

7

Apresentação e análise dos resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa. Após serem demonstrados individualmente, com base em cada um dos ensaios realizados, os resultados são correlacionados, culminando com a determinação de uma equação exponencial em que a viscosidade pode ser estimada a partir de uma taxa de cisalhamento, sendo esta última obtida mediante a realização de ensaios no equipamento desenvolvido no presente trabalho.

7.1.

Abatimento do tronco de cone

Conforme observado na Tabela 8 e ilustrado na Figura 61, os materiais foram ensaiados para quatro ou cinco umidades diferentes, de modo a percorrer o intervalo apresentado no item 6.3, que restringe o limite funcional do equipamento através da razão entre a umidade do ensaio (w) e o limite de liquidez (LL) a valores situados entre 1,3 e 2,0.

Tabela 8 - Umidade do ensaio, limite de liquidez e razão entre ambos

CEII		BQP		CAT		RBT	
LL= 47,7%		LL= 55,4%		LL= 64,5%		LL= 50,2%	
w (%)	w/LL						
61,37	1,29	79,52	1,44	85,64	1,33	68,37	1,36
66,45	1,39	84,54	1,53	89,38	1,39	77,86	1,55
77,31	1,62	94,69	1,71	95,34	1,48	88,61	1,77
85,34	1,79	103,12	1,86	104,53	1,62	97,34	1,94
-	-	113,52	2,05	115,01	1,78	-	-

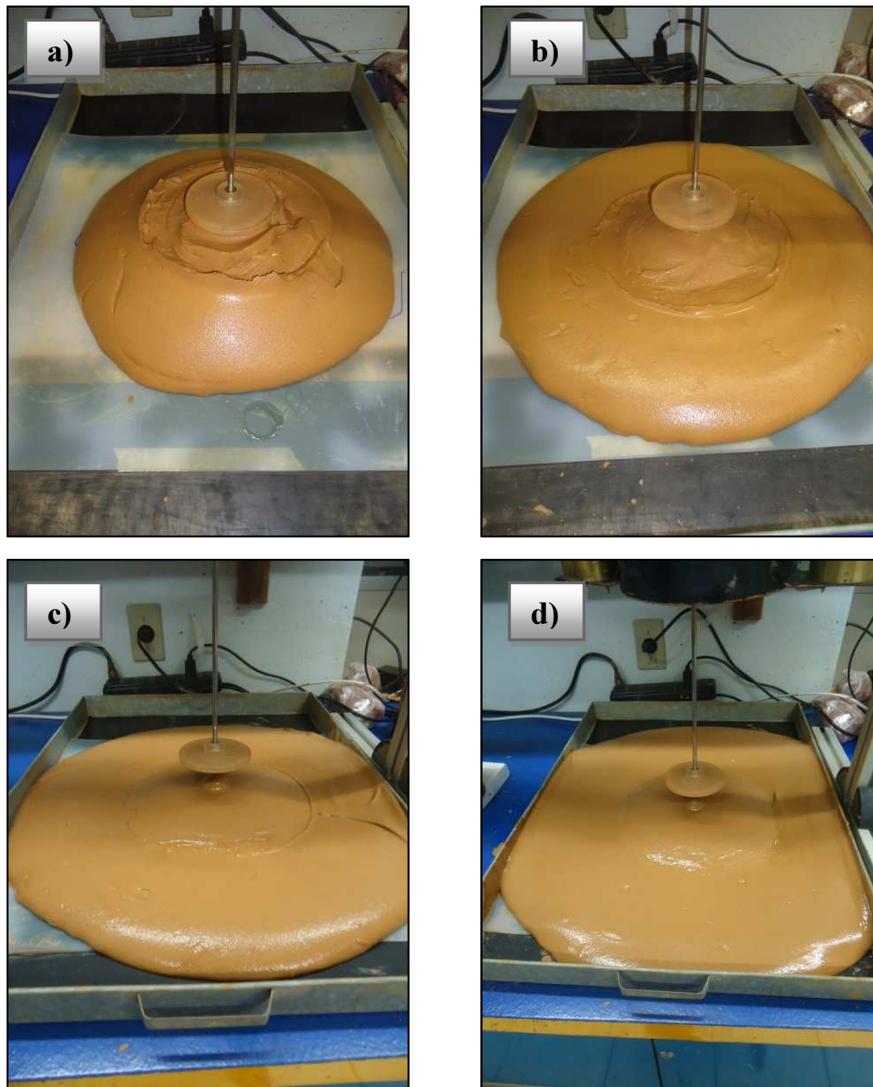


Figura 61 - Material da RBT após o ensaio do abatimento de tronco de cone modificado para diferentes umidades: a) 68,37%; b) 77,86%; c) 88,61%; d) 97,34%

Durante a execução de cada ensaio, acompanhava-se a velocidade do material através do seu deslocamento com o tempo, objetivando-se, assim, definir uma taxa de cisalhamento para cada uma das umidades analisadas. Esta taxa, que relaciona a diferença de velocidades entre duas partículas vizinhas ou planos vizinhos (dv) com a distância entre eles (dy), apresentada na Equação 3, também pode ser expressa pela Equação 13.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dy}{dt} * \frac{1}{dy} \quad (13)$$

Levando-se em consideração que o instante imediatamente anterior a colocação do peso para ascensão do cone, representava o tempo zero, fez-se necessária a escolha de altura intermediária de abatimento para que o intervalo de tempo (dt) fosse então obtido. É válido mencionar que este abatimento refere-se à distância percorrida pela massa escoada.

De modo análogo ao proposto por Ferraris & De Larrard (1998), dois problemas potenciais foram levados em consideração: primeiro, abatimentos muito baixos poderiam resultar em baixa precisão nas medidas; e segundo, um abatimento parcial que fosse muito alto poderia excluir todos os solos com abatimentos finais menores.

Assim, como o equipamento desenvolvido tem seu curso útil limitado a 24cm optou-se por escolher um valor aproximadamente intermediário, da ordem de 10cm, associado também ao menor abatimento final obtido.

Conforme mencionado no procedimento experimental apresentado no item 6.2, após a realização de cada ensaio pesava-se o conjunto bandeja-solo. E, uma vez descontado o peso da bandeja e a umidade do solo, determinava-se a massa de solo seco inserida no cone.

De posse deste valor, através da massa específica dos grãos, foi possível obter o volume de solo seco e, em seguida, determinar a concentração de sedimentos, definida através da razão entre o volume de solo seco encontrado e o volume total, sendo este último igual ao volume do tronco de cone do equipamento desenvolvido.

A Tabela 9 apresenta as concentrações de sedimentos encontradas para cada um dos ensaios realizados.

Tabela 9 - Concentração de sedimentos e umidade dos ensaios realizados

CEII		BQP		CAT		RBT	
Cv	w (%)	Cv	w (%)	Cv	w (%)	Cv	w (%)
0,36	61,37	0,31	79,52	0,29	85,64	0,35	68,37
0,34	66,45	0,30	84,54	0,28	89,38	0,33	77,86
0,32	77,31	0,28	94,69	0,27	95,34	0,30	88,61
0,30	85,34	0,26	103,12	0,25	104,53	0,28	97,34
-	-	0,23	113,52	0,24	115,01	-	-

As Figuras 62 a 65 apresentam as curvas de deslocamento com o tempo, obtidas após a realização dos ensaios para cada uma das amostras em estudo.

