

CAPÍTULO 4

TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

Muitos podem ser os factores ambientais que contribuem para a degradação das misturas betuminosas, contudo a água parece ser o principal agente de deterioração. A água fará com que o ligante não adira ao agregado, e uma vez que este é a “cola” que os mantém unidos, pode dar origem a uma diminuição da rigidez ou da resistência da mistura betuminosa ou causar a perda de ligação entre a emulsão betuminosa e os agregados, tal como é ilustrado na Figura 4.1. Este fenómeno é, também, denominado por perda de adesividade ou descolagem (stripping, na terminologia inglesa), o que pode provocar uma significativa degradação do pavimento.

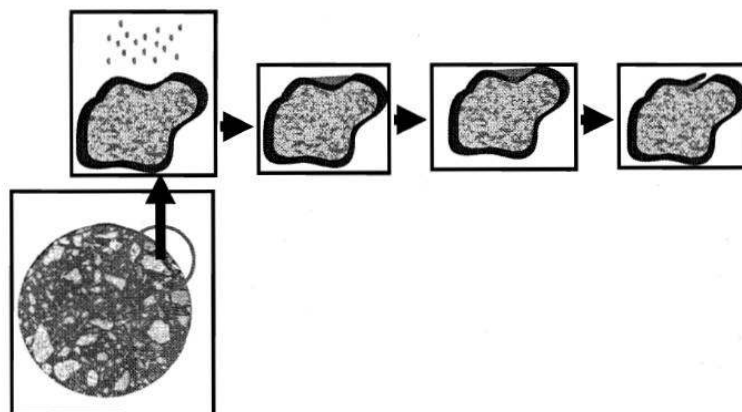


Figura 4. 1: Ilustração dos danos causados pela água na mistura

Fonte: Kim & Lutfi (2006, p. 6)

A degradação das misturas betuminosas devido à presença de água ocorre em várias formas e graus de severidade, sendo a perda de adesividade a consequência primária.

Esta perda de adesividade ocorre em sítios localizados do pavimento, no qual o betume (que se separou dos agregados) migra até à superfície das camadas betuminosas. Esta migração pode levar a deformações permanentes na forma de rodeiras ou abatimentos, ao desenvolvimento de desagregações na camada de desgaste (por exemplo, peladas, ninhos ou covas e cabeças de gato) e ao fendilhamento sob a acção repetida das cargas dos veículos.

A intrusão de água nestas zonas localizadas danificadas pela água, simultaneamente com o carregamento repetido do tráfego, contribui para um aceleração da degradação da camada de desgaste do pavimento, e provavelmente, das camadas subjacentes.

Outra consequência da presença de água nas misturas betuminosas é a redução da sua rigidez. Um pavimento com falta de rigidez, sob a acção do tráfego, está mais sujeito ao aparecimento de degradações, como resultado do aumento das extensões nas diversas camadas do pavimento, quando se aplica o mesmo nível de tensão (Silva, 2005).

Posto isso, levou-se a cabo um trabalho experimental com o objectivo de avaliar o comportamento desta nova mistura betuminosa na presença de água.

Para tal, realizaram-se três ensaios que visam avaliar a sensibilidade à água de misturas betuminosas, sendo eles, o ensaio de imersão-compressão pela norma espanhola NLT-162/00, o ensaio de sensibilidade à água pelas normas europeias EN 12697-12 e EN 12697-23 e o ensaio de gelo-degelo pela AASHTO T 283-03.

No Quadro 4.1, apresentam-se os ensaios usados para simulação laboratorial da sensibilidade à água de misturas betuminosas, bem como os procedimentos utilizados por cada método de ensaio.

Quadro 4. 1: Ensaio para simulação laboratorial da sensibilidade à água de misturas betuminosas

Fonte: adaptado de Silva (2005, p. 136)

Método de ensaio para avaliação da sensibilidade à água	Procedimentos utilizados no método de ensaio				
	Imersão em água	Avaliação visual da descolagem	Saturação em vácuo	Acção de gelo-degelo	Realização de ensaios mecânicos
Ensaio de imersão-compressão	x				x
Ensaio de sensibilidade à água	x	x	x		x
Ensaio de gelo-degelo		x	x	x	x

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1. Emulsão betuminosa

As características da emulsão utilizada, denominada por RECIEMUL-90, para a realização dos provetes em laboratório são as apresentadas no quadro seguinte:

Quadro 4. 2: Características da emulsão usada em laboratório.

Fonte: LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Características	Unidade	LNEC
Peneiração	%	0,00
Viscosidade Saybolt Furol	s	29
Carga das partículas		Positiva
Sedimentação aos 7 dias, ST	%	(Topo: 58,2/Fundo: 32,8) 25,4
Teor em betume	%	61,5
Teor em óleo	%	0,25
Teor em água	%	36,5
Rotura com filler, BV		(210 e 210) média 210
Penetração resíduo destilação (25°C, 100g, 5s)	0,1mm	103
Temperatura de amolecimento do resíduo de destilação	° C	46,0
Recuperação elástica, 25° C	%	10

4.2.2. Material fresado

O material fresado usado no laboratório trouxe-se da obra e em quantidade suficiente para a realização da totalidade dos ensaios.

No Quadro 4.3 apresentam-se os valores de betume residual obtidos por incineração em mufla de três amostras de material fresado. Na Figura 4.2 apresentam-se as curvas granulométricas do material fresado sem extracção de betume e com extracção de betume, bem como o fuso granulométrico recomendado no Caderno de Encargos da obra

(Anexo A), sendo este o mesmo fuso recomendado nas especificações actualmente vigentes em Espanha relativamente a materiais reciclados “*in situ*” a frio, o fuso RE2 para espessuras compreendidas entre os 6 e 10 cm.

Quadro 4. 3: Quantidade de betume residual presente no material fresado.

Identificação da amostra	Percentagem de betume (%)
1	5,59
2	5,25
3	5,54
Média	5,46

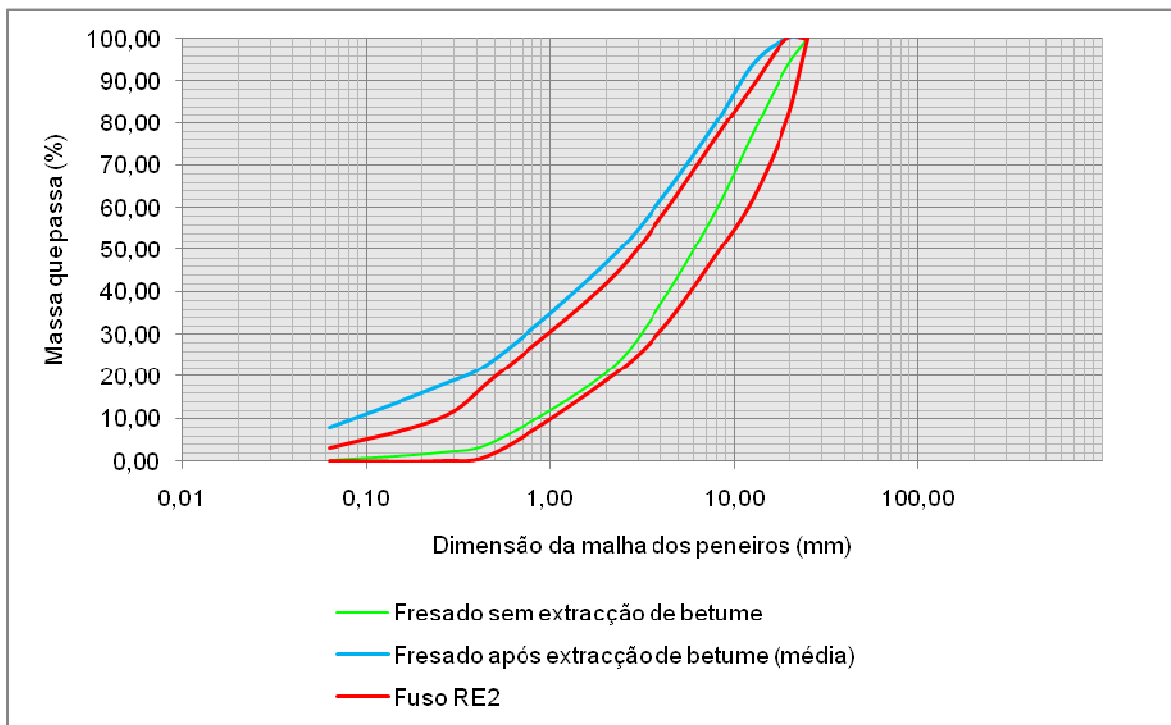


Figura 4. 2: Curvas granulométricas do material fresado sem extração de betume e do material fresado após extração do betume.

No que diz respeito à granulometria, verifica-se que a curva do fresado se enquadra no fuso recomendado no Caderno de Encargos da obra (Anexo A), enquanto que a granulometria obtida após extração do betume se obtém uma granulometria mais fina, localizada, na generalidade, fora do fuso. Deste modo, considera-se que a granulometria obtida sem extração de betume representa de uma forma mais adequada o “agregado” a misturar com emulsão e água e a compactar (Antunes e Batista, 2004).

4.3. MISTURAS PRODUZIDAS EM LABORATÓRIO

Para o **ensaio de gelo-degelo**, prepararam-se 15 provetes cilíndricos, com 10,16 cm de diâmetro e, aproximadamente, 6,3 cm de altura.

Para a execução dos provetes, começou por se aquecer o material fresado durante, aproximadamente, 30 minutos a uma temperatura de 120° C. De seguida, adicionou-se 2% de emulsão e mexeu-se durante cerca de 2 minutos.

