

## 4

# Apresentação dos Resultados e Análises

### 4.1.

#### Notas iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo 3 e são calculados diversos parâmetros mecânicos referentes à aderência concreto-CFC.

Constam no Anexo D os diagramas de carga *vs.* deformação específica do CFC para todos os extensômetros e carga *vs.* deslocamento do bloco móvel.

### 4.2.

#### Forças últimas e modos de ruptura

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 mostram as forças e os modos de ruptura dos corpos-de-prova, onde  $F_u$  é a força de ruptura atuante no lado instrumentado do CFC (metade do valor medido pela célula de carga).  $F_u$  (MPa)

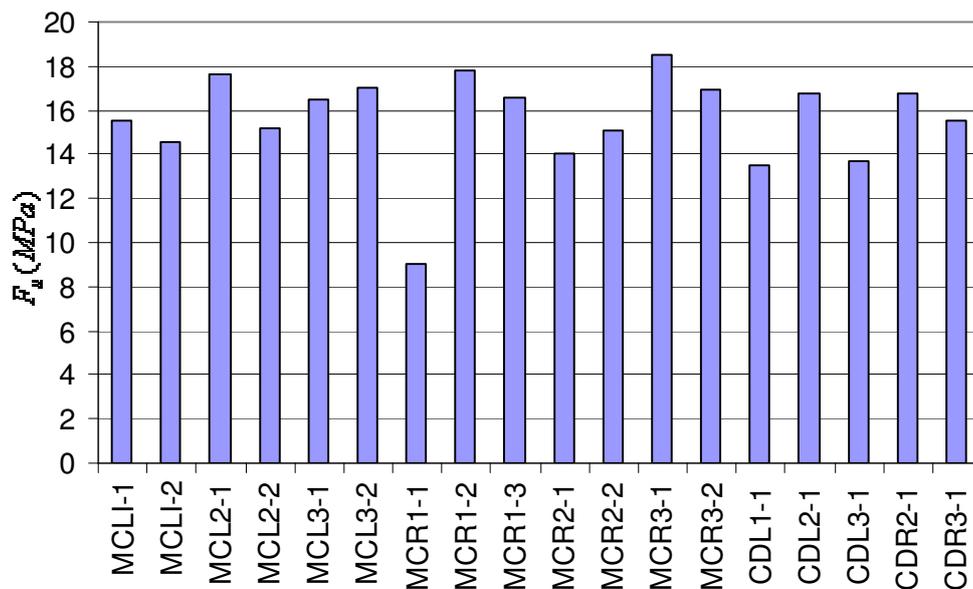


Figura 4.1 – Forças de ruptura dos corpos-de-prova.

Tabela 4.1 – Forças e modos de ruptura.

Grupos	Corpo-de-prova	Resistência à compressão do concreto (MPa)*	$F_u$ (kN)	Modos de ruptura
Grupo I	MCLI-1	26,3	15,56	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.2)
	MCLI-2	28,9	14,57	Descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.3)
	MCLII-1	31,8	17,65	Descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.4)
	MCLII-2	31,7	15,20	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.5)
	MCLIII-1	34,5	16,53	Descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.6)
	MCLIII-2	32,7	17,06	Descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.7)
Grupo II	MCRI-1	23,8	9,07	Ruptura no tecido de CFC (Figura 4.8)
	MCRI-2	23,3	17,78	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.9)
	MCRI-3	24,1	16,60	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.10)
	MCRII-1	32,9	14,06	Descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC (Figura 4.11)
	MCRII-2	29,7	15,07	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.12)
	MCRIII-1	40,8	18,51	Descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.13)
	MCRIII-2	37,4	16,94	Descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC (Figura 4.14)
Grupo III	CDLI-1	23,2	13,53	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.15)
	CDLII-1	30,5	16,78	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.16)
	CDLIII-1	32,1	13,65	Arrancamento do substrato de concreto (Figura 4.17)
Grupo VI	CDRII-1	28,2	16,73	Descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC (Figura 4.18)
	CDRIII-1	39,8	15,50	Descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC (Figura 4.19)

\* Obtida no dia do ensaio.

O corpo-de-prova MCRI-1 foi desconsiderado, pois durante o ensaio o CFC se rompeu no trecho situado entre blocos.

Os demais resultados não apresentaram grande variação e tiveram um valor médio para força de ruptura de 15,98 *kN*.

As forças de ruptura dos corpos-de-prova com diferentes resistências não apresentaram nenhuma correlação, ou seja, o aumento da resistência do concreto no intervalo estudado não necessariamente acarretou o aumento da força última.

As Figuras 4.2 a 4.19 mostram os modos de ruptura dos corpos-de-prova.



Figura 4.2 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLI-1.



Figura 4.3 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLI-2.

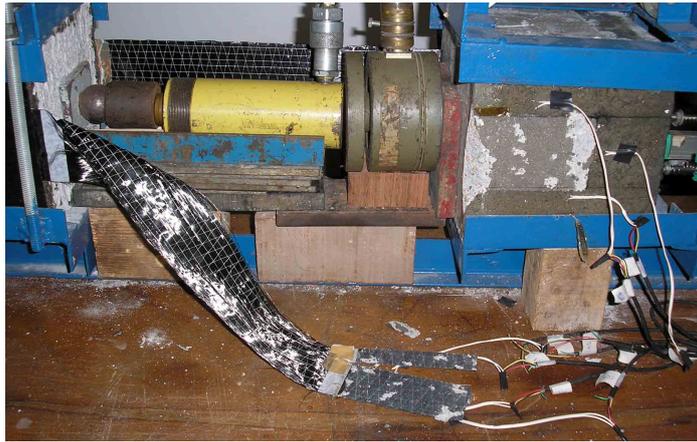


Figura 4.4 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLII-1.



Figura 4.5 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLII-2.



Figura 4.6 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLIII-1.



Figura 4.7 – Ruptura por descolamento do tecido com fissuras no bloco de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCLIII-2.



Figura 4.8 – Ruptura no tecido de CFC ao longo do comprimento descolado do corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).



Figura 4.9 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRI-2.



Figura 4.10 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRI-3.



Figura 4.11 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova MCRII-1.

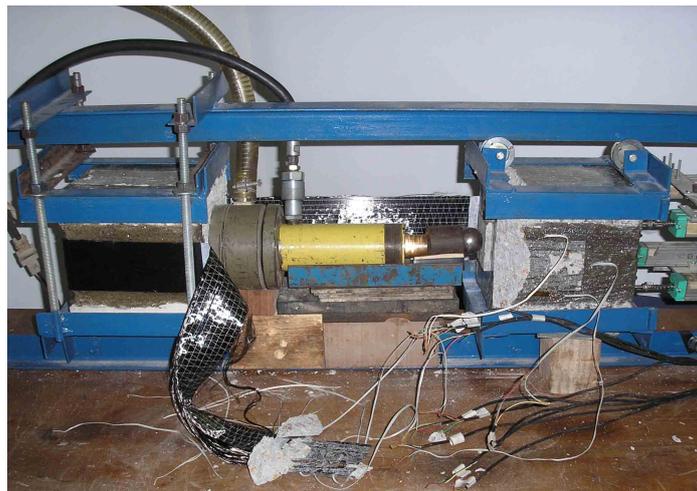


Figura 4.12 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRII-2.

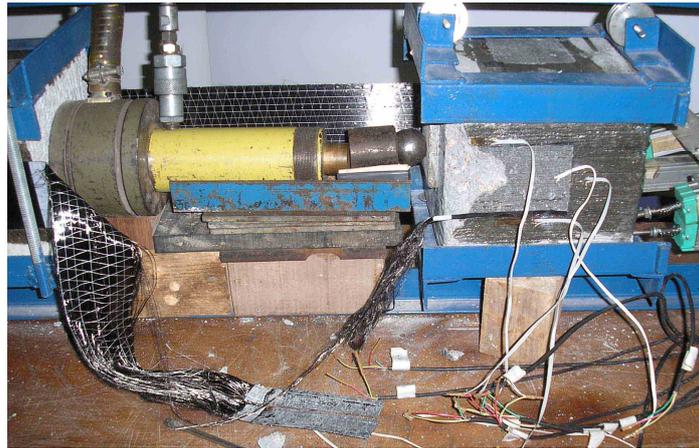


Figura 4.13 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova MCRIII-1.



Figura 4.14 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova MCRIII-2.



Figura 4.15 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLI-1.

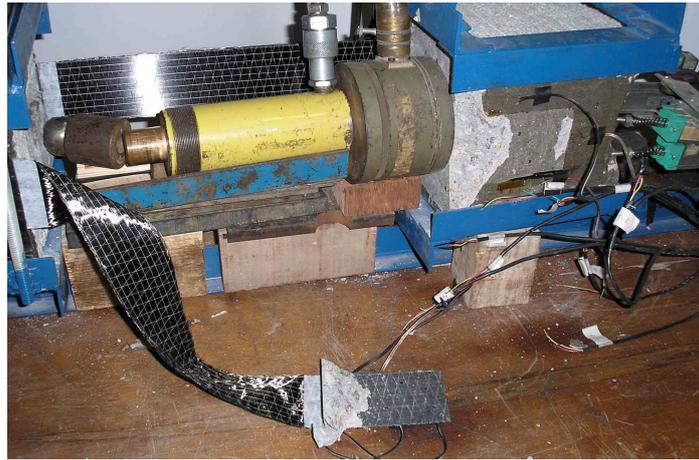


Figura 4.16 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLII-1.



Figura 4.17 – Ruptura por arrancamento do substrato de concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDLIII-1.

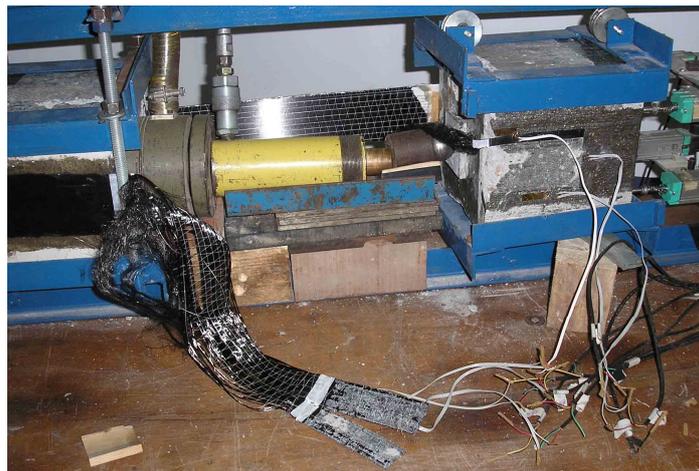


Figura 4.18 – Ruptura por descolamento do tecido com arrancamento do concreto no início da ancoragem do corpo-de-prova CDRII-1.



Figura 4.19 – Ruptura por descolamento seguido de separação das fibras do tecido de CFC do corpo-de-prova CDRIII-1.

### 4.3. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem

#### 4.3.1. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem para carregamento monôtonico crescente

Neste item são analisadas as deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem do CFC dos corpos-de-prova com carregamento Monôtonico Crescente para os diversos estágios de carregamentos, considerando-se apenas a força atuante na face instrumentada, ou seja, metade do valor medido pela célula de carga (figuras 4.20 a 4.32).

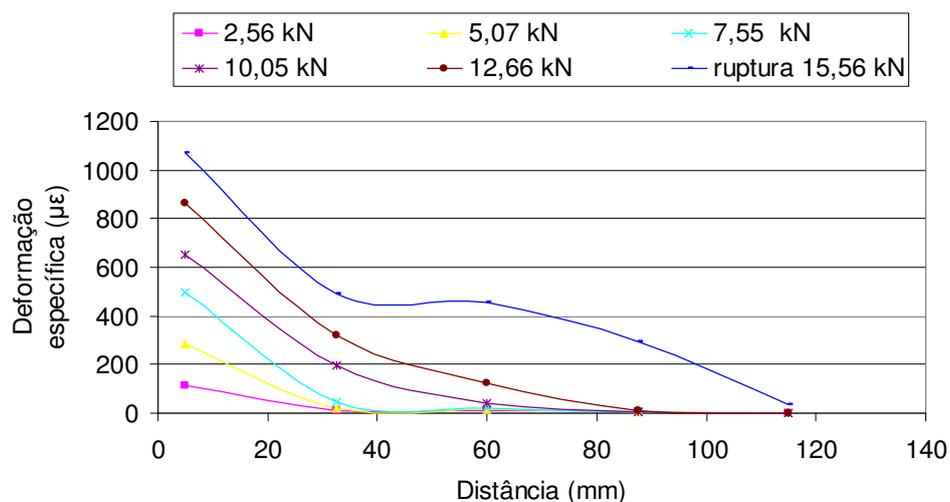


Figura 4.20 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-1.

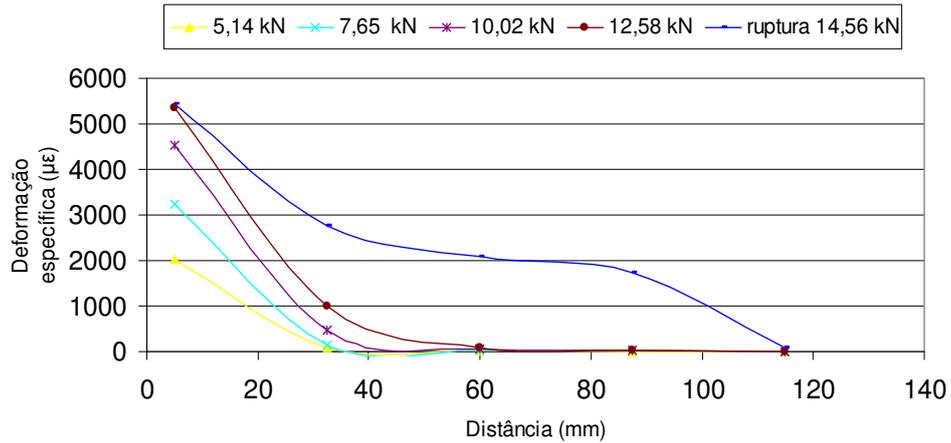


Figura 4.21 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-2.

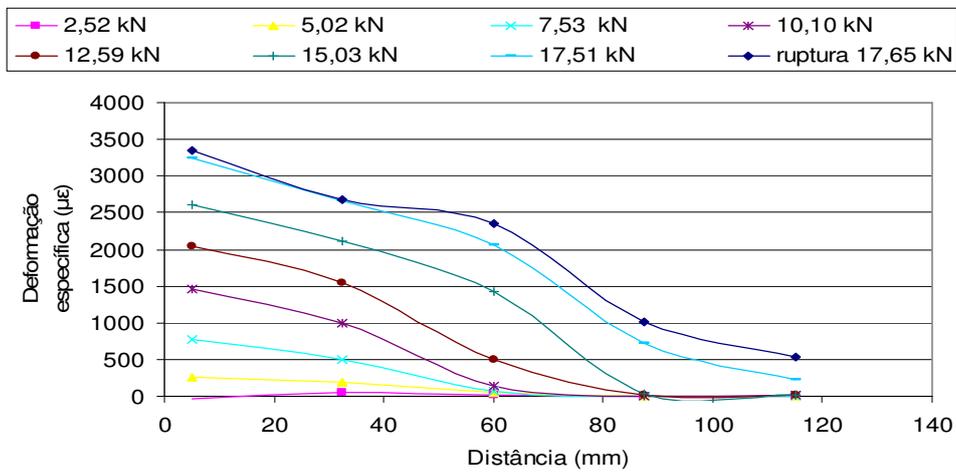


Figura 4.22 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-1.

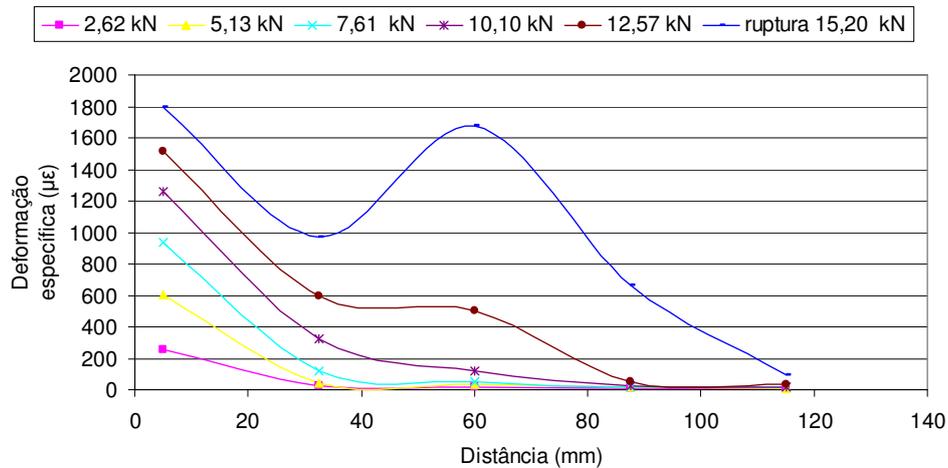


Figura 4.23 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-2.