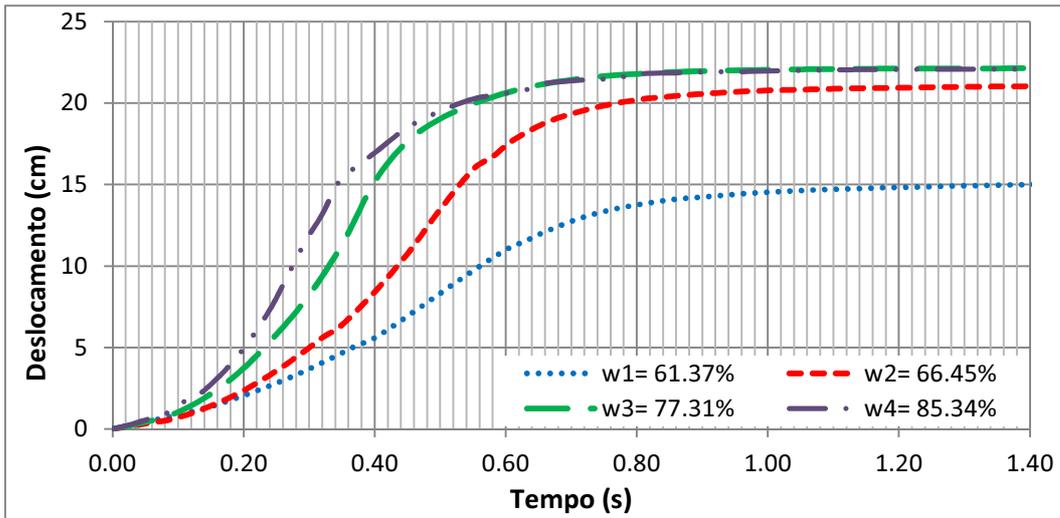


Figura 62 - Curvas de deslocamento com o tempo para o solo CEII

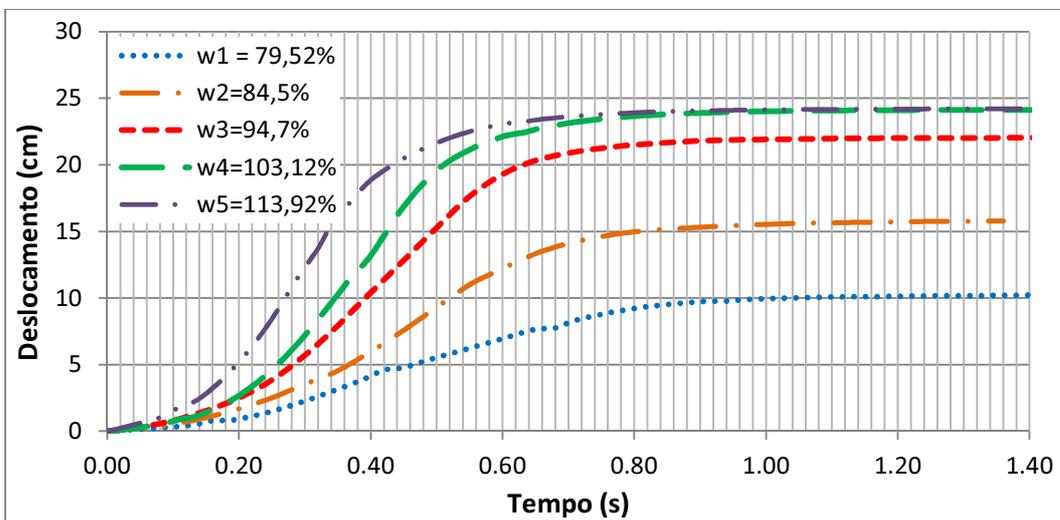


Figura 63 - Curvas de deslocamento com o tempo para o solo BQP

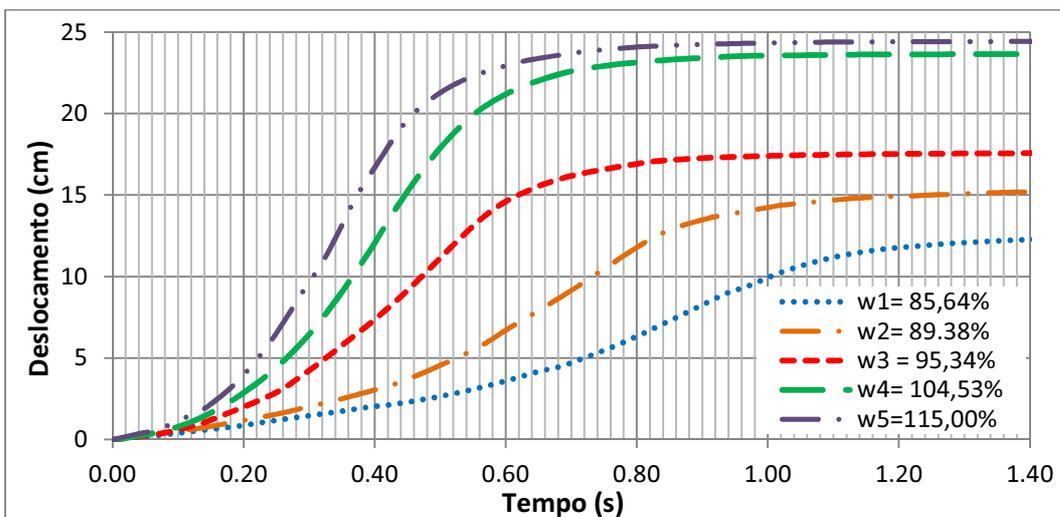


Figura 64 - Curvas de deslocamento com o tempo para o solo CAT

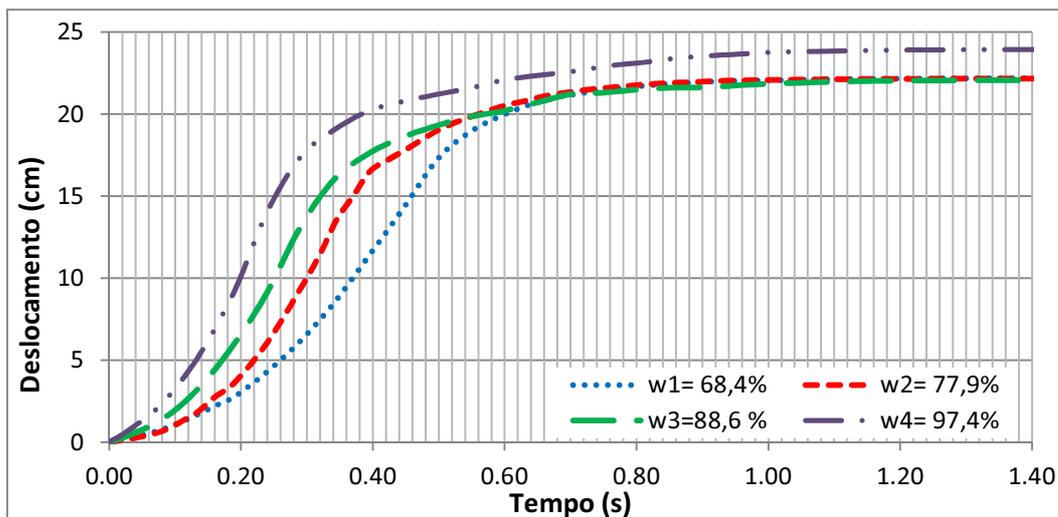


Figura 65 - Curvas de deslocamento com o tempo para o solo RBT

A partir das curvas de deslocamento apresentadas acima, determinou-se o tempo necessário para que as amostras atingissem um abatimento parcial de 10cm, definindo-se assim as taxas de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Correspondência entre a umidade do ensaio de abatimento de tronco de cone e a taxa de cisalhamento

