

5 Resultados e Discussões

O mercado para reciclagem existe e encontra-se em crescimento, principalmente pelo apelo exercido pela sociedade por produtos e atitudes que não causem agressão ao meio ambiente, porém em termos comerciais, os insumos de material reciclado encontram barreiras, tais como, valores muitas vezes inviáveis a produção, dificuldade na comercialização e, em relação as atitudes governamentais, uma total falta de incentivo a programas, em escala industrial, para produção de insumos e produtos reciclados.

Assim, torna-se enorme a barreira a ser transpassada pelo produtor para seduzir o mercado financeiro a investir nesta classe de projeto.

Desta forma, a necessidade da minimização destes resíduos, acrescida ao custo ambiental que a situação atual provoca, geram barreiras a serem enfrentadas para possibilitar a reciclagem destes polímeros, somente serão suplantadas com a participação e envolvimento de todas as parcelas da sociedade, sejam elas civis, governamentais ou empresariais que possuem parcelas de contribuições igualmente importantes e imprescindíveis ao sucesso desta pragmática empreitada.

Tendo em vista a contribuição a esta relevante questão, considerando os resíduos plásticos e, de forma particular as embalagens pós-consumo de PET, desenvolveu-se uma proposta para o projeto para a geração e utilização da fração fina, obtida através de operações de beneficiamento, na substituição parcial do agregado miúdo, areia e pó-de-pedra, para a execução de argamassas utilizadas na construção de artefatos pré-moldados.

Com o objetivo de determinar-se as etapas necessárias as operações para o processamento dos resíduos, realizou-se um fluxograma de trabalho de modo a orientar os ensaios programados (Figura 13).

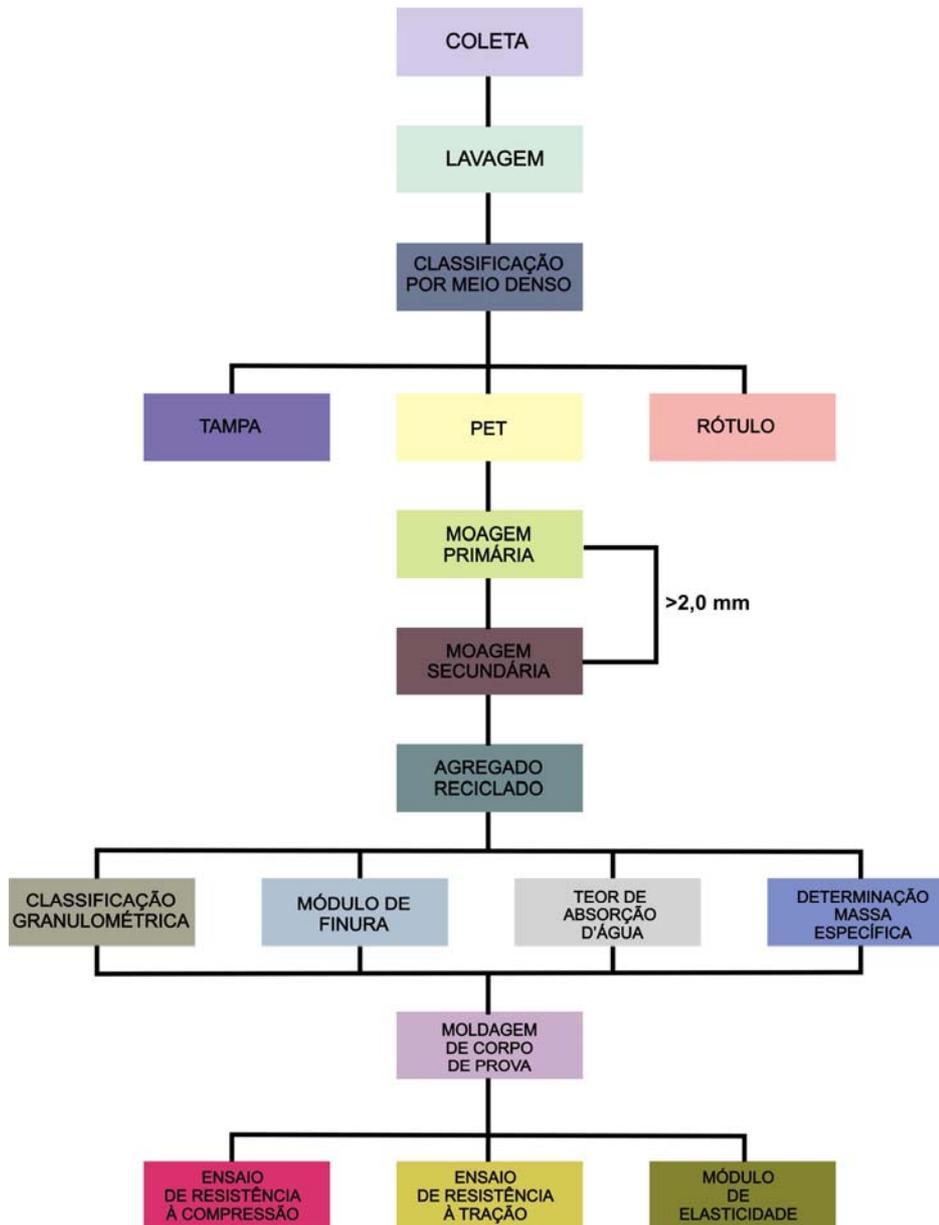


Figura 13 - Fluxograma de ensaios para caracterização tecnológica.

