

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios destinados a avaliar os efeitos da adição de cal hidratada no melhoramento das características dos solos S1 e S2, descritos no Capítulo 5.3. Compararam-se ainda os resultados com os correspondentes valores normalmente referidos na literatura.

6.2 MELHORAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DE GRANULOMETRIA E PLASTICIDADE

Os ensaios para determinação dos limites de consistência (LL e LP) e da curva granulométrica das misturas S1C2 e S2C2, originaram os resultados apresentados nas figuras 6.1 e 6.2, sintetizados no quadro 6.1.

| MISTURA | GRANULOMETRIA | | | | | | PLASTICIDADE | | |
|---------|----------------------|--------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------|---------------------|--------------|-------|-------|
| | 2 mm a 0,06 mm | 0,06 mm a 0,002 mm | <0,002 mm | PERCENTAGEM PASSADA NO PENEIRO | | | LL | LP | IP |
| | | | | Nº 10 (2,00mm) | Nº 40 (0,425mm) | Nº 200 (0,074mm) | | | |
| S1C2 | 89% | - | - | 88% | 39% | 11% | 46,0% | 22,6% | 23,4% |
| S2C2 | 95% | - | - | 98% | 56% | 5% | 25,7% | 16,6% | 9,1% |

Quadro 6.1: Síntese das características de granulometria e plasticidade das misturas S1C2 e S2C2