CEII		BQP		CAT		RBT	
w (%)	$\dot{\gamma}(s^{-1})$	w (%)	$\dot{\gamma}(s^{-1})$	w (%)	$\dot{\gamma}(s^{-1})$	w (%)	$\dot{\gamma}(s^{-1})$
61,37	1,8	79,52	1,0	85,64	1,0	68,37	2,7
66,45	2,3	84,54	1,9	89,38	1,4	77,86	3,3
77,31	2,9	94,69	2,6	95,34	2,1	88,61	4,0
85,34	3,7	103,12	2,9	104,53	2,7	97,34	5,0
-	-	113,92	3,7	115,01	3,2	-	-

Conforme observado na Figura 66, a umidade do ensaio e a taxa de cisalhamento calculada são grandezas diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior a umidade ensaiada, menor o tempo necessário para atingir o abatimento parcial de 10cm, e, conseqüentemente, maior a taxa de cisalhamento medida.

Ademais, as retas de ajuste presentes no gráfico permitem inferir que existe uma relação linear entre estas duas grandezas (w e $\dot{\gamma}$), expressa através das equações apresentadas na Tabela 11, variando de acordo com o tipo de solo ensaiado.

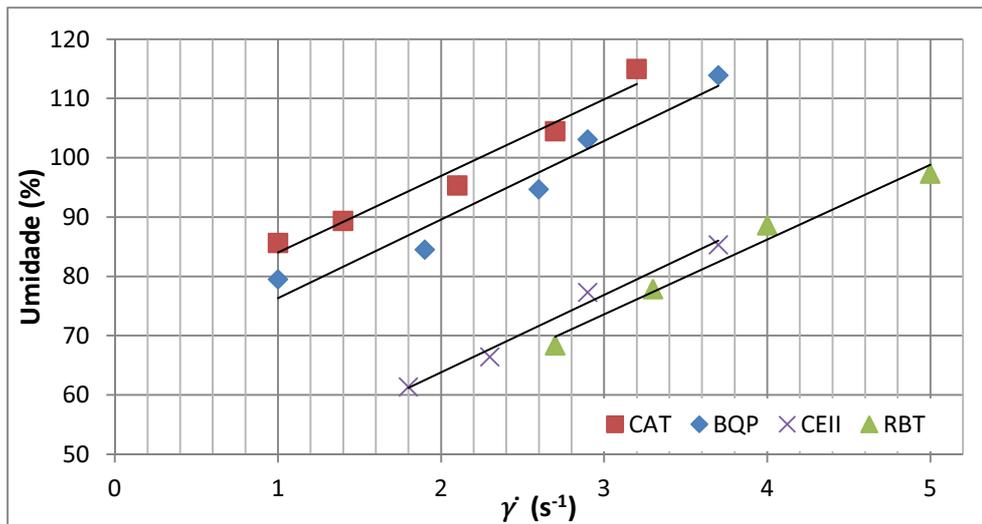


Figura 66 - Relação entre a umidade do ensaio de abatimento de tronco de cone e a taxa de cisalhamento

Tabela 11 - Equações e coeficientes de correlação das retas obtidas a partir da relação entre a umidade e a taxa de cisalhamento

Solo	Equação	R ²
CAT	$w = 12,931 \dot{\gamma} + 71,084$	0,9652
BQP	$w = 13,247 \dot{\gamma} + 63,099$	0,9509
CEII	$w = 13,076 \dot{\gamma} + 37,638$	0,9852
RBT	$w = 12,629 \dot{\gamma} + 35,687$	0,9785

A referida proporcionalidade e o paralelismo entre as retas de ajuste também foram encontrados na análise da relação existente entre a concentração de sedimentos e a taxa de cisalhamento. Conforme observado na Figura 67, existe uma relação linear entre estas duas grandezas (C_v e $\dot{\gamma}$), expressa através das equações apresentadas na Tabela 12, variando de acordo com o tipo de solo ensaiado.

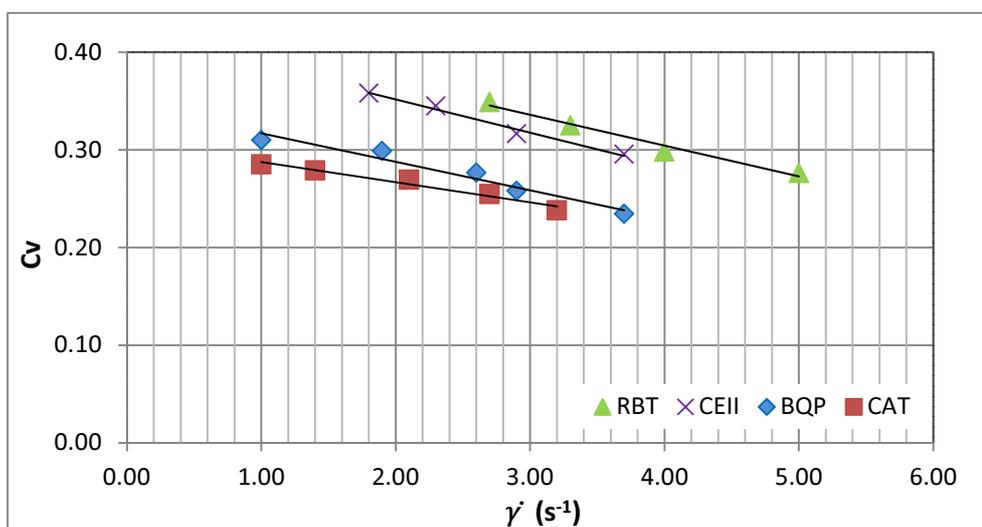


Figura 67 - Relação entre a concentração de sedimentos e a taxa de cisalhamento

Tabela 12 - Equações e coeficientes de correlação das retas obtidas a partir da relação entre a concentração de sedimentos e a taxa de cisalhamento

Solo	Equação	R ²
CAT	$C_v = -0,0207 \dot{\gamma} + 0,3084$	0,9652
BQP	$C_v = -0,00291 \dot{\gamma} + 0,3463$	0,9509
CEII	$C_v = -0,0034 \dot{\gamma} + 0,4198$	0,9852
RBT	$C_v = -0,0316 \dot{\gamma} + 0,4307$	0,9785

7.2.

Viscosímetro de Brookfield

Inicialmente, tentou-se determinar uma possível correlação entre a taxa de cisalhamento, obtida através do ensaio de abatimento de tronco de cone desenvolvido, e o valor da viscosidade determinado através de ensaios realizados no viscosímetro de Brookfield.

Ao todo foram realizados três testes com amostras do CEII. No entanto, os resultados obtidos não foram satisfatórios, pois o equipamento não conseguiu encontrar uma viscosidade constante, oscilando indefinidamente. Percebeu-se também que, dependendo da velocidade de rotação imposta, formava-se um vazio entre a haste e o solo. Desta forma, tais limitações inviabilizaram o uso deste equipamento nesta pesquisa.