5.1. Coleta das amostras

Para a realização dos ensaios foram utilizadas aproximadamente 4000 garrafas selecionadas a partir da coleta seletiva, programa que está sendo incentivado pela COMLURB para a seleção e separação do material diretamente nos domicílios. Esta é a melhor opção, pois evita os gastos com a separação e limpeza do material.

5.2.Lavagem

Esta etapa é de relevante importância para produção de *flakes* com alta pureza, a lavagem é responsável pela retirada de matérias orgânicas e minerais que possam estar presos nas embalagens, além da retirada de resíduos de seu conteúdo.

5.3.Classificação por Densidade

Após a retirada do rótulo, anel e da tampa, as embalagens são depositadas em um tanque com água onde, através da diferença de densidade, é separado o PET dos outros plásticos, a tabela 4 apresenta a densidade aparente dos vários tipos de plásticos, corroborando para a validade do ensaio e possibilitando a separação dos plásticos através de meio denso, com exceção do PVC que possui uma densidade próxima a do PET e desta forma, alguns autores tais como Florido (1999), sugerem a flotação como operação de separação destes materiais.

Tabela 4 – Densidade dos Plásticos, g/cm³ - Fonte: UFRJ/NIEAD (2004).

Polímeros	Densidade (g/cm ³)
Poli(tereftalato de etileno)- PET	1.38
Poli(etileno)- PEAD	0,94 – 0,97
Poli(cloreto de vinila)-PVC (rígido)	1.39
Poli(cloreto de vinil)-PVC (flexível)	1,19 – 1,35
Poli(etileno)de baixa densidade- PEBD	0,92 – 0,94
Polipropileno (PP)	0,90
Poliestileno (PS) (sólido)	1,05

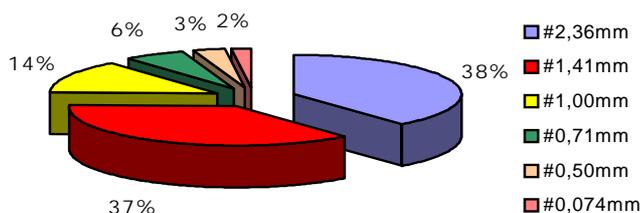
5.4.Fragmentação

O processo de fragmentação visa à redução de tamanho onde as embalagens passam por um moinho de facas onde são reduzidas através de impacto.

Como a máquina que realiza o processo possui uma peneira interna se torna possível uma pré-seleção granulométrica.

5.5. Classificação Granulométrica

Para obtenção da classificação granulométrica coletou-se amostras de 1 kg de PET flocado. Através de um classificador granulométrico, ROTAP, com peneiras de abertura nominal em milímetros e malha quadrada. Após o ensaio o material retido nas peneiras foi pesado e quantificado em percentual apresentado no Quadro 3.



Quadro 3 - Percentual de Material Retido x Peneira (mm)

Utilizou-se na execução dos ensaios duas granulometrias do PET floculado, 1,41 e 2 mm. Esta opção foi tomada devido as duas poderem ser classificadas como agregado miúdo, sendo que utilizando-se o valor de 2mm, haveria um aproveitamento maior do material reciclado. Realizou-se a análise se esta diferença contribuiu para uma diminuição da qualidade final do material.

5.6. Módulo de Finura

Analisando-se o material retido nas peneiras, Tabela 5, calcula-se o valor do módulo de finura, que tem por finalidade, avaliar o percentual de grãos menores que 1 mm que influenciam na fluência do concreto produzido.

O módulo de finura (somatório do material retido, em peso, nas peneiras com malha menores que 1 mm, da série normal, dividida por 100) encontrados para os agregados miúdos.

$$MF = \frac{\sum \text{retido}}{100}$$

Tabela 5 – Material retido em peso(g)

Peneira	#2,36	#1,41	#1,00	#0,71	#0,50	#0,074
Retido(g)	362,91	359,13	134,59	59,50	35,14	21,32

Cálculo de MF = 2,51%

$$MF = \frac{134,59 + 59,50 + 35,14 + 21,32}{100} = 2,51$$

5.7. Absorção d'água

O PET possui característica hidrofóbicas, desta forma não absorve água, assim não é necessário a determinação do seu índice de absorção d'água pois o resultado é 0.

Desta forma executou-se o ensaio de absorção d'água nos corpos de prova em argamassa, de acordo com as seguintes etapas:

- Imersão em água dos cps, por um período de 24 horas.
- Pesagem dos cps.
- Colocação dos cps na estufa com temperatura constante de 50° C, por um período de 24h.
- Nova pesagem dos cps
- Cálculo do percentual de absorção de água indicados na Tabela 6.

