



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL

UMA INVESTIGAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE BARRAS DE AÇO DE SEÇÃO “T” SUJEITAS À FLEXÃO COMPOSTA

AUTOR: WELBER MAGALHÃES CARVALHO

Orientador: Prof. Dr. Antônio Maria Claret de Gouvêia

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Ouro Preto, agosto de 2002.

“Se enxerguei longe,
é porque subi em
ombros de gigantes.”

Issac Newton

A meu pai, mãe e a minha
querida Renata.

Agradecimentos

“O pesquisador que não souber o
que está procurando não
compreenderá o que encontrar.”
Claude Bernard, filósofo francês

À minha família;

Aos meus padrinhos Paulo e Jussara;

Ao professor Claret, pelos ensinamentos e orientação;

Aos professores Ernani C. Araújo, Luiz F. L. Ribeiro e Márcia V. M. Reis, pelos ensinamentos;

Ao professor Walter Dornelas e Róvia pela paciência e ajuda;

Aos professores e funcionários do DECIV, Escola de Minas;

À Escola de Minas, pelas virtudes acadêmicas;

Aos colegas de mestrado;

Ao pessoal do LARIN;

À Republica UPA, Deuses e Convento;

Àquelas pessoas que, de alguma maneira, fizeram parte desta caminhada em Ouro Preto aos amigos;

As pessoas que não me recordo, mas que sabem que nunca deixaria de agradecer-lhes;

À Fundação Gorceix, pela ajuda financeira.

RESUMO

Nesse trabalho, descreve-se os resultados de uma investigação da resistência ao fogo de barras de aço de seção “I” sujeita à flexão composta com o emprego do Método de Elementos Finitos, implementado no VULCAN. Em uma primeira etapa, a pesquisa de relações paramétricas para o cálculo da temperatura crítica em barra flexo-comprimidas de aço bi-rotulados, rotulados-engastados e bi-engastados à rotação, sendo o carregamento variado para quatro Razões da carga máxima. Os resultados são equações paramétricas para o cálculo da temperatura crítica de barras flexo-comprimidas de aço sem proteção em função de um fator adimensional.

Em uma segunda etapa, são pesquisadas curvas de resistência ao fogo para barra flexo-comprimidas de aço de perfis usuais na prática das construções de edifícios de andares múltiplos. As barras flexo-comprimidas são parcialmente protegidas (alma ou mesas protegidas), sendo as condições de extremidade são as da barra bi-rotulada. Foram examinadas duas situações de carregamento (diagramas de momentos fletores retangular e triangular combinado com carga axial) à temperatura ambiente para a carga solicitante em situação de incêndio. Diversas conclusões de caráter prático são apresentadas.

ABSTRACT

In this work, a steel columns fire resistance investigation through the Finite Element Method implemented in the software VULCAN is presented. In a first stage, the investigation of parametric relations to determine critical temperatures and four load ratios of simply bars with simply supported ends, one end fixed and the other pinned and both ends fixed steel columns is described. Two loading situations were considered (moment diagrams rectangular and triangular plus axial load) in fire are examined. The results are parametric equations to calculate critical temperatures of steel columns without passive fire protection as a function of a dimensional factor. In a second stage, fire resistance curves of multi stories buildings commonly used steel columns were investigated. These columns are partially fire protected (webs or flanges protected) being the end conditions that of a simply supported bar with several loadings. Practical conclusions are addressed.

SUMÁRIO

	Página
Agradecimentos.....	4
Resumo.....	5
Abstract.....	6
Lista de Figuras.....	9
Lista de Tabelas.....	23
Lista de Símbolos.....	27
 Capítulo I - GENERALIDADES	 1
1.1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.2 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA.....	7
1.3 - PROCESSO METODOLÓGICO.....	8
1.4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
 Capítulo II - PEÇAS SUBMETIDAS À FLEXO-COMPRESSÃO	 10
2.1 - INTRODUÇÃO.....	10
2.2 - MODOS DE COLAPSO.....	12
2.3 - EQUAÇÕES DE INTERAÇÃO.....	16
 Capítulo III - ESTUDOS PARAMÉTRICOS DE BARRAS FLEXO- COMPRIMIDAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	 18
3.1 - INTRODUÇÃO.....	18
3.2 - ESTUDOS PARAMÉTRICOS.....	18
3.3 - TEMPERATURA CRÍTICA DE BARRAS FLEXO-COMPRIMIDAS BI-ROTULADOS SEM PROTEÇÃO.....	23

3.4 - TEMPERATURA CRÍTICA DE BARRAS FLEXO-COMPRIMIDAS BI-ENGASTADAS À ROTAÇÃO E ENGASTADAS-ROTULADAS, SEM PROTEÇÃO.....	34
3.5 - TEMPERATURA CRÍTICA DE BARRAS FLEXO-COMPRIMIDAS DE AÇO COM PROTEÇÃO PARCIAL EM 40% DO COMPRIMENTO CENTRAL.....	52
 Capítulo IV - RESISTÊNCIA AO FOGO DE BARRAS FLEXO-COMPRIMIDAS DE AÇO, BI-ROTULADOS E SEM PROTEÇÃO.....	72
4.1 - INTRODUÇÃO.....	72
4.2 - PROCESSO METODOLÓGICO.....	73
4.3 - CURVAS DE RESISTÊNCIA.....	75
4.3.1 - MOMENTOS FLETORES DE DIAGRAMA RETANGULAR.....	75
4.3.2 - MOMENTOS FLETORES DE DIAGRAMA TRIANGULAR.....	91
 Capítulo V - RESISTÊNCIA AO FOGO DE BARRAS FLEXO-COMPRIMIDAS DE AÇO, BI-ROTULADAS E COM PROTEÇÃO.....	105
5.1 - INTRODUÇÃO.....	105
5.2 - MOMENTOS FLETORES DE DIAGRAMA RETANGULAR.....	106
5.2.1 - PROTEÇÃO DA ALMA.....	106
5.2.2 - PROTEÇÃO DAS MESAS.....	118
5.3 - MOMENTOS FLETORES DE DIAGRAMA TRIANGULAR.....	129
5.3.1 - PROTEÇÃO DA ALMA.....	129
5.3.2 - PROTEÇÃO DAS MESAS.....	140
 Capítulo VI - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	150
6.1 – CONCLUSÕES.....	150
6.2 – SUGESTÕES.....	152
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154
 ANEXOS.....	158

LISTA DE FIGURAS

	Página
 Capítulo II	
Figura 2.1 - Elementos flexo - comprimidos (viga-coluna).....	10
Figura 2.2 - Carregamento em vigas-colunas.....	11
Figura 2.3 - Condições de extremidade(barras isoladas).....	12
Figura 2.4 - Instabilidade plástica por flexo - compressão, formação de rotulas plásticas.....	13
Figura 2.5 - Instabilidade em um plano:(a) para o eixo de menor inércia, (b) para o eixo de maior inércia.....	14
Figura 2.6 - Instabilidade por flexo torção.....	15
figura 2.7 - Flambagem local: (a) flambagem do flange comprimido, (b) flambagem devido ao cisalhamento.....	16
 Capítulo III	
Figura 3.1 - Deslocamento versus temperatura para uma barra flexo-comprimida de aço típico.....	19
Figura 3.2 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo de maior inércia, sem proteção.....	30
Figura 3.3 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo de maior inércia, sem proteção.....	30
Figura 3.4 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo de maior inércia, sem proteção.....	31
Figura 3.5 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo de maior inércia, sem proteção.....	31

Figura 3.6 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo de menor inércia, sem proteção.....	32
Figura 3.7 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo de menor inércia, sem proteção.....	32
Figura 3.8 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo de menor inércia, sem proteção.....	33
Figura 3.9 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo de menor inércia, sem proteção.....	33
Figura 3.10 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.....	44
Figura 3.11 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.....	44
Figura 3.12 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.....	45
Figura 3.13 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.....	45
Figura 3.14 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.....	46
Figura 3.15 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.....	46

Figura 3.16 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.....	47
Figura 3.17 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.....	47
Figura 3.18 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.....	48
Figura 3.19 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,6 e atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.....	48
Figura 3.20 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,7 e atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.....	49
Figura 3.21 - Temperaturas críticas para barras flexo-comprimidas engastados-rotulados, com razão de carga 0,8 e atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.....	49
Figura 3.22 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,5 e atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.....	50
Figura 3.23 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,6 e atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.....	50
Figura 3.24 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,7 e atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.....	51
Figura 3.25 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,8 e atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.....	51
Figura 3.26 - Proteção parcial em 40% do vão central.....	52

Figura 3.27 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	60
Figura 3.28 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	60
Figura 3.29 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	61
Figura 3.30 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	61
Figura 3.31 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	62
Figura 3.32 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	62
Figura 3.33 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	63
Figura 3.34 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	63
Figura 3.35 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	64
Figura 3.36 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	64

Figura 3.37 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	65
Figura 3.38 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	65
Figura 3.39 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	66
Figura 3.40 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	66
Figura 3.41 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	67
Figura 3.42 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	67
Figura 3.43 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	68
Figura 3.44 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	68
Figura 3.45 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	69
Figura 3.46 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.....	69

Figura 3.47 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	70
Figura 3.48 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	70
Figura 3.49 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	71
Figura 3.50 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.....	71

Capítulo IV

Figura 4.1 - Tipos de barras flexo-comprimidas analisadas.....	76
Figura 4.2 - Curva de resistência ao fogo de projeto.....	77
Figura 4.3 - Curvas resistência ao fogo do perfil CVS 450 x 216, bi-rotulado, sem proteção.....	81
Figura 4.4 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 450 x 216, bi-rotulado, sem proteção.....	82
Figura 4.5 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 450 x 216, bi-rotulado, sem proteção.....	83
Figura 4.6 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 450 x 216, bi-rotulado, sem proteção.....	84
Figura 4.7 - Curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216 sem proteção.....	85
Figura 4.8 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 850 x 414, bi-rotulado, sem proteção.....	86
Figura 4.9 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 850 x 414, bi-rotulado, sem proteção.....	87
Figura 4.10 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 850 x 414, bi-rotulado, sem proteção.....	88

Figura 4.11 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 850 x 414, bi-rotulado, sem proteção.....	89
Figura 4.12 - Curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 850 x 414.....	90
Figura 4.13 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 sem proteção de comprimento 2 m.....	95
Figura 4.14 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 sem proteção de comprimento 4 m.....	96
Figura 4.15 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 sem proteção de comprimento 6 m.....	97
Figura 4.16 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 sem proteção de comprimento 8 m.....	98
Figura 4.17 - Curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216.....	99
Figura 4.18 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 sem proteção de comprimento 2 m.....	100
Figura 4.19 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 sem proteção de comprimento 4 m.....	101
Figura 4.20 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 sem proteção de comprimento 6 m.....	102
Figura 4.21 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 sem proteção de comprimento 8 m.....	103
Figura 4.22 - Curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 850 x 414 sem proteção.....	104

Capítulo V 105

Figura 5.1 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 2 m.....	110
Figura 5.2 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 4 m.....	111
Figura 5.3 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 6 m.....	112

Figura 5.4 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 8 m.....	113
Figura 5.5 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 2 m.....	114
Figura 5.6 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 4 m.....	115
Figura 5.7 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 6 m.....	116
Figura 5.8 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 8 m.....	117
Figura 5.9 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 2 m.....	121
Figura 5.10 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 4 m.....	122
Figura 5.11 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 6 m.....	123
Figura 5.12 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 8 m.....	124
Figura 5.13 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 2 m.....	125
Figura 5.14 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 4 m.....	126
Figura 5.15 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 6 m.....	127
Figura 5.16 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 8 m.....	128
Figura 5.17 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 2 m.....	132
Figura 5.18 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 4 m.....	133
Figura 5.19 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 6 m.....	134

Figura 5.20 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 8 m.....	135
Figura 5.21 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 2 m.....	136
Figura 5.22 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 4 m.....	137
Figura 5.23 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 6 m.....	138
Figura 5.24 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 8 m.....	139
Figura 5.25 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 2 m.....	142
Figura 5.26 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 4 m.....	143
Figura 5.27 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 6 m.....	144
Figura 5.28 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 8 m.....	145
Figura 5.29 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 2 m.....	146
Figura 5.30 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 4 m.....	147
Figura 5.31 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 6 m.....	148
Figura 5.32 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 8 m.....	149

Anexos

Figura 5.33 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 2m.....	159
Figura 5.34 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 4m.....	160

Figura 5.35 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 6 m.....	161
Figura 5.36 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 8 m.....	162
Figura 5.37 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 2 m.....	164
Figura 5.38 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 4 m.....	165
Figura 5.39 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 6 m.....	166
Figura 5.40 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 4 m.....	167
Figura 5.41 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 2 m.....	169
Figura 5.42 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 4 m.....	170
Figura 5.43 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 6 m.....	171
Figura 5.44 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 8 m.....	172
Figura 5.45 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 2 m.....	174
Figura 5.46 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 4 m.....	175
Figura 5.47 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 6 m.....	176
Figura 5.48 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 8 m.	177
Figura 5.49 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 2 m.	179
Figura 5.50 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 4 m.....	180

Figura 5.51 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 6 m.	181
Figura 5.52 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 8 m.	182
Figura 5.53 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 2 m.	184
Figura 5.54 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 4 m.	185
Figura 5.55 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 6 m.	186
Figura 5.56 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 8 m.	187
Figura 5.57 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 2 m.	189
Figura 5.58 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 4 m.	190
Figura 5.59 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 2 m.	191
Figura 5.60 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 8 m.	192
Figura 5.61 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 2 m.	194
Figura 5.62 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 4 m.	195
Figura 5.63 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 6 m.	196
Figura 5.64 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 8 m.	197
Figura 5.65 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 2 m.	199
Figura 5.66 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 4 m.	200

Figura 5.67 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 6 m.	201
Figura 5.68 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 8 m.	202
Figura 5.69 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 2 m.	204
Figura 5.70 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 4 m.....	205
Figura 5.71 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 6 m.....	206
Figura 5.72 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 8 m.....	207
Figura 5.73 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 2 m.	209
Figura 5.74 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 4 m.	210
Figura 5.75 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 6 m.	211
Figura 5.76 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 8 m.	212
Figura 5.77 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 2 m.	214
Figura 5.78 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 4 m.	215
Figura 5.79 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 3 m.	216
Figura 5.80 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 8 m.	217
Figura 5.81 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 2 m.	219
Figura 5.82 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 4 m.	220

Figura 5.83 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 6 m.	221
Figura 5.84 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 8 m.	222
Figura 5.85 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 2 m.	224
Figura 5.86 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 4 m.	225
Figura 5.87 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 6 m.	226
Figura 5.88 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 8 m.	227
Figura 5.89 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 2 m.	229
Figura 5.90 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 4 m.	230
Figura 5.91 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 6 m.	231
Figura 5.92 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 8 m.	232
Figura 5.93 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 2 m.	234
Figura 5.94 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 4 m.	235
Figura 5.95 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 6 m.	236
Figura 5.96 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 8 m.	237
Figura 5.97 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 2 m.	239
Figura 5.98 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 4 m.	240

Figura 5.99 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 6 m.	241
Figura 5.100 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 8 m.	242
Figura 5.101 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 2 m.	244
Figura 5.102 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 2 m.	245
Figura 5.103 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 6 m.	246
Figura 5.104 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 8 m.	247

LISTA DE TABELAS

	Página
Capítulo III	
Tabela 1 - Propriedades físicas e geométricas dos perfis.....	20
Tabela 2 - Propriedades físicas e geométricas dos perfis – continuação.....	21
Tabela 3 - Propriedades físicas e geométricas dos perfis – continuação.....	22
Tabela 4 - Cargas críticas.....	23
Tabela 5 - Carregamentos das barras flexo-comprimidas bi-rotuladas eixo maior de inércia.....	26
Tabela 6 - Carregamentos das barras flexo-comprimidas bi-rotuladas eixo menor de inércia.....	27
Tabela 7 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas eixo maior de inércia.	28
Tabela 8 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas eixo menor de inércia.	29
Tabela 9 - Carregamentos das barras flexo-comprimidas bi-engastadas para flexão em torno do eixo maior de inércia.	35
Tabela 10 - Carregamentos das barras flexo-comprimidas bi-engastados para flexão em torno do eixo menor de inércia.	36
Tabela 11 - Carregamentos das barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, para flexão em torno do eixo de maior inércia.	37
Tabela 12 - Carregamentos das barra flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, para flexão em torno do eixo de menor inércia.....	38
Tabela 13 - Temperaturas críticas, barras flexo-comprimidas bi-engastadas, para flexão em torno do eixo de maior inércia.	39
Tabela 14 - Temperaturas críticas, barras flexo-comprimidas bi-engastadas para flexão em torno do eixo de menor inércia.	40
Tabela 15 - Temperaturas críticas das barras flexo-comprimidas engastadas - rotuladas para flexão em torno do eixo de maior inércia.	41

Tabela 16 -Temperaturas críticas das barras flexo-comprimidas engastadas rotuladas para flexão em torno do eixo de menor inércia.	42
Tabela 17 - Equações lineares paramétricas para as barras flexo-comprimidas: bi-engastadas à rotação e engastadas-rotuladas, sem proteção e momento atuando em torno dos eixos principais de inércia.....	43
Tabela 18 -Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas com flexão em torno do eixo de maior inércia.	53
Tabela 19 -Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas com flexão em torno do eixo de menor inércia.	54
Tabela 20 -Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas com flexão em torno do eixo de maior inércia.	55
Tabela 21 -Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas com flexão em torno do eixo de menor inércia.	56
Tabela 22 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas com flexão em torno do eixo de maior inércia.	57
Tabela 23 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas com flexão em torno do eixo de menor inércia.	58
Tabela 24 - Equações lineares paramétricas para as barras flexo-comprimidas: bi-rotuladas, bi-engastadas e engastadas-rotuladas, com proteção e momento atuando em torno dos eixos principais de inércia e para as 4 Razões de carga axial.	59

Capítulo IV

Tabela 25 -Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas de aço em função da razão de carga.	74
Tabela 26 - Pontos notáveis das curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216.	79
Tabela 27 - Valores médio, mínimo e máximo de t_2 para o perfil CVS 450 x 216.....	79
Tabela 28 - Pontos notáveis das curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 850 x 414.	80
Tabela 29 - Valores médio, mínimo e máximo de t_2 para o perfil CVS 850 x 414.....	80
Tabela 30 - Pontos notáveis das curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216.	92

Tabela 31 - Valores médio, mínimo e máximo de t_2 para o perfil CVS 450 x 216.....	93
Tabela 32 - Pontos notáveis das curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 850 x 414.	93
Tabela 33 - Valores médio, mínimo e máximo de t_2 para o perfil CVS 850 x 414.....	94

Capítulo V

Tabela 34 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 450 x 216.....	108
Tabela 35 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 450 x 216.....	108
Tabela 36 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 850 x 414.....	109
Tabela 37 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 850 x 414.....	109
Tabela 38 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 450 x 216.....	119
Tabela 39 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 450 x 216.....	120
Tabela 40 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 850 x 414.....	120
Tabela 41 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 850 x 414.....	120
Tabela 42 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 450 x 216.....	130
Tabela 43 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 450 x 216.....	130
Tabela 44 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 850 x 414.....	131
Tabela 45 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 850 x 414.....	131

Tabela 46 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil	
CVS 850 x 414.	141
Tabela 47 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil	
CVS 850 x 414.	141

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Área da seção transversal.
- b_f - Largura da mesa.
- b_{20} - Espessura do elemento de placa à 20 °C.
- b_{θ} - Espessura do elemento de placa calculado pelo VULCAN.
- C_w - Constante de empenamento.
- d - Altura do perfil.
- e - Excentricidade da peça.
- e_c - Perna efetiva do cordão de solda.
- E_{20} - Módulo de elasticidade à 20 °C.
- E_{θ} - Módulo de elasticidade recalculado pelo VULCAN.
- f_y - Limite de escoamento.
- h - Altura da alma.
- I_x - Inércia da seção transversal em relação ao maior eixo.
- I_y - Inércia da seção transversal em relação ao menor eixo.
- I_t - Inércia à torção.
- L - Comprimento da peça.
- m - Massa.
- M - Momento atuante.
- θ_c - Temperatura crítica.
- P - Esforço normal de compressão.
- r_x - Raio de giração em relação ao maior eixo de inércia x.
- r_y - Raio de giração em relação ao menor eixo de inércia y.
- r_t - Raio de giração total da peça.
- t_1 - Tempo correspondente à carga máxima.
- t_2 - Tempo correspondente para a razão de carga de 0,3.
- t_3 - Tempo correspondente para a razão de carga de 0,1.

t_f - Espessura da mesa comprimida.

t_w - Espessura da alma.

U - Área de pintura por metro linear.

Z_x - Módulo plástico em relação ao maior eixo de inércia.

Z_y - Módulo plástico em relação ao maior eixo de inércia.

W_x - Módulo elástico em relação à maior eixo de inércia.

W_y - Módulo elástico em relação ao menor eixo de inércia.

γ_{60} - Tempo de resistência ao fogo, igual a 60 minutos dada uma relação de e/d.

γ_{120} - Tempo de resistência ao fogo, igual a 120 minutos dada uma relação de e/d.

μ - Fator adimensional.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 - INTRODUÇÃO

O aço foi usado pela primeira vez como material na construção de silos em plantações de algodão na Inglaterra(século XIX), tendo como motivo do seu emprego, o fato de ser um material não inflamável. Por introduzir no processo construtivo qualidades como rapidez de execução, reduzida mão de obra, capacidade de suportar altas cargas, menor peso estrutural, dentre outras, assim passou a ser utilizado em grande escala em países como Estados Unidos, Inglaterra e Alemanha. Com o passar dos anos, o aço foi se tornando cada vez mais empregado na construção civil, sendo utilizado, hoje, em construção de pontes, edifícios verticais, galpões, entre outras aplicações industriais.

No Brasil, a utilização do aço como material na construção civil tem aumentado nas últimas décadas, competindo fortemente com o concreto armado nos mais diversos segmentos de mercado. Tratando-se de um material relativamente novo no mercado e menos difundido que o concreto armado, no Brasil, há restrições técnicas e sócio-culturais para o pleno emprego do aço em construção civil. Sem dúvida, uma das mais arraigadas, ainda que a prática de construção de edifícios altos, mormente nos países do primeiro mundo, indique o contrário, é a que concerne à fragilidade das estruturas de aço na situações de incêndio.

Em 1911, a ASTM – *American Society for Testing and Materials*, estabeleceu as primeiras normas para testes de resistência ao fogo, com a *Standard tests for fireproof constructions*. No Brasil, a regulamentação da segurança contra incêndio teve grande impulso na década de setenta, após três grandes incêndios ocorridos nas cidades de São Paulo (Edifícios Andraus e Joelma) e Rio de Janeiro (Edifício da Caixa Econômica), com várias vítimas fatais e grandes perdas patrimoniais, CLARET (2000).

Desse movimento em favor do estabelecimento de exigências mínimas de segurança contra incêndio no País, com forte presença do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT – do Estado de São Paulo e do Corpo de Bombeiros deste mesmo Estado, surgiram várias iniciativas para o estabelecimento de normas técnicas de projeto de estruturas de aço em situação de incêndio. Em 1999 foi publicada a norma NBR 14323, *“Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio”* e em 2000, a norma NBR 14432, *“Exigências de resistência ao fogo para edificações”*.

Os regulamentos tratam da resistência ao fogo, admitindo tempos mínimos de resistência no ensaio-padrão para os diversos elementos construtivos, sendo essa resistência traduzida pelos requisitos de estanqueidade, isolamento e resistência mecânica.

A NBR 14323 adota o tempo requerido de resistência ao fogo - TRRF que é estabelecido, como, aliás, na maioria dos regulamentos e normas estrangeiras, de modo essencialmente subjetivo, levando-se em conta, vários parâmetros como, a natureza da ocupação, a altura e as facilidades de atendimento de ocorrências pelo corpos de bombeiros. Admite-se que não haverá perda da estabilidade estrutural, quando o TRRF é atendido por todos os elementos estruturais expostos ao incêndio. Trata-se de um pressuposto genérico que se baseia na premissa de que a perda da estabilidade estrutural é dependente da resistência mecânica dos elementos estruturais isolados, que por sua vez, depende unicamente da temperatura máxima, uniforme, por eles atingida.

Para ter aplicabilidade prática, os métodos de projeto estrutural em situação de incêndio, baseados nas premissas simplificadas mencionadas acima, necessitam de hipóteses de carregamento muito favoráveis em situação de incêndio e de proteção estrutural, sendo esta, via de regra, o modo mais simples de assegurar a estabilidade estrutural.

O dimensionamento, em geral, é feito para evitar que os elementos estruturais fiquem submetidos a temperaturas superiores a uma temperatura crítica que corresponde a uma situação limite de colapso, durante o tempo requerido de resistência ao fogo. Nesse ponto, os métodos simplificados necessitam fazer a associação do tempo de resistência

no incêndio-padrão com o tempo de resistência sob o incêndio real o que constitui, sob o ponto de vista conceitual, uma aproximação conservadora, CLARET (2000).

Quando as estruturas são dimensionadas pelo método das tensões admissíveis, a temperatura crítica de 550 °C corresponde à situação limite em que o carregamento de projeto pode causar o colapso da peça. Em particular, um método simplificado de dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio foi adotado nos Eurocodes e na NBR 14323 e define a temperatura crítica para um elemento estrutural como aquela em que a resistência de cálculo é igual à solicitação de cálculo correspondente.

Os métodos simplificados adotado no Brasil pelas normas ABNT aplicam-se com vantagem em um contexto em que se admita o carregamento em situação de incêndio como uma reduzida fração do carregamento de projeto e, ademais, quando o custo dos materiais de proteção passivo seja adequadamente baixos em relação ao custo da própria estrutura. De fato, as hipóteses simplificadoras estabelecidas na base desses métodos mantêm a temperatura crítica das peças na faixa de 550 °C – 630 °C o que tem um impacto pouco significativo na resistência ao fogo.

A situação, hoje vivenciada por projetistas que necessitam compatibilizar o binômio segurança – custo de proteção no domínio das estruturas de aço, é semelhante àquela em que se encontraram alguns países europeus na década de sessenta(século XX). Nesses países, a solução foi buscada na pesquisa de novos métodos de modelamento dos incêndios e de análise do comportamento das estruturas sob altas temperaturas.

Devido ao custo elevado da experimentação estrutural em incêndio, nesta época, iniciou-se a pesquisa de modelos analíticos que permitissem obter a resposta de estruturas submetidas a elevadas temperaturas. Diversos trabalhos foram realizados nesse sentido a partir de 1967, BAILEY (1995). Os modelos mais simples eram baseados em um comportamento perfeitamente elasto-plástico do aço, estando os elementos estruturais isolados da estrutura, sob distribuição uniforme de temperatura em todo o seu volume. O método de elementos finitos foi sucessivamente utilizado, a partir

de 1981, em modelos bidimensionais e tridimensionais, considerando não linearidade física e geométrica.

Avaliar a resistência ao fogo de toda a estrutura com base no comportamento de elementos isolados é antieconômico e, por isso, grande o esforço de pesquisa que tem sido dirigido para a investigação do comportamento global das estruturas em situação de incêndio.

Na Universidade de Sheffield, Reino Unido, um programa de computador denominado VULCAN, baseado no método dos elementos finitos, foi elaborado e continuamente aperfeiçoado nos últimos dez anos, para analisar o comportamento de estruturas de aço submetidas às altas temperaturas de incêndio.

Encorajados pelos resultados obtidos com o VULCAN, quando comparados com resultados de testes de elementos isolados e de subestruturas, empreendeu-se, durante os anos de 1995 e 1996, um programa de ensaios em uma estrutura de aço de um edifício de 8 andares, construído nas instalações do Laboratório de Cardington, pertencente à instituição *Buildings Research Establishment*. O principal objetivo dos ensaios foi o de produzir resultados experimentais para a validação desse programa VULCAN.

Em incêndios compartimentados, como geralmente ocorre em edifícios verticais, a estrutura não sofre a ação do calor em sua totalidade, permanecendo parte dela a temperaturas relativamente baixas. As análises através do VULCAN demonstram, e a observação experimental comprova, que a estrutura fria suporta a subestrutura quente em face de um complexo mecanismo de redistribuição de esforços. Portanto, o modelamento tridimensional das estruturas permite explorar realisticamente a sua hiperestaticidade que gera temperaturas críticas (utilizando um conceito global) muito superiores às obtidas com o método simplificado de análise.

O programa VULCAN é capaz de obter a resposta estrutural de edifícios em vários cenários de incêndio. No modelo estrutural utilizado no programa VULCAN, as barras de viga e de coluna de aço são representadas por elementos unidimensionais de dois nós

com oito graus de liberdade por nó, CLARET (2000b). Esses oito graus de liberdade em coordenadas locais permitem a simulação de flexão composta oblíqua, de torção com empenamento e de flambagem lateral com torção. Em coordenadas globais, cada nó possui onze graus de liberdade.

Distribuições de temperatura quaisquer podem ser consideradas na seção transversal e ao longo do elemento. O comportamento de ligações semi-rígidas é modelado usando elementos de mola com uma curva momento-rotação-temperatura específica. A laje é representada por um elemento de casca de 4 nós, com 5 graus de liberdade por nó, CLARET (2000b), que pode ser conectado aos elementos unidimensionais de viga-coluna em um ponto nodal comum, modelando assim a interação total entre lajes e estrutura. Tensões térmicas devidas ao aquecimento do concreto também são incluídas.

A seção transversal do elemento de viga-coluna é dividida em um múltiplo de doze segmentos, BAILEY (1995), nos quais a temperatura é suposta constante. A cada elevação de temperatura durante a análise, a espessura do segmento é recalculada em função da variação do módulo de elasticidade do material. Desse modo, considera-se rigorosamente o efeito de diferentes distribuições de temperatura na seção transversal.

Longitudinalmente, a temperatura pode variar de elemento a elemento. Na laje, a temperatura é mantida constante por camadas, mas pode variar entre camadas. O carregamento é nodal.

Para facilitar a simulação de estruturas em incêndios compartimentados, o programa VULCAN permite utilizar superelementos que modelam as subestruturas frias que, em geral, se conservam no regime linear físico sob pequenas deformações. Desse modo, o efeito benéfico da hiperestaticidade estrutural é considerado na determinação da resistência ao fogo global da edificação sem grande aumento do esforço computacional envolvido na análise.

Diversas relações constitutivas podem ser utilizadas para o aço e o concreto, entre as quais as previstas nas normas Eurocode EC-3 e EC-4. Para o aço, é comum utilizar-se a

relação tensão-deformação devida a Ramberg-Osgood, BAILEY *et al.* (1996). Para o concreto, diversos modelos são utilizados, entre os quais os de Ellingwood, Nizzamuddin, Lie e Khennane, HUANG *et al.* (1999). Tratando-se da análise de um sistema fisicamente não-linear, as equações de equilíbrio são da forma

$$[k]\{\Delta u\} = \{\Delta P\}, \quad (1)$$

onde $[k]$ é a matriz de rigidez tangente, $\{\Delta u\}$ é o vetor de incrementos dos deslocamentos nodais e $\{\Delta P\}$ é o vetor de forças nodais incrementais. Esse sistema de equações é inicialmente resolvido pelo processo de Newton-Raphson modificado à temperatura ambiente. Mantendo as cargas externas constantes, a temperatura é elevada segundo uma lei predeterminada. A elevação de temperatura rompe o estado de equilíbrio original, gerando novo vetor de cargas incrementais que se compõe das cargas externas acrescidas às cargas internas e aos esforços devidos às tensões térmicas. Um critério de convergência é adotado para encerrar o processo iterativo e o colapso estrutural é identificado pelo aparecimento de elementos negativos na diagonal durante o processo de eliminação de Gauss.

Uma das aplicações do VULCAN é a realização de estudos paramétricos com vistas à obtenção de regras práticas de projeto e de diretrizes normativas. Com efeito, a aplicação rotineira do método de elementos finitos à análise da resistência ao fogo de estruturas complexas no ambiente dos escritórios de projeto pode tornar-se inviável tanto em face do ritmo de trabalho quanto pelo grau de especialização profissional exigida.

Estudos paramétricos em vigas mistas de aço-concreto são relatados em CLARET (1999) e COSTA (2001). Verifica-se que fórmulas práticas para o cálculo da temperatura crítica podem ser obtidas em função de parâmetros de projeto, adotando-se a devida margem de segurança.

Este trabalho visa analisar o comportamento de barras flexo-comprimidas de aço em situação de incêndio com o objetivo de gerar dados aplicáveis diretamente em projetos estruturais. Apesar de ainda considerados isolados da estrutura, o emprego de condições de contorno realísticas e o uso de técnicas de proteção parcial resultam, como se verifica ao final, em diretrizes de projeto que podem ter um impacto econômico positivo sobre o custo da proteção passiva em estruturas de aço.

1.2 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

Os objetivos desta pesquisa são:

investigar em situação de incêndio relações paramétricas para a temperatura crítica de barras flexo-comprimidas de aço em incêndio;

determinar curvas de carga axial em função do tempo de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas, uso freqüente em projeto, fixados o comprimento e a excentricidade;

verificar o efeito da proteção parcial dos perfis na resistência ao fogo para as barras flexo-comprimidas.

Em projetos estruturais em aço, a proteção das barras pilares raramente pode ser dispensada em face da importância desses elementos na estabilidade global da estrutura. Apesar de a área patinável ser, via de regra, menor que a de vigas, a proteção passiva de pilares de aço é responsável por grande parte do custo total da proteção estrutural. De fato, as barras flexo-comprimidas de aço, dependendo das condições de extremidade e de carregamento, podem desenvolver modos de colapso complexos que causam a redução da resistência ao fogo.

Os métodos simplificados resultam em temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas de aço em torno de 550 °C, dependendo da razão de carga. Isto se deve, entre outros fatores ao fato de a distribuição de temperatura nos perfis ser

considerada uniforme nas seções transversais e ao longo do comprimento. Esta simplificação leva a uma redução da resistência ao fogo, porque o escoamento das seções transversais ocorre simultaneamente em toda a sua extensão. Ao contrário, se a distribuição de temperatura não é uniforme, há transferência de carga das partes mais aquecidas para as partes mais frias, aumentando o tempo de resistência ao fogo da peça.

A análise de barras flexo-comprimidas de aço via Método dos Elementos Finitos (MEF) permite a consideração de gradientes transversais e longitudinais de temperatura. Em particular, o VULCAN permite a discretização de uma seção transversal em I ou H em um número inteiro múltiplo de 12 elementos nos quais a temperatura pode ser especificada. Longitudinalmente, cada elemento pode ter uma temperatura distinta.

1.3 - PROCESSO METODOLÓGICO

Estudos paramétricos são desenvolvidos de forma intensiva: a análise numérica de um conjunto de perfis, representativos dos mais utilizados na prática da construção metálica brasileira, são analisados pelo VULCAN (via M.E.F.), determinando-se as temperaturas críticas para diversas condições de contorno e de carregamento. Logo, após uma relação entre a temperatura crítica e parâmetros geométricos dos grupos de barras flexo-comprimidas são pesquisadas. A confiabilidade das relações paramétricas é estabelecida estatisticamente.

Na determinação de curvas de carga axial em função de tempo de resistência ao fogo para perfis usuais, a metodologia consiste na análise de perfis para cargas axiais crescentes, fixadas as condições de contorno e a excentricidade.

1.4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma ampla revisão bibliográfica é apresentada por BAILEY (1995), enfocando trabalhos de pesquisas realizados em todo mundo desde a década de sessenta. Considerando o aspecto de interesse histórico dos trabalhos realizados antes de 1994, os leitores interessados neste fase são remetidos ao trabalho de BAILEY (1995).

Após ensaios realizados em Cardington, entre 1995 e 1996, os trabalhos científicos, focalizados no comportamento estrutural em incêndio, tiveram grande impulso, mudando o patamar de modelamento. A interação aço – concreto assume importante papel na avaliação da resistência ao fogo das estruturas. BURGESS e PLANK (1999) escreveram o estado da arte da análise de pórticos de aço em situação de incêndio após os ensaios em Cardington. BURGESS e PLANK (2000) tratam em particular do efeito da rigidez das lajes na resistência ao fogo global de uma estrutura. PLANK, BURGESS e BAILEY (2001), tratam de diretrizes para o projeto de estruturas mistas com foco em especial sobre o efeito de membranas das lajes na resistência ao fogo.

Os estudos paramétricos não tem sido freqüente em grupos de pesquisas europeus. CLARET, PLANK E BURGESS (1999) apresentam um estudo da temperatura crítica de vigas mistas de aço sem proteção e com proteção parcial. COSTA (2001) e COSTA e CLARET (2001) estudaram as temperaturas críticas de vigas mistas com diversas condições de contorno explorando em particular, as técnicas de proteção parcial.

CAPÍTULO II

PEÇAS SUBMETIDAS A FLEXO-COMPRESSÃO

2.1 - INTRODUÇÃO

Barras em compressão axial pura quase não existem na prática: devido à continuidade entre os diversos membros, a compressão aparece quase sempre acompanhada de flexão. A estrutura continua, atuando sobre o elemento e transmitindo momento para os nós das ligações, submete, assim, o pilar real à ação simultânea de forças de compressão e momentos fletores, Figura 2.1.

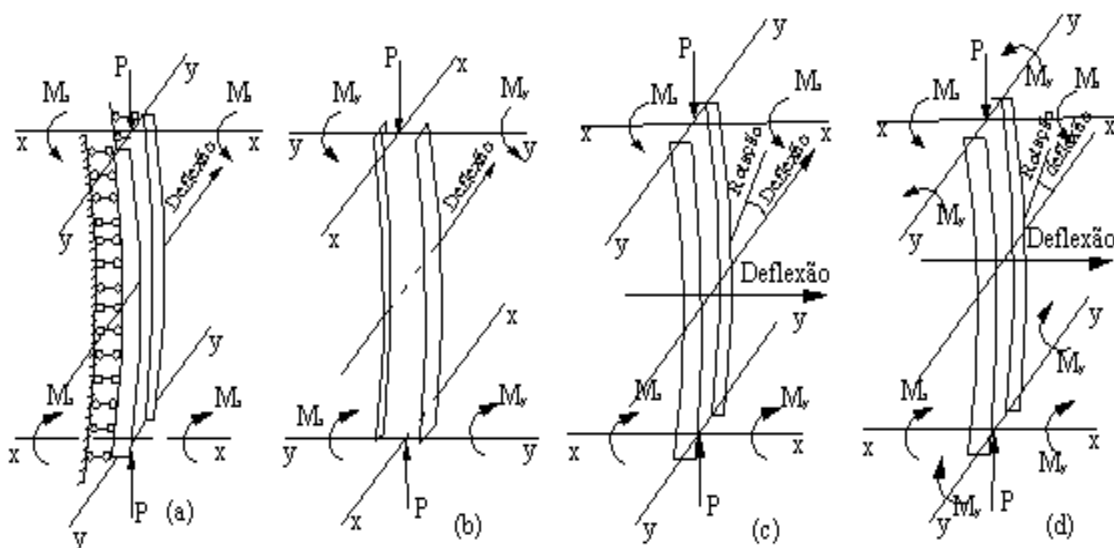


Figura 2.1 - Elementos flexo - comprimidos (viga-coluna).

Por apresentar ação simultânea destes dois esforços solicitantes na prática os pilares são denominados de vigas-coluna, Figura – 2.2, podendo o carregamento ocorrer sob três formas em pilares simétricos de seção em I ou H, carga axial excêntrica, Figura – 2.2a, carga lateral e carga axial, Figura – 2.2b, e carga axial e momentos fletores, Figura – 2.2c e 2.2d.

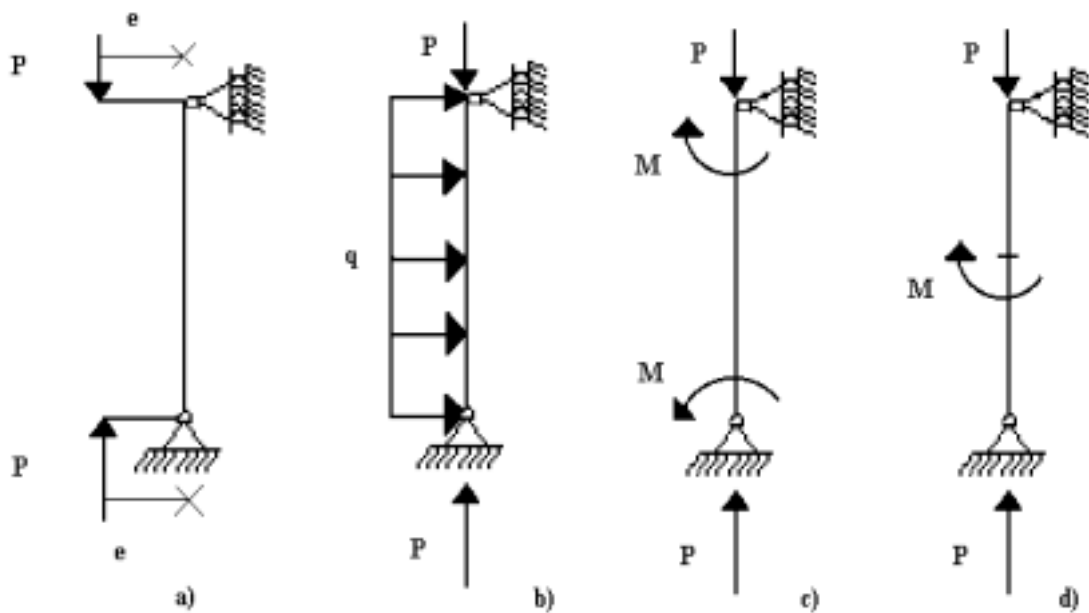


Figura 2.2 - Carregamento em vigas-coluna.

O comportamento estrutural da viga – coluna é afetado principalmente pelas suas condições de extremidade. As condições de extremidade na Figura 2.3 e os carregamentos mostrados na Figura 2.2 são muito freqüentes e, por isso mesmo, escolhidos freqüentemente para análise em situação de incêndio, SCHLEICH *et al* (1988).

As vigas - colunas têm seu papel essencial na estabilidade estrutural, uma vez que são pontos de convergência de vigas das várias direções que, por sua vez, suportam lajes e paredes. Por essa razão, a deformação axial e a flexão de vigas – colunas é rigorosamente limitada no projeto à temperatura ambiente.

Na situação de incêndio, a redução das propriedades mecânicas do aço, notadamente do módulo de elasticidade longitudinal, torna mais crítica a deformabilidade das vigas – colunas, a despeito de se admitir ao mesmo tempo uma redução de carga.

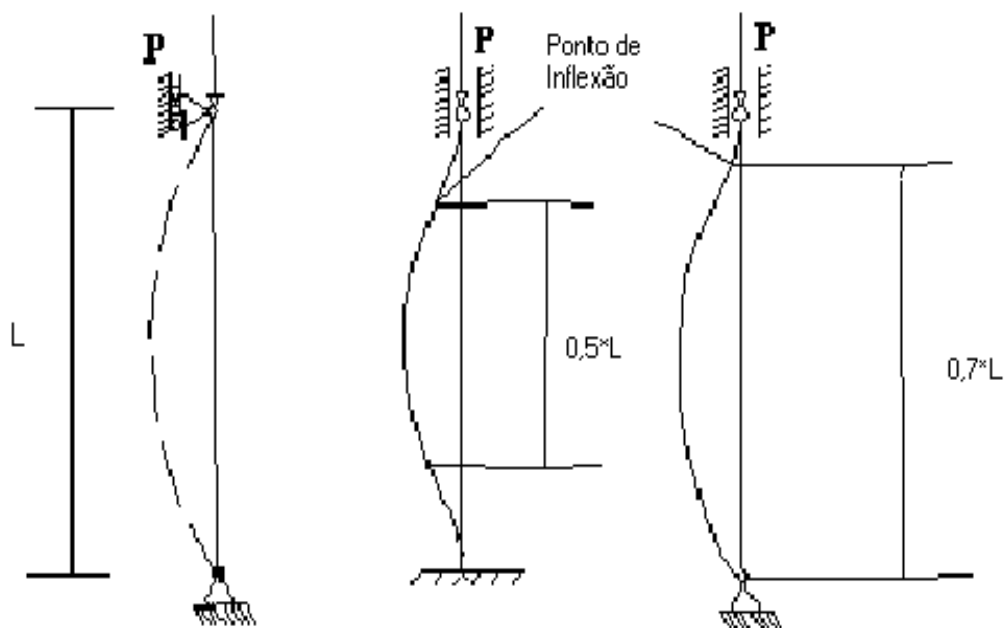


Figura 2.3 - Condições de extremidade(barras isoladas).

O modelamento de seções submetidas a gradientes de temperatura é feito no VULCAN, PLANK (1994) através de 12 elementos da seção transversal cuja espessura varia com o modulo de elasticidade de acordo com a expressão.

$$b_{\theta} = E_{\theta} \frac{b_{20}}{E_{20}} \quad (2)$$

Verifica-se que a redução do módulo de elasticidade a altas temperaturas corresponde tornar a peça mais esbelta o que explica a ocorrência das flambagem local e global, bem como a excessiva deformação axial observada em incêndio.

2.2 - MODOS DE COLAPSO

Um elemento viga-coluna pode estar sujeito aos prováveis modos de colapsos apresentados, quando analisados em temperatura ambiente:

a) Colapso por esmagamento

Ocorre devido ao momento uniaxial e à força axial combinados, ao formar articulações plásticas nas seções em que o momento tem sua maior intensidade. Este modo é particularmente, crítico em peças curtas de chapas grossas, podendo ser crítico também em peças médias. As condições de apoio e de carregamento podem formar articulações plásticas em um ou em dois extremos, sendo dependentes das condições de extremidade, Figura 2.4.

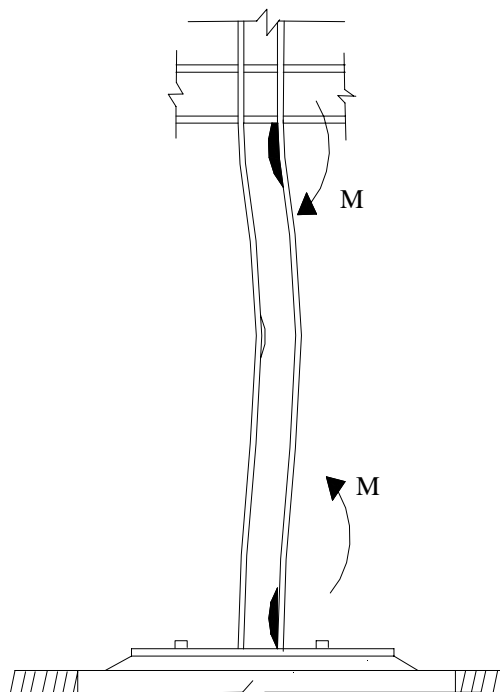


Figura 2.4 - Instabilidade plástica por flexo - compressão, formação de rotulas plásticas.

b) Colapso por instabilidade em apenas um plano

Este modo é crítico em barras fletidas em torno de seus eixos de menor ou de maior inércia. Porém, no caso da flexão em torno do eixo de maior inércia, a flambagem lateral deve ser impedida pelas características geométricas das seções, ou pela presença de elementos externos de contraventamentos, Figura.2.5.

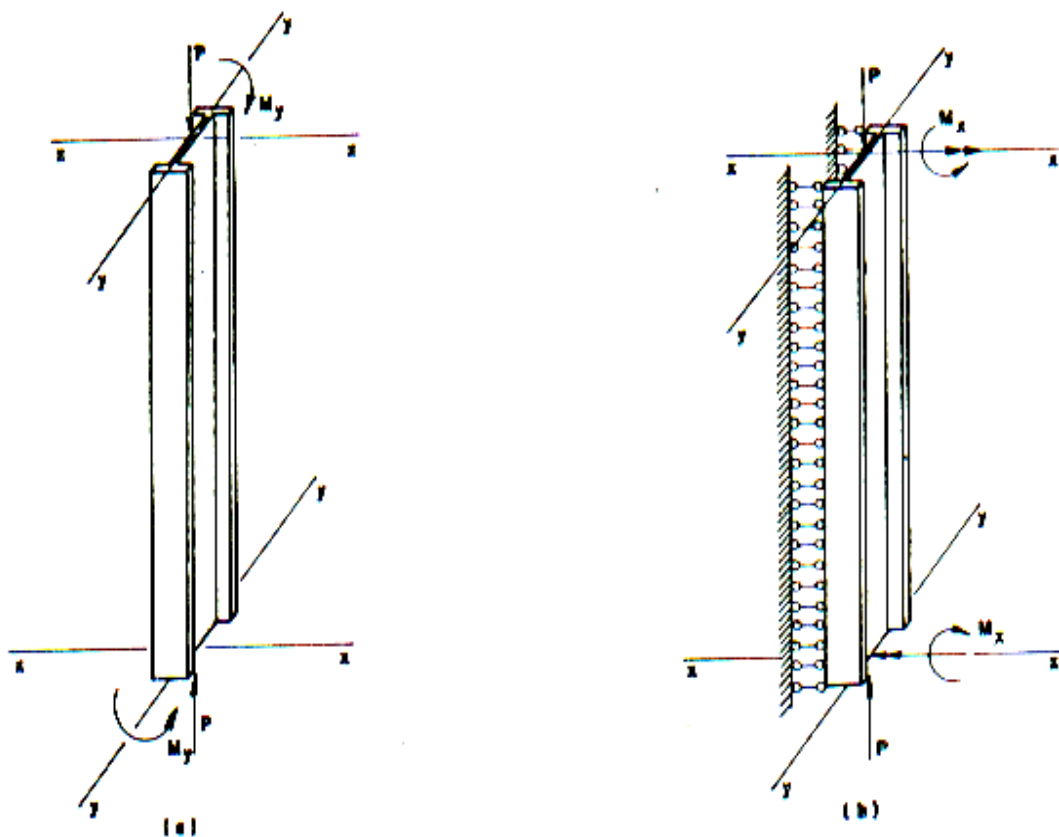


Figura 2.5 - Instabilidade em um plano: (a) para o eixo de menor inércia, (b) para o eixo de maior inércia

c) Colapso por flambagem lateral, devido à flexo - torção

Durante este tipo de flambagem, a deformação de uma seção transversal constitui-se de translação e rotação simultâneas em torno do centro de cisalhamento. A flambagem por flexo - torção é crítica em elementos de seção I, H, e similares, de seção aberta, que se flexionam em torno dos seus eixos de maior inércia e que estejam desprovidos de elementos externos adequados de contraventamentos, Figura 2.6.

Os fatores que influenciam a flexão e torção simultâneas são: a) baixa rigidez torcional; b) as dimensões da seção transversal do perfil; c) falta de dupla simetria da seção, fazendo com que o centro de gravidade e o centro de cisalhamento não coincidam; d) falta de elementos externos de contraventamentos, para impedir a flambagem lateral ou a torção.

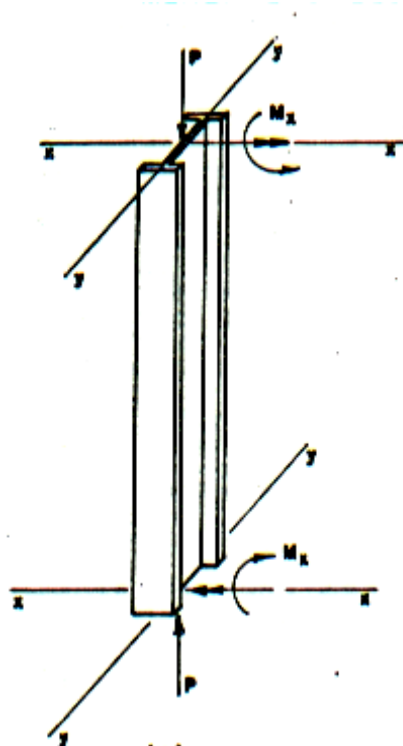


Figura 2.6 - Instabilidade por flexo torção

d) Colapso por flambagem local

Os perfis que constituem os elementos estruturais, laminados, soldados, eletro-soldados, ou formados a frio, são formados por um conjunto de chapas planas retangulares, ligadas entre si, ao longo de suas bordas. Quando trabalham submetidos à compressão, flexão ou esforço cortante, podem alcançar um estado de equilíbrio instável, conseqüentemente flambam-se localmente antes que a peça rompa integralmente, originando, um colapso prematuro caracterizado por uma distorção das seções transversais do perfil, Figura 2.7.

A flambagem local é crítica quando as relações entre largura e a espessura dos elementos planos, que compõem o perfil, estão acima de certos limites previstos nos estudos da flambagem de placas. O carregamento crítico que causa a flambagem depende das dimensões da seção da barra, do tipo de vinculação e de seu comprimento livre.

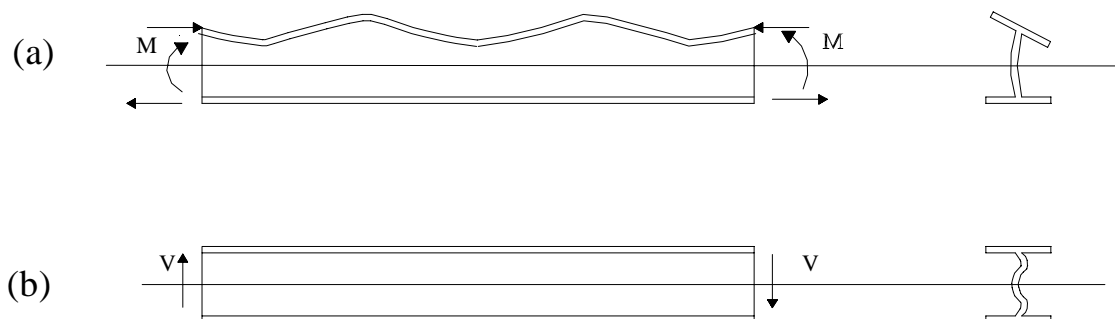


Figura 2.7 - Flambagem local: (a) flambagem do flange comprimido, (b) flambagem devido ao cisalhamento.

Em geral, é difícil saber previamente qual será a forma de instabilidade de um elemento viga-coluna. Mas, é certo que a elevação de temperatura crítica atua na aceleração da ocorrência do fenômeno de instabilidade, qualquer que ele seja.

2.3 - EQUAÇÕES DE INTERAÇÃO

Nesse trabalho, empregam-se as equações de interação da NBR 8800 que se baseiam no critério de cálculo americano, utilizando coeficientes de carga e resistência (Load and Resistance Factors Design – LRFD). Estas equações foram inicialmente obtidas na Universidade de Washington, no biênio 1969-1970, havendo sido adotadas como procedimento de cálculo pela AISC, em 1978.

Os pilares investigados nessa pesquisa foram verificados para os efeitos combinados da carga axial e do momento fletor pelas seguintes equações:

a) Critério de estabilidade da viga-coluna.

$$\frac{N_d}{\phi_c N_n} + \frac{C_{mx} M_{dx}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73 N_{ex}}\right) \phi_b M_{nx}} + \frac{C_{my} M_{dy}}{\left(1 - \frac{N_d}{0,73 N_{ey}}\right) \phi_b M_{ny}} \leq 1,0 \quad (3)$$

b) Verificação da resistência ao esmagamento da extremidade da viga coluna.

$$\frac{N_d}{\phi N_n} + \frac{M_{dx}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{dy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1,0 \quad (4)$$

Nestas equações, a seguinte nomenclatura é utilizada:

N_d = força normal de cálculo na barra, considerada constante, ao longo do comprimento;

M_{dx} e M_{dy} = momentos fletores de cálculo na seção considerada, em torno dos eixos “x” e “y”, respectivamente;

$\phi N_n = 0,9 Q N_y = 0,9 Q A_g f_y$, para força normal de compressão;

$\phi_c N_n = 0,9 \rho Q A_g f_y$, para força normal de compressão;

$\phi_b M_{nx}$ e $\phi_b M_{ny}$ = resistências de cálculo aos momentos fletores em torno dos eixos “x” e “y”, respectivamente;

C_{mx} e C_{my} = coeficientes correspondentes à flexão em torno dos eixos “x” e “y”, respectivamente.

N_{ex} e N_{ey} = Cargas de flambagem elástica, segundo os eixos “x” e “y”, respectivamente.

CAPÍTULO III

ESTUDOS PARAMÉTRICOS DE BARRAS

FLEXO-COMPRIMIDAS DE AÇO

EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

3.1 - INTRODUÇÃO

Embora a análise 3D possa ser feita com o emprego do VULCAN, dependendo dos cenários de incêndio considerados e da complexidade da estrutura, o esforço computacional exigido pode ser elevado. O estudo paramétrico de barras flexo-comprimidas de aço em elementos isolados têm importância para gerar diretrizes de projeto e recomendações às normas que, na maioria das vezes, podem conter recomendações antieconômicas baseados nos métodos simplificados adotados.

A resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas de aço isoladas assume um caráter prioritário na análise do comportamento estrutural em incêndio em face da sua importância na estabilidade global do edifício. De fato, ainda que o incêndio seja compartimentado, como, em geral, acontece em edifícios residenciais e comerciais de andares múltiplos, o colapso de uma barra isolada qualquer tem reflexos sobre toda a estrutura, alterando a distribuição de cargas .

Em face do custo elevado da experimentação estrutural em incêndio, decidiu-se pela pesquisa de modelos analíticos que permitem obter a resposta de estruturas submetidas a elevadas temperaturas em função de parâmetros que as caracterizam em fórmulas práticas e confiáveis.

3.2 - ESTUDOS PARAMÉTRICOS

Conforme a metodologia proposta, as Tabelas 1, 2 e 3 mostram as características físicas e geométricas um conjunto perfis tipo CVS, padrão ABNT, que são utilizados na

pesquisa de relações paramétricas para o cálculo da temperatura crítica de barras flexo-comprimidas de aço. Os pilares têm 3,5 m de comprimento e o aço tem limite de escoamento de 25 kN/cm^2 e módulo de elasticidade de 20500 kN/cm^2 .

A carga crítica axial é calculada de acordo com os anexos D, E, H e I da NBR 8800 para o conjunto de perfis mostrados na Tabela 1. No entanto, utilizam-se pares (P,M) em que P é escolhido como sendo 50%, 60%, 70% e 80% da carga crítica e M é determinado de modo a satisfazer, em cada caso, as equações de interação da NBR 8800, supondo a atuação de M em torno dos dois eixos principais de inércia. Portanto, cada um dos pilares é analisado na sua condição limite, isto é, sem reserva de resistência. A Tabela 4, apresenta a carga limite para três condições de extremidade.

A determinação da temperatura crítica de barras flexo-comprimidas é feita de acordo com a norma BS 476: Parte 20 (1987) que descreve o ensaio padrão de barras flexo-comprimidas de aço em fornos. Isto é conforme a Figura 3.1, a aplicação das cargas à temperatura ambiente leva a um encurtamento da barra; a elevação de temperatura subsequente, até aproximadamente 400°C , resulta em uma expansão linear do aço sem uma sensível redução da rigidez axial o que causa deslocamentos positivos; com a elevação de temperatura para além de 400°C , a rigidez axial reduz e a barra volta a encurtar; a temperatura crítica convencionalmente corresponde ao deslocamento nulo da extremidade da barra flexo-comprimida, depois de atingido o deslocamento máximo.

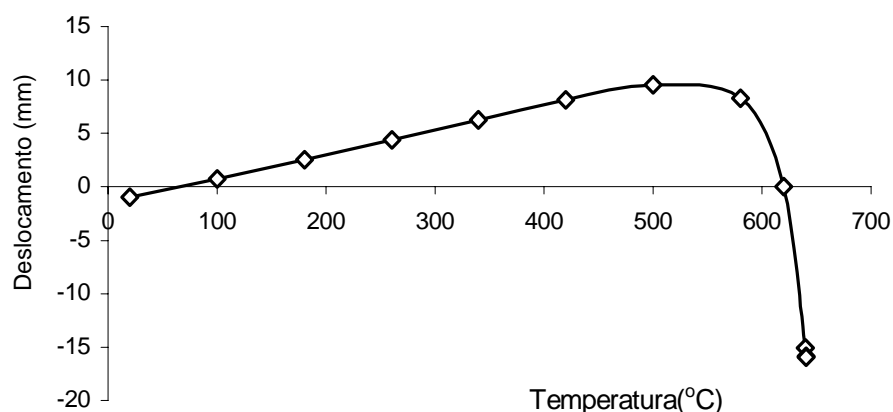


Figura 3.1 - Deslocamento versus temperatura para uma barra flexo-comprimida de aço típico.

Tabela 1 - Propriedades físicas e geométricas dos perfis.

Perfil	Massa	Área	Altura	Alma		Mesas	
CVS	m	A	d	t _w	h	t _f	b _f
ABNT	Kgf	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm
300x95	95,4	121,5	300	12,5	255	22,4	200
300x80	79,6	101,4	300	8	268	16	250
300x83	82,8	105,5	300	9,5	268	16	250
350x105	105,2	134	350	12,5	312	19	250
350x136	135,8	173	350	16	300	25	250
400x87	86,8	110,6	400	9,5	375	12,5	300
400x125	125,1	159,1	400	12,5	362	19	300
450x188	188,1	239,6	450	22,4	400	25	300
450x206	206,1	262,5	450	19	387	31,5	300
500x217	216,5	275,8	500	22,4	450	25	350
500x259	258,9	329,8	500	25	437	31,5	350
550x245	244,9	312	550	22,4	500	25	400
550x329	328,8	418,8	550	25	475	37,5	400
600x292	292,3	372,3	600	22,4	537	31,5	400
600x339	338,6	431,3	600	25	525	37,5	400
650x211	211,1	268,9	650	16	612	19	450
650x282	282,1	359,4	650	22,4	600	25	450
650x326	325,8	415	650	22,4	587	31,5	450

Tabela 2 - Propriedades físicas e geométricas dos perfis – continuação.

Perfil CVS ABNT	Eixo x-x				Eixo y-y			
	I_x cm ⁴	W_x cm ³	r_x cm	Z_x cm ³	I_y cm ⁴	W_y cm ³	r_y cm	Z_y cm ³
300x95	19092	1273	12,54	1447	2991	299	4,96	458
300x80	17432	1162	13,11	1280	4168	333	6,41	504
300x83	17672	1178	1294	1307	4169	334	6,29	506
350x105	29213	1669	1477	1876	4953	396	6,08	606
350x136	36673	2096	14,56	2391	6521	522	6,14	800
400x87	32339	1617	17,1	1787	5628	375	7,13	571
400x125	46347	2317	17,06	2581	8556	570	7,33	869
450x188	79759	3545	18,25	4084	11287	752	6,86	1175
450x206	92088	4093	18,73	4666	14197	946	7,35	1452
500x217	115812	4632	20,49	5290	17907	1023	8,06	1588
500x259	138564	5543	20,5	6359	22566	1289	8,27	1998
550x245	161250	5864	22,73	6650	26713	1336	9,25	2063
550x329	219671	7988	22,9	9098	40062	2003	9,78	3074
600x292	232726	7758	25	8778	33650	1683	9,51	2587
600x339	267803	8927	24,92	10169	40068	2003	9,64	3082
650x211	200828	6179	27,33	6893	28877	1283	10,36	1963
650x282	260164	8005	26,91	9047	38025	1690	10,29	2607
650x326	309117	9511	27,29	10697	47896	2129	10,74	3263

Tabela 3 - Propriedades físicas e geométricas dos perfis – continuação.

Perfil CVS ABNT	r_t	I_t	C_w	h/t_w	$b_f/2t_f$	d/a_f	e_c	U	U/A
	cm	cm ⁴	cm ⁶			cm ⁻¹	mm	m ² /m	cm ⁻¹
300x95	5,46	167,9	575394	20	4,5	0,67	8	1,38	1,13
300x80	6,91	73,1	840167	34	7,8	0,75	6	1,58	1,56
300x83	6,86	76,4	840167	28	7,8	0,75	6	1,58	1,5
350x105	6,77	135,9	1355247	25	6,6	0,737	6	1,68	1,25
350x136	6,8	304	1719157	19	5	0,56	8	1,67	0,96
400x87	8,05	50,1	2111572	39	12	1,067	5	1,98	1,79
400x125	8,14	162	3102816	29	7,9	0,702	6	1,98	1,24
450x188	7,91	471,7	5080078	18	6	0,6	8	2,06	0,86
450x206	8,15	720,8	6206603	20	4,8	0,476	8	2,06	0,79
500x217	9,26	542,5	10076742	20	7	0,571	8	2,36	0,85
500x259	9,36	973,3	12351583	17	5,6	0,454	8	2,35	0,71
550x245	10,6	613,4	18375000	22	8	0,55	8	2,66	0,85
550x329	10,86	1673	26265625	19	5,3	0,367	8	2,65	0,63
600x292	10,73	1047	27148149	24	6,3	0,476	8	2,76	0,74
600x339	10,79	1699	31640625	21	5,3	0,4	8	2,75	0,64
650x211	11,91	291,9	28723583	38	11,8	0,76	6	3,07	1,14
650x282	11,87	702,9	37078857	27	9	0,578	8	3,06	0,85
650x326	12,09	1169	45752651	26	7,1	0,459	8	3,06	0,74

Tabela 4 - Cargas críticas.

Perfil	Carga crítica Axial		
CVS	kN		
ABNT	Bi-engastado à rotação	Engastado-rotulado	Bi-rotulado
300x95	2.225	2.063	1.584
300x80	1.982	1.980	1.978
300x83	2.052	1.948	1.642
350x136	3.350	3.174	2.656
350x105	2.589	2.451	2.044
400x125	3.196	3.062	2.686
400x87	2.209	2.113	1.982
450x188	4.749	4.534	4.236
450x206	5.273	5.052	4.252
500x217	5.631	5.415	4.837
500x259	6.763	6.509	5.839
550x245	6.518	6.292	5.732
550x329	8.829	8.529	7.817
600x339	9.071	8.761	8.018
600x292	8.806	8.761	6.894
650x282	7.641	7.383	6.799
650x326	8.889	8.588	7.936
650x211	5.724	5.531	5.097
650x351	9.659	9.321	6.799

3.3 - TEMPERATURA CRÍTICA DE BARRAS FLEXO-COMPRESSAS BI-ROTULADAS SEM PROTEÇÃO

Barras flexo-comprimidas constituídas de perfis extraídos da Tabela 1 e analisados através do Método de Elementos Finitos (MEF), implementado no VULCAN foram considerados com ambas as extremidades rotuladas, com deslocamento vertical livre na extremidades onde aplicam-se as cargas; os deslocamentos horizontais foram impedidos. As Tabelas 5 e 6 mostra os pares (P, M) para cada um dos perfis nas quatro hipóteses de cargas consideradas.

As análises foram conduzidas para uma distribuição de temperatura uniforme na seção transversal o que corresponde aos barra flexo-comprimida completamente envolvido pelo fogo. Trata-se de uma exposição muito severa ao incêndio o que explica os baixos valores de temperatura crítica mostrados nas Tabelas 7 e 8 que correspondem a M atuando nos eixos de maior e menor inércia.

O exame das Tabelas 7 e 8 mostra uma tendência de queda da temperatura crítica à medida em que a força axial aumenta. Entretanto a redução da temperatura crítica não é tão acentuada quanto a elevação da carga, uma vez que, em todos as hipóteses de carga, a reserva de resistência é praticamente inexistente, já que o par (P,M) é tomado de modo a resultar em coeficientes de interação próximos à unidade. Assim, as razões de carga maiores (0,70 e 0,80, por exemplo), os momentos, que têm efeito estabilizante, são reduzidos. Em consequência, as temperaturas críticas não se reduzem proporcionalmente à elevação das cargas axiais.

As pesquisas de uma relação paramétrica para o cálculo da temperatura crítica de barras flexo-comprimidas bi-rotuladas foi feita por tentativas, admitindo-se o coeficiente de correlação da análise de regressão linear como parâmetro de controle.

Para o momento atuando segundo o eixo de maior inércia, o parâmetro adimensional que resulta nos melhores coeficientes de correlação é:

$$\mu = \left(\frac{L}{r_x} \right) \left(\frac{\sigma_P}{\sigma_M} \right) \left(\frac{f_y}{E} \right) \quad (5)$$

onde (L/r_x) é a esbeltez da barra flexo-comprimida; (σ_P/σ_M) é a razão das tensões máximas devidas a cada um dos esforços solicitantes; (f_y/E) é a deformação da barra flexo-comprimida.

Para a flexão em torno do eixo de menor inércia a equação 5 pode ser escrita de outra forma, conforme apresentada na Eq. 6, notando-se a inversão das tensões de compressão e de flexão:

$$\mu = \left(\frac{L}{r_y} \right) \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_P} \right) \left(\frac{f_y}{E} \right) \quad (6)$$

Para a razão de carga 0,5, a temperatura crítica é calculada com um coeficiente de correlação 0,94 para um barra flexo-comprimida bi-rotulado analisado em relação ao eixo de maior inércia, dado pela seguinte expressão:

$$\theta_c = 602 - 6305\mu \quad (7)$$

A Figura 3.2 mostra a distribuição das temperaturas críticas em função do parâmetro μ e a reta ajustada pela Eq. (7).

De modo inteiramente análogo, são mostradas nas Eqs.8, 9 e 10 as temperaturas críticas calculada em função de μ para uma flexão em torno do eixo de maior inércia, com coeficientes de correlação de 0.98, 0.98 e 0.96. As retas ajustadas são dadas pelas Figuras 3.3, 3.4 e 3,5 para razões de cargas de 0,6, 0,7 e 0,8 respectivamente .

$$\theta_c = 607 - 5767\mu \quad (8)$$

$$\theta_c = 612 - 5074\mu \quad (9)$$

$$\theta_c = 534 - 1697\mu \quad (10)$$

Seguindo o mesmo processo metodológico, são mostrados nas Eqs.11; 12, 13 e 14 as temperaturas críticas calculadas em função de μ para a flexão em torno do eixo de menor inércia, com coeficientes de correlação de 0.97, 0.91, 0.93 e 0,94. As retas

ajustadas são dadas pelas Figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 para relações de cargas de 0,5, 0,6, 0,7 e 0,8, respectivamente .

$$\theta_c = 575 - 1848\mu \quad (11)$$

$$\theta_c = 549 - 2533\mu \quad (12)$$

$$\theta_c = 558 - 6027\mu \quad (13)$$

$$\theta_c = 618 - 1724\mu \quad (14)$$

As Figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 mostram a distribuição das temperaturas críticas em função do fator μ para as retas ajustadas das Eqs. 11, 12, 13 e 14.

Tabela 5 - Carregamentos das barras flexo-comprimidas bi-rotuladas eixo maior de inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de Carga Axial							
	0,5		0,6		0,7		0,8	
	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)
300x95	543	213	651	187	760	161	868	106
300x113	617	242	741	212	864	182	988	121
300x83	821	179	985	157	1149	135	1313	90
350x136	1328	331	1593	291	1859	251	2124	167
350x105	1022	259	1226	228	1430	197	1635	130
400x125	1343	347	1611	300	1880	253	2148	185
400x87	991	241	1189	209	1387	177	1585	128
450x188	2118	566	2541	484	2965	412	3388	294
450x216	2126	648	2551	561	2976	475	3401	346
500x259	2919	834	3503	715	4087	596	4671	462
550x245	2866	855	3439	727	4012	599	4585	470
550x329	3908	1159	4690	981	5471	804	6253	626
600x339	4009	1297	4810	1100	5612	902	6414	704
600x292	3447	1123	4136	953	4825	783	5515	613
650x282	3399	1143	4079	965	4759	786	5439	608
650x326	3968	1342	4761	1130	5555	917	6348	704
650x211	2548	870	3058	734	3567	597	4077	461

Tabela 6 - Carregamentos das barras flexo-comprimidas bi-rotuladas eixo menor de inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de Carga Axial							
	0,5		0,6		0,7		0,8	
	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)
300x95	543	153	651	132	760	100	868	61
300x100	617	168	741	112	864	98	988	70
300x113	821	191	985	152	1149	114	1313	75
300x83	1328	141	1593	112	1859	84	2124	56
350x136	1022	261	1226	130	1430	100	1635	88
350x105	1343	203	1611	162	1880	121	2148	103
400x125	991	286	1189	200	1387	149	1585	123
400x87	2118	198	2541	158	2965	118	3388	78
450x188	2126	453	2551	362	2976	318	3401	180
450x 16	2919	533	3503	426	4087	271	4671	212
500x259	2866	626	3439	500	4012	374	4585	249
550x245	3908	742	4690	593	5471	444	6253	350
550x329	4009	1016	4810	811	5612	608	6414	404
600x339	3447	1136	4136	907	4825	680	5515	452
650x282	3399	1012	4079	809	4759	606	5439	403
650x326	3968	1197	4761	956	5555	716	6348	477
650x211	2548	771	3058	616	3567	462	4077	350

Tabela 7 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas eixo maior de inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica (°C)			
300x100	480	460	440	436
300x83	480	460	440	433
350x136	500	480	459	457
350x105	500	483	463	455
400x125	505	485	465	452
400x87	505	490	467	455
450x188	519	500	483	473
450x216	516	500	479	468
500x259	520	505	485	467
550x245	525	508	490	465
550x329	522	505	486	468
600x339	530	512	495	477
600x292	529	513	495	477
650x282	535	518	498	481
650x326	533	515	498	481
650x211	535	517	500	480

Tabela 8 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas eixo menor de inércia.

Perfil ABNT CVS	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica (°C)			
350x105	438	400	330	300
350x136	440	410	360	305
300x100	435	400	360	310
300x83	440	410	350	308
450x188	450	425	400	300
400x87	470	435	407	327
450x216	470	435	410	333
400x125	465	435	408	308
500x259	450	440	360	-
550x245	503	470	440	410
600x292	500	500	440	411
600x339	505	480	442	415
550x329	505	475	442	415
650x282	510	490	451	421
650x211	512	505	450	400
650x326	515	500	453	424

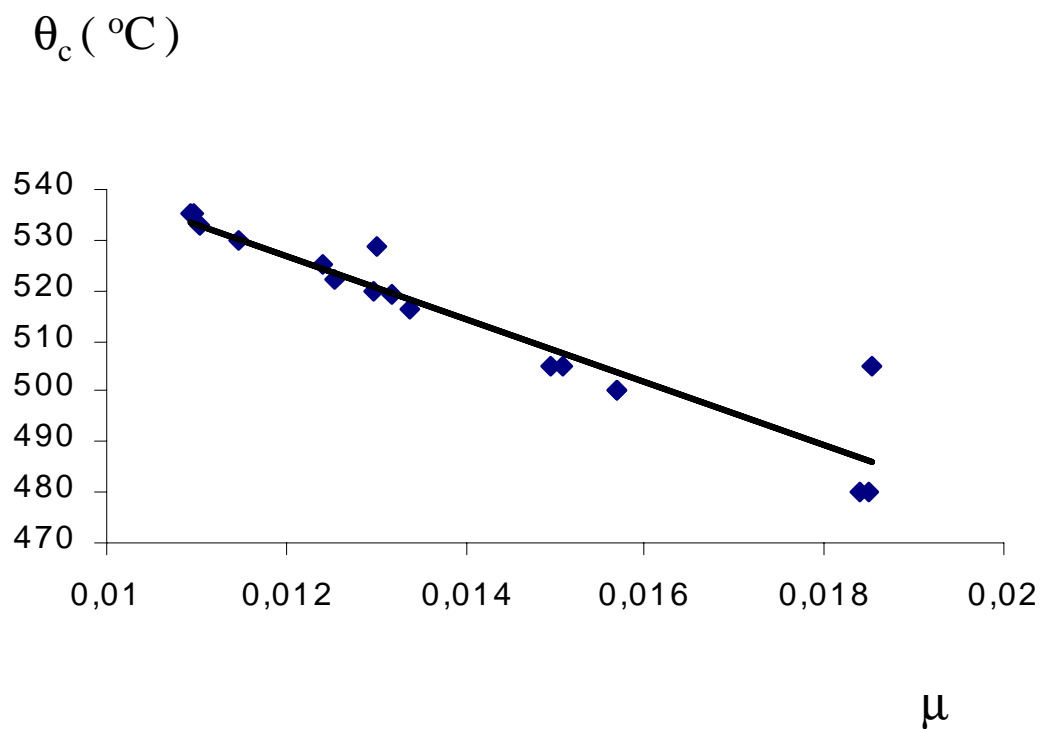


Figura 3.2 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo de maior inércia, sem proteção.

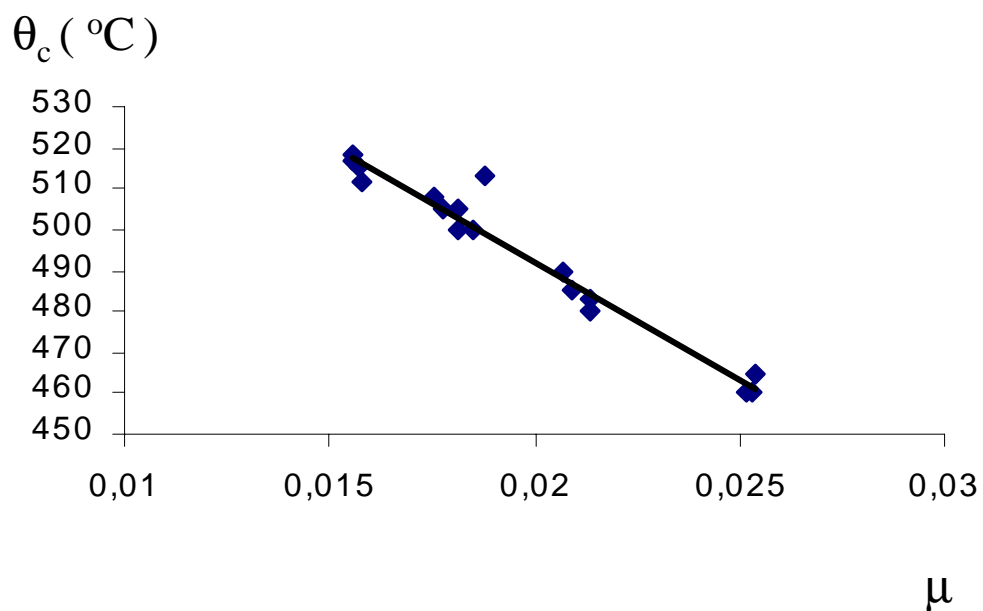


Figura 3.3 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo de maior inércia, sem proteção.

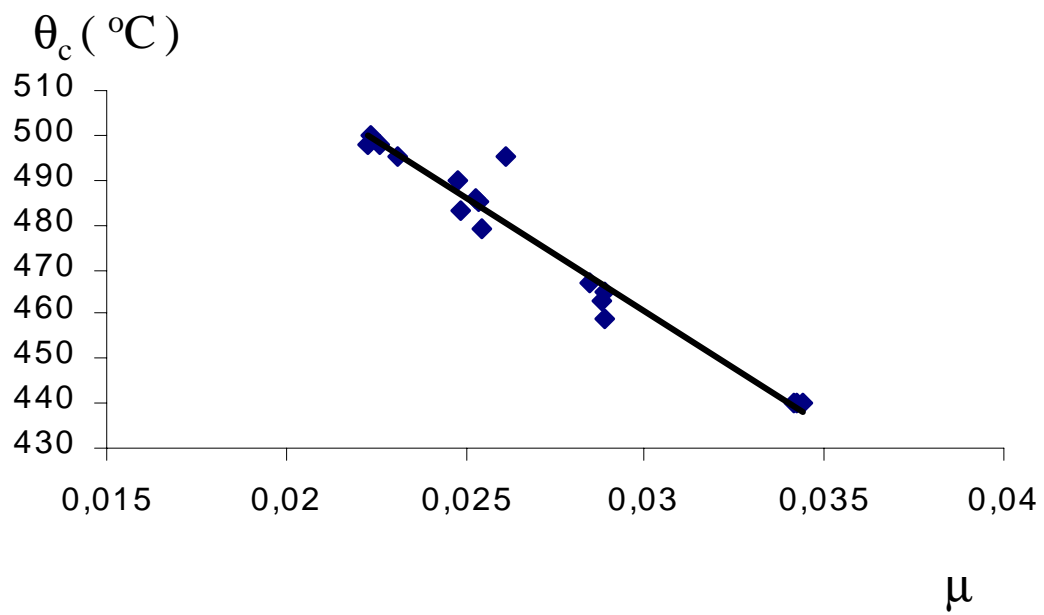


Figura 3.4 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo de maior inércia, sem proteção.

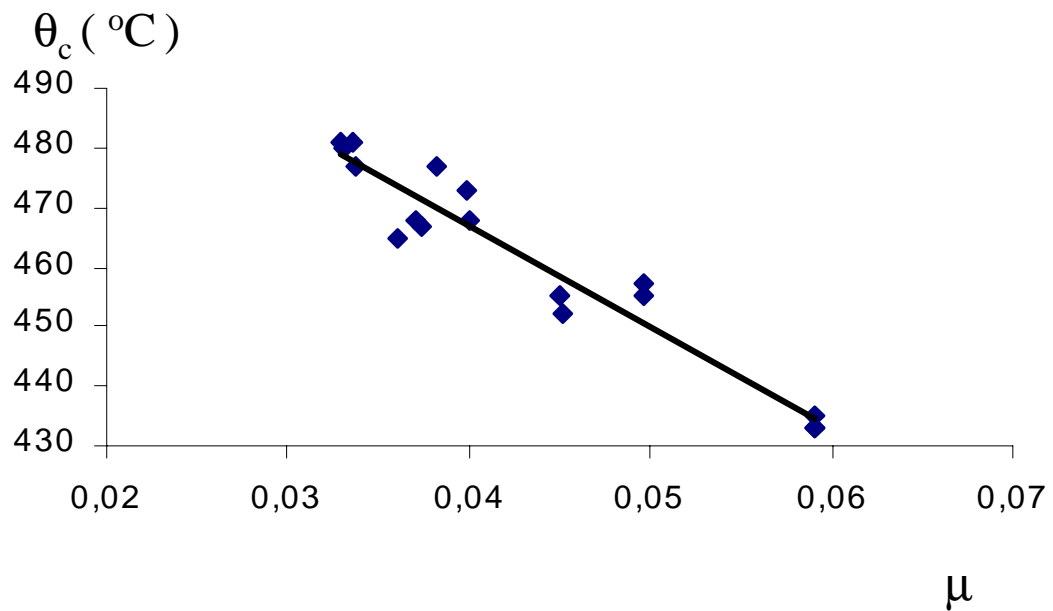


Figura 3.5 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo de maior inércia, sem proteção.

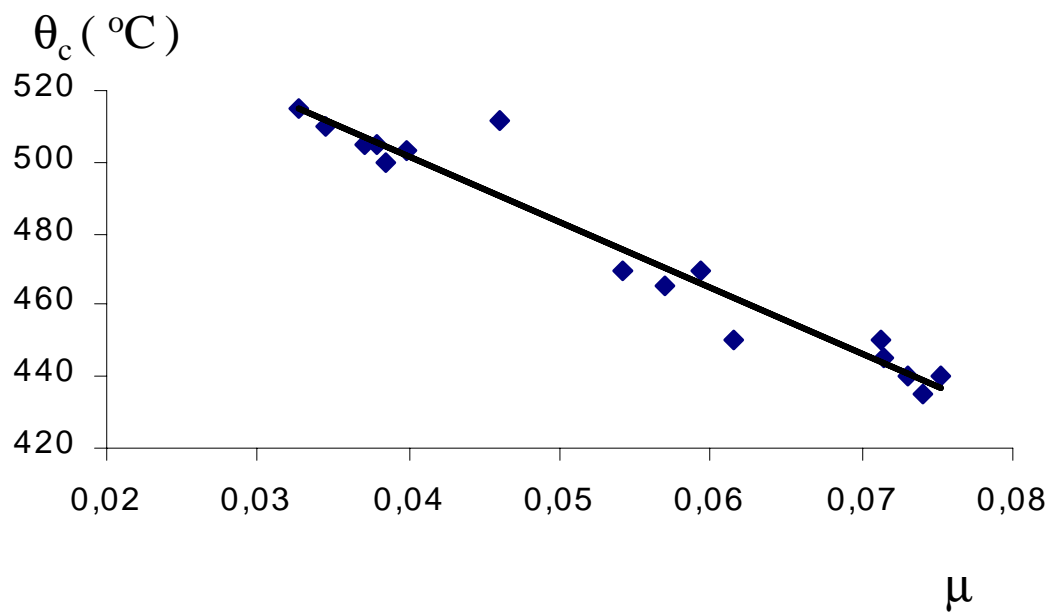


Figura 3.6 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo de menor inércia, sem proteção.

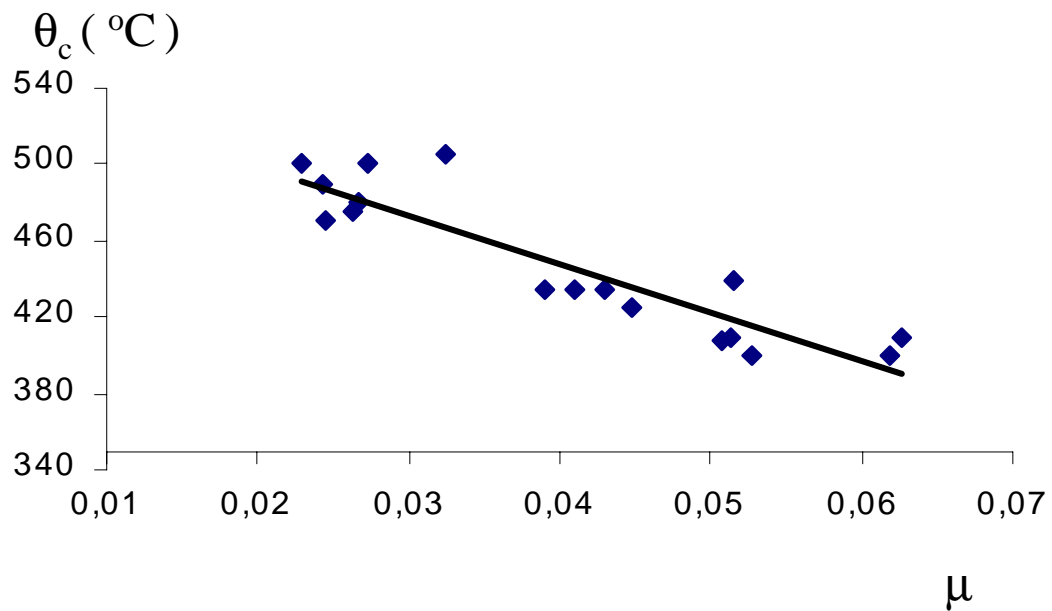


Figura 3.7 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo de menor inércia, sem proteção.

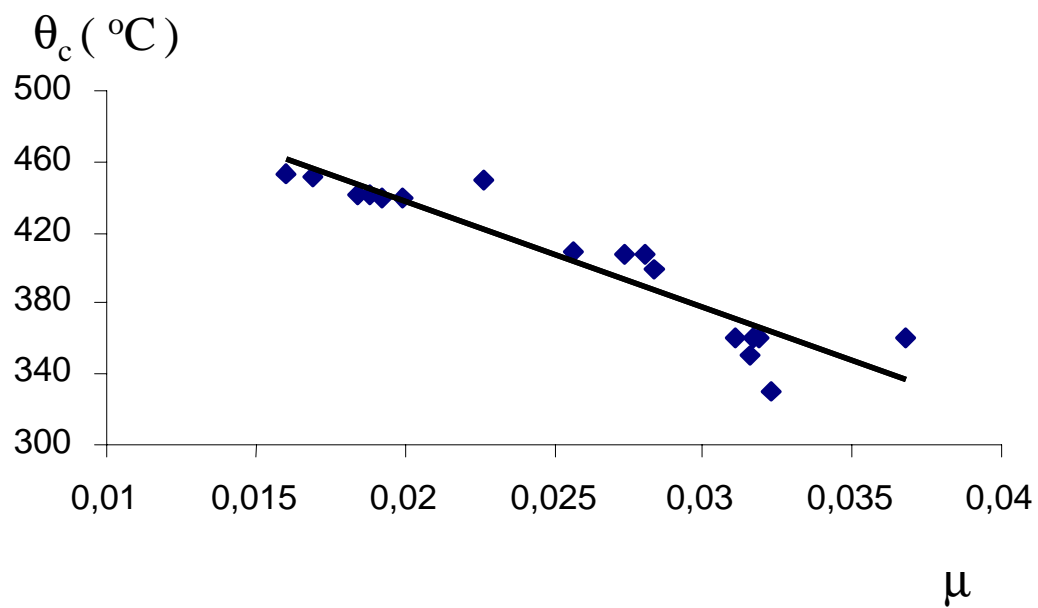


Figura 3.8 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo de menor inércia, sem proteção.