A compactação dos provetes fez-se tendo por base a metodologia de Marshall, usando a máquina apresentada na Figura 4.3, segundo a norma europeia EN 12697-34, tendo esta sido efectuada a uma temperatura de 90° C. Aplicaram-se 50 pancadas em cada face do provete, com o fim de se obter uma percentagem de vazios entre os 6 e 8%, percentagem esta que contribui para acelerar os danos nos provetes (Liang, 2008).

Depois de compactados deixaram-se os provetes nos moldes, durante 24 horas. Passado este tempo de cura, retiraram-se os provetes dos moldes e mediu-se a altura (h) e o diâmetro (D) de cada um.

Seguidamente, com base na norma europeia EN 12697-5 e EN 12697-6, aplicando-se o procedimento C: Provete selado, determinou-se a baridade máxima teórica e a baridade relativa, respectivamente.



Figura 4. 3: Máquina para o ensaio de Marshall.

Para o **ensaio de sensibilidade à água**, prepararam-se 6 provetes cilíndricos, com 10,16 cm de diâmetro e 6,3 cm de altura, aproximadamente.

Aqueceu-se o material fresado durante, aproximadamente, 30 minutos a uma temperatura de 120° C e, de seguida, adicionou-se 2% de emulsão e mexeu-se durante cerca de 2 minutos.

A compactação dos provetes fez-se a uma temperatura de 90° C e tendo por base a metodologia de Marshall (EN 12697-34). Aplicaram-se 75 pancadas em cada face do provete, com o fim de se obterem as densidades e os vazios esperados em obra.

Depois de compactados deixaram-se os provetes nos moldes, durante 24 horas.

Passado este tempo de cura, retiraram-se os provetes dos moldes e mediu-se a altura (h) e o diâmetro (D) de cada um e calcularam-se as respectivas baridades relativas, de acordo com a norma europeia EN 12697-6, seguindo o procedimento C: Provete selado.

Para o **ensaio de imersão-compressão**, fizeram-se 6 provetes cilíndricos, com 10,16 cm de diâmetro e 10,16 cm de altura, aproximadamente.

Aqueceu-se o material fresado durante, aproximadamente, 30 minutos a uma temperatura de 120° C e, de seguida, adicionou-se 2% de emulsão e mexeu-se durante cerca de 2 minutos.

A compactação dos provetes fez-se a uma temperatura de 90° C e tendo por base a ASTM D 1074-80. De modo a aproximar os provetes de laboratório à obra, estes compactaram-se com uma compactação estática de duplo efeito que consiste na aplicação de uma carga crescente de 8 MPa (65 kN) durante 2 a 3 minutos, e de seguida constante durante 2 minutos, tal como se demonstra na Figura 4.4.



Figura 4. 4: Máquina de compactação estática.

Depois de compactados deixaram-se os provetes nos moldes, durante 24 horas. Passado este tempo de cura, desmoldaram-se os provetes e calcularam-se as respectivas baridades relativas, seguindo o procedimento B: Superfície seca saturada, segundo a EN 12697-6, tal como se apresenta nas Figuras 4.5 e Figura 4.6.



Figura 4. 5: Saturação dos provetes em água.



Figura 4. 6: Provete imerso em água (peso imerso).

4.4. RECOLHA DE CAROTES

Os carotes de obra retiraram-se do pavimento usando uma caroteadora como a apresentada na Figura 4.7. A recolha destes foi feita de 100 em 100 metros, aproximadamente, alternando entre a faixa direita e esquerda da estrada, sempre que possível. Na Figura 4.8 procede-se à remoção do carote e na Figura 4.9 apresenta-se o carote após ser removido do pavimento. Na Figura 4.10 podem ver-se algumas das amostras de obra exactamente como recolhidas. Na Figura 4.11, podem ver-se as mesmas amostras da figura anterior, depois de cortadas pela camada de semi-quente.



Figura 4. 7: Corte do carote no pavimento, usando uma caroteadora.



Figura 4. 8: Extracção do carote.



Figura 4. 9: Carote após remoção do pavimento.



Figura 4. 10: Carotes recolhidos da obra.



Figura 4. 11: Carotes recolhidos da obra depois de rectificados.

De seguida, mediram-se as alturas e os diâmetros dos carotes. Com base na norma europeia EN 12697-6, determinaram-se as baridades, usando o método B: Superfície seca saturada.

Posto isto, e com base no descrito no ponto 4.3, procedeu-se à realização dos ensaios de sensibilidade água usando os carotes.

4.5 ENSAIOS DE SENSIBILIDADE À ÁGUA

4.5.1. Ensaio de gelo-degelo

O ensaio de gelo-degelo realizou-se tendo por base a norma AASHTO T 283-89 (método de Lottman modificado). Este ensaio avalia a propriedade de adesividade em misturas asfálticas, tendo em conta o efeito destrutivo da água em provetes cilíndricos preparados através da metodologia Marshall, com um volume de vazios de 7% ($\pm 1\%$). Os provetes seleccionaram-se para a formação dos grupos de modo a que a média da percentagem de vazios por grupo fosse o mais perto possível. A análise é feita pela relação entre a resistência à tracção indirecta de provetes com condicionamento prévio e provetes sem condicionamento (Wesseling, 2002). Este valor de resistência à tracção indirecta obtém-se através da aplicação de uma carga compressiva no provete cilíndrico em dois pontos diametralmente opostos, tal como está esquematizado na Figura 4.12.

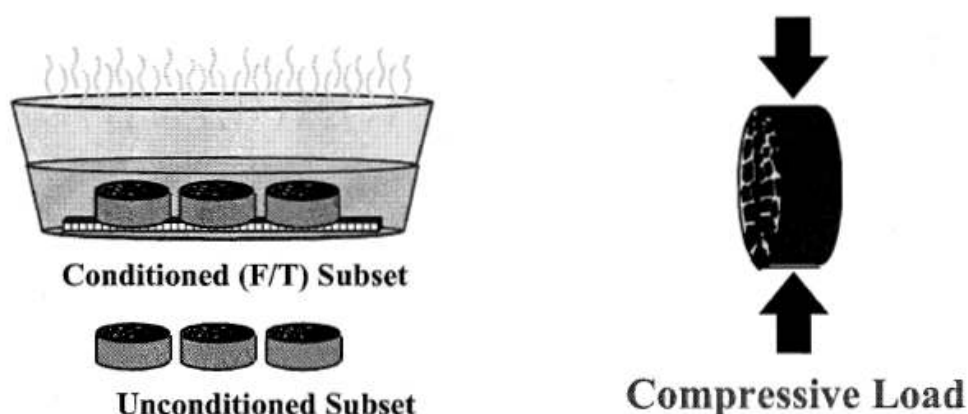


Figura 4. 12: Representação esquemática da AASHTO T 283.

Fonte: Kim e Lutfi (2006, p. 26).

▪ **PROCEDIMENTO**

Após o cálculo das densidades relativas, calculou-se a percentagem de vazios de cada provete, aplicando a seguinte equação:

$$P_a = 100 \times \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \quad (\text{eq. 4.1})$$

onde,

P_a – Vazios, %;

G_{mb} – Baridade relativa, g/cm³ (EN 12697-6);

G_{mm} – Baridade máxima teórica, g/cm³ (EN 12697-5).

Agruparam-se os provetes, em grupos de 3, de modo a que a percentagem de vazios de cada provete, por grupo, fosse semelhante.

No Quadro 4.4 e 4.5 apresentam-se os valores da percentagem de vazios obtidos e a divisão por grupos dos provetes de laboratório e dos carotes de obra, respectivamente.

Quadro 4. 4: Percentagem de vazios e grupos dos provetes de laboratório.

N.º proвете	Peso seco	Volume	Baridade relativa	Densidade máxima teórica	% de vazios
	A (g)	E (cm ³)	G _{mb} (g/cm ³)	G _{mm} (g/cm ³)	P _a
1	1208.2	518.87	2.29	2.45	6.54
2	1207.7	518.87	2.27	2.45	7.12
3	1195.1	494.55	2.30	2.45	6.10
4	1207.7	518.87	2.24	2.45	8.39
5	1206.0	510.76	2.25	2.45	8.21
6	1203.0	510.76	2.27	2.45	7.43
7	1208.4	518.87	2.28	2.45	6.78
8	1203.3	510.76	2.29	2.45	6.60
9	1223.9	518.87	2.27	2.45	7.08
10	1209.6	518.87	2.29	2.45	6.33
11	1216.9	518.87	2.26	2.45	7.81
12	1208.6	518.87	2.24	2.45	8.51
13	1198.3	510.76	2.32	2.45	5.26
14	1211.0	510.76	2.30	2.45	6.10
15	1206.4	518.87	2.27	2.45	7.21
Provetes sem condicionamento (n.º 1, 8 e 10)					6.49
Provetes só saturados (n.º 4, 5 e 12)					8.37
Provetes saturados e congelados (n.º 3, 13 e 14)					5.82
Provetes saturados e 1 ciclo gelo/degelo (n.º 6, 11 e 15)					7.49
Provetes saturados e 4 ciclos gelo/degelo (n.º 2, 7 e 9)					7.00

Quadro 4. 5: Percentagem de vazios e grupos dos carotes de obra.