Tabela 6 – Percentual de absorção d'água dos corpos de prova

Percentual de Substituição	Percentual de absorção d'água
10%	12%
30%	15%
50%	20%

Os resultados obtidos de acordo com Tabela 6 demonstram que o aumento do percentual de PET na argamassa, interfere diretamente no resultado do ensaio, uma vez que a porosidade do Cp aumenta e, conseqüentemente, ocorre um acréscimo na quantidade de água absorvida.

Conclui-se, desta forma, que este fato ocorre devido às características hidrofóbicas do PET onde a água presente é absorvida pela matriz cimentícia, excedendo a quantidade à necessária a sua hidratação, ocasionando o aumento das fissuras na zona de transferência entre a matriz e o agregado, assim ocorre o aumento da porosidade e conseqüentemente do percentual de absorção de água.

5.8.Massa Específica

Os valores obtidos nos ensaios para a determinação do peso específico aparente (ou unitária) dos materiais utilizados nos ensaios, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Peso específico das amostras de PET analisadas

Material	Volume (ml)	Peso (g)	Peso específico aparente (g/cm ³)
PET	1000	425	0.425
Areia	1000	1352	1.352
Cimento	1000	1094	1.094

O peso específico aparente dos materiais depende do grau de adensamento e da compacidade do material, ou seja, da quantidade de vazios existentes entre suas partículas.

Porém, mais importante que a comparação, é o fato de que no Brasil, ainda é comum a dosagem de concretos e argamassas em volume, nos canteiros de obra, o que torna o peso específico aparente dos agregados uma informação indispensável, para o cálculo dos traços em volume.



Figura 14 - Pesagem dos flocos de PET

5.9. Moldagem de Corpo de Prova (Cp)

Moldou-se Cps cilíndricos com dimensões de 5 x 10 cm, conforme a NBR 5738, preenchidos com argamassa de cimento e areia no traço 1:4, que é o traço utilizado com maior frequência na fabricação de artefatos pré-moldados, e substituiu-se a areia por agregado de PET nas quantidades de 10, 30 e 50%.

Tendo em vista a diferença significativa do peso específico entre a areia e o agregado de PET, optou-se por realizar ensaios com argamassas calculadas em peso e em volume, desta forma avaliando-se as diferenças mecânicas.

Observou-se a necessidade de se corrigir o A/C, fator água/cimento, devido ao aumento da plasticidade da argamassa proporcional a substituição do agregado.

5.10. Cálculo do consumo de agregados/m³

No dimensionamento da quantidade do material a ser utilizado, calculou-se para uma produção de 1m³ de argamassa produzida.

Como os materiais agregados, areia e PET possuem massas específicas bastante diferentes, sendo necessário a adequação nos traços, conforme ilustra as Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Cálculo do traço em peso para produção de 1m³ de argamassa

	T1 = 0%	T2=10%	T3 = 30%	T4 = 50%
Cimento (kg)	400	400	400	400
Areia (kg)	1600	1440	1120	800
PET (kg)	0	160	480	800
Água (L)	400	400	400	400

Tabela 9 – Cálculo do traço em volume para produção de 1m³ de argamassa

	T1 = 0%	T2=10%	T3 = 30%	T4 = 50%
Cimento (m³)	0,25	0,25	0,25	0,25
Areia (m³)	1	0,90	0,70	0,50
PET (m³)	0	0,10	0,30	0,50
Água (L)	250	250	250	250

Tabela 10 - Massa específica aparente dos materiais utilizados

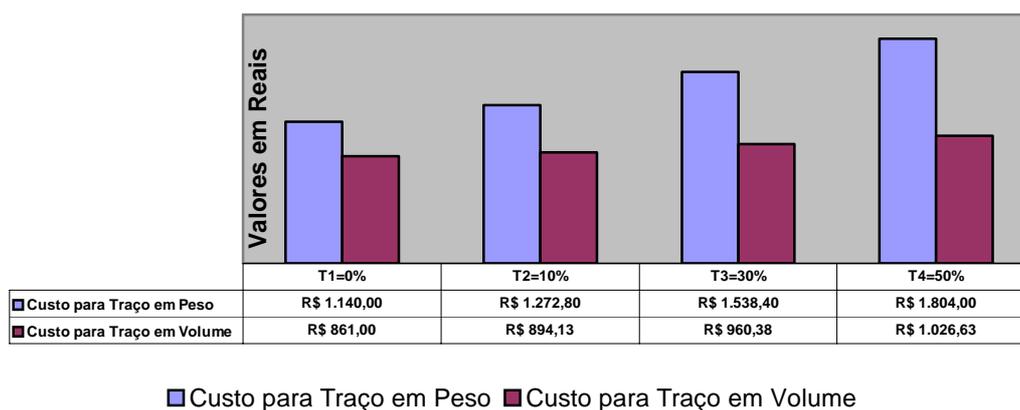
MATERIAL	kg/m ³
Cimento	1200
Areia	1600
PET	425

Não se pode deixar de considerar, em virtude da diferença de massa específica entre os agregados, o traço em peso apresentou uma quantidade maior que 1m³ de argamassa produzida, diferença que se explica observando a Tabela 10, onde se multiplicarmos a quantidade de agregado de PET pela massa específica obtêm-se uma redução de aproximadamente 75% de participação deste agregado na composição.

