

5

Apresentação e Análises dos Resultados

Neste capítulo será apresentada uma síntese dos resultados obtidos nas simulações numéricas do ensaio de Tração em Disco Circular com Fenda DC(T), realizadas nesta pesquisa, comparando-os com os resultados experimentais determinados em laboratório por Hirsch (2009). Também serão apresentados os resultados de análises paramétricas obtidas com a variação dos parâmetros mecânicos módulo de elasticidade (ME), resistência à tração estática (RT) e energia de faturamento (G_f) em diferentes situações.

5.1.

Aferição da Curva Força vs Deslocamento

A aferição do modelo numérico foi feita através das curvas obtidas nos ensaios de DC(T) dos corpos de prova ensaiados em laboratório por Hirsch (2009), procurando-se ajustar os parâmetros em mesoescala, referentes às partículas e contatos no modelo numérico, de tal forma que houvesse a melhor concordância possível entre as curvas força versus abertura da trinca determinadas experimental e numericamente.

Embora esta concordância, sob ponto de vista quantitativo, não tenha sido atingida, a comparação dos resultados, na Figura 5.1, mostra que ao menos qualitativamente a modelagem numérica simulou adequadamente as tendências gerais de comportamento do material asfáltico ensaiado em laboratório.

Na simulação computacional a força máxima prevista foi estimada 250% maior do que a obtida experimentalmente, com a energia de fratura (G_f) resultando superior na modelagem numérica (2622.76 J/m²) do que na experimental (2166.78 J/m²).

A curva indicada como calibrada na Figura 5.1 foi obtida igualando as energias de fatura, multiplicando-se o valor numérico pelo fator de calibração 0.83 (tabela 5.1).

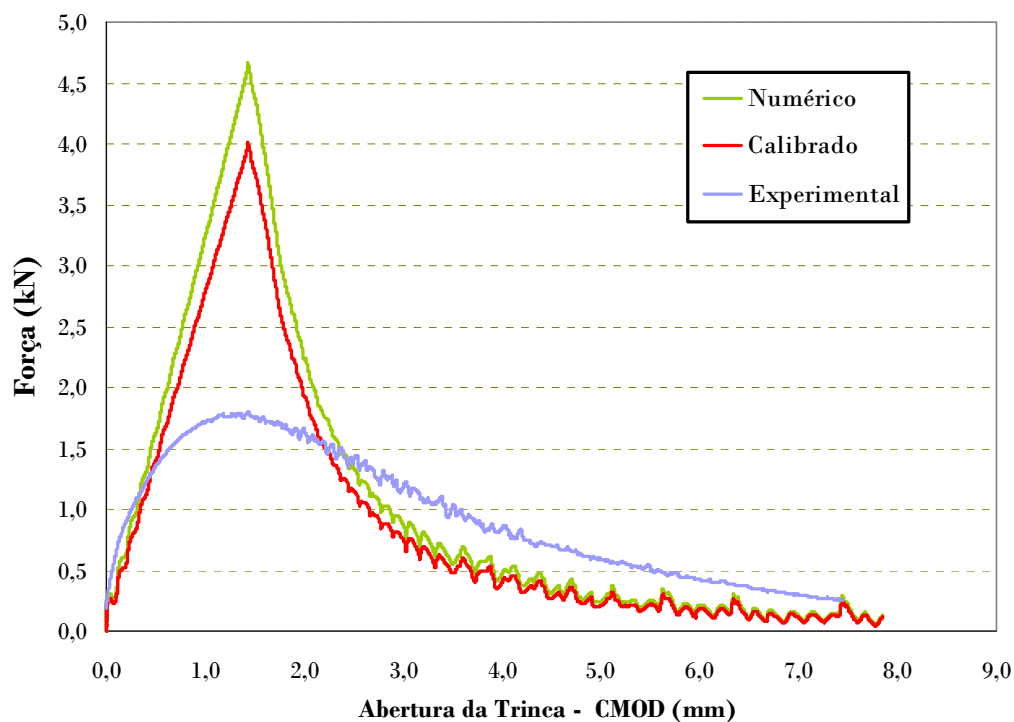


Figura 5.1 - Curvas força vs abertura da trinca (CMOD) obtidas numericamente (nesta pesquisa) e experimentalmente por Hirsch (2009)

Tabela 5.1 Fator de calibração da energia de fratura no modelo numérico.

Corpos de Prova	Area (N*m)	Gf (J/m ²)
Numérico	10,82	2622,76
Calibrado	9,32	2166,66
Experiemental (CP_B34)	9,33	2166,78
Fator de Calibração		0,83

Na Figura 5.2 são comparados os valores da energia de fratura (G_f) das curvas do modelo numérico, do modelo numérico calibrado e do modelo experimental do corpo de prova CP-B34.

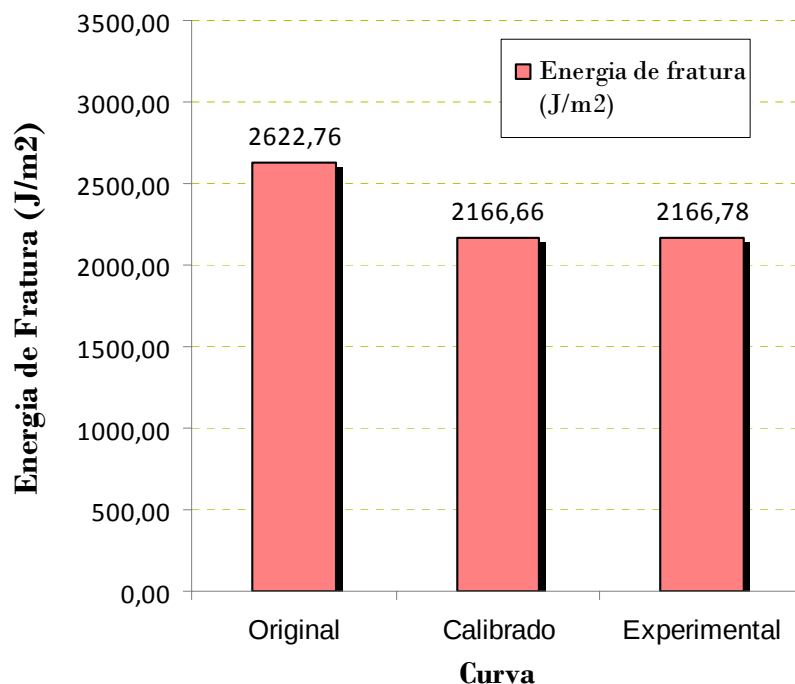


Figura 5.2 - Energia de fratura das curvas força vs abertura de trinca (CMOD).

Finalmente, na tabela 5.2 são apresentadas então as propriedades em macro e mesoescalas, correspondentes às curvas experimental e numérica calibrada, respectivamente, adotadas na continuação deste trabalho.

Tabela 5.2 – Propriedades em macro e mesoescalas das curvas experimental e numérica calibrada, respectivamente.

