

Avaliação da resistência mecânica e da sucção matricial de um solo siltoso cimentado artificialmente ao longo de 500 dias

Assessment of strength and matric suction of an artificially cemented silty soil under 500 days of cure

Jair de Jesús Arrieta Baldovino¹, Eclesielter Batista Moreira²,
Ronaldo Luis dos Santos Izzo³

¹Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias 130015, Colombia.

²Escola Politécnica, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Positivo, Rua Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300, Curitiba, Paraná, Brasil

³Laboratório de Geotecnia (LABGEO) – Departamento de Construção Civil (DACOC), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Dep. Heitor A. Furtado, 5000, CEP: 81280-340, Campus Curitiba, Sede Ecoville, Curitiba, Paraná, Brasil.

e-mail: jarrietab2@unicartagena.edu.co, eclesielter.moreira@up.edu.br, izzo@utfpr.edu.br.

RESUMO

O presente artigo avalia o desenvolvimento da resistência à compressão simples (q_u) e sucção matricial (Ψ) de um solo sedimentar cimentado artificialmente ao longo de 500 dias, tempo de cura pouco estudado na literatura. A compressão simples foi sistematicamente investigada ao longo de 500 dias e os parâmetros de sucção matricial foram pesquisados ao longo de 180 dias. Para isso, um solo siltoso da Formação Guabirotuba de Curitiba/PR foi estabilizado com cal hidratada com porcentagens de 3, 5, 7 e 9% em referência à massa seca do solo em tempos de cura de 15, 30, 60, 90, 180, 360 e 500 dias para compressão simples e durante 15, 30, 60, 90 e 180 para sucção matricial. Corpos de prova foram moldados com os diferentes teores de cal (L), diferentes porosidades (η), diferentes pesos específicos secos aparentes (γ_d), diferentes umidades de moldagem (ω) e submetidos a ensaios de compressão simples e sucção matricial usando a técnica do papel filtro nos diferentes tempos de cura. Foi usada a relação porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}) para avaliar o desenvolvimento de q_u . Os resultados demonstram um crescimento da resistência com o aumento do tempo de cura, com o aumento do teor de cal e com a diminuição dos vazios (isto é, maior peso específico seco). Finalmente, uma equação de dosagem para q_u do solo estudado e misturado com cal foi desenvolvida com a relação η/L_{iv} ajustada a um expoente 0,18. Finalmente, foi encontrado que 64% das misturas compactadas da cal com o solo atingem os requisitos mínimos para uso potencial em sub-base para $q_u \geq 1200 \text{ kPa}$, de acordo com as normas atuais.

Palavras-chave: Solo-cal, resistência à compressão simples, porosidade/cal, equações de dosagem, sucção.

ABSTRACT

This article evaluates the development of resistance of simple compression (q_u) and matrix suction (Ψ) of an artificially cemented sedimentary soil over 500 days, curing time few studied in the literature. Simple compression was systematically investigated over 500 days and the matric suction parameters were investigated over 180 days. For this, a silty soil from the Guabirotuba Formation in Curitiba/PR was stabilized with hydrated lime with percentages of 3, 5, 7 and 9% in reference to the dry mass of the soil at curing times of 15, 30, 60, 90, 180, 360 and 500 days unconfined compression and for 15, 30, 60, 90 and 180 for matrix suction. Samples were molded with different lime contents (L), different porosities (η), different apparent dry specific weights (γ_d), different molding humidity (ω) and subjected to unconfined compression and matrix suction tests using the filter paper technique at different curing times. The porosity/volumetric lime content (η/L_{iv}) ratio was used to evaluate the development of q_u . The results demonstrate an increase in resistance with the increase of the curing time, with the increase of the lime content and with the decrease of the voids (that is, greater dry specific weight). Finally, a dosage equation for q_u of the studied soil and mixed

with lime was created with the ratio η/L_{iv} adjusted to an exponent 0.18. Finally, it was found that 64% of the compacted mixtures of lime with soil reach the minimum requirements for potential use in sub-base for $q_u \geq 1200 \text{ kPa}$, according to current standards.

Keywords: Lime-soil, unconfined compressive strength, porosity/lime index, dosage equations, suction.

1. INTRODUÇÃO

Os solos finos misturados com cal e depois compactados (solo-cal) são denominados solos estabilizados ou artificialmente cimentados. As reações entre a cal e os minerais de argila presentes no solo resultam em mudanças das propriedades plásticas e estrutura do solo e, portanto, em uma maior capacidade de suporte [1]. Para o desenvolvimento da infraestrutura viária, é essencial construir mais e melhores pavimentos, os solos da Região Metropolitana de Curitiba (Formação Guabirota), contudo, não atendem às propriedades de engenharia necessárias para serem usados para fins de pavimentação já que apresentam problemas como: altos graus de expansão, granulometria muito fina e baixa resistência mecânica [2].

Muitas pesquisas foram realizadas para melhorar os solos de Curitiba, tornando-os “potencialmente usáveis” para pavimentação (ver Tabela 1). CONSOLI *et al.* [3] introduziu a relação empírica porosidade/agente cimentante para estudar a evolução da resistência mecânica dos solos cimentados artificialmente. Para solos estabilizados com cal, os autores propõem que a compressão simples seja

controlada pela equação: $q_u = A \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^\beta} \right]^{-B}$, onde η é a porosidade da mistura, L_{iv} é o conteúdo volumétrico de cal, A é um parâmetro que depende do tipo de solo e aglomerante, assim como também os expoentes B e β . Recentemente, DIAMBRA *et al.* [4] desenvolveram um modelo analítico onde definem que o valor de B e β são parâmetros que ligam a resistência de pico de q_u ao parâmetro do estado das misturas estabilizadas, sendo $\beta = 1/B$ (i.e. $q_u = A \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{1/B}} \right]^{-B}$) para areias cimentadas.

Assim, na Tabela 1 é apresentado um resumo dos valores empíricos de B e β para vários solos sedimentares cimentados da Formação Guabirota relatados na literatura. Os valores experimentais de β são comparados com os valores teóricos de β e com x/β (onde $x=1$ para areias cimentadas) em concordância com os estudos realizados por DIAMBRA *et al.* [4]. Aplicando o modelo teórico aos solos da Formação Guabirota, x varia de 0,67 a 1,45. No entanto, a maioria dos valores convergem para 1,00. Isso significa que, de fato, os valores teóricos são muito semelhantes ao modelo empírico. No entanto, estudos da evolução da resistência mecânica e sucção matricial desses solos com tempos de cura maiores a 6 meses não têm sido reportados assim como na literatura é pouco usual encontrar pesquisas onde usem tempos maiores do que 365 dias de cura.

Tabela 1: Valores dos parâmetros B e β para os solos da Formação Guabirota estabilizados com diferentes aglomerantes e resíduos

TIPO DE MISTURA	PARÂMETRO B	PARÂMETRO β	VALOR TEÓRICO PARA β DE ACORDO COM DIAMBRA ET AL. [4]	x/β	REFERÊNCIA
Solo-cimento	2,00	0,45	0,50	$0,9/\beta$	[5]
Solo siltoso-cimento-pó de vidro reciclado	3,87	0,20	0,26	$0,77/\beta$	[6]
Solo siltoso-cimento-pó de vidro reciclado	3,92	0,22	0,26	$0,86/\beta$	[7]
Solo-cimento	3,30	0,44	0,30	$1,45/\beta$	[8]
Solo-cimento	2,64	0,40	0,39	$1,05/\beta$	[9]
Solo silto-arenoso-cal	3,71	0,18	0,27	$0,68/\beta$	[10]
Solo siltoso-cal	4,39	0,20	0,23	$0,88/\beta$	[11]
Solo-cimento-resíduo de telha moída	4,47	0,28	0,22	$1,25/\beta$	[12]
Solo silto-arenoso-cal hidratada	2,62	0,19	0,38	$0,50/\beta$	[13]

As melhoras no ponto de vista geotécnico das misturas solo-cal, são atribuídas a quatro reações básicas: (i) *troca de cátions* (as ordens de substituição dos cátions comuns associados aos solos são dadas pela série isotrópica: $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{++} < \text{Mg}^{++}$. Um cátion vai ter uma tendência à esquerda, e os cátions monovalentes são geralmente substituíveis por cátions multivalentes), (ii) *floculação e aglomeração de partículas* (resultam em mudanças aparentes na textura junto com a troca de cátions, são principalmente

responsáveis pelas mudanças na plasticidade, características de expansão e contração e na trabalhabilidade), (iii) *carbonatação da cal* (onde a cal reage com o dióxido de carbono para formar os agentes de cimentação: carbonatos de Ca e Mg) e (iv) *reações pozolânicas* (reação entre a sílica do solo e a alumina da cal para formar vários tipos de agentes de cimentação [14]. Os agentes de cimentação são geralmente considerados como a principal fonte para o aumento na resistência mecânica da mistura). A Carbonatação da cal é uma das reações mais lentas e seu efeito pode aparecer em dias, meses ou anos [15]. Semelhante à carbonatação da cal, a reação pozolânica pode acontecer desde dias até anos [16].