Desta forma, conclui-se que o cálculo do traço através de medidas em peso se traduz ineficaz, pois a relação de substituição seria alterada e desta forma, o traço também seria modificado.

Os resultados aos esforços mecânicos de argamassas compostas de traços em peso estariam destorcidos, não representando a realidade requerida ao traço calculado.

Além deste fato, o custo do material produzido seria alterado de forma significativa como se pode observar no Quadro 4, considerando a Tabela 11.



Quadro 4 - Diferença de custo entre argamassas com traço calculado em peso e em volume

Tabela 11 - Valores dos Materiais no Atacado (RJ/2005)

	R\$/m ³	R\$/kg
Cimento	R\$ 3.324,00	R\$ 2,77
Areia	R\$ 30,00	R\$ 0,02
PET	R\$ 361,25	R\$ 0,85

5.11. Ensaio de Compressão Axial

Primeiramente ensaiaram-se os Cps com traços em volume, devido à intenção de se retratar o mais próximo possível da realidade, o modo como são realizadas a confecção de argamassas.

Realizou-se o ensaio de um dia, descartado posteriormente, na realização dos outros ensaios, pois não foi observada variação significativa nos resultados.

Uma das amostras foi executada sem mistura para servir como parâmetro, na análise da perda de resistência a compressão.

A mistura com 70% de substituição em volume não foi realizada na experiência em peso. Seus resultados foram descartados, pois apresentaram muita perda de resistência em relação à amostra padrão.

Os resultados demonstrados na Tabela 12 e Figura 15, demonstram a possibilidade de utilização da substituição nos percentuais de 10 e 30%.

Tabela 12 - Resultado do ensaio de compressão axial (kgf/cm²), no traço em Volume.

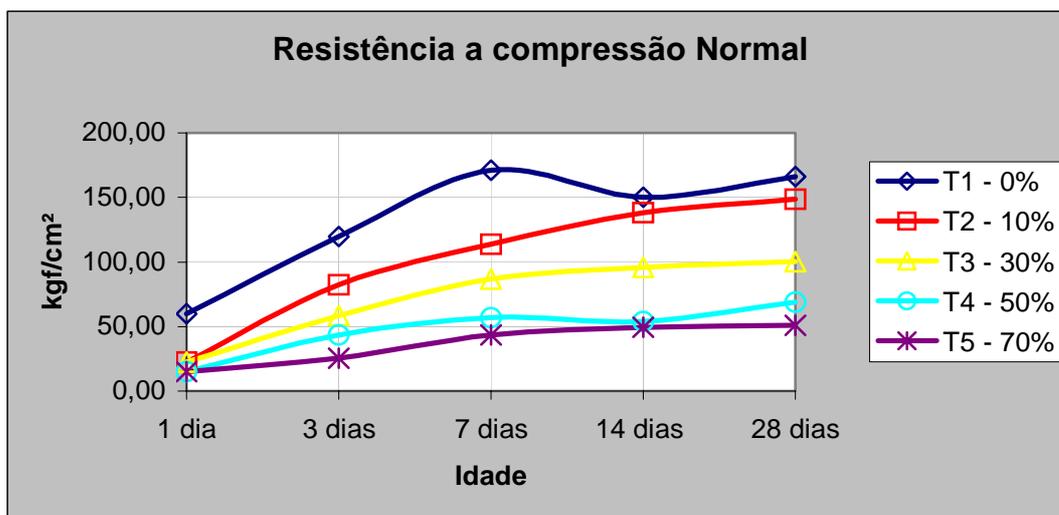
Traço	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
T1	59,97	119,94	170,91	146,92	166,15
T2	22,49	82,46	113,94	137,93	148,42
T3	22,49	58,47	86,96	95,95	100,45
T4	14,99	43,48	56,96	53,97	68,96
T5	14,99	25,49	43,46	49,48	50,97

Tabela 13 – Perda Percentual de Resistência – Traço em Volume

Traço	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
T1	100	100	100	100	100
T2	37,5	68,7	67	92	89
T3	37,5	48,7	51	64	60
T4	25	36,2	33,3	36	41,50
T5	25	21,2	25,4	33	30,7

Tabela 14 – Variação do peso em gramas dos corpos de prova, no traço em volume.

Traço	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
T1	469,71	445,56	479,96	484,78	468,50
T2	455,80	456,82	452,64	465,18	465,64
T3	423,11	411,45	426,27	435,36	435,98
T4	372,51	378,75	339,94	370,00	380,91
T5	318,13	327,34	343,31	343,00	336,30

Figura 15 - Gráfico da variação da resistência à compressão em kgf/cm², no traço em volume.

