

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Daniel Nery Kohlrauchs

**ESTABILIZAÇÃO DE AREIA FINA COM BENTONITA, VIDRO
MOÍDO E AGENTE CIMENTANTE (CAL DE CARBURETO OU
CIMENTO)**

Porto Alegre
dezembro 2018

DANIEL NERY KOHLRAUCHS

**ESTABILIZAÇÃO DE AREIA FINA COM BENTONITA, VIDRO
MOÍDO E AGENTE CIMENTANTE (CAL DE CARBURETO OU
CIMENTO)**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Cesar Alberto Ruver

Porto Alegre
dezembro 2018

DANIEL NERY KOHLRAUCHS

**ESTABILIZAÇÃO DE AREIA FINA COM BENTONITA, VIDRO
MOÍDO E AGENTE CIMENTANTE (CAL DE CARBURETO OU
CIMENTO)**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação (COMGRAD) da Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, 10 de dezembro de 2018

Prof. Cesar Alberto Ruver
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Sérgio Filipe Veloso Marques
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Relator

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nilo Cesar Consoli
PhD pela Concordia University, CA

Prof. Sérgio Filipe Veloso Marques
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Vinícius Batista Godoy
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família,
pelo apoio e suporte durante os anos de estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Cesar Alberto Ruver, não apenas pela disponibilidade da orientação e sugestão do tema, mas principalmente pelo incentivo e disposição durante a realização da pesquisa. Sou muito grato pela tua ajuda desde o início ao término do trabalho;

Ao Prof. João Ricardo Masuero, pela ajuda e disponibilidade durante todo o curso. Foi uma honra poder ter sido teu aluno;

Ao Prof. Lucas Festugato, por ter despertado meu interesse pela área da Geotecnia;

A minha família, em especial meus avós, mãe e irmã, pelo incentivo, apoio e compreensão durante todo o período de estudos.

A minha namorada, pela ajuda e companheirismo durante toda graduação;

Aos colegas do LEGG, em especial a Andreas Lotero, Hugo Filho, Luciana Queiroz e Tennison Freire, muito obrigado pela parceria e ensinamentos;

A todos os professores, colegas e funcionários da UFRGS que me acompanharam durante essa jornada.

*“A utopia está lá no horizonte.
Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos.
Caminho dez passos, e o horizonte corre dez passos.
Por mais que eu caminhe, jamais a alcançarei.
Para que serve a utopia?
Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar.”*

Fernando Birri

RESUMO

A utilização de resíduos industriais como possíveis agentes estabilizantes de um solo apresenta não só uma vantagem econômica como também ambiental, posto que o material reutilizado em questão, se não descartado da maneira correta, pode ocasionar problemas ao meio-ambiente. Neste sentido, este trabalho trata da estabilização de uma areia fina mais bentonita com a adição de: (a) vidro moído + cal de carbureto ou (b) vidro moído + cimento Portland, onde se procurou verificar a influência das diferentes variáveis (teor de cimentante, peso específico, teor de vidro moído, porosidade e teor volumétrico dos cimentantes) sobre a resistência mecânica do material. Para tal, estabeleceram-se os ensaios de compressão simples, compressão diametral e tração à flexão. Foram estudadas misturas com massas específicas aparentes secas de 1,2, 1,3 e 1,4 g/cm³, teores de vidro moído de 10, 20 e 30% (em substituição à mistura de areia fina + bentonita) e teores de cimentante de 5, 8 e 11% (em adição à mistura de areia fina + bentonita + vidro moído), todas com o teor de umidade de 25%. Os resultados obtidos demonstraram que o aumento da quantidade de agente cimentante (tanto cal de carbureto como de cimento), da massa específica aparente seca e do teor de vidro moído provocou o aumento de todas as resistências mecânicas (compressão simples, tração por compressão diametral e tração à flexão). Também se analisou a relação da porosidade do material e do teor volumétrico de cimentante com tais resistências, através da relação porosidade/(teor volumétrico de cimentante), verificando-se que a redução deste fator resultou em um ganho de resistência mecânica das misturas. Mediante a análise dos dados, obtiveram-se as relações entre compressão simples (q_u), tração por compressão diametral (q_t) e tração à flexão (q_f). Por fim, através de uma análise estatística, demonstrou-se que as variáveis englobadas pela pesquisa são significativas no que diz respeito à influência na resistência mecânica das misturas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Propriedades x Teor de vidro adicionado (Salamatpoor e Salamatpoor, 2017 apud Winter, 2018).....	36
Figura 3.2– Efeito do teor de cal na resistência à compressão simples (q_u) (Lopes Júnior, 2007).....	40
Figura 3.3 – Efeito do teor de cimento na resistência à compressão simples (q_u) (Foppa, 2005)	45
Figura 3.4 – Efeito do tempo de cura (adaptado de Ingles e Metcalf, 1972)	48
Figura 3.5 – Efeito do volume de vazios em relação à q_u (Foppa, 2005)	49
Figura 3.6 – Efeito do $1/V_{ci}$ em relação à q_u (Foppa, 2005)	49
Figura 3.7 - $q_u \times V_v/(V_{ci}^{0,28})$ (Foppa, 2005)	50
Figura 3.8 - $q_u \times V_v$ (Dalla Rosa, 2009).....	51
Figura 3.9 - $q_u \times V_v/V_{ci}$ (Dalla Rosa, 2009).....	51
Figura 3.10 – $q_u \times V_v/(V_{Ca}^{0,12})$ (Dalla Rosa, 2009).....	52
Figura 3.11 - $q_u \times \eta/(C_{iv}^{0,28})$ (Dalla Rosa, 2009).....	52
Figura 3.12 – $q_u \times \eta/(C_{av}^{0,12})$ (Dalla Rosa, 2009)	53
Figura 3.13 – $q_u \times \eta/(C_{av}^{0,12})$ (Consoli et al., 2011).....	53
Figura 3.14 – Efeito da temperatura de cura na q_u (Dalla Rosa e Thomé, 2002 apud Silvani 2013).....	54
Figura 3.15 – Efeito temperatura cura na q_u (Silvani, 2013)	55
Figura 3.16 – Efeito temperatura de cura na compressão diametral (q_t) (Silvani, 2013).....	55
Figura 4.1 – Curva granulométrica areia fina (Cruz, 2008)	59
Figura 4.2 – Curva granulométrica bentonita sódica (Lemos, 2006)	61
Figura 4.3 – Curva granulométrica vidro moído (Fonte: autor).....	62
Figura 4.4 – Curva granulométrica cal de carbureto (Fonte: autor).....	64
Figura 4.5 – Evolução média da resistência à compressão de diferentes tipos de (ABCP, 2002)	66

Figura 4.6 – Molde Cilíndrico (Fonte: autor)	68
Figura 4.7 – Molde cilíndrico (Fonte: autor)	68
Figura 4.8 – Molde prismático (Fonte: autor)	69
Figura 4.9 – Prensa acionada por macaco hidráulico (Fonte: autor)	70
Figura 4.10 – Ensaio de compressão simples	72
Figura 4.11 – Ensaio de compressão diametral (Fonte: autor)	73
Figura 4.12 – Ensaio de compressão diametral	73
Figura 4.13 – Ensaio de compressão diametral (Fonte: autor)	74
Figura 4.14 – Ensaio de flexão (Fonte: autor)	75
Figura 4.15 – Ensaio de flexão (Fonte: autor)	75
Figura 5.1.2.1.1 – Efeito da massa específica na q_u	78
Figura 5.1.2.1.2 – Efeito do teor de cal na q_u	79
Figura 5.1.2.1.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_u	80
Figura 5.1.2.1.4 – Efeito da porosidade na q_u	81
Figura 5.1.2.1.5 – $q_u \times \eta/Lv$	82
Figura 5.1.2.1.6 – $q_u \times \eta/(Lv^{0,12})$	83
Figura 5.1.2.1.7 – $q_u \times \eta/B_2$	84
Figura 5.1.2.1.8 – $q_u \times \eta/B_2$	84
Figura 5.1.2.1.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$	85
Figura 5.1.2.1.10 - η/B_3	86
Figura 5.1.2.1.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$	87
Figura 5.1.2.1.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$	88
Figura 5.1.2.1.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$	88
Figura 5.1.2.2.1 – Efeito da massa específica na q_t	90
Figura 5.1.2.2.2 – Efeito do teor de cal na q_t	91
Figura 5.1.2.2.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_t	92
Figura 5.1.2.2.4 – Efeito da porosidade na q_t	92

Figura 5.1.2.2.5 – $q_t \times \eta/Lv$	93
Figura 5.1.2.2.6 – $q_t \times \eta/(Lv^{0,12})$	93
Figura 5.1.2.2.7 – $q_t \times \eta/B_2$	94
Figura 5.1.2.2.8 – $q_t \times \eta/B_2$ ajustados para a mesma curva	94
Figura 5.1.2.2.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$	95
Figura 5.1.2.2.10 - η/B_3	96
Figura 5.1.2.2.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$	96
Figura 5.1.2.2.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$	97
Figura 5.1.2.2.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$	97
Figura 5.1.2.3.1 – Efeito da massa específica na q_f	99
Figura 5.1.2.3.2 – Efeito do teor de cal na q_f	100
Figura 5.1.2.3.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_f	101
Figura 5.1.2.3.4 – Efeito da porosidade na q_f	101
Figura 5.1.2.3.5 – $q_f \times \eta/Lv$	102
Figura 5.1.2.3.6 – $q_f \times \eta/(Lv^{0,12})$	102
Figura 5.1.2.3.7 – $q_f \times \eta/B_2$	103
Figura 5.1.2.3.8 – $q_f \times \eta/B_2$ ajustados para a mesma curva.....	103
Figura 5.1.2.3.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$	104
Figura 5.1.2.3.10 - η/B_3	105
Figura 5.1.2.3.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$	105
Figura 5.1.2.3.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$	106
Figura 5.1.2.3.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$	107
Figura 5.1.3.1 – Efeito da temperatura de cura na q_u	108
Figura 5.2.1.1 – Efeito do massa específica na q_u	110
Figura 5.2.1.2 – Efeito do teor de cimento na q_u	111
Figura 5.2.1.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_u	112

Figura 5.2.1.4 – Efeito da porosidade na q_u	113
Figura 5.2.1.5 – $q_u \times \eta/Civ$	114
Figura 5.2.1.6 – $q_u \times \eta/(Civ^{0,28})$	115
Figura 5.2.1.7 – $q_u \times \eta/B_2$	116
Figura 5.2.1.8 – $q_u \times \eta/B_2$	116
Figura 5.2.1.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$	117
Figura 5.2.1.10 - η/B_3	118
Figura 5.2.1.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$	119
Figura 5.2.1.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$	120
Figura 5.2.1.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$	120
Figura 5.2.2.1 – Efeito da massa específica na q_t	122
Figura 5.2.2.2 – Efeito do teor de cimento na q_t	123
Figura 5.2.2.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_t	124
Figura 5.2.2.4 – Efeito da porosidade na q_t	124
Figura 5.2.2.5 – $q_t \times \eta/Civ$	125
Figura 5.2.2.6 – $q_t \times \eta/(Civ^{0,28})$	125
Figura 5.2.2.7 – $q_t \times \eta/B_2$	126
Figura 5.2.2.8 – $q_t \times \eta/B_2$ ajustados para a mesma curva.....	126
Figura 5.2.2.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$	127
Figura 5.2.2.10 - η/B_3	128
Figura 5.2.2.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$	128
Figura 5.2.2.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$	129
Figura 5.2.2.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$	130
Figura 5.2.3.1 – Efeito da massa específica na q_f	132
Figura 5.2.3.2 – Efeito do teor de cimento na q_f	133
Figura 5.2.3.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_f	134

Figura 5.2.3.4 – Efeito da porosidade na q_f	134
Figura 5.2.3.5 – $q_f \times \eta/Civ$	135
Figura 5.2.3.6 – $q_f \times \eta/(Civ^{0,28})$	135
Figura 5.2.3.7 – $q_f \times \eta/B_2$	136
Figura 5.2.3.8 – $q_f \times \eta/B_2$ ajustados para a mesma curva.....	136
Figura 5.2.3.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$	137
Figura 5.2.3.10 - η/B_3	138
Figura 5.2.3.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$	138
Figura 5.2.3.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$	139
Figura 5.2.3.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$	140
Figura 6.1.1 – Estatística de regressão	145
Figura 6.1.2 – ANOVA	145
Figura 6.1.3 – Resumo dos resultados	146
Figura 6.1.4 – Estatística de Regressão	146
Figura 6.1.5 – ANOVA	146
Figura 6.1.6 – Resumo dos resultados	147
Figura 6.1.7 – Estatística de Regressão	147
Figura 6.1.8 – ANOVA	147
Figura 6.1.9 – Resumo dos resultados	148
Figura 6.1.10 – Estatística de Regressão	148
Figura 6.1.11 – ANOVA	149
Figura 6.1.12 – Resumo dos resultados	149
Figura 6.1.13 – Estatística de Regressão	149
Figura 6.1.14 – ANOVA	150
Figura 6.1.15 – Resumo dos resultados	150
Figura 6.1.16 – Estatística de Regressão	150
Figura 6.1.17 – ANOVA	151

Figura 6.1.18 – Resumo dos resultados	151
Figura 8.1.1.1–Efeito da massa específica na q_u	154
Figura 8.1.1.2–Efeito do teor de cal na q_u	155
Figura 8.1.1.3–Efeito do teor de vidro moído na q_u	156
Figura 8.1.1.4–Efeito da porosidade na q_u	157
Figura 8.1.1.5 – $q_u \times \eta/Lv$	158
Figura 8.1.1.6– $q_u \times \eta/(Lv^{0,12})$	159
Figura 8.1.1.7– $q_u \times \eta/B_2$	159
Figura 8.1.1.8 – $q_u \times \eta/B_2$	160
Figura 8.1.1.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$	160
Figura 8.1.1.10 - η/B_3	161
Figura 8.1.1.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$	162
Figura 8.1.1.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$	162
Figura 8.1.1.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$	163
Figura 8.2.1.1 – Efeito da massa específica na q_u	165
Figura 8.2.1.2 – Efeito do teor de cal na q_u	166
Figura 8.2.1.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_u	167
Figura 8.2.1.4 – Efeito da porosidade na q_u	168
Figura 8.2.1.5 – $q_u \times \eta/Lv$	169
Figura 8.2.1.6 – $q_u \times \eta/(Lv^{0,12})$	170
Figura 8.2.1.7 – $q_u \times \eta/B_2$	170
Figura 8.2.1.8 – $q_u \times \eta/B_2$	171
Figura 8.2.1.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$	171
Figura 8.2.1.10 - η/B_3	172
Figura 8.2.1.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$	173
Figura 8.2.1.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Porcentagens de cimento a adicionar (adaptado de Ingles e Metcalf, 1972).....	46
Tabela 4.1 – Programa de ensaios (Fonte: autor)	57
Tabela 4.2 – Dosagens estabelecidas para os corpos de prova (Fonte: autor).....	58
Tabela 4.3 – Distribuição granulométrica areia fina (Cruz, 2008).....	60
Tabela 4.4 – Índices físicos da bentonita sódica (Lemos, 2006).....	60
Tabela 4.5 – Análise granulométrica do vidro moído (Fonte: autor)	63
Tabela 4.6 – Composição química vidro moído (Fonte: autor).....	63
Tabela 4.7 – Análise granulométrica (Fonte: autor).....	65
Tabela 4.8 – Composição química vidro moído (Fonte: autor).....	65
Tabela 5.1.1 – Média dos resultados dos ensaios de compressão simples (Fonte: autor)	77
Tabela 5.1.2 - Média dos resultados dos ensaios de compressão diametral (Fonte: autor).....	89
Tabela 5.1.3 - Média dos resultados dos ensaios de tração por flexão (Fonte: autor).....	98
Tabela 5.2.1 - Média dos resultados dos ensaios de compressão simples (Fonte: autor).....	109
Tabela 5.2.2 - Média dos resultados dos ensaios de compressão diametral (Fonte: autor)....	121
Tabela 5.2.3 - Média dos resultados dos ensaios de tração por flexão (Fonte: autor).....	131

LISTA DE SIGLAS

ICL – *Initial Consumption of Lime*

LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos

LEGG – Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnia Ambiental

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

γ_d - peso específico aparente seco (g/cm^3)

ω - teor de umidade do solo (%)

q_u - resistência à compressão simples (kPa)

q_t - resistência à tração por compressão diametral (kPa)

q_f - resistência à tração por flexão

pH – potencial hidrogeniônico

L_v – teor de cal (%)

C_{i_v} – teor de cimento (%)

η – porosidade (%)

V_{ca} – volume de cal (cm^3)

V_{ci} – volume de cimento (cm^3)

V_v – volume de vazios (cm^3)

R^2 – coeficiente de correlação

B_2 – teor volumétrico de cal + vidro moído

B_3 – teor volumétrico de cal + vidro moído + bentonita

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	26
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	28
2.1 OBJETIVO	28
2.2 DELIMITAÇÕES.....	28
2.3 LIMITAÇÕES	28
2.4 DELINEAMENTO.....	28
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1 SOLOS	31
3.1.1 AREIA FINA.....	33
3.2 BENTONITA	33
3.3 MATERIAL POZOLÂNICO	34
3.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	37
3.4.1 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS	37
3.4.1.1 EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL	38
3.4.1.1.1 DOSAGEM DA CAL.....	41
3.4.1.1.2 DENSIDADE E COMPACTAÇÃO	42
3.4.1.2 EFEITOS DA ADIÇÃO DE CIMENTO	42
3.4.1.2.1 DOSAGEM DE CIMENTO.....	45
3.4.1.2.2 DENSIDADE E COMPACTAÇÃO	46
3.5 EFEITO DA POROSIDADE	47
3.6 EFEITO DO TEMPO DE CURA.....	47
3.7 EFEITO DA RELAÇÃO VAZIO/CIMENTANTE	48
3.8 EFEITO DA TEMPERATURA DE CURA.....	53
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	56
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	56
4.2 PROGRAMA DE ENSAIOS	57

4.3 DOSAGENS.....	57
4.3.1 TEORES DE VIDRO MOÍDO	57
4.3.2 TEORES DE CIMENTANTE.....	58
4.3.3 DOSAGENS ESTABELECIDAS	58
4.4 MATERIAIS UTILIZADOS.....	58
4.4.1 SOLO.....	58
4.4.2 BENTONITA	60
4.4.3 VIDRO MOÍDO	61
4.4.4 CAL DE CARBURETO.....	63
4.4.5 CIMENTO	65
4.4.6 ÁGUA.....	66
4.5 MÉTODOS UTILIZADOS	66
4.5.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	66
4.5.1.1 MISTURA DOS MATERIAIS	67
4.5.1.2 CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS	67
4.5.1.3 CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS	69
4.5.2 CURA	70
4.5.2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	70
4.5.2.2 CAL DE CARBURETO.....	70
4.5.2.3 CIMENTO	71
4.5.3 ENSAIOS	71
4.5.3.1 COMPRESSÃO SIMPLES	72
4.5.3.2 COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	72
4.5.3.3 FLEXÃO	74
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	76
5.1 MISTURAS DE AREIA FINA, BENTONITA, VIDRO MOÍDO E CAL DE CARBURETO.....	76

5.1.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCESSOS DE CURA INSATISFATÓRIOS	76
5.1.2 MISTURAS CURADAS 7 DIAS À 24 °C + 7 DIAS À 40 °C	76
5.1.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	77
5.1.2.1.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA	77
5.1.2.1.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL.....	78
5.1.2.1.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO.....	79
5.1.2.1.4 EFEITO DA POROSIDADE	80
5.1.2.1.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL.....	81
5.1.2.1.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO)	83
5.1.2.1.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)	85
5.1.2.1.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	88
5.1.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (q_t).....	89
5.1.2.2.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA	89
5.1.2.2.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL.....	90
5.1.2.2.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO.....	91
5.1.2.2.4 EFEITO DA POROSIDADE	92
5.1.2.2.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL.....	93
5.1.2.2.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO)	94
5.1.2.2.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)	95
5.1.2.2.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	97
5.1.2.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO.....	98
5.1.2.3.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA	98

5.1.2.3.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL.....	99
5.1.2.3.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO.....	100
5.1.2.3.4 EFEITO DA POROSIDADE	101
5.1.2.3.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL.....	102
5.1.2.3.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO).....	103
5.1.2.3.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	105
5.1.2.3.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	106
5.1.3 EFEITO DA TEMPERATURA DE CURA.....	107
5.2 MISTURAS DE AREIA FINA, BENTONITA, VIDRO MOÍDO E CIMENTO	109
5.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	109
5.2.1.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA	109
5.2.1.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CIMENTO	110
5.2.1.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO.....	111
5.2.1.4 EFEITO DA POROSIDADE	112
5.2.1.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO.....	113
5.2.1.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO).....	115
5.2.1.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	117
5.2.1.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	120
5.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (q_t).....	121
5.2.2.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA	121
5.2.2.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CIMENTO	122
5.2.2.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO.....	123

5.2.2.4 EFEITO DA POROSIDADE	124
5.2.2.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO.....	125
5.2.2.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO)	126
5.2.2.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)	128
5.2.2.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	129
5.2.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO (q_f)	131
5.2.3.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA	131
5.2.3.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CIMENTO	132
5.2.3.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO.....	133
5.2.3.4 EFEITO DA POROSIDADE	134
5.2.3.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO.....	135
5.2.3.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO)	135
5.2.3.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)	138
5.2.3.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	139
5.3 RELAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO DIAMETRAL E COMPRESSÃO SIMPLES (q_t/q_u)	140
5.3.1 CAL	140
5.3.2 CIMENTO	141
5.4 RELAÇÃO ENTRE TRAÇÃO À FLEXÃO E COMPRESSÃO SIMPLES (q_f/q_u)....	141
5.4.1 CAL	141
5.4.2 CIMENTO	142
5.5 RELAÇÃO ENTRE TRAÇÃO POR FLEXÃO E COMPRESSÃO DIAMETRAL (q_f/q_t).....	143

5.5.1 CAL	143
5.5.2 CIMENTO	143
6 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	145
6.1 AMOSTRAS COM CAL DE CARBURETO.....	145
6.1.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	145
6.1.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	146
6.1.3 ENSAIO DE FLEXÃO	147
6.2 AMOSTRAS COM CIMENTO	148
6.2.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	148
6.2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	149
6.2.3 ENSAIO DE FLEXÃO	150
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	152
7.1 CONCLUSÕES.....	152
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	152
8 APÊNDICE	153
8.1 MISTURAS CURADAS 7 DIAS À TEMPERATURA AMBIENTE	153
8.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (q_u).....	153
8.1.1.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA	153
8.1.1.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL.....	154
8.1.1.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO.....	155
8.1.1.4 EFEITO DA POROSIDADE	156
8.1.1.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL.....	157
8.1.1.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO).....	159
8.1.1.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	161
8.1.1.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	162

8.2 MISTURAS CURADAS 7 DIAS À 24 °C.....	164
8.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	164
8.2.1.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA	164
8.2.1.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL.....	165
8.2.1.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO.....	166
8.2.1.4 EFEITO DA POROSIDADE	167
8.2.1.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL.....	168
8.2.1.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL+ VIDRO MOÍDO)	170
8.2.1.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)	172
8.2.1.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA).....	173
REFERÊNCIAS	175

1 INTRODUÇÃO

As condições iniciais nas quais o solo se encontra, em grande parte das situações, não são favoráveis ao seu uso, seja para pavimentação, execução de fundações superficiais ou estabilização de taludes. Devido à urbanização das cidades, optar-se por um local diferente para a execução de uma obra, o qual apresente um solo mais adequado, nem sempre é uma possibilidade, tendo que se escolher entre:

- (a) a elaboração de um projeto que leve em consideração essas condições desfavoráveis (muitas vezes antieconômico);
- (b) a remoção do solo e sua posterior substituição por um material de melhor qualidade (antieconômica e com limitações ambientais); ou
- (c) a alteração das propriedades do solo (físico e/ou químicas) visando à melhoria do material, sendo esta última alternativa também conhecida como estabilização de solos, como apontado por Ingles e Metcalf (1972), tema que versará o presente trabalho.

O solo a ser levado em consideração neste estudo de estabilização é uma areia fina, de origem eólica, oriunda de Osório/RS, Brasil, com adição de bentonita. A estabilização se dará através da adição à mistura solo + bentonita de:

- (a) vidro moído + cal de carbureto;
- (b) vidro moído + cimento Portland CP-V ARI.

Além de ser uma técnica atrativa no que diz respeito às vantagens econômicas, este estudo de estabilização, em específico, apresenta vantagens ambientais, visto que tanto o vidro moído como a cal de carbureto (resíduo da produção do gás acetileno), (Ramasamy, Periathamby, Ibrahim (2002)) são resíduos industriais.

De acordo com Dalla Rosa (2009), a utilização de cal como estabilizante se dá desde a antiguidade, sendo a cal o agente estabilizador mais utilizado e mais econômico no que diz respeito à estabilização de solos. Através de seu emprego na elaboração de base para rodovias e camada de suporte para fundações superficiais obtém-se grande sucesso, como acrescentado por Lopes Júnior (2007).

Neste trabalho, após a mistura e cura dos materiais, serão realizados os ensaios de compressão simples, compressão diametral e à flexão, tendo como objetivo encontrar uma relação nos valores de resistência obtidos nos ensaios acima citados.

As diretrizes deste trabalho são apresentadas no Capítulo 2, onde se trata sobre o objetivo, delimitação, limitações e delineamento da pesquisa.

A revisão bibliográfica, apresentando-se informações colhidas sobre aspectos importantes do tema em questão é feita no capítulo 3.

No Capítulo 4 se descreve o programa experimental, onde são descritos os materiais utilizados na pesquisa, moldagem, cura e ensaios previstos.

Os resultados experimentais obtidos nos diferentes ensaios são explicitados no capítulo 5.

E, por fim, no capítulo 6 é feita uma discussão detalhada e análise dos resultados experimentais obtidos.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

2.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência do agente cimentante, do peso específico aparente seco e do teor de vidro moído na resistência à compressão simples, à compressão diametral e à flexão de uma areia fina adicionada de bentonita e estabilizada com a adição de vidro moído e um agente cimentante, sendo este ora cal de carbureto ora cimento.

2.2 DELIMITAÇÕES

Este trabalho se limitará a um estudo de laboratório com a utilização de areia fina, bentonita, vidro moído, cal de carbureto e cimento, onde será realizada a execução de um programa experimental com um número reduzido de ensaios para a avaliação da resistência mecânica.

2.3 LIMITAÇÕES

Este trabalho limita-se a estudar misturas com:

- a) Solo: - massas específicas aparentes secas de 1,2, 1,3 e 1,4 g/cm³;
- teor de umidade de 25%;
- substituição de 20% da areia fina por bentonita;
- b) teores de vidro moído de 10, 20 e 30% (em substituição à mistura de areia fina + bentonita);
- c) teores de cimentante de 5, 8 e 11% (em adição à mistura de areia fina + bentonita + vidro moído);
- d) utilização de cimento e cal (em separado) como agentes cimentantes.

2.4 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;
- c) moldagem dos corpos de prova;
- d) cura dos corpos de prova;

- e) rompimento dos corpos de prova (ensaios de compressão simples, compressão diametral e flexão);
- f) análise dos resultados;
- g) considerações finais.

O objetivo da **pesquisa bibliográfica** foi a obtenção de informações relativas à estabilização química de solos com a adição tanto de cal como de cimento. Também procurou-se informações sobre os outros materiais a serem adicionados ao solo em questão, ou seja, bentonita e sílica (vidro moído). Somado a isso, pesquisou-se sobre a normalização dos resultados e inter-relação entre as resistências à compressão simples, compressão diametral e tração à flexão.

Ao elaborar-se o **plano experimental**, foram definidos os seguintes aspectos:

- a) teor de umidade;
- b) massas específicas aparentes secas;
- c) teores de agente cimentante;
- d) teores de vidro moído;
- e) ensaios a serem realizados;
- f) tempo de cura das amostras.

A **moldagem dos corpos de prova** foi realizada segundo os teores pré-estabelecidos, utilizando-se os moldes adequados para os ensaios em questão: cilíndricos para ensaios de compressão simples e diametral, e, prismático para os ensaios de flexão. Após a moldagem, foi realizada a **cura dos corpos de prova**, sendo estes imersos em água por 24 horas no último dia de cura com o objetivo de saturar as amostras e reduzir o efeito da sucção.

Procedeu-se, então, para o **rompimento dos corpos de prova**, realizando-se os ensaios previamente estabelecidos: compressão simples, compressão diametral e flexão. Todos os ensaios foram realizados utilizando-se o mesmo equipamento.

Após os ensaios, se realizou a **análise dos resultados**, com o objetivo de se obter a influência das variáveis em questão:

- teor de cimentante;
- teor de vidro moído;
- massa específica;
- teor de vazios/(cimentante);
- teor de vazios/(cimentante + vidro moído);
- teor de vazios/(bentonita + cimentante + vidro moído).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SOLOS

Pinto (2006) define que solos se originam da decomposição físico-química das rochas que inicialmente constituíam a crosta terrestre, sendo que a água desempenha um importante papel no desenvolvimento dos mesmos, pois além de atacar quimicamente os minerais, após penetrar na rocha através das trincas provocadas pelas variações de temperatura, ao congelar-se, provoca um aumento de tensão no interior da rocha, que, entre outros fatores, é responsável pela fragmentação dos blocos. Somado a isso, a presença da fauna e da flora desencadeia uma série de reações químicas, como por exemplo, a oxidação e a hidrólise, que, somadas aos processos anteriores, promovem a formação dos solos. Estes solos apresentam partículas de diferentes tamanhos e composições químicas, as quais dependem da rocha que lhes originou.

Após sua formação, os solos, basicamente, podem ser divididos em dois grandes grupos principais, são eles: solos residuais e solos transportados. Como apontado por Terzaghi, Peck e Mesri (1996), a caracterização de um solo residual se dá quando o produto da rocha intemperizada permanece no local onde foi originado, enquanto em outra situação, independentemente do agente de transporte, o solo é caracterizado como transportado.

Segundo Azevedo et al. (1998 apud Azevedo 2010), os solos ainda podem ser definidos como:

Solos Residuais: a rocha presente no local os dá origem, portanto, as características apresentadas pelo solo são similares às da rocha, existindo a possibilidade de, às vezes, de serem encontrados matacões (blocos de rocha semi-alterados). A granulometria de tais solos tende a ser bem graduada, apresentando desde materiais finos a graúdos.

Solos Transportados: o transporte do material decomposto é o responsável por sua formação, podendo o agente transportador ser aluvial, coluvial ou eólico. Devido a este fato, as características dos solos transportados são diferentes das características da rocha presentes no local. Estes solos tem uma tendência a apresentar materiais mais finos que os residuais, visto

que o transporte deste material é mais fácil de ser realizado pelo agente transportador do que o de materiais graúdos.

Outro fator de suma importância no que diz respeito ao solo é a sua classificação, segundo Pinto (2006), se tratando de engenharia, o objetivo de se classificar um solo é a possibilidade de se fazer a estimativa de um possível comportamento do solo ou ao menos de se orientar uma futura investigação que permita a análise adequada de um problema, sendo, em engenharia de solos, os tipos mais conhecidos de classificação aqueles baseados no tipo e no comportamento de partículas constituintes do solo.

Para que essa classificação seja feita de maneira correta, se faz necessário o conhecimento de determinados parâmetros do solo. Ainda segundo Pinto (2006), os sistemas de classificação de solos que levam em consideração as características dos grãos constituintes tem por objetivo definir grupos os quais apresentem comportamentos similares no que diz respeito ao interesse da Engenharia Civil, onde, geralmente, os índices empregados são a composição granulométrica e os índices de Atterberg (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade).

Um dos sistemas mais utilizados mundialmente é o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), método proposto por Arthur Casagrande, que leva em consideração justamente os índices citados acima. Segundo Terzaghi, Peck e Mesri (1996), de acordo com esse sistema, os solos são divididos em três grupos:

Solos de granulação grosseira: onde mais de 50% dos grãos do solo (em peso) ficam retidos na peneira #200 (abertura de 0,074mm), sendo atribuídas as letras **G** ou **S**, de pedregulho (“*Gravel*”, em inglês) e areia (“*Sand*”, em inglês), respectivamente. Onde ainda é possível uma subdivisão em relação à granulometria do solo em questão, sendo atribuídas as letras **W** ou **P**, de bem graduado (“*Well graded*”, em inglês) e mal graduado (“*Poor graded*”, em inglês), respectivamente;

Solos finos: onde mais de 50% dos grãos do solo (em peso) são passantes na peneira #200, sendo atribuídas as letras **M** ou **C**, de silte inorgânico (“*Mo*”, em sueco) e argila inorgânica (“*Clay*”, em inglês), respectivamente. Onde ainda é possível uma subdivisão em relação à compressibilidade do solo em questão, sendo atribuídas as letras **H** e **L**, de alta

compressibilidade (“*High*”, em inglês) e baixa compressibilidade (“*Low*”, em inglês), respectivamente;

Solos altamente orgânicos (turfas): Siltes e argilas orgânicas, sendo atribuída a letra **O**, de orgânico (“*Organic*”), em inglês.

Vale ressaltar, ainda segundo Terzaghi, Peck e Mesri (1996), que o SUCS permite uma classificação confiável com base em poucos testes de laboratório, porém esse sistema serve apenas como um ponto de partida para a definição das propriedades dos solos.

3.1.1 AREIA FINA

De acordo com a ABNT NBR 6502/1995 Rochas e Solos, areia é definida como solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm. Dentro desses limites, tem-se por areia fina (material do presente trabalho), a areia com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,060 mm e 0,20 mm.

3.2 BENTONITA

Segundo Ross e Shannon (1926), bentonita pode ser definida como uma rocha composta essencialmente de um argilo-mineral montmorilonítico, formado pela desvitrificação, processo no qual o material passa ao estado cristalino após solidificar-se, e posterior alteração química de um material de estrutura amorfa, de origem ígnea, geralmente uma cinza vulcânica.

As partículas de montmorilonita apresentam o formato de placas ou lâminas, as quais possuem um perfil irregular, e, além de muito finas, quando em contato com a água, apresentam boa capacidade de delaminação, como apontam Silva e Ferreira (2008). Os autores ainda acrescentam que entre essas placas existem lacunas denominadas de camadas intermediárias ou interlamelares ou de galerias, onde estão localizados cerca de 80% dos cátions trocáveis na montmorilonita. Os cátions adsorvidos podem ser sódicos ou cálcicos, sendo que a bentonita sódica apresenta menor condutividade hidráulica e maior capacidade de

expansão do que a bentonita cálcica (Alther, 1982; Reschke e Haug, 1991 apud Gleason et al, 1997).

Tais características conferem a bentonita a capacidade de inchamento quando na presença de água, podendo expandir várias vezes o seu volume, formando géis tixotrópicos (mudam de estado físico perante agitação), sendo que essa expansão pode ser de tal intensidade, que existe a possibilidade da separação das camadas dos cristais, como apontado por Luz e Oliveira (2008).

Medidas indiretas tais como ensaios de expansão livre e avaliação dos limites de Atterberg podem servir de parâmetros para a avaliação da qualidade de uma bentonita. Quanto maior for o limite de liquidez e plasticidade, melhor é a qualidade apresentada pela bentonita. Uma bentonita sódica de média qualidade apresenta limite de liquidez entre 300 e 500%, ao passo que uma de alta qualidade tem apresenta valores entre 500 e 700%. Quanto maior for a capacidade de expansão da bentonita, melhor sua qualidade. Tal fato é conferido em testes de expansão livre (Heineck, 2002 apud Pagani, 2007).

Por fim, conforme apontado por Teixeira (2014), existem inúmeras aplicações para a utilização da mistura de bentonita com o solo, podendo funcionar como paredes semipermeáveis para a contenção do lençol freático contaminado, preenchimento de furos de estacas de modo a possibilitar a sua execução, etc.

3.3 MATERIAL POZOLÂNICO

Pozolanas são definidas como um material sílico ou sílico-alumínico, podendo ser naturais ou artificiais, o qual por si só tem pouca ou nenhuma ação cimentante, porém quando na forma de um material de granulação bem fina e na presença de um meio aquoso, reage com Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) formando Silicatos de Cálcio Hidratados (CSH), os quais apresentam propriedades cimentantes, como definido pela American Society for Testing and Materials – ASTM C618 (apud Neville 2011).

3.3.1 VIDRO MOÍDO

De uma maneira geral, a obtenção de vidro se dá através do derretimento de uma mistura de sílica, carbonato de sódio e carbonato de cálcio a elevadas temperaturas, seguida de esfriamento, resultando na solidificação do material, conforme apontado por Park, Lee e Kim (2004).

Visto que as diversas formas de utilização do vidro apresentam uma vida útil limitada, para que seu descarte não acarrete em um problema ambiental, a necessidade da reciclagem se faz presente, sendo que, na teoria, o vidro é um material 100% reciclável, podendo ser reciclado por diversas vezes sem a perda de sua qualidade, como aponta Ali e Al-Tersawy (2012) e Sobolevet et al. (apud Ali e Al-Tersawy, 2012).

A reciclagem de resíduos de vidro encontra na indústria do concreto um potencial mercado para sua reutilização. Estudos vem sendo desenvolvidos com o objetivo de utilizar vidro moído reciclado como um possível substituto de parte dos agregados convencionais do concreto e argamassa, sendo que em estudos anteriores foi observada a viabilidade dessa possível substituição (Ling, Poon e Kou, 2011).

Estudos elaborados por Reindl (2003) e Zheng (2007) (apud Abdallah e Fan, 2014) mostram que o pó de vidro ao reagir com cimento pode contribuir inclusive para o desenvolvimento do aumento da resistência do concreto, sendo que as reações pozolânicas se intensificam com a diminuição do tamanho das partículas do pó de vidro.

O desempenho da utilização de vidro moído como agregado fino em concretos foi avaliado por Ganiron Jr. (2013 apud Winter, 2018), onde o autor substituiu a areia por vidro em porcentagens de 25, 50, 75 e 100%, concluindo que:

- o fator água cimento pode ser diminuído com a utilização do vidro, dependendo da porcentagem adicionada deste;
- o módulo de elasticidade se reduz com a adição de vidro no lugar do agregado miúdo;

- o peso específico do concreto diminui quanto maior for a porcentagem adicionada de vidro;
- o custo do concreto diminui com a utilização de vidro.

O efeito do vidro, em forma granular, adicionado em areias artificialmente cimentadas foi estudado por Salamatpoor e Salamatpoor (2017 apud Winter, 2018). O ganho de resistência do material mostrou-se maior conforme a porcentagem de vidro moído adicionada. Para se avaliar a resistência das misturas os autores realizaram ensaios de compressão simples e triaxiais, chegando à conclusão de que quanto maior fosse o teor de vidro moído adicionado maior seriam os seguintes parâmetros do material:

- ângulo de atrito interno;
- coesão;
- resistência à compressão.

A Figura 3.1 abaixo explicita tais relações.

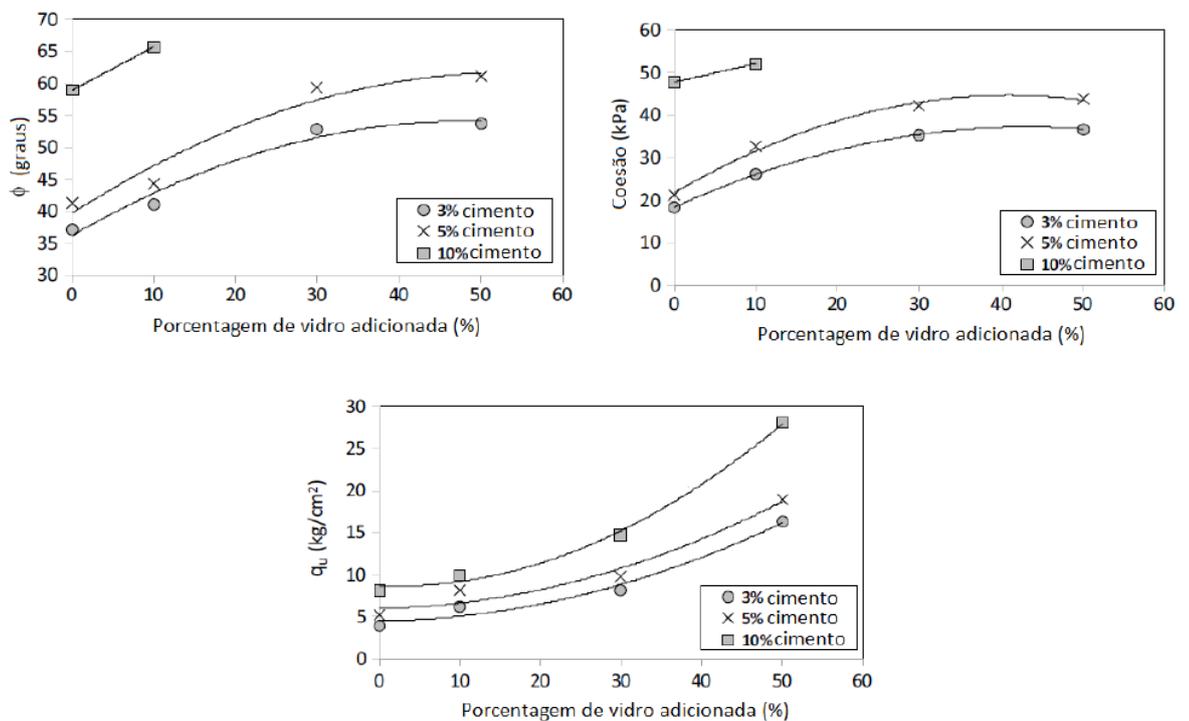


Figura 3.1- Propriedades X Teor de vidro adicionado (Salamatpoor e Salamatpoor, 2017 apud Winter, 2018)

Por fim, a composição química do vidro verde (tipo de vidro utilizado na pesquisa) é definida por Pereira-de-Oliveira et al (2012) como sendo em torno de 72% de SiO₂ (sílica), 12% de CaO (óxido de cálcio), 11% de Na₂O (óxido de sódio) e uma pequena quantidade de MgO (óxido de magnésio), Al₂O₃ (alumina) e K₂O (óxido de potássio). Ao moer, e posteriormente comparar a composição de pó de vidro com outros materiais pozolânicos, Islam, Rahman e Kazi (2016) concluíram que este material também pode ser classificado como pozolânico.

3.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A partir do momento que o solo disponível não apresenta um desempenho desejado e, se descarta o uso de algum solo proveniente de outro local ou a mudança do local da obra, faz-se necessária a utilização da estabilização de solos. Técnica essa que pode alterar as propriedades de resistência e compressibilidade do solo encontrado originalmente de diversas maneiras, seja mecânica, térmica ou quimicamente, com o objetivo de que o novo material corresponda às necessidades do projeto, como apontado por Ingles e Metcalf (1972). Vargas (1977) complementa, adicionando que o processo de estabilização torna maior a resistência estável do solo às cargas, desgaste ou erosão, podendo ser realizada além das maneiras citadas acima, como também por uma correção de sua granulometria.

Por fim, a estabilização de solos pode ser definida como a arte e ciência de melhorar as propriedades do solo, sendo que, apesar de o método mais tradicional ao longo do tempo ter sido a compactação de solos, uma variedade de compostos químicos vem sendo utilizados para a estabilização, onde os mais comuns dentre os disponíveis são a cal e o cimento, como apontado pela American Coal Ash Association (ACAA, 2008).

3.4.1 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS

Após escolhido o método a ser utilizado para estabilizar um solo, optando-se por estabilização química, vale ressaltar que, conforme Vargas (1977), em certas ocasiões, substâncias químicas com propriedades de agregar ou dispersar as partículas são empregadas, como por exemplo, a cal sendo utilizada como aditivo para potencializar e economizar cimento em estabilizações com cimento Portland. Todavia, essa situação conferiria uma utilização da cal

como aditivo químico secundário, enquanto a própria cal pode desempenhar um papel de agente estabilizador primário.

Pode se dividir a estabilização química dos solos em três partes, sendo elas: situações nas quais o efeito do agente estabilizante se deve majoritariamente a sua interação com o solo em detrimento de suas propriedades físicas, como por exemplo, a cal; situações nas quais o efeito do agente estabilizante se deve tanto a sua interação com o solo quanto as suas propriedades físicas, como por exemplo, o cimento; e por último, situações nas quais o efeito do agente estabilizante se deve essencialmente as suas propriedades físicas em detrimento de sua interação com o solo, como por exemplo, o betume. Conforme apontado por Nuñez (1991). Em geral, esses materiais podem aumentar a resistência do solo, seja cimentando os grãos entre si, ou aumentando e mantendo as forças coloidais que unem os grãos, conforme apontado por Vargas (1977).

Dentre os tratamentos citados acima, o trabalho se restringirá a apresentar as situações nas quais os agentes estabilizantes forem a cal hidratada e o cimento Portland, dois dos principais e mais efetivos estabilizantes químicos utilizados em solos, como apontado por Moh (1965).

3.4.1.1 EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL

A cal tem sua origem nas rochas carbonatadas, e sua utilização com os mais variados fins vem desde a antiguidade, sendo a indústria da construção civil a maior usuária dos produtos oriundos da cal, como apontado por Oates (1998), que ainda destaca sua utilização na secagem, melhora e estabilização de solos.

Segundo Guimarães (1997), essas rochas carbonatadas são constituídas em 50% ou mais pelos seguintes minerais: calcita – CaCO_3 romboédrico (carbonato de cálcio romboédrico), aragonita – CaCO_3 ortorombico (carbonato de cálcio ortorombico) e a dolomita – $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ romboédrico (carbonato de cálcio e carbonato de magnésio romboédricos).

Ingles e Metcalf (1972) ressaltam que de um modo geral, tratando-se de engenharia, quando se refere ao termo cal, quer-se dizer cal hidratada. Conforme Guimarães (1997), a cal hidratada é resultado do prosseguimento do processo industrial que origina a cal virgem, com

a presença de água, sendo que sua composição química se dá de acordo com as características da cal virgem que a origina.

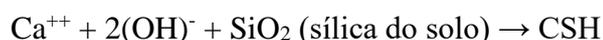
Para Oates (1998), devido às rápidas reações físico-químicas da cal com qualquer argilo-mineral presente no solo, a melhora do solo ocorre rapidamente, com uma drástica redução da plasticidade, aumento da trabalhabilidade e melhoria nas características de compactação. Em contrapartida, a estabilização do solo ocorre progressivamente durante vários meses, sendo um processo muito mais lento, o qual envolve a reação da cal com a sílica e o alumínio presentes no solo.

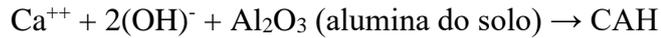
A estabilização de solos utilizando-se cal hidratada é semelhante à estabilização com o uso do cimento, diferenciando-se em dois principais aspectos, conforme Ingles e Metcalf (1972): ela é utilizada principalmente em solos argilosos em detrimento de solos arenosos (porém neste trabalho será adicionada a uma areia fina juntamente com bentonita) e como material para preparar o solo para uma futura utilização, sendo nesta situação, uma medida temporária.

Para Vargas (1977), a principal ação da cal reside na concentração de cátions trocáveis na água intersticial do solo, que resulta na retração da camada ionizada ao redor da partícula, somada a expansão dessa camada com o tempo devida ao alto pH da cal.

Conforme Boynton (1979), a reação da cal hidratada com solo desempenha um papel duplo; em situações onde o solo é argiloso, ela aglomera as finas partículas de argila e as deixa com um aspecto grosseiro (do tamanho de partículas de silte e areia) e frágil, e, além disso, ao reagir quimicamente com a sílica e alumínio disponíveis no solo ou com pozolanas a ele adicionadas, a cal forma Silicatos de Cálcio Hidratados e Aluminatos de Cálcio Hidratados, aumentando a resistência do material.

Essas reações podem ser verificadas nas equações abaixo, propostas por Mallela, Von Quintus e Smith (2004):





Ainda segundo os autores, essas reações entre cal, água, sílica e alumina do solo, que formam estes compostos cimentadores - os mesmos que são formados durante a hidratação do cimento Portland, são mencionadas como reações pozolânicas. Ao se adicionar certa quantidade de cal ao solo, o pH da mistura solo-cal é elevado a aproximadamente 12,4, como a solubilidade da sílica e alumina é fortemente elevada em pH altos, enquanto restar cálcio residual da cal no sistema e o pH se mantiver alto o suficiente para manter a solubilidade, as reações pozolânicas iram continuar, conforme apontado por Little (1987, apud Mallela et al., 2004).