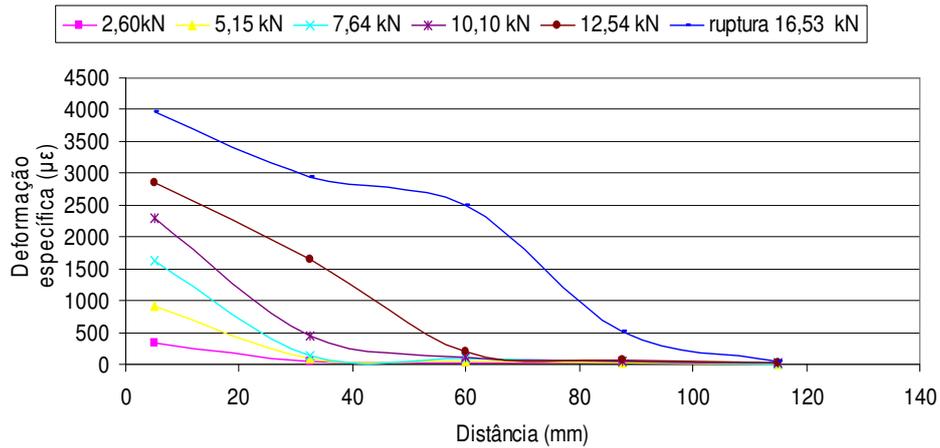


Figura 4.24 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-1.

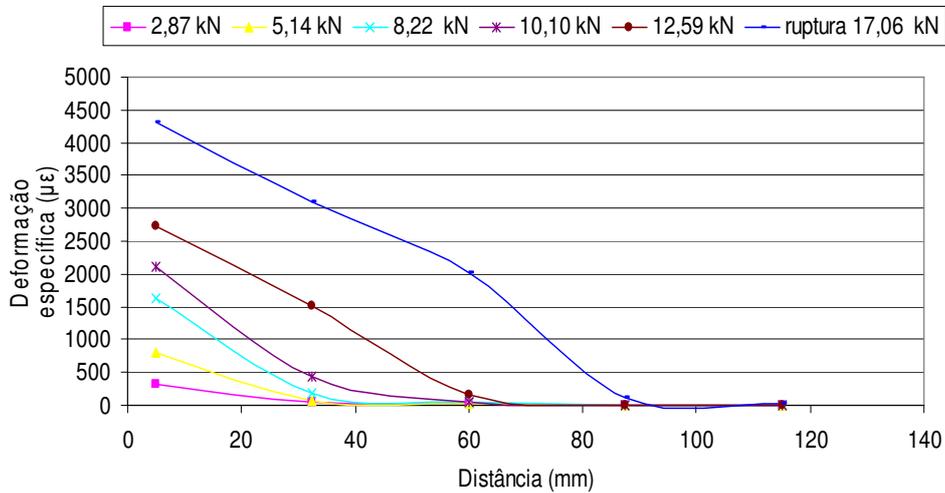


Figura 4.25 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-2.

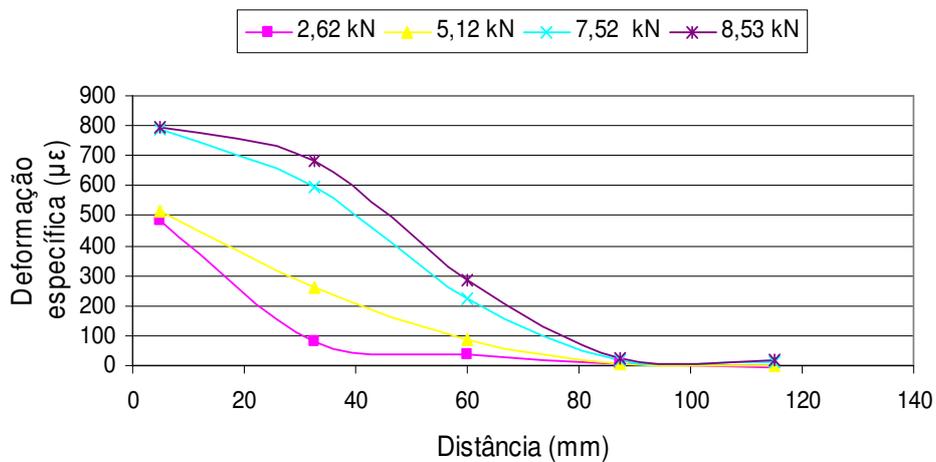


Figura 4.26 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).

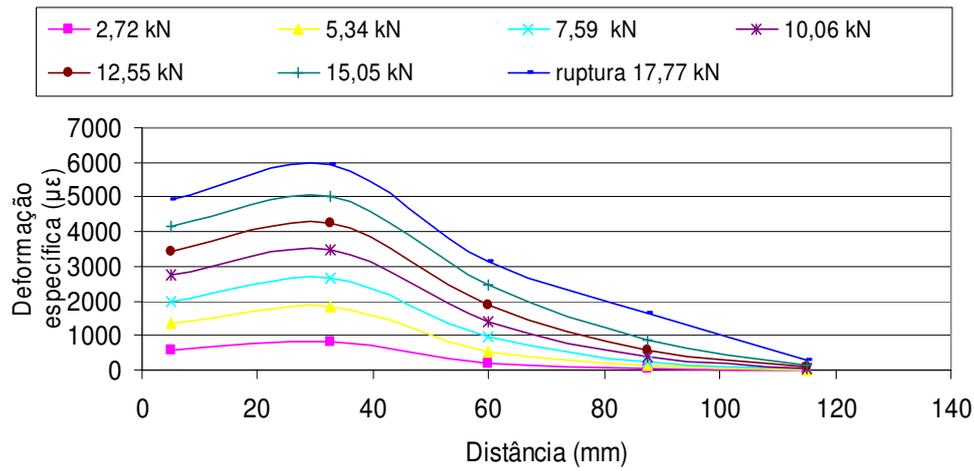


Figura 4.27 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-2.

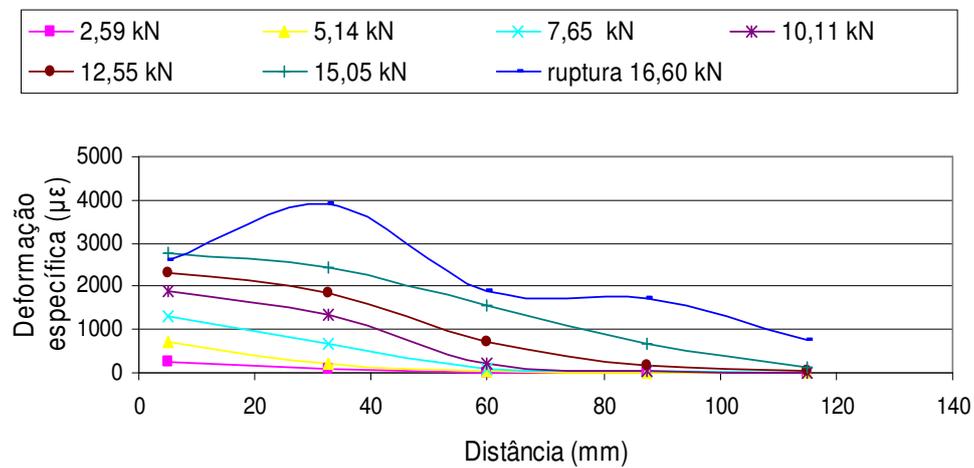


Figura 4.28 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-3.

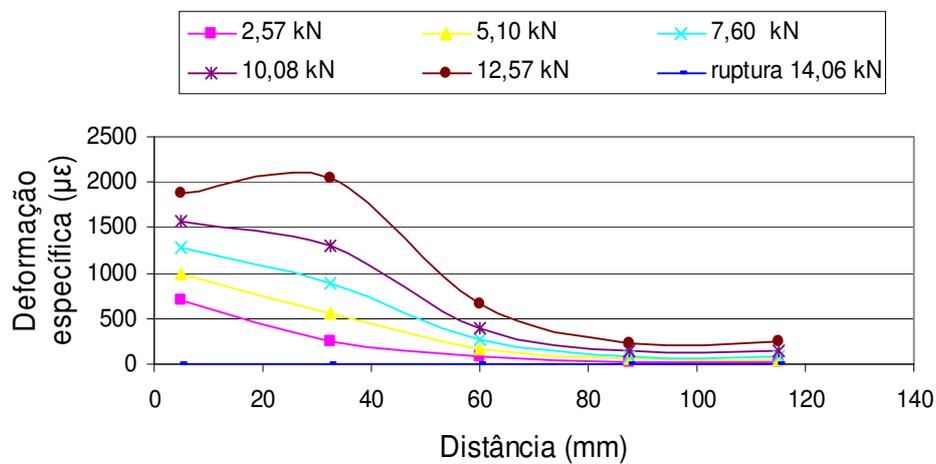


Figura 4.29 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCR II-1.

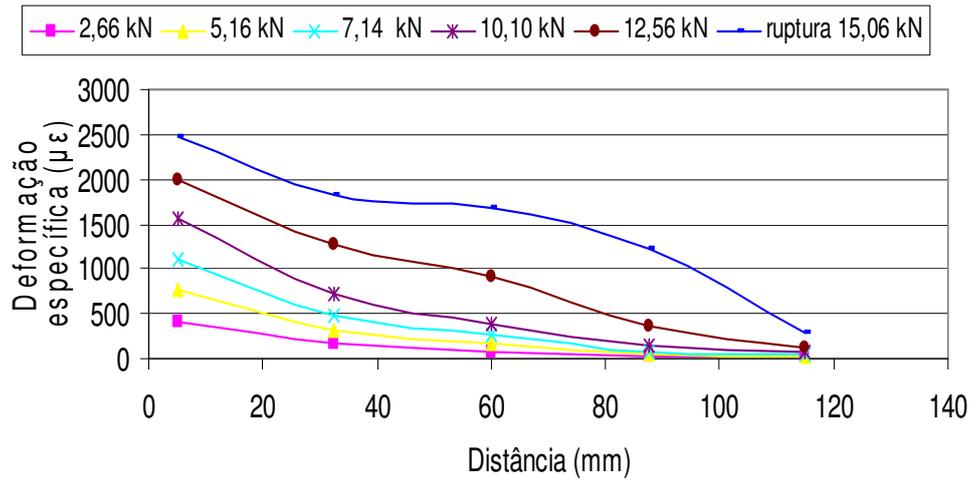


Figura 4.30 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-2.

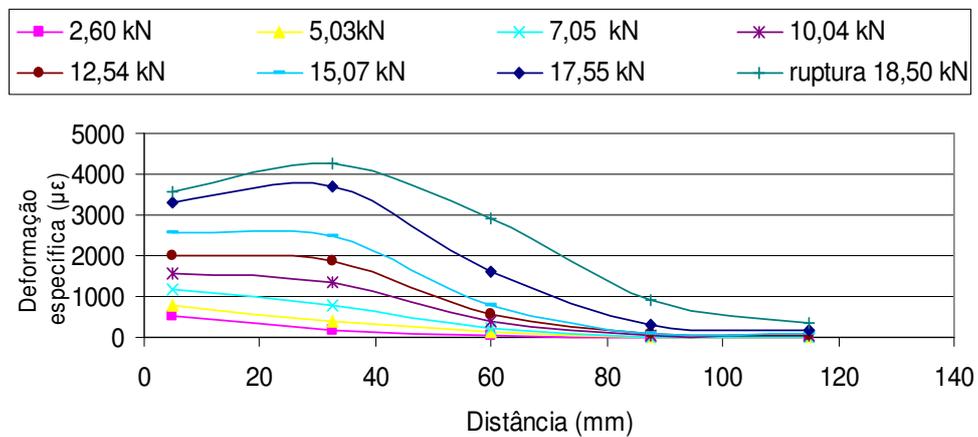


Figura 4.31 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-1.

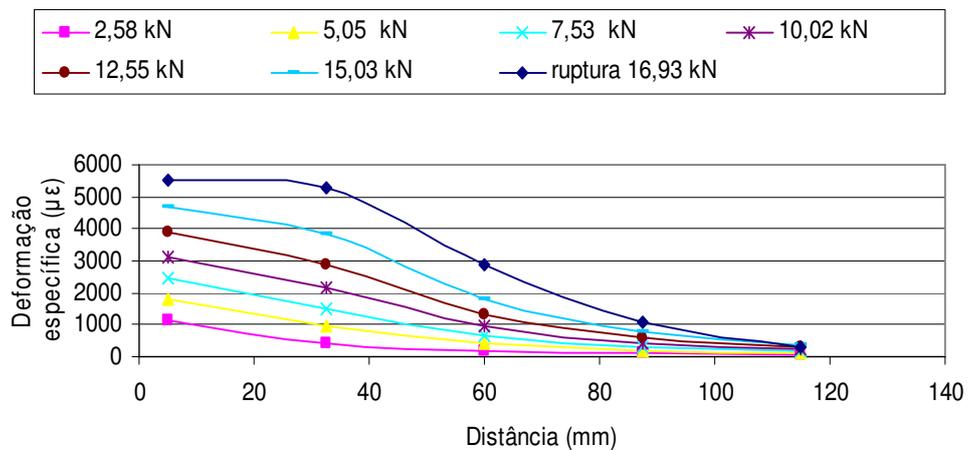


Figura 4.32 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-2.

Com os gráficos das Figuras 4.20 a 4.32 verifica-se que:

- para carregamentos não próximos da ruptura os gráficos de deformação específica vs. distância mostraram um decréscimo aproximadamente exponencial para a deformação específica em relação à distância. Com o acréscimo do carregamento tendem a ocorrer rupturas localizadas entre o CFC e o concreto, que são identificadas por mudanças na concavidade das curvas de deformação específica vs. distância. Na maioria dos casos essas rupturas ocorreram entre as distâncias  $x = 32,5 \text{ mm}$  e  $x = 60 \text{ mm}$ .
- observa-se que em alguns casos as rupturas localizadas ocorreram a partir de valores inferiores a 60% da força de ruptura (Figuras 4.22, 4.29 e 4.31). Por vezes essas rupturas ocorreram para uma força de cerca de 60 a 80% da força de ruptura.
- na Figura 4.27 percebe-se a mudança de forma da curva na distância  $x = 32,5 \text{ mm}$ , que se manifesta já no primeiro carregamento ( $2,72 \text{ kN}$  que é cerca de 15% da força de ruptura). Isso parece indicar alguma deficiência na colagem do CFC.

#### 4.3.2. Deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem para o carregamento em ciclos de carga e descarga

Neste item são analisadas as deformações específicas ao longo do comprimento de ancoragem do CFC dos corpos-de-prova para o carregamento em ciclos de carga e descarga para os primeiros estágios de carregamento (Figuras 4.33 a 4.37). Cada estágio de carga foi obtido após a descarga do estágio de carga anterior.

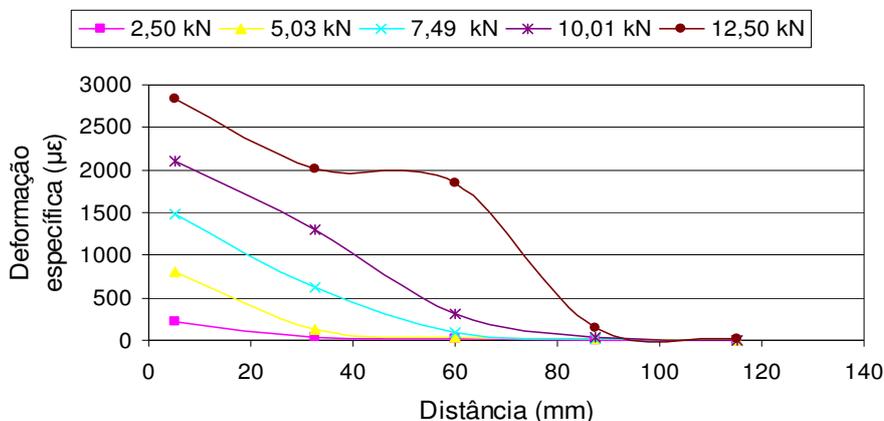


Figura 4.33 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLI-1.

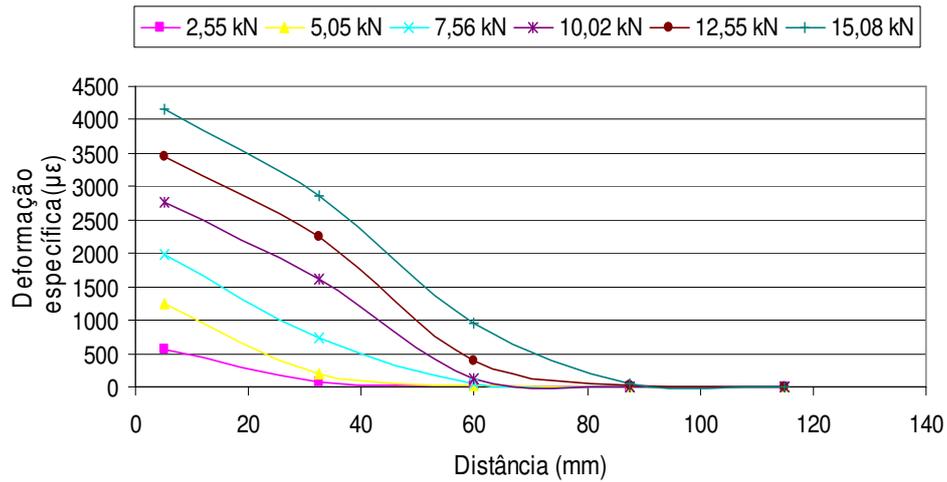


Figura 4.34 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLII-1.