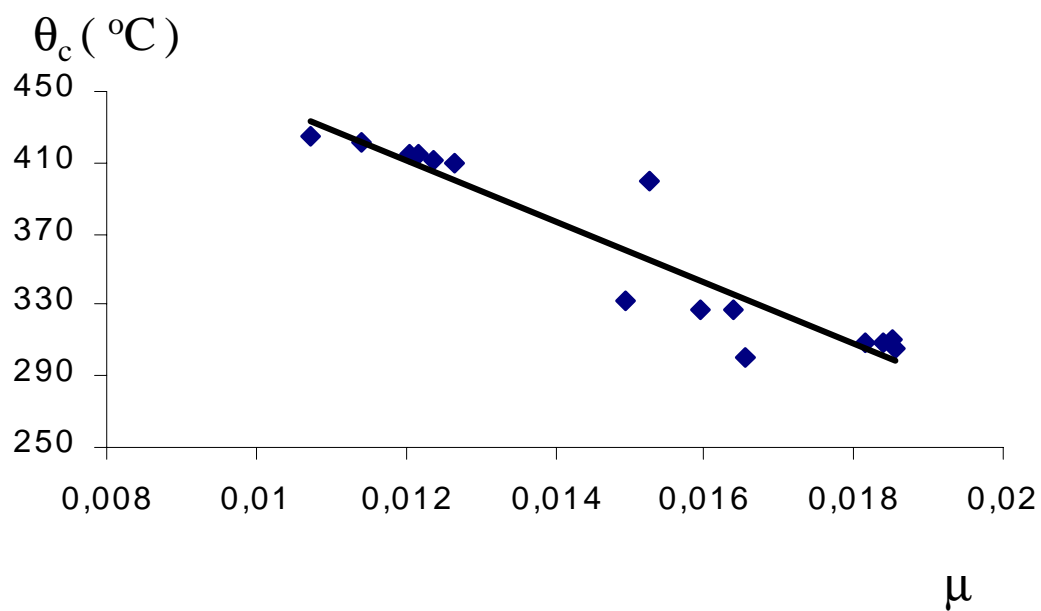


Figura 3.9 - Temperaturas críticas para para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo de menor inércia, sem proteção.

3.4 - TEMPERATURA CRÍTICA DE BARRAS FLEXO-COMPRI­MIDAS BI-ENGASTADAS À ROTAÇÃO E ENGASTADAS-ROTULADAS, SEM PROTEÇÃO

De modo análogo ao descrito na seção anterior, foram conduzidas análises de barras flexo-comprimidas; bi-engastadas à rotação e engastadas-rotuladas. Em ambos os pilares, a extremidade onde atua a carga pode deslocar-se na direção axial. Deslocamentos horizontais são impedidos nos nós de extremidade. O carregamento imposto às barras bi-engastadas é mostrado nas Tabelas 9 e 10 para as relações de carga pesquisadas neste trabalho e, analogamente, para as barras engastadas-rotuladas, o carregamento é mostrado nas Tabelas 11 e 12 para 4 razões de carga.

As temperaturas críticas obtidas para os dois casos de condições de extremidade examinados são mostradas nas Tabelas 13, 14, 15 e 16, supondo o perfil completamente exposto ao fogo.

Na Tabela 17 são mostradas as equações lineares paramétricas obtidas para as barras flexo-comprimidas; bi-engastadas à rotação e engastadas-rotuladas através de técnicas de regressão linear, sendo os coeficientes de correlação superiores à 90% para as 4 relações de carga.

As Figuras 3.10 à 3.25, mostram-se a distribuição das temperaturas críticas para barras flexo-comprimidas; bi-engastadas à rotação e engastadas-rotuladas em função do fator adimensional μ .

Observa-se que as temperaturas críticas das barras flexo-comprimidas de aço sem proteção oscilam entre 390 °C e 640 °C, dependendo da razão de carga, da esbeltez da barra e das condições de extremidade. Deve-se notar que a investigação foi realizada sobre os pilares(barras) flexo-comprimidos dimensionados com o emprego das equações de interação da NBR 8800, não apresentando nenhum deles reserva de resistência significativa para o carregamento aplicado à temperatura ambiente.

Tabela 9 - Carregamentos das barras flexo-comprimidas bi-engastadas para flexão em torno do eixo maior de inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de Carga Axial							
	0,5		0,6		0,7		0,8	
	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)
300x95	1112	153	1335	113	1557	91	1780	60
300x100	900	168	1200	112	1400	92	1900	72
300x113	1232	191	1500	152	1700	114	2000,	75
300x83	1026	141	1231	112	1436	84	1641	56
350x136	1675	261	2010	200	2345	173	2680	150
350x105	1294	203	1553	162	1812	121	2071	103
400x125	1598	286	1917	256	2237	200	2556	184
400x87	1104	198	1325	158	1546	118	1767	78
450x188	2374	453	2849	362	3324	271	3799	180
450x216	2636	533	3163	426	3691	318	4218	212
500x259	3381	626	4057	500	4734	374	5410	249
550x245	3259	742	3910	593	4562	444	5214	342
550x329	4414	1016	5297	811	6180	608	7063	404
600x339	4535	1136	5442	907	6349	680	7256	452
650x282	3820	1012	4584	809	5348	606	6112	403
650x326	4444	1197	5333	956	6222	716	7111	477
650x211	2548	771	3058	616	3567	462	4077	307

Tabela 10 - Carregamentos das barras flexo-comprimidas bi-engastados para flexão em torno do eixo menor de inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de Carga Axial							
	0,5		0,6		0,7		0,8	
	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)
300x95	1112	40	1335	31	1557	20	1780	15
300x100	900	40	1200	31	1400	23	1900	15
300x113	1232	48	1500	37	1700	27	2000	18
300x83	1026	34	1231	26	1436	19	1616	13
350x136	1675	53	2010	41	2345	30	2680	20
350x105	1294	40	1553	35	1812	33	2071	25
400x125	1598	59	1917	47	2237	34	2556	38
400x87	1104	39	1325	30	1546	22	1767	18
450x188	2374	83	2849	74	3324	48	3799	28
450x216	2636	99	3163	78	3691	57	4218	15
500x259	3381	137	4057	108	4734	80	5410	53
550x245	3259	143	3910	114	4562	84	5214	56
550x329	4414	198	5297	171	6180	127	7063	85
600x339	4535	216	5442	171	6349	127	7256	72
650x282	3820	181	4584	145	5348	108	6112	71
650x326	4444	231	5333	184	6222	137	7111	54
650x211	2548	139	3058	110	3567	82	4077	71

Tabela 11 - Carregamentos das barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, para flexão em torno do eixo de maior inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de Carga Axial							
	0,5		0,6		0,7		0,8	
	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)
300x83	974	136	1169	108	1364	80	1558	52
350x136	1587	254	1904	201	2221	149	2539	98
350x105	1225	198	1470	157	1715	116	1961	77
400x125	1531	280	1837	222	2143	165	2449	109
400x87	1056	194	1268	154	1479	114	1690	76
450x188	2267	445	2720	353	3173	263	3627	174
450x216	2526	523	3031	416	3536	310	4041	205
500x259	3254	697	3905	555	4556	414	5207	274
550x245	3146	732	3775	583	4404	435	5034	289
550x329	4264	1001	5117	797	5970	595	6823	395
600x339	4380	1122	5257	894	6133	668	7009	444
600x292	3692	970	4430	773	5168	577	5907	383
650x282	3740	1001	4488	799	5236	597	5984	396
650x326	4294	1184	5152	945	6011	706	6870	469
650x211	2765	763	3318	609	3871	455	4424	302

Tabela 12 - Carregamentos das barra flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, para flexão em torno do eixo de menor inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de Carga Axial							
	0,5		0,6		0,7		0,8	
	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)	P(kN)	M(kNm)
300x83	974	28	1169	21	1364	15	1558	10
350x136	1587	44	1904	33	2221	23	2539	15
350x105	1225	33	1470	25	1715	17	1961	11
400x125	1531	52	1837	39	2143	29	2449	18
400x87	1056	33	1268	25	1479	18	1690	12
450x188	2267	67	2720	50	3173	36	3627	20
450x216	2526	85	3031	65	3536	46	4041	31
500x259	3254	122	3905	94	4556	68	5207	40
550x245	3146	131	3775	101	4404	73	5034	45
550x329	4264	199	5117	155	5970	113	6823	75
600x339	4380	154	5256	154	6133	112	7009	75
600x292	3691	150	4430	129	5168	85	5907	61
650x282	3740	169	4488	132	5236	97	5984	64
650x326	4294	215	5152	168	6011	123	6870	82
650x211	2765	129	3318	100	3871	100	4424	90

Tabela 13 - Temperaturas críticas, barras flexo-comprimidas bi-engastadas, para flexão em torno do eixo de maior inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica (°C)			
300x95	580	515	515	470
300x100	580	515	-	-
350x83	590	515	515	480
350x105	-	515	515	480
350x136	597	-	-	-
400x105	593	-	-	-
400x125	598	-	-	-
400x87	590	550	550	480
450x188	606	550	-	490
450x216	603	560	560	-
500x259	607	555	555	490
550x245	600	560	560	-
550x329	604	575	553	505
600x339	605	580	563	515
650x282	609	565	565	515
650x326	608	560	558	515
650x211	610	570	560	510

Tabela 14 - Temperaturas críticas, barras flexo-comprimidas bi-engastadas para flexão em torno do eixo de menor inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica (°C)			
350x105	575	524	500	457
350x136	585	530	505	465
300x100	585	532	505	470
300x83	584	533	505	460
400x87	595	540	509	468
450x216	591	541	515	472
400x125	590	536	510	470
500x217	600	538	520	473
500x259	594	538	515	479
550x245	596	548	520	483
600x292	597	550	525	484
600x339	598	545	524	485
550x329	600	547	520	486
650x282	599	550	525	487
650x211	590	552	525	486
650x326	600	553	526	489

Tabela 15 - Temperaturas críticas das barras flexo-comprimidas engastadas - rotuladas para flexão em torno do eixo de maior inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica (°C)			
300x100	542	530	505	480
300x83	540	530	509	483
350x136	552	534	510	487
350x105	553	538	518	490
400x125	546	538	519	493
400x87	545	539	515	490
450x188	557	550	518	495
450x216	553	550	520	490
500x259	560	552	523	492
500x245	558	552	525	491
550x329	558	554	520	495
600x339	560	556	523	494
600x292	557	555	526	497
650x282	560	553	520	498
650x326	558	556	525	500
650x211	560	550	525	501

Tabela 16 - Temperaturas críticas das barras flexo-comprimidas engastadas rotuladas para flexão em torno do eixo de menor inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica (°C)			
300x95	538	520	-	460
350x105	540	523	485	465
350x136	541	525	488	466
300x100	540	525	495	467
300x83	543	528	490	466
450x188	542	530	498	-
400x87	544	533	497	-
450x216	545	534	500	469
400x125	546	535	501	469
500x259	549	536	505	470
550x245	549	536	508	472
600x292	-	-	-	472
600x339	553	537	510	473
550x329	550	538	512	473
650x282	549	536	513	478
650x211	547	537	505	474
650x326	550	541	500	480

Tabela 17 - Equações lineares paramétricas para as barras flexo-comprimidas: bi-engastadas à rotação e engastadas-rotuladas, sem proteção e momento atuando em torno dos eixos principais de inércia

Condição de extremidade	Eixo de Flexão	Razão de Carga Axial							
		0,5		0,6		0,7		0,8	
		Equação	Correlação	Equação	Correlação	Equação	Correlação.	Equação	Correlação.
Bi-engastada à rotação	Flexão em torno do eixo de maior inércia	$\theta_c = 631 - 2623\mu$	0,92	$\theta_c = 627 - 4459\mu$	0,90	$\theta_c = 613 - 2425\mu$	0,93	$\theta_c = 546 - 1103\mu$	0,92
	Flexão em torno do eixo de menor inércia	$\theta_c = 619 - 1085\mu$	0,94	$\theta_c = 571 - 1906\mu$	0,90	$\theta_c = 555 - 4007\mu$	0,93	$\theta_c = 513 - 6422\mu$	0,90
Engastada rotulada	Flexão em torno do eixo de maior inércia	$\theta_c = 584 - 2467\mu$	0,94	$\theta_c = 588 - 2207\mu$	0,95	$\theta_c = 544 - 872\mu$	0,91	$\theta_c = 514 - 433\mu$	0,92
	Flexão em torno do eixo de menor inércia	$\theta_c = 563 - 553\mu$	0,90	$\theta_c = 566 - 1194\mu$	0,90	$\theta_c = 541 - 3269\mu$	0,90	$\theta_c = 491 - 2914\mu$	0,90

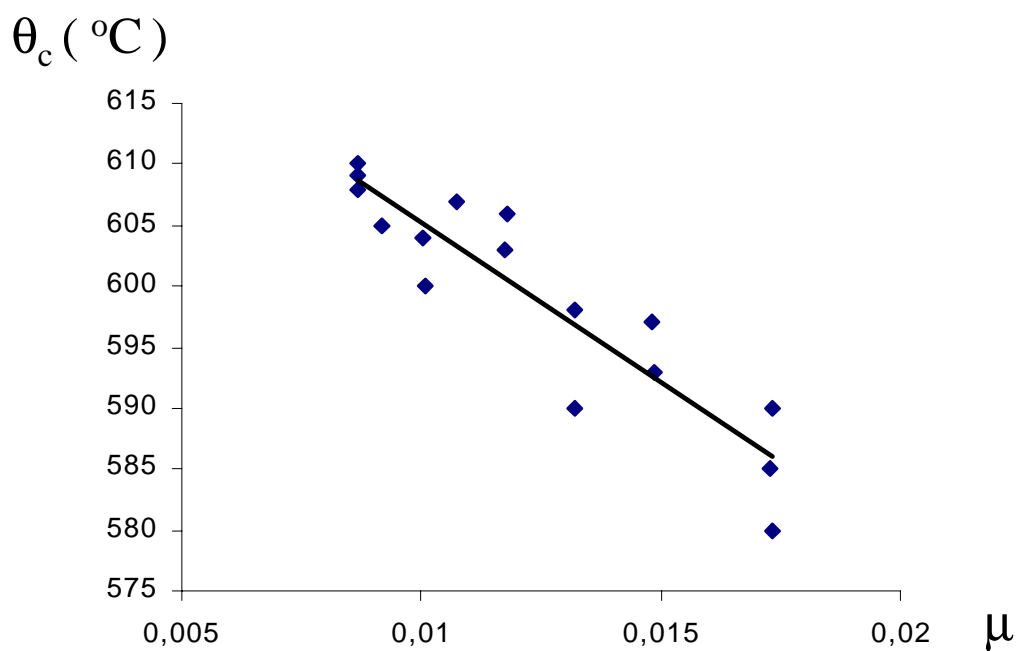


Figura 3.10 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,5; e momento atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.

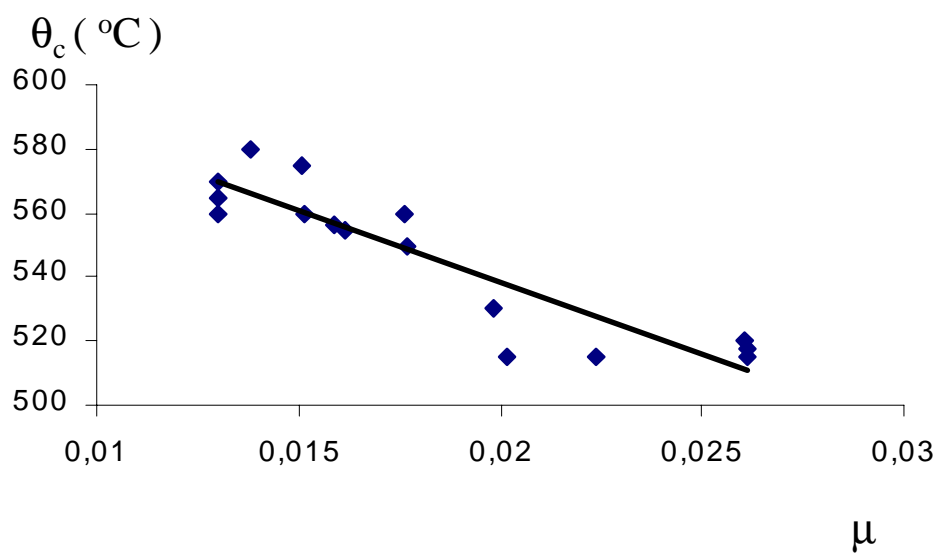


Figura 3.11 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.

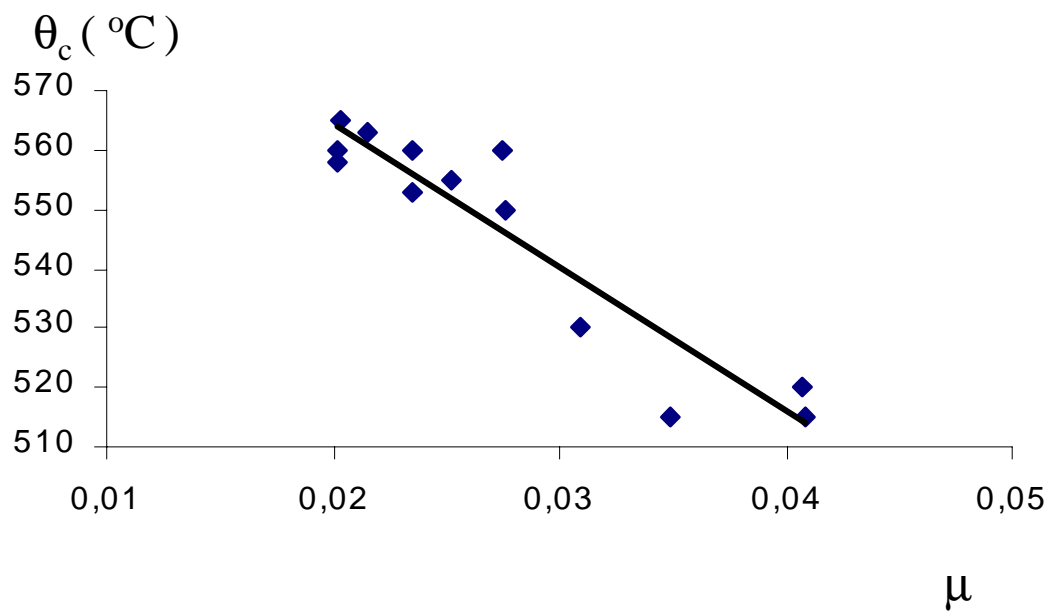


Figura 3.12 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção

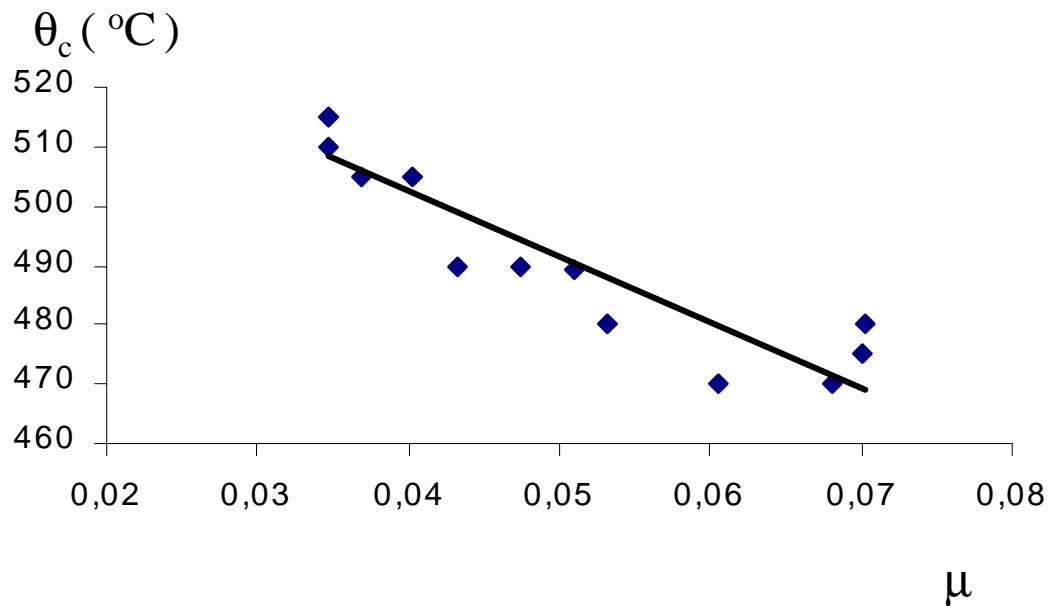


Figura 3.13 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,8; e momento atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.

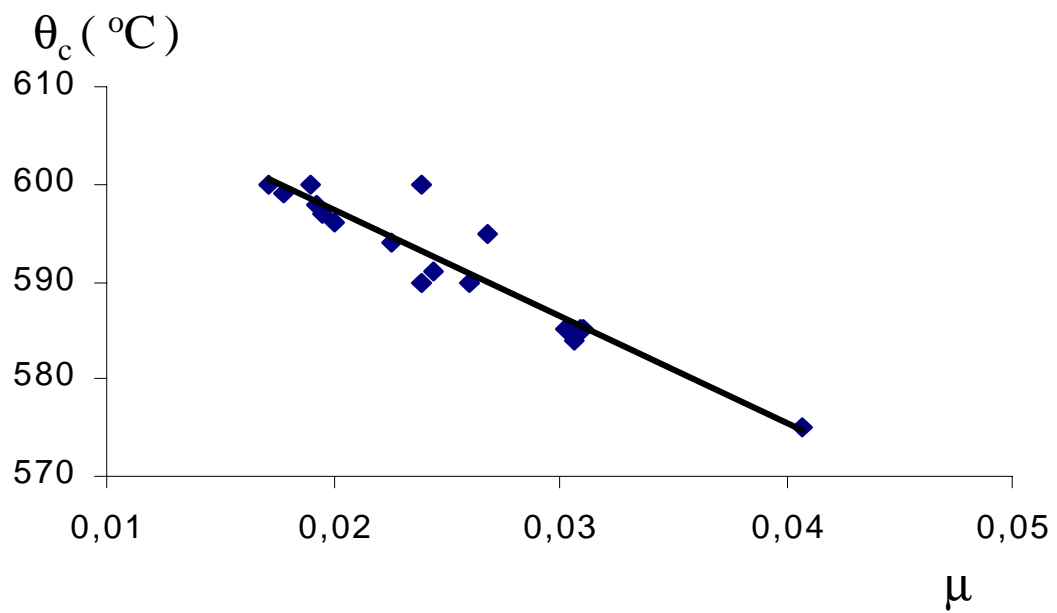


Figura 3.14 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.

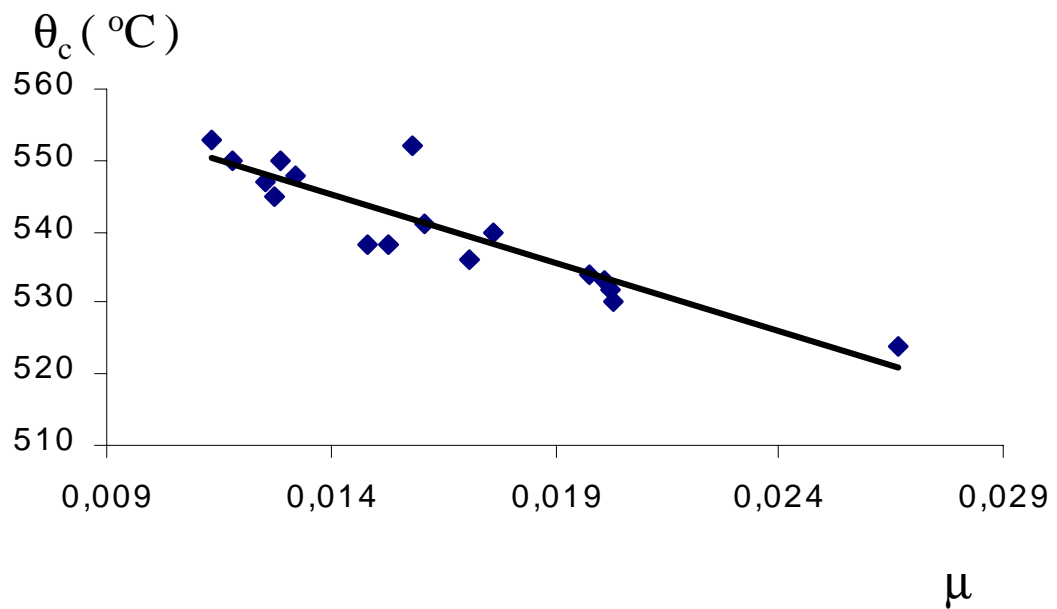


Figura 3.15 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.

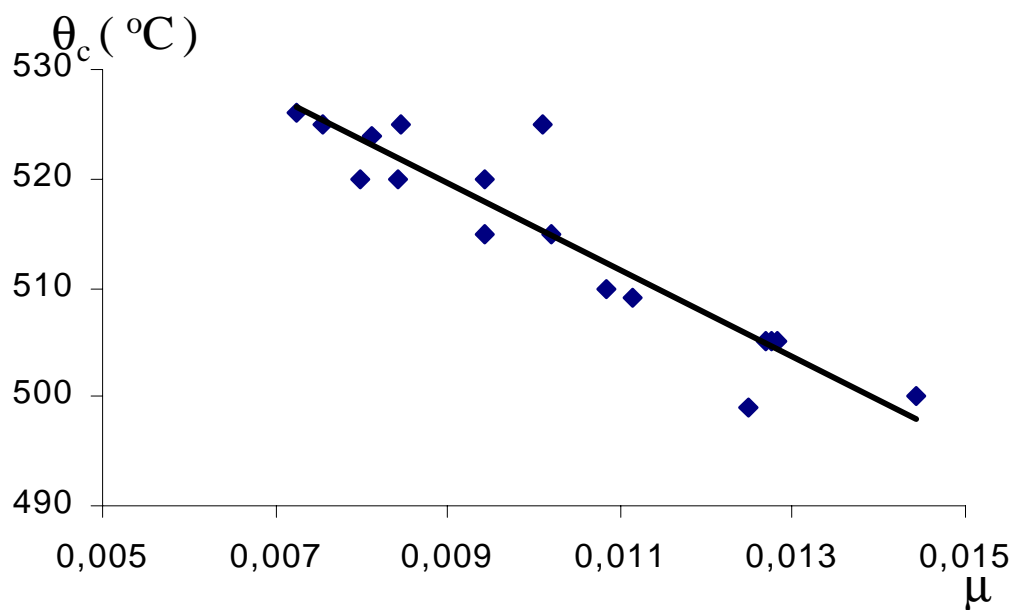


Figura 3.16 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,7; e momento atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.

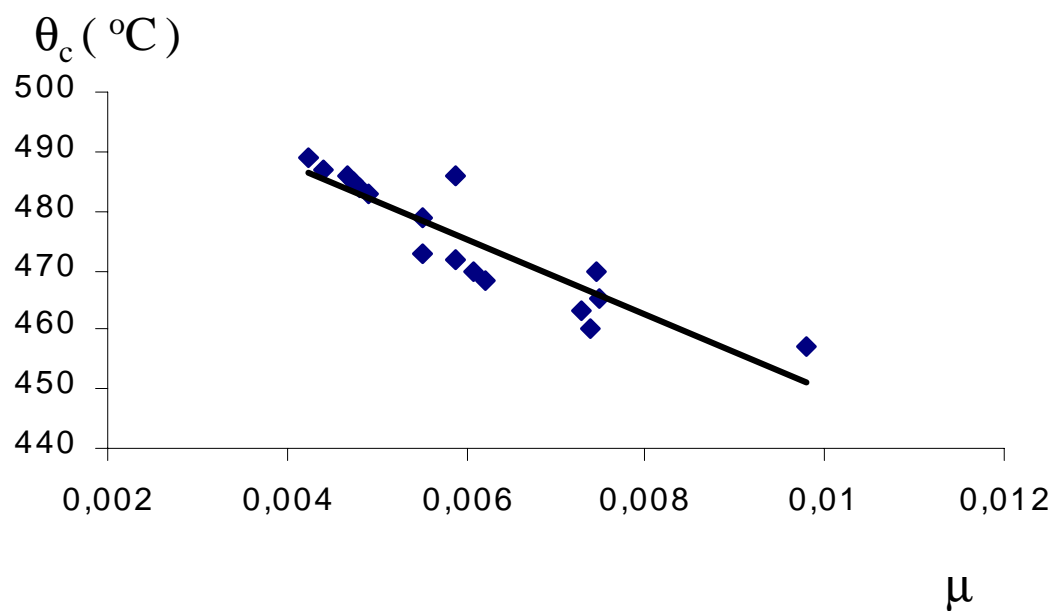


Figura 3.17 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,8; e momento atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.

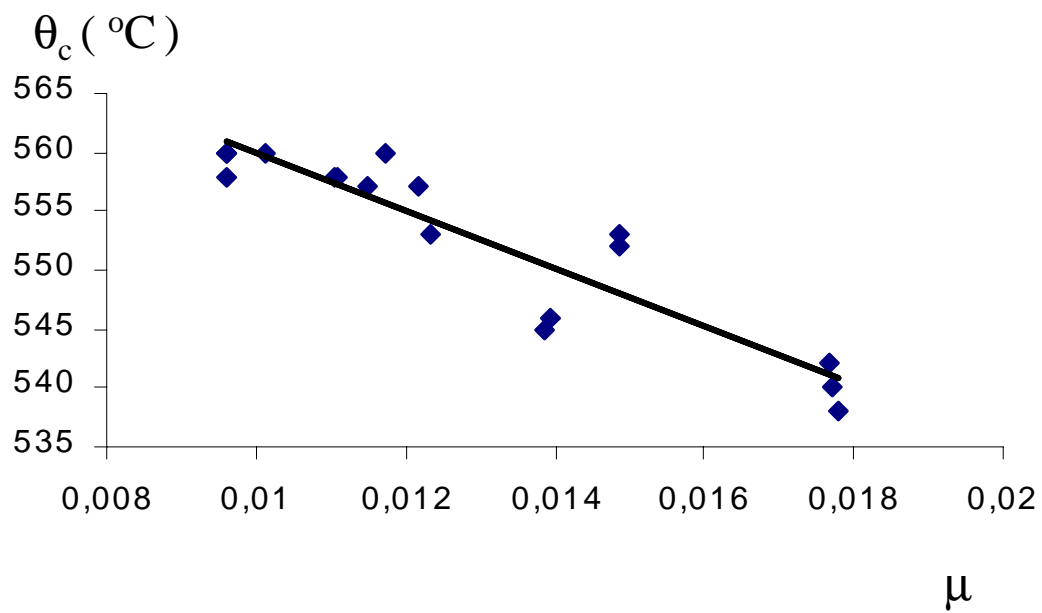


Figura 3.18 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.

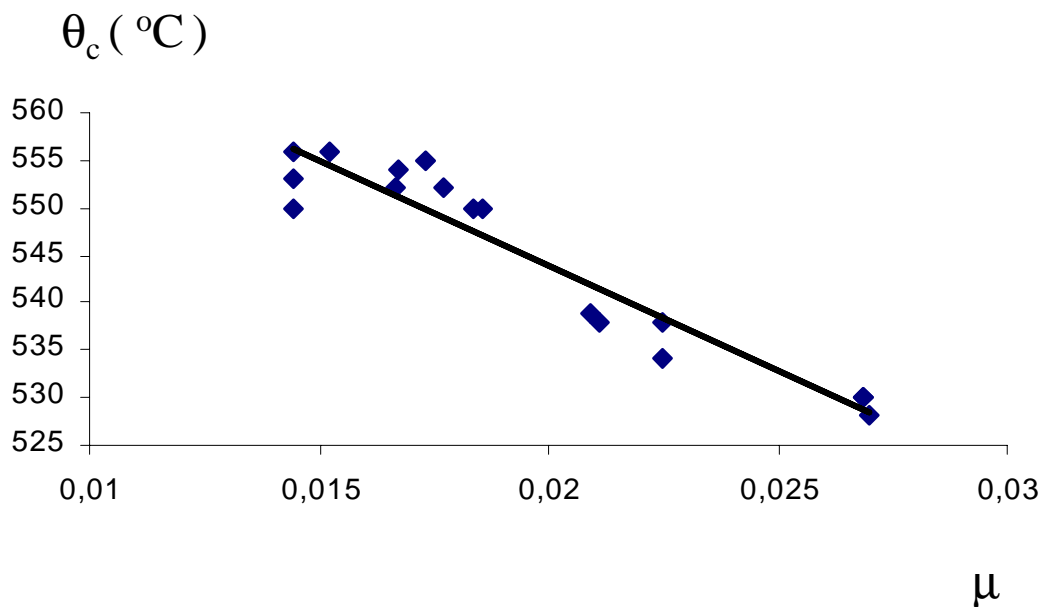


Figura 3.19 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,6 e atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.

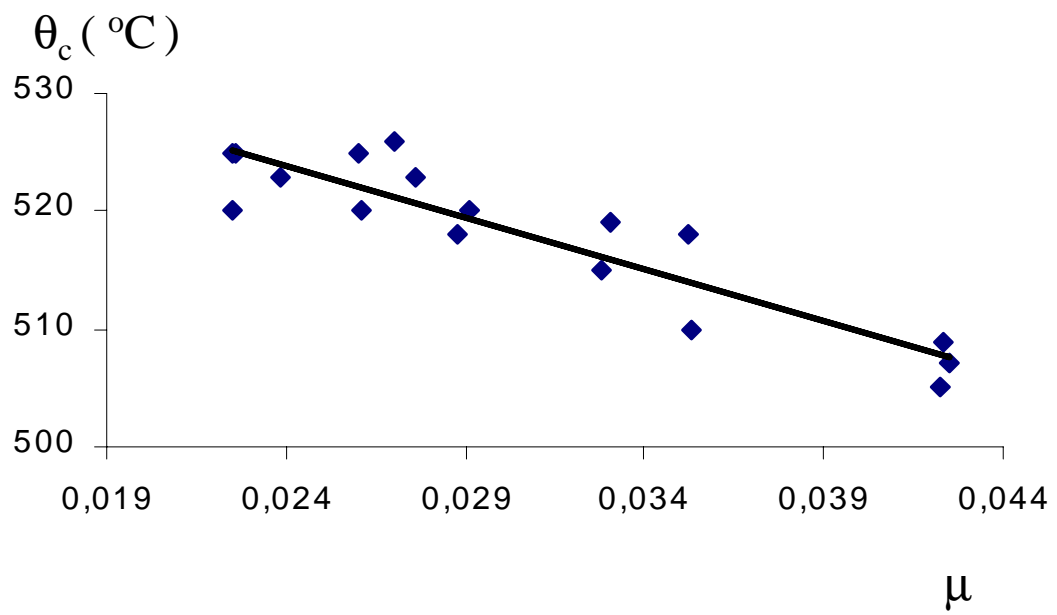


Figura 3.20 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,7 e atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.

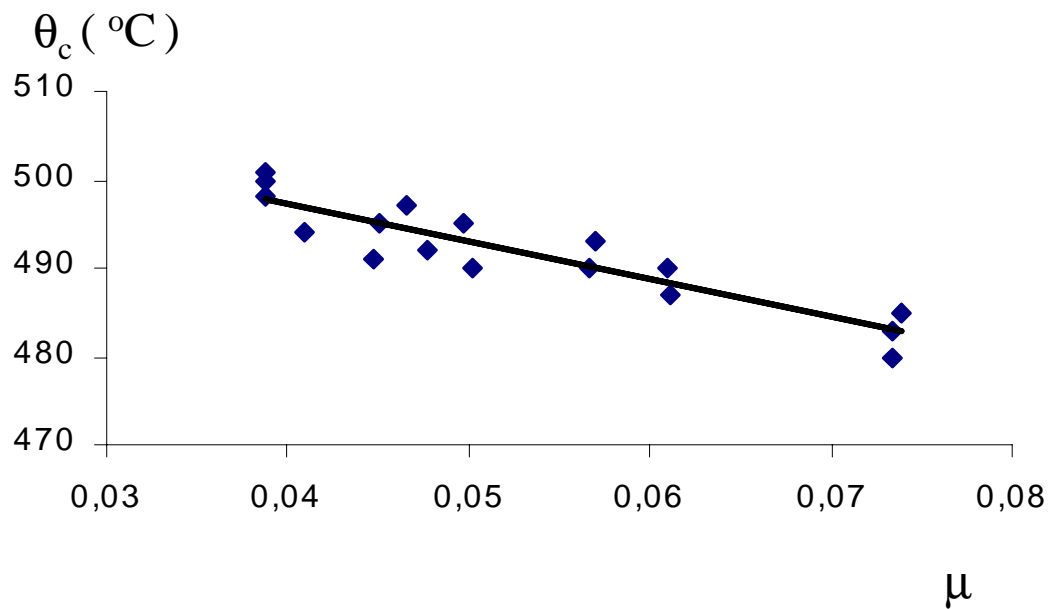


Figura 3.21 - Temperaturas críticas parabarras flexo-comprimidas engastados-rotulados, com razão de carga 0,8 e atuando em torno do eixo maior inércia, sem proteção.

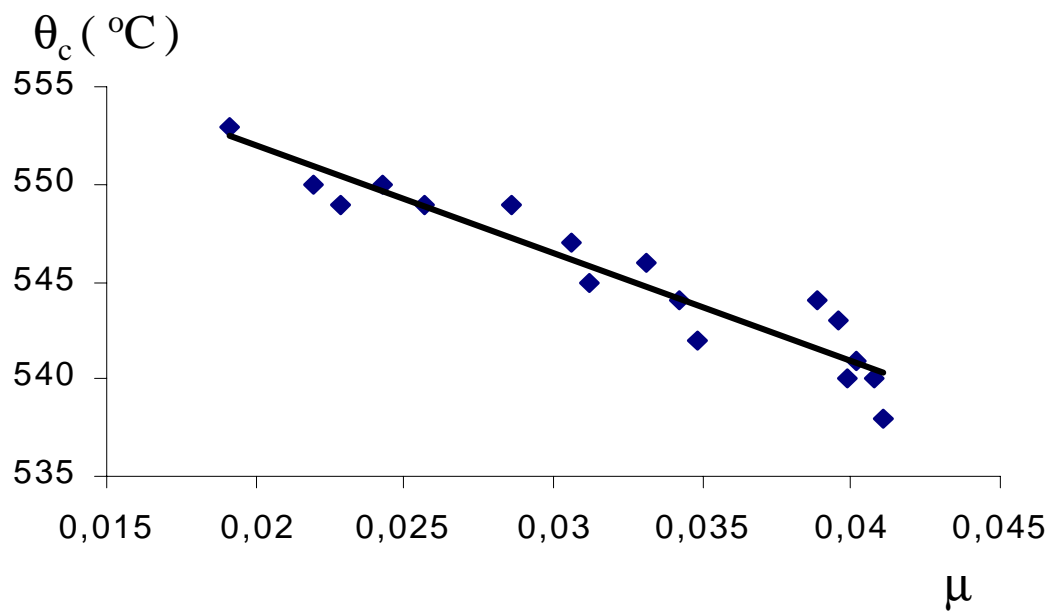


Figura 3.22 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,5 e atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.

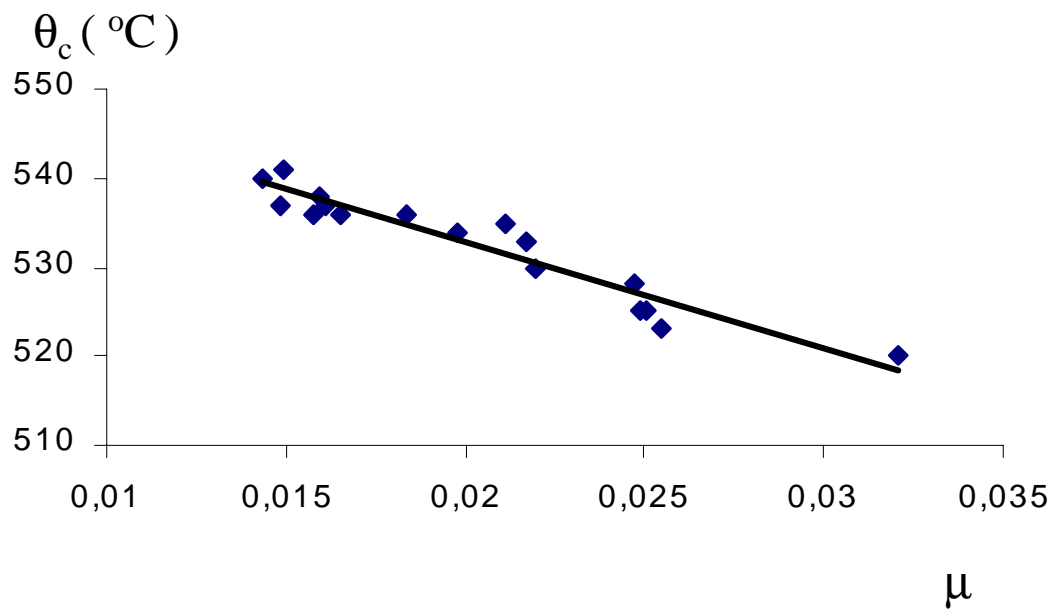


Figura 3.23 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,6 e atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.

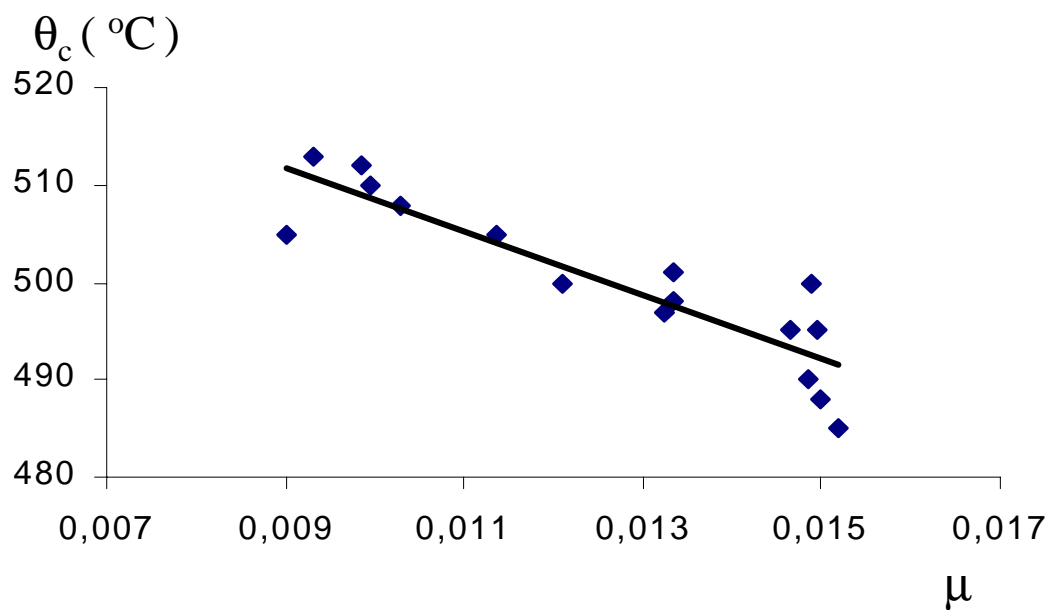


Figura 3.24 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,7 e atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.

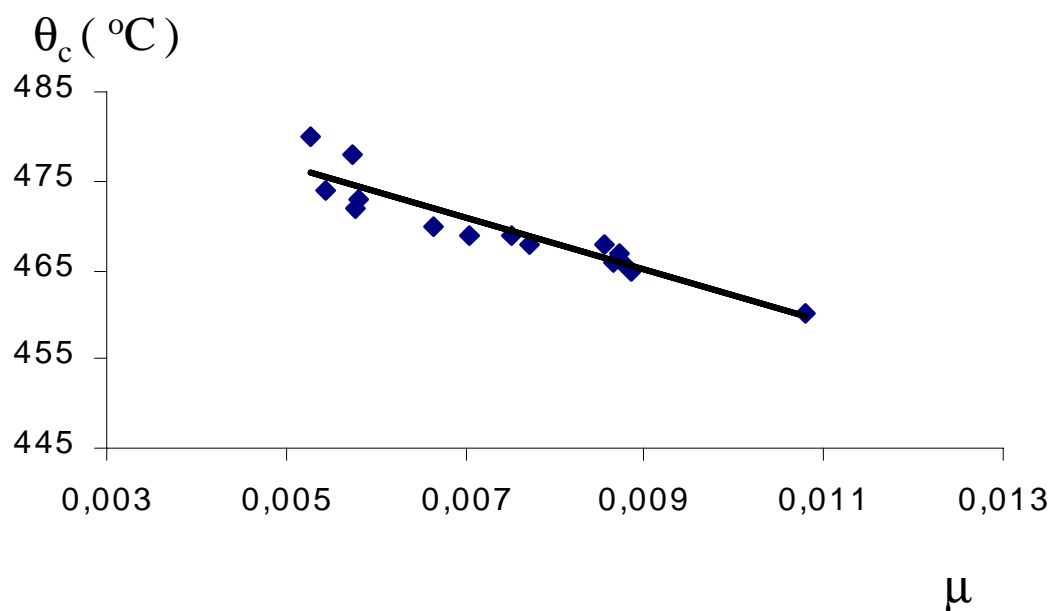


Figura 3.25 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas, com razão de carga 0,8 e atuando em torno do eixo menor inércia, sem proteção.

3.5 - TEMPERATURA CRÍTICA DE BARRAS FLEXO-COMPRESSAS DE AÇO COM PROTEÇÃO PARCIAL EM 40% DO COMPRIMENTO CENTRAL

COSTA (2001) analisou o comportamento em incêndio de vigas mistas parcialmente protegidas. CLARET *et al.*(1999) investigou a temperatura crítica de vigas de aço parcialmente protegidas. Nesses estudos indicam uma elevação significativa da temperatura crítica. Naturalmente, a investigação da temperatura crítica de barras flexo-comprimidas de aço parcialmente protegidos é uma evolução dessas pesquisas anteriores

A proteção parcial é simulado aplicando-se uma lei de elevação de temperatura distinta na proteção central da barra flexo-comprimida, Figura 3.26 , daquela, que se aplica às suas extremidades. Escolhem-se uma extensão de $0,4xL$ (fator economico) do centro do vão para aplicar a proteção. A elevação de temperatura nesta região foi escolhida como 50% daquela que ocorre nas extremidade sem proteção

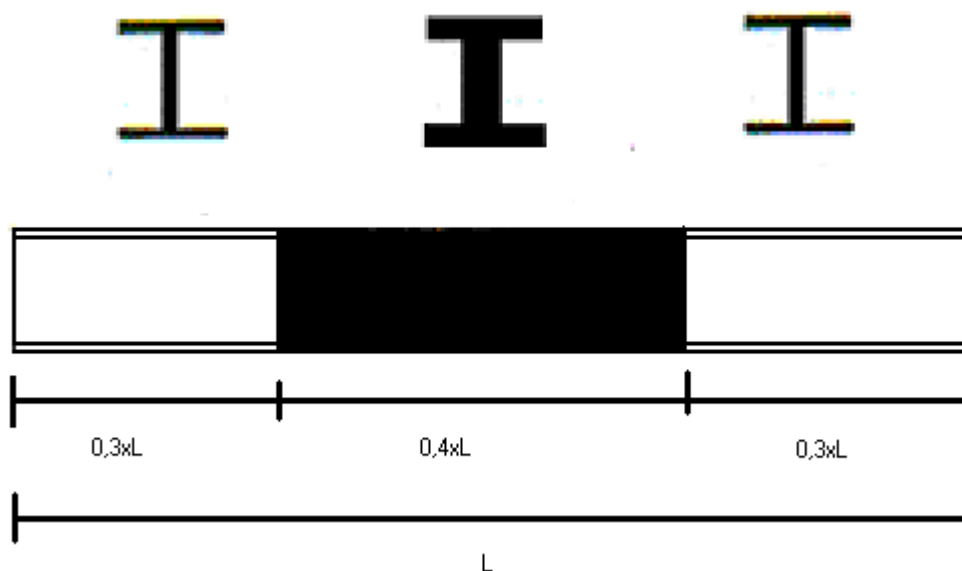


Figura 3.26 - Proteção parcial em 40% do vão central.

São mostrados nas Tabelas 18 e 19 as temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, nas Tabelas 20 e 21 são mostrados as temperaturas

críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas à rotação, nas Tabelas 22 e 23 são mostrados as temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastada-rotulada para as 4 razões de carga axial. Na Tabela 24 é mostrado as equações paramétricas lineares ajustadas para as 3 condições de extremidade com coeficientes de correlação superiores 90%.

Tabela 18 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas com flexão em torno do eixo de maior inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica ($^{\circ}\text{C}$)			
300x100	520	519	500	490
300x113	525	523	498	489
300x83	526	527	498	490
350x136	526	525	510	495
350x105	525	530	515	500
400x125	528	526	515	499
400x87	530	529	515	494
450x188	539	530	517	500
450x216	537	538	515	505
500x259	551	534	518	500
550x245	548	534	523	505
550x329	545	533	524	500
600x339	555	537	519	503
600x292	558	536	520	502
650x282	565	541	519	505
650x326	568	540	520	507
650x211	568	541	520	512

Tabela 19 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas com flexão em torno do eixo de menor inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica (°C)			
300x100	523	500	473	453
300x113	526	499	478	455
300x83	528	500	476	460
350x136	525	503	480	457
350x105	526	507	483	458
400x125	535	507	483	466
400x87	538	513	485	465
450x188	539	509	486	469
450x216	535	512	488	468
500x259	532	517	476	470
550x245	545	525	493	473
550x329	549	523	497	474
600x339	550	526	495	480
600x292	553	528	497	483
650x282	555	530	495	478
650x326	549	529	488	485
650x211	560	537	498	453

Tabela 20 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas com flexão em torno do eixo de maior inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica (°C)			
300x100	625	593	545	-
300x113	626	587	547	500
300x83	627	590	548	504
350x136	629	592	552	-
350x105	630	593	550	507
400x125	632	595	559	509
400x87	635	595	562	511
450x188	635	596	564	513
450x216	637	598	566	515
500x259	636	599	568	-
550x245	637	603	570	-
550x329	638	601	580	517
600x339	638	604	575	518
600x292	639	604	583	517
650x282	641	602	545	521
650x326	642	605	547	519
650x211	642	593	548	520

Tabela 21 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas com flexão em torno do eixo de menor inércia.

Perfil	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
CVS	Temperatura crítica (°C)			
ABNT	Temperatura crítica (°C)			
300x100	610	581	540	485
300x113	616	582	547	487
300x83	617	585	548	488
350x136	617	587	548	487
350x105	618	585	546	489
400x125	620	588	552	491
400x87	619	588	552	493
450x188	621	589	553	495
450x216	623	590	555	492
500x259	623	591	557	496
550x245	625	592	559	495
550x329	626	593	558	497
600x339	627	595	560	498
600x292	630	596	561	499
650x282	635	598	563	501
650x326	630	593	562	495
650x211	635	599	565	505

Tabela 22 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas com flexão em torno do eixo de maior inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica (°C)			
300x100	572	554	545	532
300x113	575	556	547	533
300x83	576	554	547	533
350x136	576	558	548	535
350x105	582	556	548	536
400x125	583	558	549	536
400x87	585	563	550	537
450x188	586	560	554	538
450x216	586	562	553	539
500x259	587	565	555	538
550x245	587	566	557	543
550x329	588	569	556	537
600x339	589	570	558	538
600x292	589	573	556	539
650x282	590	575	558	540
650x326	592	572	560	541
650x211	591	575	560	542

Tabela 23 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastadas-rotuladas com flexão em torno do eixo de menor inércia.

Perfil CVS ABNT	Razão de carga axial (%)			
	0,5	0,6	0,7	0,8
	Temperatura crítica (°C)			
300x100	564	549	539	522
300x113	563	554	538	524
300x83	560	555	540	522
350x136	562	558	540	523
350x105	564	550	539	523
400x125	563	554	542	526
400x87	562	556	542	525
450x188	564	554	542	530
450x216	565	557	539	532
500x259	568	560	545	533
550x245	573	563	543	-
550x329	575	565	544	534
600x339	575	564	545	536
600x292	576	565	547	533
650x282	578	567	549	535
650x326	565	568	541	535
650x211	580	570	539	537

Tabela 24 - Equações lineares paramétricas para as barras flexo-comprimidas: bi-rotuladas, bi-engastadas e engastadas-rotuladas, com proteção e momento atuando em torno dos eixos principais de inércia e para as 4 razões de carga axial.

Condição de extremidade	Eixo de flexão	Razão de Carga Axial							
		0,5		0,6		0,7		0,8	
		Equação	Correlação	Equação	Correlação	Equação	Correlação	Equação	Correlação
Bi-rotulada	Flexão em torno do eixo de maior inércia	$\theta_c = 621 - 5680\mu$	0,90	$\theta_c = 566 - 1758\mu$	0,90	$\theta_c = 564 - 1833\mu$	0,90	$\theta_c = 526 - 620\mu$	0,90
	Flexão em torno do eixo de maior inércia	$\theta_c = 578 - 704\mu$	0,98	$\theta_c = 548 - 829\mu$	0,92	$\theta_c = 517 - 1213\mu$	0,96	$\theta_c = 515 - 3068\mu$	0,91
Bi-engastada à rotação	Flexão em torno do eixo de maior inércia	$\theta_c = 654 - 1569\mu$	0,98	$\theta_c = 616 - 1072\mu$	0,93	$\theta_c = 604 - 1404\mu$	0,85	$\theta_c = 537 - 476\mu$	0,95
	Flexão em torno do eixo de maior inércia	$\theta_c = 647 - 995\mu$	0,91	$\theta_c = 609 - 1204\mu$	0,93	$\theta_c = 586 - 3057\mu$	0,95	$\theta_c = 514 - 3395\mu$	0,91
Engastada rotulada	Flexão em torno do eixo de maior inércia	$\theta_c = 610 - 2055\mu$	0,96	$\theta_c = 593 - 1534\mu$	0,91	$\theta_c = 574 - 687\mu$	0,96	$\theta_c = 249 - 230\mu$	0,90
	Flexão em torno do eixo de maior inércia	$\theta_c = 593 - 805\mu$	0,91	$\theta_c = 582 - 1154\mu$	0,90	$\theta_c = 557 - 1237\mu$	0,90	$\theta_c = 550 - 2904\mu$	0,90

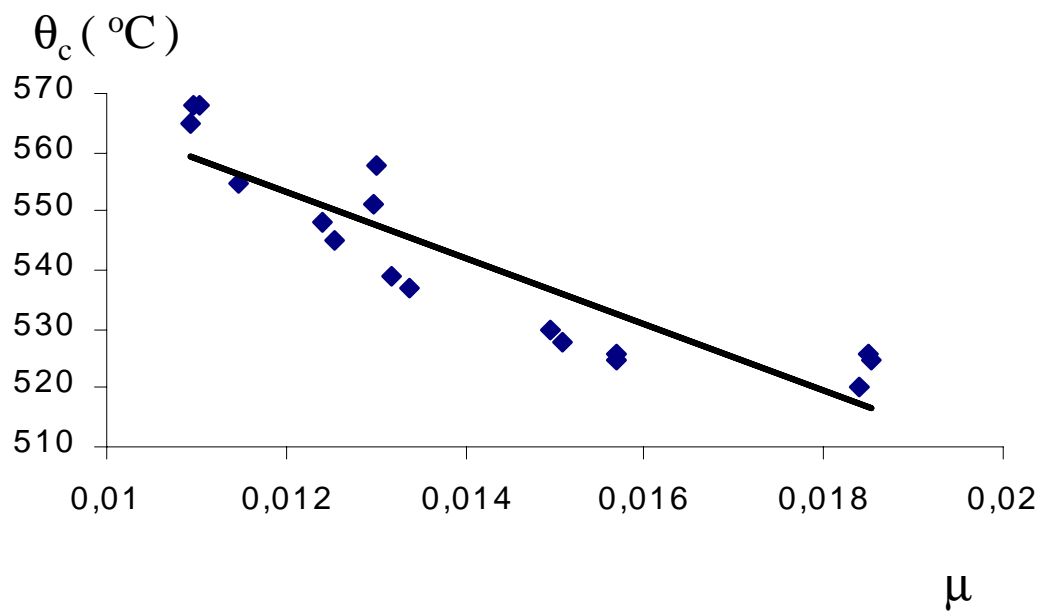


Figura 3.27 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

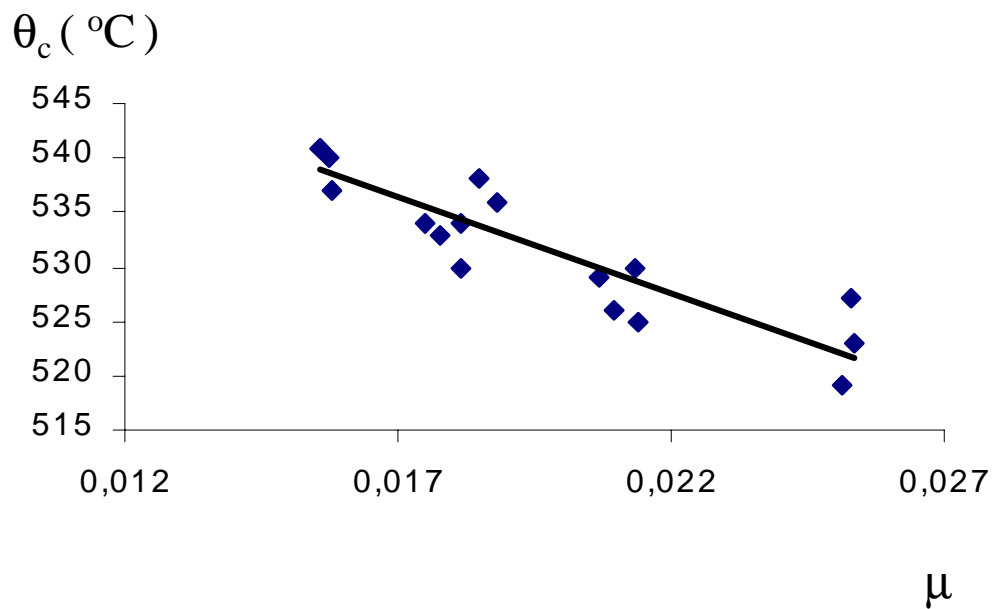


Figura 3.28 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

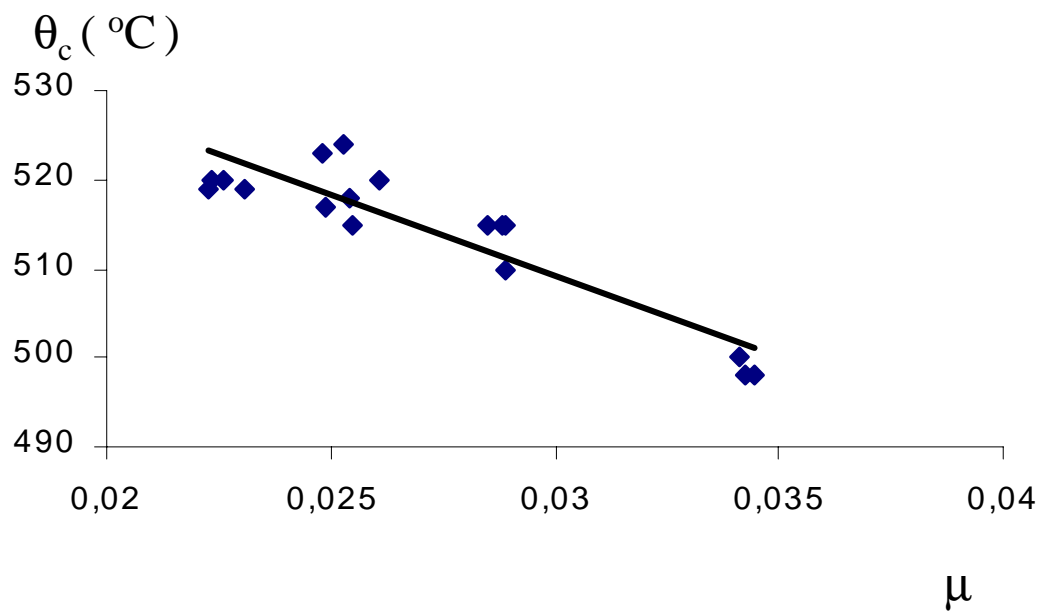


Figura 3.29 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

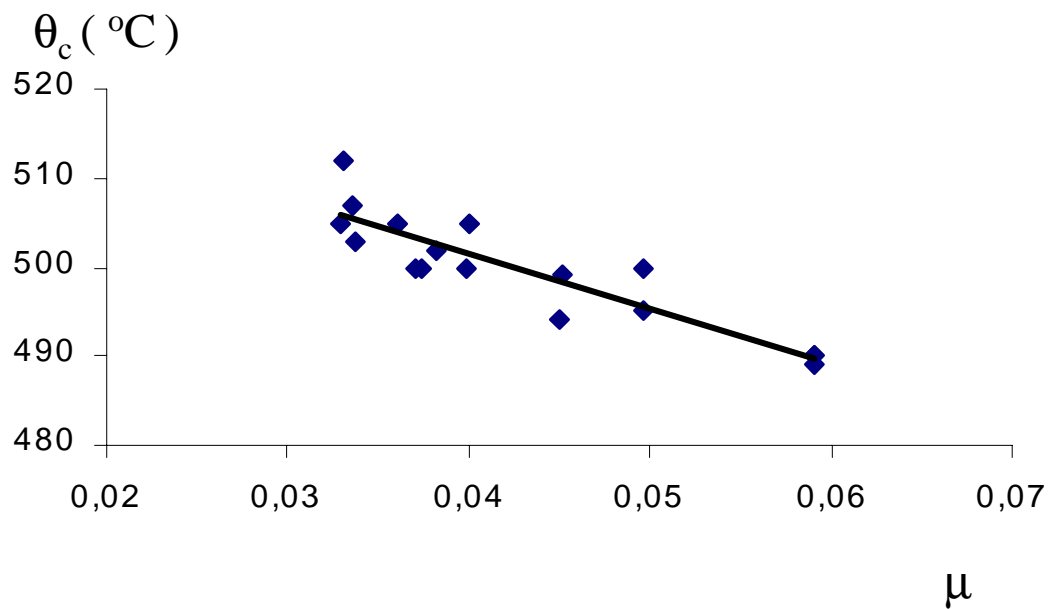


Figura 3.30 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

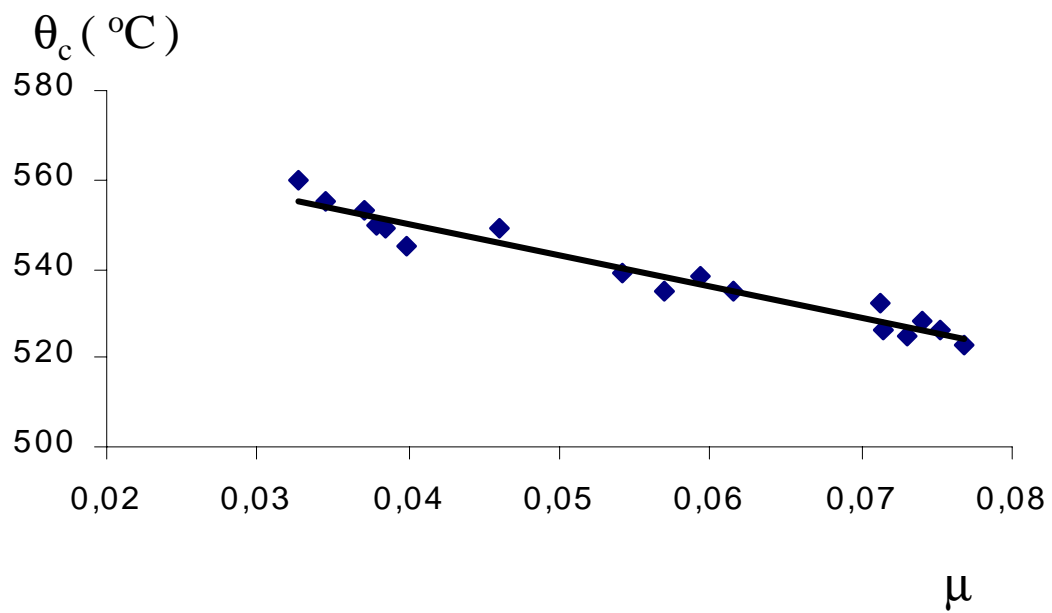


Figura 3.31 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

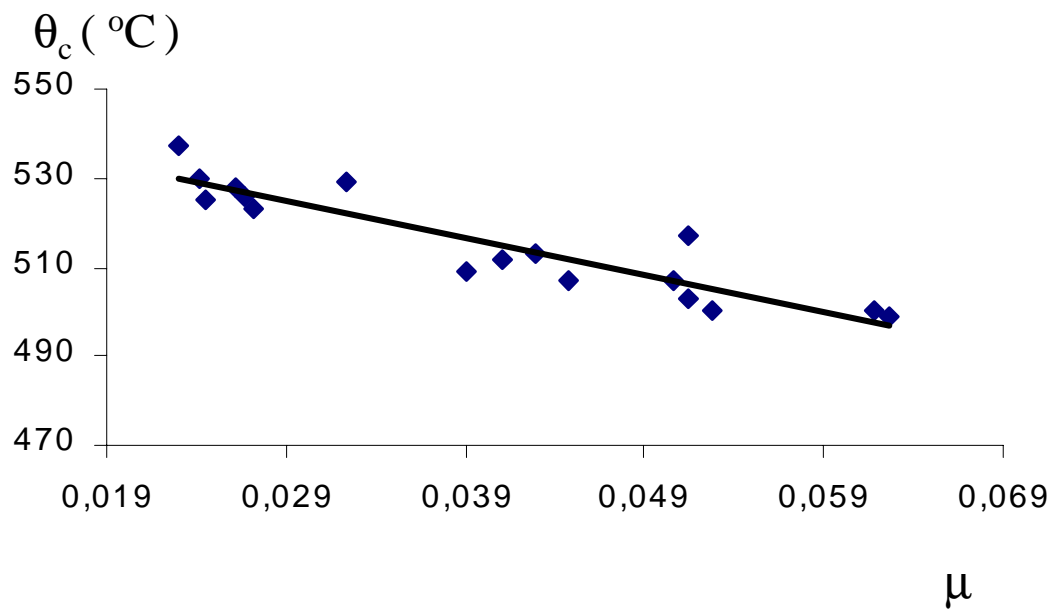


Figura 3.32 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

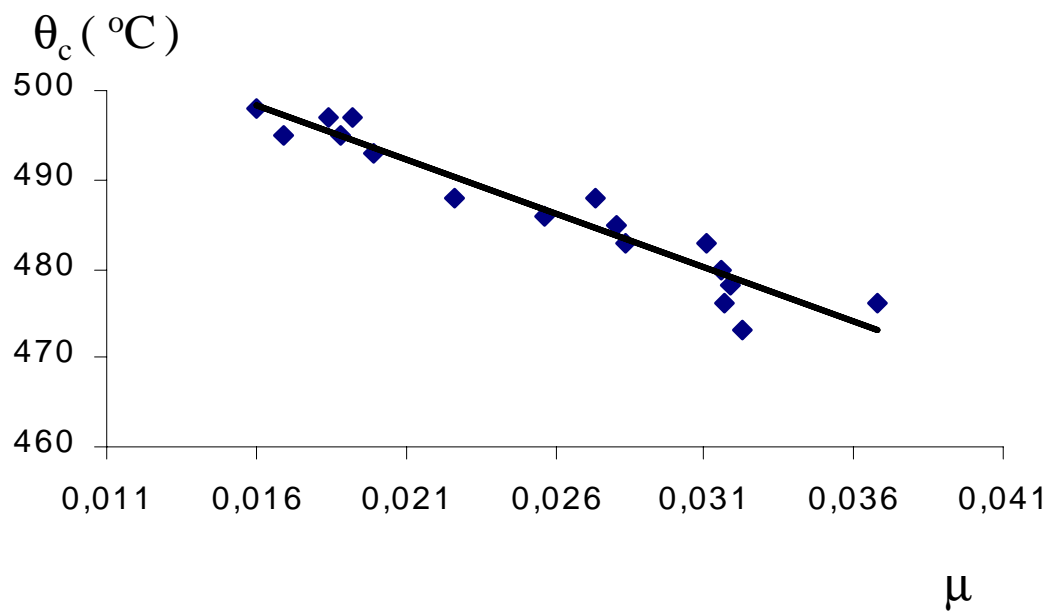


Figura 3.33 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

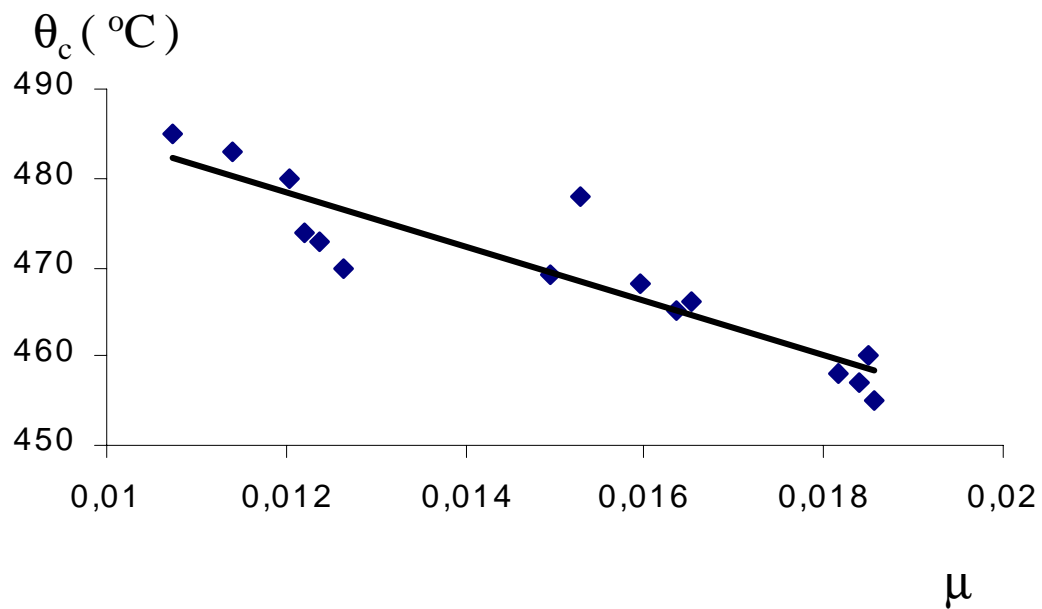


Figura 3.34 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-rotuladas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

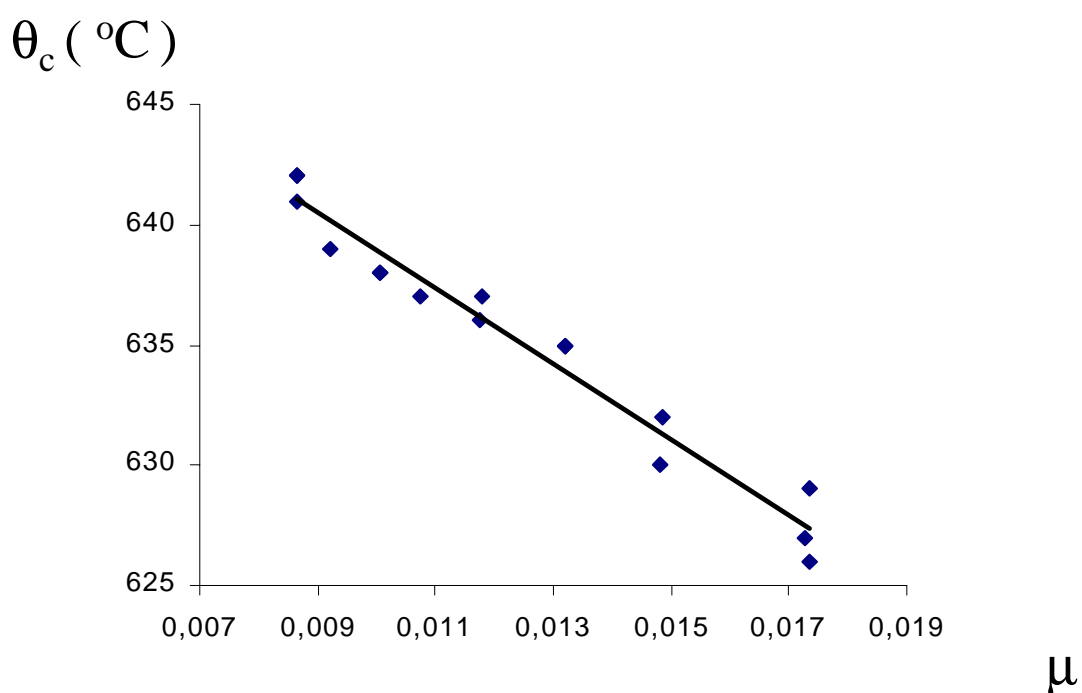


Figura 3.35 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

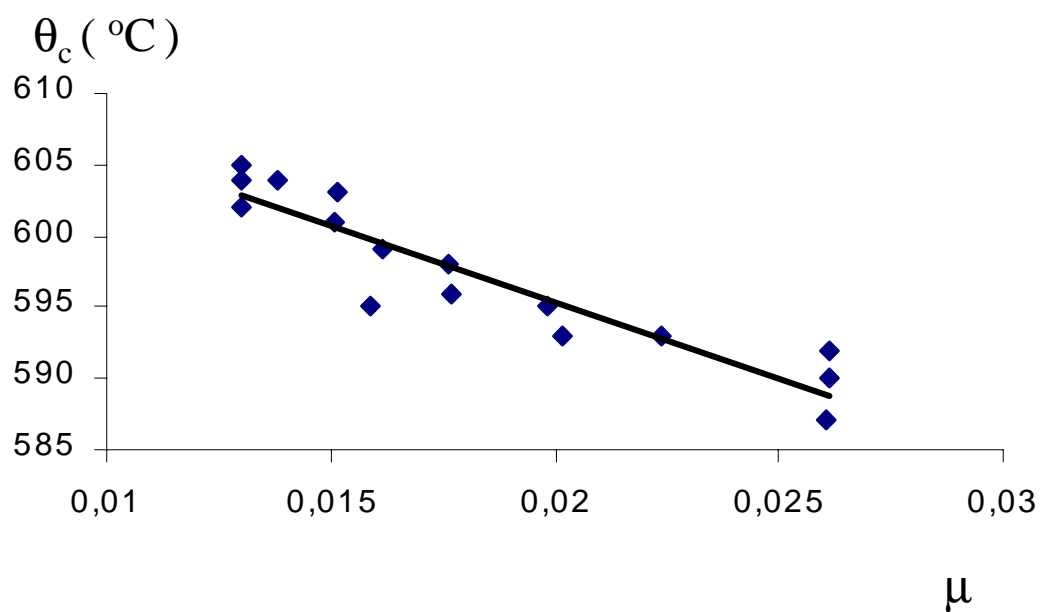


Figura 3.36 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

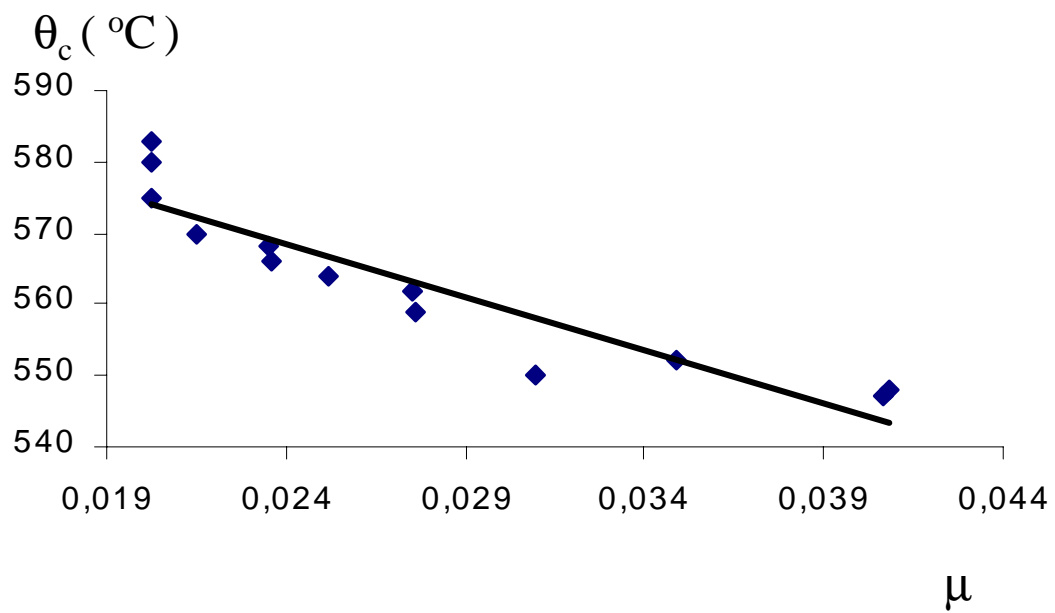


Figura 3.37 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

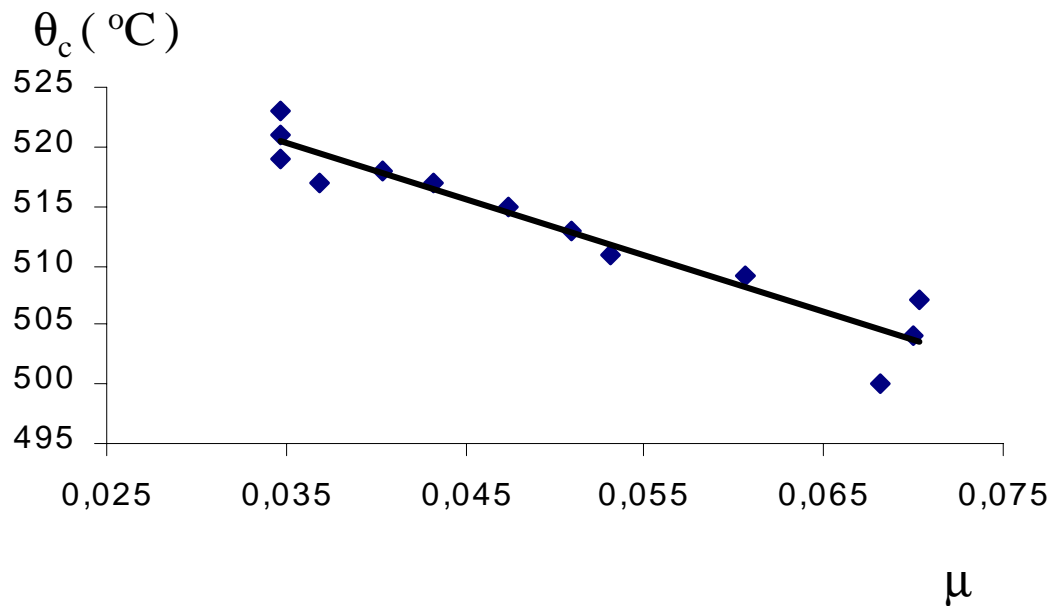


Figura 3.38 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

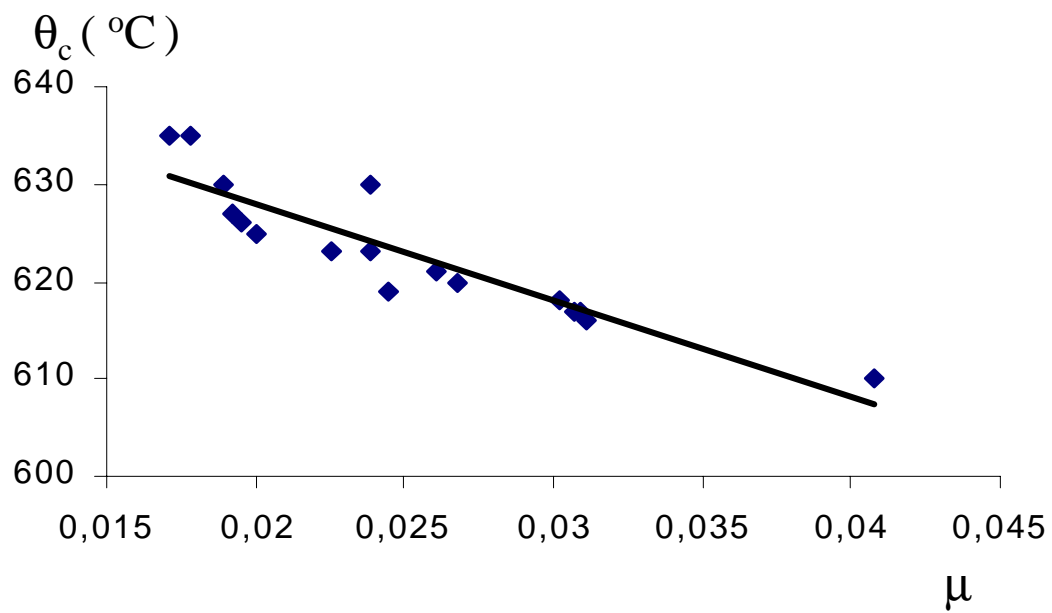


Figura 3.39 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

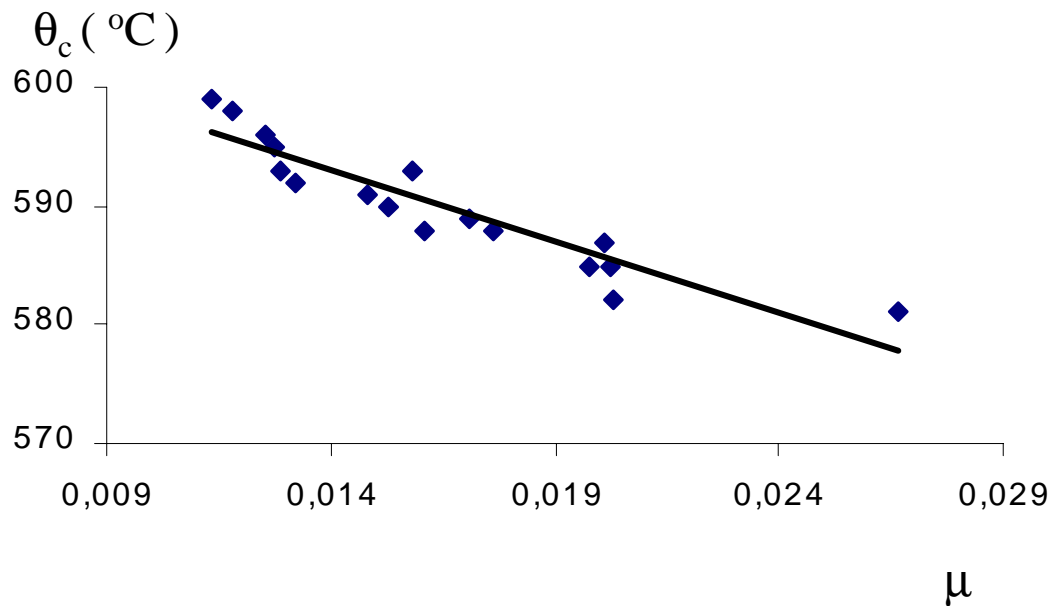


Figura 3.40 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

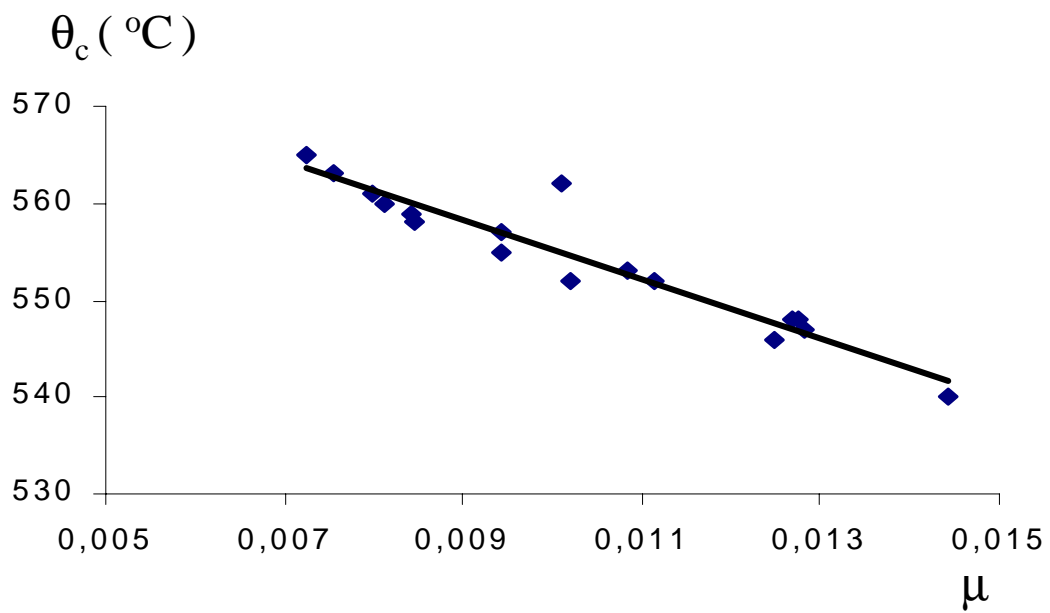


Figura 3.41 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

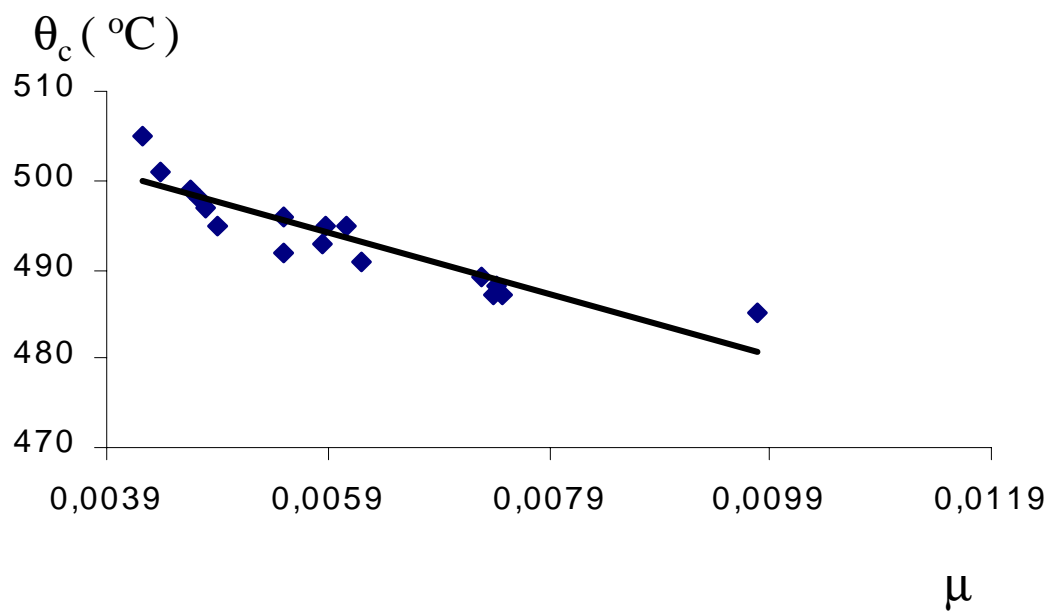


Figura 3.42 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas bi-engastadas, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

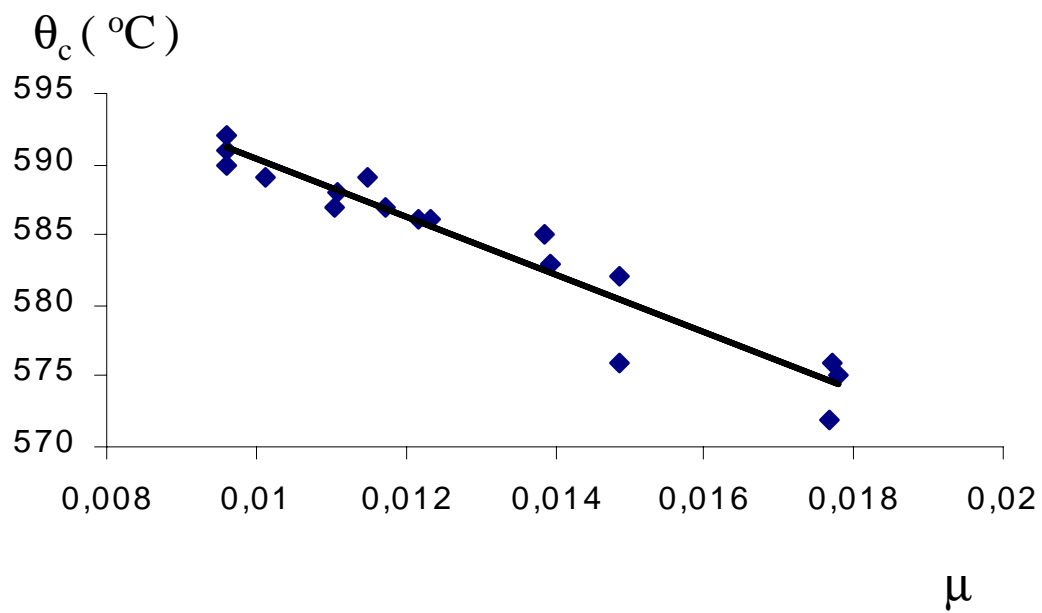


Figura 3.43 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastada-rotulada, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

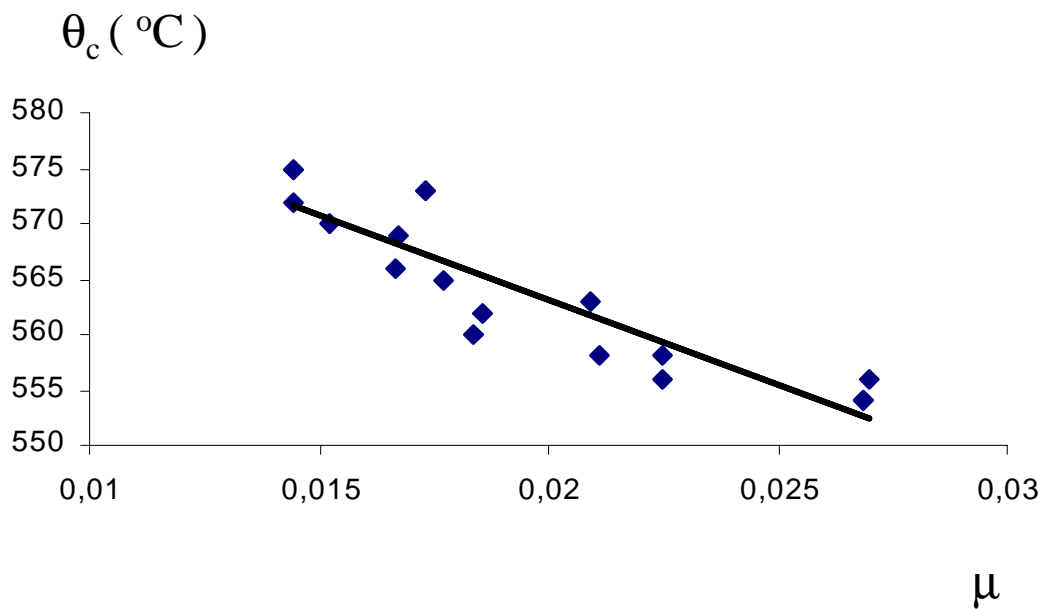


Figura 3.44 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastada-rotulada, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

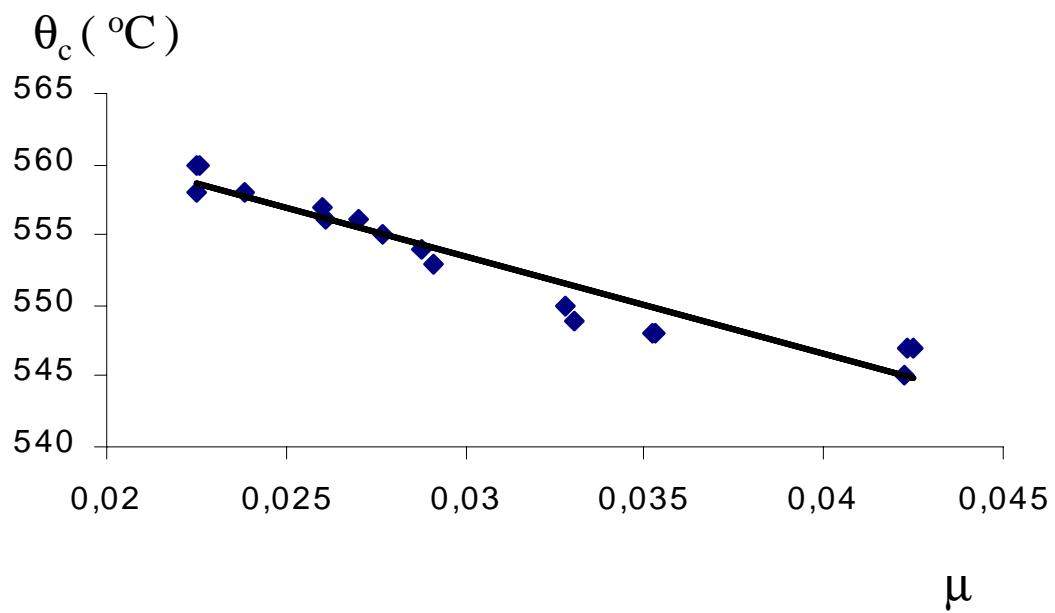


Figura 3.45 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastada-rotulada, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

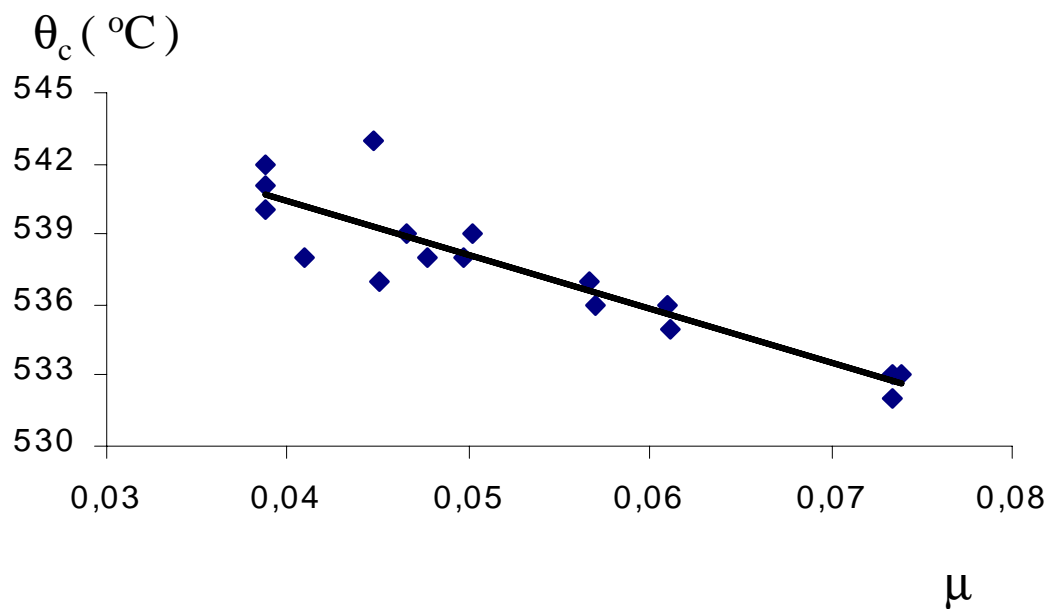


Figura 3.46 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastada-rotulada, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo maior inércia, com proteção parcial.