Corpo de Prova (CP_B34) Hirsch (2009)		Propriedades em Macroescala			Propriedades em Mesoescala		
Temperatura (°C)	Espessura (mm)	Energia de Fratura (J/m²)	Módulo de Young E (GPa)	Resistência à Tração RT (MPa)	Rigidez da partícula (GPa)	Resistência da Ligação (MPa)	Energia de Fratura (J/m²)
25	50	2166,78	4,00	2,00	0,07	8,00	2166,00

Freitas (2002) investigou a propagação de trincas em misturas asfálticas pelo método dos elementos finitos (MEF), considerando corpos de prova cilíndricos com uma trinca pré-existente no centro do corpo de prova sob forma de losango. Obteve curvas força vs deslocamento muito próximas às curvas experimentais, possivelmente porque a trinca pré-existente representava 2% da

área total do modelo, enquanto que no presente estudo os furos de carga e a trinca inicial somam mais do que 6% da área do disco do ensaio DC(T).

Song (2006) realizou modelagem do ensaio DC(T) também utilizando o método dos elementos finitos com o programa comercial ABAQUS, incorporando o modelo de zona coesiva. Os resultados obtidos das curvas força-abertura da trinca (CMOD) em relação aos resultados experimentais de Wagoner (2006) diferem em 20%.

Kim (2007) empregou o método dos elementos discretos nos resultados experimentais obtidos por Wagoner (2005) em ensaios de Disco Circular com Fenda DC(T), utilizando o programa comercial PFC2D com o modelo de zona coesiva com amolecimento. Kim (2007) realizou dois tipos de simulação: a primeira, considerando o corpo de prova como material homogêneo formado por partículas de mesmo tamanho, e a segunda simulação considerando o material como heterogêneo, com base em técnicas de imagem de alta resolução para definição da composição do corpo de prova (asfalto, interface e agregado). Os resultados obtidos na simulação numérica considerando a heterogeneidade do material foram bastante satisfatórios.

5.2.

Análises Paramétricas

Para a realização de análises paramétricas, os corpos de prova foram subdivididos em 4 grupos, cada qual com diferentes valores dos parâmetros mecânicos de interesse, em macro e mesoescalas: módulo de elasticidade (ME) e resistência à tração (RT).

Foram observadas a variação das curvas força vs abertura de trinca (CMOD), bem como o comportamento dos valores da energia de fratura (G_f) em relação à rigidez da partícula, da energia de fratura (G_f) em relação ao módulo de elasticidade e da rigidez da partícula em relação ao módulo de elasticidade.

5.2.1.

Grupo I: Corpos de Prova do Grupo A (CP_A)

Neste grupo de 6 corpos de prova as análises foram executadas mantendo-se a resistência à tração (RT) constante e verificando-se o comportamento da curva força vs abertura da trinca conforme Figura 5.3.

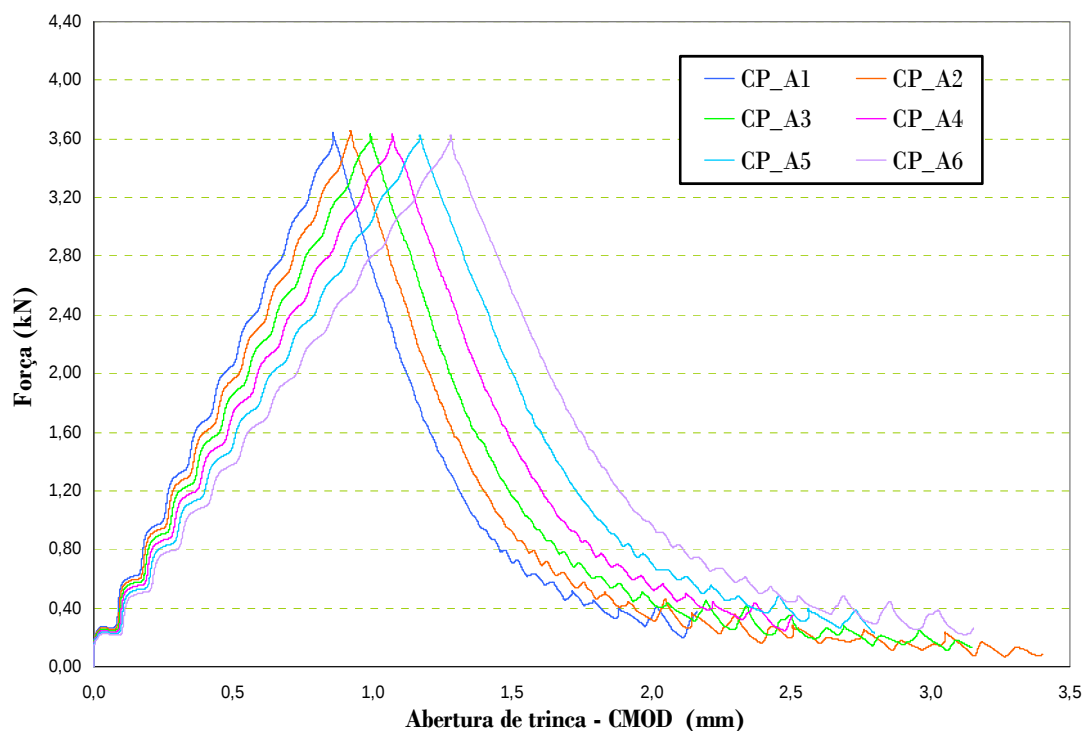


Figura 5.3 - Curvas força vs abertura de trinca (CMOD) para 6 corpos de prova do grupo CP_A mantendo-se a resistência à tração constante.

Com a diminuição do valor do módulo de elasticidade (em macroescala) de 1.5 GPa para 1.0 GPa, conforme valores listados na tabela 5.3, aumentam as aberturas de trinca (Figura 5.3) e da energia de fratura (Figura 5.4).

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas e energia de fraturamento nos corpos de prova do grupo CP_A

Corpos de Prova A	Propriedades em Macroescala		Propriedades em Mesoescala		Area (N*m)	Energia de fratura G_f (J/m ²)
	Módulo de Young, E (GPa)	Resistência à Tração, RT (MPa)	Rigidez da partícula (GPa)	Resistência de Ligação (MPa)		
CP_A1	1,50	2,00	0,0765	7,00	3,06	741,90
CP_A2	1,40	2,00	0,0714	7,00	3,45	837,06
CP_A3	1,30	2,00	0,0663	7,00	3,61	874,90
CP_A4	1,20	2,00	0,0612	7,00	3,69	893,84
CP_A5	1,10	2,00	0,0561	7,00	4,00	970,84
CP_A6	1,00	2,00	0,0510	7,00	4,37	1058,60