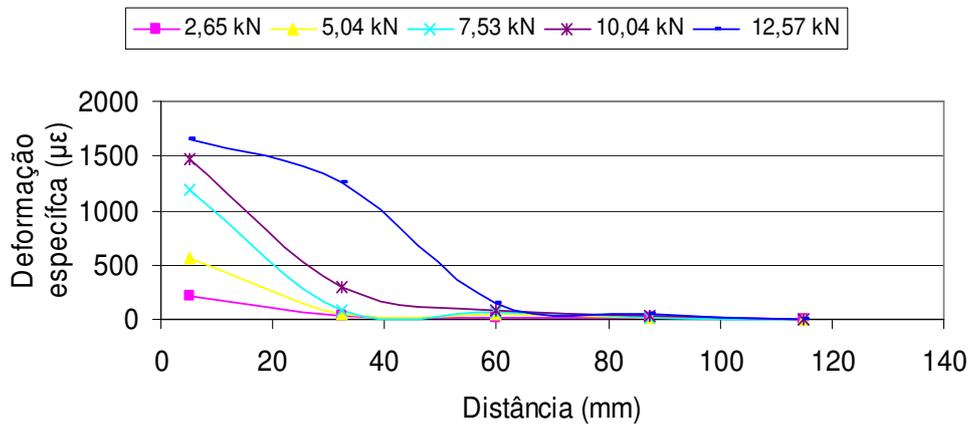


Figura 4.35 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLIII-1.

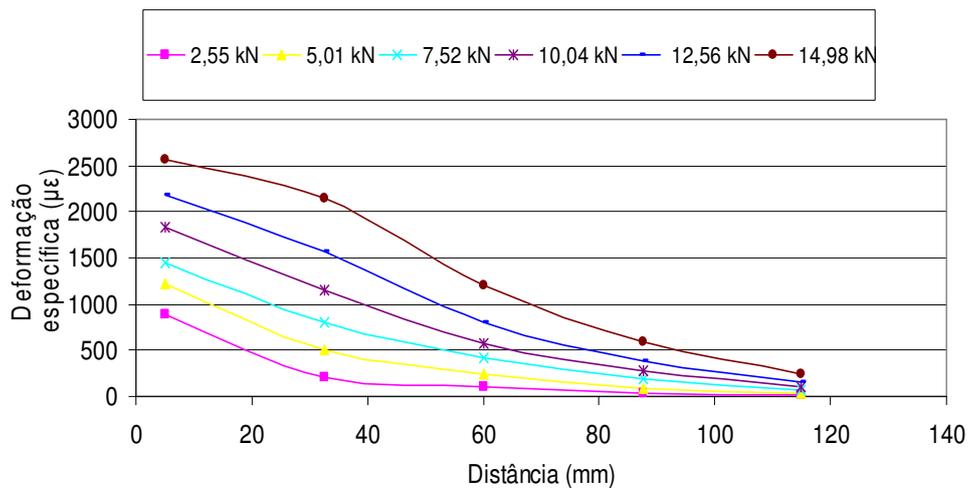


Figura 4.36 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRII-1.

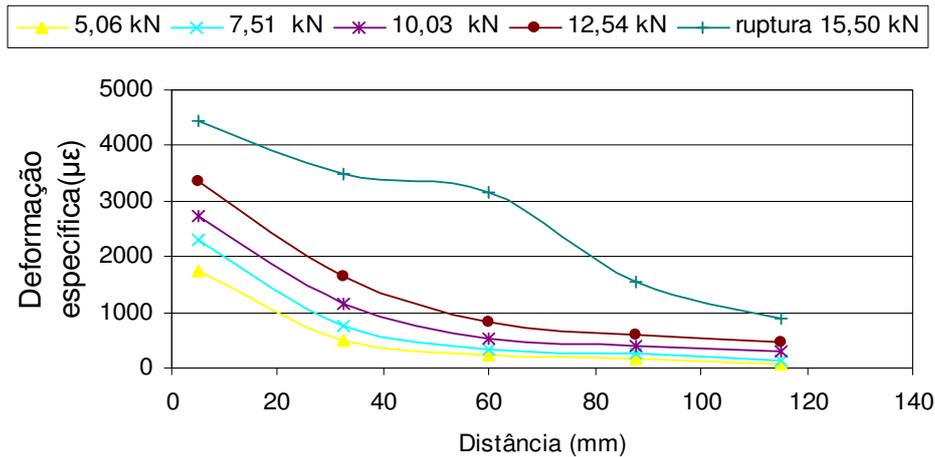


Figura 4.37 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRIII-1.

O comportamento das curvas deformação específica vs. distância é praticamente idêntico ao carregamento monótonico crescente.

As deformações específicas foram maiores nos dois primeiros EER colados na extremidade carregada do comprimento de ancoragem (correspondente aos extensômetros 1 e 2). Os dois últimos EER (correspondentes aos extensômetros 4 e 5) apresentaram valores baixos para as deformações específicas, confirmando a proposição do comprimento efetivo de 120 mm.

#### 4.4.

#### Tensões de aderência e deformações específicas no CFC

As tensões de aderência foram calculadas baseando-se na lei de Hooke, expressas em função das deformações específicas lidas nos EER colados ao tecido de CFC  $\varepsilon_f$ :

$$\tau_b = \frac{(\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i+1})t_f E_f}{l_0} \quad (4.1)$$

onde

$\tau_b$  – tensão de aderência no ponto médio do trecho  $i, i+1$ ;

$\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i+1}$  – deformação específica do tecido de CFC na seção  $i$  e na seção  $i+1$ , respectivamente, considerando-se a seqüência 1,2,3,4 e 5 dos EER;

$t_f$  – espessura do CFC;

$E_f$  – módulo de elasticidade do CFC;

$l_0$  – distância entre os pontos onde são medidas das deformações específicas.

O valor da deformação específica média no CFC é dado por:

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_{f,i} + \varepsilon_{f,i+1}}{2} \quad (4.2)$$

As Figuras 4.38 a 4.50 mostram as curvas tensão de aderência vs. deformação específica do CFC para cada corpo-de-prova dos ensaios com carregamento monotônico crescente, para os trechos 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, que correspondem ao intervalo entre os respectivos extensômetros de 1 a 5.

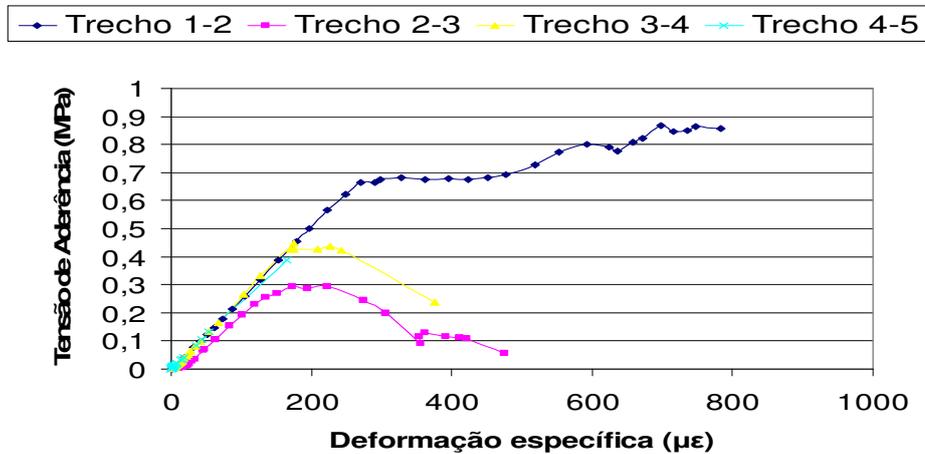


Figura 4.38 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLI-1.

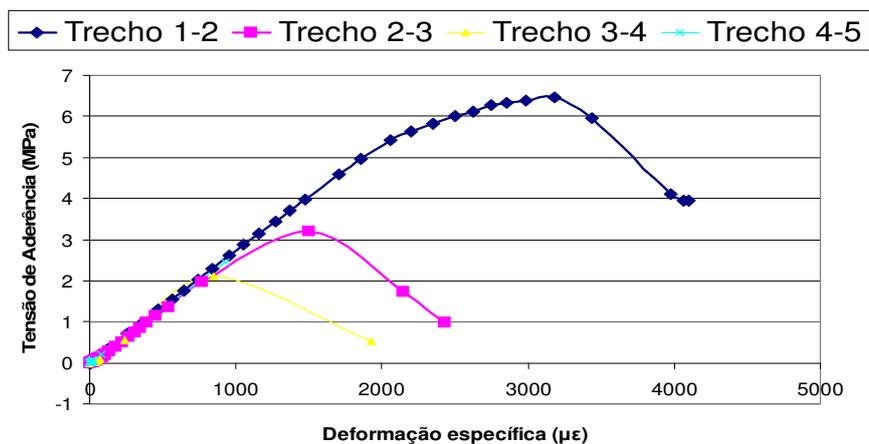


Figura 4.39 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLI-2.

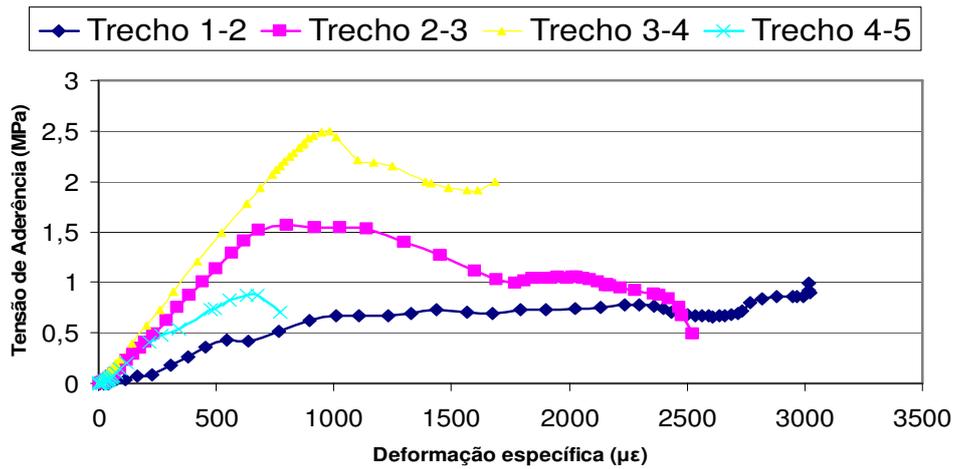


Figura 4.40 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLII-1.

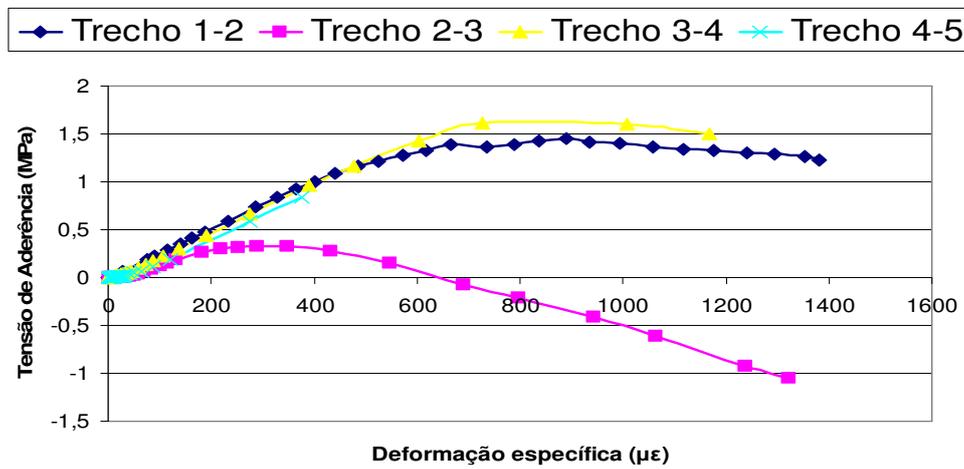


Figura 4.41 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLII-2.

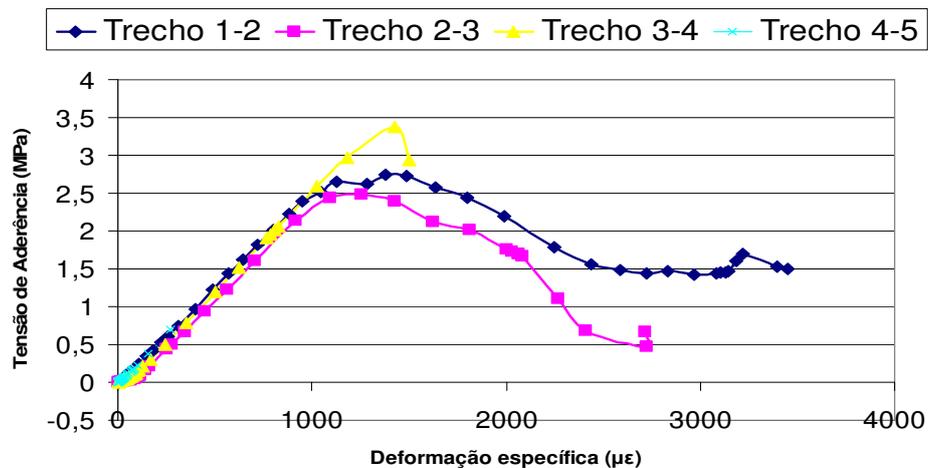


Figura 4.42 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLIII-1.

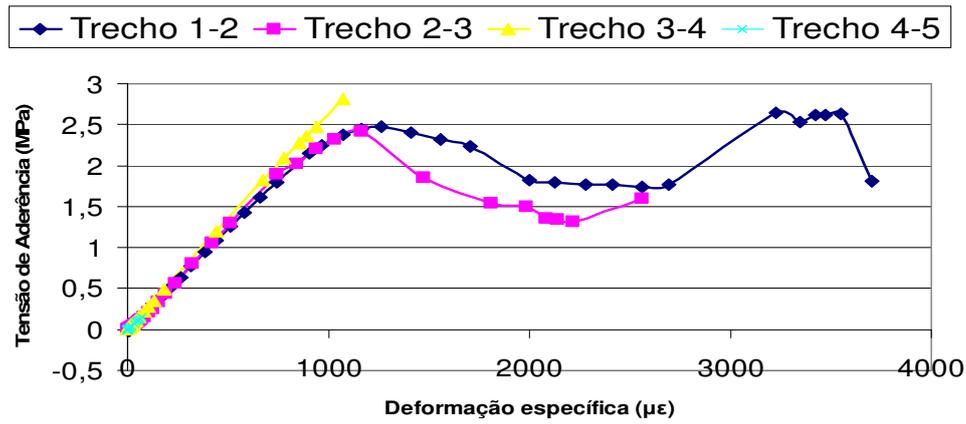


Figura 4.43 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCLIII-2.

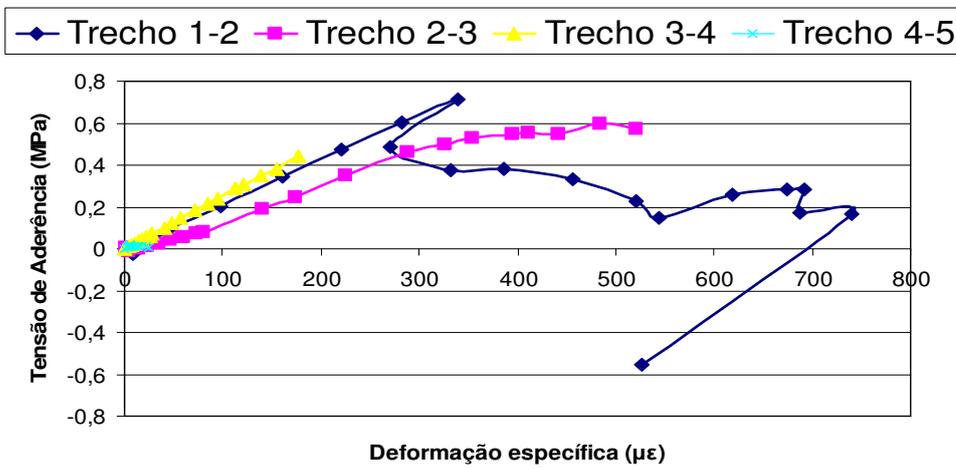


Figura 4.44 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-1 (corpo-de-prova descartado).

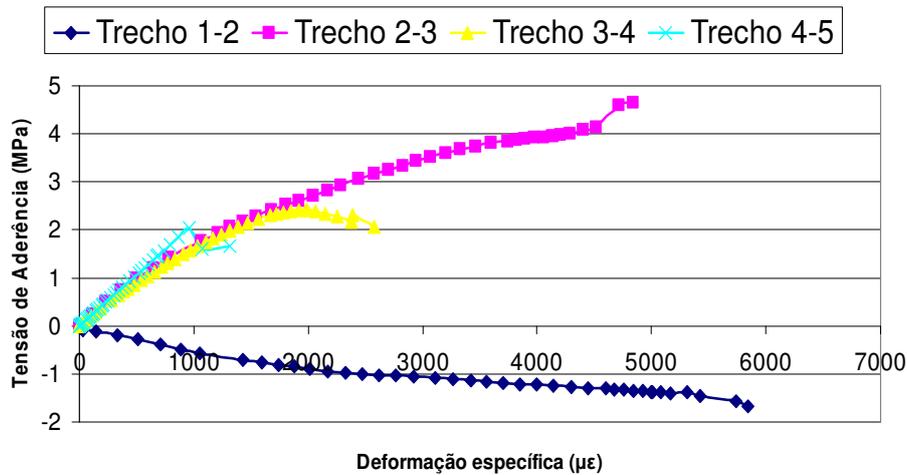


Figura 4.45 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-2.

