

3

Caracterização física, compactação e contração

3.1.

Introdução

No presente capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão dos ensaios de caracterização física, compactação e contração do resíduo da indústria de papel (RIP). A curva de compactação do Proctor Normal é comparada com outras curvas encontradas na literatura.

3.2.

Revisão bibliográfica

A distribuição do tamanho das partículas dos RIPs é apresentada por poucos autores, pois, existem dificuldades na caracterização dos mesmos utilizando métodos convencionais. Cabral et al. (2000) e Teixeira (2002) assinalam a dificuldade de trabalhar com material fibroso e orgânico. Por isso, NCASI (1989) e Kraus et al. (1997) utilizaram o método TAPPI T233 (TAPPI, 1992) na caracterização dos RIPs. Este método consiste em determinar a distribuição do tamanho das fibras. Kraus et al. mostraram que é possível usar o ensaio de sedimentação nas partículas finas e, nas grossas (fibras) a norma TAPPI.

O teor de umidade inicial é um dos fatores relevantes na caracterização de RIPs pois geralmente é muito elevado. Segundo dados da literatura, o seu valor varia entre 126 – 268 % (Zimmie et al. 1993; Mõo-Young e Zimmie, 1996; Cabral et al, 1999; Kamon et al., 1999; Iberio, 2007).

No ensaio de limite liquidez tem-se dificuldade em dividir a massa do RIP com o cinzel, devido à presença de fibras e tecidos (Zimmie et al. 1993, Mõo-Young e Zimmie 1996, Kamon et al. 1999, Cabral et al. 2002, Teixeira 2002, Iberio 2007).

Existem casos em que com o cinzel, não se consegue cortar o RIP na concha de Casagrande, como reporta Kraus et al. (1997). Neste caso o método de Casagrande não resulta adequado. Kamon et al. (1999) e Teixeira (2002) resolveram utilizar o método do penetrômetro cônico (BSI, 1975). NCASI (1989) e Kraus et al. (1997) assinalam que uma dificuldade no ensaio de limite de plasticidade é que as fibras atuam como reforço do RIP ocasionando resultados de baixa confiabilidade.

Geralmente os RIPs têm um teor de matéria orgânica elevado. A faixa de variação é de 25 a 86%, segundo Teixeira (2002), Mõo-Young e Zimmie (1996). A densidade relativa dos grãos apresenta uma faixa de variação de 1,62 a 2,3, conforme afirma Teixeira (2002). Mõo-Young e Zimmie (1996) concluem que a densidade relativa dos grãos é mais baixa que os valores típicos das argilas e o teor de matéria orgânica decrescem com o aumento do peso específico de sólidos.

O método de Proctor Normal é o ensaio empregado pela maioria dos pesquisadores que caracterizaram resíduos da indústria de papel, segundo a literatura revisada. O elevado teor de umidade inicial dos RIPs exige que o ensaio de compactação seja feito diminuindo-se a umidade por secagem gradual ao ambiente, ver, e.g. Zimmie et al. (1993), Mõo-Young e Zimmie (1996), Mõo-Young e Zimmie (1997), Kraus et al. 1997, Cabral et al. (1999), Teixeira (2002) e Iberio (2007). Como o material tem elevado teor de matéria orgânica, após secagem já não se consegue recuperar sua umidade inicial. Assim, a curva de compactação obtida com secagem prévia do material resulta diferente da curva determinada pela secagem do material inicialmente úmido. No entanto algumas amostras do RIP apresentam umidades não elevadas como em Kamon et al. (1999), sendo nessas amostras necessário agregar água.

É usual a formação de torrões rígidos em umidades baixas (lado seco da curva de compactação). Eles dificultam a homogeneização da amostra no momento do ensaio (Mõo-Young e Zimmie 1996, Cabral et al. 2002 e Teixeira 2002).

O teor de umidade ótimo varia de 13,1 a 110% e o peso específico seco máximo de 5,2 até 8,7 kN/m³, segundo Teixeira (2002), Diaz et al. (2000) e Iberio (2007).