N.º provete	Peso seco	Volume	Densidade relativa	Densidade máxima teórica	% de vazios
	A (g)	V (cm ³)	G _{mb} (g/cm ³)	G _{mm} (g/cm ³)	P _a
1	995.1	424.74	2.22	2.39	6.93
3	1398.0	594.64	2.27	2.40	5.54
4	1398.8	594.64	2.30	2.40	3.98
5	1384.0	586.15	2.23	2.40	6.99
6	1232.6	552.17	2.21	2.40	8.11
7	1095.5	484.21	2.14	2.40	10.67
8	1086.7	467.22	2.22	2.40	7.31
10	910.7	399.26	2.13	2.40	11.31
11	1163.7	509.69	2.15	2.40	10.41
12	999.5	458.72	2.13	2.40	11.43
14	1013.2	441.73	2.16	2.40	10.04
15	1294.9	577.65	2.11	2.40	11.89
17	1442.5	603.14	2.29	2.40	4.48
18	1474.8	628.62	2.27	2.40	5.32
19	1662.3	713.57	2.31	2.40	3.94
Provetes sem condicionamento (n.º 7, 11 e 14)					10.38
Provetes só saturados (n.º 4, 17 e 19)					4.13
Provetes saturados e congelados (n.º 10, 12 e 15)					11.55
Provetes saturados e 1 ciclo gelo/degelo (n.º 3, 5 e 18)					5.95
Provetes saturados e 4 ciclos gelo/degelo (n.º 1, 6 e 8)					7.08

♦ **Provetes sem condicionamento (Grupo 1)**

Os provetes sem condicionamento colocaram-se num saco de plástico resistente e colocaram-se num banho de água a uma temperatura de 25° C, durante 2 horas. De seguida removeram-se os provetes do banho e colocaram-se entre as tiras de carregamento, tal como demonstrado na Figura 4.13. Aplicou-se uma carga constante de 50 mm por minuto, registou-se o pico máximo de carga e parou-se a máquina depois de o provete ter fracturado. De seguida abriu-se o provete e observaram-se os seus agregados.

Depois, determinou-se a força de tracção indirecta de cada provete do grupo 1 (S₁), com base na eq. 4.2.

$$S_t = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times D} \times 10^6 \dots\dots\dots (eq. 4.2)$$

onde,

S_t – Resistência à tracção indirecta do grupo t, kPa;

P – Força máxima, kN;

h – Altura do provete, sem condicionamento, mm;

D – Diâmetro do provete, mm.

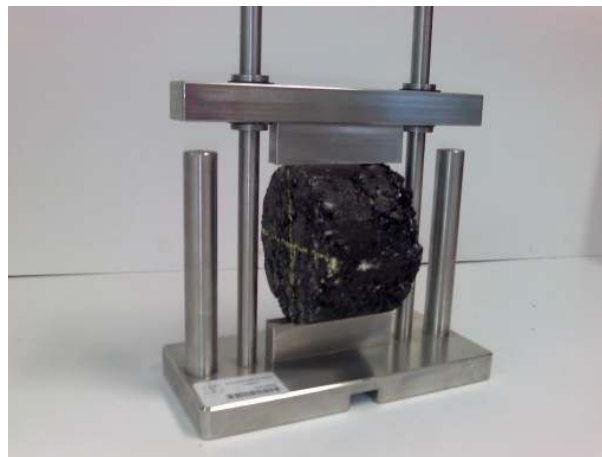


Figura 4. 13: Provete entre as tiras de carregamento.

A Figura 4.14 e a Figura 4.15 apresentam os provetes fracturados de laboratório e de obra, do grupo 1, respectivamente, após terem sido submetidos ao ensaio de tracção indirecta. Na Figura 4.16 e na Figura 4.17, pode observar-se o interior de um dos provetes de laboratório e de obra, respectivamente, onde se constatou que os agregados nos provetes e nos carotes, na sua maioria, se descolaram e apenas uma pequena percentagem se partiram.



Figura 4. 14: Fracturas resultantes nos provetes de laboratório do Grupo 1, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 15: Interior de um provete de laboratório do Grupo 1, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 16: Fracturas resultantes nos carotes do Grupo 1, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 17: Interior de um carote do Grupo 1, após o ensaio de tracção indirecta.

O Quadro 4.6 e o Quadro 4.7 apresentam os valores obtidos de resistência à tracção indirecta, pelos provetes e pelos carotes, respectivamente, do Grupo 1, assim como a sua média.

Quadro 4. 6: Resistência à tracção dos provetes, do Grupo 1.

N.º provete	Diâmetro do provete	Altura do provete	Força máxima	Resistência à tracção indirecta
	D (mm)	h (mm)	P (kN)	S_t (kPa)
1	101,6	64,0	11,5	1.121,0
8	101,6	63,0	12,6	1.255,3
10	101,6	64,0	12,4	1.215,9
Média, Grupo 1 (sem condicionamento)				1.197,4

Quadro 4. 7: Resistência à tracção dos carotes, do Grupo 1.

N.º provete	Diâmetro do provete	Altura do provete	Força máxima	Resistência à tracção indirecta
	D (mm)	h (mm)	P (kN)	S_t (kPa)
7	101,6	57,0	11,4	1.249,8
11	101,6	60,0	10,4	1.086,1
14	101,6	52,0	10,1	1.219,1
Média, Grupo 1 (sem condicionamento)				1.185,0

♦ **Provetes condicionados apenas com saturação (Grupo 2)**

Este segundo grupo formou-se apenas por provetes saturados. Os provetes colocaram-se num excicador com água potável, à temperatura ambiente. Estes saturaram-se aplicando-se uma pressão de vácuo de 67kPa (670 mbar), durante, aproximadamente, 15 minutos, tal como se apresenta na Figura 4.18. Removeu-se o vácuo e deixou-se o provete imerso na água durante, aproximadamente, 15 minutos. De seguida, determinou-se o grau de saturação (S') de cada provete.

Para se determinar o grau de saturação (S') calculou-se, inicialmente, o volume de vazios (V_a) e o volume de água absorvida (J').



Figura 4. 18: Saturação em vácuo.

O volume de vazios calculou-se aplicando-se a seguinte equação:

$$V_a = \frac{P_a \times E}{100} \dots\dots\dots (eq. 4.3)$$

onde,

V_a – Volume de vazios, cm³;

P_a – Vazios, %;

E – Volume do provete, cm³.

O Quadro 4.8 e o Quadro 4.9, apresentam os valores do volume de vazios, para os provetes e para os carotes, respectivamente.

Quadro 4. 8: Volume de vazios dos provetes.

N.º provete	% de vazios	Volume	Volume de vazios
	P_a	E (cm^3)	V_a (cm^3)
2	7,12	518,87	36,97
3	6,10	494,55	30,15
4	8,39	518,87	43,55
5	8,21	510,76	41,95
6	7,43	510,76	37,95
7	6,78	518,87	35,20
9	7,08	518,87	36,75
11	7,81	518,87	40,55
12	8,51	518,87	44,15
13	5,26	510,76	26,86
14	6,10	510,76	31,17
15	7,21	518,87	37,43

Quadro 4. 9: Volume de vazios dos carotes.

N.º provete	% de vazios	Volume	Volume de vazios
	P_a	E (cm^3)	V_a (cm^3)
1	6,93	424,74	29,44
3	5,54	594,64	32,93
4	3,98	594,64	23,68
5	6,99	586,15	40,97
6	8,11	552,17	44,78
8	7,31	467,22	34,16
10	11,31	399,26	45,17
12	11,43	458,72	52,45
15	11,89	577,65	68,67
17	4,48	603,14	26,99
18	5,32	628,62	33,45
19	3,94	713,57	28,15

O volume de água absorvida calculou-se de acordo com a eq. 4.4. A diferença entre a massa do provete saturado e a massa inicial do provete sem saturação representa o volume de água absorvida.

$$J' = B' - A \quad \dots\dots\dots \quad (\text{eq. 4.4})$$

onde,

J' – Volume de água absorvida, cm³;

B' – Peso após saturação, g;

A – Peso seco, g.

Os valores de volume de água absorvida obtidos, para os provetes e para os carotes, apresentam-se, respectivamente, no Quadro 4.10 e no Quadro 4.11.

Quadro 4. 10: Volume de água absorvida dos provetes.

N.º provete	Peso após saturação B' (g)	Peso seco A (g)	Volume de água absorvida J' (g)
2	1209,1	1207,7	1,4
3	1195,7	1195,1	0,6
4	1208,5	1207,7	0,8
5	1206,8	1206,0	0,8
6	1204,1	1203,0	1,1
7	1210,1	1208,4	1,7
9	1225,2	1223,9	1,3
11	1221,1	1216,9	4,2
12	1211,1	1208,6	2,5
13	1199,4	1198,3	1,1
14	1211,3	1211,0	0,3
15	1207,9	1206,4	1,5

Quadro 4. 11: Volume de água absorvida dos carotes.

N.º provete	Peso após saturação B' (g)	Peso seco A (g)	Volume de água absorvida J' (g)
1	1017,7	995,1	22,6
3	1401,6	1398,0	3,6
4	1412,1	1398,8	13,3
5	1390,7	1384,0	6,7
6	1250,5	1232,6	17,9
8	1095,1	1086,7	8,4
10	941,2	910,7	30,5
12	1038,3	999,5	38,8
15	1326	1294,9	31,1
17	1453,3	1442,5	10,8
18	1482,1	1474,8	7,3
19	1683,6	1662,3	21,3

O grau de saturação representa a percentagem de vazios de todos os provetes cheios de água. Este calculou-se pela seguinte equação:

$$S' = \frac{100 \times J'}{V_a} \quad \dots\dots\dots \quad (\text{eq. 4.5})$$

onde,

S' – Grau de saturação, %;

J' – Volume de água absorvida, cm³;

V_a – Volume de vazios, cm³.