A resistência conferida ao solo pela adição de cal pode ser observada na Figura 3.2 abaixo, retirada de um estudo de Lopes Júnior (2007), onde o gráfico em questão demonstra a variação da resistência à compressão simples em relação a diferentes pesos específicos e teores de cal para o tempo de cura de 28 dias.

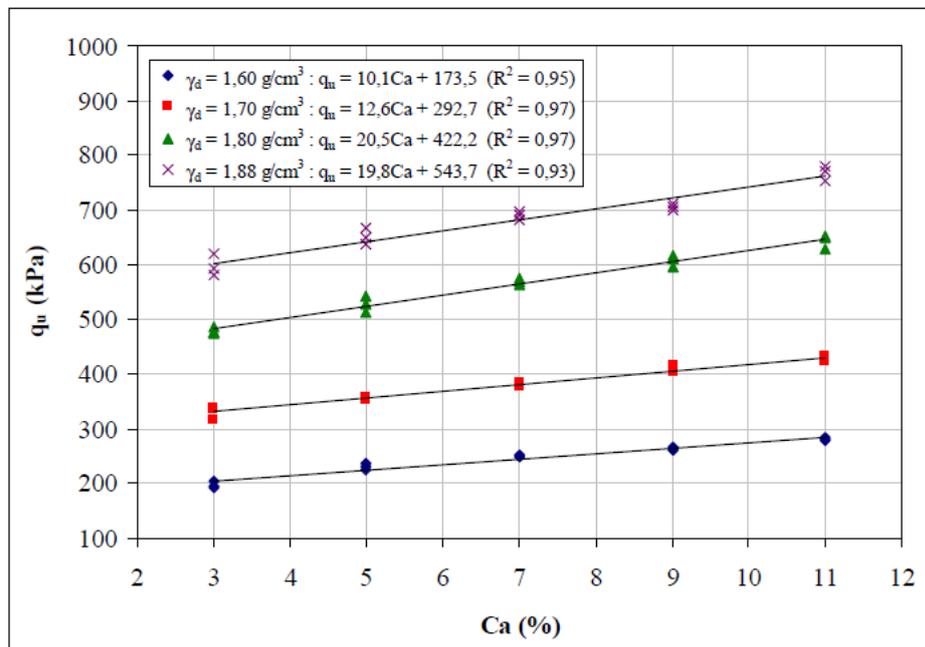


Figura 3.2– Efeito do teor de cal na resistência à compressão simples (q_u) (Lopes Júnior, 2007)

Cal de Carbureto

A cal de carbureto é um resíduo originado na produção de gás acetileno, sendo um material composto basicamente por hidróxido de cálcio somado de pequenas quantidades de carbonato de cálcio, óxido de silício e outros óxidos que também se podem formar durante a produção deste gás, como apontado por Saldanha et al. (2018 apud Winter, 2018).

O mesmo autor acrescenta que esse tipo de cal apresenta um potencial de uso semelhante ao das cales hidratadas comerciais, destacando-se pela vantagem ambiental de se tratar de um resíduo.

Ao analisar um solo arenoso estabilizado com cinza volante e cal de carbureto, Consoli et al. (2001) constataram que, para uma mesma tensão de confinamento, o aumento da quantidade de cal resulta no aumento da resistência de pico e na diminuição da deformação na qual o pico é atingido.

3.4.1.1.1 DOSAGEM DA CAL

De acordo com Ingles e Metcalf (1972), a escolha do teor de cal tem como objetivo eleger a quantidade do material a ser adicionada ao solo que resulte na obtenção da resistência e durabilidade apropriadas de acordo com o uso do material.

Dentre os métodos de dosagem mais utilizados para adição de cal ao solo, tem-se:

- a) Método do pH (Eades e Grim, 1966) – baseia-se na definição do teor mínimo de cal que resulte num aumento do valor do pH para 12,4;
- b) Método do ICL (Initial Consumption of Lime, apresentado por Rogers et al (1997)) – é uma variação do método do pH, onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH alcança um valor constante (máximo);
- c) Método de Thompson (1966) – estabelece como reativo um solo que apresente um ganho de resistência à compressão simples de pelo menos 345 kPa quando estabilizado com cal.

De um modo geral, os métodos de dosagem do teor de cal consideram a resistência como um parâmetro secundário e não consideram a durabilidade do material (Bhattacharjaet al, 2003 apud Lopes Junior, 2007).

3.4.1.1.2 DENSIDADE E COMPACTAÇÃO

Para Ingles e Metcalf (1972), a densidade na qual as misturas solo-cal são compactadas apresenta tanta importância quanto a quantidade de cal adicionada ao solo. Com o aumento da densidade tem-se um aumento na resistência e uma diminuição na permeabilidade do material, a qual alcança um valor próximo à umidade ótima, começando a aumentar depois desta.

As misturas solo-cal apresentam uma menor massa específica aparente máxima (γ_d) que o solo natural para a mesma energia de compactação. A γ_d continua diminuindo conforme o teor de cal aumenta, ademais, o aumento do teor de cal resulta num aumento da umidade ótima, conforme observado por vários autores (TRB, 1987).

De acordo com Sivapullaiah et al. (1998 apud Lopes Júnior, 2007), ao serem adicionadas de cal, as partículas do solo tornam-se mais floculadas, pois ocorre a troca dos íons sódio monovalentes presentes na argila pelos íons cálcio divalentes presentes na cal. Devido a este fato, a quantidade e o tamanho dos vazios no solo aumenta, porém tal estrutura floculada apresenta resistência suficiente resistir aos esforços de compactação com um índice de vazios mais elevado, reduzindo a massa específica aparente seca do solo-cal. Quanto mais vazios houver na amostra, maior será a quantidade de água necessária para preenchê-los, resultando em uma umidade ótima maior e uma curva de compactação mais achatada.

3.4.1.2 EFEITOS DA ADIÇÃO DE CIMENTO

Quando a estabilidade mecânica de um material ou uma combinação de materiais não é possível de ser alcançada, o uso de cimento, cal ou betume para a estabilização do solo pode ser empregado, sendo a estabilização por cimento a mais comum dentre elas (Ingles e Metcalf 1972).

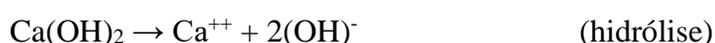
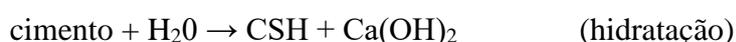
Estabilizar um solo com cimento, nada mais é do que a adicionar o mesmo a um solo previamente escarificado, realizar a mistura entre solo e cimento, e posteriormente adicionar água seguida da compactação do novo material. O processo de hidratação do cimento confere resistência ao solo à medida que este se estabiliza, sendo que o cimento pode ser adicionado a quase todo tipo de solo, com a exceção de solos muito orgânicos (aqueles com mais de 2% de matéria orgânica presente), de modo que o sucesso da estabilização depende da mineralogia e composição química do solo. (Ingles e Metcalf, 1972; Croft, 1967).

Para se alterar as propriedades dos solos não são necessárias grandes quantidades de cimento, pelo contrário, pequenas quantidades de até 2% (em massa) de cimento são o suficiente. Em contra partida, ao se adicionar maiores quantidades (de 5% a 10% de cimento em massa) a um solo de granulometria mais grosseira, este se comportaria quase como um concreto, apresentando uma mudança drástica das propriedades do solo, como conferiram Ingles e Metcalf (1972).

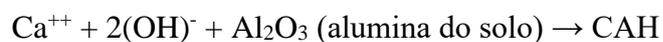
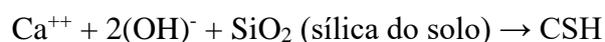
Como apontado por Handy (1958), apesar de a reação entre o cimento e a superfície dos minerais em um material de granulação grosseira ser de suma importância, como no caso do concreto, se tratando de materiais de granulação mais fina, como no caso de um solo, essa reação do cimento com a superfície dos minerais se torna ainda mais evidente. O autor ainda define que a cimentação pode ser imaginada como a combinação das ligações mecânicas do cimento com as imperfeições da superfície das partículas dos minerais somadas às ligações químicas que se desenvolvem entre o cimento e a superfície dos minerais.

Como a composição mineralógica do cimento Portland tradicional é feita de quase 45% de Silicato Tricálcico (C_3S) e 27% de Silicato Dicálcico (C_2S), ao serem hidratados na presença do solo formam Silicatos de Cálcio Hidratados e Cal Hidratada, conforme definido por Ingles e Metcalf (1972) e explicitado por Moh (1965, apud Nuñez, 1991) segundo o esquema de reações abaixo:

1) Reações primárias:



2) Reações secundárias:



Onde o Silicato de Cálcio Hidratado (CSH) e o Aluminato de Cálcio Hidratado (CAH) conferem resistência ao solo. Esta resistência do solo-cimento continua a aumentar durante os anos, embora alguns dados oriundos de estudos realizados em argamassas demonstram que após 24 meses a hidratação tenha terminado quase por completo, como apontado por Handy (1958).

Consoli et al. (2003), ao estudarem o comportamento de fundações superficiais apoiadas em uma camada de 30 cm de espessura de areia tratada com 7% de cimento Portland, observaram uma melhora significativa dos parâmetros de tal areia, principalmente se tratando da coesão e do módulo de elasticidade.

A resistência conferida ao solo pela adição de cimento pode ser observada na Figura 3.3 abaixo, retirada de um estudo de Foppa (2005), onde o gráfico em questão demonstra a variação da resistência à compressão simples em relação a diferentes pesos específicos e teores de cimento.

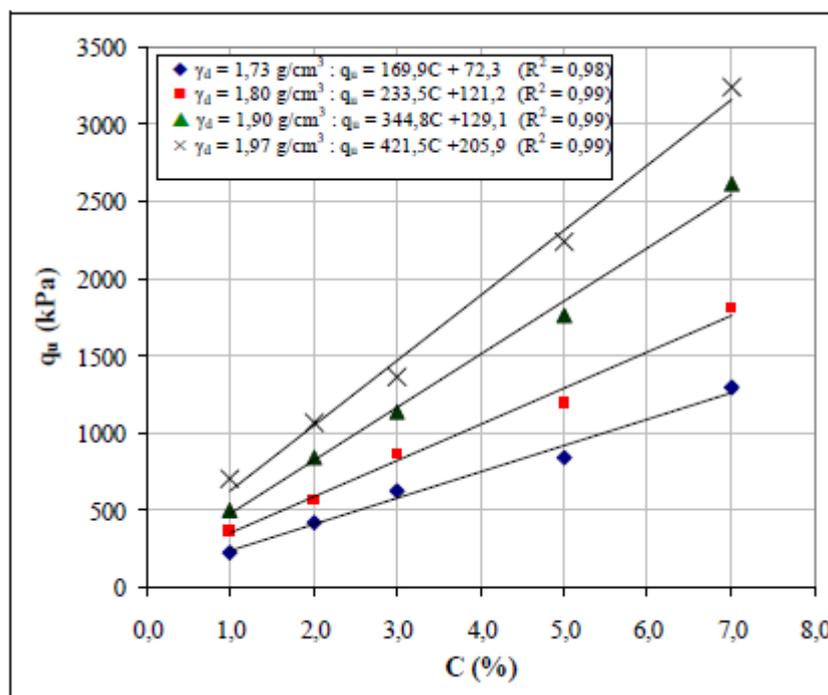


Figura 3.3 – Efeito do teor de cimento na resistência à compressão simples (q_u) (Foppa, 2005)

3.4.1.2.1 DOSAGEM DE CIMENTO

A NBR 12253/92 – Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – fixa-se a resistência à compressão simples mínima admissível em 2,1 Mpa aos 7 dias. O processo de dosagem para a determinação do teor de cimento, de acordo com esta norma, segue as seguintes etapas:

- Teores de cimento em massa (5, 6, 7, 9 e 10%) são sugeridos para o ensaio de compactação do solo-cimento de acordo com a classificação do solo em questão (A1-a, A1-b, A2, A3 e A4);
- Executar o ensaio de compactação conforme a NBR 12023/92 utilizando o teor de cimento sugerido conforme o item anterior e obter os valores de umidade ótima e da massa específica aparentemente seca máxima;
- Para cada teor de cimento selecionado, moldar e curar no mínimo três corpos de prova cilíndricos nas condições estipuladas pela NBR 12024/92;

- d) Submissão dos corpos de prova ao ensaio de compressão simples conforme as condições da NBR 12025/90;
- e) Determinação da resistência média à compressão simples, calculando-se a média aritmética das resistências à compressão simples dos corpos de prova que cumprem as tolerâncias de moldagem estabelecidas na NBR 12024/92, excluindo-se da composição da média valores individuais de resistência que se afastem em mais de 10% da média;
- f) Deve ser adotado como o teor de cimento o menor dos teores para o qual a resistência média à compressão simples for igual ou superior a 2,1 Mpa aos 7 dias de idade;
- g) O teor mínimo de cimento em massa recomendado pela NBR 12253/92 é de 5%, ou, de 3,5% em massa, desde que seja satisfeita a resistência mínima, que a mistura seja processada em usina e que o solo matéria-prima seja do tipo A1-a, A1-b ou A2-4.

Ingles e Metcalf (1972) sugerem teores de cimento a serem adicionados para diferentes tipos de solos, como por ser observado na Tabela 3.1.

TIPO DE SOLO	PORCENTAGEM DE CIMENTO A ADICIONAR
Pedra finamente britada	0,5 a 2
Pedregulho areno-argiloso bem graduado	2 a 4
Areia bem graduada	2 a 4
Areia mal graduada	4 a 6
Argila-arenosa	4 a 6
Argila-siltosa	6 a 8
Argilas	8 a 15

Tabela 3.1–Porcentagens de cimento a adicionar (adaptado de Ingles e Metcalf, 1972)

3.4.1.2.2 DENSIDADE E COMPACTAÇÃO

O efeito da densidade e compactação em solos-cimento apresenta a mesma importância daquele em solos-cal, resultando no aumento da resistência e diminuição da permeabilidade com o aumento da densidade, como apontado por Ingles e Metcalf (1972).

Felt (1955 apud Foppa, 2005) observou que o aumento da densidade da mistura solo-cimento resultava em um aumento exponencial da resistência à compressão simples do material para o mesmo teor de umidade.

Por fim, ao manter-se o teor de cimento constante e aumentar a densidade relativa de 60 para 90%, Clough et al (1981 apud Foppa, 2005) verificaram um aumento na coesão e no ângulo de atrito interno do material.

3.5 EFEITO DA POROSIDADE

Espera-se uma relação inversa da porosidade do material com o ganho de resistência por ele apresentado, visto que uma menor porosidade implica em um maior número de contatos entre as partículas do material em questão, fato esse que aumenta a eficiência da cimentação. Somado a isso, uma maior mobilização do atrito e uma maior capacidade de distribuir as tensões no interior do material, aspectos oriundos de uma menor porosidade, também auxiliam na conferência de resistência ao material, como observado por Lopes Júnior (2007).

Vale ressaltar que o aumento da resistência observado com a redução da porosidade independe da quantidade de cal acrescentada, como destacado por Dalla Rosa (2009 apud Corte, 2013).

3.6 EFEITO DO TEMPO DE CURA

Para a influência do tempo de cura, um estudo de Ingles e Metcalf (1972) apresenta resultados de aumento de resistência à compressão simples para diferentes tipos de solo tratados com 5% de cal hidratada com o aumento do tempo. Verifica-se na Figura 3.4 que todos os solos em questão aumentam de resistência com o aumento do tempo de cura, sendo pedregulhos arenosos o tipo de solo a apresentar a maior taxa desse ganho de resistência.

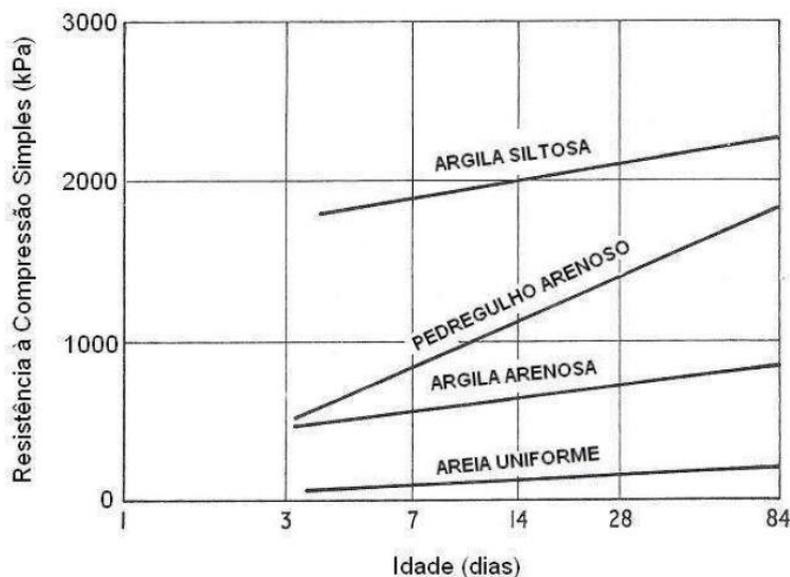


Figura 3.4 – Efeito do tempo de cura (adaptado de Ingles e Metcalf, 1972)

3.7 EFEITO DA RELAÇÃO VAZIO/CIMENTANTE

De acordo com Larnach (1960 apud Foppa, 2005), pelo fato de não ser possível a expulsão completa do ar do sistema solo-água-ar ou solo-cimento-água-ar pela compactação de um solo ou solo-cimento, não pode se correlacionar a resistência com a relação água/cimento, visto que esta somente se aplica a situações onde todos os vazios existentes no material estão preenchidos por água. O autor definiu a relação vazios/cimento através da seguinte expressão:

$$\text{Volume absoluto de vazios} / \text{Volume absoluto de cimento}$$

Ainda segundo o autor, o uso da relação pode ser suma importância para dosagem de misturas de solo-cimento.

Foppa (2005) analisou separadamente a relação do volume de vazios (V_v) e o inverso do volume de cimento ($1/V_{C_i}$) com a resistência à compressão simples, obtendo os gráficos abaixo nas figuras 3.5 e 3.6.

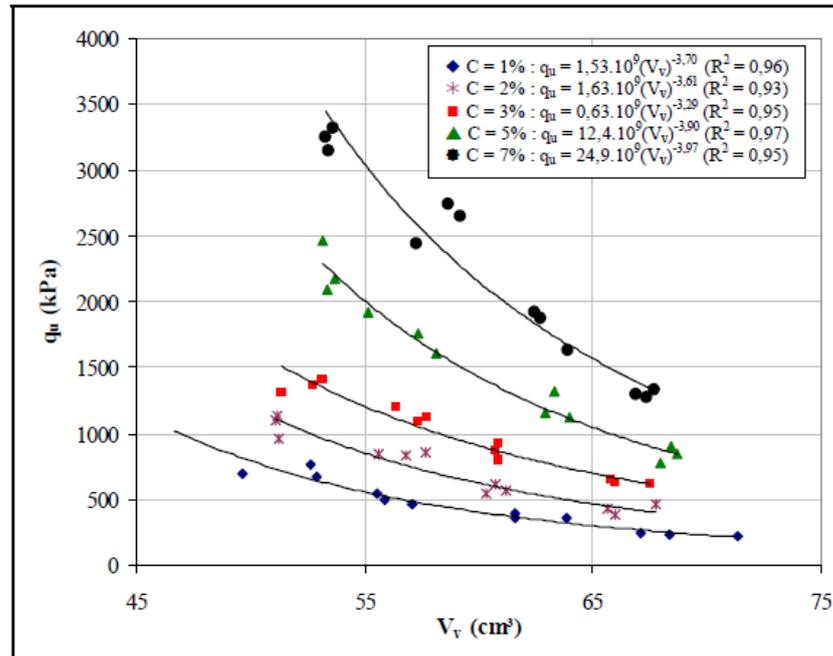


Figura 3.5 – Efeito do volume de vazios em relação à q_u (Foppa, 2005)

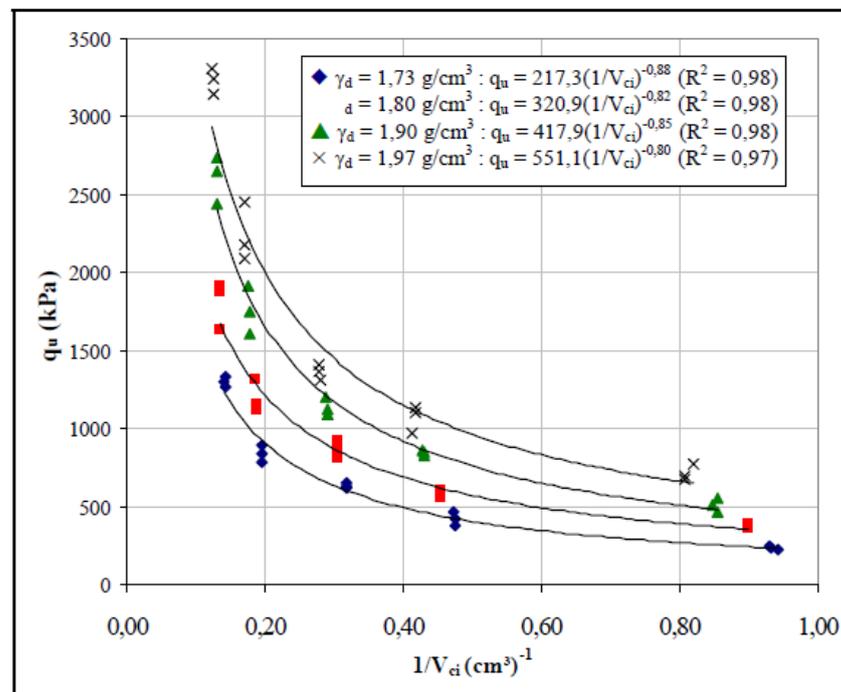


Figura 3.6 – Efeito do $1/V_{ci}$ em relação à q_u (Foppa, 2005)

Nota-se que a taxa de variação da resistência à compressão simples em relação a cada uma das grandezas é consideravelmente diferente, logo, para a compatibilização dessas taxas, o autor lança mão da aplicação de uma potência sobre uma delas, chegando, após inúmeras

tentativas, ao valor de 0,28 a ser aplicado sobre o parâmetro V_{Ci} . Na figura 3.7 abaixo, se vê que o resultado obtido foi um melhor ajuste para a relação vazios/cimento, de onde também se obtém um coeficiente de ajuste R^2 .

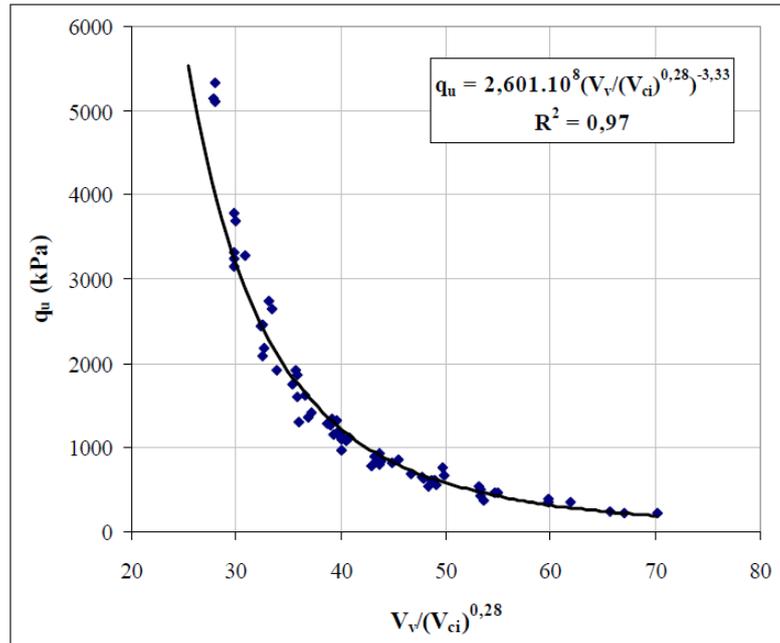
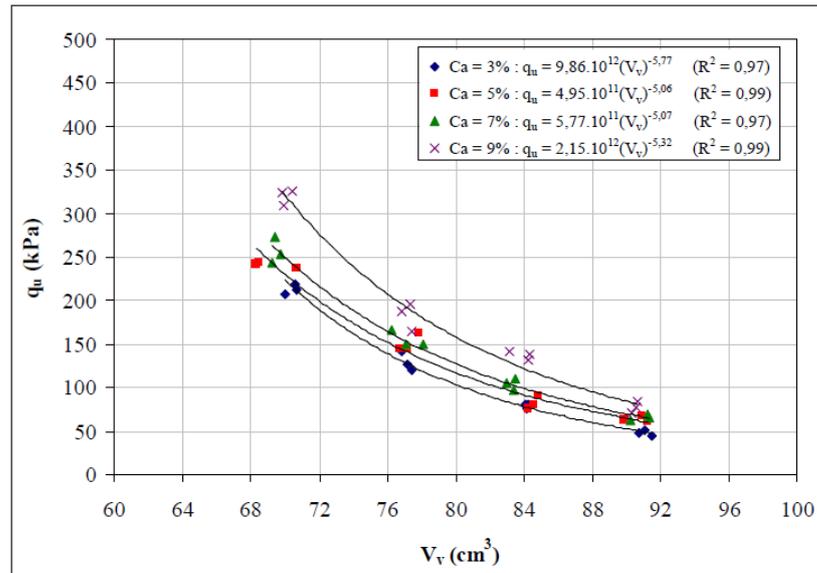
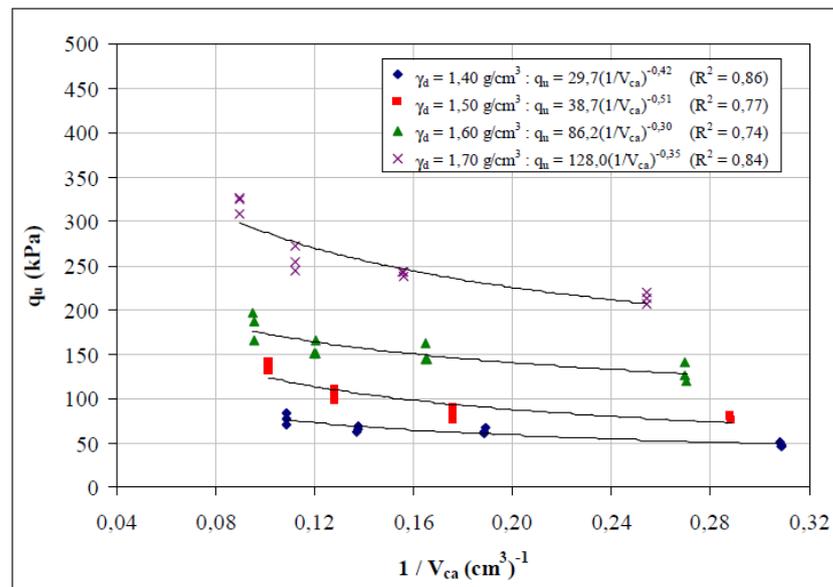


Figura 3.7 - $q_u \times V_v/(V_{ci})^{0,28}$ (Foppa, 2005)

Já se tratando de solo-cal, Dalla Rosa (2009) observou a mesma tendência de relações entre a resistência à compressão simples e o volume total de vazios e o volume total de cal que Foppa (2005) observara em seu estudo com solo-cimento. Tais relações são vistas nas figuras 3.8 e 3.9 abaixo.

Figura 3.8 - $q_u \times V_v$ (Dalla Rosa, 2009)Figura 3.9 - $q_u \times V_v/V_{ci}$ (Dalla Rosa, 2009)

Dalla Rosa (2009) partiu então para o mesmo procedimento de ajuste que Foppa (2005) fizera com o volume de cimento, porém obtendo como resultando um valor diferente daquele. Para o solo-cal, a autora após inúmeras tentativas chegou ao valor de 0,12 para se elevar o volume de cal, também obtendo um coeficiente de ajuste R^2 satisfatório, como pode ser visto na figura 3.10.

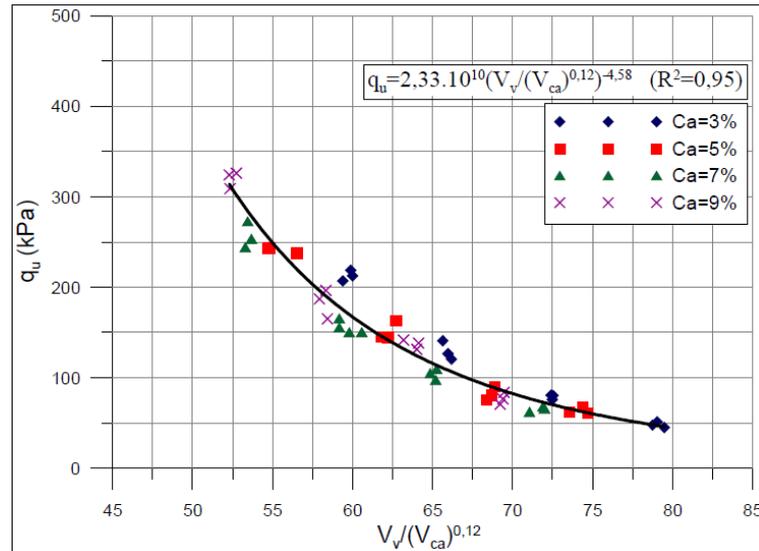


Figura 3.10 – $q_u \times V_v / (V_{ca})^{0.12}$ (Dalla Rosa, 2009)

Por fim, ambos os autores expressam o fator vazios/cimentante de outra maneira, utilizando a porosidade (η), expressa em porcentagem, ao invés do volume de vazios, e, o teor volumétrico do cimentante em questão (C_{av} para a cal e C_{iv} para o cimento), também expresso em porcentagem, ao invés do volume do cimentante. As figuras 3.11 e 3.12 apresentam o novo ajuste utilizando as relações $[\eta / (C_{iv})^{0.28}]$ e $[\eta / (C_{av})^{0.12}]$. Nota-se que não ocorre alteração na qualidade do ajuste, visto que as novas variáveis são proporcionais às anteriores.

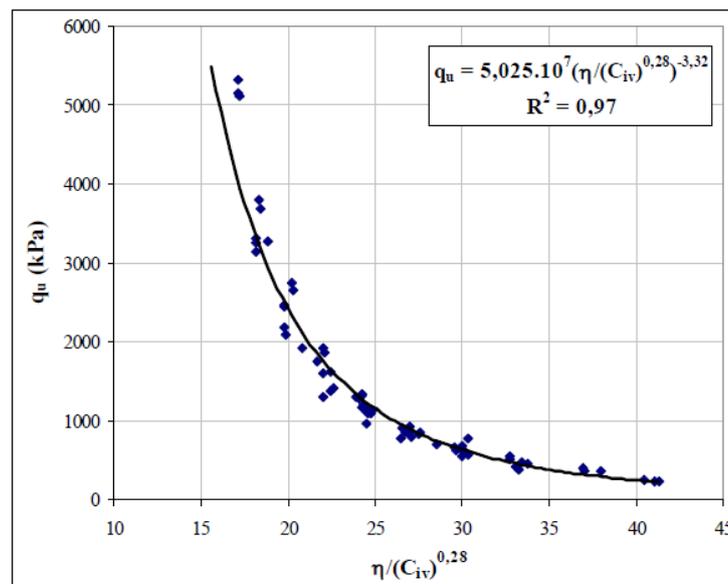


Figura 3.11 - $q_u \times \eta / (C_{iv})^{0.28}$ (Dalla Rosa, 2009)

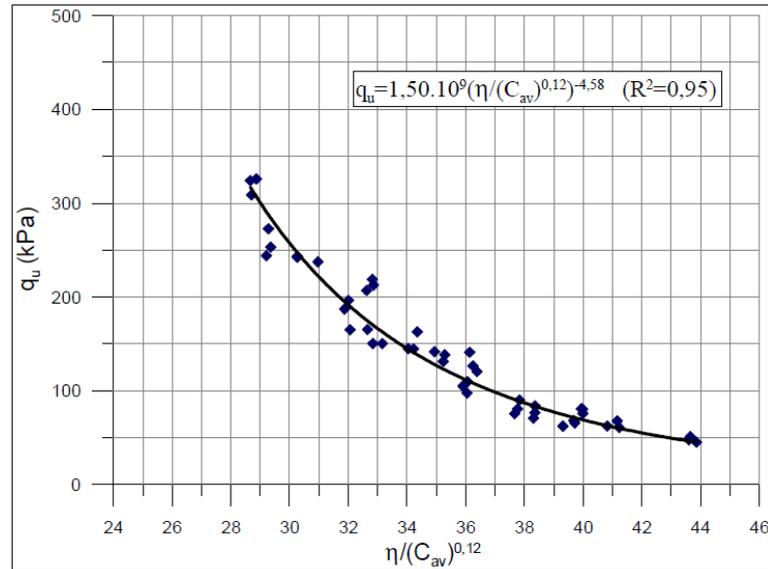


Figura 3.12 – $q_u \times \eta / (C_{av}^{0,12})$ (Dalla Rosa, 2009)

A mesma relação foi encontrada por Consoli et al. (2011), ao estudarem um solo estabilizado com cinza volante e cal.

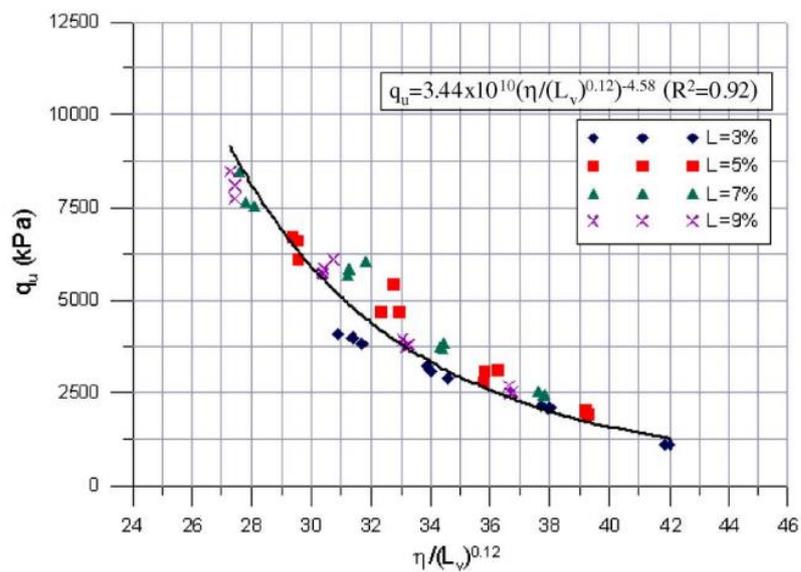


Figura 3.13 – $q_u \times \eta / (C_{av}^{0,12})$ (Consoli et al., 2011)

3.8 EFEITO DA TEMPERATURA DE CURA

O aumento da temperatura de cura leva à aceleração das reações pozolânicas, e, devido ao fato de serem reações endotérmicas, o desenvolvimento da resistência terá uma taxa maior

quanto maior for esta temperatura. Porém, um aspecto negativo desse aumento da temperatura é a diminuição da solubilidade do Ca(OH)_2 conforme o aumento da temperatura de cura, como apontado por Silvani (2013).

Dalla Rosa e Thomé (2002 apud Silvani, 2013), ao estudarem uma mistura de argila muito plástica com cal e resíduo da rolagem de pedras preciosas com temperaturas de cura fixadas em 5, 20, 30 e 40 °C, observaram o aumento da resistência à compressão simples para todas as misturas com o aumento da temperatura de cura, como observado na figura 3.13 abaixo.

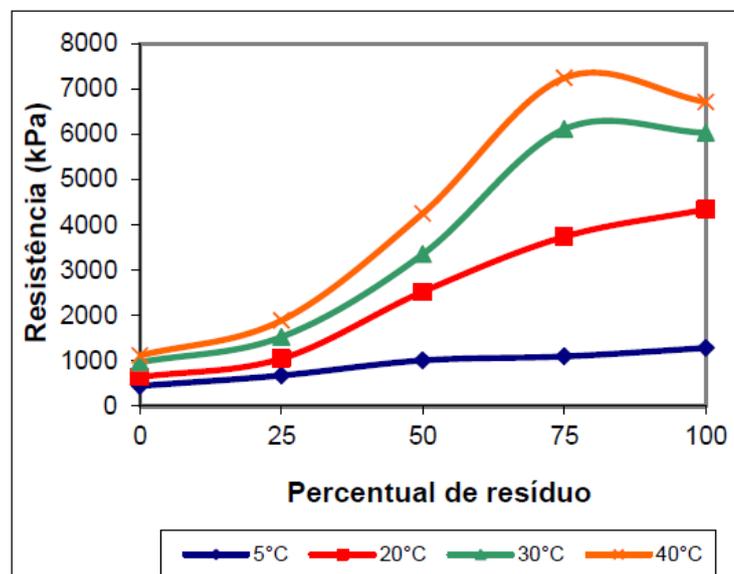


Figura 3.14 – Efeito da temperatura de cura na q_u (Dalla Rosa e Thomé, 2002 apud Silvani 2013)

Silvani (2013), ao estudar uma mistura de areia, cinza volante e cal, observou, assim como inúmeros estudos, a mesma tendência do aumento do ganho de resistência com o aumento da temperatura de cura. Abaixo, nas figuras 3.14 e 3.15, os resultados (já acrescidos da relação entre porosidade e teor volumétrico de cal e de métodos de ajuste) obtidos pela autora para os ensaios de resistência à compressão simples e à compressão diametral.

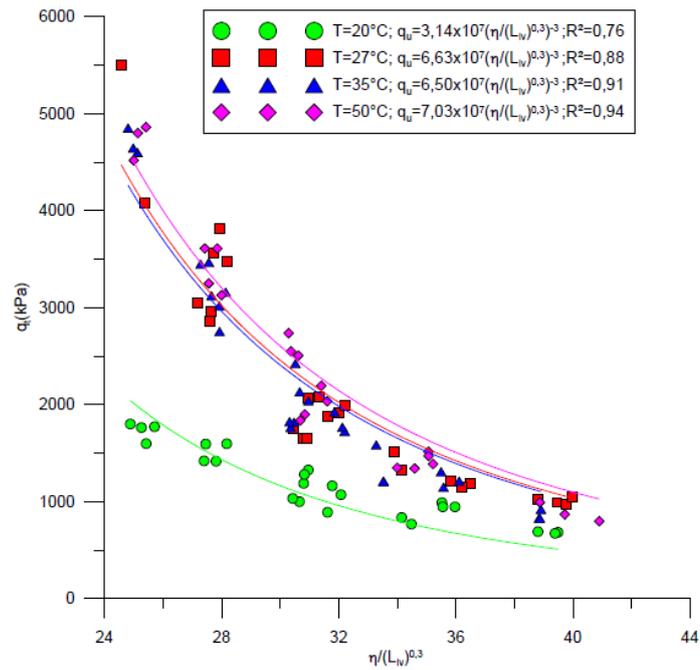


Figura 3.15 – Efeito temperatura cura na q_u (Silvani, 2013)

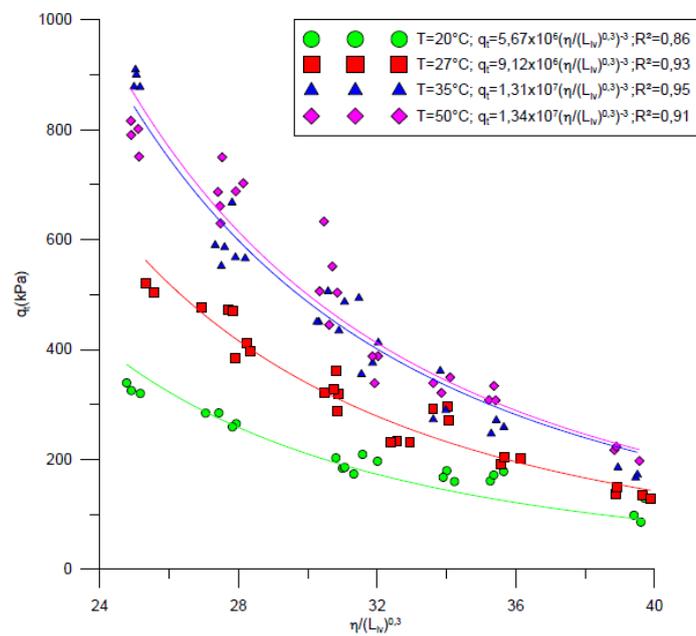


Figura 3.16 – Efeito temperatura de cura na compressão diametral (q_c) (Silvani, 2013)

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo apresenta-se o programa experimental desenvolvido para este trabalho, onde se descreve os materiais utilizados, dosagens, moldagem dos corpos de prova, cura e ensaios realizados.

O solo utilizado na pesquisa é uma areia fina de Osório/RS, e, o procedimento de sua estabilização obedece às seguintes etapas:

- a) substituição de 20% do solo por bentonita (visando a diminuição da condutividade hidráulica);
- b) substituição do material (solo + bentonita) por vidro moído (em teores de 10, 20 ou 30%);
- c) adição de agentes cimentantes em teores de 5, 8 ou 11% em relação à massa do novo material (solo + bentonita + vidro moído) seca.

Este programa prevê duas situações distintas no que diz respeito ao cimentante utilizado para a estabilização do solo, onde se adicionam, separadamente:

- a) vidro moído mais cal de carbureto;
- b) vidro moído mais cimento Portland CP V – ARI;

Vale ressaltar que, em ambas as situações, as adições (vidro moído + cimentante) são feitas ao solo já acrescido da bentonita.

No que diz respeito à moldagem dos corpos de prova se fixou os seguintes aspectos:

- a) massas específicas aparentes secas de 1,2, 1,3 e 1,4 g/cm³;

- b) teor de umidade de 25%;
- c) tempo de cura das amostras de:
 - 7 dias para as amostras contendo cimento como agente cimentante;
 - 14 dias para as amostras contendo cal de carbureto como agente cimentante;

4.2 PROGRAMA DE ENSAIOS

O programa experimental consistiu em ensaios de: compressão simples, compressão diametral e flexão, tendo sua abrangência definida de acordo com a Tabela 4.1 abaixo.

ENSAIO	MISTURA	
	SOLO, BENTONITA, VIDRO MOÍDO, CAL DE CARBURETO	SOLO, BENTONITA, VIDRO MOÍDO, CIMENTO
Compressão Simples	X	
Compressão Diametral	X	
Flexão	X	X

Tabela 4.1 – Programa de ensaios (Fonte: autor)

Os resultados dos ensaios de compressão simples e compressão diametral para as misturas contendo cimento como agente cimentante serão retirados do trabalho realizado por Ruver (2017).

4.3 DOSAGENS

4.3.1 TEORES DE VIDRO MOÍDO

Assim como Winter (2018), os teores de vidro moído utilizados nas misturas foram definidos através de estudos anteriores, tendo suas porcentagens fixadas em 10, 20 e 30% em relação (substituição) à massa seca do material (solo + bentonita).

4.3.2 TEORES DE CIMENTANTE

Os teores de cal e cimento de 5, 8 e 11% adicionados em relação à massa seca do material (solo + bentonita + vidro moído) também foram estabelecidos através de estudos preliminares.

4.3.3 DOSAGENS ESTABELECIDAS

Variando-se os teores de vidro moído e cimentante conforme explicitado acima, juntamente com a variação de peso específico da mistura como estabelecido anteriormente, obteve-se um total de 15 dosagens, apresentadas na Tabela 4.2 abaixo:

Vidro Moído (%)	Massa específica (g/cm ³)	Cimentante		
		5%	8%	11%
10	1,2		X	
	1,3		X	
	1,4	X	X	X
20	1,2		X	
	1,3		X	
	1,4	X	X	X
30	1,2		X	
	1,3		X	
	1,4	X	X	X

Tabela 4.2 – Dosagens estabelecidas para os corpos de prova (Fonte: autor)

Vale ressaltar que estas dosagens foram utilizadas tanto para as amostras contendo cal quanto para as amostras contendo cimento.

4.4 MATERIAIS UTILIZADOS

4.4.1 SOLO

Areia fina

O solo utilizado neste trabalho é uma areia de origem eólica, da cidade de Osório, localizada no litoral norte do Rio Grande do Sul, tendo sido obtida através de aquisição comercial. O

solo em questão é caracterizado como uma areia fina, apresentando granulometria uniforme e grãos arredondados.

Após a aquisição, realizou-se a secagem do material em uma estufa composta por lâmpadas fluorescentes, durante 72 horas, seguida de seu armazenamento em bombonas em um ambiente seco, sendo retirado somente no momento de mistura com os outros materiais para a execução dos corpos de prova. Nessa pesquisa, utilizou-se em torno de 39 kg deste material.

A análise granulométrica foi obtida de um estudo de Cruz (2008), o autor realizou-a por peneiramento, respeitando as recomendações da NBR 7181/84. Abaixo a curva granulométrica do material.

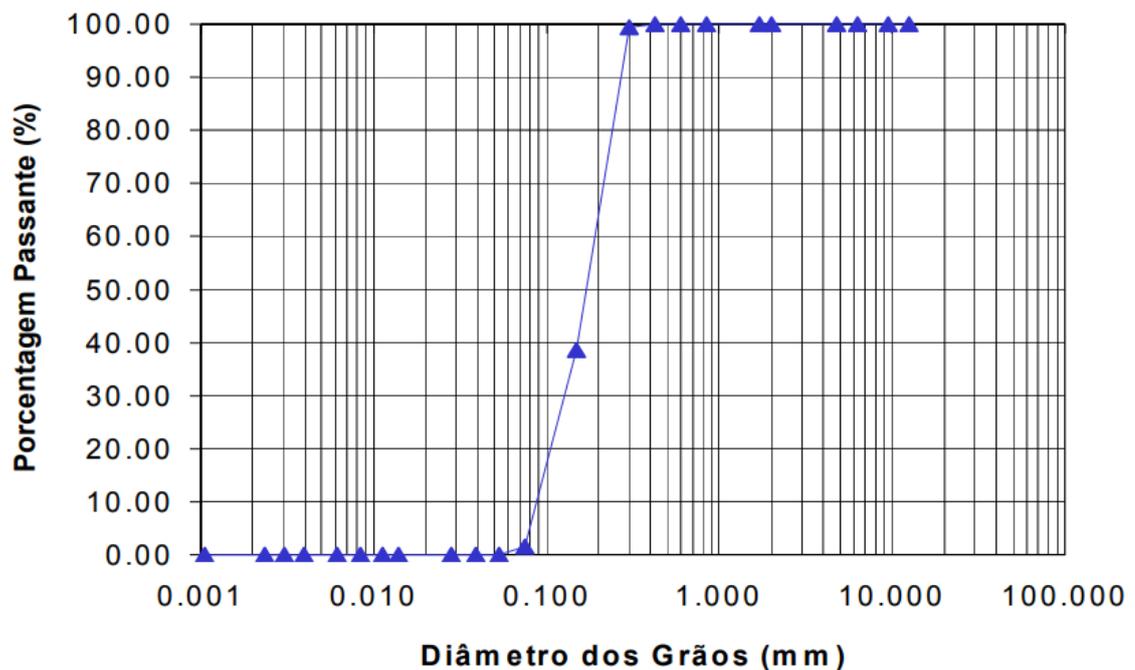


Figura 4.1 – Curva granulométrica areia fina (Cruz, 2008)

Abertura da peneira (m m)	% passante
0,6	100
0,425	99,97
0,2	99,47
0,15	38,5
0,075	1,55
0,0534	0,00

Tabela 4.3 – Distribuição granulométrica areia fina (Cruz, 2008)

A massa específica real dos grãos do material obtida em laboratório foi de 2,657 g/cm³.

