RELATÓRIO PRELIMINAR

PROJECTO SUPERB: PTDC/ECM/117618/2010

VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO VIGA/PILAR POR INTERMÉDIO DO EFEITO "FERROLHO"

Modelação da Estrutura em Extreme Loading for Structures®

Autoria:

André Emanuel Bicho Lourenço de Oliveira

Vasco Miguel Serrano Bernardo

Sob a orientação do Professor Doutor Corneliu Cismasiu

Maio de 2014

ÍNDICE:

1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVO 1
3. MODELAÇÃO DA LIGAÇÃO PILAR-TABULEIRO 2
4. RESULTADOS 5
4.1. H=2m; Ø=10mm 6
4.2. H=2m; Ø=15mm 8
4.3. H=3m; Ø=10mm 10
4.4. H=3m; Ø=15mm 12
4.5. H=3m; Ø=20mm 14
4.6. H=4m; Ø=10mm 16
4.7. H=4m; Ø=15mm 18
4.8. H=4m; Ø=20mm 20
4.9. H=5m; Ø=10mm 22
4.10. H=5m; Ø=15mm 24
4.11. H=5m; Ø=20mm 26
5. CONCLUSÕES 28
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 29

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1 – Representação esquemática do ensaio a realizar 1
Figura 2 – Vista geral do modelo e detalhes da ligação 3
Figura 3 - Altura do encastramento variável (Boundary Conditions) 4
Figura 4 – Pormenor das malhas 4
Figura 5 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 6
Figura 6 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 6
Figura 7 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C 6
Figura 8 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar 7
Figura 9 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 8
Figura 10 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 8
Figura 11 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C 8
Figura 12 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar 9
Figura 13 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 10
Figura 14 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 10
Figura 15 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C 10
Figura 16 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar 11
Figura 17 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 12
Figura 18 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 12
Figura 19 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C 12
Figura 20 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar 13
Figura 21 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 14
Figura 22 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 14
Figura 23 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C 14
Figura 24 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar 15
Figura 25 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 16
Figura 26 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 16
Figura 27 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A e B 16
Figura 28 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar 17
Figura 29 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 18
Figura 30 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 18
Figura 31 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C 18
Figura 32 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar 19
Figura 33 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 20
Figura 34 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 20
Figura 35 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C 20
Figura 36 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar 21
Figura 37 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 22
Figura 38 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 22
Figura 39 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C 22
Figura 40 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar 23

Figura 41 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 24
Figura 42 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 24
Figura 43 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C 24
Figura 44 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar..... 25
Figura 45 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar 26
Figura 46 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar 26
Figura 47 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C 26
Figura 48 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar..... 27

ÍNDICE DE TABELAS:

Tabela 1- Altura dos Pilares e Diâmetros dos Ferrolhos..... 2
Tabela 2 – Resumo dos esforços 28

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho pretende simular o comportamento da ligação pilar-tabuleiro de um passadiço pedonal pré-fabricado, solicitado a acção sísmica. Neste caso específico, a transmissão das forças na interface é geralmente materializada por um conjunto de varões de aço, colocados perpendicularmente a placas de neoprene na superfície da junta. Estes varões encontram-se devidamente ancorados no pilar e no tabuleiro.

O funcionamento destes varões, no que diz respeito a solicitações horizontais, é sobretudo controlado pelo efeito de "ferrolho" [1, 2].

2. OBJETIVO

O objetivo passa por preparar um ensaio experimental na mesa sísmica do LNEC, em que será imposto um deslocamento na base do pilar de 20 cm, mantendo fixas as extremidades das vigas do tabuleiro (

Figura **1**).

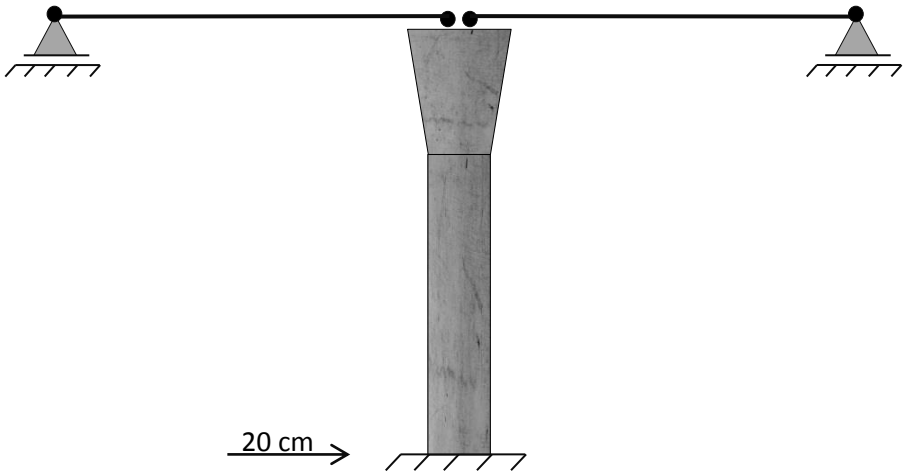


Figura 1 – Representação esquemática do ensaio a realizar

Para tal, e como se observa na Tabela 1, foram testadas várias combinações "altura do pilar/diâmetro dos varões".

Tabela 1- Altura dos Pilares e Diâmetros dos Ferrolhos

H **Altura do Pilar** (m)	**Ø** **Diâmetro dos Ferrolhos** (mm)
2	10
	15
	20 (falta correr)
3	10
	15
	20
4	10
	15
	20
5	10
	15
	20

O estudo desenvolvido neste trabalho permitirá tirar conclusões relativamente ao tipo de colapso esperado para cada uma destas combinações da Tabela 1 e fornecerá dados relativamente aos esforços na base do pilar, necessários para dimensionar devidamente esta ligação aquando a realização do ensaio.

3. MODELAÇÃO DA LIGAÇÃO PILAR-TABULEIRO

A modelação estrutural desta ligação foi desenvolvida através de um modelo numérico tridimensional apresentado na Figura 2. A modelação foi feita com recurso ao *software* de dimensionamento estrutural Extreme Loading for Structures (ELS).

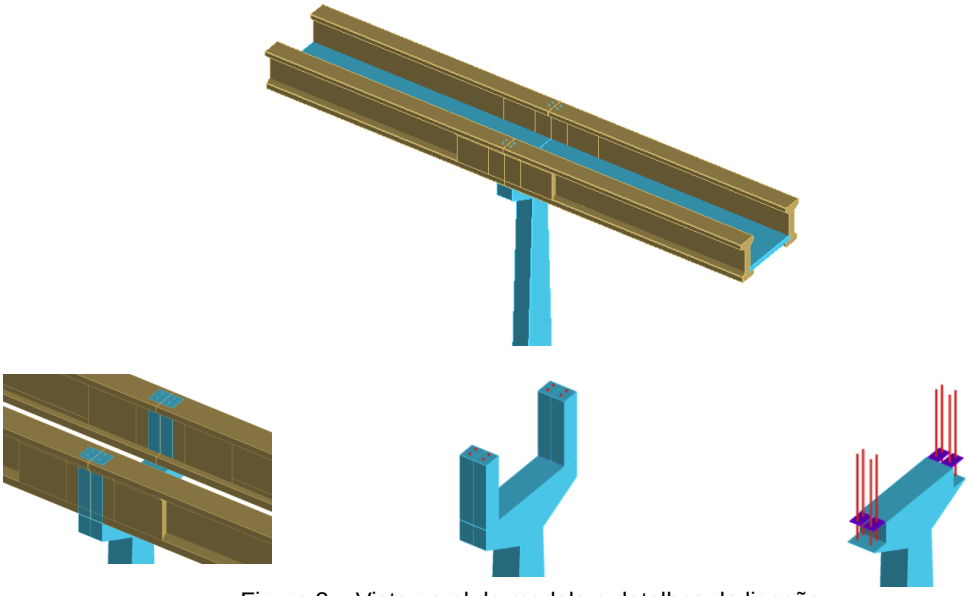


Figura 2 – Vista geral do modelo e detalhes da ligação

O programa ELS utiliza o método *Applied Element Method* [3, 4] que possibilita a análise não-linear de estruturas para ações estáticas e dinâmicas como o vento, explosões, impactos, sismos e colapso progressivo. Este *software* analisa automaticamente o comportamento da estrutura durante a fase elástica, início de fendilhação, separação de elementos da estrutura e respetiva redistribuição de esforços. Desta forma é possível estudar o colapso da estrutura, verificando os seus modos de rutura para uma determinada solicitação.

Durante a fase de elaboração do modelo optou-se por definir dois estágios distintos tendo em conta o processo construtivo da estrutura. Um primeiro estágio onde ocorre exclusivamente a actuação do peso próprio, e um segundo estágio onde são inseridos os ferrolhos nos furos e o espaço envolvente é selado com *grout*. Desta forma evita-se que os varões/ferrolhos sejam solicitados devido ao peso próprio da estrutura.

Tal como anteriormente referido na Tabela 1 fez-se variar as caracterícsticas geométricas da ligação, nomeadamente as alturas do pilar e os diâmetros dos ferrolhos. Variaram-se as alturas do pilar elevando a altura do encastramento por intermédio de *Boundary Conditions* (Figura 3). Esta situação pretende simular o que se passará durante do ensaio na mesa sísmica do LNEC, com um deslocamento forçado de 20 cm, onde o pilar a ser testado será seccionado à altura pretendida.

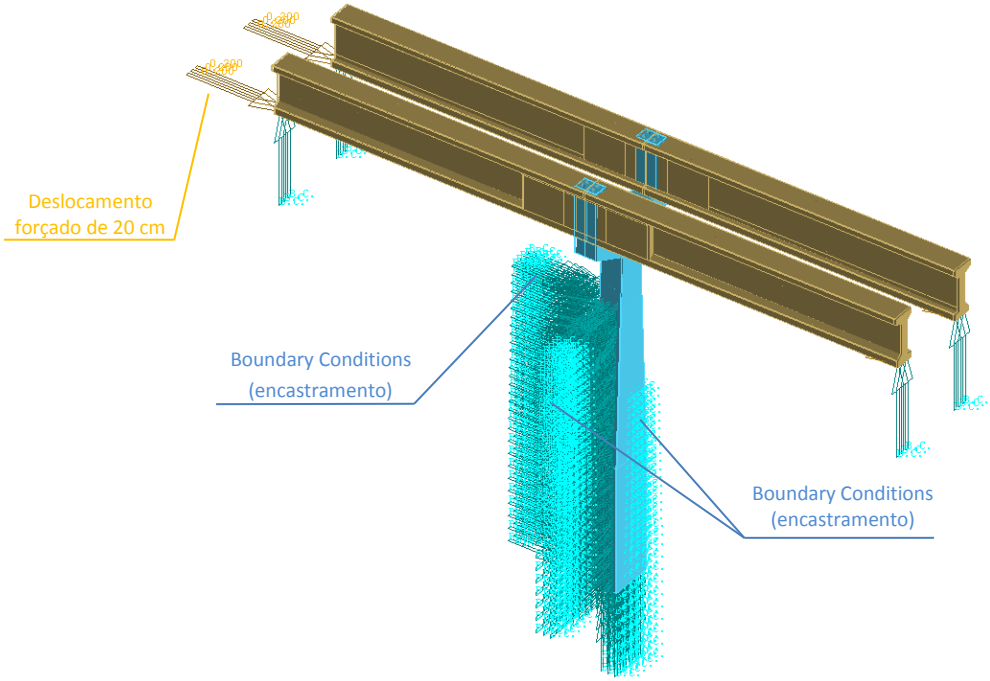


Figura 3 - Altura do encastramento variável (Boundary Conditions)

No que diz respeito ao diâmetro dos varões/ferrolhos, estes foram variando de secção através da manipulação das propriedades da secção.

Toda a malha estrutural em redor dos ferrolhos foi dividida em elementos de pequena dimensão (Figura 4) de forma a traduzir um comportamento mais próximo da realidade possível.