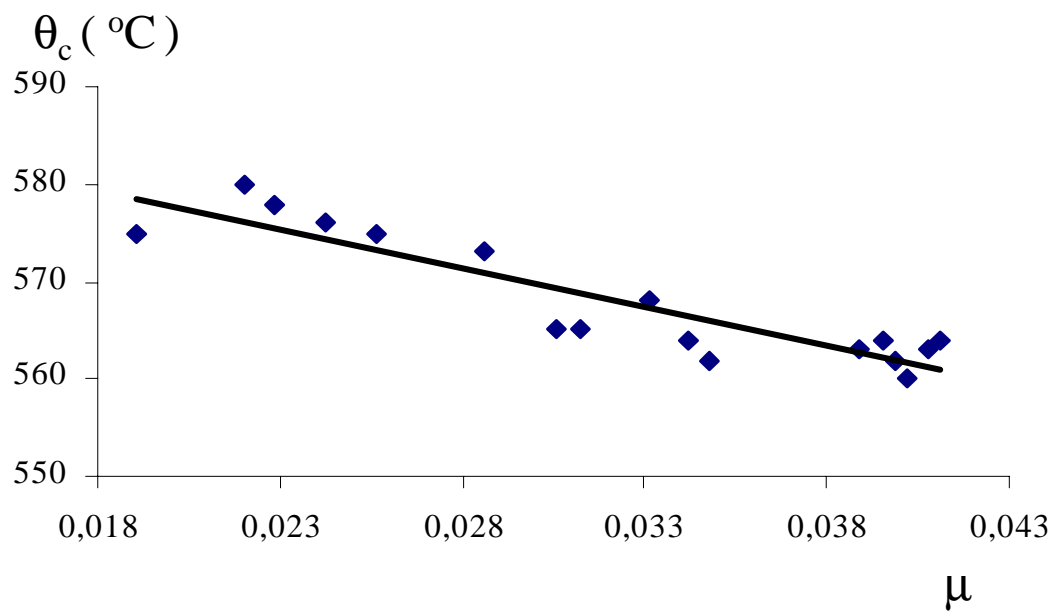


Figura 3.47 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastada-rotulada, com razão de carga 0,5 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

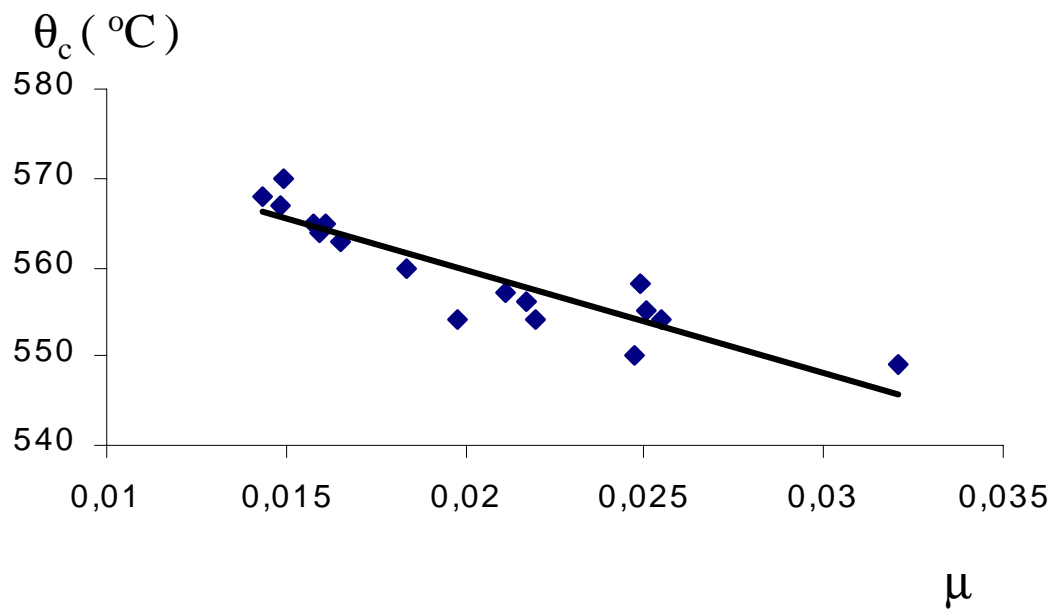


Figura 3.48 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastada-rotulada, com razão de carga 0,6 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

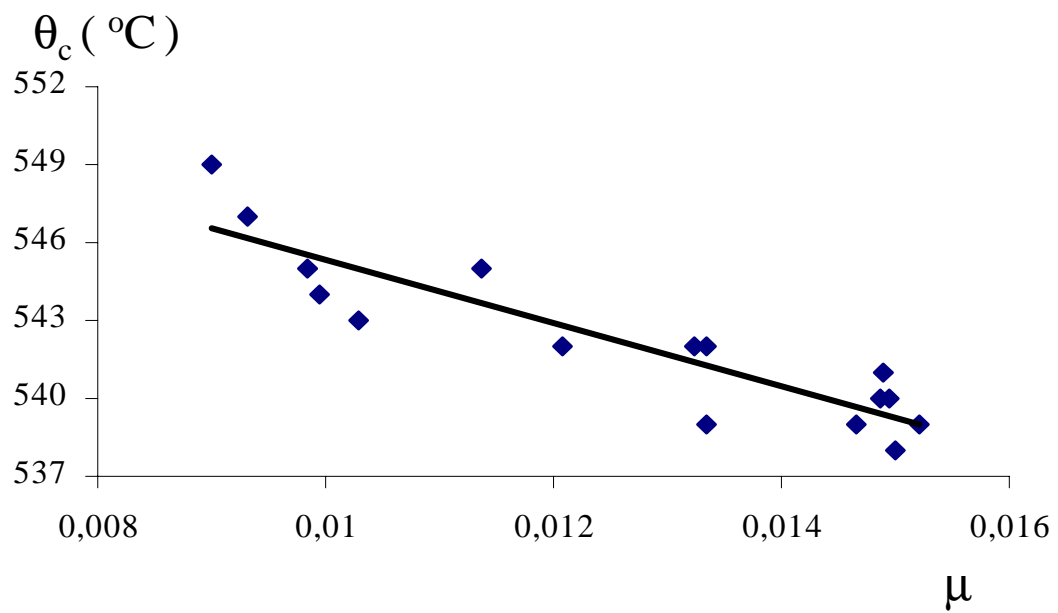


Figura 3.49 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastada-rotulada, com razão de carga 0,7 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

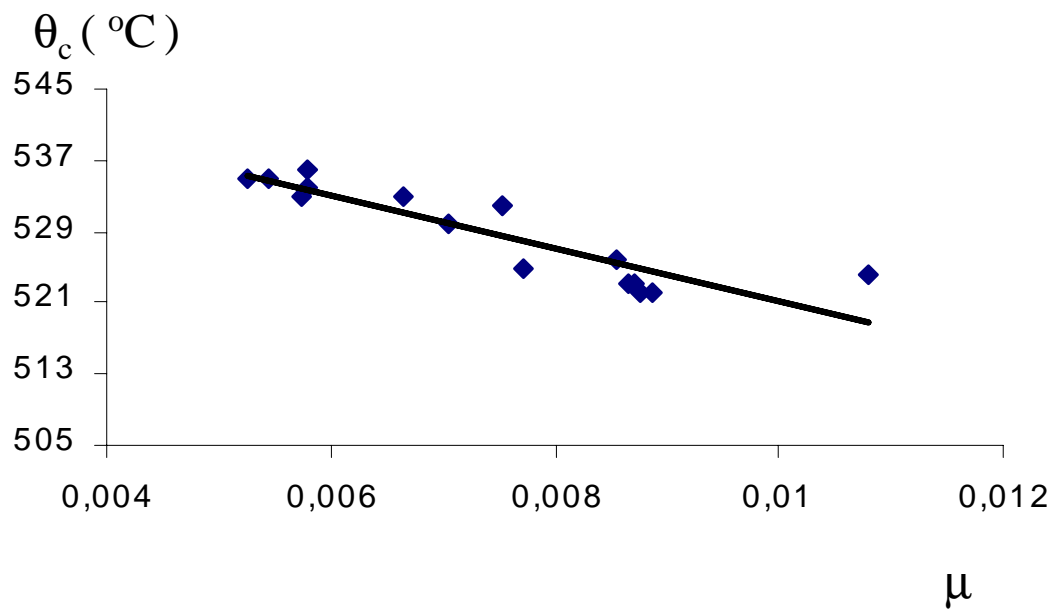


Figura 3.50 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas engastada-rotulada, com razão de carga 0,8 e momento atuando em torno do eixo menor inércia, com proteção parcial.

CAPÍTULO IV

RESISTÊNCIA AO FOGO DE BARRAS FLEXO-COMPRESSAS DE AÇO, BI-ROTULADAS E SEM PROTEÇÃO

4.1 - INTRODUÇÃO

Apesar da grande variedade dos perfis produzidos pela indústria, as rotinas de cálculo e dimensionamento dos escritórios de projeto estrutural sempre conduzem ao uso de perfis que se situam em uma determinada faixa de dimensões para estruturas de porte semelhante. Esta relativa padronização se compreende em função da especialização dos construtores em determinados tipos de edificações o que se verifica na prática. Em consequência, um tipo de estudo que tem o mesmo objetivo da investigação paramétrica conduzida anteriormente, embora empregue processo metodológico distinto, refere-se à obtenção de curvas de resistência ao fogo para as barras flexo-comprimidas de aço com dimensões e condições de contorno típicas das usuais na prática de projeto.

Nesse capítulo, são apresentadas curvas de resistência ao fogo de algumas barras flexo-comprimidas de aço bi-rotuladas. Os perfis foram escolhidos entre os padronizados pela ABNT com as dimensões que se supõem representativas dos perfis usuais na construção de edifícios de andares múltiplos.

As curvas de resistência têm uma finalidade dupla. Em primeiro lugar, de um ponto de vista mais imediato, servem para ilustrar o tipo de investigação que se pode fazer especificamente para uma determinada linha de produtos disponíveis no mercado. Nesse caso, as curvas de resistência são um tipo de informação do fabricante que, naturalmente, implementam a competitividade do produto. Em segundo lugar, de um ponto de vista de investigação tecnológica, tais curvas indicam padrões de comportamento de uma dada classe de perfis o que pode suscitar pesquisas futuras.

4.2 - PROCESSO METODOLÓGICO

Em situação de incêndio, as barras flexo-comprimidas de aço bi-rotulados podem, especialmente, chegar prematuramente a uma condição de colapso. De fato, sendo bi-rotuladas, têm um comprimento de flambagem igual a seu comprimento geométrico o que reduz a tensão de flambagem na proporção do seu quadrado. Qualitativamente, o fenômeno de instabilidade global em situação de incêndio poderia ser descrito em duas fases, a saber: (a) temperaturas no perfil inferiores a 400°C ; (b) temperaturas superiores a 400°C .

Na primeira fase, não se observa redução significativa da rigidez da barra, ao mesmo tempo em que se verifica uma a sua dilatação linear. A tensão de flambagem é aproximadamente igual à tensão de flambagem à temperatura ambiente. Nesta fase, observa-se uma redução do esforço resultante de compressão na peça em função da dilatação o que reduz a tensão atuante e eleva a resistência ao fogo.

Na segunda fase, porém, a redução do módulo de elasticidade longitudinal é bastante acentuada e a tensão de flambagem se reduz proporcionalmente. Naturalmente, admite-se uma redução da carga atuante em função do caráter excepcional da solicitação, mas, ainda assim, a instabilidade das barras flexo-comprimidas é uma situação crítica de verificação de uma estrutura em incêndio.

Os processos simplificados de cálculo de pilares flexo-comprimidos, adotados em normas estrangeiras como a BS 5950: Part 8 e na norma brasileira NBR 14323, empregam hipóteses analíticas simplificadoras como a de solicitação axial e distribuição uniforme de temperaturas. Para levar em conta fatores como a existência de tensões residuais, excentricidade acidental da carga e imperfeição geométrica da barra, as normas de cálculo utilizam curvas de flambagem elaboradas com base em programas experimentais que complementam os resultados da formulação analítica. De acordo com essa metodologia, o ECCS (1985) recomenda as temperaturas críticas de barras

flexo-comprimidas de aço indicadas na Tabela 23 em função da razão da carga solicitante na situação de incêndio para a carga solicitante à temperatura ambiente.

Tabela 25 - Temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas de aço em função da razão de carga.

Razão de Carga	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Temp. Crítica. (°C)	585	540	490	430	360

Observa-se na Tabela 25 que as temperaturas críticas são baixas, mesmo para razões de carga reduzidas. Isto é consequência das hipóteses simplificadoras adotadas na análise, notadamente a hipótese da distribuição uniforme de temperaturas na seção e ao longo do comprimento da barra, e nos resultados de ensaios de barras isoladas. Em consequência, o custo de proteção passiva envolvido no projeto de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas de aço é habitualmente muito elevado, CLARET (2000).

As análises conduzidas pelo Método de Elementos Finitos simulam condições mais próximas da situação real de emprego dos pilares de aço nas edificações. Por exemplo, raramente uma barra estará envolvida pelo fogo identicamente nas quatro faces. Ora, a existência de gradientes de temperatura na seção transversal resulta na transferência de carga das partes mais aquecidas para as partes mais frias, podendo elevar significativamente a resistência ao fogo da barra. Por outro lado, a análise de barras flexo-comprimidas de aço pelo Método de Elementos Finitos, conforme a implementação do VULCAN, permite a consideração de tensões superiores ao limite elástico do material; em paralelo, grandes deslocamentos também podem ser considerados. Por outro lado, com mais acuidade e menor custo que nas experimentações, condições de contorno e de carregamento variadas podem ser introduzidas na análise, BURGESS e PLANK (1999). Desse modo, as análises pelo VULCAN são um método que permite ao engenheiro de cálculo aproximar-se tanto quanto possível da resistência ao fogo da barra flexo-comprimida sem desprezar

parâmetros de grande importância na sua resistência ao fogo como a hiperestaticidade e a distribuição não-uniforme de temperaturas.

O processo metodológico empregado nessa pesquisa consiste no uso de análises extensivas através do VULCAN de barras flexo-comprimidas de aço com geometria, carregamento e condições de contorno representativas da prática de projetos no ramo das edificações residenciais e comerciais de múltiplos andares. As curvas de resistência foram elaboradas para diversas situações com a intenção de que sejam aplicáveis em projetos reais. Ademais, o exame dessas curvas de resistência permite concluir sobre o comportamento de barras flexo-comprimidas de aço em incêndio, particularizando conclusões gerais que também podem ser úteis em projeto.

4.3 - CURVAS DE RESISTÊNCIA

4.3.1 - MOMENTOS FLETORES DE DIAGRAMA RETANGULAR

De acordo com o processo metodológico proposto, as barras flexo-comprimidas de aço, bi-rotuladas sem proteção passiva, foram analisados pelo VULCAN, nas situação de carregamento mostrada na Figura 4.1(a). Os comprimentos de flambagem de 2, 4, 6 e 8 m foram adotados, admitindo a interpolação linear para valores situados nesses intervalos, conforme REFAO (1985).

O carregamento aplicado é calculado de acordo com os anexos D, E, H e I da NBR 8800 para os dois tipos de barras flexo-comprimidas analisados, impondo-se relações excentricidade de e/d de 0, 0,1, 0,25, 0,5 e 1,0 (REFAO) onde e é a excentricidade e d a altura total do perfil. A excentricidade final se obtém acrescentando uma imperfeição geométrica de $L/1000$, onde L é o comprimento total da barra flexo-comprimida, à excentricidade acidental e . Para cada excentricidade, frações da carga axial crítica são aplicadas, juntamente com os momentos correspondentes. Evidentemente, quanto menor a fração do carregamento crítico aplicada, maior a reserva de resistência ao fogo.

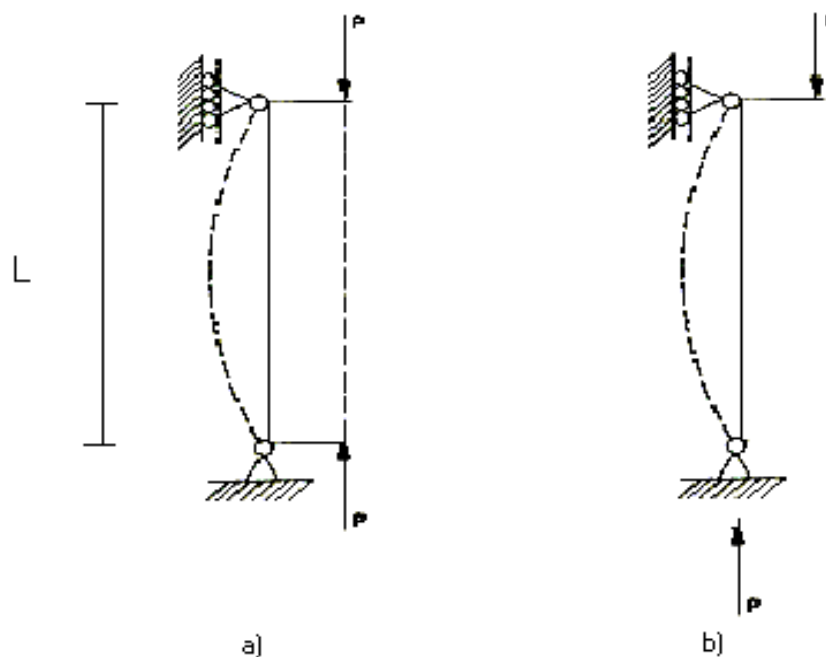


Figura 4.1 - Tipos de barras flexo-comprimidas analisadas.

As Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 são as curvas de resistência para barras flexo-comprimidas de aço de comprimento 2, 4, 6, e 8m, respectivamente, formados com um perfil CVS 450 x 216. Qualitativamente, as seguintes observações são feitas quanto ao comportamento das barras flexo-comprimidas examinadas:

(a) verifica-se a existência de duas resistências ao fogo características de todos os perfis, a saber: um valor mínimo, correspondente à carga axial máxima, e um valor intermediário correspondente à razão de carga 0,3;

(b) a resistência ao fogo tende a ter valores relativamente elevados [acima de 60 minutos] para razões de carga muito baixas (menores que 0,3);

(c) à medida em que o comprimento de flambagem cresce, a carga axial máxima decresce para relações e/d crescentes no intervalo $[0,1]$;

A diferença entre as cargas axiais máximas entre duas dadas relações e/d decresce à medida em que os comprimentos de flambagem crescem.

Observa-se que todas as curvas têm dois trechos definidos conforme se ilustra na Figura 4.6 em função da razão de carga. t_1 é a resistência ao fogo que corresponde à carga axial máxima e, portanto, à razão de carga 1,0; t_2 é a resistência ao fogo que corresponde à razão de carga 0,3; t_3 é a resistência ao fogo mínima que corresponde à razão de carga 0,1. Desse modo, uma "curva de resistência ao fogo de projeto" para um dado perfil pode ser traçada com o aspecto da curva da Figura 4.2. Evidentemente, com o objetivo de se utilizar em projeto, coeficientes de segurança adequados devem ser inclusos na sua elaboração. Por isso, para a maior razão de carga, adota-se o valor mínimo de t_1 ; para a razão de carga 0,3, toma-se o valor médio de t_2 e, para a razão de carga 0,1, toma-se o valor mínimo de t_3 . Nesse último caso, o valor mínimo é considerado, apesar de ser a carga axial muito pequena, para limitar a deformação da barra.

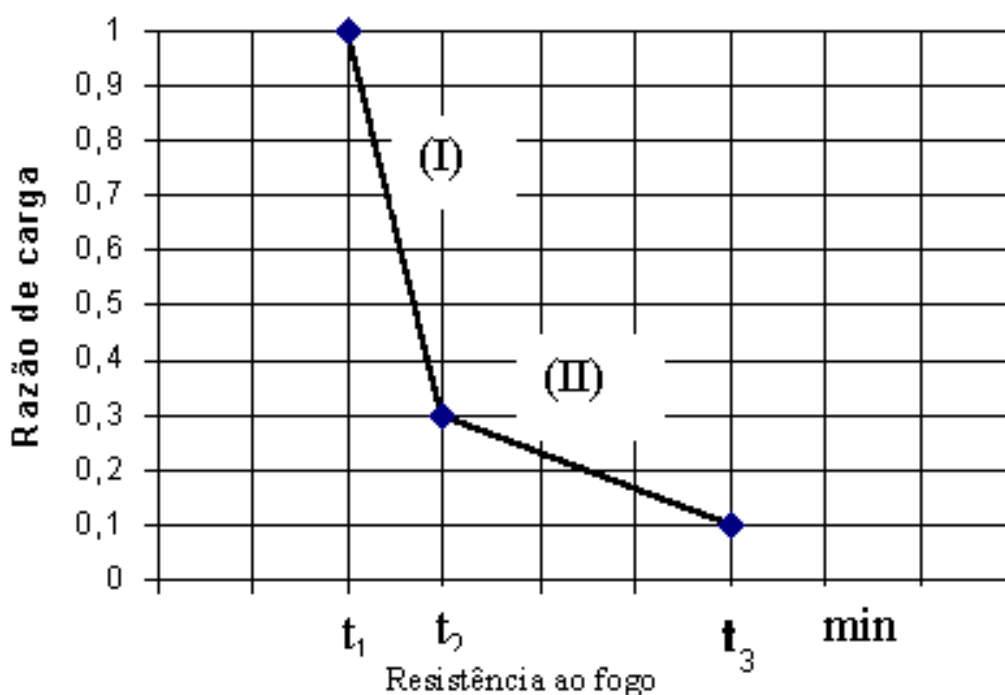


Figura 4.2 - Curva de resistência ao fogo de projeto.

A Tabela 26 lista os valores de t_1 , t_2 e t_3 para os diversos comprimentos da barra e as diversas relações e/d do perfil CVS 450 x 216. As seguintes conclusões permitem traçar uma curva de resistência ao fogo de projeto para esse perfil:

(a) o tempo t_1 é no mínimo igual a 18 min, independentemente do comprimento da barra e da relação e/d ;

(b) para a relação $e/d = 0$, o tempo t_2 varia muito com o comprimento da barra, caracterizando curvas distintas para cada uma das barras;

(c) para $0 < e/d \leq 1,0$, o tempo t_2 é no mínimo igual a 27 min;

o trecho (II) das curvas de resistência do perfil considerado é caracterizado por um valor mínimo de t_3 igual a 60 min.

O tempo t_2 varia de acordo com a relação e/d , mantendo-se, na média, independente do comprimento da barra; os valores médios de t_2 em função de e/d são dados na Tabela 27.

Portanto, a curva de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216 é a mostrada na Figura 4.7.

Analizando um perfil CVS 850 x 414 em situação análoga à do perfil considerado anteriormente, obtêm-se resultados qualitativamente idênticos. As Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 mostram as curvas de resistência ao fogo correspondentes aos dados extraídos das respectivas tabelas.

A Tabela 28 mostra os valores de t_1 , t_2 e t_3 para os diversos comprimentos e as diversas relações de excentricidade deste perfil, notando-se:

(a) o tempo t_1 é no mínimo igual a 21 min, independentemente da relação e/d ;

(b) o tempo t_2 varia de acordo com a relação e/d , mantendo-se, na média, independente do comprimento da barra; os valores médios de t_2 em função de e/d são dados na Tabela 29;

(c) o trecho (II) da curva é caracterizado por um valor mínimo de t_3 igual a 90 min.

A Figura 4.12 mostra as curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 850 x 414. Os Anexos A, B e C mostram curvas de resistência ao fogo para os perfis CVS 300 x 113, CVS 550 x 184 e CVS 700 x 342, respectivamente.

Tabela 26 - Pontos notáveis das curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216.

L (m)	e/d	t_1 (min)	t_2 (min)	t_3 (min)
2	0,00	20	33	91
	0,10	18	27	60
	0,25	20	28	90
	0,50	20	28	91
	1,00	19	27	90
4	0,00	20	40	90
	0,10	21	29	60
	0,25	22	29	89
	0,50	20	28	88
	1,00	24	29	90
6	0,00	21	54	90
	0,10	20	29	61
	0,25	18	27	89
	0,50	20	29	88
	1,00	18	27	89
8	0,00	34	60	90
	0,10	20	30	61
	0,25	21	30	90
	0,50	22	30	71
	1,00	21	27	90

Tabela 27 - Valores médio, mínimo e máximo de t_2 para o perfil CVS 450 x 216

e/d	t_2 médio (min)	t_2 mínimo (min)	t_2 máximo (min)
0,00	46	33	60
0,10	28	27	30
0,25	29	27	30
0,50	29	28	30
1,00	28	27	29

Tabela 28 - Pontos notáveis das curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil
CVS 850 x 414.

L (m)	e/d	t ₁ (min)	t ₂ (min)	t ₃ (min)
2	0,00	21	43	100
	0,10	22	60	115
	0,25	23	68	119
	0,50	24	76	129
	1,00	25	113	140
4	0,00	21	54	100
	0,10	20	61	91
	0,25	21	66	98
	0,50	22	73	120
	1,00	24	104	125
6	0,00	21	50	97
	0,10	22	60	90
	0,25	22	63	120
	0,50	23	74	123
	1,00	24	107	140
8	0,00	21	54	103
	0,10	22	60	90
	0,25	23	66	126
	0,50	20	80	129
	1,00	24	107	137

Tabela 29 - Valores médio, mínimo e máximo de t₂ para o perfil CVS 850 x 414

e/d	t ₂ médio (min)	t ₂ mínimo (min)	t ₂ máximo (min)
0,00	50	43	54
0,10	60	60	61
0,25	66	63	68
0,50	76	73	80
1,00	107	104	113

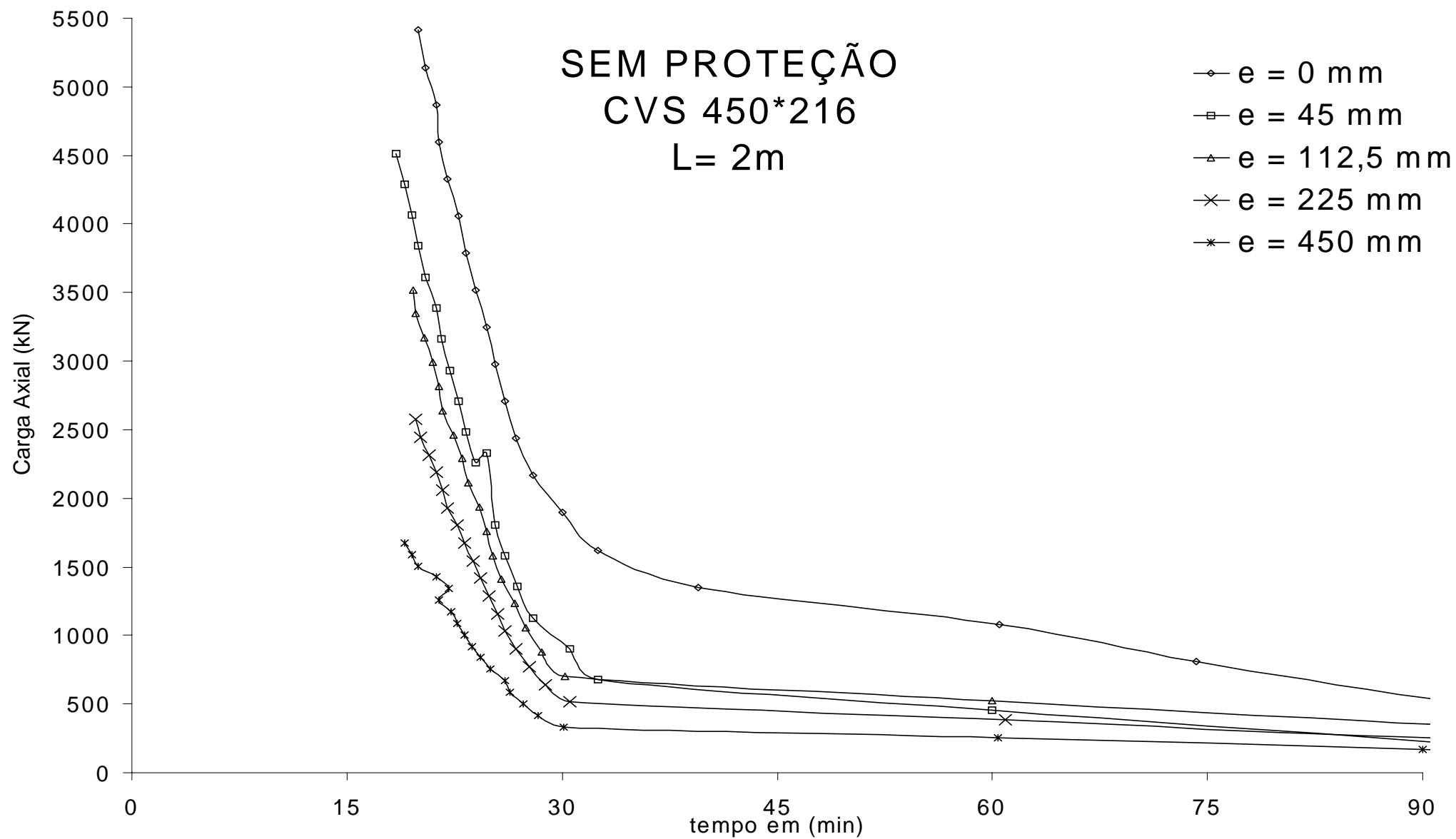


Figura 4.3 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 450 x 216, bi-rotulado, sem proteção

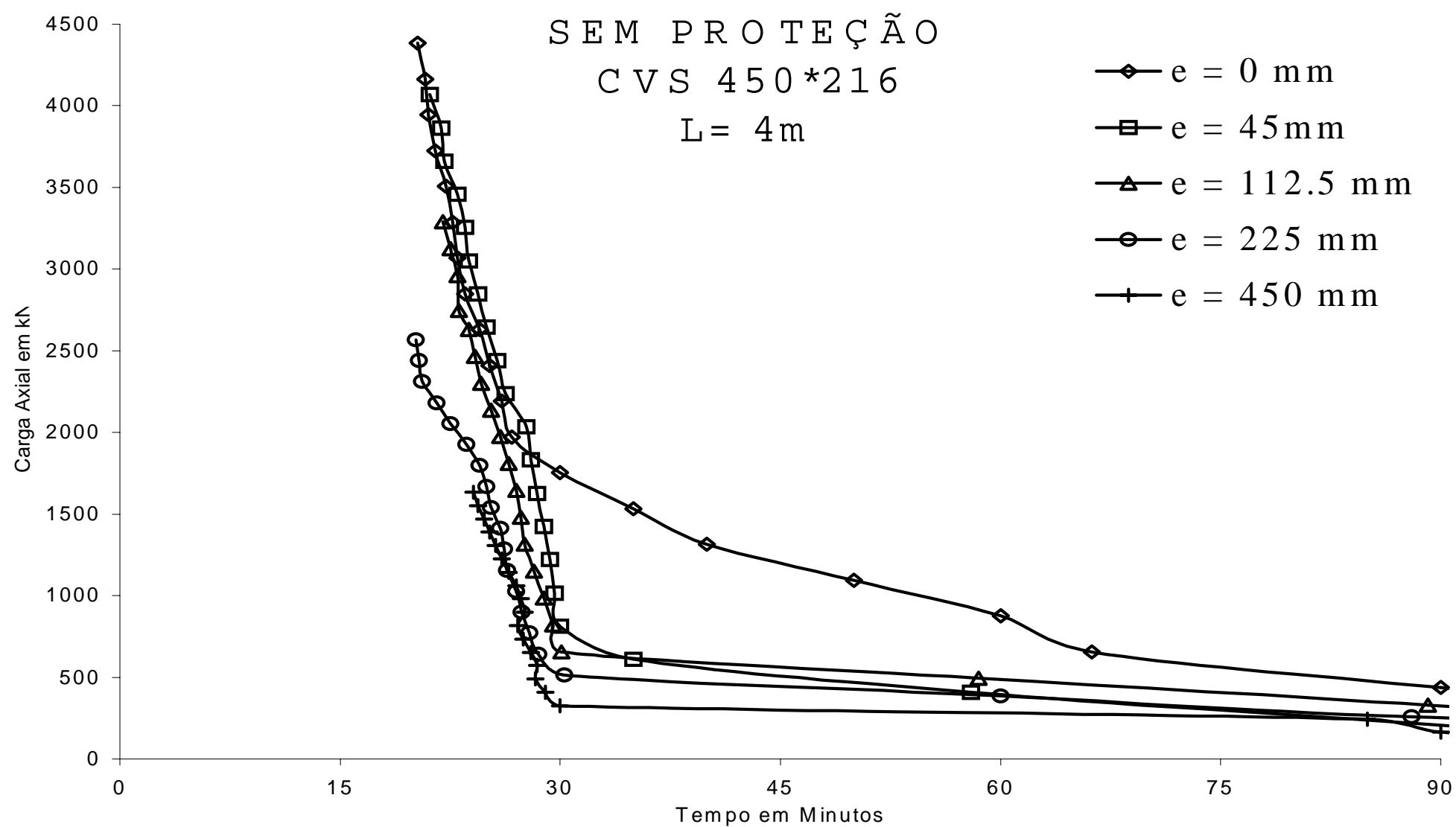


Figura 4.4 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 450 x 216, bi-rotulado, sem proteção.

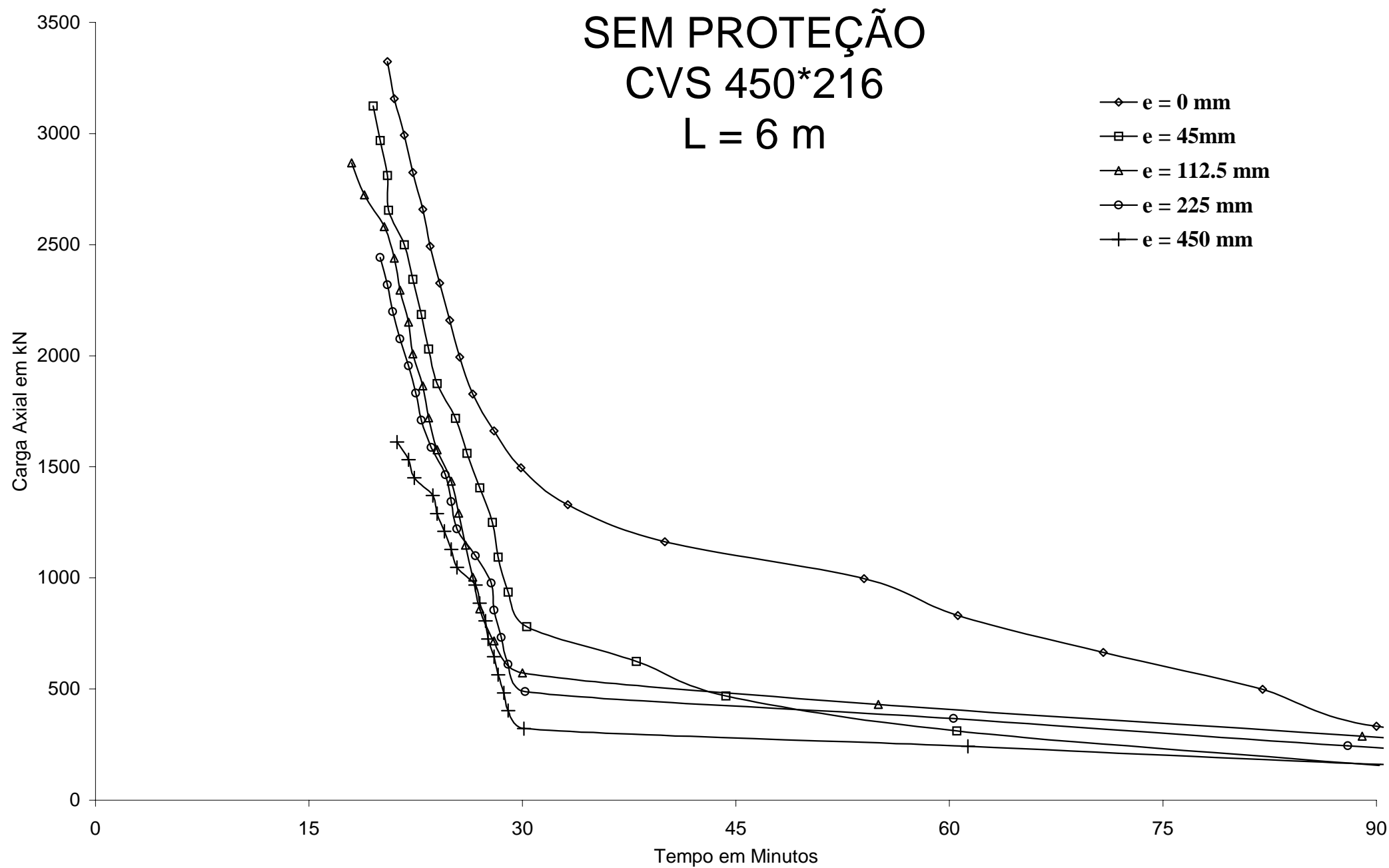


Figura 4.5 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 450 x 216, bi-rotulado, sem proteção.

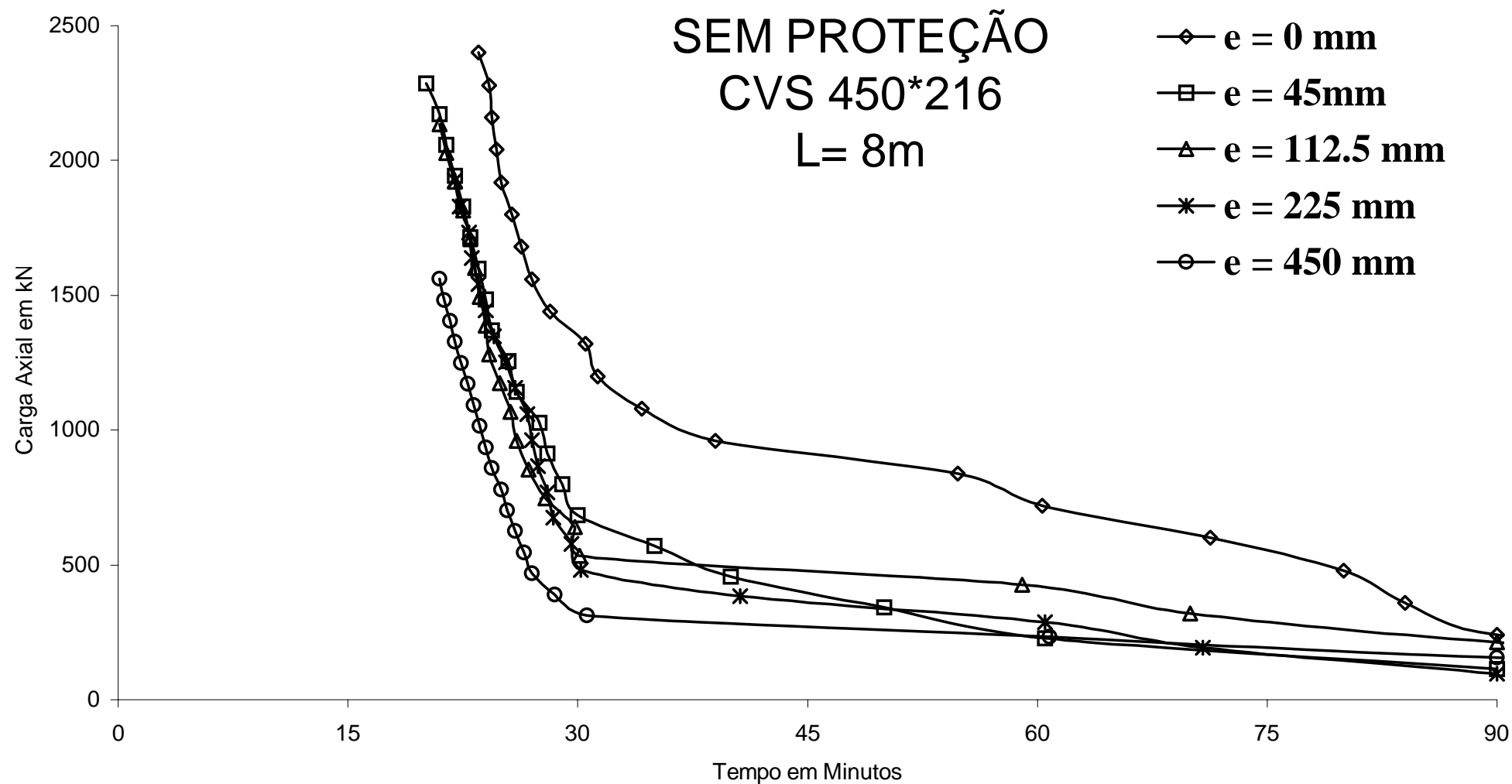
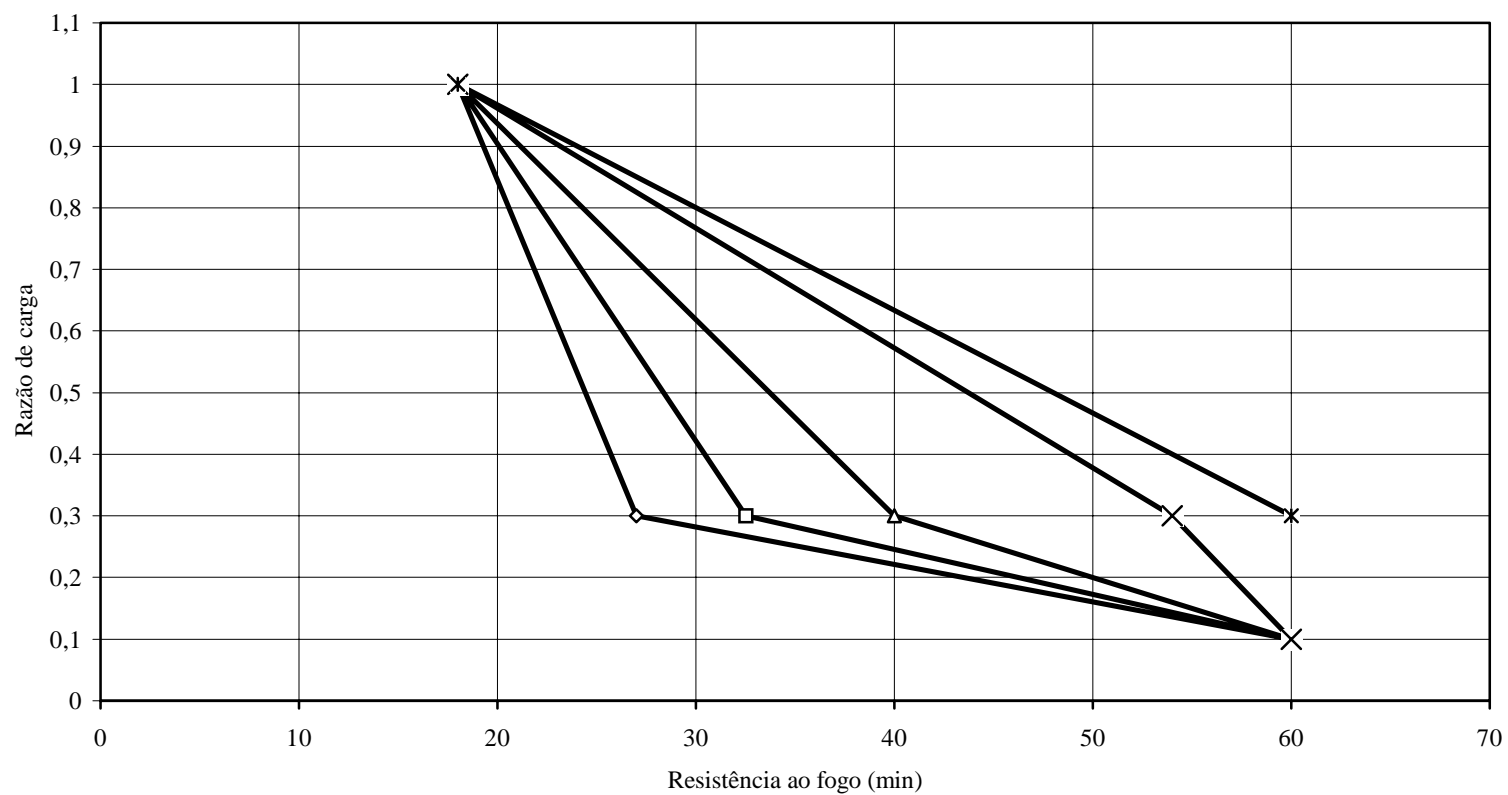


Figura 4.6 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 450 x 216, bi-rotulado, sem proteção.



—◇— L qualquer e $0 < e/d \leq 8$

—□— rel. exc. = 0 e L = 2 m

—△— rel. exc. = 0 e L = 4 m

—×— rel. exc. = 0 e L = 6 m

—*— rel. exc. = 0 e L = 8 m

Figura 4.7 - Curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216 sem proteção.

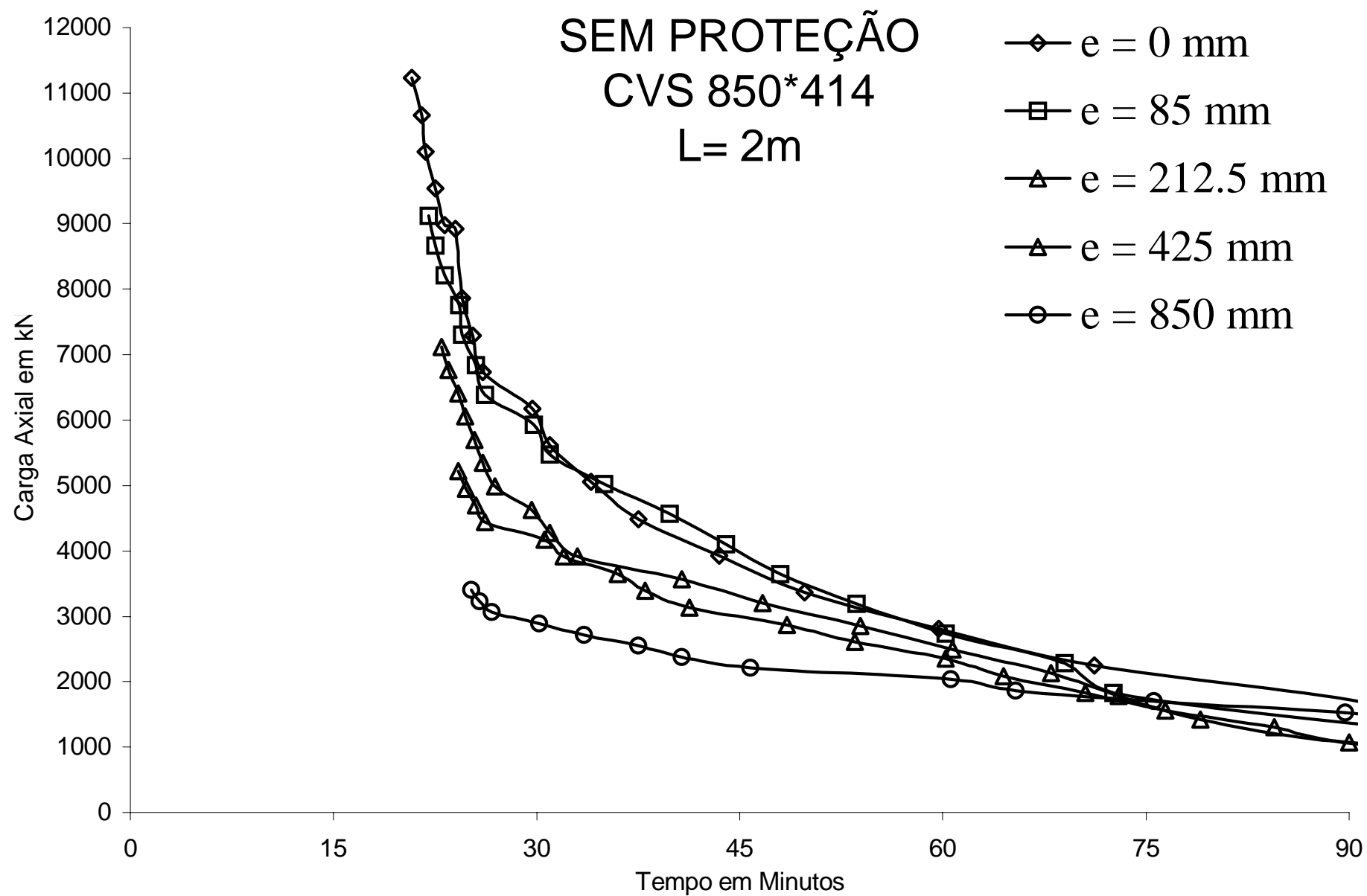


Figura 4.8 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 850 x 414, bi-rotulado, sem proteção.

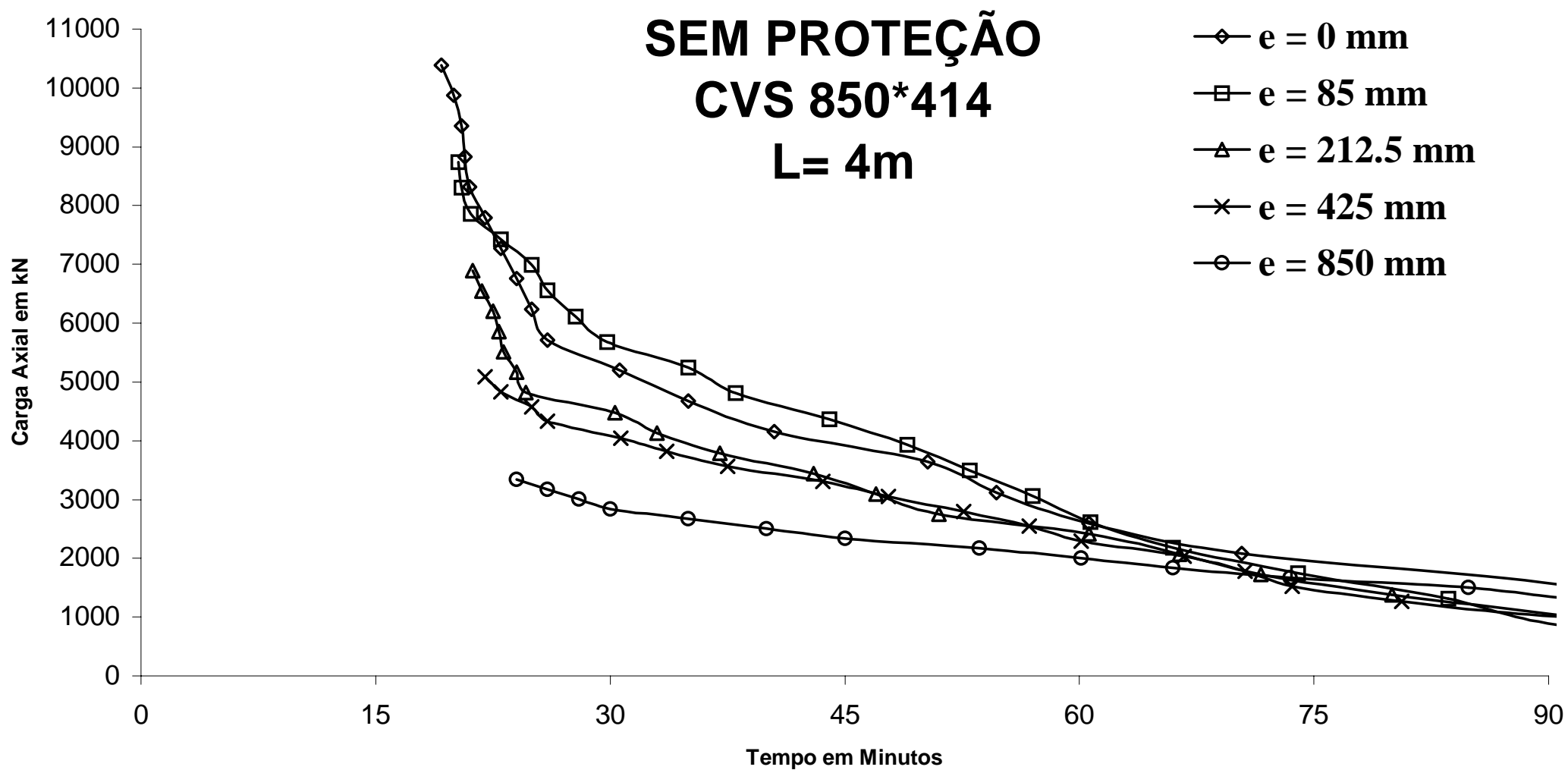


Figura 4.9 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 850 x 414, bi-rotulado, sem proteção.

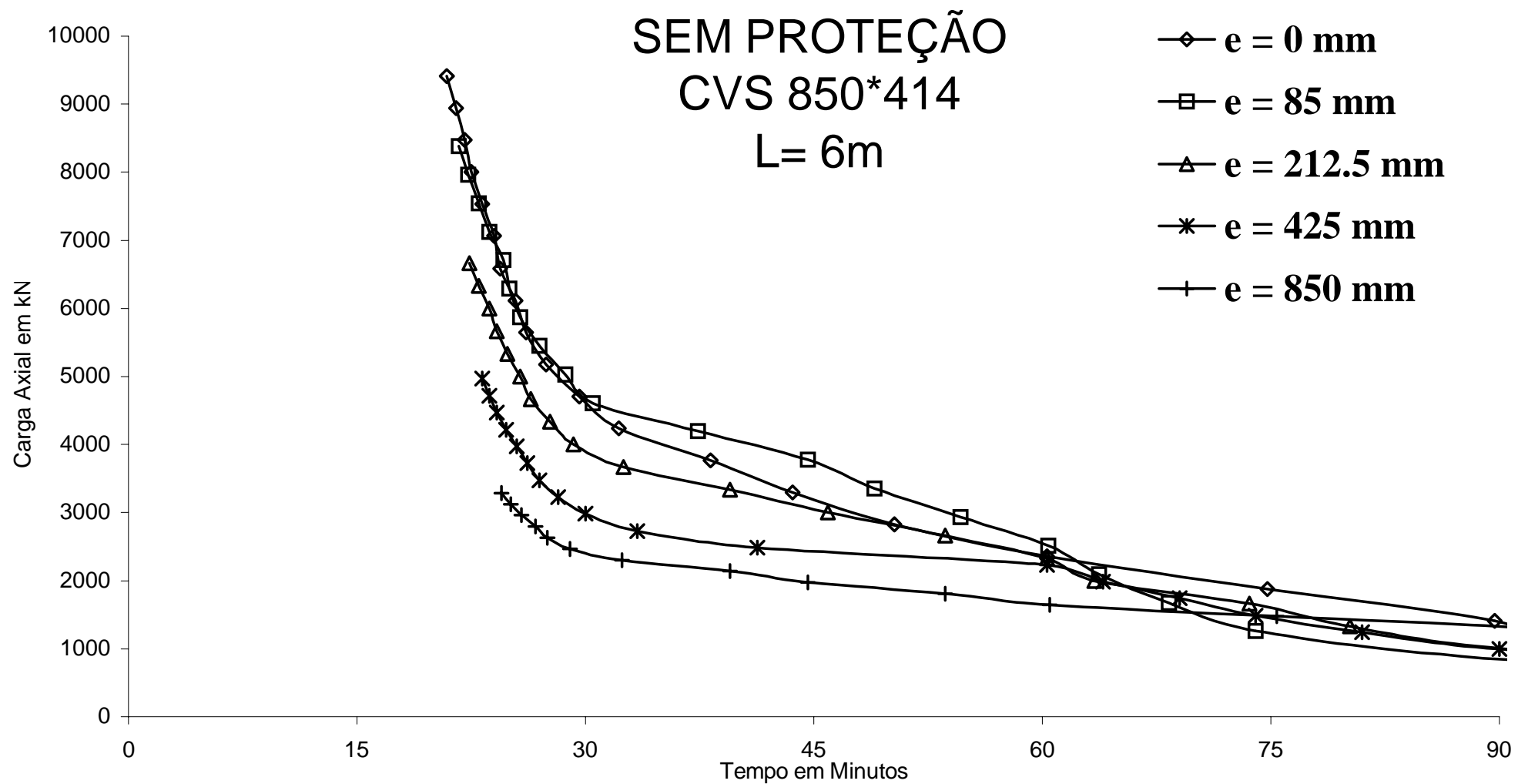


Figura 4.10 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 850 x 414, bi-rotulado, sem proteção.

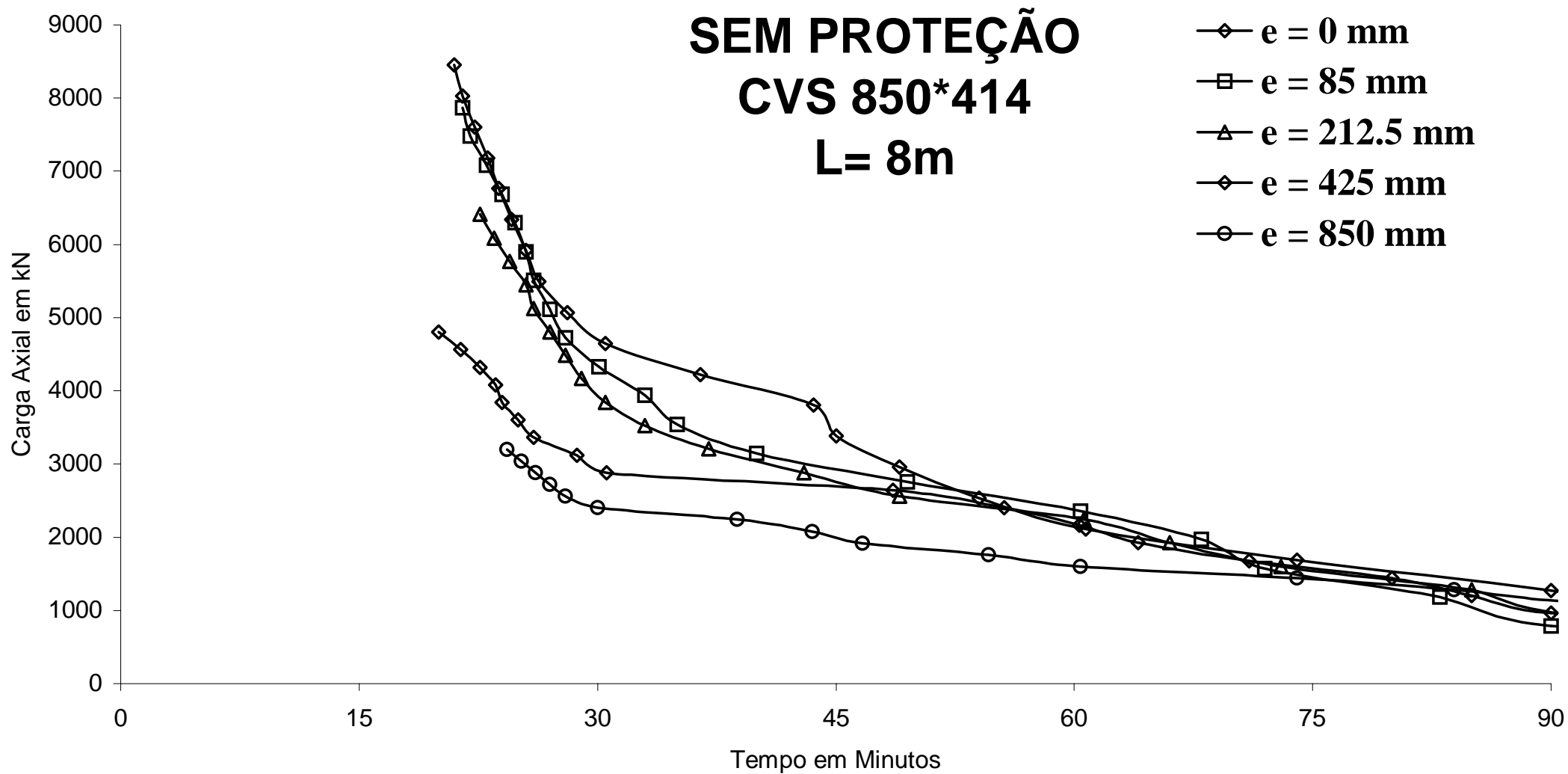
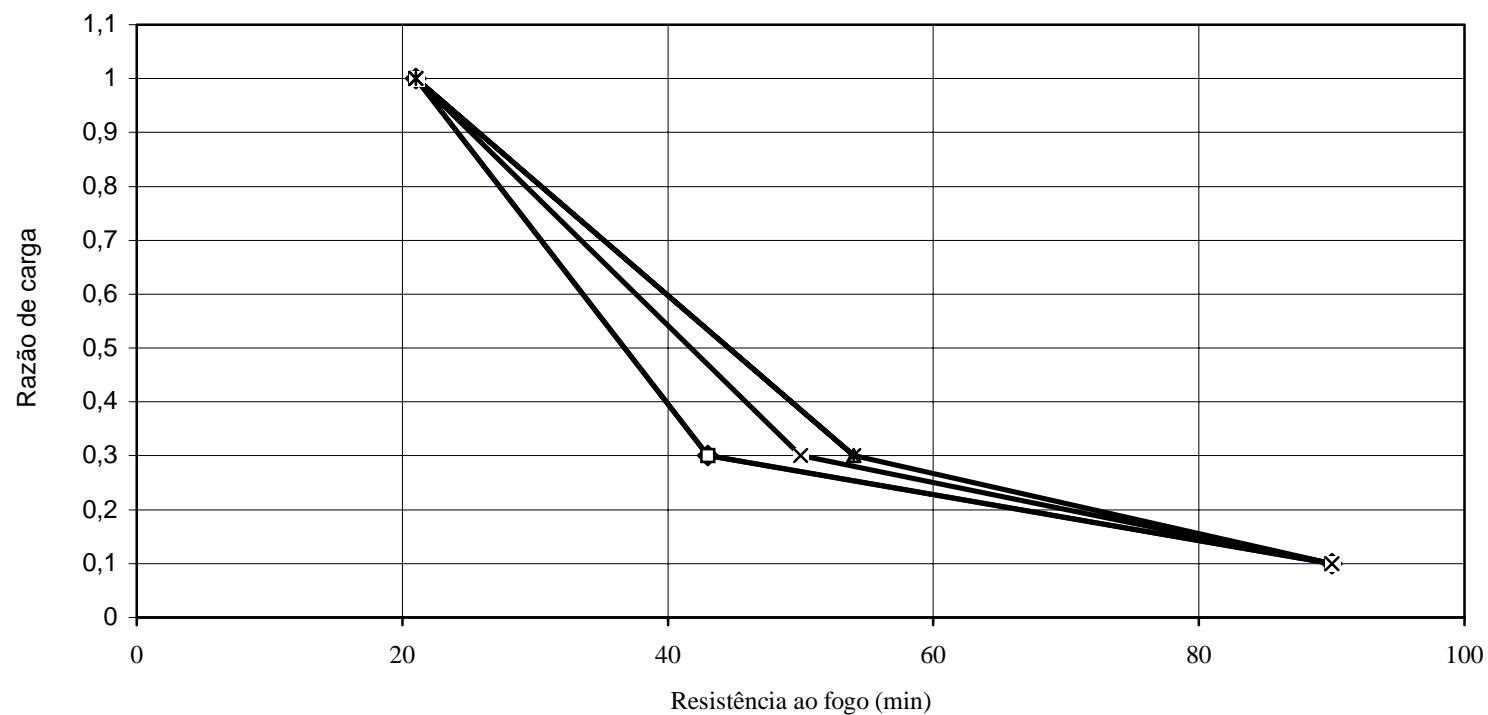


Figura 4.11 - Curvas de resistência ao fogo do perfil CVS 850 x 414, bi-rotulado, sem proteção



—○— L qualquer e $0 < e/d \leq 8$

—□— rel. exc. = 0 e L = 2 m

—△— rel. exc. = 0 e L = 4 m

—×— rel. exc. = 0 e L = 6 m

—*— rel. exc. = 0 e L = 8 m

Figura 4.12 - Curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 850 x 414

4.3.2 - MOMENTOS FLETORES DE DIAGRAMA TRIANGULAR

De acordo com o processo metodológico proposto, as barras flexo-comprimidas de aço, bi-rotuladas e sem proteção passiva, foram analisados pelo VULCAN, nas situação de carregamento mostrada na Figura 4.1(b). Os comprimentos de flambagem de 2, 4, 6 e 8 m foram adotados, admitindo a interpolação linear para valores situados nesses intervalos, conforme REFAO (1985). São mostradas nas Figuras 4.13; 4.14; 4.15 e 4.16 logo abaixo as curvas de resistência obtidas para um perfil CVS 450 x 216.

A Tabela 30 mostram-se os valores de t_1 , t_2 e t_3 para os diversos comprimentos e as diversas relações de excentricidade deste perfil, com as seguintes observações:

- (a) o tempo t_1 é no mínimo igual a 20 min, independentemente da relação e/d ;
- (b) o tempo t_2 varia de acordo com a relação e/d , mantendo-se, na média, independente do comprimento da barra; os valores médios de t_2 em função de e/d são dados na Tabela 31;
- (c) o trecho (II) da curva é caracterizado por um valor mínimo de t_3 igual a 81 min.

A curva de resistência ao fogo de projeto para o perfil considerado é a mostrada na Figura 4.17

Analizando um perfil CVS 850 x 414 em situação análoga à do perfil considerado anteriormente, obtêm-se resultados qualitativamente idênticos, as Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 mostram as curvas de resistência ao fogo correspondentes. A Tabela 32 mostra os valores de t_1 , t_2 e t_3 para os diversos comprimentos e as diversas relações de excentricidade deste perfil, notando-se:

- (a) o tempo t_1 é no mínimo igual a 15 min, independentemente da relação e/d ;

(b) o tempo t_2 varia de acordo com a relação e/d , mantendo-se, na média, independente do comprimento da barra; os valores médios de t_2 em função de e/d são dados na Tabela 33;

(c) o trecho (II) da curva é caracterizado por um valor mínimo de t_3 igual a 90 min.

A Figura 4.22 mostra as curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil em consideração. Os Anexos D, E e F mostram curvas de resistência ao fogo para os perfis CVS 300 x 113, 550 x 184 e CVS 700 x 342, respectivamente.

Tabela 30 - Pontos notáveis das curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216.

L (m)	e/d	t_1 (min)	t_2 (min)	t_3 (min)
2	0,00	20	43	90
	0,10	21	48	90
	0,25	21	56	90
	0,50	21	59	89
	1,00	24	75	100
4	0,00	20	49	90
	0,10	21	51	90
	0,25	22	56	90
	0,50	24	60	90
	1,00	24	72	102
6	0,00	20	45	90
	0,10	20	57	90
	0,25	22	60	85
	0,50	23	60	90
	1,00	23	66	90
8	0,00	21	40	90
	0,10	22	60	90
	0,25	22	66	81
	0,50	23	63	81
	1,00	21	72	90

Tabela 31 - Valores médio, mínimo e máximo de t_2 para o perfil CVS 450 x 216.

e/d	t_2 médio (min)	t_2 mínimo (min)	t_2 máximo (min)
0,00	44	40	49
0,10	54	48	60
0,25	60	56	60
0,50	61	59	63
1,00	71	66	75

Tabela 32 - Pontos notáveis das curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil
CVS 850 x 414.

L (m)	e/d	t_1 (min)	t_2 (min)	t_3 (min)
2	0,00	18	61	98
	0,10	21	54	91
	0,25	21	54	91
	0,50	22	61	108
	1,00	25	81	120
4	0,00	18	61	75
	0,10	21	54	91
	0,25	22	61	108
	0,50	25	67	99
	1,00	26	80	120
6	0,00	20	44	106
	0,10	21	46	90
	0,25	22	49	100
	0,50	24	45	103
	1,00	25	84	131
8	0,00	15	35	91
	0,10	16	41	90
	0,25	17	53	90
	0,50	19	48	90
	1,00	25	74	140

Tabela 33 - Valores médio, mínimo e máximo de t_2 para o perfil CVS 850 x 414.

e/d	t_2 médio (min)	t_2 mínimo (min)	t_2 máximo (min)
0,00	50	35	61
0,10	49	41	54
0,25	56	49	61
0,50	57	45	67
1,00	80	74	81

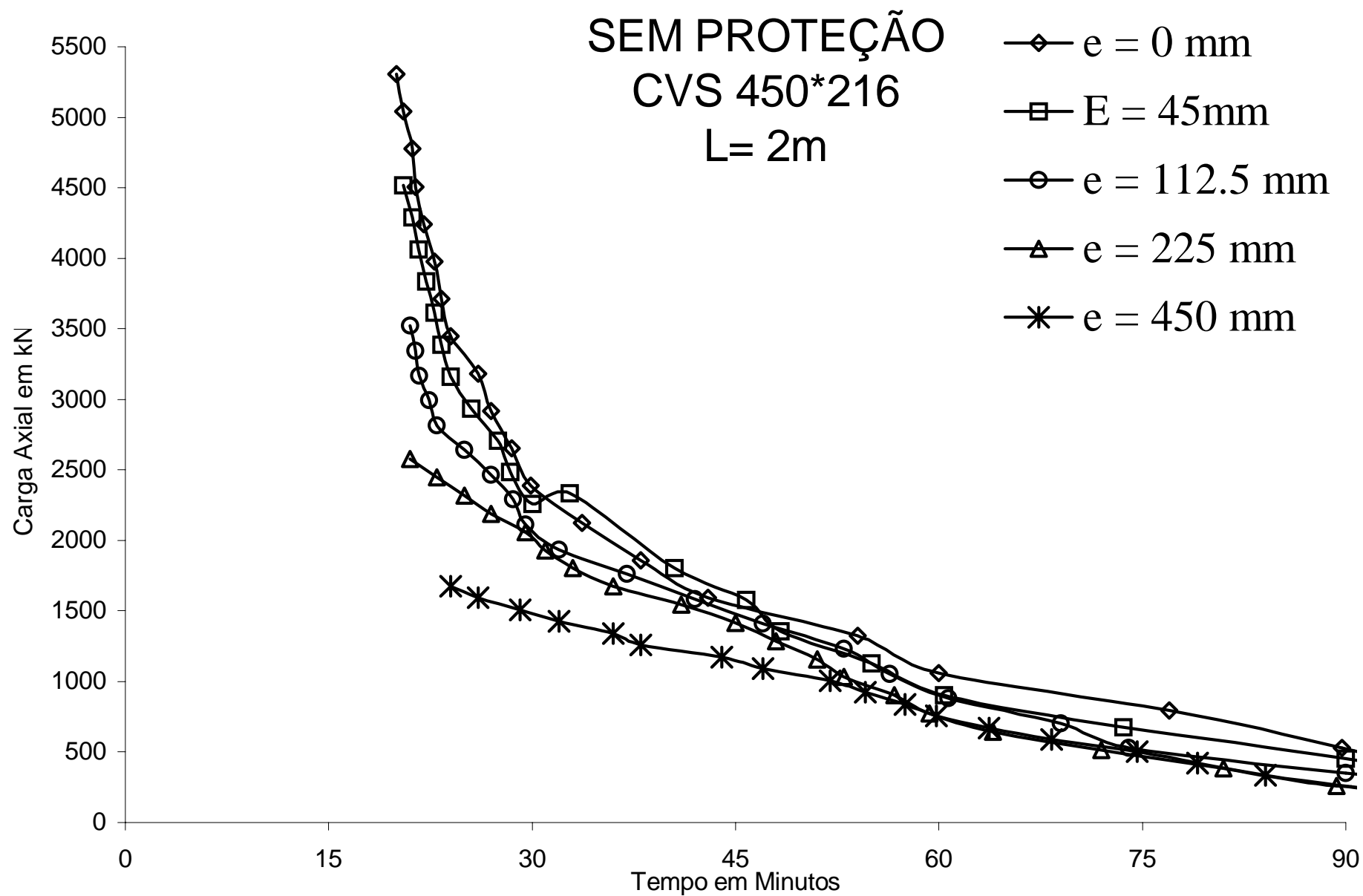


Figura 4.13 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 sem proteção de comprimento 2 m.

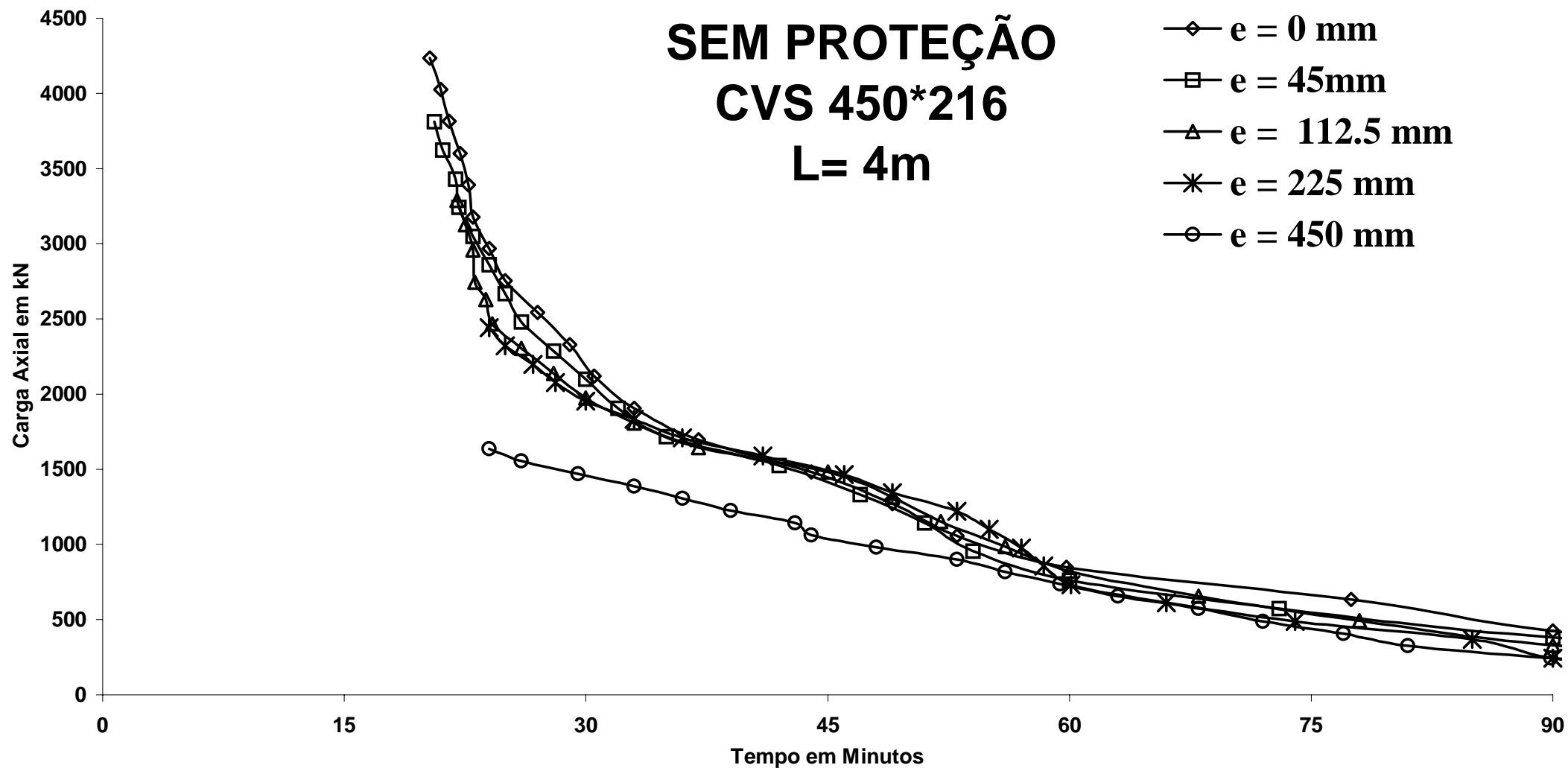


Figura 4.14 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 sem proteção de comprimento 4 m.

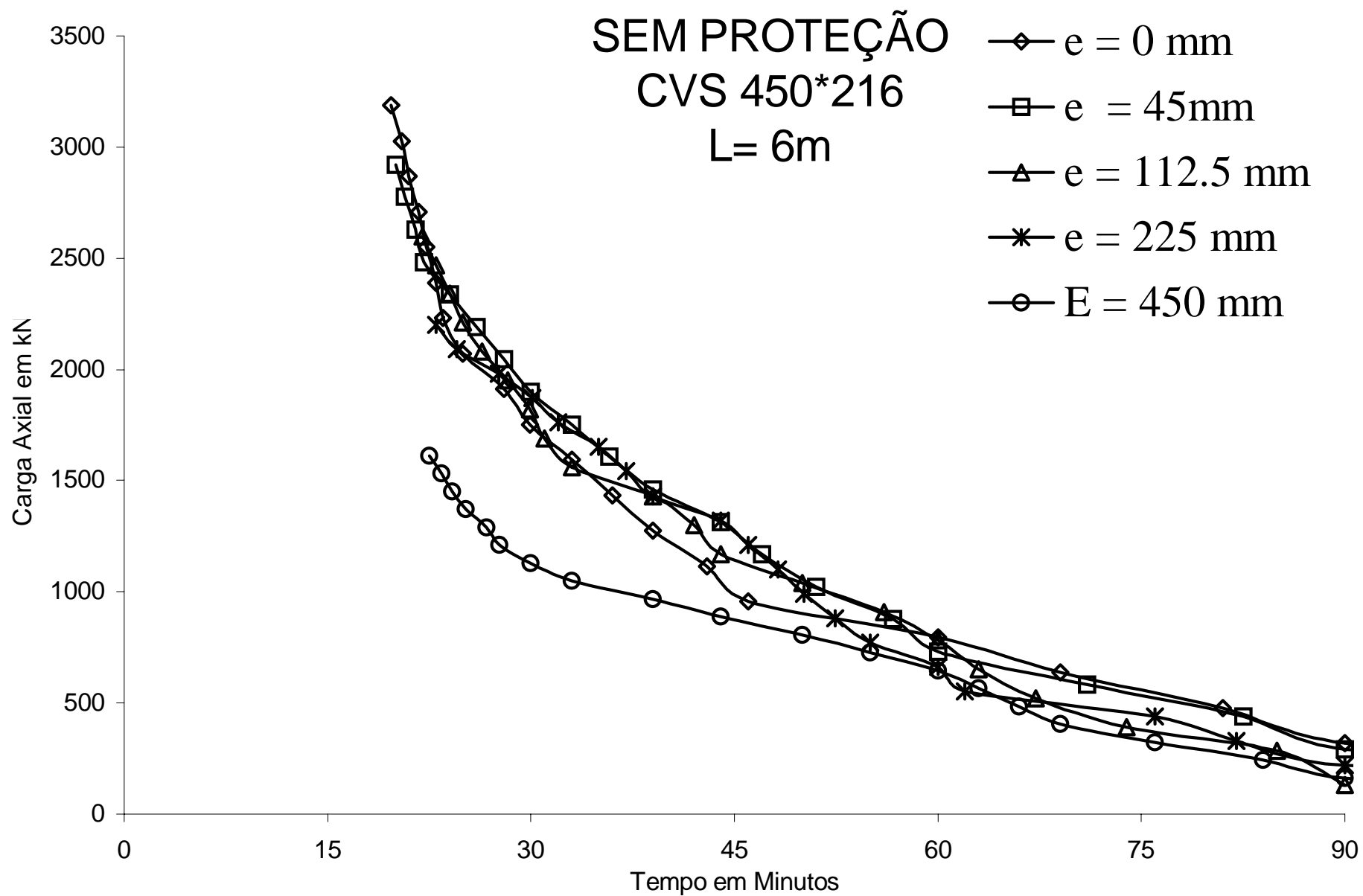


Figura 4.15 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 sem proteção de comprimento 6 m.