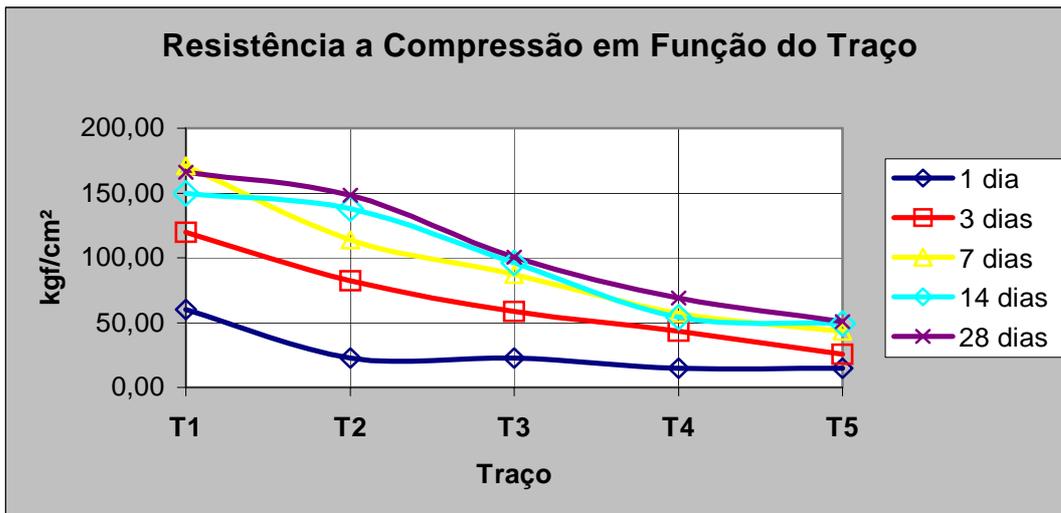


Figura 16 - Gráfico da resistência a compressão em função do traço em volume

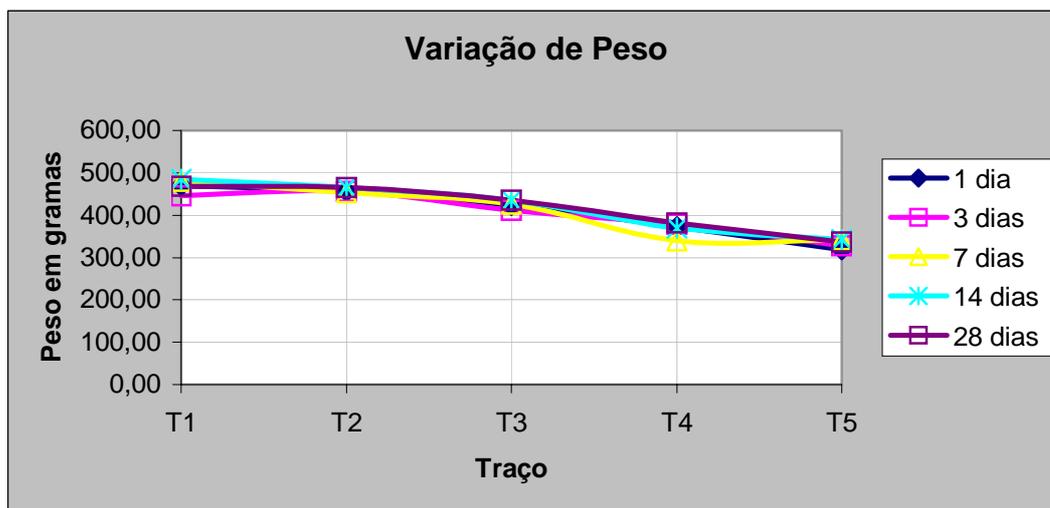


Figura 17 - Variação do peso dos corpos de prova em gramas, em função da variação dos percentuais de substituição do agregado por flocos de PET em volume.

Tabela 15 - Resultado do ensaio de compressão axial (kgf/cm²)-Traço em peso

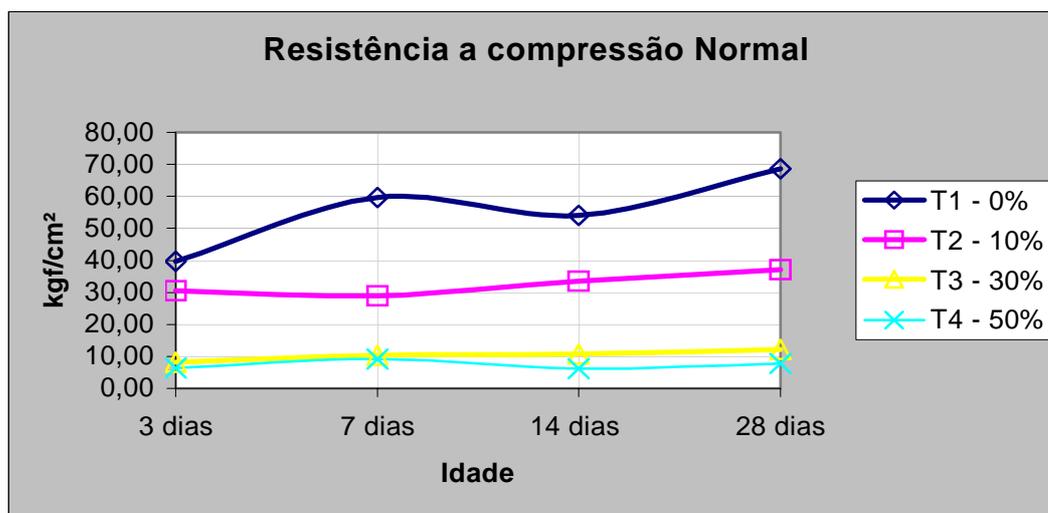
Traço	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
T1	39,61	59,70	54,13	68,64
T2	30,57	28,91	33,49	37,06
T3	8,15	10,36	10,70	12,23
T4	6,37	9,17	6,11	7,81