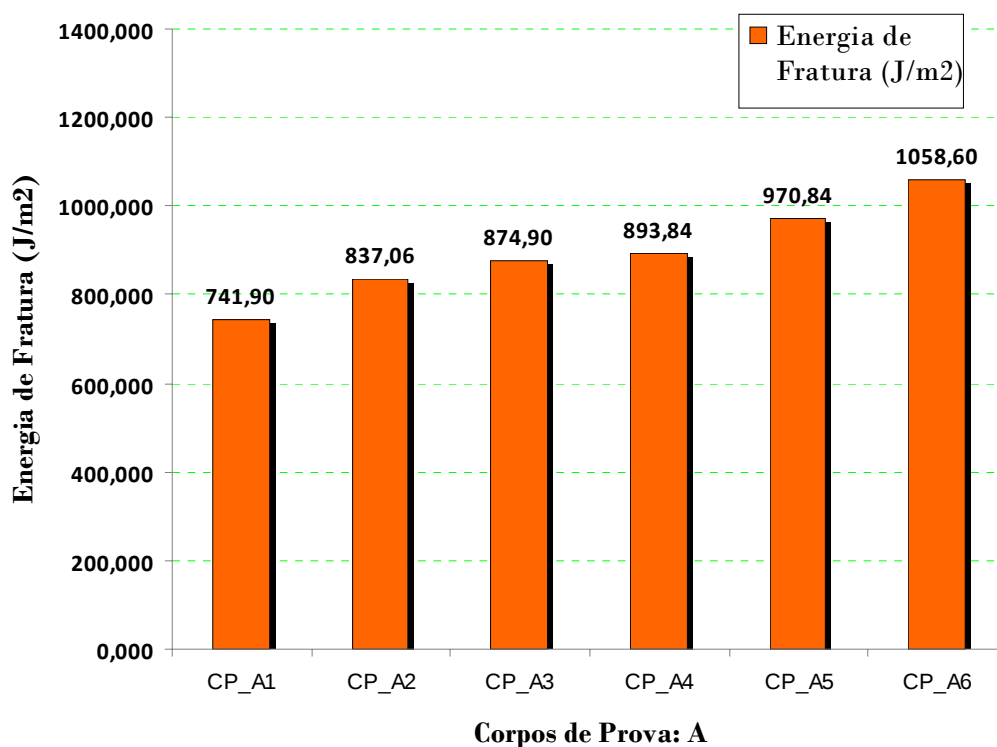


Figura 5.4 - Variação da energia de fratura nos corpos de prova do Grupo I (CP_A).

Nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 são apresentadas as relações entre energia de fratura (G_f) vs rigidez da partícula, energia de fratura (G_f) vs módulo de elasticidade (E) e rigidez da partícula vs módulo de elasticidade (E), respectivamente. Os gráficos apresentados nas duas primeiras figuras ilustram o

decaimento da energia de fratura com a rigidez da partícula e do módulo de elasticidade, respectivamente.

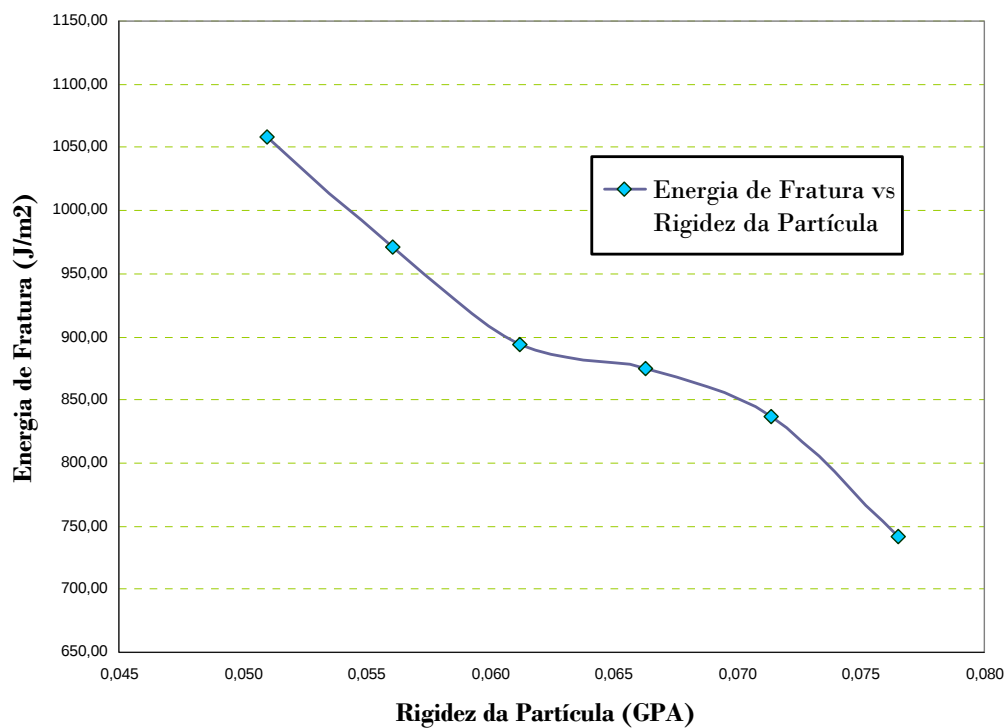


Figura 5.5 - Relação entre energia de fratura (G_f) e rigidez da partícula nos corpos de prova CP_A do grupo I.

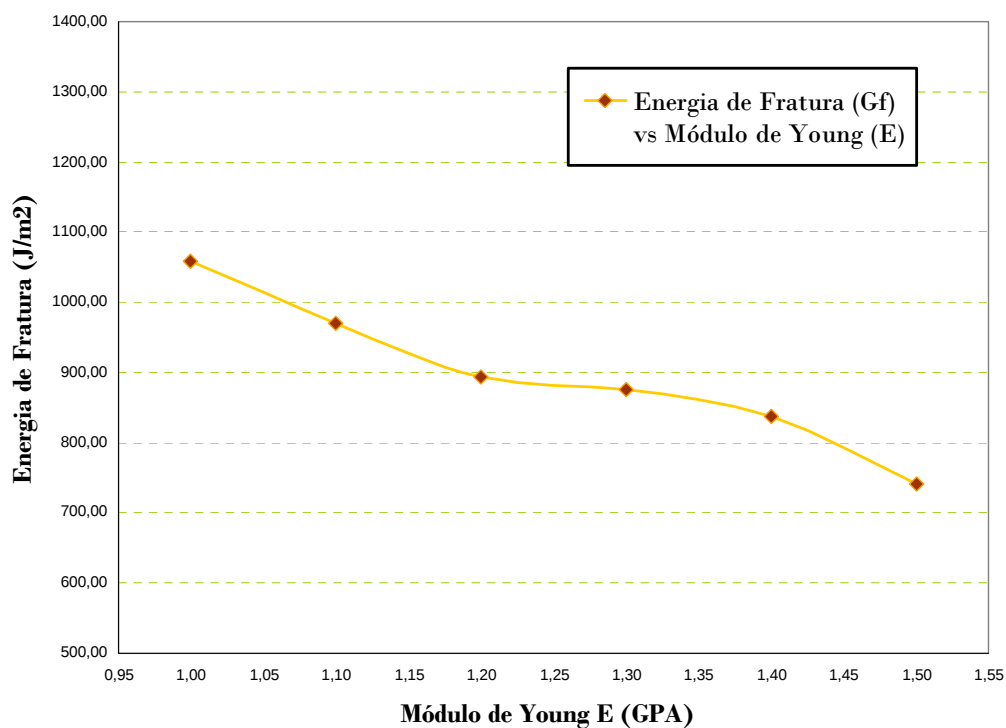


Figura 5.6 - Relação entre a energia de fratura (G_f) e módulo de elasticidade nos corpos de prova CP_A do grupo I.