Uma revisão do fenômeno de contração para argilas pode ser encontrada em Marinho (1994 a). A capacidade de contração do solo depende de diversos fatores

como o tipo de solo (i.e., composição mineralógica), estrutura do solo e o teor de umidade inicial e final (Marinho 1994 a). Segundo o autor, a redução de volume durante a contração é similar à redução de volume devido à compressão mecânica, desde que o solo permaneça saturado ou próximo à saturação. Uma maneira de representar a contração é pela relação de teor de umidade pelo volume por 100 gramas de solo seco, definida na norma britânica (BS-1377). Nessa curva se distinguem duas partes: uma parte de saturação constante e outra onde a saturação se reduz durante a secagem até chegar ao limite de contração.

O problema geral da contração de materiais de cobertura para aterros de resíduos é a formação de trincas (Andersland e Al-Moussawi 1987). As trincas estão relacionadas com o aumento da permeabilidade, como foi assinalado por Albrecht e Benson (2001) em sua pesquisa usando argilas compactadas. No caso de RIPs, os estudos de Klaus et al. (1997), Moo-Young e Zimmie (1997) e Kamon et al. (2002b), concluem que o RIP tem um comportamento similar a uma argila, isso é, que apresentam trincas durante a secagem.

3.3. Materiais e métodos

Os ensaios de caracterização, como densidade relativa dos grãos (G_s), granulometria, limite de liquidez (w_L), limite de plasticidade (w_P), teor de matéria orgânica (MO) e teor de umidade inicial (w_o , ensaiando-se a amostra ao chegar no laboratório), foram executados com base nos procedimentos das NBRs 5457 (ABNT, 1986a), 6459 (ABNT, 1984a), 7180 (ABNT, 1984b), 7181 (ABNT, 1984c), 6457 (ABNT, 1986b), 6508 (ABNT, 1984d), e 13600 (ABNT, 1996) . No caso da densidade relativa dos grãos se considerou uma quantidade próxima a 5 gramas, menor que a recomendada pela respectiva NBR 6508 (ABNT, 1984d) para argilas, pois, a elevada capacidade de retenção de água fez com que o material umedecido ocupasse um grande volume. Os ensaios de limite de liquidez e de plasticidade foram realizados por secagem do material ao ambiente de laboratório (25°C). A granulometria por peneiramento foi realizada por lavagem (com água) até a peneira 400. O ensaio de sedimentação foi executado para partículas que passam na peneira 200 usando solução de hexametáfosfato de sódio.

A compactação foi realizada pelo método de Proctor Normal, baseada nos procedimentos da NBR 7182 (ABNT, 1986c). A umidade para cada compactação se realizou por secagem gradual ao ar.

Os ensaios de contração foram realizados compactando-se três amostras com diferentes teores de umidade (171, 128 e 61 %) num anel com diâmetro de 7,15 cm e altura de 2 cm. Com cada teor de umidade foi preparada uma massa, a mesma que foi compactada em três camadas até conseguir a densidade correspondente à curva de compactação de Proctor Normal. Foi monitorado o diâmetro e a espessura das amostras conforme diminuía sua umidade.

3.4. Resultados e discussão

3.4.1. Caracterização física

Na Tabela 3.1 apresentam-se parte dos resultados médios da caracterização física. O RIP em relação a outros RIPs pesquisados na literatura caracteriza-se por ter baixo teor de matéria orgânica, elevada densidade relativa dos grãos e alto teor de umidade inicial (w_o).

No caso do limite de liquidez pelo aparelho de Casagrande, foi observada certa dificuldade em fazer a ranhura com o cinzel causada pela presença da fibra, sendo a ranhura feita lentamente utilizando-se o cinzel curvo. Outra dificuldade foi na determinação da umidade que corresponde ao limite de plasticidade, pois, o material não apresentou trincas e tal umidade foi estimada com uma inspeção táctil da rigidez.

Tabela 3.1 - Resultados da caracterização física do RIP

G_s	w_L	w_P	MO (%)	w_o (%)
2,08	172	78	30	310 - 340

Na Figura 3.1, observa-se o RIP separado em duas partes: uma parte passante e outra retida pela peneira 200. O material retido pela peneira 200 constitui-se em sua maioria por materiais lignocelulíticos, sendo que eles possuem

um baixo peso específico dos grãos. O material passante constitui-se em sua maioria por minerais de carbonato de cálcio possuindo Gs de 2,74.