A sucção matricial se refere a uma medida da energia necessária para remover uma molécula de água a partir da matriz do solo, sem alterar o estado da água. Ela representa a diferença entre a pressão do ar nos poros e a pressão da água nos poros [17]. A estabilização de solos finos com cal indica que a adição da menor porcentagem de cal aumenta a área da inclinação da curva característica considerando a sucção matricial no processo de secagem, o que causa para o solo atingir no estado residual um valor inferior de sucção, apresentando também uma diminuição significativa na porcentagem da expansão do solo. Wang et al. [18] estudaram a curva característica de sucção de um solo siltoso tratado com 2% de cal. Os resultados demonstraram que a adição da cal aumenta a capacidade de retenção da água do solo. ELKADY *et al.* [19] também investigaram o efeito da adição de cal na curva de retenção de água em um solo expansivo. Os autores usaram, principalmente, a técnica do papel filtro e o método de translação de eixos para analisar a influência do tempo de cura na sucção do solo tratado com cal. O papel é usado como um sensor e é considerado como um método indireto, uma vez que é necessário calibrar o conteúdo de água do papel filtro contra a sucção do solo [20].

Assim, é importante para toda a Região Metropolitana de Curitiba/PR, e para a literatura, ter estudos amplos sobre o melhoramento de seus solos com diferentes agentes cimentantes ao longo do tempo. Neste contexto, o presente estudo visa avaliar o comportamento mecânico de um solo sedimentar da Formação geológica Guabirota estabilizado e tratado com diferentes teores de cal e tempos de cura até de 500 dias estudando o efeito da adição de cal e o impacto da relação porosidade/cal na resistência à compressão simples e sucção matricial mediante ensaios laboratoriais, auxiliando na dosagem da cal para futuros projetos de engenharia onde seja usado o tipo de solo da presente pesquisa ou similar.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em três etapas: a primeira foi a realização dos ensaios de caracterização dos solos e da cal hidratada: granulometria do solo de acordo à norma brasileira NBR 7181 [21], limites de Atterberg dos solos de acordo às normas brasileiras NBR 7180 [22] e NBR 6459 [23], a massa específica real dos grãos dos solos de acordo à norma ASTM D854 [24], massa específica real dos grãos da cal de acordo à norma brasileira NBR 16605 [25] e as propriedades de compactação dos solos nas três energias (normal, intermediária e modificada) de acordo à norma brasileira NBR 7182 [26]; a segunda etapa, consistiu-se na moldagem, cura e rompimento dos corpos de prova solo-cal submetidos à ensaios de compressão simples. A terceira etapa consistiu na realização dos ensaios de sucção matricial. Os materiais e metodologia usados são descritos na continuação.

2.1 Materiais

Na Figura 1 são apresentadas as fotos dos materiais: solo rosa destorroado e da cal hidratada usada como estabilizante. Os resultados dos ensaios de caracterização física do solo e da caracterização química tanto do solo como da cal são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

A curva granulométrica do solo é apresentada na Figura 2. O solo rosa apresenta uma porcentagem de areia média de 7,5%; areia fina de 25,9%; silte 57,6% e de argila de 9,3%, sendo a porcentagem de silte ($0,002 \text{ mm} < \phi < 0,075 \text{ mm}$) composição da maior parcela do solo (ver Tabela 2). Segundo a Figura 2 e Tabela 2, o diâmetro efetivo do solo foi calculado como $D_{10}=0,0023 \text{ mm}$. Adicionalmente, os diâmetros D_{30} , D_{50} , D_{60} e D_{90} foram medidos como $D_{30}=0,0075 \text{ mm}$, $D_{50}=0,025 \text{ mm}$, $D_{60}=0,050 \text{ mm}$ e $D_{90}=0,25 \text{ mm}$. Assim, os coeficientes de uniformidade (i.e., $C_u=D_{60}/D_{10}$) e de curvatura [i.e. $C_c=(D_{30})^2/(D_{60}\times D_{10})$] do silte foram calculados como $C_u=21,74$ e $C_c=0,48$. De acordo com a proposta de Skempton [27] para a atividade (A) das argilas, a parcela de argila presente no solo (Tabela 2) é classificada como ativa ($A>1,25$).

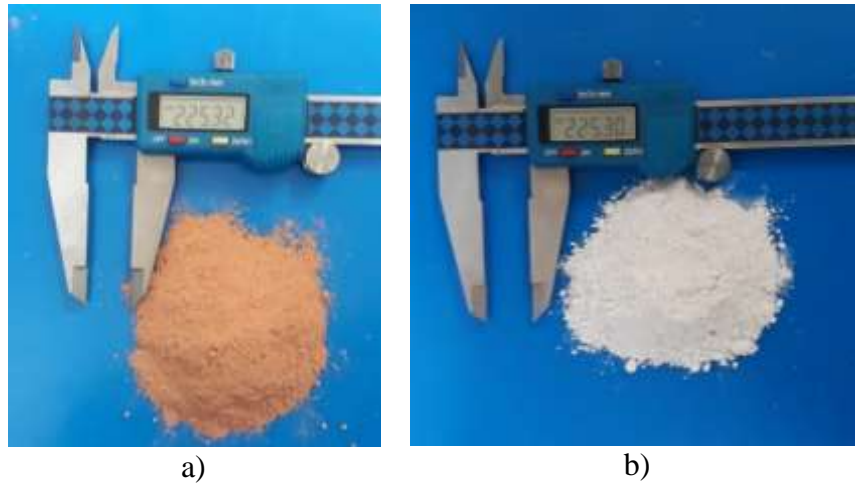


Figura 1: Fotos do solo destorroado e da cal dolomítica

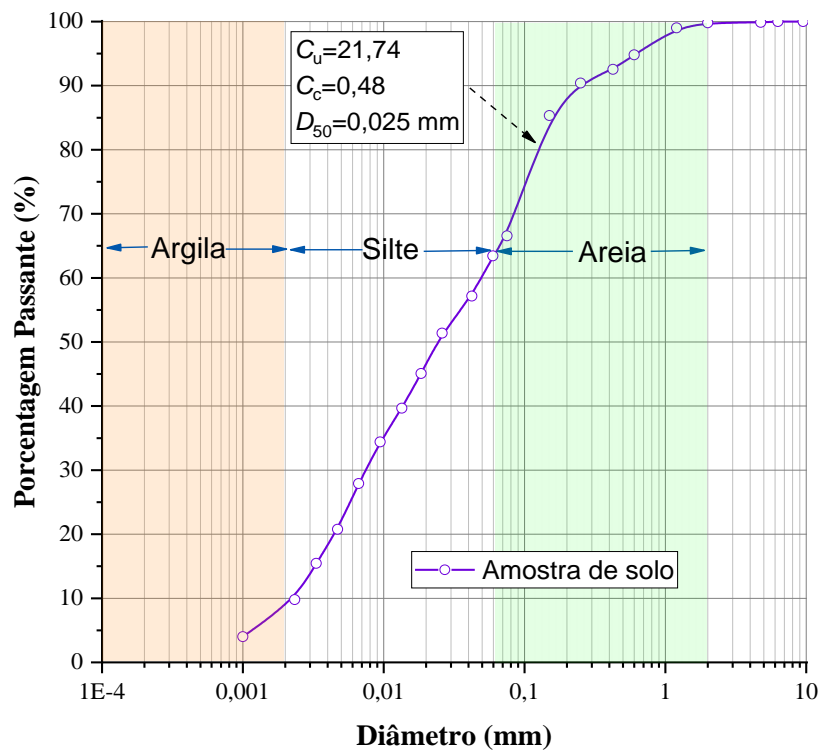


Figura 2: Curva granulométrica do solo rosa

Tabela 2: Propriedades físicas do solo rosa

PROPRIEDADE	VALOR
Limite de liquides (LL), %	53,1
Índice de plasticidade (IP), %	21,3
Densidade real dos grãos (Gs)	2,71
Brita (4,75 mm < ϕ < 19 mm), %	0
Areia grossa (2,0 mm < ϕ < 4,75 mm), %	0
Areia média (0,425 mm < ϕ < 2,0 mm), %	7,5
Areia fina (0,075 mm < ϕ < 0,425 mm), %	25,9
Silte (0,002 mm < ϕ < 0,075 mm), %	57,6
Argila (ϕ < 0,002 mm), %	9,3
Diâmetro efetivo (d_{50}), mm	0,025
C_u	21,74
C_c	0,48
Atividade, A [$A=IP/(% < 0,002 \text{ mm})$]	2,29
Classificação SUCS	MH
Cor	Rosa

A cal usada para o presente estudo foi uma cal hidratada dolomítica CH-III, composta, principalmente, por hidróxidos de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ e magnésio $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$, produzida no município de Almirante Tamandaré, Região Metropolitana de Curitiba, Estado do Paraná, Brasil. A atribuição de cal dolomítica dá-se pela quantidade de óxido de magnésio presente no calcário, neste caso é próximo ao 10% (segundo a Tabela 3). Esse material foi escolhido como agente cimentante por ser de grande uso para estabilização de solos de forma geral, por já ter sido usado em outras pesquisas realizadas anteriormente (e.g., [13, 16, 28, 29]) por ser de baixo custo, o que é uma variável muito importante quando, por exemplo, a cal é empregada em obras civis nas quais são usados grandes volumes de solo como pavimentação de estradas.