Após uma primeira saturação, constatou-se que o grau de saturação que se obteve não atingiu os 70%, como é referido na AASHTO T 283, assim sendo, numa primeira tentativa de aumentar o grau de saturação, aumentou-se o tempo para 30 minutos. Contudo, os resultados que se obtiveram continuaram a não ser os desejados, tendo-se por isso aumentado o tempo para 60 minutos. No entanto, após a análise dos graus de saturação, estes ainda não cumpriam a norma. Assim, numa terceira e última tentativa, aumentou-se a pressão para 900 mbar e manteve-se o tempo nos 60 minutos. Aquando da análise dos graus de saturação verificou-se que os provetes não estavam a saturar mais e por isso,

decidiu-se continuar com o ensaio não cumprindo os 55 a 80% de saturação exigidos pela norma acima mencionada.

Deste modo, no Quadro 4.12 e o Quadro 4.13, apresentam-se os resultados finais obtidos de grau de saturação, para os provetes e para os carotes, respectivamente.

Quadro 4. 12: Grau de saturação dos provetes.

N.º provete	Volume de água	Volume de	Grau de
	absorvida	vazios	saturação
	J'	V _a	S'
	(g)	(cm ³)	(%)
2	1,4	36,97	3,79
3	0,6	30,15	1,99
4	0,8	43,55	1,84
5	0,8	41,95	1,91
6	1,1	37,95	2,90
7	1,7	35,20	4,83
9	1,3	36,75	3,54
11	4,2	40,55	10,36
12	2,5	44,15	5,66
13	1,1	26,86	4,09
14	0,3	31,17	0,96
15	1,5	37,43	4,01

Quadro 4. 13: Grau de saturação dos carotes.

N.º provete	Volume de água	Volume de	Grau de
	absorvida	vazios	saturação
	J'	V _a	S'
	(g)	(cm ³)	(%)
1	22,6	29,44	76,77
3	3,6	32,93	10,93
4	13,3	23,68	56,16
5	6,7	40,97	16,35
6	17,9	44,78	39,98
8	8,4	34,16	24,59
10	30,5	45,17	67,52
12	38,8	52,45	73,98
15	31,1	68,67	45,29
17	10,8	26,99	40,01
18	7,3	33,45	21,82
19	21,3	28,15	75,68

Depois do vácuo, colocaram-se os provetes num banho de água a 60° C durante 24 horas, como se demonstra na Figura 4.19. Feitas as 24 horas, colocaram-se os provetes num outro banho de água a 25° C durante 2 horas.



Figura 4. 19: Provetes no banho a 60° C.

Removeram-se os provetes do banho de água e determinou-se a força de tracção indirecta de cada provete do grupo 2 (S_2), seguindo a eq. 4.2, apresentada anteriormente.

Na Figura 4.20. e Figura 4.21 podem observar-se as fracturas originadas, após o ensaio de tracção indirecta, em cada provete de Grupo 2, do laboratório e de obra, respectivamente. Na Figura 4.22 e Figura 4.23, apresenta-se o interior de um provete e de um carote, respectivamente, sujeito apenas a saturação em vácuo. Nos provetes observou-se que os agregados se descolaram, e nos carotes, no seu interior os agregados descolaram-se, mas junto à superfície, os agregados partiram-se.



Figura 4. 20: Fracturas resultantes nos provetes do Grupo 2, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 21: Interior de um provete do Grupo 2, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 22: Fracturas resultantes nos carotes do Grupo 2, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 23: Interior de um carote do Grupo 2, após o ensaio de tracção indirecta.

No Quadro 4.14 e no Quadro 4.15 apresentam-se os valores de resistência à tracção indirecta, de cada provete de laboratório e de obra, respectivamente, apenas sujeitos a saturação e a média do grupo.

Quadro 4. 14: Resistência à tracção indirecta dos provetes do Grupo 2.

N.º provete	Diâmetro do provete D (mm)	Altura do provete h (mm)	Força máxima P (kN)	Resistência à tracção indirecta S ₂ (kPa)
4	101,6	61,0	9,6	987,4
5	101,6	63,0	9,9	986,2
12	101,6	63,0	10,6	1.054,4
Média, Grupo 2 (saturados)				1.009,3

Quadro 4. 15: Resistência à tracção indirecta dos carotes do Grupo 2.

N.º provete	Diâmetro do provete D (mm)	Altura do provete h (mm)	Força máxima P (kN)	Resistência à tracção indirecta S ₂ (kPa)
4	101,6	70,0	14,2	1.267,1
17	101,6	71,0	15,3	1.349,1
19	101,6	84,0	16,8	1.256,3
Média, Grupo 2 (saturados)				1.290,8

♦ **Provetes condicionados com saturação em vácuo e congelamento (Grupo 3)**

O terceiro grupo foi sujeito a saturação em vácuo, seguido de congelamento. O processo de vácuo que se utilizou foi o mesmo já descrito anteriormente para o grupo 2. Depois da saturação em vácuo, embrulhou-se cada provete numa película impermeável, colocou-se dentro de um saco de plástico resistente, deitaram-se no saco 10 mL de água e fechou-se o saco. De seguida colocaram-se os provetes numa câmara à temperatura de $-18 \pm 3^\circ$ C, durante 16 horas. Terminado o ciclo de gelo, removeu-se o saco de plástico e a película impermeável que revestia os provetes. De seguida determinou-se a resistência à tracção indirecta de cada provete do grupo 3 (S₃), com o intuito de simular a influência

dos dias extremamente frios e verificar a sua influência na resistência à tracção dos pavimentos (Ribeiro, 2005).

Na Figura 4.24. e Figura 4.25 apresentam-se as fracturas originadas, após o ensaio de tracção indirecta, em cada provete de Grupo 3, do laboratório e de obra, respectivamente. Na Figura 4.26 e Figura 4.27, apresenta-se o interior de um provete de e de um carote, respectivamente, sujeito a saturação em vácuo e congelamento. Tanto nos provetes, como nos carotes, constatou-se que os agregados partiram.



Figura 4. 24: Fracturas resultantes nos provetes do Grupo 3, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 25: Interior de um provete do Grupo 3, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 26: Fracturas resultantes nos carotes do Grupo 3, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 27: Interior de um carote do Grupo 3, após o ensaio de tracção indirecta.

No Quadro 4.16 e no Quadro 4.17 apresentam-se os valores de resistência à tracção indirecta, de cada provete de laboratório e de obra, respectivamente, do Grupo 3, assim como a sua média.

Quadro 4. 16: Resistência à tracção indirecta dos provetes do Grupo 3.

N.º provete	Diâmetro do provete	Altura do provete	Força máxima	Resistência à tracção indirecta
	D (mm)	h (mm)	P (kN)	S ₃ (kPa)
3	101,6	64,0	39,9	3.910,7
13	101,6	63,0	42,7	4.245,9
14	101,6	64,0	50,7	2.960,5
Média, Grupo 3 (saturados e congelados)				4.372,4

Quadro 4. 17: Resistência à tracção indirecta dos carotes do Grupo 3.

N.º provete	Diâmetro do provete	Altura do provete	Força máxima	Resistência à tracção indirecta
	D (mm)	h (mm)	P (kN)	S ₃ (kPa)
10	101,6	47,0	20,0	2.659,9
12	101,6	54,0	26,5	3.072,0
15	101,6	68,0	38,9	3.587,7
Média, Grupo 3 (saturados e congelados)				3.106,5

♦ **Provetes condicionados com saturação em vácuo e 1 ciclo de gelo/degelo (Grupo 4)**

O quarto grupo foi submetido a uma saturação em vácuo e a um ciclo de gelo/degelo. O processo de saturação em vácuo que se utilizou foi o mesmo descrito para os provetes condicionados apenas com saturação. Quanto ao processo de gelo, após se embrulharem os provetes com uma película impermeável, se colocarem num saco de plástico resistente com 10 mL de água e se fecharem os sacos, colocaram-se estes numa câmara à temperatura de -18° C, durante 18 horas. Passado o tempo de gelo, retiraram-se os provetes da câmara e, rapidamente, removeram-se os sacos de plástico e a película que os revestia, e colocaram-se num banho de água a 60° C durante 24 horas. Após as 24 horas, retiraram-se os provetes do banho de água a 60° C e colocaram-se num outro banho de água a 25° C durante 2 horas. De seguida, determinou-se a força de tracção indirecta de cada provete do grupo 4 (S₄), com o intuito de se observar a variação de resistência após variações bruscas de temperatura (Ribeiro, 2005).

Na Figura 4.28. e Figura 4.29 apresentam-se as fracturas originadas, após o ensaio de tracção indirecta, em cada provete de Grupo 4, do laboratório e de obra, respectivamente. Na Figura 4.30 e Figura 4.31, apresenta-se o interior de um provete de laboratório e um provete de obra, respectivamente, sujeito a saturação em vácuo e a um ciclo de gelo. Tanto nos provetes, como nos carotes, constatou-se que os agregados existentes no interior do provete se descolaram e os que se encontravam mais junto à superfície se partiram.



Figura 4. 28: Fracturas resultantes nos provetes do Grupo 4, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 29: Interior de um provete do Grupo 4, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 30: Fracturas resultantes nos carotes do Grupo 4, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 31: Interior de um carote do Grupo 4, após o ensaio de tracção indirecta.

No Quadro 4.18 e no Quadro 4.19 apresentam-se os valores de resistência à tracção indirecta, de cada provete de laboratório e de obra, respectivamente, depois de sujeitos a saturação e a um ciclo de gelo-degelo e a média do grupo.

Quadro 4. 18: Resistência à tracção indirecta dos provetes do Grupo 4.

N.º proвете	Diâmetro do proвете	Alturado proвете	Força máxima	Resistência à tracção indirecta
	D (mm)	h (mm)	P (kN)	S ₄ (kPa)
6	101,6	63,0	13,6	1.349,7
11	101,6	64,0	13,2	1.293,0
15	101,6	64,0	14,6	1.433,4
Média, Grupo 4 (saturados e 1 ciclo gelo/degelo)				1.358,7

Quadro 4. 19: Resistência à tracção indirecta dos carotes do Grupo 4.

