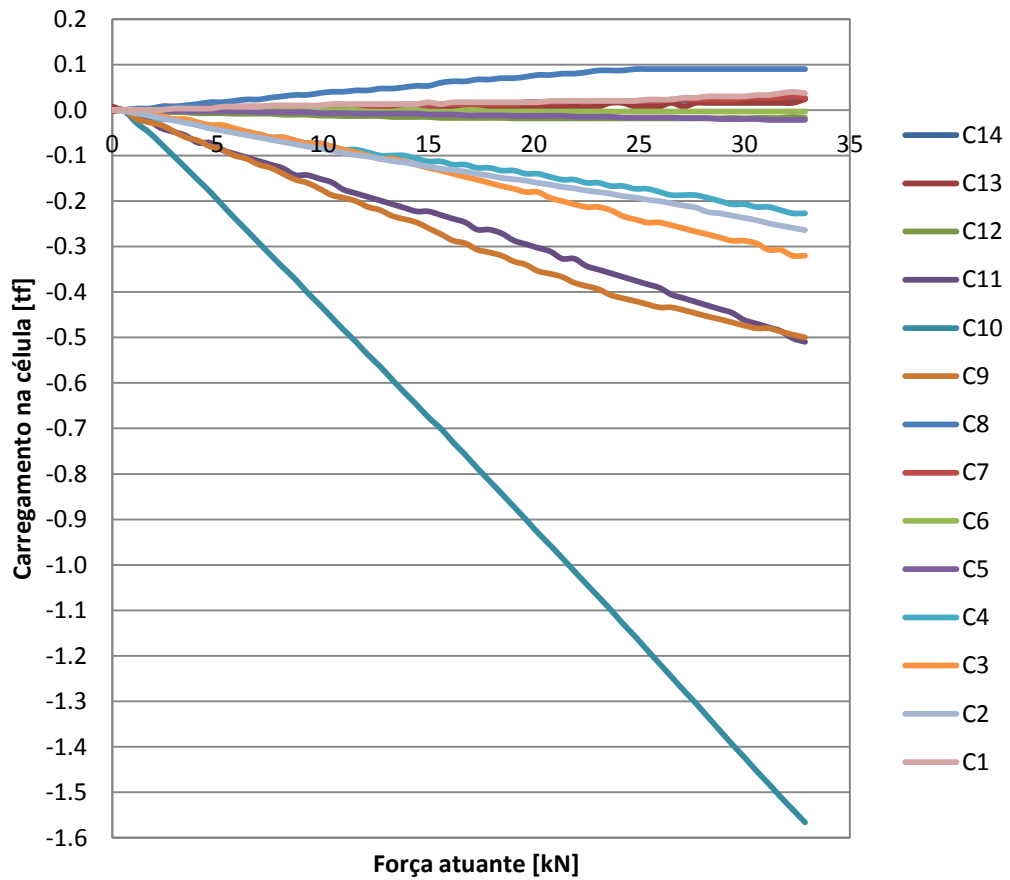


Figura 6.9 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 5

Quadro 6.9 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 5

Toro 5							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]	0.025	0.016	-0.017	-0.51	-1.566	-0.5	0.09
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]	0.03	-0.003	-0.022	-0.227	-0.32	-0.264	0.037