A cal hidratada foi obtida de um distribuidor local da cidade de Curitiba (Paraná) em embalagem de 20 kg, armazenada no Laboratório de Geotecnia/UTFPR, em um lugar fechado e vedada depois de cada uso para evitar a carbonatação. A Finura da cal foi medida calculando o número de partículas passantes pela peneira 200. Aproximadamente 91% das partículas de cal são menores a 0,075 mm de diâmetro [30]. A quantidade de óxido de cálcio é um dos parâmetros que dá resistência aos solos melhorados com cal. Outro fator que acelera as reações solo-cal é a temperatura de cura, que pode diminuir substancialmente os tempos de cura. A porcentagem de óxidos presente na CH-III usada neste estudo, promove resistências mecânicas que podem, por exemplo tornar os solos da Formação Guabirotuba úteis na área de pavimentação.

Tabela 3: Composição química do solo e da cal hidratada

COMPOSTO	CONCENTRAÇÃO (%)	
	SILTE ROSA	CAL HIDRATADA
SiO_2	53,12	0,70
Al_2O_3	24,30	0,40
Fe_2O_3	10,46	0,20
CaO	0,03	63,20
MgO	0,28	10,40
K_2O	0,39	0,30
Na_2O	0,02	0,10
TiO_2	1,37	0,20
MnO	0,17	ND
P_2O_5	0,22	ND
P. Fogo	9,64	24,5

ND: Não detectado

A água utilizada tanto para a moldagem de corpos de prova quanto para os ensaios de caracterização do solo foi a destilada, pois está livre de impurezas e evita reações não desejadas [10]. A água usada para o

umedecimento dos corpos de prova para ensaios de durabilidade e para a saturação dos corpos de prova antes dos ensaios mecânicos (compressão simples) também foi destilada.

2.2 Moldagem dos corpos de prova e ensaios de resistência mecânica

Para os ensaios de compressão simples foram moldados em corpos de prova de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, conforme preconizado na NBR 12025 [30]. Depois da coleta em campo, o solo foi seco, totalmente, em estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, e colocado em porções uniformemente distribuídas para ser misturado com cal. Adicionou-se a quantidade de cal com referência ao peso seco da amostra de solo nos teores de 3%, 5%, 7% e 9%. Realizou-se a mistura do solo com a cal de modo que a mistura ficasse a mais homogênea possível. Em seguida, foi adicionada uma porcentagem de água em peso, sendo esta porcentagem referente ao teor de umidade dos pontos de moldagem estabelecidos na Tabela 4 resultantes dos ensaios de compactação em várias energias de acordo com a NBR 7182 [26]. A mistura do solo-cal com a água destilada foi realizada em um período não superior a 7 minutos, com isto tentando minimizar as reações da cal com a água antes do processo de moldagem dos corpos de prova. As amostras para a moldagem dos corpos de prova foram compactadas estaticamente em três camadas com um molde de aço inox com diâmetro interno de 50 mm, altura de 100 mm e espessura de 5 mm, nas condições de compactação mostradas na Tabela 4. A primeira e segunda camada eram escarificadas. Para assegurar o peso específico seco aparente foi realizado o cálculo do volume do molde e do peso de mistura úmida (dividida em três partes) necessários para cada corpo de prova. Após esses cálculos, foi pesada a quantidade necessária de material para cada corpo de prova. A moldagem foi feita manualmente.

Os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão de 0,01 g e as dimensões dele eram medidas com o uso de um paquímetro de 0,1 mm de precisão. Os corpos de prova extraídos de seus moldes foram envolvidos com plástico filme transparente para manter o teor de umidade. Por último, os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida para processo de cura por 15, 30, 60, 90, 180, 360 e 500 dias. As amostras tinham que respeitar os seguintes erros máximos para serem usadas nos ensaios de compressão simples: dimensões das amostras com diâmetro de $\pm 0,5$ mm e altura de ± 1 mm, peso específico aparente seco (γ_d) de $\pm 1\%$ e teor de umidade (ω) de $\pm 0,5\%$ [10, 28]. Para cada ponto de moldagem ou energia de compactação, tipo de ensaio e teor de cal foram moldados 3 corpos de prova.

Tabela 4: Definição dos pontos de moldagem para ensaios de compressão simples e tração diametral

PONTO DE MOLDAGEM	TEOR DE	PESO ESPECÍFICO	SATURAÇÃO
	UMIDADE (%)	SECO (kN/m^3)	
1-Energia normal	28,5	13,80	0,82
2-Energia intermediária	22,8	15,10	0,80
3-Energia modificada	20,0	16,15	0,83

Para a realização dos ensaios de compressão simples foi usada uma prensa automática com capacidade de 30 kN. Os ensaios foram feitos com um sistema automatizado, medindo, principalmente, a força aplicada e a deformação com uma sensibilidade de 0,01 mm, sendo a velocidade do ensaio de 1,50 mm/min. Os procedimentos para os ensaios de compressão simples seguiram a norma brasileira NBR 12025 [30].

2.3 Ensaios de sucção matricial

Para a realização dos ensaios de sucção matricial das misturas solo-cal foi utilizada a metodologia do papel filtro proposta por [31], e seguindo também a norma americana ASTM D 5298 [32]. O ensaio foi realizado pelo procedimento de secagem em câmara úmida. Para a obtenção da sucção matricial foram trabalhados 50 corpos de prova em todos os tempos de cura e teores de cal. O papel usado para medir a sucção matricial foi o Wathman® N°. 42. Este foi recortado em círculos menores que o diâmetro das amostras de solo (50 mm). O papel foi colocado na estufa, a 60°C , por 48 horas para retirar a umidade presente.

Para a realização dos ensaios, o papel filtro era retirado da estufa em um recipiente fechado que assegurasse a sua não reumidificação. Cada papel filtro era pesado em uma balança de resolução de 0,0001 g em um intervalo não maior que 5 segundos, desde o momento em que era retirado do recipiente fechado até o momento em que era colocado na balança. Depois de pesado, um papel filtro era colocado em contato com o solo, um papel acima e outro embaixo, isto é, em cima e em baixo da amostra. Posteriormente, as amostras com o papel filtro eram envoltas, novamente, com um plástico filme impermeável e devidamente

identificadas para serem levadas à câmara úmida durante um período que variou entre 7 e 10 dias de acordo à metodologia de [33] para o papel filtro Wathman® N°. 42.

Depois deste período de 7 a 10 dias, as amostras eram retiradas da câmara úmida, o papel era retirado da amostra do solo e era pesado na balança de precisão, anotando o peso final úmido. A diferença entre o peso inicial seco e o peso final úmido fornece a porcentagem de água que o papel ganhou com o contato direto com o solo, correspondente ao fluxo de água capilar. Com a umidade do papel, foi determinada a sucção matricial usando as curvas de calibração para o papel filtro Wathman® N°. 42 determinadas por [34]. A sucção matricial ou total do papel pode ser calculada pela Equação (1) e Equação (2):

Para umidades do papel filtro > 47%:

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05-2,48\log wf)} \quad (1)$$

Para umidades do papel filtro \leq 47%:

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84-0,0622\log wf)} \quad (2)$$

Onde wf é o teor de umidade final do papel filtro. Foram usadas as amostras dos ensaios de compressão simples para a obtenção da sucção matricial nos diferentes tempos de cura. Foram utilizadas amostras entre 25 e 35 mm de espessura e 50 mm de diâmetro para medição da sucção com a técnica do papel filtro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Influência da relação porosidade/cal e tempo de cura na compressão simples

A Figura 3 correlaciona a relação entre o índice porosidade/cal (η/L_{iv}) e a resistência à compressão simples (q_u) das misturas compactadas de solo-cal para os tempos de cura entre 15 e 500 dias. Nota-se que a melhor forma de representar a correlação entre os dois parâmetros (η/L_{iv} e q_u) foi a através de uma função potencial. Os coeficientes de determinação foram calculados entre 0,82 e 0,97, o que significa a eficiência da relação porosidade/cimento para prever a evolução da compressão simples para cada tempo de cura. A diminuição de $\eta/L_{iv}^{0,18}$ resultou em um aumento de q_u . Isto é, com a diminuição dos vazios das misturas (aumento do peso específico de compactação) e do aumento da quantidade de cal em pó adicionada ao solo.

Para fornecer uma melhor tendência dos pontos experimentais de resistência e obter um melhor coeficiente de determinação o valor do teor volumétrico de cal ajusta-se a um expoente $x/\beta=0,18$. Onde β é um parâmetro que relaciona a resistência de pico q_u ao parâmetro de estado crítico. O expoente 0,18 depende do tipo de solo e do tipo de agente cimentante. Na presente pesquisa o valor de x/β foi obtido entre 0,1 e 1,0 com variações de 0,01. Para o solo estudado o valor de x/β que forneceu o melhor ajuste para os pontos experimentais compressão foi de 0,18 (onde $x=0,70$); como pode ser visto na Figuras 3.