4.4.2 BENTONITA

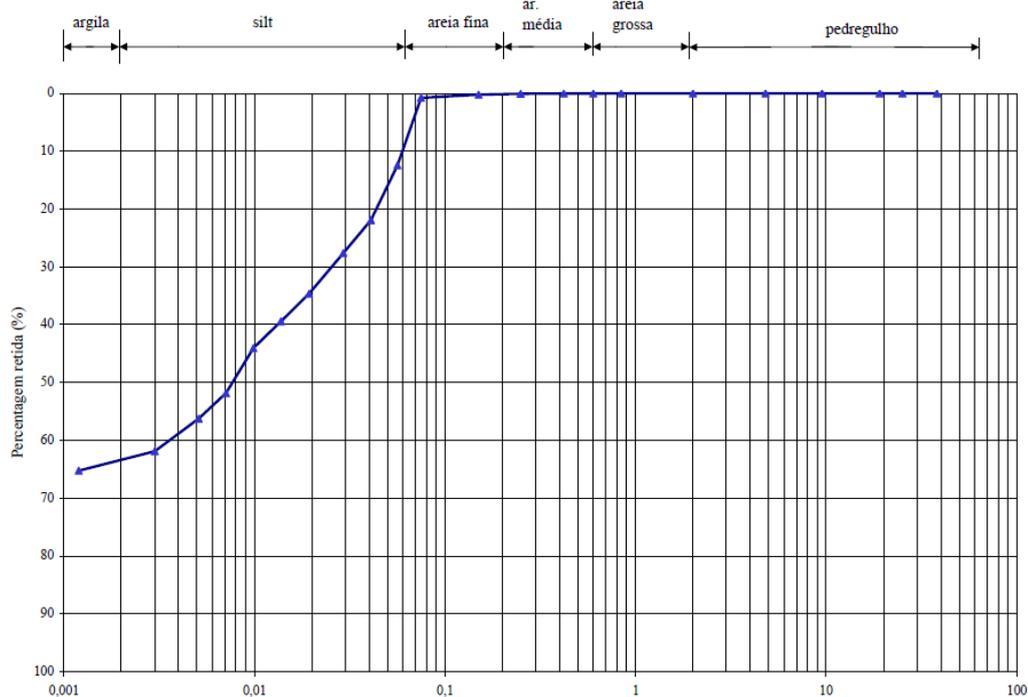
Este trabalho utilizou uma bentonita sódica, adquirida através de aquisição comercial de uma empresa localizada em Boa Vista, no estado da Paraíba.

De acordo com as normas NBR 6508/84, NBR 6459/84, NBR 7180/84 e NBR 7181/84 determinaram-se os índices físicos e a distribuição granulométrica da bentonita. Os resultados são apresentados na Tabela abaixo.

Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
604,70%	139,10%	465,60%

Tabela 4.4 – Índices físicos da bentonita sódica (Lemos, 2006)

O alto limite de liquidez (LL) comprova a boa qualidade desta bentonita.



colocadas no moinho de bolas metálicas de quatro unidades por vez, em torno de 2 kg do material, visando uma moagem adequada das mesmas.

Posterior à moagem (processo que dura de 4 horas), realizou-se a retirada do material grosseiro (que viria a ser recolocado no moinho de bolas) e prosseguiu-se para o peneiramento do pó de vidro, utilizando-se a peneira #200. O material passante em tal peneira foi então armazenado em potes em um ambiente seco, sendo retirado somente no momento de mistura com os outros materiais para a execução dos corpos de prova. Nessa pesquisa, utilizou-se em torno de 13 kg deste material passante na peneira #200.

A análise granulométrica foi realizada no LEGG/UFRGS através de sedimentação, atendendo as recomendações da NBR 7181/2016, obtendo-se os resultados abaixo.

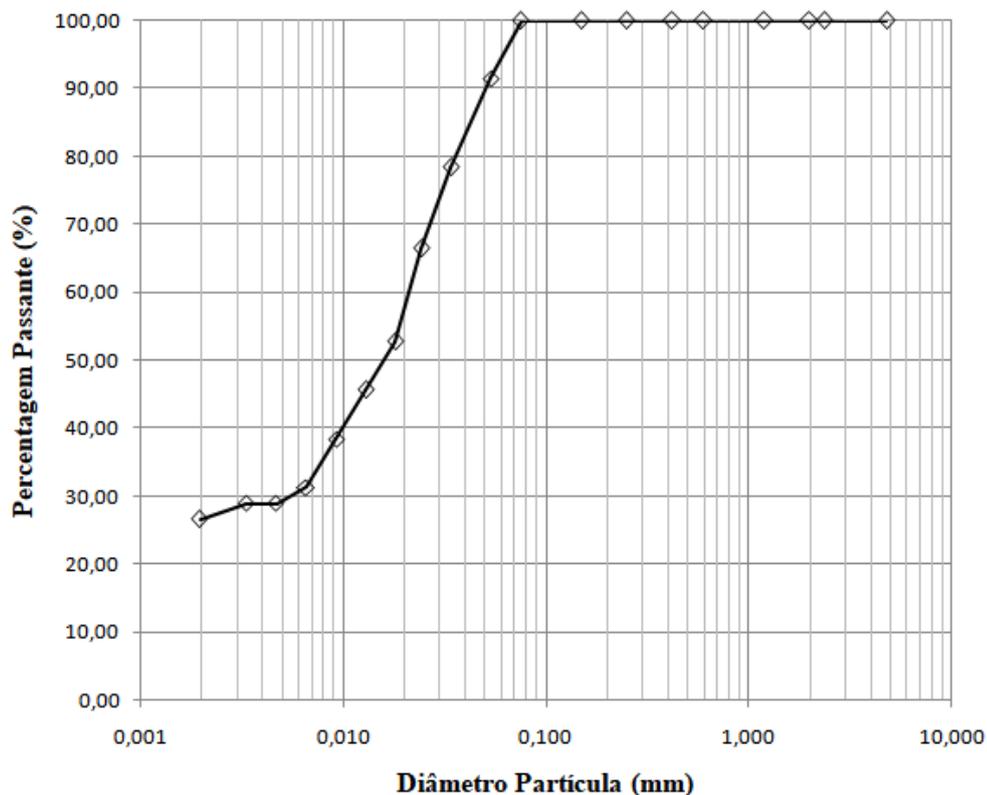


Figura 4.3 – Curva granulométrica vidro moído (Fonte: autor)

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (%)	
Argila	26,56
Silte	67,48
Areia Fina	5,96
Areia Média	0
Areia Grossa	0
Pedregulho	0

Tabela 4.5 – Análise granulométrica do vidro moído (Fonte: autor)

Para a análise química do vidro moído, utilizou-se a espectrometria de Fluorescência de raios X de dispersão por comprimento de onda (WDXRF), realizada no LACER/UFRGS. Abaixo, a composição química do material.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)						
CaO	SiO₂	Al₂O₃	SO₃	Fe₂O₃	SrO	Na₂O₃
24,58	66,78	1,76	0,28	2,46	0,08	2,08

Tabela 4.6 – Composição química vidro moído (Fonte: autor)

A massa específica real dos grãos do material passante na peneira #200 obtida em laboratório foi de 2,516 g/cm³.

4.4.4 CAL DE CARBURETO

A cal de carbureto utilizada na pesquisa - resíduo industrial oriundo do processo de produção de gás acetileno - foi obtida junto à White Martins, empresa responsável pela fabricação de gases. Após a reação que resulta na formação do gás acetileno, o resíduo (cal de carbureto) é encaminhado para tanques de decantação, de onde foi realizada a coleta deste material para posterior utilização neste trabalho.

Após a coleta, realizou-se a secagem deste material em uma estufa composta por lâmpadas fluorescentes, durante 72 horas, seguida de seu armazenamento em bombonas em um ambiente seco, sendo retirado somente no momento de mistura com os outros materiais para a execução dos corpos de prova.

Realizada a secagem, prosseguiu-se para os processos de destorroamento e peneiração do material. Para se destorroar a amostra utilizou-se almofariz e pilão de porcelana, e, após esse processo, peneirou-se o material na peneira #100.

Por fim, armazenou-se o material em potes em um ambiente seco, retirando-se a cal de carbureto peneirada somente no momento de mistura com os outros materiais para a execução dos corpos de prova. Nessa pesquisa, utilizou-se em torno de 3,5 kg deste material passante na peneira #100.

A análise granulométrica foi realizada no LEGG/UFRGS através de sedimentação, atendendo as recomendações da NBR 7181/2016, obtendo-se os resultados abaixo.

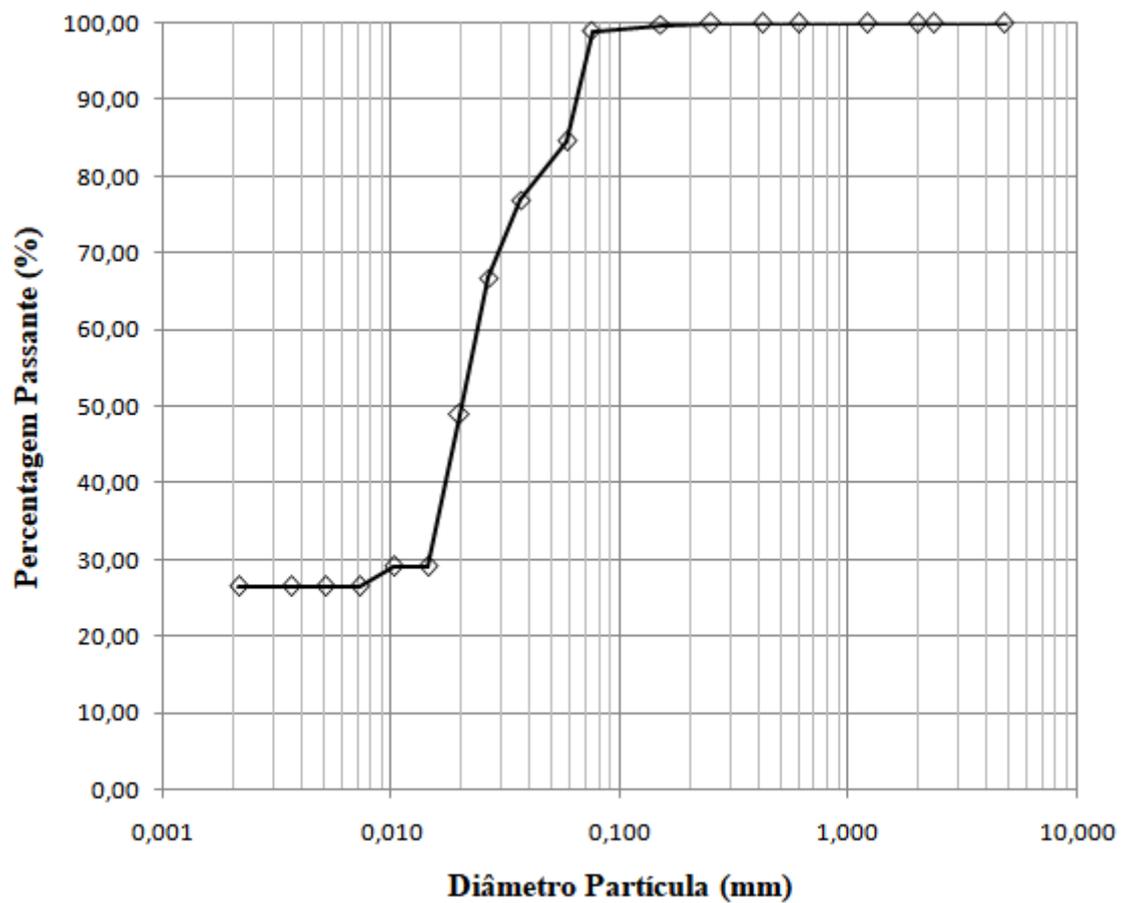


Figura 4.4 – Curva granulométrica cal de carbureto (Fonte: autor)

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (%)	
Argila	26,56
Silte	59,63
Areia Fina	13,72
Areia Média	0,09
Areia Grossa	0
Pedregulho	0

Tabela 4.7 – Análise granulométrica (Fonte: autor)

Para a análise química da cal, utilizou-se a espectrometria de Fluorescência de raios X de dispersão por comprimento de onda (WDXRF), realizada no LACER/UFRGS. Abaixo, a composição química do material.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)						
CaO	SiO₂	Al₂O₃	SO₃	Fe₂O₃	SrO	CO₂
80,74	1,36	0,46	0,45	0,27	0,14	16,57

Tabela 4.8 – Composição química vidro moído (Fonte: autor)

A massa específica real dos grãos do material obtida em laboratório foi de 2,281g/cm³.

4.4.5 CIMENTO

Quando da utilização de cimento como agente cimentante, optou-se pelo cimento Portland CP V-ARI (alta resistência inicial), visto que o material apresenta um rápido ganho de resistência, atingindo aos 7 dias de idade em torno de 80% de sua resistência apresentada aos 28 dias de idade.

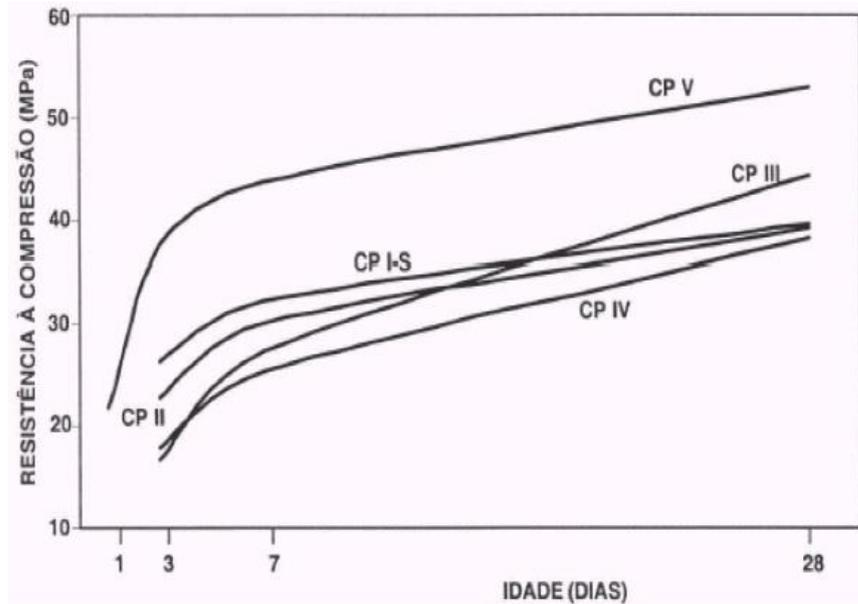


Figura 4.5 – Evolução média da resistência à compressão de diferentes tipos de (ABCP, 2002)

A massa específica real dos grãos do material obtida em laboratório foi de 3,229 g/cm³.

4.4.6 ÁGUA

Para a moldagem dos corpos de prova optou-se pela utilização de água destilada, sendo o processo de destilação da água executado no LEGG.

Já para a submersão dos corpos de prova em água no período de saturação se utilizou água potável proveniente da rede de abastecimento pública.

4.5 MÉTODOS UTILIZADOS

A seguir são apresentados os métodos utilizados para a preparação e moldagem dos corpos de prova bem como os ensaios previstos pelo programa experimental.

4.5.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a execução dos corpos de prova, utilizaram-se os materiais citados no item 4.4 de acordo com as dosagens propostas no item 4.3.3. Devido aos tipos de ensaios a serem realizados, moldaram-se corpos de prova em formatos cilíndricos e prismáticos.

A pesagem de todos os materiais foi realizada em uma balança com precisão de 0,01 g, após esse processo, deu-se início à execução dos corpos de prova.

4.5.1.1 MISTURA DOS MATERIAIS

A primeira etapa consistiu em misturar os materiais secos – areia fina, bentonita, vidro moído e cimento – respeitando as dosagens pré-estabelecidas, em um recipiente metálico com uma espátula também metálica até se obter a homogeneização desta mistura. Posteriormente, peneirou-se essa mistura seca utilizando-se a peneira #50, com o objetivo de evitar a presença de grumos de algum dos materiais no interior do corpo de prova. Em seguida, adicionou-se a quantidade de água destilada pré-estabelecida a fim de se manter os 25% de umidade da amostra e se misturou novamente o material até a obtenção da homogeneização.

4.5.1.2 CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

Este formato de corpo de prova foi utilizado nos ensaios de compressão simples e compressão diametral, apresentando as seguintes dimensões: 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Para a moldagem desses corpos de prova, utilizou-se um molde cilíndrico tripartido, de dimensões internas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, como pode ser observado nas Figuras 4.6 e 4.7 abaixo.



Figura 4.6 – Molde Cilíndrico (Fonte: autor)



Figura 4.7 – Molde cilíndrico (Fonte: autor)

Após a mistura, dividia-se o material em três partes de igual massa, visto que a moldagem dos corpos de prova cilíndricos se dá em três camadas de compactação, de maneira que esta se distribua homogeneamente.

Feita a colocação do material de cada uma das partes no interior do molde, compactava-se estaticamente o material com a utilização de uma prensa, acionada por um macaco hidráulico, e, antes da colocação da camada seguinte, escarificava-se a superfície da camada anterior, com o objetivo de aumentar as ligações entre as camadas.

Finalizada essa etapa, o corpo de prova era extraído do molde e acondicionado em sacos plásticos vedados, sendo posteriormente armazenados para a realização da cura.

4.5.1.3 CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

Este formato de corpo de prova foi utilizado no ensaio de flexão, apresentando as seguintes dimensões: 40 mm de altura, 40 mm de largura e 170 mm de comprimento.

Para a moldagem desses corpos de prova, utilizou-se um molde prismático de dimensões internas de 40 mm de altura, 40mm de largura e 170 mm de comprimento, como pode ser observado nas Figuras 4.8 e 4.9 abaixo.



Figura 4.8 – Molde prismático (Fonte: autor)

Após a mistura, colocava-se o material no interior do molde, e com a utilização de uma prensa, acionada pelo macaco hidráulico, compactava-se o material.

Finalizada essa etapa, o corpo de prova era extraído do molde e acondicionado em sacos plásticos vedados, sendo posteriormente armazenados para a realização da cura.



Figura 4.9 – Prensa acionada por macaco hidráulico (Fonte: autor)

4.5.2 CURA

4.5.2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Inicialmente, foi proposta uma cura de 7 dias em temperatura ambiente (6 dias à seco + 24 horas em submersão) para ambas as situações, tanto para o material estabilizado com cal quanto para o material estabilizado com cimento, porém os resultados iniciais dos ensaios com os corpos de prova adicionados de cal mostraram-se insatisfatórios. Logo, outras alternativas de cura foram sugeridas para esse caso, conforme será descrito a seguir.

Vale ressaltar que tal processo de cura em temperatura ambiente foi realizado em meados de Julho de 2018, onde a temperatura média em Porto Alegre estava em torno de 14 °C, dado obtido junto ao Instituto Nacional de Meteorologia/INMET.

As últimas 24 horas de cura em submersão visaram a saturação e a redução da sucção das amostras.

4.5.2.2 CAL DE CARBURETO

Devido a uma maior influência da temperatura de cura no material estabilizado com cal, a proposta inicial de cura referida no item anterior não se mostrou adequada, partindo-se então

para 7 dias de cura com temperatura controlada, fixada em 24 graus (repetindo-se o método de 6 dias à seco + 24 horas em submersão). Porém, tal alternativa também gerou resultados insatisfatórios, tendo que se adotar uma nova temperatura de cura.

Por fim, optou-se por um período de cura e temperatura maiores, fixando-se a cura em 14 dias, sendo 7 dias com temperatura controlada em 24 °C (6 dias à seco + 24 horas em submersão) e 7 dias em submersão com temperatura em 40 °C.

O fato de os 7 dias iniciais de cura serem em 24 °C se deve ao fato de que já havia um grande número de corpos de prova moldados, portanto, para não se descartar o material, preferiu-se optar pela cura referida acima.

4.5.2.3 CIMENTO

Para as amostras estabilizadas com cimento Portland CP-V ARI, realizou uma cura de 7 dias em temperatura ambiente (6 dias à seco + 24 horas em submersão).

Temperatura ambiente média no período de cura: 14 °C.

4.5.3 ENSAIOS

Após os processos de cura mencionados no item anterior, partiu-se para a execução dos ensaios visando a obtenção do ganho de resistência das misturas à compressão simples, à tração por compressão diametral e à tração por flexão.

Para todos os ensaios, utilizou-se uma prensa automática com capacidade máxima de carga de 100 kN com um anel dinamométrico com capacidade de carga de 10 kN, apresentando um resolução de 0,005 kN. Tal prensa apresenta uma velocidade de deformação de 1,14 mm por minuto.

Nos próximos itens será especificado cada tipo de ensaio realizado no trabalho.

4.5.3.1 COMPRESSÃO SIMPLES

A execução deste ensaio foi realizada seguindo a NBR 12025/2012, onde a resistência à compressão simples (q_u) é obtida através da divisão da carga máxima obtida no ensaio pela área da seção transversal dos corpos de prova.

Para esse ensaio foram utilizados corpos de provas cilíndricos de 50 mm e de 100 mm de altura.



Figura 4.10 – Ensaio de compressão simples (Fonte: autor)

4.5.3.2 COMPRESSÃO DIAMETRAL

Tal ensaio foi utilizado para se obter a resistência à tração (q_t) das amostras por compressão diametral, sendo sua execução realizada seguindo a NBR 7222/2010. A tensão de tração é obtida através da aplicação da seguinte equação:

$$q_t = (2 \times P) / (\pi \times D \times L);$$

Onde:

q_t = resistência à tração por compressão diametral [Mpa];

P = carga máxima obtida no ensaio [kN];

D = diâmetro do corpo de prova [mm];

L = altura do corpo de prova [mm].

Para esse ensaio foram utilizados corpos de provas cilíndricos de 50 mm e de 100 mm de altura.



Figura 4.11 – Ensaio de compressão diametral (Fonte: autor)



Figura 4.12 – Ensaio de compressão diametral (Fonte: autor)



Figura 4.13 – Ensaio de compressão diametral (Fonte: autor)

4.5.3.3 FLEXÃO

Para a obtenção da resistência de tração à flexão (q_f) das misturas seguiram-se os procedimentos indicados pela norma ASTM D1635/D1635M (2012), sendo a tensão de tração calculada pela expressão abaixo:

$$q_f = (P \times L) / (B \times H^2) ;$$

Onde:

q_f = resistência à tração à flexão [Mpa];

P = carga máxima obtida no ensaio [kN];

L = distância entre apoios (neste caso = 0,12 m) [m];

B = base do corpo de prova [m];

H = altura do corpo de prova [m];

Para esse ensaio foram utilizados corpos de provas prismáticos de 40 mm largura, 40 mm de altura e 170 mm de comprimento.



Figura 4.14 – Ensaio de flexão (Fonte: autor)



Figura 4.15 – Ensaio de flexão (Fonte: autor)

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios propostos pelo programa experimental, onde inicialmente são tratadas as misturas contendo cal de carbureto como agente cimentante, e, posteriormente, as misturas contendo cimento.

No Apêndice (Capítulo 8) encontram-se os resultados obtidos com os processos de cura insatisfatórios, que, para um melhor entendimento do trabalho, foram alocados na seção final.

5.1 MISTURAS DE AREIA FINA, BENTONITA, VIDRO MOÍDO E CAL DE CARBURETO

5.1.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCESSOS DE CURA INSATISFATÓRIOS

Ao analisar os resultados de resistência com o aumento do teor de cal obtidos com os processos de cura julgados insatisfatórios, definidos nos itens 4.5.2, verifica-se que há uma tendência da resistência não variar e inclusive diminuir, contradizendo tudo que a literatura cita a respeito. Sendo assim, as temperaturas de cura utilizadas (ambiente a 14 °C e cura controlada a 24° C) não foram suficientes para proporcionar as reações químicas pozolânicas necessárias para a conferência de uma maior resistência. Com a não ocorrência de tais reações, há a possibilidade de a resistência baixar com o aumento de cal devido ao efeito de finos, pois quanto maior a quantidade de finos, menor a quantidade de pontos de contato entre os grãos de areia, resultando numa redução da resistência.

5.1.2 MISTURAS CURADAS 7 DIAS À 24 °C + 7 DIAS À 40 °C

Visando a potencialização da resistência, optou-se por realizar a cura a uma temperatura de 40° C. Visto que um grande número de corpos de prova moldados já se encontrava em cura a 24° C, e, somado ao fato de que os resultados obtidos nos ensaios de resistência com essa mesma cura estavam insatisfatórios, optou-se, após 7 dias de cura, por colocar esses corpos de prova por mais 7 dias em uma cura úmida a 40° C. Por esta razão padronizou-se uma cura de 7 dias a 24° C (6 dias a seco e 1 dia submerso) e mais 7 dias a 40° C (submerso) para os demais ensaios contendo cal de carbureto como agente cimentante.

5.1.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Na Tabela 5.1.1 abaixo, o resumo da média dos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples para cada dosagem estabelecida.

Vidro Moído (%)	Massa específica (g/cm ³)	Resistência à Compressão Simples (kPa)		
		Cimentante		
		5%	8%	11%
10	1,2		528,90	
	1,3		806,2	
	1,4	1167,09	1318,85	1400,75
20	1,2		884,63	
	1,3		1300,94	
	1,4	1840,5	1790,92	1961,72
30	1,2		1119,05	
	1,3		1571,74	
	1,4	1714,99	2039,52	2472,23

Tabela 5.1.1 – Média dos resultados dos ensaios de compressão simples (Fonte: autor)

5.1.2.1.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA

Na Figura 5.1.2.1.1, tem-se a variação da resistência à compressão simples (q_u) com o aumento da massa específica (γ_d). Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para o mesmo teor de cal de 8%.

Observa-se que o aumento da massa específica de 1,2 para 1,4 g/cm³ exerce influência na resistência do material independentemente das outras variáveis, obtendo-se ganhos de resistência da magnitude de 100%.

Também é possível observar que a taxa de aumento de resistência devido ao aumento da massa específica foi semelhante para todos os teores de vidro moído, sendo os maiores valores de resistência para cada massa específica obtidos com o aumento do teor de vidro moído nas amostras.

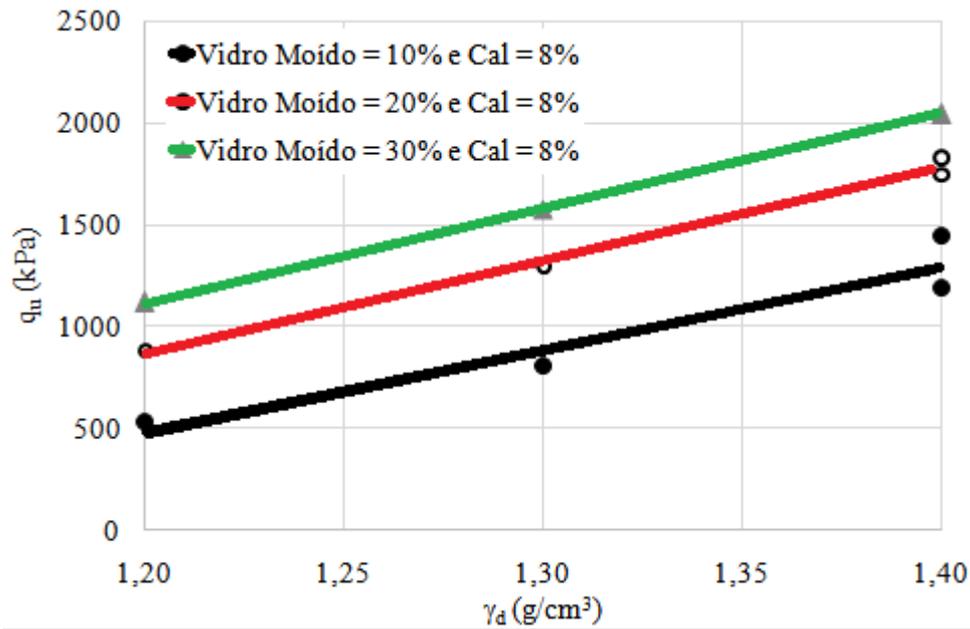


Figura 5.1.2.1.1 – Efeito da massa específica na q_u

5.1.2.1.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL

Na Figura 5.1.2.1.2, é apresentada a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação ao teor de cal apresentado pela mistura. Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para a mesma massa específica de 1,4 g/cm³.

Observa-se a tendência de ganho de resistência com o aumento do teor de cal. A amostra contendo 30% de teor de vidro moído apresentou uma taxa de aumento de resistência mais significativa do que as outras, obtendo em torno de 50% de aumento.

Já as misturas contendo 10 e 20% de teor de vidro moído não apresentaram um aumento significativo de resistência à compressão simples com o aumento do teor de cal.

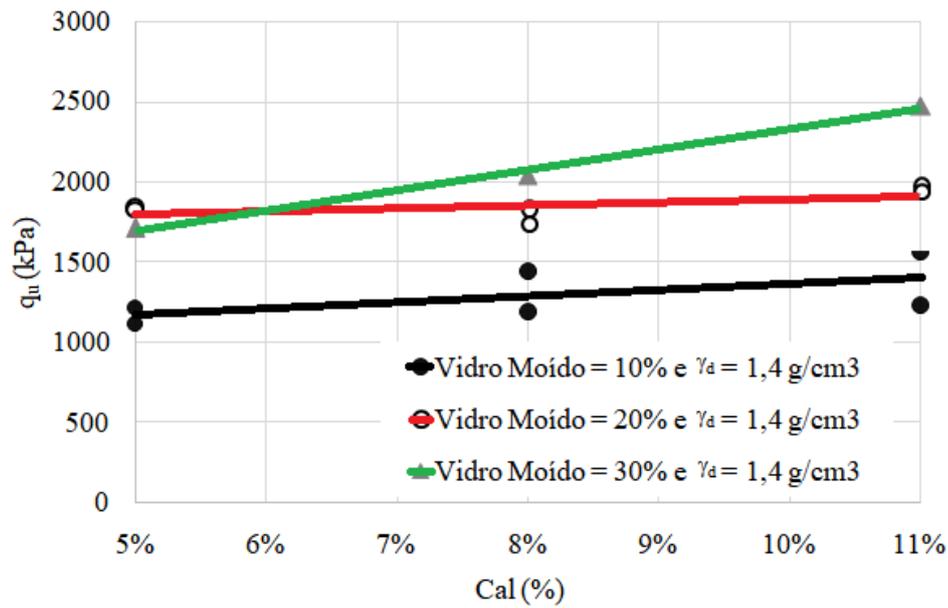


Figura 5.1.2.1.2 – Efeito do teor de cal na q_u

5.1.2.1.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO

Na Figura 5.1.2.1.3, é apresentada a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação ao teor de vidro moído para diferentes teores de cal e massa específica.

Nota-se que o aumento do teor de vidro moído apresentou influência para todos os teores de cal e massa específica, sendo este ganho mais acentuado na amostra de maior teor de cal juntamente com a maior massa específica.

Também é possível observar que, para essa situação, os maiores valores de resistência foram obtidos para as amostras que apresentavam a maior massa específica.

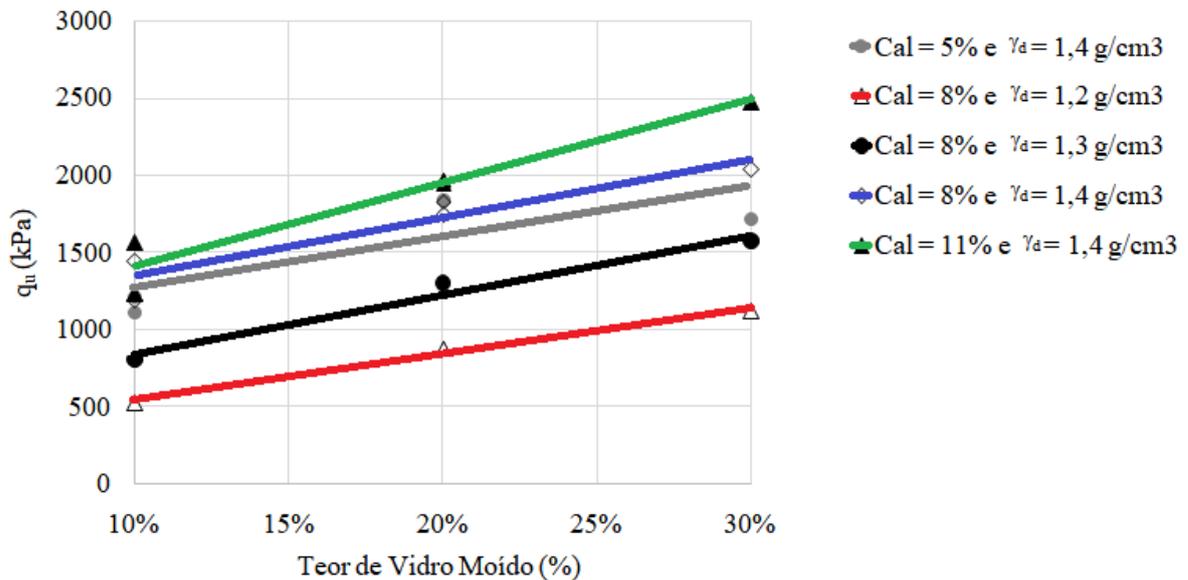


Figura 5.1.2.1.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_u

5.1.2.1.4 EFEITO DA POROSIDADE

Na Figura 5.1.2.1.4, tem-se a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação à porosidade (η) para diferentes teores de vidro moído. Cada curva difere apenas no teor de vidro moído, estando juntos na mesma curva todas as massas específicas e teores de cal diferentes para o mesmo teor de vidro moído.

É possível observar que a resistência aumenta com a redução da porosidade da mistura, independentemente do teor de vidro moído presente. Tal efeito pode ser atribuído ao fato de que uma menor porosidade resulta num maior número de contatos entre as partículas do material, aumentando a eficiência da cimentação e, também, à maior mobilização do atrito e maior capacidade de distribuição de tensões no interior da amostra.

Para a mesma porosidade, os maiores valores de resistência são observados nas amostras com 30% de teor de vidro moído.

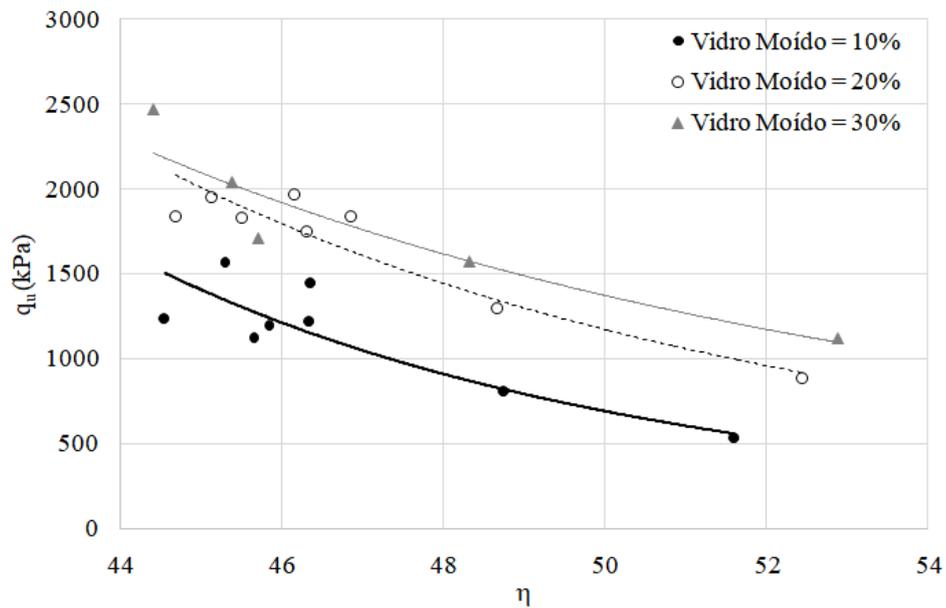


Figura 5.1.2.1.4 – Efeito da porosidade na q_u

5.1.2.1.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL

Visto que ocorre o aumento da resistência com o aumento do teor de cal, e, estando esse teor de cal diretamente ligado ao teor volumétrico de cal (L_v), pode-se afirmar que ocorre a diminuição da resistência com o aumento do inverso do teor volumétrico de cal ($1/L_v$).

Propõe-se, então, a análise da resistência em relação ao fator porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_v), como visto no item 3.7.

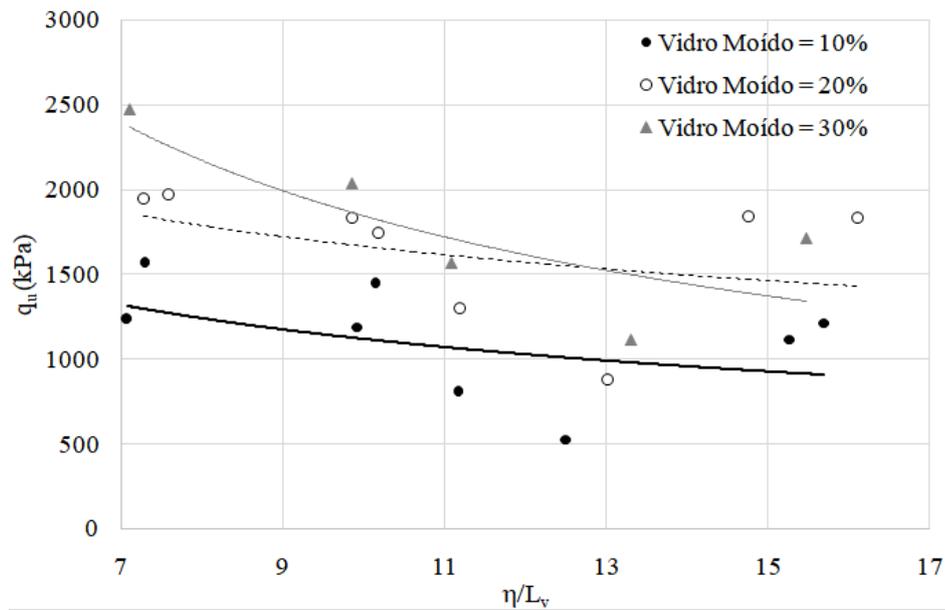


Figura 5.1.2.1.5 – $q_u \times \eta/L_v$

Observa-se na Figura 5.1.2.1.5 acima que com o aumento do fator η/L_v ocorre a diminuição da resistência à compressão simples.

Visto que a taxa de variação da resistência em função de cada uma das grandezas é substancialmente diferente, aplica-se uma potência de 0,12 sobre o teor volumétrico de cal (L_v) visando a compatibilização de tais taxas. Tal valor foi obtido após inúmeras tentativas.

Então, observa-se o aumento da resistência com a diminuição do fator $\eta/(L_v^{0,12})$, independentemente do teor de vidro moído presente.

Para o mesmo fator $\eta/(L_v^{0,12})$, os maiores valores de resistência são observados nas amostras com 30% de teor de vidro moído.

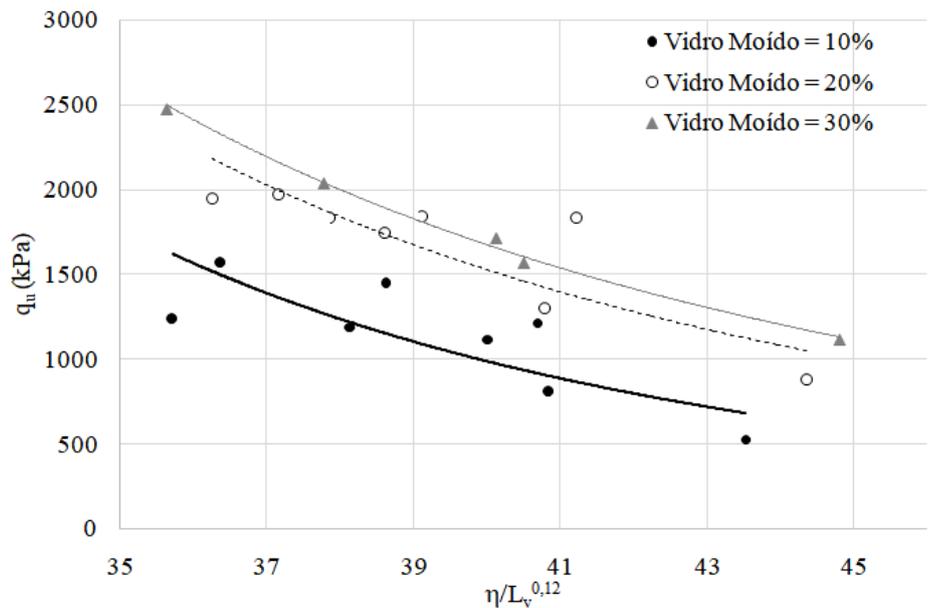


Figura 5.1.2.1.6 – $q_u \times \eta/(L_v^{0,12})$

5.1.2.1.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO)

Visto que a presença de vidro moído na mistura também influencia nas reações de cimentação, é conveniente se fazer uma análise da resistência em relação ao fator porosidade/teor volumétrico de cimentante similar àquela do item anterior, porém com a adição de vidro moído ao teor volumétrico do cimentante.

Na Figura 5.1.2.1.7, tem-se a relação da resistência à compressão simples com o fator porosidade/teor volumétrico de cimentante, onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_2 (teor volumétrico de cal + vidro moído).

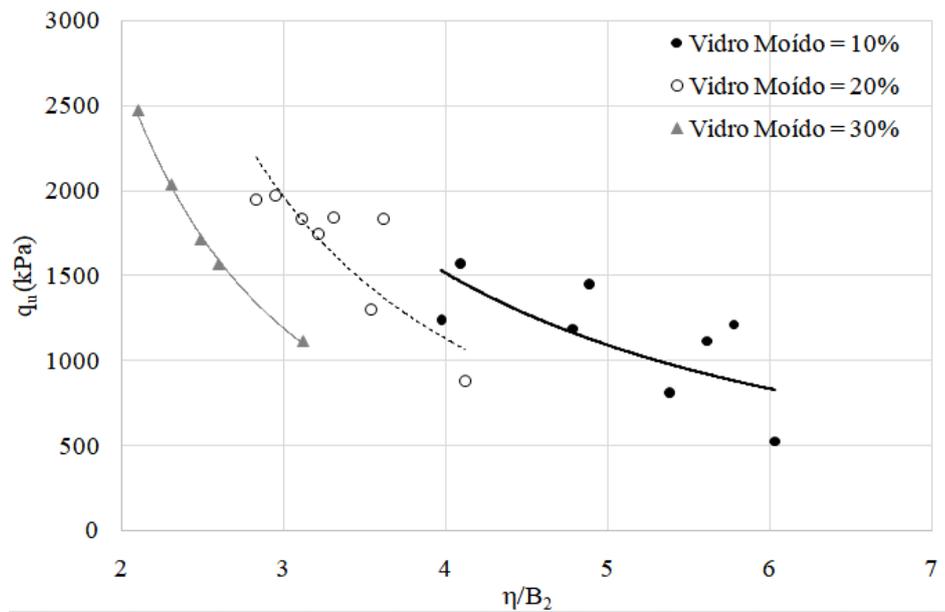


Figura 5.1.2.1.7 – $q_u \times \eta/B_2$

Com o objetivo de se obter apenas uma curva que correlacione a resistência ao fator em questão independentemente do peso específico, teor de cal ou teor de vidro moído fez-se o ajuste exponencial das curvas isoladas acima. Como resultado, tem-se a curva da Figura 5.1.2.1.8 abaixo, que apresenta um coeficiente de correlação $R^2 = 0,61$.

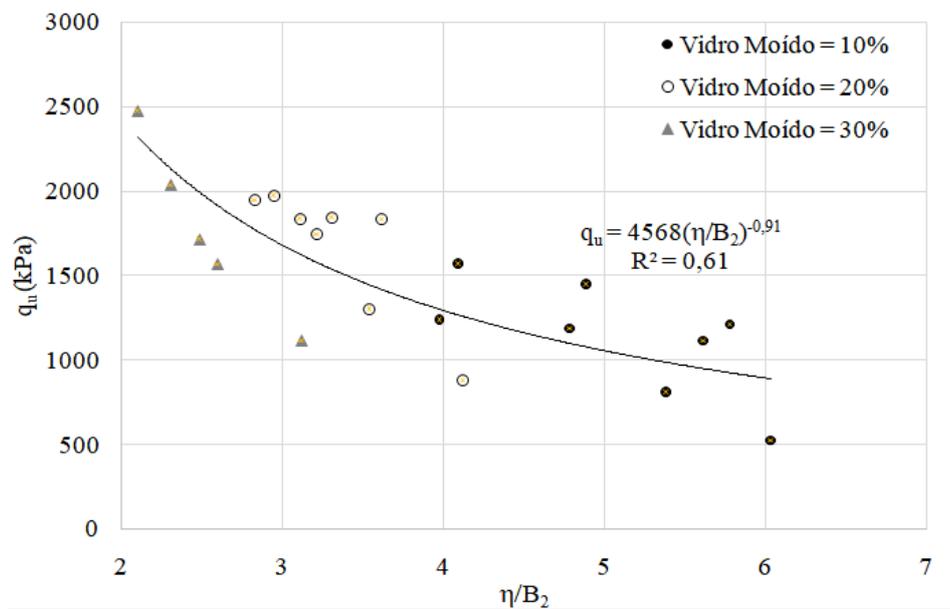


Figura 5.1.2.1.8 – $q_u \times \eta/B_2$

Pelo mesmo fato observado no item que tratava do teor volumétrico de cal, essa situação apresenta uma taxa de variação da resistência em função de cada uma das grandezas consideravelmente diferente, portanto, recorre-se a mesma aplicação de uma potência sobre o teor volumétrico de cimentante (B_2) visando a compatibilização de tais taxas. Nesse caso, o valor da potência é de 0,28, também obtida após inúmeras tentativas. Na Figura 5.1.2.1.9 abaixo, se encontra o resultado de tal compatibilização.

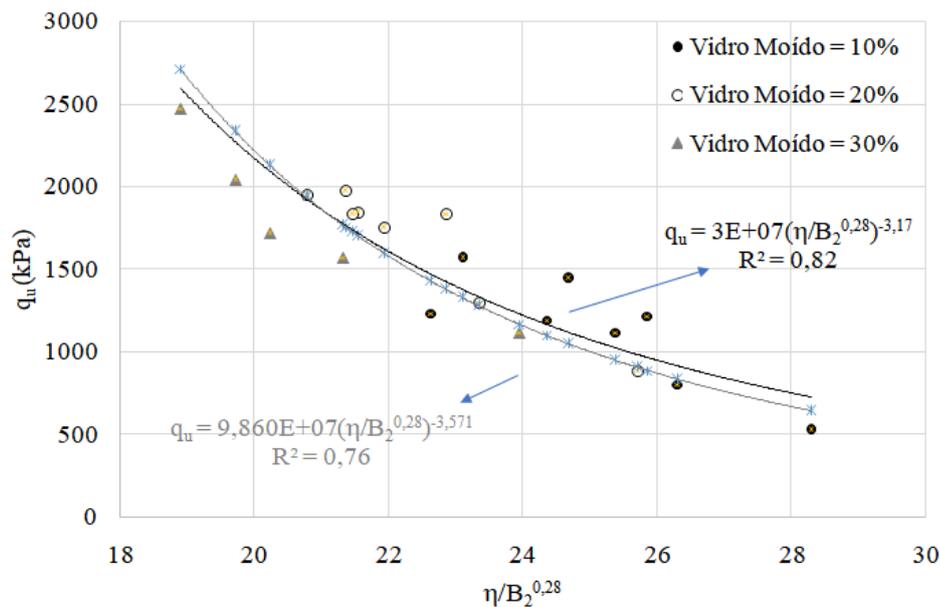


Figura 5.1.2.1.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$

A presença de duas curvas na Figura 5.1.2.1.9 acima se deve ao fato de que uma é resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos) e outra é o resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da compressão simples com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

5.1.2.1.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

A presença de bentonita nas amostras também influencia as reações que ocorrem na mistura, portanto, se faz necessária uma análise da resistência em relação ao fator porosidade/teor volumétrico de cimentante similar àquelas dos itens anteriores, porém com a adição de bentonita ao teor volumétrico de cimentante.

Na Figura 5.1.2.1.10, tem-se a relação da resistência à compressão simples com o fator porosidade/teor volumétrico de cimentante, onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_3 (teor volumétrico de cal + vidro moído + bentonita).

A curva em questão é representada com o devido ajuste exponencial (para a obtenção de apenas uma curva que correlacione a resistência ao fator em questão independentemente do peso específico, teor de cal ou teor de vidro moído) já realizado, apresentando um coeficiente de correlação $R^2 = 0,79$.