De acordo com Kiryu (2006), a principal limitação deste viscosímetro está relacionada à falta de garantia da precisão dos dados coletados abaixo de 10 s^{-1} de taxa de cisalhamento, conforme destacado na Figura 68.

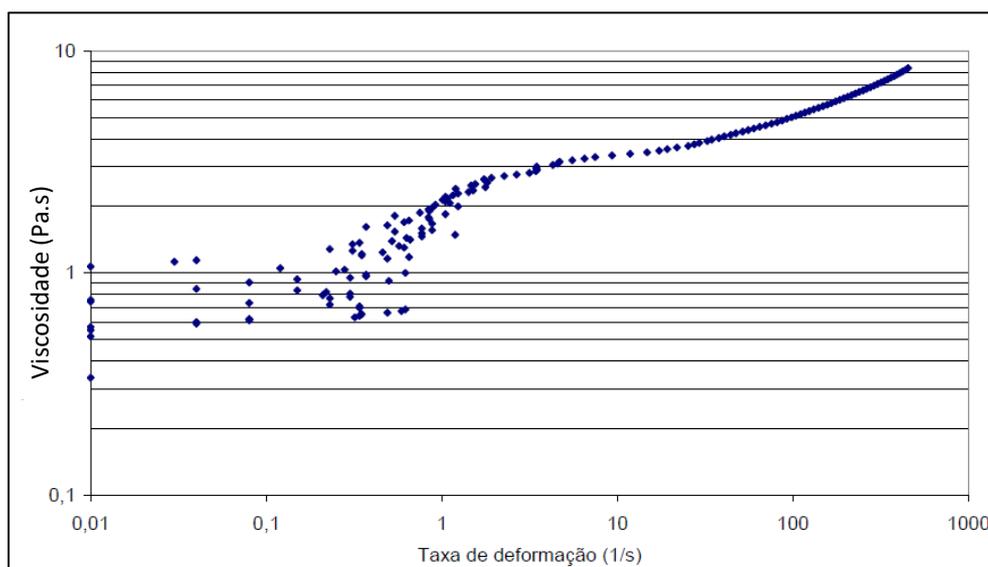


Figura 68 - Grande dispersão para dados coletados no viscosímetro de Brookfield para taxas de cisalhamento abaixo de 10 s^{-1} (Kiryu, 2006)

7.3. Reômetro

O ideal seria realizar o ensaio no reômetro imediatamente após o ensaio no abatimento de tronco de cone desenvolvido, utilizando assim a mesma amostra, mantendo exatamente os mesmos valores de umidade. No entanto, devido à disponibilidade dos equipamentos do laboratório de reologia, tal fato não foi possível.

Desta forma, para garantir a representatividade do comportamento do material ensaiado, procurou-se estabelecer uma diferença máxima (D) de $\pm 3\%$ entre as umidades das amostras analisadas no equipamento desenvolvido (w_a) e àquelas obtidas após a realização dos testes no reômetro (w_r). A Tabela 13 apresenta uma comparação entre essas umidades, ratificando a diferença obtida.

Tabela 13 - Umidades dos ensaios no abatimento de tronco de cone, no reômetro e diferença entre ambas

CEII			BQP			CAT			RBT		
w_a	w_r	D	w_a	w_r	D	w_a	w_r	D	w_a	w_r	D
61,37	63,82	2,45	79,52	81,50	1,98	85,64	86,86	1,22	68,40	70,66	2,26
66,45	69,33	2,88	84,50	86,50	2,00	89,38	91,24	1,86	77,90	76,35	1,55
77,31	78,80	1,49	94,70	96,14	1,44	95,34	94,28	1,06	88,60	85,92	2,68
85,34	86,12	0,78	103,12	105,82	2,70	104,53	103,46	1,07	97,40	95,57	1,83
-	-	-	113,92	115,56	1,64	115,00	115,09	0,09	-	-	-

Onde: w_a = umidade do ensaio de abatimento de tronco de cone (%);

w_r = umidade do ensaio no reômetro (%);

$D = w_a - w_r$ (%), em módulo.

As Figuras 69 a 72 apresentam os resultados obtidos após a realização dos ensaios no reômetro.