Os valores máximos de q_u e q_t foi com o 9% de cal. O valor máximo alcançado por q_u foi de 4400 kPa na energia modificada e usando 9% de cal. Foram plotados os resultados da resistência dos 3 corpos de prova feitos por cada teor de cal e cada ponto de moldagem não apresentando variações maiores a 10% entre os três valores para q_u , levando a um melhor ajuste de tendência dos pontos sendo o pior coeficiente de determinação de 0,82 e o melhor de 0,97. Por outra parte se pode mencionar que entre os resultados para cada ponto de moldagem existe uma tendência potencial. Com o uso de 0% de cal o solo não teve um aumento na resistência entre 0-500 dias de cura e com o aumento da densidade do ponto de moldagem, para os demais valores de cal usados esse ganho de resistência para compressão foi aumentando gradualmente sendo o menor ganho para $L=3\%$ e o maior para $L=9\%$.

Para q_u , η/L_{iv} varia de 20 até 30 para os corpos de prova de 3% de cal, de 12 até 18 para 5% de cal, de 9 até 13 para 7% de cal e de 7 até 10 para 9% de cal; sendo variações de 10, 6, 4 e 3 para 3,5, 7 e 9% de cal respectivamente. A variação da relação η/L_{iv} diminui quando é aumentado o teor de cal enquanto essa diminuição faz aumentara resistência alcançada pelas misturas solo-cal.

Como mencionado anteriormente o valor do expoente 0,18 depende do tipo de solo e do tipo de agente cimentante empregado para a estabilização do solo, e $B=3,83$ depende do parâmetro β que quantifica a diferença entre o estado de densidade atual e o correspondente no estado crítico das misturas. Nas Figura 3 se

pode perceber um aumento potencial da resistência das misturas de solo com cal. Assim, é possível estabelecer uma relação entre q_u para cada uns dos tempos de cura, tendo em consideração a relação $\eta/L_{iv}^{0,18}$ e tomando um valor empírico de $B=3,83$.

As Equações (3), (4), (5), (6), (7), (8) e (9) apresentam estabelecem uma relação entre q_u e $\eta/L_{iv}^{0,18}$ para os tempos de cura de 15, 30, 60, 90, 180, 360 e 500 dias de cura, respectivamente.

$$q_u=781 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,18}} \right]^{-3,83} \quad (R^2 = 0,82) \quad (3)$$

$$q_u=1117 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,18}} \right]^{-3,83} \quad (R^2 = 0,93) \quad (4)$$

$$q_u=1226 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,18}} \right]^{-3,83} \quad (R^2 = 0,96) \quad (5)$$

$$q_u=1329 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,18}} \right]^{-3,83} \quad (R^2 = 0,96) \quad (6)$$

$$q_u=1478 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,18}} \right]^{-3,83} \quad (R^2 = 0,97) \quad (7)$$

$$q_u=1582 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,18}} \right]^{-3,83} \quad (R^2 = 0,95) \quad (8)$$

$$q_u=1710 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,18}} \right]^{-3,83} \quad (R^2 = 0,93) \quad (9)$$

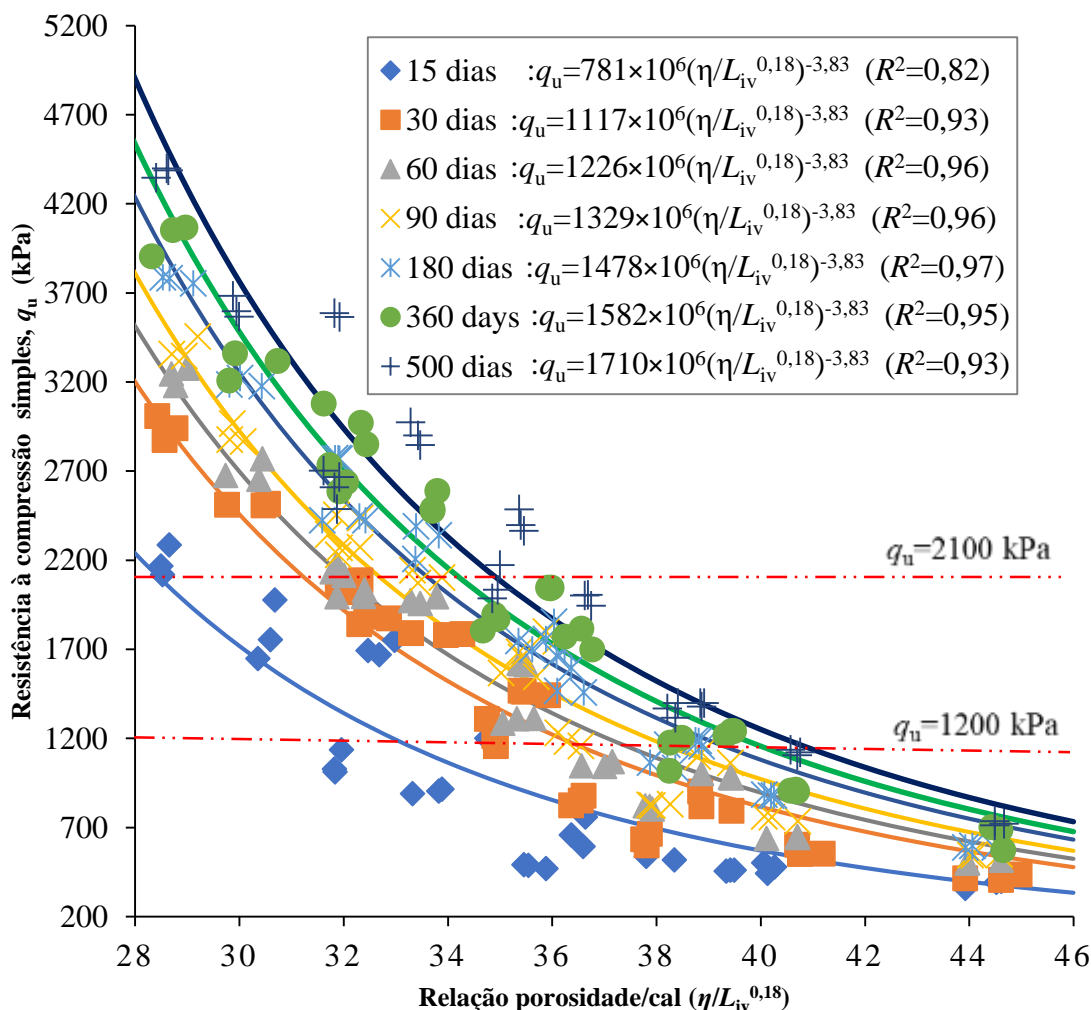


Figura 3: Influência da relação porosidade-cal na resistência à compressão simples das amostras curadas durante 15, 30, 60, 90, 180, 360 e 500 dias.

Em aplicações de campo do solo-cal, as dosagens e tempos de cura dependerão das especificações do projeto. Deve-se notar que, para aplicações em estradas, o tempo de cura deve ser quase sempre curto devido ao cronograma de execução do projeto. Em geral, 64% das misturas compactadas da cal com solo atingem os requisitos mínimos para uso em sub-base, de acordo com a norma americana *TxDOT* [35] e a norma Brasileira DNIT 143 [36], como pode ser observado na Figura 3 (veja as linhas pontilhadas). Segundo essas normas, o requisito mínimo seria de $q_u = 1200$ kPa e $q_u = 2100$ kPa para sub-base e base, respectivamente. O mínimo requerido em norma é obtido com 5% de cal e, com 3% de cal quando compactado acima de $\gamma_d = 15,10$ kN/m³. Com a finalidade de evitar altos teores de cal, a relação $\eta/L_{iv}^{0,18}$ pode ser empregado para atingir 1200 kPa de resistência, aumentando a energia de compactação e diminuindo a quantidade de cal para 4%, sem que haja a necessidade de realização de ensaios confirmatórios.

3.2 Normalização da resistência à compressão simples

Segundo CONSOLI *et al.* [37], para encontrar a equação de estimativa dos solos cimentados artificialmente com o uso da relação $\eta/L_{iv}^{0,18}$, primeiro se deve determinar todas as resistências de normalização com o uso de um valor particular, que para o caso dessa pesquisa será $\eta/L_{iv}^{0,18} = \Omega$ (ômega) igual a 35%.

