

# **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE UM SOLO TÍPICO DE CAXIAS DO SUL/RS REFORÇADO COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**Amanda T. Dalmás**

Engenheira Ambiental e Civil  
atdalmás@icloud.com

**Jaqueline Bonatto**

Professora dos cursos de Engenharia Ambiental e Civil da Universidade de Caxias do Sul/RS  
jbonatto4@ucs.br

**Resumo.** *O crescimento do setor da construção civil contribui para uma significativa geração de impactos ambientais, como o aumento dos resíduos da construção civil (RCC). A reciclagem é uma alternativa para minimizar os problemas provocados pelo acúmulo de resíduos. Atualmente, estão sendo desenvolvidos estudos no uso destes materiais para pavimentação, contenção, aterros, solos reforçados, entre outros. Uma possível solução para locais compostos por solos com baixa capacidade mecânica poderia ser a construção de reforço de solo com RCC para otimizar suas propriedades físicas. Diante deste contexto, o presente trabalho buscou averiguar o desempenho dos RCC na aplicação de solo reforçado. No que tange ao comportamento mecânico, obtido através dos ensaios de resistência à compressão simples, verificou-se que para a moldagem e ruptura imediata, a amostra com melhor desempenho ocorreu com a mistura 25% solo + 75% RCC. Enquanto que, para a ruptura após vinte e quatro horas da moldagem, o melhor desempenho mecânico ocorreu com a mistura 50% solo + 50% RCC*

**Palavras-chave:** *Solo reforçado. Resíduos da Construção Civil. Resistência à compressão.*

## **1. INTRODUÇÃO**

A construção civil, durante anos, vem se destacando por ser um setor em plena expansão, contribuindo significativamente para a economia brasileira. Este expressivo crescimento a tornou uma grande consumidora de energia, bens naturais, matérias primas e insumos. Além disso, a construção civil não apenas contribui para a exaustão destes recursos, como também colabora para uma geração considerável de resíduos. Com a operação inadequada do sistema de gestão destes resíduos, visto que grande parte dos municípios brasileiros não contam com áreas licenciadas e aptas a receberem estes materiais, ocorre a disposição em locais irregulares como em margens de rios, banhados, encostas, ruas e terrenos baldios. Esta disposição, contrária à legislação brasileira, provoca a degradação das áreas de manancial e de preservação permanente, além de proporcionar a proliferação de diversas doenças, colocando as populações que vivem próximas a estas áreas em uma expressiva vulnerabilidade (Souza et al., 2004 apud Karpinski et al., 2008).

Uma alternativa para minimizar os problemas provocados pelo acúmulo de resíduos é a reciclagem. Atualmente, estão sendo desenvolvidos estudos no uso destes

materiais para pavimentação, contenção, aterros, solos reforçados, entre outros.

Segundo Ferraz (2004), o aproveitamento dos resíduos da construção civil se destaca como alternativa à adequada disposição destes materiais. Valorizando os resíduos descartados nas obras de engenharia, atribuindo-lhes a condição de material nobre em vez de simplesmente lançá-los na natureza, retornando-os assim para a cadeia produtiva.

Locais compostos por solos com baixa capacidade mecânica de suportar uma edificação, eram substituídos por outros, alterando a localização por áreas com solos mais resistentes, ou ainda recorrendo a modificações nos projetos. Porém, estas mudanças enfrentam uma série de questões conflitantes, pois alterações significativas no projeto podem ser custosas financeiramente ou inviáveis mercadologicamente (Leal, 2003).

Sendo assim, uma solução é promover a construção de reforço de solo, para otimizar suas propriedades físicas com o intuito de proporcionar uma maior capacidade de resistência. A execução deste tipo de técnica poderia tornar-se inviável pela falta de material específico próximo ao local da construção.

Diante deste contexto, o presente trabalho busca averiguar o desempenho dos resíduos da construção civil na aplicação de solo reforçado gerando uma nova função para estes resíduos.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Solo Típico de Caxias do Sul/RS

Para a realização dos ensaios de solo, foi efetuada a coleta do material no Acesso da Rodovia RS-122, no Bairro Pedancino, município de Caxias do Sul/RS. Na Figura 1 é possível visualizar o ponto onde foi coletado o solo.



Figura 1 - Localização do ponto de coleta do solo.

Na Tabela 1 é possível visualizar as coordenadas geográficas e a cota altimétrica do local da coleta do solo.

Tabela 1. Dados do local da coleta do solo.