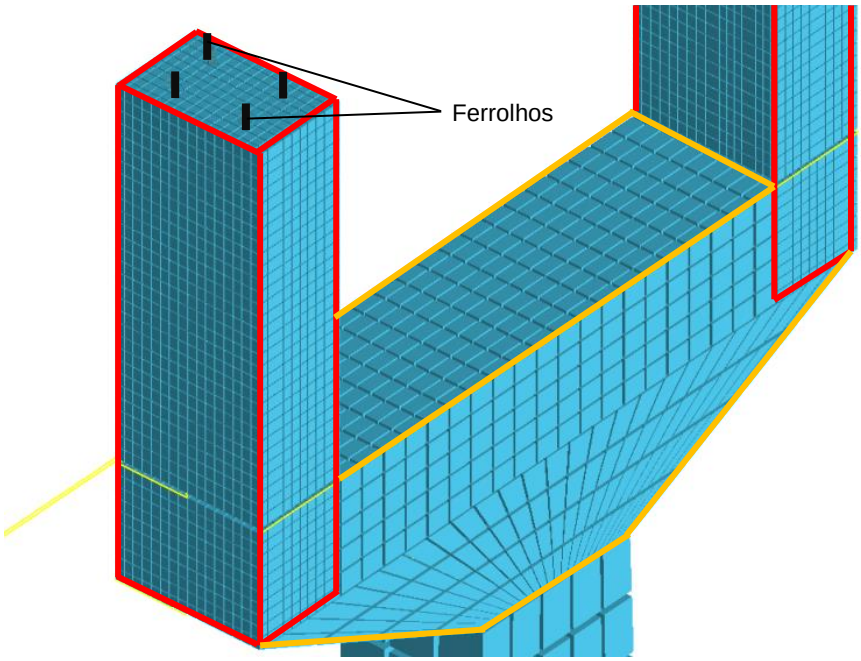


Figura 4 – Pormenor das malhas

4. RESULTADOS

Para cada configuração (H-altura do pilar e Ø-diâmetro do ferrolho) são apresentados de seguida três gráficos dos resultados obtidos, nomeadamente:

- Gráfico da força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar;
- Gráfico do momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar;
- Gráfico da força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar.

4.1. H=2m; Ø=10mm

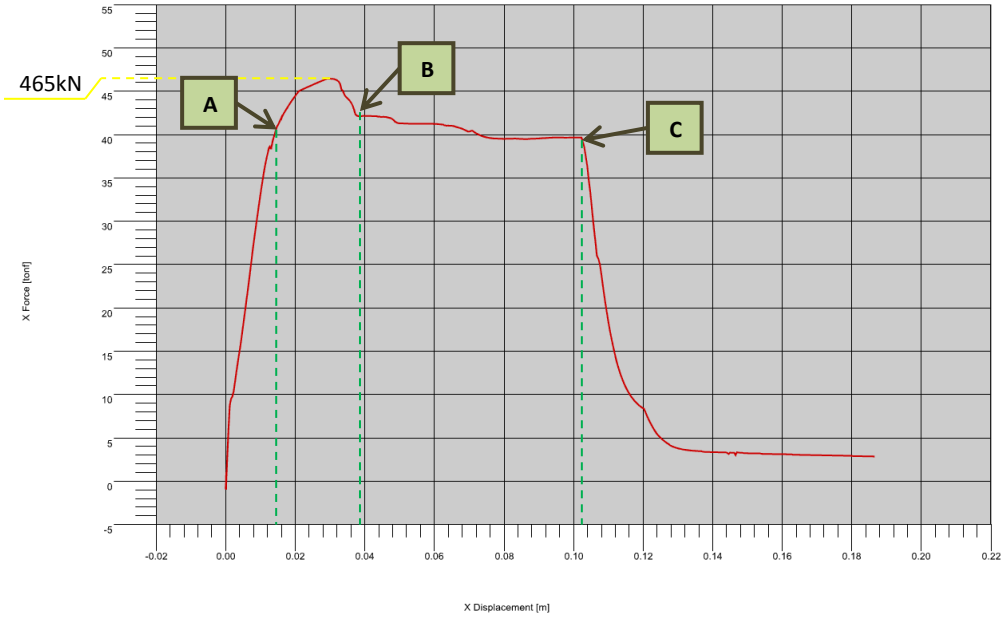


Figura 5 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

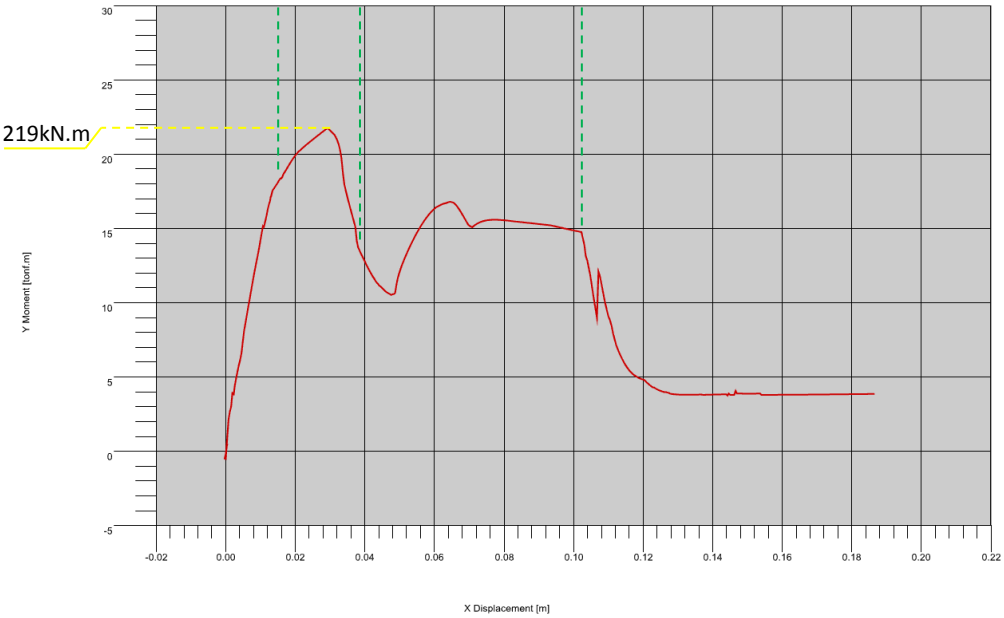
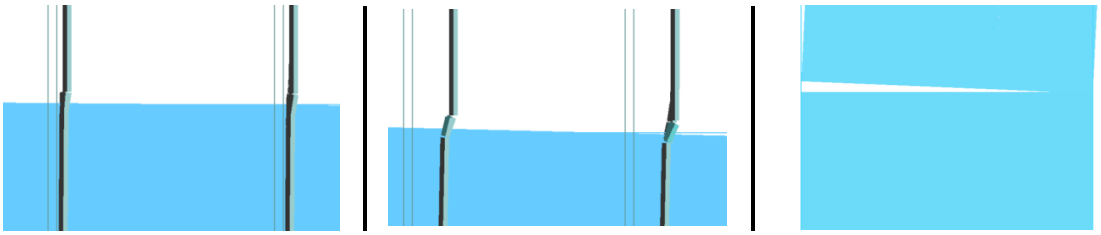