SEM PROTEÇÃO

CVS 450*216

L= 8m

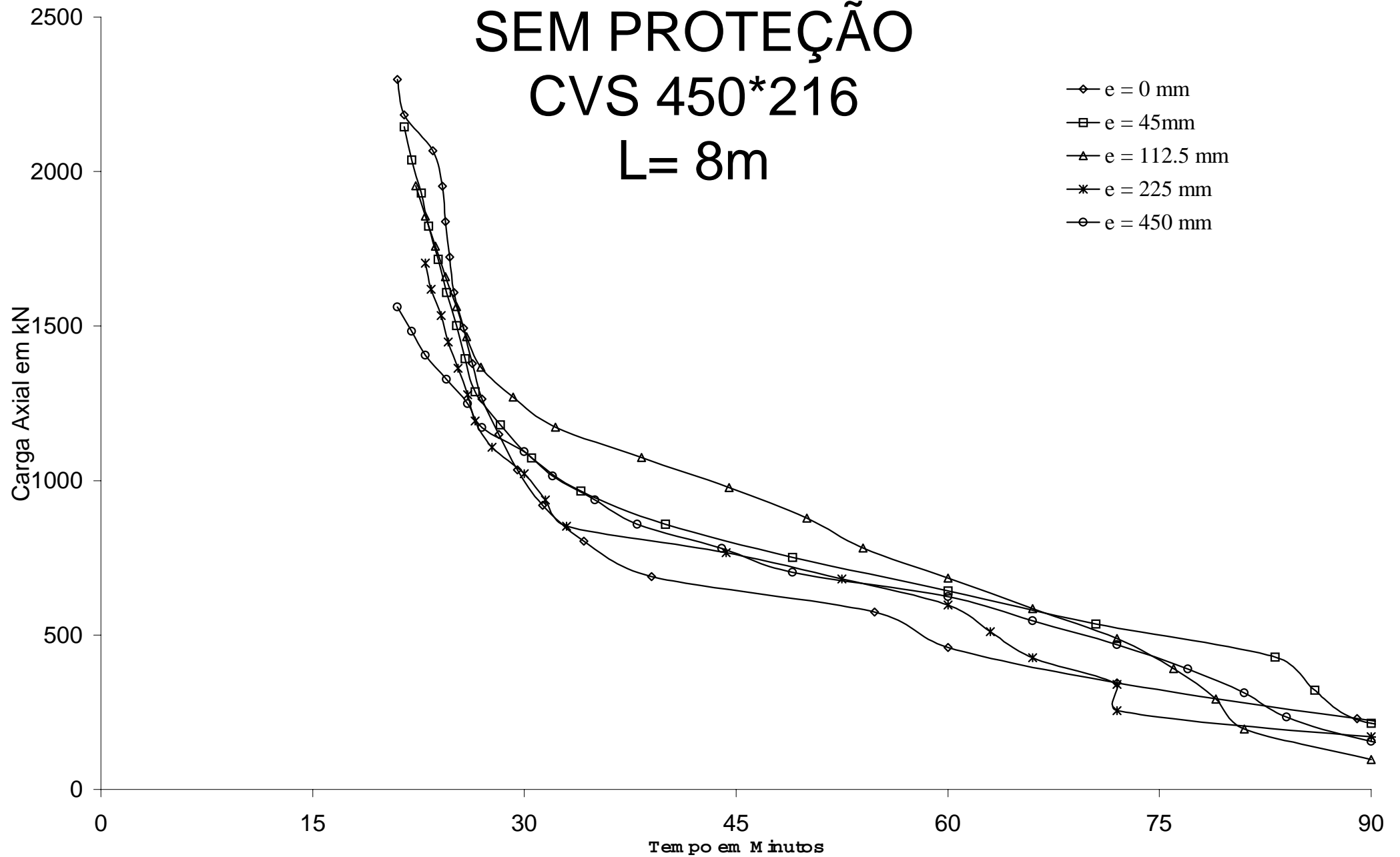
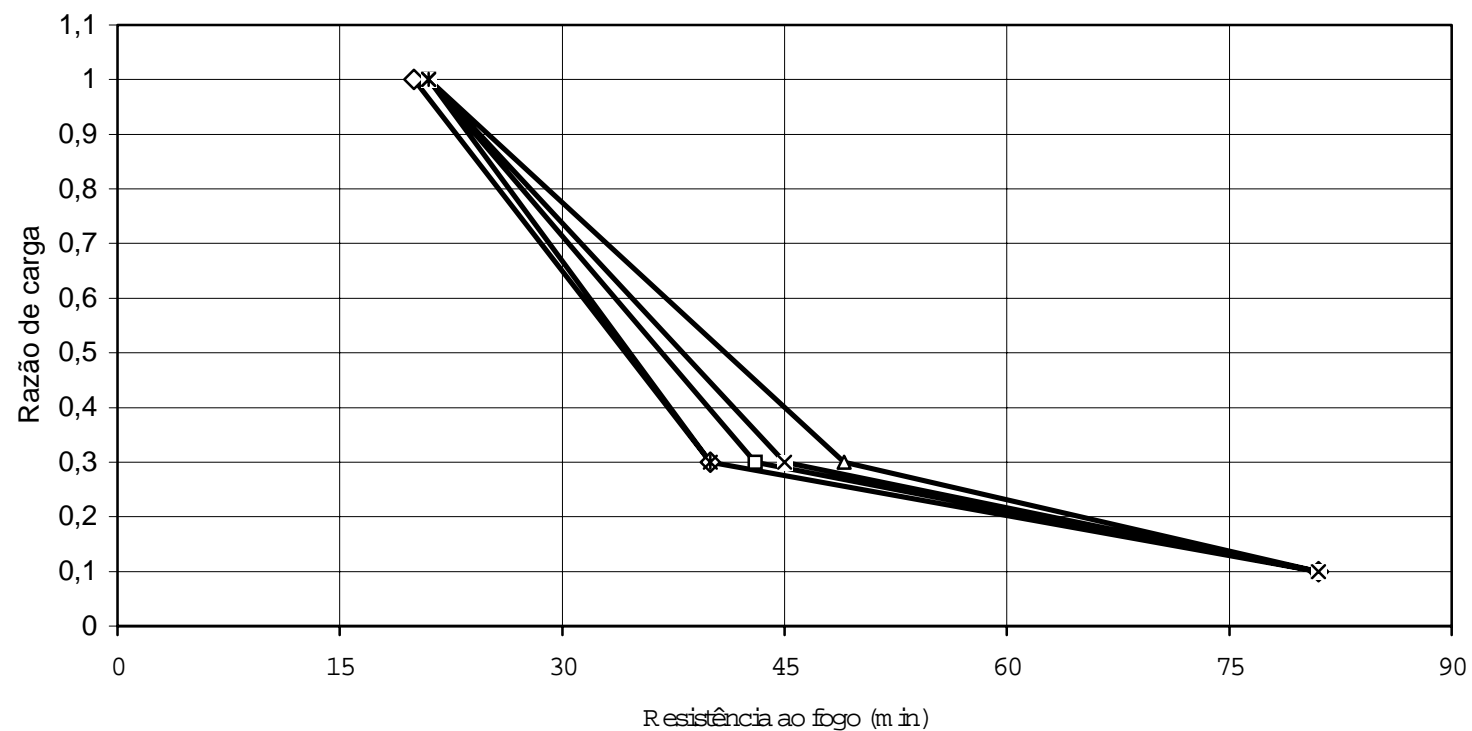


Figura 4.16 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 sem proteção de comprimento 8 m.



—◇— L qualquer e $0 < e/d \leq 8$

—□— rel. exc. = 0 e L = 2 m

—△— rel. exc. = 0 e L = 4 m

—×— rel. exc. = 0 e L = 6 m

—*— rel. exc. = 0 e L = 8 m

Figura 4.17 - Curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 450 x 216.

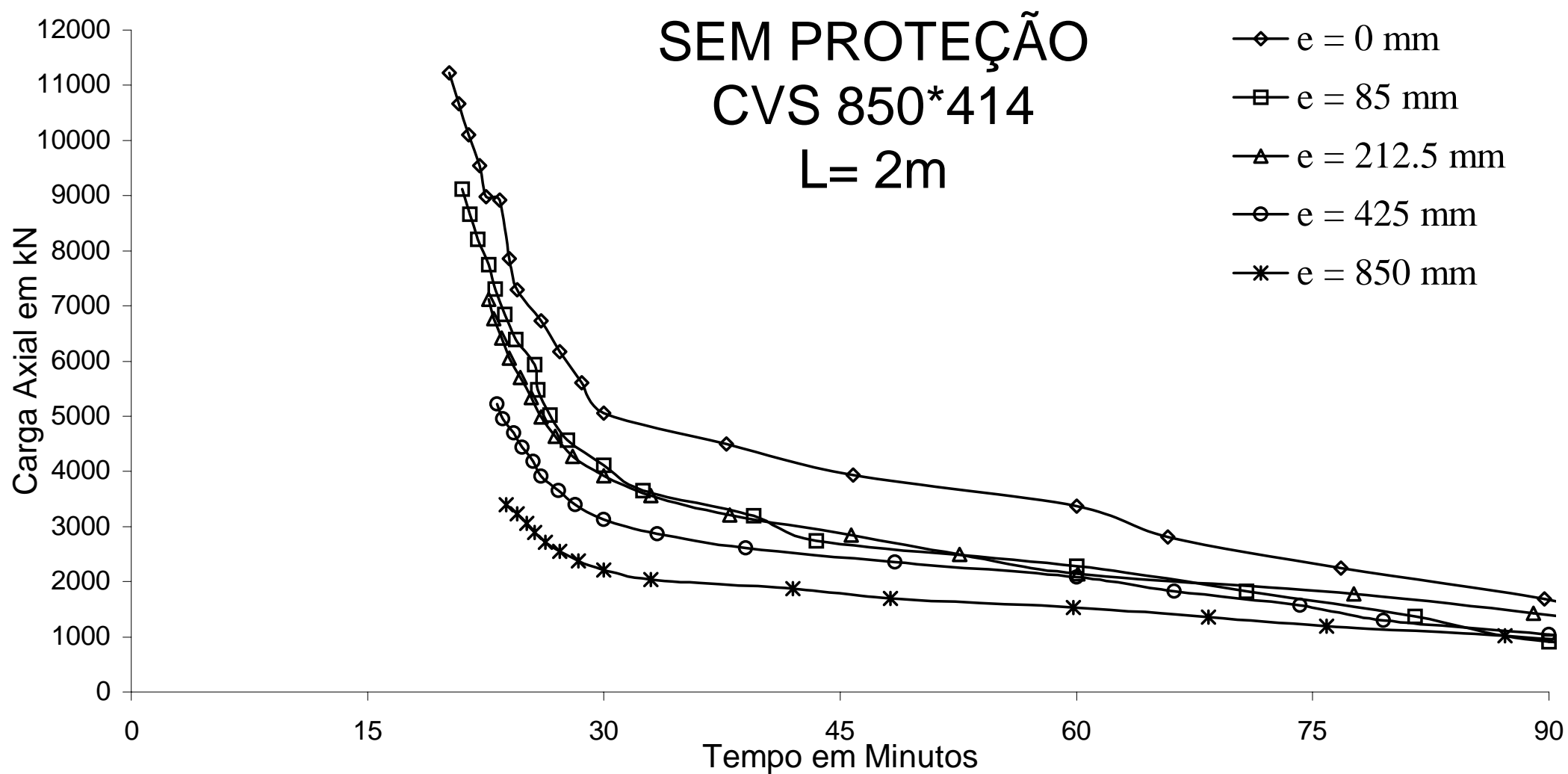


Figura 4.18 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 sem proteção de comprimento 2 m.

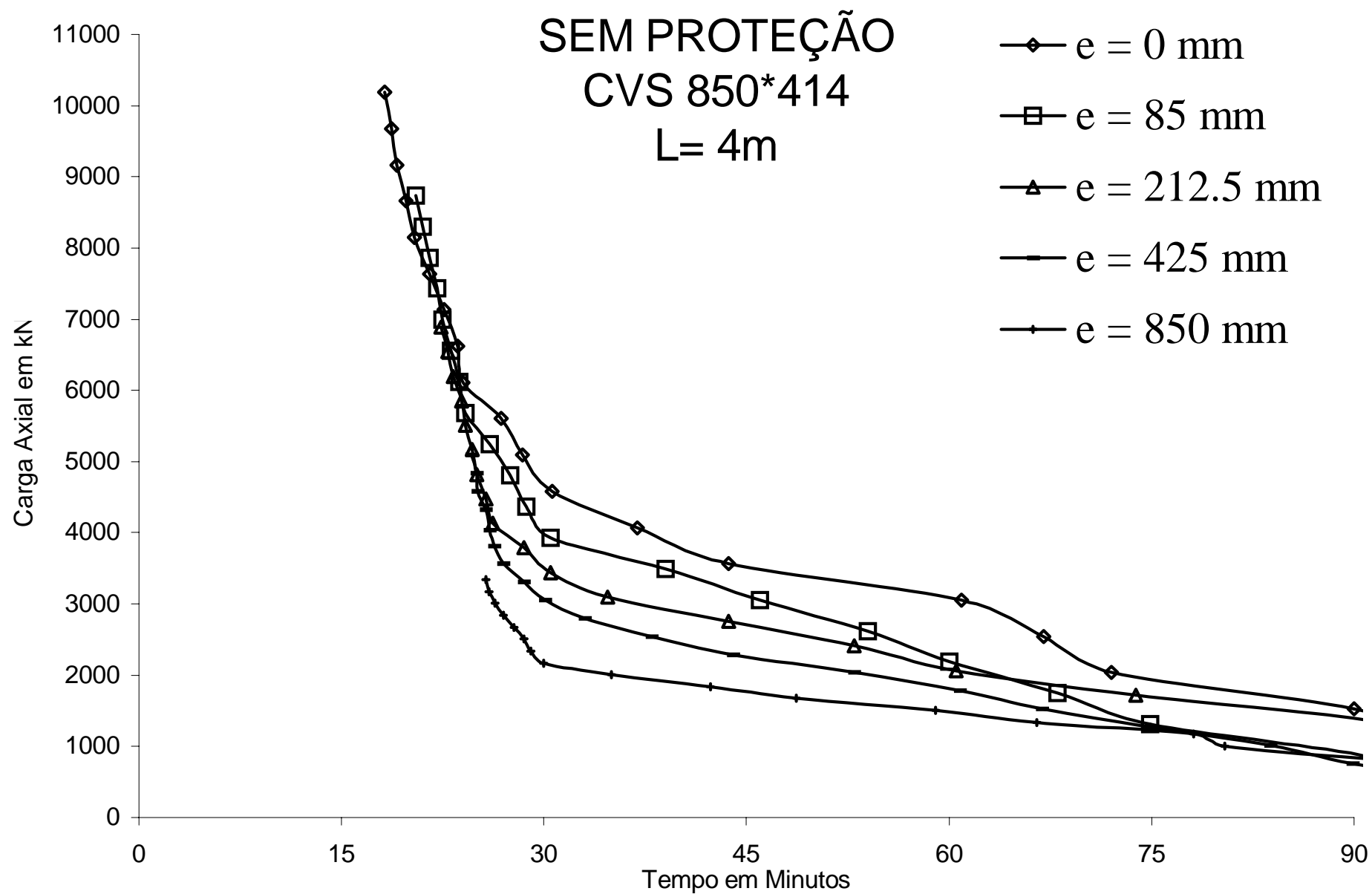


Figura 4.19 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 sem proteção de comprimento 4 m.

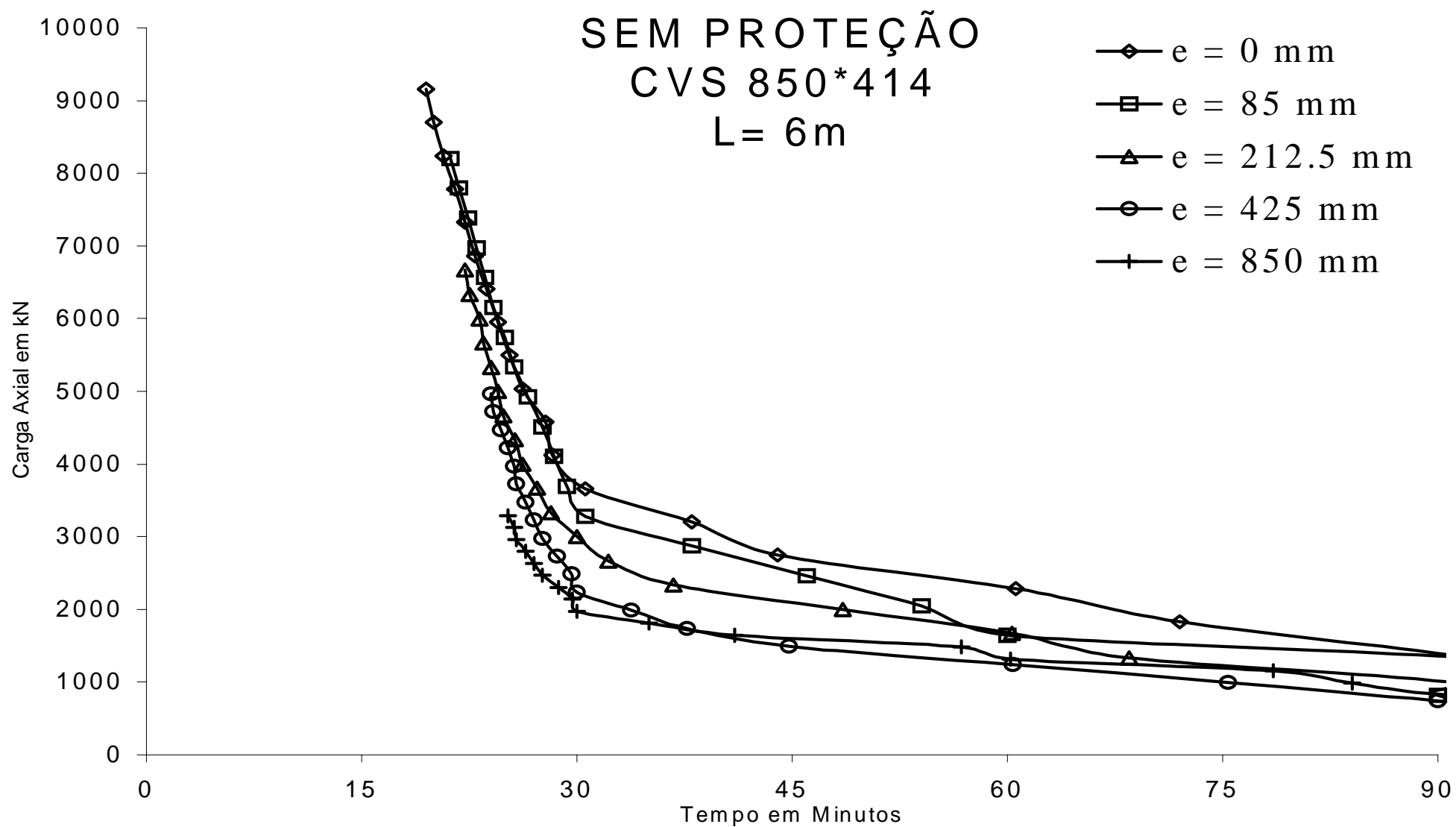


Figura 4.20 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 sem proteção de comprimento 6 m.

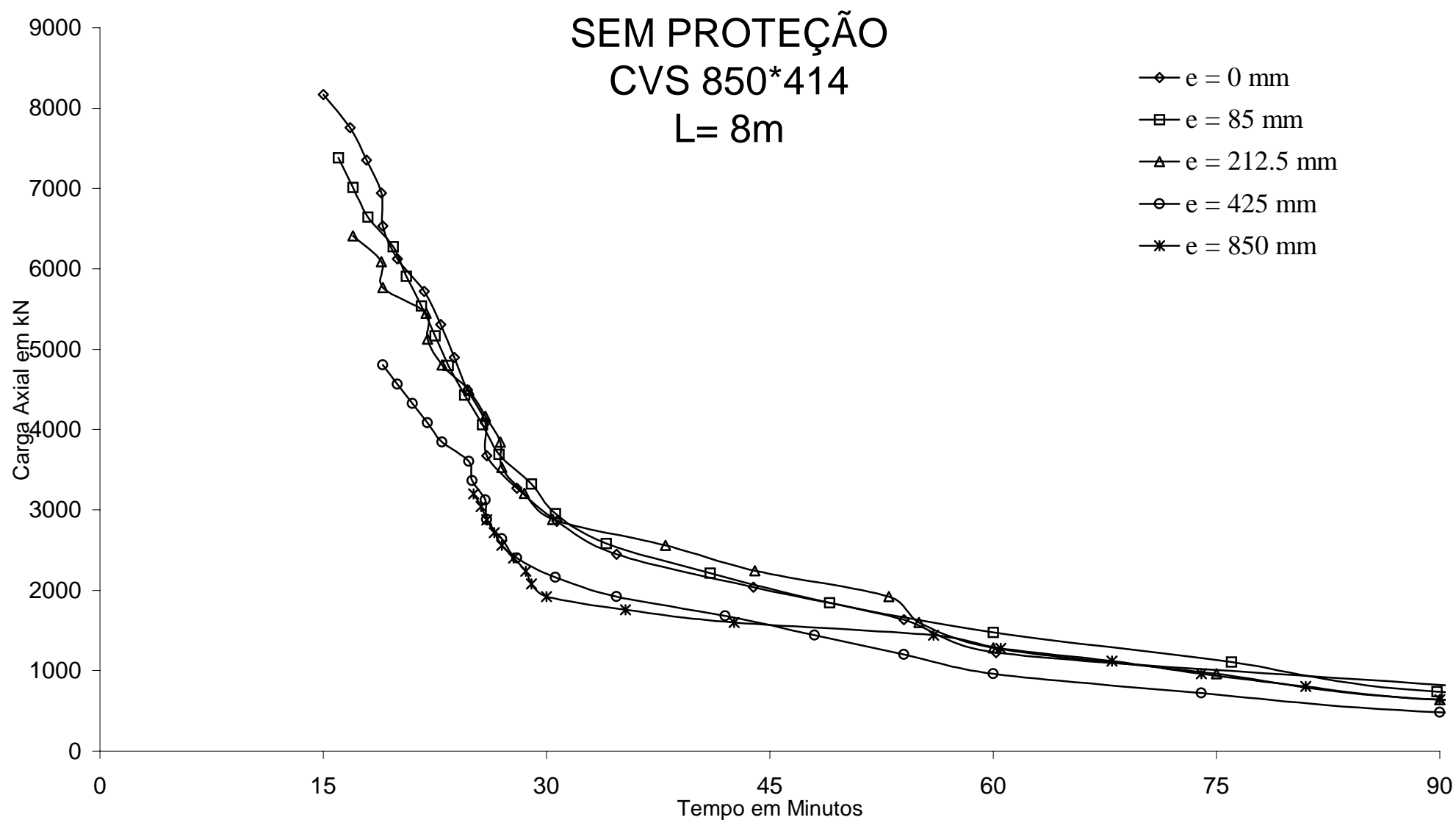
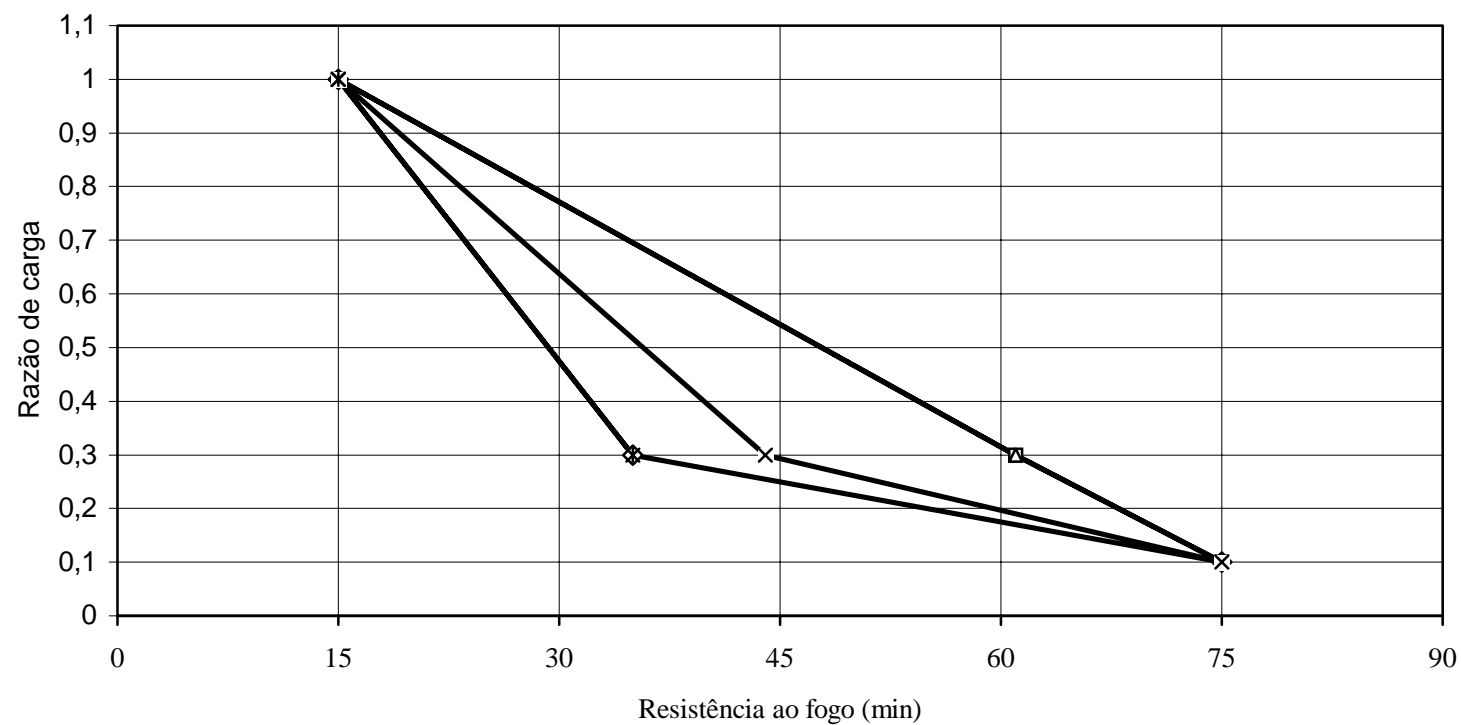


Figura 4.21 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 sem proteção de comprimento 8



—○— L qualquer e $0 < e/d \leq 8$

—□— rel. exc. = 0 e L = 2 m

—△— rel. exc. = 0 e L = 4 m

—×— rel. exc. = 0 e L = 6 m

—✱— rel. exc. = 0 e L = 8 m

Figura 4.22 - Curvas de resistência ao fogo de projeto para o perfil CVS 850 x 414 sem proteção.

CAPÍTULO V

RESISTÊNCIA AO FOGO DE BARRAS FLEXO-COMPRESSAS DE AÇO, BI-ROTULADAS E COM PROTEÇÃO

5.1 - INTRODUÇÃO

No Brasil, o custo final da proteção passiva de estruturas de aço é, ainda, dependente em grande proporção dos custos de importação do material. Esse fato torna a pesquisa de técnicas alternativas de proteção importante na viabilização da construção metálica no País, uma vez que como se sabe, CLARET (2000), o custo da proteção é responsável por uma significativa restrição de mercado para as estruturas de aço.

A redução do custo da proteção passiva é uma consequência direta da resistência ao fogo da estrutura: quanto, maior a resistência ao fogo inerente à estrutura, menor a proteção passiva necessária, dado um requisito mínimo legal. Disto decorrem as duas técnicas potencialmente mais promissoras para a redução do custo da proteção passiva, a saber: a) análise estrutural com um modelo tridimensional que inclua a participação conjunta dos elementos lineares e dos elementos planos; b) modelamento realístico do incêndio.

A primeira das alternativas técnicas está hoje viabilizada por programas do método de elementos finitos como o VULCAN. Evidentemente a confiança depositada em programas experimentais como o de Cardington, PLANK (2001).

A segunda alternativa tem, ainda hoje, um impacto de redução dos custos de proteção passiva relativamente pequeno, porque a disponibilidade de curvas tempo temperatura para densidades de carga de incêndio e geometria dos compartimentos é pouco variada. Desse modo, as curvas disponibilizadas em normas são conservadoras.

Alternativas técnicas recentes para a redução de custo da proteção passiva são o conjunto de técnicas de proteção parcial, CLARET *et al.* (1999) e COSTA (2001). Em países de economia desenvolvida, como Japão e Inglaterra, onde o custo da mão de obra é relativamente elevado, a proteção parcial de perfis não é uma alternativa de redução significativa do custo da proteção. Mas no Brasil, onde o custo do material de proteção é elevado, a proteção parcial parece ser uma alternativa técnica adequada para a redução de custo da proteção passiva.

Nesse capítulo, descrevem-se os resultados de uma investigação da resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas de aço com proteção parcial. O programa VULCAN é utilizado. O processo metodológico é semelhante ao descrito no capítulo anterior. Analogamente as condições de carregamento são idênticas as das barras examinadas no capítulo anterior.

A proteção parcial é simulada no VULCAN com a especificação de acréscimos de temperatura distintos para as partes protegidas e não protegida. Para economia de proteção passiva, admite-se que a temperatura nas partes com proteção cresce à razão de 50% de temperatura da parte protegida.

5.2 - MOMENTOS FLETORES DE DIAGRAMA RETANGULAR

5.2.1 - PROTEÇÃO DA ALMA

As Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 são as curvas de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas com comprimentos de 2m, 4m, 6m e 8m, respectivamente, para relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0; elaborados com o perfil CVS 450 x 216.

A observação das curvas de resistência ao fogo para o perfil CVS 450 x 216 permite elaborar as seguintes conclusões:

- a) A carga axial tende a variar linearmente com o tempo de resistência ao fogo;
- b) A medida em que o comprimento da barra aumenta, a variação da carga axial com a resistência ao fogo tende a ser independente da relação e/d até 60 minutos, mas para 120 minutos ocorre uma variação significativa da carga com a relação e/d e comprimento para proteção na alma.

Com o objetivo de buscar informações aplicáveis em projeto, define-se aqui as razões da carga γ_{60} e γ_{120} como capazes de ressaltar em tempos de resistência ao fogo, respectivamente, iguais a 60 e 120 minutos para uma dada relação de e/d .

A Tabela 34 fornece os valores de γ_{60} para as relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0 e para comprimentos da barra iguais a 2m, 4m, 6m e 8m, notando-se que a razão de carga γ_{60} é tendencialmente independente do comprimento da barra e da relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

A Tabela 35 fornece os valores de γ_{120} em função das relações e/d e dos comprimentos da barra, verifica-se que a razão de carga γ_{120} é tendencialmente independente do comprimento da barra, mas variando com a relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

As Figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 são as curvas de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas com comprimentos de 2m, 4m, 6m e 8m, respectivamente, para relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0; elaborados com o perfil CVS 850 x 414. A observação das curvas de resistência ao fogo para o perfil CVS 850 x 414, observando:

A carga axial tende a variar linearmente com o tempo de resistência ao fogo;

A medida em que o comprimento da barra aumenta, a variação da carga axial com a resistência ao fogo tende a ser independente da relação e/d até 60 minutos, mas para

120 minutos ocorre uma variação significativa da carga com a relação e/d e comprimento para proteção na alma.

A Tabela 36 fornece os valores de γ_{60} para as relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0 e para comprimentos da barra iguais a 2m, 4m, 6m e 8m., a razão de carga γ_{60} é tendencialmente independente do comprimento da barra e da relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

A Tabela 37 fornece os valores de γ_{120} em função das relações e/d e dos comprimentos da barra, nota-se que a razão de carga γ_{120} é tendencialmente independente do comprimento da barra, mas variando com a relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

Tabela 34 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 450 x 216.

L(m)	e / d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,88	0,93	0,95	0,95	0,95
4	0,80	0,92	0,95	0,95	0,95
6	0,92	0,95	0,95	0,98	0,98
8	0,95	0,99	0,97	0,97	1,00

Tabela 35 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil CVS 450 x 216.

L(m)	e / d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,60	0,72	0,73	0,78	0,80
4	0,62	0,72	0,75	0,72	0,77
6	0,62	0,70	0,74	0,74	0,75
8	0,64	0,68	0,70	0,79	0,75

Tabela 36 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 850 x 414.

L(m)	e / d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,85	0,92	0,90	0,90	0,92
4	0,80	0,87	0,90	0,90	0,90
6	0,87	0,95	0,86	0,90	0,85
8	0,85	0,90	0,85	0,90	0,90

Tabela 37 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 850 x 414.

L(m)	e / d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,58	0,70	0,65	0,69	0,70
4	0,57	0,67	0,65	0,68	0,70
6	0,65	0,64	0,65	0,66	0,70
8	0,50	0,64	0,60	0,67	0,70

ALMA PROTEGIDA
CVS 450*216
L= 2m

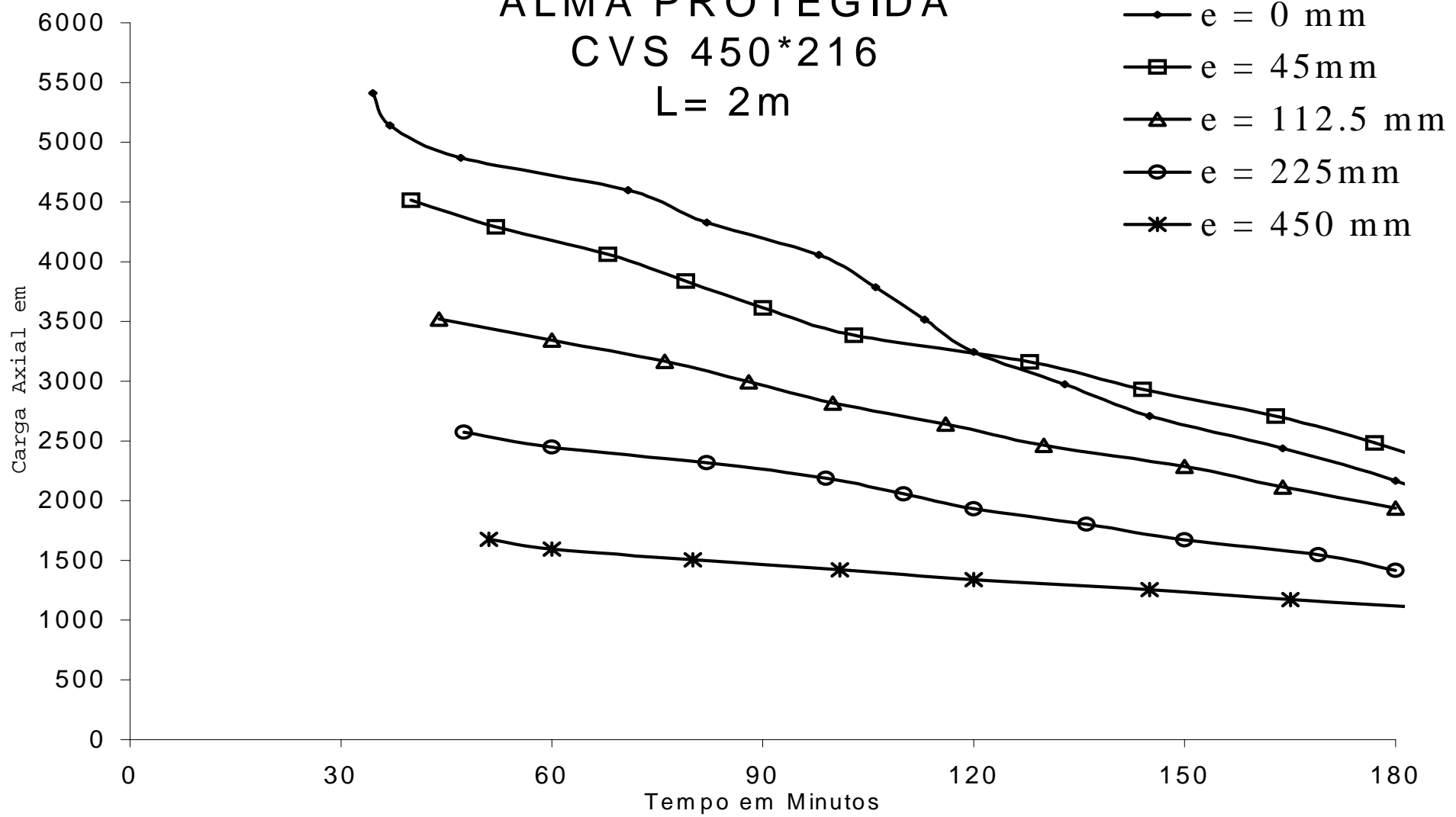


Figura 5.1 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 2 m.

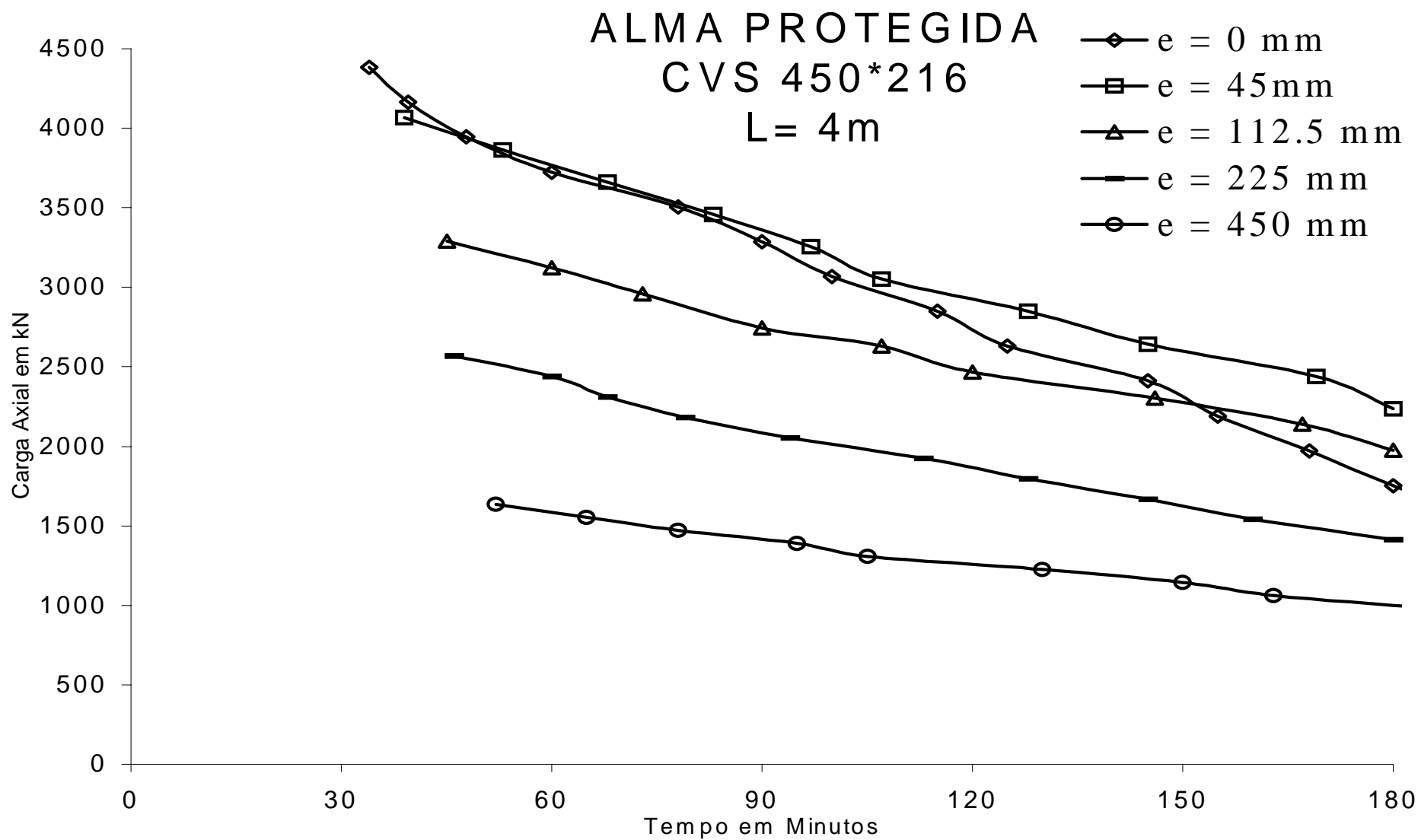


Figura 5.2 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 4 m.

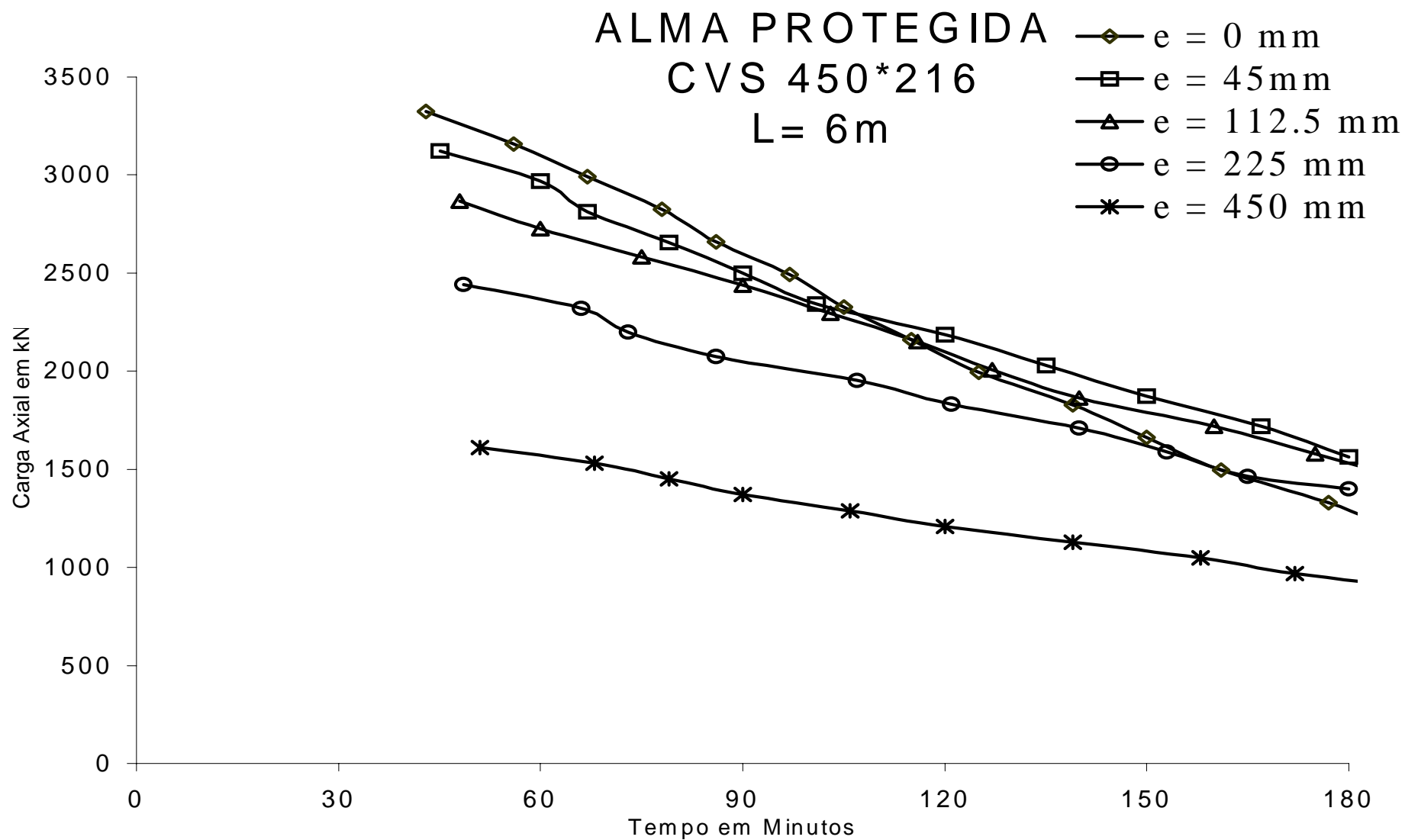


Figura 5.3 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 6 m.

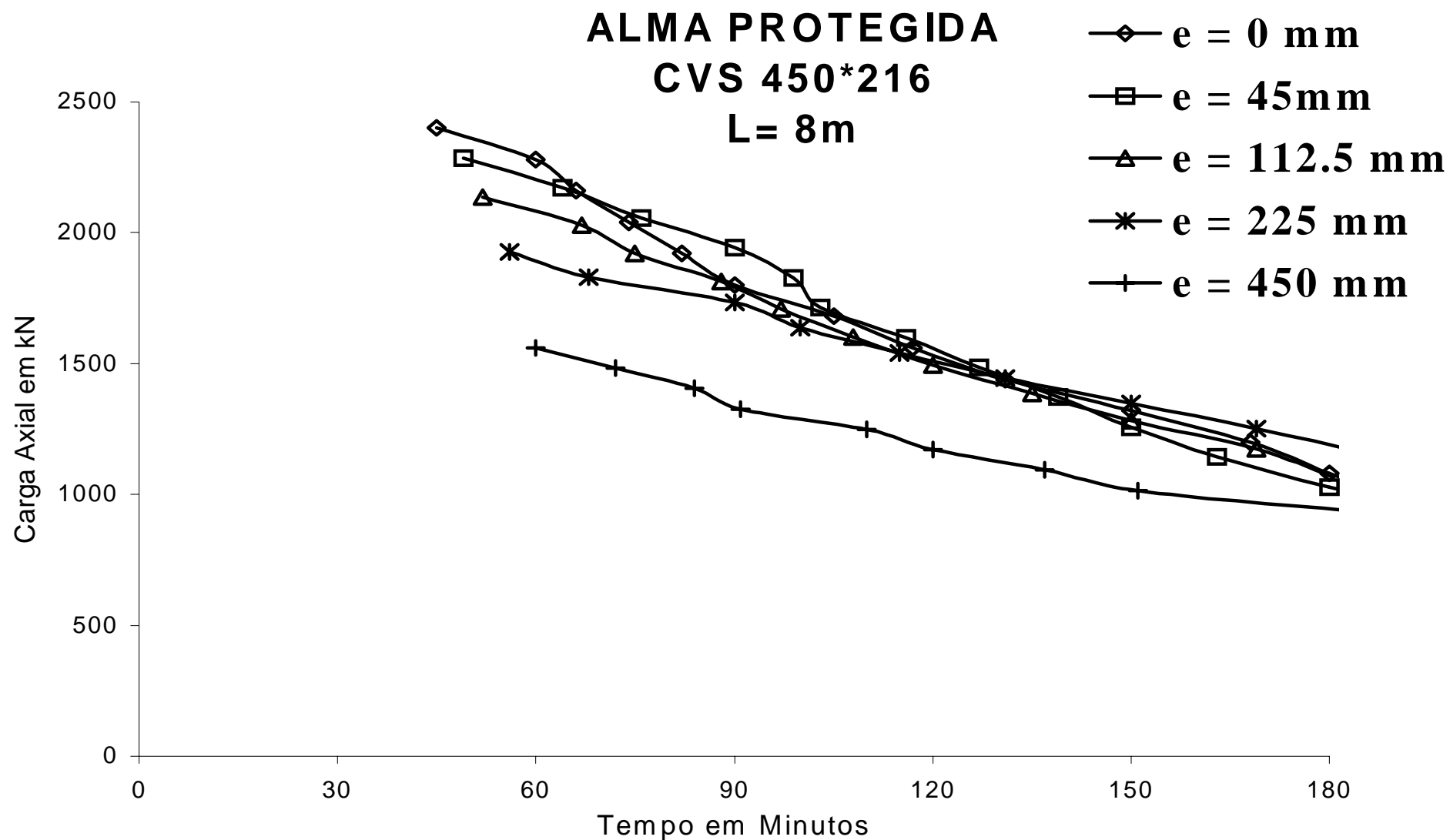


Figura 5.4 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 8 m.

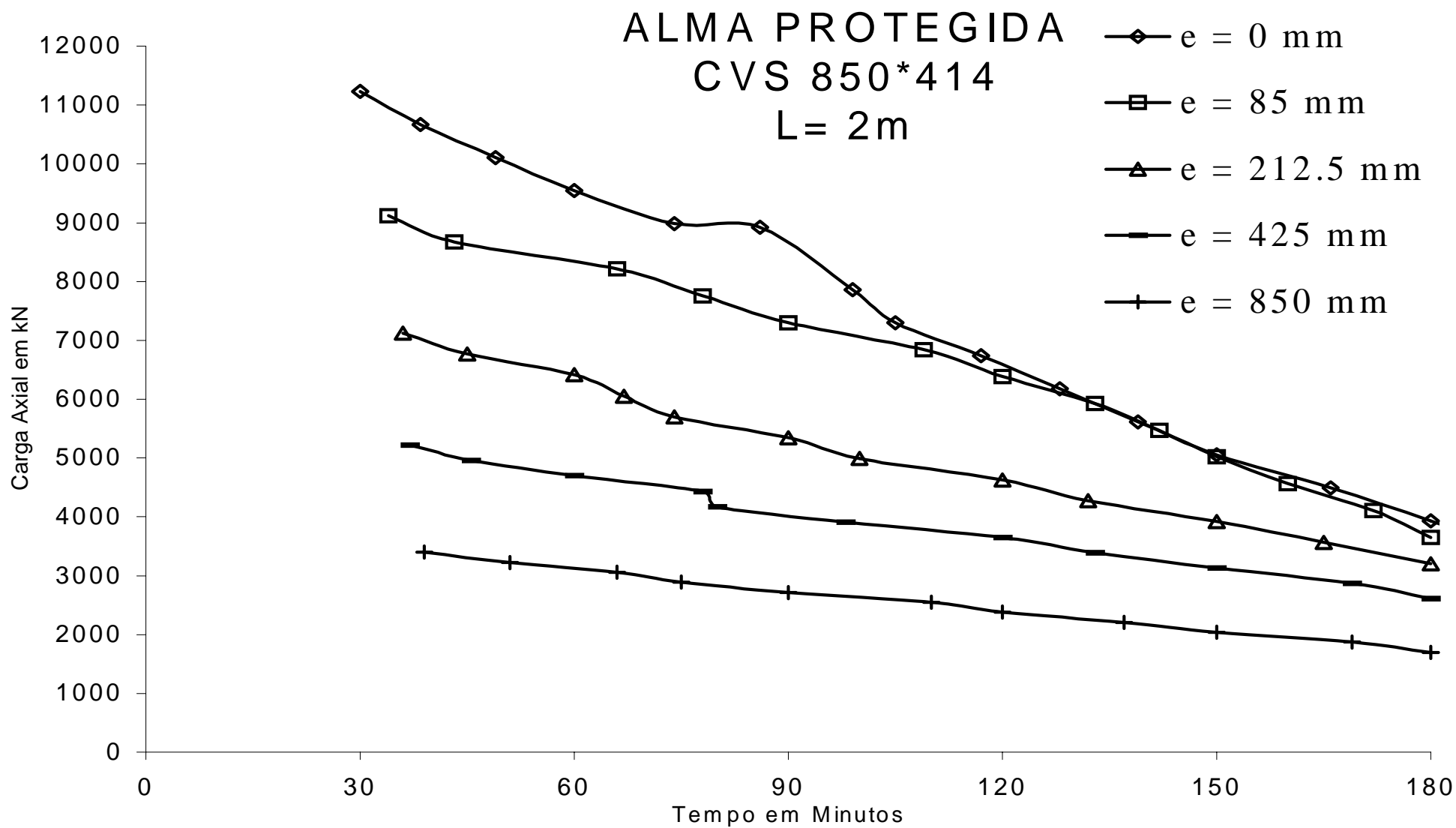


Figura 5.5 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 2 m.

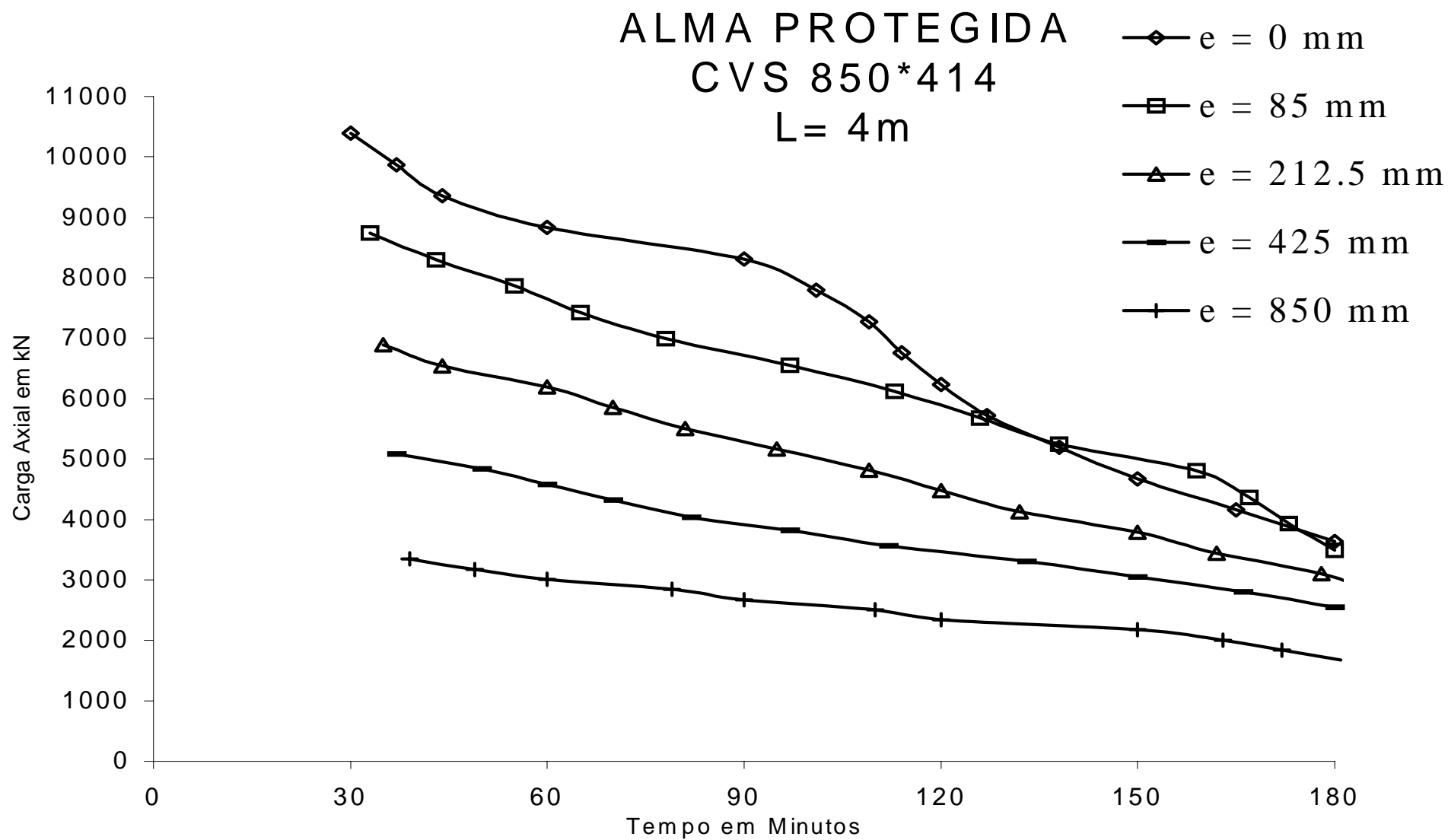


Figura 5.6 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 4 m.

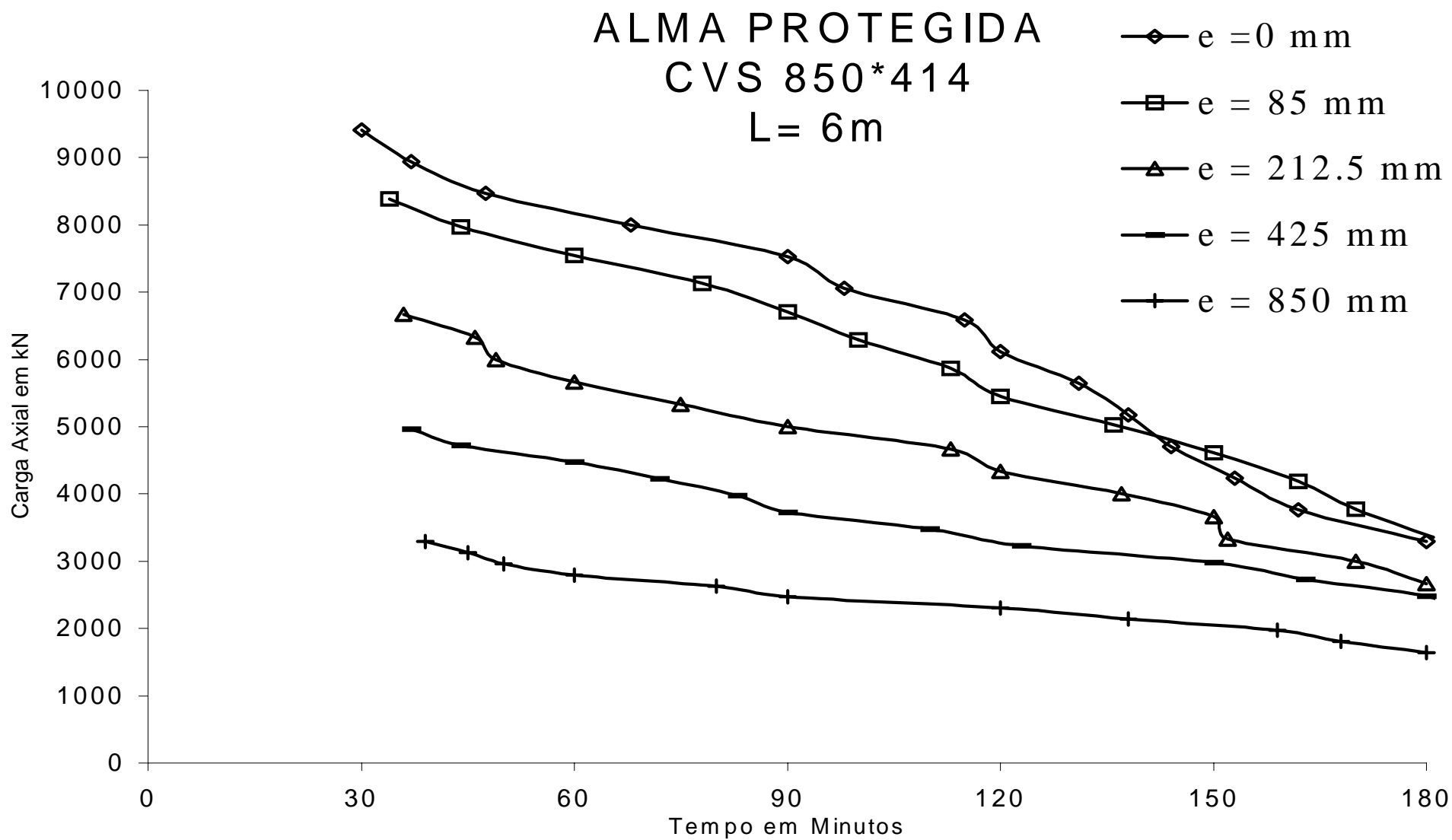


Figura 5.7 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 6 m.

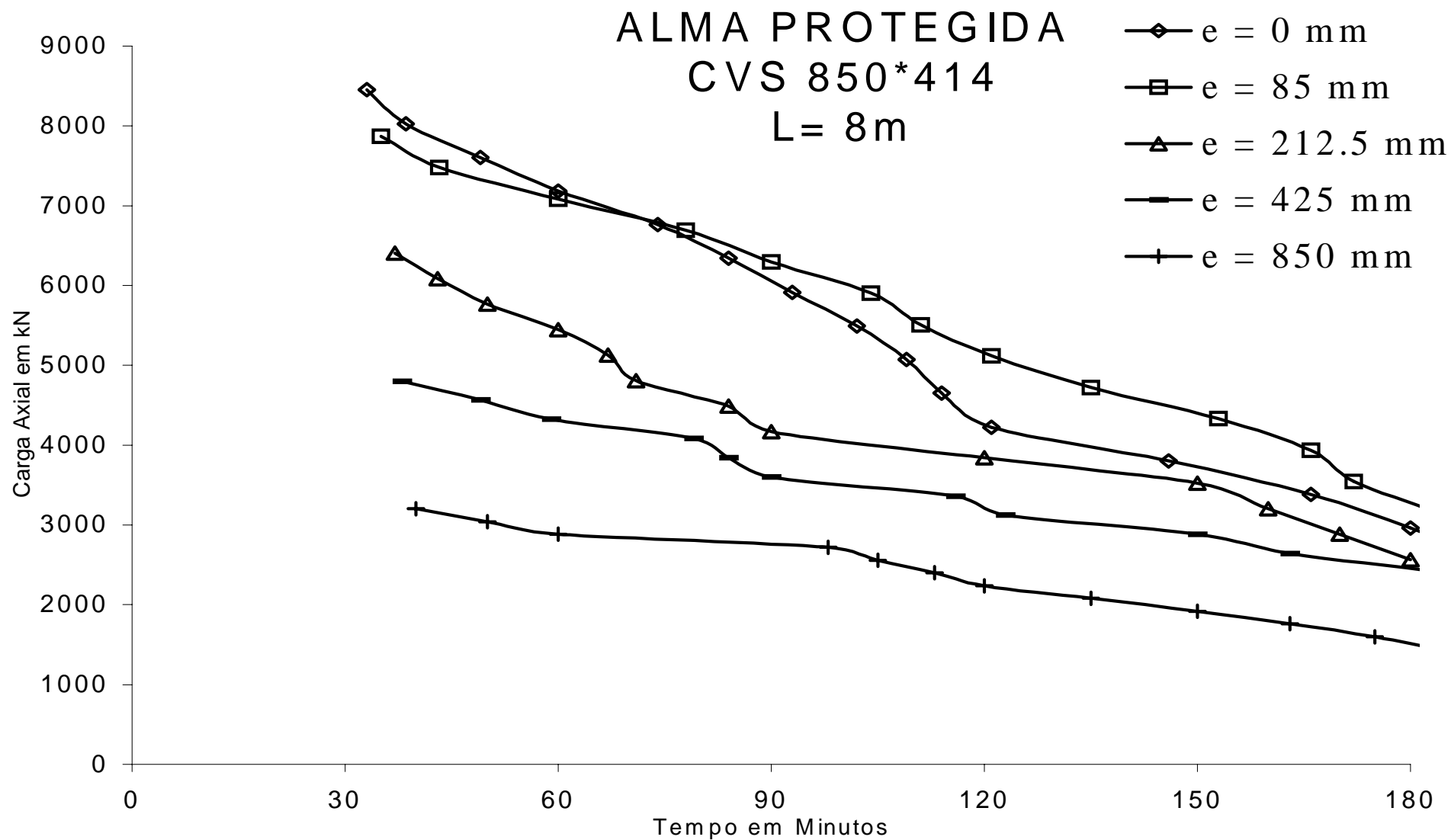


Figura 5.8 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 8 m.

5.2.2 - PROTEÇÃO DAS MESAS

As Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 são as curvas de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas com comprimentos de 2m, 4m, 6m e 8m, respectivamente, para relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0, elaborados com o perfil CVS 450 x 216, observando as curvas de resistência ao fogo pode-se notar:

A carga axial tende a variar linearmente com o tempo de resistência ao fogo;

A medida em que o comprimento da barra aumenta, a variação da carga axial com a resistência ao fogo tende a ser independente da relação e/d até 60 minutos, mas para 120 minutos ocorre uma variação significativa da carga com a relação e/d e comprimento para proteção nas mesas.

A Tabela 38 fornece os valores de γ_{60} para as relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0 e para comprimentos da barra iguais a 2m, 4m, 6m e 8m, conclui-se que: a razão de carga γ_{60} é tendencialmente independente do comprimento da barra e da relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

A Tabela 39 fornece os valores de γ_{120} em função das relações e/d e dos comprimentos da barra, observa-se que a razão de carga γ_{120} é tendencialmente independente da variação do comprimento, mas variando com a relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

As Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 são as curvas de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas com comprimentos de 2m, 4m, 6m e 8m, respectivamente, para relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0; elaborados com o perfil CVS 850 x 414.

A observação das curvas de resistência ao fogo para o perfil CVS 850 x 414 permite obter as seguintes conclusões:

A carga axial tende a variar linearmente com o tempo de resistência ao fogo;

A medida em que o comprimento da barra aumenta, a variação da carga axial com a resistência ao fogo tende a ser independente da relação e/d até 60 minutos, mas para 120 minutos ocorre uma variação significativa da carga com a relação e/d e comprimento para proteção nas mesas.

A Tabela 40 fornece os valores de γ_{60} para as relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0 e para comprimentos da barra iguais a 2m, 4m, 6m e 8m, nota-se que a razão de carga γ_{60} é tendencialmente independente do comprimento da barra e da relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

A Tabela 41 fornece os valores de γ_{120} em função das relações e/d e dos comprimentos da barra observando que a razão de carga γ_{120} é tendencialmente independente da variação do comprimento, mas aumentando com a relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

Tabela 38 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 450 x 216.

L(m)	e/d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,82	0,91	0,95	0,95	0,95
4	0,87	0,88	0,90	0,90	0,73
6	0,87	0,82	0,85	0,85	0,85
8	0,90	0,95	0,95	0,90	0,85

Tabela 39 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 450 x 216.

L(m)	e/d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,67	0,78	0,80	0,77	0,75
4	0,87	0,75	0,75	0,75	0,74
6	0,71	0,76	0,70	0,69	0,60
8	0,70	0,85	0,79	0,74	0,64

Tabela 40 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 850 x 414.

L(m)	e/d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,81	0,87	0,89	0,91	0,93
4	0,80	0,84	0,88	0,90	0,93
6	0,70	0,75	0,82	0,82	0,90
8	0,75	0,81	0,82	0,87	0,95

Tabela 41 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 850 x 414.

L(m)	e/d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,67	0,70	0,73	0,74	0,76
4	0,65	0,68	0,70	0,75	0,75
6	0,50	0,57	0,65	0,62	0,68
8	0,55	0,58	0,65	0,67	0,70

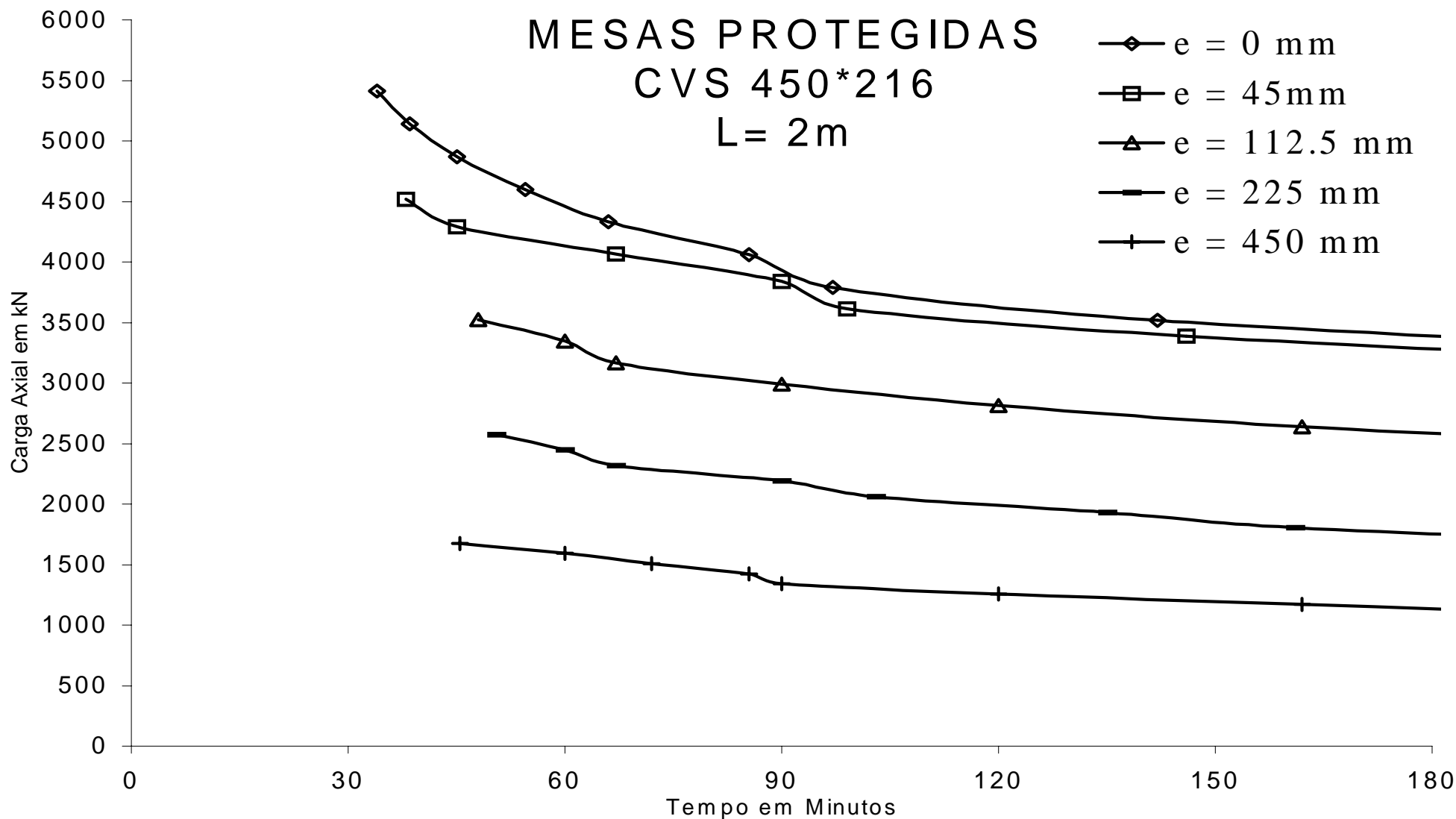


Figura 5.9 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 2 m.

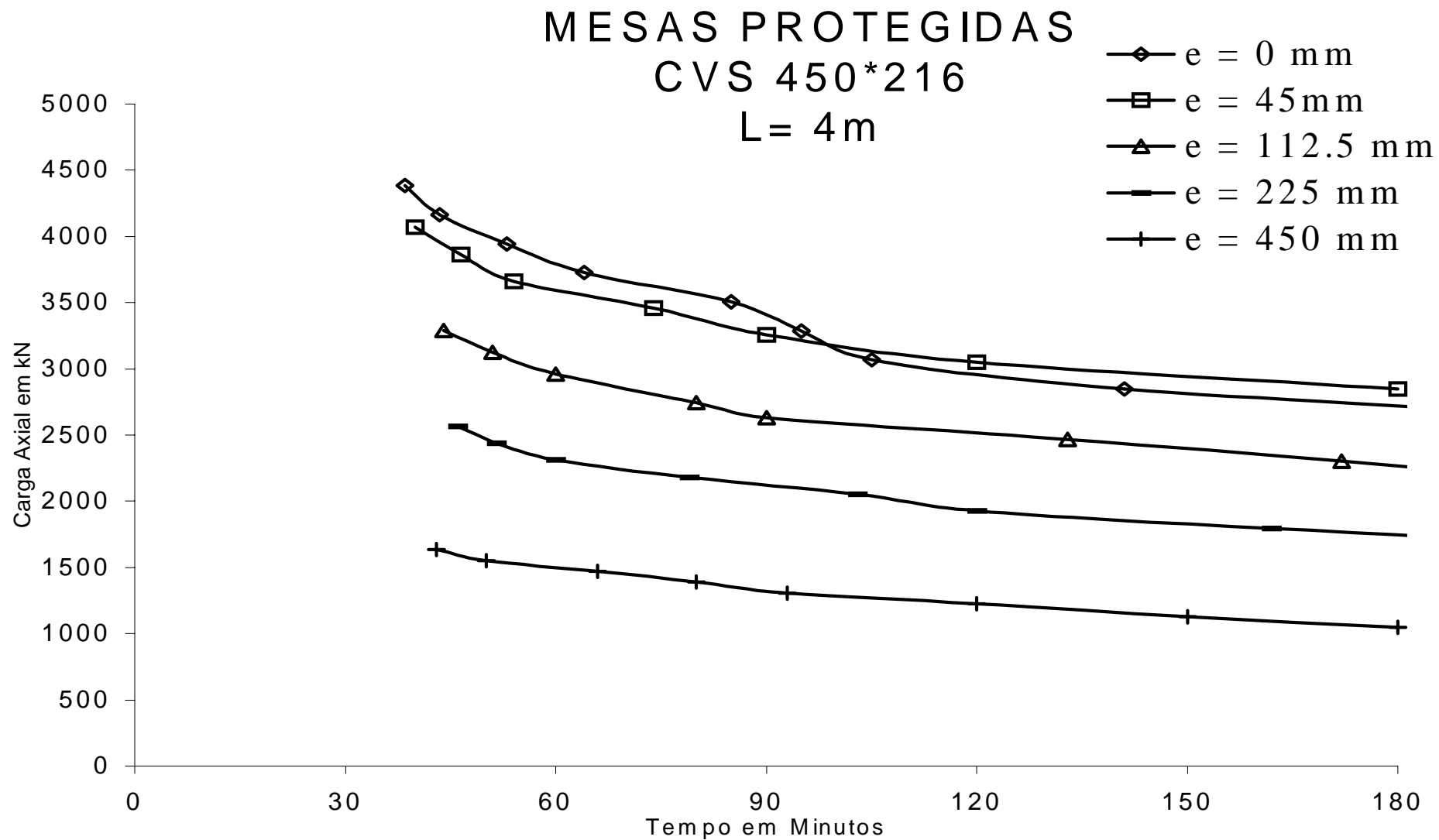


Figura 5.10 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 4 m.

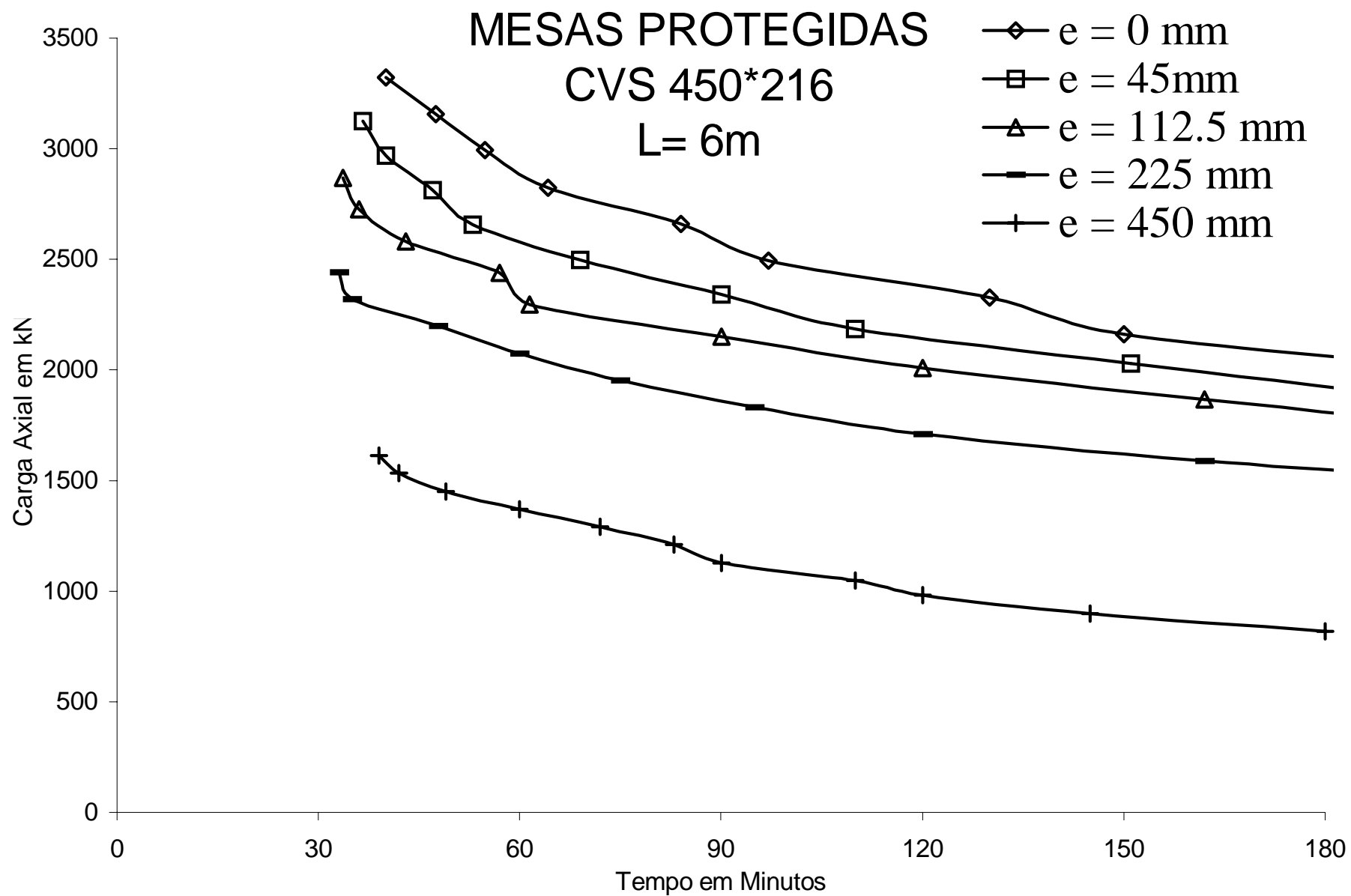


Figura 5.11 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 6 m.

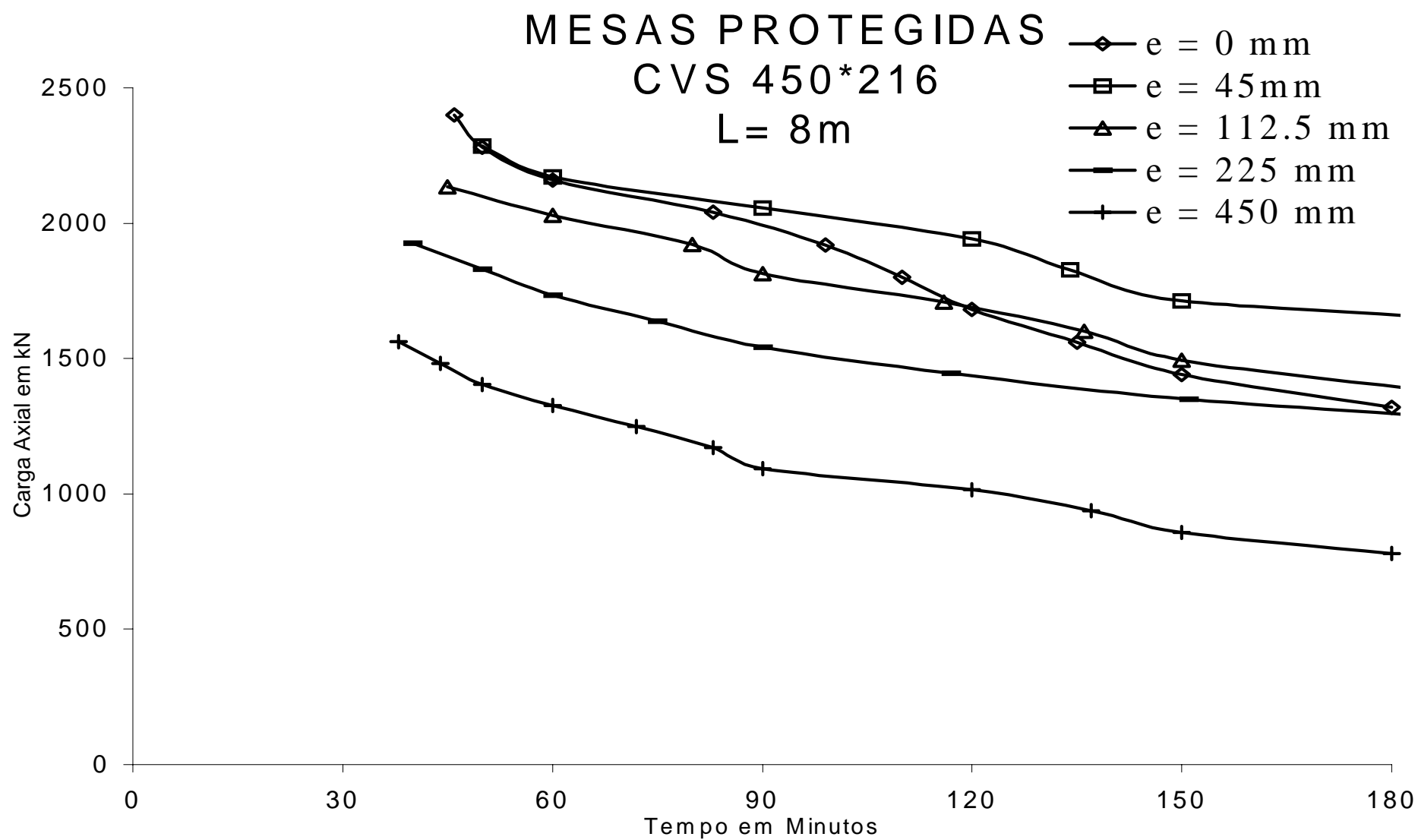


Figura 5.12 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 8 m.

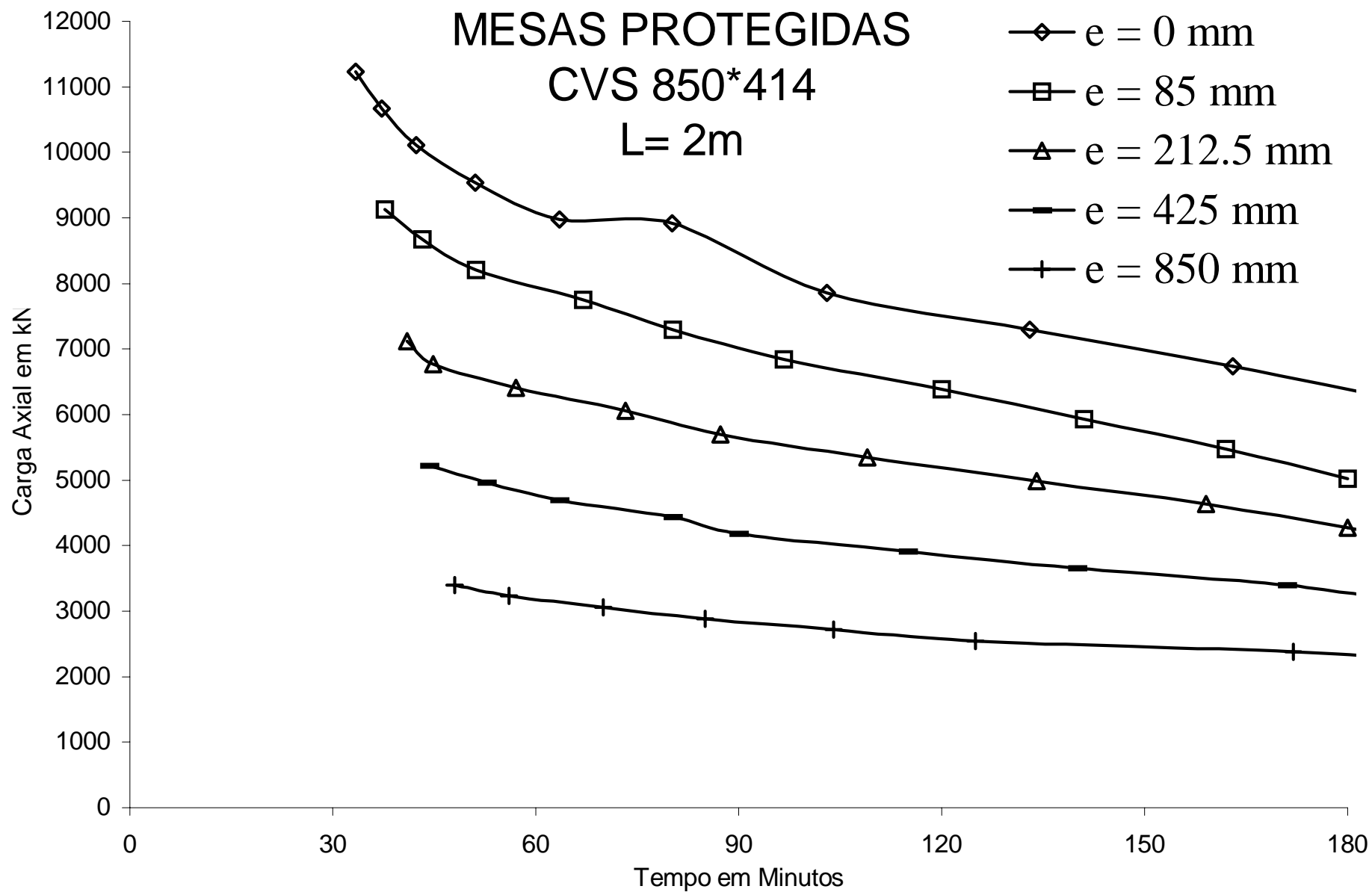


Figura 5.13 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 2 m.

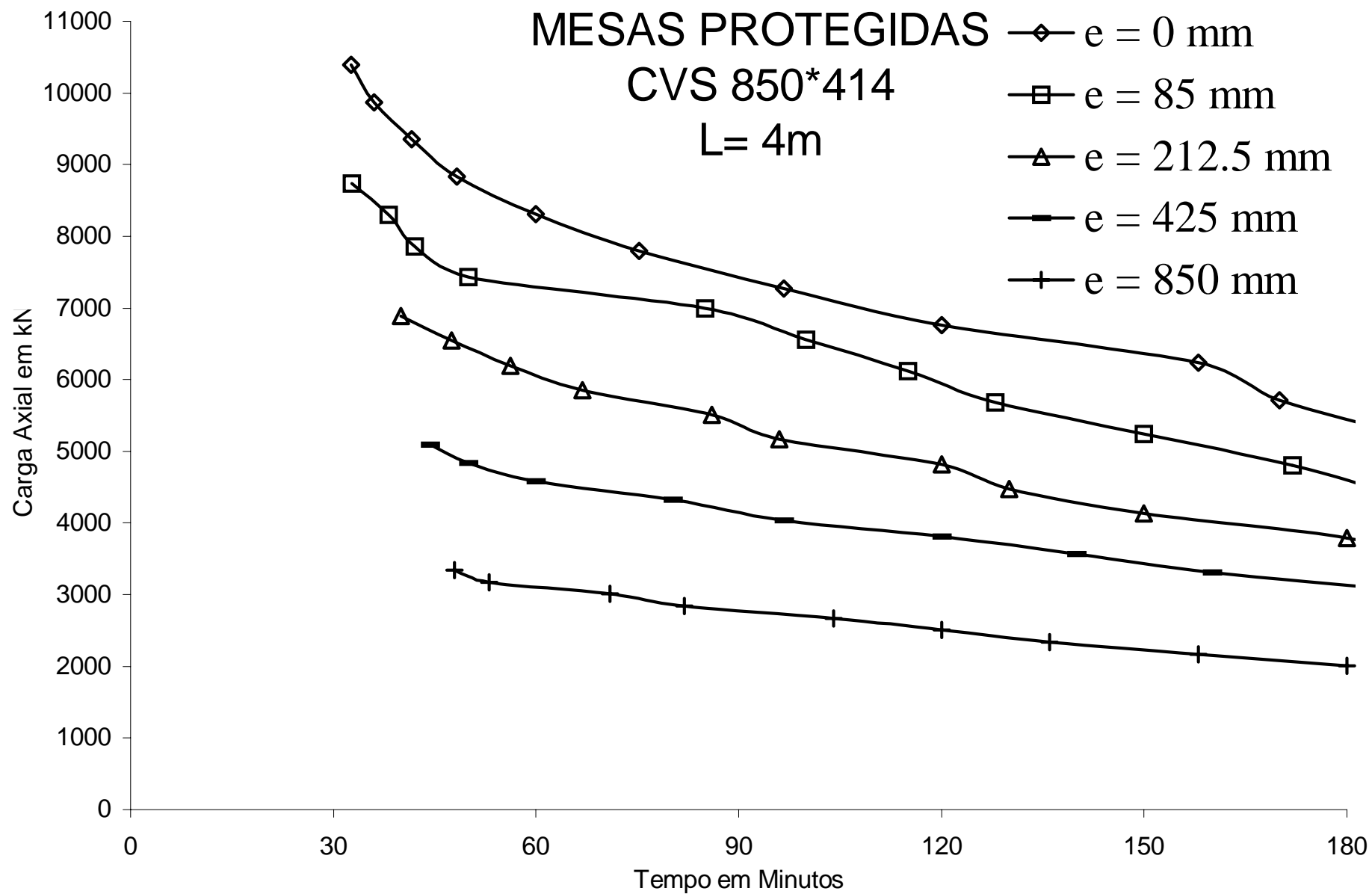


Figura 5.14 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 4 m.

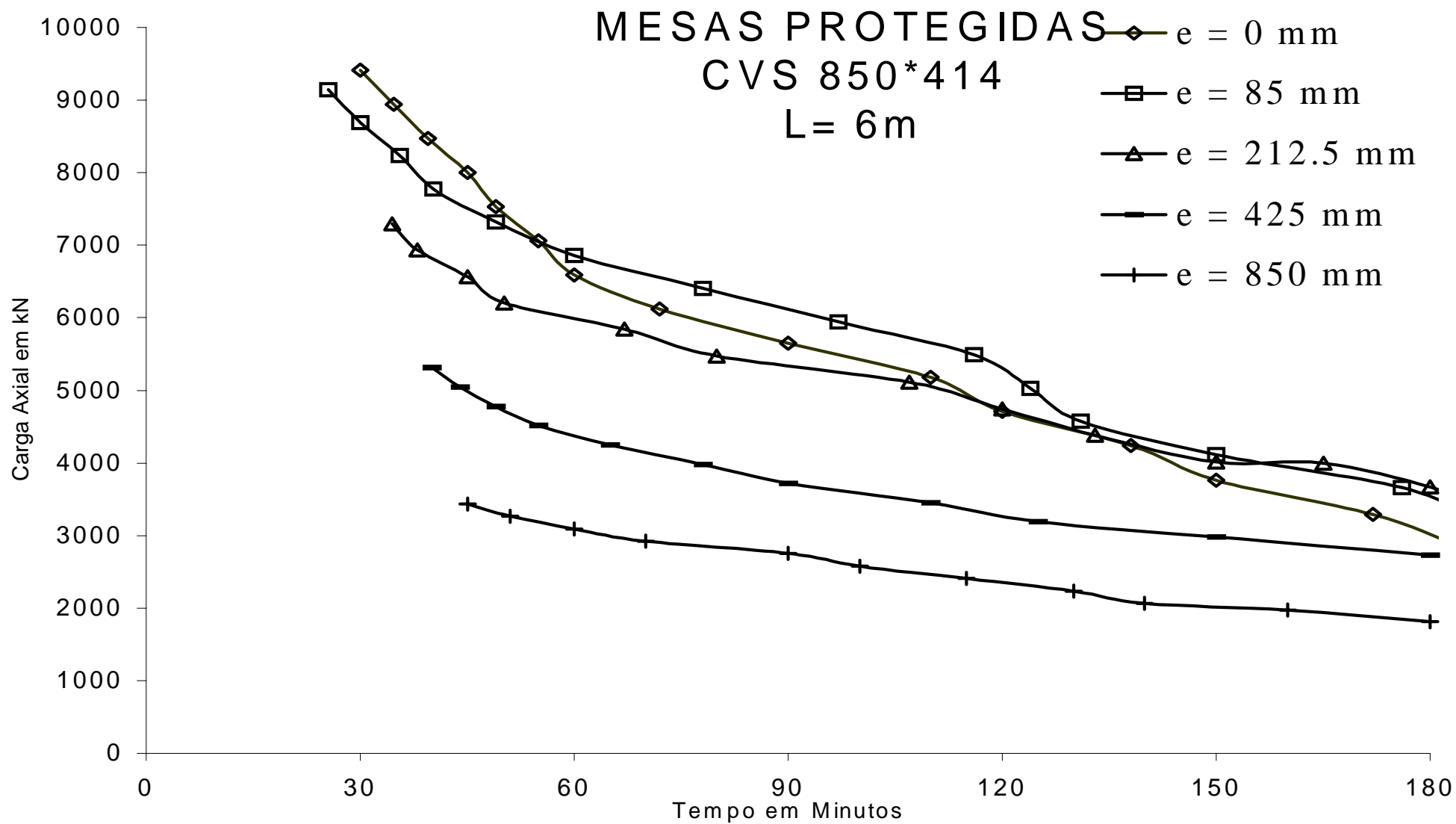


Figura 5.15 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 6 m.