A curva granulométrica por peneiramento foi ampliada até a abertura da peneira 400, debaixo desse valor foi considerada a curva por sedimentação. No decorrer do ensaio por lavagem com água, foi observado que as partículas de diâmetros superiores à peneira 200 são constituídas principalmente por fibras com forma e tamanhos irregulares (Figura 3.1). Se há estimado uma elevada relação comprimento/diâmetro, maior que 30. Foi observado que o ensaio de granulometria por secado das amostras não é possível de fazer, devido que as fibras e o mineral ficam colados e é muito difícil sua separação, por isso, o ensaio de granulometria por lavagem resultou mais aceitável. Assumem-se aqui dimensões das fibras que podem passar pela peneira pela lavagem com água. Esta estimativa, entretanto, não fornece a distribuição real dos tamanhos, pois, como se mencionou, elas têm uma largura muito maior que sua espessura.



Figura 3.1 Diferença do RIP retido e passante da peneira 200.

A parte da curva estimada por sedimentação tem uma forma quase vertical entre diâmetros de 0,006 a 0,02 mm e inclinada no diâmetro inferior a 0,02 mm, resultando uma distribuição não uniforme. A distribuição das partículas finas é de 72% de silte e de 13% de argilas (% menor que 2 micra). A curva granulométrica total é apresentada na Figura 3.2.

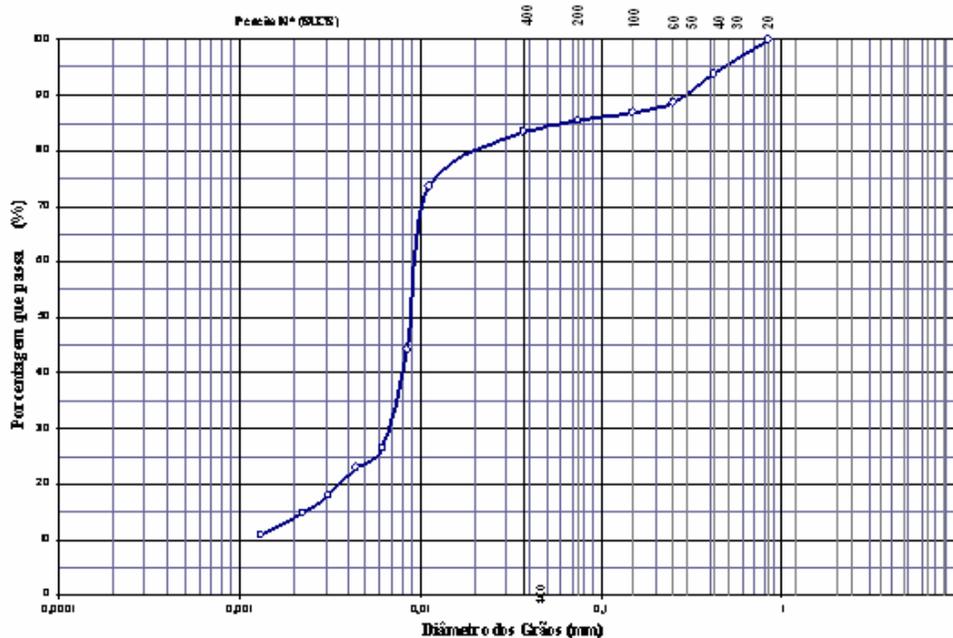


Figura 3.2 Curva granulométrica completa. Peneiramento via lavagem

3.4.2. Compactação

O RIP tem um peso específico seco máximo de 7,7 kN/m³ e um teor de umidade ótima de 70%. Para umidades maiores que 90% a curva quase coincide com a curva de saturação de 100%, mas em umidades menores reduz fortemente seu grau de saturação. Tem-se uma diferença de umidade de 215% desde a umidade inicial (315%) até 90% (Figura 3.3).