Coordenadas	Valores
Longitude UTM	483253.00 m E
Latitude UTM	6781882.00 m S
Altitude	822 m

A amostragem foi realizada com base na NBR 9604 (2016), a qual instrui sobre a retirada de amostras de solo. O material foi coletado com o auxílio de uma pá e foi acondicionado em sacos plásticos resistentes.

**Ensaio de granulometria.** O ensaio de granulometria foi conduzido de acordo com a NBR 7181 (2016). Pesou-se uma amostra de 500 g de solo seco à sombra e destorroado, previamente preparado. Após, inseriu-se o solo dentro da peneira de maior abertura. As peneiras foram posicionadas em ordem decrescente de aberturas: 3/4", 3/8", 4, 10, 16, 20, 30, 40, 60, 80, 100 e 200, contendo um fundo metálico para finalizar (Figura 2). Posto o solo na peneira superior tampou-se esta, e agitaram-se os elementos até o solo se dispersar entre as peneiras.



Figura 2 - Série de peneiras utilizadas.

Em seguida, pesou-se, em uma balança digital de precisão, separadamente cada fração de solo retida nas peneiras, para mensurar o percentual retido em cada faixa de tamanho granulométrico.

**Limite de Liquidez.** Após a preparação inicial da amostra, passou-se na peneira de 0,42 mm, de modo a se ter cerca de 200 g de material passado. O ensaio para determinação do limite de liquidez foi realizado de acordo com a NBR 6459 (2016), onde utilizou-se o aparelho de Casagrande.

Preparou-se uma mistura de solo com uma umidade abaixo da umidade líquida do solo. Após este procedimento, transferiu-se parte da mistura para a concha, moldando-a de forma que na parte central a espessura fosse da ordem, de 10 mm. Dividiu-se a massa de solo em duas partes, passando o cinzel por meio desta, de maneira a abrir uma ranhura em sua parte central (Figura 3).



Figura 3 - Concha do aparelho de Casagrande.

Recolocou-se, cuidadosamente, a concha no aparelho e golpeou-se contra a base, deixando-a cair em queda livre, girando a

manivela à razão de duas voltas por segundo. Anotou-se o número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se unissem ao longe de 13 mm de comprimento. Transferiu-se, imediatamente, uma pequena quantidade do material para junto das bordas que se unira, para um recipiente de peso conhecido, para determinação do peso da amostra com umidade.

Repetiu-se este procedimento cinco vezes, com dois pontos acima da umidade líquida e dois pontos abaixo.

**Limite de Plasticidade.** O ensaio para determinação do limite de plasticidade foi realizado de acordo com a NBR 7180 (2016), onde o solo previamente preparado foi inserido em um recipiente de porcelana e adicionou-se água destilada em pequenos incrementos, amassando e revolvendo, vigorosamente e continuamente, com o auxílio de uma espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, de consistência plástica.

Posteriormente, formou-se uma pequena bola, que foi rolada sobre a placa de vidro com pressão suficiente da palma da mão para lhe dar a forma de cilindro, até atingir dimensões aproximadas de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, conforme gabarito metálico. Foram repetidos quatro vezes este processo, ou seja, feitas quatro amostras (Figura 4).



Figura 4 - Moldagem dos cilindros.

Transferiram-se os cilindros moldados para cápsulas de alumínio para determinar a umidade das amostras.

**Umidade.** O ensaio para determinar a umidade natural do solo foi realizado de acordo com a

NBR 6457 (2016), onde a amostra de solo foi inserida em uma cápsula de porcelana. Primeiramente, pesou-se somente o recipiente e depois disso, o conjunto (cápsula + amostra).

Colocou-se a cápsula em estufa, onde permaneceu até apresentar constância de massa. Retirou-se a cápsula da estufa e transferiu-se para o dessecador, onde permaneceu até atingir a temperatura ambiente. Pesou-se o conjunto. Efetuaram-se três determinações do teor de umidade por amostra.

**Peso Específico.** O ensaio para determinar a massa específica do solo foi realizado de acordo com a NBR 6458 (2016). Primeiramente, calibrou-se o picnômetro, preenchendo-o com água destilada até o menisco e pesando o conjunto (picnômetro + água destilada).

Transferiu-se a amostra de 50 g para o picnômetro, preencheu-se com água destilada o picnômetro até que a base do menisco coincidiu com a marca de referência do aparelho. Agitou-se o picnômetro em intervalos regulares de tempo e aplicou-se vácuo para remoção total do ar aderente às partículas de solo. Pesou-se o conjunto picnômetro + solo + água destilada (Figura 5).



Figura 5 - Conjunto picnômetro + solo + água destilada.