N.º provete	Diâmetro do provete D (mm)	Altura do provete h (mm)	Força máxima P (kN)	Resistência à tracção indirecta S ₄ (kPa)
3	101,6	70,0	18,8	1.684,7
5	101,6	69,0	19,3	1.753,1
18	101,6	74,0	18,6	1.573,6
Média, Grupo 4 (saturados e 1 ciclo gelo/degelo)				1.670,3

♦ **Provetes condicionados com saturação em vácuo e 4 ciclos de gelo/degelo (Grupo 5)**

O procedimento para este grupo de provetes é exactamente igual ao anterior, com a única diferença que neste se efectuaram 4 ciclos de gelo/degelo.

Na Figura 4.32. e Figura 4.34 apresentam-se as fracturas originadas, após o ensaio de tracção indirecta, em cada provete de Grupo 5, do laboratório e de obra, respectivamente. Na Figura 4.33 e Figura 4.35, apresenta-se o interior de um provete de laboratório e um provete de obra, respectivamente, sujeito a saturação em vácuo e a quatro ciclos de gelo. Tanto nos provetes, como nos carotes, constatou-se que os agregados existentes no interior do provete se descolaram e os que se encontravam mais junto à superfície se partiram.



Figura 4. 32: Fracturas resultantes nos provetes do Grupo 5, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 33: Interior de um provete do Grupo 5, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 34: Fracturas resultantes nos carotes do Grupo 5, após o ensaio de tracção indirecta.



Figura 4. 35: Interior de um carote do Grupo 5, após o ensaio de tracção indirecta.

No Quadro 4.20 e no Quadro 4.21 apresentam-se os valores de resistência à tracção indirecta, de cada provete de laboratório e de obra, respectivamente, depois de sujeitos a saturação e a quatro ciclos de gelo-degelo, assim como a média do grupo.

Quadro 4. 20: Resistência à tracção indirecta dos provetes do Grupo 5.

N.º provete	Díâmetro do provete	Altura do provete	Força máxima	Resistência à tracção indirecta
	D (mm)	h (mm)	P (kN)	S ₅ (kPa)
2	101,6	64,0	13,9	1.364,2
7	101,6	64,0	12,9	1.265,3
9	101,6	64,0	14,3	1.403,7
Média, Grupo 5 (saturados e 4 ciclos gelo/degelo)				1.344,4

Quadro 4. 21: Resistência à tracção indirecta dos carotes do Grupo 5.

N.º provete	Díâmetro do provete	Altura do provete	Força máxima	Resistência à tracção indirecta
	D (mm)	h (mm)	P (kN)	S ₅ (kPa)
1	101,6	50,0	5,6	703,5
6	101,6	65,0	10,9	1.049,3
8	101,6	55,0	11,8	1.339,0
Média, Grupo 5 (saturados e 4 ciclos gelo/degelo)				1.030,6

Após se ter determinado a força de tracção indirecta de cada grupo de provetes (S_t), determinou-se a razão da força de tracção indirecta, TSR_t (Tensile Strength Ratio) para cada grupo. Esta determinou-se usando a média da força de tracção de cada grupo, de acordo com a seguinte equação:

$$TSR_t = \frac{S_t}{S_1} \dots\dots\dots (eq. 4.7)$$

onde,

TSR_t – Resistência conservada à tracção indirecta do grupo t, %;

S_1 – Média da resistência à tracção indirecta dos provetes sem condicionamento (grupo1);

S_t – Média da resistência à tracção indirecta dos provetes com condicionamento (grupot).

Os resultados de TSR obtidos para cada grupo de provetes de laboratório e carotes de obra apresentam-se no Quadro 4.22 e no Quadro 4.23, respectivamente.

Quadro 4. 22: Resultados da razão da resistência à tracção indirecta de cada grupo de provetes.

Resistência conservada à tracção indirecta (%)			
TSR ₂	TSR ₃	TSR ₄	TSR ₅
84	365	113	112

Quadro 4. 23: Resultados da razão da resistência à tracção indirecta de cada grupo de carotes.

Resistência conservada à tracção indirecta (%)			
TSR ₂	TSR ₃	TSR ₄	TSR ₅
109	262	141	87

Na Figura 4.36 pode ver-se um esquema do procedimento do ensaio de gelo-degelo e a calendarização deste ensaio pode ver-se no Quadro 4.24.

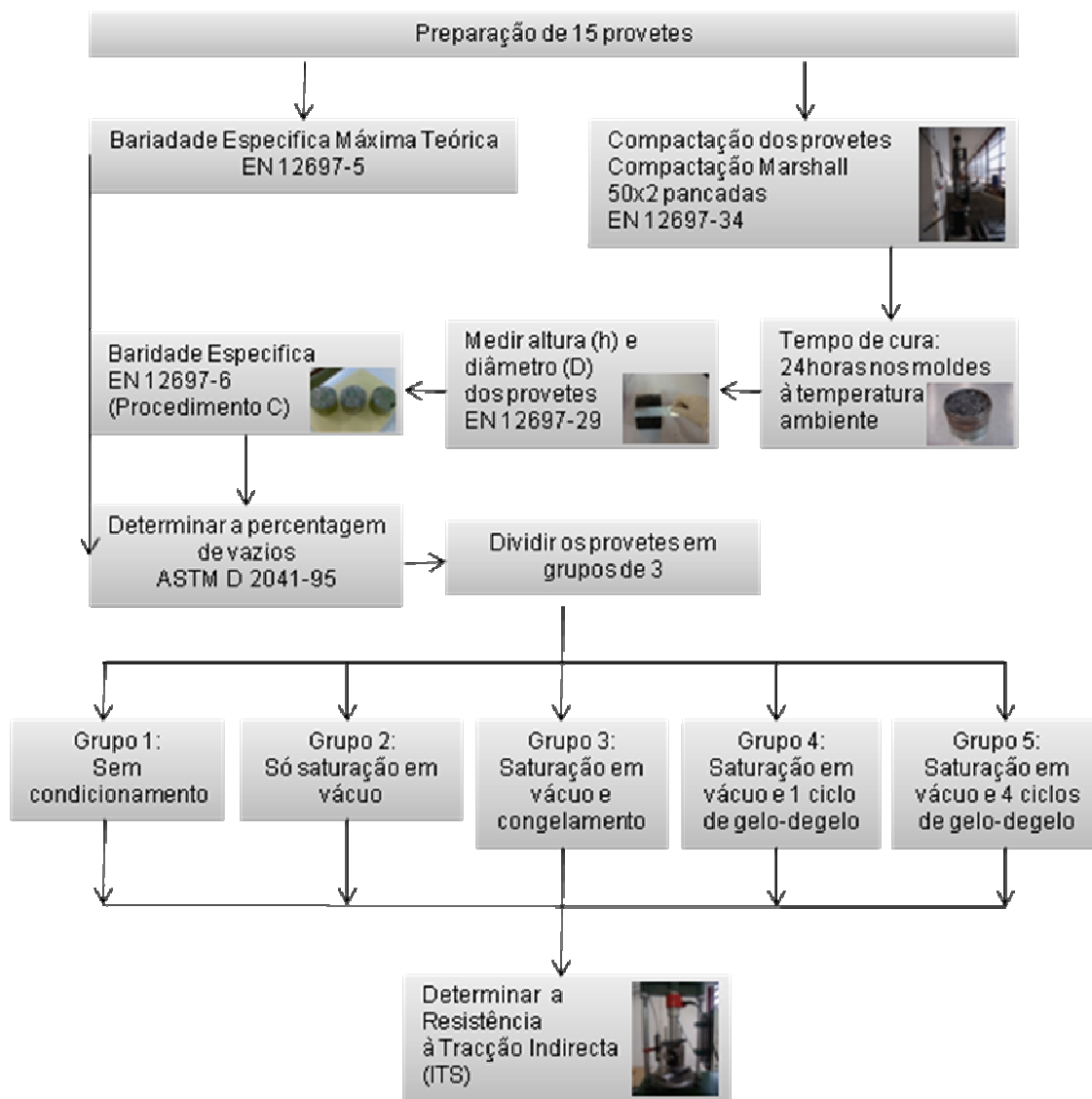


Figura 4. 36: Esquema do procedimento para execução do ensaio de gelo-degelo.

4.5.1.1. Análise dos resultados e conclusões

▪ Laboratório

O Gráfico 4.1, o Gráfico 4.2, o Gráfico 4.3, o Gráfico 4.4 e o Gráfico 4.5 apresentam, respectivamente, a força e o deslocamento atingidos pelos provetes do Grupo 1 – sem condicionamento, do Grupo 2 – só saturados, do Grupo 3 – saturados e congelados, do Grupo 4 – saturados e com um ciclo de gelo-degelo e do Grupo 5 – saturados e com quatro ciclos de gelo-degelo. Dos grupos que sofreram condicionamentos, o que apresenta valores mais elevados de carga é o Grupo 3, mas tal justifica-se com o facto que, aquando do ensaio, estes ainda estavam congelados. Quanto ao Grupo 2, comparativamente com o grupo 1, este perde resistência, apresentando valores de carga mais baixos.