Para calcular as resistências para normalização, por exemplo, para 15 dias cura, o valor de q_u é representado pela equação $q_u = 781 \times 10^6 \left[\frac{\eta}{(L_{iv}^{0,18})} \right]^{-3,83}$ [Equação (3)]. O valor de Ω foi determinado dentro da faixa que representa $\eta/L_{iv}^{0,18}$ da Figura 3. O valor escolhido foi de $\eta/L_{iv}^{0,18} C = \Omega = 35\%$. Assim, para os 15 dias de cura, a resistência de normalização para q_u pode ser calculado como: $q_u = 781 \times 10^6 [35]^{-3,83}$. Resolvendo essa expressão, tem-se o valor de $q_u = 952,5$ kPa. Procedendo da mesma maneira, ou seja, ao substituir 35%

nas Equações (4)-(8), as outras resistências de normalização para q_{u-n} são: 1362,30 kPa, 1495,86 kPa, 1620,86 kPa, 1802,58 kPa, 1929,42 kPa e 2085,53 kPa para 15, 30, 60, 90, 180, 360 e 500 dias de cura, respectivamente.

A forma de representar um crescimento único da resistência q_u é mediante a normalização (divisão) das resistências. A normalização final é obtida dividindo a $q_u = A \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,18}} \right]^B$ (Onde A é uma constante em kPa e depende do tempo de cura e das propriedades do solo e do agente cimentante) por um valor específico arbitrário de resistência à compressão simples, correspondente a um valor de um dado ajustado de porosidade, $\eta/L_{iv}^{0,18} = \Omega$, que leva a:

$$\frac{q_u}{q_{u-n} \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{0,18}} = \Omega \right)} = \frac{A (\eta/L_{iv}^{0,18})^{-B}}{A (\Omega)^{-B}} = (\Omega)^B (\eta/L_{iv}^{0,18})^{-B} \quad (9)$$

O valor de Ω foi escolhido da faixa de $\eta/L_{iv}^{0,18}$ média dos tempos de cura. Assim, com o valor de $\Omega=35$, a Equação (9) se converte em:

$$\frac{q_u}{q_{u-n} \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{0,18}} = 35 \right)} = A (\eta/L_{iv}^{0,18})^{-B} \quad (10)$$

Cada valor experimental de q_u deve ser dividido pela sua respectiva resistência de normalização q_{u-n} resultante de valor específico de $\eta/L_{iv}^{0,18}=35$ e calculado com as expressões que seguem a forma da Equação (10) para cada tempo de cura. Quando cada valor experimental de resistência é dividido pela sua respectiva resistência de normalização q_{u-n} é obtido um valor quocientes. Os valores quocientes de compressão simples do solo estudado para todos os tempos de cura formam uma mesma tendência potencial descrita pela Equação (11) e mostrada na Figura 4 junto com a normalização das resistências. Assim, a Equação (10) se converte em uma equação única que descreve o comportamento de q_u para os tempos de cura de 15-500 dias:

$$\frac{q_u}{q_{u-n} \left(\frac{\eta}{L_{iv}^{0,18}} = 35 \right)} = 819937 (\eta/L_{iv}^{0,18})^{-3,83} \quad (R^2=0,93) \quad (11)$$

A Equação (11) pode ser empregada para estimar a resistência de qualquer dos tempos de cura estudados com o uso da relação $\eta/L_{iv}^{0,15}$ ou pode se estender a outro tipo de solos da Formação Guabirotuba com propriedades similares.

Os valores normalizados da resistência obtêm um coeficiente de determinação $R^2=0,93$, sendo uma excelente tendência única de todos os pontos experimentais e pontos normalizados, e também para todos os tempos de cura dos corpos de prova. Logo, se os valores de $B=-3,83$ e $0,18$ experimentais forem aplicados na Equação (9), a expressão de estimativa para o cálculo do comportamento mecânico através de ensaios de compressão simples para o solo estudado e para qualquer tempo de cura se converte na forma descrita pela Equação (11).

Na Figura 3 também foram plotadas as linhas normalizadas para camadas de base ($q_u = 2100$ kPa) e sub-base ($q_u = 1200$ kPa) rodoviárias, nota-se que todas as resistências abaixo de $q_u/q_{u-n}=1,13$ e $q_u/q_{u-n}=0,88$ são aceitáveis para sub-base para pavimentação e as resistências das misturas solo-cal abaixo de $q_u/q_{u-n}=0,92$ e $q_u/q_{u-n}=0,63$ são potencialmente aplicáveis para base de pavimentos. Embora os critérios adequados para validar uma mistura para aplicação em estradas sejam o módulo resiliente e os ensaios de deformação permanente, ou ISC (Índice Suporte de Califórnia) e expansão, ensaio de compressão não confinado está diretamente relacionado a esses testes e pode ditar uma possível aplicação de um material de base/sub-base.

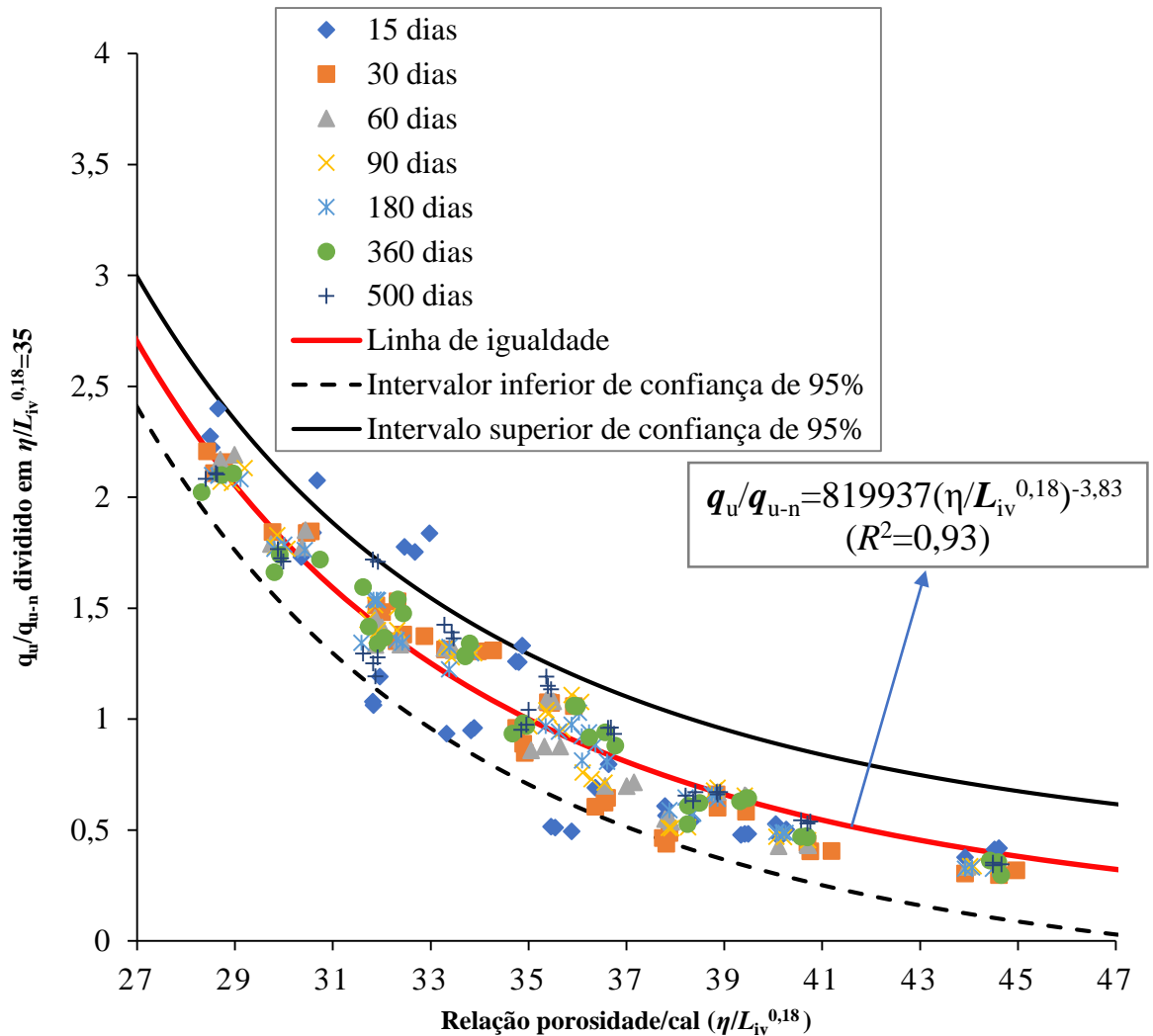


Figura 4: Normalização da relação $\eta/L_{iv}^{0,18}$ sobre as resistências à compressão simples em todos os tempos de cura (15-500 dias) para o solo siltoso estabilizado com cal hidratada dolomítica.

Com objetivo de comparar a resistência normalizada do presente estudo em termos de q_u/q_{u-n} com outro tipo de solos siltosos estabilizados, na Figura 5 foram plotados os resultados dos programas experimentais de q_u/q_{u-n} de vários autores (i.e. [6, 12, 13, 28]). BALDOVINO *et al.* [6] estudaram misturas de solo amarelo siltoso da Formação Guabirotuba estabilizado com vidro moído e cimento durante 90-dias de cura e [37] aplicaram, com êxito, pela primeira vez em campo *binder* com um novo agente cimentante de vidro moído e cal; MOREIRA *et al.* [12] estudou o melhoramento de q_u para um solo siltoso misturado com resíduos de telha moída e cimento Portland para 28-dias de cura; CONSOLI *et al.* [28] avaliaram a compressão simples de uma argila arenosa estabilizada com cal durante 1 ano de cura e TEIXEIRA [13] estabilizou um solo silto-arenoso da Formação Guabirotuba melhorado com cal até 180-dias de cura.