**pH.** Devido à ausência de uma Normativa Brasileira para o ensaio de medição do pH em solos, utilizou-se a Norma ASTM 4972 (2013). Após a calibração do pHmetro, secou-se ao ar uma amostra de solo. Passou-se pela peneira de 2,0 mm, o solo previamente seco.

Separaram-se 2 amostras de aproximadamente 10 g cada, do material passante pela peneira.

Colocou-se 10 g de solo em um recipiente de vidro e os outros 10 g em outro recipiente de vidro, para ambos, adicionou-se 10 mL de água destilada em cada um. Misturou-se bem em cada recipiente a água destilada com a amostra de solo, e deixou-se repousar por 1 hora. Realizou-se a leitura do pH das duas amostras através do equipamento pHmetro.

## 2.2 Resíduos da Construção Civil

A coleta dos resíduos da construção civil foi efetuada na Central de Resíduos Scariot no dia 09 de dezembro de 2017, localizada no bairro São Giacomo, em Caxias do Sul/RS. Esta empresa possui Licença de Operação e está apta a receber todos os tipos de resíduos gerados em obras, seja na construção, reforma ou demolição. Após o recebimento, é feita a triagem do material, onde todos os resíduos provenientes de construção, como blocos, concretos, tijolos, cerâmicos, pedras, mármore, granitos, paralelepípedos são dispostos no alimentador vibratório, triturados em um britador e com o auxílio de esteiras, os materiais passam por peneiras de distintas aberturas.

**Ensaio de Caracterização.** Para determinar as propriedades da amostra de resíduos da construção civil foram executados os ensaios de caracterização física e química no Laboratório de Solos da Universidade de Caxias do Sul. Foram realizados os seguintes ensaios: Granulometria, Massa Específica Seca e pH, conforme a metodologia apresentada para a amostra de solo.

## 2.3 Preparo das Misturas

Para execução dos ensaios de compactação e de compressão simples foram desenvolvidas misturas com distintos teores de resíduos da construção civil e de solo:



- Amostra 01: 25% de RCC + 75% de solo;
- Amostra 02: 50% de RCC + 50% de solo;
- Amostra 03: 75% de RCC + 25% de solo;
- Amostra Solo: somente solo, sem RCC.

## 2.4 Ensaios de Compactação

A preparação da amostra para o ensaio de compactação foi realizada conforme a NBR 6457 (2016), onde foi utilizado o processo de preparação com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima, desmanchando-se os torrões e homogeneizando a amostra. O ensaio de compactação foi conduzido de acordo com a NBR 7182 (2016) para amostras preparadas a 5% abaixo da umidade ótima presumível, sem reuso de material.

Com a umidade bem uniformizada, colocou-se uma porção da amostra em um cilindro pequeno Proctor (Figura 6) e submeteu-se a 26 golpes aplicados perpendicularmente, com um soquete pequeno, deslizando a 30,5 cm em queda livre. Repetiu-se o procedimento mais duas vezes.



Figura 6 - Cilindro para a compactação Proctor normal.

Após a compactação da última camada, removeu-se o molde cilíndrico de sua base. Pesou-se o conjunto, mediu-se o volume, assim foi possível obter o valor da massa específica do solo compactado. Com três amostras do interior do corpo de prova, determinou-se a umidade.

## 2.5 Ensaios de Compressão Simples

O ensaio de compressão simples foi realizado com o intuito de se determinar a

resistência à compressão, não confinada (simples). Devido ao fato de não existirem normas específicas para a determinação da resistência à compressão simples em amostras com resíduos da construção civil, os ensaios foram executados conforme a NBR 12770 (1992), indicada para solos coesivos, mediante a aplicação de carga axial, com controle de deformação.

Para uma maior representatividade dos resultados, realizaram-se ensaios para 3 (três) corpos de prova por mistura. A moldagem dos corpos de prova foi realizada com base nos ensaios de compactação, com a massa específica seca máxima e com o teor de umidade ótimo, parâmetros obtidos em cada um dos ensaios de compactação com os diferentes percentuais de solo e resíduos da construção civil.

Para a moldagem dos corpos de prova não foram utilizados os mesmos moldes do ensaio de compactação, devido a restrições de dimensões no equipamento utilizado no ensaio de compressão. Para o referido ensaio foram utilizados moldes de aço com aproximadamente 10 cm de altura com 5 cm de diâmetro.

A preparação dos corpos de prova foi executada similarmente ao procedimento do ensaio de compactação.