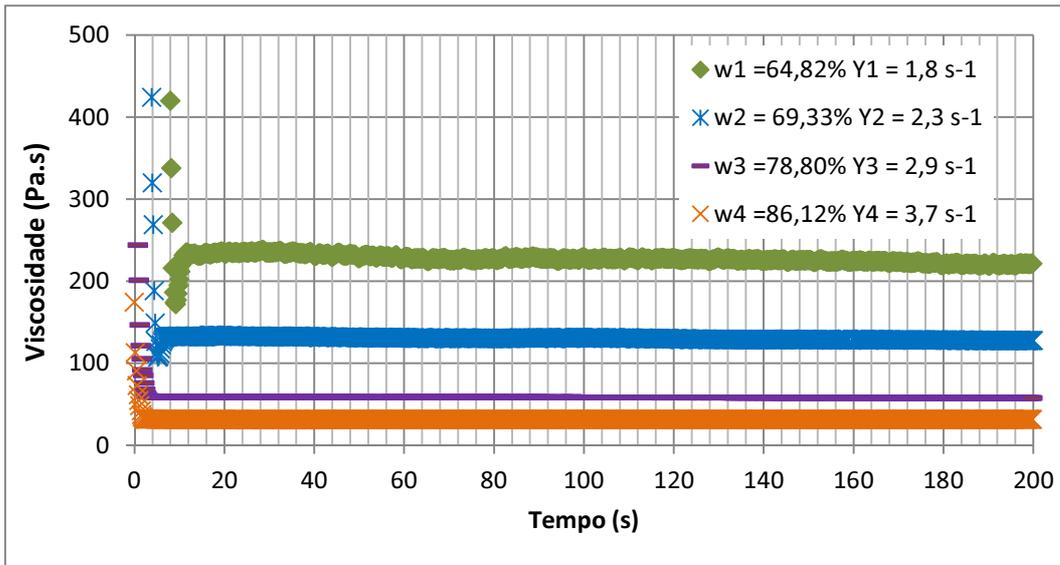


Figura 69 - Gráfico da viscosidade com o tempo para o solo CEII

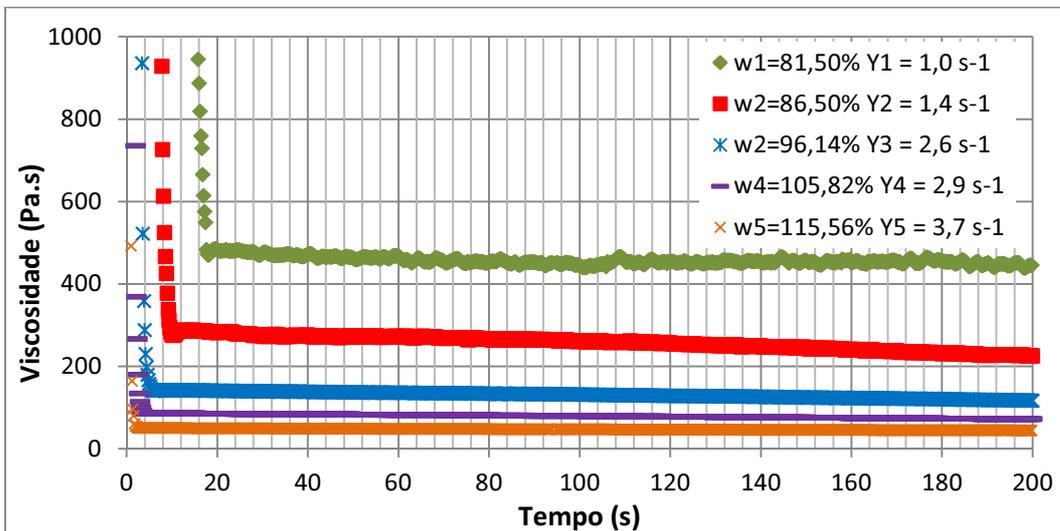


Figura 70 - Gráfico da viscosidade com o tempo para o solo BQP

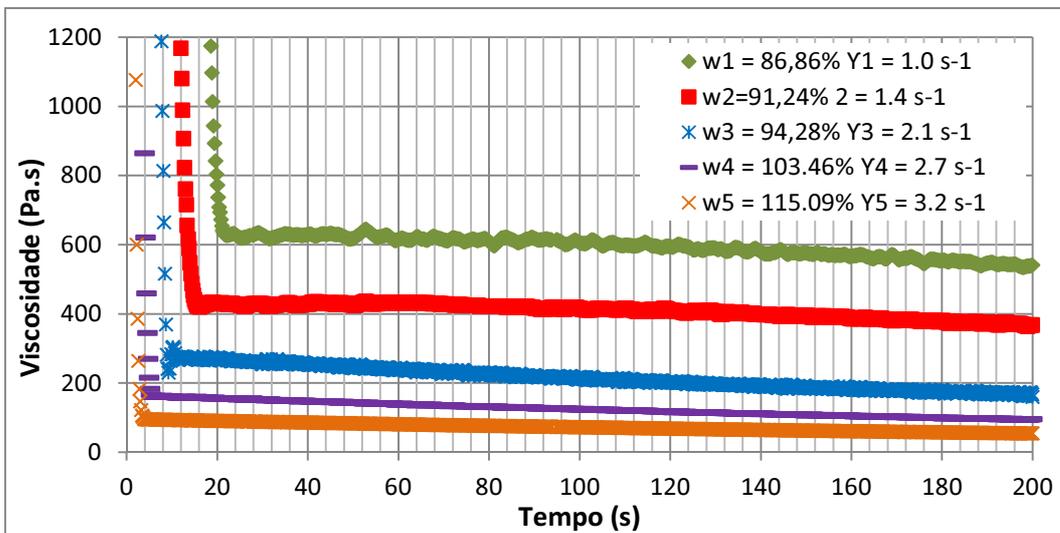


Figura 71 - Gráfico da viscosidade com o tempo para o solo CAT

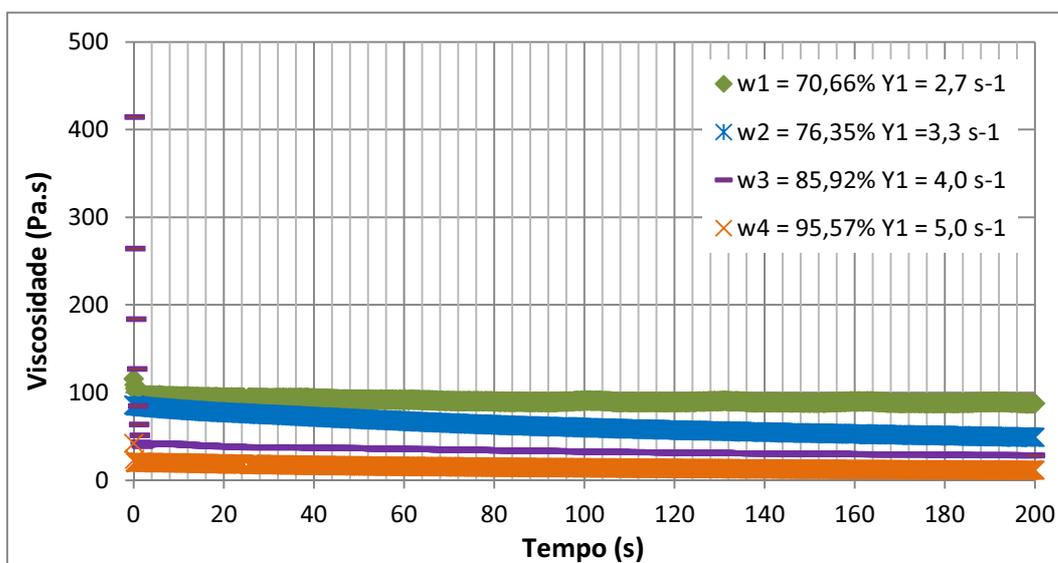


Figura 72 - Gráfico da viscosidade com o tempo para o solo RBT

De um modo geral, a viscosidade associada a cada umidade foi definida a partir da média dos valores obtidos aos últimos 100 segundos, pois se observou que neste trecho as curvas apresentavam um comportamento aproximadamente constante.

A Tabela 14 apresenta a correspondência entre a viscosidade definida no reômetro e a taxa de cisalhamento obtida no ensaio de abatimento de tronco de cone.

Tabela 14 - Correspondência entre a viscosidade definida no reômetro (η) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) obtida no ensaio de abatimento de tronco de cone

CEII		BQP		CAT		RBT	
η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)						
224,76	1,80	457,47	1,00	574,38	1,00	89,19	2,70
129,19	2,30	243,82	1,90	393,30	1,40	54,23	3,30
58,34	2,90	124,58	2,60	188,73	2,10	30,41	4,00
31,95	3,70	75,37	2,90	108,06	2,70	12,82	5,00
-	-	45,55	3,70	62,86	3,20	-	-

A Tabela 15, por sua vez, apresenta os valores de viscosidade obtidos por meio de retroanálises numéricas, desenvolvidas por Macias *et al* (1997), para analisar o comportamento mecânico das corridas de massa do Quitite e Papagaio, ocorridas no Rio de Janeiro em 1996. As relações analíticas utilizadas foram baseadas nos modelos propostos por Bagnold (1954), fundado no modelo

reológico de Newton, e Johnson (1970), fundado no modelo reológico de Saint Venant e Bingham.

Tabela 15 - Viscosidade dos materiais envolvidos nas corridas de massa ocorridas no Rio de Janeiro em 1996 (Adaptado de Macias *et al*, 1997)

Corrida	Modelo de Bagnold (Pa.s)	Modelo de Johnson (Pa.s)
Quitite	92	3440
Papagaio	165	1790

De acordo com Macias *et al* (1997), a diferença entre os valores de viscosidade encontrados está relacionada ao fato de que no modelo de Johnson representa-se o depósito como um todo, enquanto no modelo de Bagnold, a viscosidade é representativa da resistência do material mais fino (matriz), o qual é intuitivamente menos resistente do que a mistura blocos-matriz (detritos).

Estudos numéricos baseados nas corridas de massa ocorridas nestes locais também foram desenvolvidos por Gomes (2006). Seu trabalho envolveu a análise de 150 cenários, dentre estes, o que mais se aproximou da área real mapeada pela GEORIO à época dos movimentos foi simulado com uma viscosidade de 92 Pa.s.