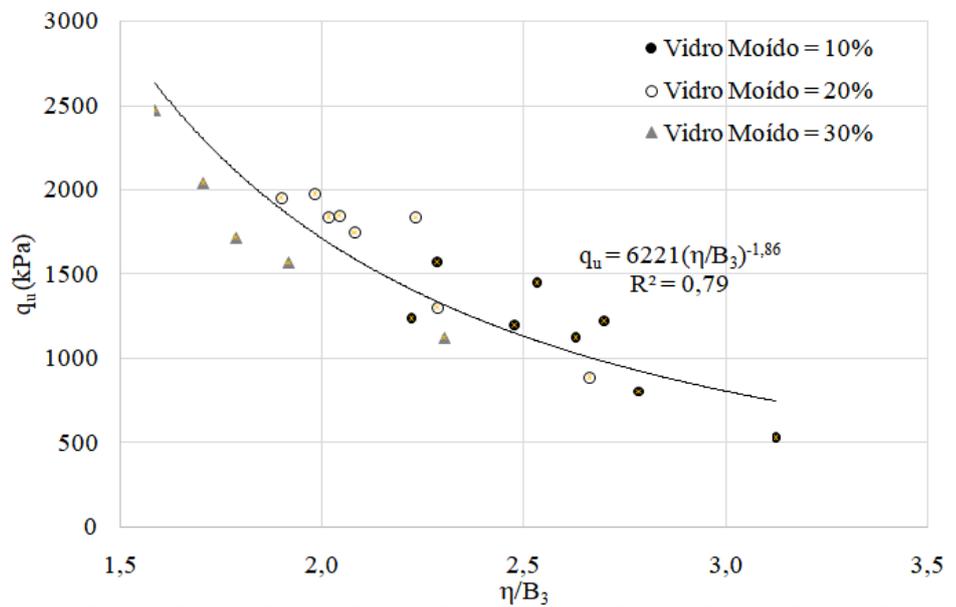


Figura 5.1.2.1.10 - η/B_3

Pelo mesmo fato observado no item anterior, essa situação apresenta uma taxa de variação da resistência em função de cada uma das grandezas substancialmente diferente, portanto, recorre-se a mesma aplicação de uma potência sobre o teor volumétrico de cimentante (B_3) visando a compatibilização de tais taxas. Nesse caso, o valor da potência é de 0,28, também obtida após inúmeras tentativas. Na Figura 5.1.2.1.11 abaixo, se encontra o resultado de tal compatibilização.

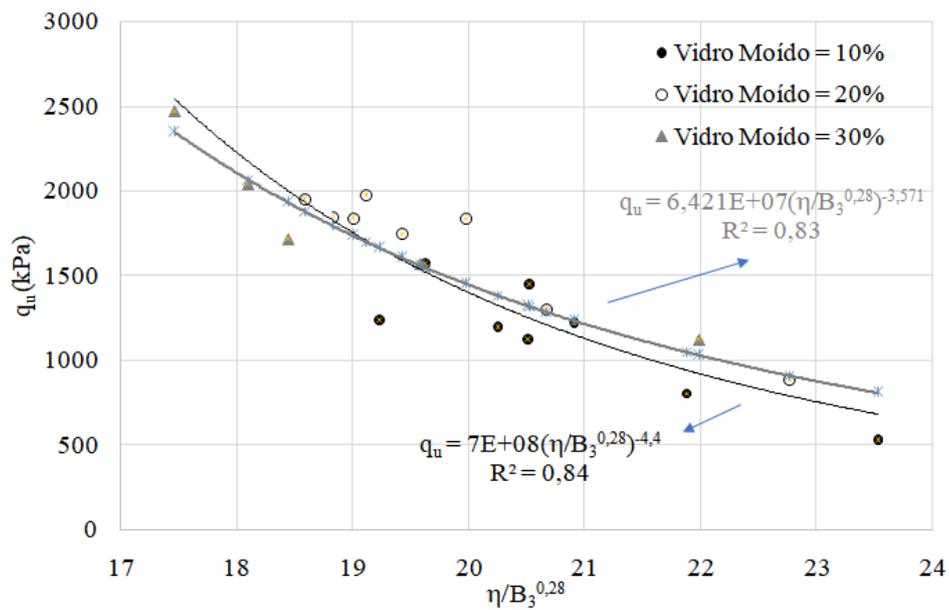


Figura 5.1.2.1.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$

A presença de duas curvas na Figura 5.1.2.1.11 acima se deve ao fato de que uma é resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos) e outra é o resultado da elevação do termo $\eta/(B_3^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_3)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da compressão simples com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

**5.1.2.1.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO) x
(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)**

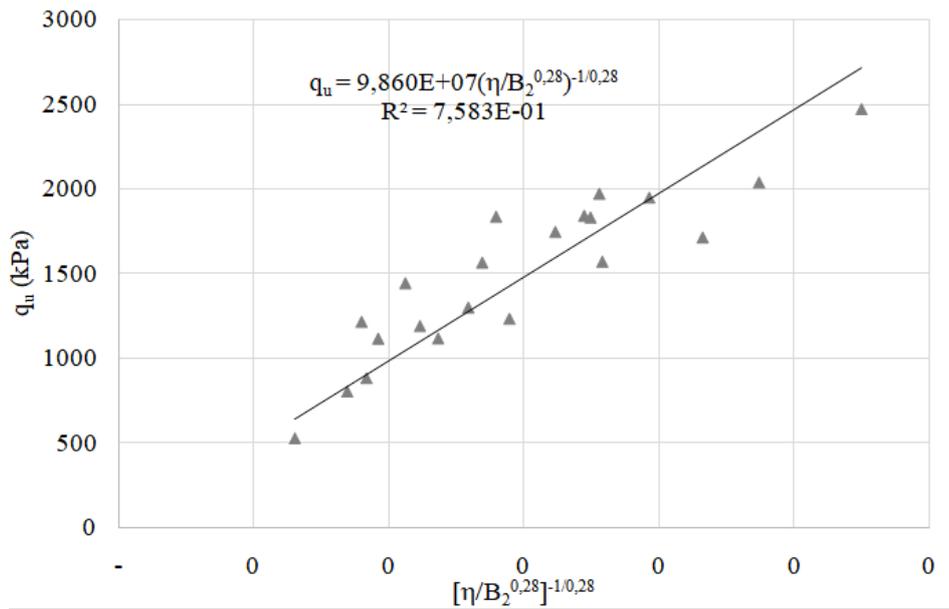


Figura 5.1.2.1.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,76$$

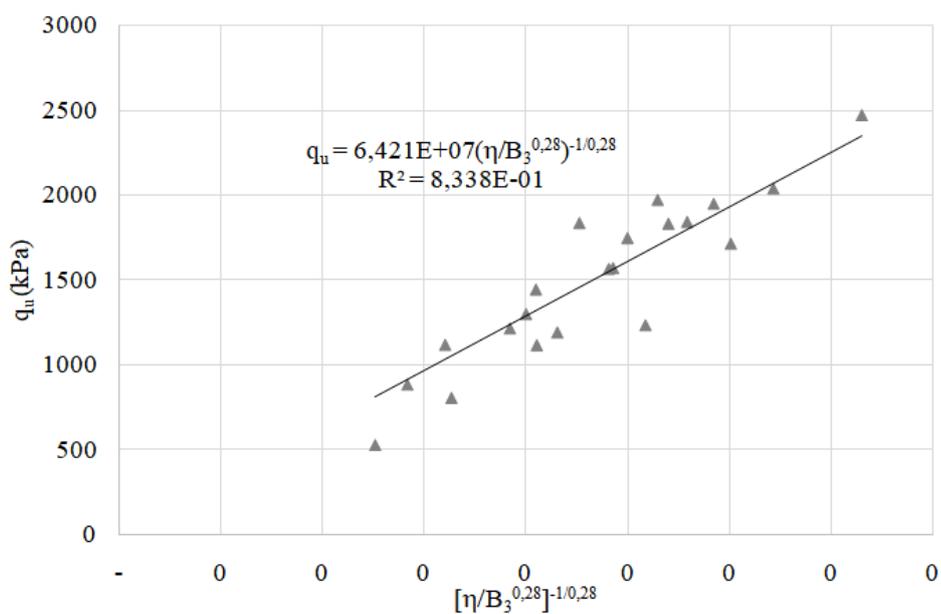


Figura 5.1.2.1.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,83$$

Observa-se que B_3 apresentou um maior valor de R^2 do que B_2 , mostrando uma maior correlação se for considerada a mistura do conjunto ‘cal + vidro moído + bentonita’ no tratamento estatístico do que apenas ‘cal + vidro moído’. Tal fato ocorre pois a cal reage em parte com o vidro moído e em parte com a bentonita, apresentando uma maior relevância de B_3 na interpretação dos resultados.

5.1.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (q_t)

Na Tabela 5.1.2 abaixo, o resumo da média dos resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral para cada dosagem estabelecida.

Vidro Moído (%)	Massa específica (g/cm ³)	Resistência à Compressão Diametral (kPa)		
		Cimentante		
		5%	8%	11%
10	1,2		36,57	
	1,3		60,75	
	1,4	106,15	104,15	156,09
20	1,2		51,23	
	1,3		88,39	
	1,4	157,53	164,85	210,46
30	1,2		86,53	
	1,3		117,58	
	1,4	178,69	182,98	318,85

Tabela 5.1.2 - Média dos resultados dos ensaios de compressão diametral (Fonte: autor)

Os itens de 5.1.2.2.4 ao 5.1.2.2.8 se resumirão aos resultados obtidos, visto que a explanação completa envolvendo os efeitos e relações obtidas nas amostras é a mesma que ocorre para os ensaios de compressão simples, realizada em tal seção.

5.1.2.2.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA

Na Figura 5.1.2.2.1, tem-se a variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com o aumento da massa específica (γ_d). Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para o mesmo teor de cal de 8%.

Observa-se que o aumento da massa específica de 1,2 para 1,4 g/cm³ exerce influência na resistência do material independentemente das outras variáveis, obtendo-se ganhos de resistência da magnitude de 150%.

Também é possível observar que a taxa de aumento de resistência devido ao aumento da massa específica foi semelhante para todos os teores de vidro moído, sendo os maiores valores de resistência para cada massa específica obtidos com o aumento do teor de vidro moído nas amostras.

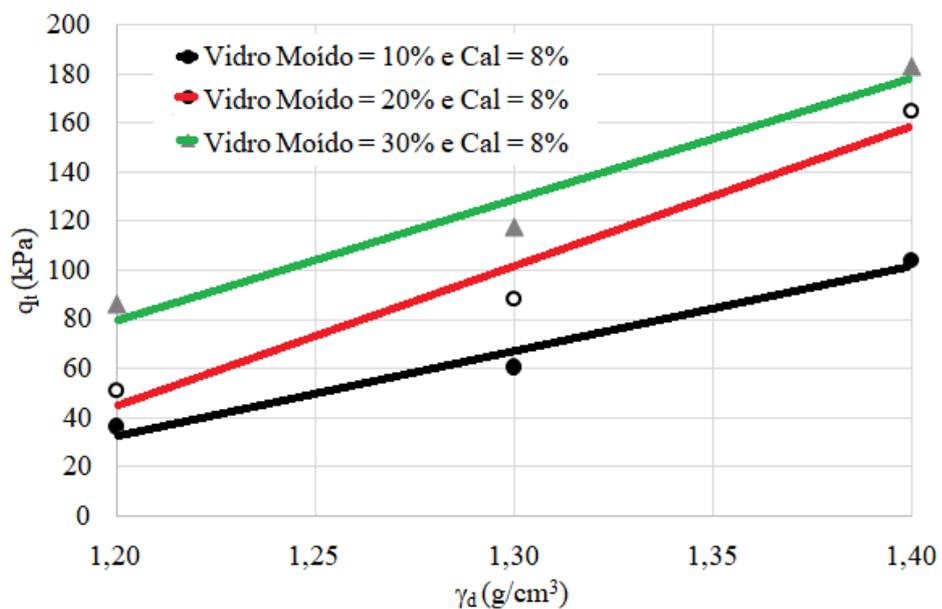


Figura 5.1.2.2.1 – Efeito da massa específica na q_t

5.1.2.2.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL

Na Figura 5.1.2.2.2, é apresentada a variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) em relação ao teor de cal apresentado pela mistura. Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para a mesma massa específica de 1,4 g/cm³.

Observa-se a tendência de ganho de resistência com o aumento do teor de cal. A amostra contendo 30% de teor de vidro moído apresentou uma taxa de aumento de resistência mais significativa do que as outras, obtendo em torno de 100% de aumento.

Já as misturas contendo 10 e 20% de teor de vidro moído apresentaram aumentos de resistência à tração por compressão diametral com o aumento do teor de cal da ordem de 50%.

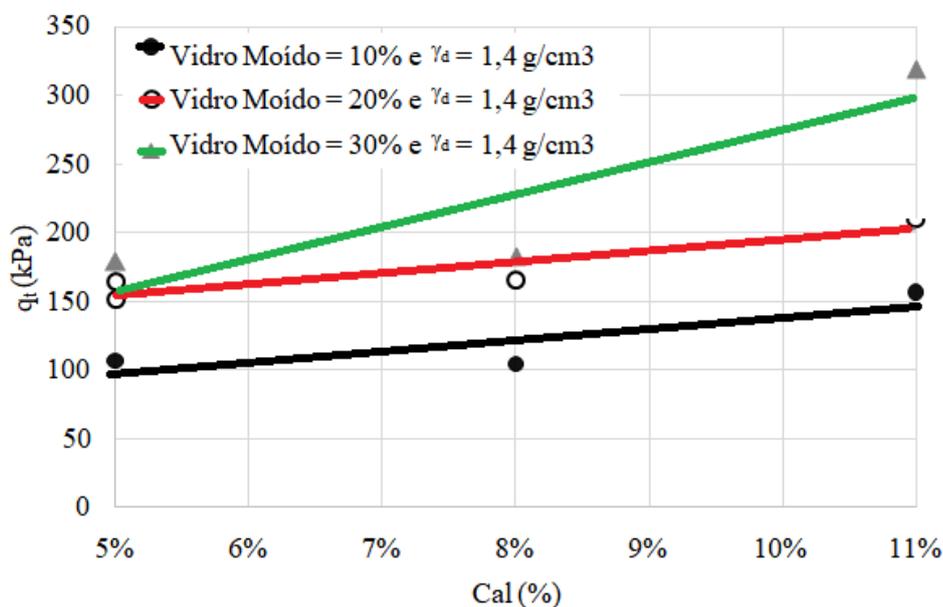


Figura 5.1.2.2.2 – Efeito do teor de cal na q_t

5.1.2.2.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO

Na Figura 5.1.4.2.3, é apresentada a variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) em relação ao teor de vidro moído para diferentes teores de cal e massas específicas.

Nota-se que o aumento do teor de vidro moído apresentou influência para todos os teores de cal e massas específicas, sendo este ganho mais acentuado na amostra de maior teor de cal juntamente com a maior massa específica.

Também é possível observar que, para essa situação, os maiores valores de resistência foram obtidos para as amostras que apresentavam a maior massa específica, sendo que as misturas contendo 5 e 8% de teor de cal apresentaram valores bem similares.

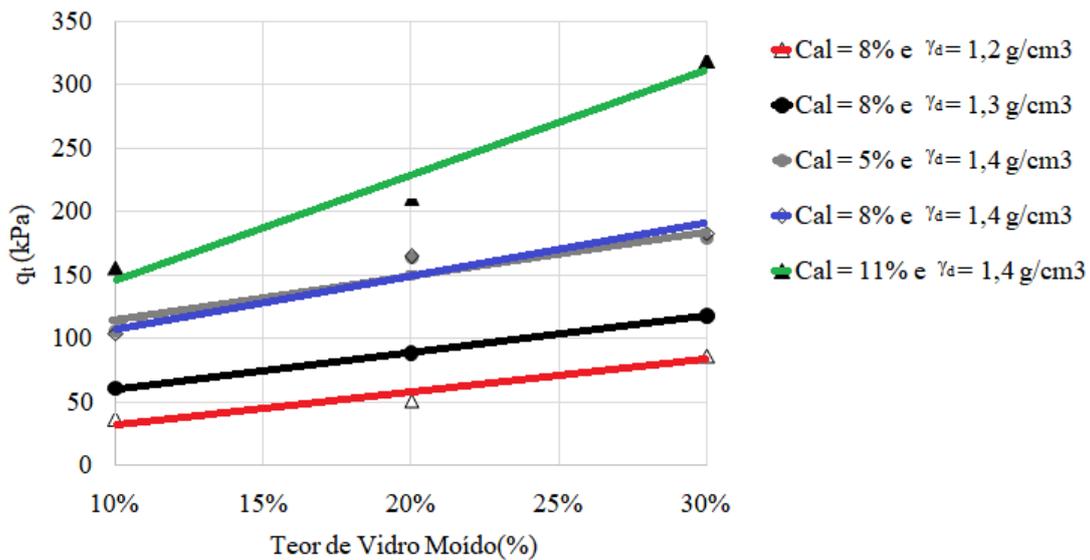


Figura 5.1.2.2.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_t

5.1.2.2.4 EFEITO DA POROSIDADE

Na Figura 5.1.2.2.4, tem-se a variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) em relação à porosidade (η) para diferentes teores de vidro moído. Cada curva difere apenas no teor de vidro moído, estando juntos na mesma curva todos os pesos específicos e teores de cal diferentes para o mesmo teor de vidro moído.

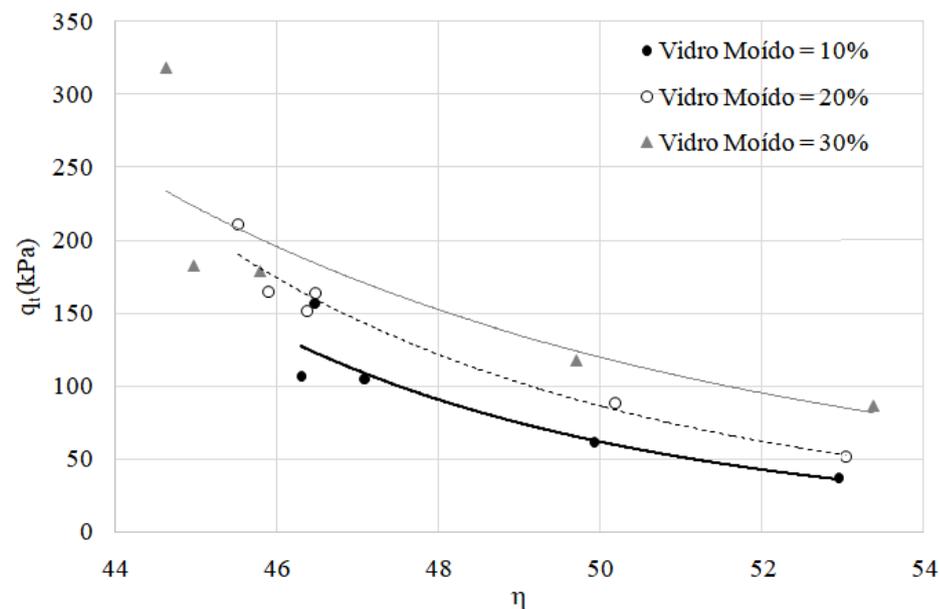


Figura 5.1.2.2.4 – Efeito da porosidade na q_t

5.1.2.2.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL

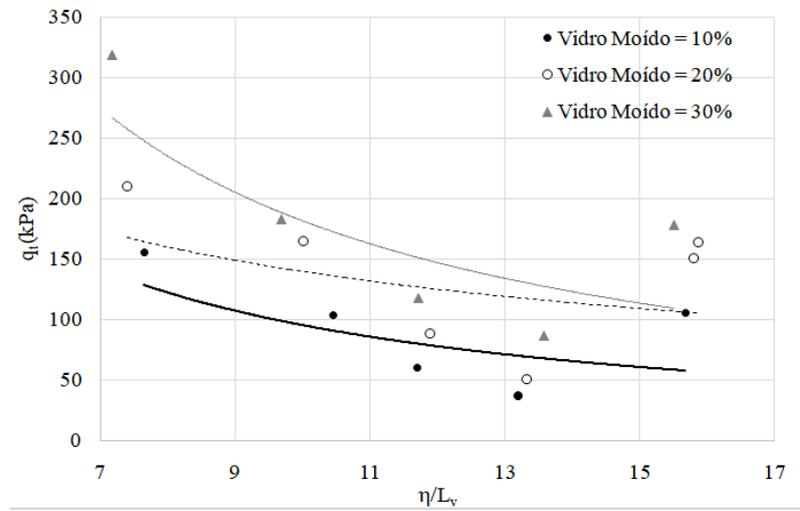


Figura 5.1.2.2.5 – $q_t \times \eta/L_v$

O aumento da η e $(1/L_v)$ resulta na redução da resistência à compressão simples.

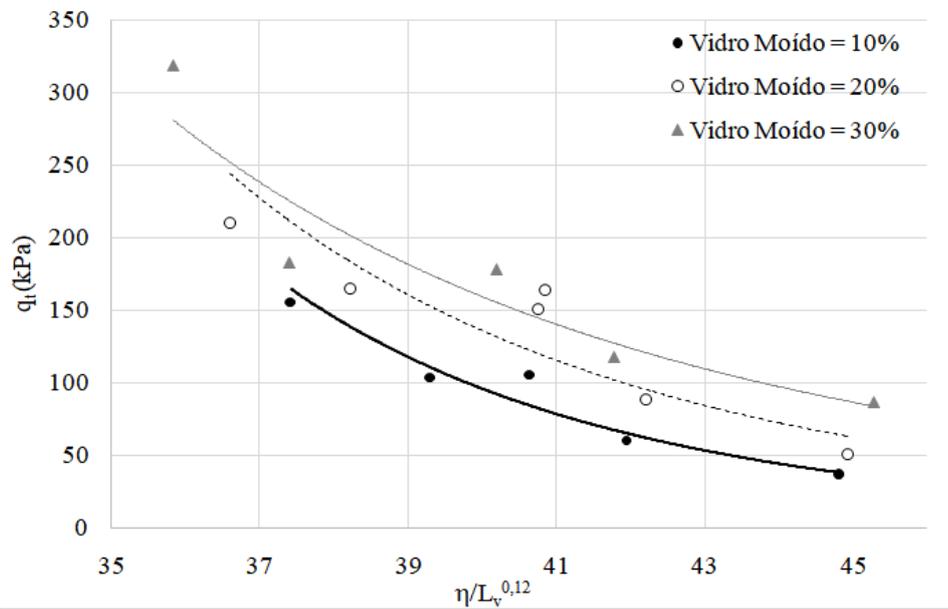


Figura 5.1.2.2.6 – $q_t \times \eta/(L_v^{0,12})$

5.1.2.2.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à tração por compressão diametral com o fator porosidade/teor volumétrico de cimentante, onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_2 (teor volumétrico de cal + vidro moído).

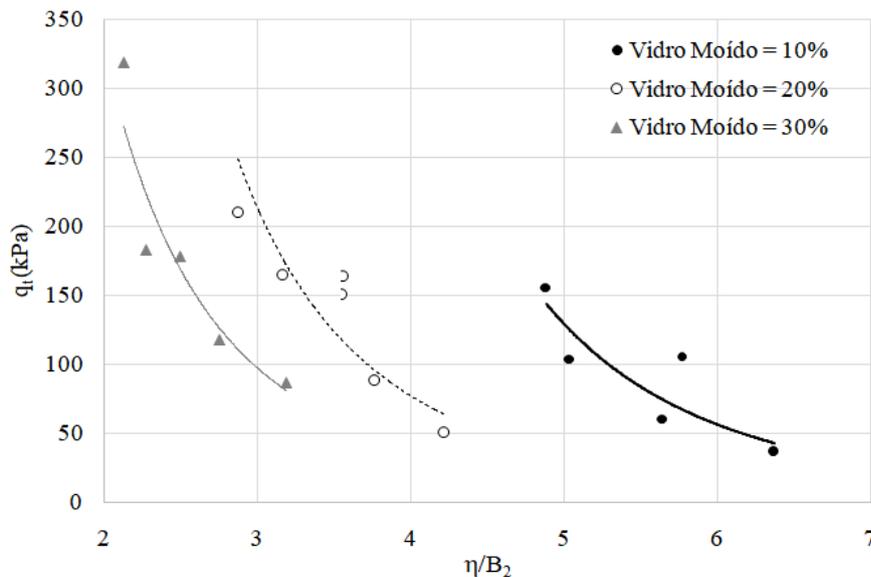


Figura 5.1.2.2.7 – $q_t \times \eta/B_2$

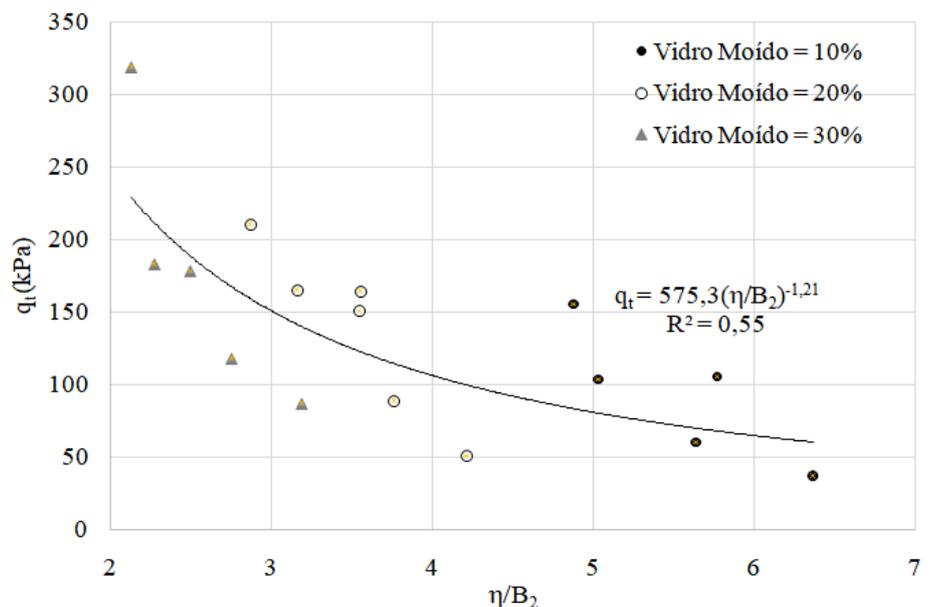


Figura 5.1.2.2.8 – $q_t \times \eta/B_2$ ajustados para a mesma curva

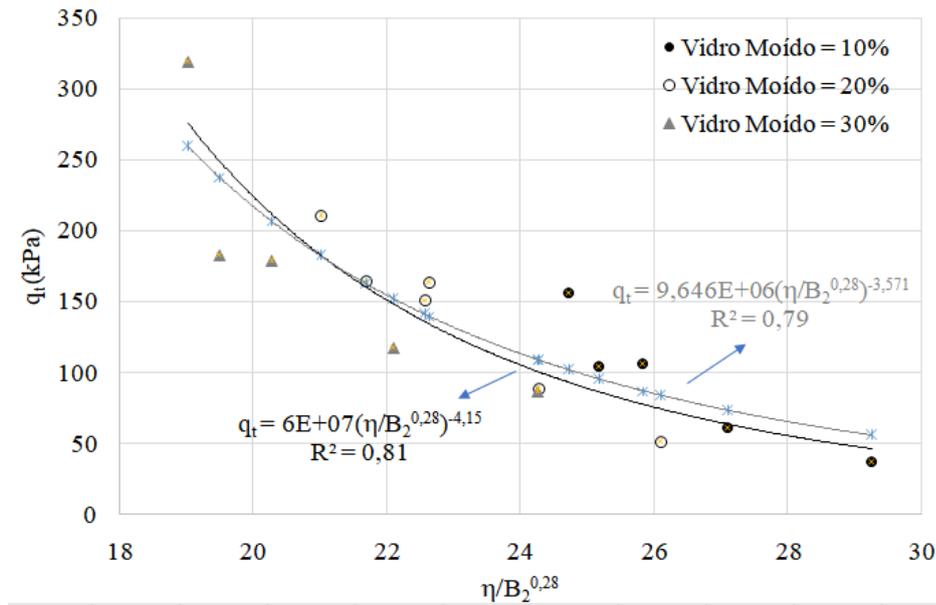


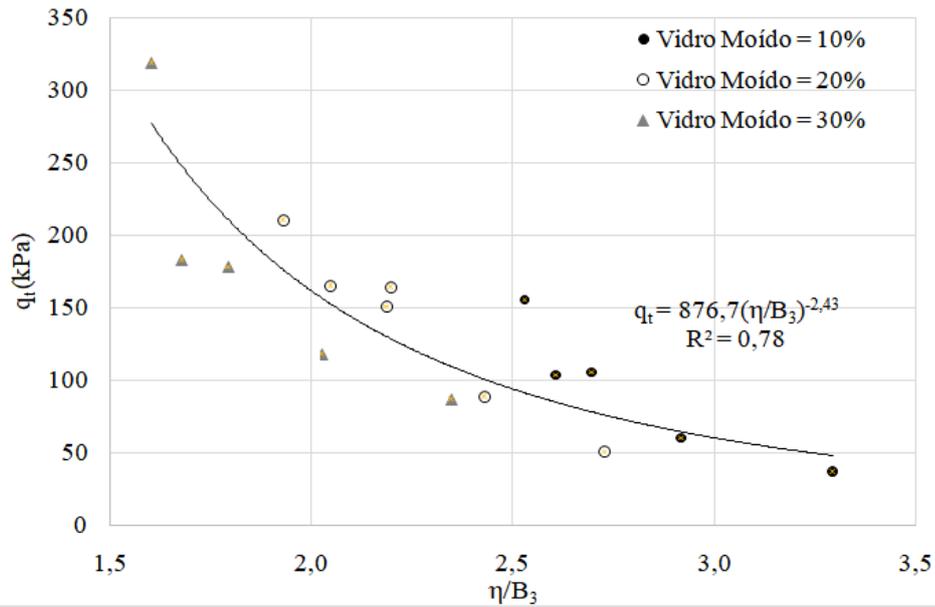
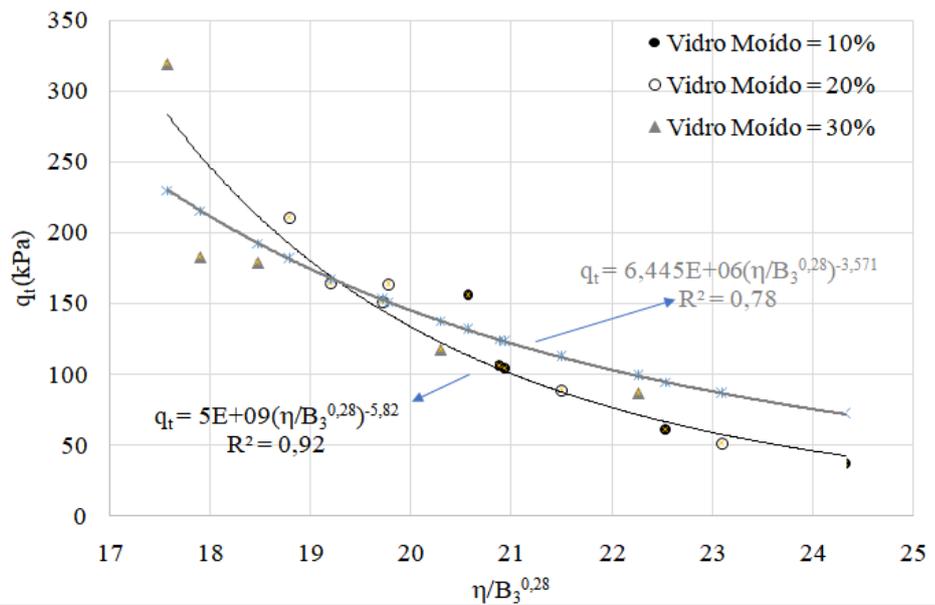
Figura 5.1.2.2.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da compressão diametral com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

5.1.2.2.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à tração por compressão diametral com o fator porosidade/teor volumétrico de cimentante, onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_3 (teor volumétrico de cal + vidro moído + bentonita).

Figura 5.1.2.2.10 - η/B_3 Figura 5.1.2.2.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da compressão diametral com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

5.1.2.2.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

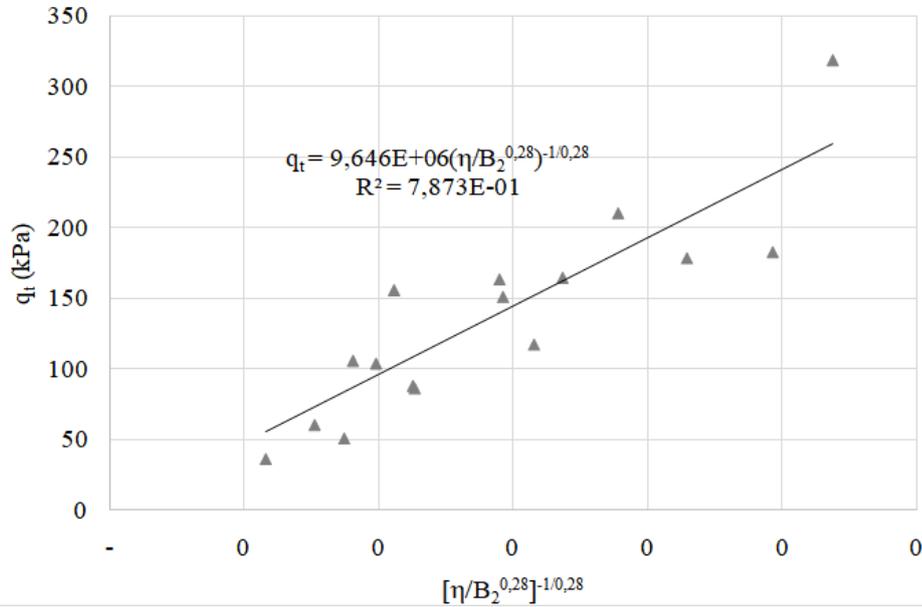


Figura 5.1.2.2.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$

$R^2 = 0,79$

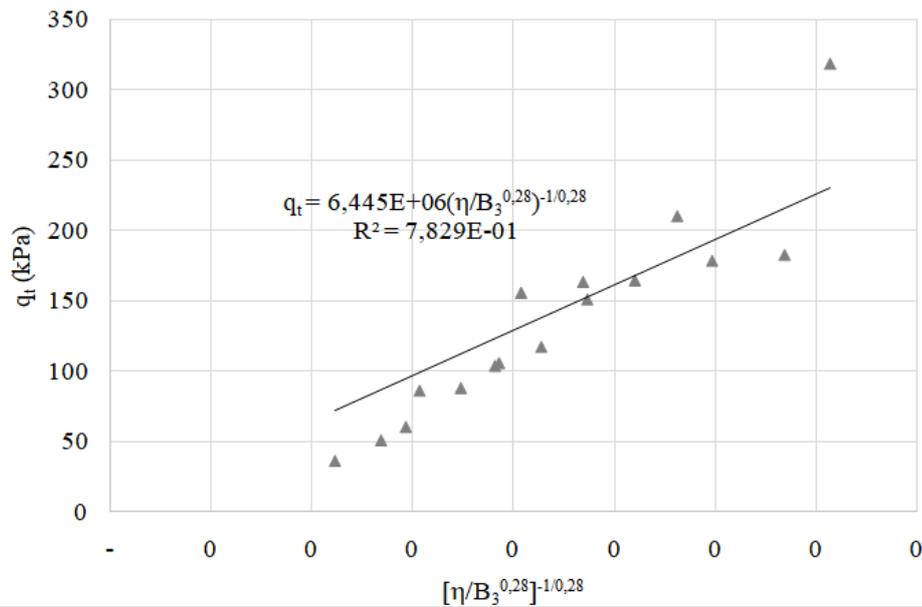


Figura 5.1.2.2.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$

$R^2 = 0,78$

Tratando-se da comparação entre os teores volumétricos dos agentes reagentes, esta situação foi a única da pesquisa onde B₃ não apresentou maior relevância do que B₂, apesar de o resultado de ambos estar muito semelhante. Portanto, exclusivamente para este item, pode-se afirmar que a relevância de ambos os teores volumétricos dos materiais reagentes é praticamente a mesma.

5.1.2.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

Na Tabela 5.1.3 abaixo, o resumo da média dos resultados obtidos nos ensaios de tração por flexão para cada dosagem estabelecida.

Vidro Moído (%)	Massa específica (g/cm ³)	Resistência à Tração por Flexão (kPa)		
		Cimentante		
		5%	8%	11%
10	1,2		212,62	
	1,3		306,57	
	1,4	390,17	495,58	549,57
20	1,2		259,14	
	1,3		434,4	
	1,4	482,36	693,35	745,84
30	1,2		406,13	
	1,3		502,22	
	1,4	442,3	863,74	1111,49

Tabela 5.1.3 - Média dos resultados dos ensaios de tração por flexão (Fonte: autor)

Os itens de 5.1.2.3.4 ao 5.1.2.3.8 se resumirão aos resultados obtidos, visto que a explanação completa envolvendo os efeitos e relações obtidas nas amostras é a mesma que ocorre para os ensaios de compressão simples, realizada em tal seção.

5.1.2.3.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA

Na Figura 5.1.2.3.1, tem-se a variação da resistência à tração por flexão (q_f) com o aumento da massa específica (γ_d). Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para o mesmo teor de cal de 8%.

Observa-se que o aumento da massa específica de 1,2 para 1,4 g/cm³ exerce influência na resistência do material independentemente das outras variáveis, obtendo-se ganhos de resistência da magnitude de 100%.

Também é possível observar que a taxa de aumento de resistência devido ao aumento da massa específica foi semelhante para todos os teores de vidro moído, sendo os maiores valores de resistência para cada massa específica obtidos com o aumento do teor de vidro moído nas amostras.

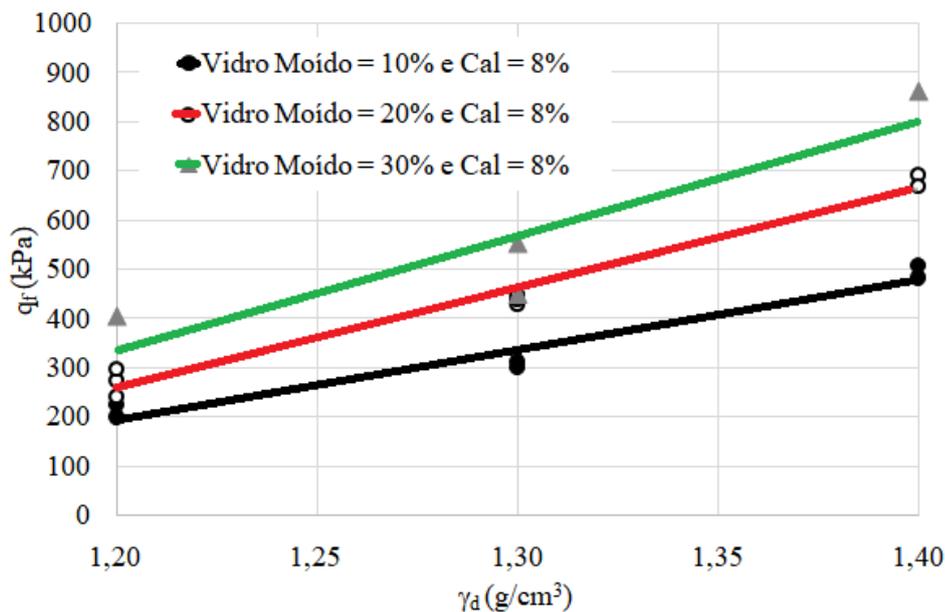


Figura 5.1.2.3.1 – Efeito da massa específica na q_f

5.1.2.3.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL

Na Figura 5.1.2.3.2, é apresentada a variação da resistência à tração por flexão (q_f) em relação ao teor de cal apresentado pela mistura. Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para a mesma massa específica de 1,4 g/cm³.

Observa-se a tendência de ganho de resistência com o aumento do teor de cal. A amostra contendo 30% de teor de vidro moído apresentou uma taxa de aumento de resistência mais significativa do que as outras, obtendo em torno de 200% de aumento.

Já as misturas contendo 10 e 20% de teor de vidro moído apresentaram aumentos de resistência à tração por compressão diametral com o aumento do teor de cal da ordem de 50%.

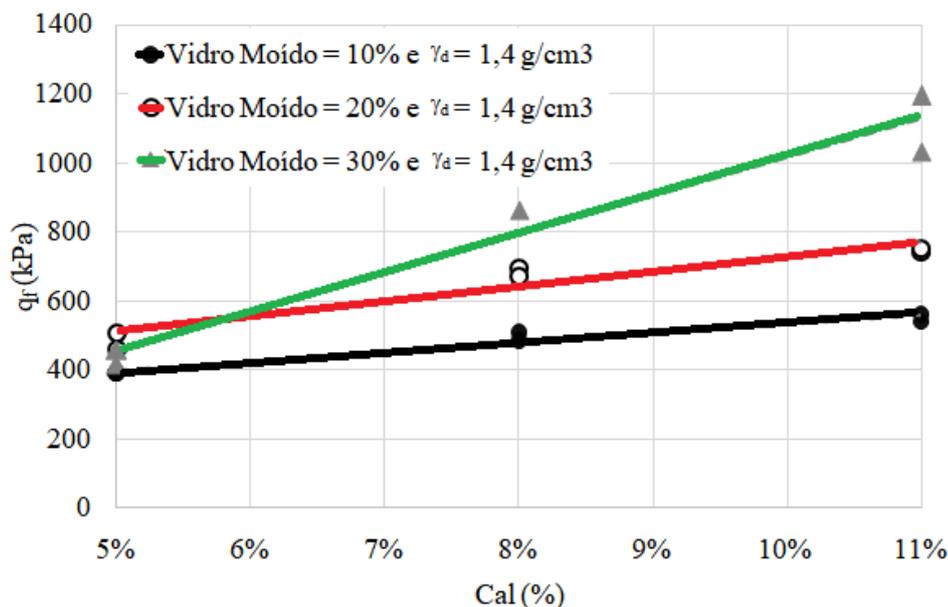


Figura 5.1.2.3.2 – Efeito do teor de cal na q_f

5.1.2.3.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO

Na Figura 5.1.2.3.3, é apresentada a variação da resistência à tração por flexão (q_f) em relação ao teor de vidro moído para diferentes teores de cal e massas específicas.

Nota-se que o aumento do teor de vidro moído (com exceção da mistura com 5% de teor de cal) apresentou influência na resistência para todos os teores de cal e massas específicas, sendo este ganho mais acentuado na amostra de maior teor de cal juntamente com a maior massa específica.

Também é possível observar que, para essa situação, os maiores valores de resistência foram obtidos para as amostras que apresentavam 8 e 11% de teor de cal juntamente com a maior massa específica.

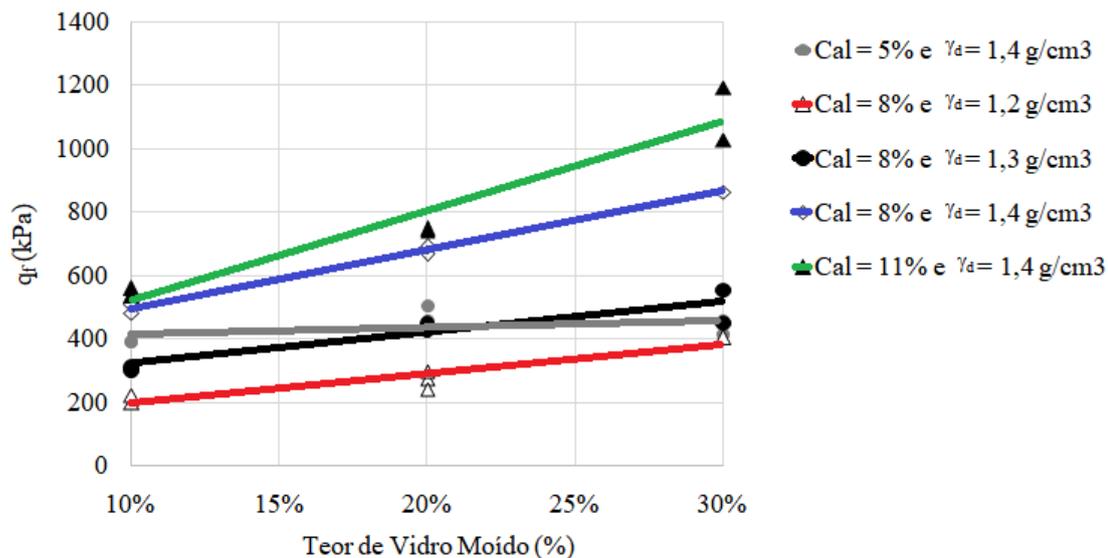


Figura 5.1.2.3.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_f

5.1.2.3.4 EFEITO DA POROSIDADE

Na Figura 5.1.4.3.4, tem-se a variação da resistência à tração por flexão (q_f) em relação à porosidade (η) para diferentes teores de vidro moído. Cada curva difere apenas no teor de vidro moído, estando juntos na mesma curva todos os pesos específicos e teores de cal diferentes para o mesmo teor de vidro moído.

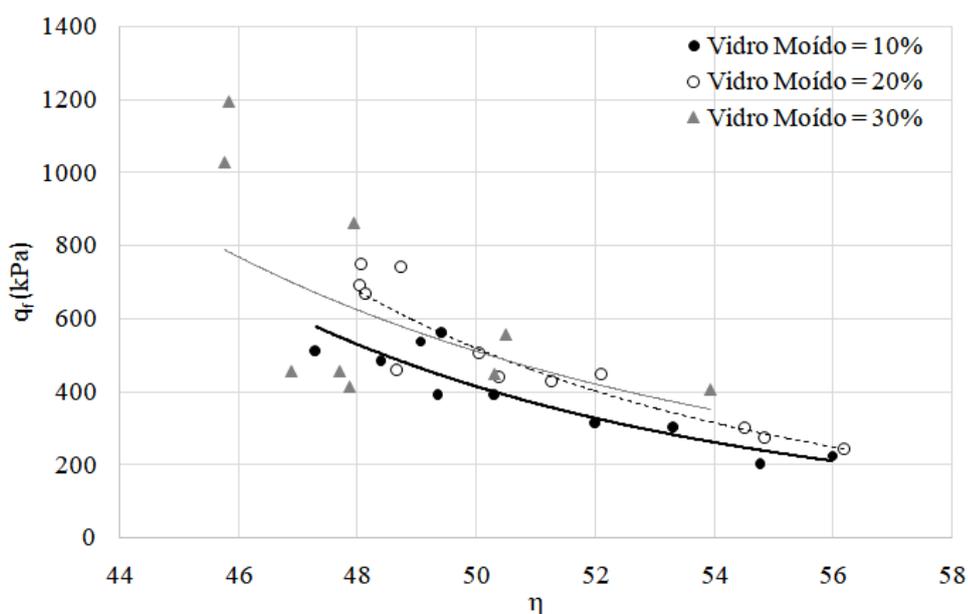


Figura 5.1.2.3.4 – Efeito da porosidade na q_f

5.1.2.3.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL

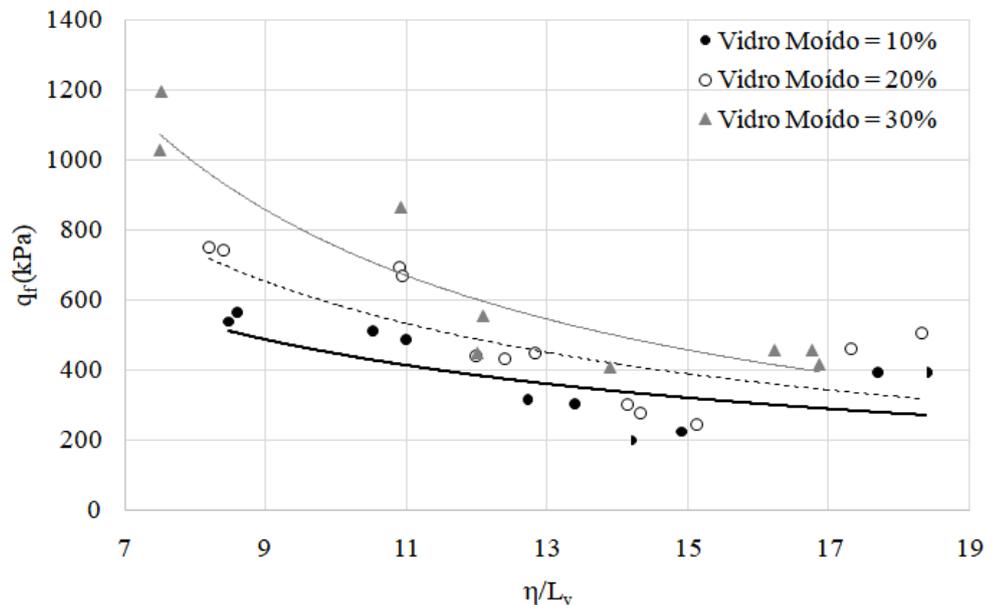


Figura 5.1.2.3.5 – $q_f \times \eta/L_v$

O aumento da η e $(1/L_v)$ resulta na redução da resistência à compressão simples.