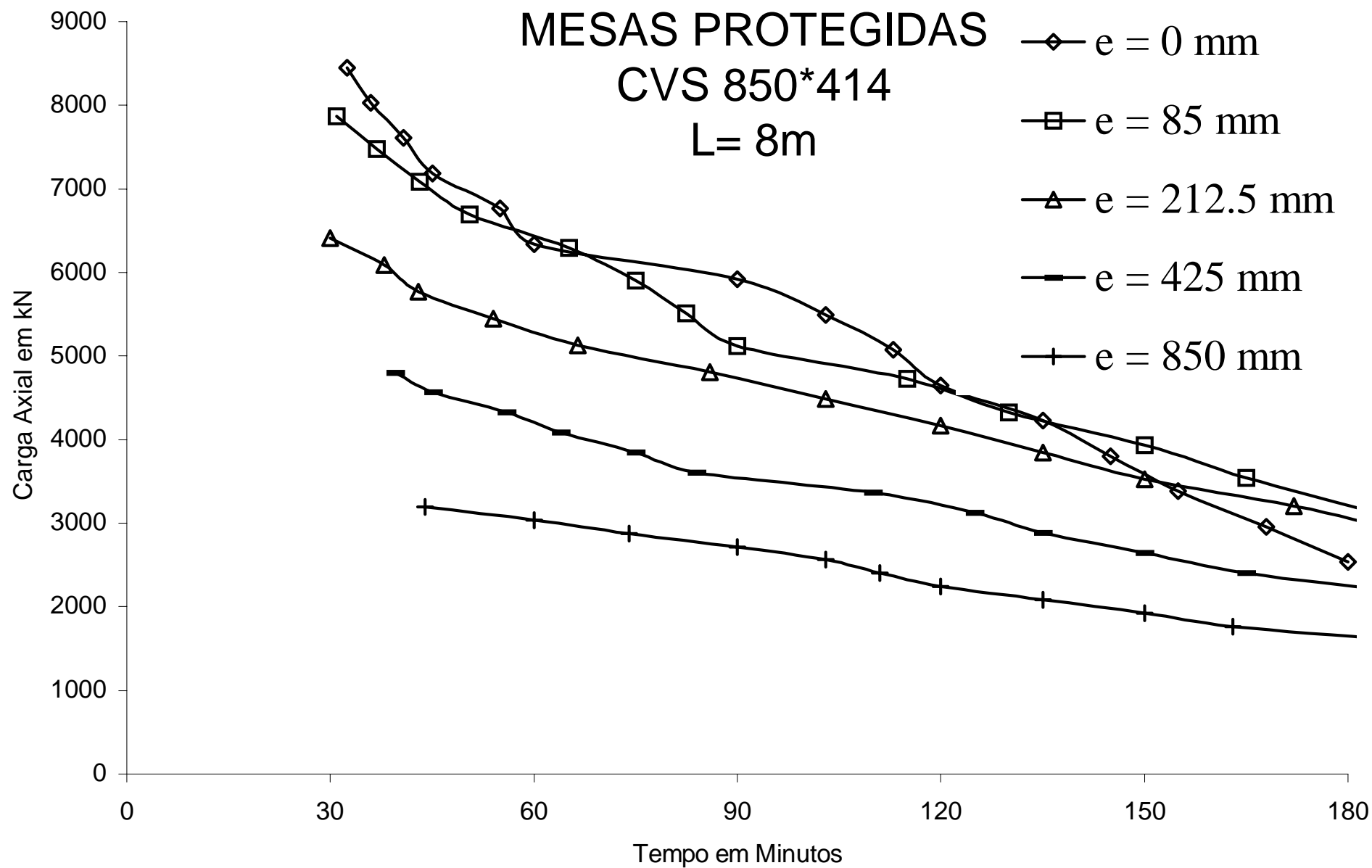


Figura 5.16 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 8 m.

5.3 - MOMENTOS FLETORES DE DIAGRAMA TRIANGULAR

5.3.1 - PROTEÇÃO DA ALMA

As Figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20 são as curvas de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas com comprimentos de 2m, 4m, 6m e 8m, respectivamente, para relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0; elaborados com o perfil CVS 450 x 216 observando as curvas de resistência ao fogo, obtém-se as seguintes conclusões :

- a) A carga axial tende a variar linearmente com o tempo de resistência ao fogo;
- b) A medida em que o comprimento da barra aumenta, a variação da carga axial com a resistência ao fogo tende a ser independente da relação e/d até 60 minutos, mas para 120 minutos ocorre uma variação significativa da carga com a relação e/d e comprimento para proteção na alma.

A Tabela 42 fornece os valores de γ_{60} para as relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0 e para comprimentos da barra iguais a 2m, 4m, 6m e 8m. observa-se que a razão de carga γ_{60} é tendencialmente independente do comprimento da barra e da relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

A Tabela 43 fornece os valores de γ_{120} em função das relações e/d e dos comprimentos da barra, a razão de carga γ_{120} é tendencialmente independente do comprimento da barra e da relação de e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

As Figuras 5.21; 5.22, 5.23 e 5.24 são as curvas de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas com comprimentos de 2m, 4m, 6m e 8m, respectivamente, para relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0; elaborados com o perfil CVS 850 x 414 observando as curvas de resistência ao fogo, nota-se:

- a) A carga axial tende a variar linearmente com o tempo de resistência ao fogo;
- b) A medida em que o comprimento da barra aumenta, a variação da carga axial com a resistência ao fogo tende a ser independente da relação e/d até 60 minutos, mas para 120 minutos ocorre uma variação significativa da carga com a relação e/d e comprimento para proteção na alma.

A Tabela 44 fornece os valores de γ_{60} para as relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0 e para comprimentos da barra iguais a 2m, 4m, 6m e 8m, a razão de carga γ_{60} é tendencialmente independente do comprimento da barra e da relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

A Tabela 45 fornece os valores de γ_{120} em função das relações e/d e dos comprimentos da barra, observa-se que a razão de carga γ_{120} é tendencialmente independente do comprimento da barra, mas variando com a relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

Tabela 42 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 450 x 216.

L(m)	e/d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,90	0,80	0,88	0,88	0,94
4	0,85	0,85	0,83	0,90	0,90
6	0,86	0,85	0,88	0,90	0,85
8	0,85	0,92	0,90	0,91	0,85

Tabela 43 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 450 x 216.

L(m)	e/d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,61	0,55	0,60	0,50	0,65
4	0,56	0,60	0,54	0,50	0,57
6	0,60	0,52	0,55	0,55	0,51
8	0,61	0,57	0,57	0,60	0,50

Tabela 44 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 850 x 414

L(m)	e/d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,86	0,90	0,93	0,85	0,94
4	0,85	0,90	0,88	0,85	0,91
6	0,85	0,92	0,90	0,85	0,90
8	0,85	0,85	0,90	0,85	0,90

Tabela 45 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 850 x 414

L(m)	e/d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,55	0,65	0,75	0,68	0,70
4	0,60	0,67	0,68	0,64	0,72
6	0,57	0,70	0,86	0,65	0,72
8	0,55	0,60	0,65	0,65	0,70

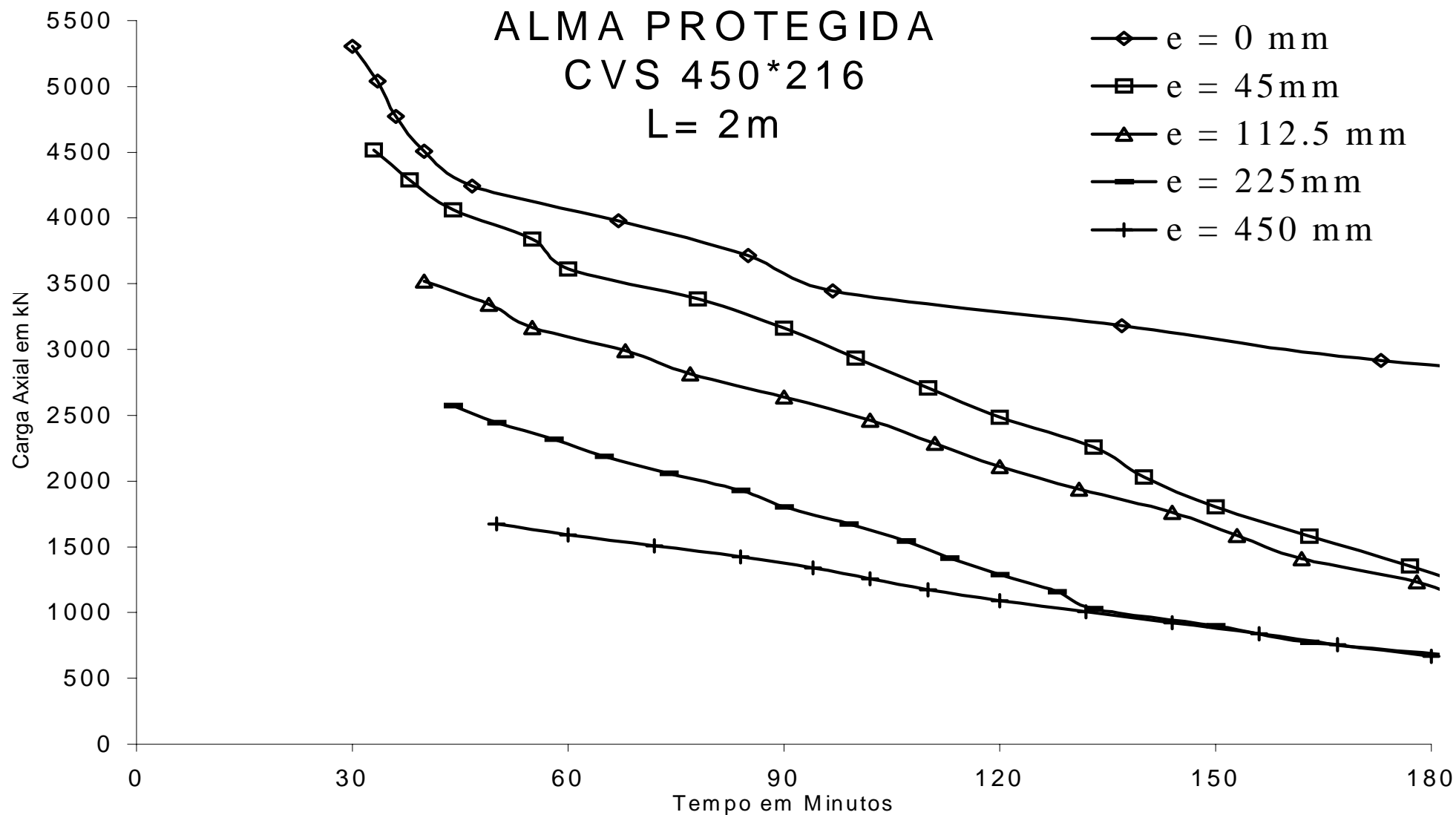


Figura 5.17 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 2 m.

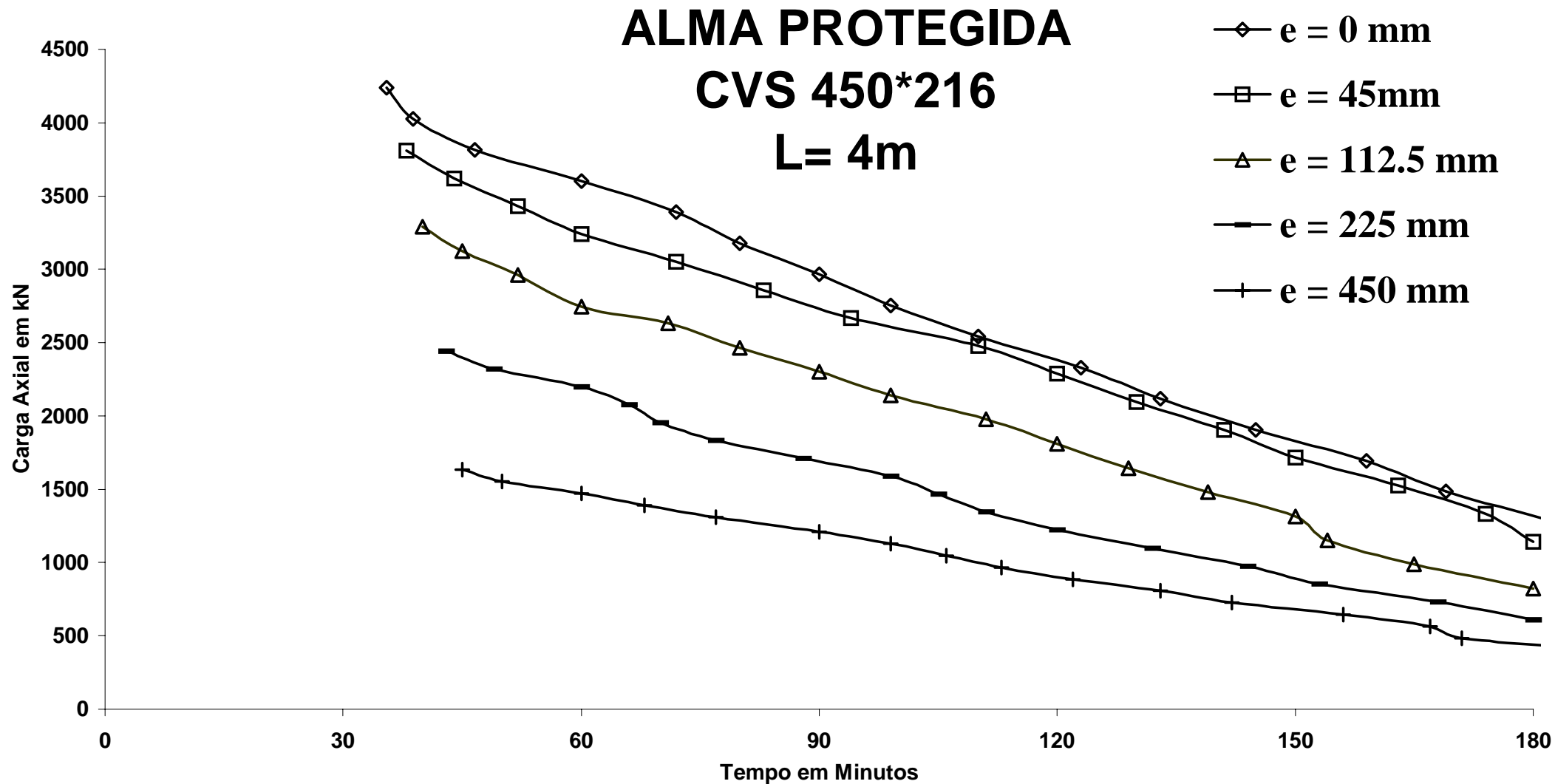


Figura 5.18 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 4 m.

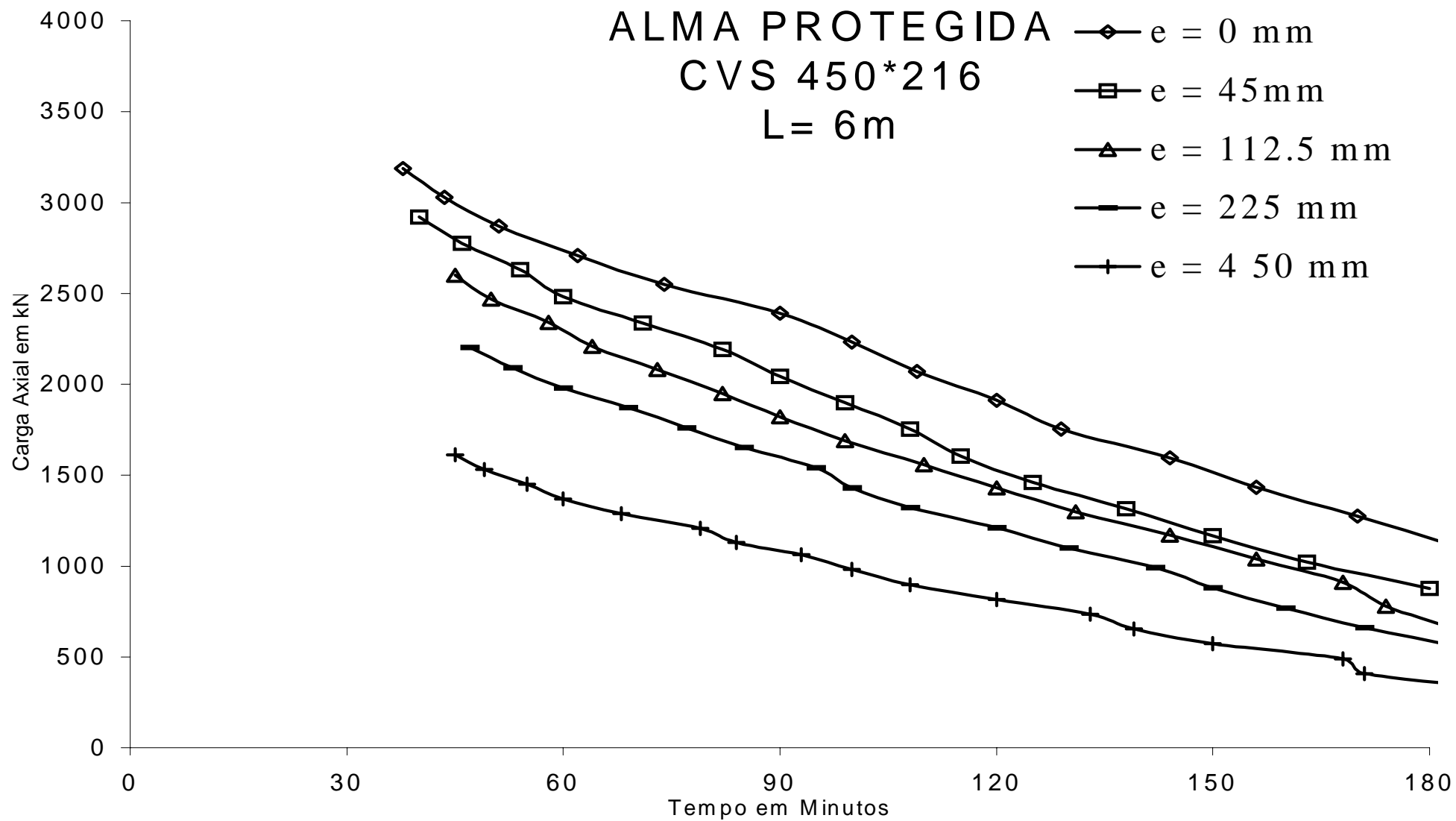


Figura 5.19 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 6 m.

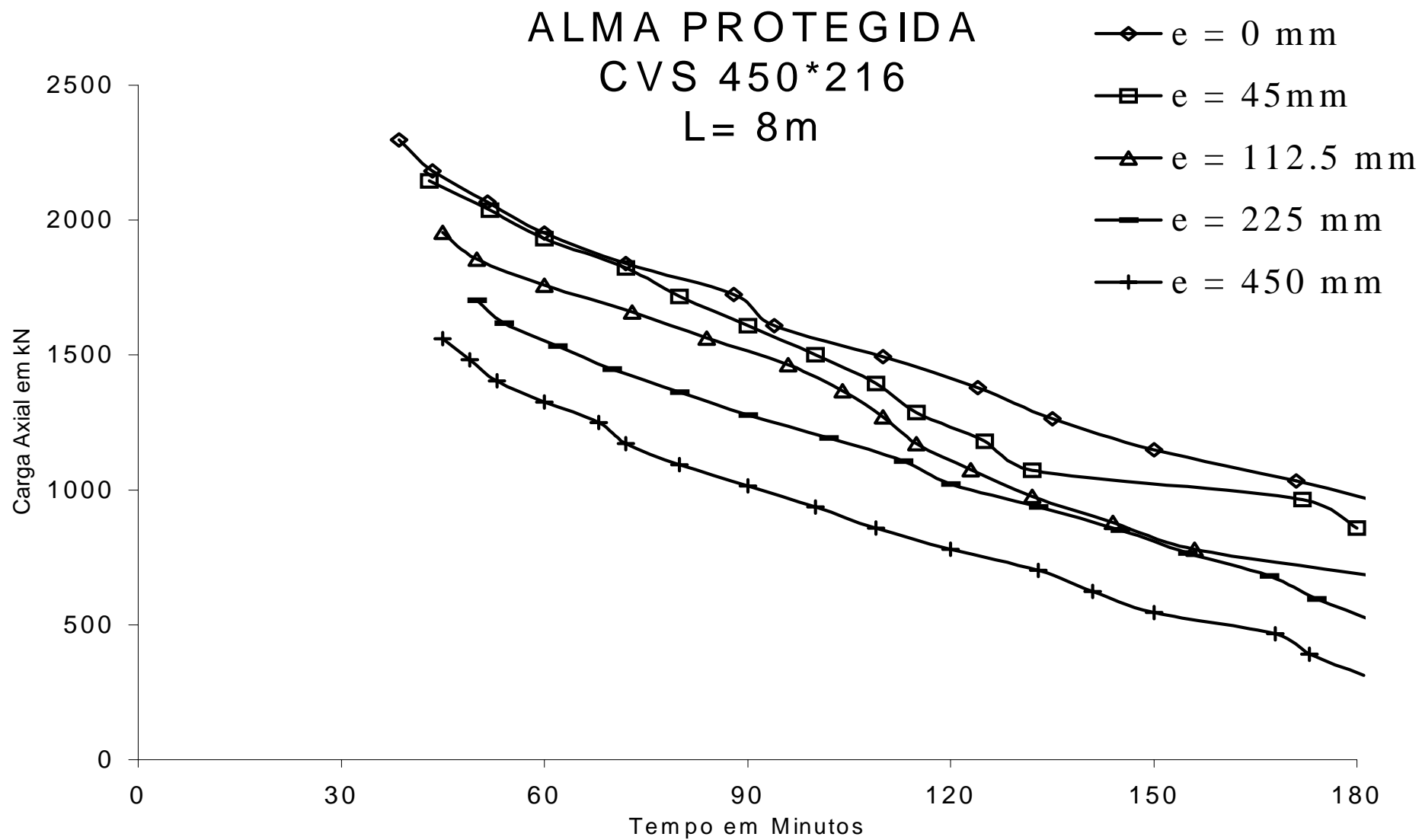


Figura 5.20 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 8 m

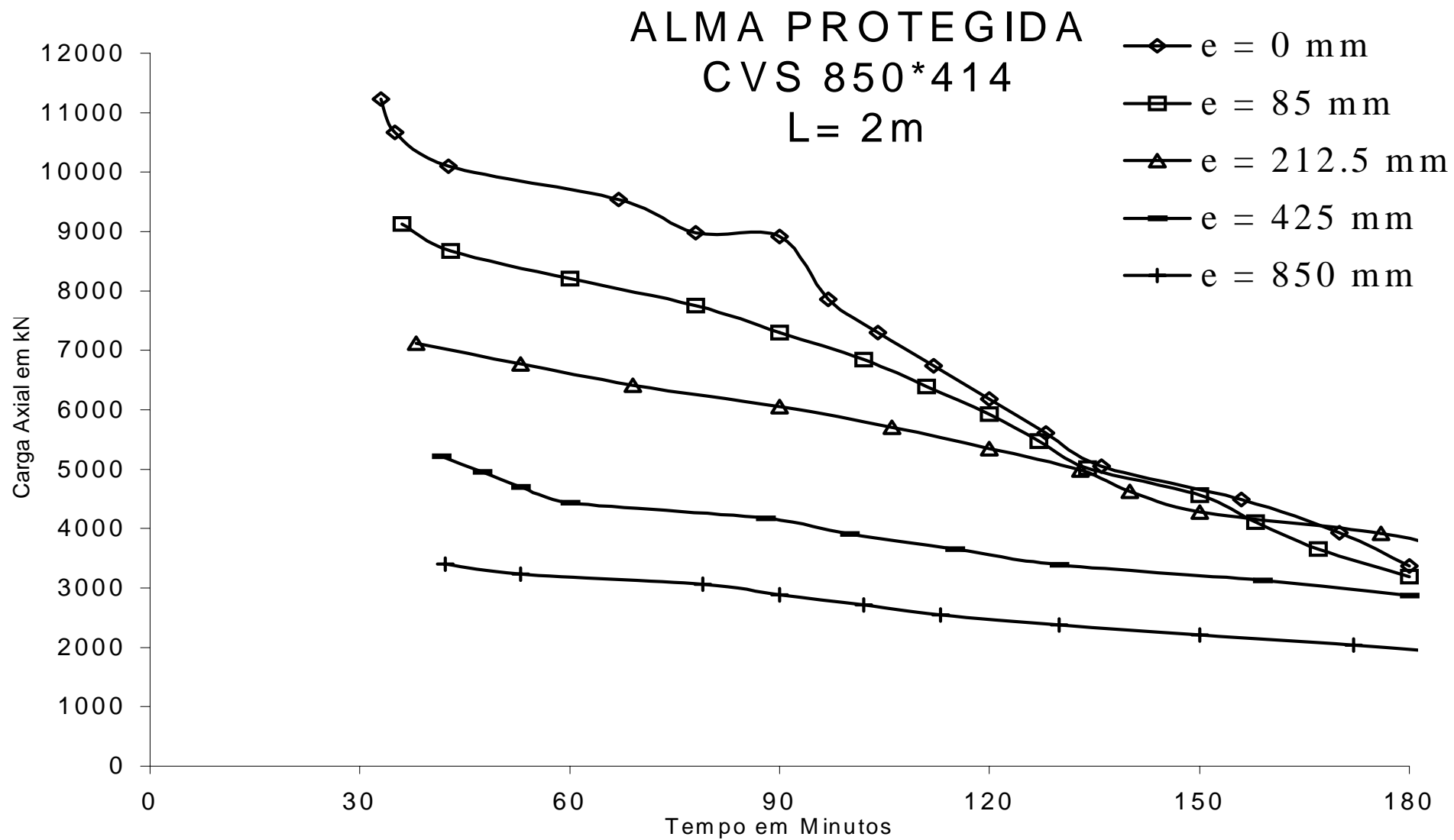


Figura 5.21 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 2 m.

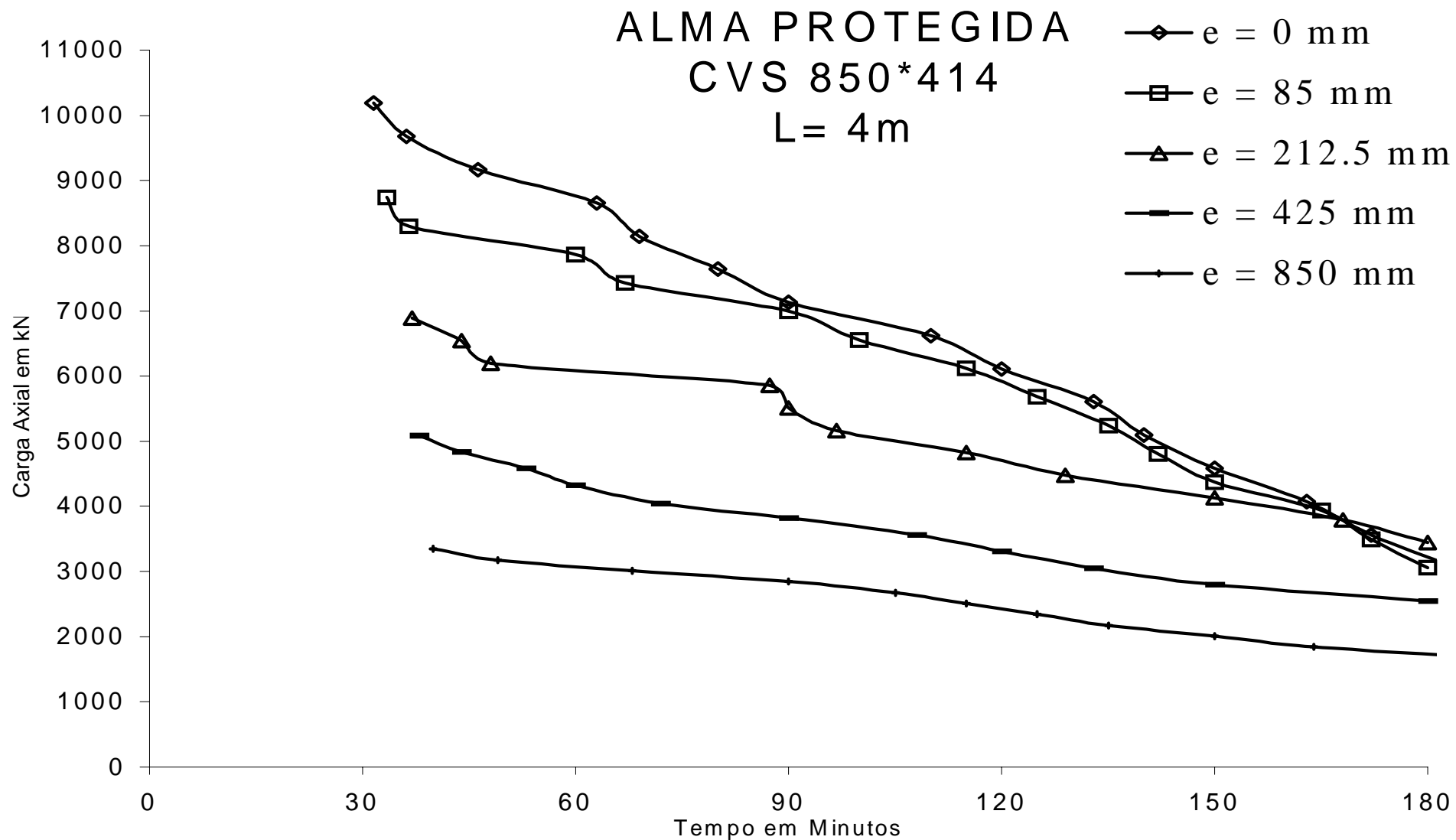


Figura 5.22 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 4 m.

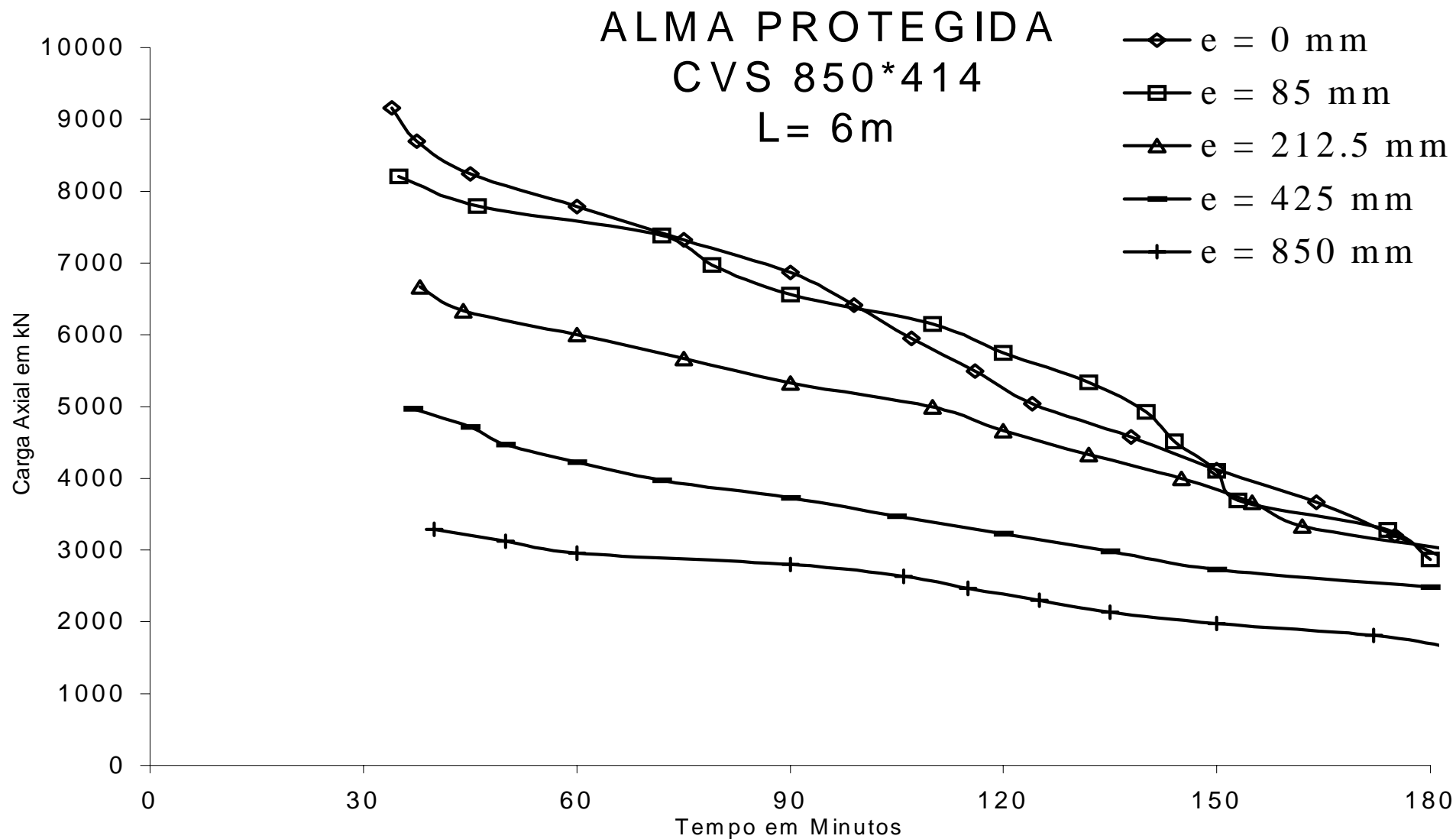


Figura 5.23 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 6 m.

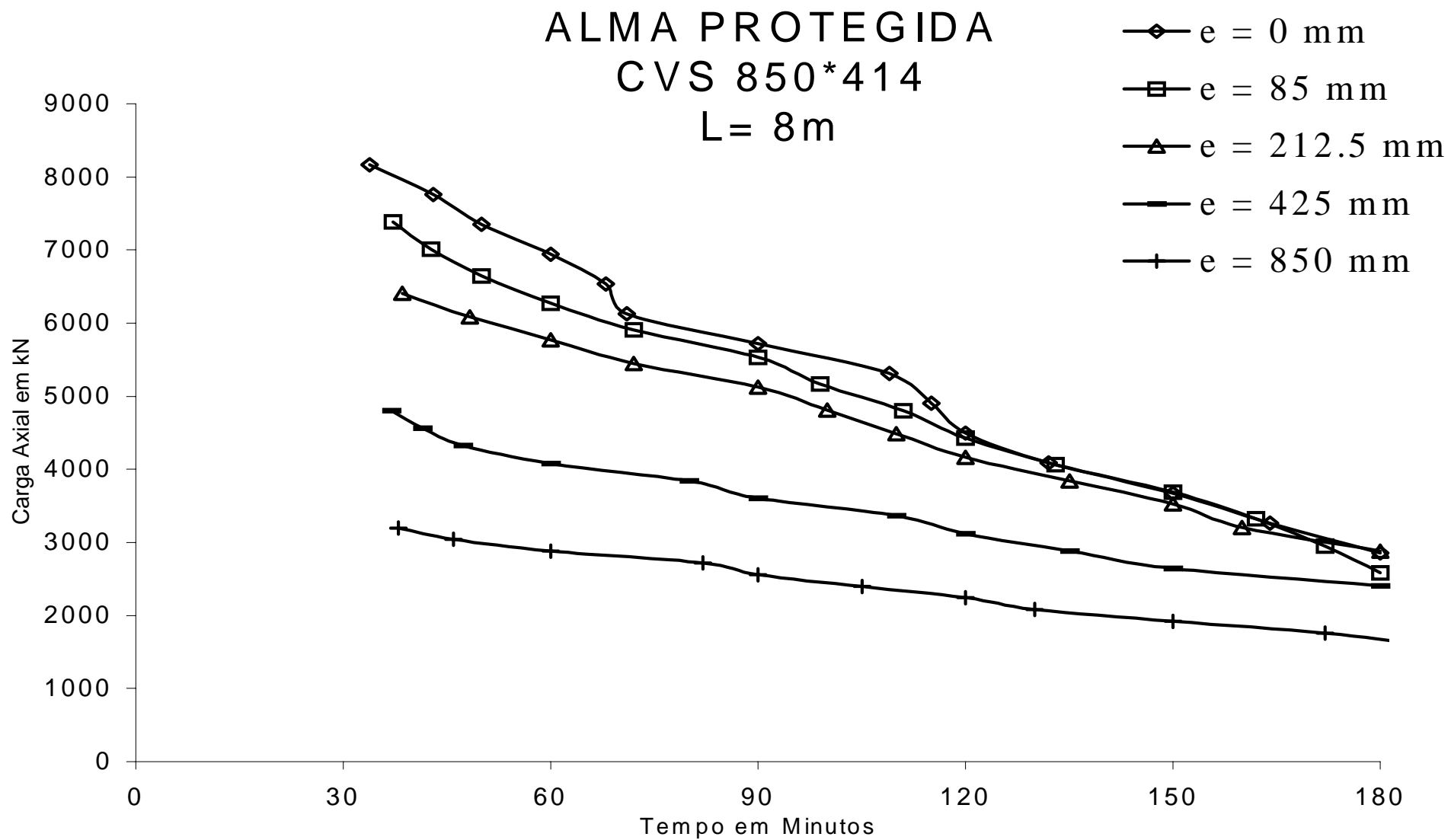


Figura 5.24 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 8 m.

5.3.2 - PROTEÇÃO DAS MESAS

As Figuras 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28 são as curvas de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas com comprimentos de 2m, 4m, 6m e 8m, respectivamente, para relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0; elaborados com o perfil CVS 450 x 216.

Para qualquer comprimento e relação de e/d , a variação da carga axial com a resistência ao fogo tende a constante e γ_{60} e γ_{120} iguais a 1.

As Figuras 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32 são as curvas de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas com comprimentos de 2m, 4m, 6m e 8m, respectivamente, para relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0; elaborados com o perfil CVS 850 x 414, permitindo as seguintes conclusões:

- a) A carga axial tende a variar linearmente com o tempo de resistência ao fogo;
- b) A medida em que o comprimento da barra aumenta, a variação da carga axial com a resistência ao fogo tende a ser independente da relação e/d .

A Tabela 46 fornece os valores de γ_{60} para as relações e/d iguais a 0,00, 0,10, 0,25, 0,50 e 1,0 e para comprimentos da barra iguais a 2m, 4m, 6m e 8m. Nota-se que a razão de carga γ_{60} é tendencialmente independente do comprimento da barra, mas crescendo com a relação e/d para a barra flexo-comprimida examinada.

A Tabela 47 fornece os valores de γ_{120} em função das relações e/d e dos comprimentos da barra, a razão de carga γ_{120} é tendencialmente dependente da variação do comprimento da barra, mas crescendo com a relação e/d para a barra flexo-comprimida utilizando perfil CVS 850 x 414 .

Tabela 46 - Razões de carga γ_{60} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 850 x 414.

L(m)	e/d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,82	0,97	0,95	1,0	1,0
4	0,75	0,90	0,95	1,0	1,0
6	0,82	0,85	0,95	1,0	1,0
8	0,80	0,90	0,95	1,0	1,0

Tabela 47 - Razões de carga γ_{120} em função de e/d e do comprimento para perfil
CVS 850 x 414.

L(m)	e/d				
	0,00	0,10	0,25	0,50	1,00
2	0,67	0,85	0,85	0,62	0,95
4	0,60	0,75	0,85	0,87	0,95
6	0,60	0,85	0,85	0,87	0,90
8	0,55	0,75	0,80,	0,90	0,90

MESAS PROTEGIDAS
CVS 450*216
L= 2m

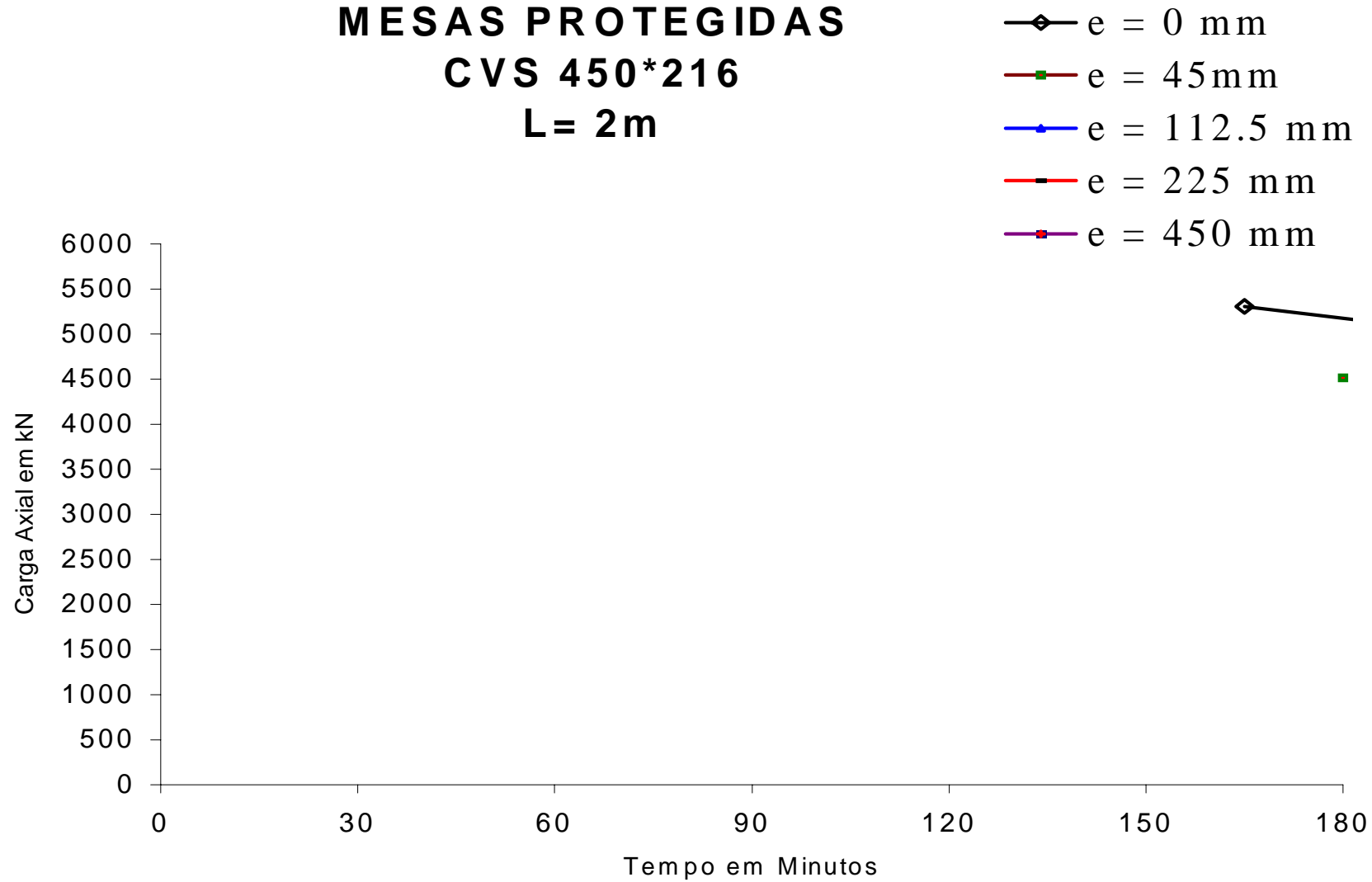


Figura 5.25 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 2 m.

MESAS PROTEGIDAS
CVS 450*216
L= 4 m

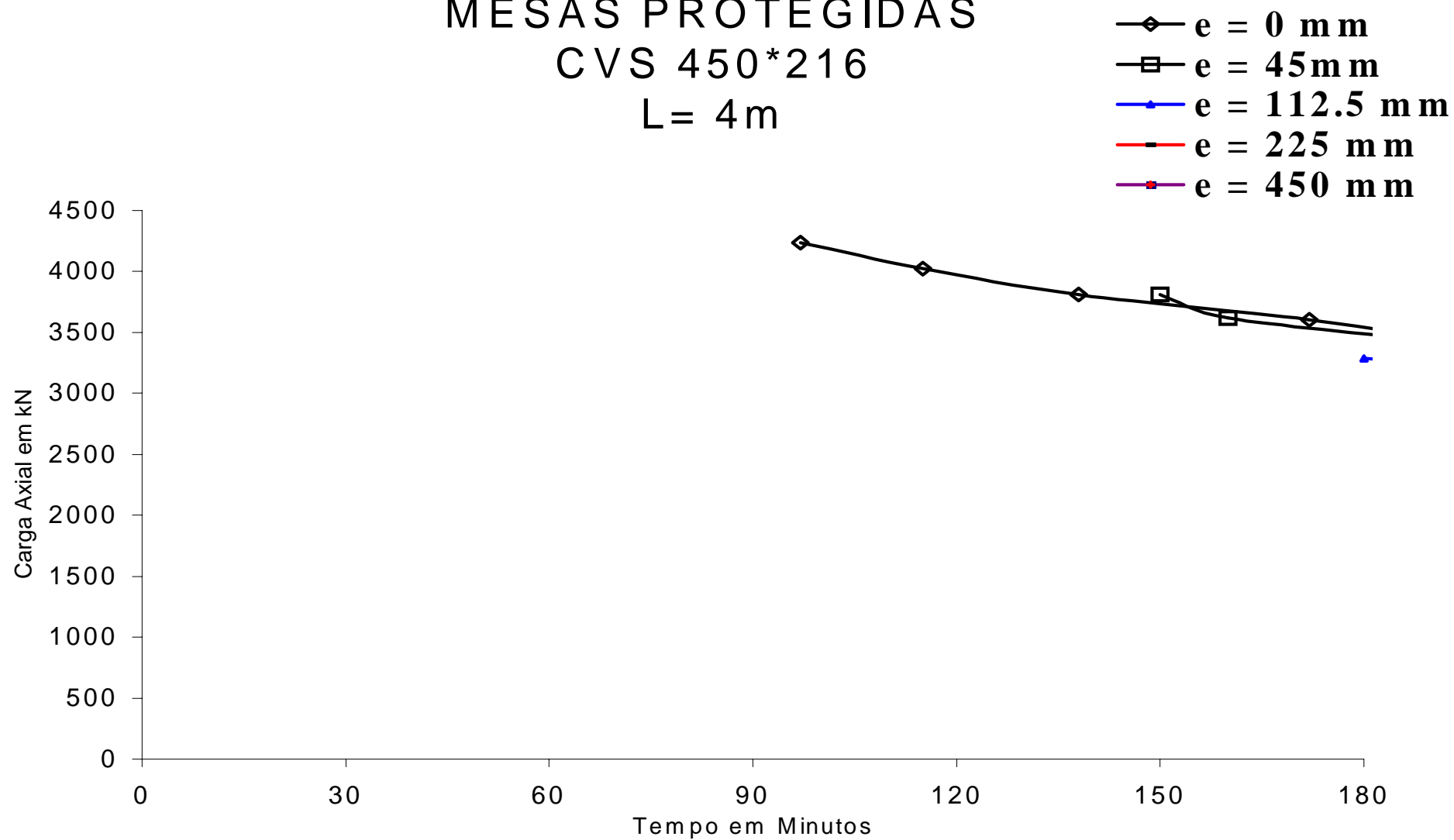


Figura 5.26 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 4 m.

MESAS PROTEGIDAS **CVS 450*216** **L= 6m**

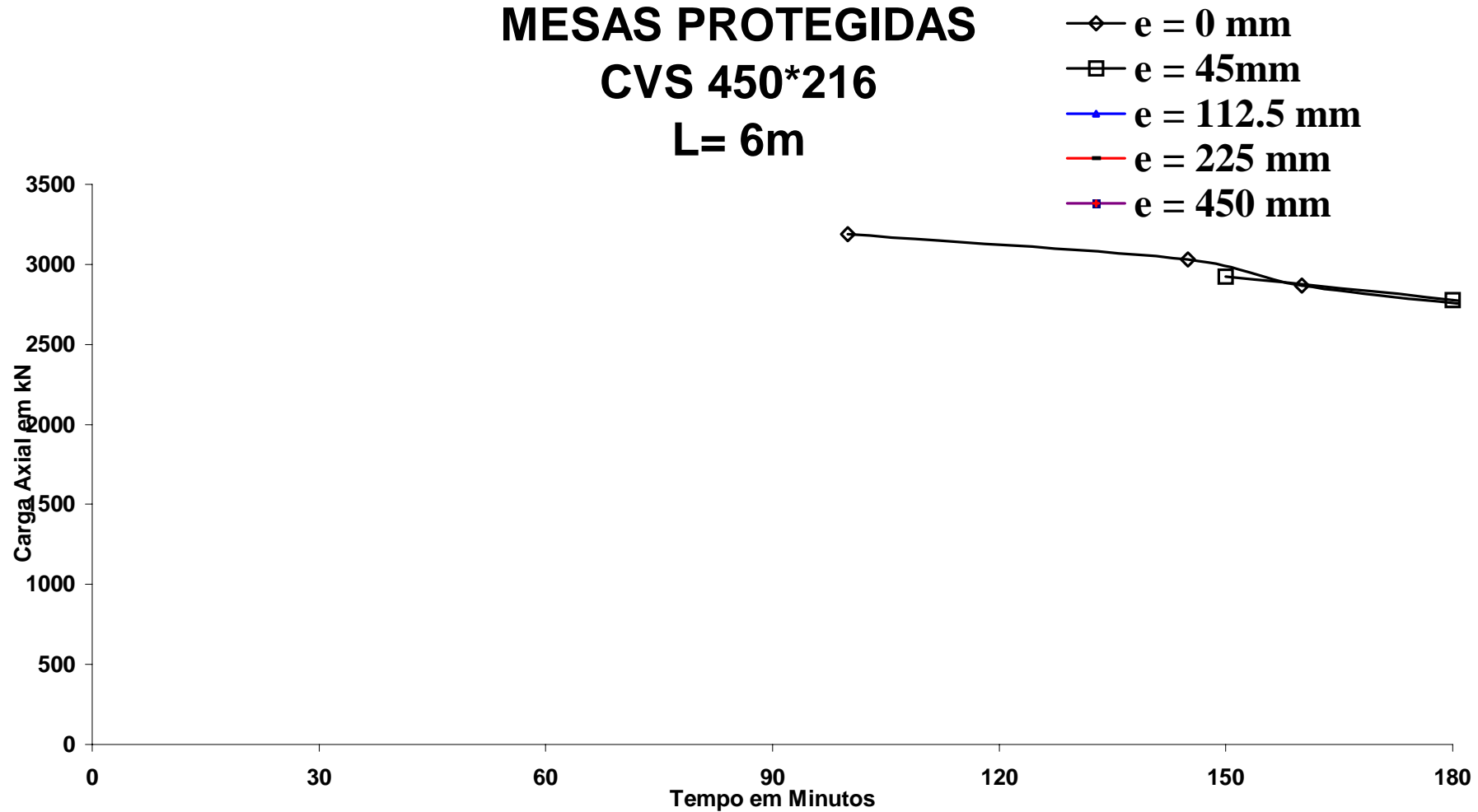


Figura 5.27 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 6 m.

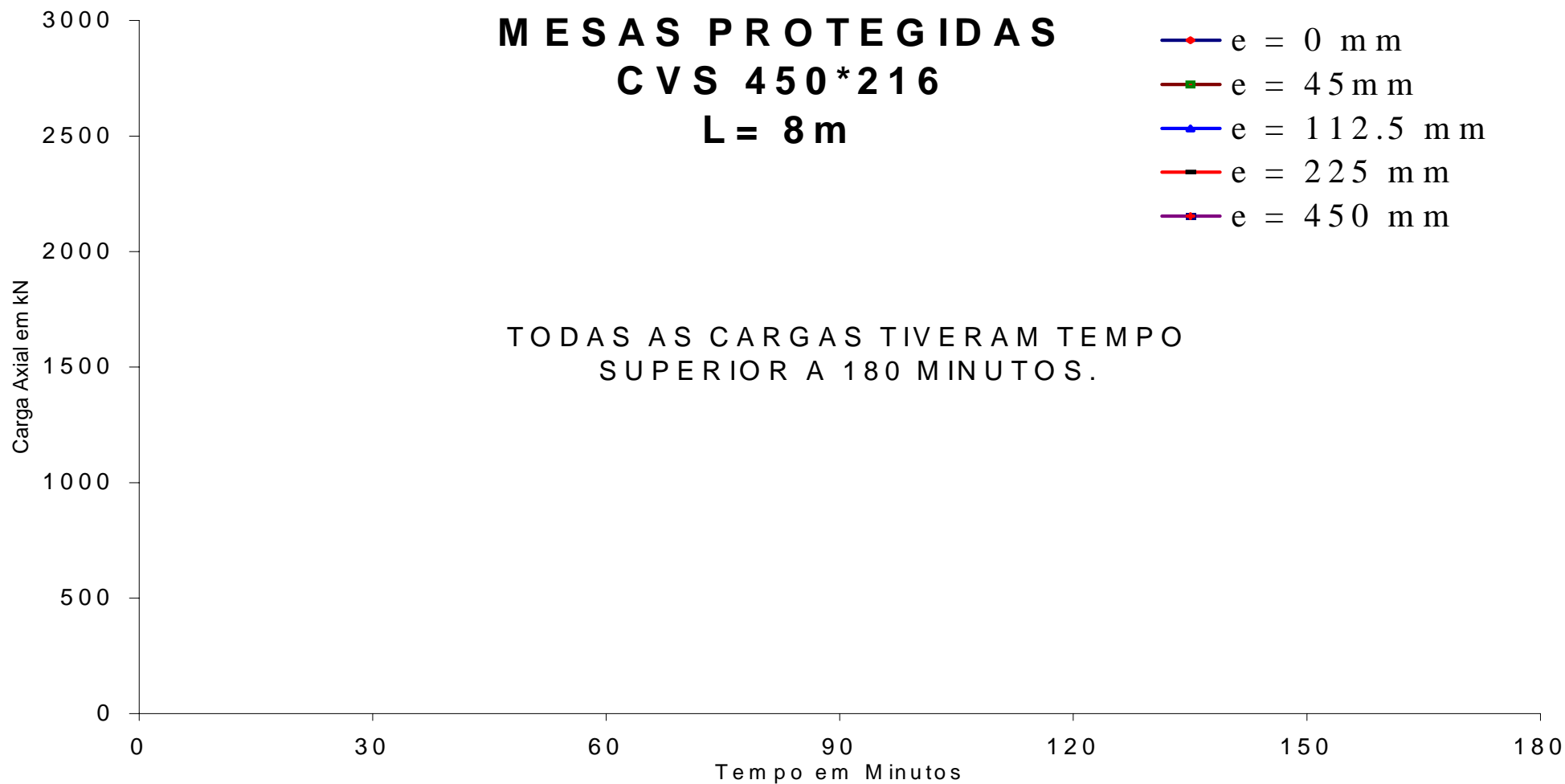


Figura 5.28 - Curvas de resistência, para perfil CVS 450 x 216 com proteção e comprimento 8 m.

Figura 4.23 -

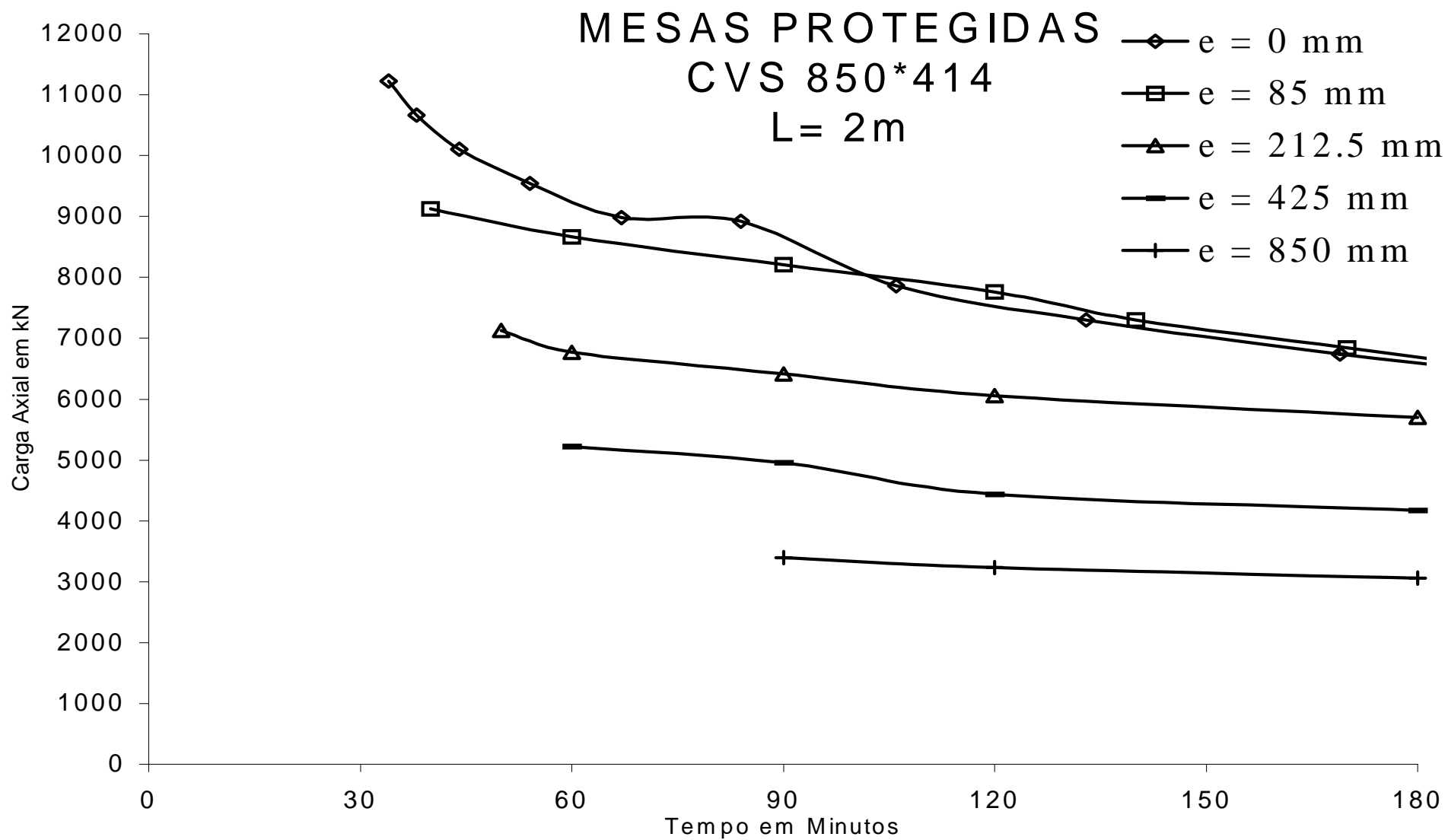


Figura 5.29 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 2 m.

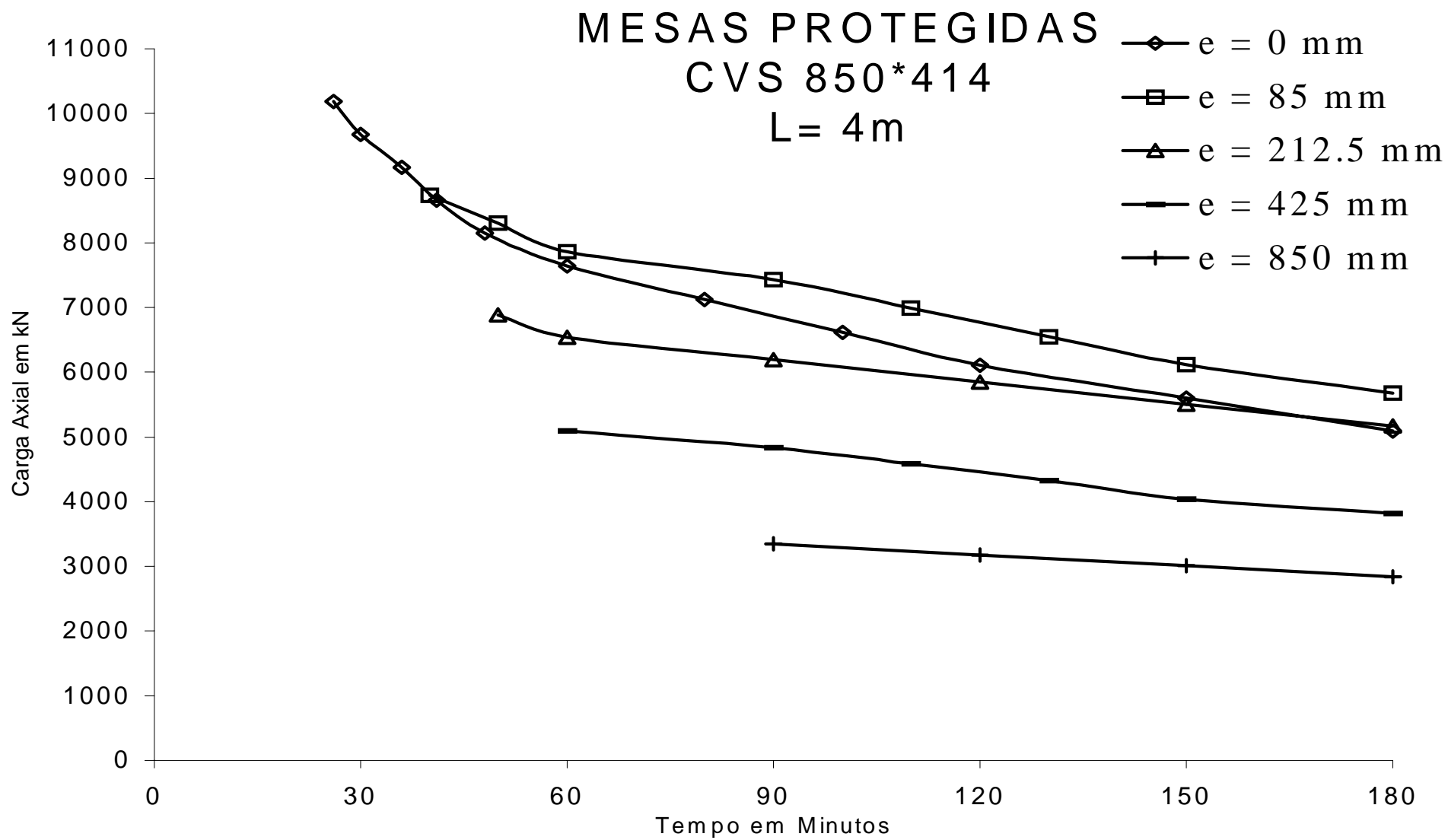


Figura 5.30 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 4 m.

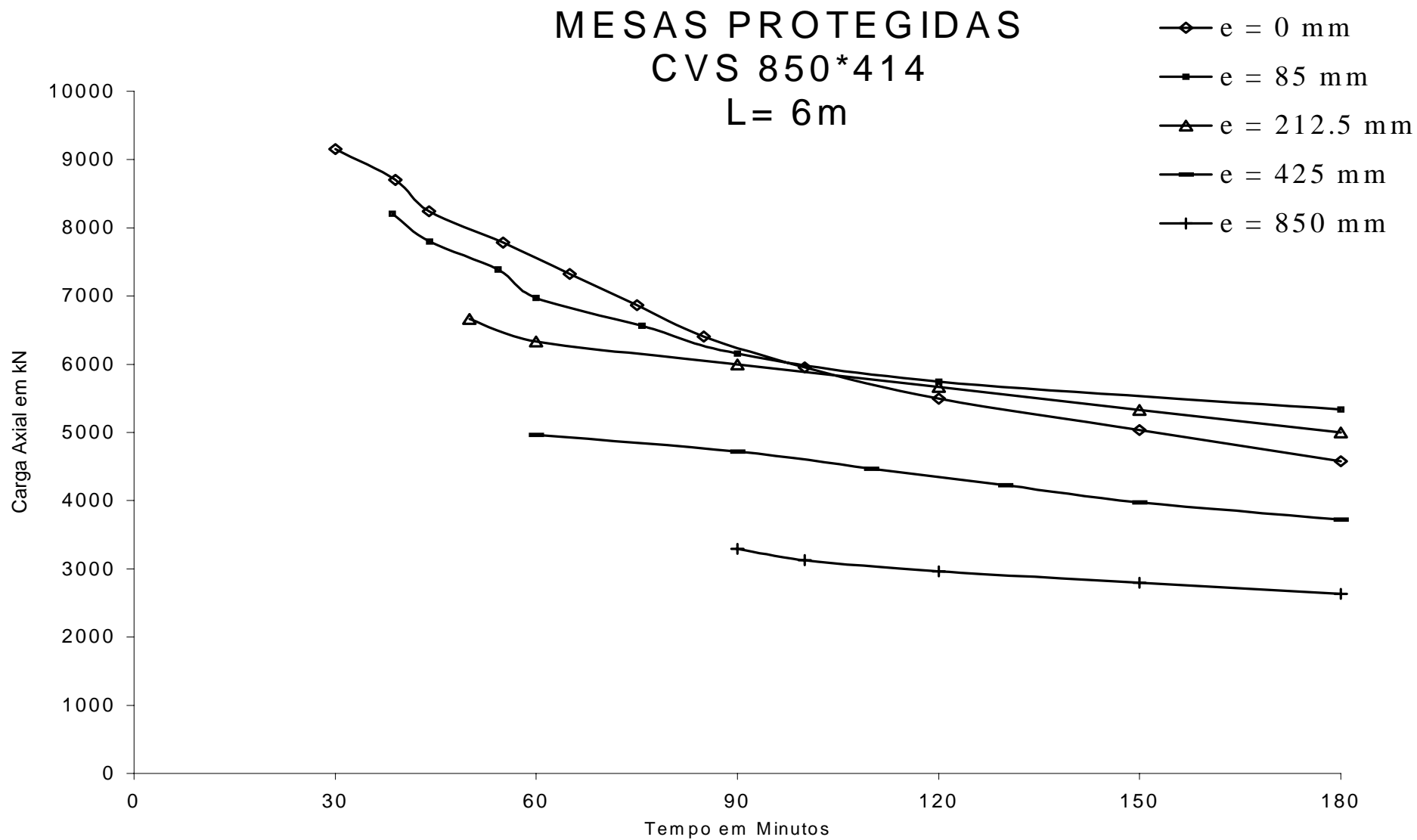


Figura 5.31 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 6 m.

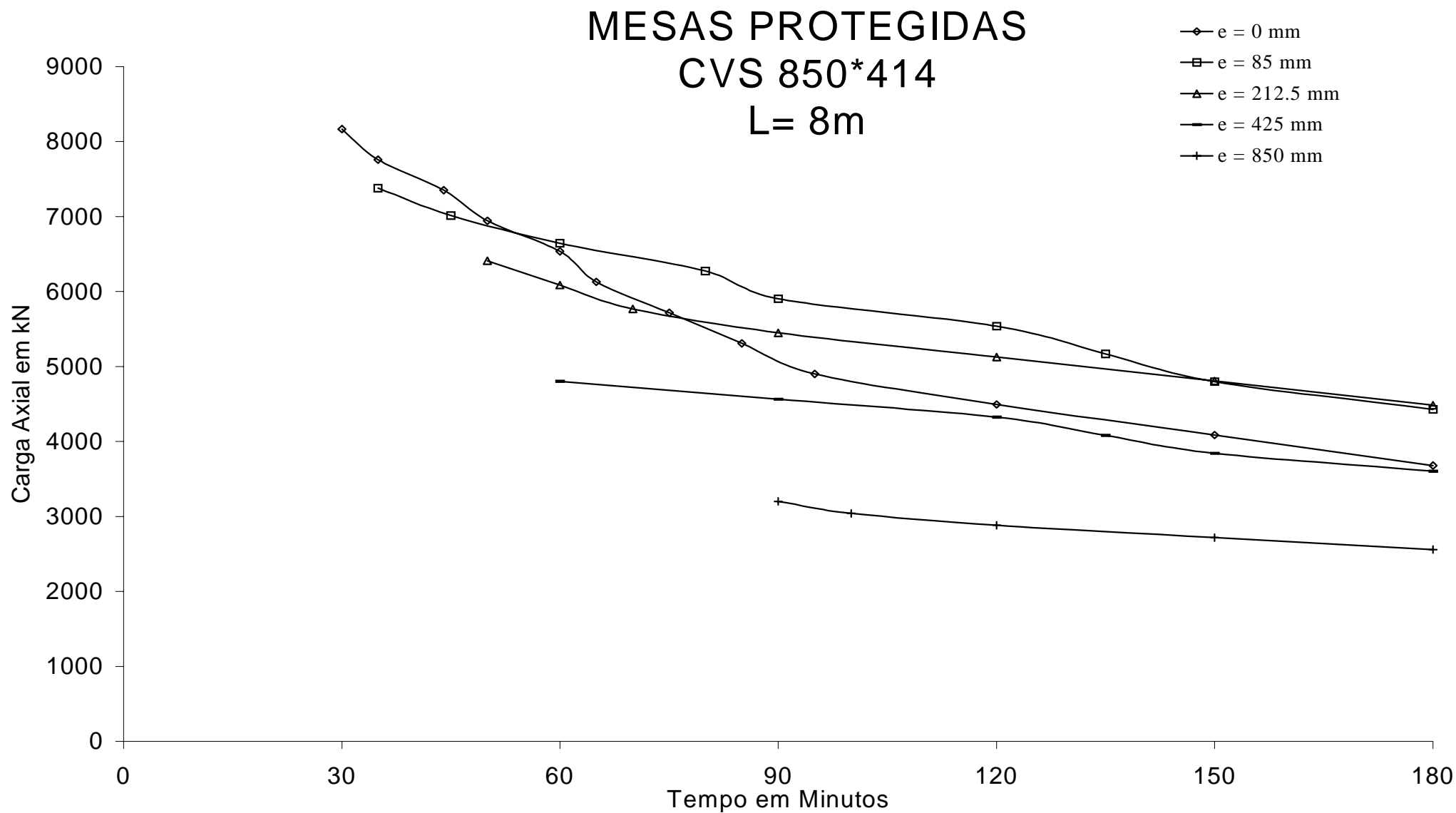


Figura 5.32 - Curvas de resistência, para perfil CVS 850 x 414 com proteção e comprimento 8 m.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 – CONCLUSÕES

A análise da resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas de aço pelo Método de Elementos Finitos implementado no VULCAN é um processo adequado para simulação computacional do ensaio-padrão, conforme previsto na norma BS 476: Part 20 (BSI, 1987). Em consequência, os estudos paramétricos da resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas de aço conduzem a relações determinantes da temperatura crítica que potencialmente podem ser empregadas em prescrições normativas, dependendo apenas da realização de um determinado número de testes experimentais.

O exame exaustivo das temperaturas críticas de barras flexo-comprimidas de aço sem proteção passiva, em geral, conduziu a temperaturas entre 390 °C e 640 °C, dependendo da razão de carga e das condições de vínculo das extremidades da barra. Estes valores, concordando com dados da literatura técnica, SCHLEICH *et al.* (1991), são relativamente baixos o que conduz à regra de proteção das barras flexo-comprimidas nas estruturas de aço de edifícios. Na situação de dimensionamento à temperatura ambiente utilizada nessa pesquisa, as barras flexo-comprimidas suportam uma carga axial máxima e o momento correspondente à excentricidade normativa decorrente da imperfeição geométrica. Logo, as peças praticamente não apresentam reserva de resistência para que, na situação de incêndio, a temperatura crítica seja mais elevada.

Os fatores adimensionais em função dos quais foram obtidas equações para o cálculo das temperaturas críticas são distintos para flexão em torno do eixo de maior inércia e para flexão em torno do eixo de menor inércia. Em ambos, figuram a esbeltez das barras flexo-comprimidas e a relação entre a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade, mas a relação entre as tensões máximas devidas à carga axial e ao

momento fletor que entra na composição do parâmetro adimensional para flexão em torno do eixo de maior inércia, aparece invertida no caso da flexão em torno do eixo de menor inércia. De todo modo, os coeficientes de correlação das regressões lineares feitas são todos maiores que 90%, indicando uma forte dependência linear entre a temperatura crítica e os correspondentes parâmetros adimensionais.

A pesquisa de curvas de resistência ao fogo para um conjunto de perfis I determinados mostrou-se viável com o emprego do VULCAN. Trata-se de uma ferramenta que pode ser útil na prática da construção metálica em que, para determinadas faixas de altura, os edifícios de andares múltiplos urbanos tendem a utilizar perfis estruturais de determinados padrões dimensionais. No caso presente, as curvas de resistência ao fogo fornecem diretamente o tempo de resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas de aço em função da carga axial que se lhe deseja aplicar, dados o comprimento da barra e a excentricidade.

Observando-se o padrão das curvas de resistência ao fogo para as barras flexo-comprimidas de aço sem proteção, curvas de resistência ao fogo de projeto foram propostas para perfis específicos em que o tempo de resistência ao fogo pode ser determinado diretamente em função da razão de carga e da excentricidade. Nota-se que, para razões de baixas carga (da ordem de 0,3), dependendo do comprimento da barra e da excentricidade da carga axial, tempos de resistência ao fogo de 30 minutos são encontrados, podendo chegar a 60 minutos, quando a razão de carga é da ordem de 0,1 e a excentricidade acidental é nula.

Em geral, as curvas de resistência ao fogo confirmam baixas temperaturas críticas para as barras flexo-comprimidas sem proteção. Entretanto, os casos examinados nessa pesquisa indicam que o potencial de aplicabilidade prática das curvas de resistência ao fogo de projeto é elevado, podendo cada fabricante de estruturas vir a ter as curvas correspondentes a seus perfis mais consumidos como um fator de impulsão do mercado.

A investigação conduzida no domínio da proteção parcial de barras flexo-comprimidas de aço permitiu concluir imediatamente que a proteção da parte central das barras tem um resultado inexpressivo na elevação da temperatura crítica. Nesse caso, a investigação focalizou a proteção da alma e a proteção das mesas como duas alternativas distintas. Resolveu-se introduzir as grandezas " γ_{60} " e " γ_{120} " como novas características dos perfis de aço as quais correspondem às razões de carga máximas para resultar em resistências ao fogo de 60 min e 120 min.

Essa estratégia metodológica é potencialmente útil no projeto de resistência ao fogo, porque permite formular conclusões do tipo: o perfil CVS 450 x 216, tendo a alma protegida e solicitado por carga axial e momentos fletores de diagrama retangular, para comprimentos entre 2m e 8m e relação de excentricidade $e/d \leq 1,0$, apresenta um γ_{60} mínimo igual a 0,80. Isto é, para razões de carga de no máximo 0,80, pode-se admitir tal perfil com tempo de resistência ao fogo mínimo de 60 minutos.

Tanto a proteção da alma do perfil quanto a proteção das mesas parecem ser igualmente eficientes em resultar a resistência ao fogo de barras flexo-comprimidas de aço, dependendo apenas da grandeza das tensões geradas por momentos em relação aquelas geradas pela carga axial: quando predominam as tensões de flexão, a proteção das mesas é mais eficiente; quando predominam as tensões axiais, a proteção da alma torna-se mais eficiente.

6.2 – SUGESTÕES

A validade do presente estudo é condicionada à realização de experimentos que, nesse caso, podem ser com peças isoladas e com o emprego do incêndio padrão. Por outro lado, aprofundar a investigação computacional no sentido de ampliar o conjunto dos perfis examinados, a variedade dos carregamentos e das condições de extremidade é também uma atividade necessária para continuação dessa pesquisa.

Pesquisas intensivas podem ser feitas com os perfis mais usuais de modo a obter curvas de resistência ao fogo de projeto que sejam liberadas para emprego em escritórios de cálculo. Nesse caso, a investigação deve uma determinação estatística das grandezas " γ_{60} " e " γ_{120} " sobre um universo de experimentos numéricos de amplitude adequada.

Um estudo que também se sugere é o da economicidade da proteção parcial aqui investigada em relação aos métodos convencionais de proteção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, E. C. **Elementos de Aço Flexo-Comprimidos** 1992. 544f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos 1992.

ARAUJO, E. C. **Elementos de Aço I**. Notas de aula do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, DECIV, Escola de Minas –UFOP, Ouro Preto, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: **Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14323: **Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: **Exigências de Resistência ao fogo de Elementos Construtivos de Edificações - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2000.

BAILEY, C. G. **Simulation of the Structural Behaviour of Steel-Framed Buildings in Fire**. 1995. 247f. Ph.D Thesis – Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, Sheffield.

BAILEY, C. G.; BURGESS, I. W.; PLANK, R. J. Computer simulation of a full-scale structural fire test. **The Structural Engineer**, v. 74, n6, p. 93-100, 1996.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 476: Fire tests on buildings materials and structures. Part 20: Method of determination of fire resistance of elements of construction** (general principles). London, 1987.

BURGESS, I. W.; EL-RIMAWI, J.; PLANK, R. J. Studies of the behaviour of steel beams in fire. **J. of Constr. Steel Research**, v. 19, p. 285-312, 1991.

BURGESS, I. W.; PLANK, R. J. **Steel Frame Analysis in Fire**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL “O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL”, 2., 1999, Belo Horizonte. Anais...[CD-ROM]. Belo Horizonte: Sociedade Mineira de Engenheiros/AMICEM, 1999. 44f.

CLARET, A. M. **Resistência ao Fogo de Vigas Mistas Aço-Concreto Modeladas Pelo Método de Elementos Finitos**. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000, Punta Del Este, Uruguai. Anais... [CD-ROM]. Punta Del Este: IET/FIUR/ASAIE, 2000. 11f.

CLARET, A. M. **Resistência ao Fogo de Estruturas: Alternativas Técnicas para a Redução do Custo da Proteção Passiva**. 2000. 37f. Relatório Interno L01/2000. Departamento de Engenharia Civil,. Escola de Minas, UFOP.

CLARET, A. M. **Segurança Contra Incêndio de Edificações Estruturadas em Aço**. 1998. Apostila . Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP.

CLARET, A. M; SILVA, J. G. A. **Introdução à Engenharia de Incêndio**. 2000. Apostila – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP.

CLARET, A. M.; BURGESS, I.W.; PLANK, R. J. **Studies of the Behaviour of Welded Steel Beams in Fire**. 1999. 80 f. Research Report DCSE/99/F/5. Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, Sheffield.

CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Especificações para Instalação de Proteção Contra Incêndio**. Decreto nº. 38.069/93. CB-SP. São Paulo, 1993, SP.

COSTA, I. A. **Estudo Paramétrico da Resistência ao Fogo de Vigas Mistas Aço-Concreto** 2001. 93f. Dissertação(Mestrado em Construção Metálica) – Departamento de Engenharia Civil – Escola de Minas- UFOP, Ouro preto 2001.

COSTA, I. A. CLARET, A. M., RIBEIRO, L. F. L **Estudo Paramétrico da Resistência ao Fogo de Vigas Mistas Aço-Concreto** “O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL”, 4., 2001, São Paulo...[CD-ROM],. 15f.

FAKURY, R. H. **Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio**. 1999. 109f. Apostila . Departamento de Engenharia de Estruturas, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 1999.

HUANG, Z.; BURGESS, I. W.; PLANK, R. J. Nonlinear analysis of reinforced concrete slabs subjected to fire. **ACI Structures Journal**, v. 96, n1, p 273-293, 1999.

PLANK, R. J. **Fire Engineering of Steel Structures**. Cadernos Técnicos de Construção Metálica CTCM –01/96. Núcleo de Construção Metálica, UFOP, Ouro Preto. 1996.

PLANK, R. J. BURGESS I. BAILEY C. “**Strategies for Fire Protection of Large Composite Buildings**” “O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL”, 4., 2001, São Paulo...[CD-ROM], . 13f.

RIBEIRO, L. F. L. **Elementos de Aço II**. Notas de aula do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, DECIV, Escola de Minas – UFOP, Ouro Preto, 2000.

SOUZA JR., V. **Análises de Pórticos de Aço Sob Altas Temperaturas**. 1998. 51f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - DECIV, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto.

TIMOSHENKO, S. P. AND GERE “**Mecânica dos Sólidos 1**”, LTC S. A. , Rio de Janeiro, 1992 - RJ.

TIMOSHENKO, S. P. AND GERE. “**Mecânica dos Sólidos 2**”, LTC S. A. , Rio de Janeiro, 1992 - RJ.

BATHE, K. J. “**Finite Element Procedures In Engineering Analysis**”, Prentice-Hall, New Jersey, 1982 - USA.

ANEXOS

ANEXO A

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF RETANGULAR

Perfil CVS 300 x 113 SEM PROTEÇÃO

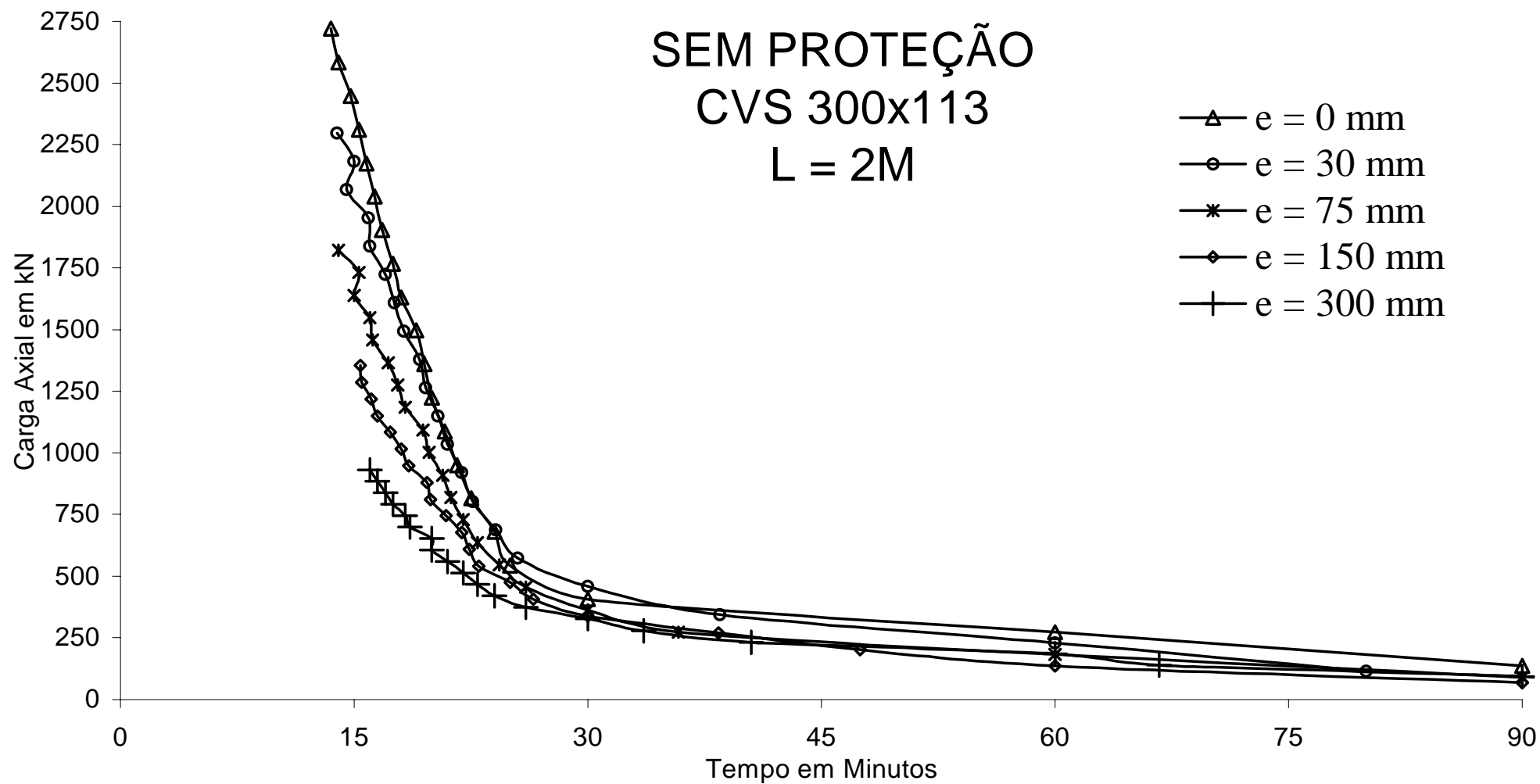


Figura 5.33 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 2m.

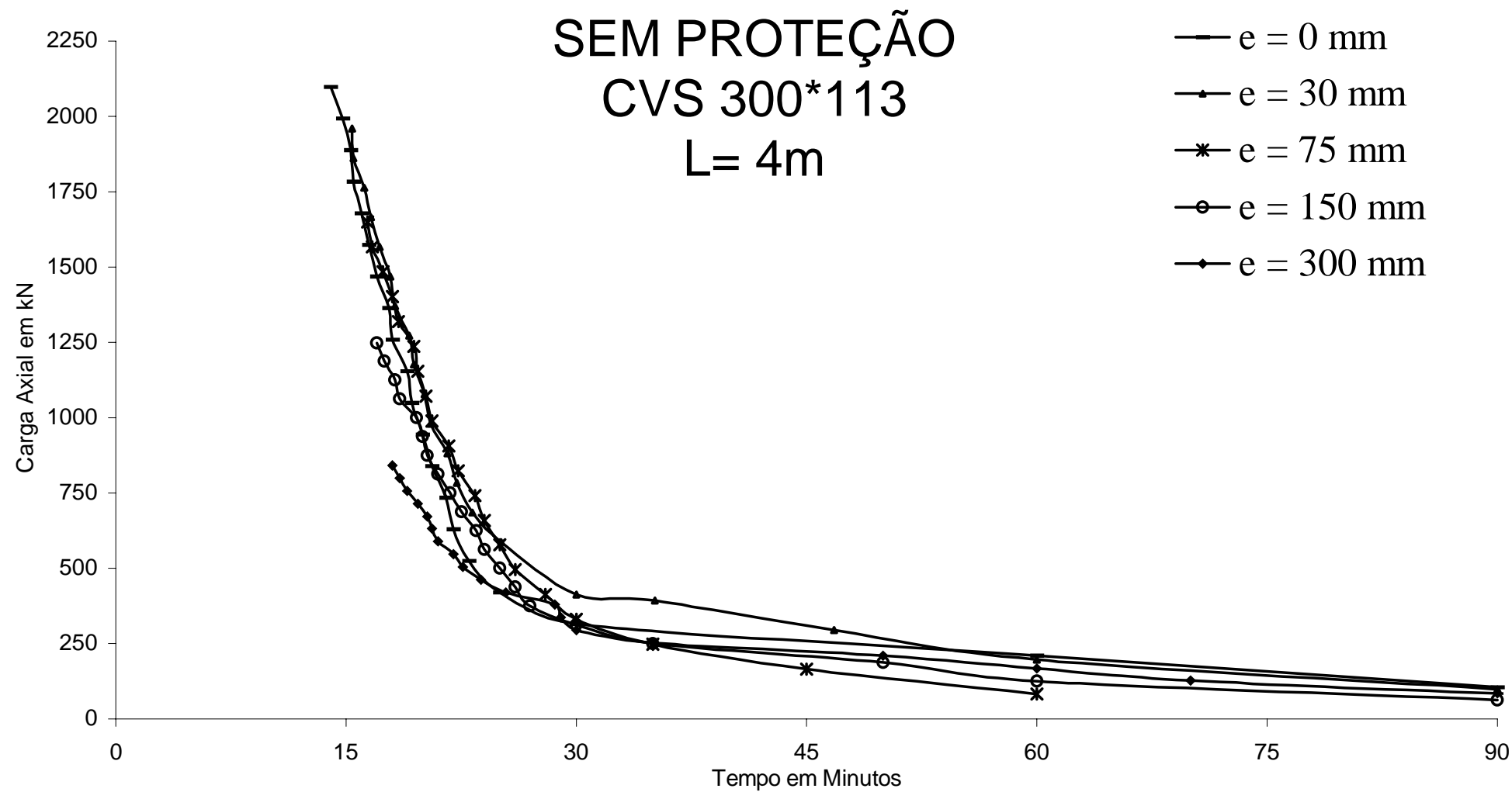


Figura 5.34 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 4m

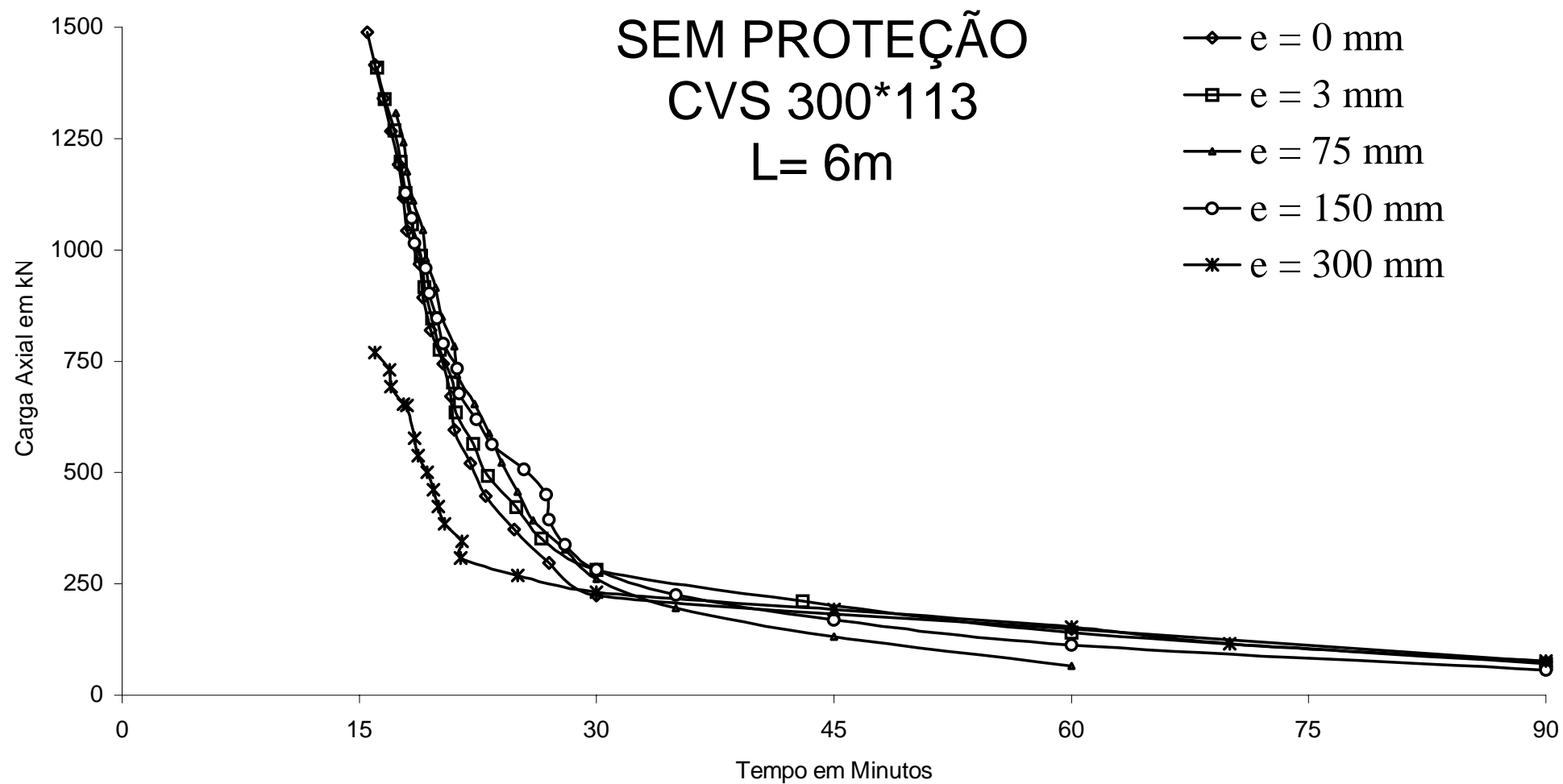


Figura 5.35 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 6 m.