Observou-se a presença de grumos na preparação dos corpos de prova; desde umidades de 90 a 70% os grumos desapareciam com a compactação; já com umidades menores a 70%, os grumos aumentavam sua rigidez e formavam parte do espécimen resultando uma morfologia similar à “granular”, onde os grãos são os grumos rígidos. A diferença morfológica é mostrada na Figura 3.4.

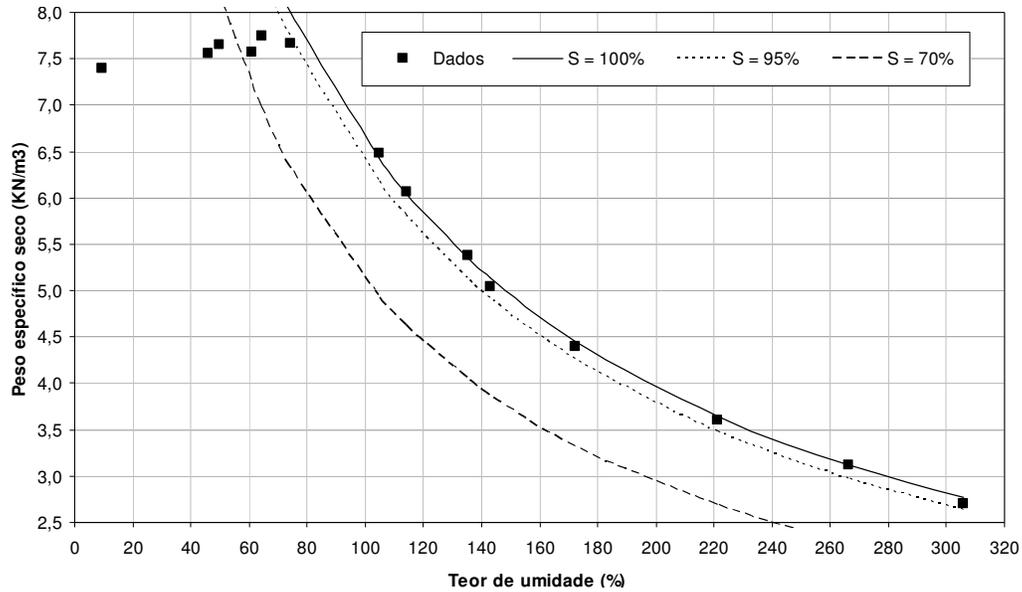


Figura 3.3 Resultado da curva de compactação pelo método de Proctor Normal do RIP

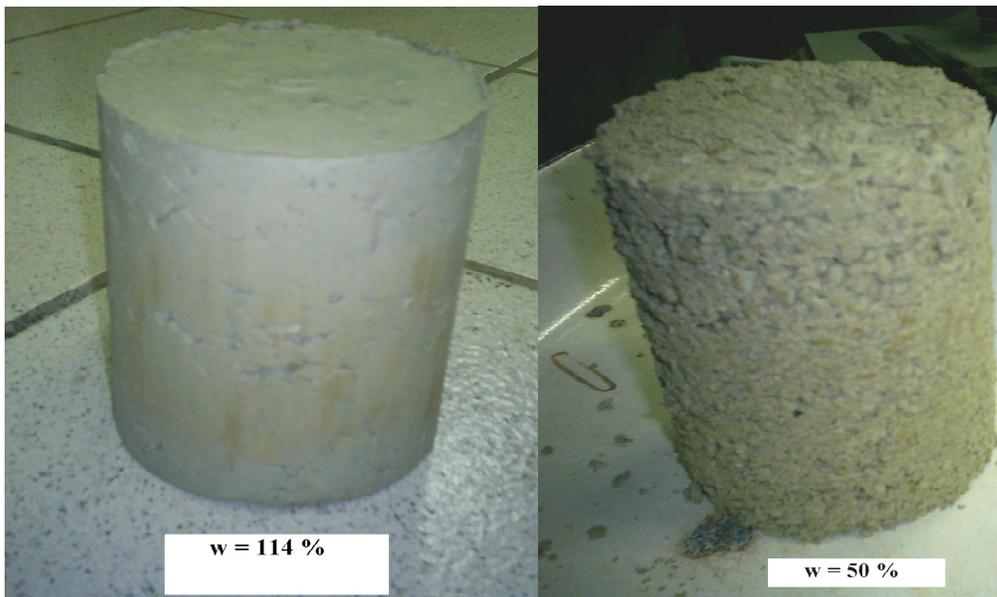


Figura 3.4 - Diferença das estruturas superficiais do RIP compactado a distintas umidades.