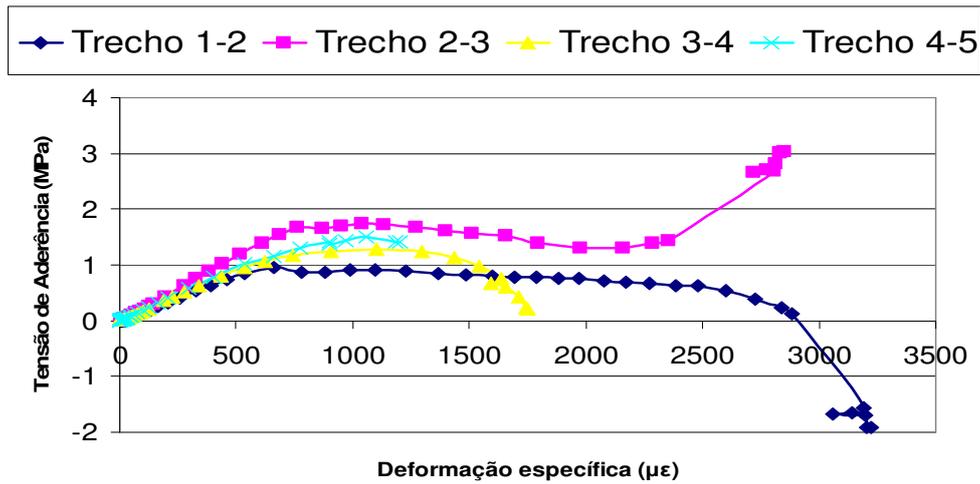


Figura 4.46 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRI-3.

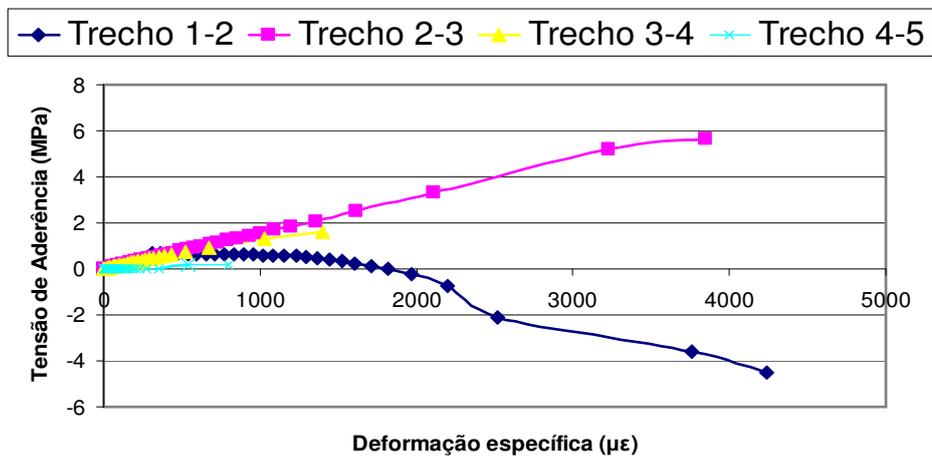


Figura 4.47 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRII-1.

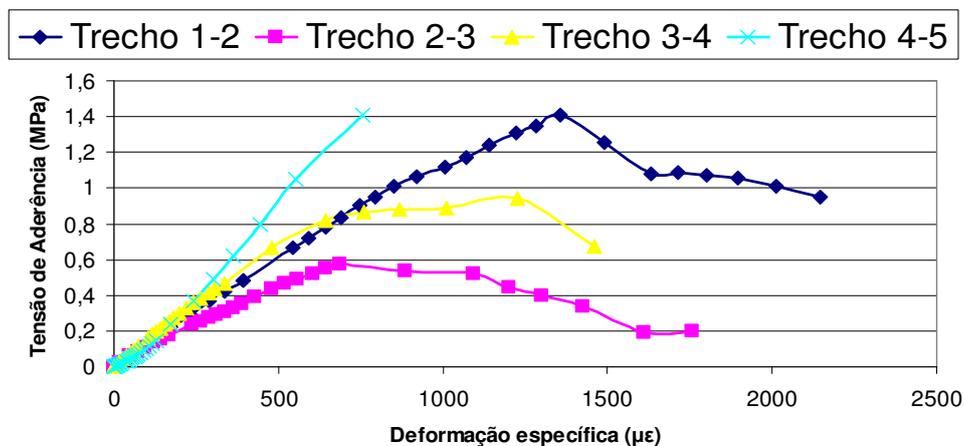


Figura 4.48 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRII-2.

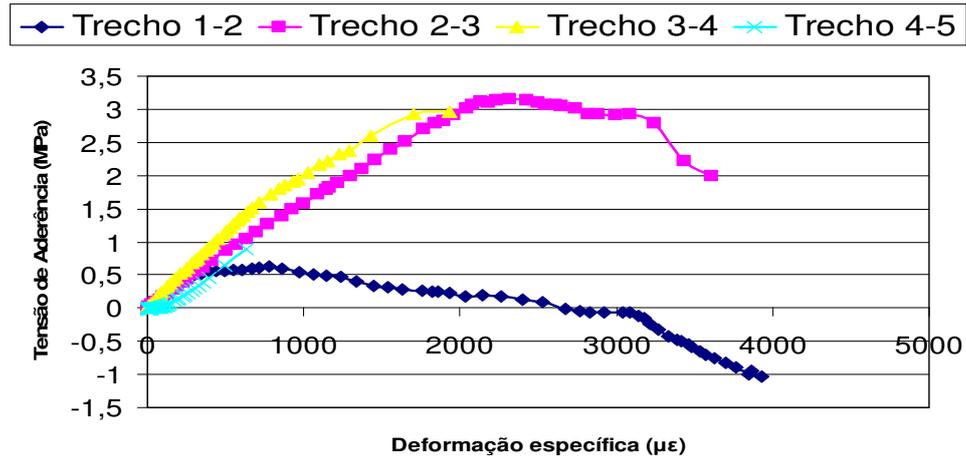


Figura 4.49 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRIII-1.

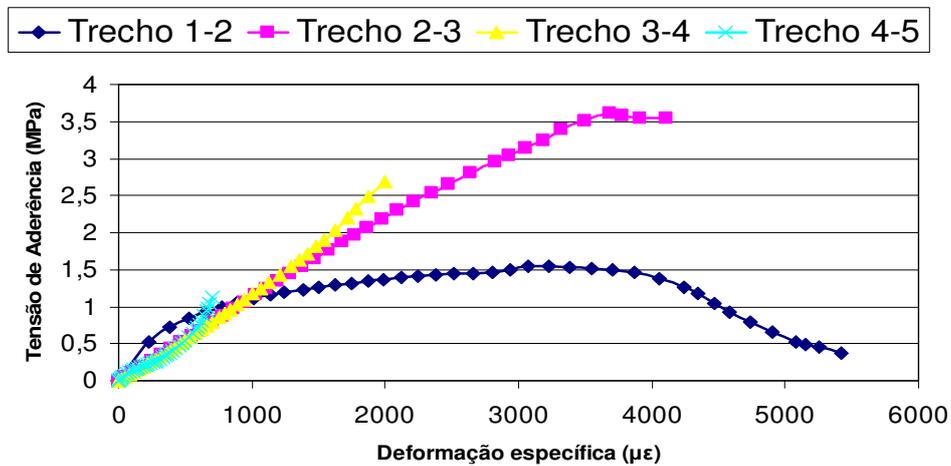


Figura 4.50 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova MCRIII-2.

As Figuras 4.51 a 4.55 mostram as envoltórias das curvas tensões de aderência x deformação específica do CFC para cada corpo-de-prova dos ensaios com carregamento em ciclos de carga e descarga, cujas tensões de aderência foram calculadas pela expressão 4.1.

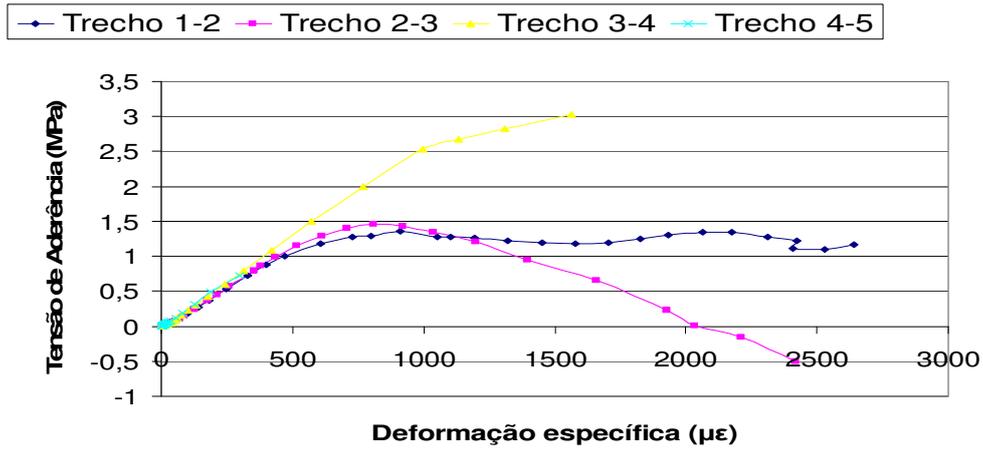


Figura 4.51 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLI-1.

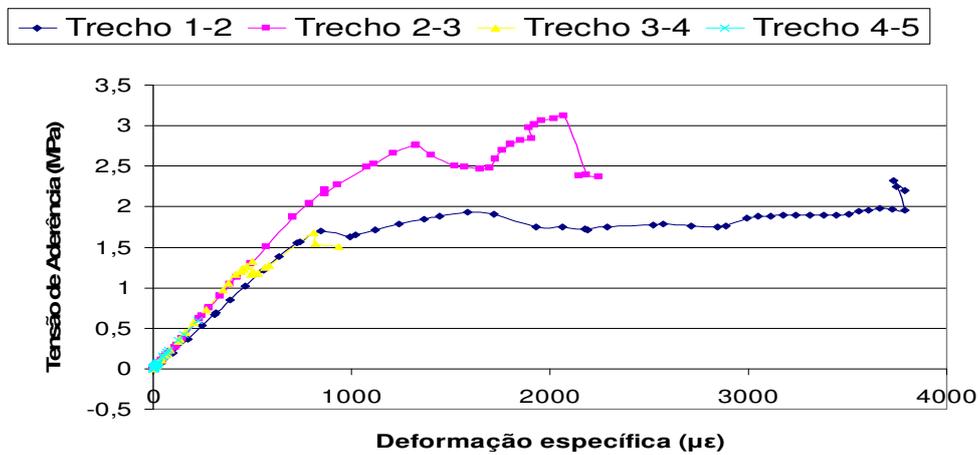


Figura 4.52 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLII-1.

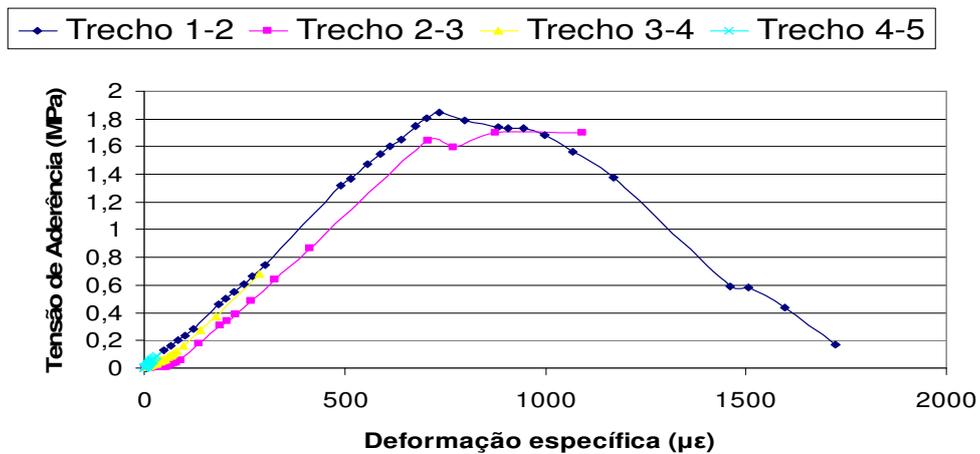


Figura 4.53 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDLIII-1.

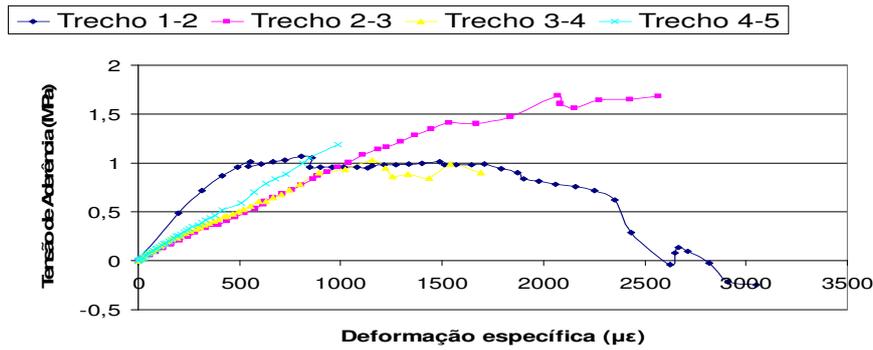


Figura 4.54 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDRII-1.

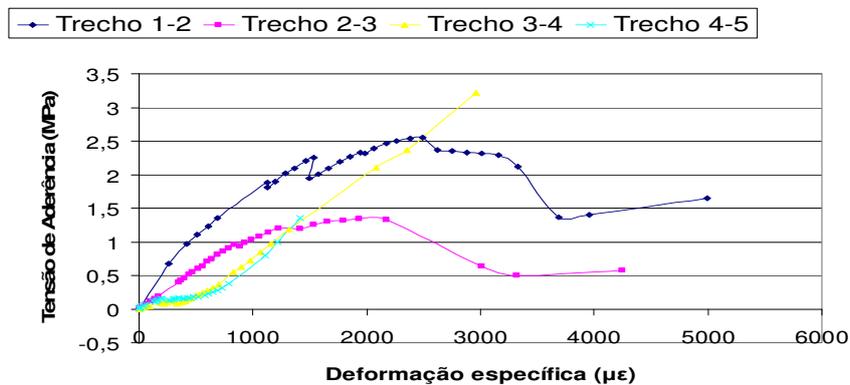


Figura 4.55 – Tensão de aderência x deformação específica do CFC para o corpo-de-prova CDRIII-1.

As curvas tensão de aderência vs. deformação específica apresentam comportamentos diferentes para os diversos trechos, tanto pela esperada diferença de deformações entre duas seções consecutivas, como pela ocorrência de rupturas localizadas no contato CFC-concreto. As rupturas localizadas podem explicar algumas anomalias (irregularidades) nas curvas tensão de aderência vs. deformação específica.

A ocorrência de tensões de aderência negativas mostra, segundo a Equação 4.1, que a deformação  $\varepsilon_{f,i+1}$  é maior que a seção adjacente  $\varepsilon_{f,i}$ . Indicando que está ocorrendo uma redistribuição de tensões da seção  $i$  para a seção adjacente  $i+1$ .

Em conseqüência da redistribuição de tensões da seção  $i$  para a seção adjacente  $i+1$ , um ponto de máximo na curva tensão de aderência vs. deformação específica não significa, em geral uma tensão de ruptura. Portanto, a diminuição de tensões em uma seção indica um acréscimo de tensões em uma seção adjacente, em função da redistribuição de tensões.

#### 4.4.1.

#### Varição das tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem

Neste item são analisadas as tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem do CFC dos corpos-de-prova com carregamento Monótonico Crescente para os diversos estágios de carregamentos (Figuras 4.56 a 4.68).

Os extensômetros 1,2,3,4 e 5 estão posicionados nas abscissas 5 mm, 32,5 mm, 60 mm, 87,5 mm e 115 mm e as tensões de aderência (calculadas pela equação 4.1) estão representadas no ponto médio entre dois extensômetros consecutivos. Os pontos indicados nas Figuras 4.56 a 4.73 indicam tensões de aderência médias nos trechos limitados pelos extensômetros.

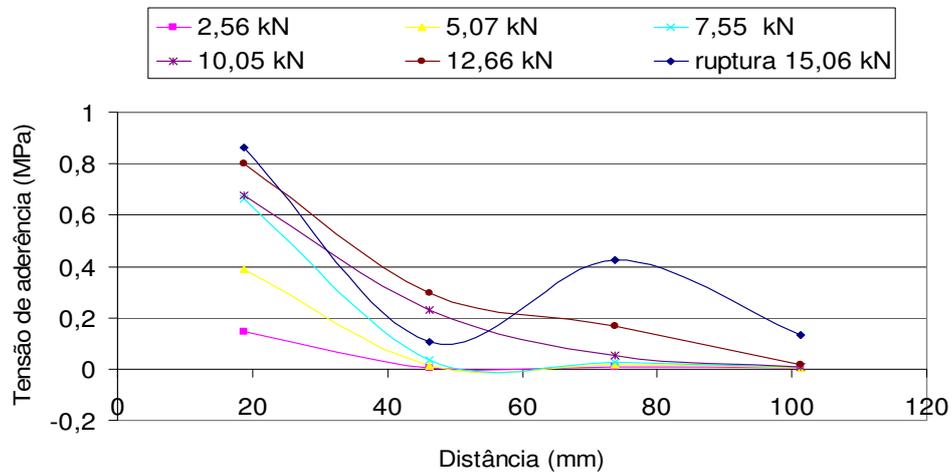


Figura 4.56 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-1.

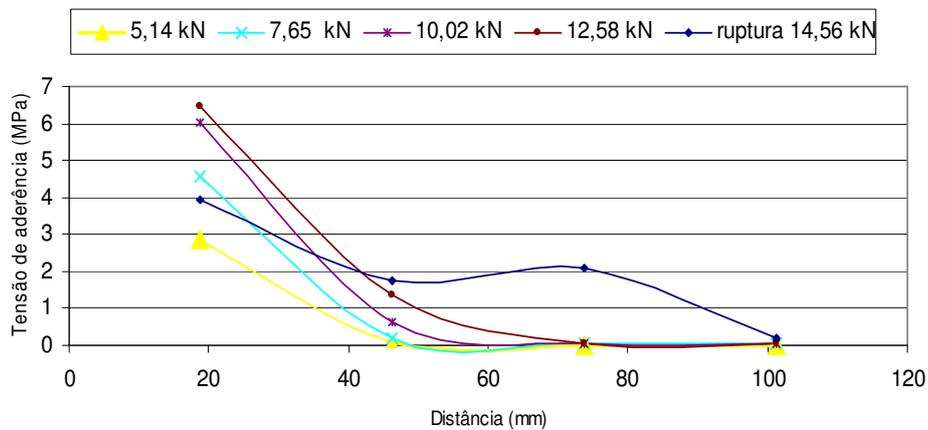


Figura 4.57 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLI-2.