Tabela 16 - Perda percentual de resistência – Traço em peso

Traço	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
T1	100	100	100	100
T2	77,1	48,43	61,9	54
T3	20,6	17,35	19,8	17,8
T4	16	15,4	11,3	4,7

Tabela 17 - Variação do peso em gramas dos corpos de prova - Traço em peso

Traço	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
T1	390	395	396	395
T2	355	354	358	360
T3	280	298	300	314
T4	226	243	254	263

Figura 18 - Gráfico da variação da resistência à compressão em kgf/cm²-Traço em peso.

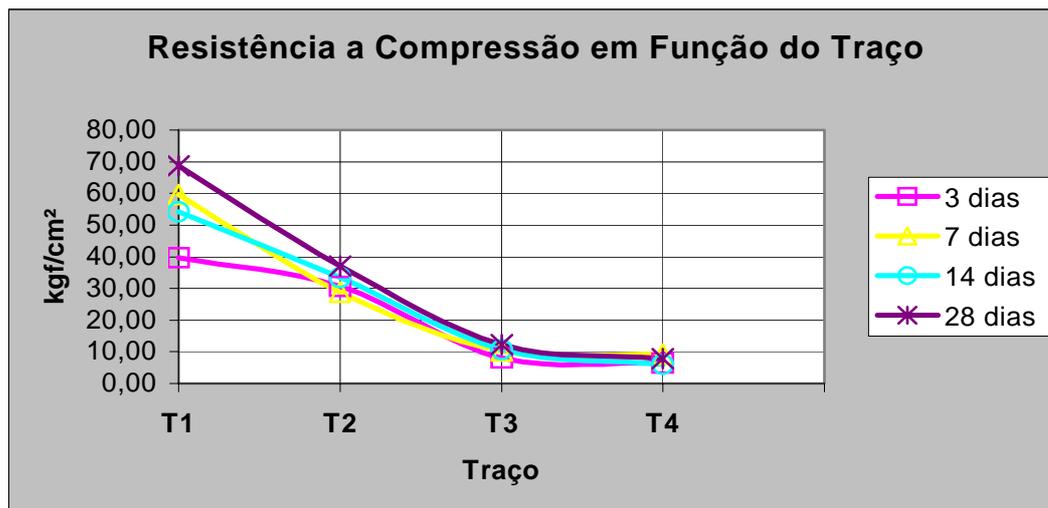


Figura 19 - Gráfico da resistência à compressão em função do traço em peso.

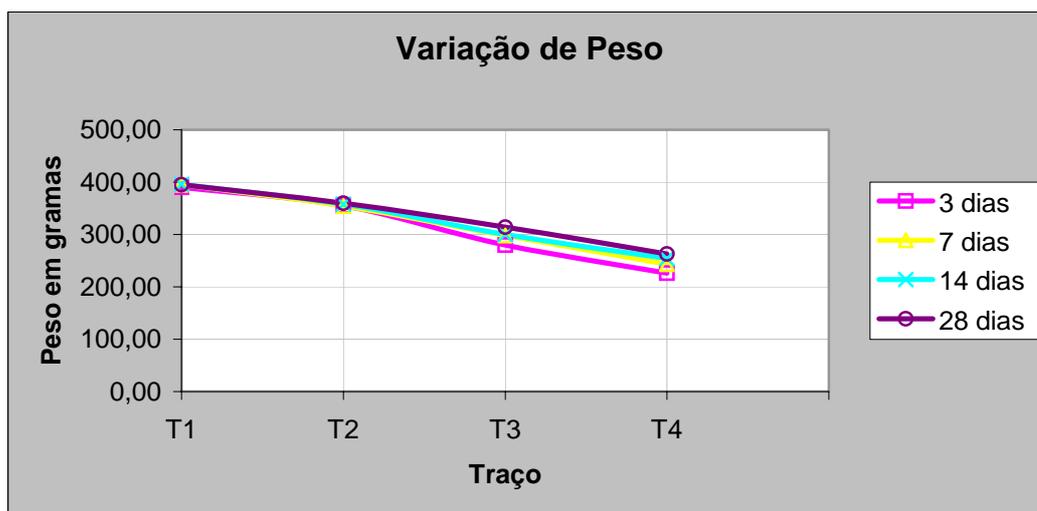


Figura 20 - Variação do peso dos corpos de prova em gramas, em função da variação dos percentuais de substituição do agregado por flocos de PET em volume.