Figura 6 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar



A
Ponto de rotura inicial dos ferrolhos

B
Ponto de rotura total dos ferrolhos

C
Ponto de rotura do pilar

Figura 7 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C

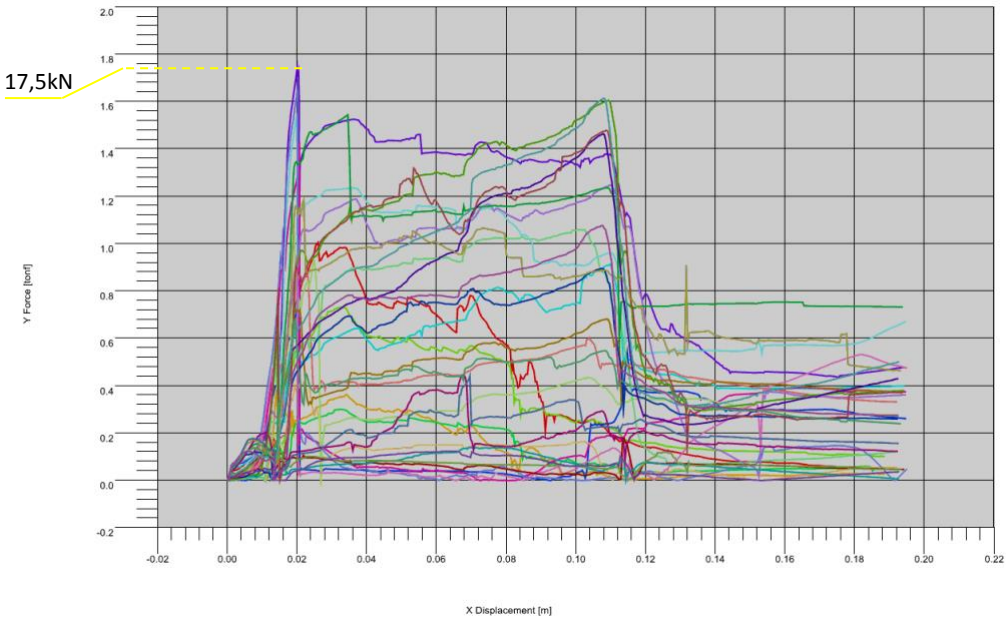


Figura 8 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

4.2. H=2m; Ø=15mm

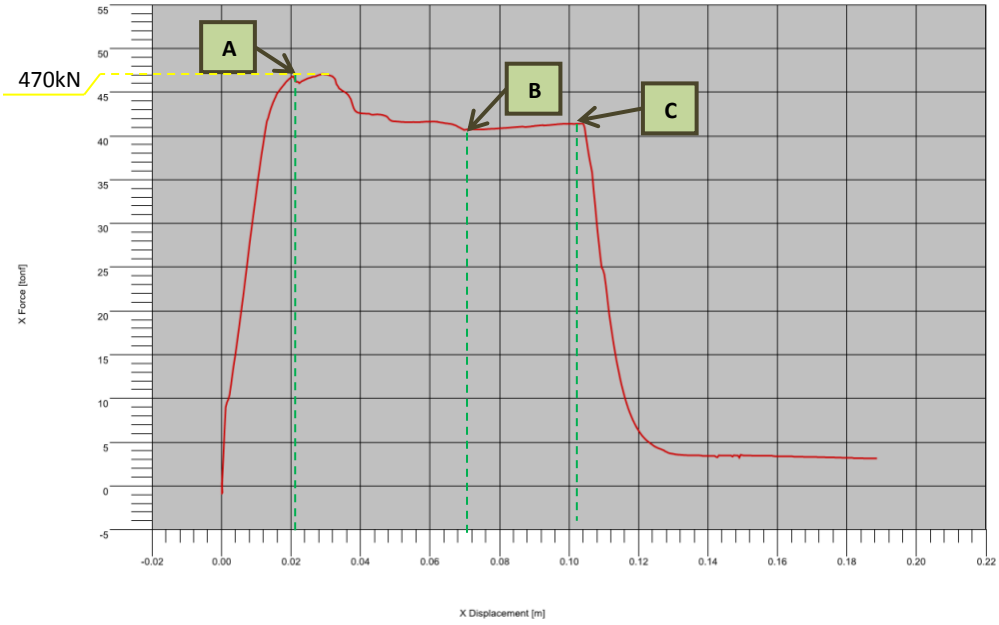


Figura 9 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

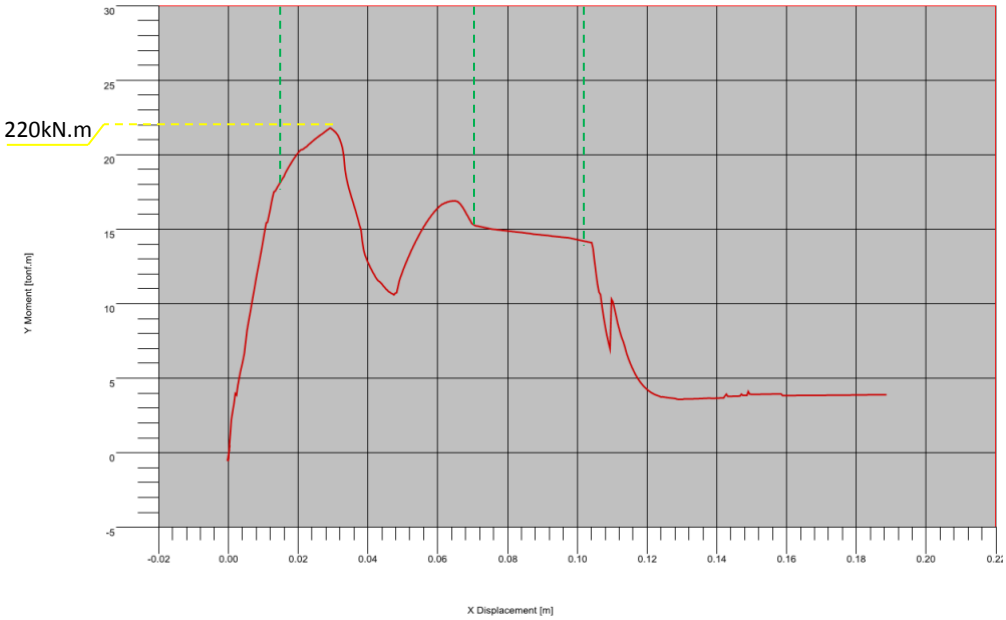
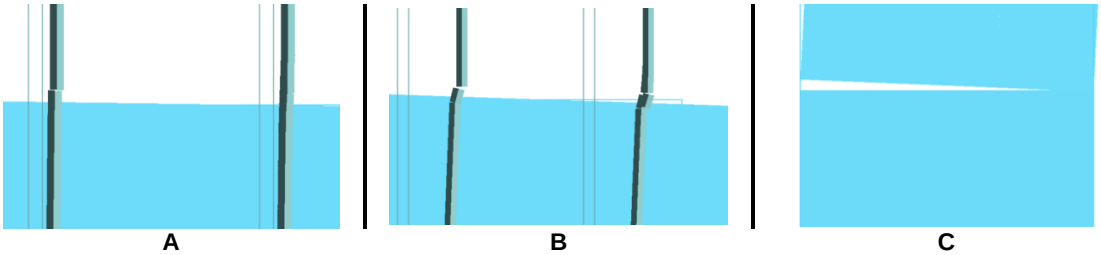


Figura 10 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar



A
Ponto de rotura inicial dos ferrolhos

B
Ponto de rotura total dos ferrolhos

C
Ponto de rotura do pilar

Figura 11 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C

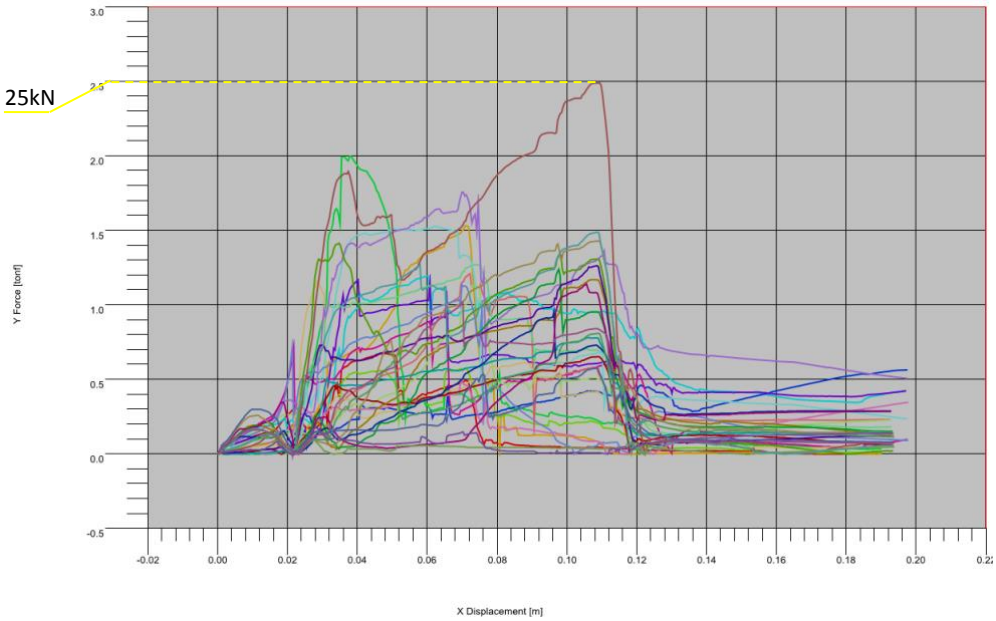


Figura 12 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

4.3. H=3m; Ø=10mm

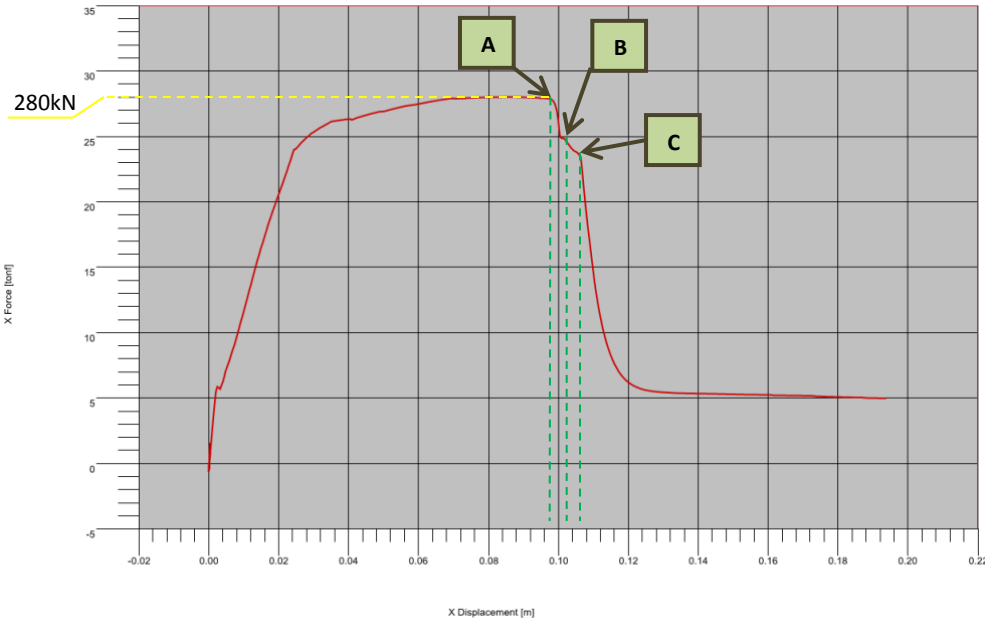


Figura 13 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

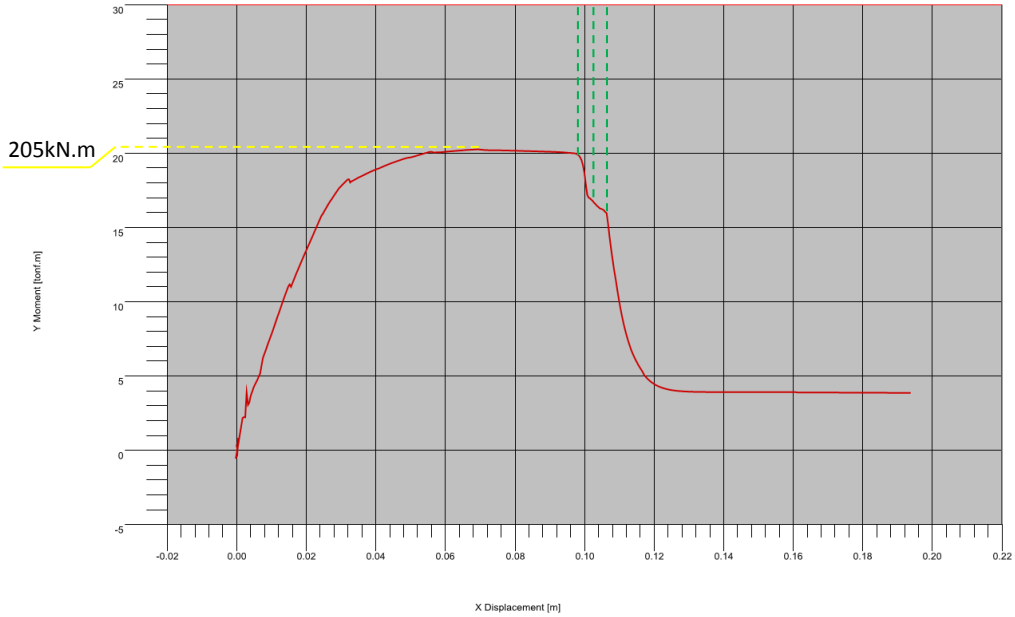
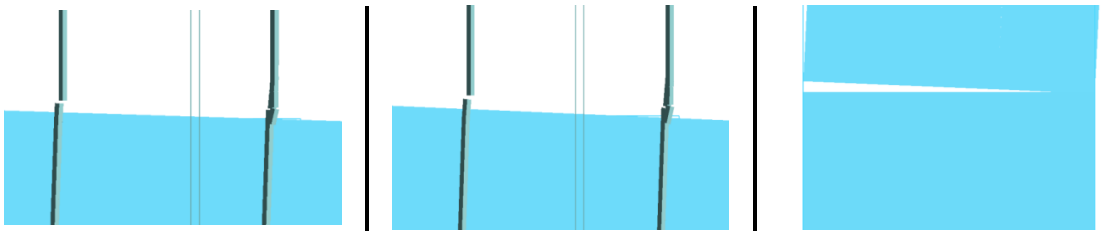