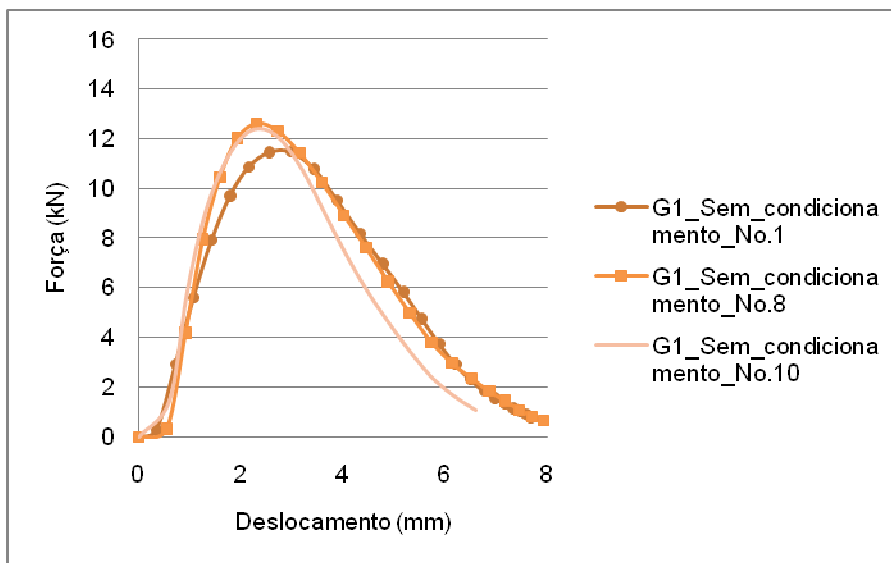


Gráfico 4. 1: Força Vs. Deslocamento do Grupo 1 (sem condicionamento) do laboratório.

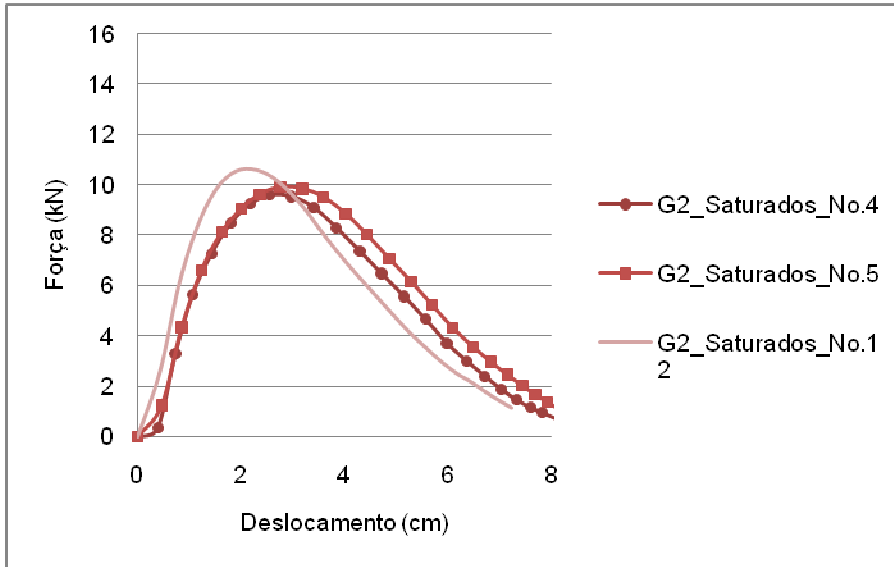


Gráfico 4. 2: Força Vs. Deslocamento do Grupo 2 (só saturados) do laboratório.

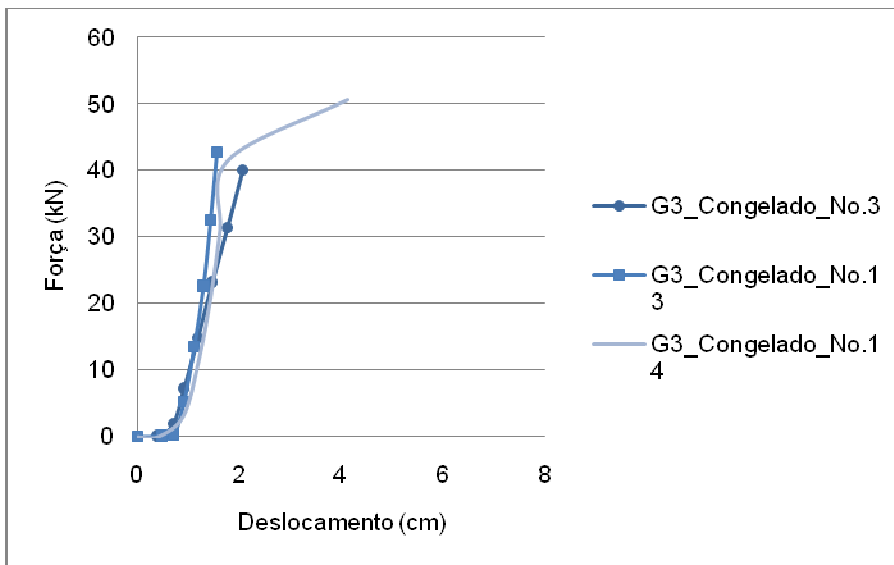


Gráfico 4. 3: Força Vs. Deslocamento do Grupo 3 (congelados) do laboratório.

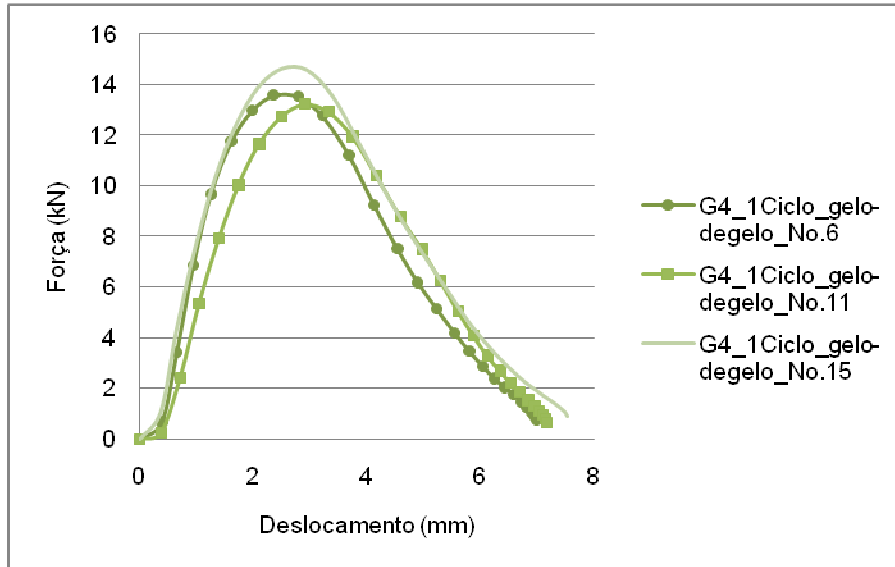


Gráfico 4. 4: Força Vs. Deslocamento do Grupo 4 (1 ciclo de gelo-degelo) do laboratório.

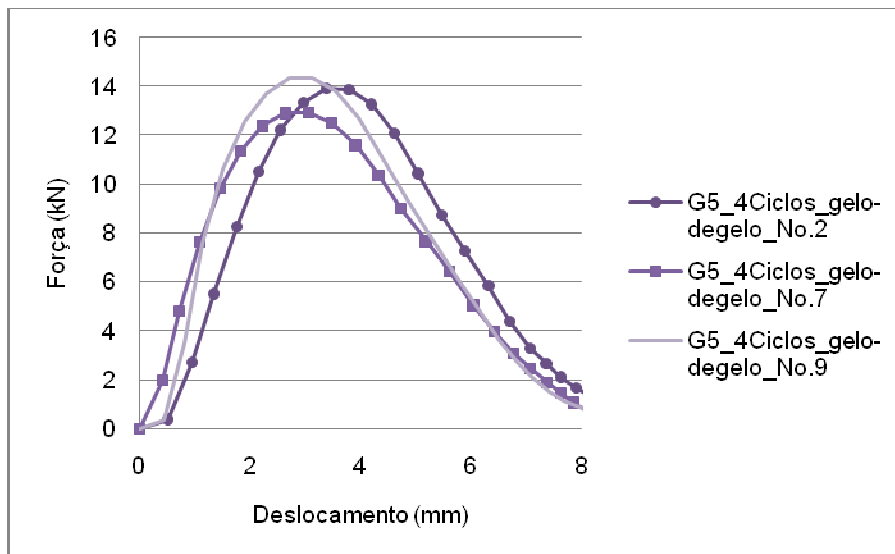


Gráfico 4. 5: Força Vs. Deslocamento do Grupo 5 (4 ciclos de gelo-degelo) do laboratório.

O Gráfico 4.6 apresenta os valores médios de carga e de deslocamento do Grupo 1 e do Grupo 4. Da análise do gráfico, relativamente aos valores de força, não é possível chegar a uma conclusão, pois o Grupo 4 apresenta um valor mais elevado que o Grupo 1. Assim sendo, o Gráfico 4.7 resulta da normalização dos valores da força e do deslocamento, isto é, dividiram-se os valores médios de carga e de deslocamento de cada grupo pelos valores médios máximos de carga e deslocamento, do respectivo grupo. Da sua análise pode concluir-se que no Grupo 4 o valor do deslocamento para a carga máxima

aumentou em relação ao Grupo 1, passando de cerca de 30% para 40%. A normalização dos valores médios de carga e deslocamento permite ainda observar a alteração da configuração da curva de ensaio Força-Deslocamento, evidenciando que no grupo 4 os corpos de prova deformam-se mais para os mesmos valores de carga que no Grupo 1, provavelmente devido à existência de deterioração no interior do provete, causados pelo ciclo de gelo-degelo.