Após, ocorreu a extração do corpo de prova do molde, e foram realizadas as pesagens e medições de altura e diâmetro, de cada um dos corpos de prova moldados.

O equipamento de compressão utilizado foi uma prensa automática da marca Solotest com capacidade máxima de 5.000 kgf. O único parâmetro ajustado para o ensaio foi a velocidade, a qual foi escolhida a mínima permitida pelo equipamento, que é de 10 mm/min, definida como a velocidade de deformação axial específica constante.

Depois disso, inseriu-se o corpo de prova no equipamento de compressão de forma a ficar centrado sobre o prato inferior (Figura 7).



Figura 7 - Posicionamento do corpo de prova na prensa automática.

Iniciou-se o processo de ruptura do corpo de prova. O equipamento possui capacidade de auto-regulagem da velocidade, independente da carga, mantém o avanço sempre constante. A prensa prossegue com o carregamento até que os valores da carga aplicada diminuam com a evolução dos deslocamentos. Salienta-se que lateralmente ao corpo de prova que rompe, inseriu-se um outro corpo intacto com a mesma altura, para medição do deslocamento.

Ao término do ensaio, o equipamento foi conectado ao computador e os dados de tempo, deslocamento e carga foram registrados em uma planilha. A prensa retornou à posição inicial, ficando pronta para um novo ensaio.

### 3. DISCUSSÕES E RESULTADOS

#### 3.1 Ensaio de Granulometria

Com os resultados obtidos no ensaio das peneiras foi possível traçar um gráfico representando a curva granulométrica do solo avaliado e dos resíduos da construção civil, tendo no eixo das abscissas o diâmetro das partículas, que corresponde à abertura das peneiras, e no eixo das ordenadas o percentual passante acumulado. As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 8. A classificação de faixas de tamanhos de partícula ocorre conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995).

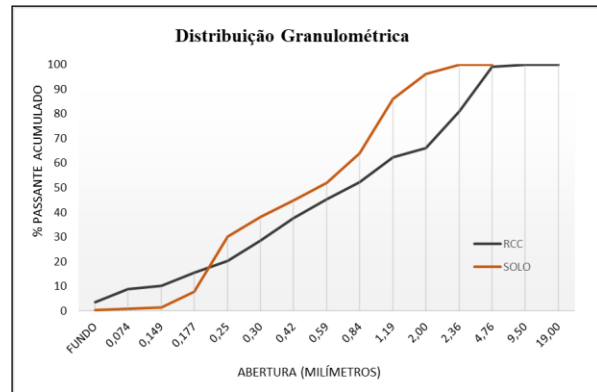


Figura 8 - Distribuição granulométrica.

As composições das amostras podem ser estimadas conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Composições das amostras.

Amostra	Silte/Argila	Areia	Pedregulho
Solo	0,29%	63,55%	36,16%
RCC	3,41%	62,65%	33,95%

Com base nos resultados da Tabela 2 e na análise da Figura 8 é possível classificar ambas amostras com uma composição predominante de areia, especificadamente areia média.

Salienta-se que o ensaio de sedimentação não foi realizado, devido às inexpressivas quantidades de materiais finos que ficaram no fundo das peneiras. Desta forma, justifica-se a não realização do ensaio de sedimentação.

#### 3.2 Limites de Consistência do Solo

Na Tabela 3 é possível visualizar os resultados obtidos nos ensaios dos limites de consistência do solo.

Tabela 3 - Resultados dos limites de consistência do solo.

Parâmetros do solo	Valores
Limite de Liquidez (%)	47,63
Limite de Plasticidade (%)	41,75
Índice de Plasticidade (%)	5,88
Índice de Consistência	2,9
Índice de Liquidez	-1,9

Pelo Índice de Consistência é possível classificar o solo como Duro, no estado sólido ou semi-sólido. Através do resultado do Índice de Liquidez verifica-se que a argila é muito pré-adensada.

### 3.3 Análise da Umidade

Na Tabela 4 observam-se os resultados obtidos nos ensaios de umidade do solo e dos resíduos da construção civil.

Tabela 4 - Resultados das umidades.

Amostra	Umidade
Solo	30,60%
RCC	11,06%

É possível constatar que a amostra de solo possui uma porcentagem de água superior a dos resíduos da construção civil. O solo possui uma maior capacidade de retenção de água.

### 3.4 Análise do pH

Na Tabela 5 visualizam-se os resultados obtidos nos ensaios de pH das amostras.

Tabela 5 - Resultados das análises de pH.