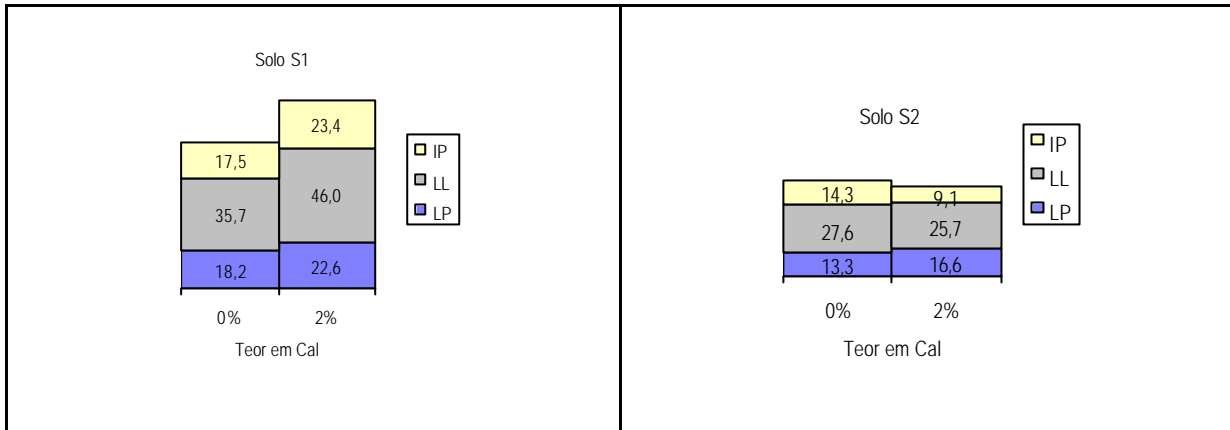


Figura 6.1: Evolução dos limites de consistência dos solos S1 e S2

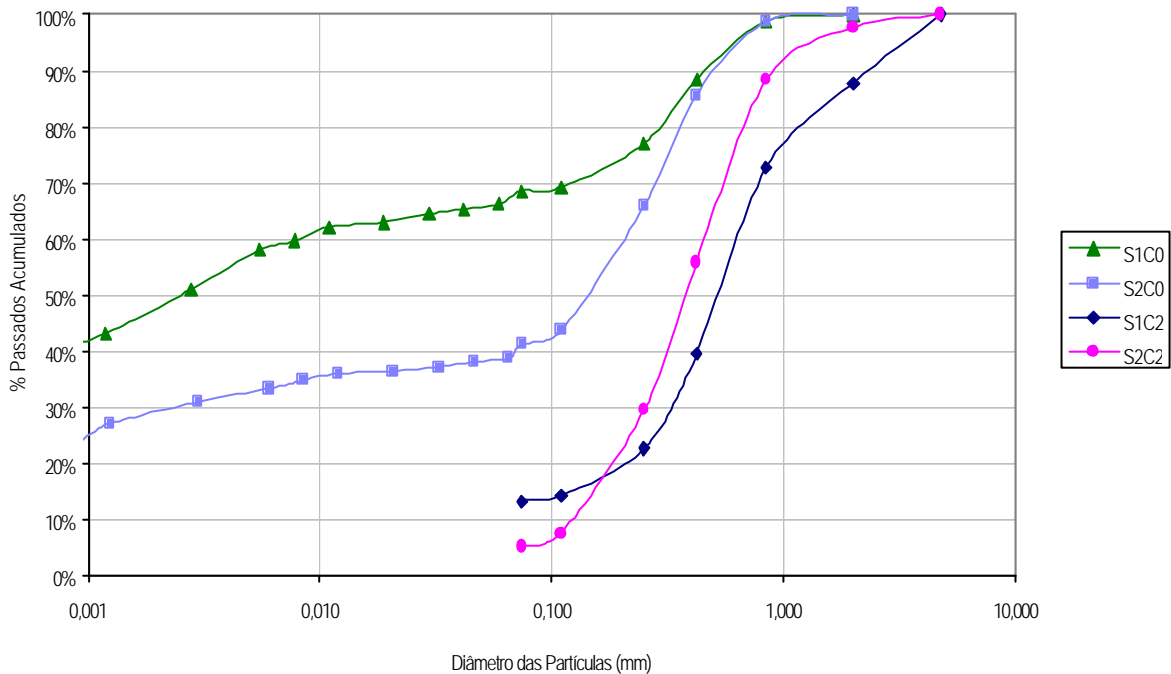


Figura 6.2: Curvas granulométricas das misturas S1C2 e S2C2 e dos solos naturais S1 e S2

Pode deduzir-se, através da comparação das curvas granulométricas, que a adição de cal aos solos originais alterou significativamente a dimensão das suas partículas. De facto, as partículas finas dos solos aglutinaram-se, formando flocos de dimensões superiores. Esta reacção é visível através das alterações que ocorreram na forma das curvas granulométricas, que deixaram de ser “horizontais” (solos bem graduados), e tornaram-se curvas “verticais” (representativas de solos mal graduados). Notar ainda que, antes dos ensaios, as partículas

foram remexidas com os dedos, de modo a desagregar aquelas cujas forças de ligação (responsáveis pela aglutinação após a mistura com cal) eram mais fracas.

Relativamente à alteração das características de plasticidade, verifica-se que no solo S2 o índice de plasticidade diminuiu, o que está de acordo com os resultados indicados normalmente na literatura. Registou-se porém um aumento do mesmo índice no solo S1, o que se terá ficado a dever a um aumento significativo do limite de liquidez (LL) com a adição de cal. De facto, foram já relatados vários casos de aumento do LL com a adição de cal, mas acompanhados de um aumento ainda maior do limite de plasticidade, o que conduz a uma redução do índice de plasticidade.

Quanto à classificação dos solos estabilizados registaram-se algumas alterações, de resto já esperadas. Devido ao fenómeno de floculação das partículas após a mistura com cal, já referido no Capítulo 4.2.2, verificou-se a tendência para uma aproximação aos solos arenosos. Assim, e de acordo com a classificação unificada (norma ASTM-D2487/85), o solo S1 passou de uma “Argila Magra Arenosa”, para uma “Areia Bem Graduada”. Quanto ao solo S2, passou de “Areia Argilosa” a “Areia Mal Graduada” (Quadro 6.2).

| CLASSIFICAÇÃO | SOLO | | MISTURA | |
|------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | S1C0 | S2C0 | S1C2 | S2C2 |
| UNIFICADA (ASTM-D2487/85) | CL | SC | SW | SP |
| RODOVIÁRIA (E240-1970) | A – 6 (Ig = 9) | A – 2 – 6 (Ig = 1) | A – 2 – 7 (Ig = 0) | A – 2 – 4 (Ig = 0) |