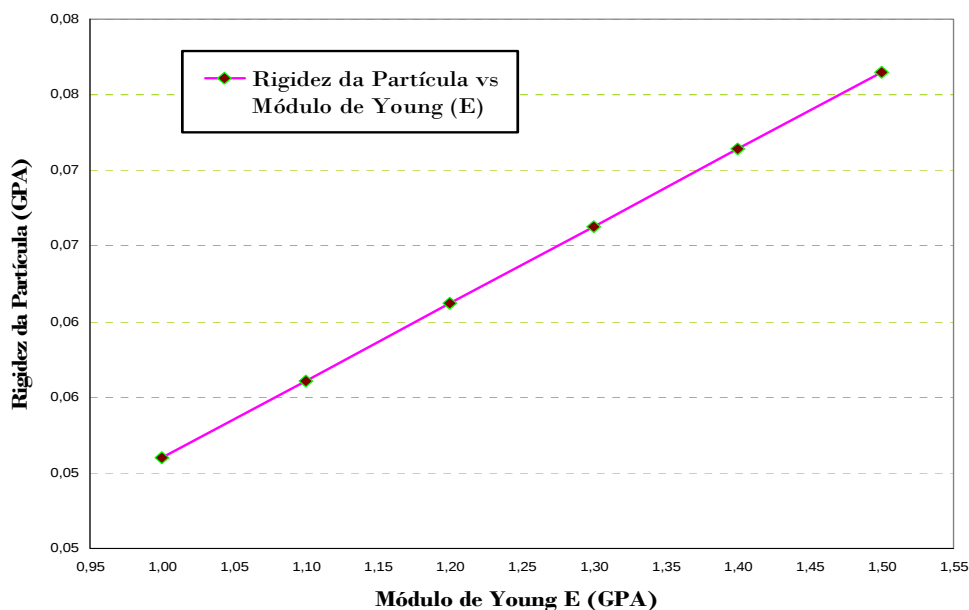


Figura 5.7 - Relação linear entre a rigidez da partícula e o módulo de elasticidade.

5.2.2.

Grupo II: Corpos de Prova do Grupo B (CP_B)

Análises similares foram executadas com os corpos de prova do grupo B, mantendo-se desta vez constante o valor do módulo de elasticidade (E) e obtendo-se os resultados da Figura 5.8, em termos das curvas força vs abertura da trinca correspondentes aos 6 corpos de prova listados na tabela 5.4.

Diminuindo-se o valor da resistência à tração de 2 Mpa para 1 Mpa, a força na máxima abertura de trinca diminuiu também progressivamente, variando de 4.2 kN (corpo de prova CP_B1) para 3.3 kN (corpo de prova CP_B3), assim como observa-se um decréscimo no valor da energia de fratura correspondente (Figura 5.9).

As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam a relação entre a energia de fratura (G_f) e a resistência da ligação, a energia de fratura (G_f) e a resistência à tração (RT) e a resistência da ligação vs resistência a tração (RT), respectivamente.

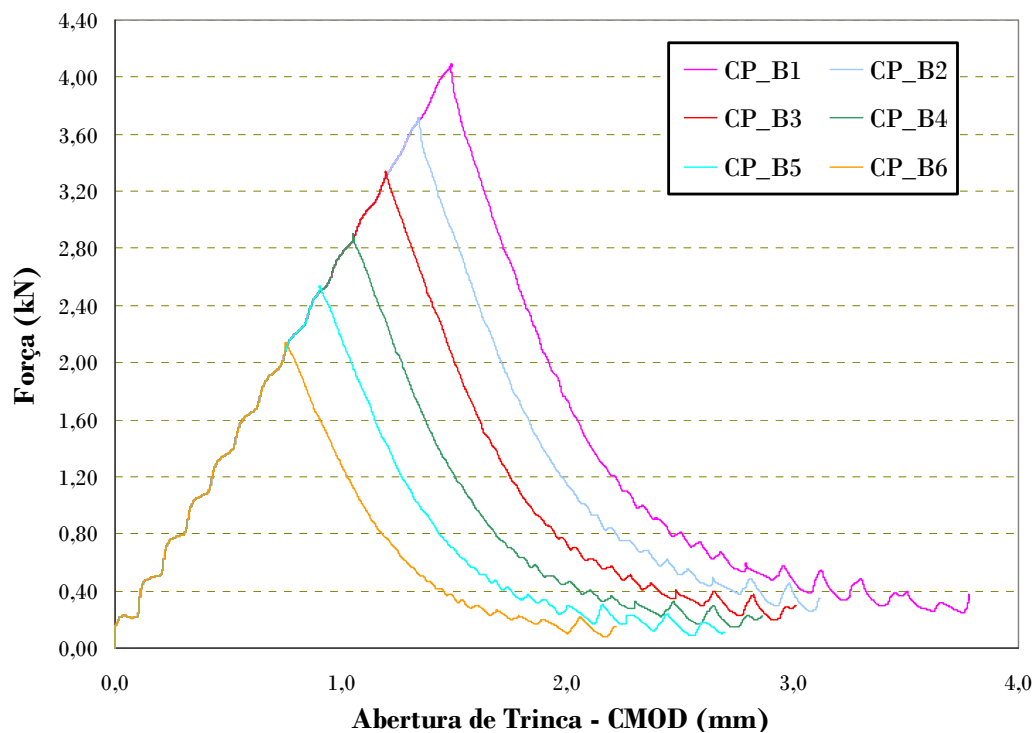


Figura 5.8 - Curvas força vs abertura de trinca (CMOD) para 6 corpos de prova do grupo CP_B mantendo-se o módulo de elasticidade constante.

Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas e energia de fratura nos corpos de prova do grupo II (CP_B).