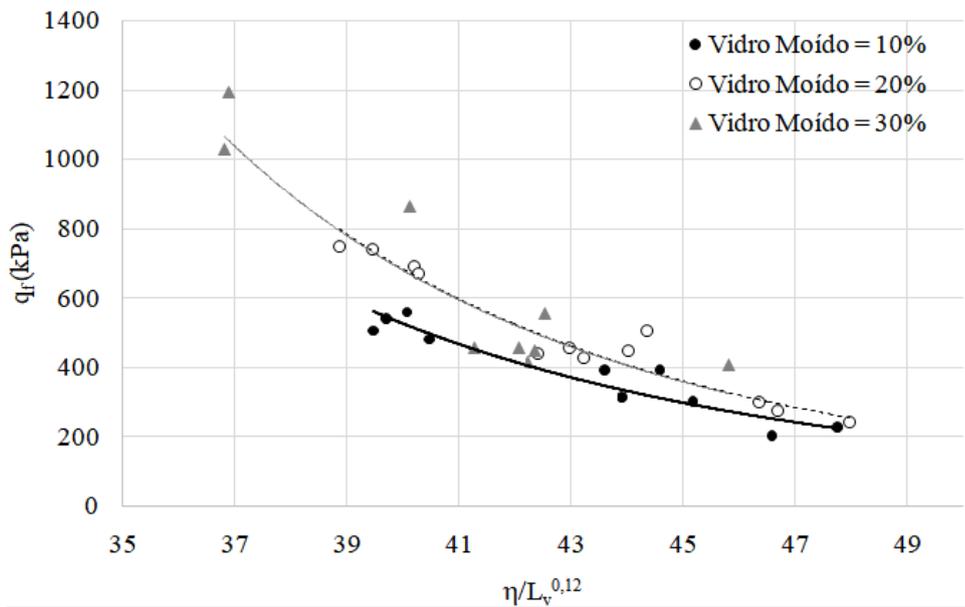


Figura 5.1.2.3.6 – $q_f \times \eta/(L_v^{0,12})$

5.1.2.3.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à tração por flexão (q_f) com o fator porosidade/(teor volumétrico de cimentante), onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_2 (teor volumétrico de cal + vidro moído).

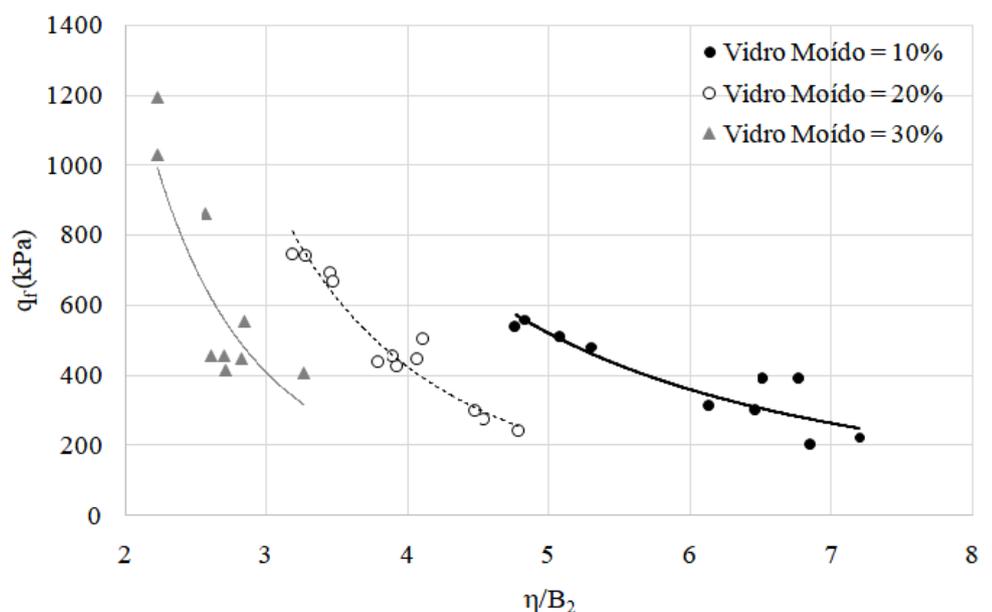


Figura 5.1.2.3.7 – $q_f \times \eta/B_2$

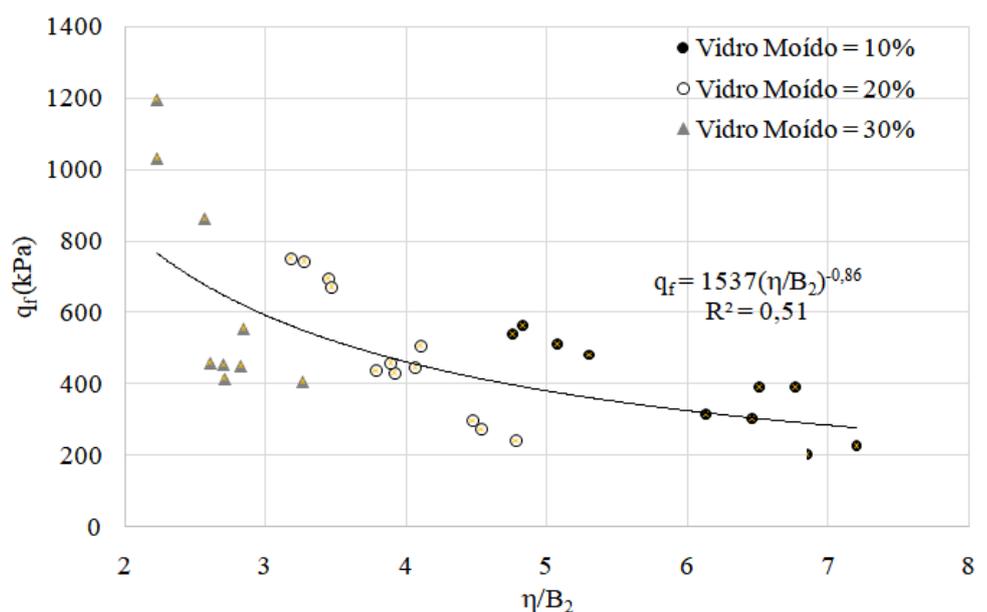


Figura 5.1.2.3.8 – $q_f \times \eta/B_2$ ajustados para a mesma curva

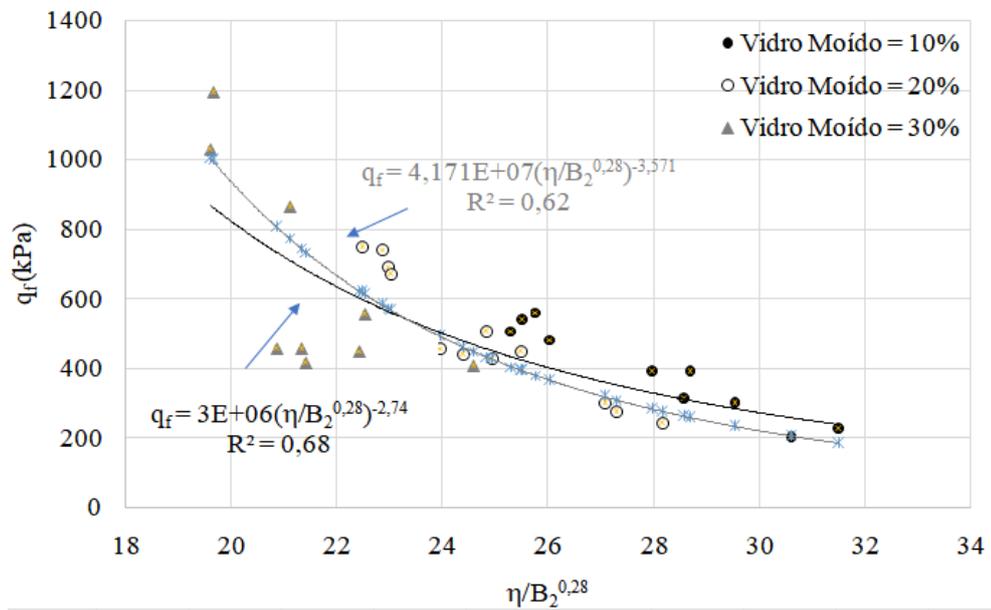


Figura 5.1.2.3.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da resistência à tração por flexão com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

5.1.2.3.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à tração por flexão (q_f) com o fator porosidade/(teor volumétrico de cimentante), onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_3 (teor volumétrico de cal + vidro moído + bentonita).

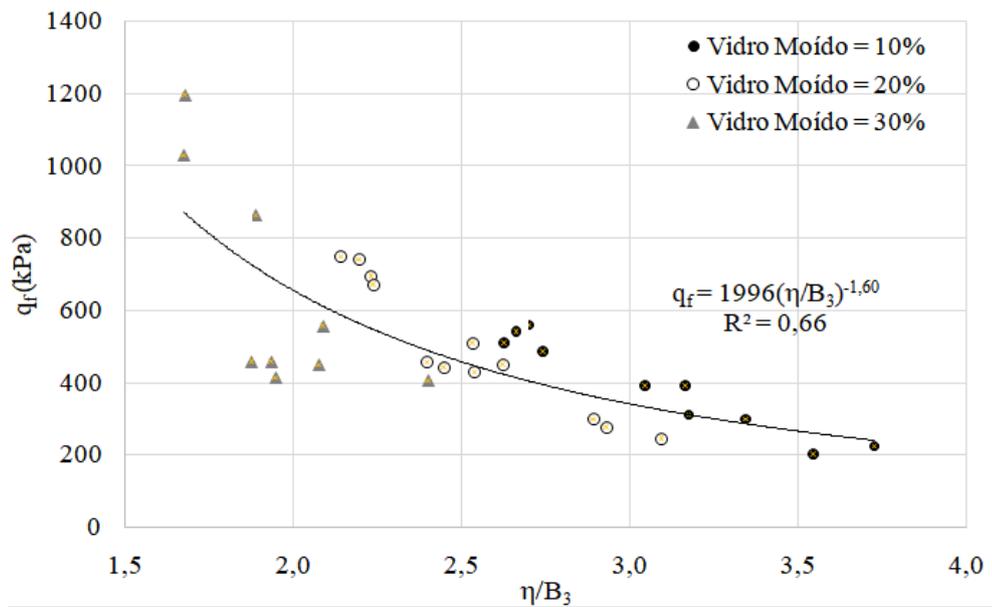


Figura 5.1.2.3.10 - η/B_3

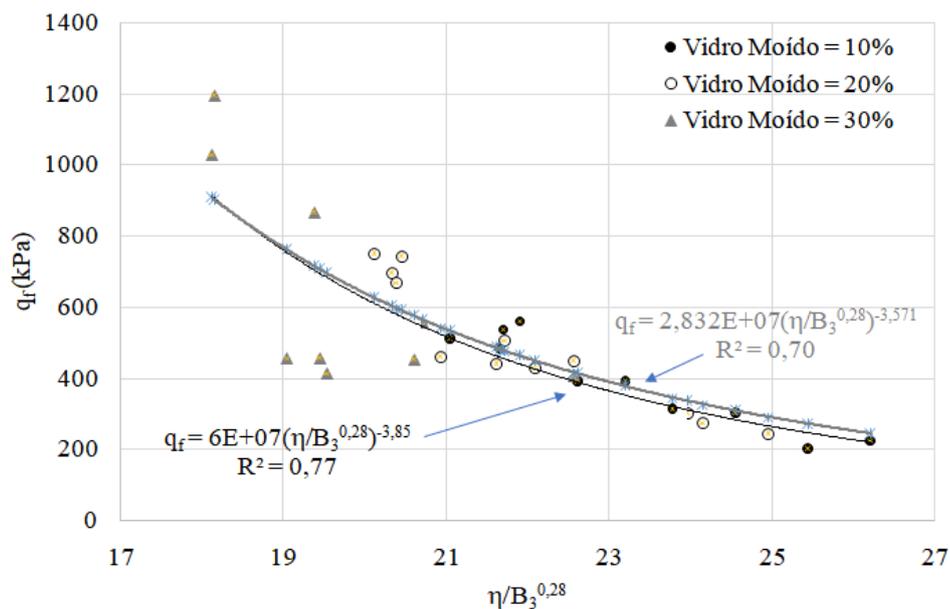


Figura 5.1.2.3.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da resistência à tração por flexão com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

5.1.2.3.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

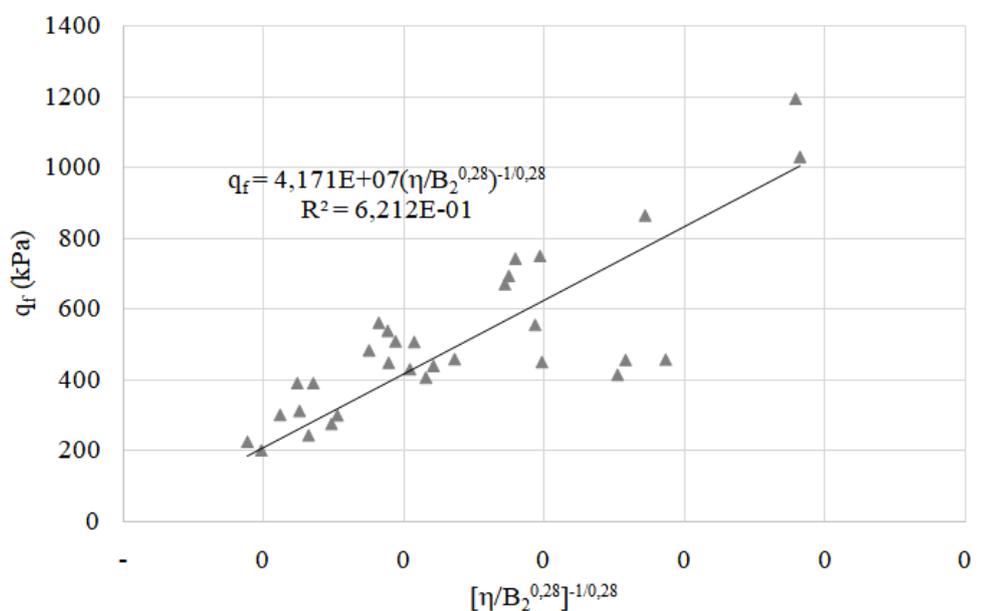


Figura 5.1.2.3.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,62$$

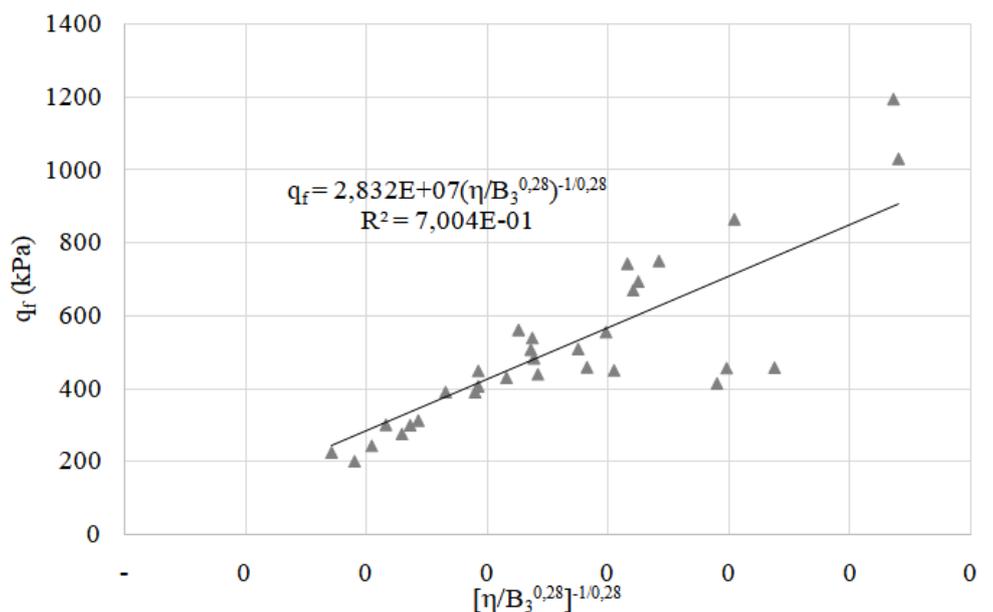


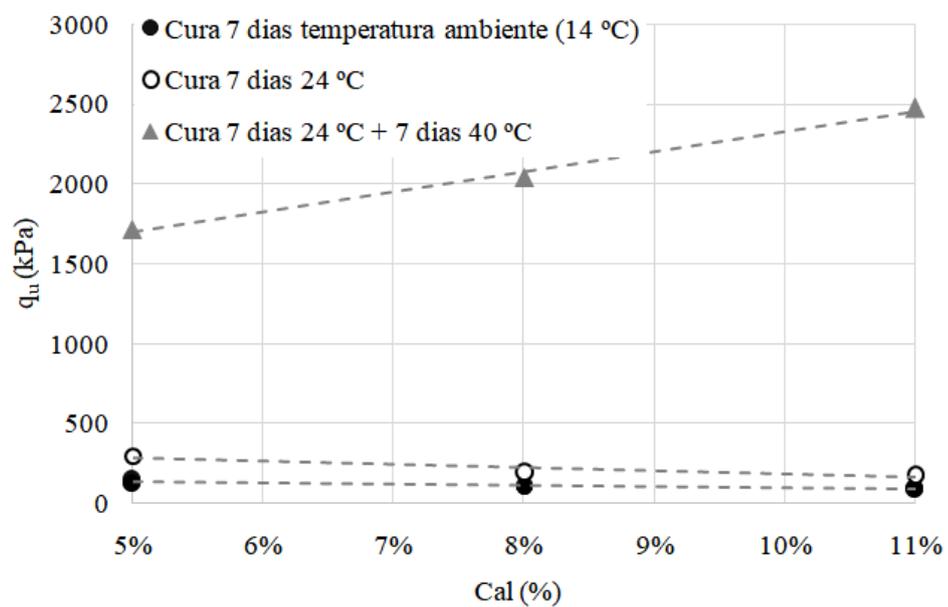
Figura 5.1.2.3.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,70$$

Observa-se que B_3 apresentou um maior valor de R^2 do que B_2 , mostrando uma maior correlação se for considerada a mistura do conjunto ‘cal + vidro moído + bentonita’ no tratamento estatístico do que apenas ‘cal + vidro moído’. Tal fato ocorre pois a cal reage em parte com o vidro moído e em parte com a bentonita, apresentando uma maior relevância de B_3 na interpretação dos resultados.

5.1.3 EFEITO DA TEMPERATURA DE CURA

Conforme apontado no item 3.8, o aumento da temperatura de cura de fato acarretou em um maior aumento de resistência da mistura. Apesar do fato de que, na situação de cura que se obteve mais sucesso, além da temperatura variou-se o tempo de cura, observa-se na Figura 5.1.3.1 abaixo o quão relevante é a temperatura de cura na influência da resistência da mistura solo-cal, onde se comparou a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação ao teor de cal com temperaturas diferentes para os corpos de prova apresentando massa específica de $1,4 \text{ g/cm}^3$ e 30% de teor de vidro moído.

Figura 5.1.3.1 – Efeito da temperatura de cura na q_u

5.2 MISTURAS DE AREIA FINA, BENTONITA, VIDRO MOÍDO E CIMENTO

Os corpos de prova contendo areia fina, bentonita, vidro moído e cimento foram todos curados por 7 dias à temperatura ambiente, a qual teve uma média de 14 °C durante o tempo de cura em questão.

5.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Na Tabela 5.2.1 abaixo, o resumo da média dos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples para cada dosagem estabelecida.

Vidro Moído (%)	Massa específica (g/cm ³)	Resistência à Compressão Simples (kPa)		
		Cimentante		
		5%	8%	11%
10	1,2		327,01	
	1,3		719,75	
	1,4	941,9	961,03	1012,4
20	1,2		397,4	
	1,3		817,78	
	1,4	1166,09	1454,08	1861,28
30	1,2		545,93	
	1,3		938,76	
	1,4	1378,81	1880,96	2236,02

Tabela 5.2.1 - Média dos resultados dos ensaios de compressão simples (Fonte: autor)

5.2.1.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA

Na Figura 5.2.1.1, tem-se a variação da resistência à compressão simples (q_u) com o aumento da massa específica (γ_d). Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para o mesmo teor de cimento de 8%.

Observa-se que o aumento da massa específica de 1,2 para 1,4 g/cm³ exerce influência na resistência do material independentemente das outras variáveis, obtendo-se ganhos de resistência da magnitude de até 200%.

Também é possível observar que a taxa de aumento de resistência devido ao aumento da massa específica foi maior para quanto maior fosse o teor de vidro moído da mistura. Os

maiores valores de resistência para cada massa específica foram obtidos na amostra contendo o maior teor de vidro moído.

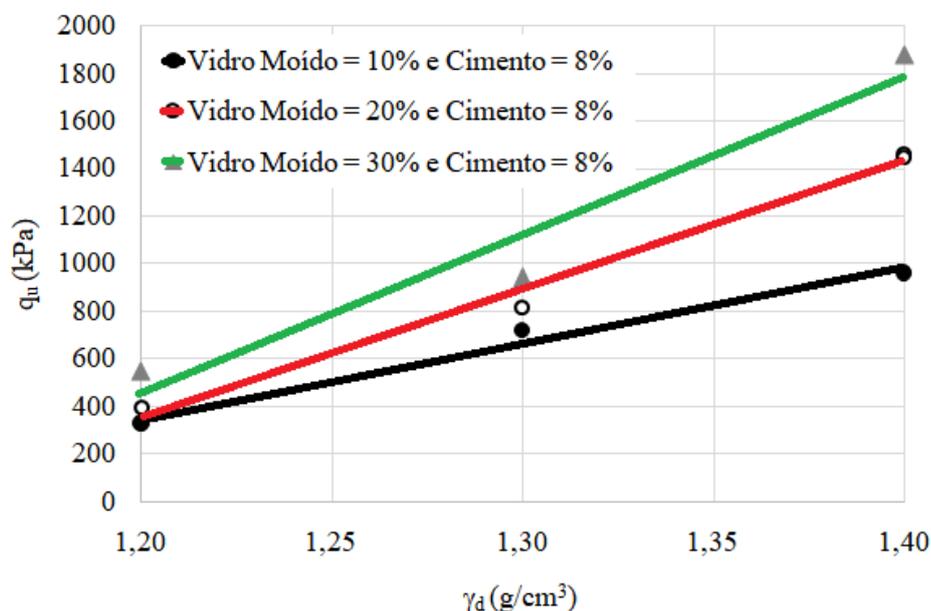


Figura 5.2.1.1 – Efeito do massa específica na q_u

5.2.1.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CIMENTO

Na Figura 5.2.1.2, é apresentada a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação ao teor de cimento apresentado pela mistura. Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para a mesma massa específica de 1,4 g/cm³.

Para as misturas contendo 20 e 30% de teor de vidro moído observa-se a tendência de ganho de resistência com o aumento do teor de cimento. Ambas as misturas apresentaram uma taxa de ganho de resistência similar, da magnitude de 70%.

Já a mistura contendo 10% de teor de vidro moído não apresentou variação significativa de resistência com o aumento do teor de cimento.

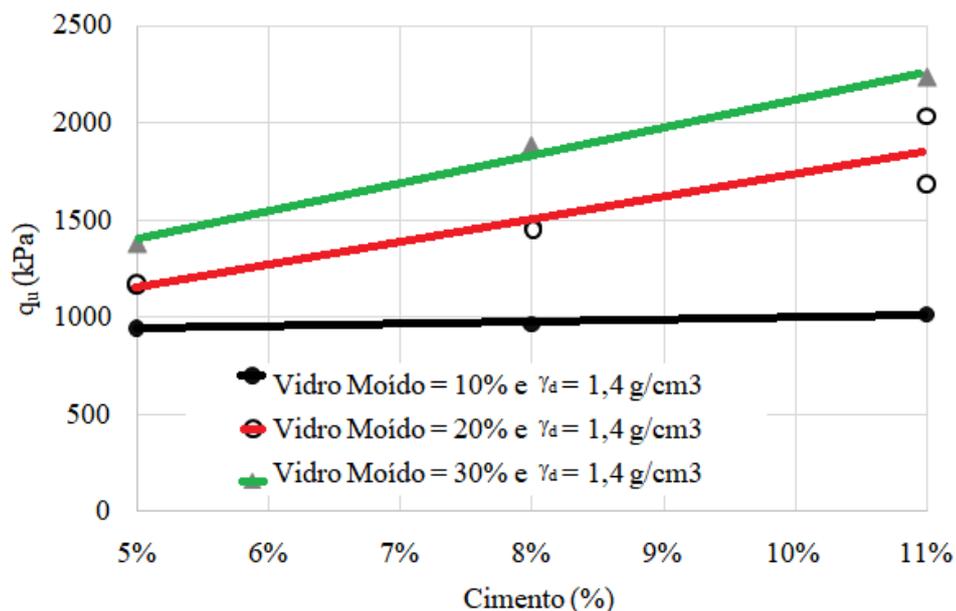


Figura 5.2.1.2 – Efeito do teor de cimento na q_u

5.2.1.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO

Na Figura 5.2.1.3, é apresentada a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação ao teor de vidro moído para diferentes teores de cimento e massas específicas.

Nota-se que o aumento do teor de vidro moído apresentou influência para todos os teores de cimento e massas específicas, sendo este ganho mais acentuado na amostra de maior teor de cimento juntamente com a maior massa específica.

Também é possível observar que, para essa situação, os maiores valores de resistência foram obtidos para a amostra que apresentava o maior de teor de cimento juntamente com a maior massa específica.

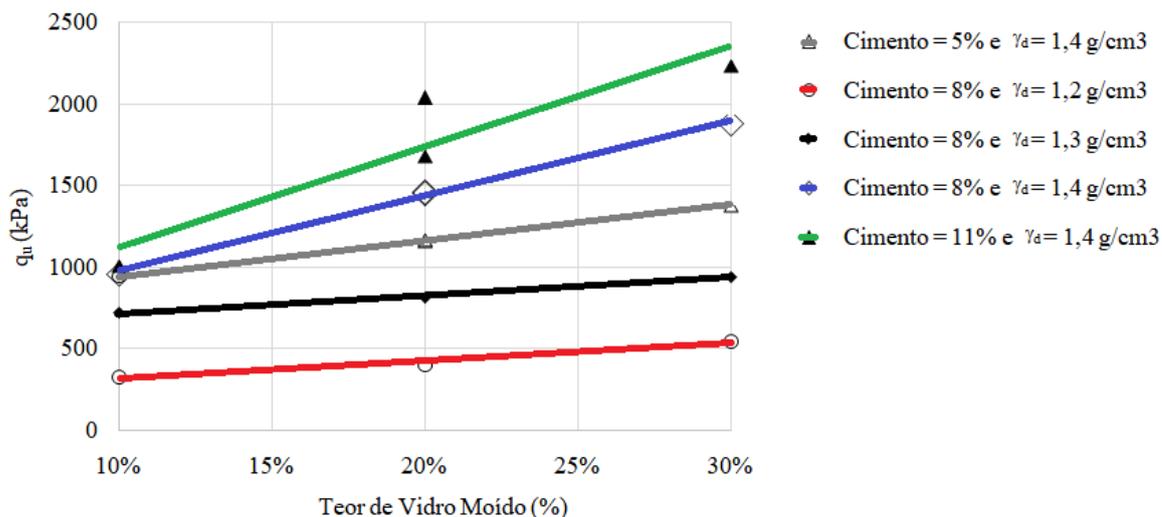


Figura 5.2.1.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_u

5.2.1.4 EFEITO DA POROSIDADE

Na Figura 5.2.1.4, tem-se a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação à porosidade (η) para diferentes teores de vidro moído. Cada curva difere apenas no teor de vidro moído, estando juntos na mesma curva todos os pesos específicos e teores de cimento diferentes para o mesmo teor de vidro moído.

É possível observar que a resistência aumenta com a redução da porosidade da mistura, independentemente do teor de vidro moído presente. Tal efeito pode ser atribuído ao fato de que uma menor porosidade resulta num maior número de contatos entre as partículas do material, aumentando a eficiência da cimentação e, também, à maior mobilização do atrito e maior capacidade de distribuição de tensões no interior da amostra.

Para a mesma porosidade, os maiores valores de resistência são observados nas amostras com 30% de teor de vidro moído.

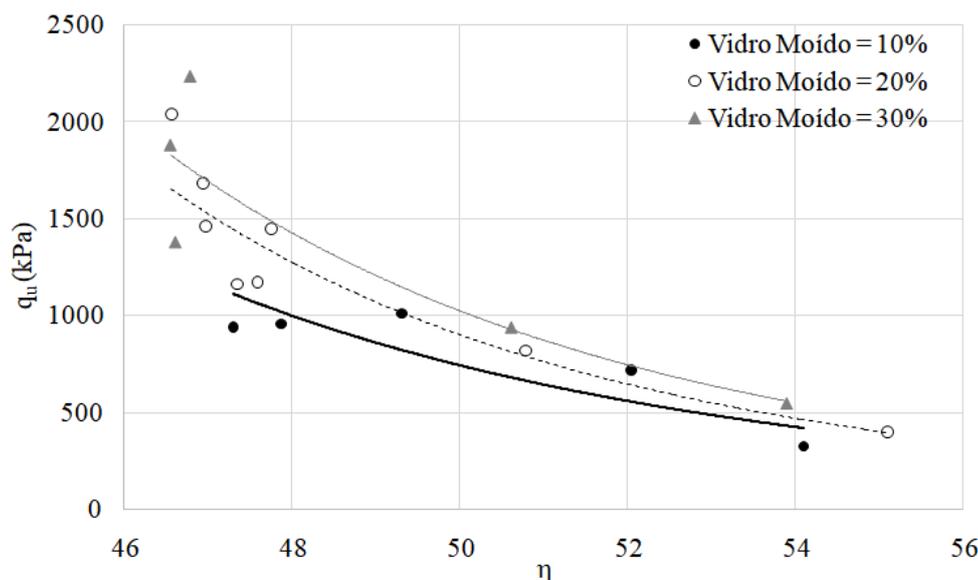


Figura 5.2.1.4 – Efeito da porosidade na q_u

5.2.1.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO

Visto que ocorre o aumento da resistência com o aumento do teor de cimento, e, estando esse teor de cimento diretamente ligado ao teor volumétrico de cimento (C_{i_v}), pode-se afirmar que ocorre a diminuição da resistência com o aumento do inverso do teor volumétrico de cimento ($1/C_{i_v}$).

Propõe-se, então, a análise da resistência em relação ao fator porosidade/(teor volumétrico de cimento) (η/C_{i_v}), como visto no item 3.7.

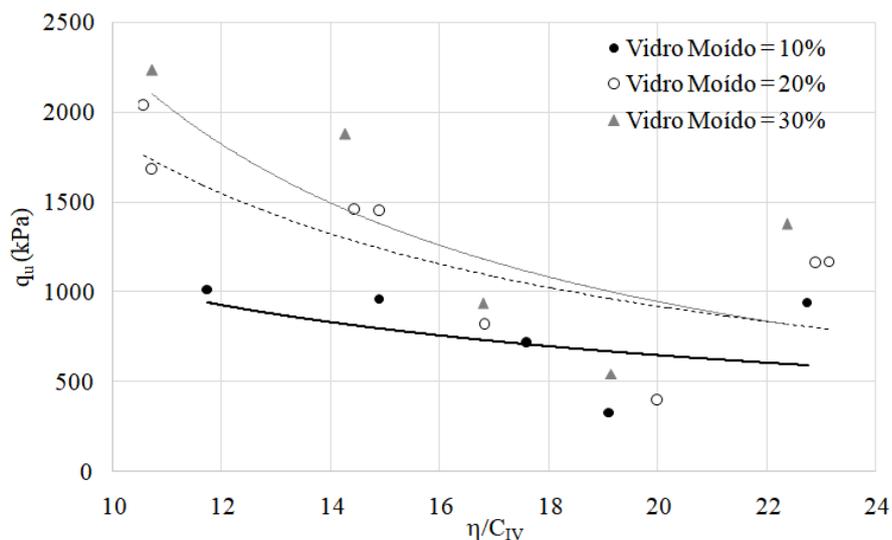


Figura 5.2.1.5 – $q_u \times \eta/C_{iv}$

Observa-se na Figura 5.2.1.5 acima que com o aumento do fator η/C_{iv} ocorre a diminuição da resistência à compressão simples (q_u).

Visto que a taxa de variação da resistência em função de cada uma das grandezas é substancialmente diferente, aplica-se uma potência de 0,28 sobre o teor volumétrico de cimento (C_{iv}) visando a compatibilização de tais taxas. Tal valor foi obtido após inúmeras tentativas.

Então, observa-se o aumento da resistência com a diminuição do fator $\eta/(C_{iv}^{0,28})$, independentemente do teor de vidro moído presente.

Para o mesmo fator $\eta/(C_{iv}^{0,28})$, os maiores valores de resistência são observados nas amostras com 30% de teor de vidro moído.

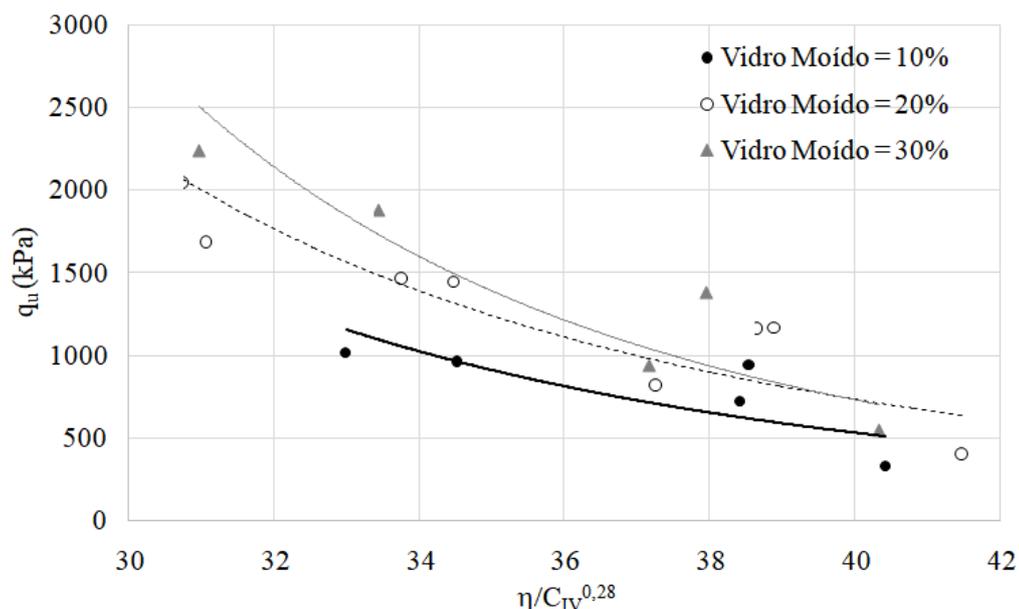
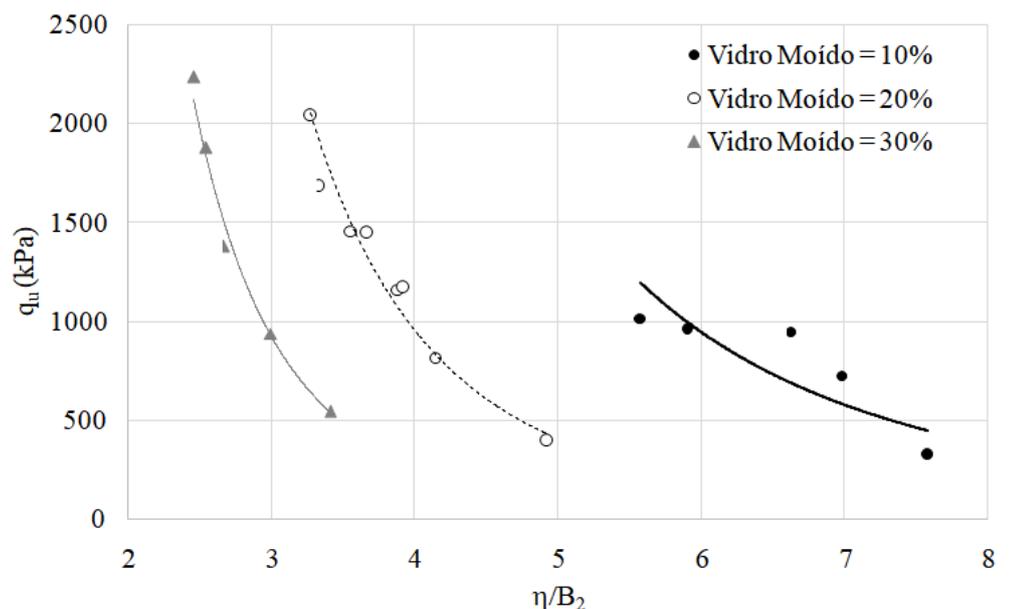


Figura 5.2.16 – $q_u \times \eta/(C_{IV}^{0,28})$

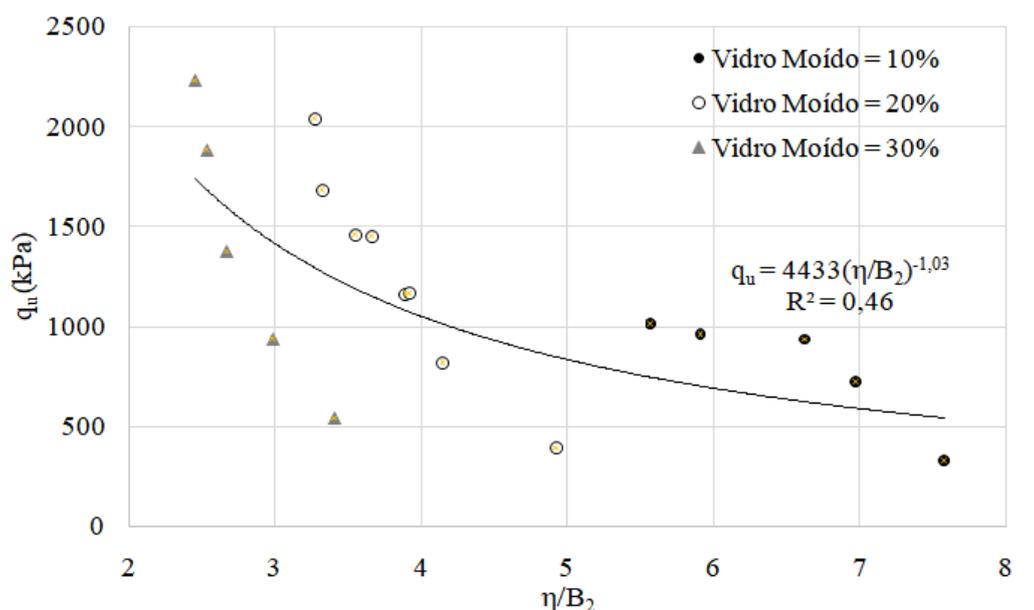
5.2.1.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO)

Visto que a presença de vidro moído na mistura também influencia nas reações de cimentação, é conveniente se fazer uma análise da resistência em relação ao fator porosidade/teor volumétrico de cimentante similar àquela do item anterior, porém com a adição de vidro moído ao teor volumétrico do cimentante.

Na Figura 5.2.1.7, tem-se a relação da resistência à compressão simples (q_u) com o fator porosidade/teor volumétrico de cimentante, onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_2 (teor volumétrico de cimento + vidro moído).

Figura 5.2.1.7 – $q_u \times \eta/B_2$

Com o objetivo de se obter apenas uma curva que correlacione a resistência ao fator em questão independentemente do peso específico, teor de cimento ou teor de vidro moído fez-se o ajuste exponencial das curvas isoladas acima. Como resultado, tem-se a curva da Figura 5.2.1.8 abaixo, que apresenta um coeficiente de correlação $R^2 = 0,46$.

Figura 5.2.1.8 – $q_u \times \eta/B_2$

Pelo mesmo fato observado no item que tratava do teor volumétrico de cimento, essa situação apresenta uma taxa de variação da resistência em função de cada uma das grandezas

consideravelmente diferente, portanto, recorre-se a mesma aplicação de uma potência sobre o teor volumétrico de cimentante (B_2) visando a compatibilização de tais taxas. Nesse caso, o valor da potência é de 0,28, também obtida após inúmeras tentativas. Na figura 5.2.1.9 abaixo, encontra-se o resultado de tal compatibilização.

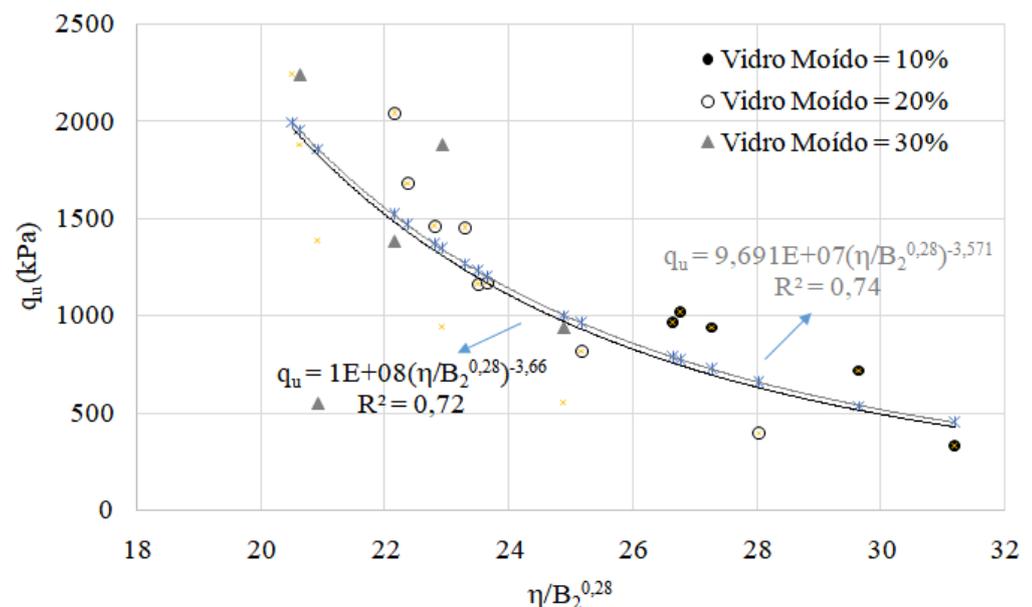


Figura 5.2.1.9 - $\eta/(B_2)^{0,28}$

A presença de duas curvas na Figura 5.2.1.9 acima se deve ao fato de que uma é resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos) e outra é o resultado da elevação do termo $\eta/(B_2)^{0,28}$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da compressão simples com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

5.2.1.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

A presença de bentonita nas amostras também influencia as reações que ocorrem na mistura, portanto, se faz necessária uma análise da resistência em relação ao fator porosidade/(teor volumétrico de cimentante) similar àquelas dos itens anteriores, porém com a adição de bentonita ao teor volumétrico de cimentante.

Na Figura 5.2.1.10, tem-se a relação da resistência à compressão simples (q_u) com o fator porosidade/(teor volumétrico de cimentante), onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_3 (teor volumétrico de cimento + vidro moído + bentonita).

A curva em questão é representada com o devido ajuste exponencial (para a obtenção de apenas uma curva que correlacione a resistência ao fator em questão independentemente do peso específico, teor de cimento ou teor de vidro moído) já realizado, apresentando um coeficiente de correlação $R^2 = 0,69$.

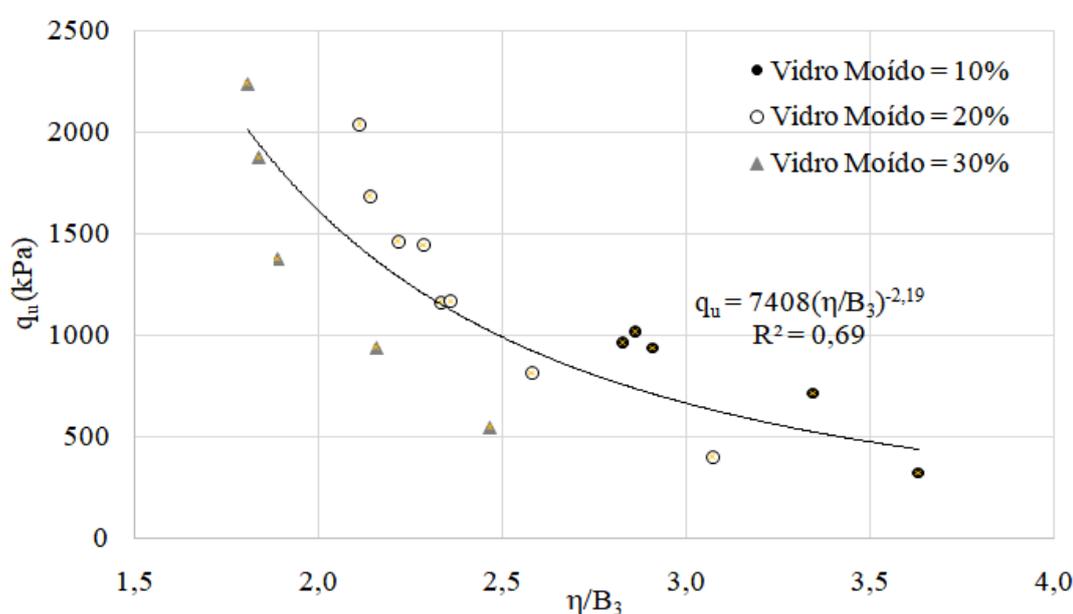


Figura 5.2.1.10 - η/B_3

Pelo mesmo fato observado no item anterior, essa situação apresenta uma taxa de variação da resistência em função de cada uma das grandezas substancialmente diferente, portanto, recorre-se a mesma aplicação de uma potência sobre o teor volumétrico de cimentante (B_3) visando a compatibilização de tais taxas. Nesse caso, o valor da potência é de 0,28, também obtida após inúmeras tentativas. Abaixo, na Figura 5.2.1.11, encontra-se o resultado de tal compatibilização.