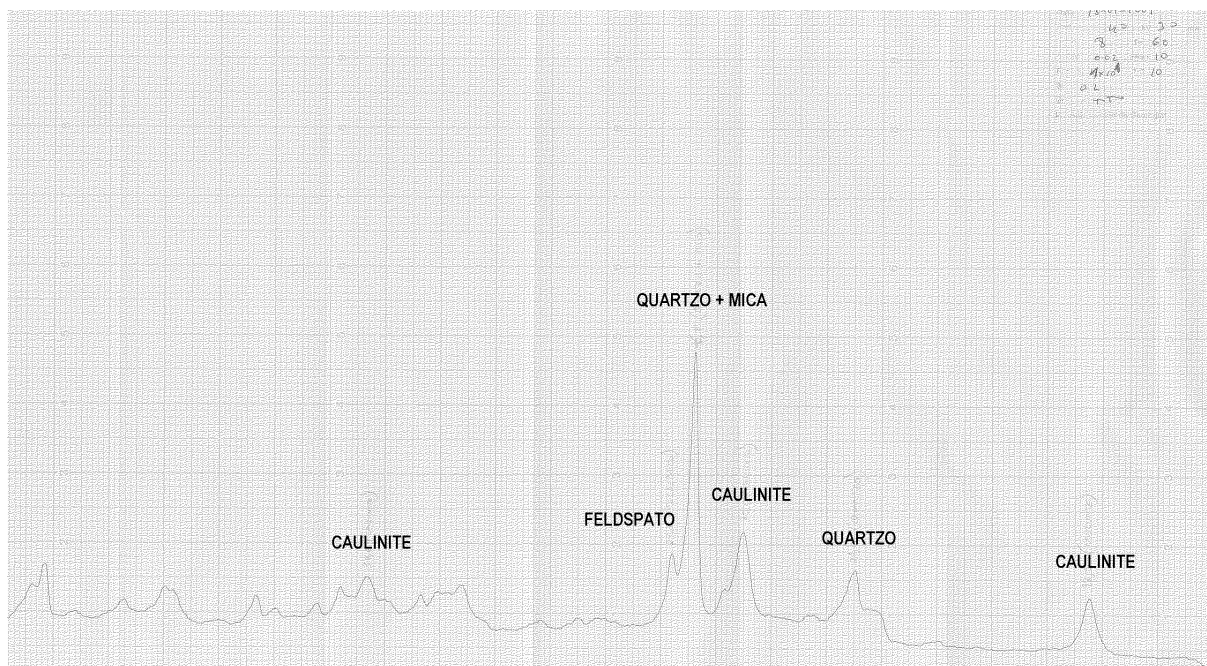
Quadro 6.2: Classificação dos solos originais e das misturas solo-cal

Quanto à classificação rodoviária (norma AASHTO M145-42), verifica-se que o solo S1, inicialmente pertencente ao grupo A – 6 (com índice de grupo igual a nove), pertence agora, após a mistura com cal, ao grupo A – 2 – 7 (com índice de grupo igual a zero). O solo S2, que no estado natural foi classificado como pertencente ao grupo A – 2 – 6, com índice de grupo igual a um, pertence agora ao grupo A – 2 – 4. Notar que

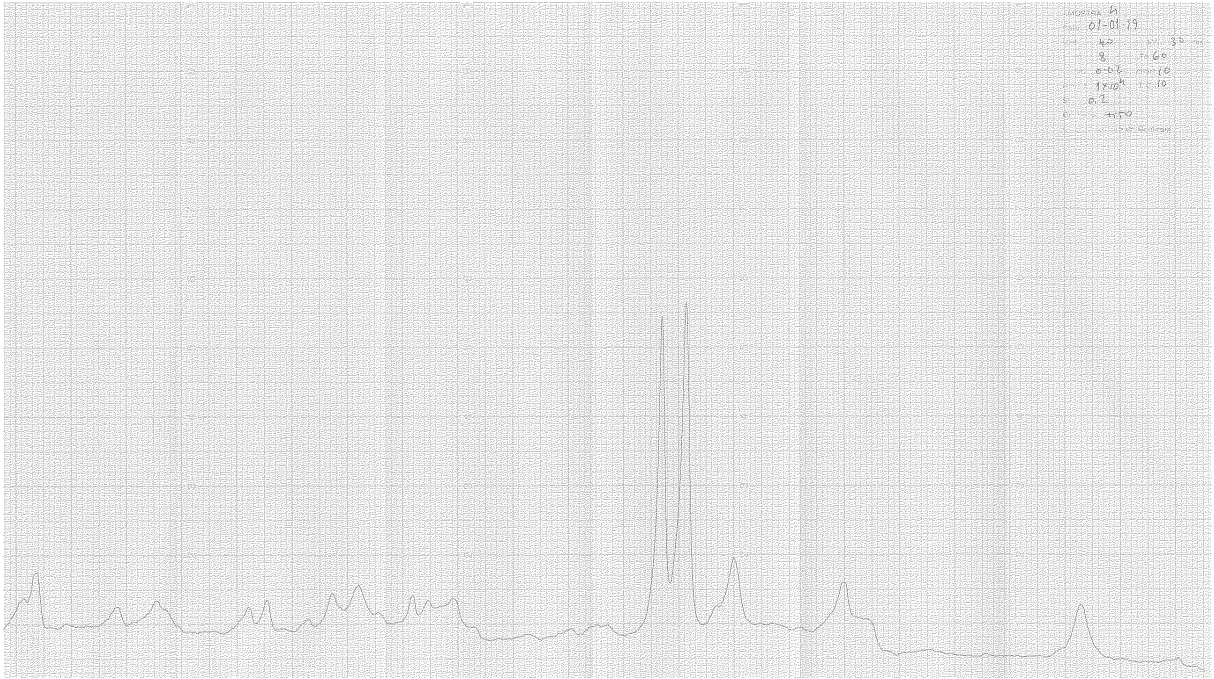
em ambos os casos houve uma melhoria da qualidade do material no que respeita ao seu comportamento quando utilizado em camadas sob pavimentos rodoviários (de acordo com a referida norma).