Corpos de Prova B	Propriedades em Macroescala		Propriedades em Mesoescala		Área (N*m)	Energia de fratura Gf (J/m ²)
	Módulo de Young, E (GPa)	Resistência à Tração, RT (MPa)	Rigidez da partícula (GPa)	Resistência de Ligação (MPa)		
CP_B1	1,00	2,00	0,05	8,00	5,63	1364,88
CP_B2	1,00	1,80	0,05	7,20	4,60	1116,18
CP_B3	1,00	1,60	0,05	6,40	3,83	927,97
CP_B4	1,00	1,40	0,05	5,60	3,04	737,32
CP_B5	1,00	1,20	0,05	4,80	2,38	575,83
CP_B6	1,00	1,00	0,05	4,00	1,73	418,56

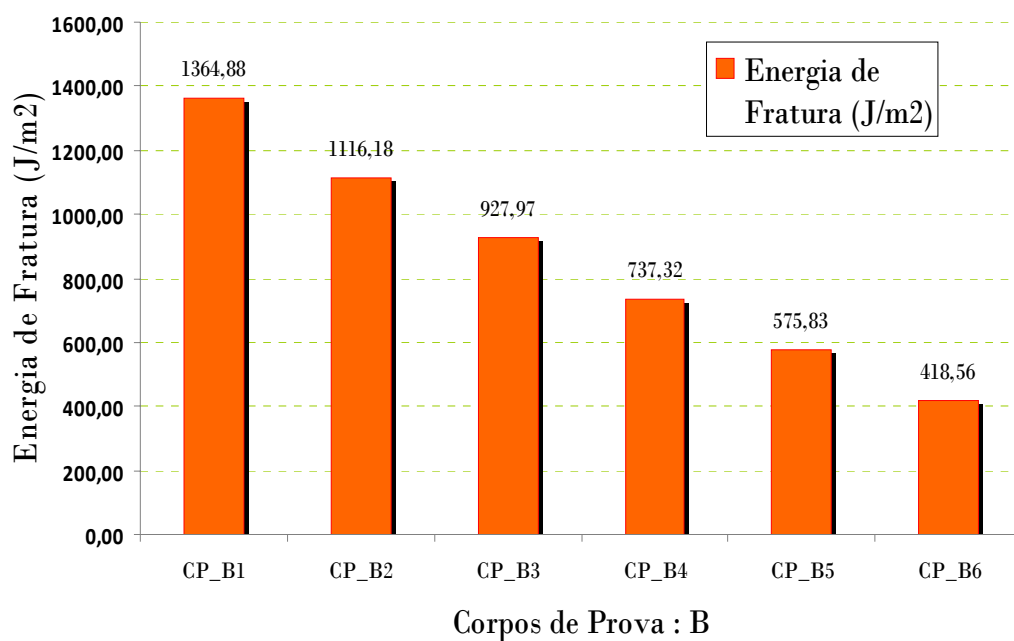


Figura 5.9 - Energia de fratura nos 6 corpos de prova do grupo II (CP_B).

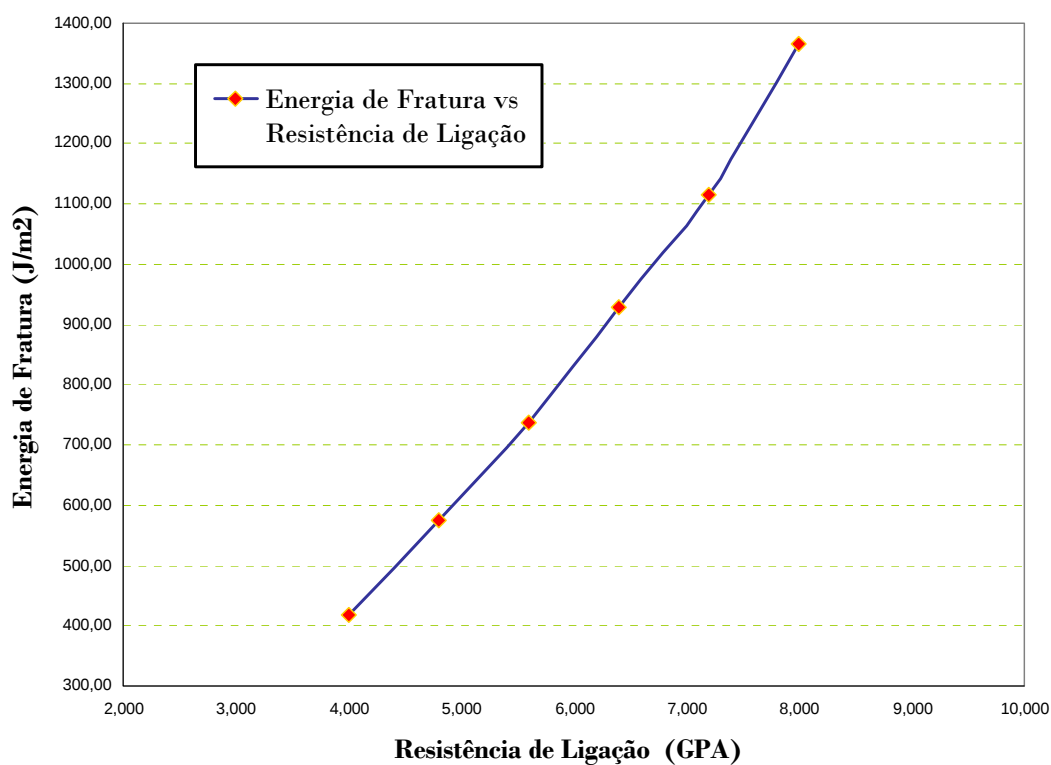


Figura 5.10 - Relação entre a energia de fratura (G_f) e a resistência de ligação nos corpos de prova do grupo II (CP_B).

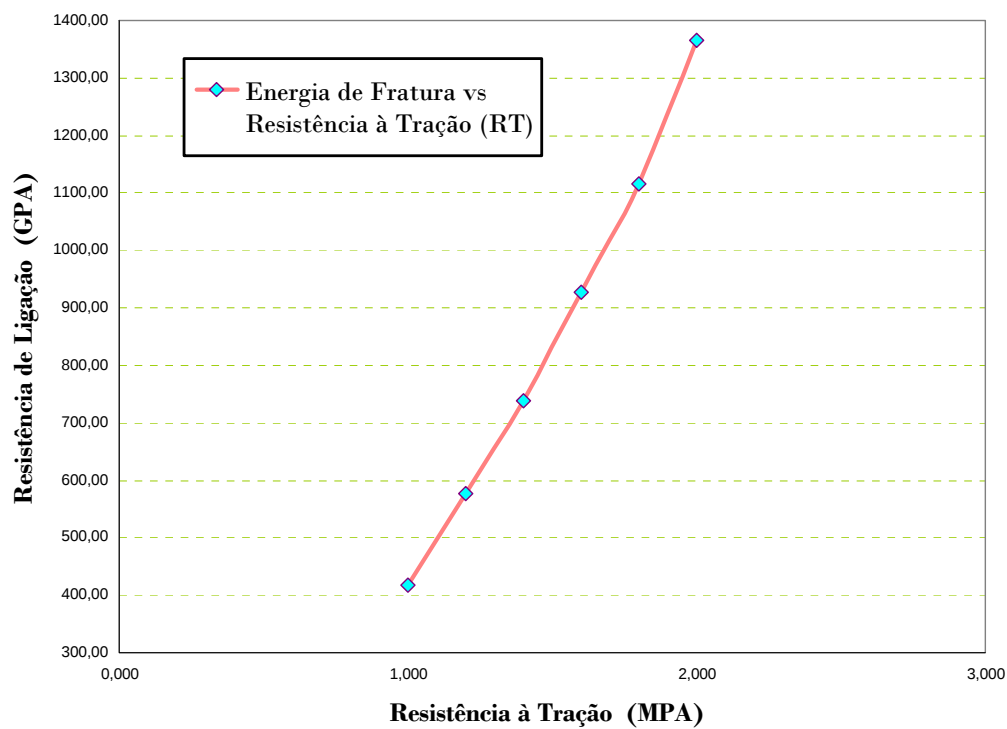


Figura 5.11 - Relação entre a energia de fratura (Gf) e a resistência à tração nos corpos de prova do grupo II (CP_B).