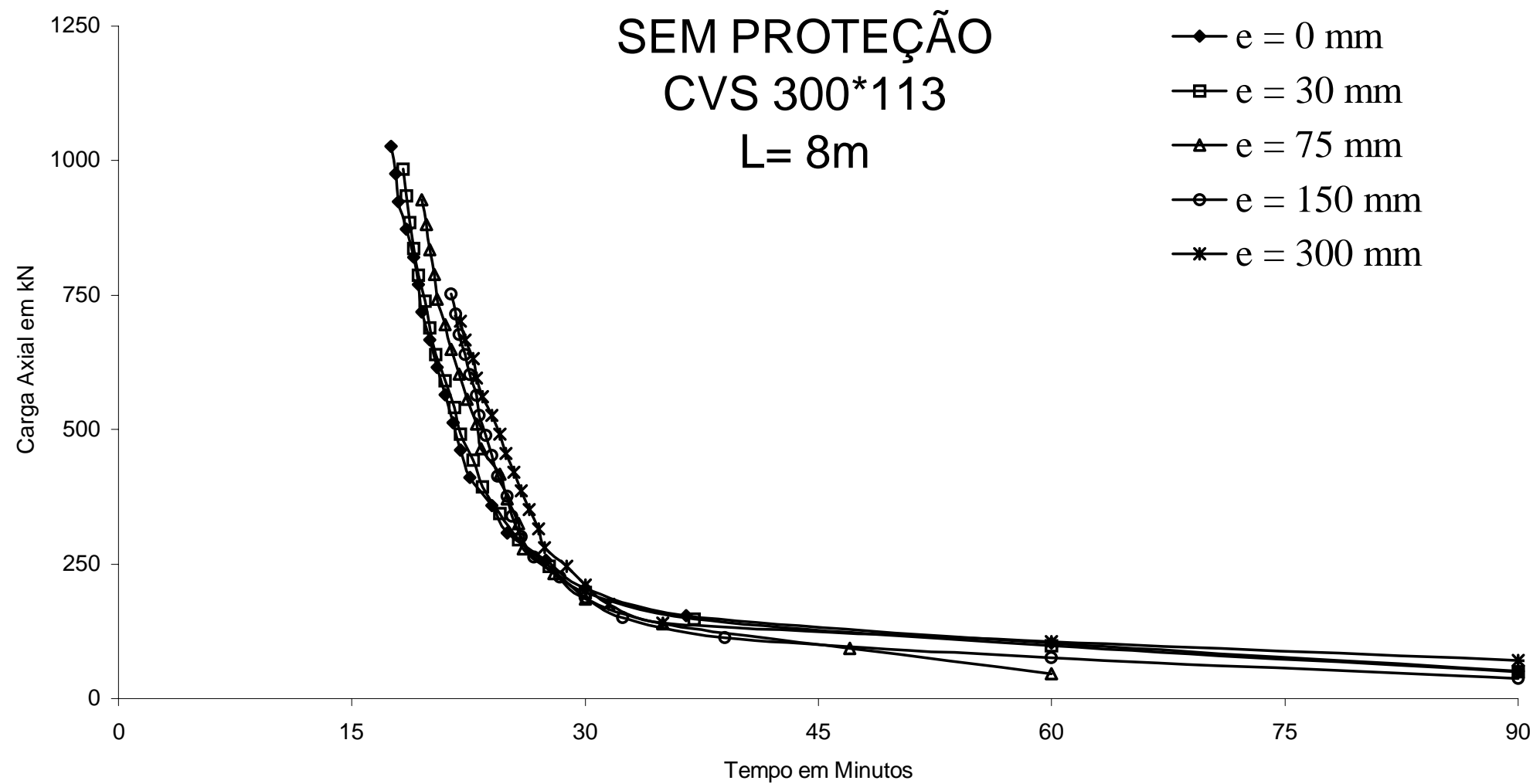


Figura 5.36 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 8 m.

ANEXO B

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF RETANGULAR

Perfil CVS 550 x 184 SEM PROTEÇÃO

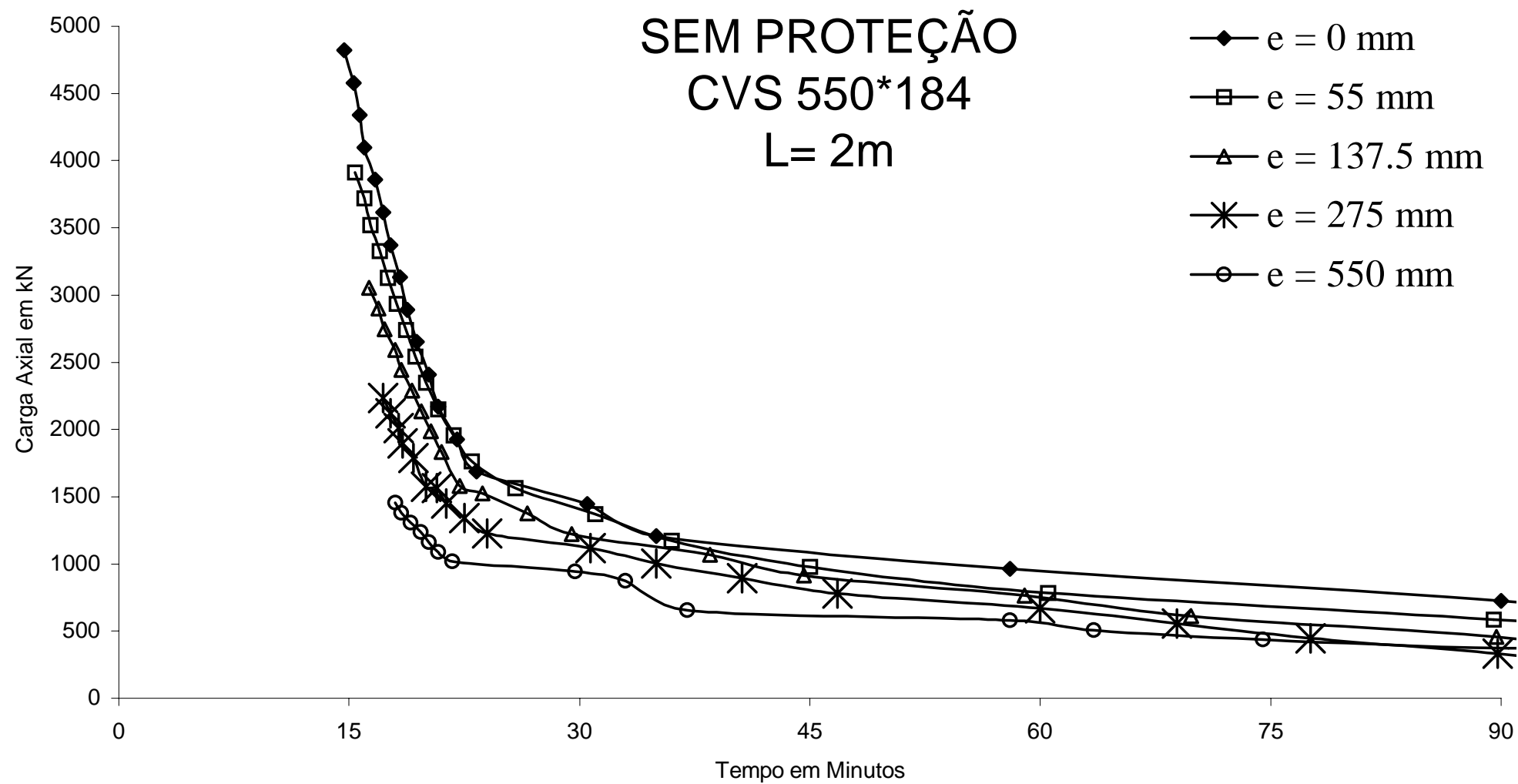


Figura 5.37 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 2 m.

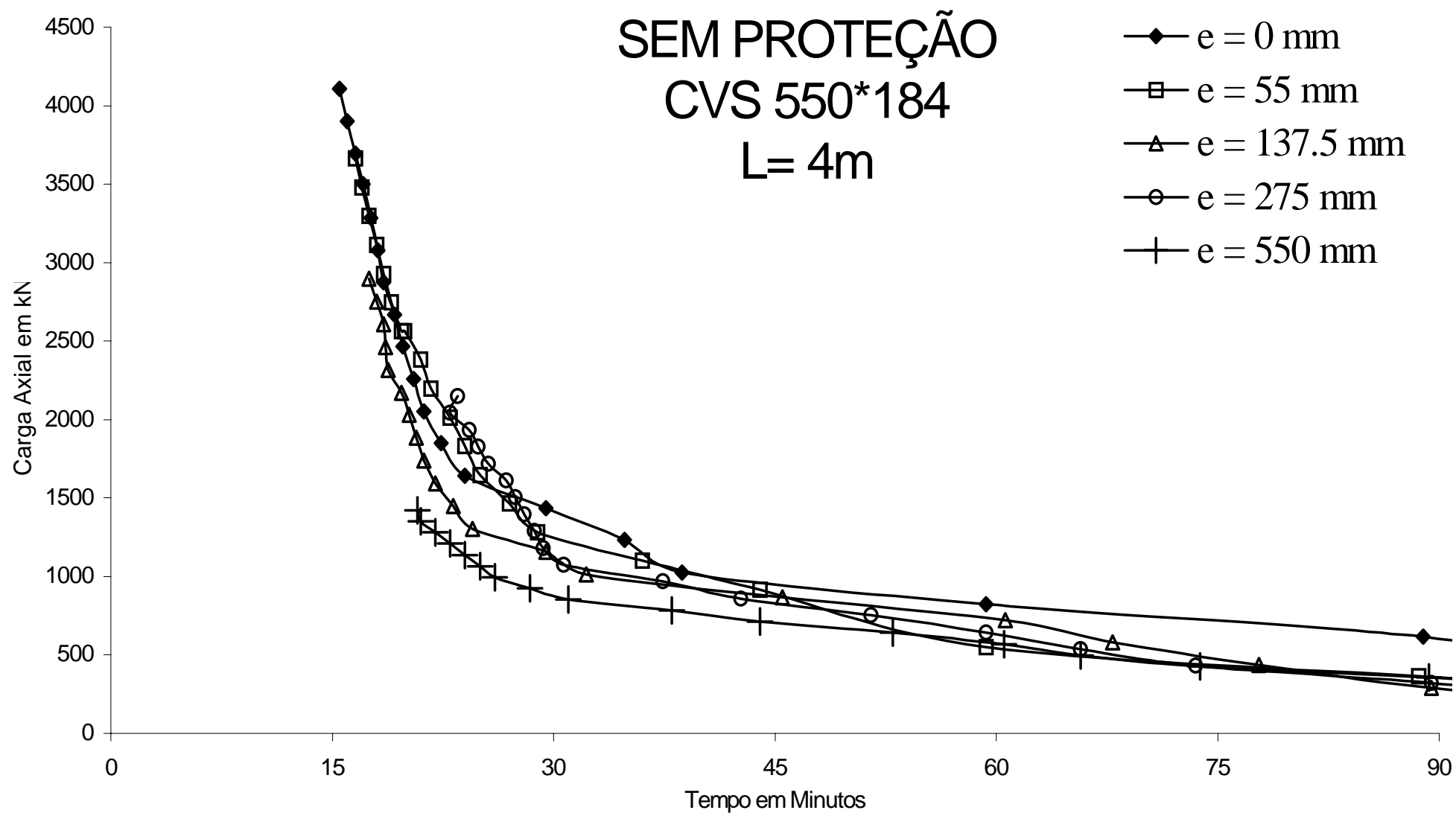


Figura 5.38 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 4 m.

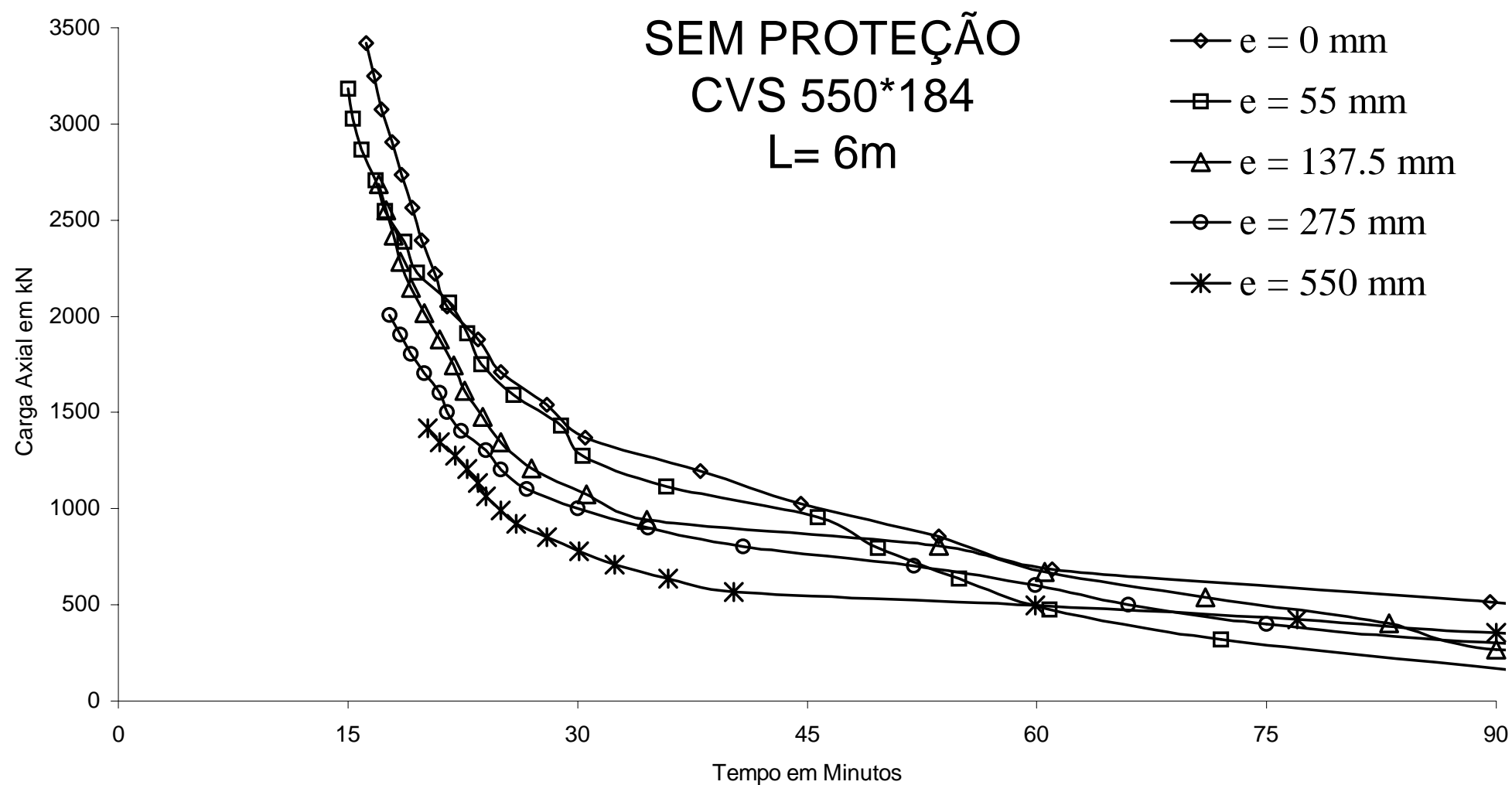


Figura 5.39 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 6 m.

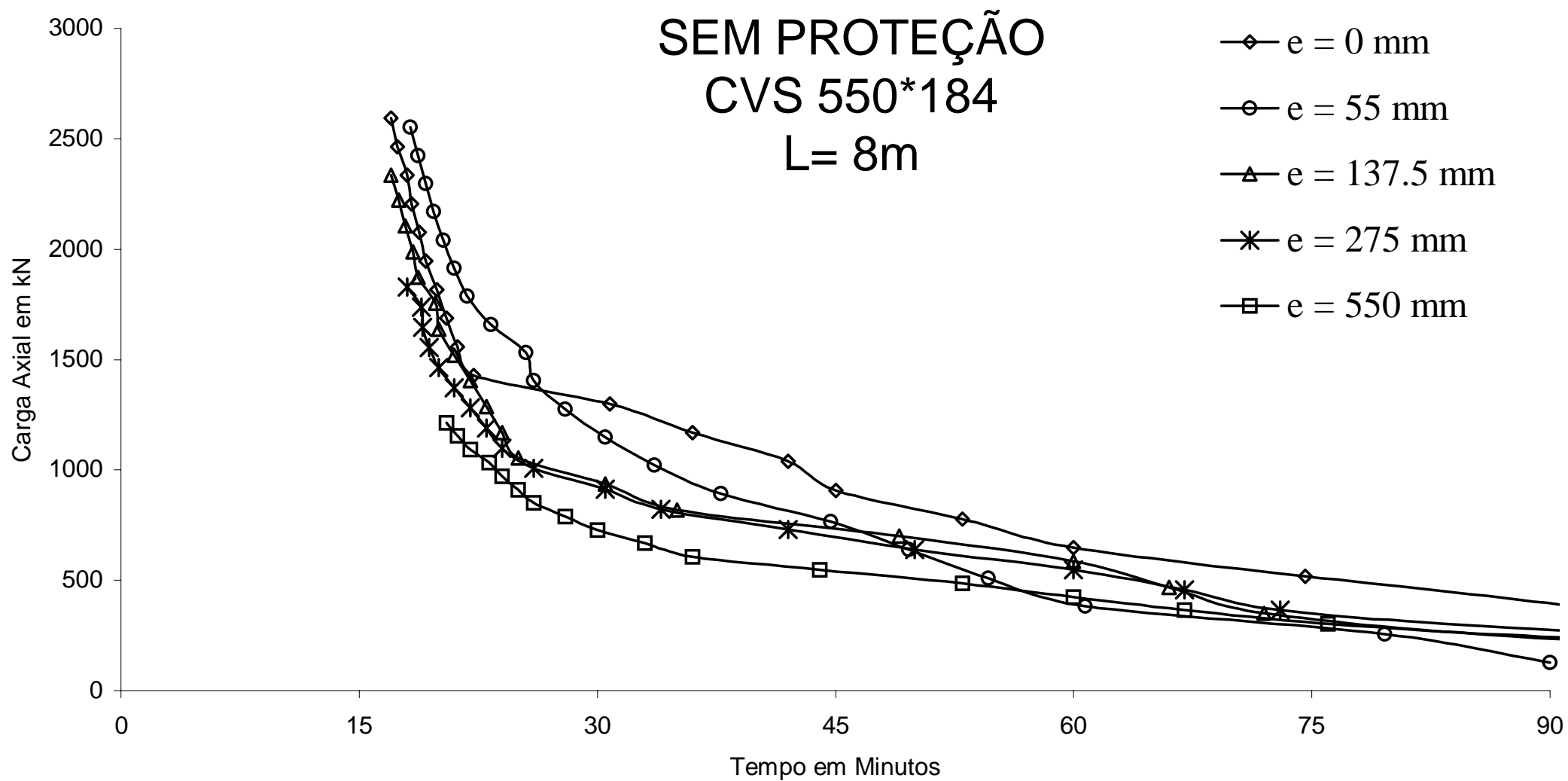


Figura 5.40 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 4 m.

ANEXO C

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF RETANGULAR

Perfil CVS 700 x 342 SEM PROTEÇÃO

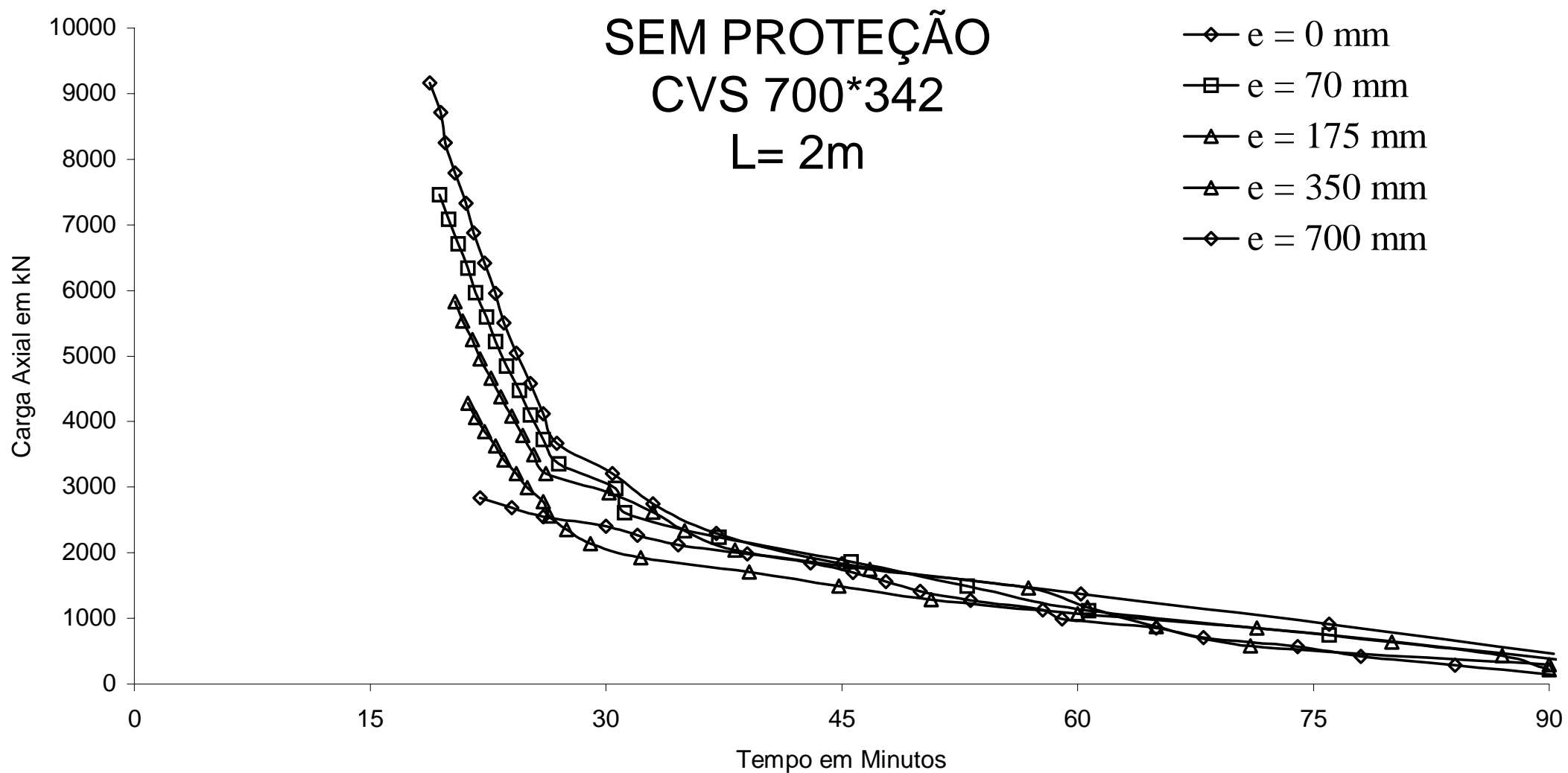


Figura 5.41 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 2 m.

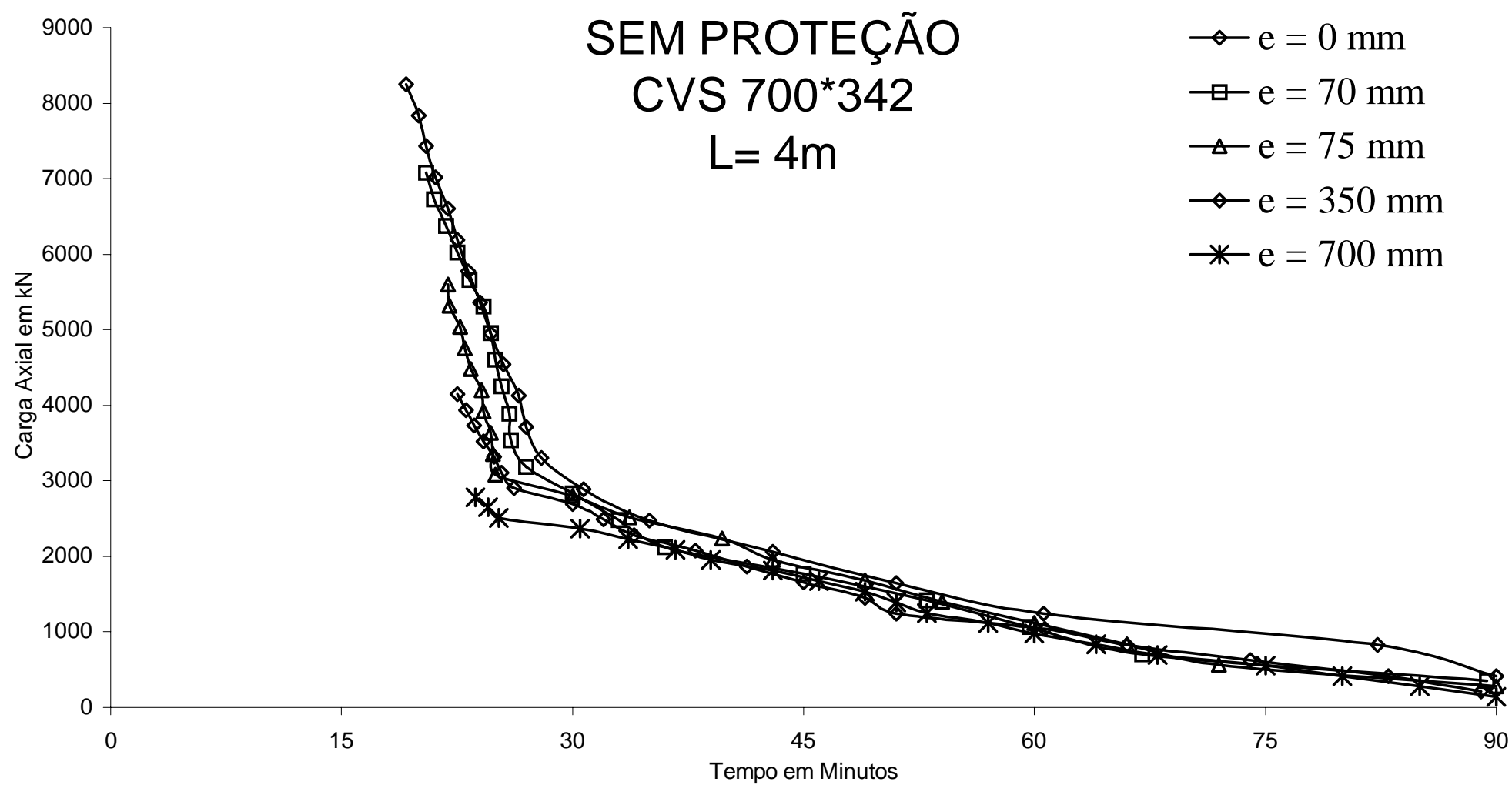


Figura 5.42 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 4 m.

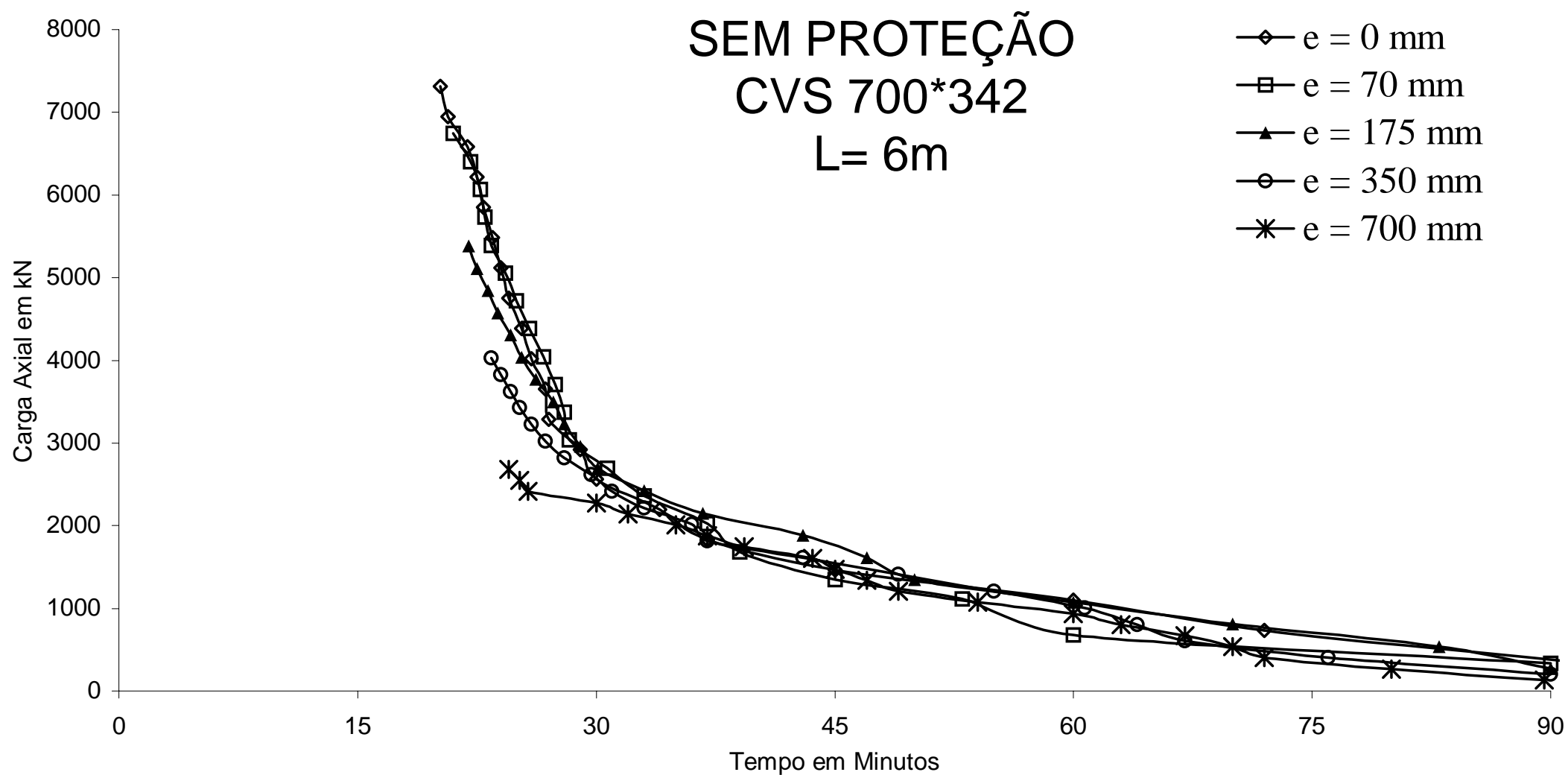


Figura 5.43 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 6 m.

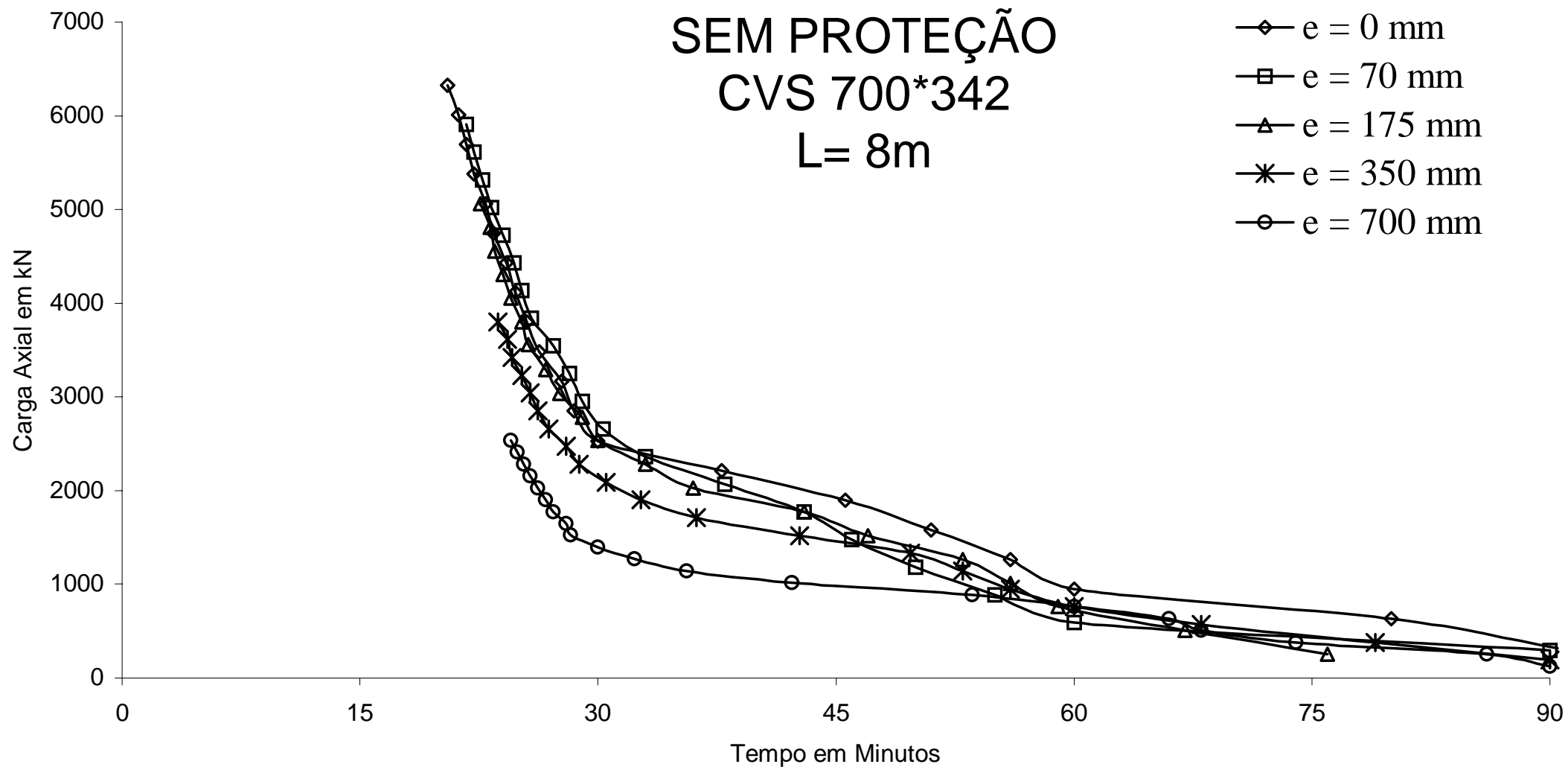


Figura 5.44 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 8 m.

ANEXO D

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF TRIANGULAR

Perfil CVS 300 x 113 SEM PROTEÇÃO

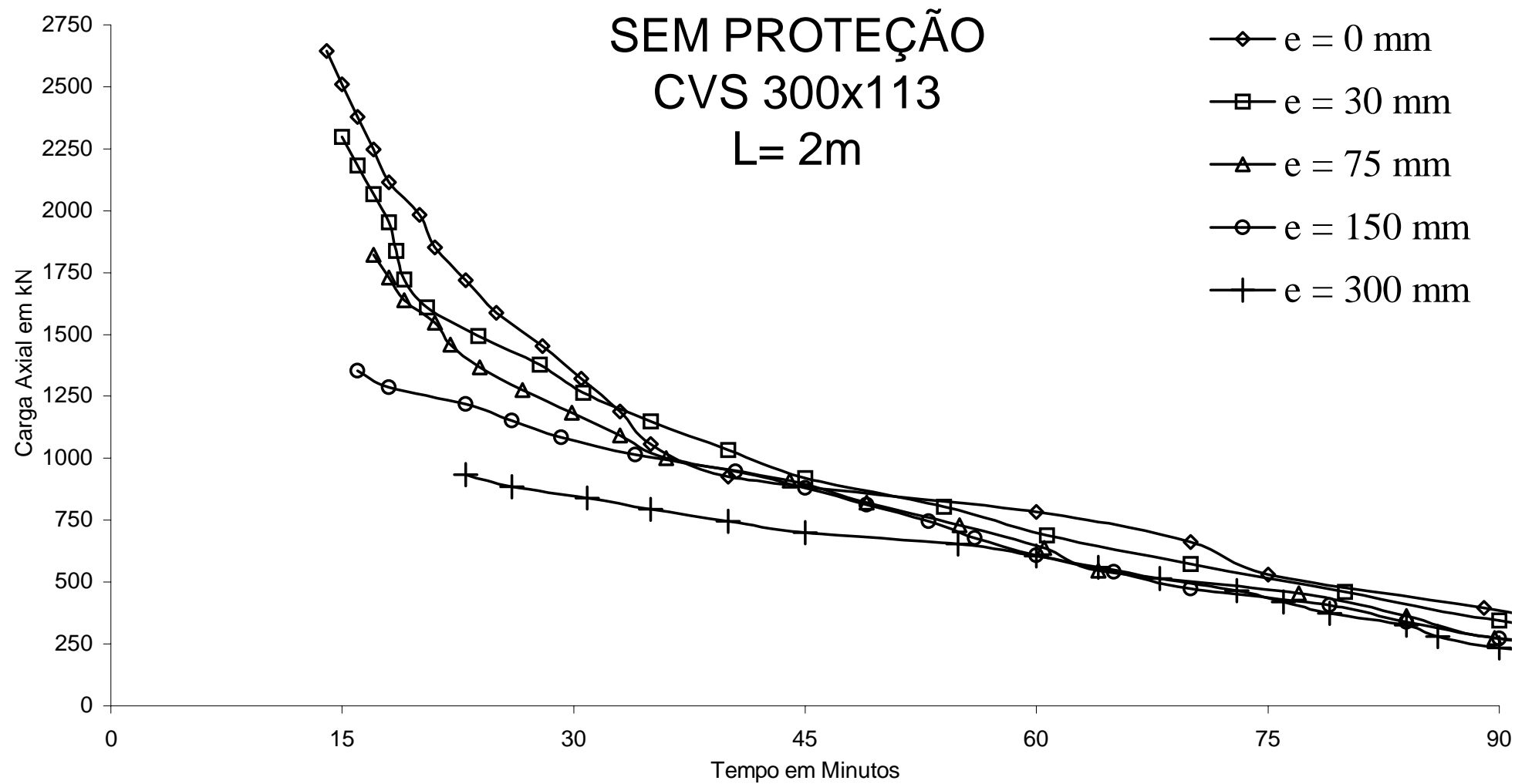


Figura 5.45 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 2 m.

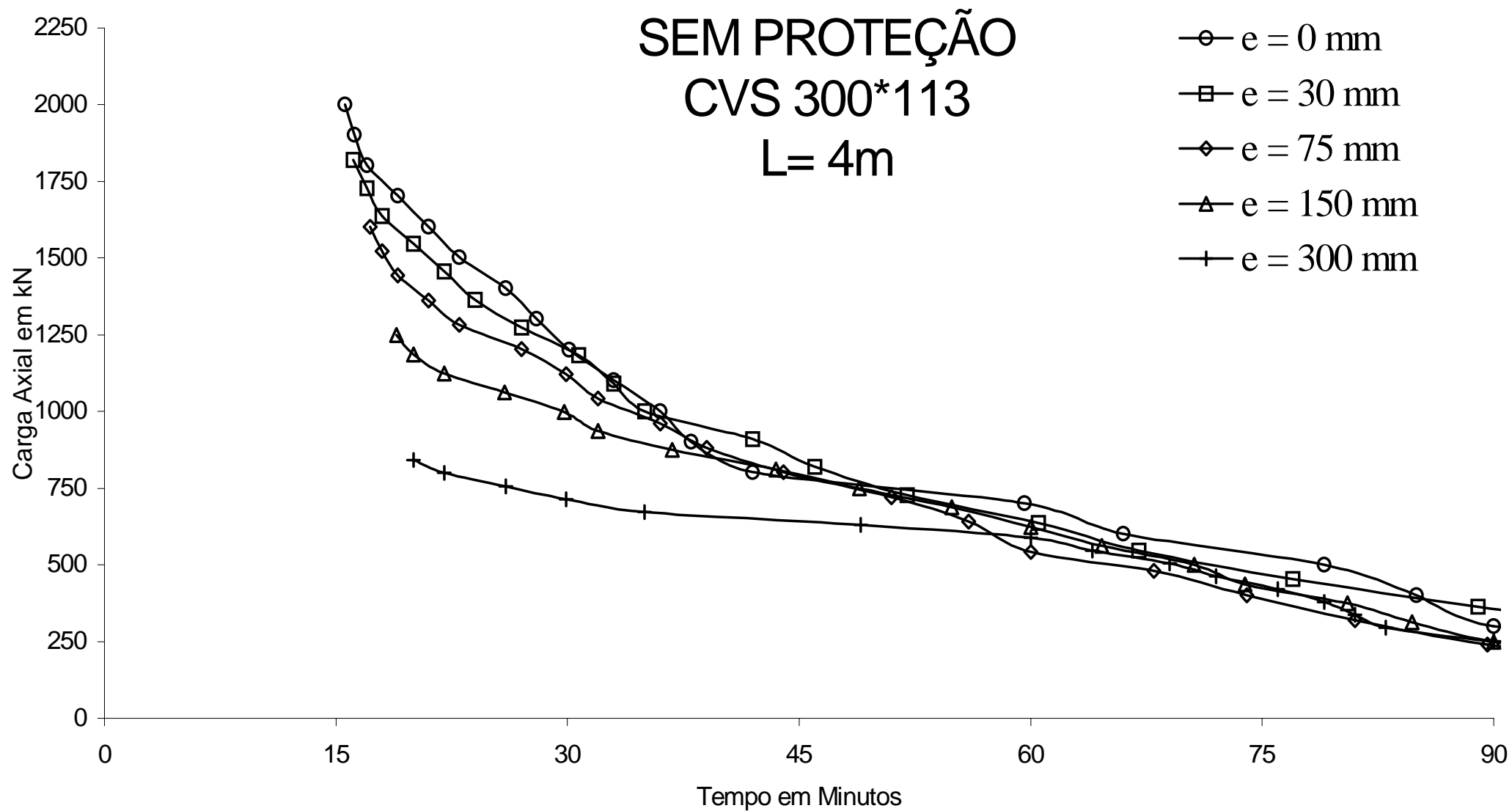


Figura 5.46 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 4 m.

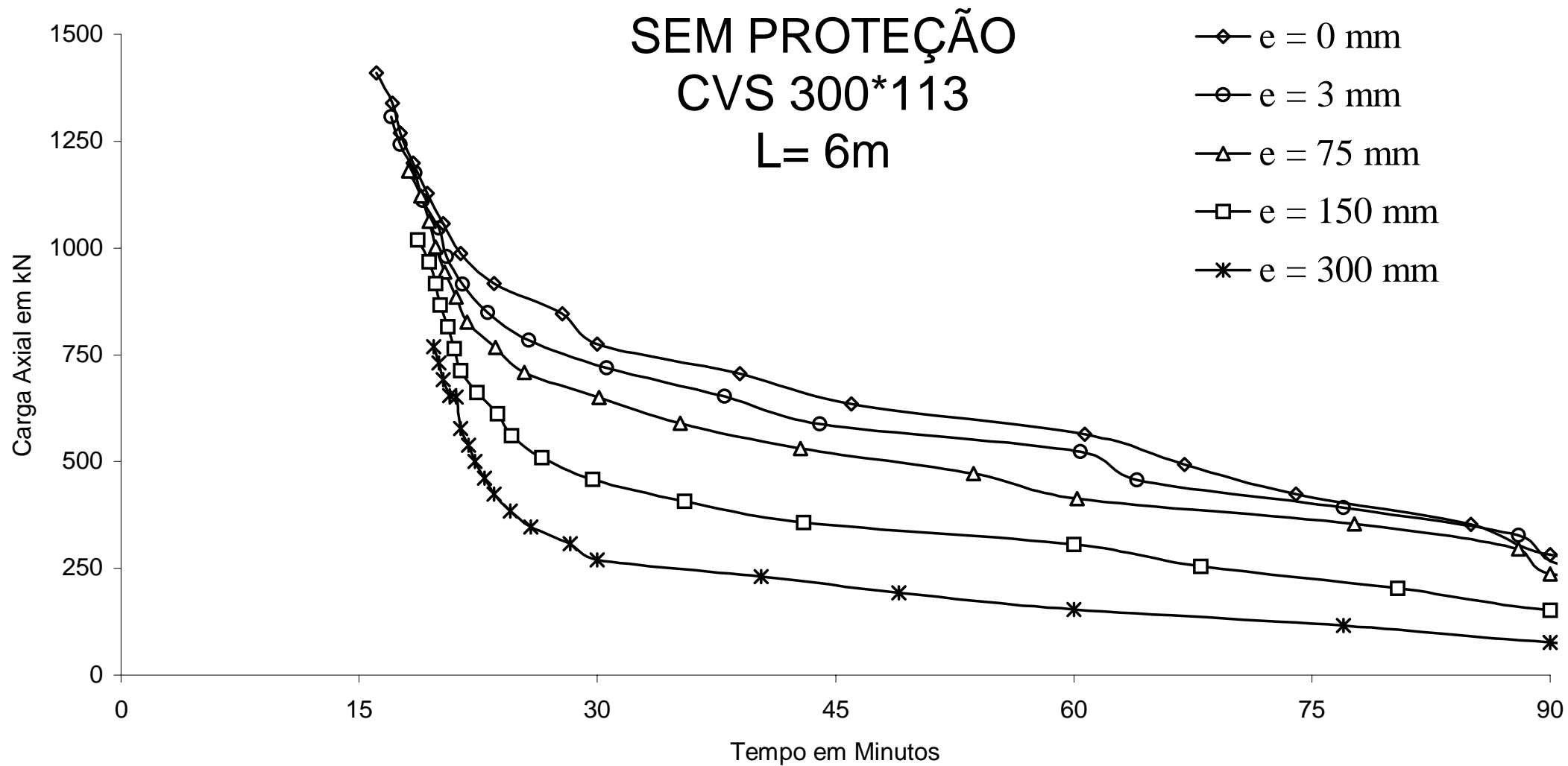


Figura 5.47 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 6 m.

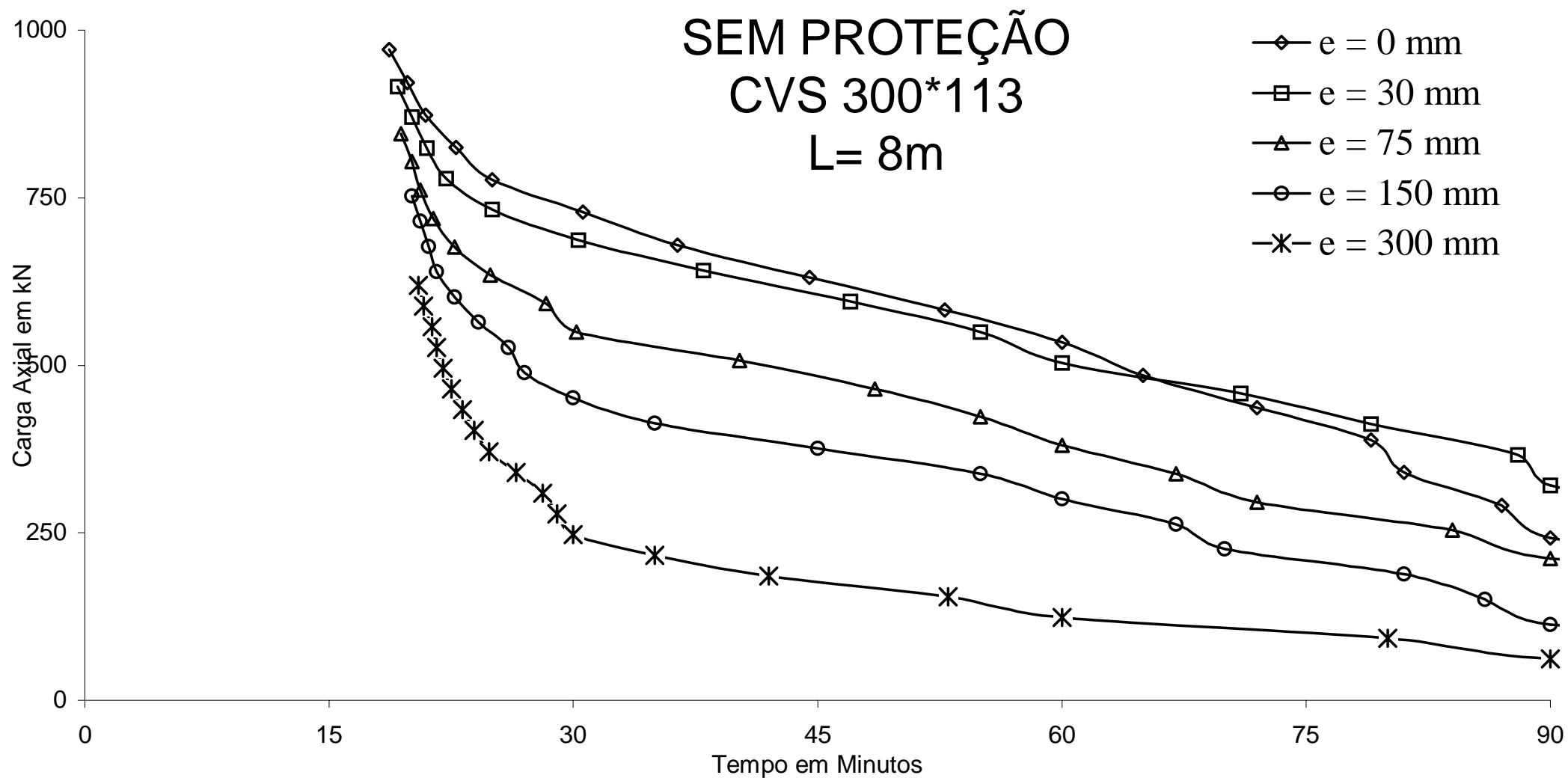


Figura 5.48 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 sem proteção de comprimento 8 m.

ANEXO E

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF TRIANGULAR

Perfil CVS 550 x 184 SEM PROTEÇÃO

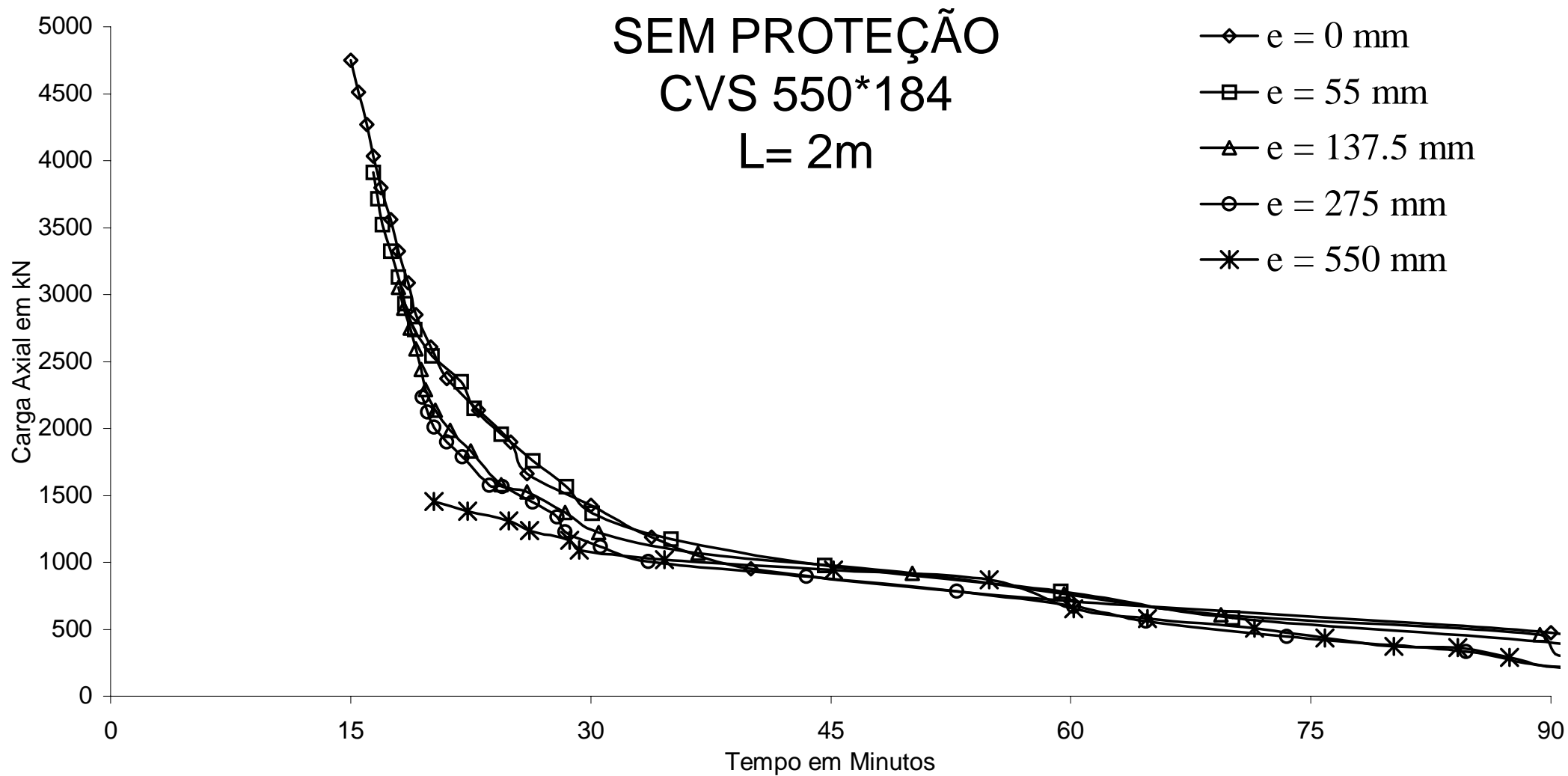


Figura 5.49 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 2 m.

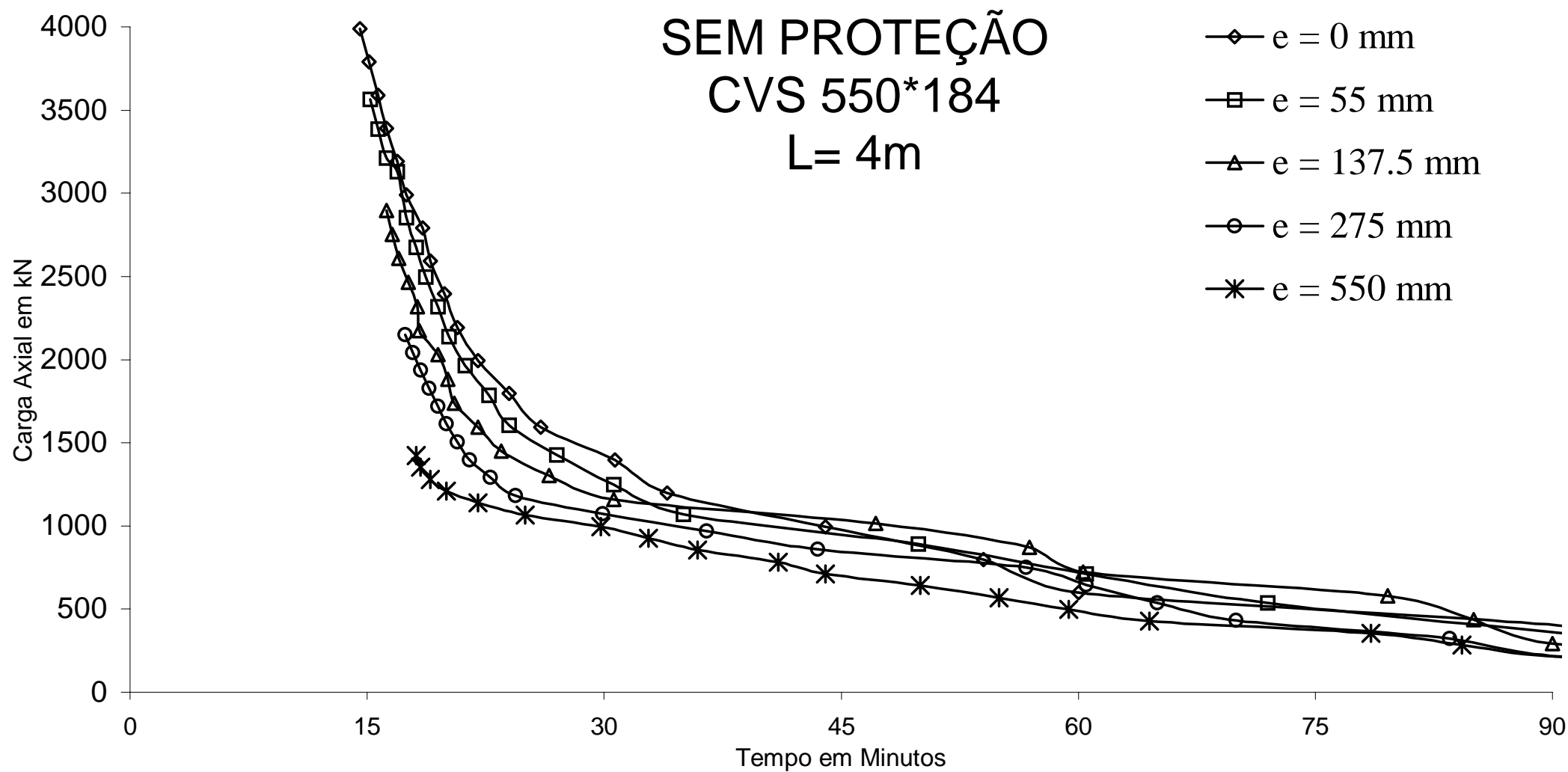


Figura 5.50 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 4 m.

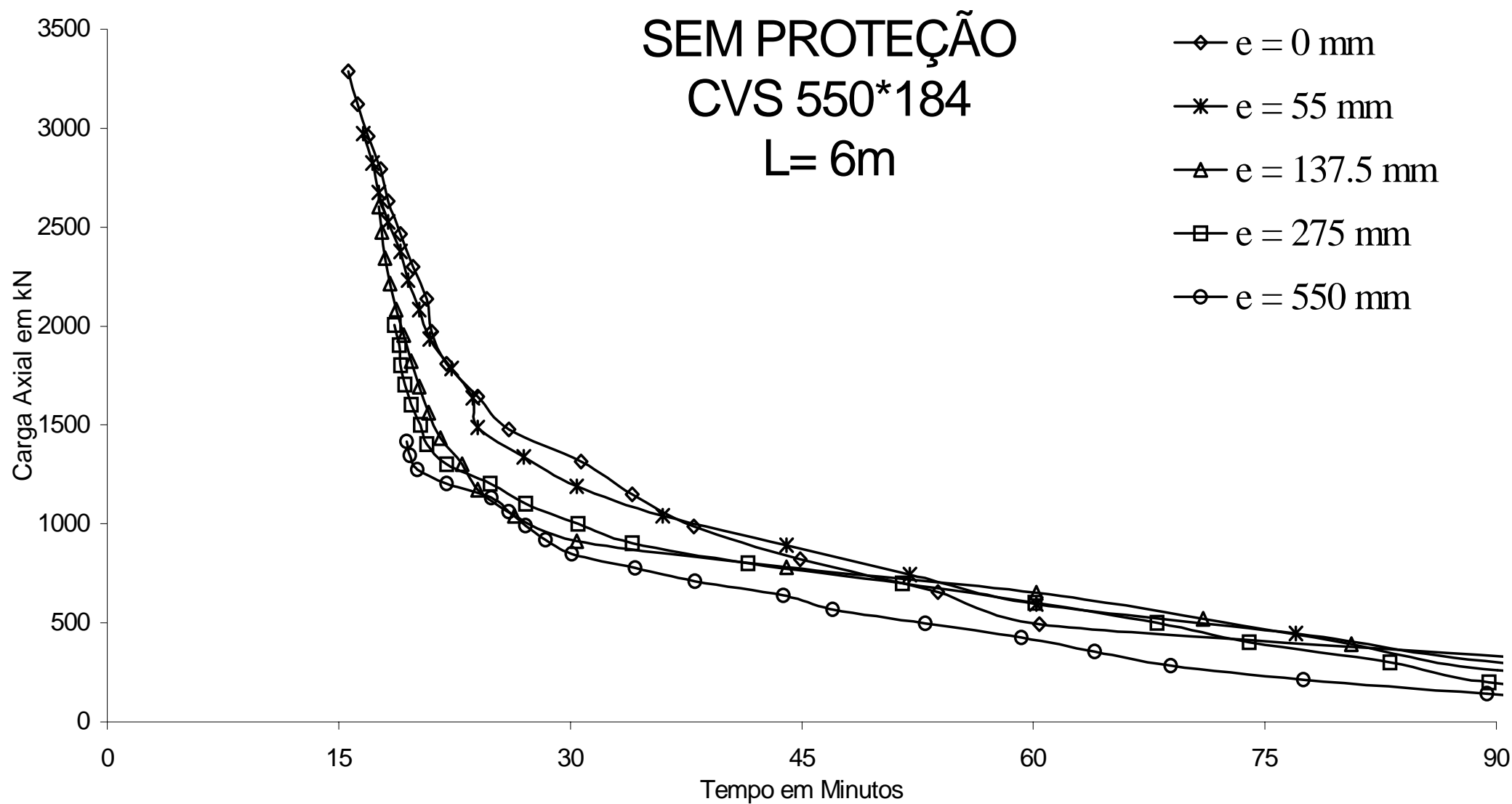


Figura 5.51 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 6 m.

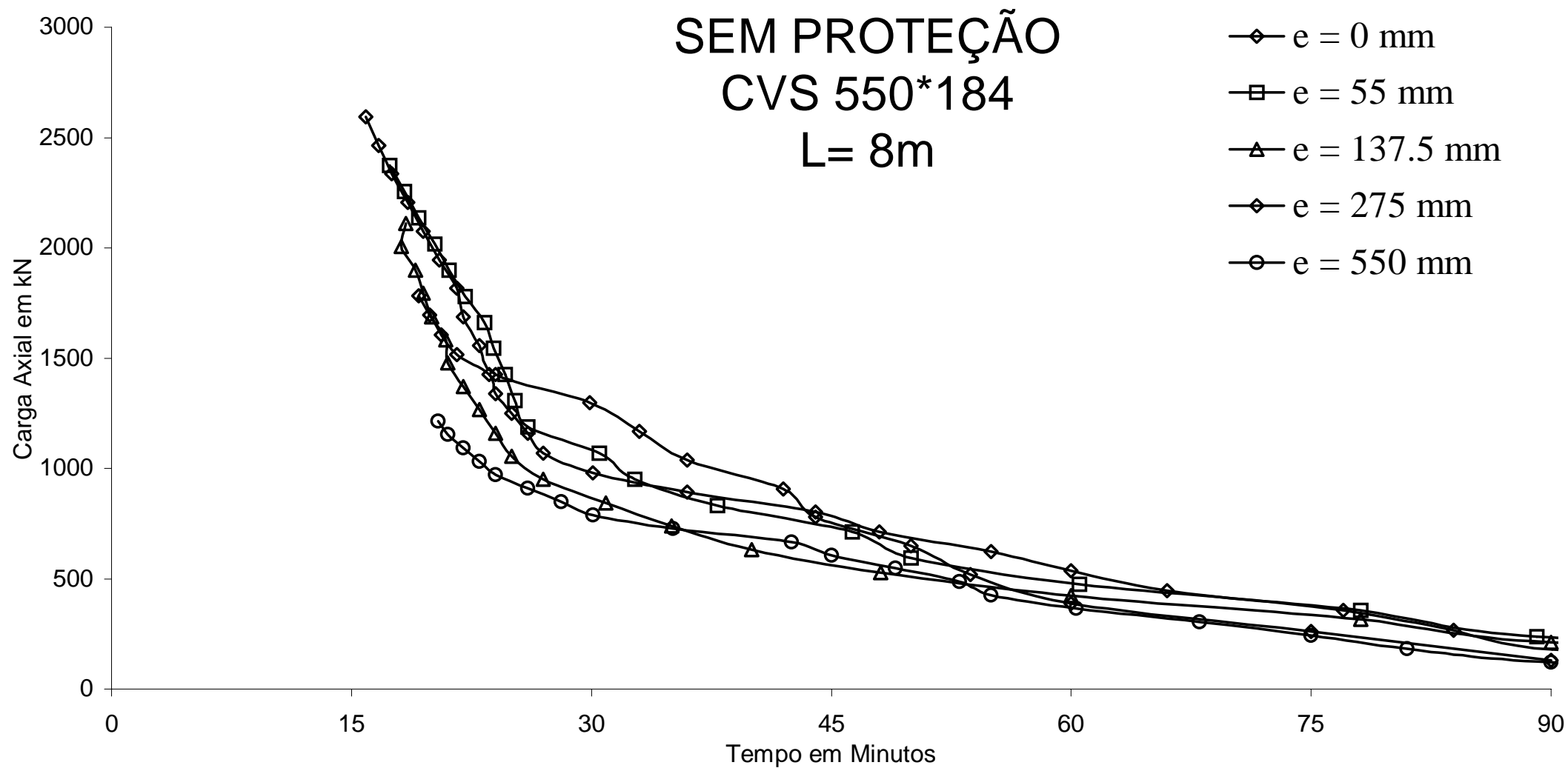


Figura 5.52 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 sem proteção de comprimento 8 m.

ANEXO F

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF TRIANGULAR

Perfil CVS 700 x 342 SEM PROTEÇÃO

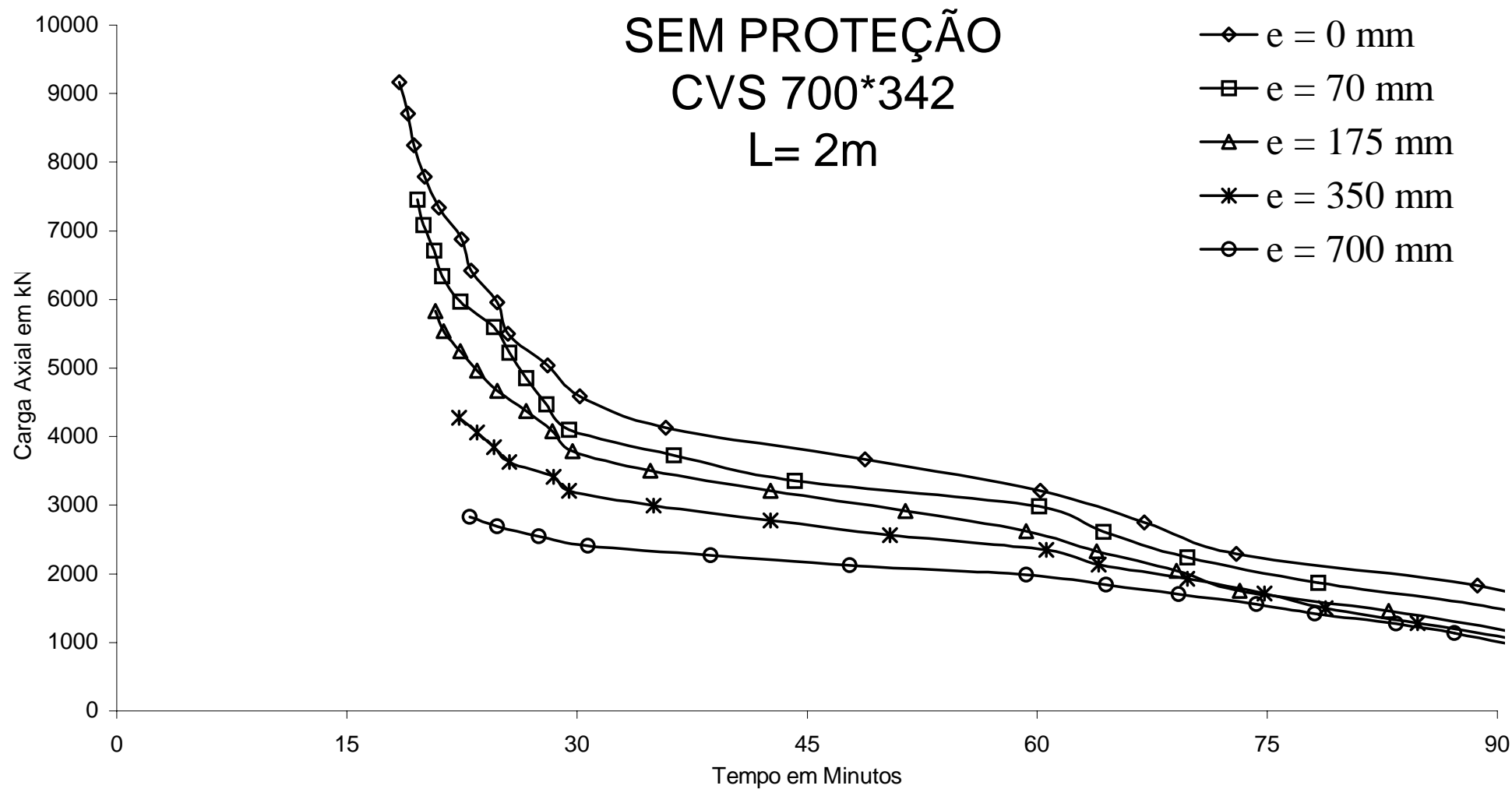


Figura 5.53 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 2 m.

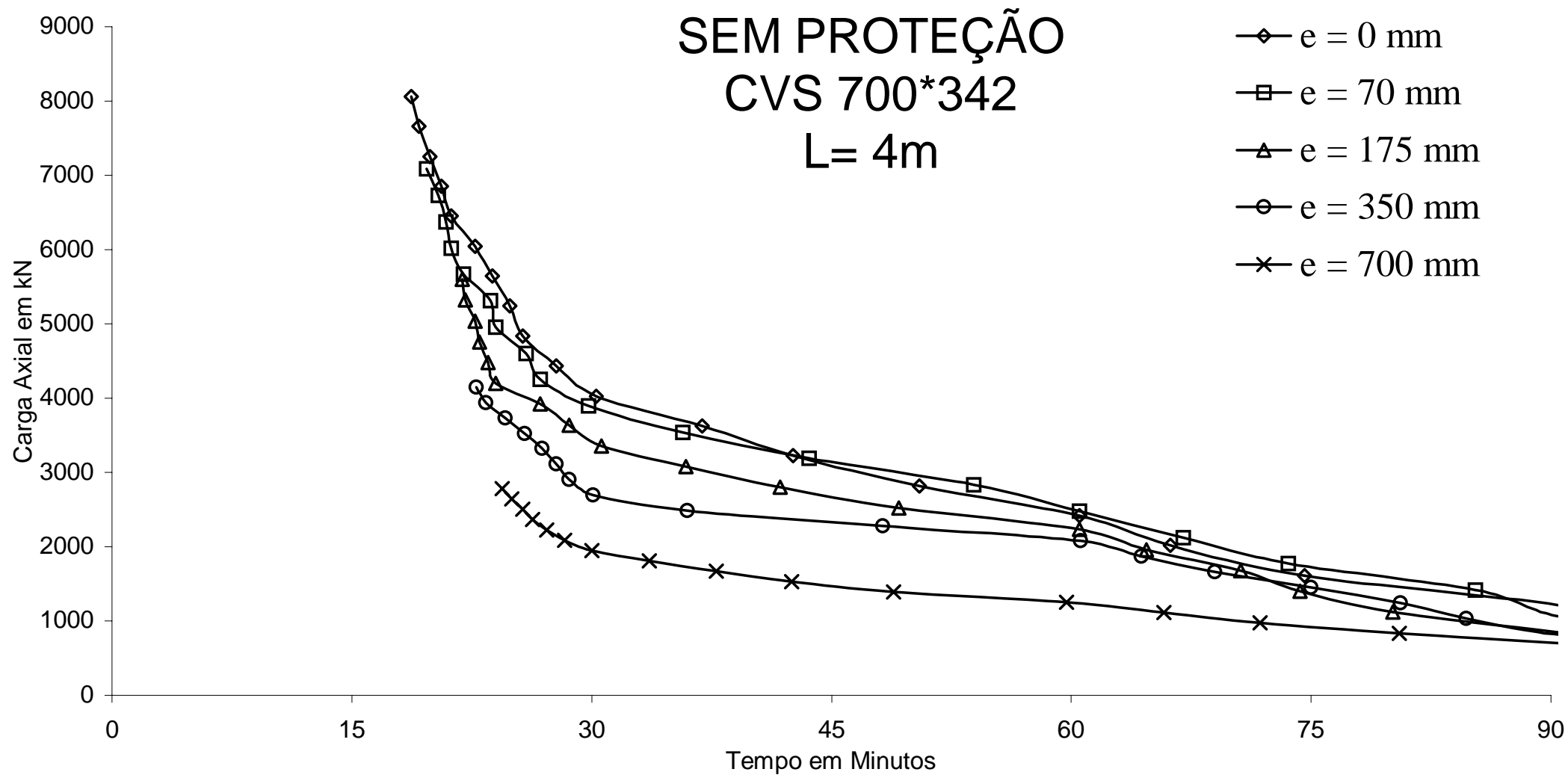


Figura 5.54 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 4 m.

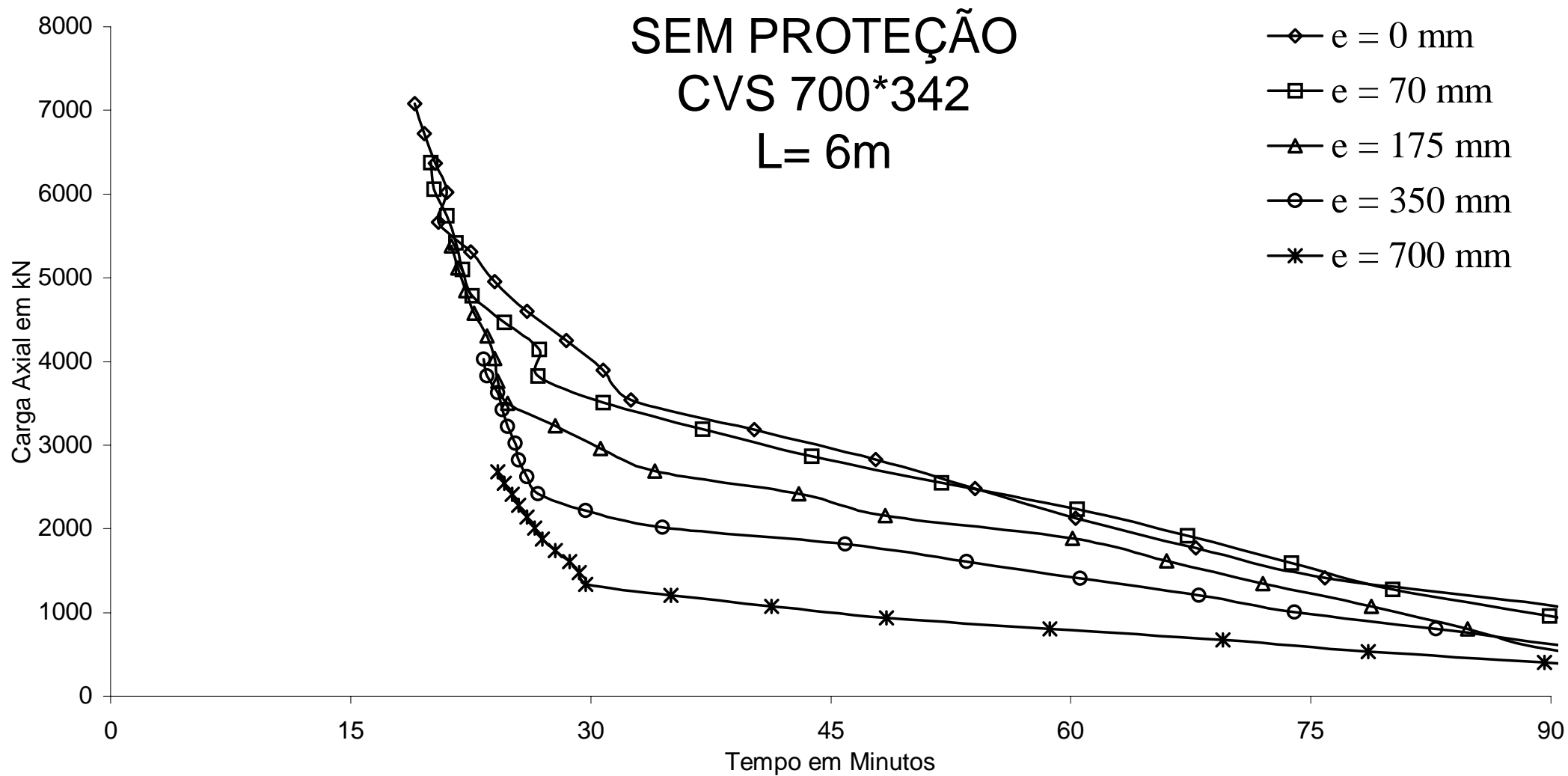


Figura 5.55 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 6 m.

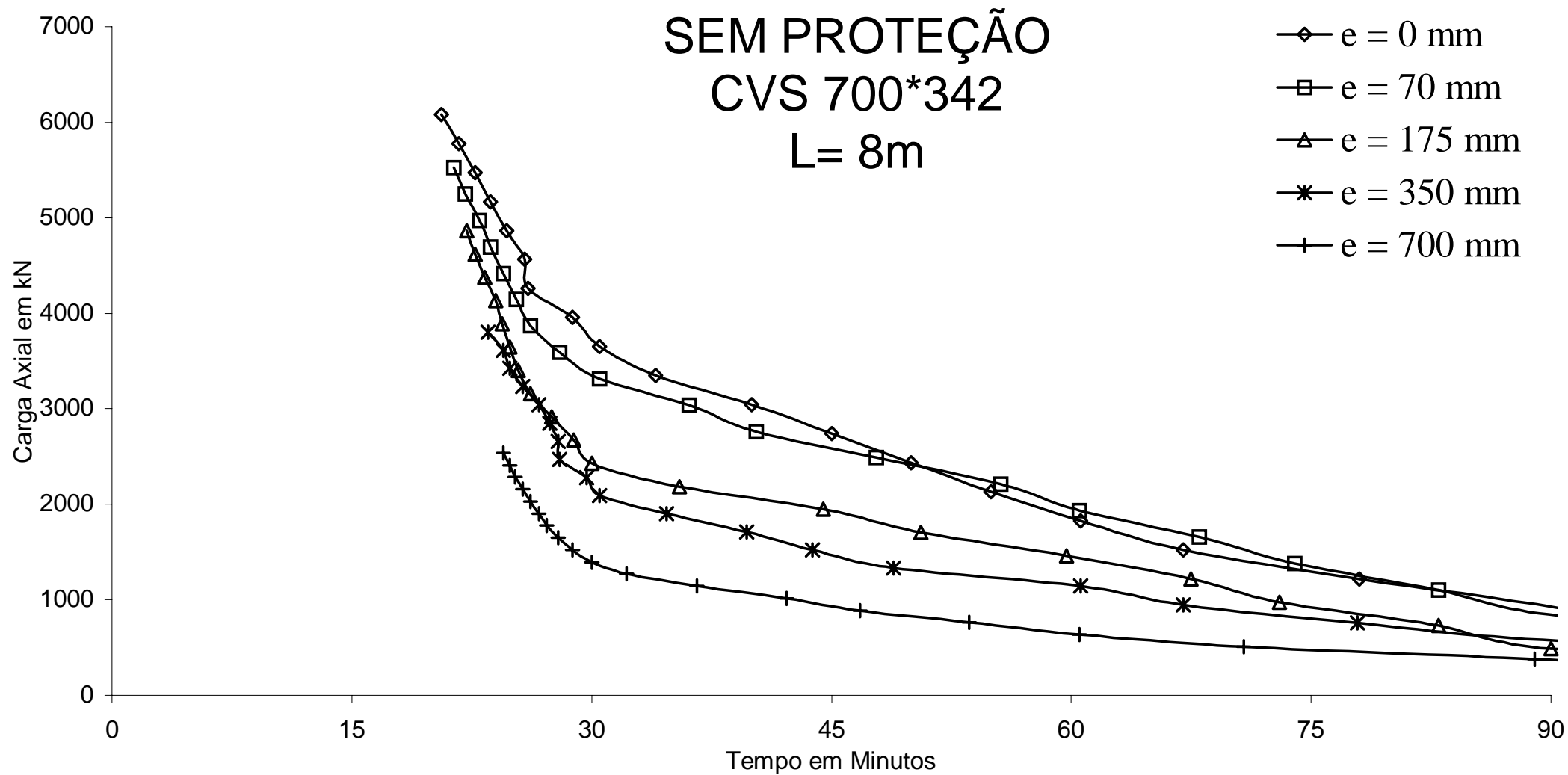


Figura 5.56 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 sem proteção de comprimento 8 m.

ANEXO G

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF RETANGULAR

PERFIL 330x113 COM PROTEÇÃO DA ALMA

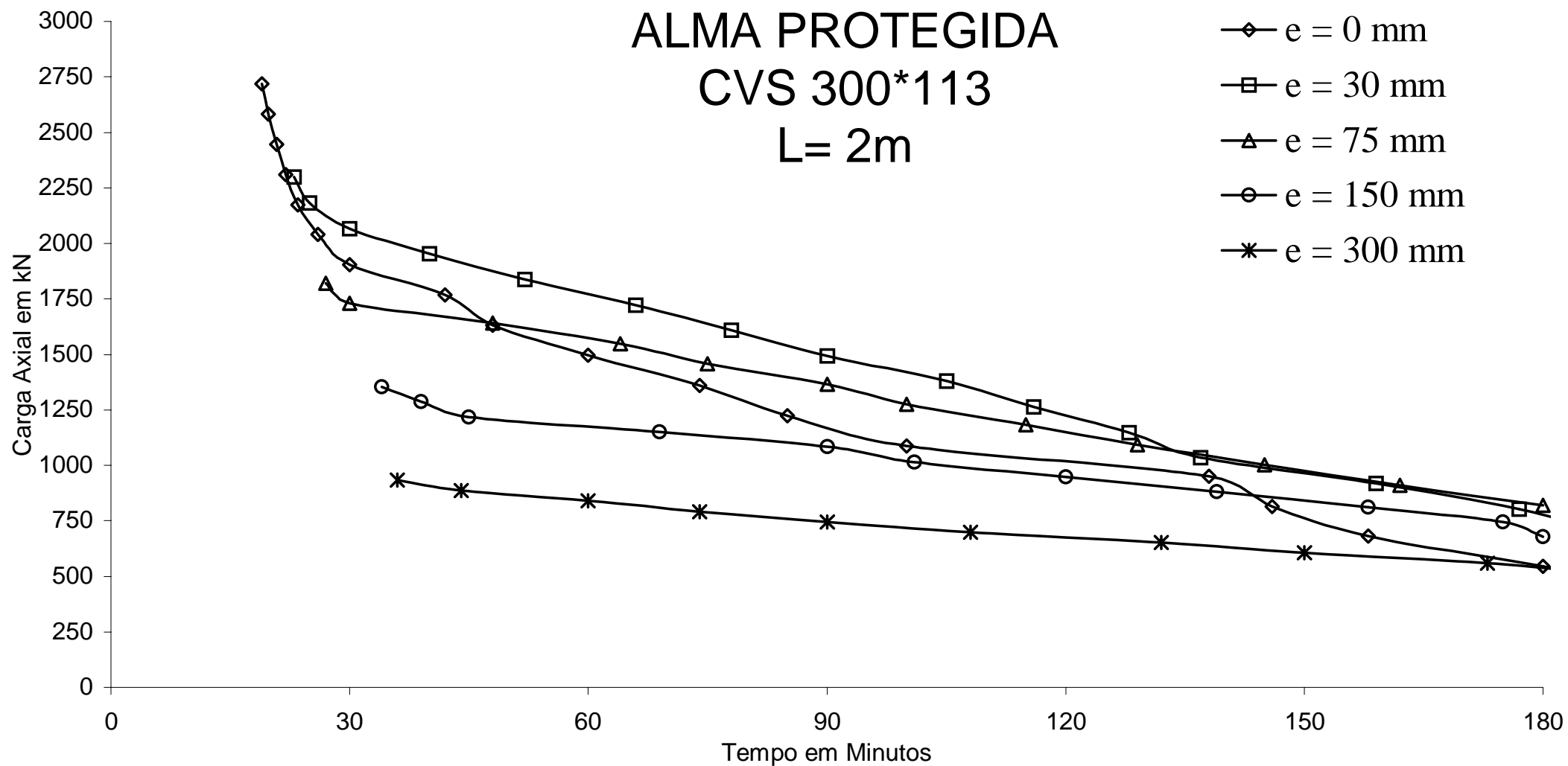


Figura 5.57 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 2 m.

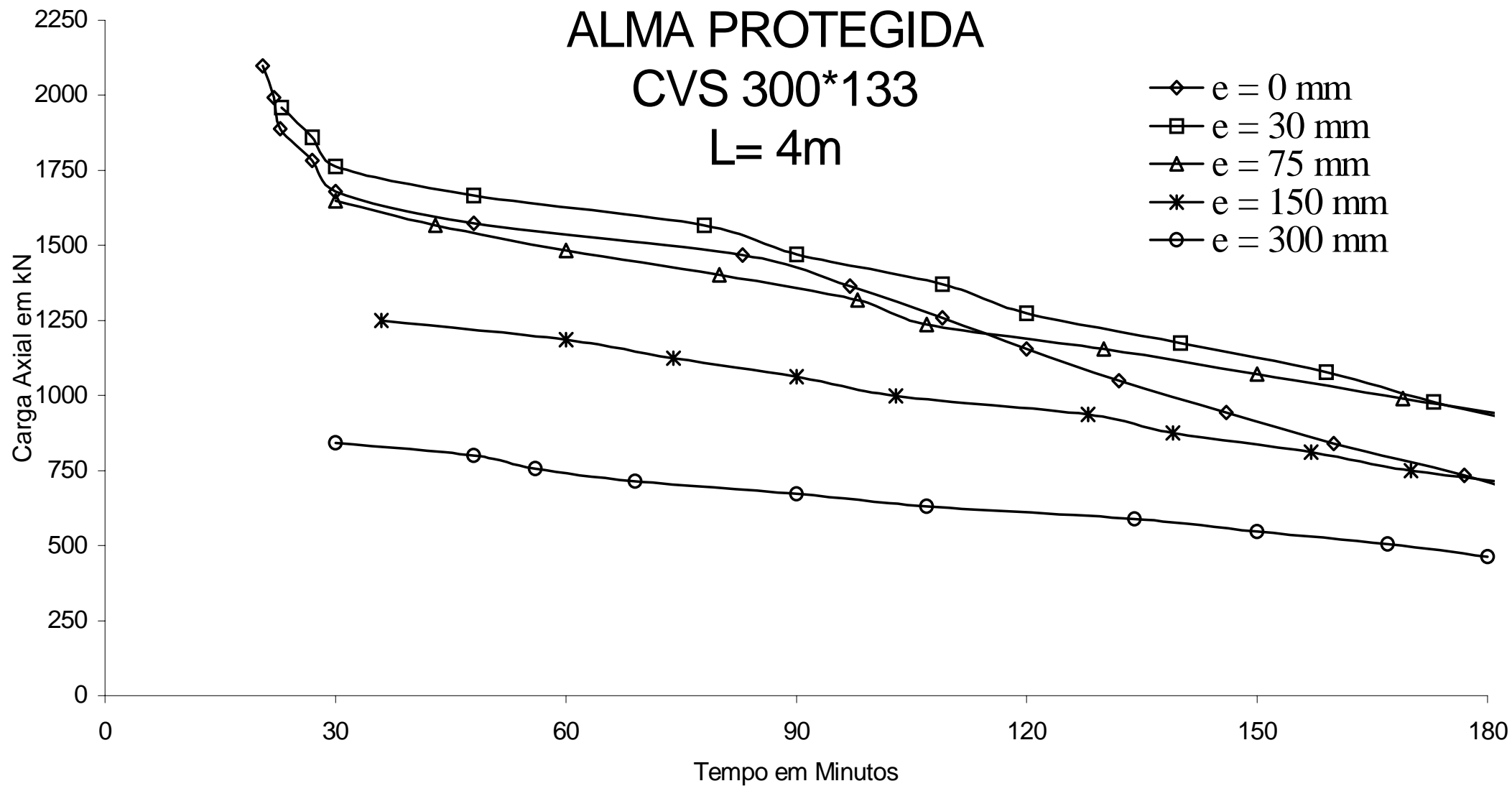


Figura 5.58 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 4 m.