A Figura 5 apresenta a normalização de q_u (para toda a faixa de η/L_{iv}^x e η/C_{iv}^x) dividindo por q_{u-n} para qualquer valor fixo de η/L_{iv}^x ou η/C_{iv}^x , considerando a resistência das misturas compactadas silte-cal de acordo com o presente estudo, misturas compactadas silte-cimento-vidro de acordo com BALDOVINO *et al.* [6], misturas compactadas argila arenosa-cal de acordo com CONSOLI *et al.* [28], misturas compactadas de resíduos de telhas-cimento-silte de acordo com MOREIRA *et al.* [12], e misturas solo-cal em concordância com TEIXEIRA [13] usando vários períodos de cura, pesos específicos secos e teores de umidade de moldagem.

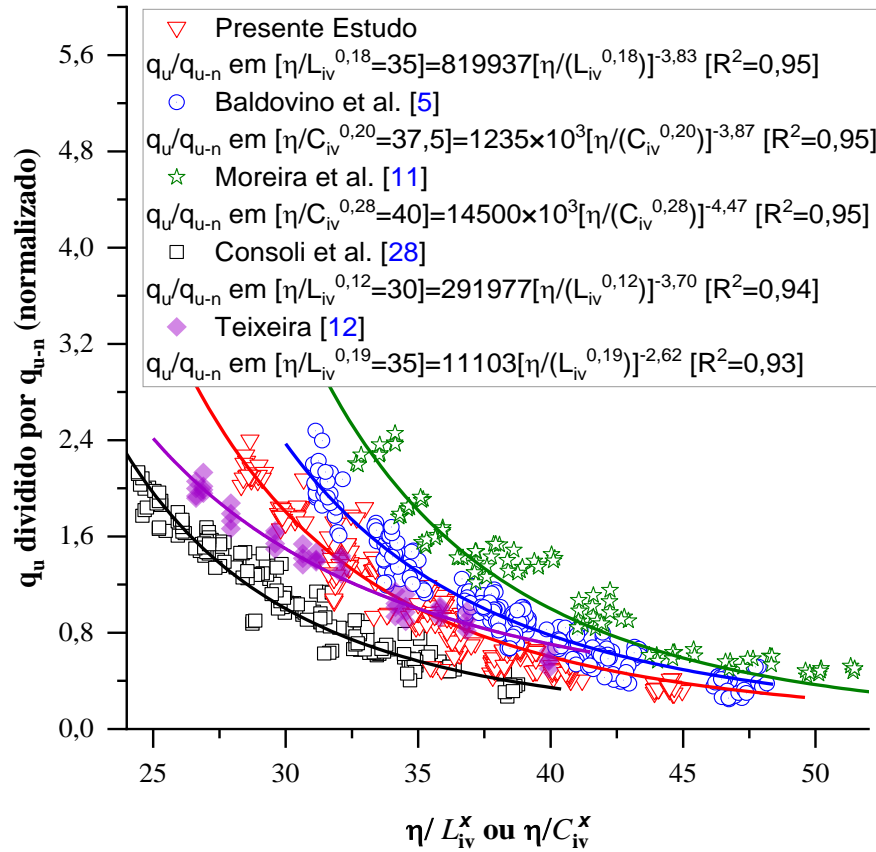


Figura 5: Normalização de q_u (para toda a faixa de η/L_{iv}^x e η/C_{iv}^x) comparando os resultados com autores da literatura.

De acordo com a Figura 5, a resistência normalizada de cada tipo de mistura mostra uma tendência ao desenvolvimento de sua resistência ao longo do tempo ou por meio de outras variáveis como o teor de umidade de moldagem. As misturas que contém cimento atingem valores maiores de q_u/q_{u-n} em comparação com as misturas que possuem cal, que adquirem resistências normalizadas inferiores. Consequentemente, o índice η/L_{iv}^x e η/C_{iv}^x tem uma influência direta nos valores q_u/q_{u-n} de cada mistura. As misturas de solo-cal apresentadas no presente trabalho se encaixaram maior das faixas normalizadas dos estudos realizados por [13, 28], ou seja, a performance do solo siltoso rosa da Formação Guabirotuba foi superior em comparação com os outros siltes independentemente do tempo de cura.

3.3 Desenvolvimento da compressão simples por meio de uma equação de dosagem

Os valores de $q_u - [\eta/L_{iv}^{0,18}]$ são independentes do tempo de cura. Já o valor de η inicial das misturas depende do peso específico seco de moldagem: $\gamma_d=13,80 \text{ kN/m}^3$ ($\eta=49,3\%$), $\gamma_d=15,10 \text{ kN/m}^3$ ($\eta=44,50\%$) e $\gamma_d=16,15 \text{ kN/m}^3$ ($\eta=40,60\%$). Por outro lado, L_{iv} depende da quantidade de cal (em volume) por volume de solo+vazios (vazios=água+ar) no qual está contido. Com isto, menores valores de η e maiores valores de L_{iv} significam maiores valores de resistência mecânica na compressão.

Com o uso da relação $\eta/L_{iv}^{0,18}$ mostrada nas Figura 3 se pode encontrar uma equação que permita estimar a resistência à compressão simples para qualquer tempo de cura em função da porosidade e do teor volumétrico da cal presentes nas amostras, uma vez que o teor de cal, a porcentagem de solo e o peso específico seco de moldagem estão diretamente imersos na relação $\eta/L_{iv}^{0,18}$. Se as Equações (3)-(9) forem divididas pela expressão $10^6[\eta/L_{iv}^{0,18}]^{-3,83}$, é obtida uma constante que aumenta com o tempo de cura. Assim, na Figura 6 são apresentados a evolução da resistência à compressão simples desde 15 até 500 dias de cura. O aumento do tempo de cura produz um aumento nos valores de q_u mostrando um aumento logarítmico com valores de coeficiente de determinação de $R^2=0,97$. Uma equação de dosagem para q_u pode ser proposta com a relação $\eta/L_{iv}^{0,18}$ e com o tempo de cura (t). A expressão de dosagem para q_u é mostrada pela Equação (12).

$$q_u = [239,62 \ln(t) + 222,27] \times 10^6 (\eta/L_{iv}^{0,18})^{-3,83} \quad (R^2=0,97) \quad (12)$$

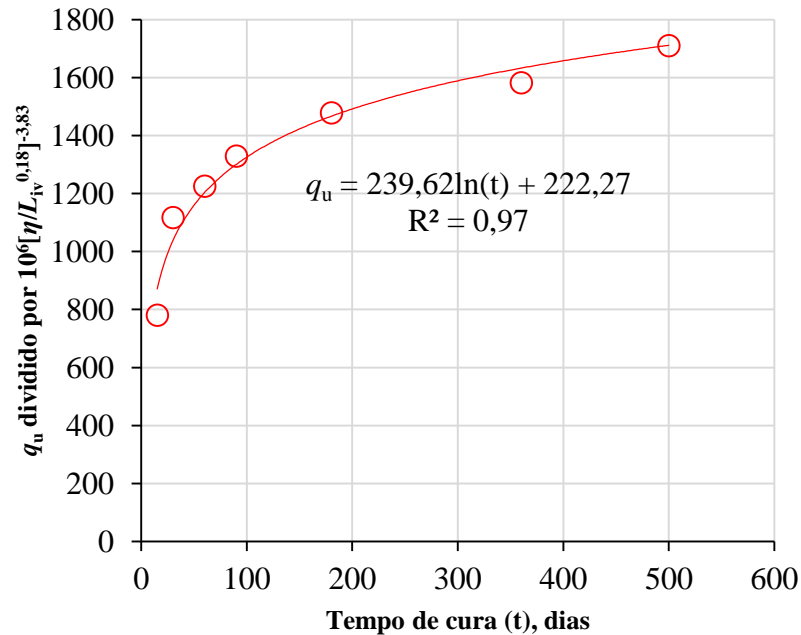


Figura 6: Influência da relação porosidade-cal na resistência à compressão simples das amostras curadas durante 15, 30, 60, 90, 180, 360 e 500 dias.

A Equações (12) de dosagem para q_u são validadas se os valores de porosidade, tempo de cura e teor volumétrico de cal dos 252 corpos de prova, que foram submetidos a ensaios de resistência de compressão, forem inseridos nas mesmas equações e apresentarem valores com pouca dispersão. São apresentados nas Figura 6 os resultados de validação da equação de dosagem de q_u .

Observa-se na Figura 7 que os ajustes dos valores experimentais em relação aos valores calculados são de 95% para compressão simples, portanto, a relação $\eta/L_{iv}^{0,18}$ e normalização são uma metodologia válida para dosar as misturas solo-cal, no presente estudo.