Figura 14 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar



A
Ponto de rotura inicial dos ferrolhos

B
Ponto de rotura total dos ferrolhos

C
Ponto de rotura do pilar

Figura 15 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C

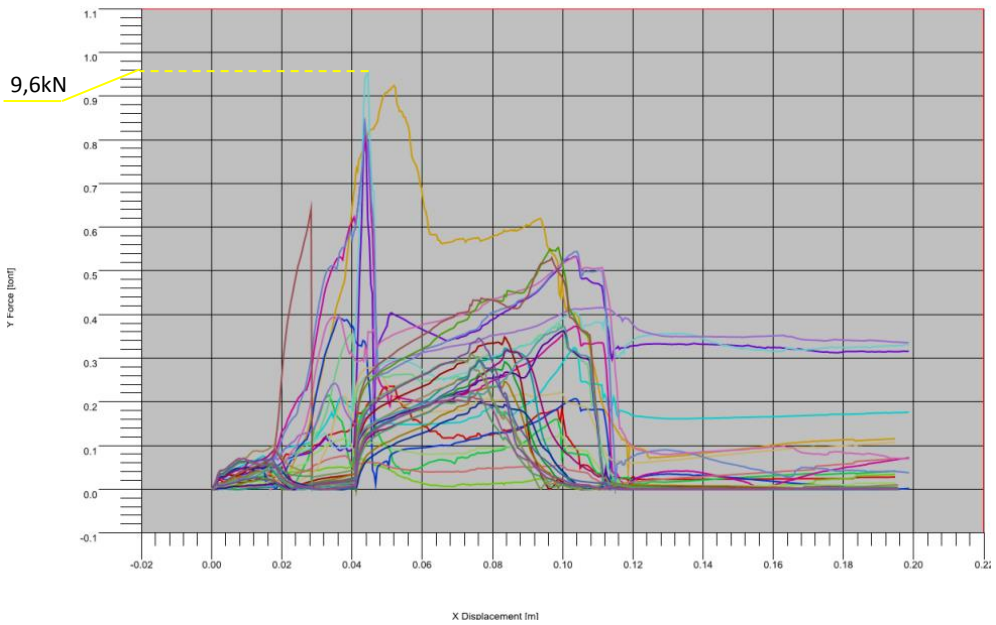


Figura 16 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

4.4. H=3m; Ø=15mm

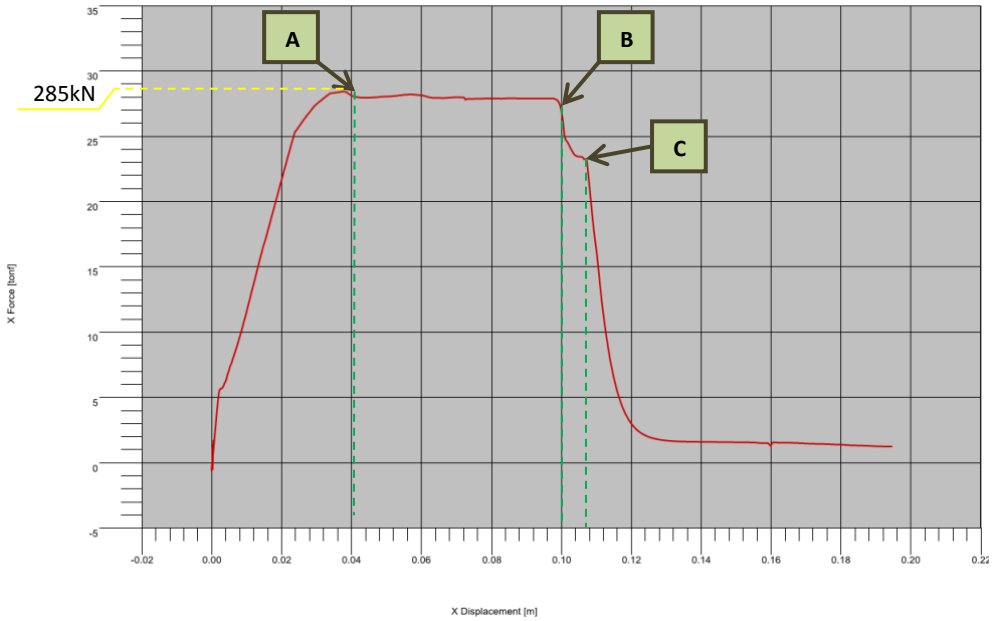


Figura 17 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

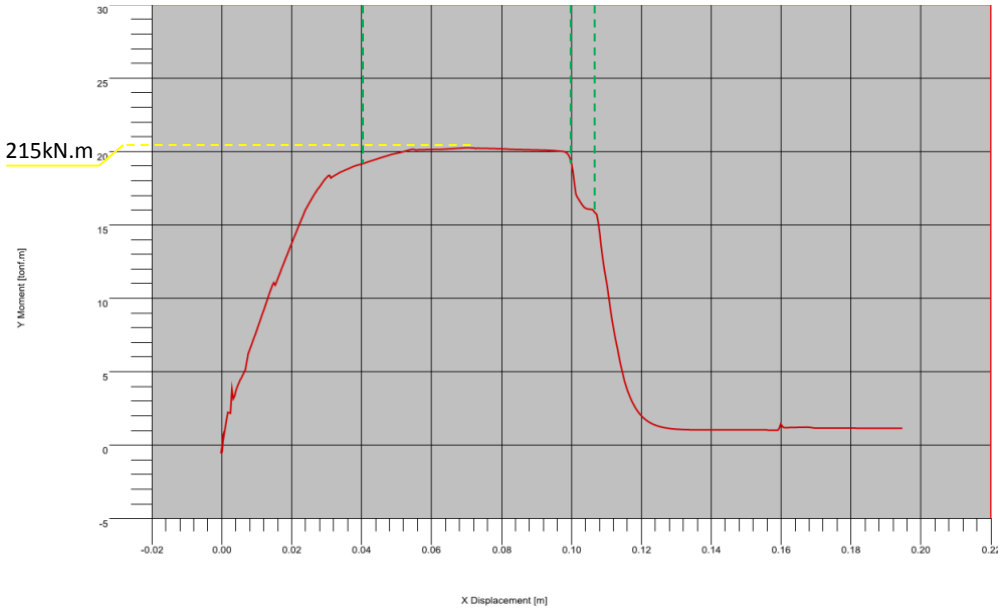
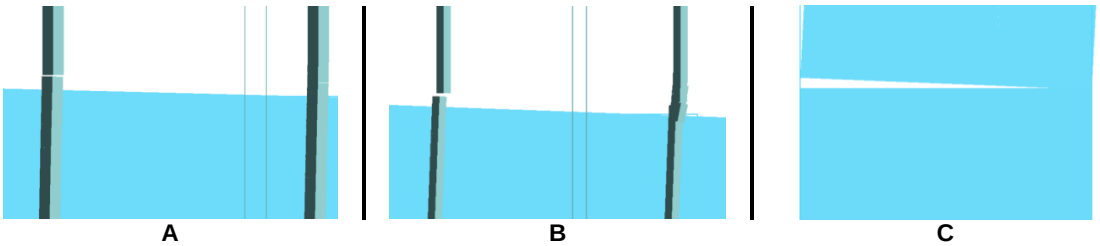


Figura 18 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar



A
Ponto de rotura inicial dos ferrolhos

B
Ponto de rotura total dos ferrolhos

C
Ponto de rotura do pilar

Figura 19 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C

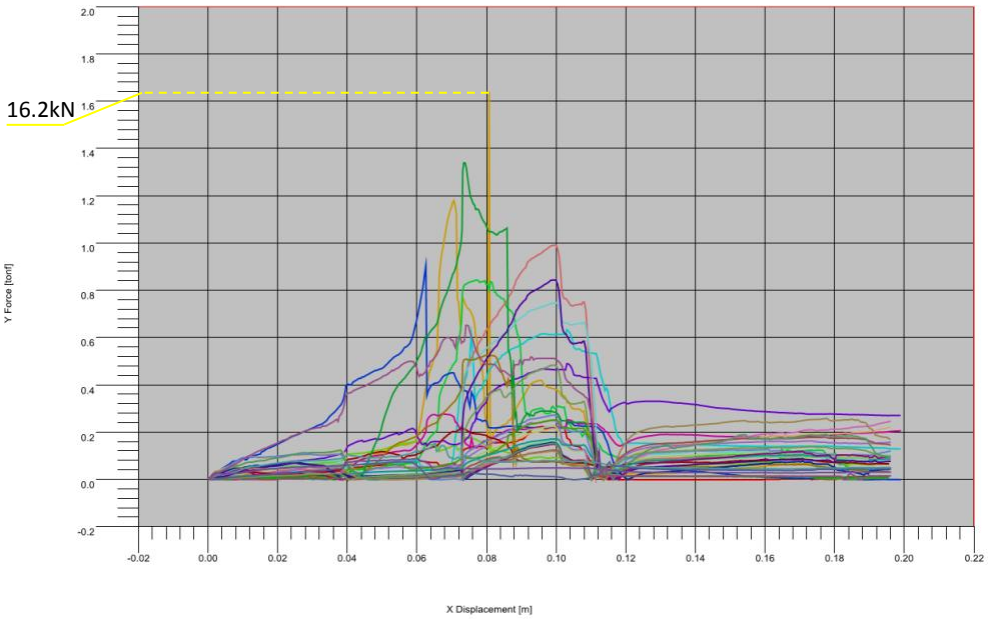


Figura 20 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

4.5. H=3m; Ø=20mm

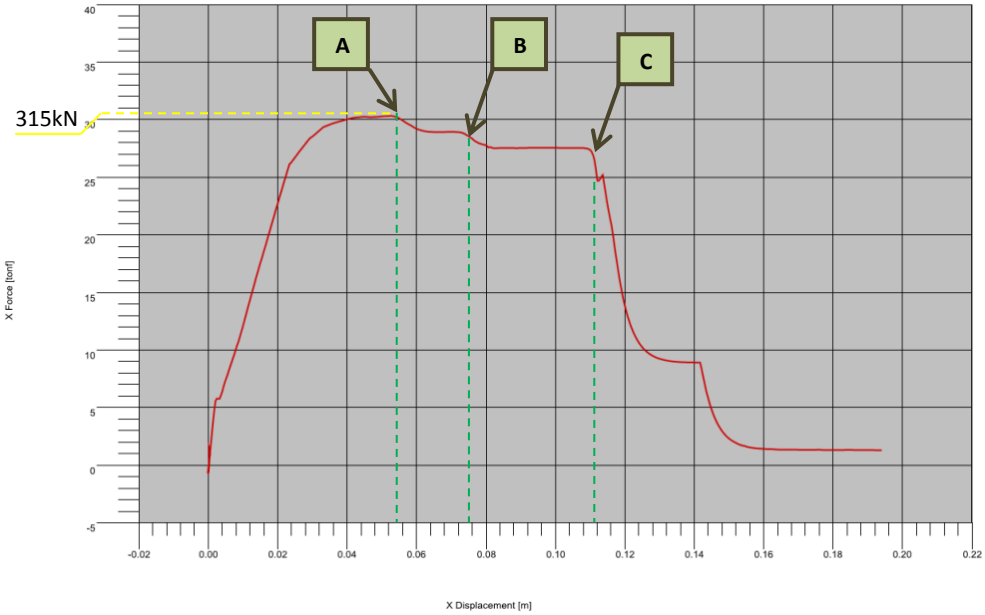


Figura 21 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

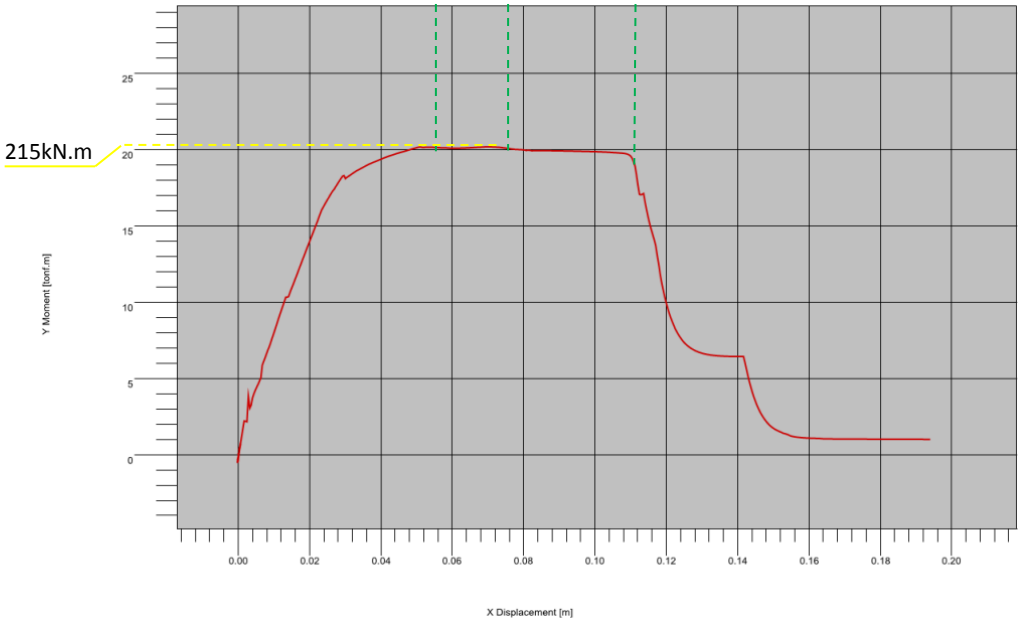
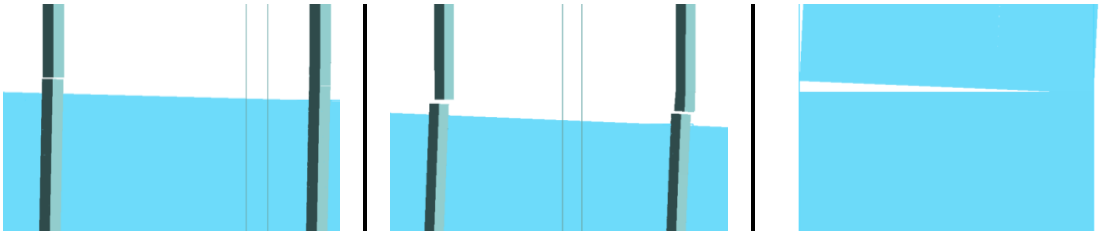