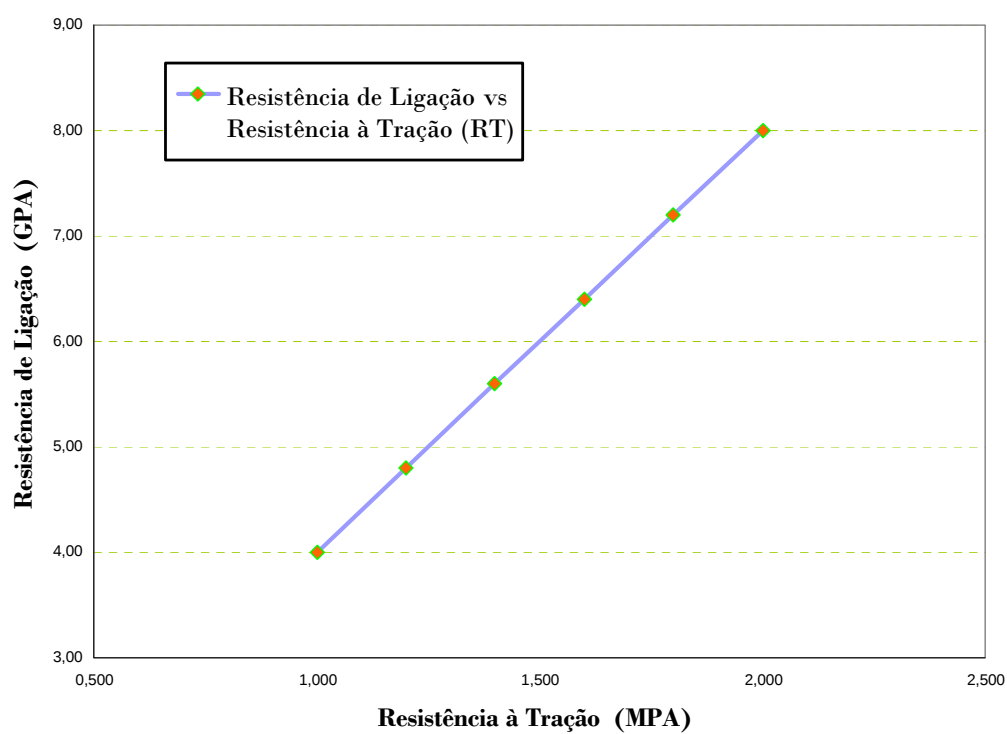


Figura 5.12 - Relação entre a resistência da ligação vs resistência à tração nos corpos de prova do grupo II (CP_B).

5.2.3.

Grupo III: Corpos de Prova do Grupo III (CP_C)

Neste grupo, 8 de corpos de provas são considerados em análises executadas mantendo-se a resistência à tração (RT) constante em 2 MPa (tabela 5.5), com obtenção de curvas força vs abertura de trinca apresentadas nos gráficos das Figuras 5.13 (corpos de prova CP_C1 a CP_C5) e 5.14 (corpos de prova CP_C6 a CP_C8).

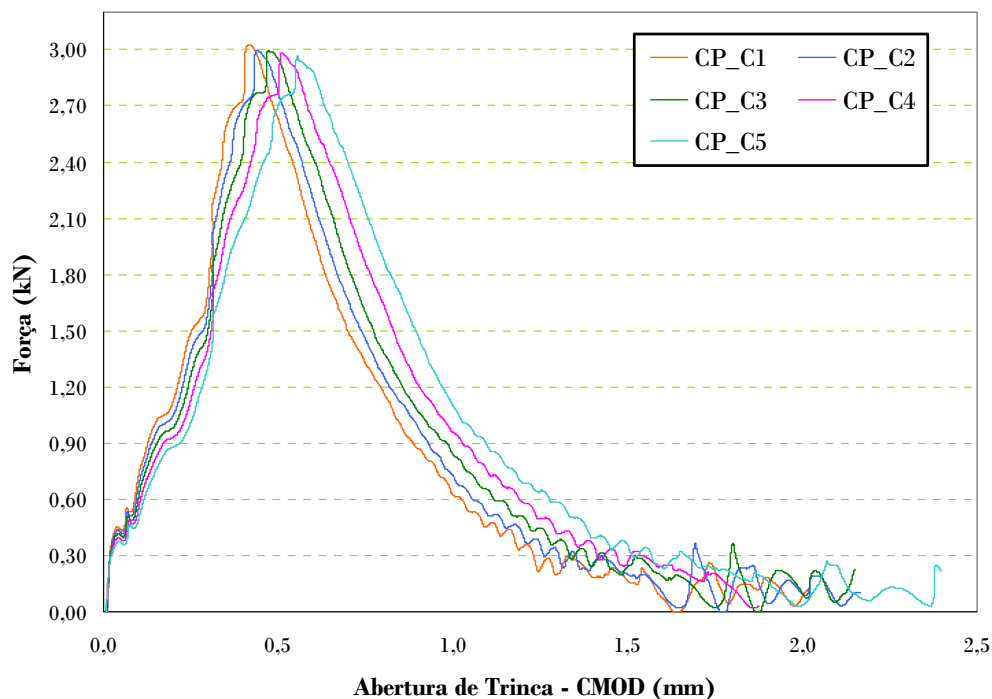


Figura 5.13 - Curvas força vs abertura de trinca (CMOD) para 5 corpos de prova do grupo III considerando-se a resistência à tração constante.

Diminuindo-se o valor do módulo de elasticidade de 1.5 GPa para 0.1 GPa, pode-se observar que o valor da abertura máxima aumenta de 0.3mm para 6mm, aproximadamente, bem como os respectivos valores da energia de fratura (Figuras 5.15 e 5.16).