Amostra	pH
Solo	5,25
RCC	8,85

Verifica-se que o pH dos resíduos tem característica alcalina, fato devido à presença de cimento e cal nestes materiais. Enquanto que, o solo analisado apresenta indicativo de acidez, que pode ter influência proveniente do material de origem, de precipitações, decomposição da matéria orgânica, profundidade do solo. Salienta-se que a formação das rochas na região tem origem de derrames ácidos.

### 3.5 Peso Específico

Os resultados obtidos nos ensaios de peso específico das amostras podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos pesos específicos.

Amostra	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )
Solo	25,48
RCC	26,66

Constata-se que o material constituído de resíduos da construção civil possui um valor de peso específico superior ao solo.

### 3.6 Ensaios de Compactação

Na Tabela 7 observam-se os resultados provenientes dos ensaios de compactação para as distintas amostras.

Tabela 7 - Resultados da compactação.

Amostra	Massa Esp. Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)
	1,40	30,24
	1,41	31,56
Amostra 100% solo	1,40	33,62
	1,34	35,81
	1,28	38,88
	1,44	22,35
Amostra 01 75% solo + 25% RCC	1,51	25,33
	1,50	27,32
	1,43	30,20
	1,35	33,57
Amostra 02 50% solo + 50% RCC	1,54	17,21
	1,58	20,82
	1,56	21,97
	1,52	24,34
Amostra 03 25% solo + 75% RCC	1,48	25,81
	1,56	14,66
	1,61	17,23
	1,64	19,58
	1,66	21,50
	1,60	23,48

Na Figura 9 é possível observar as curvas de compactação de cada mistura plotada em um único gráfico.

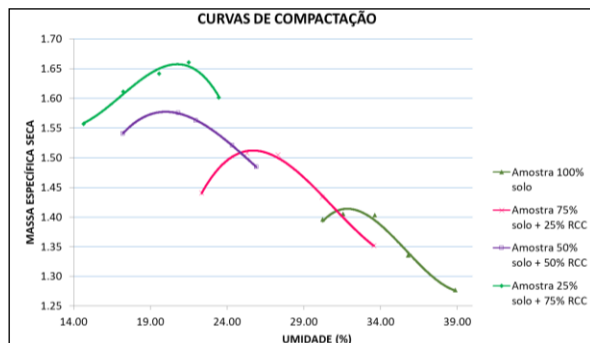


Figura 9 - Curvas de compactação.

Observa-se na Tabela 8 os resultados das massas específicas máximas e das umidades ótimas, conforme a amostra analisada.

Tabela 8 - Resultados das massas específicas máximas e umidade ótima das amostras.

Amostra	Massa específica máxima (g/cm <sup>3</sup> )	W Ótima (%)
100% solo	1,41	31,85
75% solo + 25% RCC	1,51	25,70
50% solo + 50% RCC	1,58	20,05
25% solo + 75% RCC	1,66	21,40

Através da análise da Figura 9 e da Tabela 8 é possível constatar que o incremento de resíduos na amostra acarreta em um aumento na massa específica máxima, além disso, minimiza a umidade ótima.

### 3.7 Compressão Simples

Através dos procedimentos normatizados foi possível realizar os ensaios de compressão simples para as distintas amostras. Salienta-se que foram moldados corpos de prova para ruptura no mesmo dia (imediate) e também para ruptura após um dia de moldagem.

Os corpos de prova que foram rompidos com um dia de cura permaneceram em repouso, em temperatura ambiente (em torno de 20° C) por 24 (vinte e quatro) horas, para então ocorrer a ruptura em uma prensa automática. A umidade do ambiente não foi monitorada ou ajustada durante o tempo de cura.

**Moldagem e ruptura imediata.** Os resultados obtidos nos ensaios com as distintas amostras podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de compressão - ruptura imediata.

Amostra	Ruptura Média (kPa)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
100% solo	137,35	1,65
75% solo + 25% RCC	148,30	1,63
50% solo + 50% RCC	126,09	1,73
25% solo + 75% RCC	66,47	1,84

Na Figura 10 é possível observar os resultados das curvas médias de deformação versus tensão das quatro misturas ensaiadas e rompidas no mesmo dia, sem tempo de cura. Verifica-se que a mistura que apresentou o valor mais significativo de ruptura foi a amostra 75% solo + 25% resíduos da construção civil, seguido da amostra 100% solo e, posteriormente, a amostra 50% solo + 50% resíduos da construção civil.

A amostra com a maior porcentagem de resíduos foi a que apresentou o menor valor de ruptura. Salienta-se que houve dificuldade inclusive para o preparo dos corpos de provas desta mistura e para o encaminhamento entre o local da moldagem até a prensa. Não havia coesão entre as partículas e observava-se uma maior presença de poros nestas amostras.