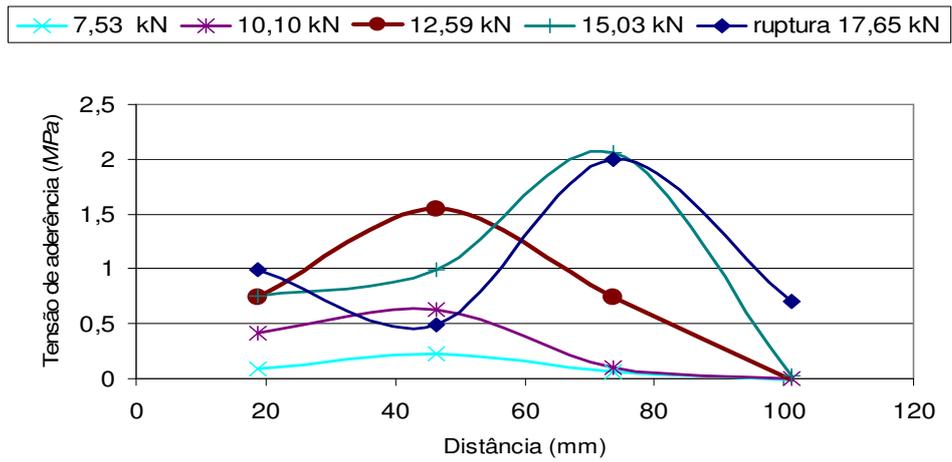


Figura 4.58 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-1.

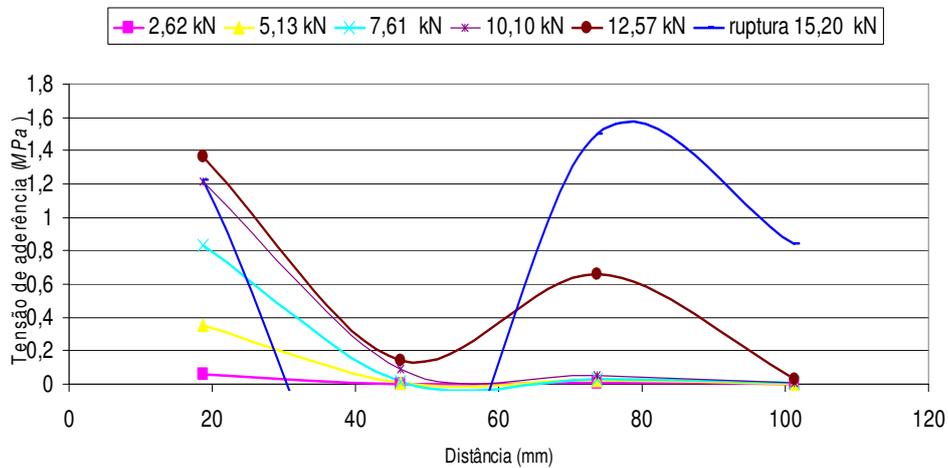


Figura 4.59 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLII-2.

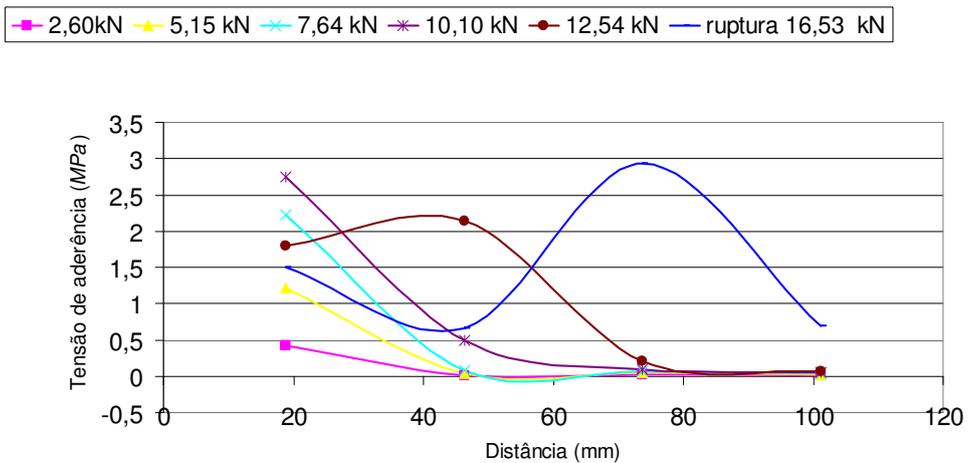


Figura 4.60 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-1.

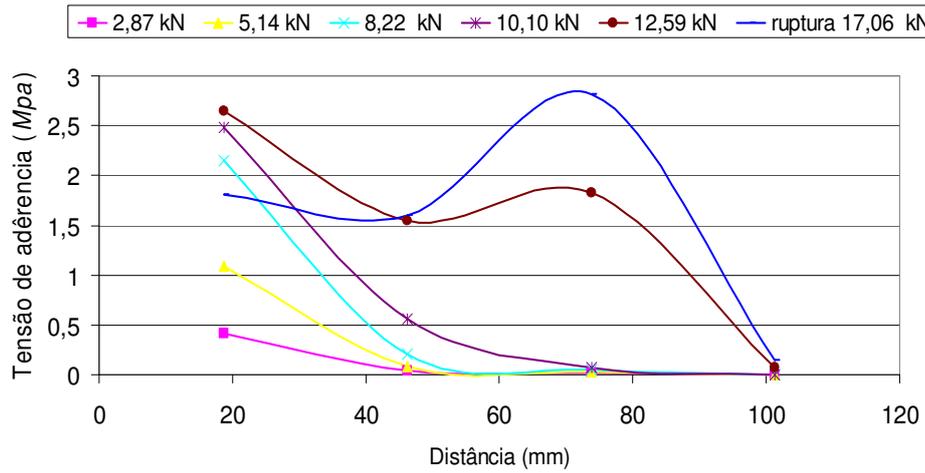


Figura 4.61 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCLIII-2.

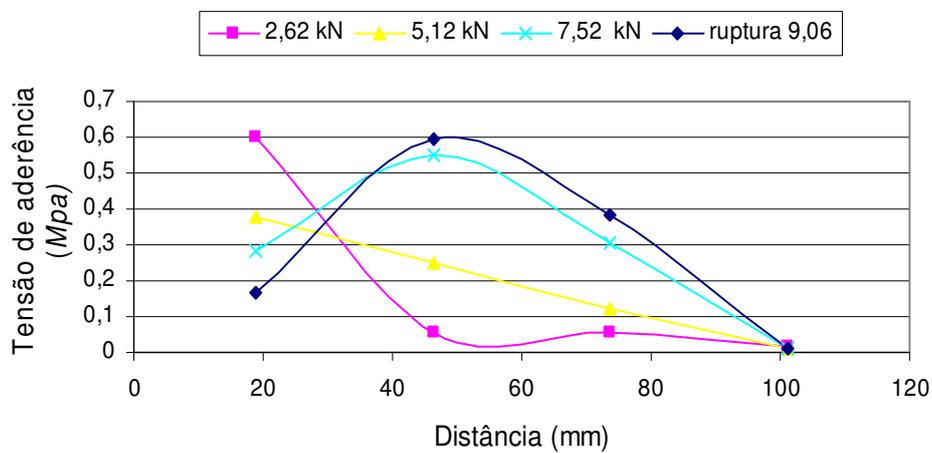


Figura 4.62 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-1.

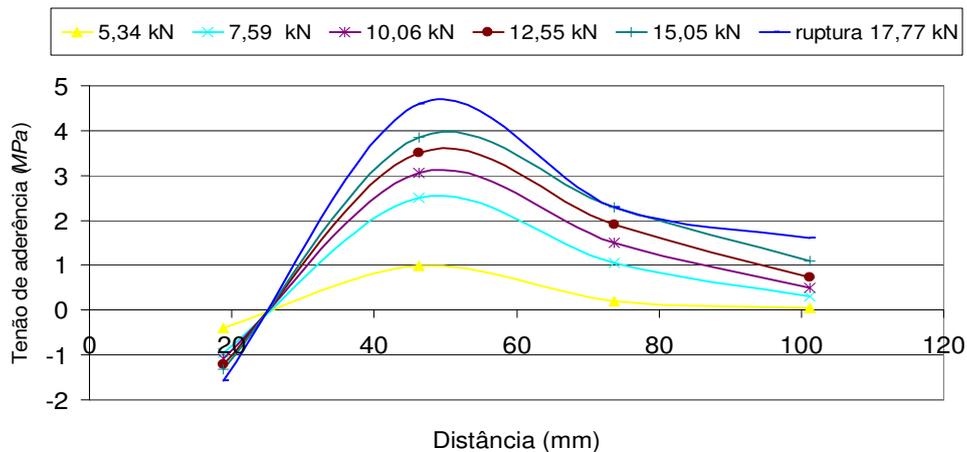


Figura 4.63 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-2.

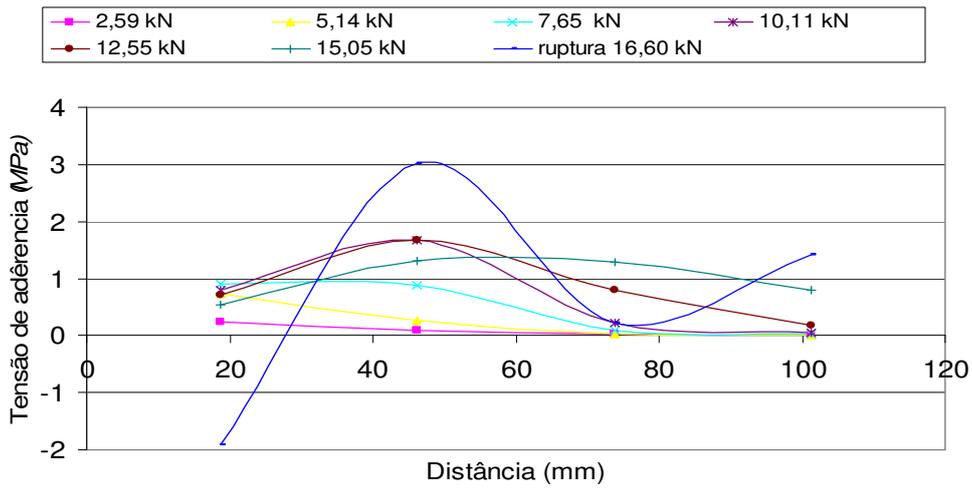


Figura 4.64 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRI-3.

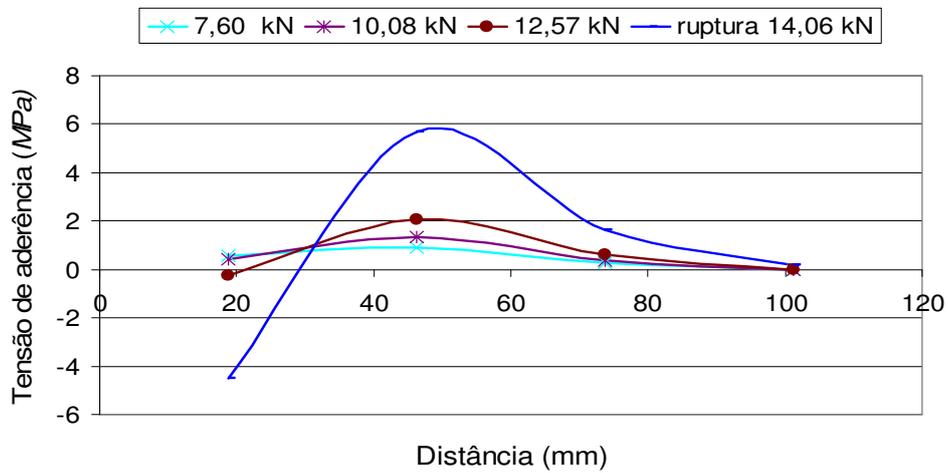


Figura 4.65 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-1.

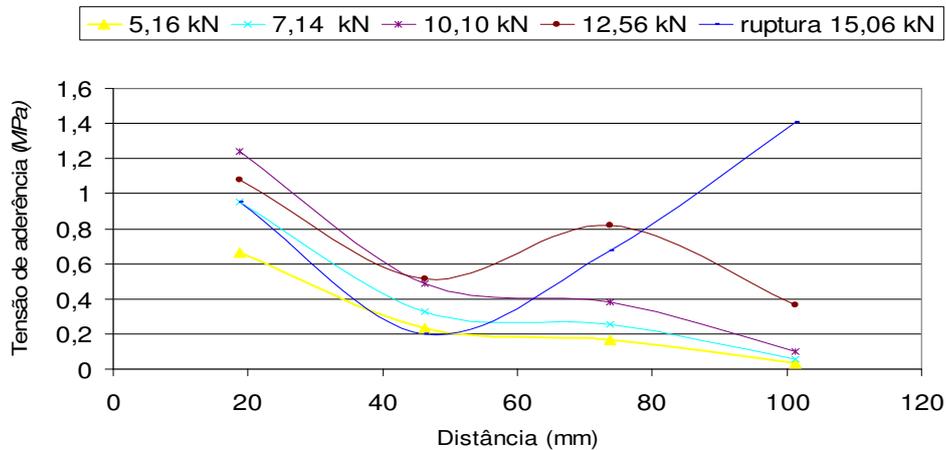


Figura 4.66 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRII-2.

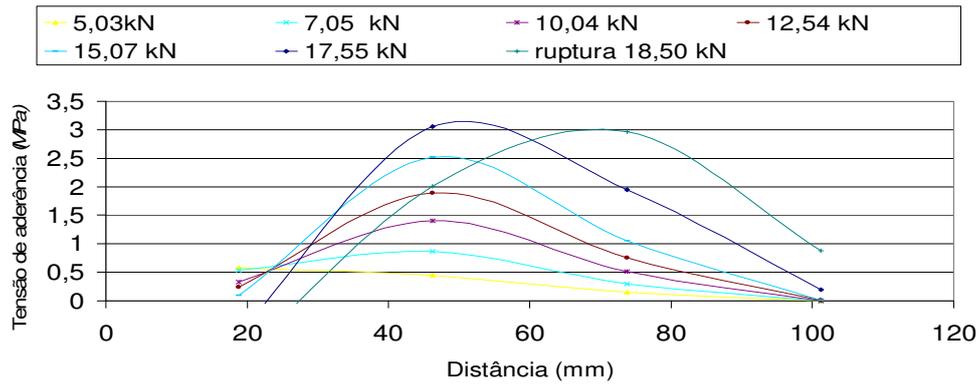


Figura 4.67 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-1.

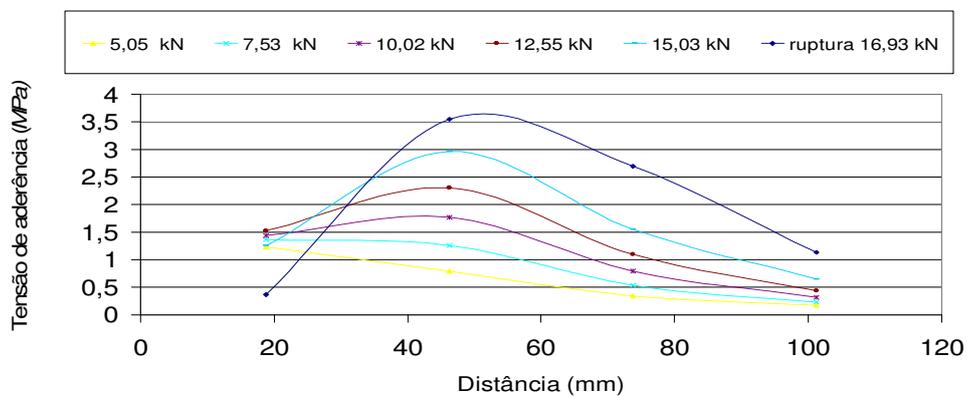


Figura 4.68 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova MCRIII-2.

Na Figuras 4.69 a 4.73 são analisadas as resistência de aderência ao longo do comprimento de ancoragem do CFC dos corpos-de-prova para o carregamento em ciclos de carga e descarga para os primeiros estágios de carregamento.

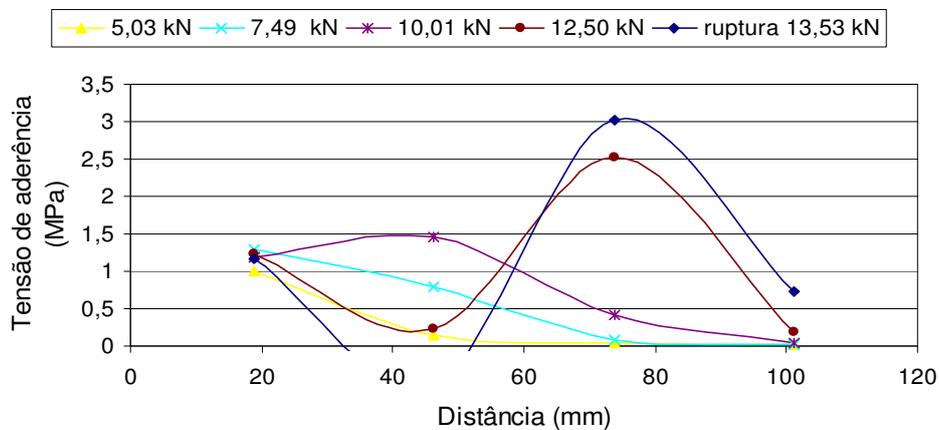


Figura 4.69 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLI-1.