Por meio de uma interpolação dos resultados obtidos neste trabalho para os ensaios feitos na amostra BQP, a referida viscosidade, de 92 Pa.s, estaria associada a uma taxa de cisalhamento de $2,7 \text{ s}^{-1}$, apresentando uma umidade correspondente a aproximadamente 1,78 vezes o limite de liquidez e uma concentração de sedimentos da ordem de 0,27.

Desta forma, pode-se inferir que os valores de viscosidade determinados com base na metodologia aqui apresentada exibem uma boa concordância com os resultados encontrados na literatura.

7.4.

Análise conjunta: abatimento de tronco de cone e reômetro

Conforme observado nas Figuras 73 a 76, independente do solo analisado, os resultados experimentais, a saber: viscosidade e taxa de cisalhamento, podem ser ajustados através de uma equação exponencial, listada na Tabela 16.

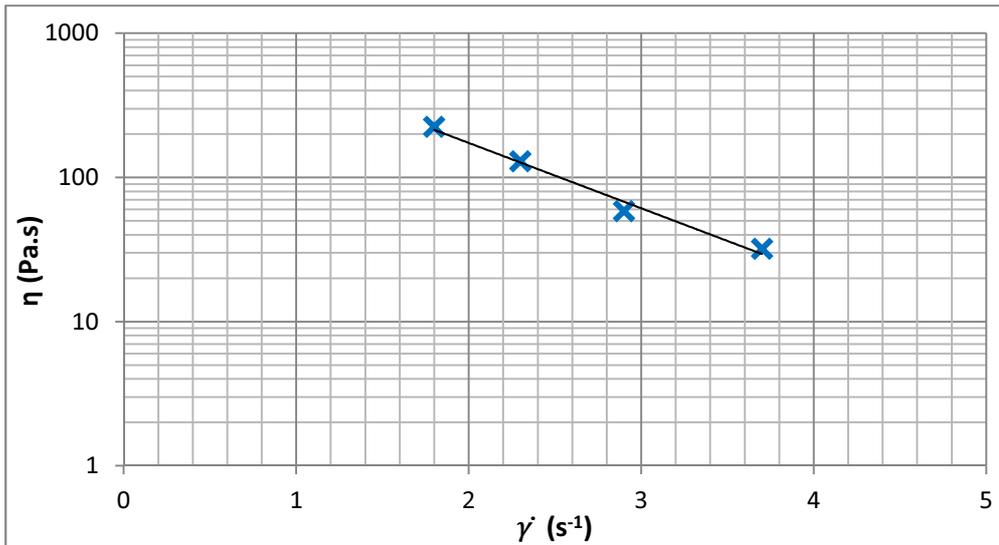


Figura 73 - Ajuste dos resultados experimentais para CEII

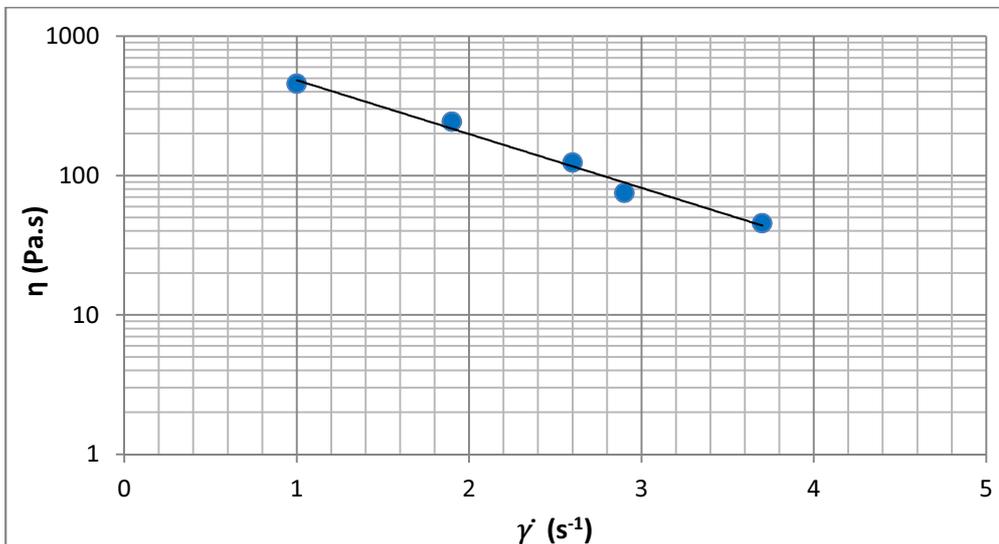


Figura 74 - Ajuste dos resultados experimentais para BQP

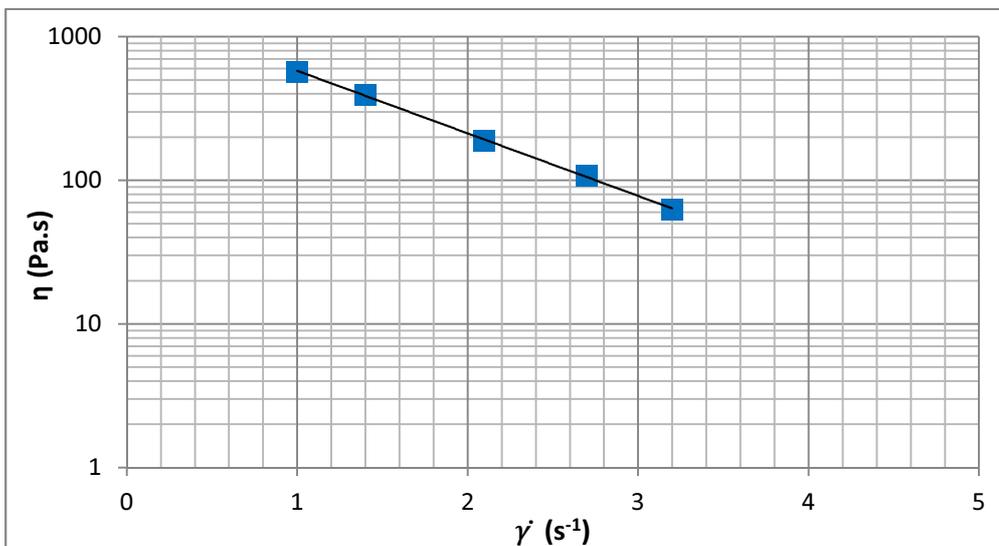


Figura 75 - Ajuste dos resultados experimentais para CAT

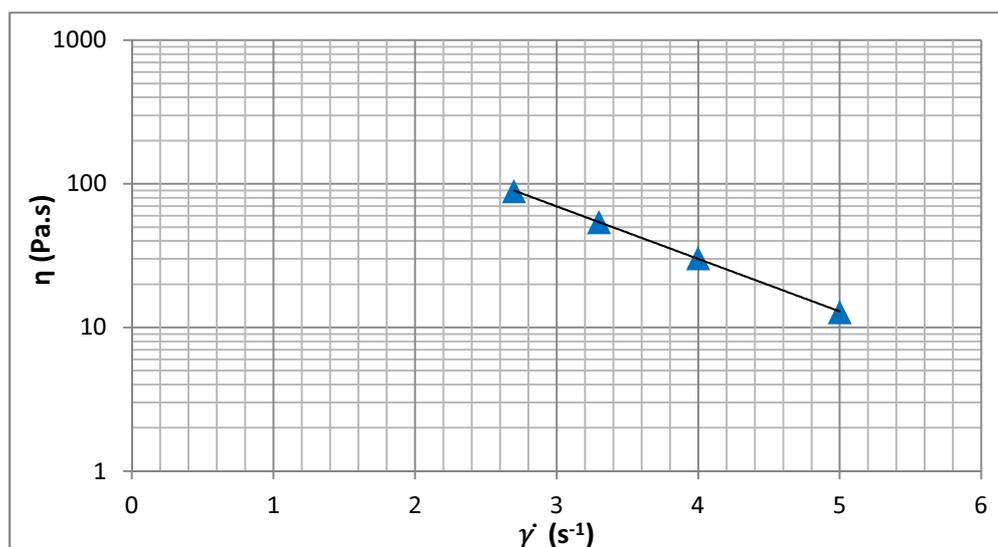


Figura 76 - Ajuste dos resultados experimentais para RBT

Tabela 16 - Equações e coeficientes de correlação das retas obtidas a partir da relação entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento

Solo	Equação	R ²
CEII	$\eta = 1399,5 e^{-1,044\dot{\gamma}}$	0,9855
BQP	$\eta = 1176,5 e^{-0,89\dot{\gamma}}$	0,9848
CAT	$\eta = 1579,6 e^{-1,003\dot{\gamma}}$	0,9996
RBT	$\eta = 874,34 e^{-0,843\dot{\gamma}}$	0,9999

A junção de todos os resultados experimentais obtidos, apresentada na Figura 77, permitiu a obtenção de uma curva de ajuste única, expressa através da Equação 14, correlacionando a viscosidade, obtida a partir da realização de ensaios no reômetro placa-placa, com a taxa de cisalhamento, determinada a partir do ensaio de abatimento de tronco de cone desenvolvido.

$$\eta = 1312,8 e^{-0,954 \dot{\gamma}} \quad (14)$$

Através da utilização da equação supracitada, pode-se obter uma estimativa da viscosidade do solo mediante apenas a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone desenvolvido no presente trabalho.

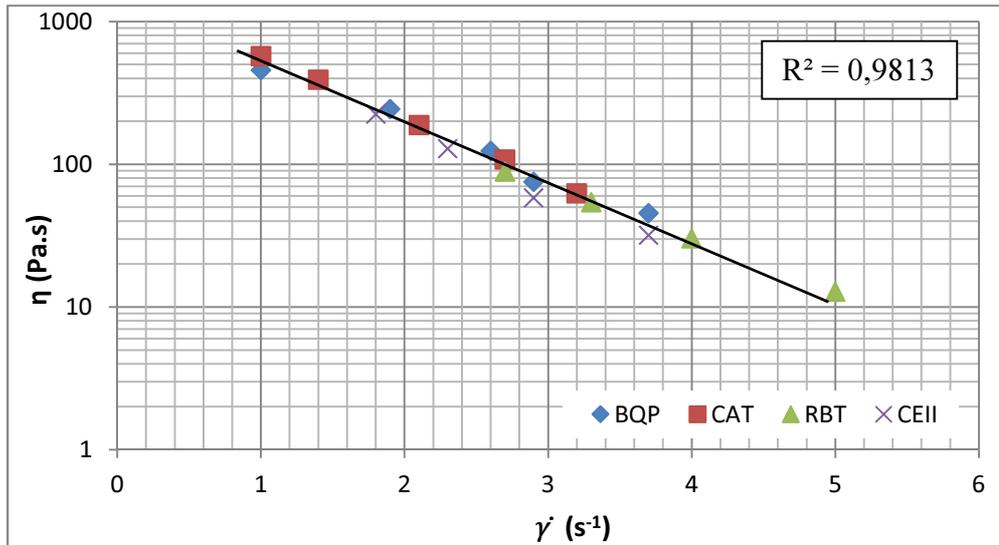


Figura 77 - Ajuste dos resultados experimentais para todos os solos estudados

A viscosidade também pode ser relacionada com a concentração de sedimentos por meio de equações exponenciais, variáveis em função do solo analisado. As Figuras 78 a 81 ilustram as relações obtidas, a serem listadas nas equações apresentadas na Tabela 17.