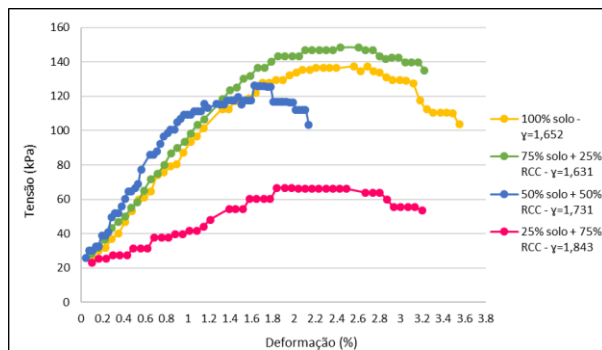


Figura 10 - Gráfico: Deformação x Tensão - Ruptura no mesmo dia.

É possível observar que a amostra com menor valor de massa específica apresentou o maior valor de tensão de ruptura, enquanto que a amostra com o valor de massa específica superior expressou um reduzido valor de tensão de ruptura. Uma hipótese para tal comportamento pode estar associada ao fato de que, provocando a ruptura logo após a moldagem não ocorreu contato e entrosamento suficiente entre as partículas a ponto de aumentar a resistência das amostras com maiores valores de resíduos.

Conforme os resultados dos ensaios de peso específico realizados, pôde-se constatar que os resíduos da construção civil possuem um valor superior de peso do que o solo. Logo, com o incremento de resíduos, as amostras obtiveram valores de massa específica mais elevadas, conforme esperado.

**Moldagem com ruptura após vinte e quatro horas.** Os resultados obtidos nos ensaios com as distintas amostras podem ser visualizados na Tabela 10.

Na Figura 11 é possível observar os resultados das curvas médias de deformação versus tensão das quatro misturas ensaiadas em um dia e rompidas no dia posterior, ou seja, com tempo de cura de um dia. Verifica-se que a mistura que apresentou o valor mais significativo de ruptura foi a amostra 50% solo + 50% resíduos da construção civil, seguida da amostra 25% solo + 75% resíduos

da construção civil e posteriormente da amostra 75% solo + 25% resíduos da construção civil. A amostra sem o incremento de resíduos (100%) solo foi a que apresentou o menor valor de ruptura.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de compressão - ruptura após 1 dia.

Amostra	Ruptura Média (kPa)	Massa espec. (g/cm <sup>3</sup> )
100% solo	286,69	1,73
75% solo + 25% RCC	331,34	1,64
50% solo + 50% RCC	786,56	1,92
25% solo + 75% RCC	409,97	1,85

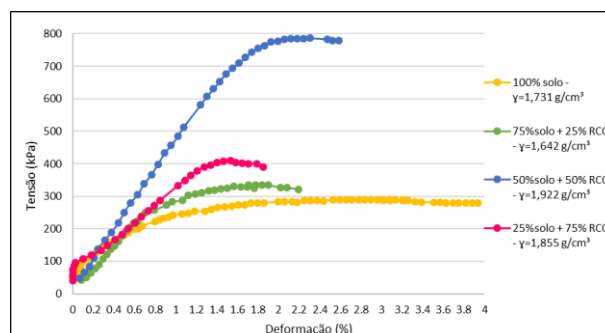


Figura 11 - Gráfico: Deformação x Tensão - Ruptura após um dia.

É possível constatar que a amostra que apresentou o valor máximo de tensão de ruptura possui a maior massa específica. Sendo assim, nota-se que esta amostra tem um peso superior às demais para um mesmo valor de volume. Ou seja, na amostra com 50% solo + 50% resíduos da construção civil, as partículas possuem um entrosamento melhor entre os grãos, provavelmente, minimizando o índice de vazios. No estudo de Ferreira e Thomé (2011), em termos de resistência, a mistura que apresentou o melhor resultado de capacidade de suporte também foi a amostra com 50% de solo + 50% de RCC.

Observa-se que a amostra com somente solo é a que possui uma porcentagem maior de deformação, devido à plasticidade do material. Enquanto que, a mistura com a maior porcentagem de resíduos apresenta a menor deformação, devido ao material ser mais rígido.

Na Tabela 11 é possível observar os ângulos de atrito que foram estimados através da correlação de Valejos et al (2005), em casos onde o ângulo de atrito possui um valor maior que zero, o mesmo é calculado com base no ângulo que a superfície de ruptura do corpo de prova formar com a horizontal.