Figura 22 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar



A
Ponto de rotura inicial dos ferrolhos

B
Ponto de rotura total dos ferrolhos

C
Ponto de rotura do pilar

Figura 23 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C

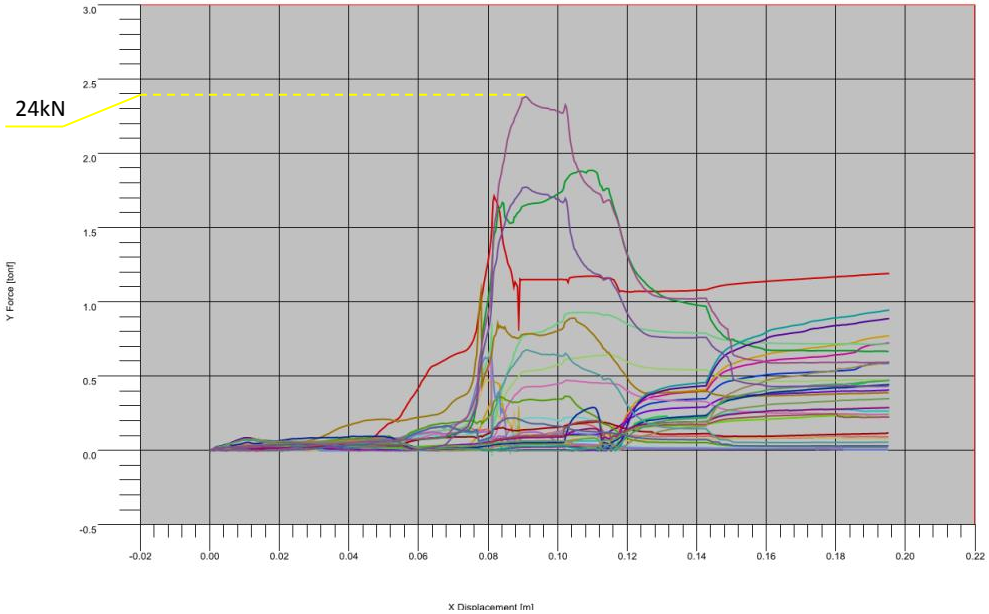


Figura 24 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

4.6. H=4m; Ø=10mm

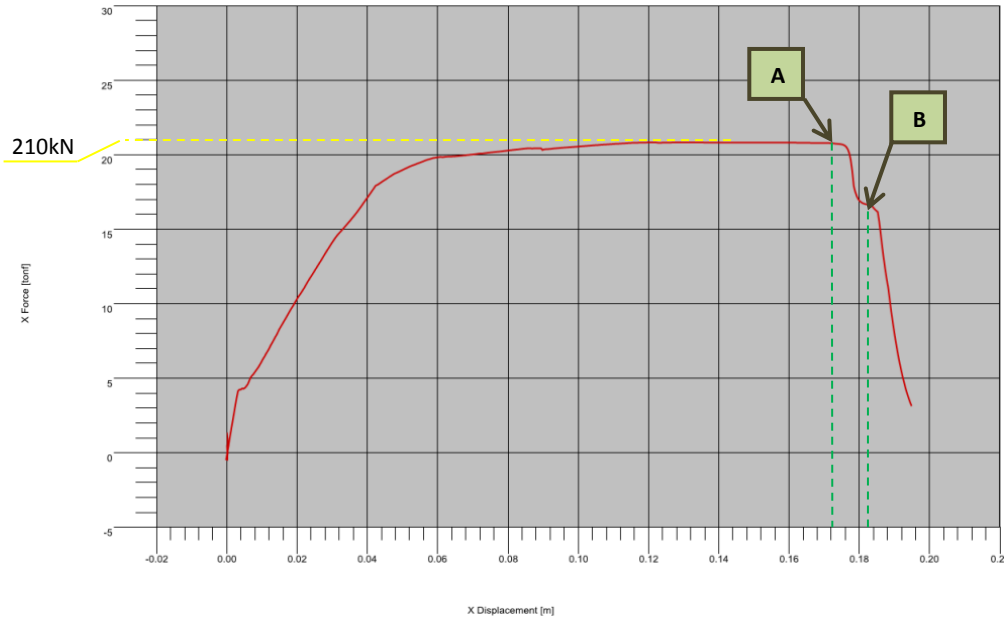


Figura 25 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

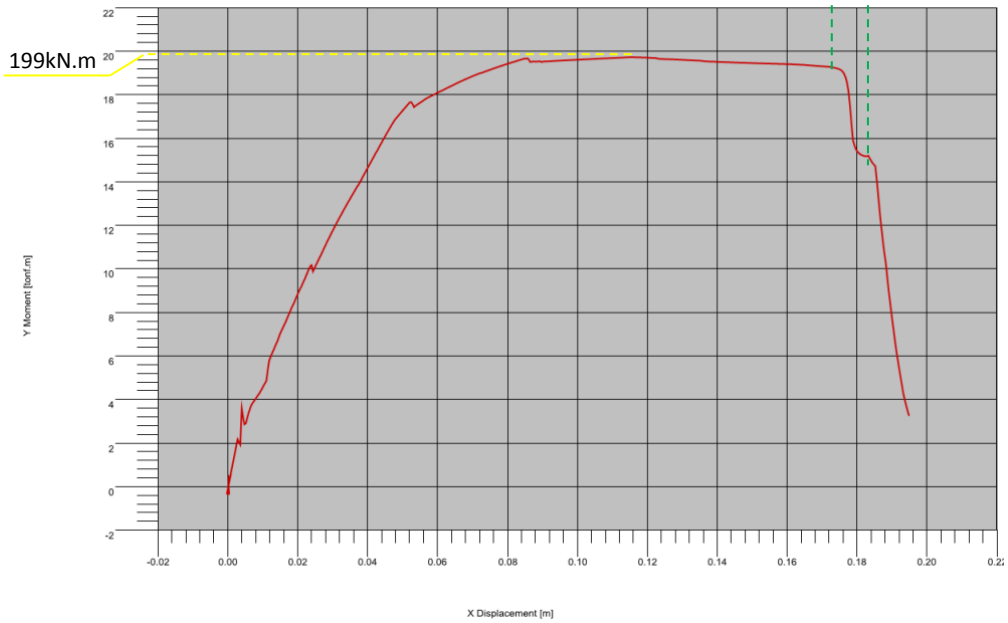


Figura 26 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar

A
Ponto de rotura inicial dos ferrolhos

B
Ponto de rotura do pilar

Figura 27 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A e B

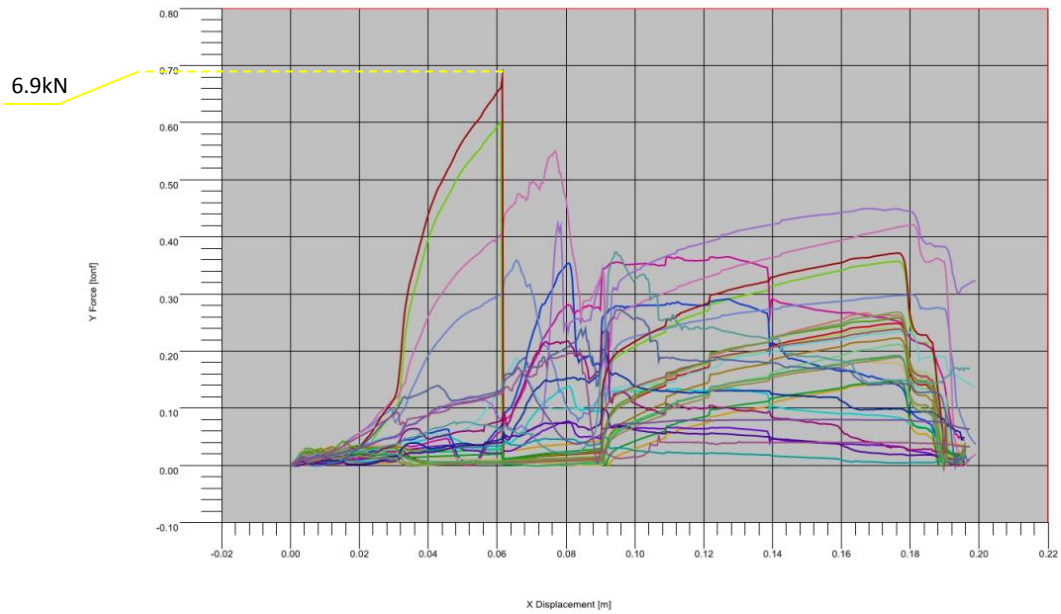