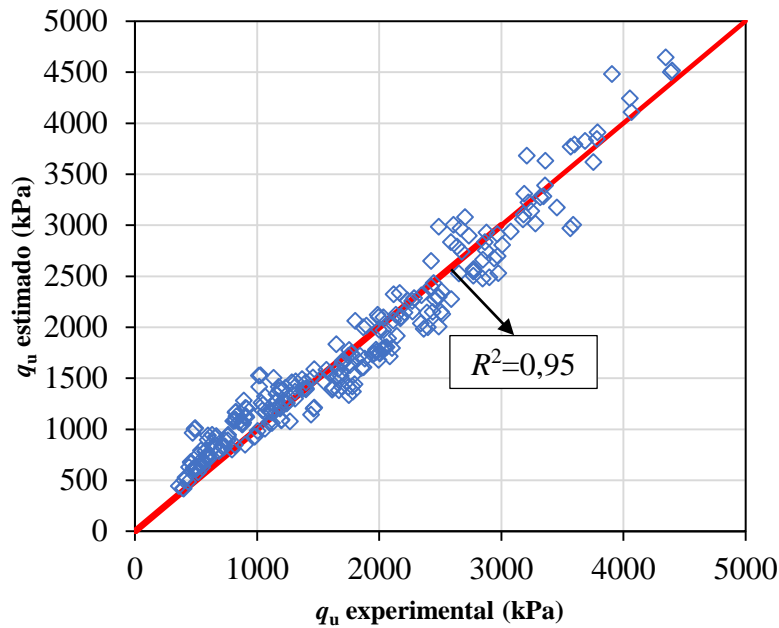


Figura 7: Validação da equação de estimativa [Equação (12)] da resistência à compressão simples usando a relação $\eta/L_{iv}^{0,18}$ e os tempos de cura.

3.4 Influência da sucção matricial

Para determinar se a sucção teve influência na resistência mecânica das misturas solo-cal foram medidos valores de sucção matricial com uma técnica simples e econômica conhecida como a técnica ou método do papel filtro. Foram escolhidas algumas amostras representativas de cada teor e tempo de cura para avaliar o grau de sua influência sobre a resistência à compressão. À vista disto, a Tabela 5 e Tabela 6 apresentam os valores de sucção matricial das amostras escolhidas nos diferentes tempos de cura (entre 15 e 180 dias). Os espécimes de ensaiados exibiram uma variação de $\pm 0,5\%$ do teor inicial de umidade, com grau saturação ocorrendo entre 80% e 82,5%. A sucção calculada com o método do filtro de papel produziu resultados, em média, entre 17 e 82,5 kPa para todos os tempos de cura.

Tabela 5: Influência do teor de cal e tempo de cura (15, 30 e 60 dias) na sucção matricial e resistência à compressão simples.

% CAL	15 DIAS DE CURA			30 DIAS DE CURA			60 DIAS DE CURA		
	Ψ (kPa)	q_u (kPa)	Ψ/q_u	Ψ (kPa)	q_u (kPa)	Ψ/q_u	Ψ (kPa)	q_u (kPa)	Ψ/q_u
3	16,8	294,1	5,7	13,0	304,2	4,3	15,0	343,5	4,4
3	15,0	392,9	3,8	9,0	414,5	2,2	25,0	501,9	5,0
5	17,9	538,7	3,3	20,0	632,5	3,2	32,0	817,5	3,9
5	22,9	657,8	3,5	21,0	850,7	2,5	35,0	1046,9	3,3
7	15,6	460,3	3,4	15,5	818,3	1,9	34,0	981,9	3,5
7	21,6	903,9	2,4	20,1	1784,8	1,1	54,0	1972,8	2,7
7	20,6	1027,9	2,0	21,8	1871,8	1,2	65,0	1996,9	3,3
9	12,0	1200,9	1,0	34,0	1212,1	2,8	67,0	1310,7	5,1
9	13,0	1753,8	0,7	56,5	2510,7	2,3	80,0	2676,4	3,0
9	12,0	2166,7	0,6	66,0	2940,0	2,2	75,0	3245,4	2,3

Os maiores valores de sucção foram obtidos pelas amostras com alto peso específico seco, cura de 180 dias e resistência mecânica superior a 3500 kPa. Os valores de sucção mais baixos foram obtidos das amostras com um baixo peso específico seco, tempo de cura curto (entre 15 e 60 dias) e resistência mecânica de até 470 kPa. Os valores de sucção determinados com a metodologia do papel filtro foram entre 15 e 85,5

kPa. Todos os valores de sucção calculados variaram, em média, entre 1% a 6% dos valores de resistência mecânica total. Pode-se concluir que, para esses valores, a sucção não é uma variável relevante para as análises do presente estudo. CONSOLI *et al.* [28] também encontraram que a sucção matricial depois de 80% de saturação não influencia na resistência de misturas solo-cal.

Tabela 6: Influência do teor de cal e tempo de cura (90 e 180 dias) na sucção matricial e resistência à compressão simples

% CAL	90 DIAS DE CURA			180 DIAS DE CURA		
	Ψ (kPa)	q _u (kPa)	Ψ/q _u	Ψ (kPa)	q _u (kPa)	Ψ/q _u
3	25,0	339,5	7,4	25,0	337,6	7,4
3	54,0	545,5	9,9	54,0	588,1	9,2
5	56,0	826,4	6,8	56,0	1063,7	5,3
5	87,0	1182,2	7,4	87,0	1466,9	5,9
7	32,0	1098,7	2,9	65,0	1185,8	5,5
7	34,0	2103,5	1,6	62,0	2339,1	2,7
7	82,0	2270,3	3,6	77,0	2771,9	2,8
9	54,0	1567,5	3,4	80,4	1695,1	4,7
9	67,0	2876,7	2,3	67,5	3186,1	2,1
9	82,5	3356,7	2,5	79,0	3781,7	2,1

A Figura 8 apresenta um resumo dos resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6. Mostra-se um aumento da resistência à compressão simples com o aumento do tempo de cura. Por exemplo, para 15 dias de cura obteve-se uma resistência máxima de 2166,7 kPa, para 30 dias de 2940 kPa, para 60 de 3245,4 kPa, para 90 dias de 3356,7 kPa e finalmente para 180 dias de cura um valor de q_u de 3781,7 kPa.

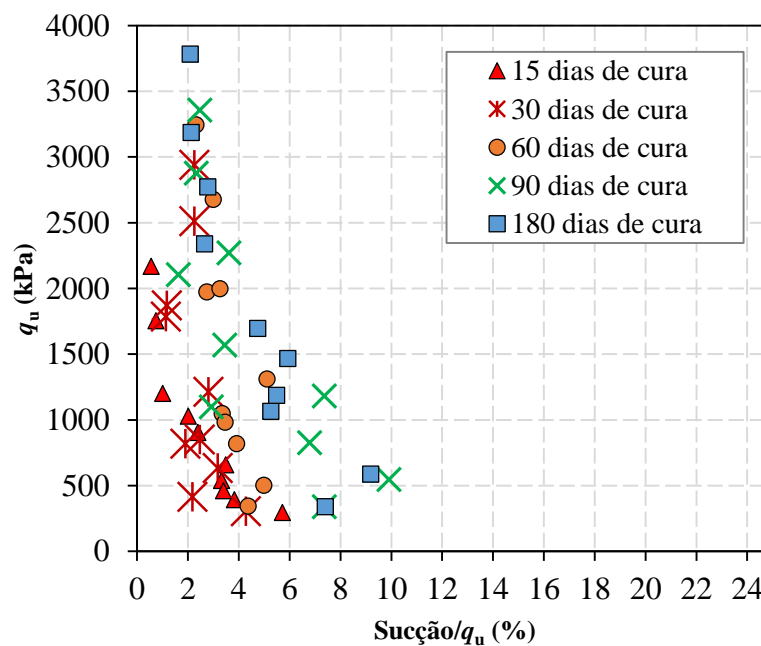


Figura 8: Influência da sucção matricial na compressão simples ao longo do tempo.

A relação sucção/compressão simples aumenta com o tempo de cura, o que significa que as amostras tiveram uma diminuição dos vazios e da variação do teor de umidade inicial. Com a diminuição da umidade presente nos vazios apresenta-se um aumento na sucção das partículas do sol-cal sobre a água que fica livre nos poros. Por outra parte, comparando a Figura 7 e as Tabelas 5 e 6, a resistência aumentou com o tempo de cura o com o teor de cal, devido às reações pozolânicas.