Tabela 18 - Resultado do Ensaio de Compressão Axial (kgf/cm^2) -Traço em peso, # 2mm

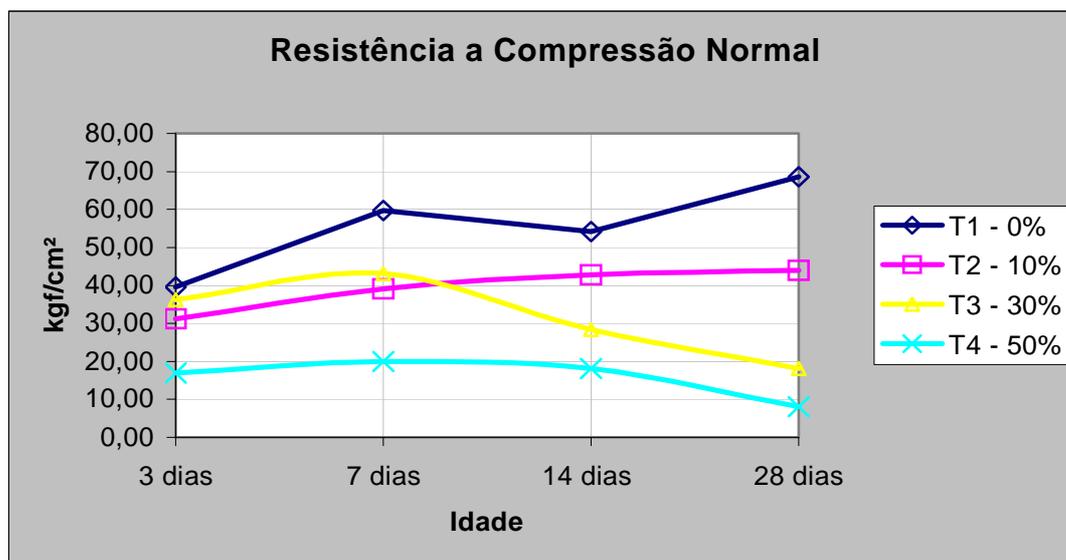
Traço	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
T1	39,61	59,70	54,13	68,64
T2	31,20	39,10	42,79	43,94
T3	36,30	43,17	28,40	18,08
T4	16,98	20,04	18,08	7,91

Tabela 19 - Perda Percentual de Resistência – Traço em Peso

Traço	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
T1	100	100	100	100
T2	78,8	65,5	79,0	64
T3	91,6	72,3	52,5	26,3
T4	42,9	33,6	33,4	4,8

Tabela 20 - Variação do peso em gramas dos corpos de prova-Traço em peso- # 2 mm

Traço	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
T1	390	395	396	395
T2	350	370	369	351
T3	320	362	265	251
T4	250	285	228	196

Figura 21 - Gráfico da variação da resistência a compressão axial em kgf/cm², no traço em peso.

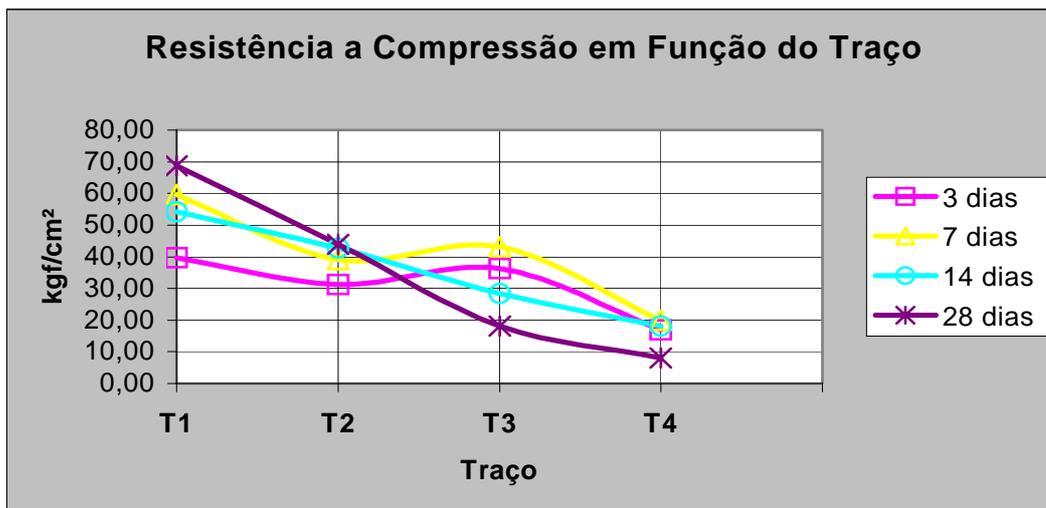


Figura 22 - Gráfico da resistência à compressão em função do traço em peso.