Tabela 11 - Ângulos de atrito estimados para as amostras com ruptura após 1 dia.

Amostra	Ângulo de atrito ( $\phi$ )
100% solo	30,00
75% solo + 25% RCC	31,33
50% solo + 50% RCC	34,00
25% solo + 75% RCC	43,33

É possível perceber que a amostra que possui o maior ângulo corresponde à mistura com maior porcentagem de resíduos da construção civil. Enquanto que o menor ângulo de atrito é verificado na mistura com apenas solo. Assim, constata-se que com o incremento de resíduos nas misturas eleva-se o ângulo de atrito. Este parâmetro é de fundamental importância na avaliação de reforço de solo.

Também, constata-se que com o aumento do ângulo de atrito obtém-se uma tensão de ruptura superior, exceto para o caso da amostra com a maior porcentagem de resíduos (75%), a qual possui o maior valor de ângulo, porém, com uma resistência intermediária. Tal fato pode estar associado à adição de resíduos da construção civil nas amostras promover uma graduação melhor dos grãos, elevando o contato entre as partículas e minimizando a porosidade. Entretanto, isto ocorre até determinado teor de resíduos, posteriormente

percebe-se que as partículas de solo e resíduos não se entrosam mais, não permitindo a coesão e, conseqüentemente, há mais poros, diminuindo a massa específica da amostra.

**Análise dos resultados dos ensaios de compressão.** Na Figura 12 é possível visualizar as tensões de ruptura das distintas amostras com tempo de cura de 0 e 1 dia. Conforme mencionado anteriormente, verifica-se que com a moldagem e ruptura no mesmo dia, a amostra que apresentou um valor mais expressivo de ruptura foi a mistura com 75% solo + 25% resíduos da construção civil. Já para a moldagem no dia anterior à ruptura, a amostra de 50% solo + 50% resíduo apresentou o valor mais significativo de ruptura.

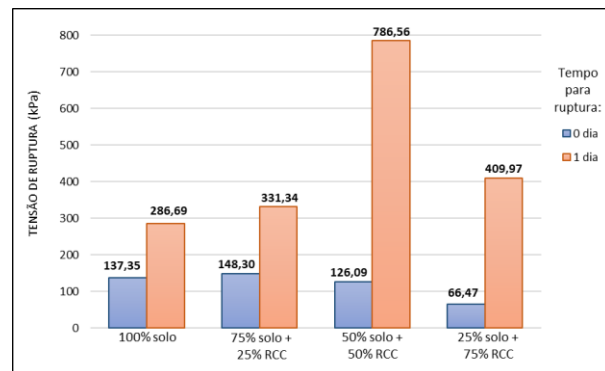


Figura 12 - Comparativo entre o tempo de cura das amostras.

É possível constatar que a tensão de ruptura aumenta acentuadamente com a ruptura após um dia da moldagem dos corpos de prova. Para a amostra 100% solo observa-se um aumento de 208,73%, para a amostra com 75% de solo o acréscimo da resistência foi de 223,42%, para a amostra com 50% de solo o incremento da resistência constatado foi de 623,81%, enquanto que para a amostra com apenas 25% de solo o aumento da tensão de ruptura foi de 618,80%.

O estudo de Amorim (2013) justifica que este tipo de comportamento poderia estar relacionado à composição dos resíduos da

construção civil, pois parte da composição dos referidos materiais são oriundas de restos de concreto, podendo possuir matrizes cimentícias virgens. Neste sentido, o autor acredita que quando ocorre a mistura do solo com o RCC, essas matrizes reagem quimicamente com a água da mistura, fazendo com que acarrete em um determinado ganho de resistência com o passar do tempo.

Através da análise da Figura 13 é possível verificar que em nenhuma das misturas ensaiadas para compressão simples atingiu-se a umidade ótima do ensaio de compactação.

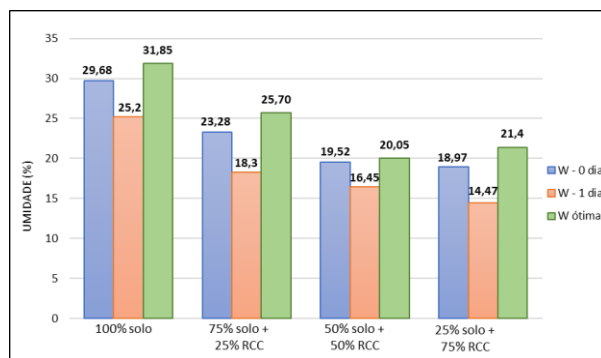


Figura 13 - Comparativo entre o tempo de cura e a umidade das amostras.