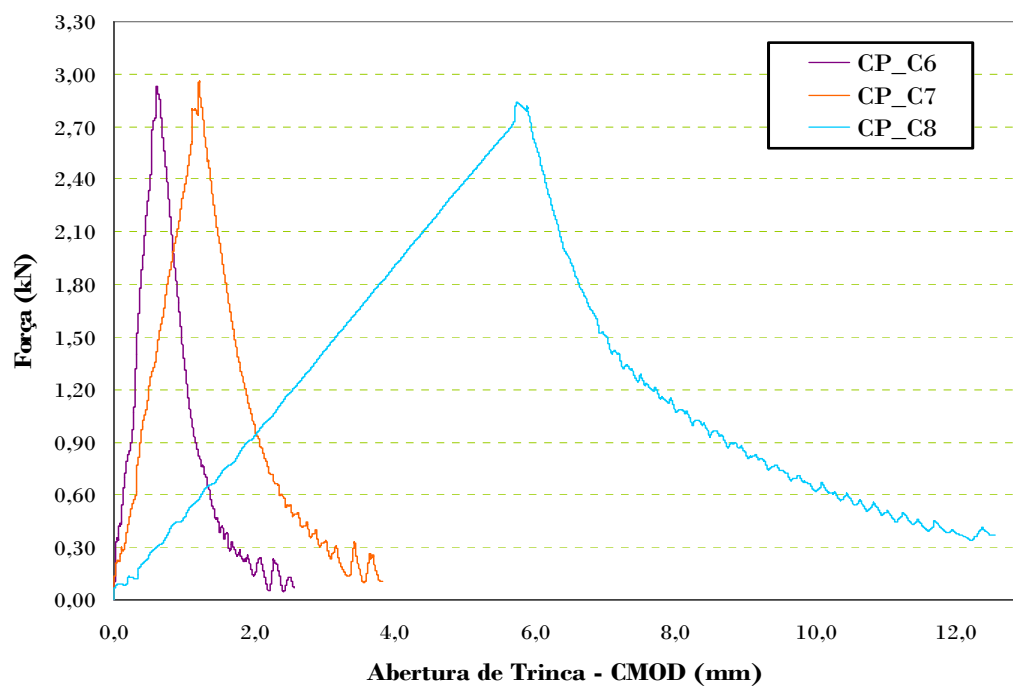


Figura 5.14 - Curvas força vs abertura de trinca (CMOD) para 3 corpos de prova do grupo III considerando-se a resistência à tração constante.

Tabela 5.3 - Propriedades mecânicas e energia de fratura nos 8 corpos de prova do grupo III.

Corpos de Prova C	Propriedades em Macroescala		Propriedades em Mesoescala		Área (N*m)	Energia de fratura Gf (J/m ²)
	Módulo de Young, E (GPa)	Resistência à Tração, RT (MPa)	Rigidez da partícula (GPa)	Resistência de Ligação (MPa)		
CP_C1	1,50	2,00	0,075	4,00	1,85	447,68
CP_C2	1,40	2,00	0,070	4,00	1,93	467,42
CP_C3	1,30	2,00	0,065	4,00	1,99	481,82
CP_C4	1,20	2,00	0,060	4,00	2,17	525,01
CP_C5	1,10	2,00	0,055	4,00	2,32	563,02
CP_C6	1,00	2,00	0,05	4,00	2,32	563,02
CP_C7	0,50	2,00	0,025	4,00	3,91	947,43
CP_C8	0,10	2,00	0,005	4,00	14,72	3567,68

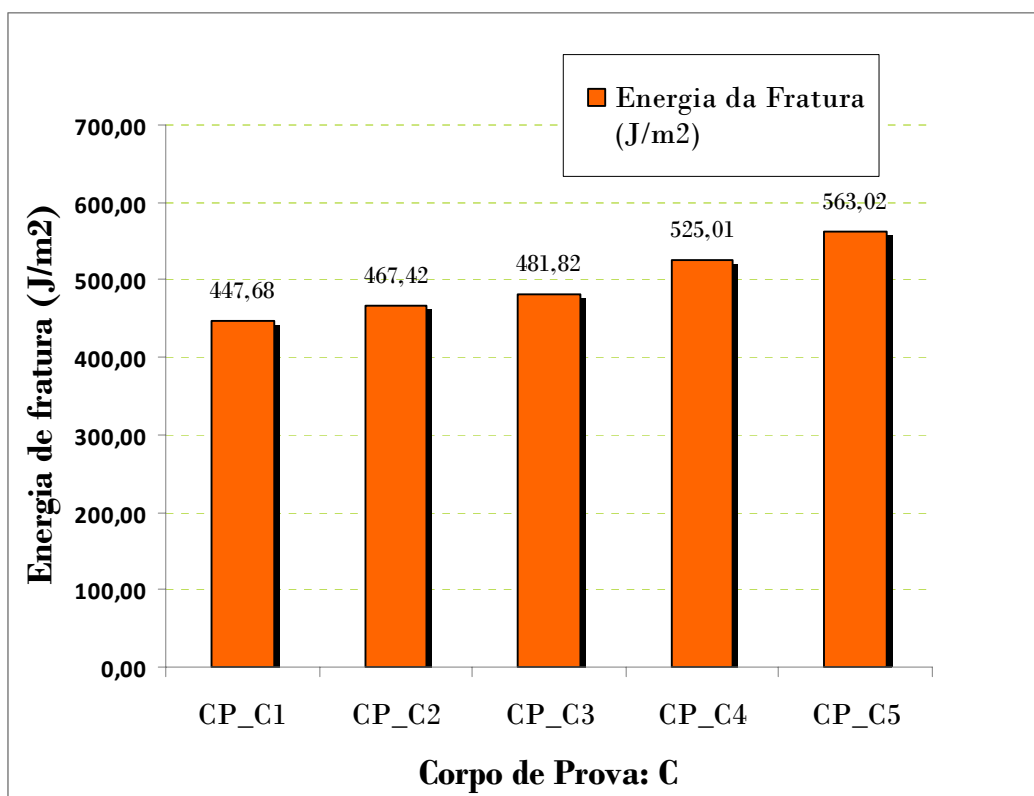


Figura 5.15 - Energia de fratura em 5 corpos de prova do grupo III (CP_C).

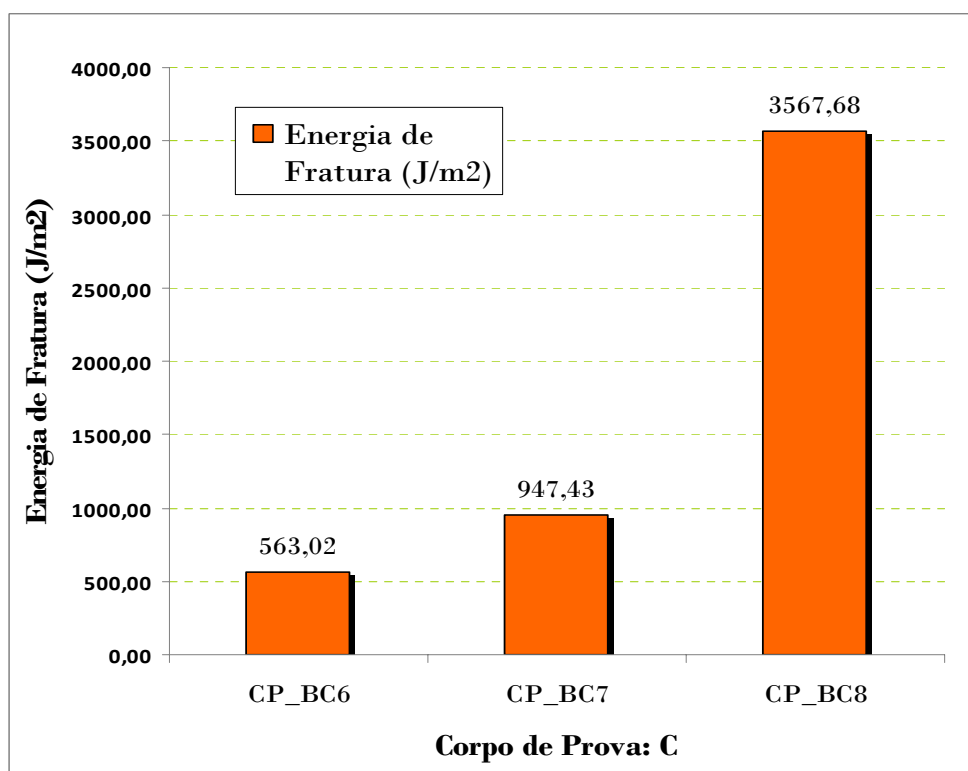


Figura 5.16 - Energia de fratura em 3 corpos de prova do grupo III (CP_C).