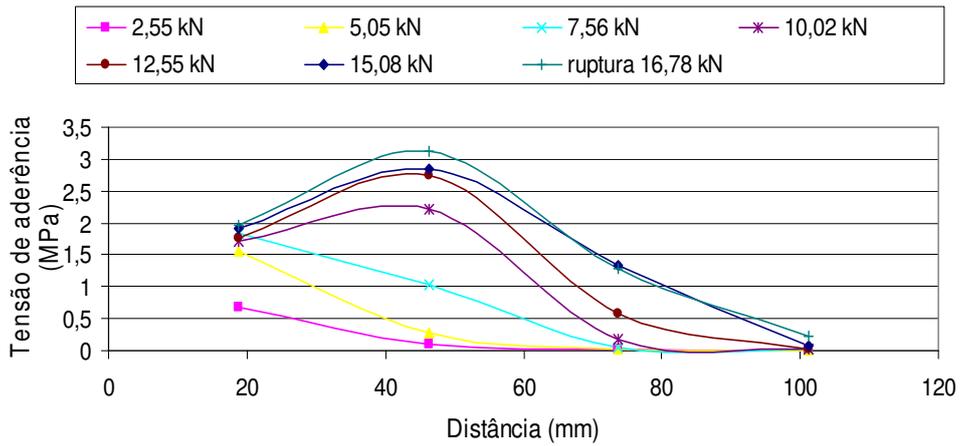


Figura 4.70 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLII-1.

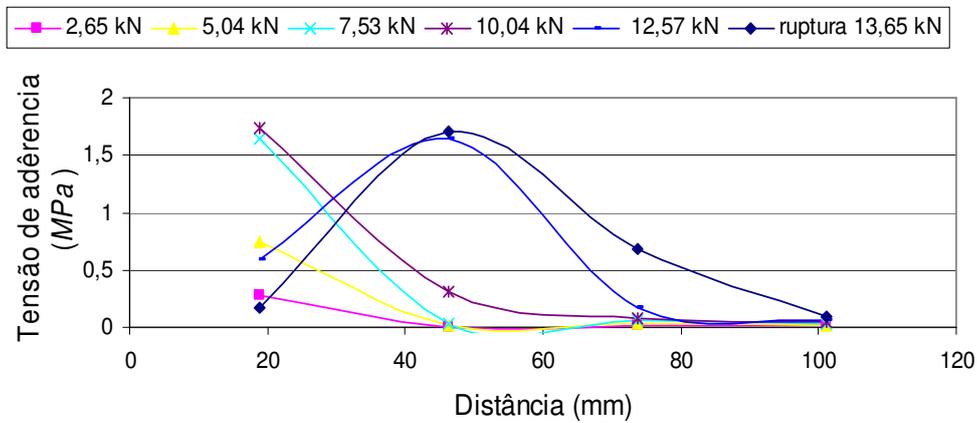


Figura 4.71 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDLIII-1.

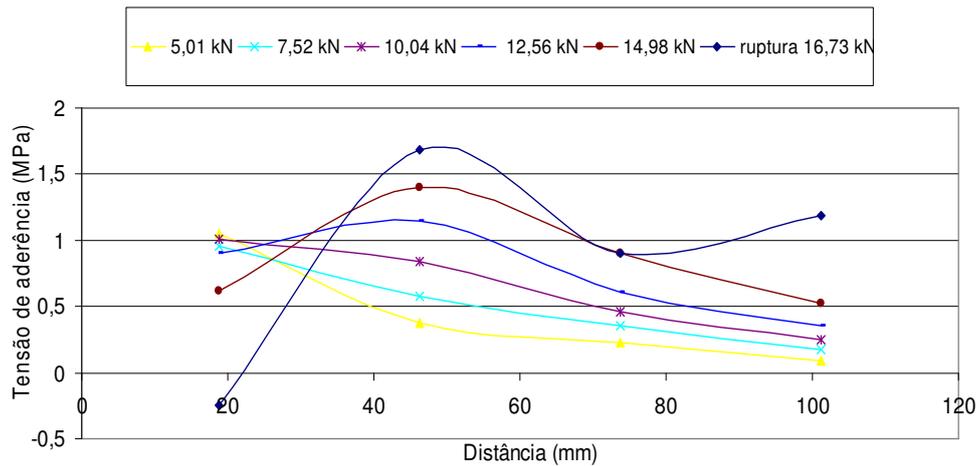


Figura 4.72 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRII-1.

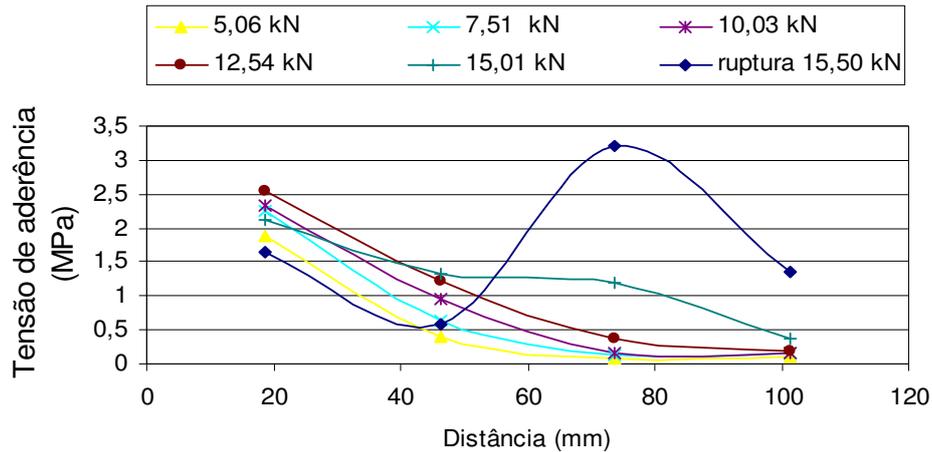


Figura 4.73 – Tensão de aderência x distância ao longo do comprimento de ancoragem para o corpo-de-prova CDRIII-1.

Na maior parte dos corpos-de-prova, com o aumento do carregamento as tensões de aderência aumentaram e os pontos de tensão máxima se deslocaram ao longo do comprimento de ancoragem do tecido. No momento da ruptura a tensão máxima ocorre nos trechos intermediários, trecho 2-3 e trecho 3-4. É importante salientar que os pontos tensão de aderência vs. distância nas Figuras 4.56 a 4.73, por representarem tensões médias nos trechos considerados, fazem com que o aspecto dessas curvas seja em geral diferente das curvas deformação específica vs. distância, cujos pontos representam a deformação nos locais dos extensômetros, nas Figuras 4.20 a 4.37.

#### 4.4.2. Resistência de aderência

Os valores da resistência última de aderência foram calculados em função da área total do CFC colado ao corpo-de-prova de concreto por meio da expressão:

$$f_{bu} = \frac{F_u}{l_{b,efet} b_f} \quad (4.3)$$

onde

$F_u$  – força última;

$l_{b,efet}$  – comprimento de ancoragem efetivo;

$b_f$  – largura do CFC.

A Tabela 4.2 mostra resultados da análise estatística efetuada para as os valores da resistência de aderência última, considerando-se as duas sistemáticas de cálculo, equações 4.1 e 4.3. Mostra também os resultados obtidos para os valores experimentais de Meneghel (2005). Os valores de resistência de aderência última obtidos pelo uso da equação 4.1 foram obtidos pela média das resistências de aderência dos trechos correspondentes à última leitura de deformações.

Tabela 4.2 – Resistências últimas de aderência dos corpos-de-prova.

Grupo	Corpo-de-prova	Resistências últimas de aderência (MPa)	
		Equação 4.1	Equação 4.3.
Grupo I	MCLI-1	0,382	1,729
	MCLI-2	1,977	1,618
	MCLII-1	1,045	1,961
	MCLII-2	1,152	1,688
	MCLIII-1	1,451	1,837
	MCLIII-2	1,590	1,896
Grupo II	MCRI-1*	–	–
	MCRI-2	2,514	1,975
	MCRI-3	1,644	1,844
	MCRII-1	2,988	1,562
	MCRII-2	0,809	1,674
	MCRIII-1	1,719	2,056
	MCRIII-2	1,936	1,882
Grupo III	CDLI-1	1,359	1,503
	CDLII-1	1,669	1,864
	CDLIII-1	0,660	1,517
Grupo VI	CDRII-1	1,004	1,858
	CDRIII-1	1,698	1,722
<b>Média</b>		<b>1,636</b>	<b>1,776</b>
<b>Desvio padrão (s)</b>		<b>0,694</b>	<b>0,165</b>
<b>Coefficiente de variação (%)</b>		<b>42,40</b>	<b>9,30</b>
Meneghel (2005)	L50-R25-2	2,85	2,00
	L50-R35-1	1,85	2,10
	L50-R45-1	1,42	1,47
	L50-R45-2	1,48	1,95
	L100-R35	2,13	2,55
	L100-R45	1,78	2,11
<b>Média</b>		<b>1,918</b>	<b>2,030</b>
<b>Desvio padrão (s)</b>		<b>0,525</b>	<b>0,347</b>
<b>Coefficiente de variação (%)</b>		<b>27,4</b>	<b>17,1</b>

\*Corpo-de-prova desconsiderado na análise.

Os valores estatísticos calculados para os resultados experimentais desse trabalho e de Meneghel (2005) indicam que:

- os resultados fornecidos pela equação 4.1 com os dados de Meneghel (2005) apresentam menor dispersão do que os dados experimentais deste trabalho;
- a dispersão dos resultados fornecidos pela equação 4.3 com os dados deste trabalho é cerca de 45% inferior à dispersão obtida com os dados de Meneghel (2005).

A menor dispersão obtida pela Equação 4.3 mostra a sua melhor adequação em relação à Equação 4.1, onde a resistência última de aderência foi obtida pela média de tensões nos 4 trechos considerados. Entretanto, a obtenção de resultados mais precisos através da Equação 4.3 depende da determinação confiável do comprimento de ancoragem efetivo  $l_{b,efet}$ , como obtido no presente trabalho.

Considerando os dados experimentais deste trabalho e de Meneghel (2005) com a Equação 4.3, e considerando-se um quantil de 5% na curva de Gauss, tem-se para a resistência de aderência característica:

$$f_{bk} = \bar{f}_b - 1,65s \quad (4.4)$$

segundo-se

$$f_{bk} = 1,842 - 1,65 \times 0,245 = 1,44MPa \quad (4.5)$$

Neste trabalho é adotado  $f_{bk} = 1,44MPa$  para as demais análises.

#### 4.5.

#### Efeito da resistência à compressão do concreto nas resistências últimas de aderência

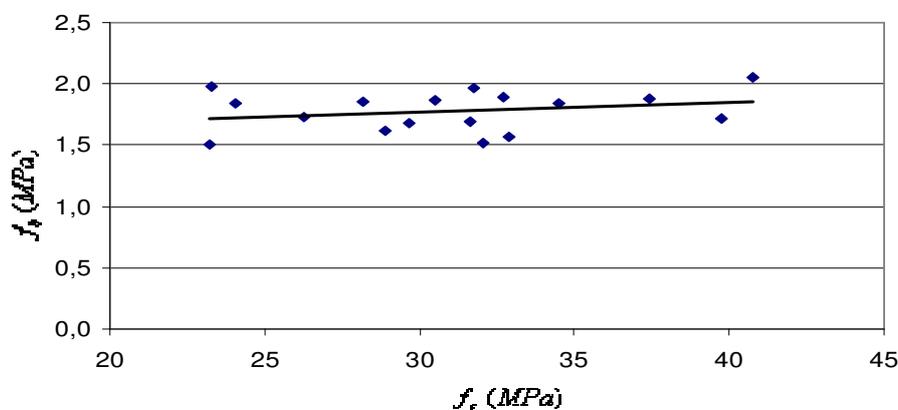


Figura 4.74 – Resistência aderência  $f_b$  vs. resistência do concreto  $f_c$ .

A Figura 4.74 mostra a relação entre a resistência à compressão do concreto e a resistência de aderência  $f_b$ , calculado pela equação 4.3, se observa que este não depende da resistência do concreto  $f_c$ , no intervalo estudado.

#### 4.6. Efeito da rugosidade nas resistências últimas aderência

A Figura 4.75 e a Tabela 4.3 mostram as resistências de aderência, obtidas pela equação 4.3, dos ensaios dos corpos-de-prova com superfície lisa e rugosa.

Tabela 4.3 – Resistência de aderência vs tipo de superfície do concreto.

Corpos-de-prova lisos	Resistência de aderência $f_b$ (MPa)	Corpos-de-prova rugosos	Resistência de aderência $f_b$ (MPa)
MCLI-1	1,729	MCRI-1	–
MCLI-2	1,618	MCRI-2	1,975
MCLII-1	1,961	MCRI-3	1,844
MCLII-2	1,688	MCRII-1	1,562
MCLIII-1	1,837	MCRII-2	1,674
MCLIII-2	1,896	MCRIII-1	2,056
CDLI-1	1,503	MCRIII-2	1,882
CDLII-1	1,864	CDRII-1	1,858
CDLIII-1	1,517	CDRIII-1	1,722
Média	1,735	Média	1,822
Desvio Padrão (s)	0,166	Desvio Padrão (s)	0,162
Coefficiente de Variação (CV) (%)	9,6	Coefficiente de Variação (CV) (%)	8,9

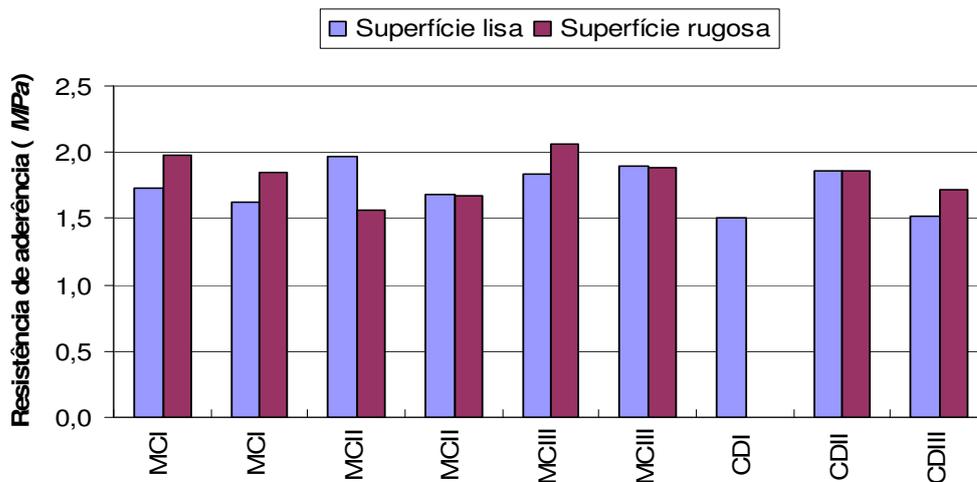


Figura 4.75 – Resistência de aderência  $f_b$  vs tipo de superfície do concreto.

Para os corpos de prova de superfície rugosa a média da resistência última de aderência foi 4,8% superior aos corpos-de-prova com superfície lisa.

#### 4.7.

#### Efeito do carregamento em ciclos de carga e descarga no CFC

Neste item são analisados os efeitos do carregamento em ciclos de carga e descarga realizados em cinco corpos-de-prova, identificados com a seguinte nomenclatura: CDLI-1, CDLII-1, CDLIII-1, CDRII-1, CDRIII-1.

Os carregamentos foram aplicados em incrementos de 2,5 kN (força atuando na lateral do CFC), seguido de descarga total.

As Figuras 4.76. a 4.85 mostram as deformações dos extensômetros 1 e 2 dos corpos-de-prova.

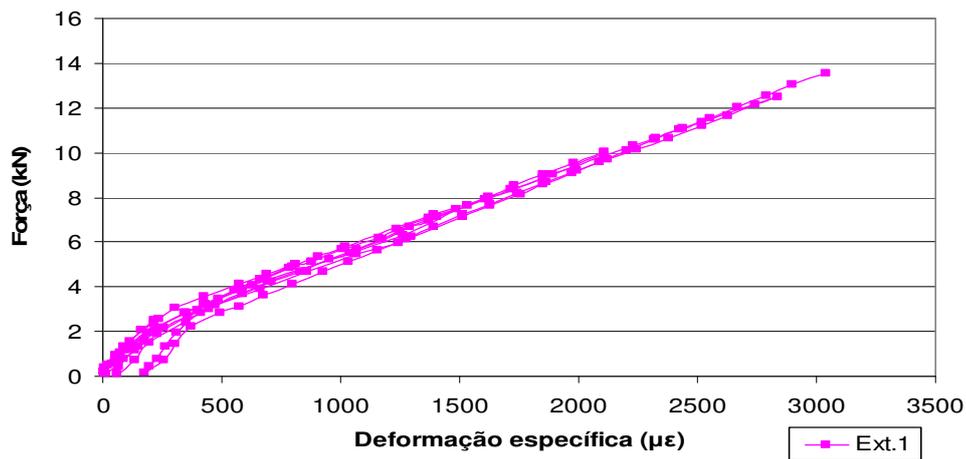


Figura 4.76 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 1 do corpo-de-prova CDLI-1.