Nas amostras da moldagem e ruptura no mesmo dia, a umidade ficou acima dos valores medidos nas amostras de moldagem no dia anterior à ruptura. Salienta-se que um percentual de umidade é perdido ao ambiente entre a moldagem do corpo até a ruptura, no caso 1 dia, pois não houve controle de umidade no ambiente. A cura foi realizada em temperatura ambiente, aproximadamente 20°C. Porém, todo o montante da diferença constatada não pode ser proveniente desta perda.

Uma hipótese é que parte da diferença entre as umidades constatadas é oriunda devido à reação com as matrizes cimentícias presentes nos resíduos. Outra hipótese é quanto à quantidade de água adicionada no material utilizado para a moldagem. Pois, não foi acrescentada água no material total, foi

feito o preparo em momentos distintos das amostras. Salienta-se a importância de um controle mais rígido da umidade para futuros ensaios. Para assim constatar as possíveis diferenças que a presença de água nas amostras acarreta na resistência dos materiais.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de compactação executados no Laboratório de Solos, observou-se que as amostras com misturas de resíduos da construção civil apresentaram valores de massa específica máxima superiores, comparando os resultados com a amostra de 100% solo. Também, constatou-se de um modo geral que, a umidade ótima diminui com o incremento de resíduos nas misturas.

No que tange ao comportamento mecânico, obtido através dos ensaios de resistência à compressão simples, verifica-se que para a moldagem e ruptura imediata a amostra com melhor desempenho ocorreu com a mistura 25% solo + 75% RCC. Enquanto que, para a ruptura após vinte e quatro horas da moldagem, o melhor desempenho mecânico ocorreu com a mistura 50% solo + 50% RCC. Comparando as resistências de ruptura com a cura de um dia e ruptura imediata, obtiveram-se valores significativamente superiores, com um tempo maior de cura. Foi constatado que o incremento do RCC ao solo elevou a resistência à compressão simples. A amostra composta por somente solo obteve o menor valor de tensão de ruptura.

Através de correlação, foi possível obter os ângulos de atrito das amostras com ruptura após um dia da moldagem, onde percebeu-se que, conforme a adição de resíduos houve acréscimo no valor do ângulo. Para a ruptura imediata, os valores de ângulos de atrito calculados foram inconsistentes. Sendo assim, seriam necessários novos ensaios de

compressão simples ou ainda realizar o ensaio de cisalhamento direto para obter o ângulo de atrito interno das amostras.

Os resultados atingidos foram satisfatórios, ocorrendo variabilidade conforme o teor de resíduos da construção civil adicionados. Determina-se a viabilidade da utilização destes resíduos como reforço de solos.

Além disso, ressalta-se a importância da disposição adequada dos resíduos. Com o uso destes materiais no melhoramento do solo para a geotecnia é possível evitar os significativos problemas ambientais relacionados ao descarte incorreto dos resíduos.

## 5. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4972**: Standard Test Method for pH of Soils. Philadelphia, 2013.
- AMORIM, E. F. **Viabilidade técnica econômica de misturas de solo-RCD em camadas de base de pavimentos urbanos. Estudo de caso: município de Campo Verde - MT**. 2013. 173 f. Tese - Doutorado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:2016**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6458:2016**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT, 2016.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT, 2016.
- FERRAZ, A. L. N. **Análise da adição de resíduos de argamassa de cimento em tijolos prensados de solocimento**. 2004. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2004.
- FERREIRA, M. C.; THOMÉ, A. Utilização de resíduo da construção e demolição como reforço de um solo residual de basalto, servindo como base de fundações superficiais. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.18, p. 1-12, Nov. 2011.
- GOOGLE EARTH (2018). Disponível em: <<http://earth.google.com/intl/pt/index.html>>. Acesso em: 21 abr. 2018.
- LEAL, U. **Quando é preciso reforçar o solo**. *Téchne*, São Paulo, n. 71, fev 2003.
- SOUZA, T. E. S.; Wayhs, C. A. S. P. Modelagem de estrutura de contenção em solo reforçado com geogrelhas. In: XXIV Seminário de Iniciação Científica da UNIJUÍ, 2016, Ijuí - RS. **Anais do Salão do Conhecimento UNIJUÍ 2016**.
- VALEJOS, C. V.; BAZAN, H. W. D.; LOYOLA, J. M. T.; CECON, T. A. **Cálculo de Ensaio Laboratoriais de Mecânica dos Solos**. Curitiba – PR, 2005.