Estes grumos se caracterizam por apresentar variação de teor de umidade em seu corpo; na Figura 3.5a tem-se o grumo superficialmente de cor branca, mas na Figura 3.5b o mesmo grumo é cortado e pode-se apreciar que sua cor interior é cinza, o que representa uma maior umidade.



Figura 3.5 - Diferença das estruturas do RIP compactado a distintas umidades.

Na Figura 3.6 se apresenta uma comparação com RIPs estudados por Klaus et al. (1997), M \ddot{o} -Young e Zimmie (1996), Teixeira (2002), Cabral et al. (1999) e Iberio (2007). O RIP se mostra pr \acute{o} ximo aos apresentados por Klaus et al. e M \ddot{o} -Young e Zimmie, isto \acute{e} , valores elevados de peso espec \acute{i} fico m \acute{a} ximo e umidade \acute{o} tima baixa.

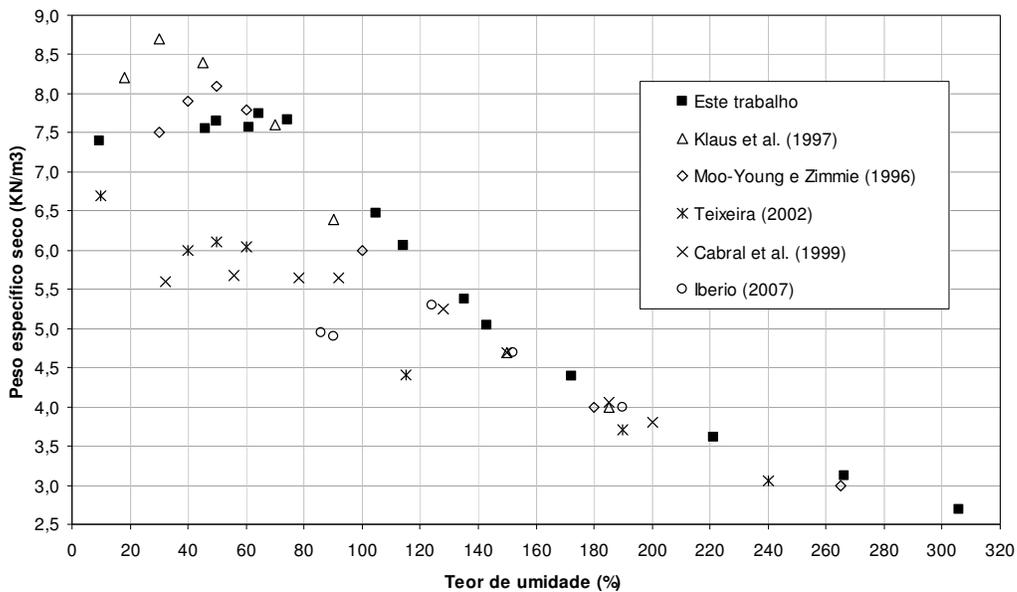


Figura 3.6 - Comparação da curva de Proctor Normal do RIP com a literatura.

3.4.3. Contração

As amostras que foram preparadas com umidades de compactação de 127 e 170% estão inicialmente saturadas. A amostra compactada com umidade de 65% tem uma saturação de 79%. Nas amostras inicialmente saturadas a umidade de desaturação é de 90% (Figura 3.7). Todas as curvas, incluindo a da amostra inicialmente não saturada, apresentam uma mesma tendência no processo de secagem, apresentando, para uma umidade zero, um volume de 117 cm³ por 100g de solo seco comum.