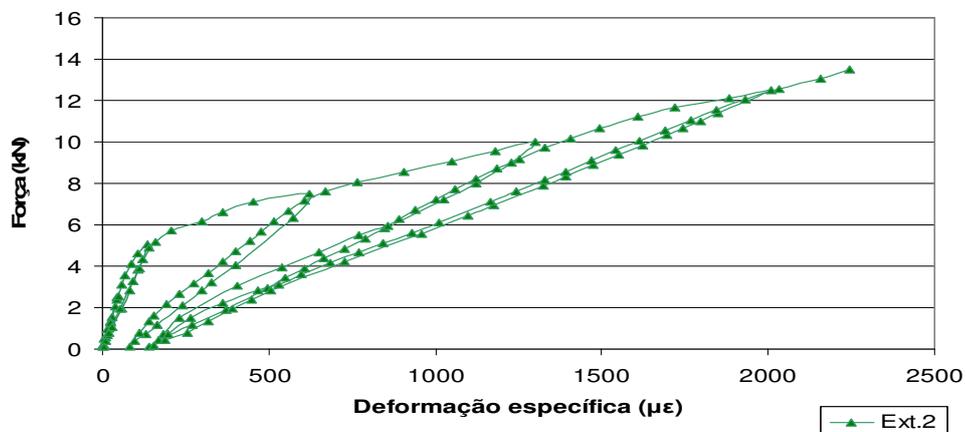


Figura 4.77 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetros 2 do corpo-de-prova CDLI-1.

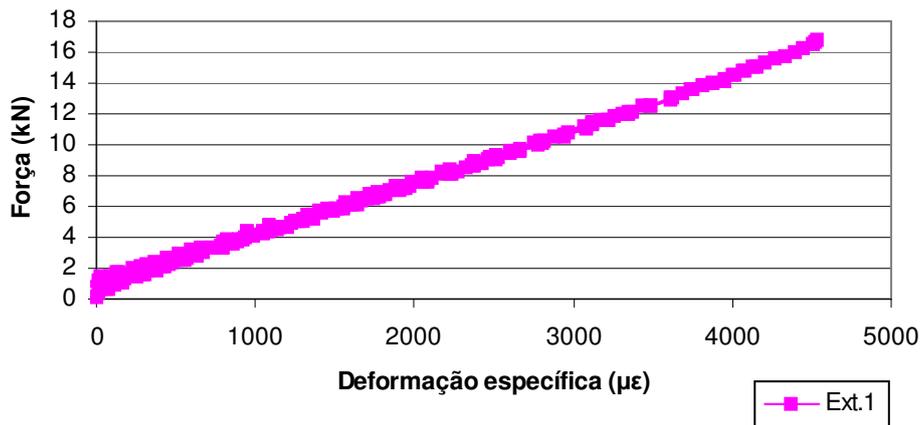


Figura 4.78 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 1 do corpo-de-prova CDLII-1.

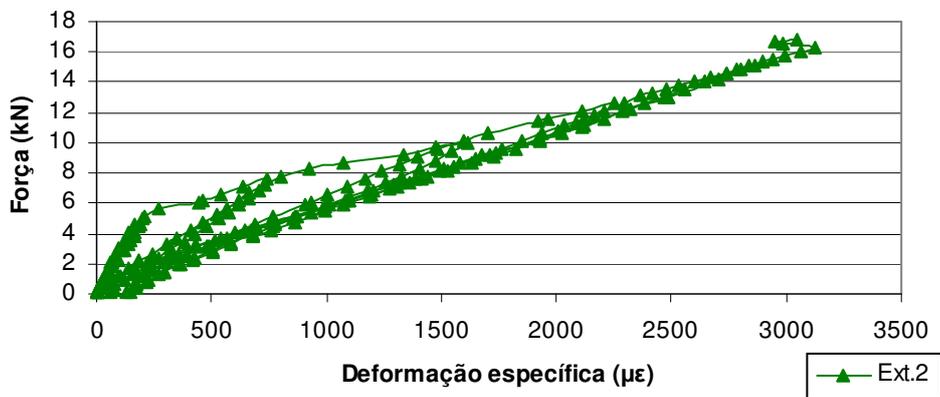


Figura 4.79 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 2 do corpo-de-prova CDLII-1.

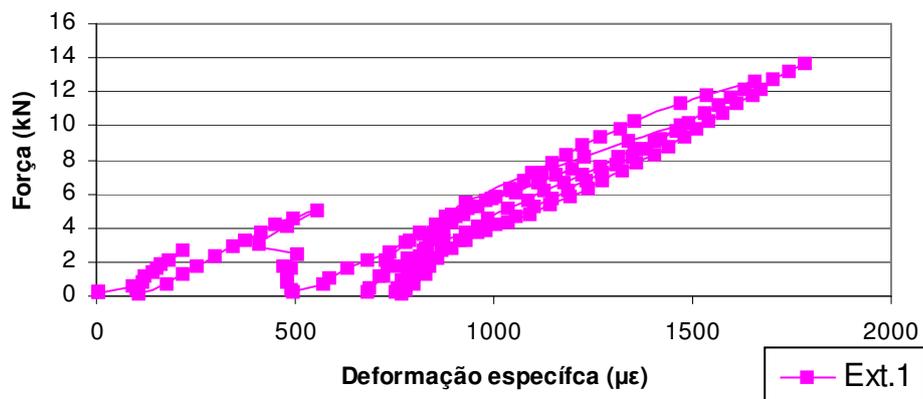


Figura 4.80 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 1 do corpo-de-prova CDLIII-1.

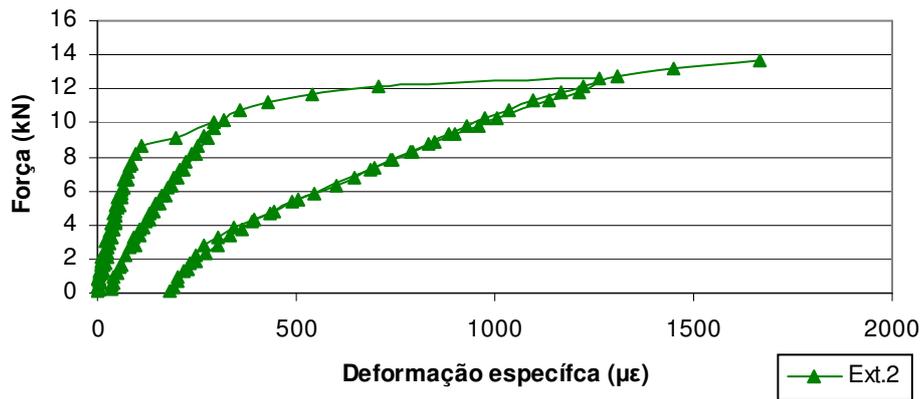


Figura 4.81 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 2 do corpo-de-prova CDLIII-1.

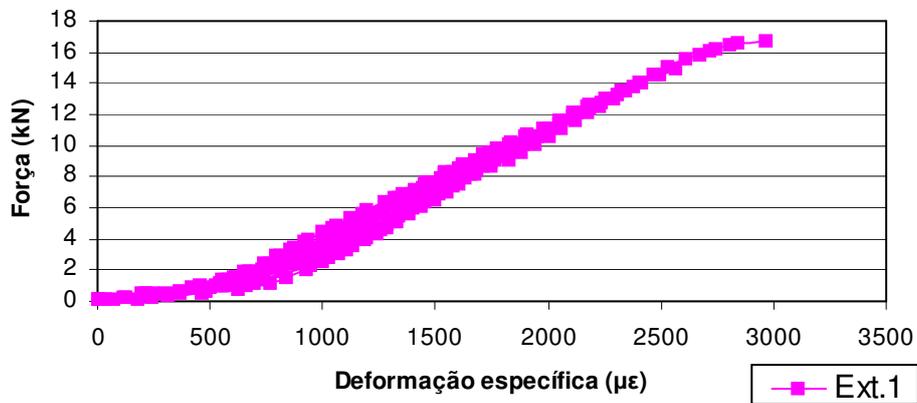


Figura 4.82 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 1 do corpo-de-prova CDRII-1.

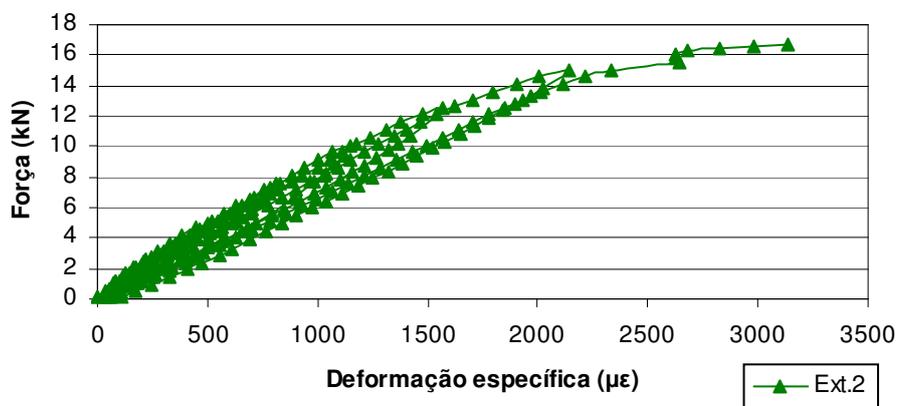


Figura 4.83 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 2 do corpo-de-prova CDRII-1.

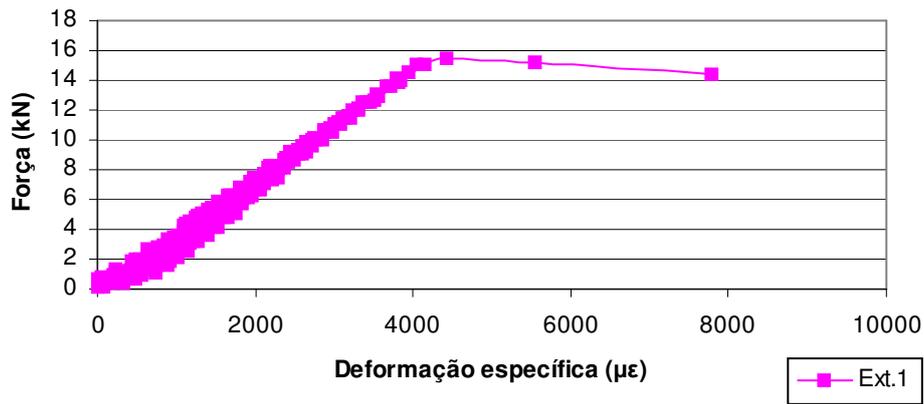


Figura 4.84 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 1 do corpo-de-prova CDRIII-1.

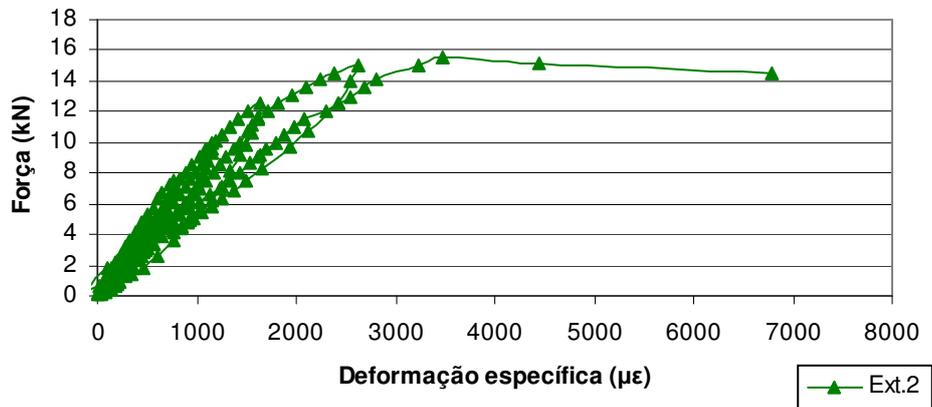


Figura 4.85 – Gráfico força x deformação específica do CFC 1 para ciclos de carga e descarga do extensômetro 2 do corpo-de-prova CDRIII-1.

O efeito do carregamento em ciclos de carga e descarga, na maior parte dos ensaios realizados, não apresentou grandes deformações residuais.

O extensômetro 1 do corpo-de-prova CDLIII-1 apresentou maiores deformações residuais de aproximadamente 800  $\mu\epsilon$  (Figura 4.80).

Os demais corpos-de-prova apresentaram pequenas deformações residuais de aproximadamente 200  $\mu\epsilon$ .

## 4.8. Energia de fratura

A energia de fratura  $G_F$  é dado pela área sob o gráfico  $\tau \times s$ , e pode ser obtida por meio de modelos teóricos, destacando-se o modelo de Holzenkämpfer (1994). Esse modelo consta no Bulletin 14 FIB (2001).

### 4.8.1. Modelo de Holzenkämpfer (1994)

Os resultados experimentais foram usados como dados para aferir o modelo de Holzenkämpfer (1994), pois esse modelo foi originalmente concebido e aferido para chapas metálicas colados ao concreto.

Desse autor tem-se:

$$F_u = b_f \sqrt{\frac{2G_{F,\text{teórico}} E_f t_f}{1 + \frac{E_f A_f}{E_c A_c}}} = b_f \sqrt{\frac{2G_{F,\text{teórico}} E_f t_f}{1 + n_f \rho_f}} \quad (4.6)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (4.7)$$

Explicitando-se a energia de fratura na equação 4.6 tem-se:

$$G_{F,\text{teórico}} = \left(\frac{F_u}{b_f}\right)^2 \left(1 + \frac{E_f A_f}{E_c A_c}\right) \left(\frac{1}{2E_f t_f}\right) \quad (4.8)$$

onde

$F_u$  – força última obtida no ensaio;

$b_f$  – largura do CFC;

$E_f$  – módulo de deformação do CFC;

$t_f$  – espessura do CFC;

$A_f$  – área do CFC;

$E_c$  – módulo de deformação do concreto;

$A_c$  – área do concreto do corpo-de-prova.

No cálculo do  $G_{F,teórico}$  foram usados os seguintes parâmetros:  $b_f = 75 \text{ mm}$ ,  $E_f = 247 \text{ GPa}$ ,  $t_f = 0,165 \text{ mm}$ ,  $A_f = 12,375 \text{ mm}^2$  ( $75 \text{ mm} \times 0,165 \text{ mm}$ ),  $E_c = 22.040 \text{ MPa}$  para série I,  $E_c = 34.280 \text{ MPa}$  para série II,  $E_c = 30.080 \text{ MPa}$  para série III,  $A_c = 40.000 \text{ mm}^2$ . As forças últimas  $F_u$  foram as forças obtidas nos ensaios.

O cálculo de  $G_{F,teórica}$  usando-se o valor experimental da força última  $F_u$ , permite relacionar esse parâmetro com a resistência de aderência  $f_b$  calculada por meio da equação 4.3. A Tabela 4.4 mostra as energias de fratura teóricas  $G_{F,teórica}$  calculadas com a equação 4.8

Tabela 4.4 – Relação entre a resistência de aderência  $f_b$ , obtido pela equação 4.3 e a energia de fratura teórica  $G_{F,teórica}$  obtida com expressão 4.8.

Corpo-de-prova	$f_b$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$G_{F,teórica}$ (N / mm)
MCLI-1	1,729	26,3	0,530
MCLI-2	1,618	28,9	0,464
MCLII-1	1,961	31,8	0,681
MCLII-2	1,688	31,7	0,505
MCLIII-1	1,837	34,5	0,597
MCLIII-2	1,896	32,7	0,636
MCRI-1*	–	–	–
MCRI-2	1,975	23,3	0,692
MCRI-3	1,844	24,1	0,603
MCRII-1	1,562	32,9	0,432
MCRII-2	1,674	29,7	0,496
MCRIII-1	2,056	40,8	0,749
MCRIII-2	1,882	37,4	0,627
CDLI-1	1,503	23,2	0,400
CDLII-1	1,864	30,5	0,615
CDLIII-1	1,517	32,1	0,407
CDRII-1	1,858	28,2	0,612
CDRIII-1	1,722	39,8	0,525
<b>Média</b>			<b>0,563</b>
<b>Desvio padrão</b>			<b>0,103</b>
<b>Coefficiente de variação (%)</b>			<b>18,32</b>

\*Corpo-de-prova desconsiderado na análise.

A análise estatística efetuada para os valores de  $G_F$  apresentou o valor médio de  $0,563 \text{ MPa}$ , desvio padrão igual a  $0,103$  e coeficiente de variação de  $18,32\%$ .

Usando-se o valor médio de  $G_F$  obtido na curva de tendência tem-se para o valor característico da energia de fratura  $G_{F,k}$ :

$$G_{F,k} = \bar{G}_F - 1,65s \quad (4.9)$$

$$G_{F,k} = 0,563 - 1,65 \times 0,103 = 0,393 \frac{N}{mm} \quad (4.10)$$

As Figuras 4.86 e 4.87 mostram a relação entre a resistência à compressão  $f_c$  a resistência de aderência  $f_b$  vs. a energia de fratura  $G_{F,teórica}$ .