5. CONCLUSÕES

A partir do programa experimental, da apresentação, da análise e da discussão dos resultados apresentados foram obtidas as seguintes conclusões:

- De acordo com os teores de cal empregados (3, 5, 7 e 9%) para o solo estudado os valores da resistência à compressão simples aumentaram de maneira potencial com o uso da relação porosidade/cal. O uso de 500 dias de cura demonstrou que as propriedades mecânicas do solo estabilizado continuam aumentando depois de 1 ano, o que pode ser benéfico para obras geotécnicas já que a durabilidade do material melhorado aumentará.
- Tanto o aumento do peso específico seco de moldagem como o tempo de cura aumentaram a resistência à compressão e sucção matricial do solo. As resistências q_u cresceram com a variação do peso específico de moldagem, enquanto que os valores q_u cresceram de maneira logarítmica com a variação do tempo de cura normalizado [Equação (12)]. Por outra parte, a relação $\eta/L_{iv}^{0,18}$ e normalização das resistências são uma metodologia válida para dosar as misturas solo-cal, no presente estudo.
- O uso do expoente 0,18 para o teor volumétrico de cal (L_{iv}) se ajustou de forma eficaz aos pontos experimentais para a compressão simples. Assim, a relação vazios/cal ($\eta/L_{iv}^{0,18}$) mostrou ser válida para a estimativa dos valores de resistência das misturas solo-cal à compressão. De acordo com o presente estudo, o valor do expoente (0,18) não depende do tempo de cura, da umidade de compactação e nem do peso específico seco de moldagem, depende do tipo de solo e do tipo de cal como foi concluído em estudos prévios de outros autores.
- Durante a realização dos cálculos e das análises, foi encontrado que o comportamento da resistência à compressão simples seguiu a seguinte equação: $q_u = A \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,18}} \right]^B$. Nesta equação o valor de A cresceu com o aumento do tempo de cura. Os resultados mostraram que a equação geral de estimativa obteve ajustes de 95%.
- Em geral, 64% das misturas compactadas da cal com o solo (5% de cal, 3% de cal e $\gamma_d > 15,10 \text{ kN/m}^3$) atingem os requisitos mínimos para uso em sub-base para $q_u \geq 1200 \text{ kPa}$, de acordo com as normas atuais de uso de material estabilizado para aplicações geotécnicas e pavimentação.
- As misturas de solo-cal tiveram uma performance superior em quanto a resistências normalizadas em comparação com os outros siltes estabilizados com cal reportados na literatura recente, independentemente do tempo de cura, o que indica o potencial uso destas misturas em obras na cidade de Curitiba, ou em outras regiões que tenham solos de origem geológica similar ou propriedades geotécnicas parecidas.
- Finalmente, foi comprovado que a sucção matricial não teve influência maior a 10% sobre a resistência das misturas solo-cal o que significa que o processo de saturação final das amostras foi efetiva. Além disso, com o aumento da sucção com o tempo a porosidade das misturas diminuiu.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação Araucária do Paraná no Brasil.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] METCALF, J.B., INGLES, O.G., *Soil stabilization-Principles and practice*, Melbourne, Australia, 1972.
- [2] KORMANN, A.C., *Comportamento geomecânico da Formação Guabirota: estudos de campo e laboratório*, Universidade de São Paulo, Tesis de Doutorado, São Paulo, 2002.
- [3] CONSOLI, N.C., FOPPA, D., FESTUGATO, L., *et al.*, *Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 133, n. 2, pp. 197-205, Feb. 2007.
- [4] DIAMBRA, A., FESTUGATO, L., IBRAIM, E., *et al.*, *Modelling tensile/compressive strength ratio of artificially cemented clean sand*, Soils and Foundations, v. 58, n. 1, pp. 199-211, Feb. 2018.

- [5] BALDOVINO, J.J.A., IZZO, R.L.S., PEREIRA, M.D., *et al.*, *Equations Controlling Tensile and Compressive Strength Ratio of Sedimentary Soil-Cement Mixtures under Optimal Compaction Conditions*, Journal of Materials in Civil Engineering, v. 32, n. 1, p. 04019320, Jan. 2020.
- [6] BALDOVINO, J.J., SANTOS IZZO, R.L., SILVA, É.R., *et al.*, *Sustainable Use of Recycled-Glass Powder in Soil Stabilization*, Journal of Materials in Civil Engineering, v. 32, n. 5, p. 04020080, May 2020.
- [7] BALDOVINO, J., IZZO, R., ROSE, J.L., *et al.*, *Geopolymers Based on Recycled Glass Powder for Soil Stabilization*, Geotechnical and Geological Engineering, v. 38, n. 4, pp. 4013–4031, Aug. 2020.
- [8] BALDOVINO, J.J.A., IZZO, R.L.S., FELTRIM, F., *et al.*, *Experimental Study on Guabirota's Soil Stabilization Using Extreme Molding Conditions*, Geotechnical and Geological Engineering, pp. 1-17, Jan. 2020.
- [9] BALDOVINO, J.J.A., MOREIRA, E.B., CARAZZAI, É., *et al.*, *Equations controlling the strength of sedimentary silty soil–cement blends: influence of voids/cement ratio and types of cement*, International Journal of Geotechnical Engineering, pp. 1-14, May 2019.
- [10] BALDOVINO, J.J.A., IZZO, R.L.S., MOREIRA, E.B., *et al.*, *Optimizing the evolution of strength for lime-stabilized rammed soil*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 11, n. 4, pp. 882-891, Aug. 2019.
- [11] BALDOVINO, J.A., MOREIRA, E.B., IZZO, R.L.S., *et al.*, *Empirical Relationships with Unconfined Compressive Strength and Split Tensile Strength for the Long Term of a Lime-Treated Silty Soil*, Journal of Materials in Civil Engineering, v. 30, n. 8, p. 06018008, Aug. 2018.
- [12] MOREIRA, E.B., BALDOVINO, J.A., ROSE, J.L., *et al.*, *Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 11, n. 2, pp. 369–378, Apr. 2019.
- [13] TEIXEIRA, W., *Comportamento mecânico de misturas solo, cal e RCD para uso em pavimentos*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, 2019.
- [14] AL-RAWAS, A.A., HAGO, A.W., AL-SARMI, H., *Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman*, Building and Environment, v. 40, n. 5, pp. 681-687, May 2005.
- [15] OLA, S.A., *Geotechnical properties and behaviour of some stabilized Nigerian lateritic soils*, Quarterly Journal of Engineering Geology, 1978.
- [16] PUPPALA, A.J., *Advances in ground modification with chemical additives: From theory to practice*, Transportation Geotechnics, v. 9, pp. 123–138, Dec. 2016.
- [17] VANAPALLI, S.K., FREDLUND, D.G., PUFAHL, D.E., *et al.*, *Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction*, Canadian Geotechnical Journal, 1996.
- [18] WANG, Y., CUI, Y.J., TANG, A.M., *et al.*, *Effects of aggregate size on the compressibility and air permeability of lime-treated fine-grained soil*, Engineering Geology, 2017.
- [19] ELKADY, T.Y., *The effect of curing conditions on the unconfined compression strength of lime-treated expansive soils*, Road Materials and Pavement Design, 2016.
- [20] FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H., FREDLUND, M.D., *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2012.
- [21] ABNT, *NBR 7181:2016 Análise Granulométrica*, ABNT, 2016.
- [22] ———, *NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade*, ABNT, 2016.
- [23] ———, *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez*, ABNT, 2016.
- [24] ASTM, *ASTM D854: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [25] ABNT, *NBR 16605-17 Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*, ABNT, 2017.
- [26] ———, *NBR 7182 - Solo - Ensaio de Compactação*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.
- [27] SKEMPTON, A.W., “The Colloidal ‘Activity’ of Clays,” in 3rd International Conference on Soil Mechanics, 1953, pp. 57–61.
- [28] CONSOLI, N.C., PRIETTO, P.D.M., SILVA LOPES, L., *et al.*, *Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil*, Transportation Geotechnics, v. 1, n. 3, pp. 129–136, Sep. 2014.
- [29] ABNT, *NBR-7175-cal-hidratada-para-argamassas*, 2003.
- [30] ———, *NBR 12025 Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio*, ABNT, p. 2, 2012.
- [31] MARINHO, F., *A técnica do Papel Filtro para Medição da Sucção*, Encontro sobre Solos Não Saturados, pp. 111–125, 1995.
- [32] ASTM D5298-16, *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter*

Paper, Astm International, 2016.

[33] CHANDLER, R.J., GUTIERREZ, C.I., *The filter-paper method of suction measurement*, Geotechnique, 1986.

[34] TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, (*TxDOT*) *test procedure for soil-cement testing*, Tex-120-E, Austin, TX., 2013.

[35] NATIONAL DEPARTMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE, *DNIT 143: Pavement Soil-cement base- Service specification*, DNIT, 2010.

[36] CONSOLI, N.C., MARQUES, S.F.V., FLOSS, M.F., *et al.*, *Broad-spectrum empirical correlation determining tensile and compressive strength of cement-bonded clean granular soils*, Journal of Materials in Civil Engineering, v. 29, n. 6, pp. 1–7, 2017.

[37] CONSOLI, N.C., MOREIRA, E.B., FESTUGATO, L., *et al.*, *Spread Footings on Green Stabilized Sand Layers over Weakly Bonded Residual Soil*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 146, n. 11, p. 06020022, Nov. 2020.

ORCID

Jair de Jesús Arrieta Baldovino <https://orcid.org/0000-0001-7740-1679>

Eclesielter Batista Moreira <https://orcid.org/0000-0002-6569-2808>

Ronaldo Luis dos Santos Izzo <https://orcid.org/0000-0002-6290-1520>