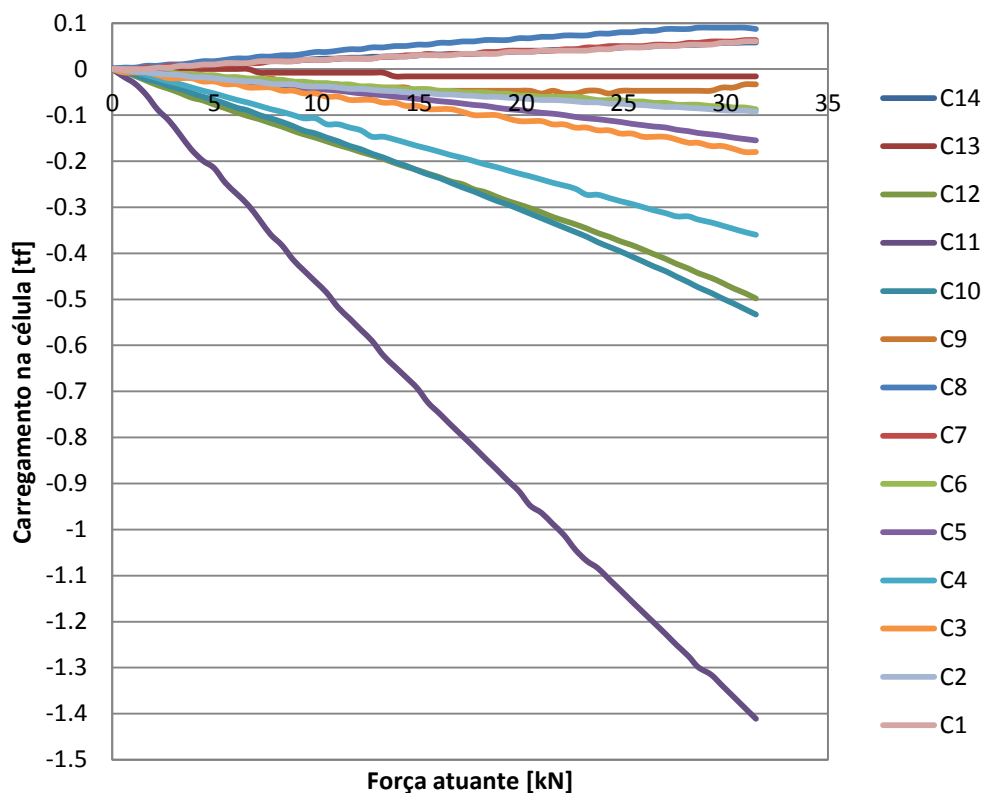


Figura 6.10 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 1

Quadro 6.10 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 1

Toro 1							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]	0.056	-0.016	-0.496	-1.411	-0.533	-0.033	0.087
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]	0.063	-0.087	-0.155	-0.36	-0.18	-0.092	0.06