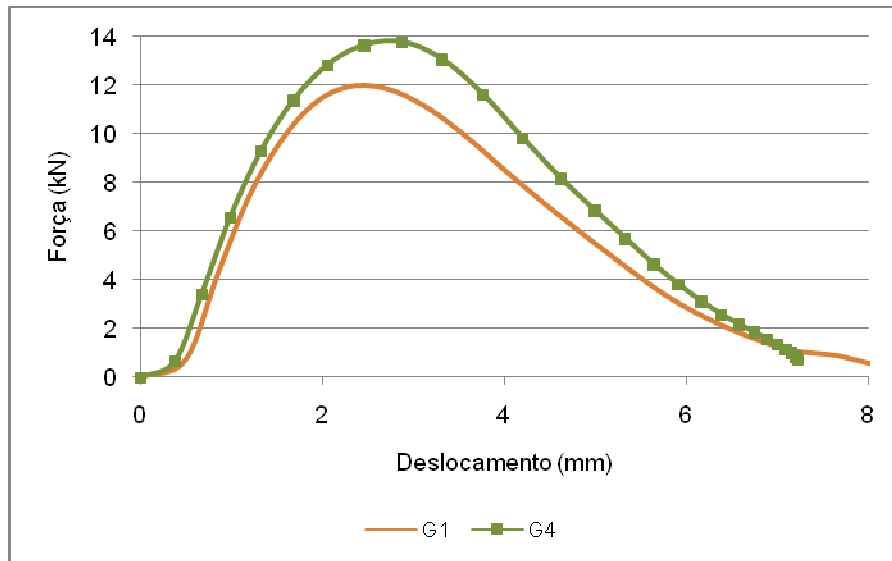


Gráfico 4. 6: Média da força e do deslocamento do Grupo 1 (sem condicionamento) e do Grupo 4 (1 ciclo de gelo-degelo) do laboratório.

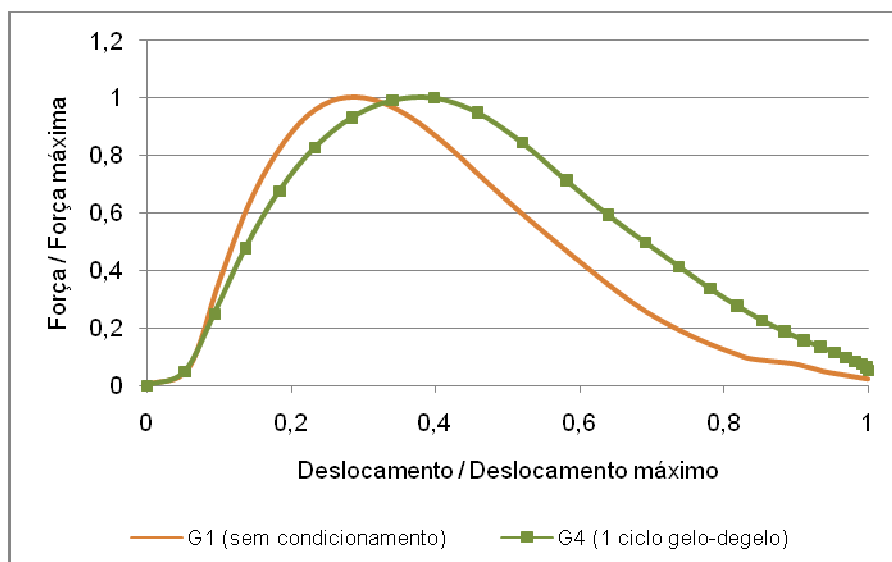


Gráfico 4. 7: Normalização da média da força e do deslocamento do Grupo 1 (sem condicionamento) e do Grupo 4 (1 ciclo de gelo-degelo) do laboratório.

Relativamente ao Grupo 1 e ao Grupo 5, a média da força e do deslocamento é apresentada no Gráfico 4.8. Visto que a media da força do Grupo 5 é superior à do Grupo 1, normalizou-se a força e o deslocamento para uma nova análise. Assim, com base no Gráfico 4.9, pode concluir-se que o Grupo 5 aumentou o seu deslocamento, praticamente para o dobro do deslocamento do Grupo 1. Conclui-se então que os 4 ciclos de gelo-degelo a que o Grupo 5 foi submetido danificaram consideravelmente os provetes.

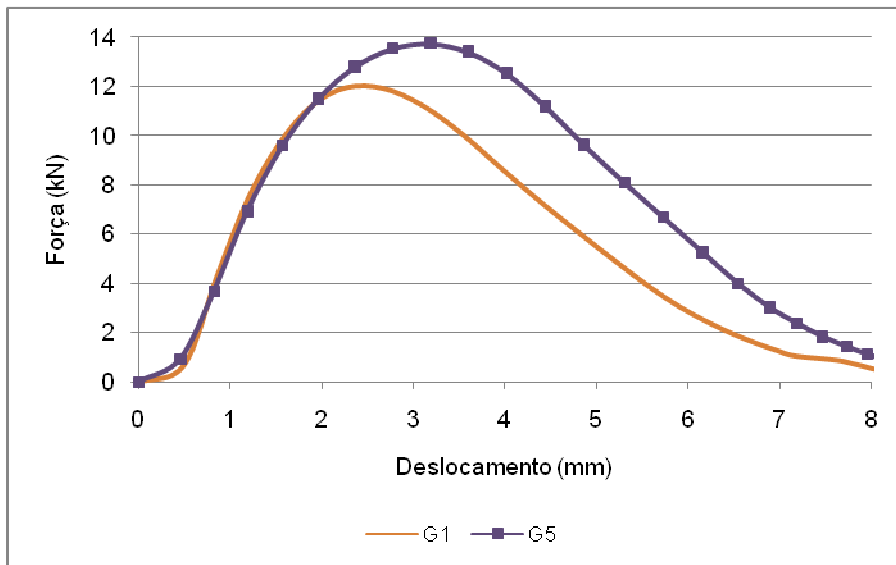


Gráfico 4. 8: Média da força e do deslocamento do Grupo 1 (sem condicionamento) e do Grupo 5 (4 ciclos de gelo-degelo) do laboratório.

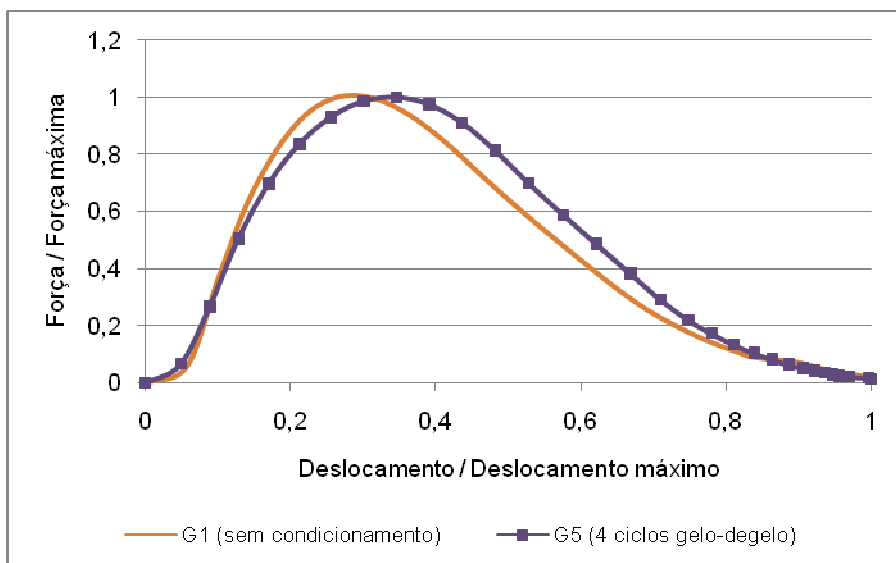


Gráfico 4. 9: Normalização da média da força e do deslocamento do Grupo 1 (sem condicionamento) e do Grupo 5 (4 ciclos de gelo-degelo) do laboratório.

No Gráfico 4.10 apresentam-se os valores de resistência conservada em tracção indirecta ds grupos condicionados.

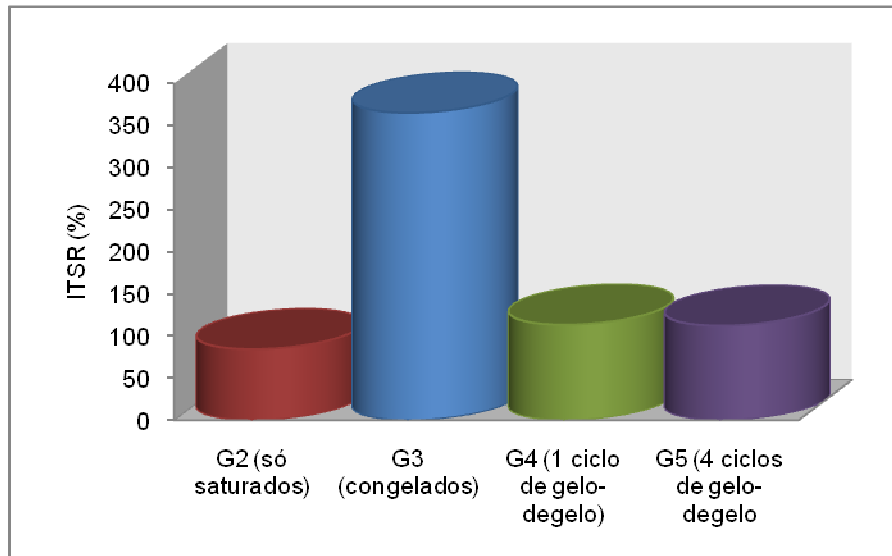


Gráfico 4. 10: Resistência conservada dos grupos de provetes condicionados.

Do gráfico 4.11 e segundo Bueche & Vanelstraete (2006) e Claude et al. (2008), conclui-se que quanto maior for a percentagem de vazios do provete, menor será o seu valor de tracção indirecta, pois deste modo, a mistura está exposta à acção da água.