ALMA PROTEGIDA CVS 300*113 L= 6m

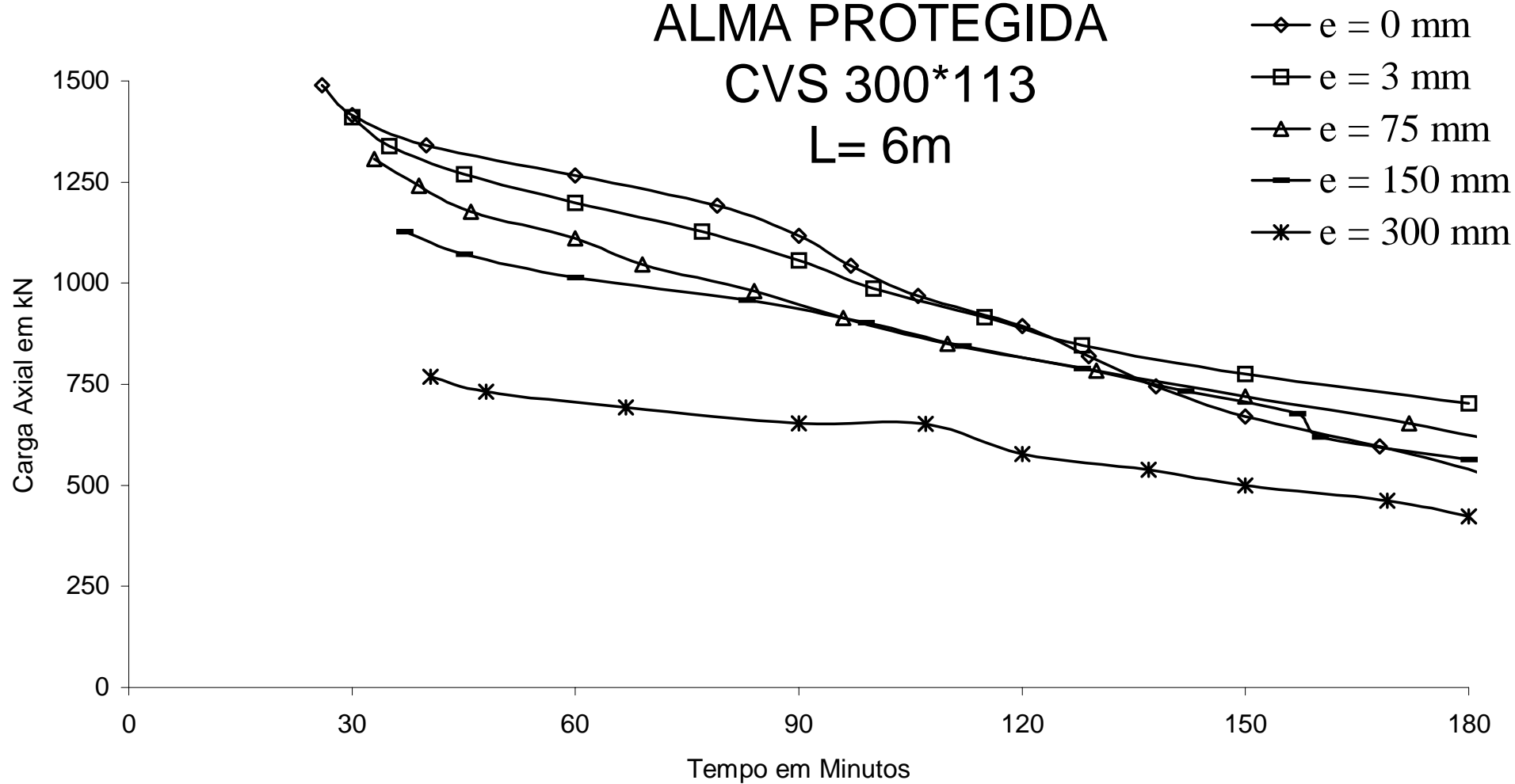


Figura 5.59 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 2 m.

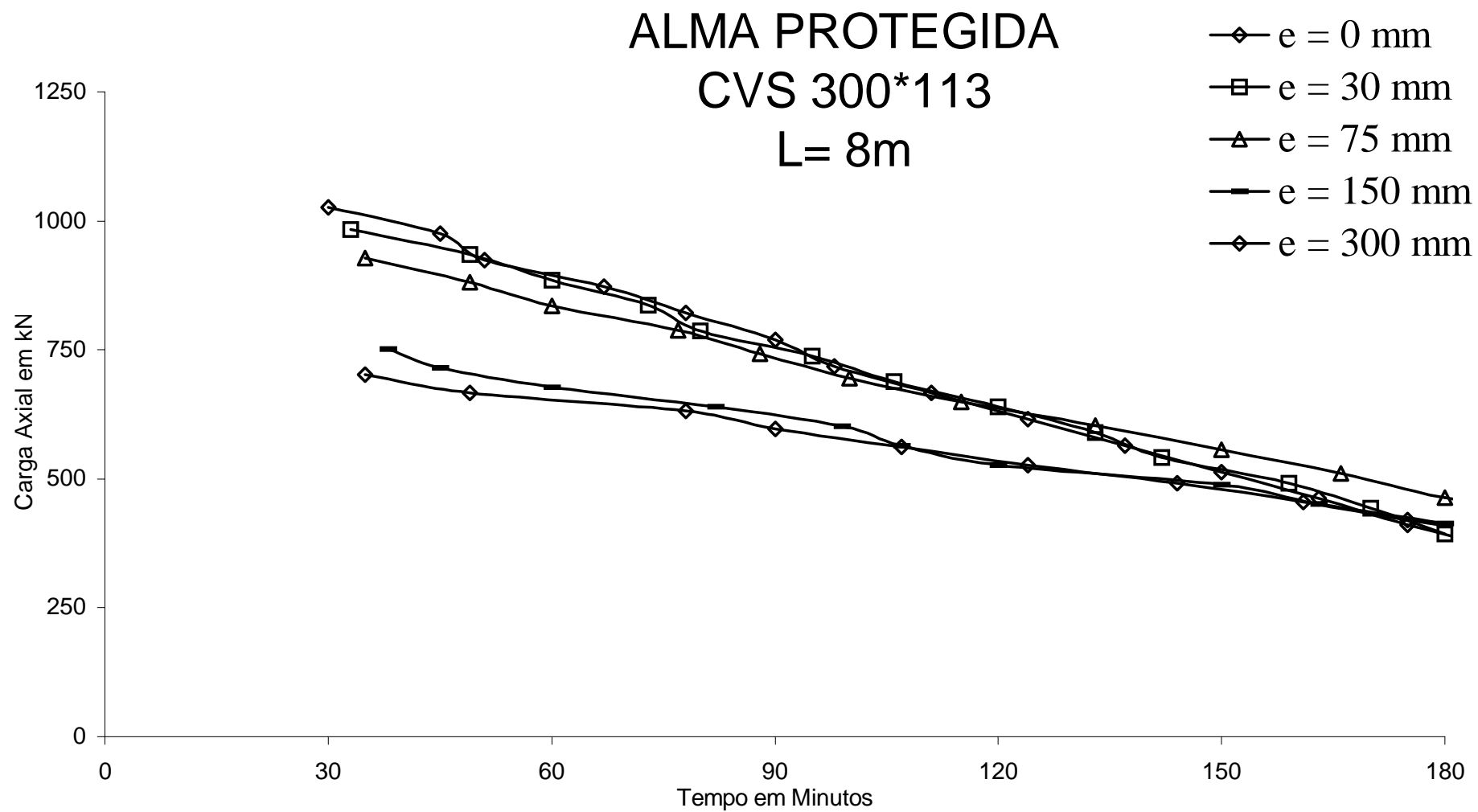


Figura 5.60 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO H

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF RETANGULAR

Perfil CVS 550 x 184 COM PROTEÇÃO DA ALMA

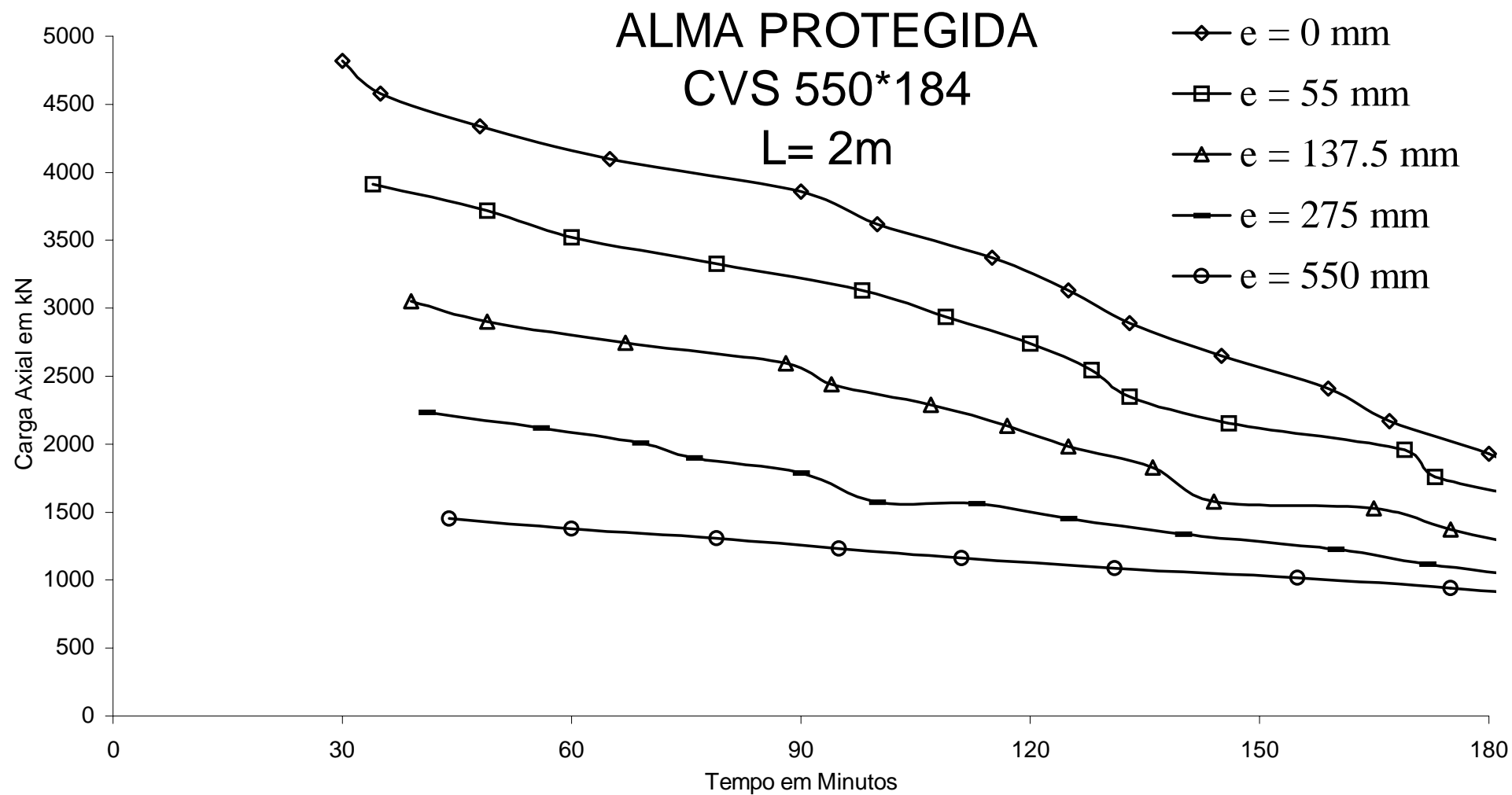


Figura 5.61 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 2 m.

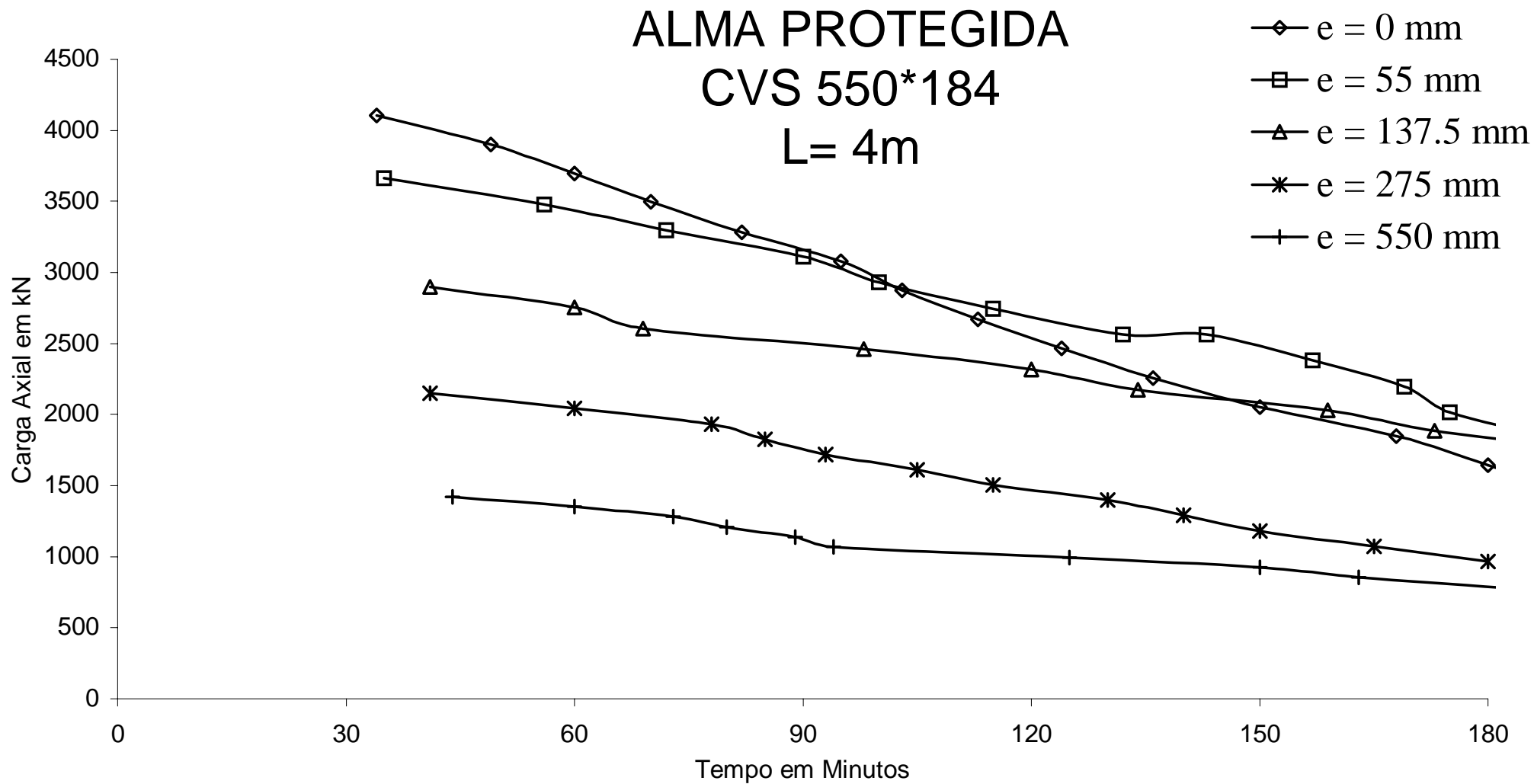


Figura 5.62 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 4 m.

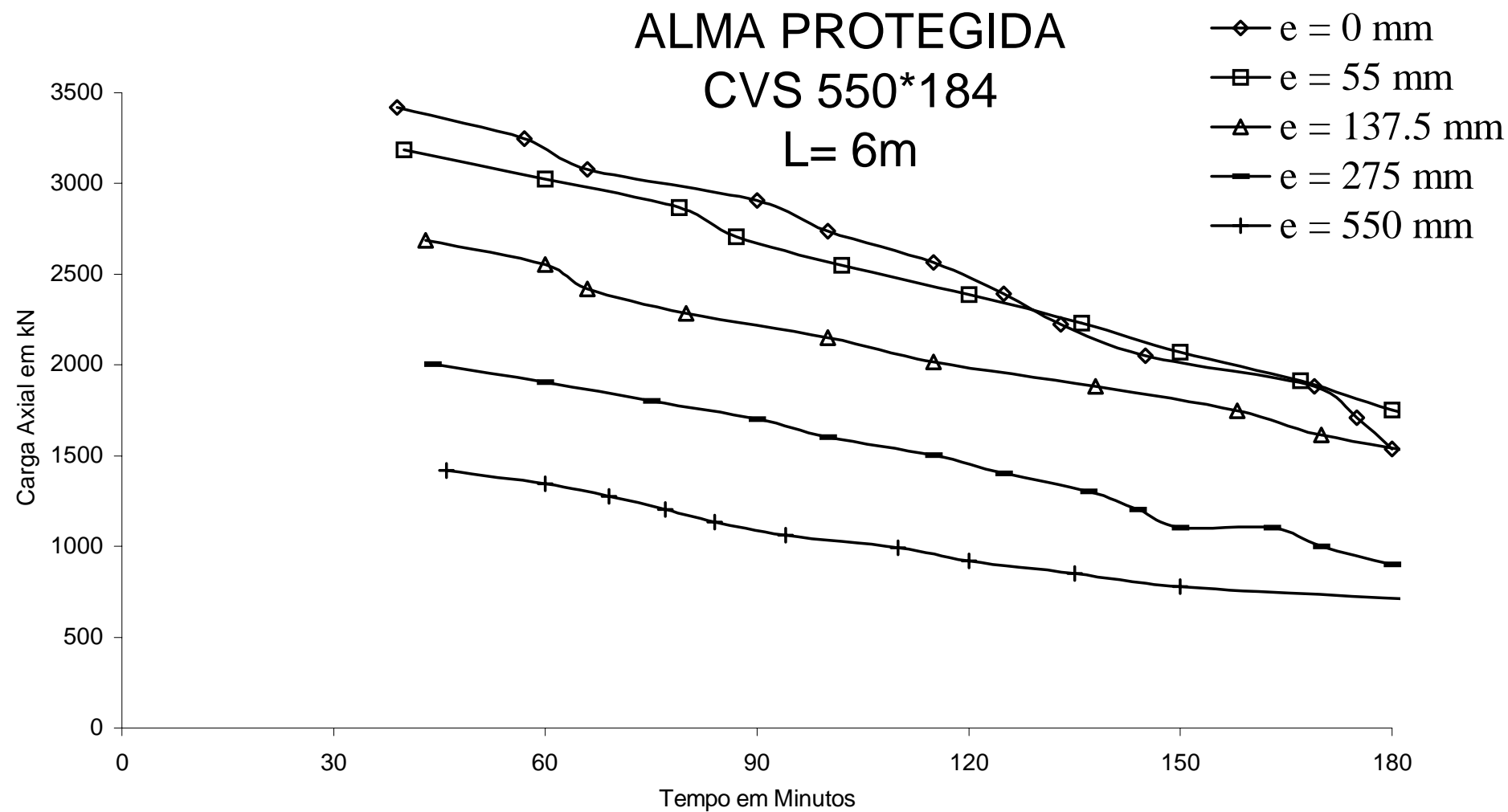


Figura 5.63 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 6 m.

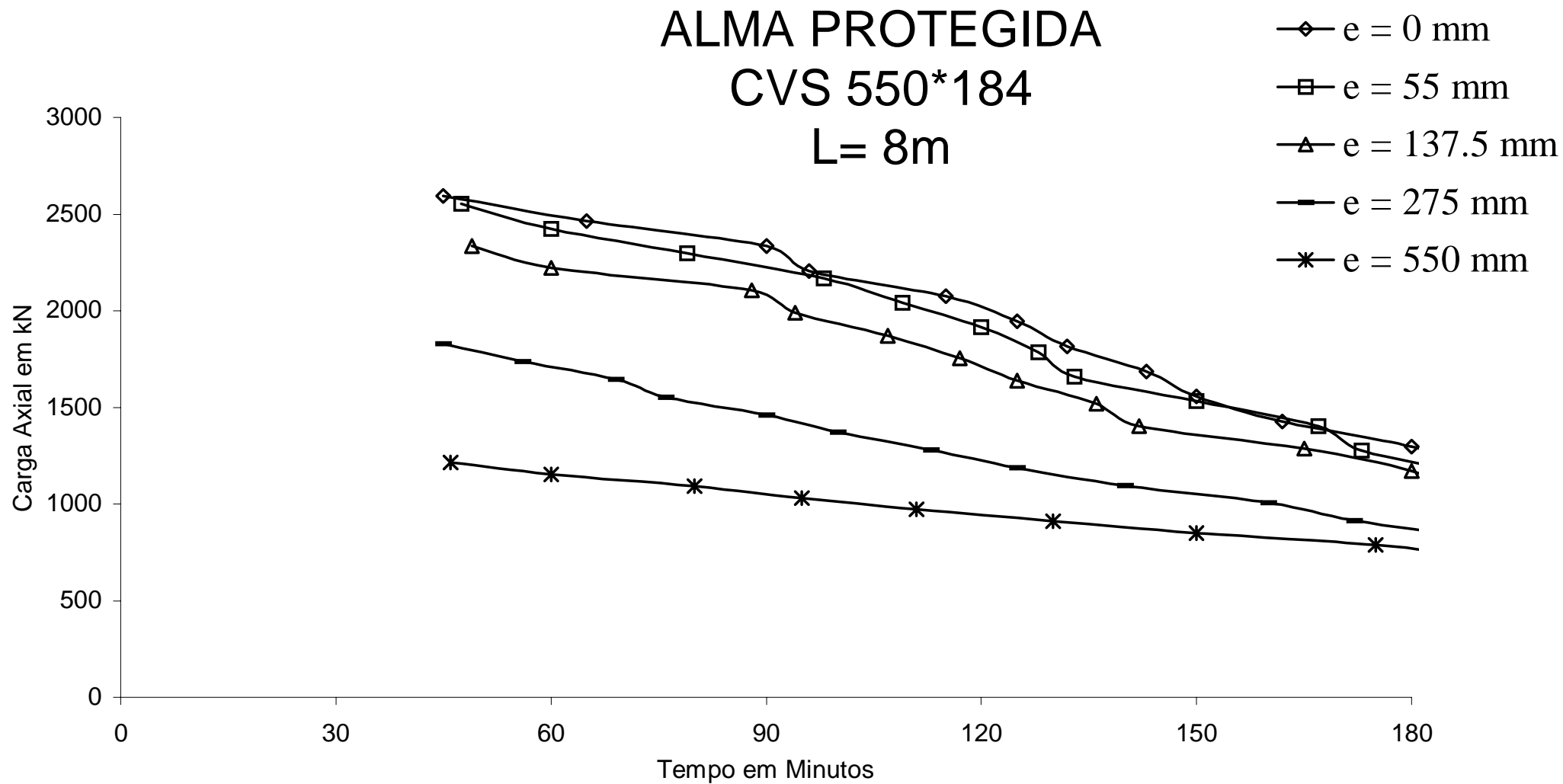


Figura 5.64 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO I

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF RETANGULAR

Perfil CVS 700 x 342 COM PROTEÇÃO DA ALMA

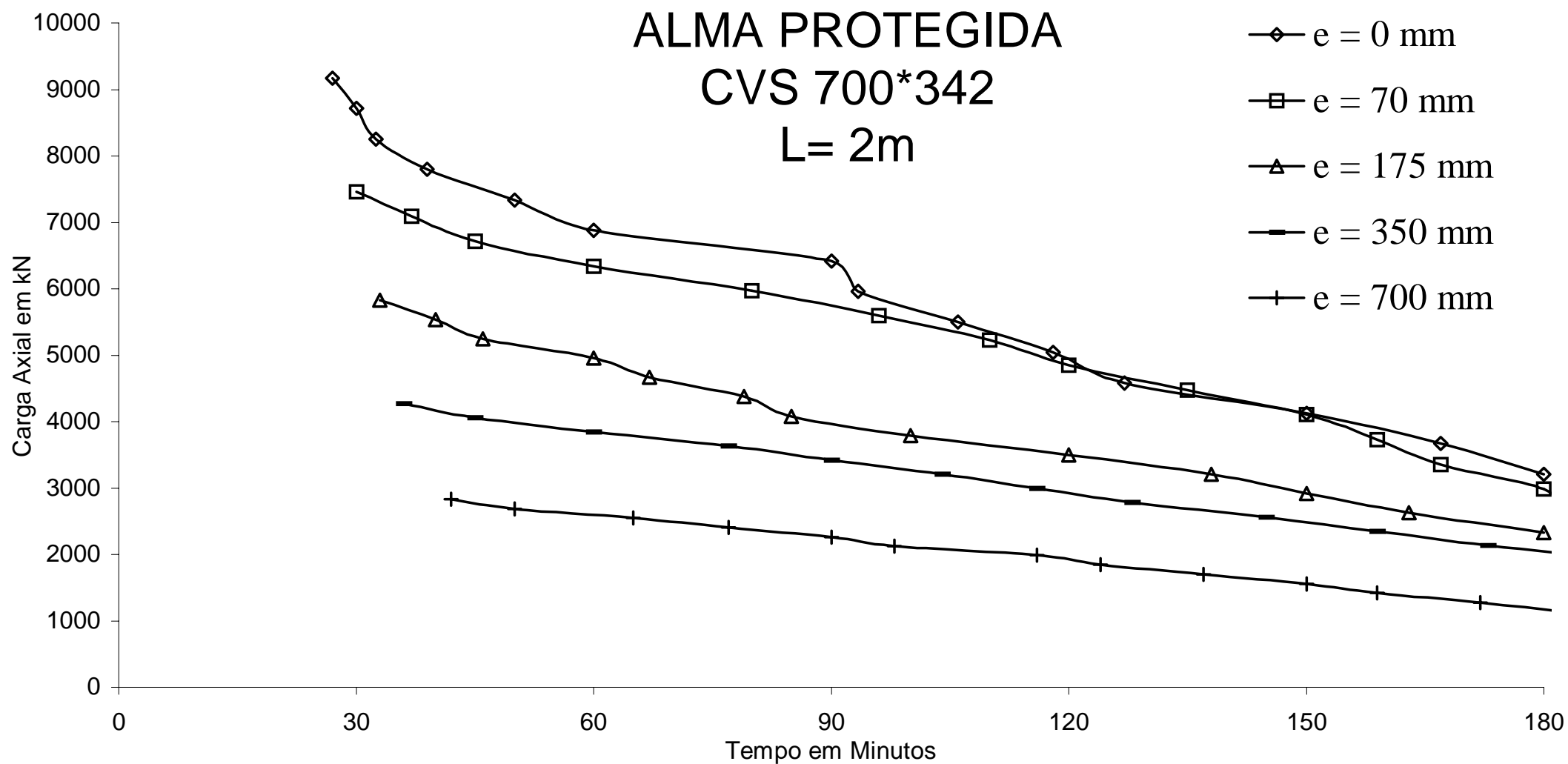


Figura 5.65 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 2 m.

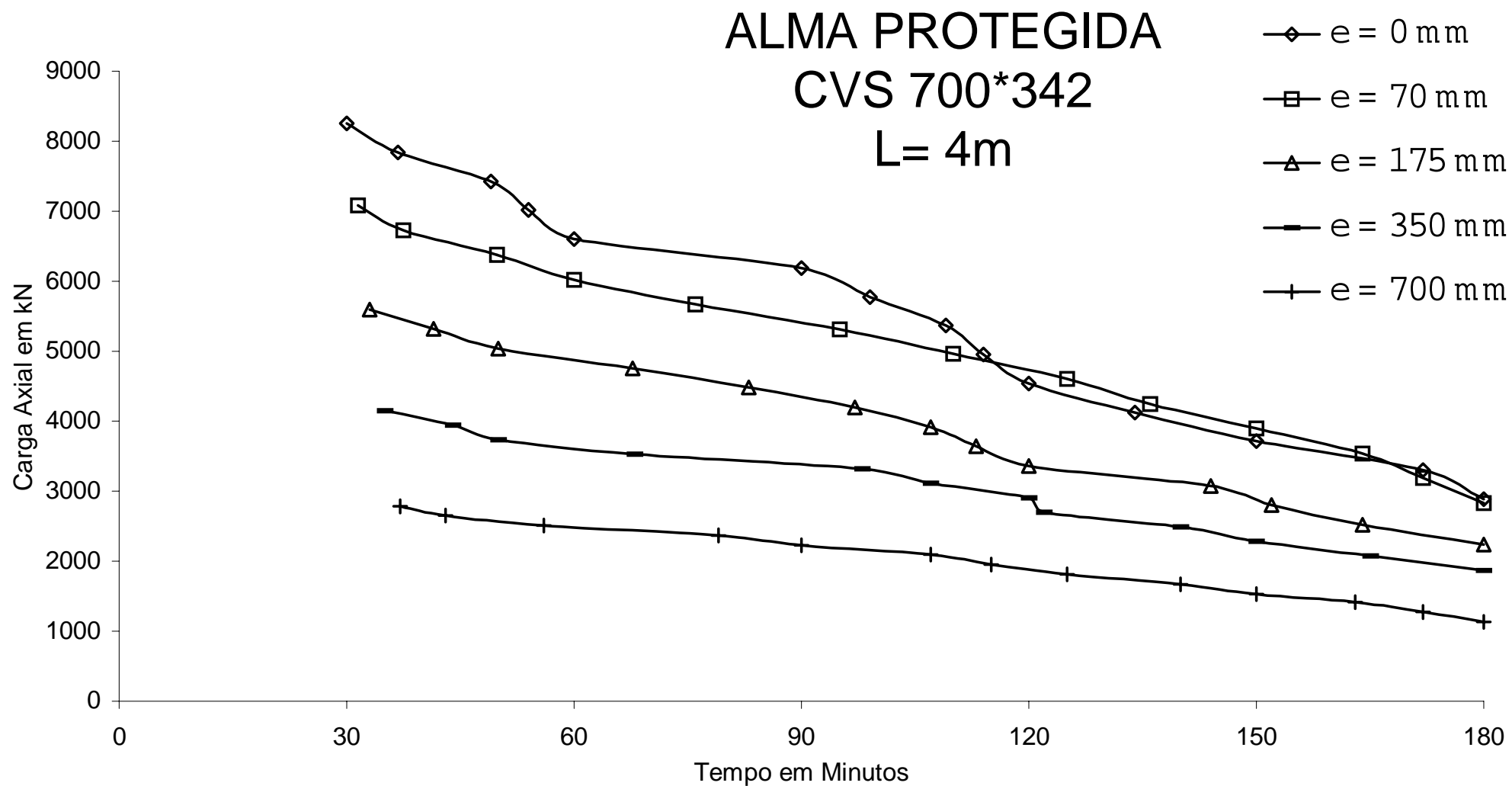


Figura 5.66 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 4 m.

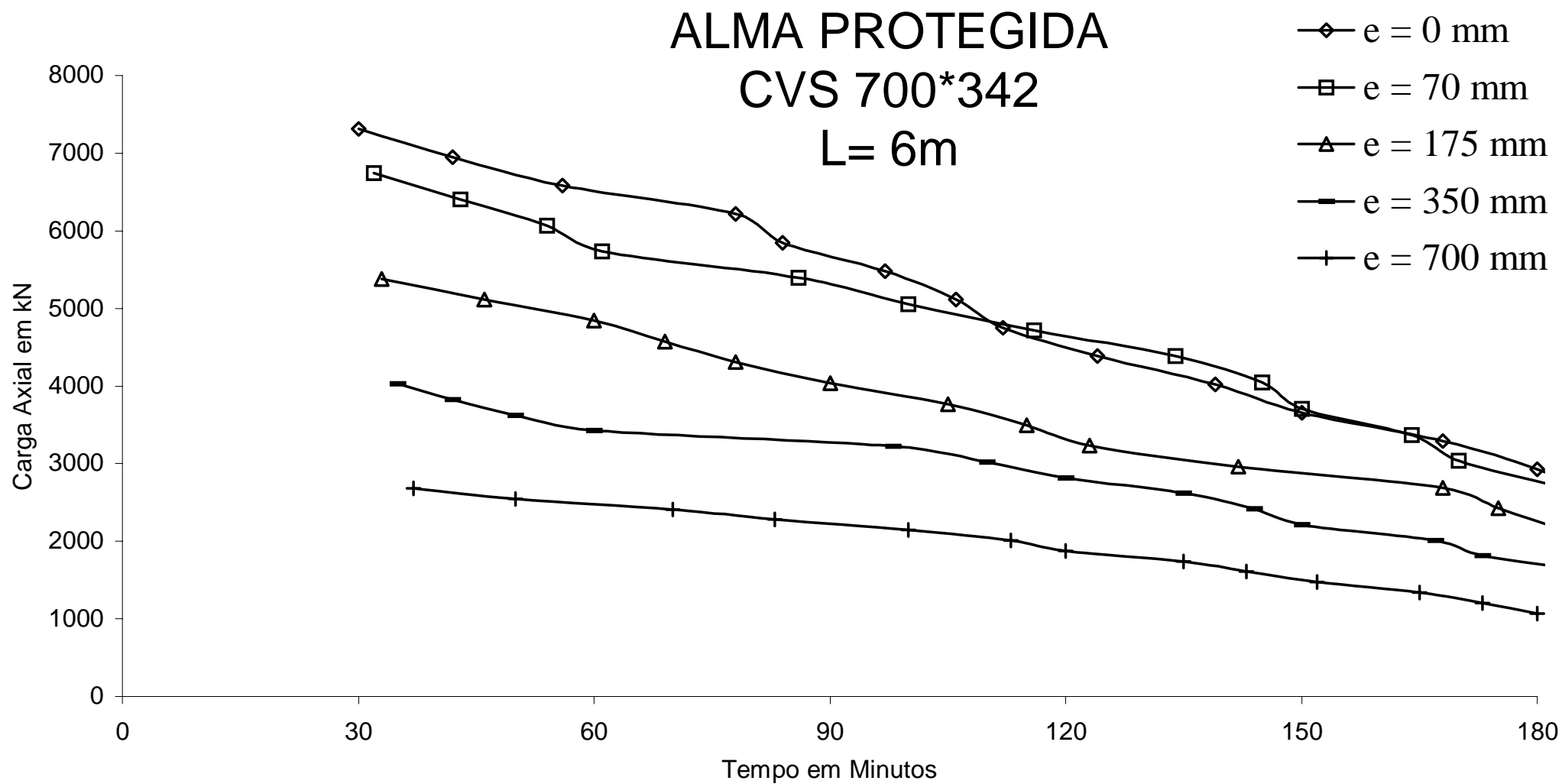


Figura 5.67 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 6 m.

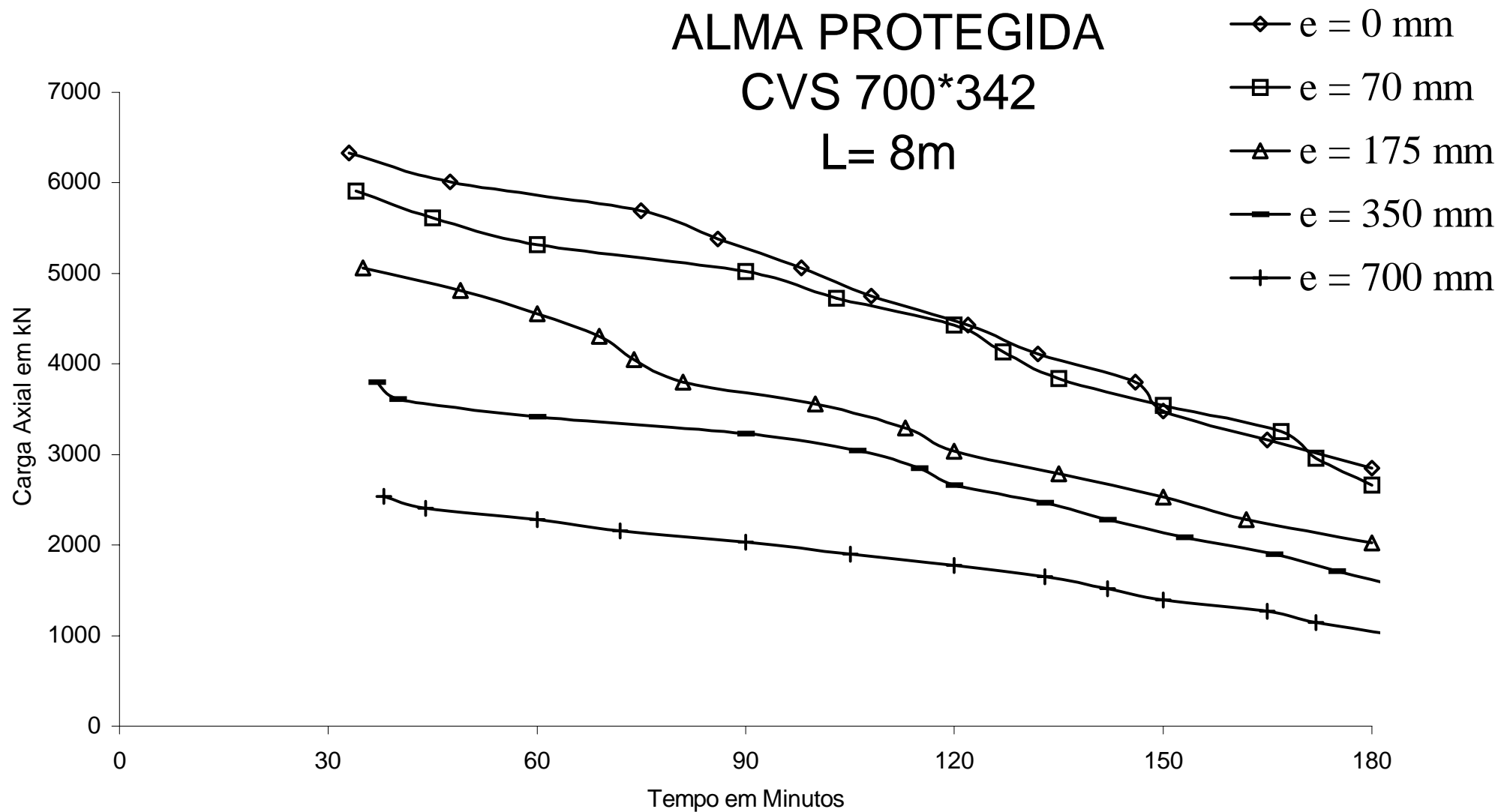


Figura 5.68 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO J

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF RETANGULAR

PERFIL 330x113 COM PROTEÇÃO DAS MESAS PROTEGIDAS

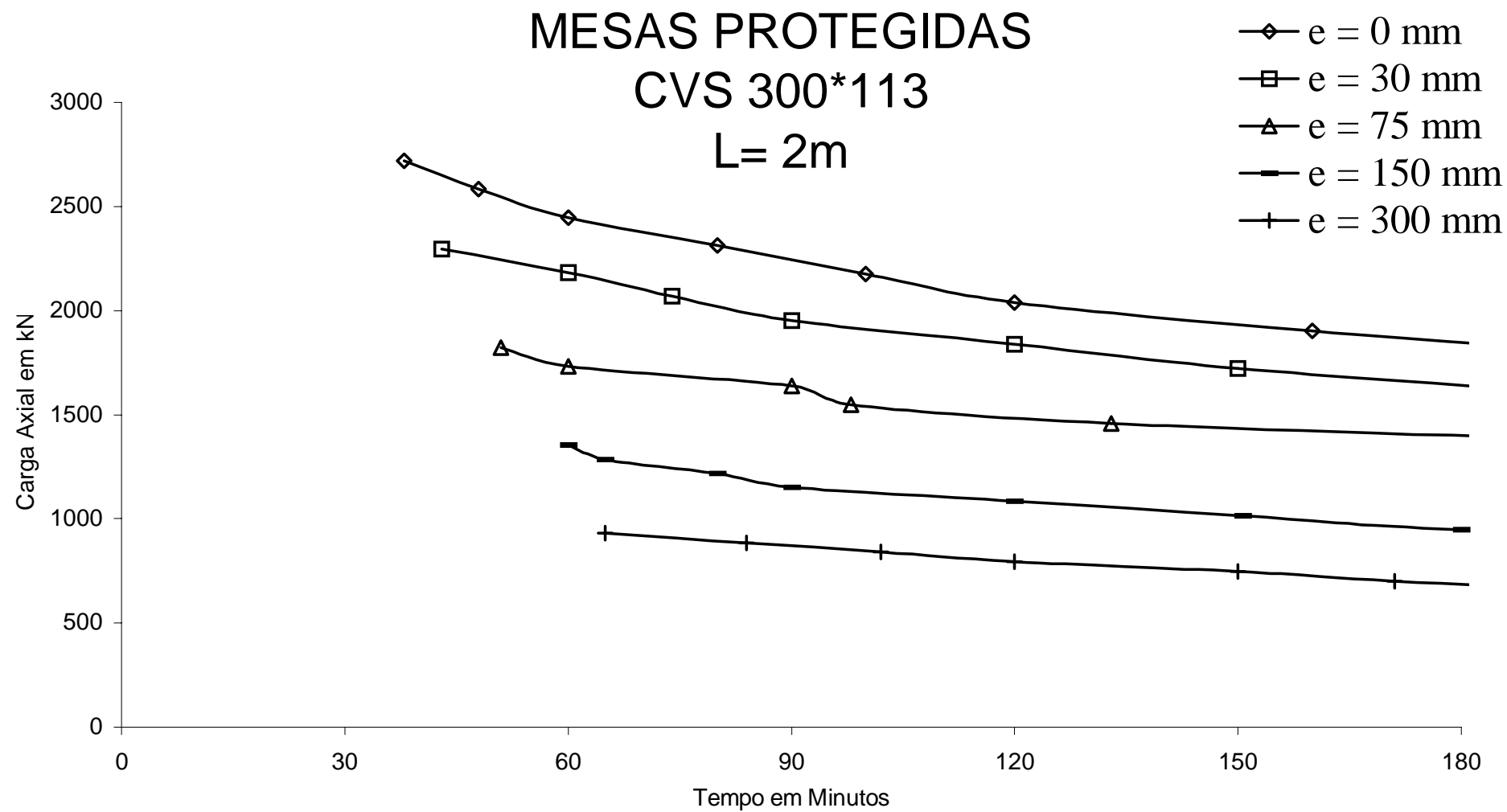


Figura 5.69 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 2 m.

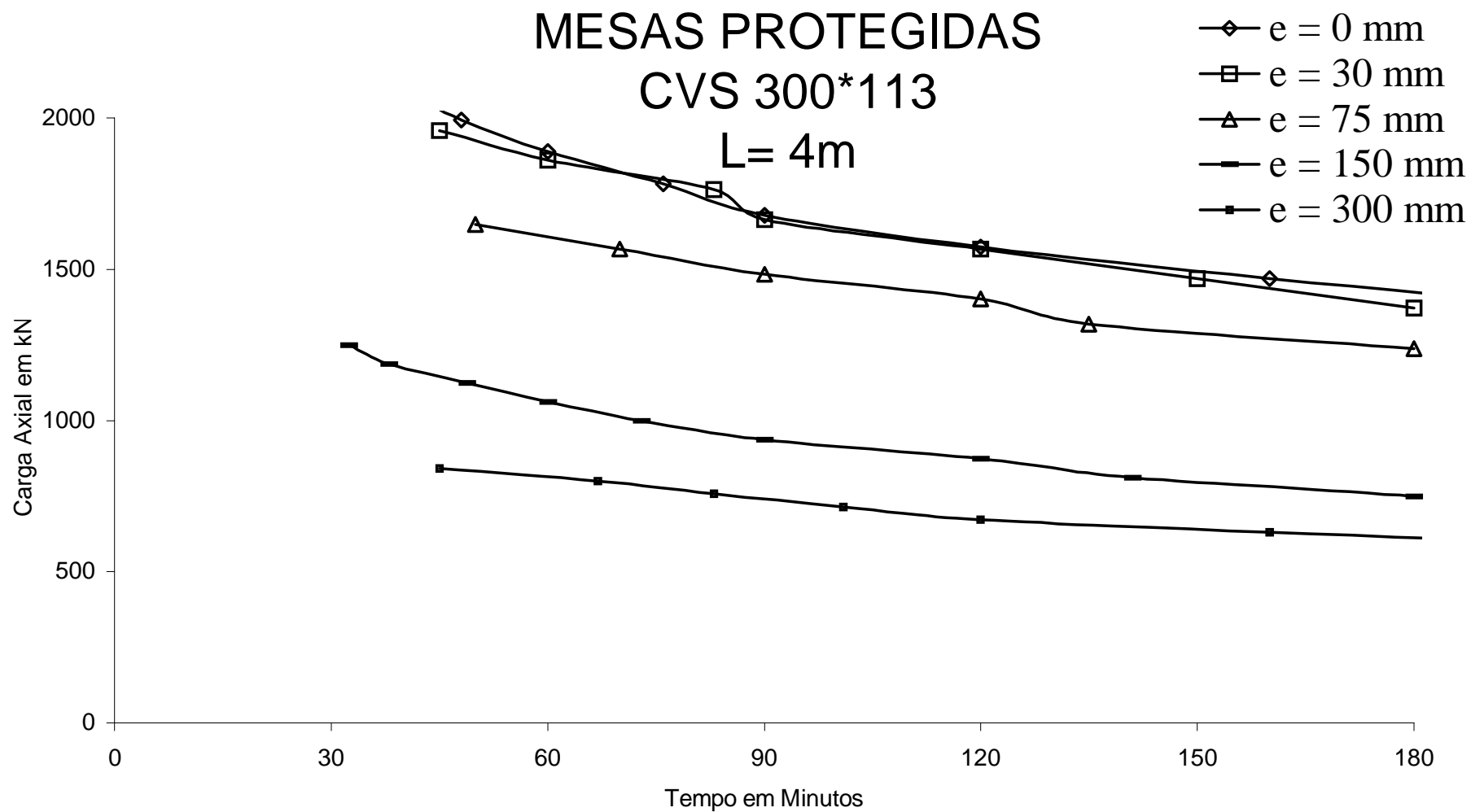


Figura 5.70 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 4 m.

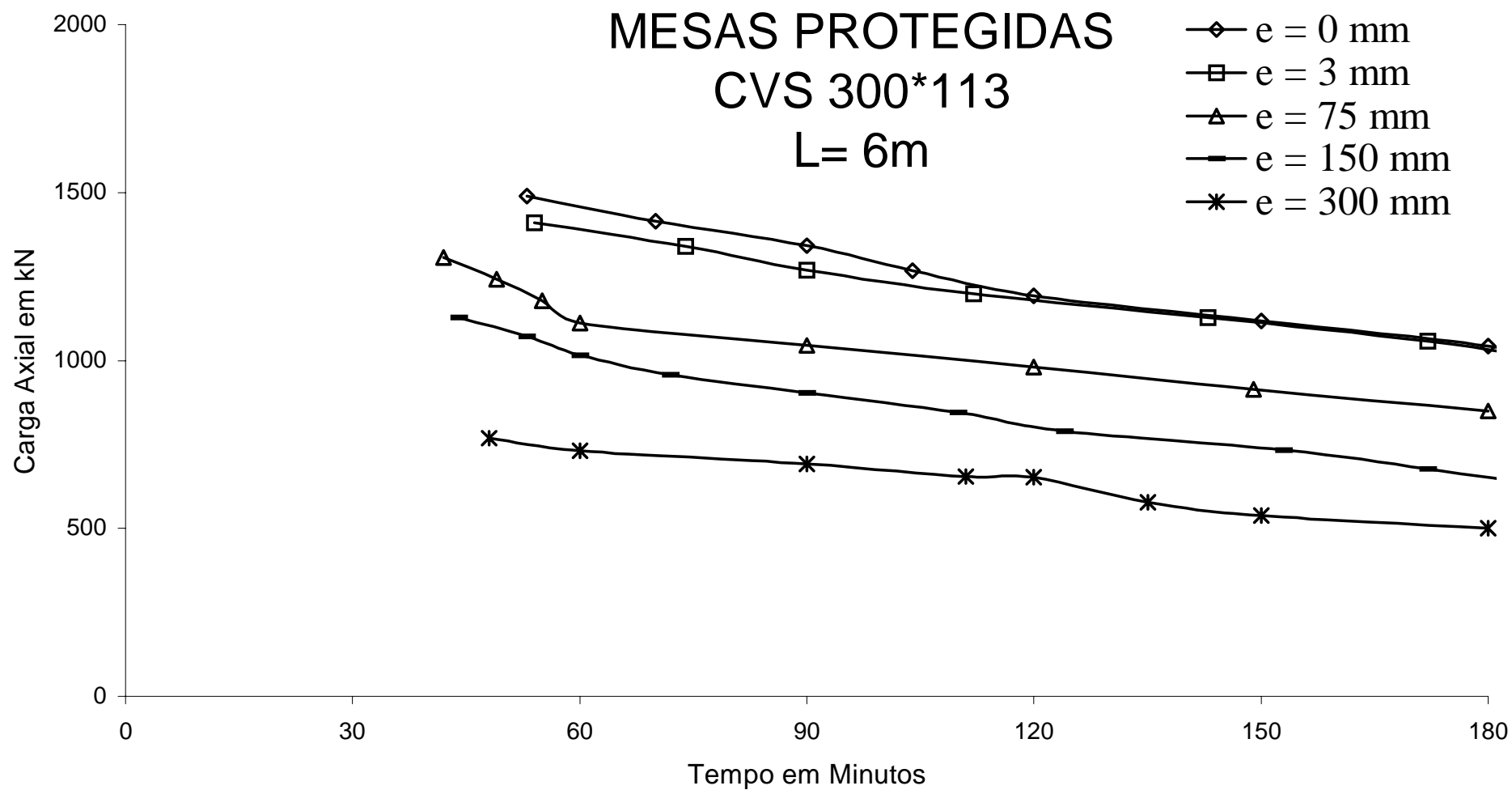


Figura 5.71 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 6 m.

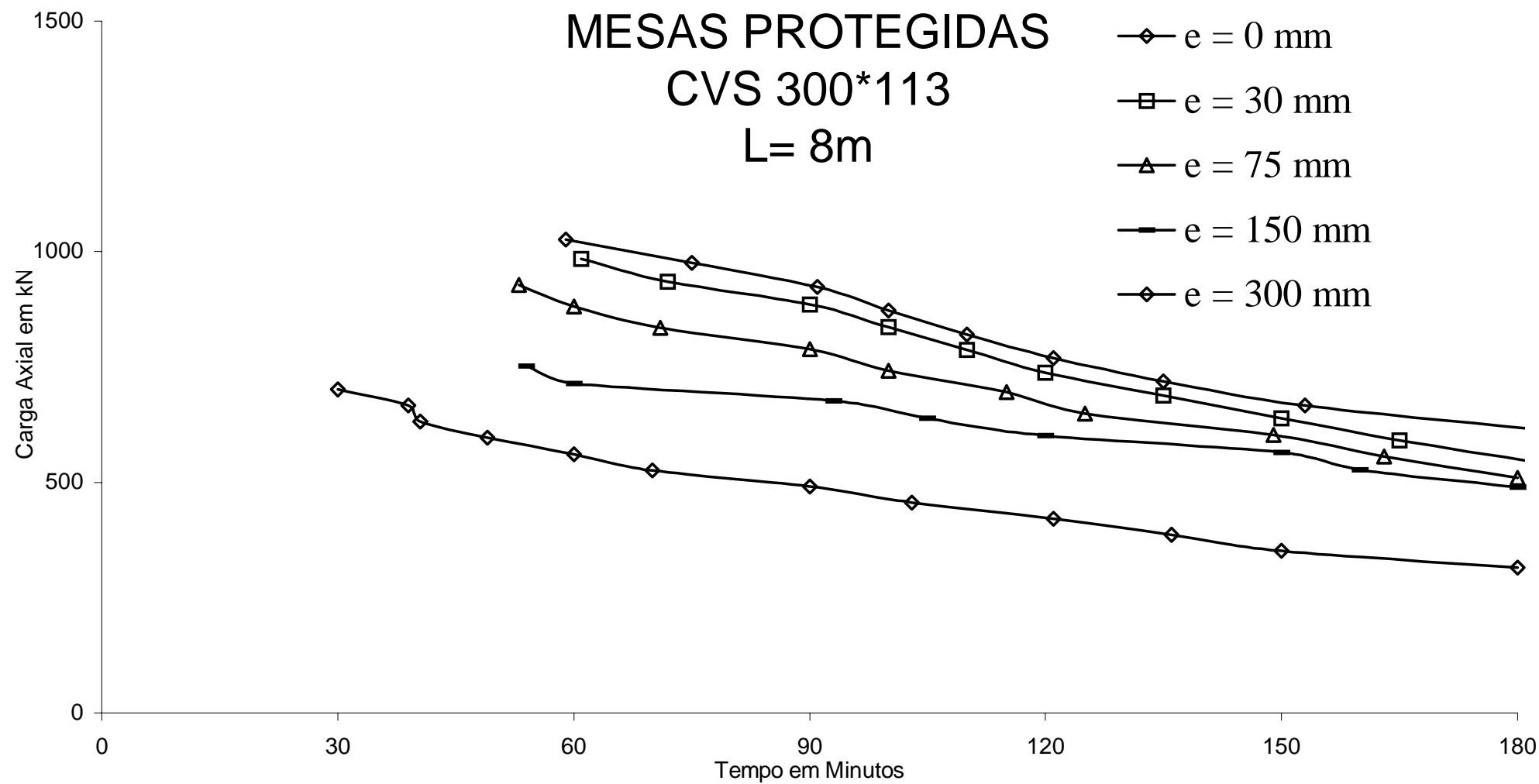


Figura 5.72 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO K

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF RETANGULAR

Perfil CVS 550 x 184 COM PROTEÇÃO DAS MESAS PROTEGIDAS

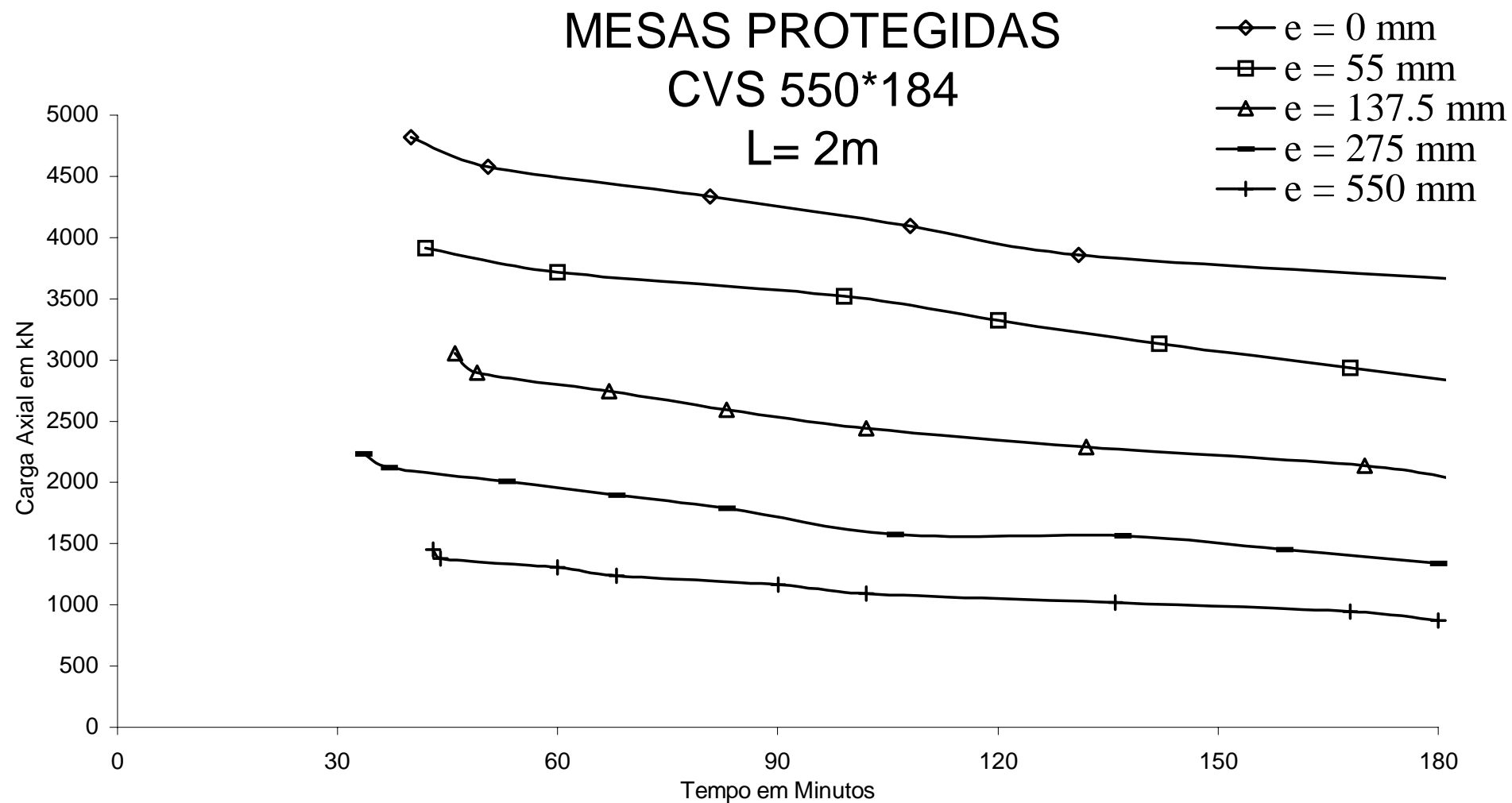


Figura 5.73 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 2 m.

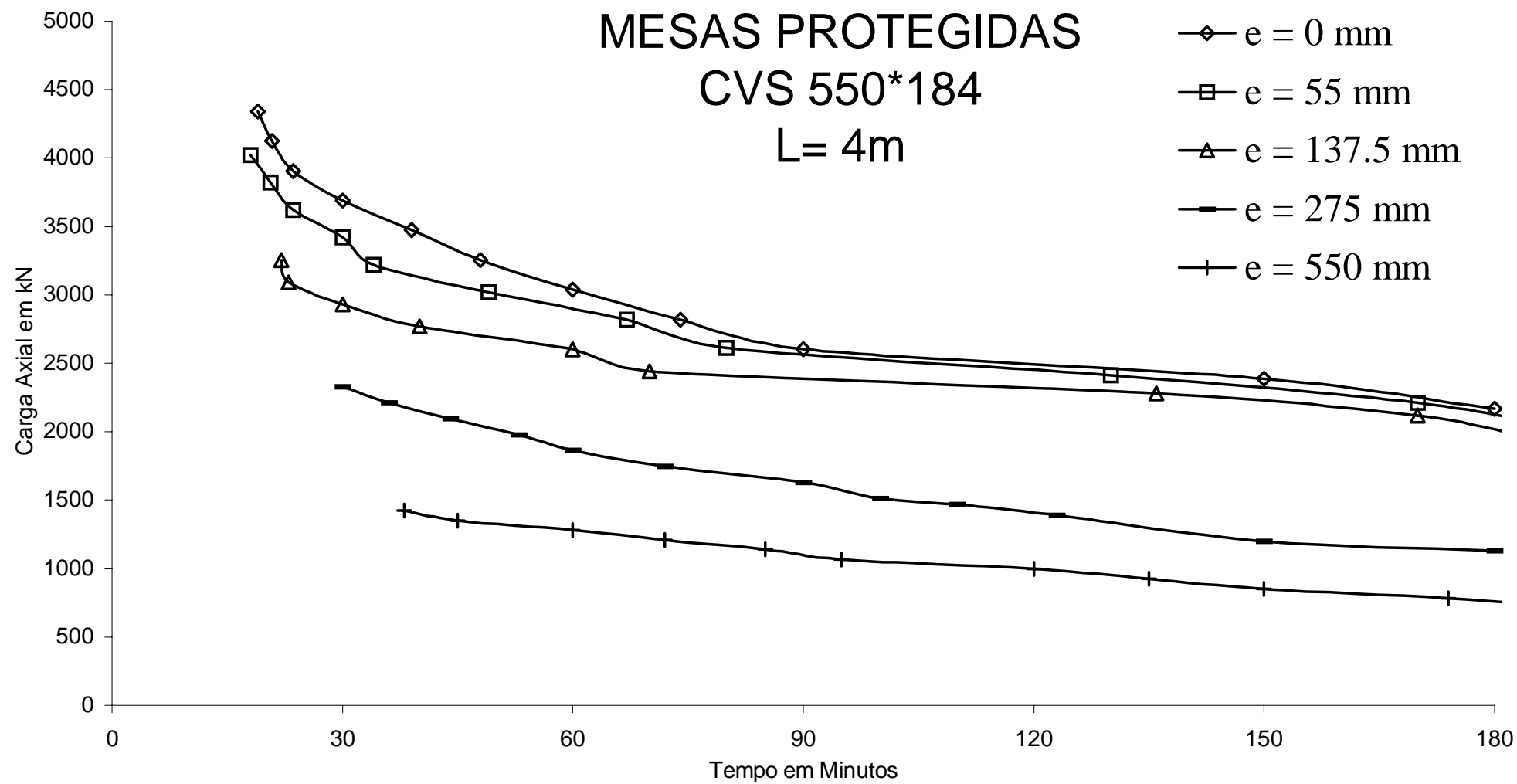


Figura 5.74 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 4 m.

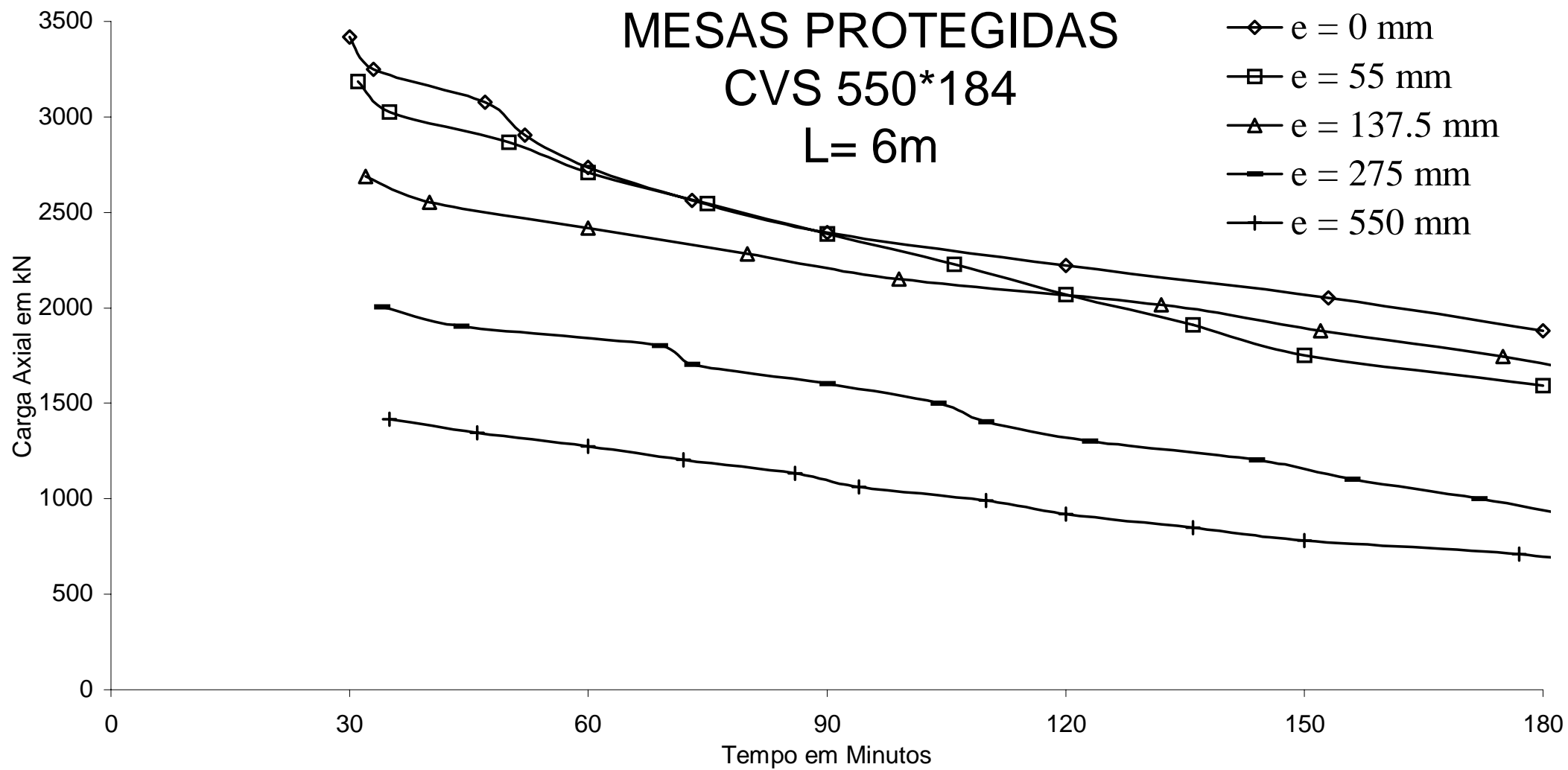


Figura 5.75 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 6 m.

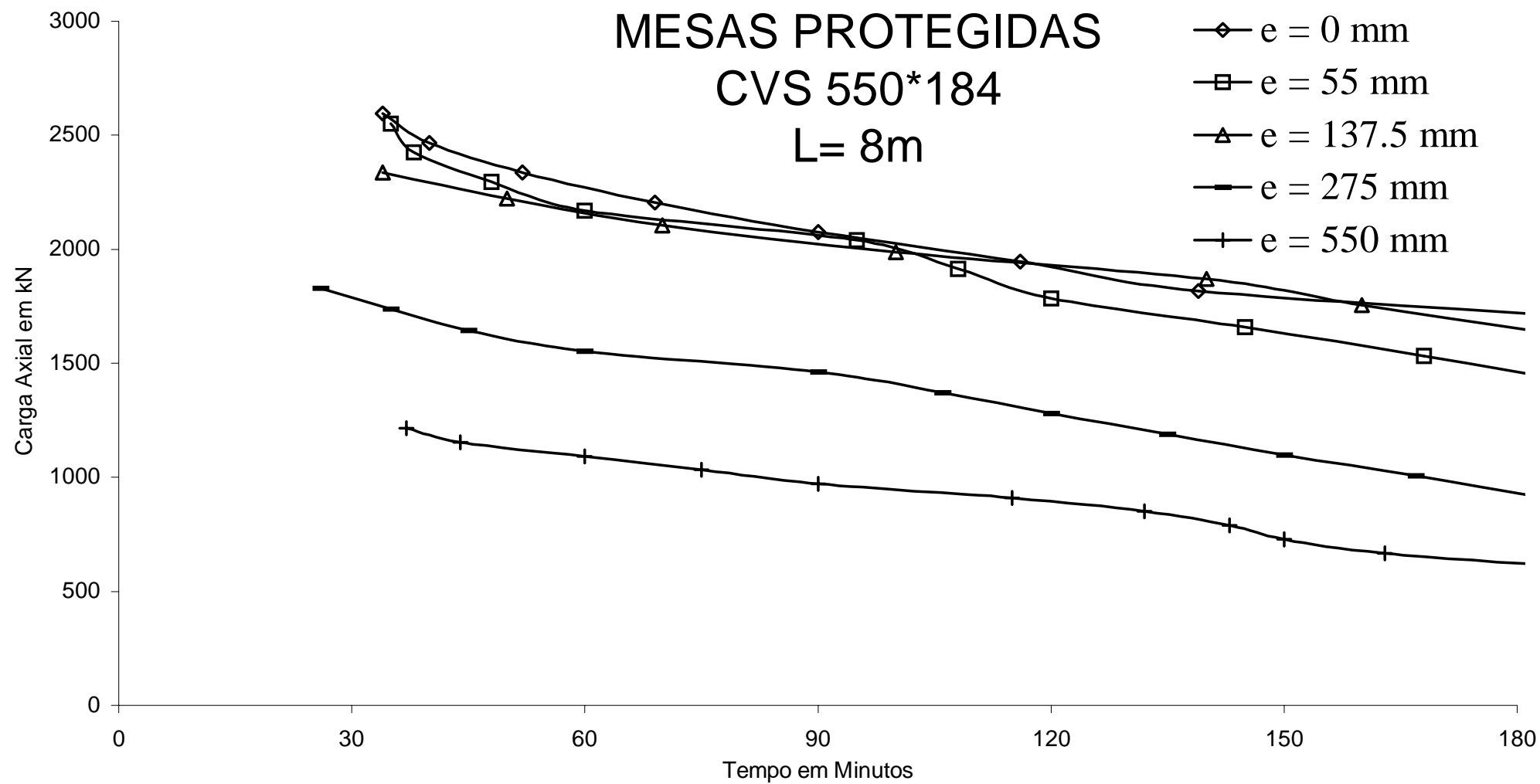


Figura 5.76 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO L

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF RETANGULAR

Perfil CVS 700 x 342 COM PROTEÇÃO DAS MESAS PROTEGIDAS

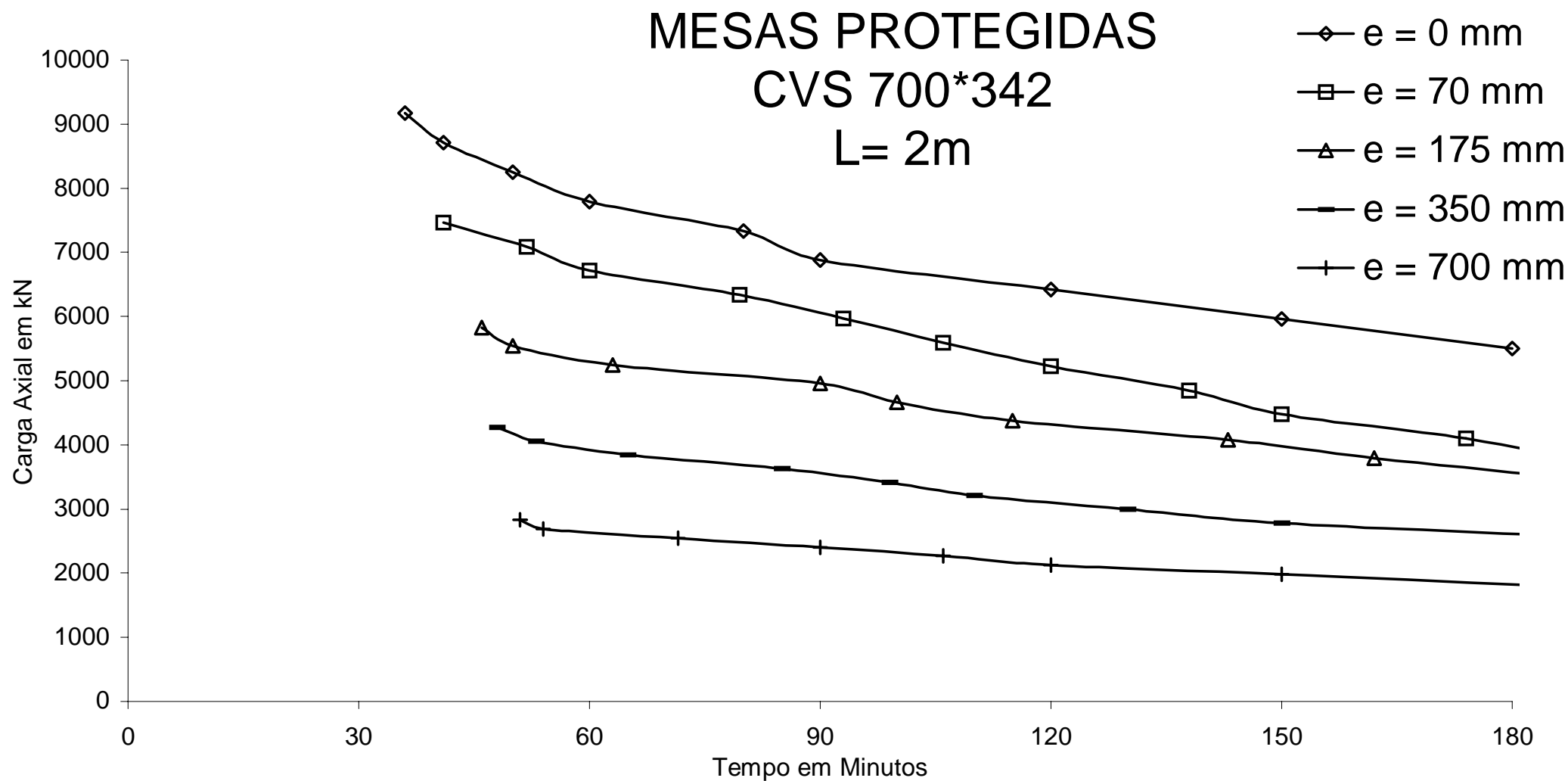


Figura 5.77 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 2 m.

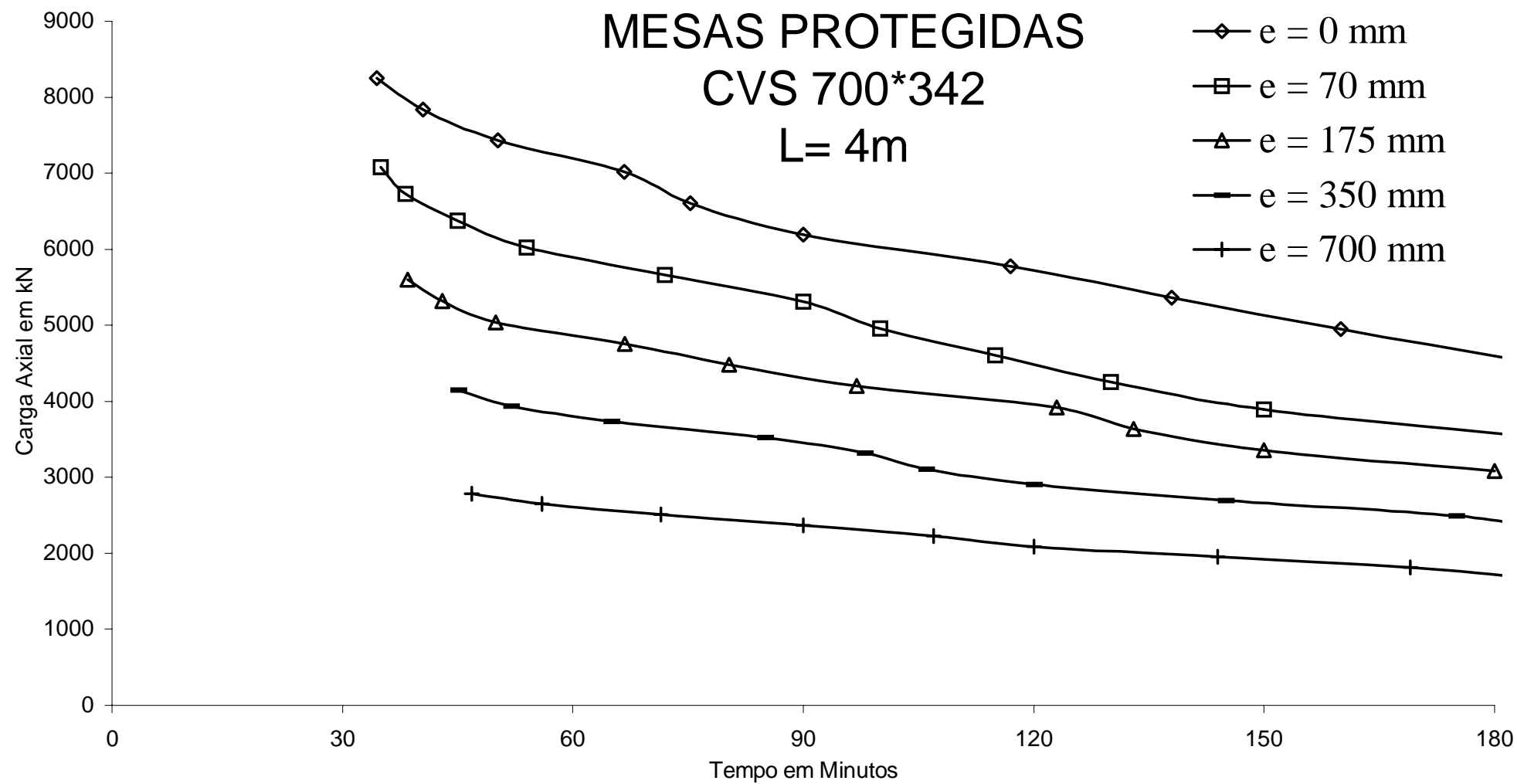


Figura 5.78 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 4 m.

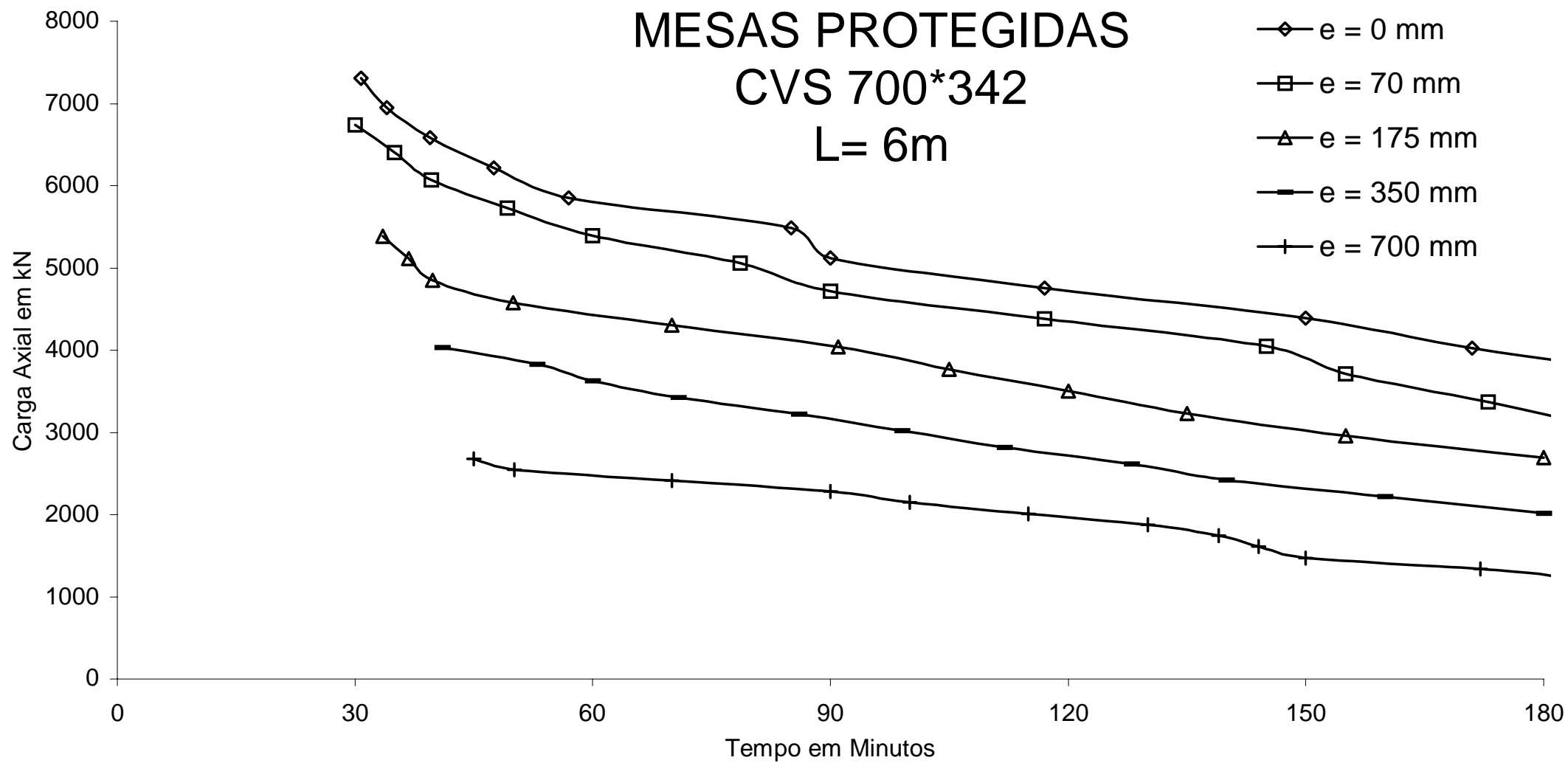


Figura 5.79 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 3 m.

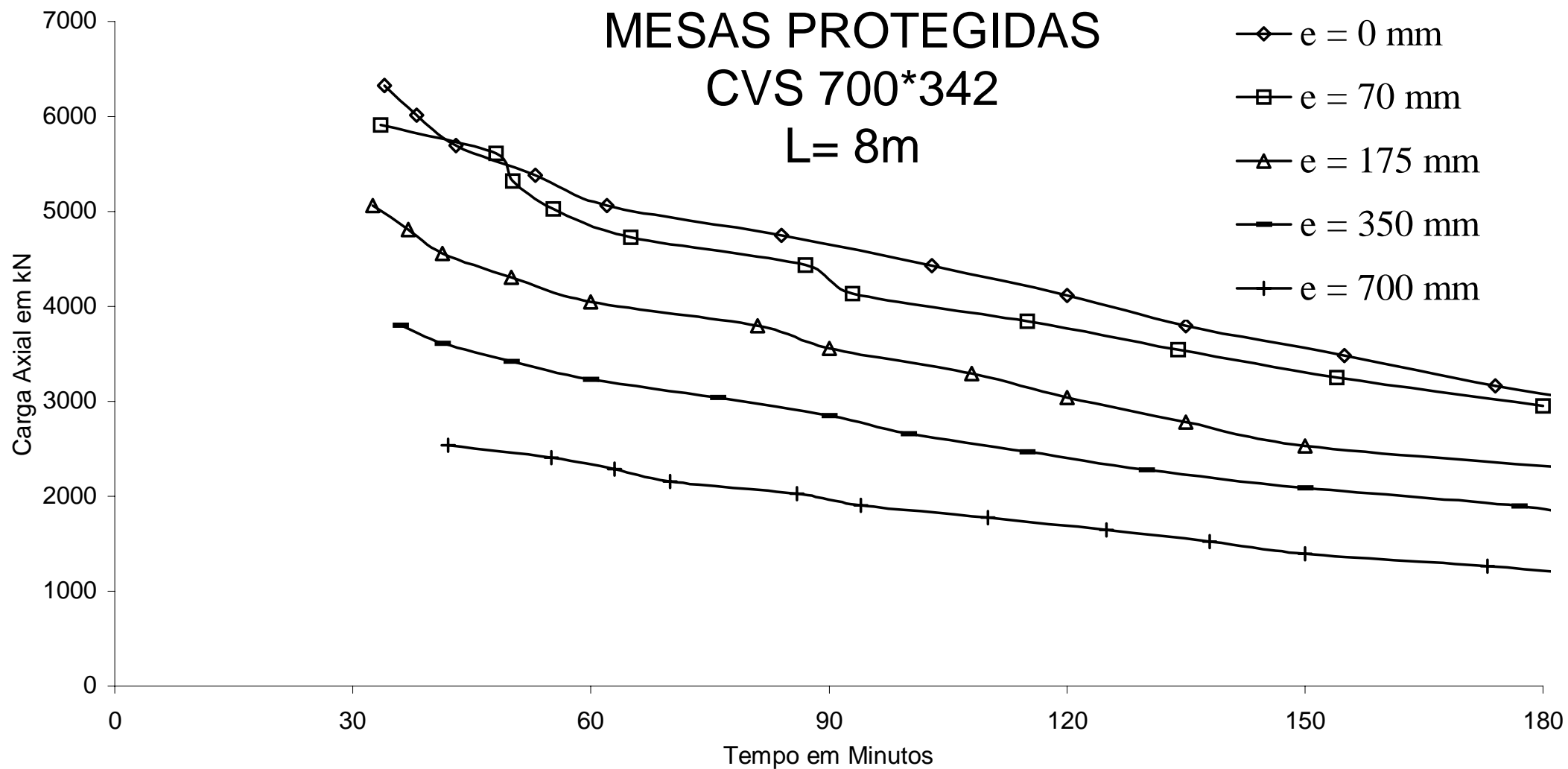


Figura 5.80 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO M

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF TRIANGULAR

PERFIL 330x113 COM PROTEÇÃO DA ALMA

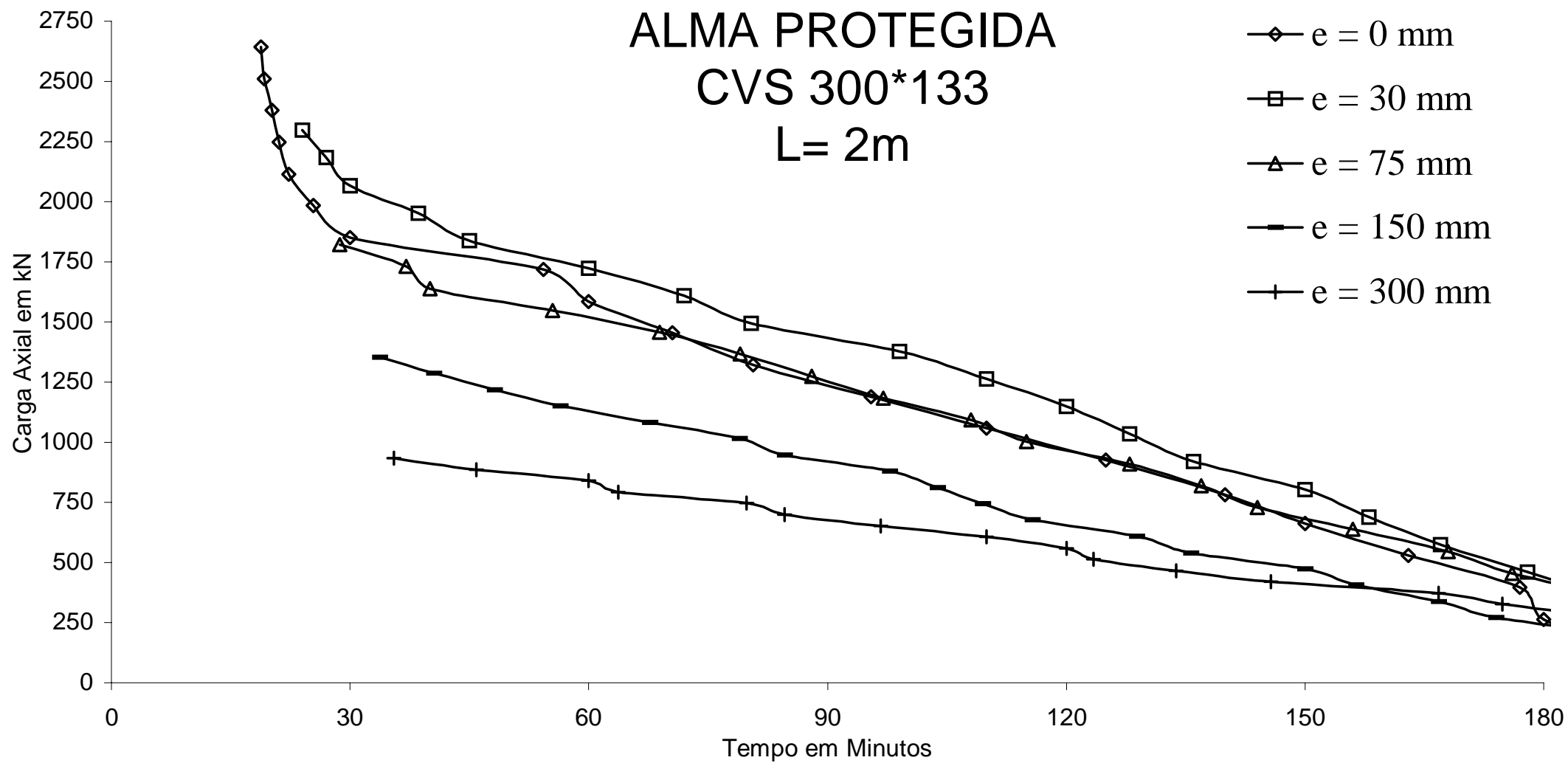


Figura 5.81 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 2 m.