Figura 28 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

4.7. H=4m; Ø=15mm

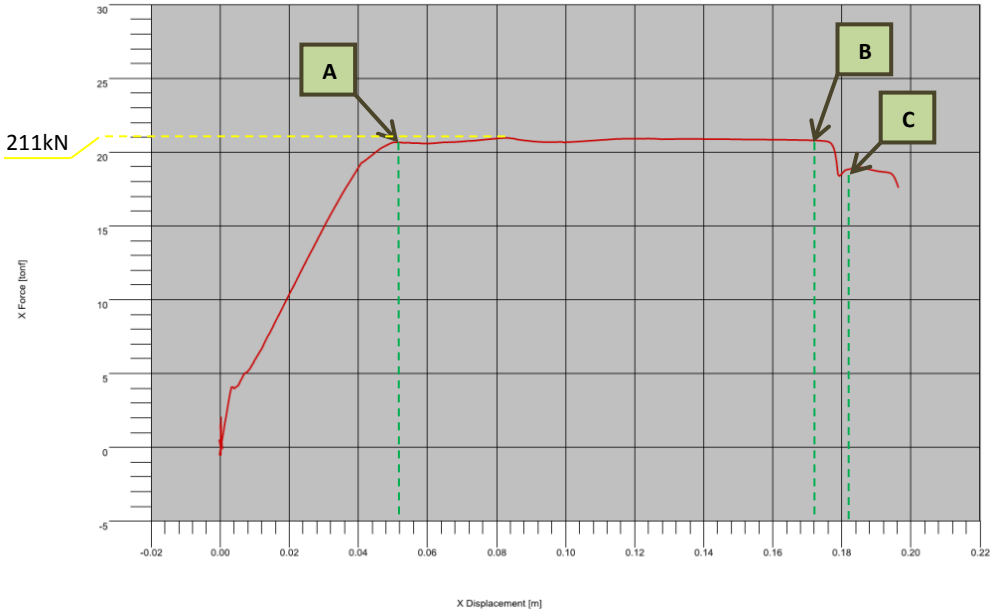


Figura 29 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

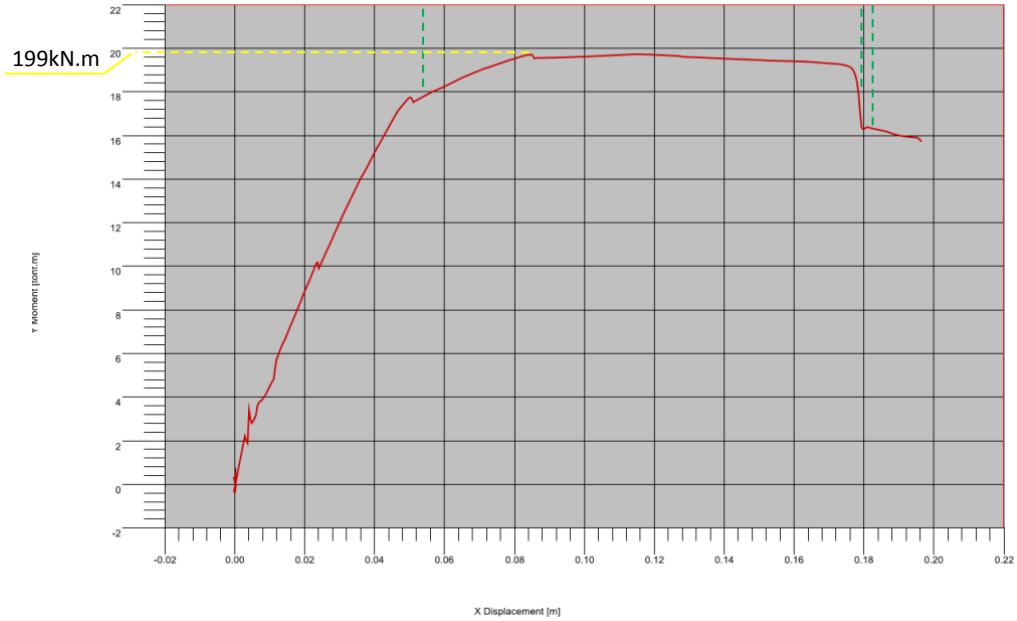
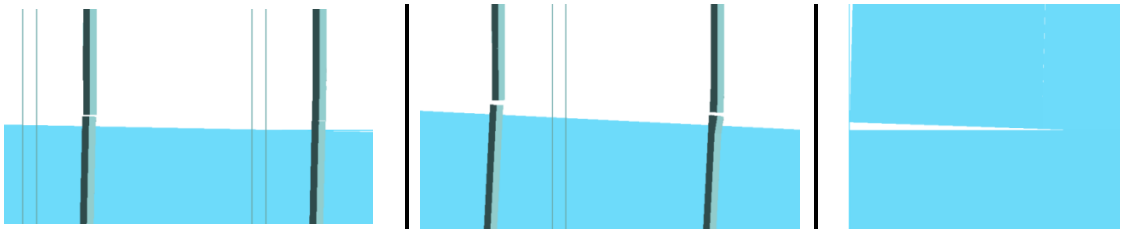


Figura 30 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar



A
Ponto de dano inicial dos ferrolhos

B
Ponto de dano final dos ferrolhos

C
Ponto de dano no pilar

Figura 31 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C

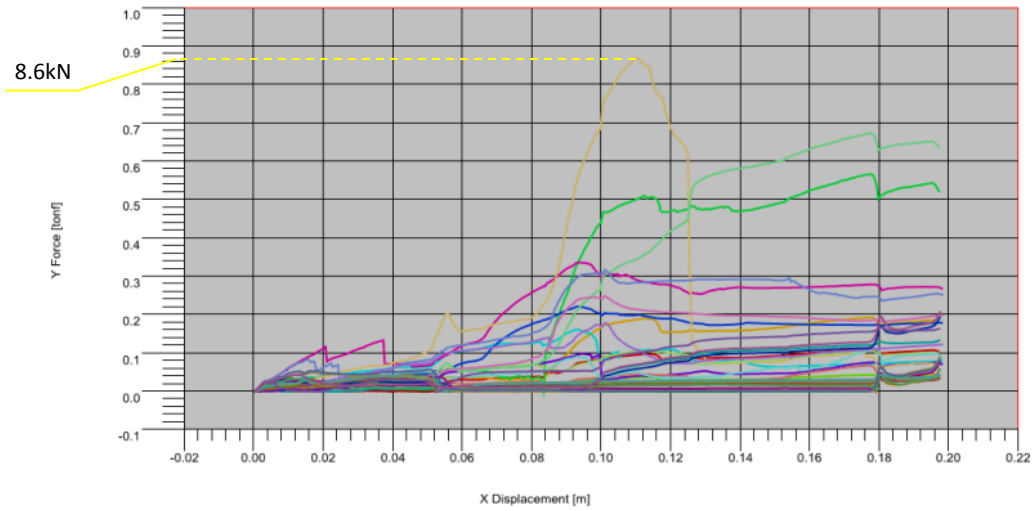


Figura 32 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

4.8. H=4m; Ø=20mm

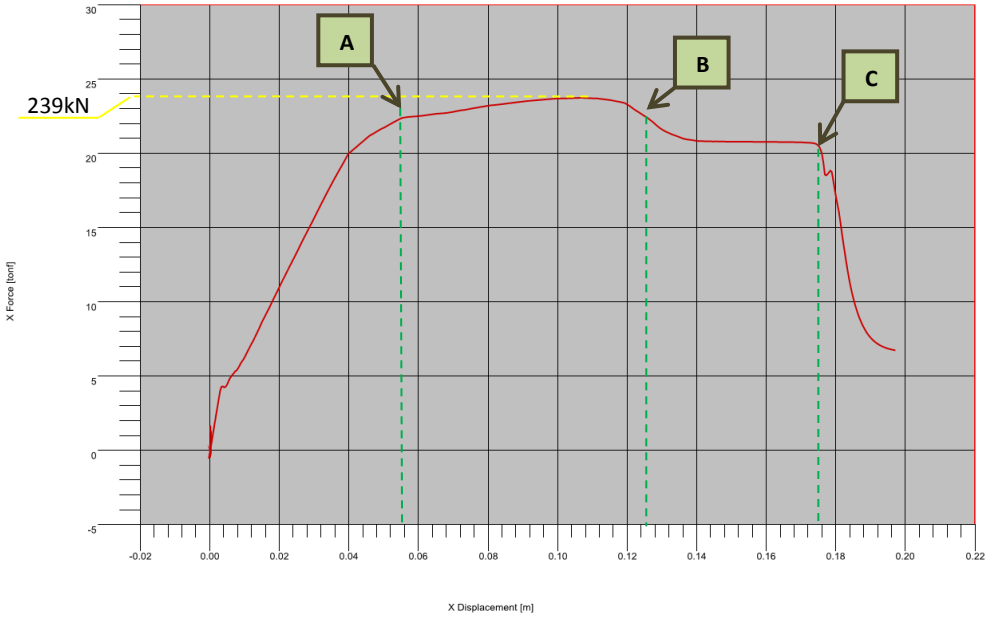


Figura 33 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

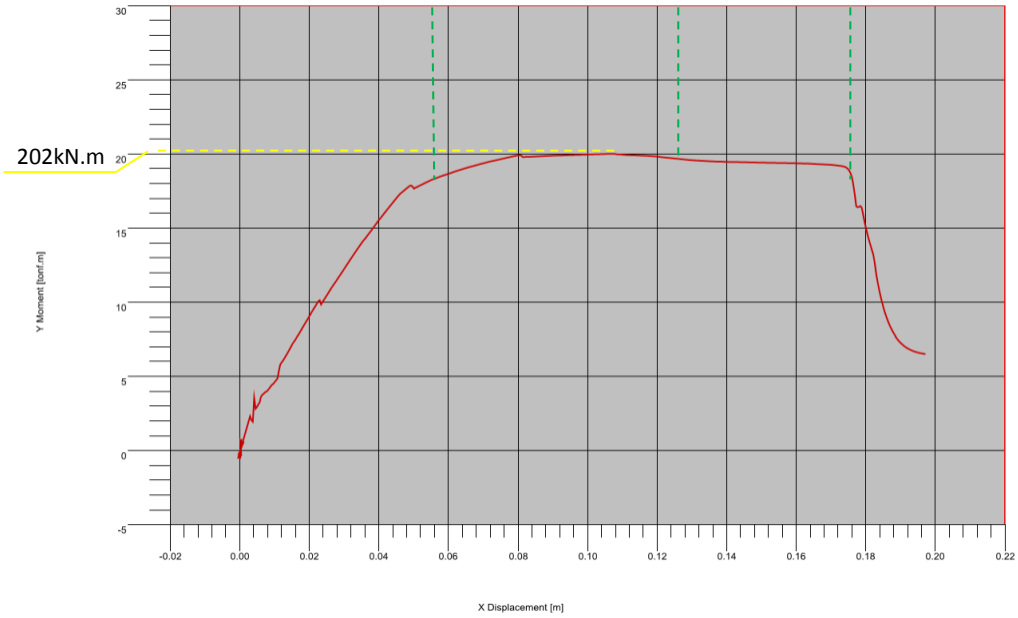
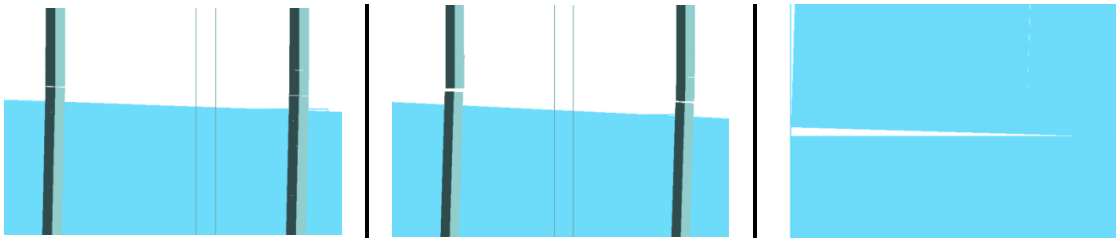