6.3 MODIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Em relação às características mineralógicas das misturas solo-cal, verifica-se, após análise e comparação dos difractogramas resultantes das misturas S1C0 e S1C2 e das misturas S2C0 e S2C2, alguma coerência com o tipo de transformações que se encontram normalmente referidas na literatura. Ou seja, regista-se uma transformação dos solos iniciais tipicamente argilosos, com uma fracção argilosa à base de caulinite, em solos em que os minerais originais aparecem ligeiramente menos definidos (Figura 6.3). Contudo, são ainda bem visíveis os picos que, nos difractogramas dos solos originais, identificavam os vários minerais presentes.

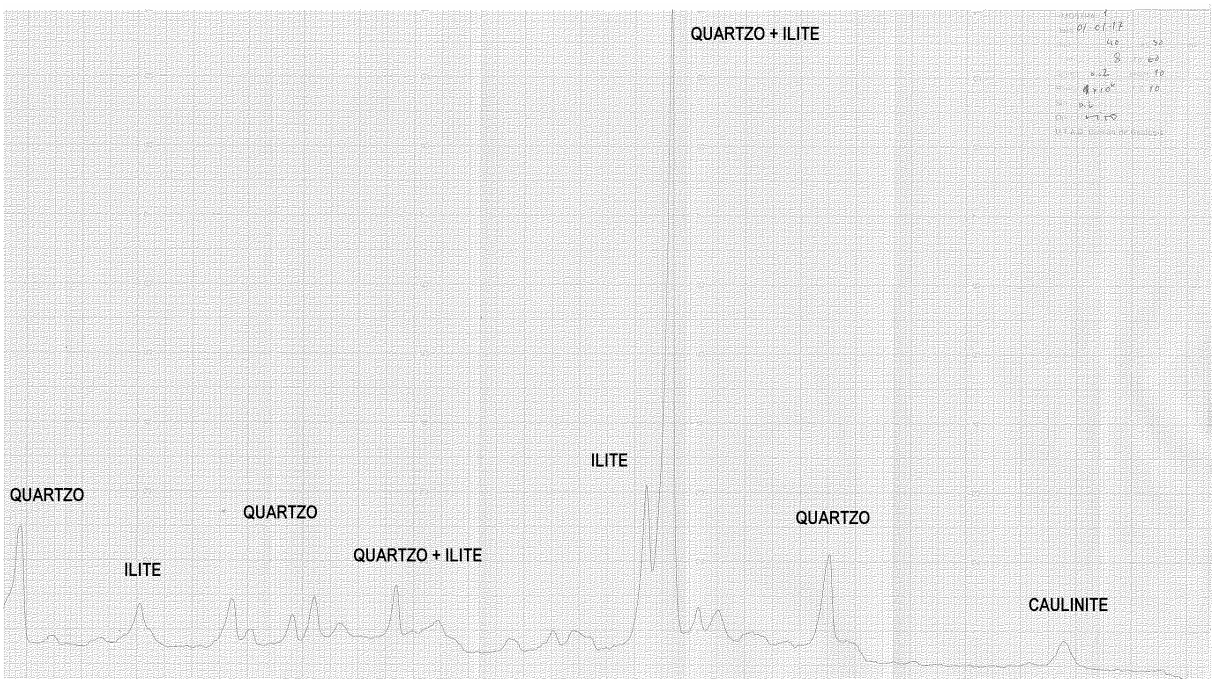


(a)



(b)

Figura 6.3: Comparação entre os difractogramas do solo S1 (a) e da mistura S1C2 (b)



(a)



(b)

Figura 6.4: Comparação entre os difractogramas do solo S2 (a) e da mistura S2C2 (b)

6.4 MODIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO

A evolução dos teores óptimos de humidade dos solos tratados com cal está de acordo com o que é normalmente relatado na literatura. Ou seja, nas amostras tratadas com cal verifica-se uma subida do teor óptimo em água em relação aos valores registados nos solos naturais (Figura 6.6). Este aspecto é positivo, visto que basta acrescentar água ao solo para atingir o novo valor óptimo do teor em água para compactação.