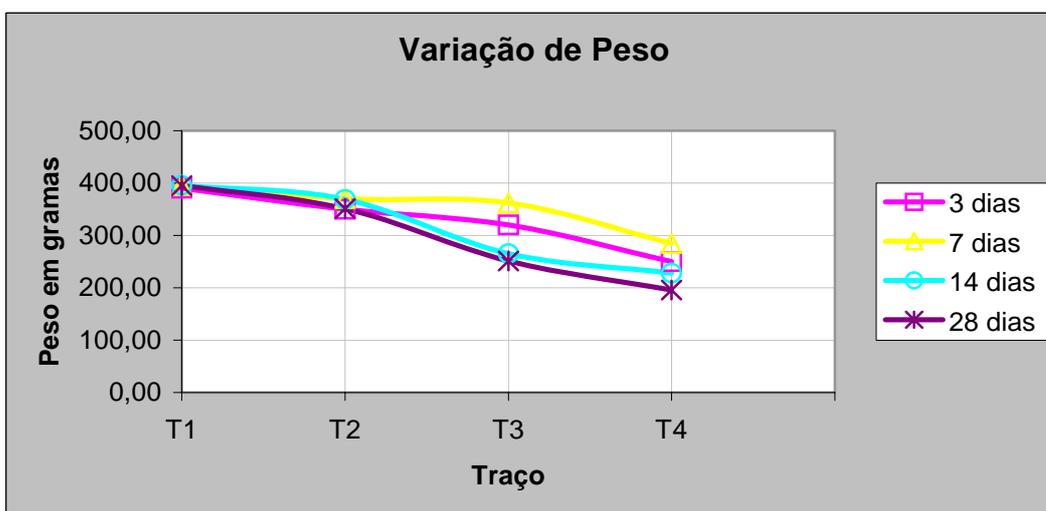


Figura 23 - Variação do peso dos corpos de prova em gramas, em função da variação dos percentuais de substituição do agregado por flocos de PET em peso.

5.12. Ensaio de Tração

Para realização deste ensaio o CP não é o mesmo utilizado nos outros ensaios, este é executado num molde prismático, porém os traços utilizados são os mesmos utilizados nos outros ensaios.

Tendo em vista as características mecânicas do concreto, onde o módulo de deformação obtido através dos esforços de compressão é proporcional ao módulo de tração, uma vez que este material não tem características de grandes resistências a tração e flexão, obteve-se os valores representativos aos esforços de tração dos corpos de prova utilizando-se modelagem matemática, através de software apropriado de uso comum na Engenharia Civil, **Pingüim-Cálculo de**

Resistência a Tração, desenvolvido pela Concreteste Tecnologia em Materiais, onde obteve-se os valores listados na Tabela 21, que originou o Figura 24.

Tabela 21 - Ensaio de Tração

Traço	Peso		Volume	
	14 dias	28 dias	14 dias	28 dias
T1	8,37	10,72	23,39	25,90
T2	5,10	5,72	21,52	23,08
T3	1,66	2,05	14,95	15,73
T4	0,89	9,07	8,37	10,72

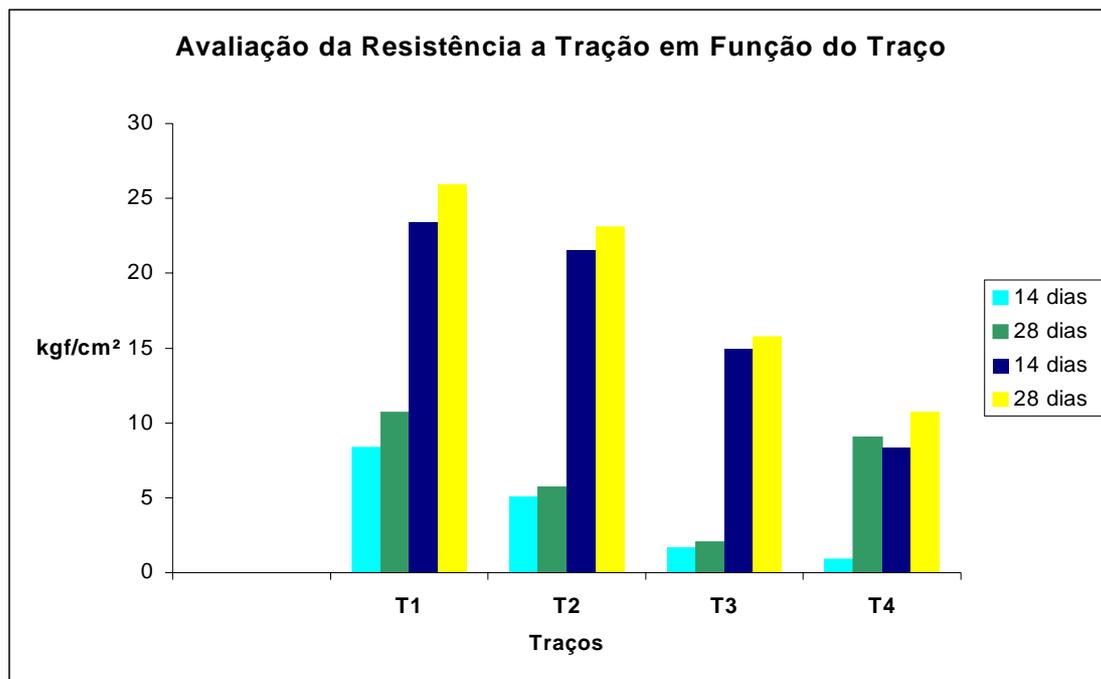


Figura 24-Variação de Resistência a Tração – kgf/cm²