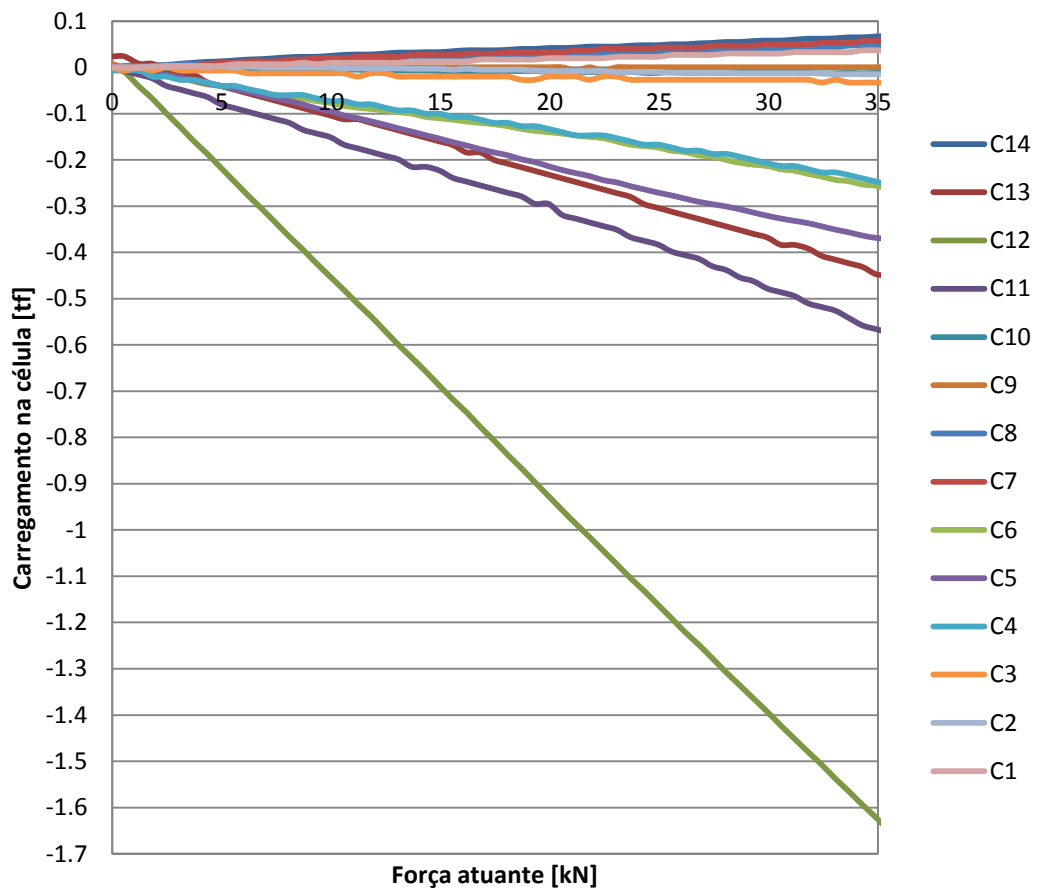


Figura 6.11 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 12

Quadro 6.11 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 12

Toro 12							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]	0.068	-0.472	-1.653	-0.574	-0.013	-0.007	0.047
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]	0.057	-0.266	-0.371	-0.246	-0.033	-0.015	0.037