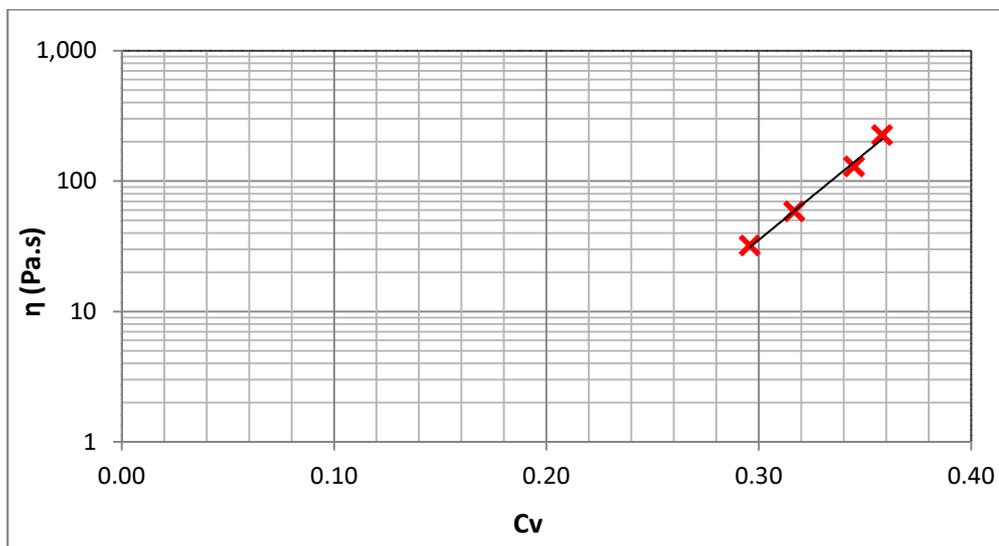


Figura 78 - Relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos para CEII

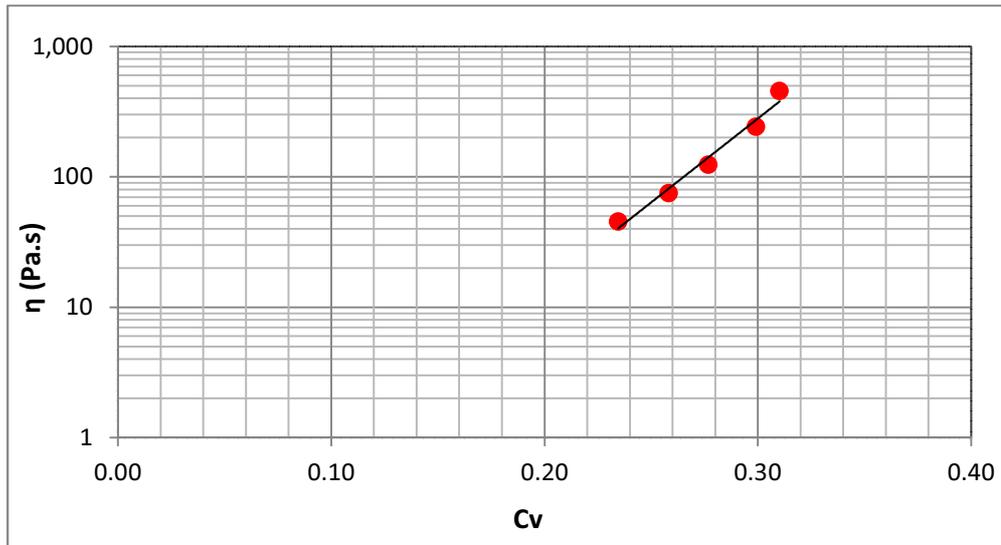


Figura 79 - Relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos para BQP

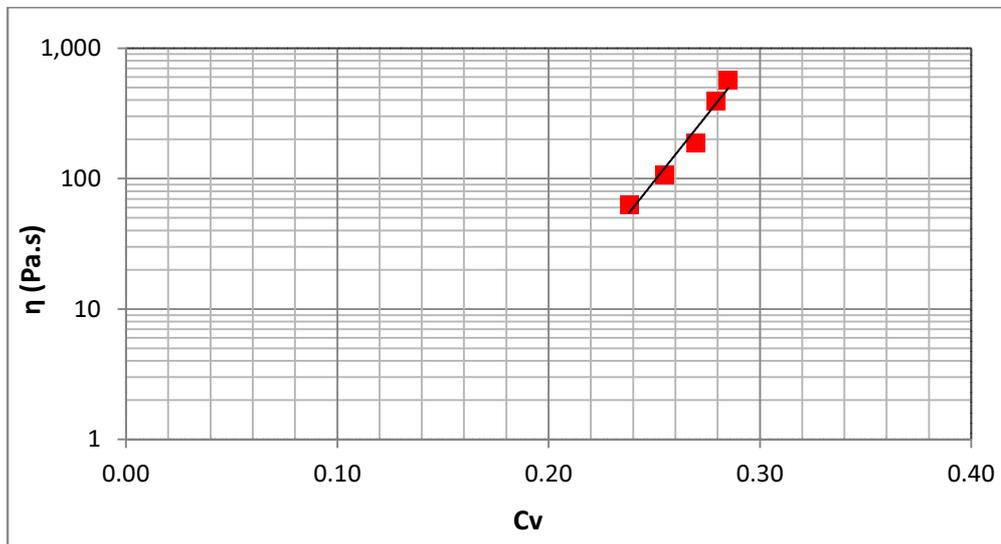


Figura 80 - Relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos para CAT

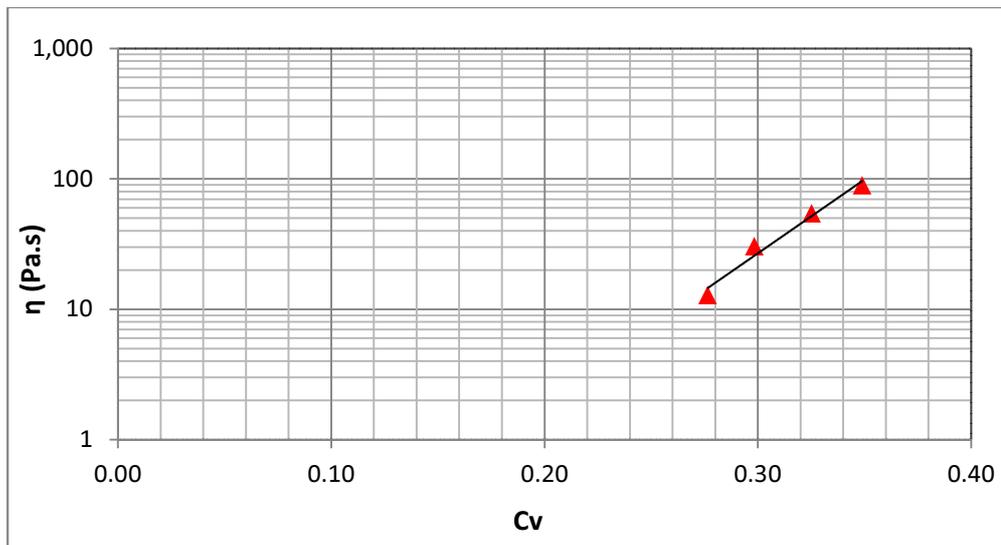


Figura 81 - Relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos para RBT

Tabela 17 - Equações e coeficientes de correlação das retas obtidas a partir da relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos

Solo	Equação	R ²
CEII	$\eta = 0,0036 e^{30,61 Cv}$	0,9946
BQP	$\eta = 0,0039 e^{29,61 Cv}$	0,9748
CAT	$\eta = 0,0008 e^{46,84 Cv}$	0,9662
RBT	$\eta = 0,0108 e^{26,08 Cv}$	0,975

A análise conjunta de todos os dados, apresentada na Figura 82, mostra que não existe uma curva única capaz de ajustar todos os resultados. Entretanto, os materiais ensaiados agruparam-se segundo duas tendências, delimitando uma faixa de viscosidade.

Conforme observado na referida figura, O'Brien & Julien (1988) delimitaram uma faixa de valores para as corridas de massa ocorridas nas cidades de Aspen e Glenwood, nos Estados Unidos. De um modo geral, a análise de ambas as faixas indica que, independente da concentração de sedimentos, os solos analisados neste trabalho apresentam maiores viscosidades.

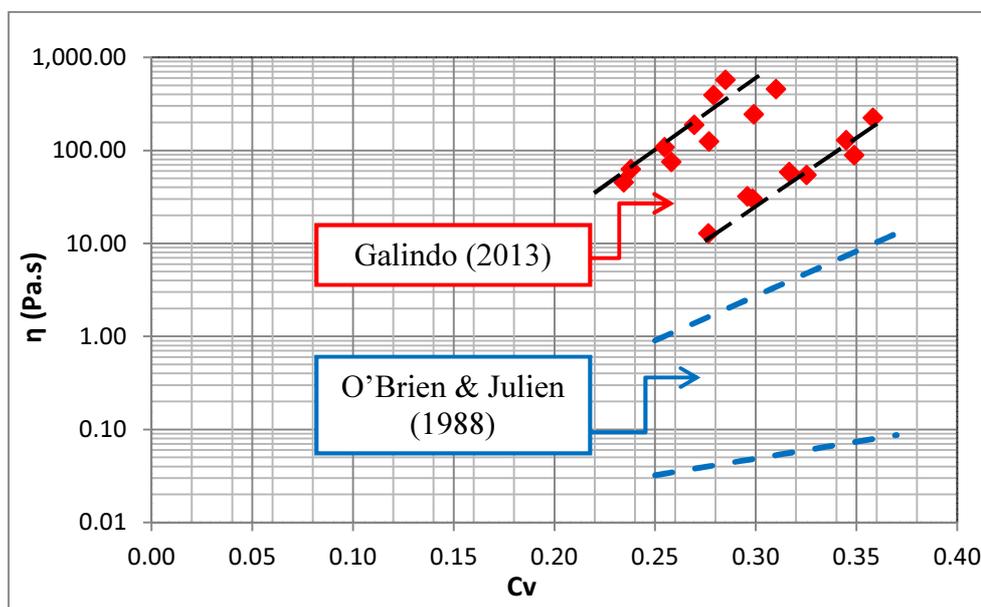


Figura 82 - Relação entre a viscosidade e a concentração de sedimentos para todos os solos ensaiados, com destaque para as faixas de valores obtidas por Galindo (2013) e O'Brien & Julien (1988)