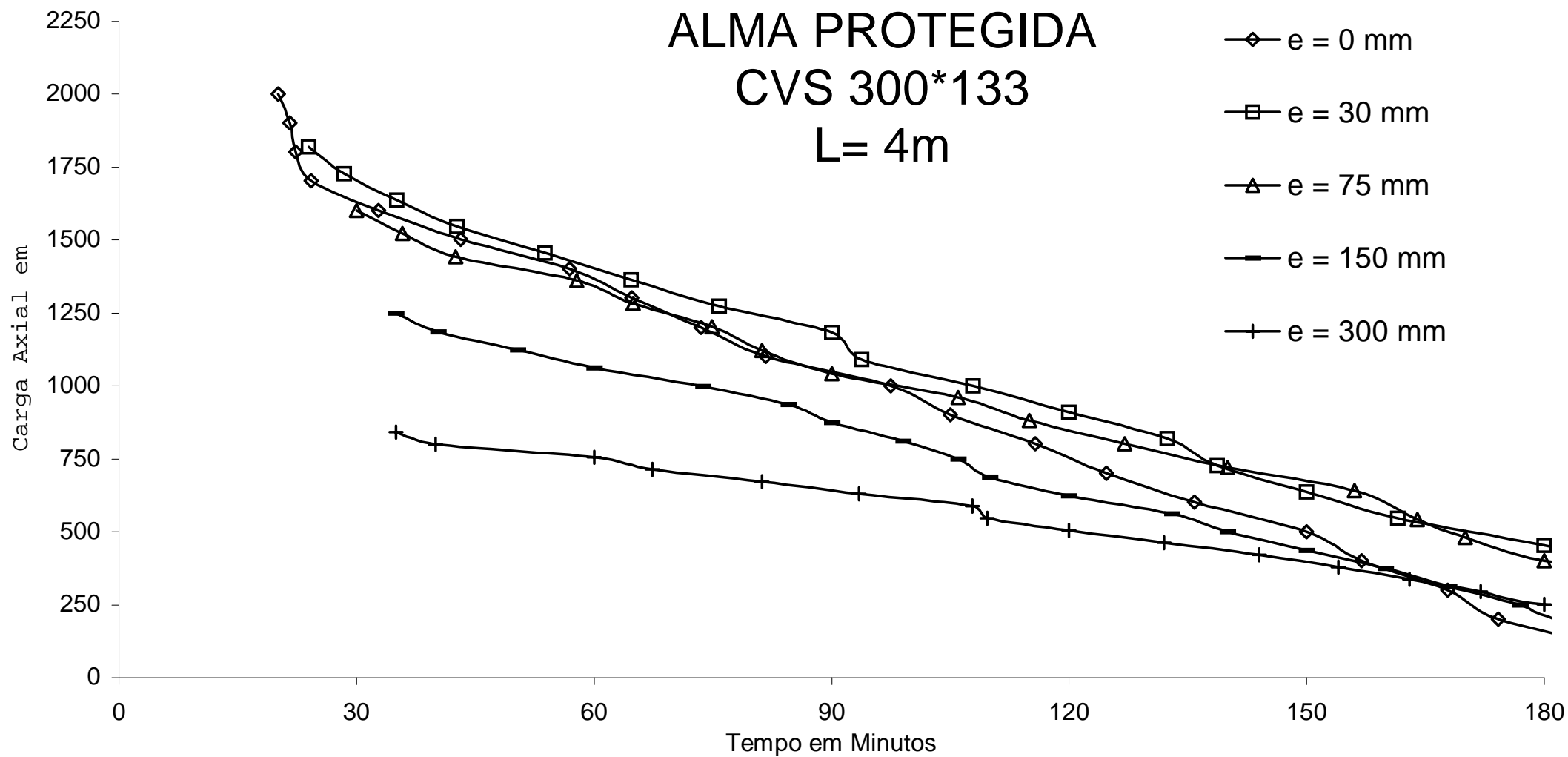


Figura 5.82 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 4 m.

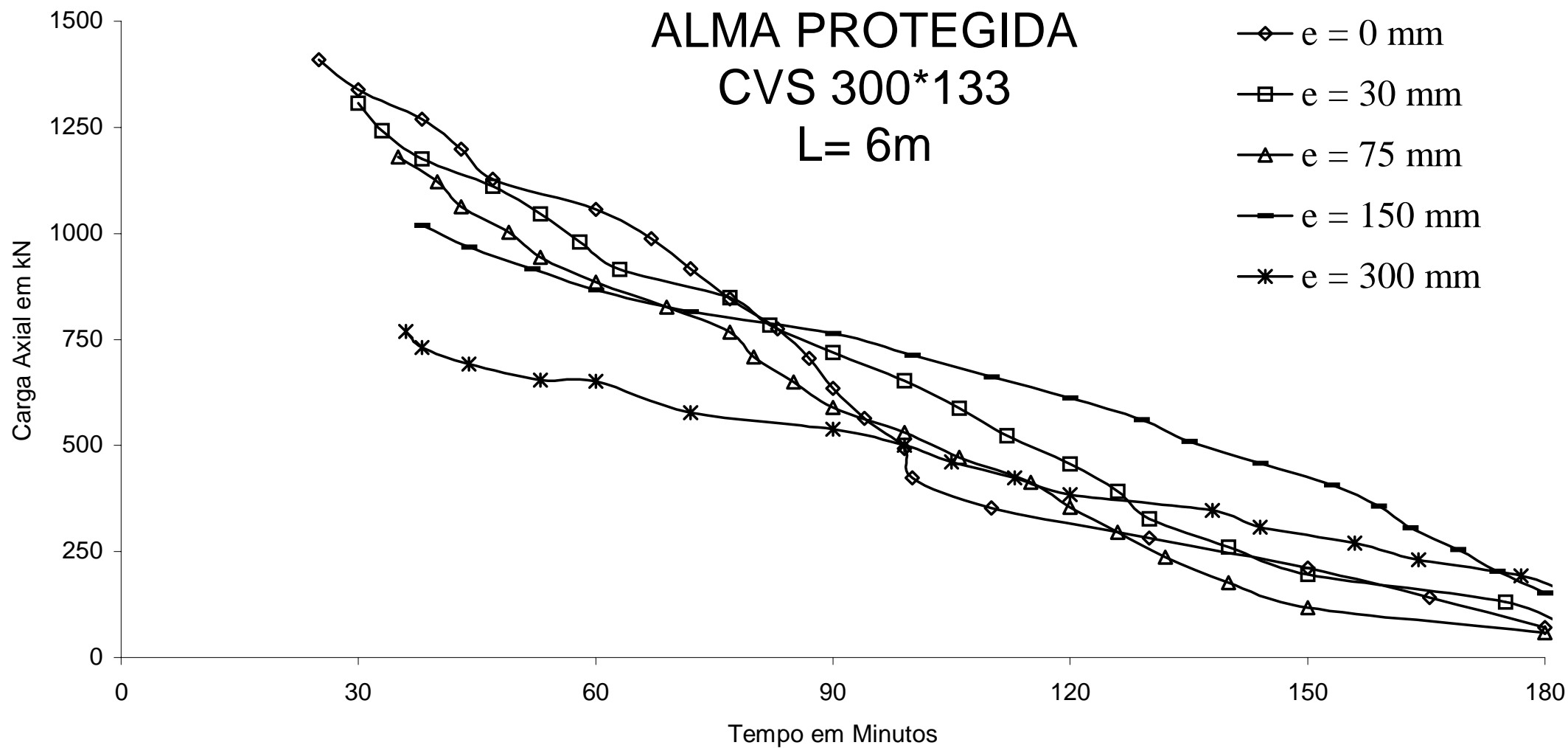


Figura 5.83 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 6 m.

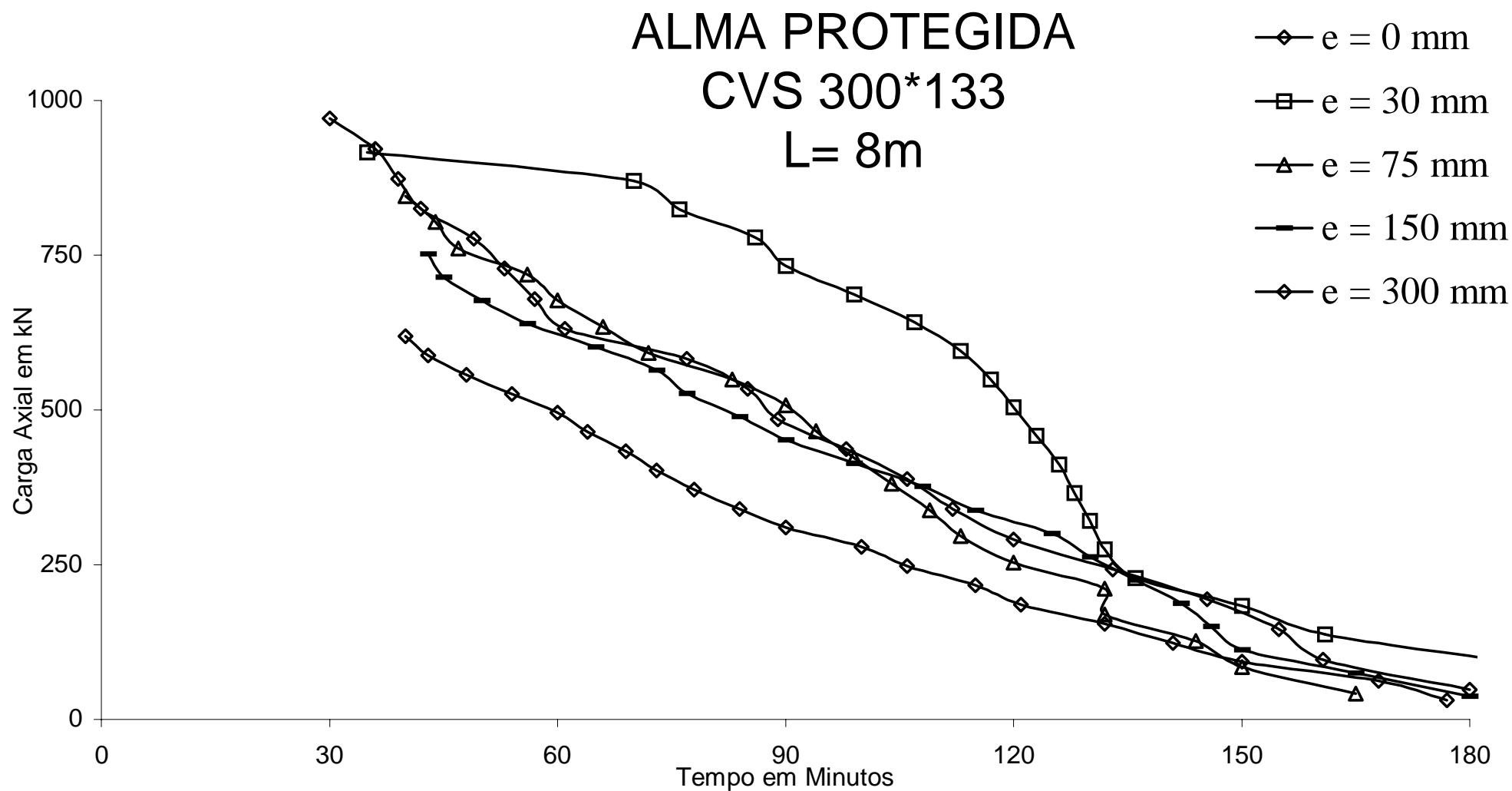


Figura 5.84 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO N

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF TRIANGULAR

Perfil CVS 550 x 184 COM PROTEÇÃO DA ALMA

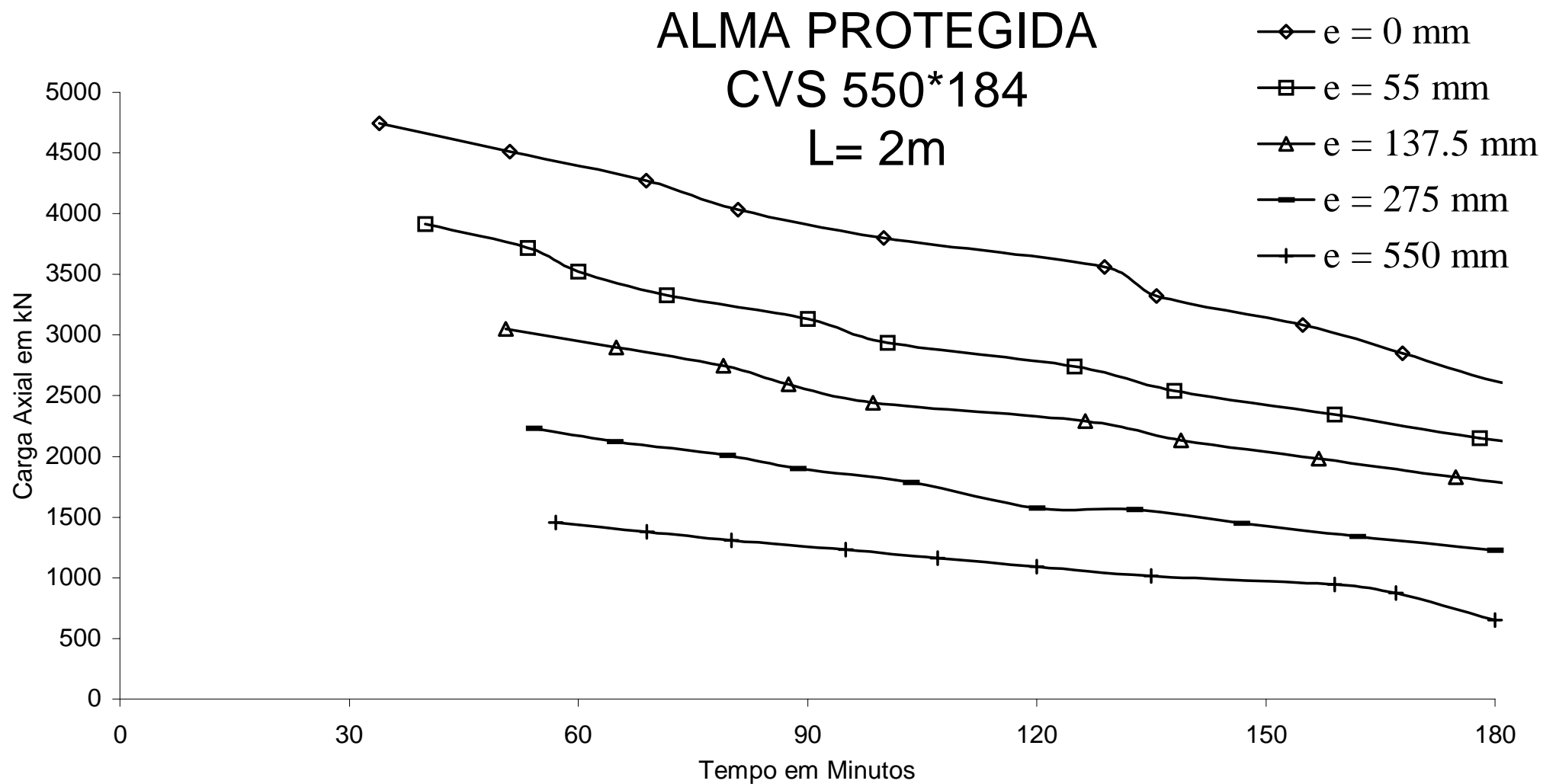


Figura 5.85 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 2 m.

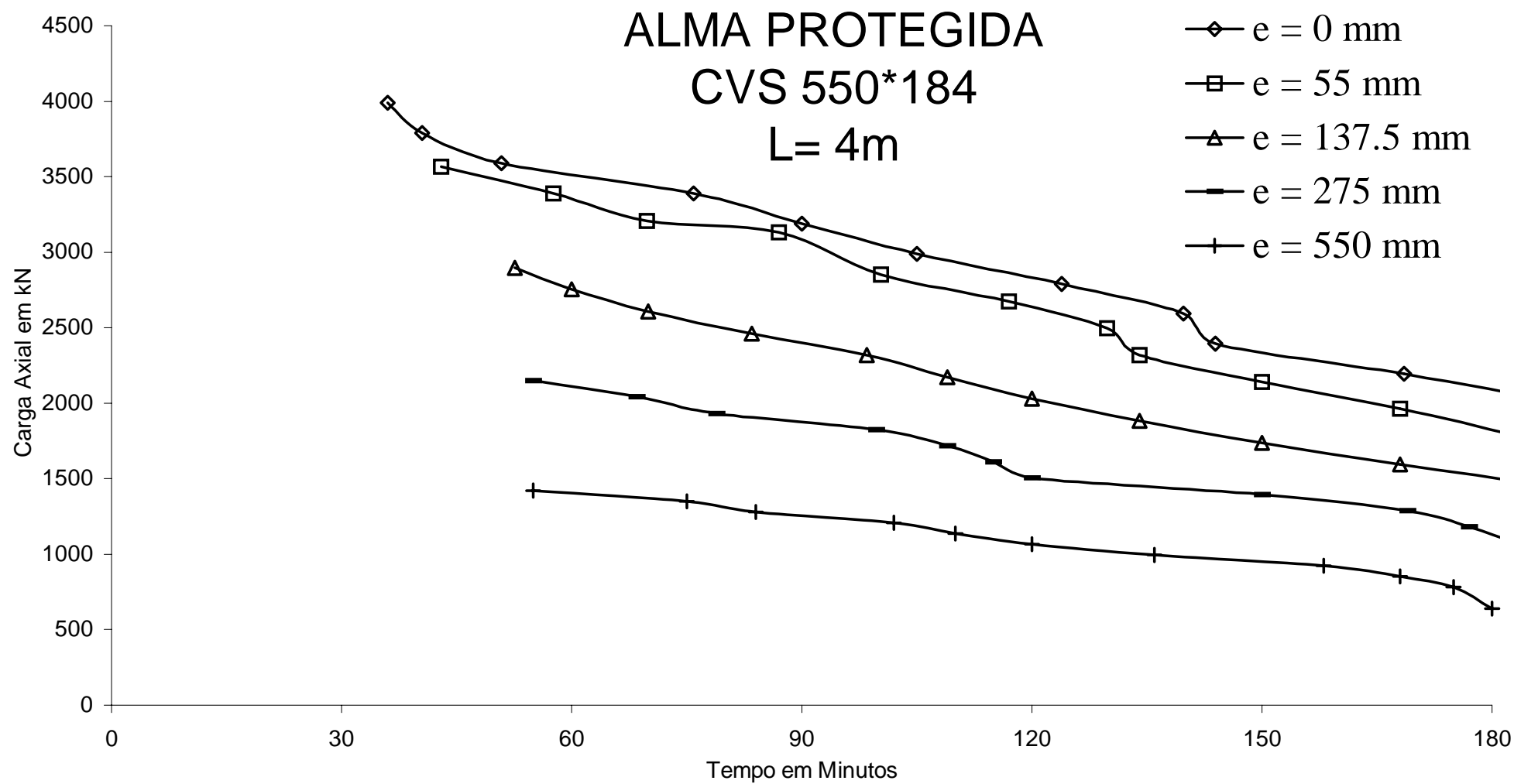


Figura 5.86 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 4 m.

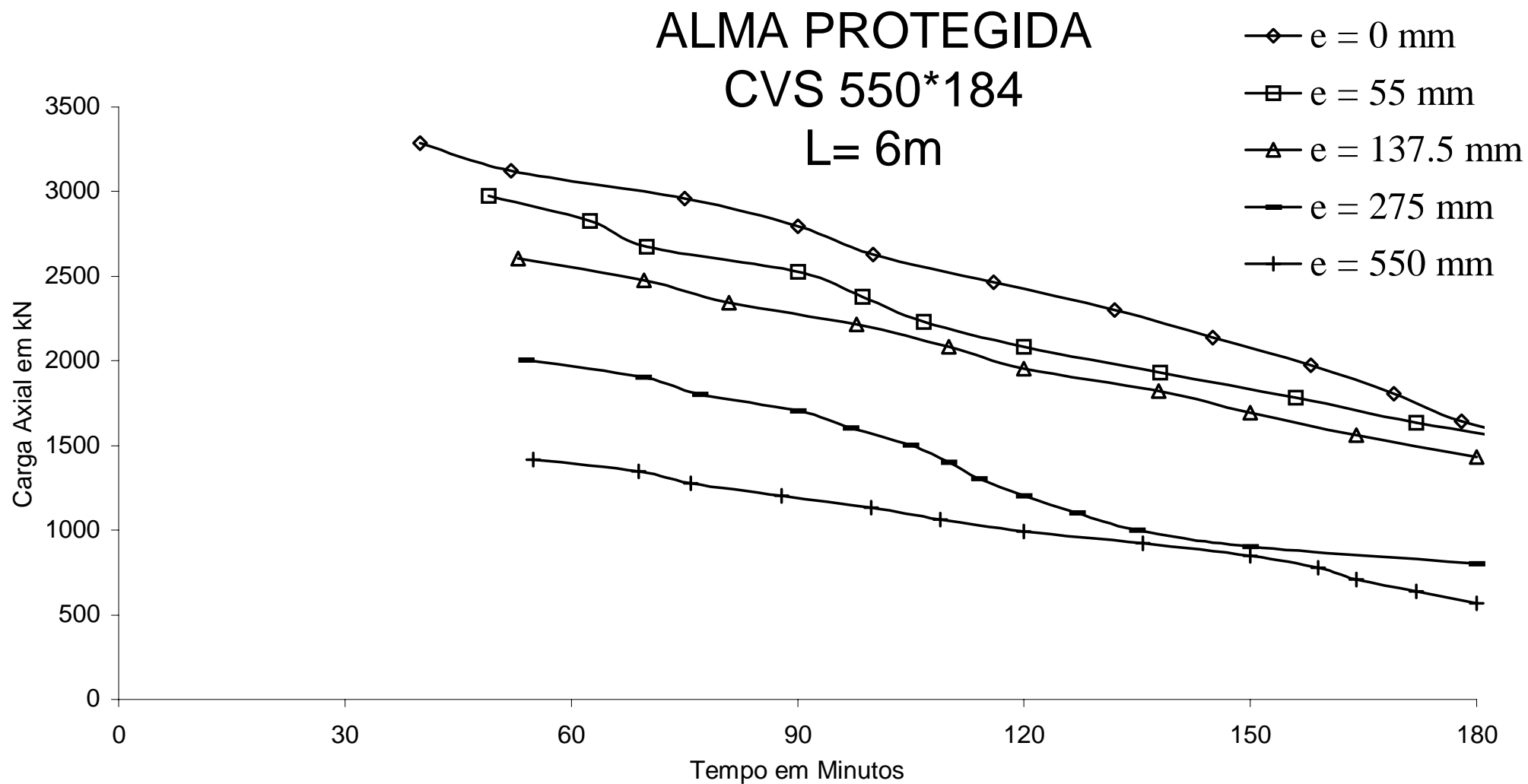


Figura 5.87 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 6 m.

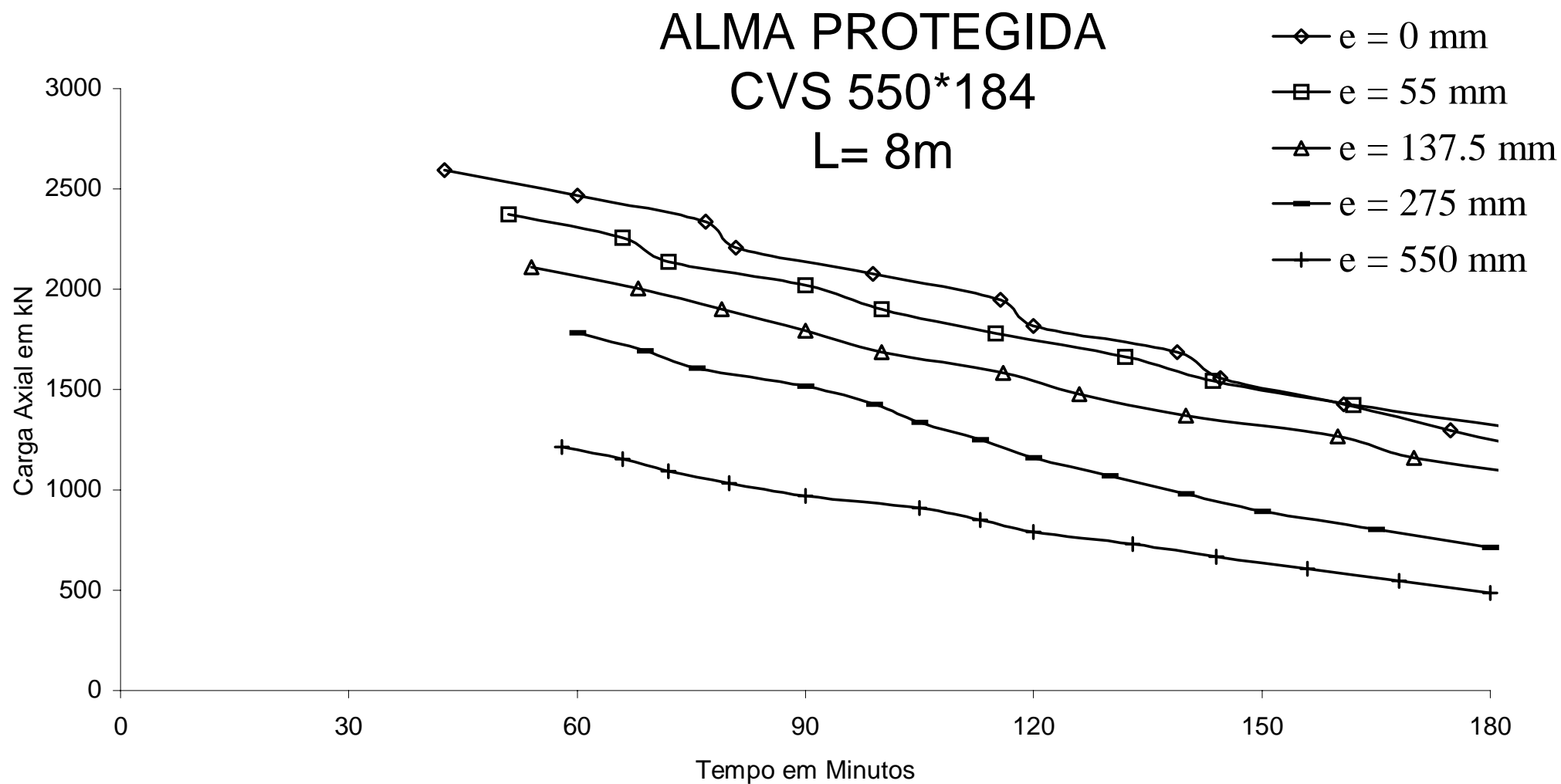


Figura 5.88 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO O

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF TRIANGULAR

Perfil CVS 700 x 342 COM PROTEÇÃO DA ALMA

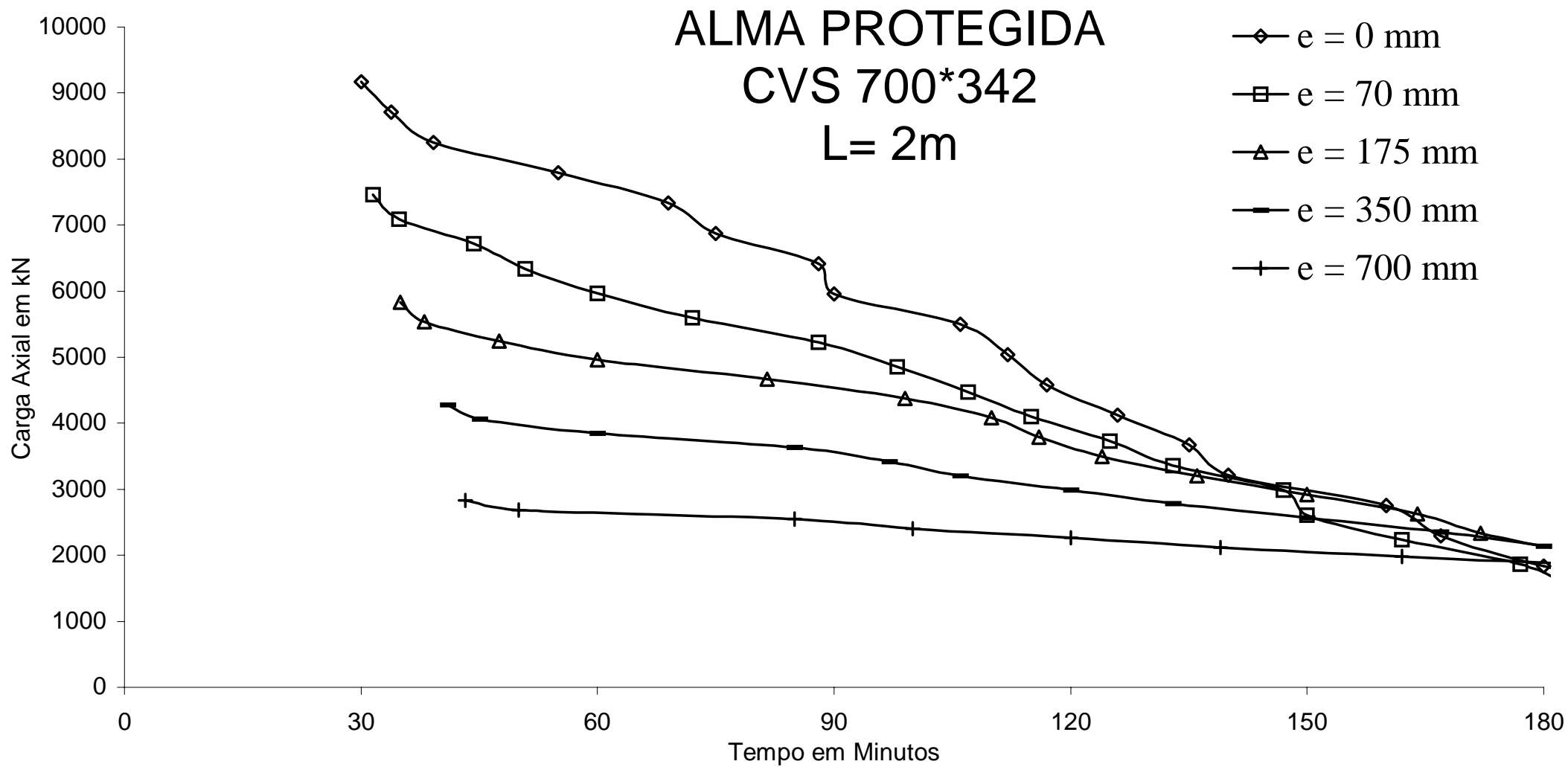


Figura 5.89 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 2 m.

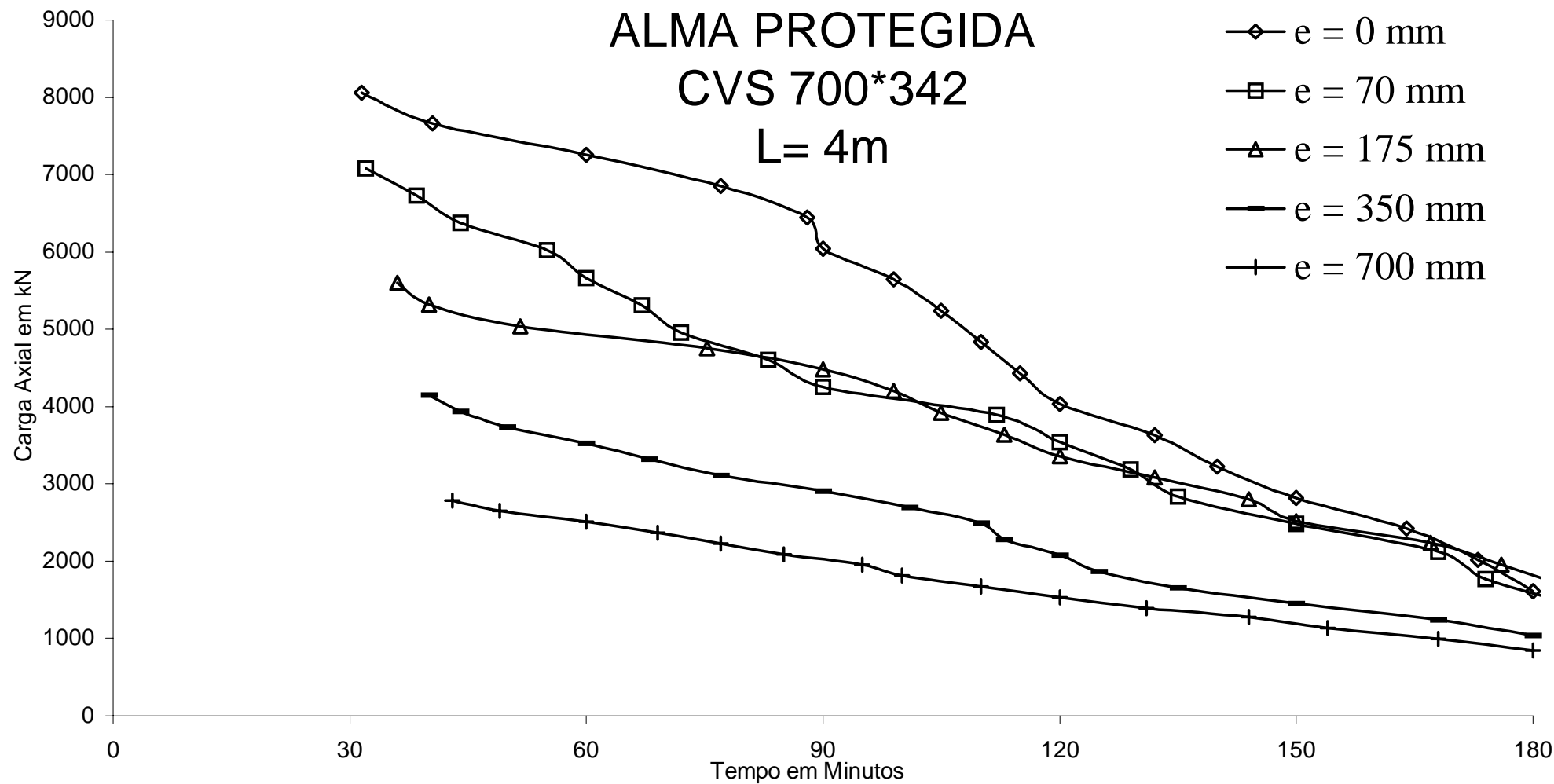


Figura 5.90 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 4 m.

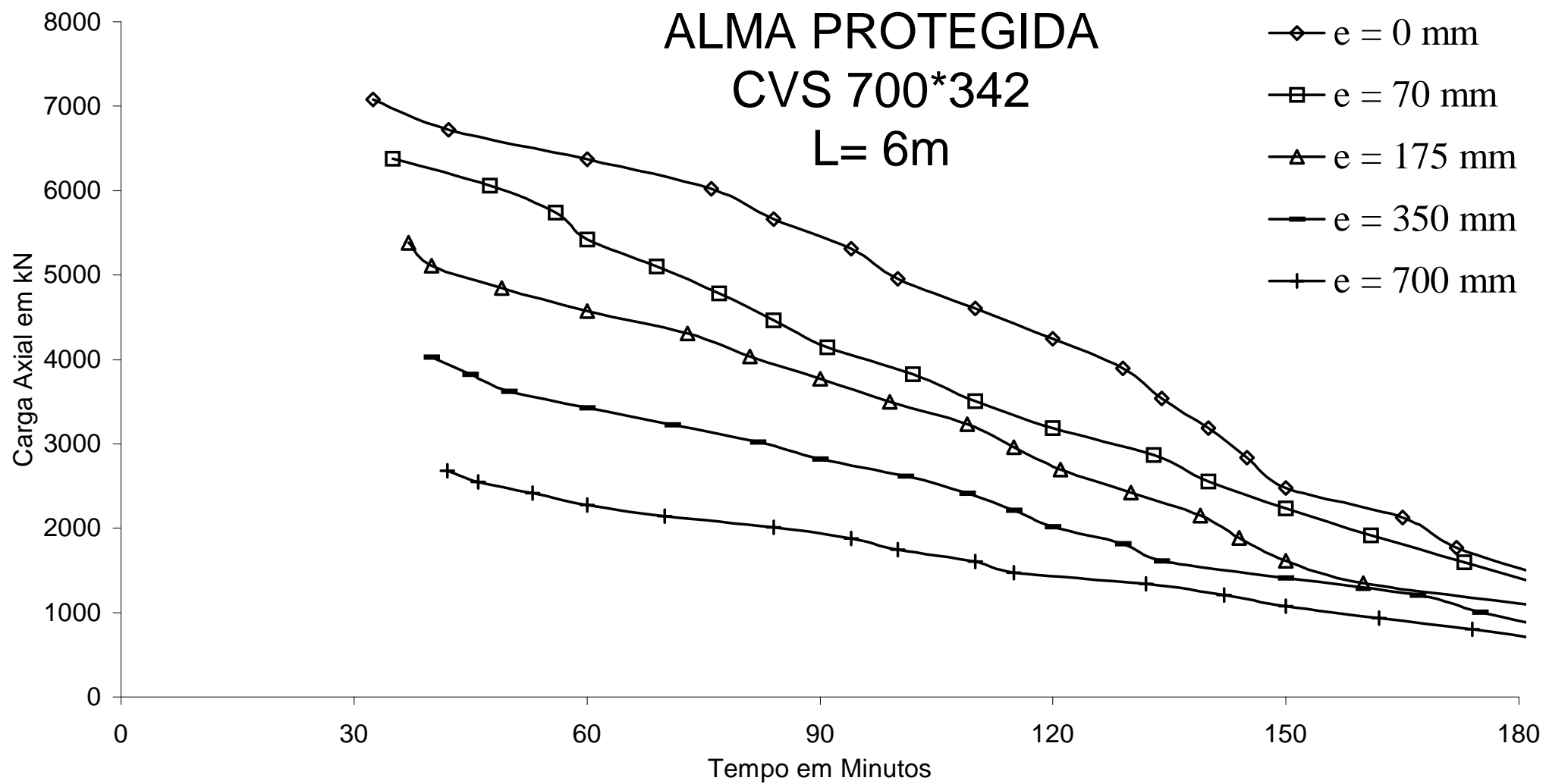


Figura 5.91 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 6 m.

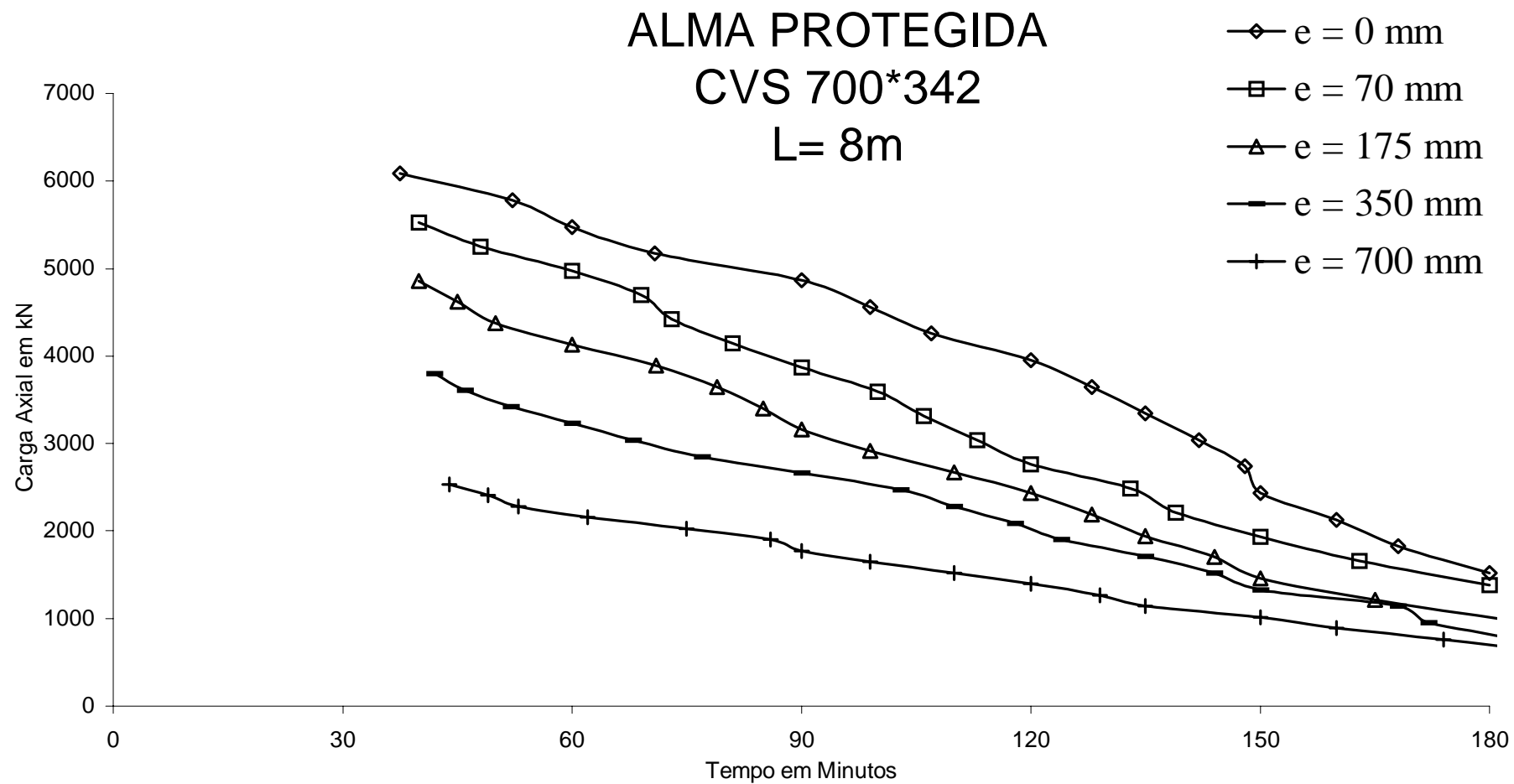


Figura 5.92 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO P

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF TRIANGULAR

PERFIL 330x113 COM PROTEÇÃO DAS MESAS

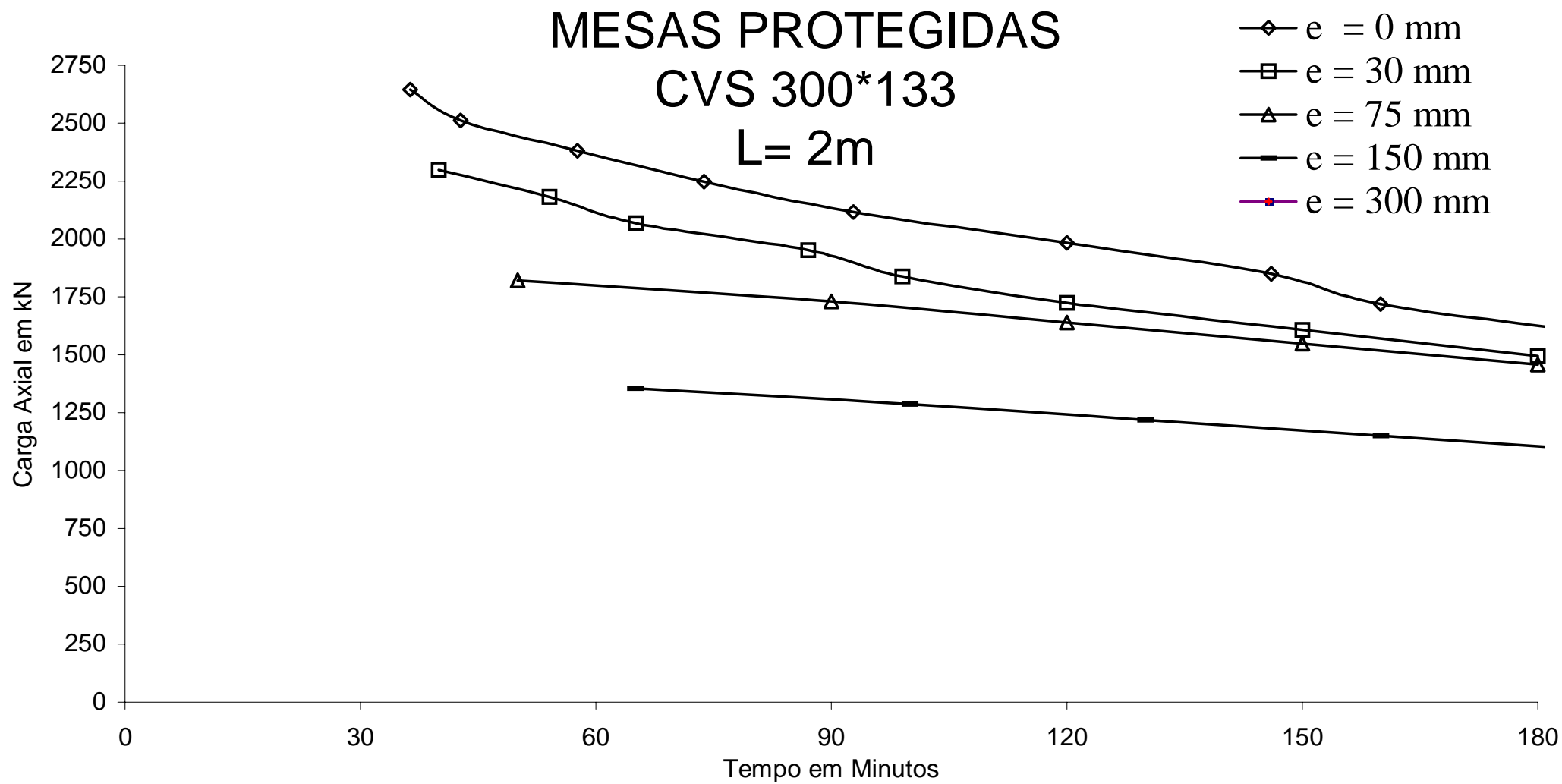


Figura 5.93 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 2 m.

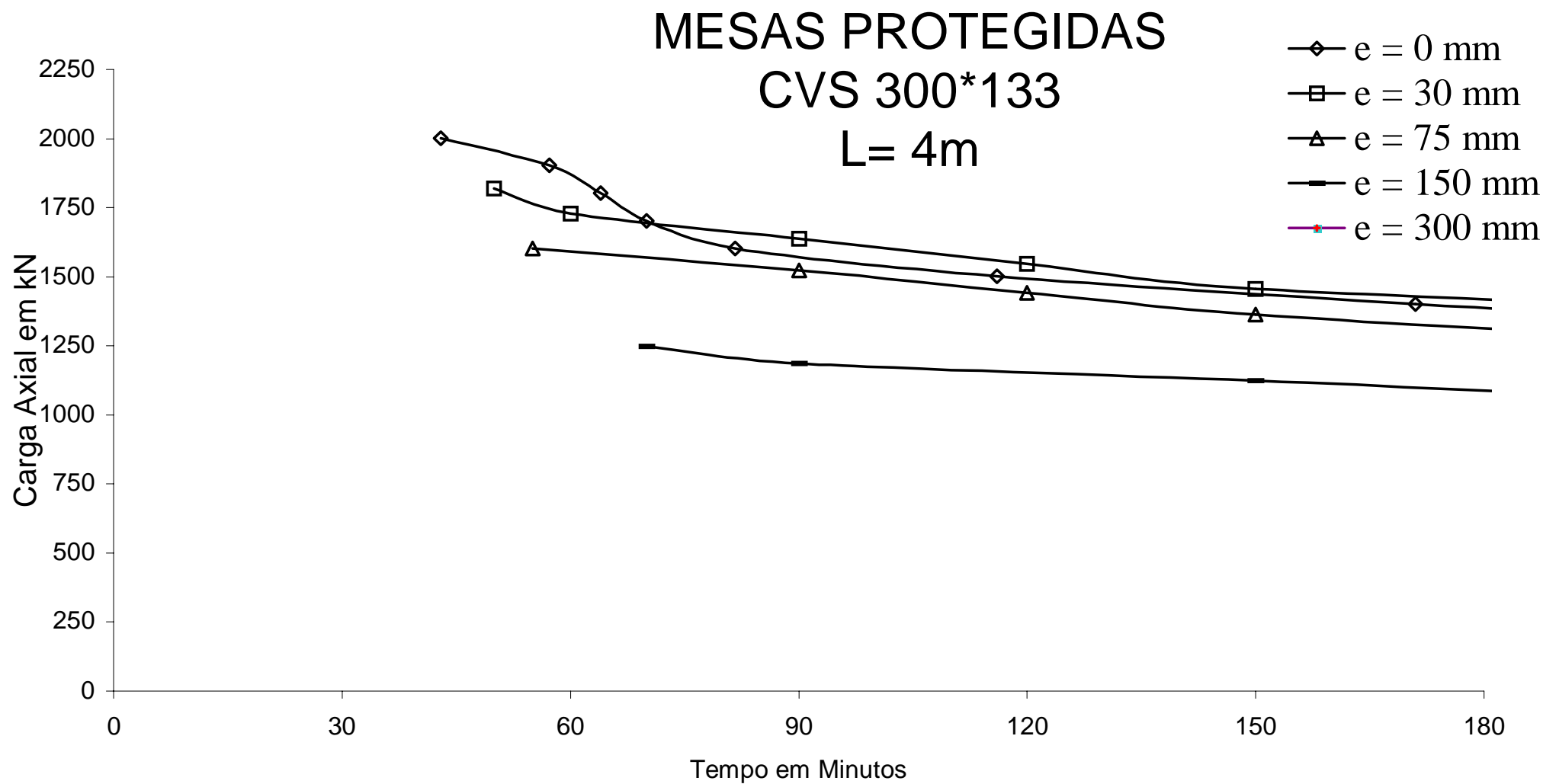


Figura 5.94 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 4 m.

MESAS PROTEGIDAS CVS 300*133 L= 6m

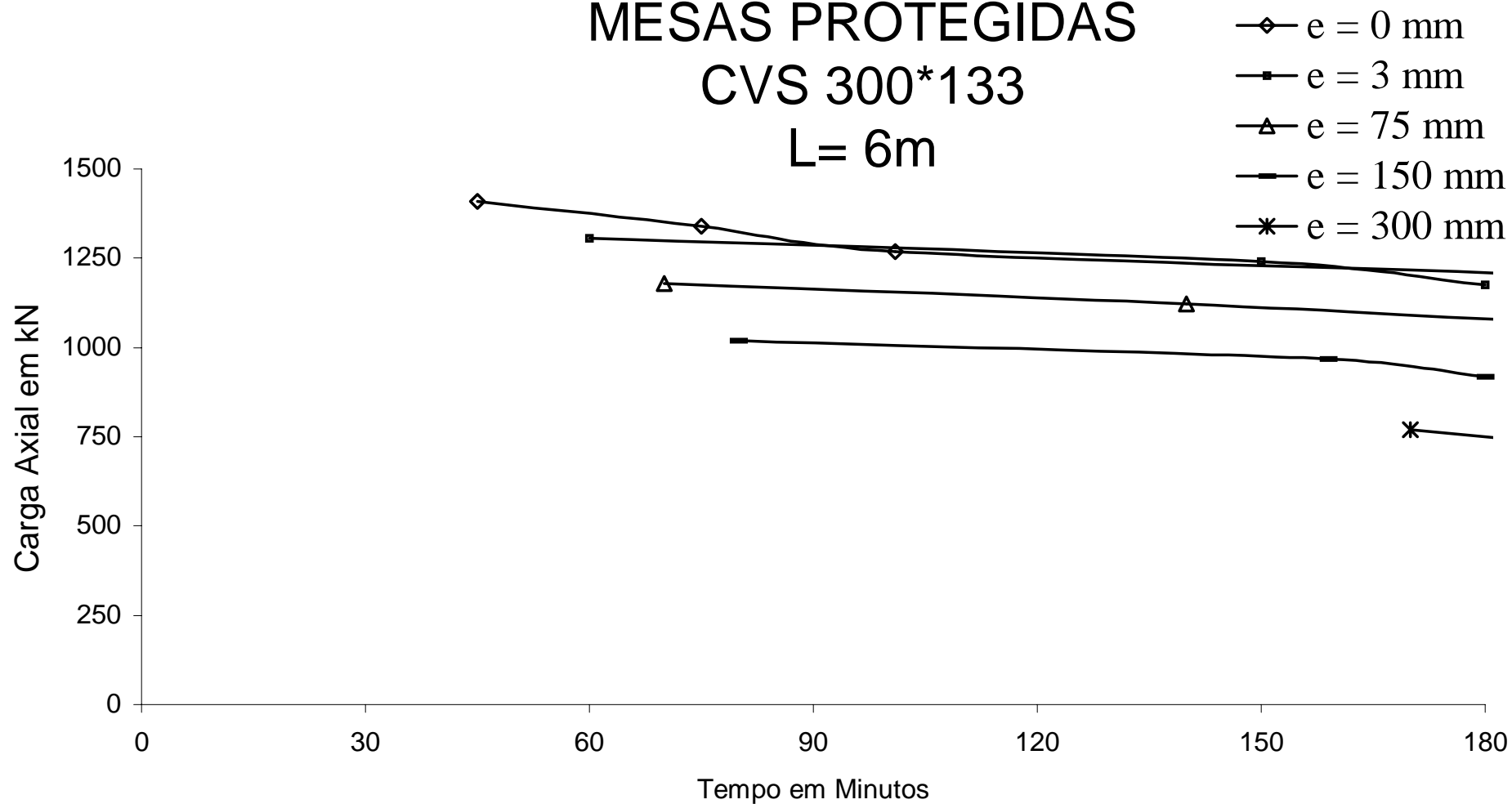


Figura 5.95 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 6 m.

MESAS PROTEGIDAS

CVS 300*113

L= 8m

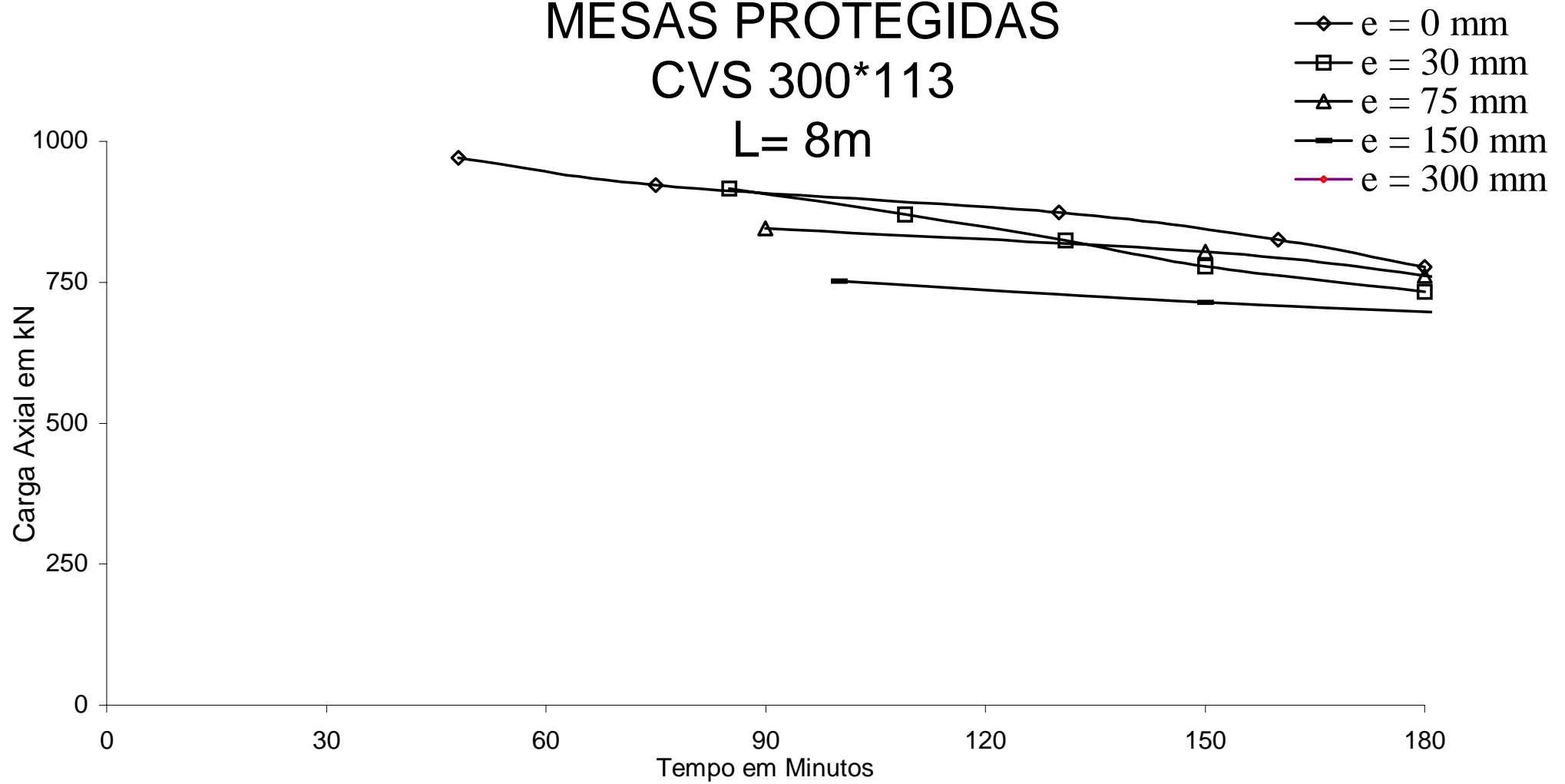


Figura 5.96 - Curvas de resistência, para perfil CVS 300 x 113 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO Q

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF TRIANGULAR

Perfil CVS 550 x 184 COM PROTEÇÃO DA ALMA

MESAS PROTEGIDAS CVS 550*184 L= 2m

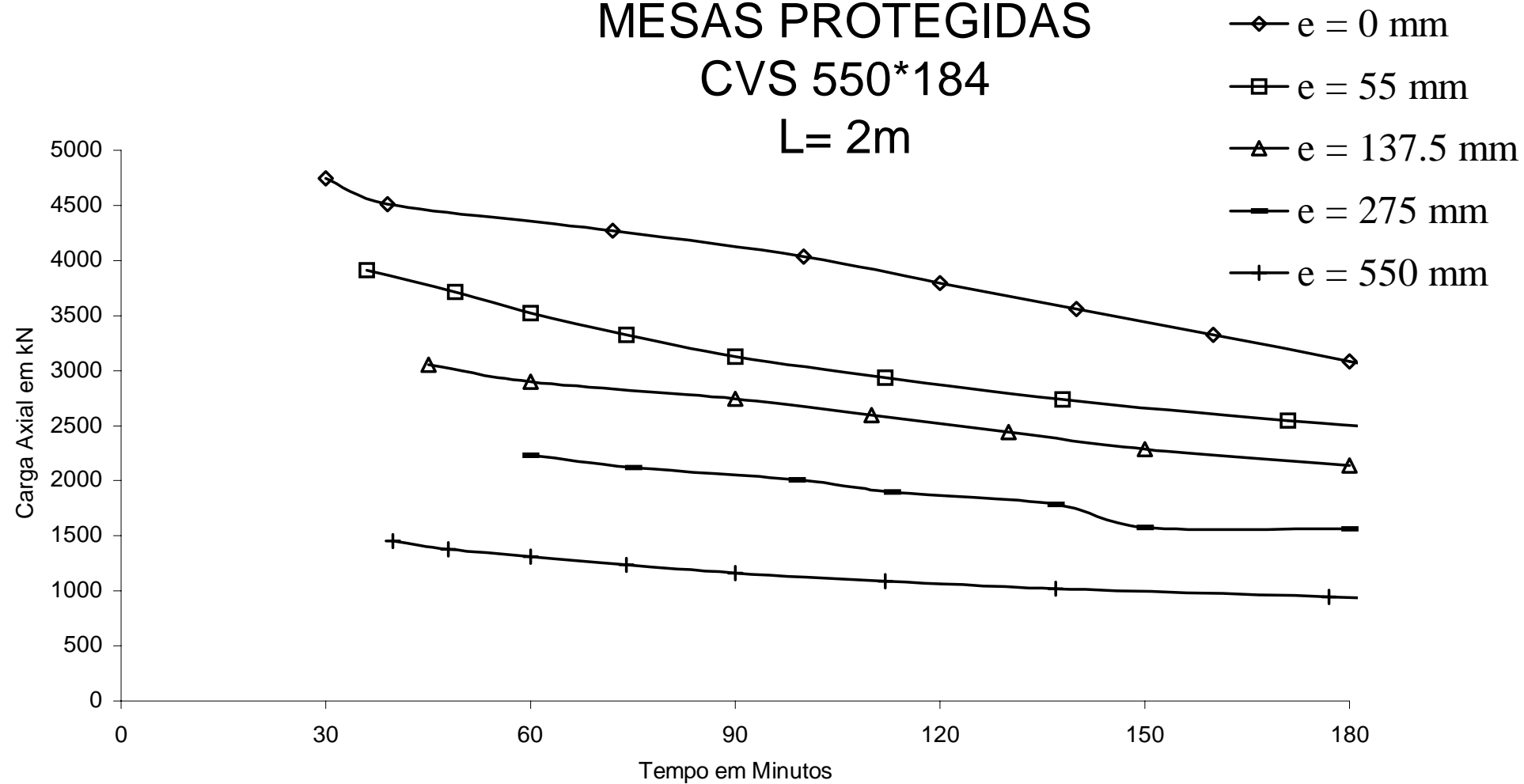


Figura 5.97 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 2 m.

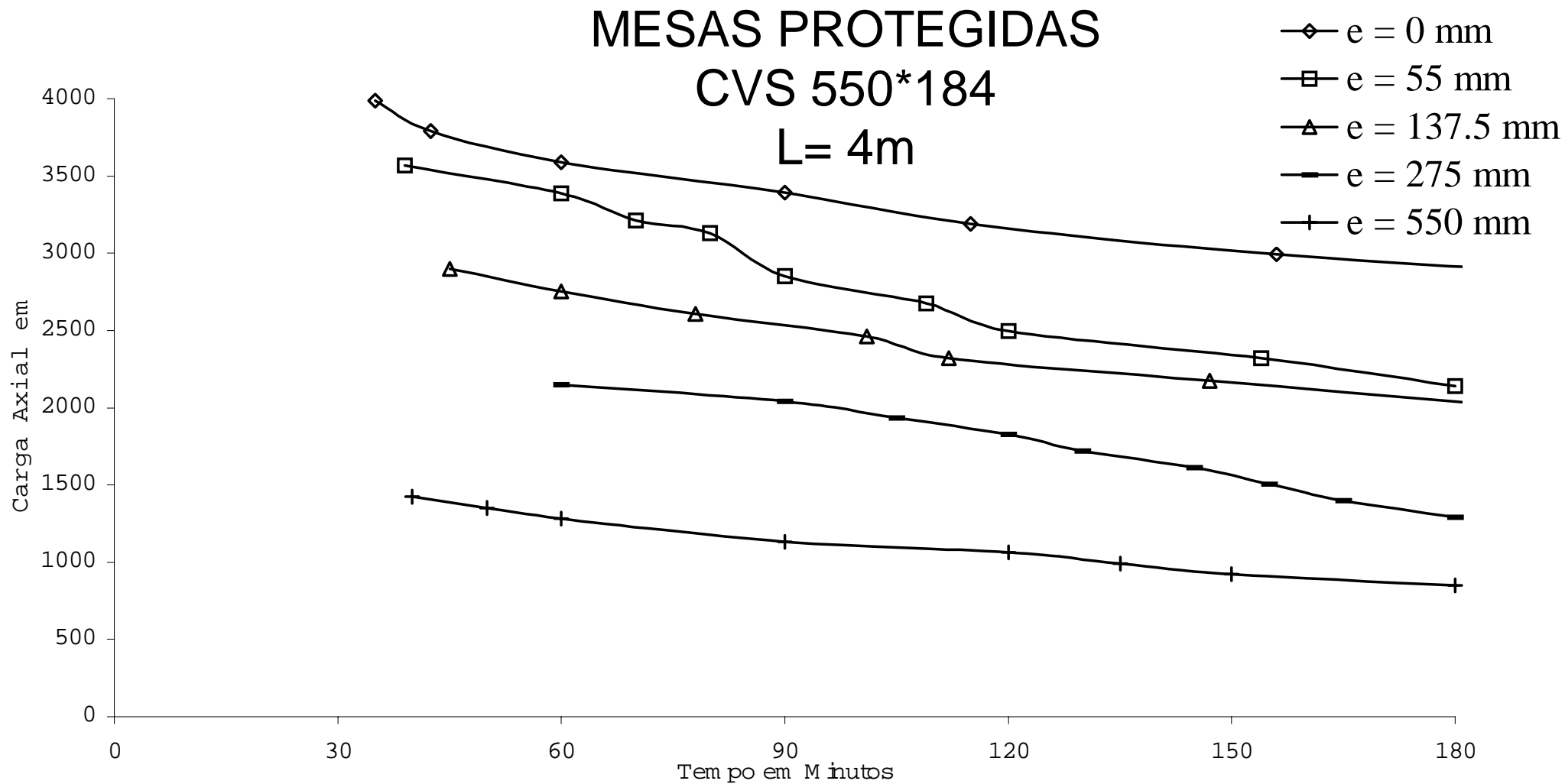


Figura 5.98 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 4 m.

MESAS PROTEGIDAS CVS 550*184 L= 6m

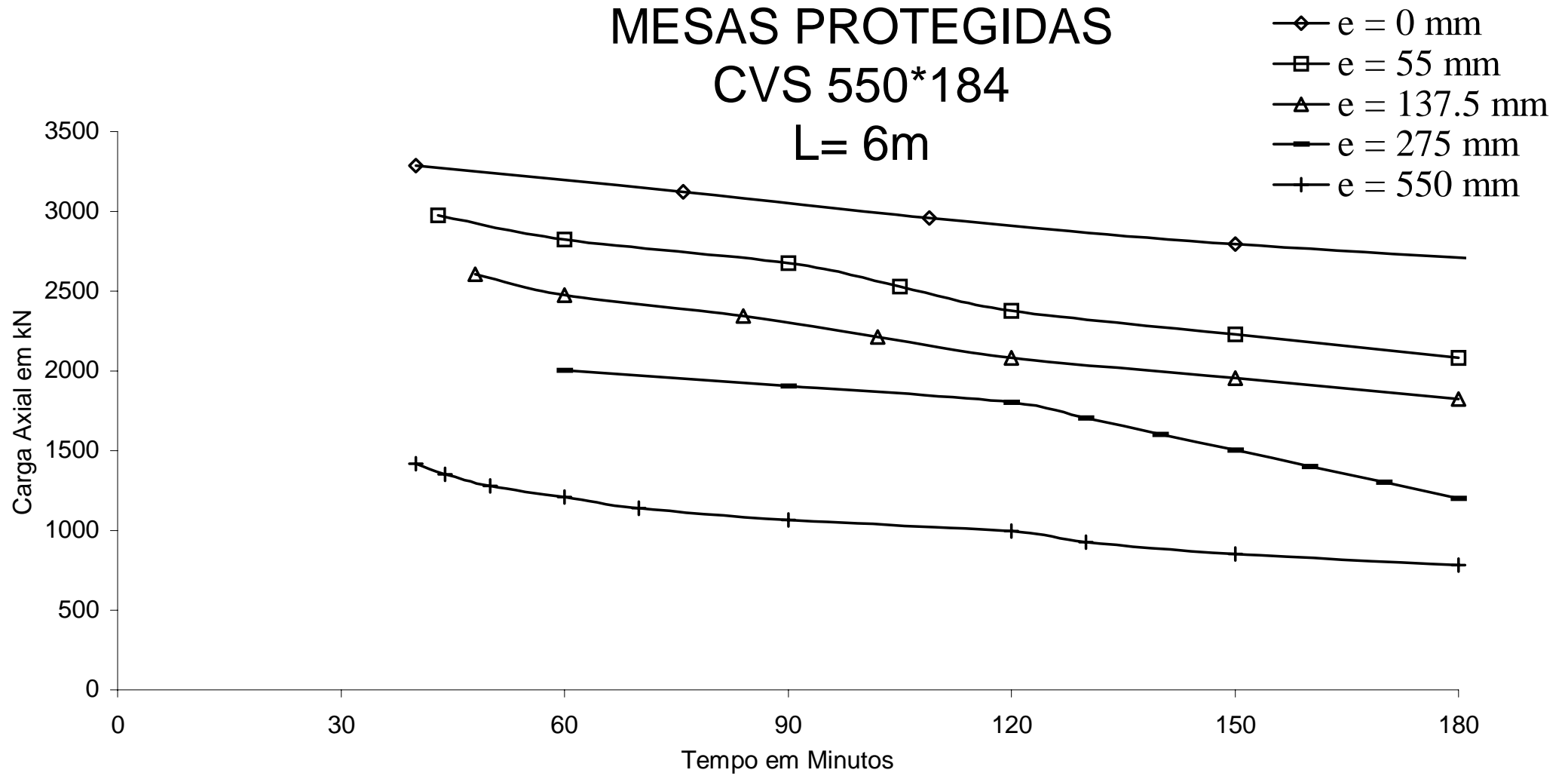


Figura 5.99 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 6 m.

MESAS PROTEGIDAS CVS 550*184 L= 8m

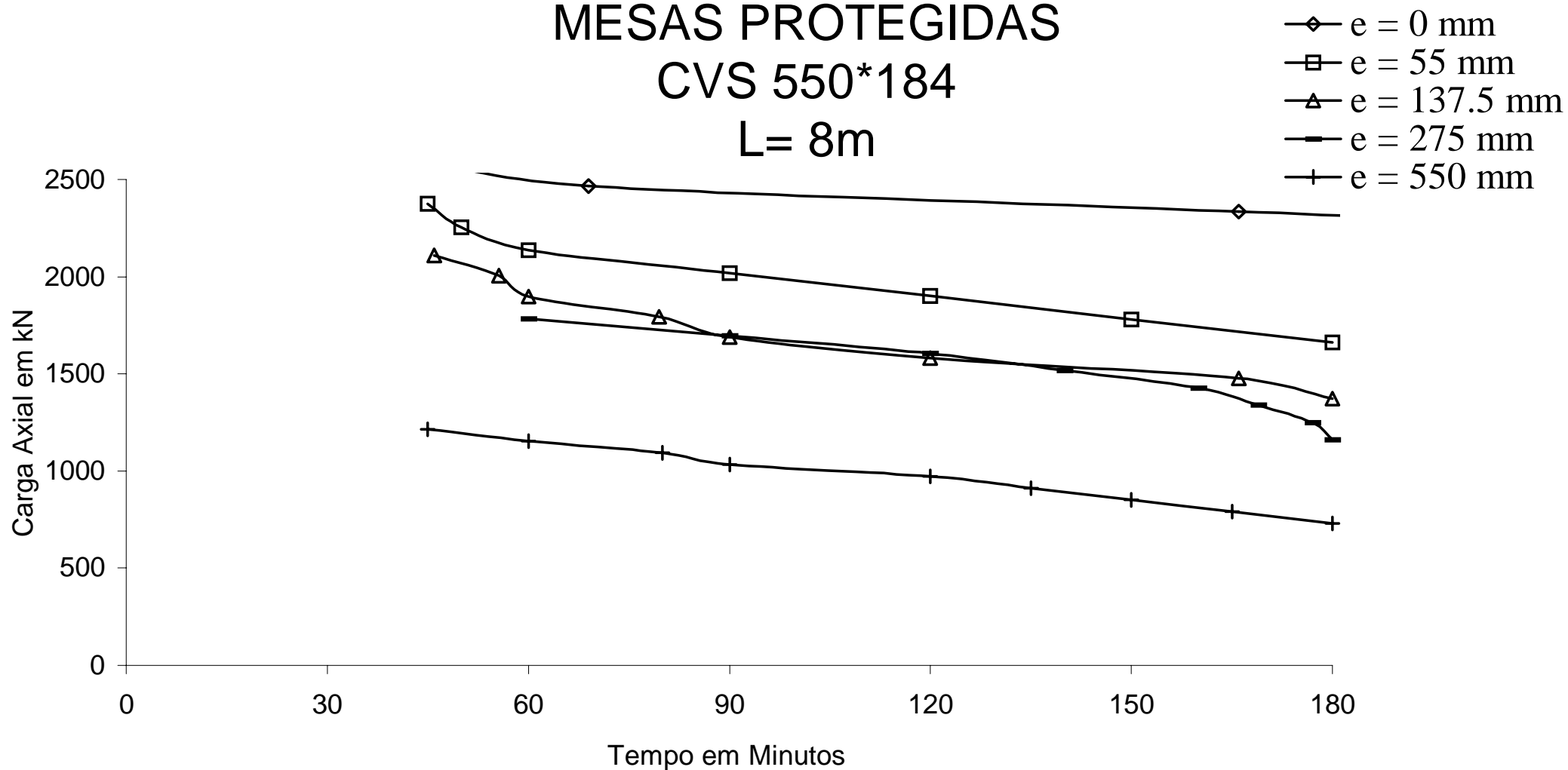


Figura 5.100 - Curvas de resistência, para perfil CVS 550 x 184 com proteção e comprimento 8 m.

ANEXO R

CURVAS DE RESISTÊNCIA DMF TRIANGULAR

Perfil CVS 700 x 342 COM PROTEÇÃO DAS MESAS

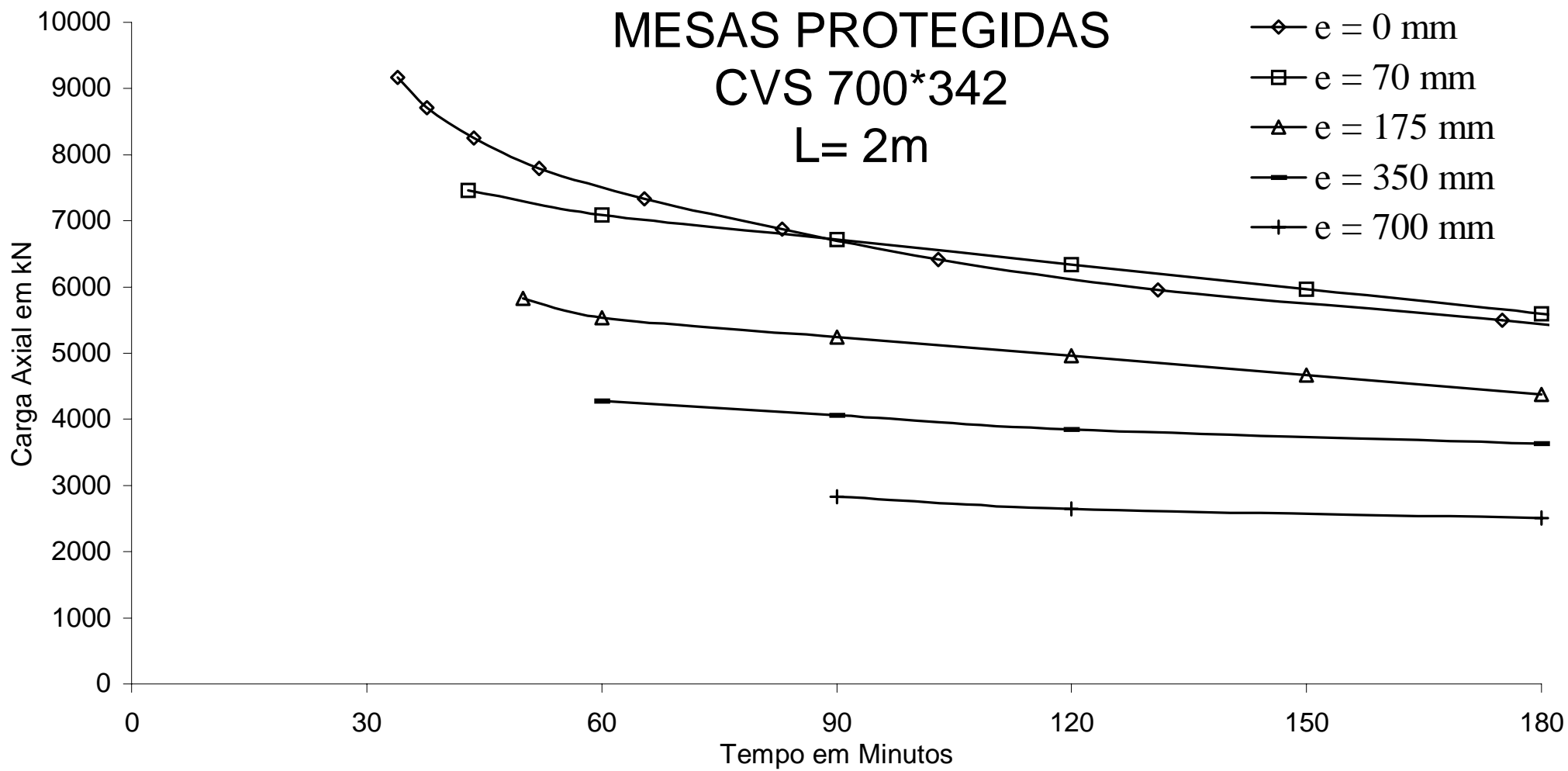


Figura 5.101 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 2 m.

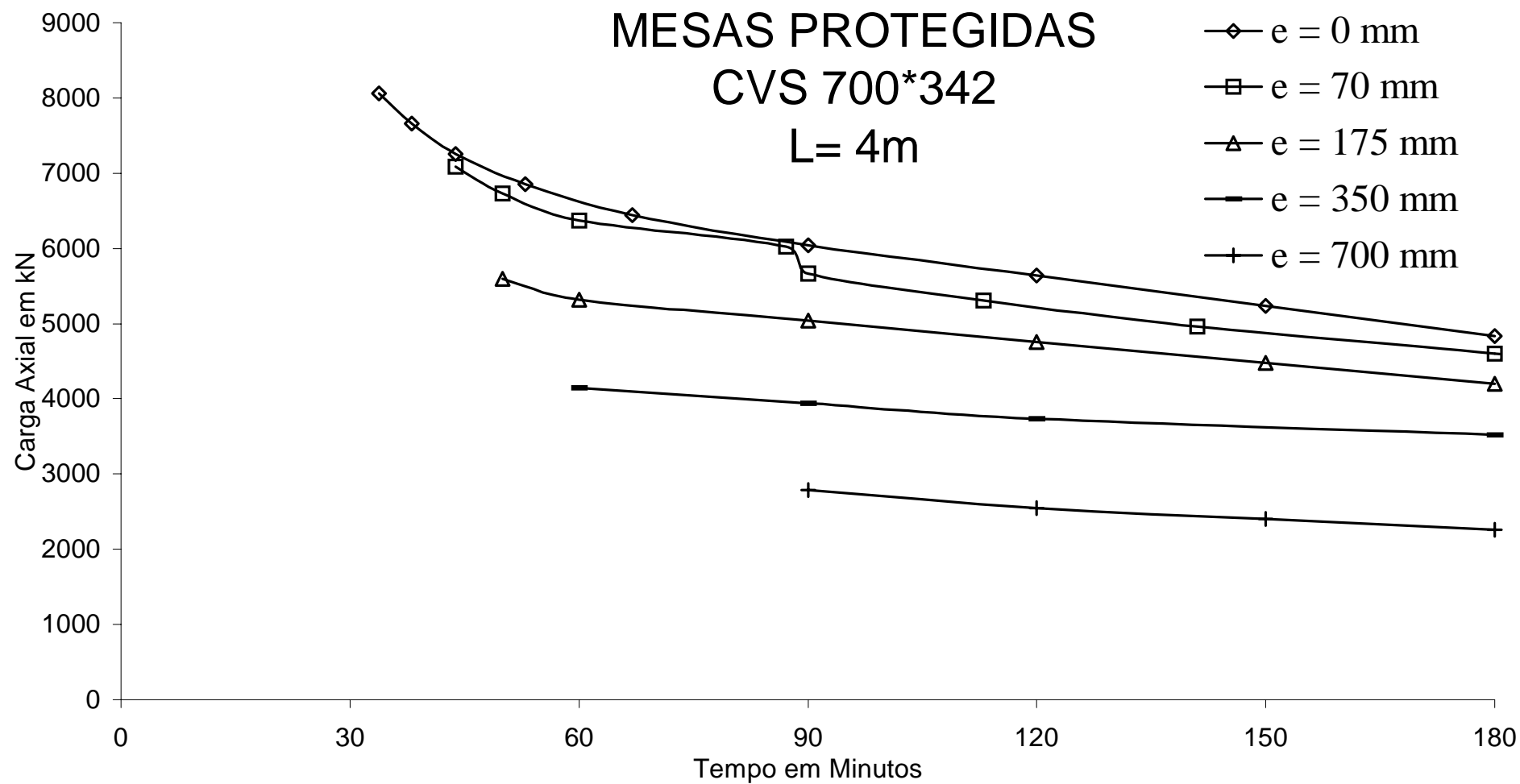


Figura 5.102 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 2 m.

MESAS PROTEGIDAS
CVS 700*342
L= 6m

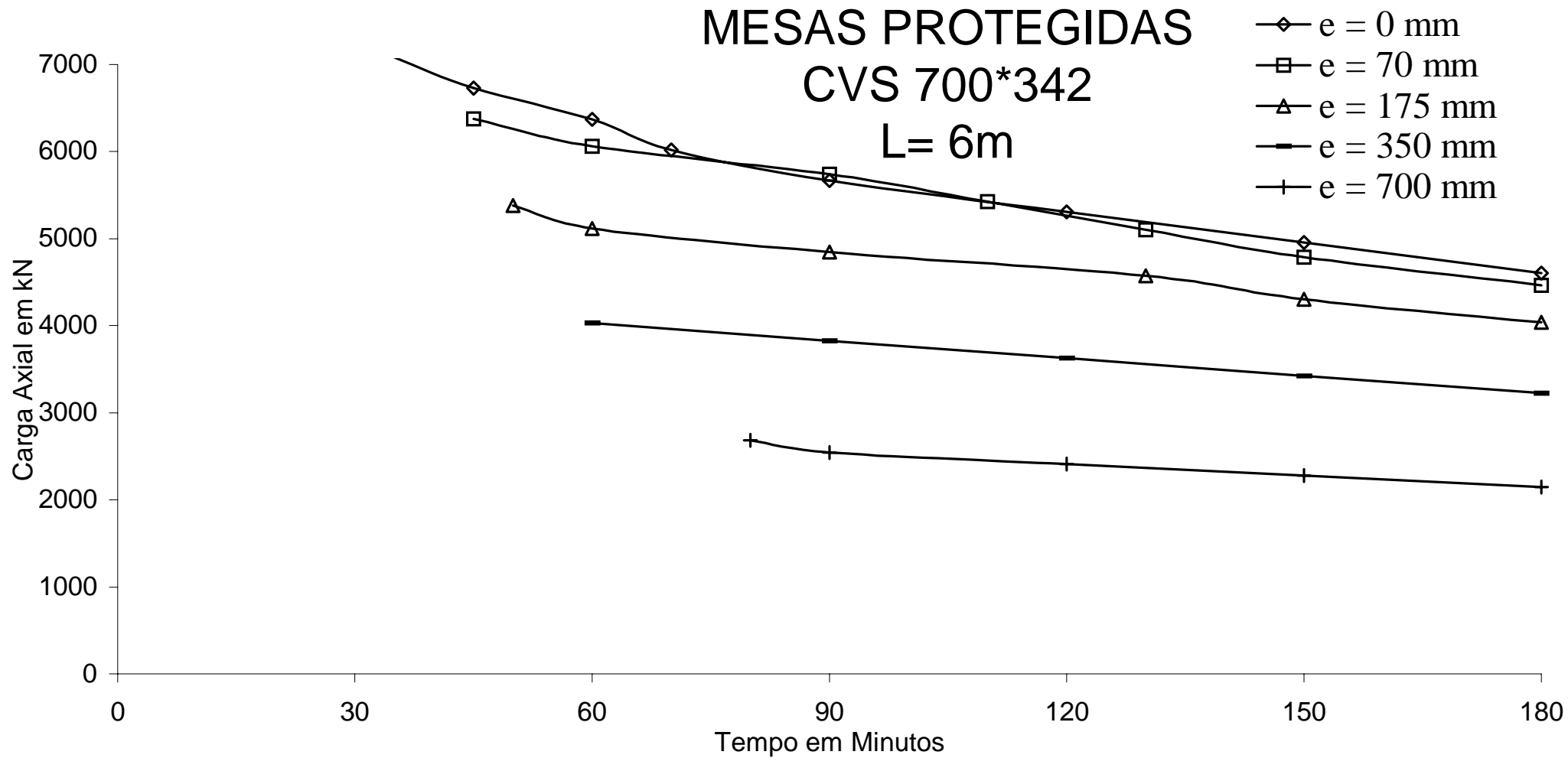


Figura 5.103 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 6 m.

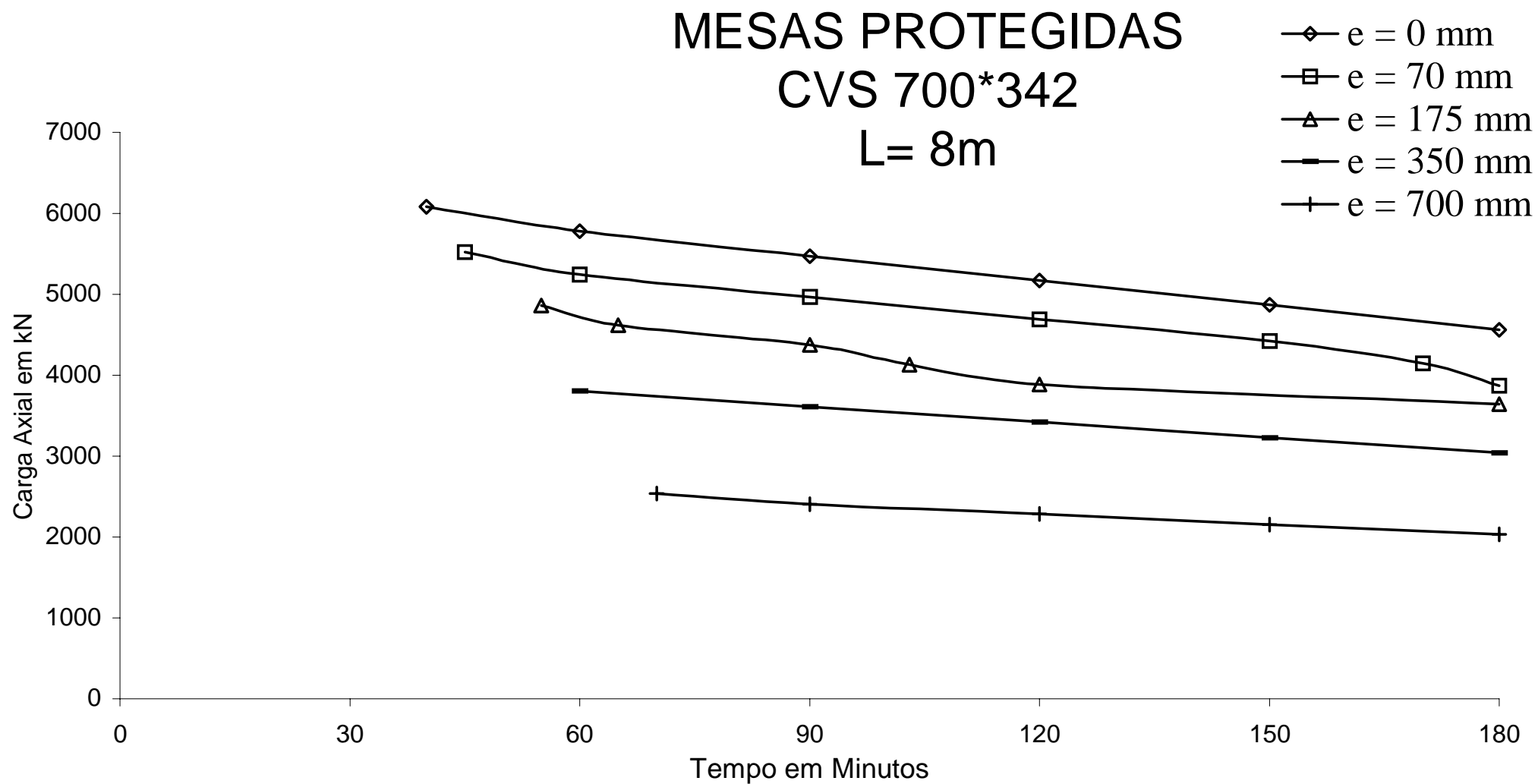


Figura 5.104 - Curvas de resistência, para perfil CVS 700 x 342 com proteção e comprimento 8 m.