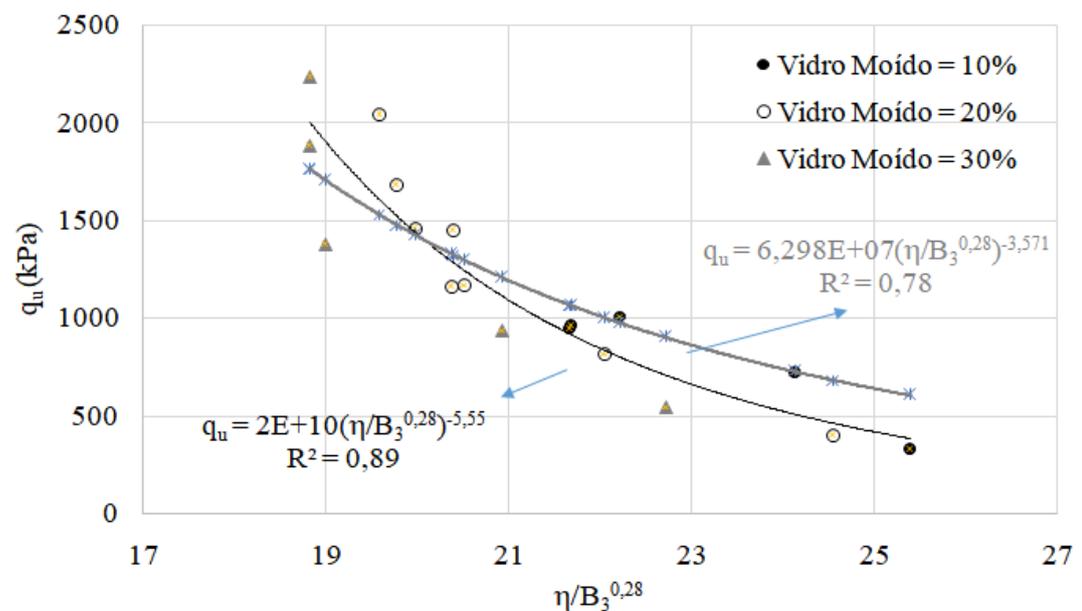


Figura 5.2.1.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$

A presença de duas curvas na Figura 5.2.1.11 acima se deve ao fato de que uma é resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos) e outra é o resultado da elevação do termo $\eta/(B_3^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_3)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da compressão simples com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

**5.2.1.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO)
x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)**

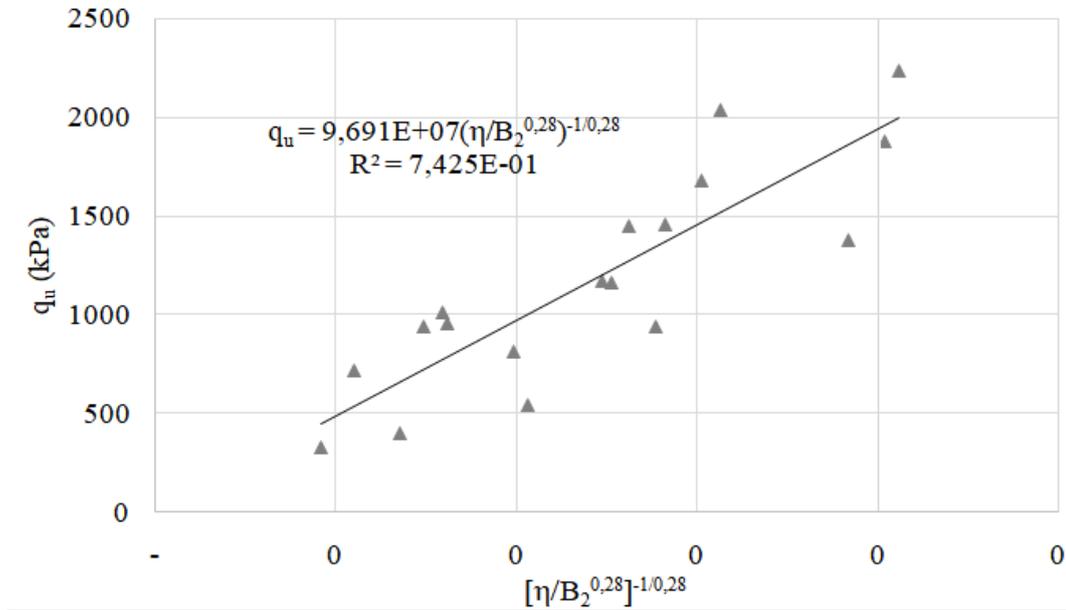


Figura 5.2.1.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,74$$

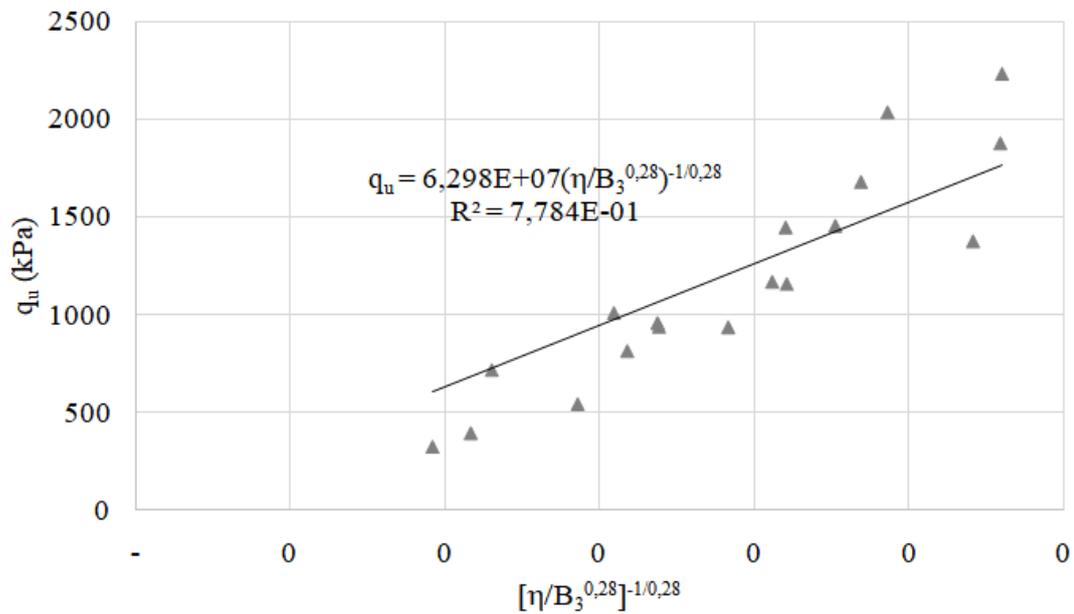


Figura 5.2.1.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,78$$

Observa-se que B₃ apresentou um maior valor de R² do que B₂, mostrando uma maior correlação se for considerada a mistura do conjunto ‘cimento + vidro moído + bentonita’ no tratamento estatístico do que apenas ‘cimento + vidro moído’. Tal fato ocorre pois o cimento reage em parte com o vidro moído e em parte com a bentonita, apresentando uma maior relevância de B₃ na interpretação dos resultados.

5.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (q_t)

Na Tabela 5.2.2 abaixo, o resumo da média dos resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral para cada dosagem estabelecida.

Vidro Moído (%)	Massa específica (g/cm ³)	Resistência à Compressão Diametral (kPa)		
		Cimentante		
		5%	8%	11%
10	1,2		73,71	
	1,3		140,94	
	1,4	165,16	195,15	214,57
20	1,2		80,44	
	1,3		144,64	
	1,4	172,38	202,67	227,3
30	1,2		100,19	
	1,3		151,52	
	1,4	215,85	224,52	272,62

Tabela 5.2.2 - Média dos resultados dos ensaios de compressão diametral (Fonte: autor)

Os itens de 5.2.2.4 ao 5.2.2.8 se resumirão aos resultados experimentais obtidos, visto que a explanação completa envolvendo os efeitos e relações obtidas nas amostras é a mesma que ocorre para os ensaios de compressão simples, realizada em tal seção.

5.2.2.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA

Na Figura 5.2.2.1, tem-se a variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com o aumento da massa específica (γ_d). Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para o mesmo teor de cimento de 8%.

Observa-se que o aumento da massa específica de 1,2 para 1,4 g/cm³ exerce influência na resistência do material independentemente das outras variáveis, obtendo-se ganhos de resistência da magnitude de 100%.

Também é possível observar que a taxa de aumento de resistência devido ao aumento da massa específica foi similar para todas as amostras, independentemente do teor de vidro moído. Os maiores valores de resistência para cada massa específica foram obtidos na amostra contendo o maior teor de vidro moído.

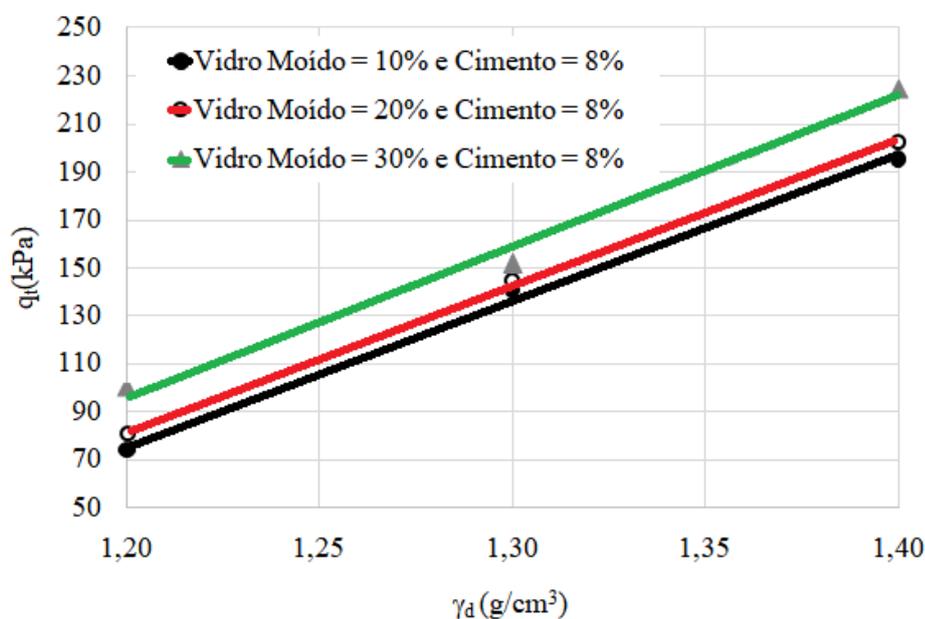


Figura 5.2.2.1 – Efeito da massa específica na q_t

5.2.2.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CIMENTO

Na Figura 5.2.2.2, é apresentada a variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) em relação ao teor de cimento apresentado pela mistura. Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para a mesma massa específica de 1,4 g/cm³.

Observa-se um aumento de resistência com o aumento do teor de cimento, com uma taxa de aumento similar para todas as misturas. Porém, esse ganho de resistência não se mostrou substancial como nos outros ensaios, estando a magnitude do aumento em torno de 25%.

A mistura que apresentou os maiores valores de resistência foi aquela com o maior teor de vidro moído. Já as misturas contendo 10 e 20% de vidro moído apresentaram resultados semelhantes.

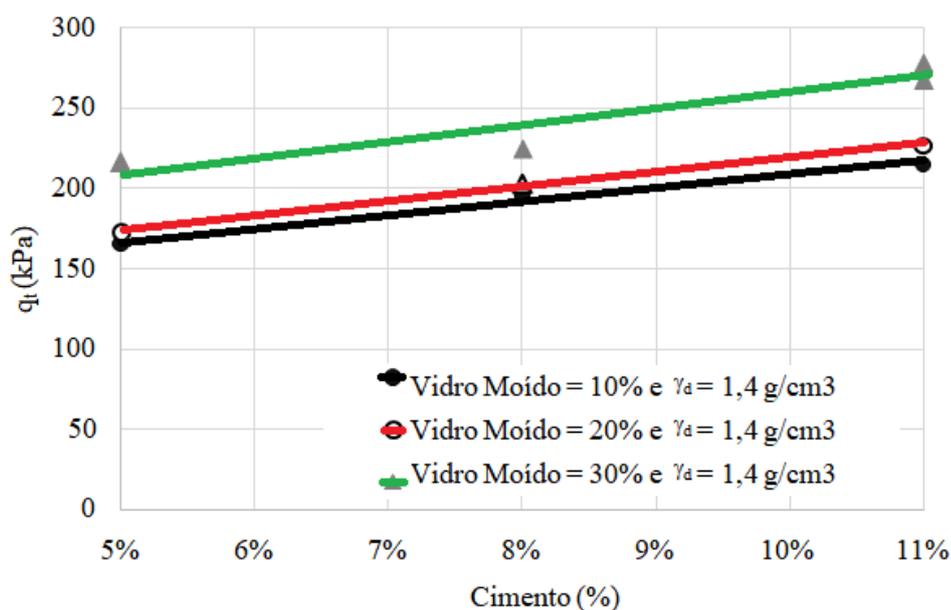


Figura 5.2.2.2 – Efeito do teor de cimento na q_t

5.2.2.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO

Na Figura 5.2.2.3, é apresentada a variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) em relação ao teor de vidro moído para diferentes teores de cimento e massas específicas. Nota-se que o aumento do teor de vidro moído apresentou influência para todos os teores de cimento e massas específicas, sendo este ganho mais acentuado na amostra de maior teor de cimento juntamente com a maior massa específica.

Também é possível observar que, para essa situação, os maiores valores de resistência foram obtidos para as amostras que apresentavam a maior massa específica.

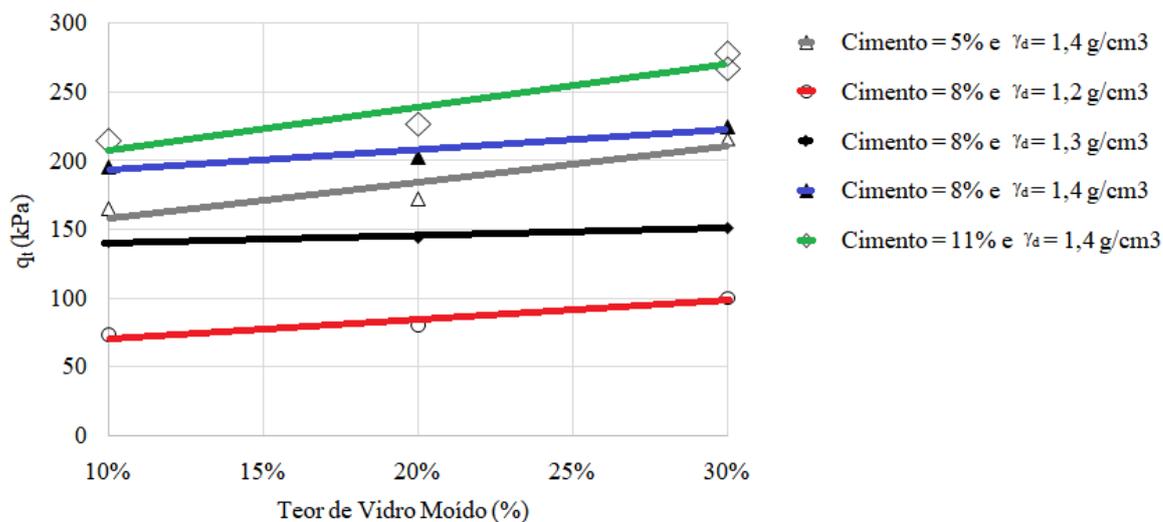


Figura 5.2.2.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_t

5.2.2.4 EFEITO DA POROSIDADE

Na Figura 5.2.2.4, tem-se a variação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) em relação à porosidade (η) para diferentes teores de vidro moído. Cada curva difere apenas no teor de vidro moído, estando juntos na mesma curva todos os pesos específicos e teores de cimento diferentes para o mesmo teor de vidro moído.

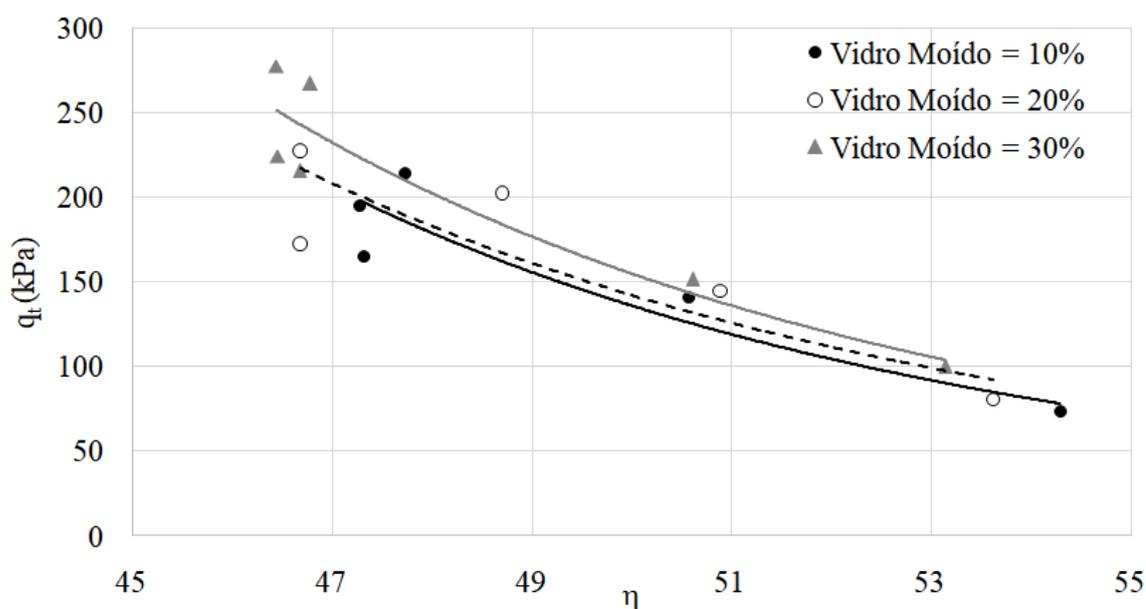


Figura 5.2.2.4 – Efeito da porosidade na q_t

5.2.2.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO

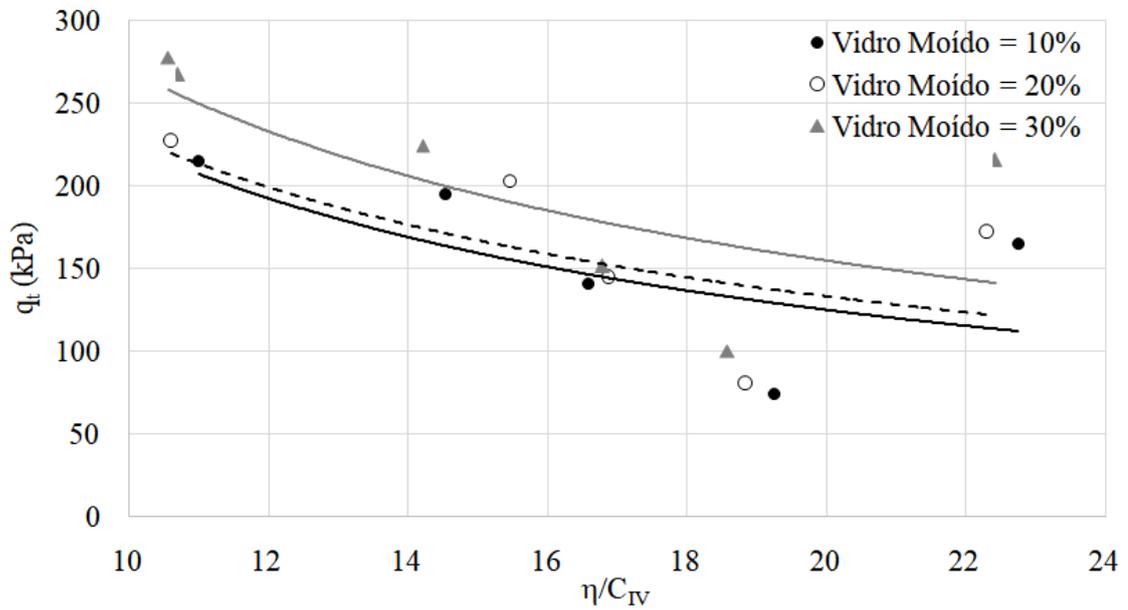


Figura 5.2.2.5 – $q_t \times \eta/C_{IV}$

O aumento da η e $(1/C_{i_v})$ resulta na redução da resistência à tração por compressão diametral.

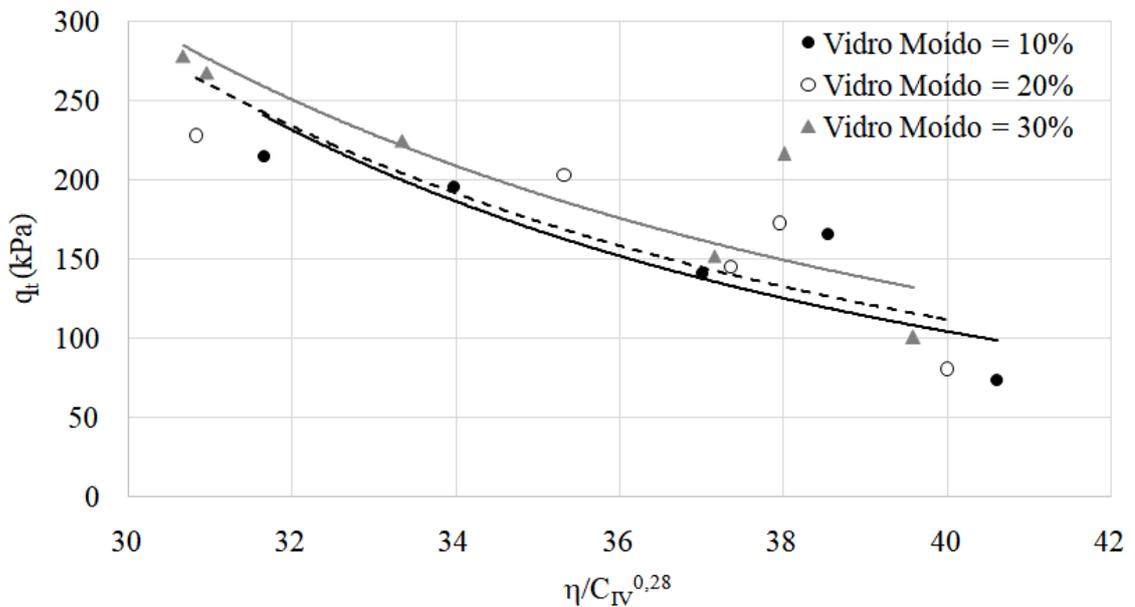


Figura 5.2.2.6 – $q_t \times \eta/(C_{i_v}^{0,28})$

5.2.2.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com o fator porosidade/teor volumétrico de cimentante, onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_2 (teor volumétrico de cimento + vidro moído).

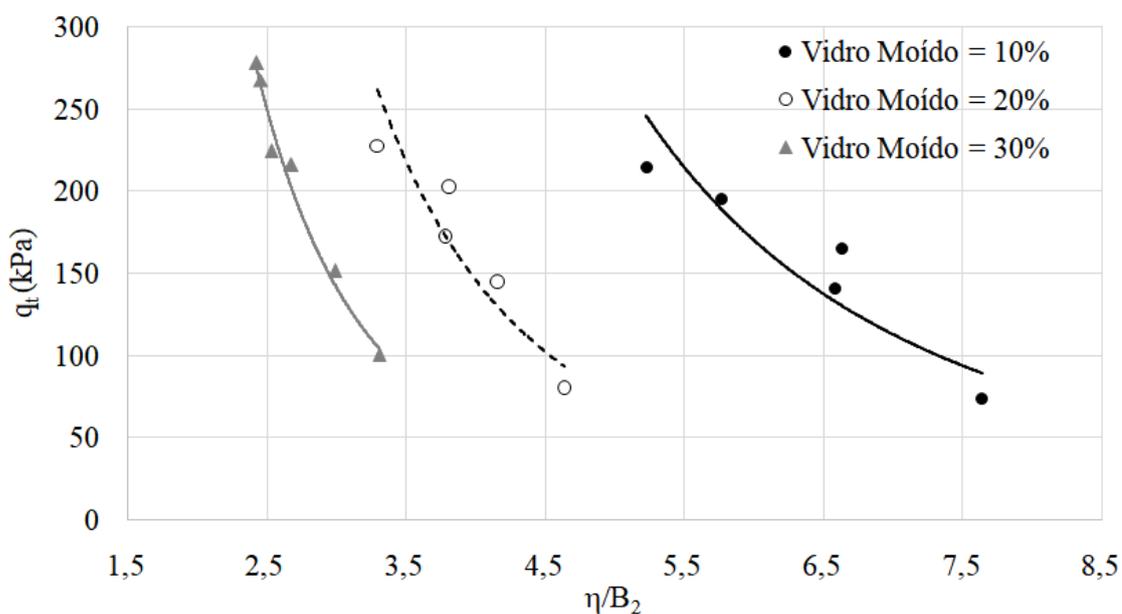


Figura 5.2.2.7 – $q_t \times \eta/B_2$

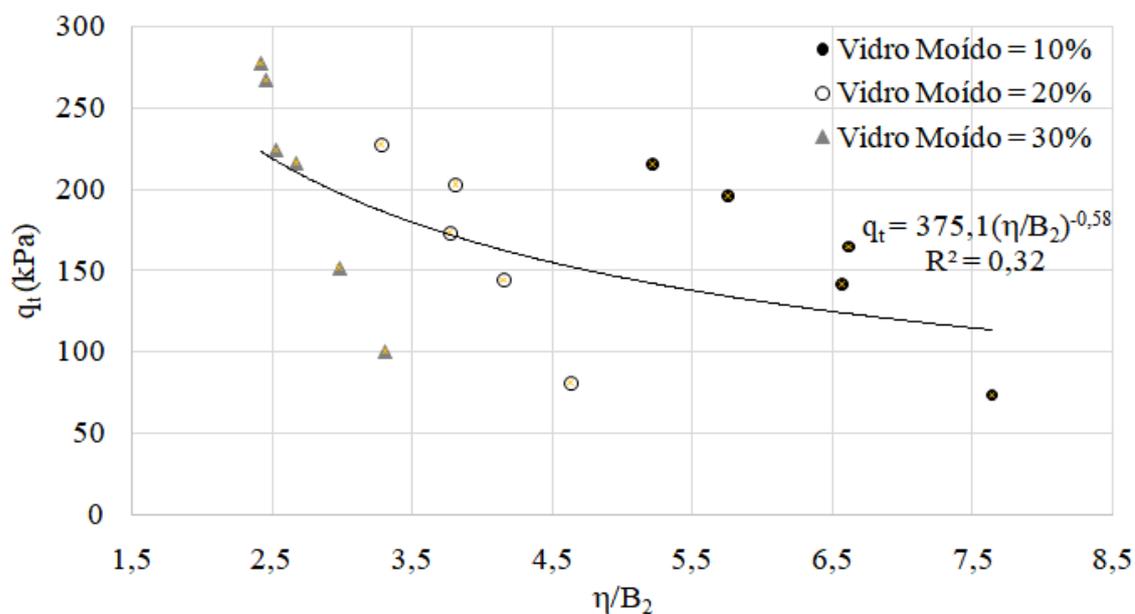


Figura 5.2.2.8 – $q_t \times \eta/B_2$ ajustados para a mesma curva

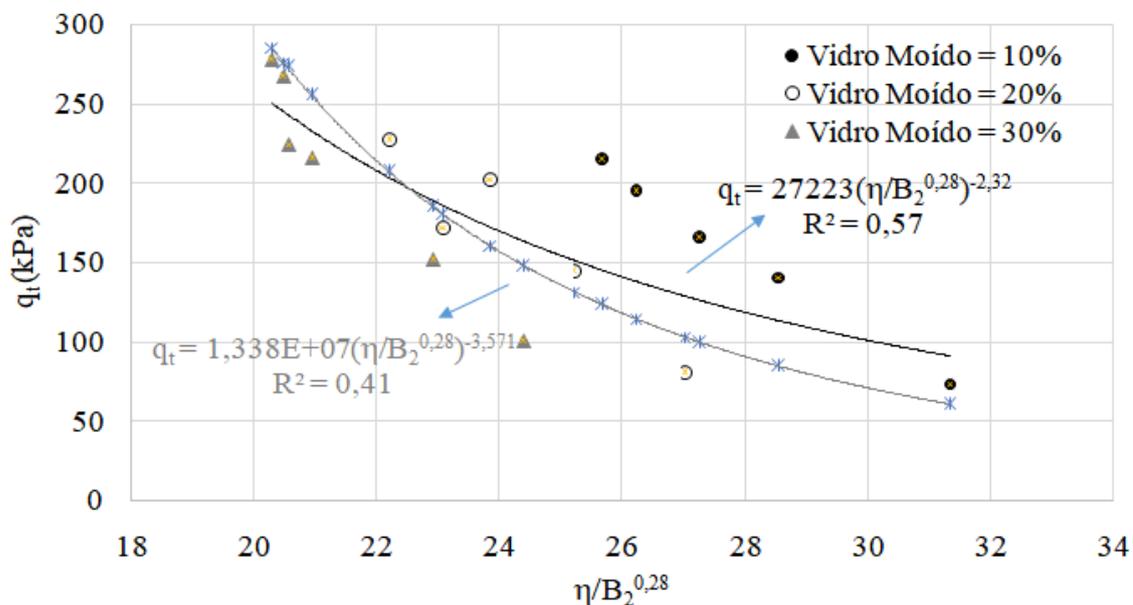


Figura 5.2.2.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da resistência á tração por compressão diametral com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

5.2.2.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à tração por compressão diametral (q_t) com o fator porosidade/teor volumétrico de cimentante, onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_3 (teor volumétrico de cimento + vidro moído + bentonita).

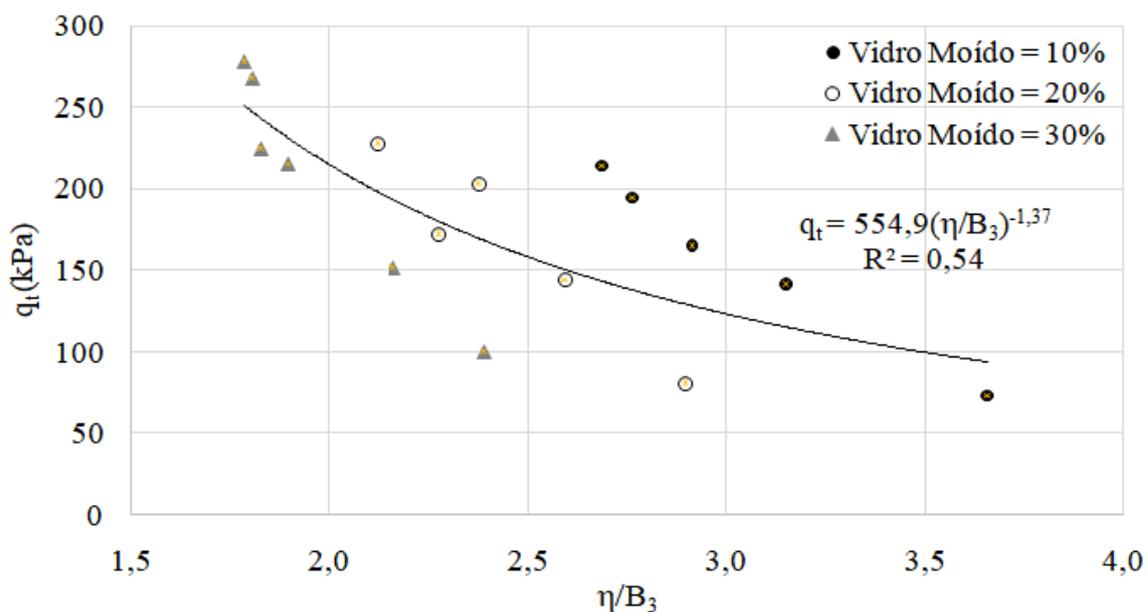


Figura 5.2.2.10 - η/B_3

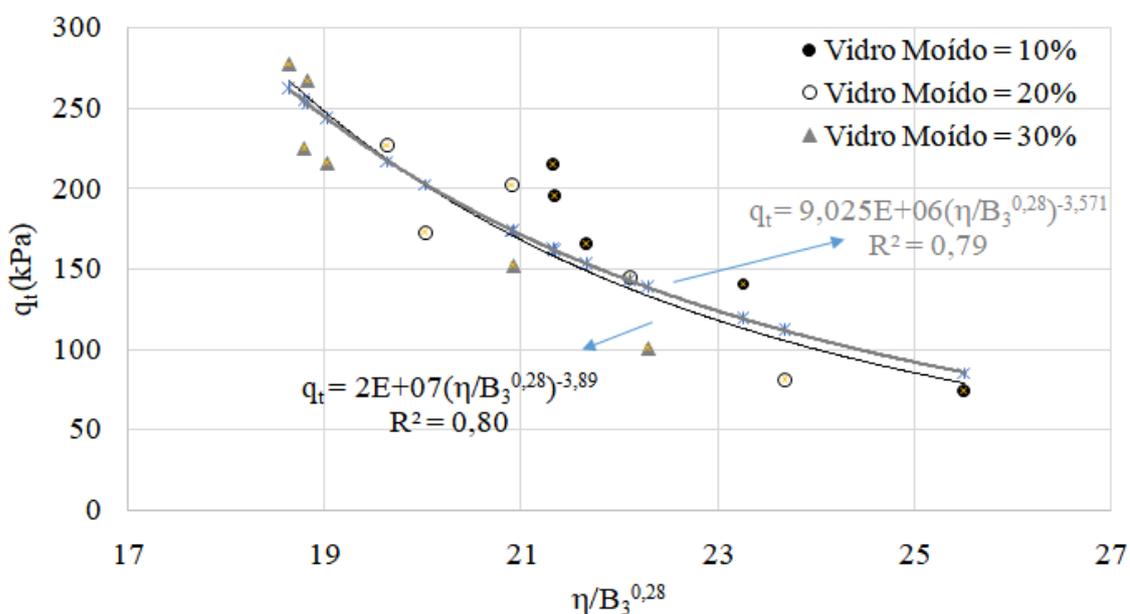


Figura 5.2.2.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da resistência à tração por compressão diametral com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

5.2.2.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

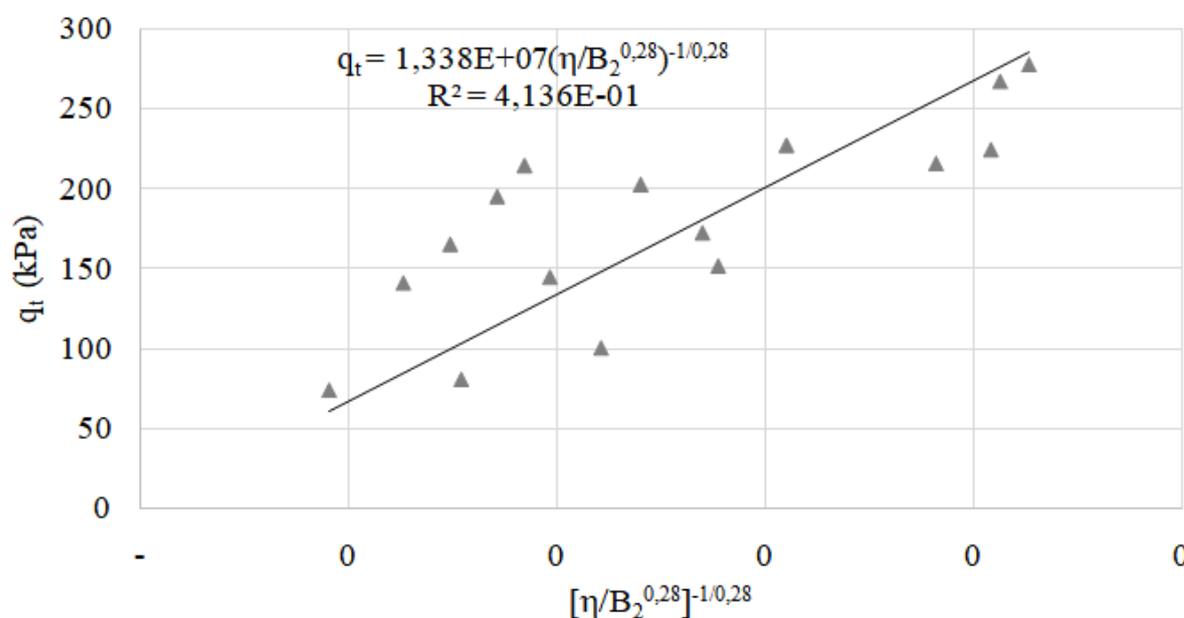


Figura 5.2.2.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,41$$

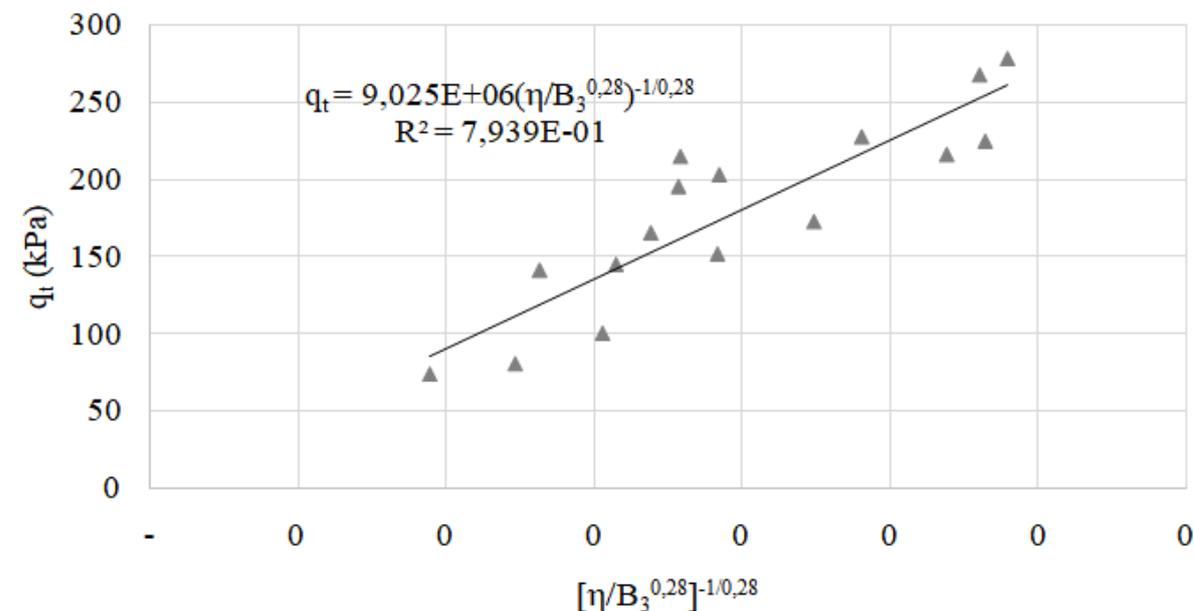


Figura 5.2.2.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,79$$

Observa-se que B_3 apresentou um maior valor de R^2 do que B_2 , mostrando uma maior correlação se for considerada a mistura do conjunto ‘cimento + vidro moído + bentonita’ no tratamento estatístico do que apenas ‘cimento + vidro moído’. Tal fato ocorre pois o cimento reage em parte com o vidro moído e em parte com a bentonita, apresentando uma maior relevância de B_3 na interpretação dos resultados.

5.2.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO (q_f)

Na Tabela 5.2.3 abaixo, o resumo da média dos resultados obtidos nos ensaios de tração por flexão para cada dosagem estabelecida.

Vidro Moído (%)	Massa específica (g/cm ³)	Resistência à Tração por Flexão (kPa)		
		Cimentante		
		5%	8%	11%
10	1,2		93,49	
	1,3		159,75	
	1,4	130,98	229,55	307,52
20	1,2		113,18	
	1,3		174,64	
	1,4	204,04	241,45	356,36
30	1,2		97,83	
	1,3		169,82	
	1,4	219,85	280,57	414,35

Tabela 5.2.3 - Média dos resultados dos ensaios de tração por flexão (Fonte: autor)

Os itens de 5.2.3.4 ao 5.2.3.8 se resumirão aos resultados experimentais obtidos, visto que a explanação completa envolvendo os efeitos e relações obtidas nas amostras é a mesma que ocorre para os ensaios de compressão simples, realizada em tal seção.

5.2.3.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA

Na Figura 5.2.3.1, tem-se a variação da resistência à tração por flexão (q_f) com o aumento da massa específica (γ_d). Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para o mesmo teor de cimento de 8%.

Observa-se que o aumento da massa específica de 1,2 para 1,4 g/cm³ exerce influência na resistência do material independentemente das outras variáveis, obtendo-se ganhos de resistência da magnitude de 150%.

Também é possível observar que para essa situação em específico, tanto a taxa de aumento de resistência quanto os valores de resistência são similares independentemente do teor de vidro moído presente na mistura.

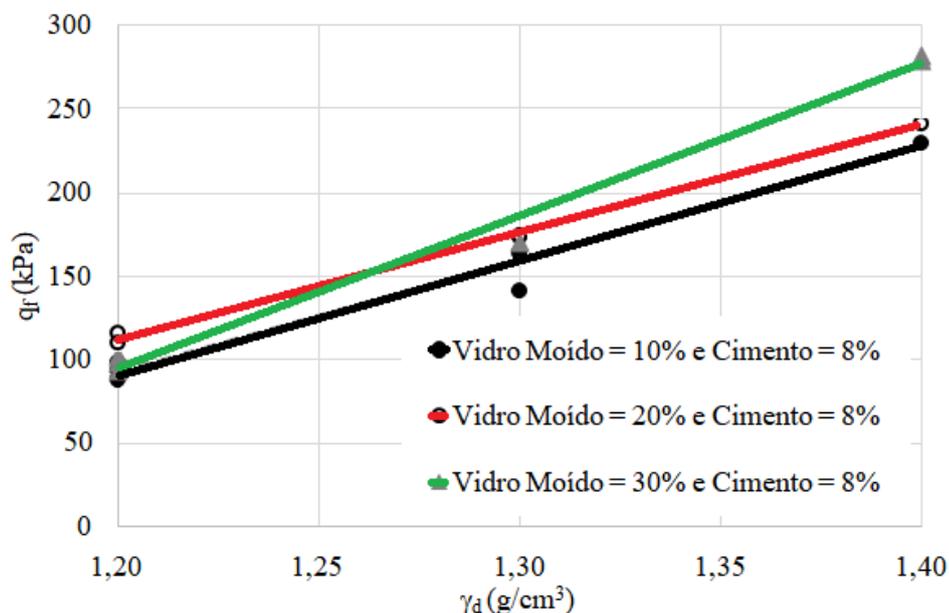


Figura 5.2.3.1 – Efeito da massa específica na q_f

5.2.3.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CIMENTO

Na Figura 5.2.3.2, é apresentada a variação da resistência à tração por flexão (q_f) em relação ao teor de cimento apresentado pela mistura. Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para a mesma massa específica de 1,4 g/cm³.

Observa-se um aumento de resistência com o aumento do teor de cimento, com uma taxa de aumento similar para todas as misturas, chegando a atingir valores próximos a 100%.

A mistura que apresentou os maiores valores de resistência foi aquela com o maior teor de vidro moído, seguida da mistura com 20% de teor de vidro moído. Já a mistura contendo 10% de teor de vidro moído foi a que apresentou os valores mais baixos.

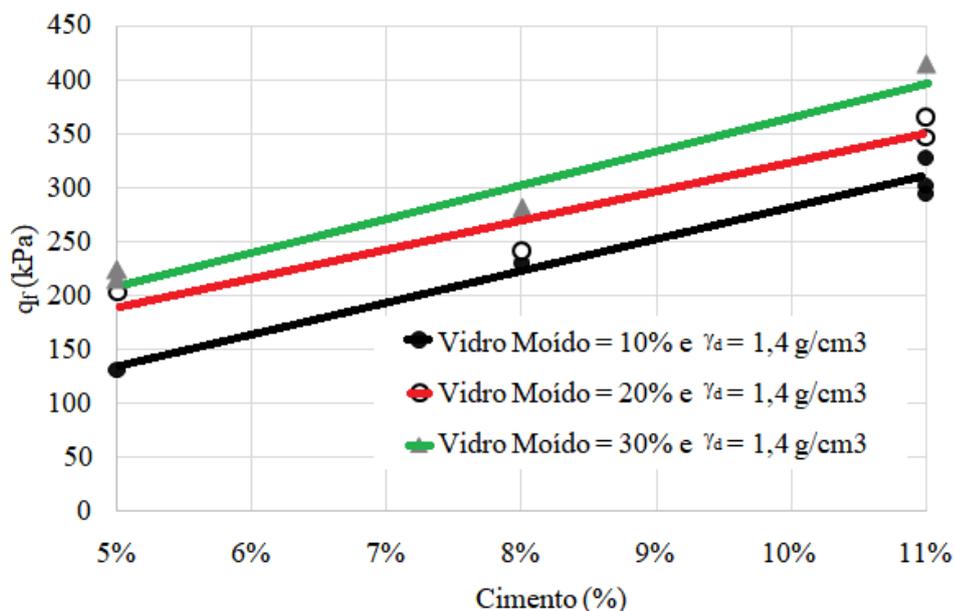


Figura 5.2.3.2 – Efeito do teor de cimento na q_{fr}

5.2.3.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO

Na Figura 5.2.3.3, é apresentada a variação da resistência à tração por flexão (q_f) em relação ao teor de vidro moído para diferentes teores de cimento e pesos específicos. Nota-se que o aumento do teor de vidro moído não apresentou influência para as misturas com massas específicas de $1,2$ e $1,3 \text{ g/cm}^3$.

Já para as amostras de $1,4 \text{ g/cm}^3$, o teor de vidro moído apresentou uma taxa de aumento de resistência semelhante, sendo os maiores valores de resistência obtidos com as misturas que apresentavam o maior teor de cimento, seguidas das misturas com 8% de teor de cimento e, por fim, das misturas com 5% de cimento.

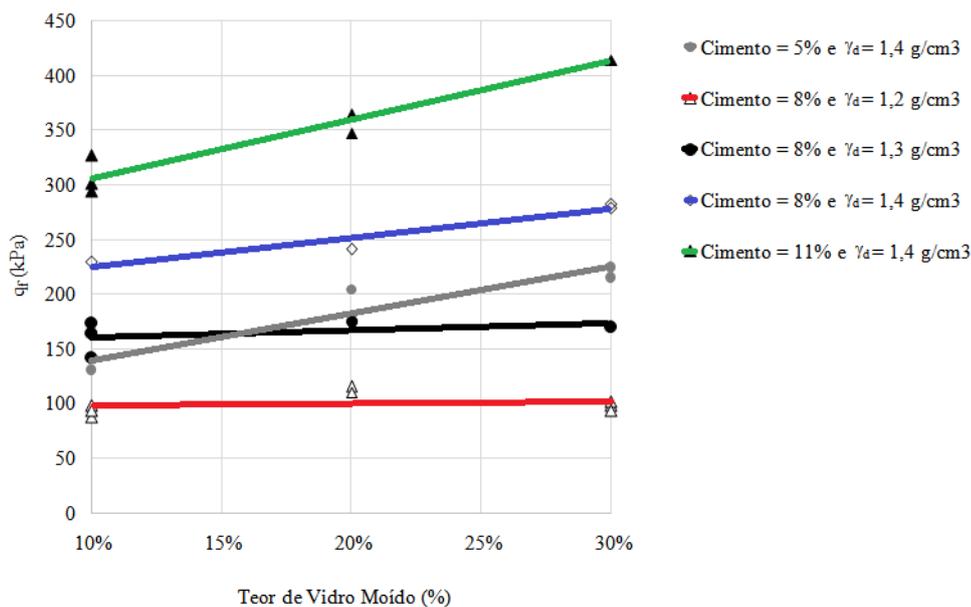


Figura 5.2.3.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_f

5.2.3.4 EFEITO DA POROSIDADE

Na Figura 5.2.3.4, tem-se a variação da resistência à tração por flexão (q_f) em relação à porosidade (η) para diferentes teores de vidro moído. Cada curva difere apenas no teor de vidro moído, estando juntos na mesma curva todos os pesos específicos e teores de cimento diferentes para o mesmo teor de vidro moído.

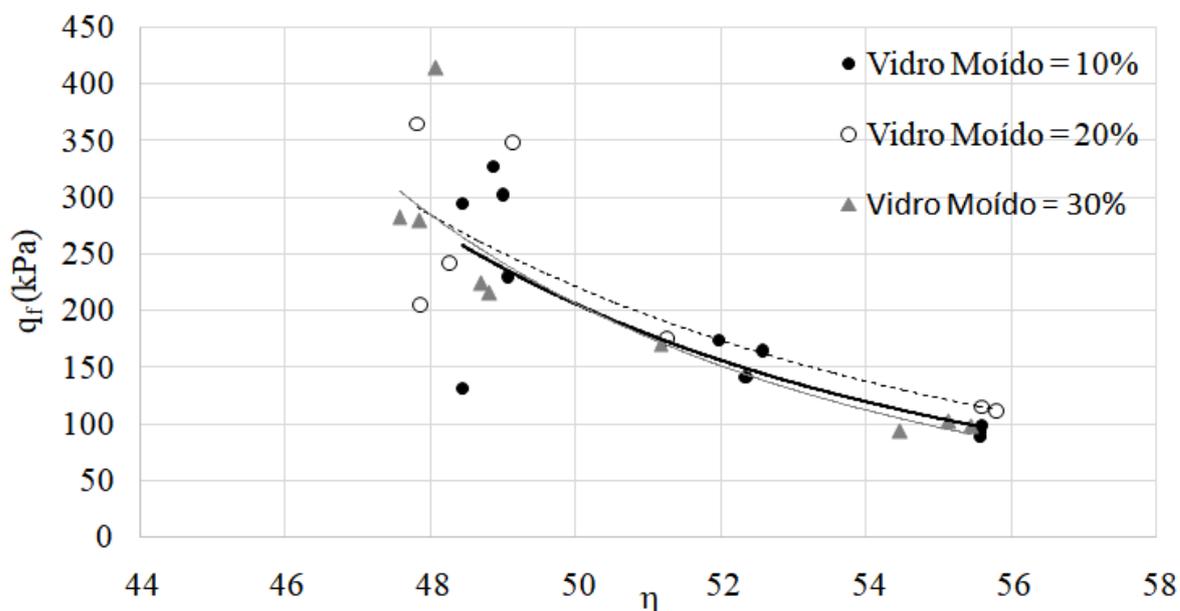


Figura 5.2.3.4 – Efeito da porosidade na q_f

5.2.3.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO

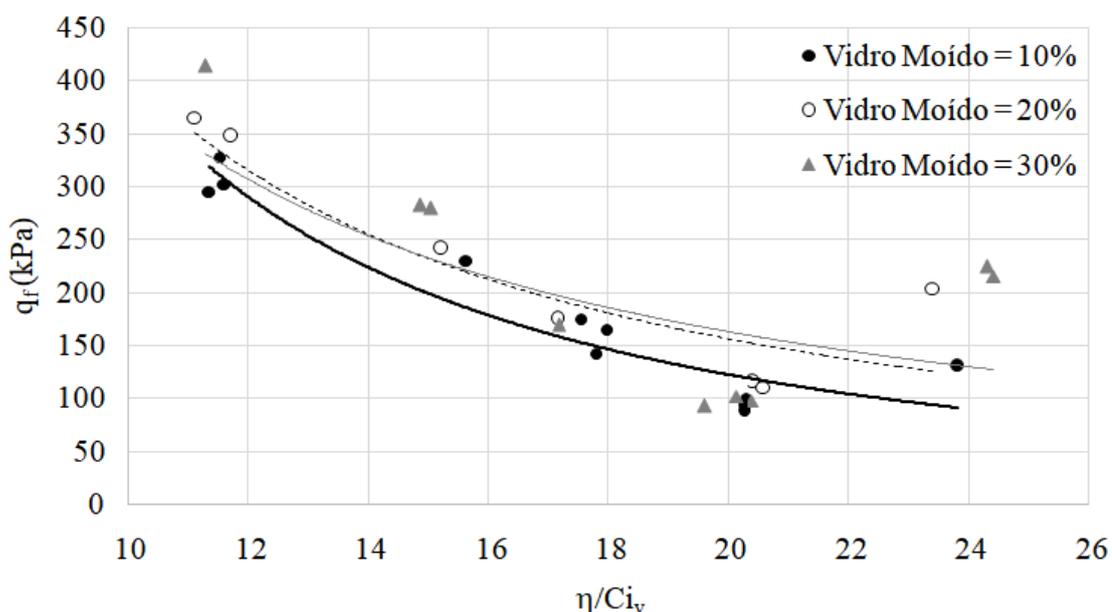


Figura 5.2.3.5 – $q_f \times \eta/Civ$

O aumento da η e $(1/Civ)$ resulta na redução da resistência à tração por flexão.