Figura 34 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar



A
Ponto inicial de dano nos ferrolhos

B
Ponto intermédio de dano nos ferrolhos

C
Ponto de dano no pilar

Figura 35 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C

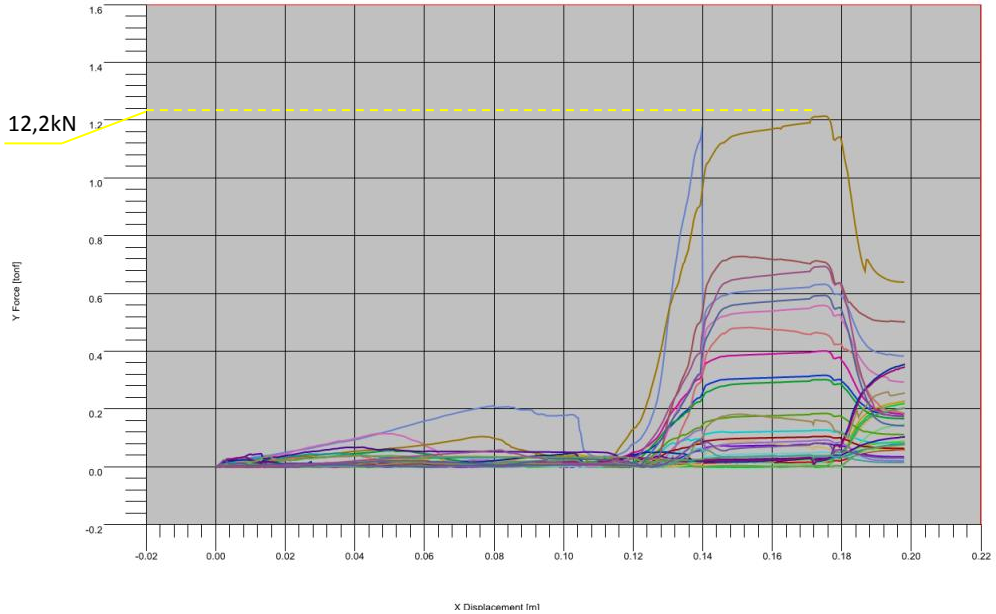


Figura 36 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

4.9. H=5m; Ø=10mm

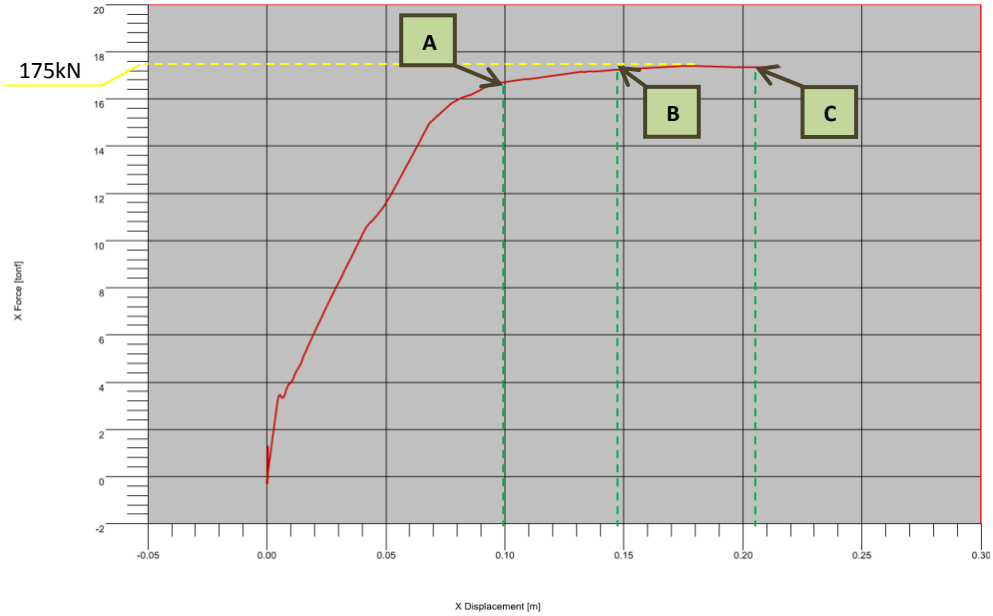


Figura 37 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

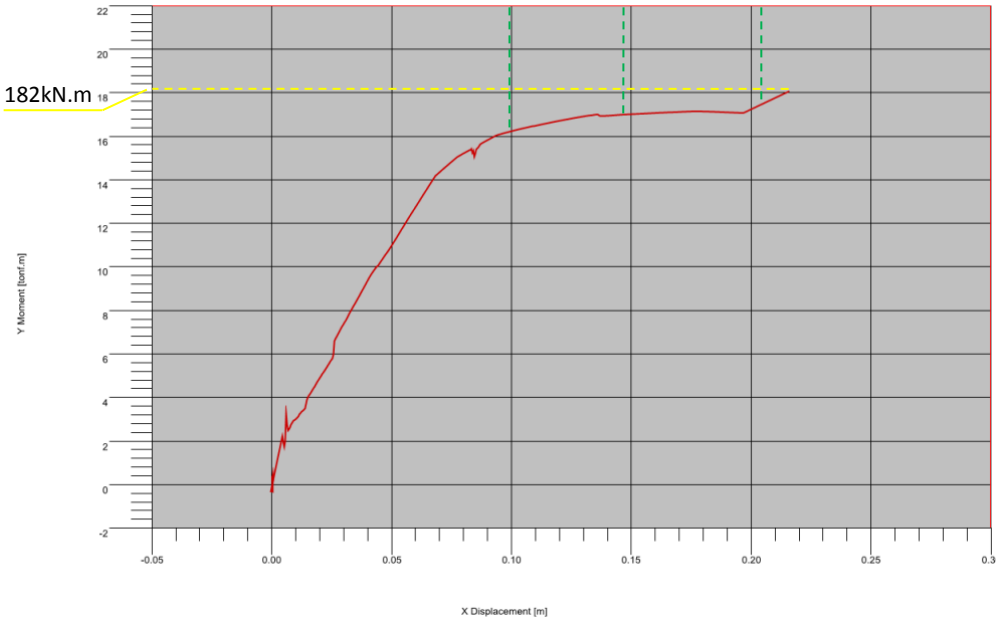
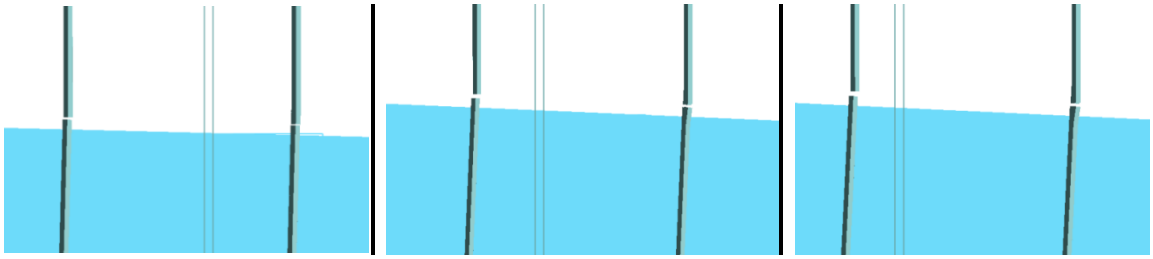


Figura 38 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar



A
Ponto inicial de dano nos ferrolhos

B
Ponto intermédio de dano nos ferrolhos

C
Ponto final de dano nos ferrolhos

Figura 39 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C

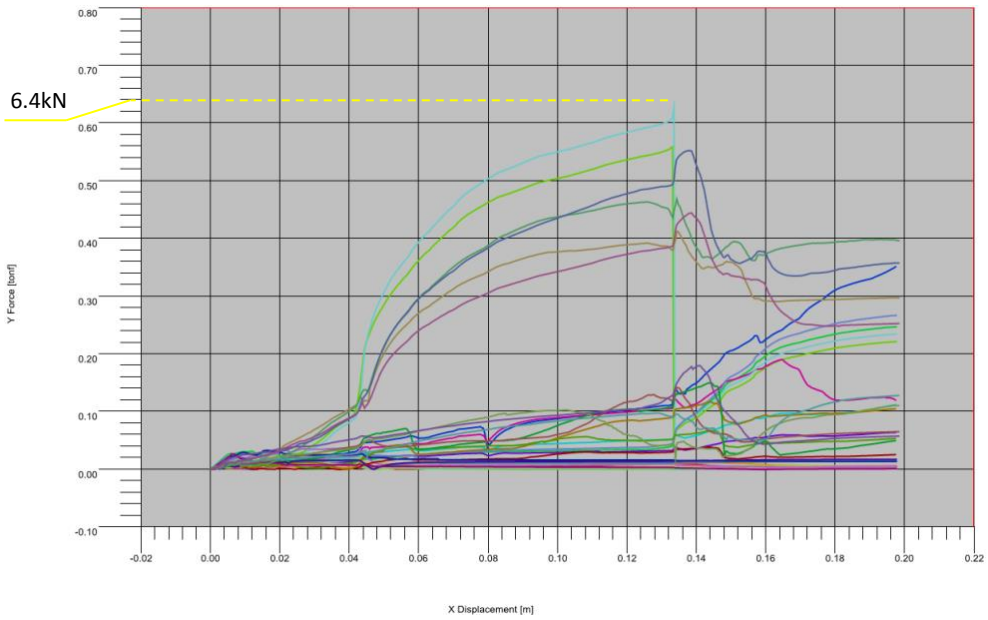


Figura 40 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

4.10. H=5m; Ø=15mm

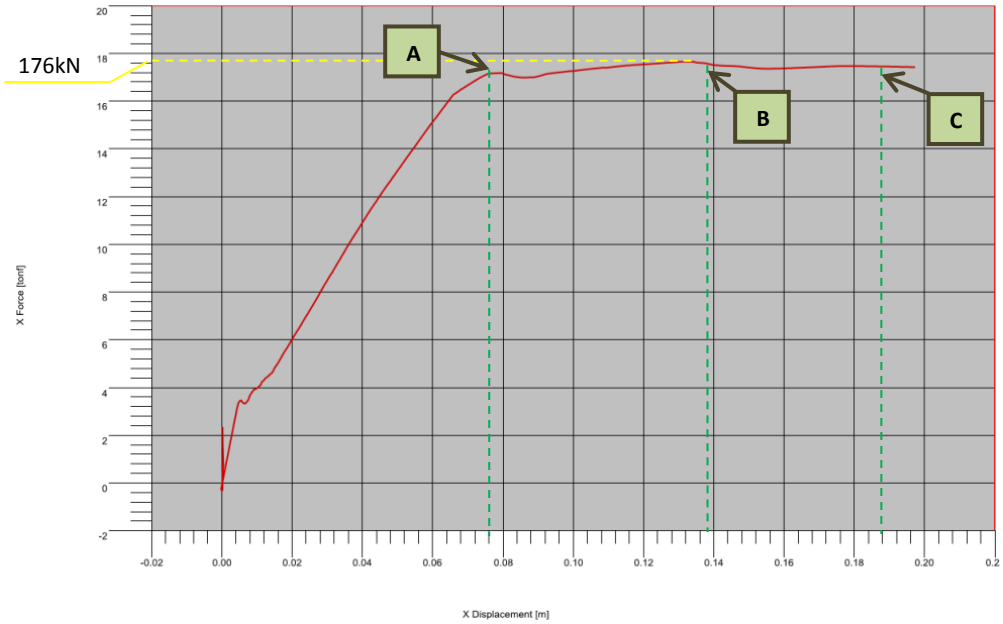


Figura 41 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

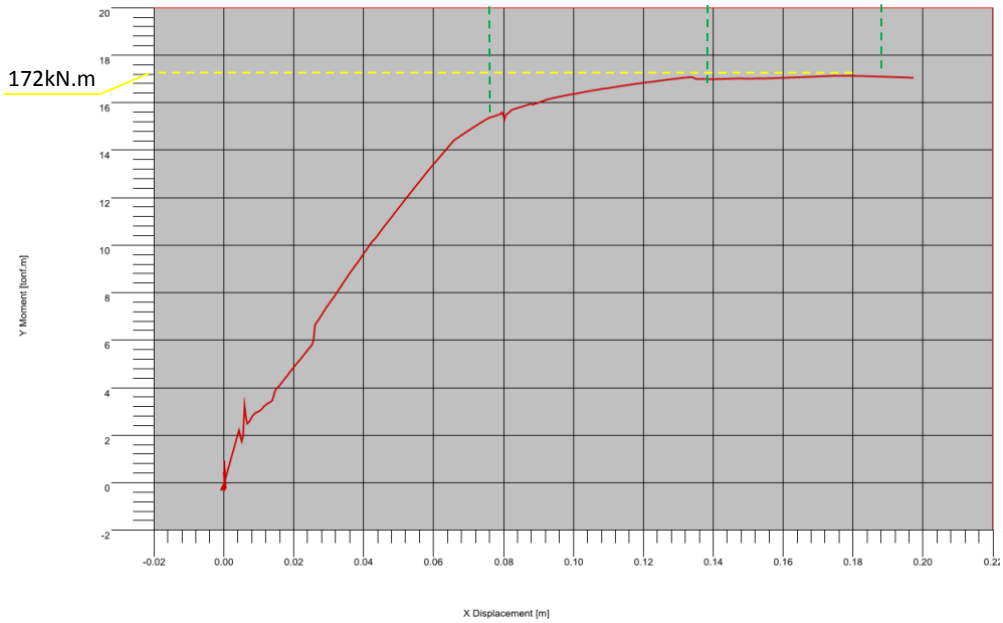
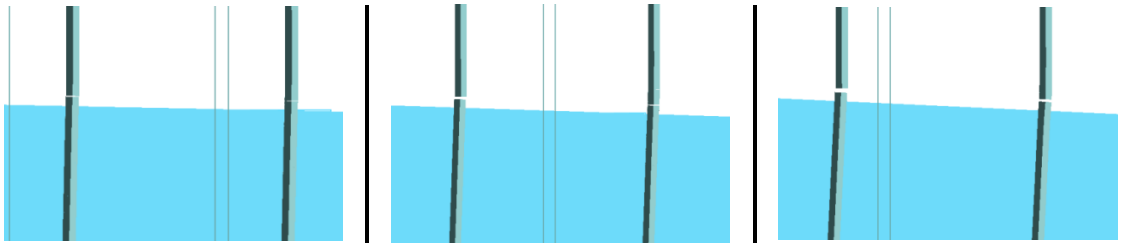