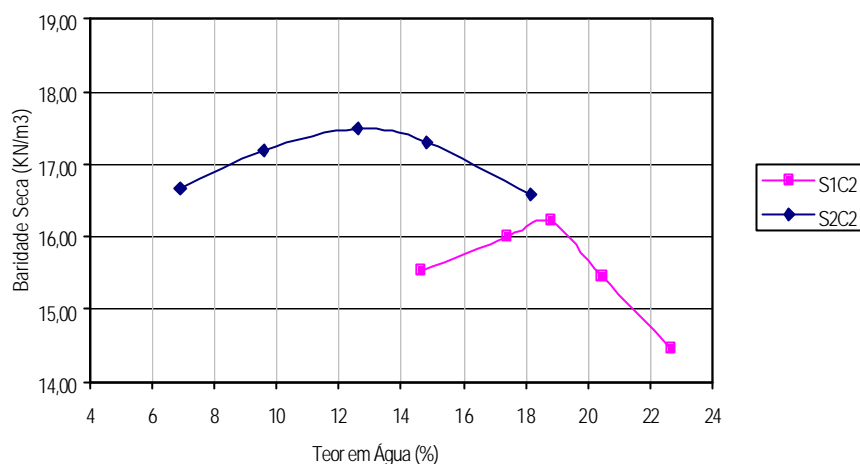


Figura 6.5: Resultados dos ensaios de compactação Proctor sobre os solos tratados com cal

| SOLO / MISTURA | TEOR EM ÁGUA ÓTIMO | BARIDADE SECA MÁXIMA |
|----------------|--------------------|----------------------|
| S1C0 | 17,0 (%) | 16,3 (KN/m³) |
| S1C2 | 18,8 (%) | 16,3 (KN/m³) |
| S2C0 | 10,9 (%) | 17,6 (KN/m³) |
| S2C2 | 12,6 (%) | 17,5 (KN/m³) |

Quadro 6.3: Parâmetros ótimos para compactação das amostras S1C2 e S2C2

Já em relação à evolução da baridade seca máxima, verificou-se que os valores após o tratamento com cal se mantiveram. Em solos mais reactivos, com uma fracção fina à base de montmorilonite, por exemplo, seria de esperar uma redução deste parâmetro. Contudo, não se encontram ainda divulgados muitos estudos sobre a estabilização de solos cauliníticos, pelo que serão necessários novos trabalhos para confirmar se este comportamento é normal em solos residuais graníticos, ou se constitui uma característica dos solos aqui estudados.

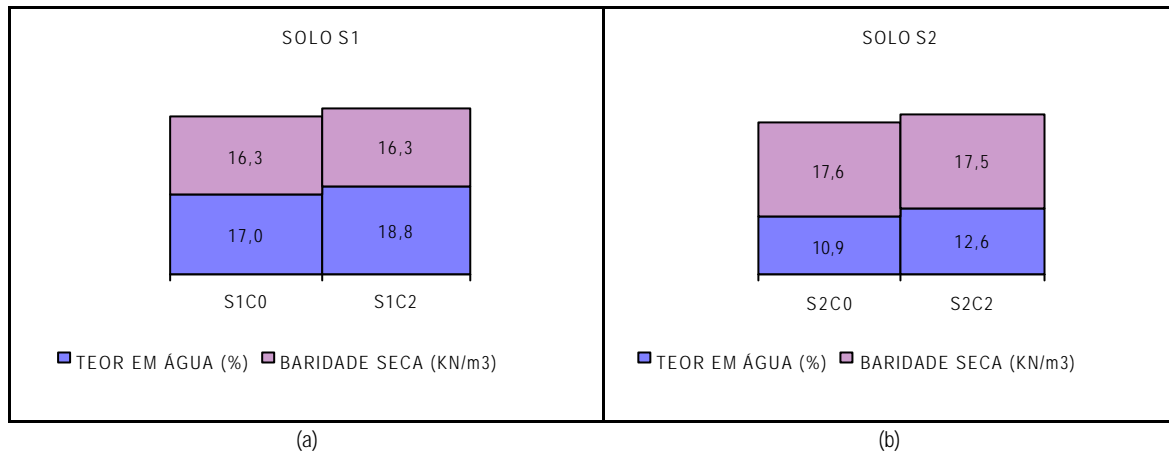


Figura 6.6: Evolução de densidade máxima e teor óptima na compactação pesada (a) solo S1 (b) solo S2