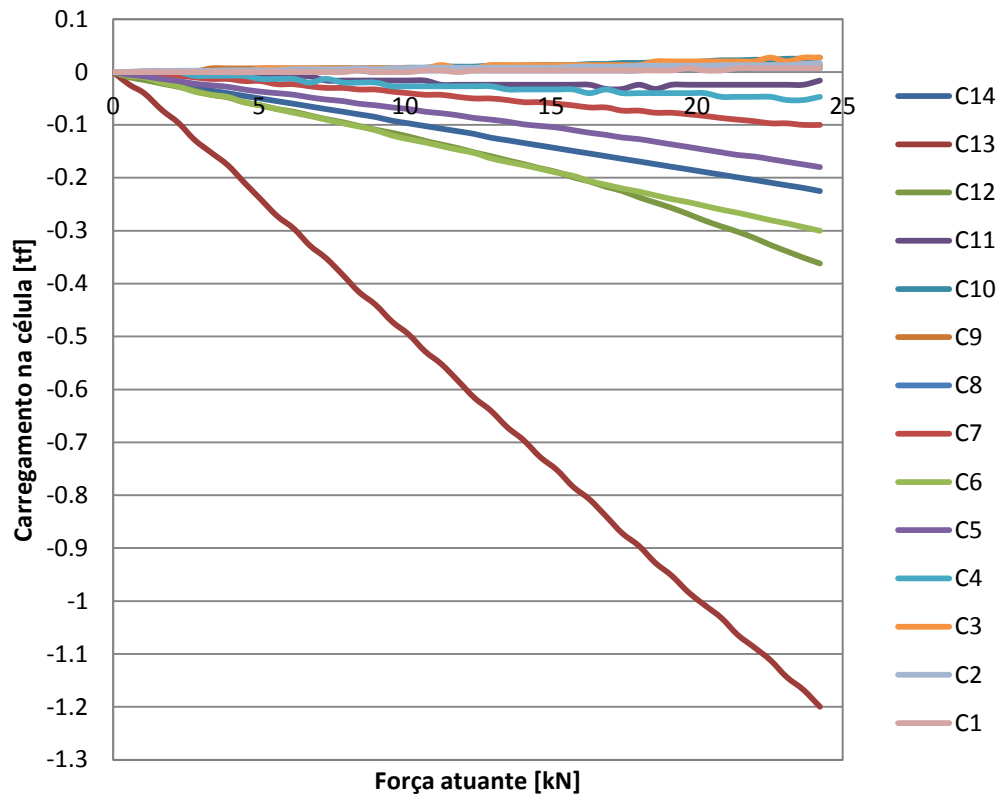


Figura 6.12 - Carregamento a quarto-de-vão no Toró 7

Quadro 6.12 - Carregamento a quarto-de-vão no Toró 7

Toró 7							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]	-0.225	-1.2	-0.362	-0.016	0.027	0.013	0.007
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]	-0.1	-0.3	-0.18	-0.047	0.027	0.017	0.007

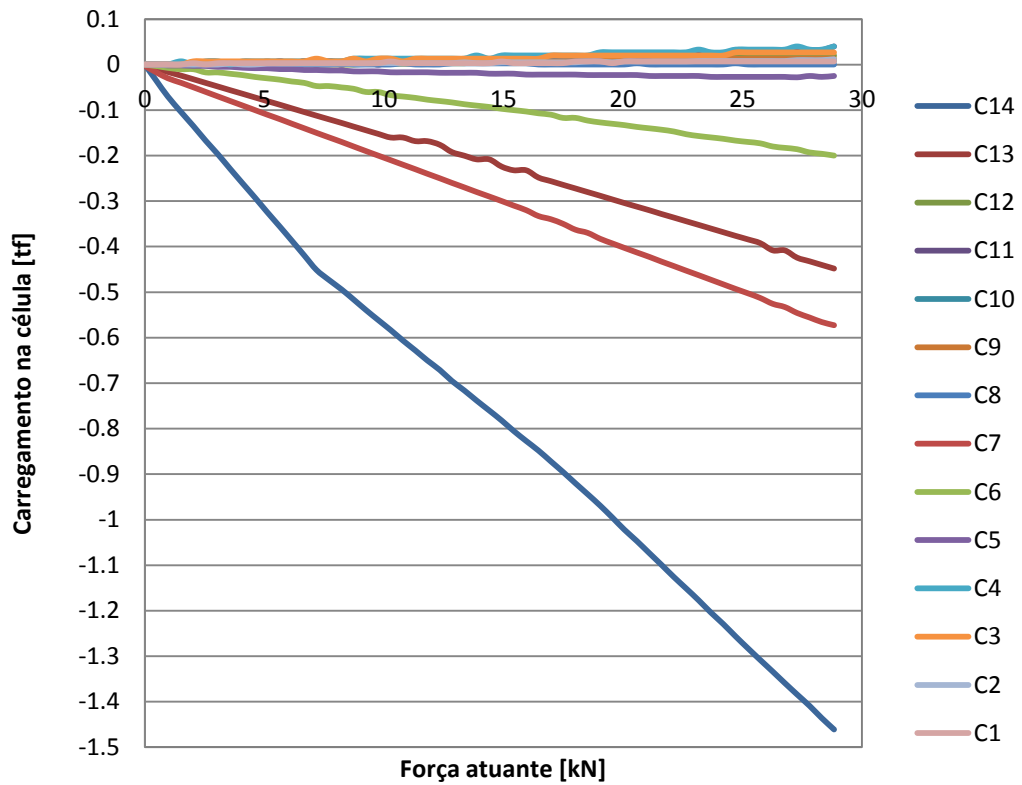


Figura 6.13 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 2

Quadro 6.13 - Carregamento a quarto-de-vão no Toro 2

Toro 2							
Células de carga	C14	C13	C12	C11	C10	C9	C8
Varição do carregamento [tf]	-1.461	-0.448	0.02	0.04	0.008	0.013	0
Células de carga	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Varição do carregamento [tf]	-0.57	-0.2	-0.025	0.04	0.027	0.012	0.007