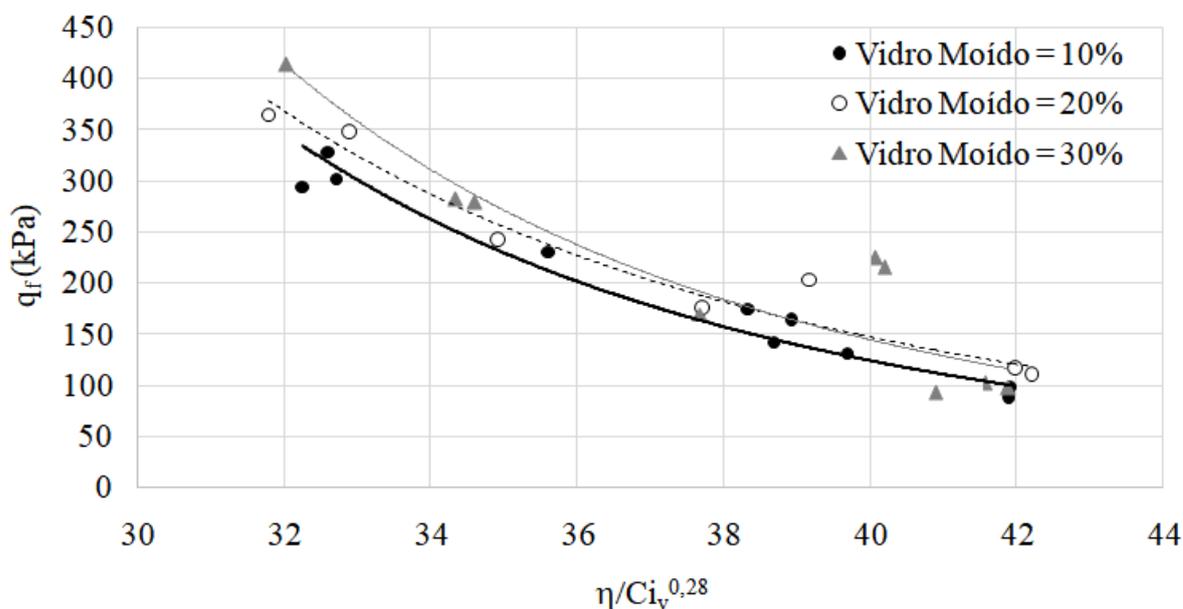


Figura 5.2.3.6 – $q_f \times \eta/(Civ^{0,28})$

5.2.3.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à tração por flexão (q_f) com o fator porosidade/(teor volumétrico de cimentante), onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_2 (teor volumétrico de cimento + vidro moído).

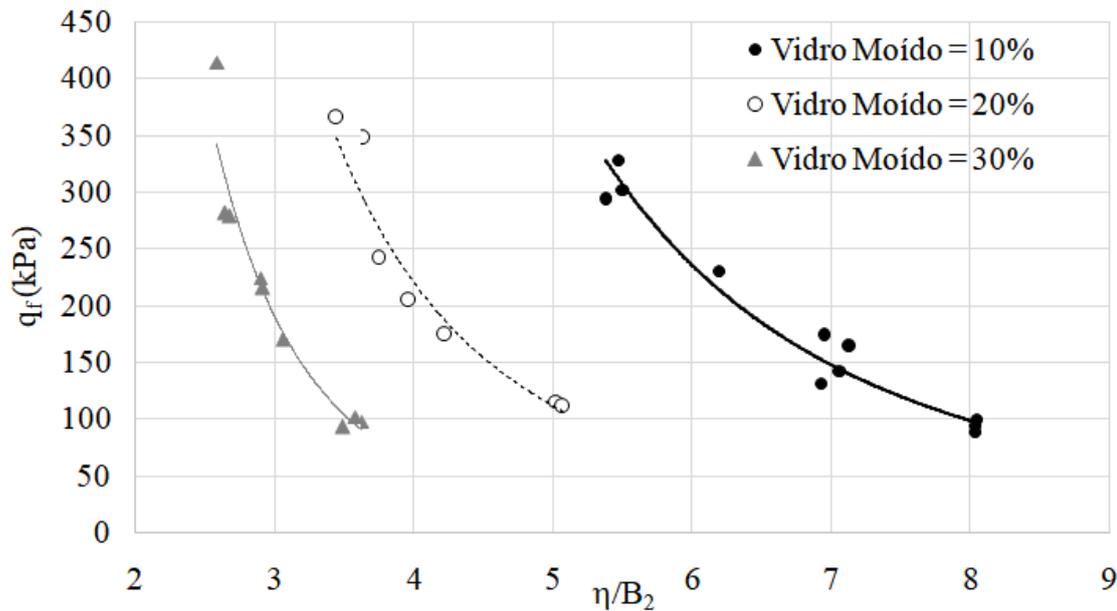


Figura 5.2.3.7 – $q_f \times \eta/B_2$

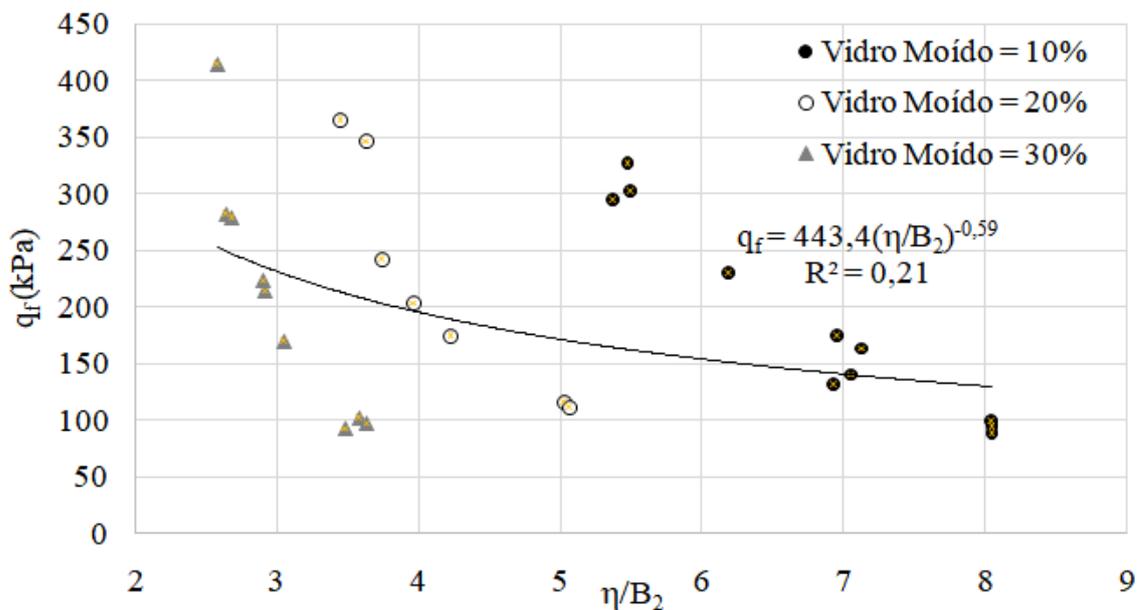


Figura 5.2.3.8 – $q_f \times \eta/B_2$ ajustados para a mesma curva

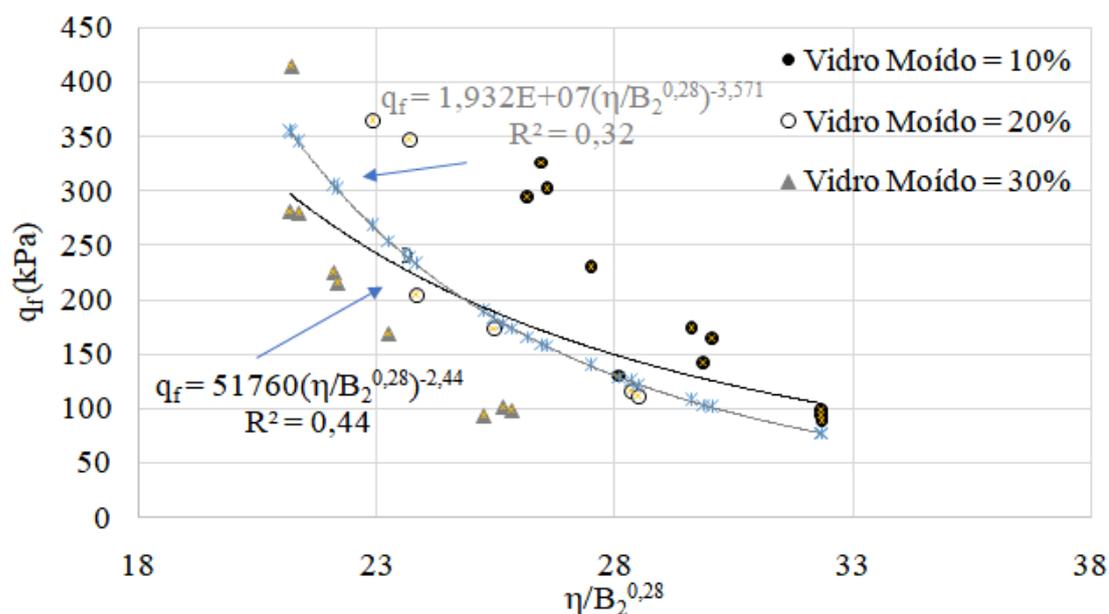


Figura 5.2.3.9 - $\eta/(B_2^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da resistência á tração por flexão com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

5.2.3.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à tração por flexão (q_f) com o fator porosidade/(teor volumétrico de cimentante), onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_3 (teor volumétrico de cimento + vidro moído + bentonita).

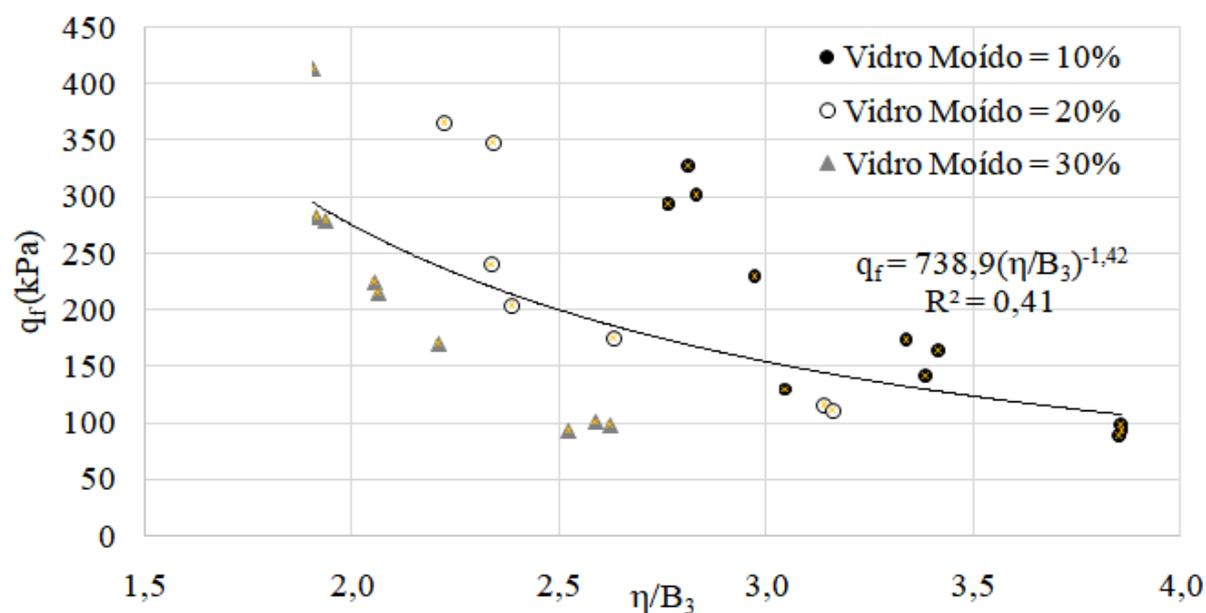


Figura 5.2.3.10 - η/B_3

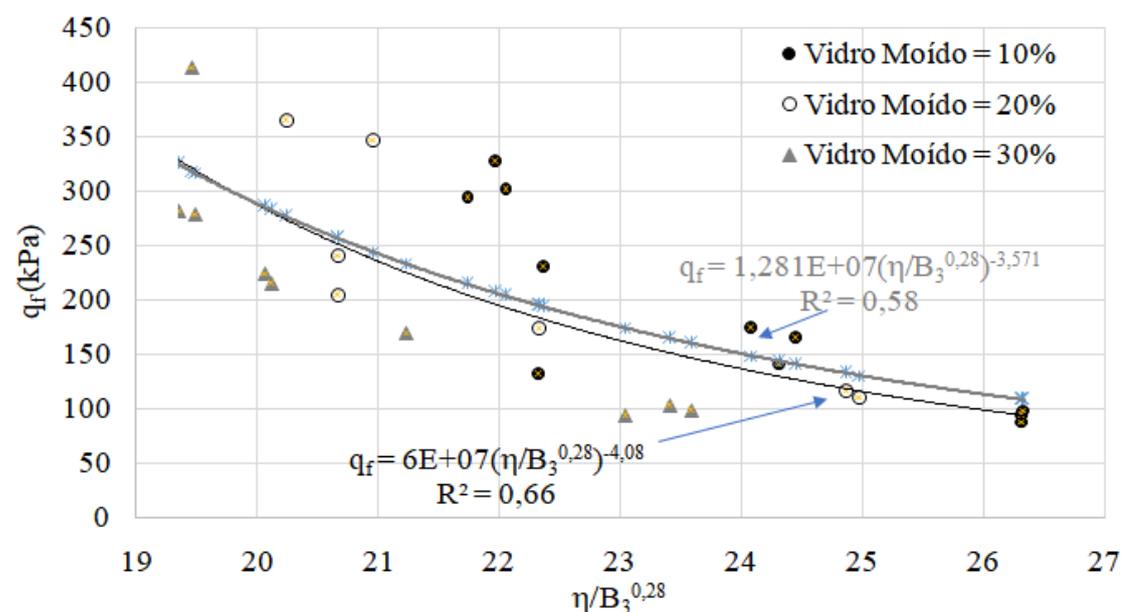


Figura 5.2.3.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da resistência á tração por flexão com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

5.2.3.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CIMENTO + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

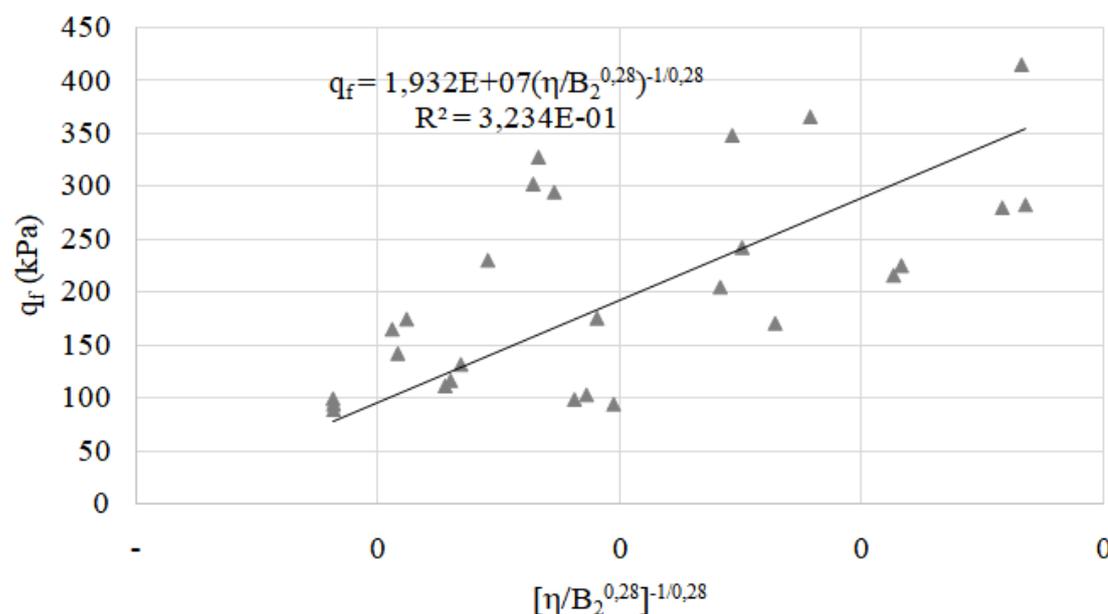


Figura 5.2.3.12 – $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,32$$

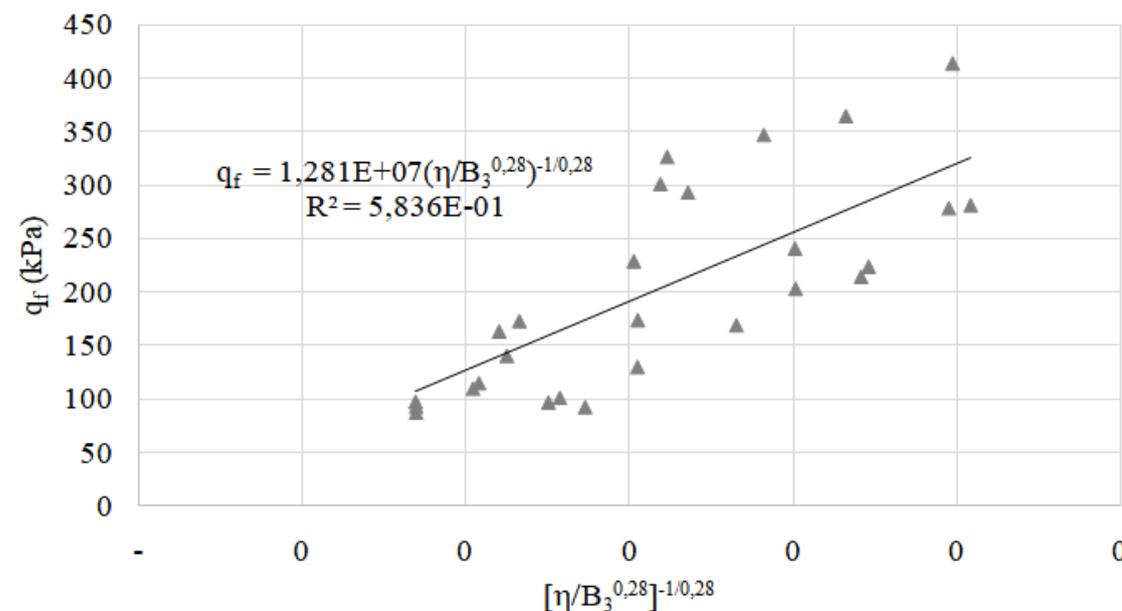


Figura 5.2.3.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,58$$

Observa-se que B_3 apresentou um maior valor de R^2 do que B_2 , mostrando uma maior correlação se for considerada a mistura do conjunto ‘cimento + vidro moído + bentonita’ no tratamento estatístico do que apenas ‘cimento + vidro moído’. Tal fato ocorre pois o cimento reage em parte com o vidro moído e em parte com a bentonita, apresentando uma maior relevância de B_3 na interpretação dos resultados.

5.3 RELAÇÃO ENTRE COMPRESSÃO DIAMETRAL E COMPRESSÃO SIMPLES (q_t/q_u)

5.3.1 CAL

Para os corpos de prova contendo areia fina, bentonita, vidro moído e cal de carbureto foram encontradas as seguintes equações de resistência e sua relação:

$$q_t = 9,646 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\eta}{B_2^{0,28}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,79$$

$$q_u = 6,421 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{3^{0,28}}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,83$$

$$\frac{q_t}{q_u} = 0,15$$

5.3.2 CIMENTO

Para os corpos de prova contendo areia fina, bentonita, vidro moído e cal de carbureto foram encontradas as seguintes equações de resistência e sua relação:

$$q_t = 9,025 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{3^{0,28}}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,79$$

$$q_u = 6,298 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{3^{0,28}}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,78$$

$$\frac{q_t}{q_u} = 0,14$$

Valor muito próximo do encontrado por Consoli et al. (2010) ao estudar uma areia cimentada, o qual foi 0,15.

5.4 RELAÇÃO ENTRE TRAÇÃO À FLEXÃO E COMPRESSÃO SIMPLES (q_t/q_u)

5.4.1 CAL

Para os corpos de prova contendo areia fina, bentonita, vidro moído e cal de carbureto foram encontradas as seguintes equações de resistência e sua relação:

$$q_f = 2,832 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{30,28}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,70$$

$$q_u = 6,421 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{30,28}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,83$$

$$\frac{q_f}{q_u} = 0,4411$$

5.4.2 CIMENTO

Para os corpos de prova contendo areia fina, bentonita, vidro moído e cimento foram encontradas as seguintes equações de resistência e sua relação:

$$q_f = 1,281 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{30,28}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,58$$

$$q_u = 6,298 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{30,28}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,78$$

$$\frac{q_f}{q_u} = 0,2034$$

5.5 RELAÇÃO ENTRE TRAÇÃO POR FLEXÃO E COMPRESSÃO DIAMETRAL (q_f/q_t)

5.5.1 CAL

Para os corpos de prova contendo areia fina, bentonita, vidro moído e cal de carbureto foram encontradas as seguintes equações de resistência e sua relação:

$$q_t = 9,646 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{20,28}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,79$$

$$q_f = 2,832 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{30,28}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,70$$

$$\frac{q_t}{q_f} = 0,3406$$

5.5.2 CIMENTO

Para os corpos de prova contendo areia fina, bentonita, vidro moído e cimento foram encontradas as seguintes equações de resistência e sua relação:

$$q_t = 9,025 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{30,28}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,79$$

$$q_f = 1,281 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\eta}{B_{30,28}}\right)^{-3,571}$$

$$R^2 = 0,58$$

$$\frac{q_t}{q_f} = 0,7045$$

6 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A fim de se comprovar a influência das variáveis (teor de cimentante, massa específica e teor de vidro moído) no resultado dos ensaios de resistência, optou-se por utilizar o método de regressão linear múltipla. Os resultados obtidos seguem abaixo.

6.1 AMOSTRAS COM CAL DE CARBURETO

Neste item, se analisou somente os resultados obtidos com o processo de cura de 7 dias a 24 °C + 7 dias a 40 °C.

6.1.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

Utilizando a regressão linear múltipla para os resultados obtidos através deste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados:

ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO	
R múltiplo	0,953036743
R-Quadrado	0,908279034
R-quadrado ajustado	0,892092982
Erro padrão	155,9114663
Observações	21

Figura 6.1.1 – Estatística de regressão

O valor de R^2 -ajustado foi considerado adequado, obtendo-se uma boa correlação dos resultados.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	4092189,2	1364063,067	56,11491869	4,98872E-09
Resíduo	17	413242,5507	24308,38533		
Total	20	4505431,75			

Figura 6.1.2 – ANOVA

	Coefficientes	Stat t	valor-P
Interseção	-5968,40353	-8,965449704	7,48382E-08
Cal (%)	4889,95102	2,975416094	0,008487822
Vidro (%)	3894,518814	8,804208874	9,67375E-08
γ_d (g/cm ³)	4678,266156	9,956975133	1,64923E-08

Figura 6.1.3 – Resumo dos resultados

Através dos valores-P, observa-se que todas as variáveis nesse ensaio foram significativas (valor-P < 0,005), para 95% de significância, indicando que a cal de carbureto, vidro moído e a massa específica exercem influência na resistência à compressão simples.

6.1.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Utilizando a regressão linear múltipla para os resultados obtidos através deste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados:

ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO	
R múltiplo	0,928843914
R-Quadrado	0,862751016
R-quadrado ajustado	0,82843877
Erro padrão	29,27729203
Observações	16

Figura 6.1.4 – Estatística de Regressão

O valor de R²-ajustado foi considerado adequado, obtendo-se uma boa correlação dos resultados.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	64657,57252	21552,52417	25,14411368	1,84125E-05
Resíduo	12	10285,91794	857,1598287		
Total	15	74943,49047			

Figura 6.1.5 – ANOVA

	Coefficientes	Stat t	valor-P
Interseção	-897,6288466	-6,809504985	1,8773E-05
Cal (%)	1236,534557	3,329654841	0,006001934
Vidro (%)	420,9153438	4,546360323	0,000670397
γ_d (g/cm ³)	634,7816535	6,819195512	1,85157E-05

Figura 6.1.6 – Resumo dos resultados

Através dos valores-P, observa-se que todas as variáveis nesse ensaio foram significativas (valor-P < 0,005), para 95% de significância, indicando que a cal de carbureto, vidro moído e a massa específica exercem influência na resistência à tração por compressão diametral.

6.1.3 ENSAIO DE FLEXÃO

Utilizando a regressão linear múltipla para os resultados obtidos através deste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados:

ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO	
R múltiplo	0,922683645
R-Quadrado	0,851345109
R-quadrado ajustado	0,834827898
Erro padrão	92,22974234
Observações	31

Figura 6.1.7 – Estatística de Regressão

O valor de R²-ajustado foi considerado adequado, obtendo-se uma boa correlação dos resultados.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	1315322,339	438440,7795	51,54291193	2,63913E-11
Resíduo	27	229670,785	8506,325372		
Total	30	1544993,124			

Figura 6.1.8 – ANOVA

	Coefficientes	Stat t	valor-P
Interseção	-2545,337761	-8,685563145	2,66432E-09
Cal (%)	6381,869295	7,454785845	5,09623E-08
Vidro (%)	1255,025195	5,898998571	2,76193E-06
γ_d (g/cm ³)	1718,108738	8,169226811	8,97002E-09

Figura 6.1.9 – Resumo dos resultados

Através dos valores-P, observa-se que todas as variáveis nesse ensaio foram significativas, (valor-P < 0,005), para 95% de significância, indicando que a cal de carbureto, vidro moído e a massa específica exercem influência na resistência à tração por flexão.

6.2 AMOSTRAS COM CIMENTO

6.2.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

Utilizando a regressão linear múltipla para os resultados obtidos através deste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados:

ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO	
R múltiplo	0,943644071
R-Quadrado	0,890464133
R-quadrado ajustado	0,866992162
Erro padrão	199,0496709
Observações	18

Figura 6.1.10 – Estatística de Regressão

O valor de R²-ajustado foi considerado adequado, obtendo-se uma boa correlação dos resultados.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	4509319,883	1503106,628	37,93733872	5,6523E-07
Resíduo	14	554690,8006	39620,77147		
Total	17	5064010,684			

Figura 6.1.11 – ANOVA

	Coefficientes	Stat t	valor-P
Interseção	-7330,179265	-8,515573415	6,57062E-07
Cimento (%)	9658,713288	4,117409469	0,001045973
Vidro (%)	3018,40086	4,795296354	0,000285074
γ_d (g/cm ³)	5279,386835	8,594421929	5,88863E-07

Figura 6.1.12 – Resumo dos resultados

Através dos valores-P, observa-se que todas as variáveis nesse ensaio foram significativas, (valor-P < 0,005), para 95% de significância, indicando que o cimento, vidro moído e a massa específica exercem influência na resistência à compressão simples.

6.2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Utilizando a regressão linear múltipla para os resultados obtidos através deste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados:

ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO	
R múltiplo	0,986178093
R-Quadrado	0,972547231
R-quadrado ajustado	0,965684038
Erro padrão	11,32444393
Observações	16

Figura 6.1.13 – Estatística de Regressão

O valor de R²-ajustado foi considerado adequado, obtendo-se uma boa correlação dos resultados.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	4509319,883	1503106,628	37,93733872	5,6523E-07
Resíduo	14	554690,8006	39620,77147		
Total	17	5064010,684			

Figura 6.1.14 – ANOVA

	Coefficientes	Stat t	valor-P
Interseção	-795,5346599	-16,16108202	1,65211E-09
Cimento (%)	969,6878122	6,71368497	2,15327E-05
Vidro (%)	188,6286715	5,470648979	0,000142835
γ_d (g/cm ³)	636,7477376	17,66481531	5,91248E-10

Figura 6.1.15 – Resumo dos resultados

Através dos valores-P, observa-se que todas as variáveis nesse ensaio foram significativas, (valor-P < 0,005), para 95% de significância, indicando que o cimento, vidro moído e a massa específica exercem influência na resistência à tração por compressão diametral.

6.2.3 ENSAIO DE FLEXÃO

Utilizando a regressão linear múltipla para os resultados obtidos através deste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados:

ESTATÍSTICA DE REGRESSÃO	
R múltiplo	0,976344024
R-Quadrado	0,953247653
R-quadrado ajustado	0,947149521
Erro padrão	22,02890655
Observações	27

Figura 6.1.16 – Estatística de Regressão

O valor de R²-ajustado foi considerado adequado, obtendo-se uma boa correlação dos resultados.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	3	227570,5423	75856,84744	156,3179708	1,94877E-15
Resíduo	23	11161,27264	485,2727236		
Total	26	238731,815			

Figura 6.1.17 – ANOVA

	Coeficientes	Stat t	valor-P
Interseção	-1151,708128	-17,37432984	1,01447E-14
Cimento (%)	2719,516541	11,30358835	7,21829E-11
Vidro (%)	220,4977999	4,361549364	0,000228642
γ_d (g/cm ³)	823,3254113	16,87212419	1,89998E-14

Figura 6.1.18 – Resumo dos resultados

Através dos valores-P, observa-se que todas as variáveis nesse ensaio foram significativas, (valor-P < 0,005), para 95% de significância, indicando que o cimento, vidro moído e a massa específica exercem influência na resistência à tração por flexão.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

- O estudo observou que tanto a adição de cal quanto a adição de cimento resultaram num ganho de resistência mecânica da mistura, variando de acordo com o teor adicionado, apresentando valores expressivos quando do uso dos maiores teores de cimentantes;
- O aumento da massa específica resultou em ganhos de resistência de elevados valores independentemente dos teores de cimentante ou vidro moído utilizados na mistura;
- A variação do teor de vidro moído presente na mistura de um modo geral mostrou-se mais eficiente quando aliada da maior massa específica em questão;
- Para todos os tipos de ensaios e misturas, a redução da porosidade conferiu ganhos expressivos de resistência;
- A relação (teor de vazios)/(teor volumétrico de cimentante), através do ajuste dos fatores η/B_2 e η/B_3 se mostrou adequada no que diz respeito à avaliação da resistência das amostras, sendo que o teor volumétrico de 'bentonita + cimentante + vidro moído' (B_3) mostrou-se o mais relevante dentre eles;
- Todas as variáveis em questão exerceram influência, do ponto de vista estatístico, no ganho de resistências mecânica das amostras.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise do efeito de diferentes teores de bentonita na resistência;
- Análise do efeito de diferentes teores de umidade na resistência;
- Análise microscópica dos mecanismos de interação da mistura;
- Obtenção da variável mais significativa na influência das resistências.

8 APÊNDICE

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os processos de cura que se mostraram insatisfatórios no que diz respeito ao ganho da resistência das misturas.

8.1 MISTURAS CURADAS 7 DIAS À TEMPERATURA AMBIENTE

Vale ressaltar que no período de cura em questão a temperatura média ambiente foi de 14 °C.

8.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (q_u)

Considerando tal temperatura (14° C) e tempo de cura, os resultados que foram obtidos apresentaram valores de resistência muito baixos (variando de valores em torno de 20 a 160 kPa). Possivelmente, tal temperatura foi um fator condicionante para limitar as reações químicas. Apesar disso, abaixo são apresentadas as análises dos resultados obtidos.

Os itens de 8.1.1.4 ao 8.1.1.4 se resumirão aos resultados obtidos, visto que a explanação completa envolvendo os efeitos e relações obtidas nas amostras é a mesma que ocorre para os ensaios do capítulo 5.

8.1.1.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA

Na Figura 8.1.1.1, tem-se a variação da resistência à compressão simples (q_u) com o aumento da massa específica (γ_d). Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para o mesmo teor de cal de 8%.

Observa-se que o aumento da massa específica de 1,2 para 1,4 g/cm³ exerce influência na resistência do material independentemente das outras variáveis, obtendo-se ganhos de resistência de até 300%.

Também é possível observar que as amostras com maior teor de vidro moído foram as que obtiveram maior ganho de resistência.

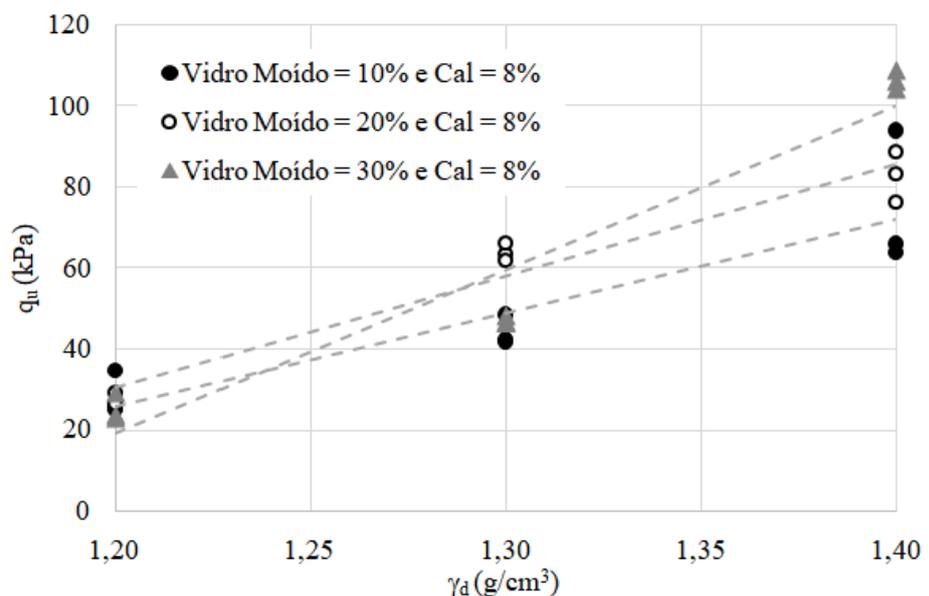


Figura 8.1.1.1–Efeito da massa específica na q_u

8.1.1.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL

Na Figura 8.1.1.2, é apresentada a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação ao teor de cal apresentado pela mistura. Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para a mesma massa específica de 1,4 g/cm³.

Nas condições de cura iniciais não se obteve resultados satisfatórios com o aumento do teor de cal, havendo, inclusive, uma relação inversa entre a resistência e a adição de cal.

Observa-se que as misturas contendo um maior teor de cal apresentaram as menores resistências, fato oposto ao que se é esperado.

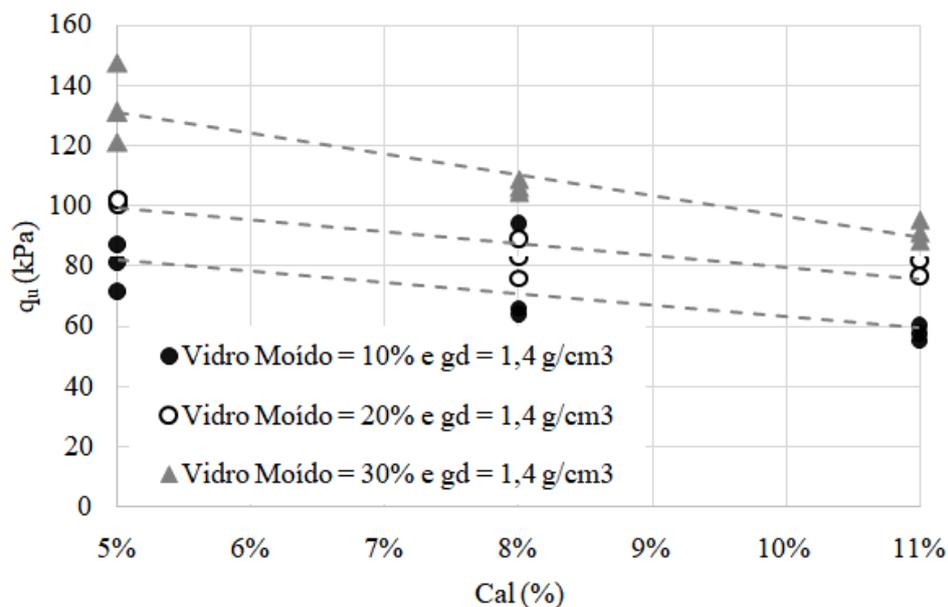


Figura 8.1.1.2–Efeito do teor de cal na q_u

8.1.1.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO

Na Figura 8.1.1.3, é apresentada a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação ao teor de vidro moído para diferentes teores de cal e massas específicas.

Nota-se que o aumento do teor de vidro moído somente apresentou influência para a maior massa específica, de $1,4 \text{ g/cm}^3$, obtendo-se ganhos de resistência da magnitude de 50%.

Também é possível observar que, para essa situação, os maiores valores de resistência foram obtidos na amostra com o menor teor de cal juntamente com a maior massa específica.

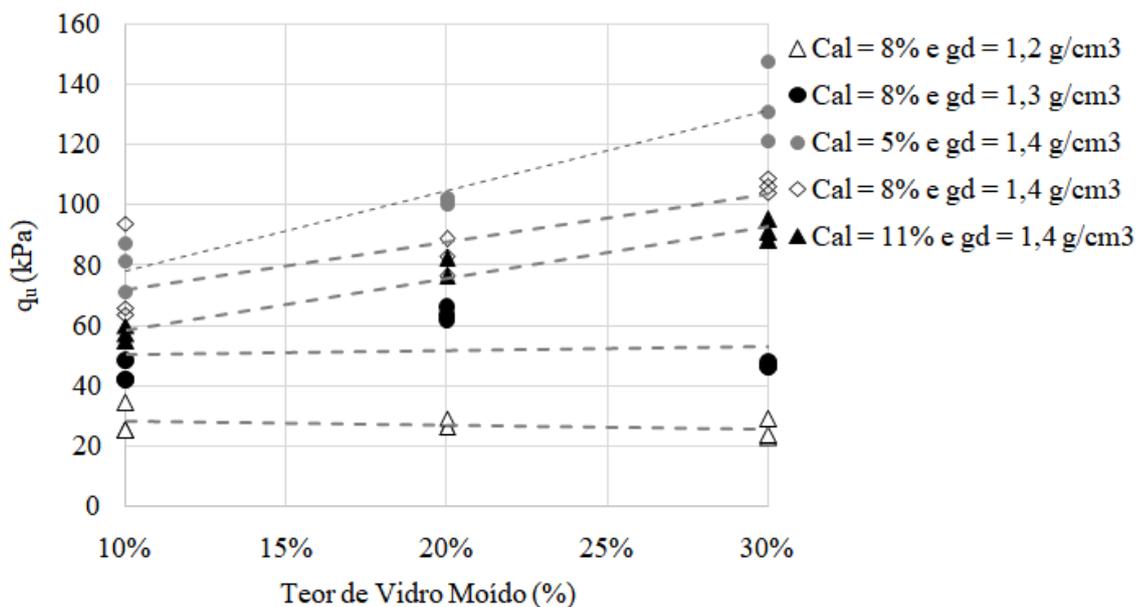


Figura 8.1.1.3–Efeito do teor de vidro moído na q_u

8.1.1.4 EFEITO DA POROSIDADE

Na Figura 8.1.1.4, tem-se a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação à porosidade (η) para diferentes teores de vidro moído. Cada curva difere apenas no teor de vidro moído, estando juntos na mesma curva todos os pesos específicos e teores de cal diferentes para o mesmo teor de vidro moído.

É possível observar que a resistência aumenta com a redução da porosidade da mistura, independentemente do teor de vidro moído presente.

Para essa situação em específico, tal efeito pode ser atribuído a uma maior mobilização do atrito e capacidade de distribuir as tensões no interior do material, como visto no item 3.5, já que, para a cura em questão, a eficiência da cimentação não foi observada.

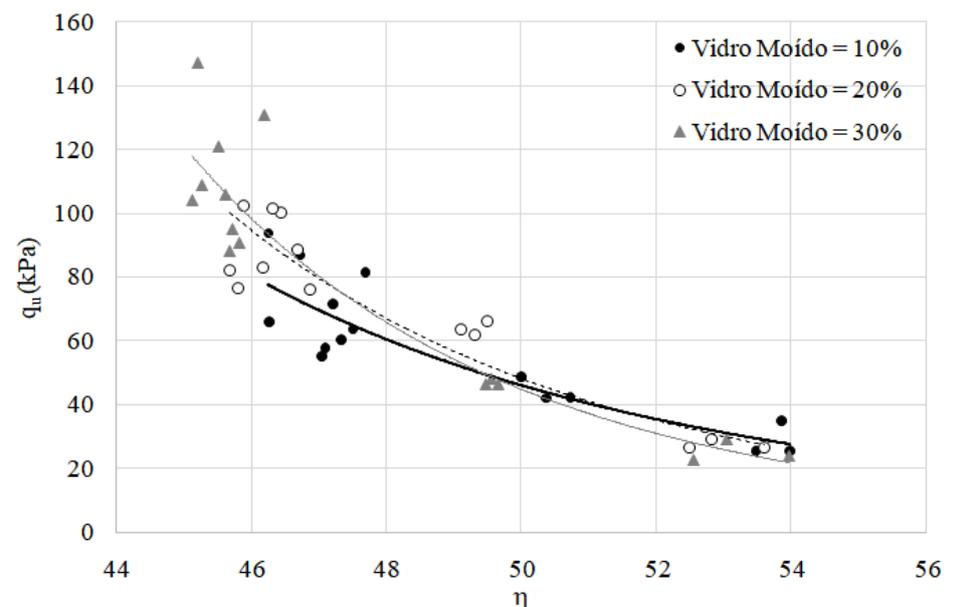


Figura 8.1.1.4–Efeito da porosidade na q_u

8.1.1.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL

Visto que os resultados para as resistências obtidos neste ensaio mostraram-se insatisfatórios, apresentando relação inversa entre teor de cal presente na amostra e resistência, a análise deste item não faria sentido, porém, a fim de se respeitar a estrutura do trabalho, optou-se por prosseguir-se com a análise

Normalmente, ocorre o aumento da resistência com o aumento do teor de cal, e, estando esse teor de cal diretamente ligado ao teor volumétrico de cal (L_v), pode-se afirmar que ocorre a diminuição da resistência com o aumento do inverso do teor volumétrico de cal ($1/L_v$).

Propõe-se, então, a análise da resistência em relação ao fator porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_v), como visto no item 3.7.

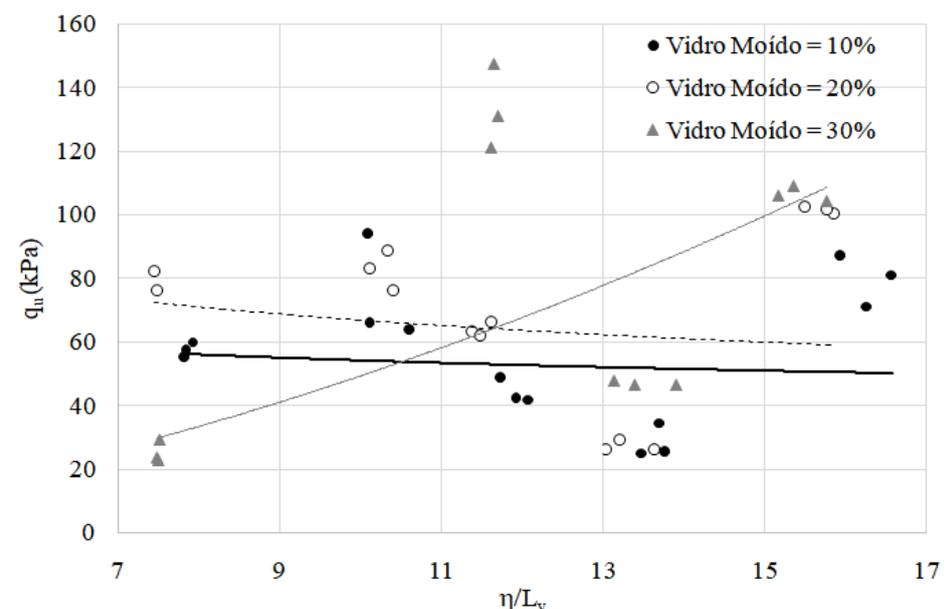


Figura 8.1.1.5 – $q_u \times \eta/L_v$

O resultado esperado da relação η/L_v era de que com o aumento do fator η/L_v ocorresse a diminuição da resistência à compressão simples. Porém, como se pode observar na Figura 8.1.1.5 acima, este comportamento não se faz presente nessa situação.

Mesmo não apresentando valores de resistência coerentes, a aplicação da potência sobre o fator η/L_v resultou em uma curva apresentando uma tendência ao aumento da resistência com a diminuição do fator $\eta/(L_v^{0,12})$, independentemente do teor de vidro moído presente.

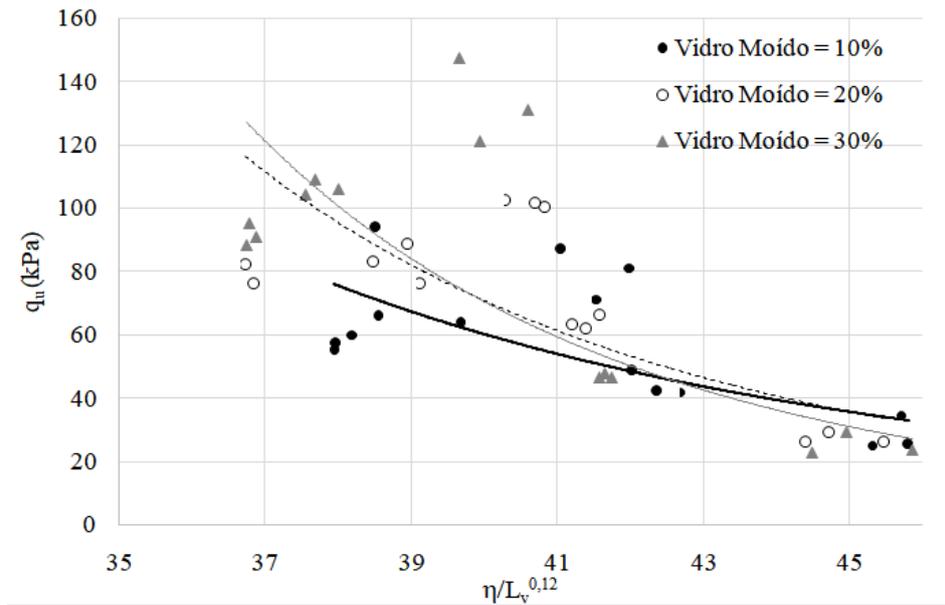


Figura 8.1.1.6- $q_u \times \eta/(L_v^{0,12})$

8.1.1.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à compressão simples (q_u) com o fator porosidade/(teor volumétrico de cimentante), onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_2 (teor volumétrico de cal + vidro moído).