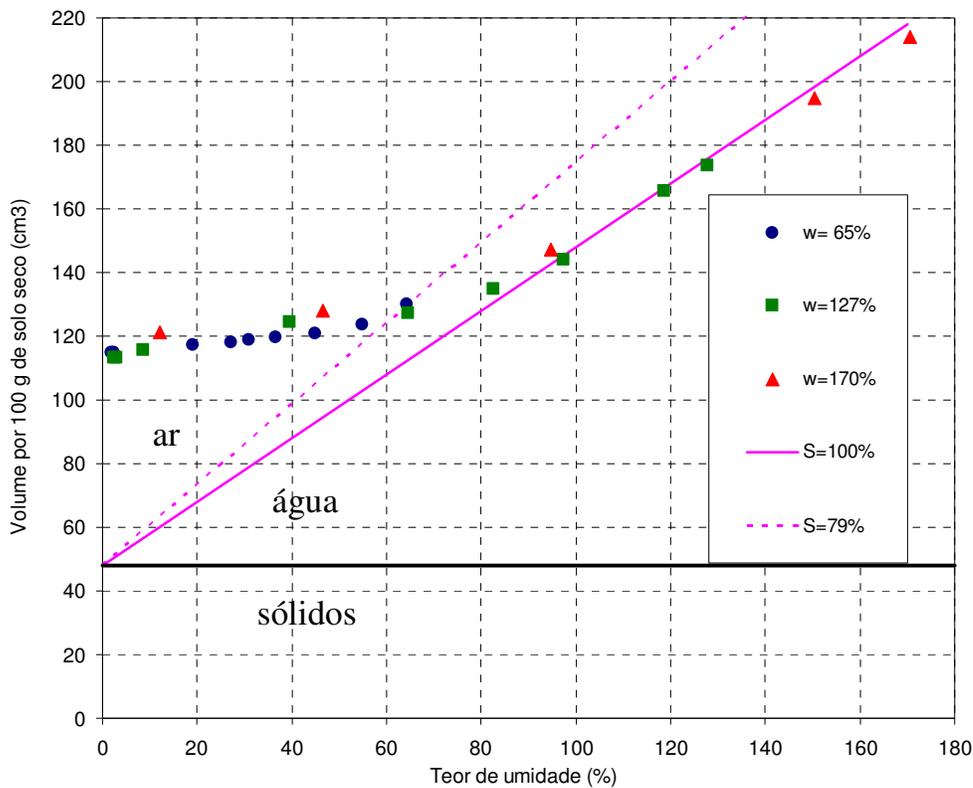


Figura 3.7 - Curvas de secagem dos espécimes.

Uma relação direta (tendência linear) foi encontrada entre o teor de umidade de compactação pela deformação volumétrica de contração (Figura 3.8). Com a amostra compactada na umidade de 170% alcançou-se 45% de deformação volumétrica de contração, uma quantidade muito elevada ao se comparar com resultados da literatura. Como a umidade inicial (de chegada ao laboratório) é de

305-310%, é possível ter ainda amostras com contrações superiores a 50% para o RIP.

Observou-se também que as amostras não recuperaram o volume inicial com a adição da água e foi medida uma livre expansão volumétrica na faixa de 7% até 9% após a secagem.