Figura 42 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar



A
Ponto inicial de dano nos ferrolhos

B
Ponto intermédio de dano nos ferrolhos

C
Ponto final de dano nos ferrolhos

Figura 43 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C

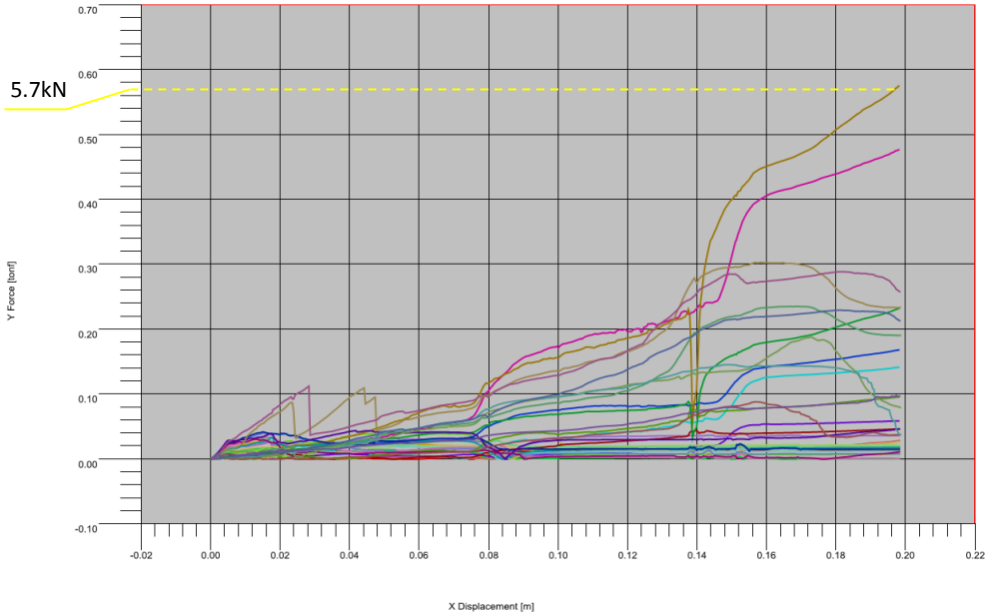


Figura 44 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

4.11. H=5m; Ø=20mm

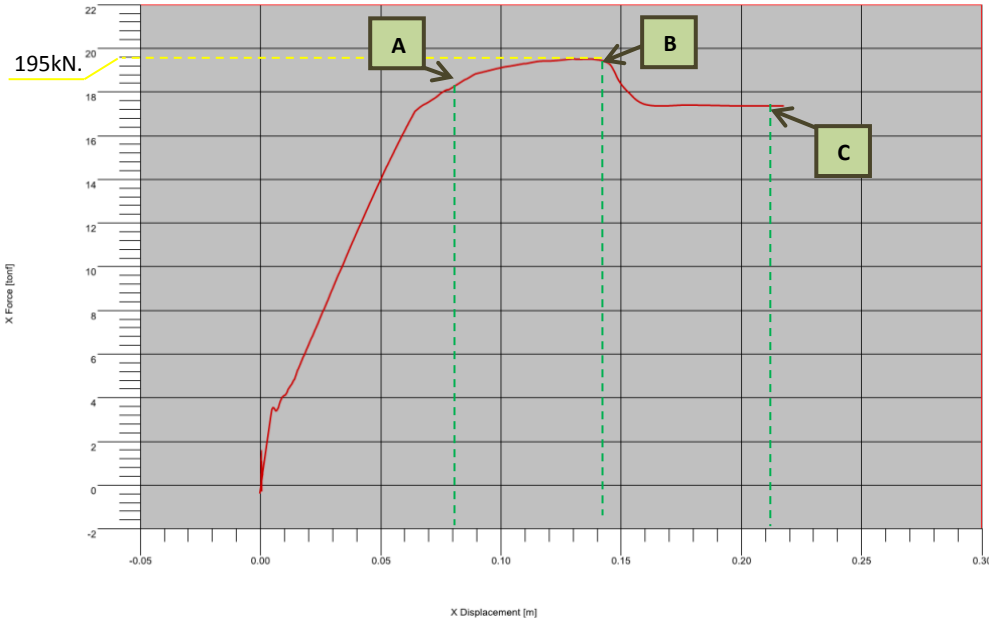


Figura 45 - Força de corte na base do pilar e o descolamento no topo do pilar

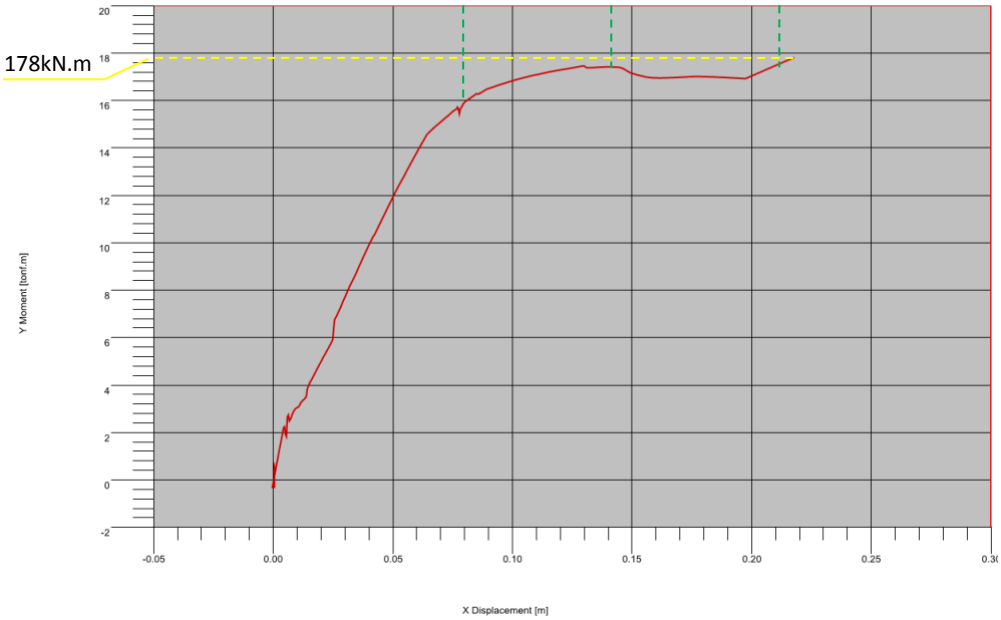
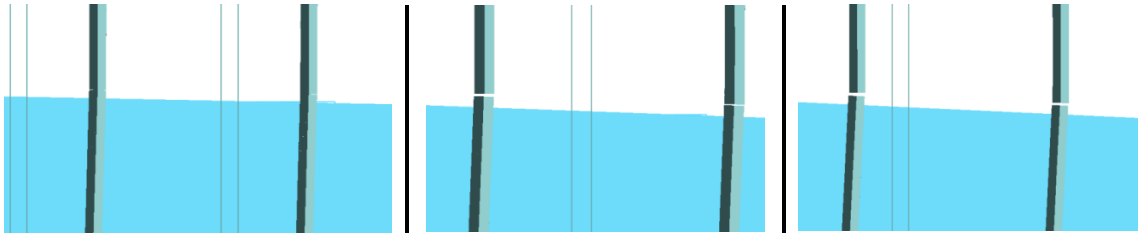


Figura 46 - Momento na base do pilar e deslocamento no topo do pilar



A
Ponto inicial de dano nos ferrolhos

B
Ponto intermédio de dano nos ferrolhos

C
Ponto de dano final nos ferrolhos

Figura 47 – Ilustração do comportamento do modelo numérico nos pontos A, B e C

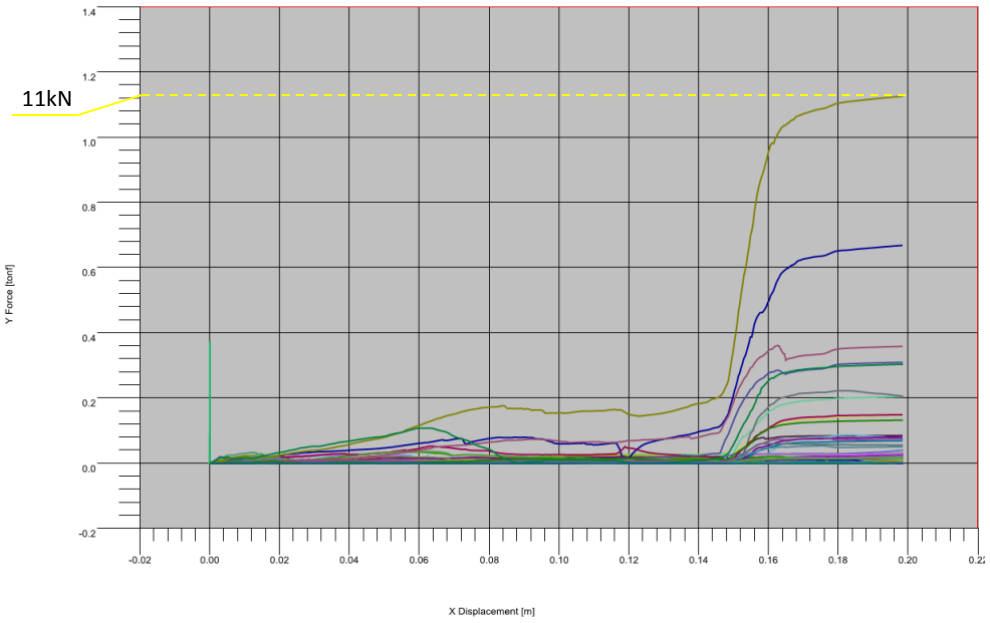


Figura 48 - Força de corte no ferrolho e o deslocamento no topo do pilar

5. CONCLUSÕES

Em virtude dos resultados apresentados no capítulo anterior é possível perceber que a ligação apresenta comportamentos distintos ao variar as suas caracterícsticas estruturais e geométricas.

Levando-se em consideração esses aspectos e por observação da Figura 29 e da Figura 30, pode-se dizer que a roptura da ligação acontece de forma consistente até à utilização de pilares com 4 metros de altura e ferrolhos com 15 mm de diâmetro. Esta configuração (H4Ø15) é a combinação que, contrariamente ao que acontecia até então, apresenta danos ao nível dos ferrolhos sem originar roptura completa da ligação pilar-tabuleiro.

Pela observação dos aspectos analisados foi criada a Tabela 2 que é representativa do momento máximo (M_{pilar}) e da força de corte máxima (V_{pilar}) na base do pilar e da força de corte máxima nos ferrolhos (V_{ferro}), para as várias combinações estruturais.

Tabela 2 – Resumo dos esforços

H Altura do Pilar (m)	**Ø** Diâmetro dos Ferrolhos (mm)	**V_{pilar}** Força de corte máxima na base do pilar (kN)	**M_{pilar}** Momento máximo na base do pilar (kN.m)	**V_{ferro}** Força de corte máxima nos ferrolhos (kN)
2	10	465	219	17,5
	15	470	220	25,0
	20	Falta correr	Falta correr	Falta correr
3	10	280	205	9,6
	15	285	215	16,2
	20	315	215	24,0
4	10	210	199	6,9
	15	211	199	8,6
	20	239	202	12,2
5	10	175	182	6,4
	15	176	172	5,7
	20	195	178	11

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. Ferreira, A.: *Identificação Modal e Actualização de Modelos de Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Dezembro 2013;

[2]. Valentim, N.: *Análise do Comportamento Dinâmico em Pontes Pedonais*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Dezembro 2012;

[3]. Gohel, Vikas, Paresh V. Patel e Digesh Joshi: *Analysis of Frame using Applied Element Method (AEM)*. Procedia Engineering, 51:176–183, 2013, ISSN 1877-7058;

[4]. Applied Science International, Advanced Nonlinear Dynamic Analysis Simplified for Everyday Engineers, Extreme Loading for Structures, 2010 Disponível em www.extremeloading.com.