6.5 AUMENTO DA RESISTÊNCIA

O aumento da resistência das misturas com 2% de cal foi determinado através de ensaios triaxiais não consolidados, não drenados, descritos no Capítulo 5.2.3.2. Foram ensaiados 3 provetes de cada mistura, para as tensões de consolidação de 50, 100 e 200 KPa. Com base nos valores das tensões principais na rotura, e adoptando o critério de rotura de Mohr-Coulomb, procedeu-se à determinação da coesão não drenada (C_u) das misturas ensaiadas, e que se encontram indicadas no quadro 6.4.

| DESIGNAÇÃO DA MISTURA | PERÍODO DE CURA | COESÃO NÃO DRENADA (C_u) |
|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| S1C0 | 0 DIAS | 69 KPa |
| S1C2 | 3 DIAS | 341 KPa |
| S1C2 | 7 DIAS | 341 KPa |
| S2C0 | 0 DIAS | 205 KPa |
| S2C2 | 3 DIAS | 486 KPa |
| S2C2 | 7 DIAS | 510 KPa |

Quadro 6.4: Valores da Resistência Não Drenada (C_u) obtidos a partir dos ensaios triaxiais efectuados

Na figura 6.7 está representada a evolução da coesão não drenada para as misturas S1C2 e S2C2. Verifica-se um aumento deste parâmetro devido à adição de cal, contudo, os valores obtidos após 3 dias de cura são

semelhantes aos valores após 7 dias de cura. O facto do aumento da resistência durar apenas alguns dias está de acordo com as conclusões relatadas na bibliografia, e explica-se pela reduzida quantidade de cal adicionada aos solos. De facto, a cal disponível para o desenvolvimento do material pozolânico esgota-se rapidamente, visto que não só a quantidade inicial de cal é reduzida (tendo em vista um aumento da resistência mecânica), como parte dessa cal é utilizada nas reacções de permuta iónica que conduzem à floculação das partículas do solo e alteração da sua plasticidade.

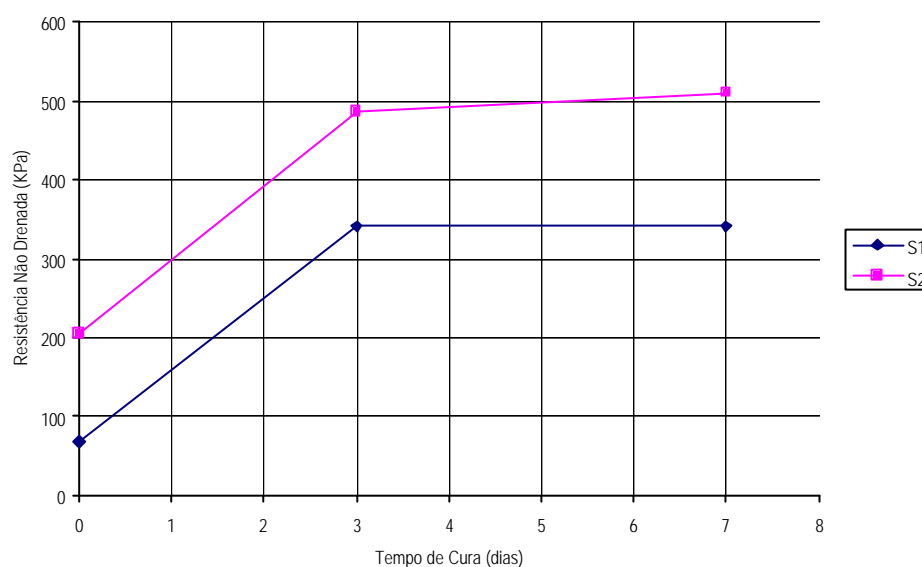


Figura 6.7: Evolução da Resistência Não Drenada (C_u) dos Solos S1 e S2