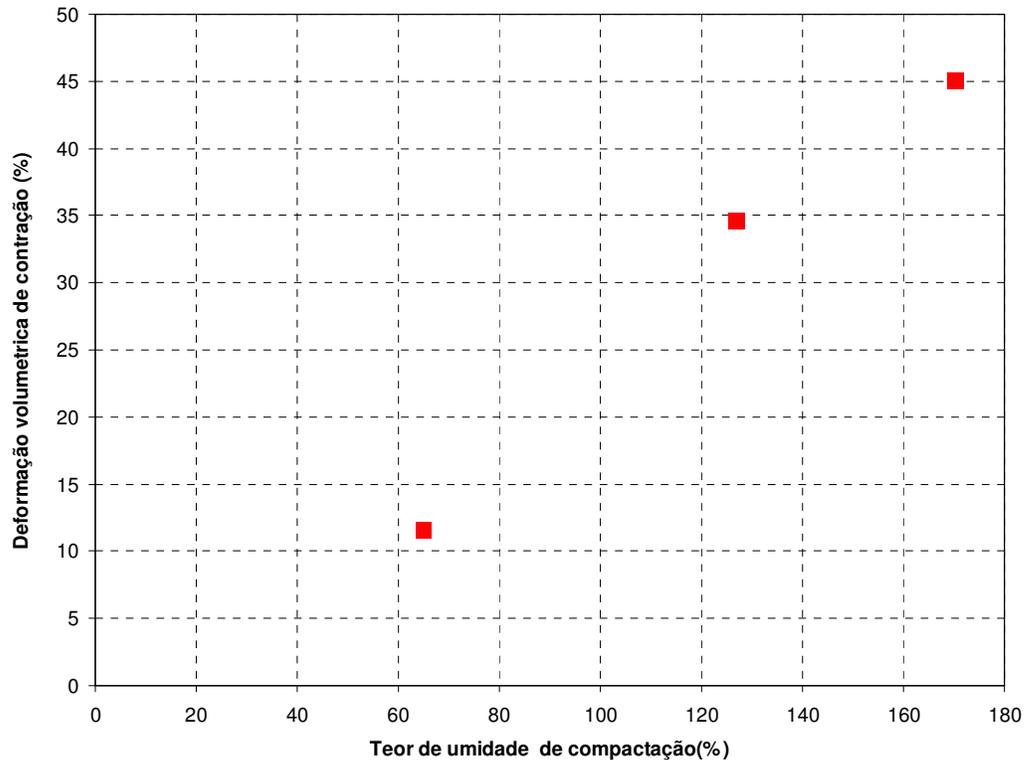


Figura 3.8 - Variação da deformação volumétrica unitária com o teor de umidade de compactação.

O aspecto morfológico das três amostras estudadas é característico ao final da contração. A amostra com 65% de umidade apresenta uma morfologia aproximadamente “granular”, onde os grumos formam grãos grossos. Os espécimes de umidade de 127% e 170% apresentam uma morfologia fina, sem a presença de grumos e sem trincas na secagem (Figura 3.9).

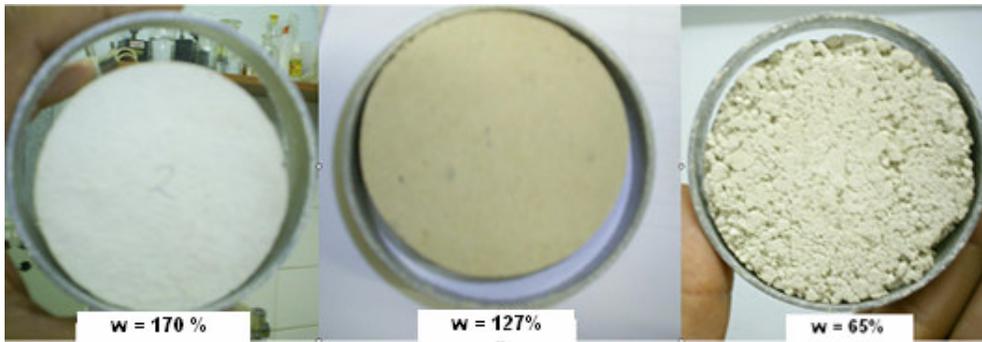


Figura 3.9 - Espécimes ensaiados, após a secagem na estufa.

Outra amostra compactada no molde do Proctor Normal, secada à temperatura do laboratório (25°C), também sofreu grandes contrações sem apresentar trincas (Figura 3.10); estas amostras de grande dimensão podem apresentar deslocamentos devido ao peso próprio, por isso, preferiu-se trabalhar com amostras de menor dimensão. A ausência de trincas nos processos de secagem apresenta-se como uma característica do RIP.



Figura 3.10 - Contração da amostra compactado no mesmo molde do Proctor Normal.

O processo de contração gera um aumento de peso específico seco e uma redução do índice de vazios (Figuras 3.11e 3.12, respectivamente). Para as amostras inicialmente saturadas (128% e 171% de umidade), os gráficos apresentam duas partes: uma de maior inclinação, próximo à linha de saturação, e outra de menor inclinação à medida que a umidade diminui. A amostra não saturada ($w=65%$) também apresenta o mesmo comportamento saindo da curva de

saturação de 79% com uma elevada inclinação (Figuras 3.11 e 3.12). Com o Proctor Normal chegou-se ao valor de 7,7 kN/m³ de peso específico seco de peso específico seco máximo, mas com a contração as amostras chegaram até 8,7 kN/m³ (Figura 3.11). O mesmo ocorre com o índice de vazios, onde o valor alcançado com o Proctor Normal é 1,63, mas com a contração as amostras alcançaram até 1,4 (Figura 3.12).