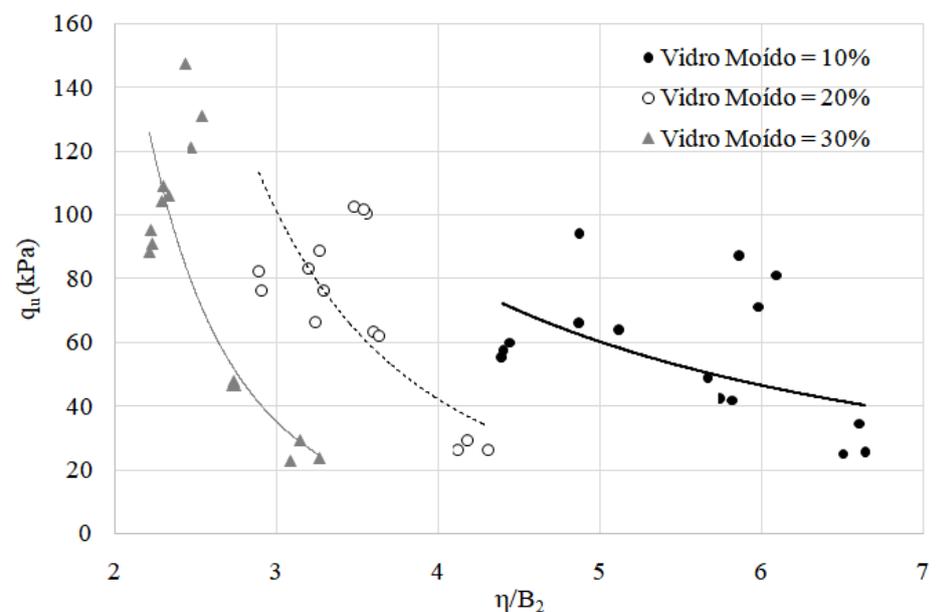


Figura 8.1.1.7- $q_u \times \eta/B_2$

Os resultados insatisfatórios obtidos nos ensaios com esse tipo de cura refletem no baixo valor obtido para o coeficiente R^2 nessa situação.

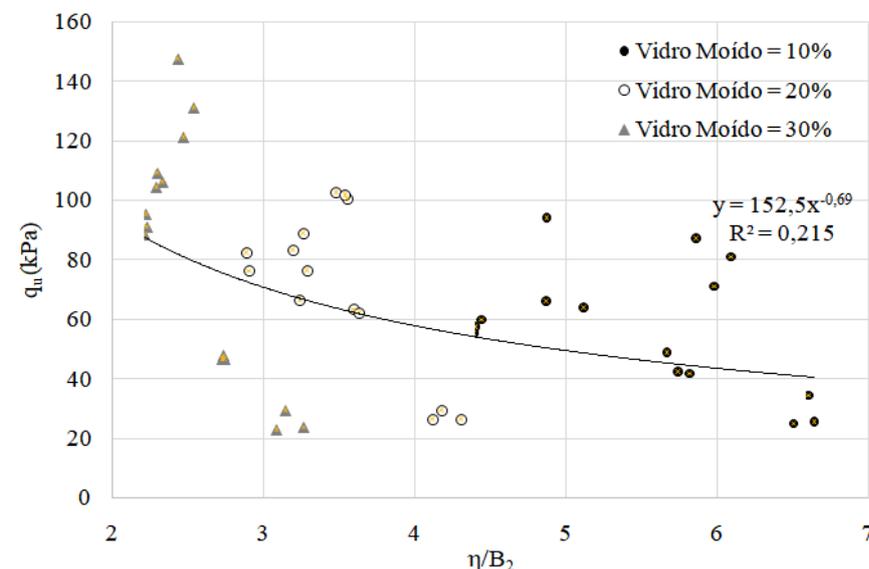


Figura 8.1.1.8 – $q_u \times \eta/B_2$

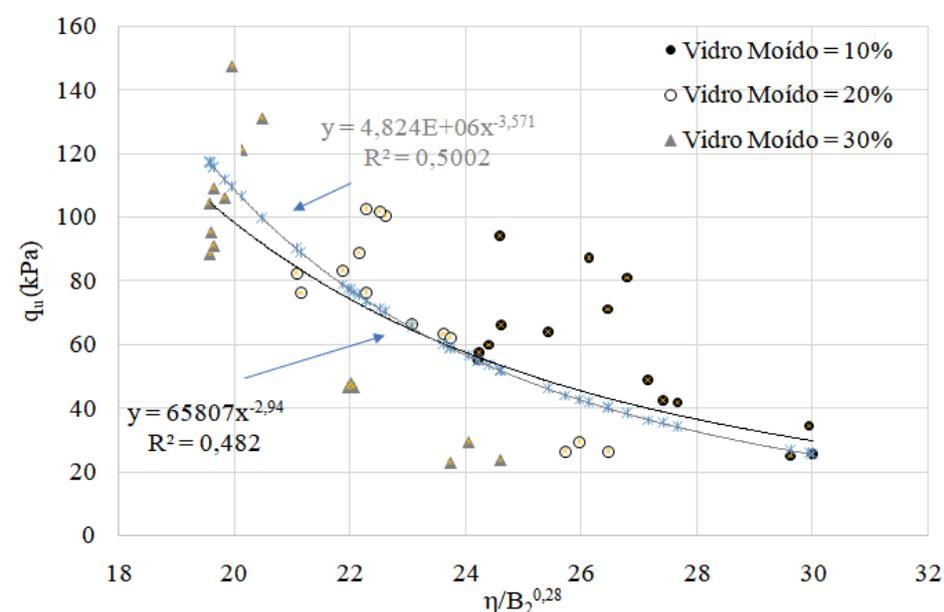


Figura 8.1.1.9 – $\eta/(B_2^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da resistência à tração

por compressão diametral com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

8.1.1.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à compressão simples com o fator porosidade/teor volumétrico de cimentante, onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_3 (teor volumétrico de cal + vidro moído + bentonita).

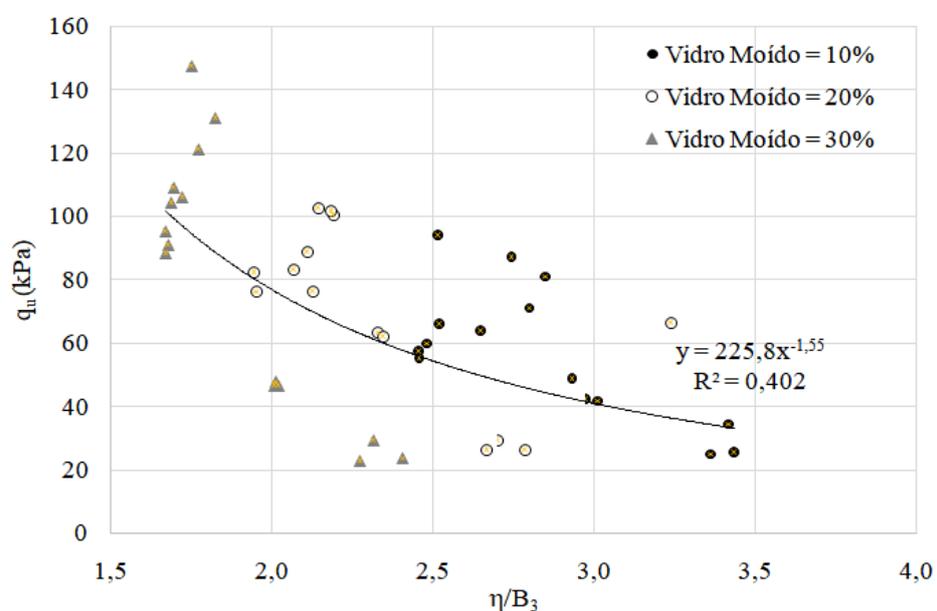


Figura 8.1.1.10 - η/B_3

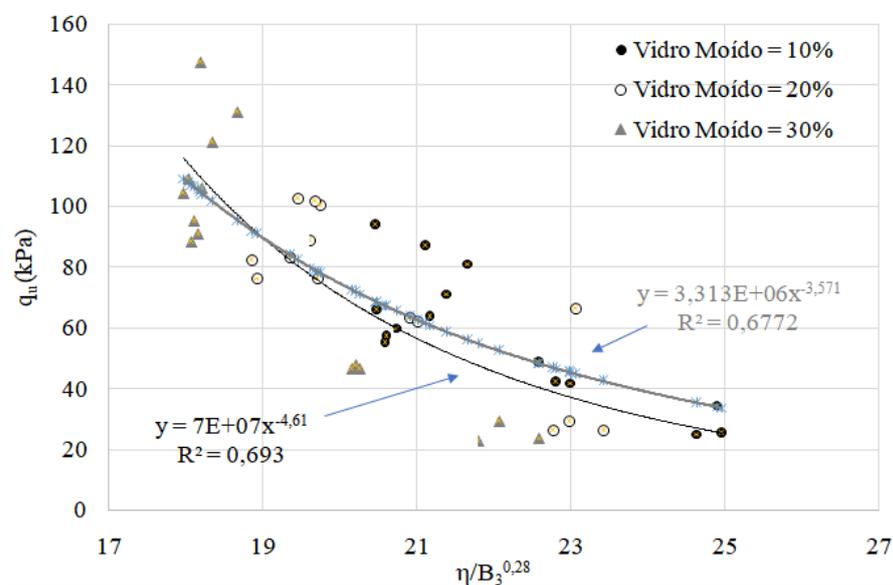
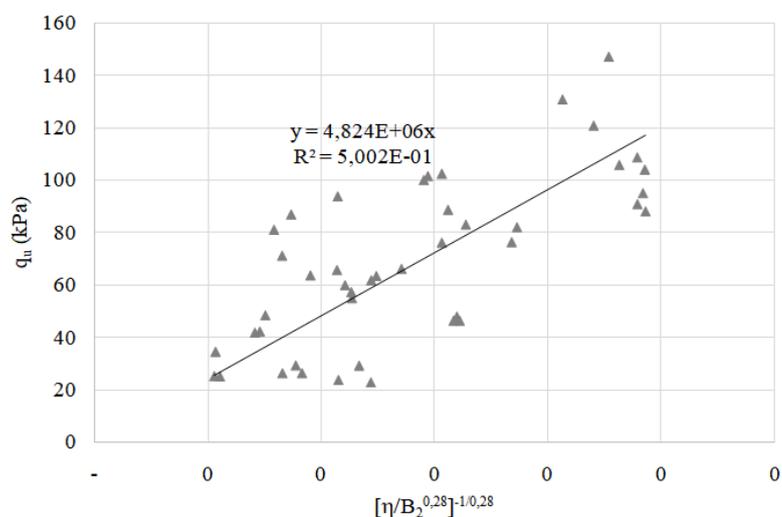


Figura 8.1.1.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da resistência à tração por compressão diametral com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

8.1.1.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

Figura 8.1.1.12 - $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,50$$

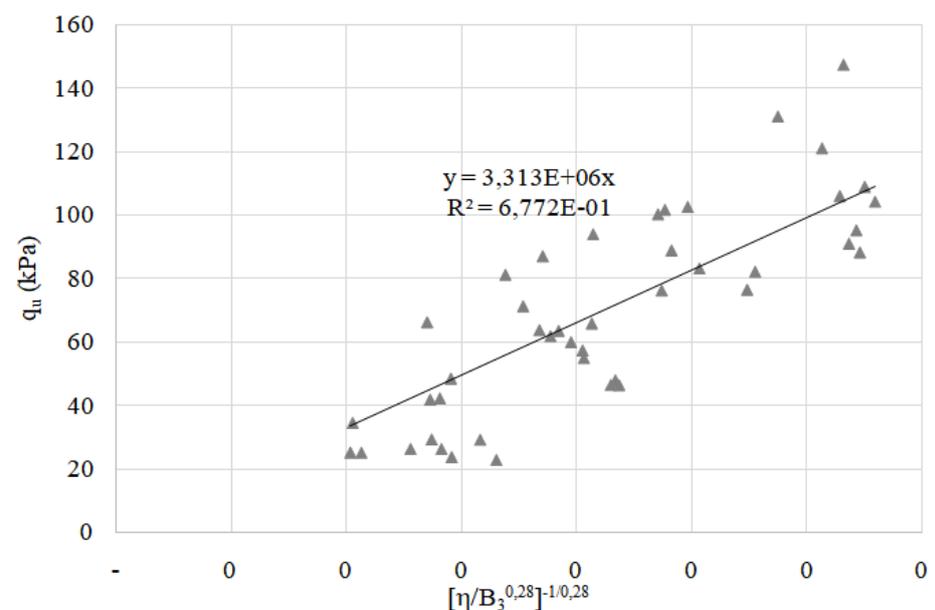


Figura 8.1.1.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,68$$

Observa-se que B_3 apresentou um maior valor de R^2 do que B_2 , mostrando uma maior correlação se for considerada a mistura do conjunto ‘cal + vidro moído + bentonita’ no tratamento estatístico do que apenas ‘cal + vidro moído’. Tal fato ocorre pois a cal reage em parte com o vidro moído e em parte com a bentonita, apresentando uma maior relevância de B_3 na interpretação dos resultados.

8.2 MISTURAS CURADAS 7 DIAS À 24 °C

8.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Visto que para a cura em temperatura ambiente as resistências obtidas foram baixas, optou-se por padronizar uma temperatura de 24 °C, de maneira a verificar se para uma maior temperatura acarretaria em maiores ganhos de resistência. Embora se aumentando a temperatura, verificou-se um ganho de resistência não muito expressivo (da ordem de 50 kPa até 300 kPa).

8.2.1.1 EFEITO DA MASSA ESPECÍFICA

Na Figura 8.2.1.1, tem-se a variação da resistência à compressão simples (q_u) com o aumento da massa específica (γ_d). Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para o mesmo teor de cal de 8%.

Observa-se que o aumento da massa específica de 1,2 para 1,4 g/cm³ exerce influência na resistência do material independentemente das outras variáveis, obtendo-se ganhos de resistência de até 100%.

Também é possível observar que a taxa de aumento de resistência devido ao aumento da massa específica foi semelhante para todos os teores de vidro moído, sendo os menores valores de resistência apresentados pelas amostras com 10% de vidro moído.

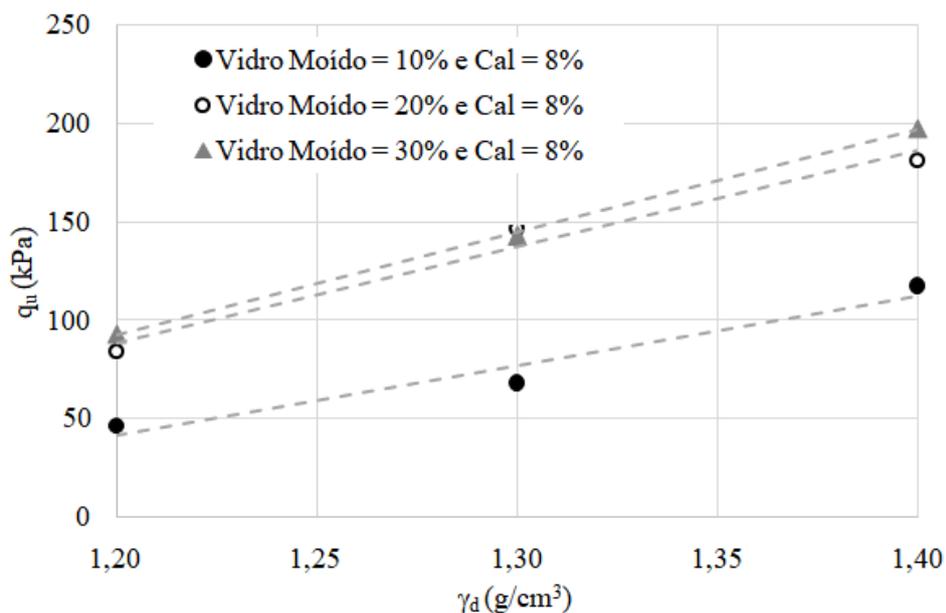


Figura 8.2.1.1 – Efeito da massa específica na q_u

8.2.1.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL

Na Figura 8.2.1.2, é apresentada a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação ao teor de cal apresentado pela mistura. Cada uma das curvas apresenta diferentes teores de vidro moído para a mesma massa específica de 1,4 g/cm³.

Nessas condições de cura não se obteve resultados satisfatórios com o aumento do teor de cal. As amostras apresentaram a mesma tendência observada no item 8.1.1.2, onde se obteve uma relação inversa entre a resistência e a adição de cal.

Observa-se que as misturas contendo um maior teor de cal apresentaram as menores resistências, fato contrário ao que se é esperado.

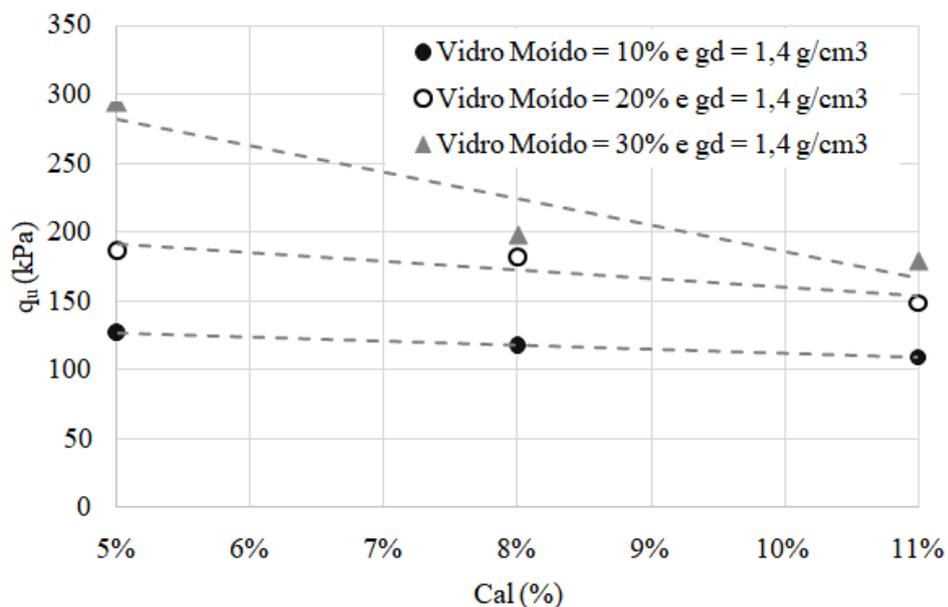


Figura 8.2.1.2 – Efeito do teor de cal na q_u

8.2.1.3 EFEITO DO TEOR DE VIDRO MOÍDO

Na Figura 8.2.1.3, é apresentada a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação ao teor de vidro moído para diferentes teores de cal e massas específicas.

Nota-se que o aumento do teor de vidro moído apresentou influência para todos os teores de cal e massas específicas, sendo este ganho mais acentuado na amostra de menor teor de cal juntamente com a maior massa específica.

Também é possível observar que, para essa situação, os maiores valores de resistência foram obtidos para as amostras que apresentavam a maior massa específica.

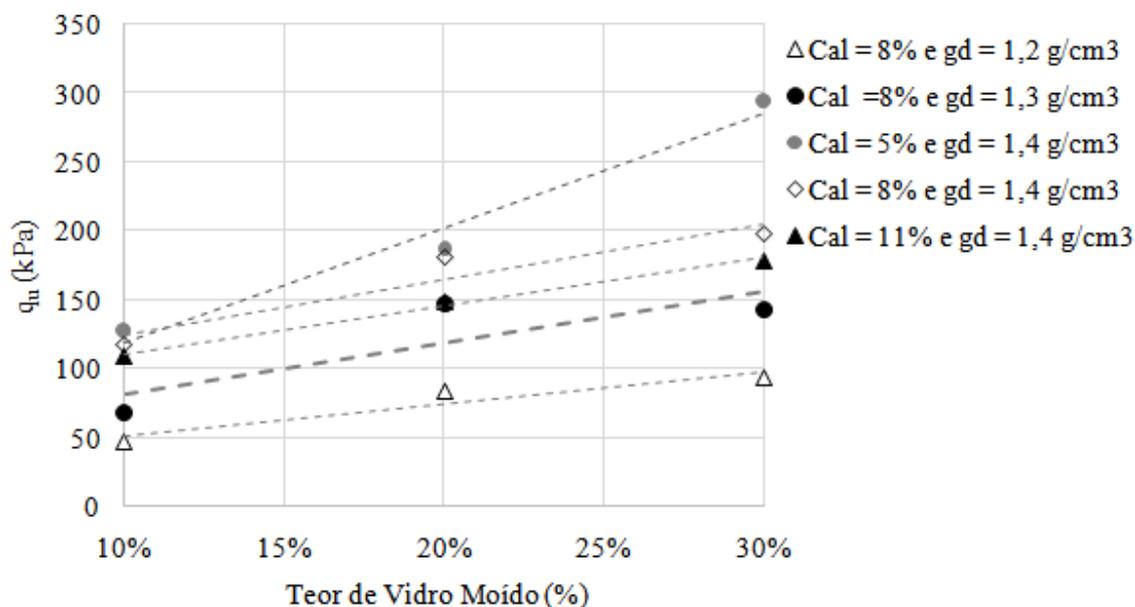


Figura 8.2.1.3 – Efeito do teor de vidro moído na q_u

8.2.1.4 EFEITO DA POROSIDADE

Na Figura 8.2.1.4, tem-se a variação da resistência à compressão simples (q_u) em relação à porosidade (η) para diferentes teores de vidro moído. Cada curva difere apenas no teor de vidro moído, estando juntos na mesma curva todos os pesos específicos e teores de cal diferentes para o mesmo teor de vidro moído.

É possível observar que a resistência aumenta com a redução da porosidade da mistura, independentemente do teor de vidro moído presente.

Para essa situação em específico, tal efeito pode ser atribuído a uma maior mobilização do atrito e capacidade de distribuir as tensões no interior do material, como visto no item 3.5, já que, para a cura em questão, a eficiência da cimentação não foi observada.

Para a mesma porosidade, os maiores valores de resistência são observados nas amostras com 30% de teor de vidro moído.

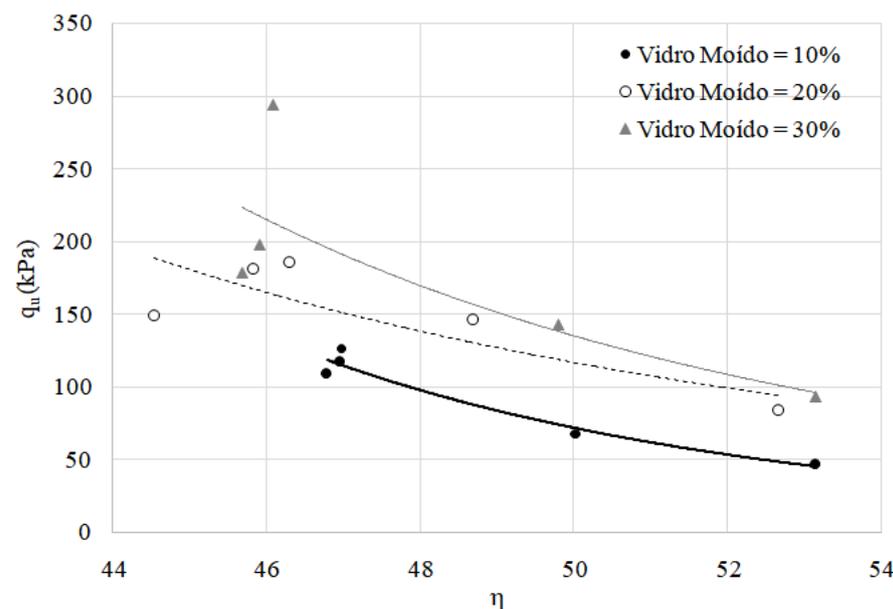


Figura 8.2.1.4 – Efeito da porosidade na q_u

8.2.1.5 RELAÇÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL

Visto que os resultados para as resistências obtidos neste ensaio mostraram-se insatisfatórios, apresentando relação inversa entre teor de cal presente na amostra e resistência, a análise deste item não faria sentido, porém, a fim de se respeitar a estrutura do trabalho, optou-se por prosseguir-se com a análise

Normalmente, ocorre o aumento da resistência com o aumento do teor de cal, e, estando esse teor de cal diretamente ligado ao teor volumétrico de cal (L_v), pode-se afirmar que ocorre a diminuição da resistência com o aumento do inverso do teor volumétrico de cal ($1/L_v$).

Propõe-se, então, a análise da resistência em relação ao fator porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_v), como visto no item 3.7.

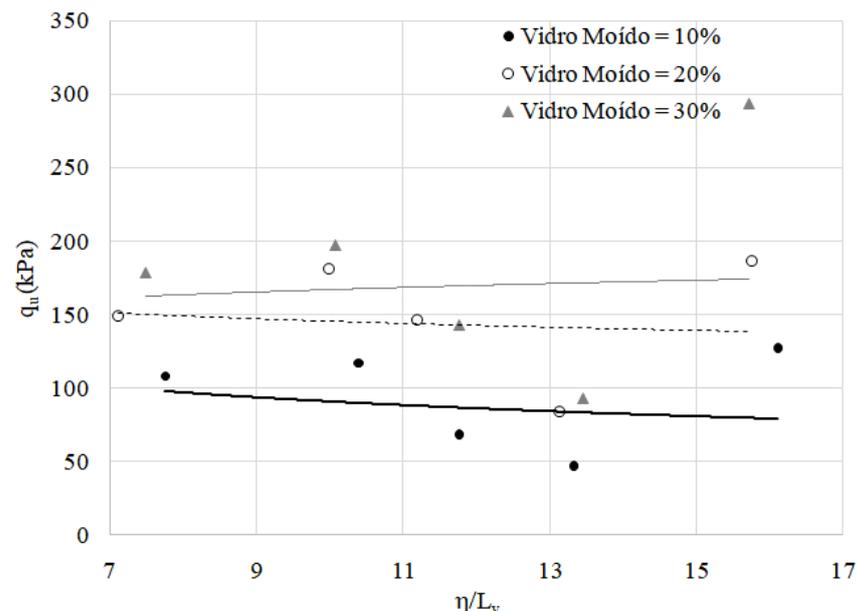


Figura 8.2.1.5 – $q_u \times \eta/L_v$

O resultado esperado da relação η/L_v era de que com o aumento do fator η/L_v ocorresse a diminuição da resistência à compressão simples. Porém, como se pode observar na Figura 8.1.2.5 acima, este comportamento não se faz presente nessa situação.

Visto que a taxa de variação da resistência em função de cada uma das grandezas é substancialmente diferente, aplica-se uma potência de 0,12 sobre o teor volumétrico de cal (L_v), visando a compatibilização de tais taxas. Tal valor foi obtido após inúmeras tentativas.

Mesmo não apresentando valores de resistência coerentes, a aplicação da potência sobre o fator η/L_v resultou em uma curva apresentando uma tendência ao aumento da resistência com a diminuição do fator $\eta/(L_v^{0,12})$, independentemente do teor de vidro moído presente.

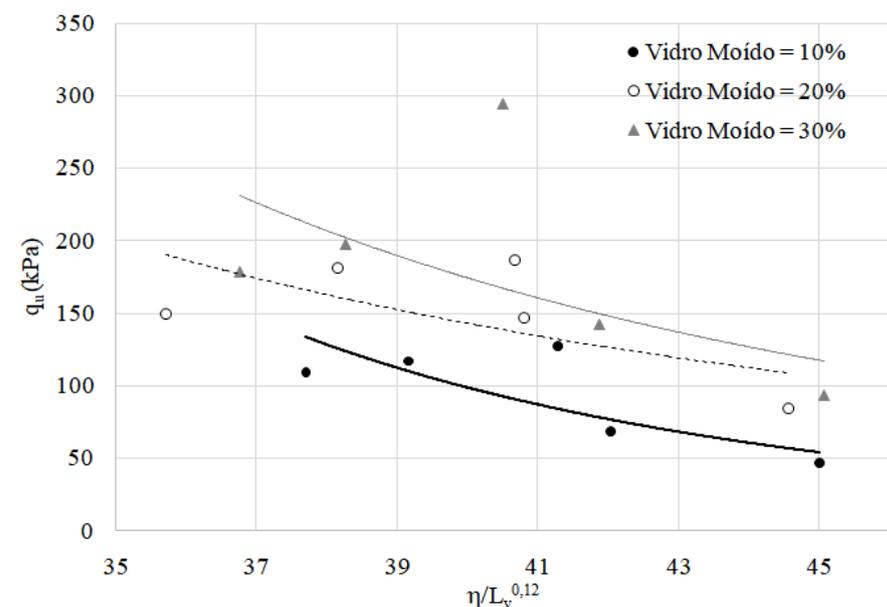


Figura 8.2.1.6 – $q_u \times \eta/(L_v^{0,12})$

8.2.1.6 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL+ VIDRO MOÍDO)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à compressão simples (q_u) com o fator porosidade/(teor volumétrico de cimentante), onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_2 (teor volumétrico de cal + vidro moído).

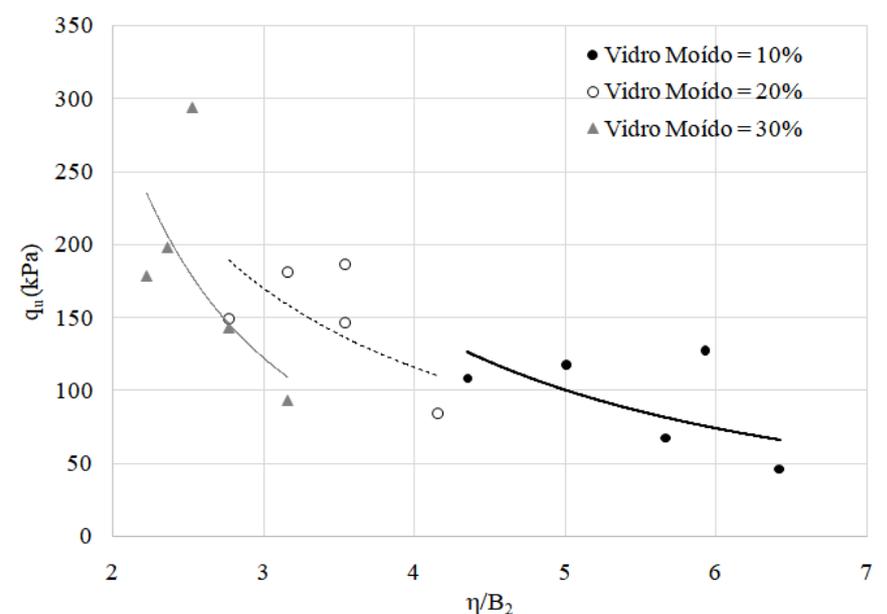
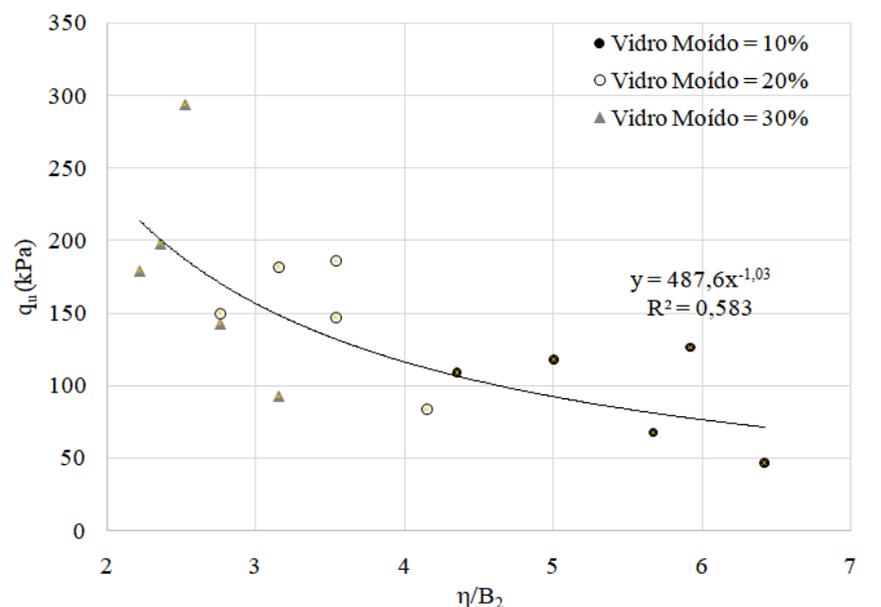
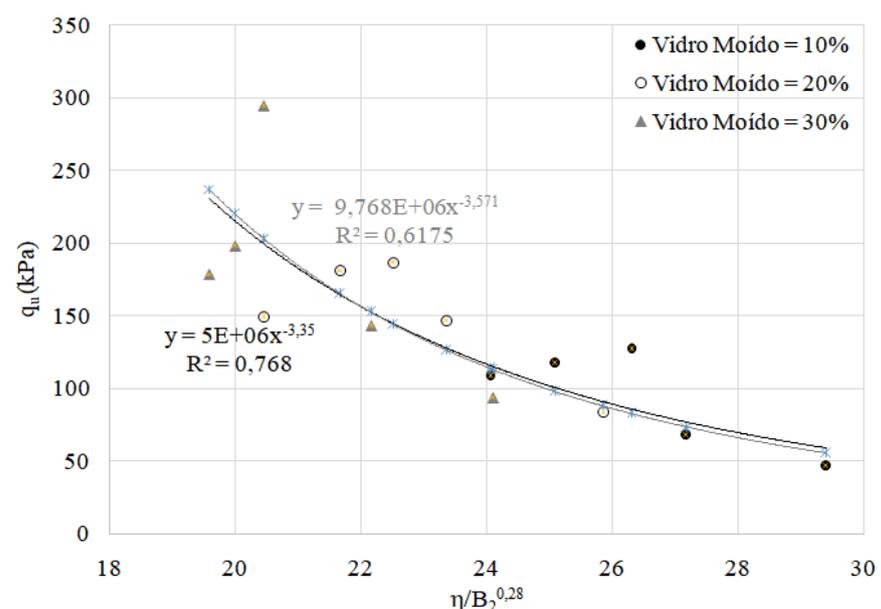


Figura 8.2.1.7 – $q_u \times \eta/B_2$

Figura 8.2.1.8 – $q_u \times \eta/B_2$ Figura 8.2.1.9 - $\eta/(B_2)^{0,28}$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2)^{0,28}$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da resistência à tração por compressão diametral com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

8.2.1.7 RELAÇÃO POROSIDADE/(TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

Nas figuras abaixo, tem-se a relação da resistência à compressão simples com o fator porosidade/teor volumétrico de cimentante, onde o teor volumétrico de cimentante nesse caso é representado como B_3 (teor volumétrico de cal + vidro moído + bentonita).

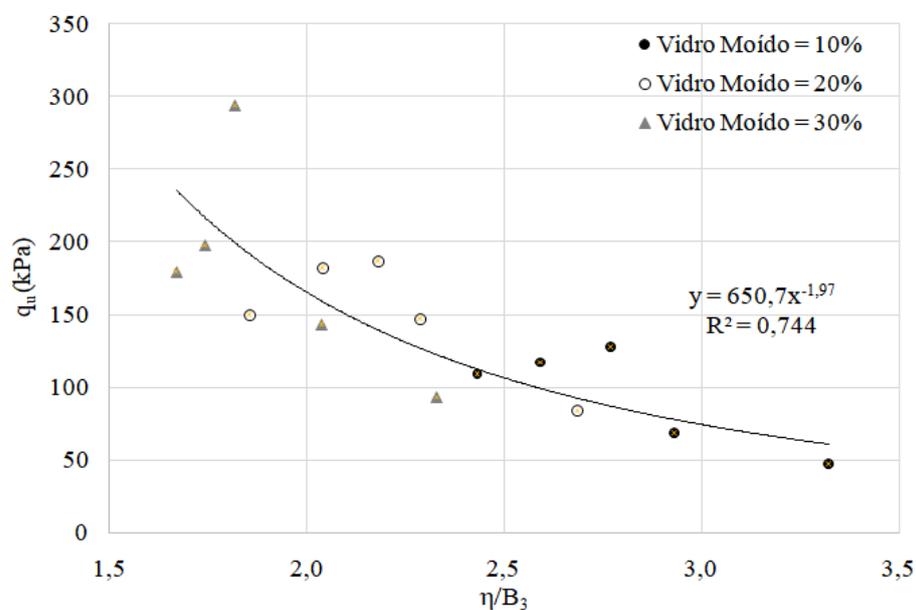


Figura 8.2.1.10 - η/B_3

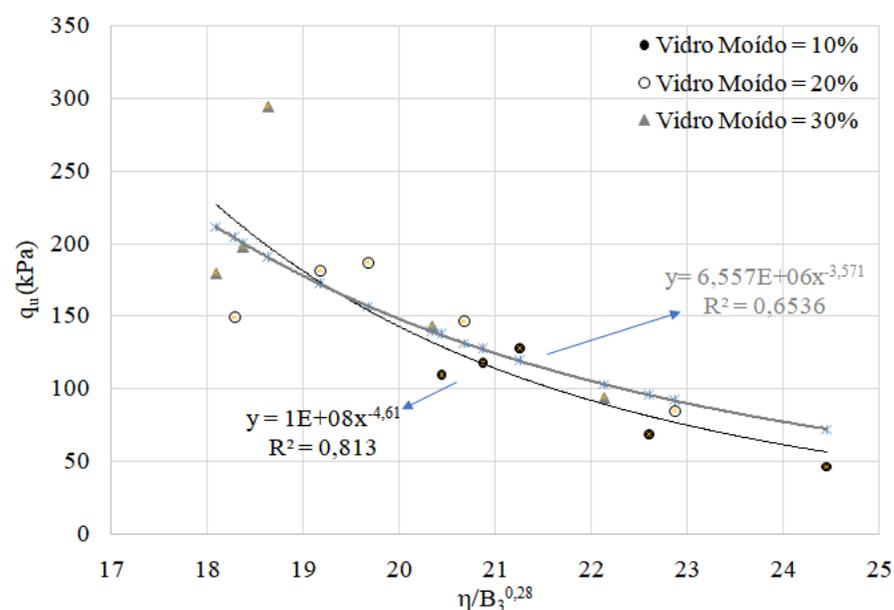
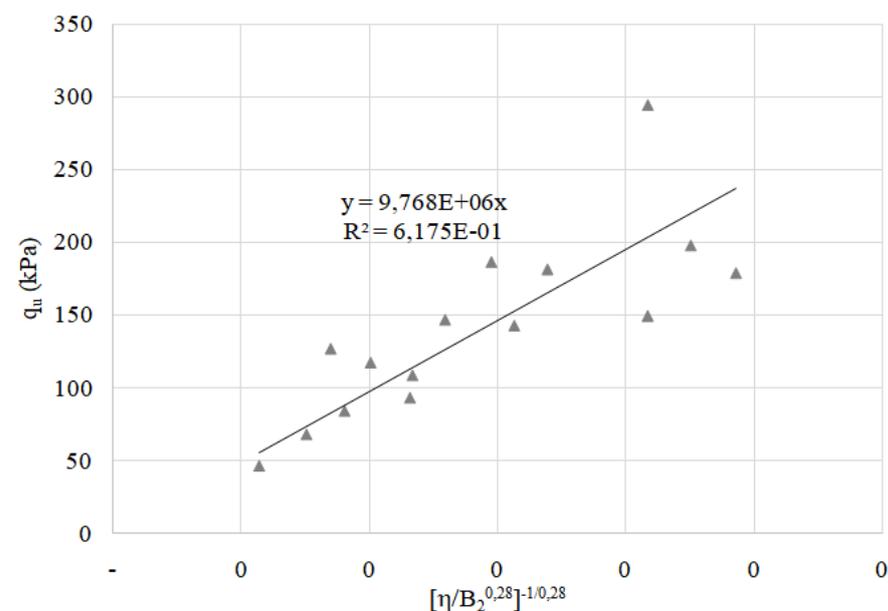


Figura 8.2.1.11 - $\eta/(B_3^{0,28})$

Curva A (preta): resultado do melhor ajuste (por mínimos quadráticos);

Curva B (cinza): resultado da elevação do termo $\eta/(B_2^{0,28})$ à potência de $-1/0,28$ (obtendo-se o termo $(\eta/B_2)^{-3,571}$), para poder-se estabelecer uma futura comparação da resistência à compressão simples com as demais resistências, tendo como variação somente a constante multiplicadora.

8.2.1.8 COMPARAÇÃO (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO) x (TEOR VOLUMÉTRICO DE CAL + VIDRO MOÍDO + BENTONITA)

Figura 8.2.1.12 - $[\eta/(B_2^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,62$$

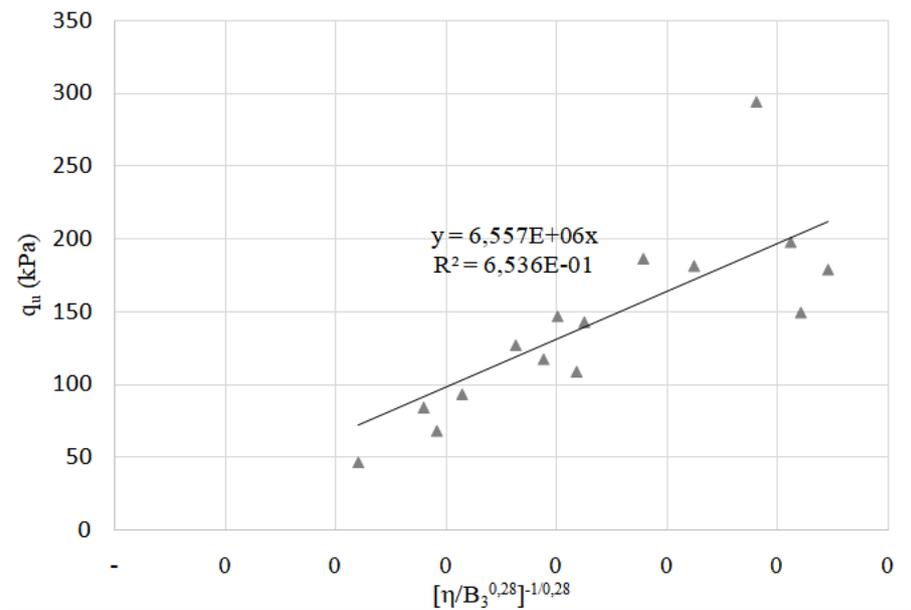


Figura 8.2.1.13 – $[\eta/(B_3^{0,28})]^{-1/0,28}$

$$R^2 = 0,65$$

Observa-se que B_3 apresentou um maior valor de R^2 do que B_2 , mostrando uma maior correlação se for considerada a mistura do conjunto ‘cal + vidro moído + bentonita’ no tratamento estatístico do que apenas ‘cal + vidro moído’. Tal fato ocorre pois a cal reage em parte com o vidro moído e em parte com a bentonita, apresentando uma maior relevância de B_3 na interpretação dos resultados.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, S. e FAN, M. **Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement**. International Journal of Engineering and Technical Research, Vol 2, Issue 6, 2014.

ALI, E. E. e AL-TERSAWY, S.H. **Recycled glass as partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete**. Construction and Building Materials 35, 2012.

AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION EDUCATIONAL FOUNDATIONS. **Soil Stabilization and Pavement recycling with Self-Cementing Coal Fly Ash**, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1635/D1635M - Standard Test Method for Flexural Strength of Soil-Cement Using Simple Beam with Third-Point Loading**. ASTM International, West Conshohocken, U.S.A., 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 1984 e 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023: Solo-cimento: Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 1992

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024: Solo-cimento: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025: Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 1990 e 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253: Solo-cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento.** Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 1992.

AZEVEDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal: um estudo a respeito das reações que acontecem após a adição de cal.** Ouro Preto, Brasil: Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

BOYNTON, R. S. **Chemistry and Technology of lime and limestone.** New York, U.S.A.: John Wiley & Sons, 1979.

CONSOLI, N. C.; CRUZ, R. C.; FLOSS, M. F.; FESTUGATO, L. **Parameters controlling tensile and comprehensive strength of artificially cemented sand.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v. 136, n.5, p. 759-763, 2010.

CONSOLI, N. C.; DALLA ROSA, A.; SALDANHA, R. B.; **Variables Governing Strength of Compacted Soil–Fly Ash–Lime Mixtures.** Journal of Materials in Civil Engineering, New York: ASCE, v. 23, n.4, p. 432-440, 2011.

CONSOLI, N. C.; PRIETTO, P. D. M.; CARRARO, J. A. H.; HEINECK, K. S. **Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime Mixtures.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v. 127, n.9, p. 774-782, 2001.

CONSOLI, N. C.; VENDRUSCOLO, M. A. ; PRIETTO, P. D. M.; **Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v. 129, n.1, p. 96-101, 2003.

CORTE, M. B. **Misturas Solo-Cal-Fibra: Comportamento mecânico à compressão e tração.** Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2013.

CROFT, J. B. **The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization.** Géotechnique 17, 1967.

CRUZ, R. C. **Influência de Parâmetros Fundamentais na Rigidez, Resistência e Dilatância de uma Areia Artificialmente Cimentada.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2008.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2009.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. A. **Quickest to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization.** Highway Research Record, Washington, D. C., n. 139, 1966.

FOPPA, D. **Análise de Variáveis-Chave no Controle da Resistência Mecânica de Solos Artificialmente Cimentados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2005.

GLEASON, M. H., DANIEL, D. E., EYKHOLT, G. R. **Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Maior, 1997.

HANDY, R. L. **Cementation of Soil Minerals with Portland Cement or Alkalis**. Washington, U.S.A: Highway Reserach Board, 1958.

INGLES, O. G. e METCALF, J. B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Sydney, Australia: Butterworths, 1972.

INMET – **Instituto Nacional de Meteorologia**, www.inmet.gov.br.

ISLAM, G. M. S.; RAHMAN, M. H. e KAZI, N. **Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice**. International Journal of Sustainable Built Environment, 2016.

LEMOES, R. G. **Estudo do Comportamento Hidráulico, Mecânico e Químico de Barreiras Hidráulicas Verticais, Compostas por Solo Residual, Bentonita e Cimento sob a Ação de Substâncias Agressivas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2006.

LING, T.C.; POON, C.S. e KOU, S.C. **Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars**. Cement & Concrete Composites 33, 2011.

LOPES JÚNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2012.

LUZ, A.B e OLIVEIRA, C. H. **Argila – Bentonita. Rochas e Minerais Industriais – CETEM 2ª Edição**, 2008.

MALLELA, J.; VON QUINTUS, H. e SMITH, K.L. **Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design**. Arlington, U.S.A. :The National Lime Association, 2004.

MOH, Z.C. **Reactions of Soil Minerals With Cement and Chemicals**. Transportation Research Board of the National Academy of Sciences, 1965.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2011.

NUÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-Química de um solo residual de Arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1991.

OATES, J. A. H. **Lime and Limestone – Chemistry and Technology, Production and Uses**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 1998.

PAGANI, B. R. **Estudo de Misturas Solo-Cimento-Bentonita-Fibra para Uso em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2007.

PARK, S. B.; LEE, B. C. e KIM, J. H. **Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate**. Cement and Concrete Research 34, 2004.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J. P. e SANTOS, P. M. S. **The potencial pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components**. Construction and Building Materials 31, 2012.

RAMASAMY., P; PERIATHAMBY, A. e IBRAHIM, S. **Carbide sludge management in acetylene producing plants by using vacuum siltration**. Waste Manage and Research, 2002.

ROGERS, C. D. F.; GLENDINNING S. **Lime requirement for stabilization**. Transportation Research Board Annual Meeting, 79, 2000.

ROSS, C. S. e SHANNON, E. V. **The minerals of bentonite and related clays and their physical properties**. Journal of the American Ceramic Society, 1926.

RUVER, C. A. Trabalho realizado na cadeira de Obras de Terra do curso de Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2017.

SILVA, A.R.V. e FERREIRA, H.C. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. Campina Grande, Brasil: Revista Eletrônica de Materiais e Processos / ISSN 1809-8797 2008.

SILVANI, C. Influência da Temperatura de Cura no Comportamento Mecânico de Misstras Areia-Cinza Volante-Cal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2013.

TEIXEIRA, B. S. Resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2014.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B. E MESRI, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. New York, U.S.A.: John Wiley & Sons, 1996.

THOMPSON, M. R. Lime Reactivity of Illinois Soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, v. 92, 1966.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo, Brasil: McGraw-Hill do Brasil Limitada, 1977.

WINTER, D. Resistência, Rigidez e Durabilidade de Solos Arenosos Estabilizados com Materiais Mais Sustentáveis. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2018.