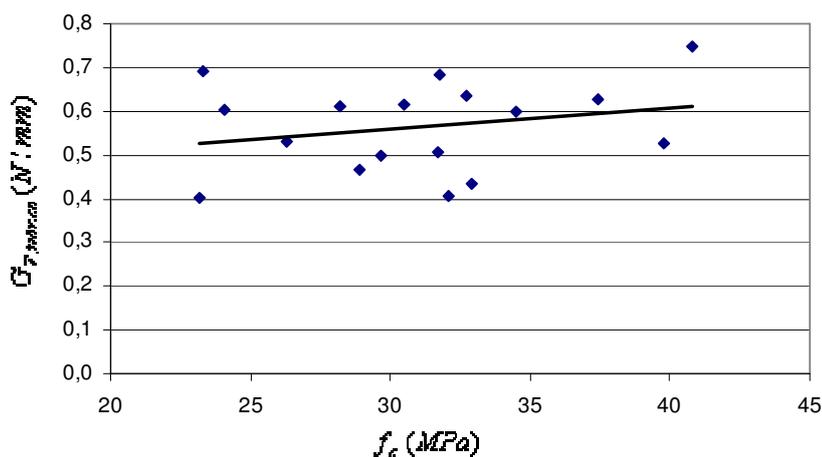


Figura 4.86 – Resistência à compressão  $f_c$  vs. energia de fratura  $G_{F,teórica}$ .

Na equação 4.8 se observa que  $G_{F,teórica}$  não depende diretamente da resistência do concreto no intervalo estudado, mas o módulo de elasticidade do concreto  $E_c$  consta dessa equação. Ressalta-se que  $1 + \left( \frac{E_f A_f}{E_c A_c} \right) \cong 1$ ,  
 donde tem-se:

$$G_{F,teórico} = \left( \frac{F_u}{b_f} \right)^2 \left( \frac{1}{2E_f t_f} \right) \quad (4.11)$$

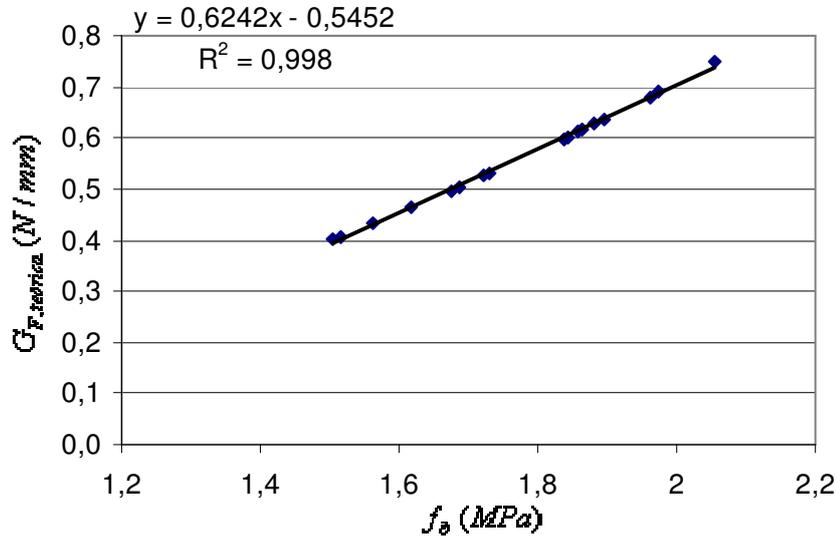


Figura 4.87 – Resistência de aderência  $f_b$  vs. energia de fratura  $G_{F,teórica}$ .

A variação da energia de fratura  $G_{F,teórica}$  em função da resistência de aderência  $f_b$  mostrada na Figura 4.87, indica que a curva de tendência tem bom ajuste de dados. A curva  $G_{F,teórica} = 0,6242f_b + 0,5452$  com  $R^2=0,998$  serve como um bom referencial inicial para estudos posteriores.

Manipulando-se as expressões que constam de Holzenkämpfer (1994) e do Bulletin 14 FIB (2001) seguem-se respectivamente:

$$l_f = 2 \sqrt{\frac{2G_f E_f t_f}{\tau_{máx}^2}} \quad (4.12)$$

$$l_f = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}} \quad (4.13)$$

Usando-se o valor de  $G_{F,k}$  e  $f_{b,k}$  na Equação 4.12 tem-se:

$$l_f = 2 \sqrt{\frac{2 \times 0,393 \times 247000 \times 0,165}{1,44^2}} = 248,5 \text{ mm}$$

O valor de  $l_f$  calculado por esse modelo foi cerca de duas vezes superior ao valor usado nos ensaios. O valor de  $l_f = 248,5\text{ mm}$  calculado com o valor de  $f_{b,k}$  é muito conservativo, visto que o comprimento adotado foi igual a  $120\text{ mm}$ , e no extremo desse comprimento quase não existiam tensões de aderência. Ressalta-se que o modelo de Holzenkämpfer (1994) foi originalmente estudado para chapas metálicas.

Segundo o Bulletin 14 FIB (2001) o coeficiente  $c_2$  deve ser obtido a partir de resultados experimentais. Neste trabalho os valores de  $c_2$ , foram obtidos usando-se a Equação 4.13, escrita sob a forma:

$$c_2 = \frac{E_f t_f}{l_f^2 f_{ctm}} \quad (4.14)$$

Com a relação dada pela NBR 6118/2003:

$$f_{ctm} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (4.15)$$

Tem-se os valores mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – resultados da calibração de  $c_2$  pela equação 4.14.

Série	$f_{ct}$ (MPa)	$c_2$
I	2,57	1,103
II	2,84	0,998
III	3,17	0,893

#### 4.9.

#### Tensão tangencial máxima resistida pelo substrato de concreto

A tensão de tangencial máxima atuante no substrato de concreto deve atender a um critério de ruptura, sendo adotado o critério de Coulomb-Mohr generalizado. A Figura 4.88 e Figura 4.89 mostram o estado de tensões atuantes na interface concreto adesivo.

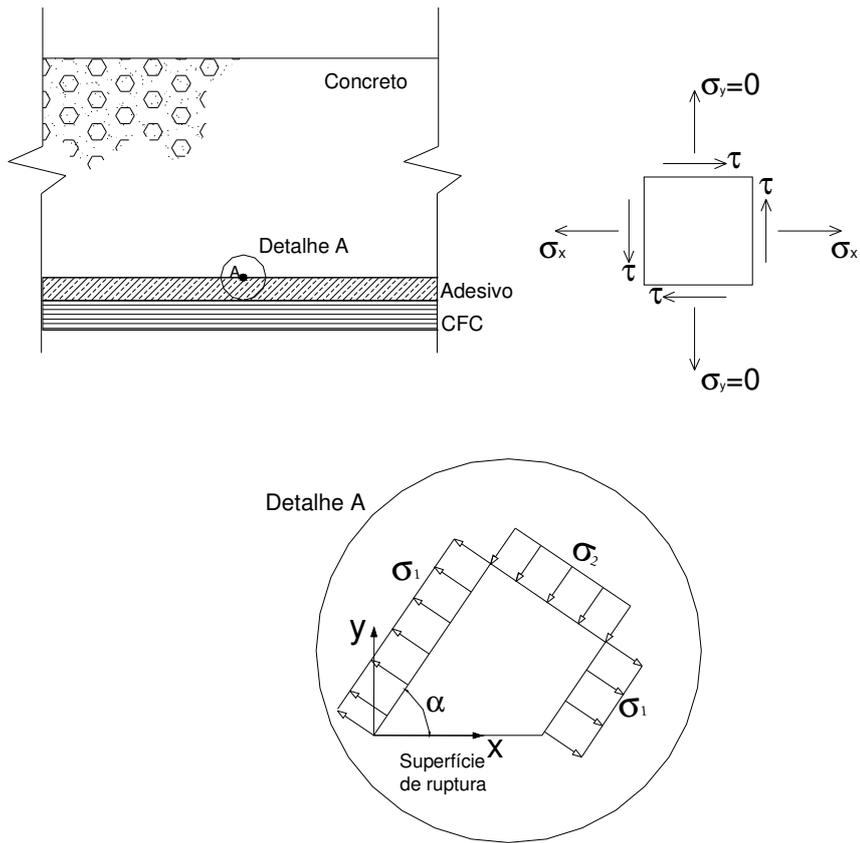


Figura 4.88 – Tensões principais atuantes no substrato de concreto.

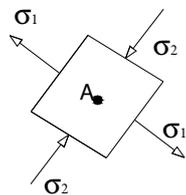


Figura 4.89 – Detalhe das tensões principais atuantes no substrato de concreto.

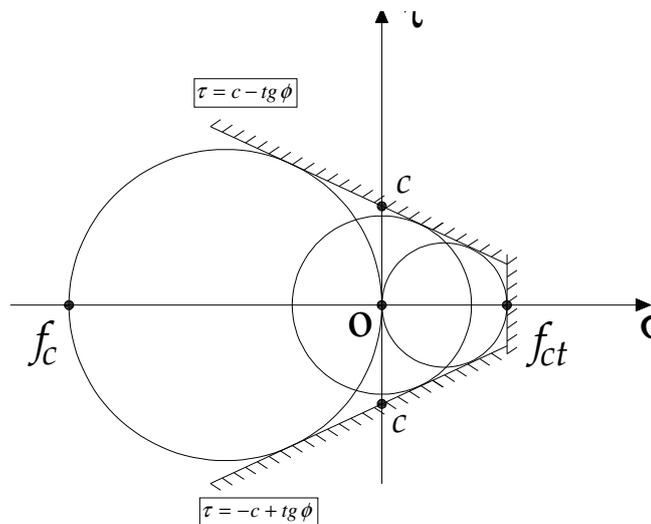


Figura 4.90 – Critério de ruptura de Coulomb-Mohr generalizado para o concreto.

O tensor de tensões no ponto A é dado por:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

sendo as tensões principais

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{4} + \tau_{xy}^2} \quad (4.17)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{4} + \tau_{xy}^2} \quad (4.18)$$

A envoltória do critério de ruptura em forma normalizada é dada por:

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{m} \left[ 1 + (m-1) \frac{\sigma_y}{f_c} \right]} \quad (4.20)$$

Sendo  $\sigma_y = 0$  tem-se:

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{m}} \quad (4.20)$$

Pondo-se:

$$m = \frac{f_c}{f_{ct}} \quad (4.19)$$

onde  $f_c$  e  $f_{ct}$  são, respectivamente, a resistência a compressão e a resistência a tração do concreto obtidas em ensaios normalizados, resulta:

$$\frac{\tau}{f_c} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f_{ct}}{f_c}} \quad (4.20)$$

Com essas expressões e atendendo-se ao critério de ruptura de Coulomb-Mohr generalizado, tem-se para a tensão tangencial máxima resistida pelo substrato de concreto:

$$\tau_{máx} = \frac{1}{2} \sqrt{f_c f_{ct}} \quad (4.20)$$

Essa tensão tangencial é função das resistências à compressão e à tração do concreto.

Tabela 4.6 – Análise da tensão  $\tau_{m\acute{a}x}$ , calculada pela equação 4.18.

Corpo-de-prova	$f_c$ (MPa)	$f_{ct}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$f_b = \frac{F_u}{b_f \ell_f}$ (MPa)	$\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$
MCLI-1	26,29	2,57	4,108	1,729	0,421
MCLI-2	28,91	2,57	4,307	1,618	0,376
MCLII-1	31,75	2,84	4,749	1,961	0,413
MCLII-2	31,65	2,84	4,741	1,688	0,356
MCLIII-1	34,53	3,17	5,226	1,837	0,352
MCLIII-2	32,72	3,17	5,088	1,896	0,373
MCRI-1*	–	–	–	–	–
MCRI-2	23,28	2,57	3,867	1,975	0,511
MCRI-3	24,06	2,57	3,933	1,844	0,469
MCRII-1	32,92	2,84	4,830	1,562	0,323
MCRII-2	29,68	2,84	4,589	1,674	0,365
MCRIII-1	40,76	3,17	5,683	2,056	0,362
MCRIII-2	37,40	3,17	5,441	1,882	0,346
CDLI-1	23,24	2,57	3,859	1,503	0,390
CDLII-1	30,48	2,84	4,651	1,864	0,401
CDLIII-1	32,08	3,17	5,041	1,517	0,301
CDRII-1	28,15	2,84	4,472	1,858	0,415
CDRIII-1	39,77	3,17	5,613	1,722	0,307
<b>Média</b>			<b>4,717</b>	<b>1,776</b>	<b>0,381</b>
<b>Desvio padrão</b>			<b>0,585</b>	<b>0,165</b>	<b>0,054</b>
<b>Coefficiente de variação (%)</b>			<b>12,39</b>	<b>9,30</b>	<b>14,30</b>

\*corpo-de-prova desconsiderado na análise.

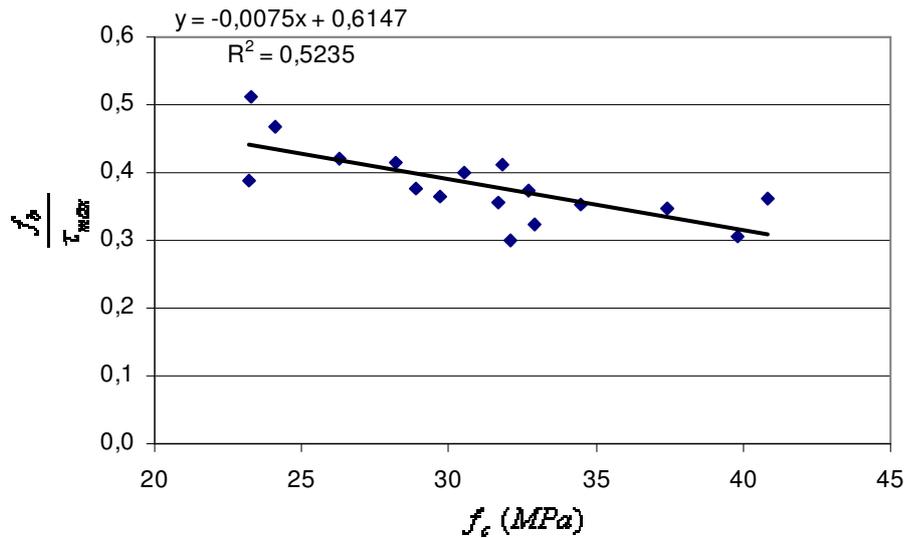


Figura 4.91 – Gráfico  $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$  vs. resistência à compressão do concreto  $f_c$ .

O comportamento da relação  $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$  vs. resistência à compressão do concreto  $f_c$  é mostrado no da Figura 4.91 e indica que a curva  $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}} \times f_c$  tem um ajuste de dados regular, mostrando que relação  $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$  diminui com o aumento da resistência à compressão do concreto.

Para os cálculos usais adotando-se  $m = 10$  tem-se:

$$\tau_{m\acute{a}x} = 0,158 f_c \quad (4.19)$$

O cálculo do valor característico da relação  $\frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}}$  para um quantil de 5% na curva de Gauss:

$$\left( \frac{f_b}{\tau_{m\acute{a}x}} \right)_k = 0,381 - 1,65 \cdot 0,054 = 0,291 \quad (4.20)$$

então:

$$f_b = 0,291 \tau_{m\acute{a}x} = 0,291 \times 0,158 f_c \quad (4.21)$$

donde resulta

$$f_b = 4,60\% f_c \leq 1,44 \text{ MPa} \quad (4.22)$$

Se for adotado a relação prescrita pela NBR 6118/2003 tem-se:

$$f_{ct} = 0,3 f_c^{\frac{2}{3}} \quad (4.23)$$

Portanto, com uma análise análoga à anterior tem-se:

$$f_{b.} = 7,97\% f_c^{0,8335} \leq 1,44 MPa \quad (4.24)$$

A diferença entre essas duas sistemáticas é da ordem de 5% para  $f_c = 20 MPa$ , e para os concretos com maiores resistências o valor  $f_{bk} = 1,44 MPa$  limita a tensão de aderência.

Com essa análise observa-se que concretos com  $f_c < 23 MPa$  podem romper para  $\tau_{máx} < f_{bk} = 1,44 MPa$ . Entretanto, os resultados experimentais mostraram que esse valor de  $f_{bk}$  atende a todos os tipos de ensaios realizados.

As resistências à compressão dos corpos-de-prova ensaiados situam-se no intervalo  $23 MPa \leq f_c \leq 40 MPa$ , donde para casos em que  $15 MPa \leq f_c \leq 22 MPa$  não se pode afirmar que a tensão característica de aderência seja  $1,44 MPa$ . Para confirmar esse óbice foram calculadas de acordo com a expressão 4.20 as tensões de aderência relativas ao intervalo  $15 MPa \leq f_c \leq 22 MPa$  que são  $0,690 MPa \leq f_b \leq 1,012 MPa$ .

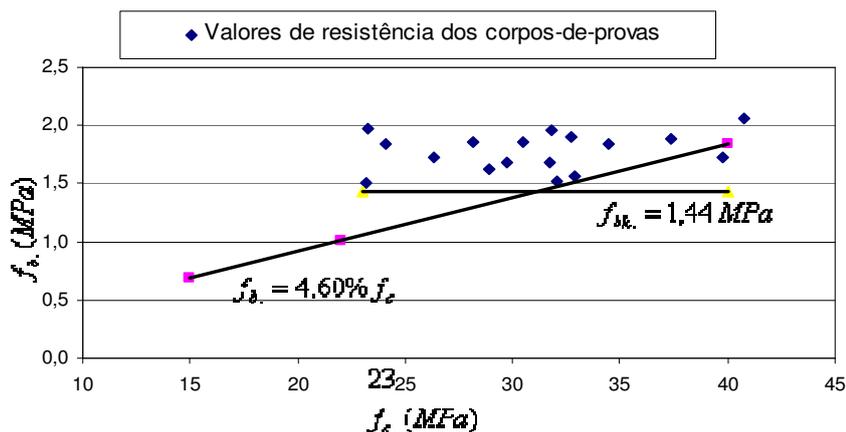


Figura 4.92 – Resistência de aderência para concretos com resistência  $f_c$  acima de  $15 MPa$ .

A Figura 4.92 mostra que  $f_b = 4,60\% f_c$  pode ser usado a favor da segurança em concretos com  $f_c < 23 MPa$ .