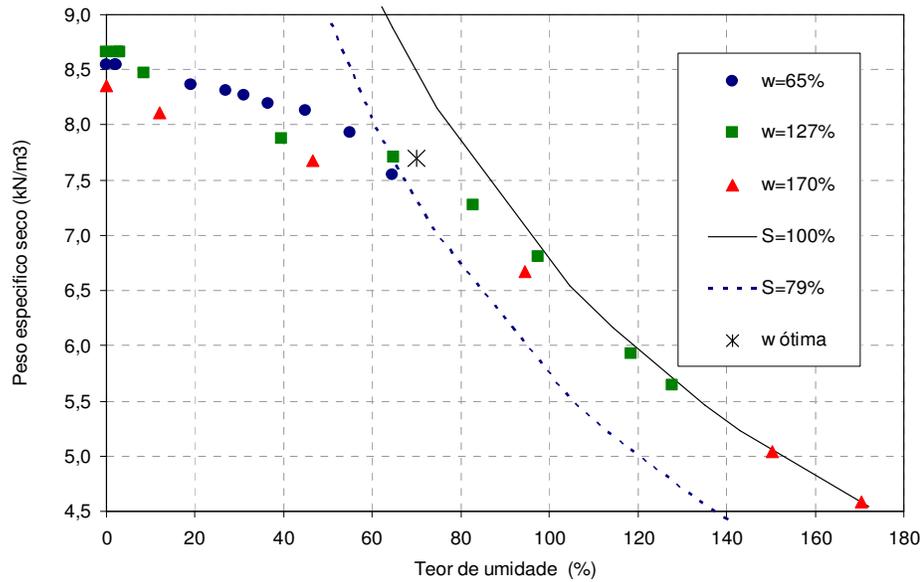


Figura 3.11 - Variação de peso específico seco com o teor de umidade no processo de secagem.

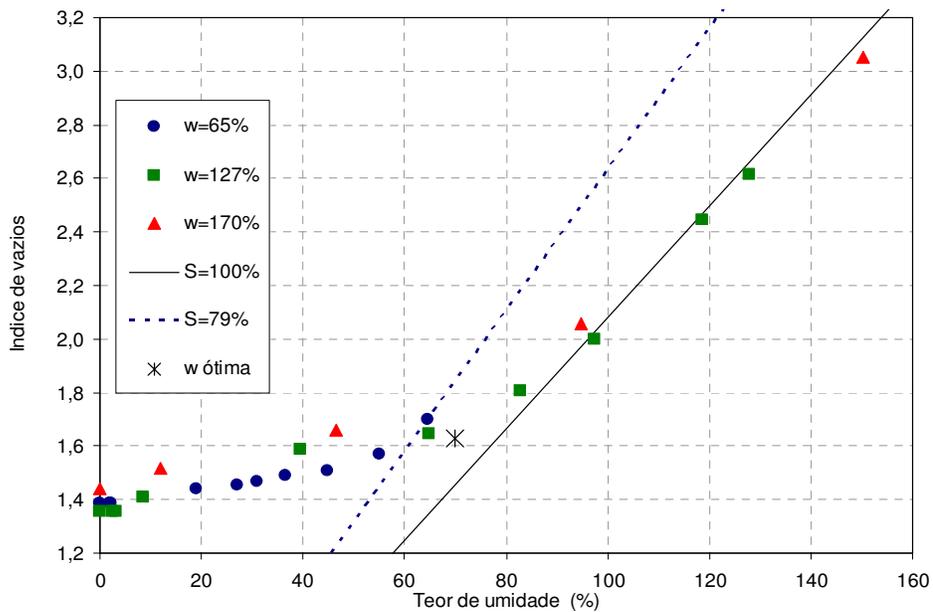


Figura 3.12 - Variação de índice de vazios com o teor de umidade no processo de secagem.