5.2.4.

Grupo IV: Corpos de Prova do Grupo IV (CP_D).

Nos 5 corpos de prova do grupo IV, identificados por CP_D, a resistência à tração é mantida também constante em 1.429 MPa para três corpos de prova (subgrupo CP_DA) e em 1.314 MPa para outros dois corpos de prova (subgrupo CP_DB). Os valores das propriedades mecânicas dos mesmos são apresentados na tabela 5.6, enquanto que a Figura 5.17 mostra o comportamento da curva força vs abertura da trinca.

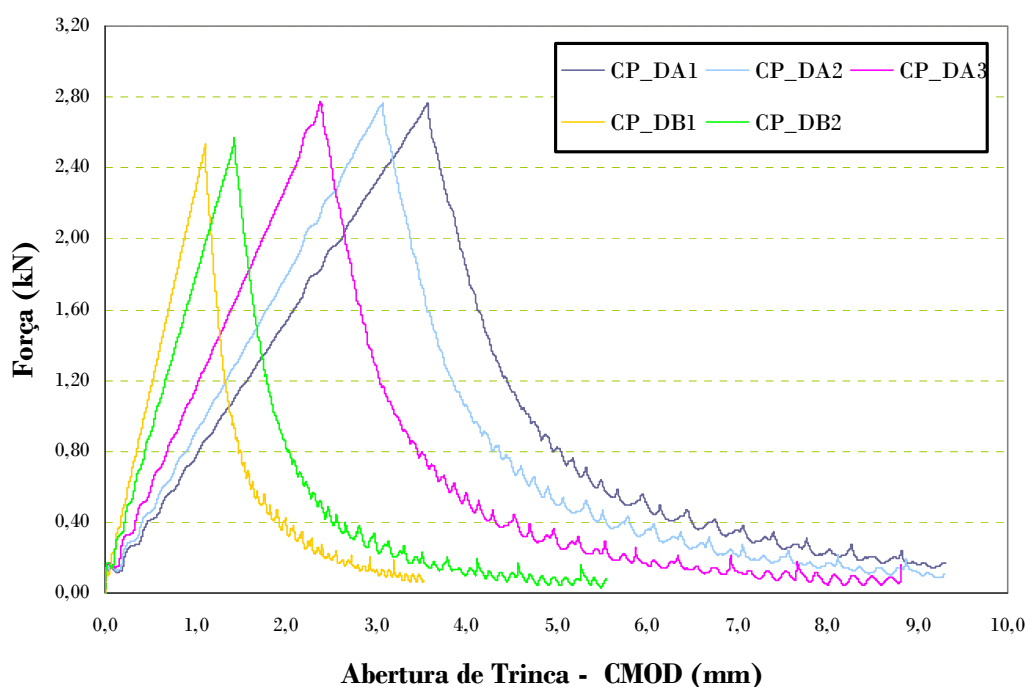


Figura 5.17 - Curvas força vs abertura de trinca (CMOD) para 3 corpos de prova do subgrupo CP_DA (resistência à tração constante em 1.429 MPa) e dois corpos de prova do subgrupo CP_DB (resistência à tração constante em 1.314 MPa).

A força máxima aumenta com a resistência à tração, passando do valor 2.5 kN no subgrupo CP_DA para o valor 2.9 kN nos corpos de prova do subgrupo CP_DB. A energia de fratura (Figura 5.18) diminui, como já anteriormente constatado, com o aumento do módulo de elasticidade do corpo de prova.

Tabela 5.4 - Propriedades mecânicas e energia de fratura nos corpos de prova dos grupos CP_DA e CP_DB.

Corpos de Prova D	Propriedades em Macroescala		Propriedades em Mesoescala		Area (N*m)	Energia de fratura Gf (J/m ²)
	Módulo de Young , E (GPa)	Resistência à Tração, RT (MPa)	Rigidez da partícula (GPa)	Resistência de Ligação (MPa)		
CP_DA1	1,176	1,429	0,06	5,00	8,65	2097,29
CP_DA2	1,372	1,429	0,07	5,00	7,67	1859,57
CP_DA3	1,764	1,429	0,09	5,00	6,22	1507,08
CP_DB1	3,528	1,314	0,18	4,60	2,49	604,61
CP_DB2	2,744	1,314	0,14	4,60	3,48	842,60

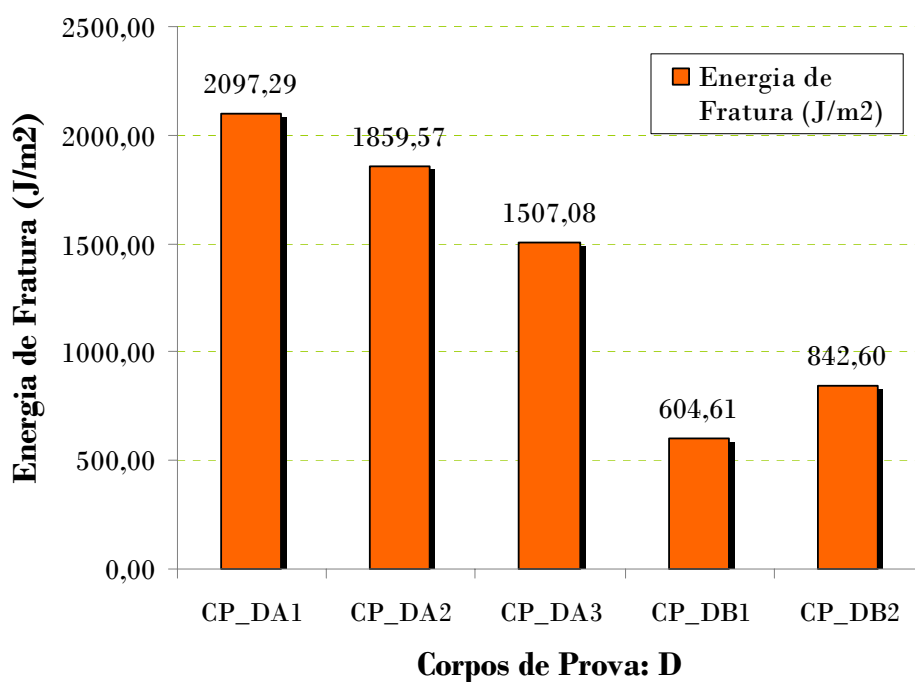


Figura 5.18 - Energia de fratura em 3 corpos de prova do subgrupo CP_DA e 2 corpos de prova do subgrupo CP_DB.