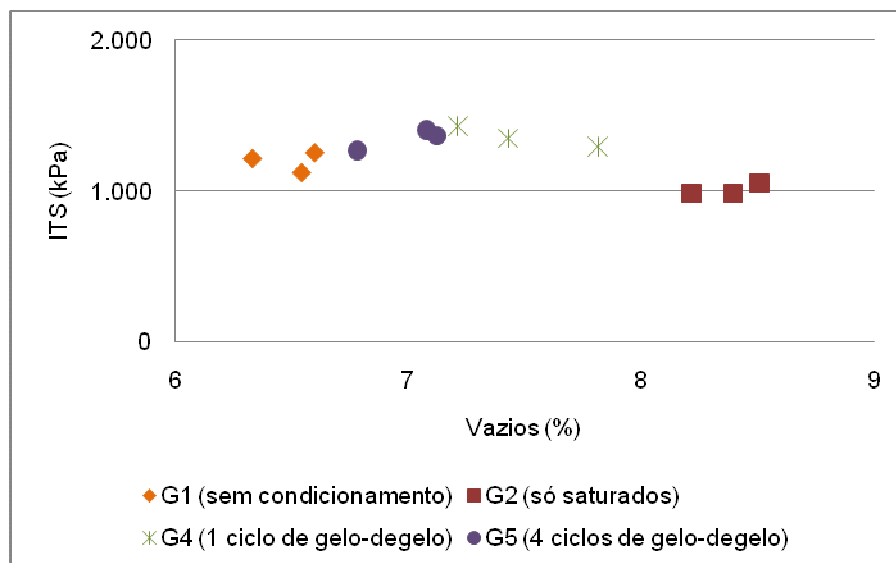


Gráfico 4. 11: Tracção indirecta Vs. Percentagem de vazios para os provetes submetidos ao ensaio de gelo-degelo.

▪ **Obra**

A força e o deslocamento dos carotes do Grupo 1 – sem condicionamento, do Grupo 2 – só saturados, do Grupo 3 – saturados e congelados, do Grupo 4 – saturados e com um ciclo de gelo-degelo e do Grupo 5 – saturados e com quatro ciclos de gelo-degelo, apresentam-se respectivamente, no Gráfico 4.12, Gráfico 4.13, Gráfico 4.14, Gráfico 4.15 e Gráfico 4.16. O Grupo 3 é o que apresenta valores mais elevados de carga. Quanto ao Grupo 2, este apresenta valores de força superiores ao do Grupo 1, possivelmente devido à diferença de percentagem de vazios que existe entre eles. O Grupo 1 apresenta 10% de vazios e o Grupo 2, apresenta 4% de vazios, isto é, o Grupo 2 é menos poroso que o Grupo 1, ou seja está mais compactado, o que dificulta a entrada da água no interior do carote.

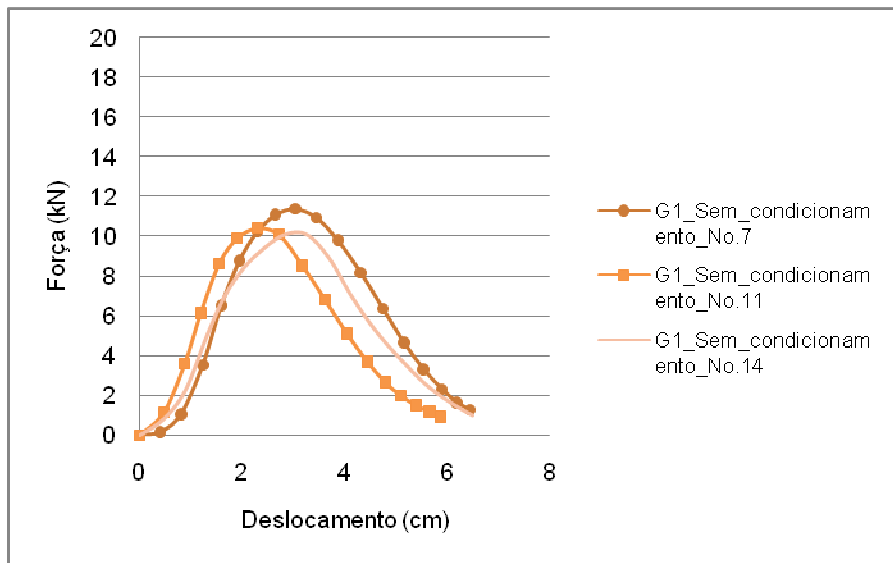


Gráfico 4. 12: Força Vs. Deslocamento do Grupo 1 (sem condicionamento) da obra.

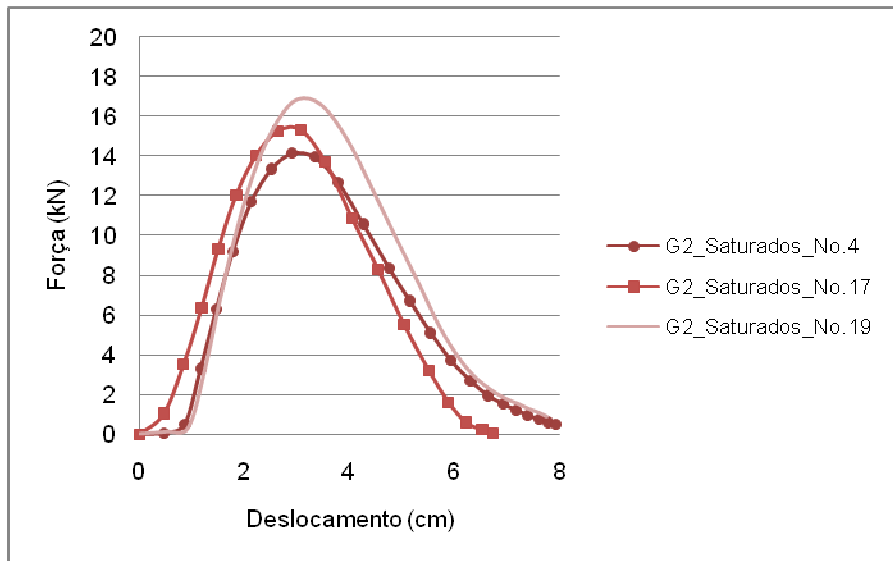


Gráfico 4.13: Força Vs. Deslocamento do Grupo 2 da obra.

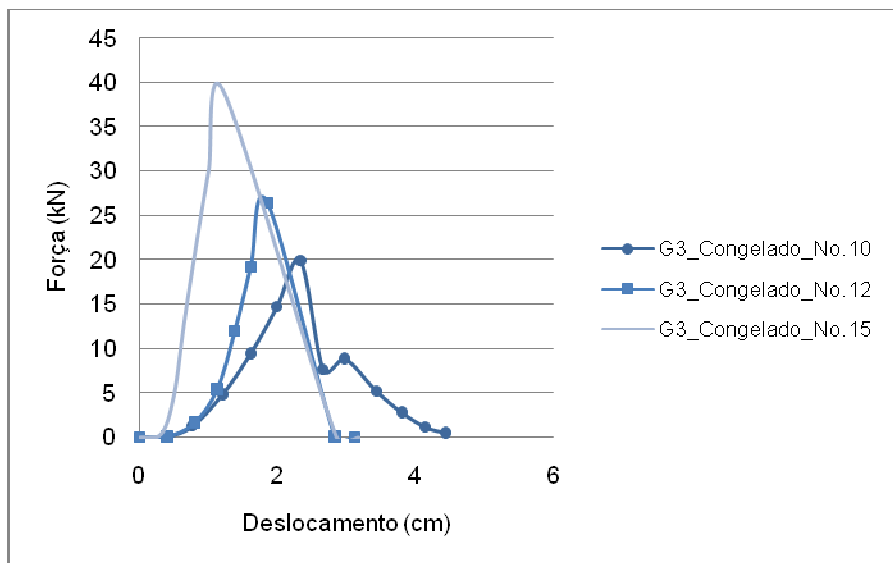


Gráfico 4.14: Força Vs. Deslocamento do Grupo 3 da obra.

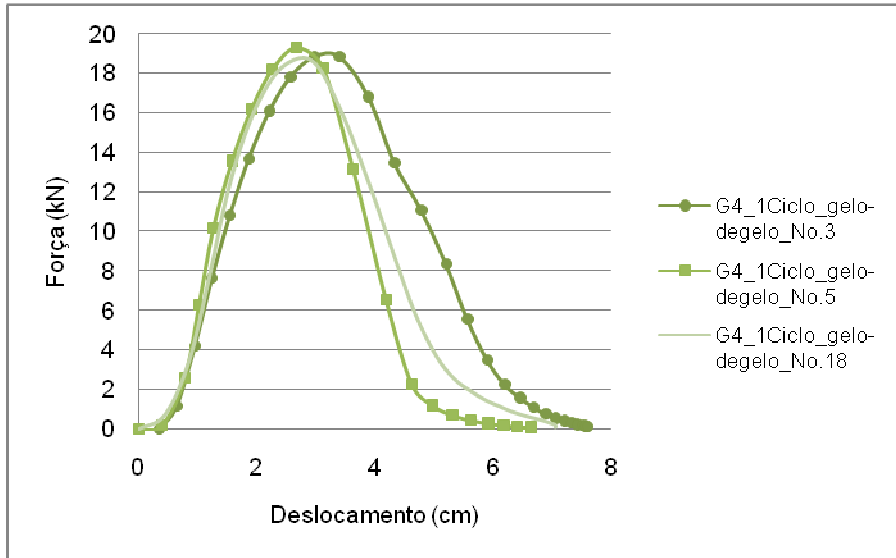


Gráfico 4. 15: Força Vs. Deslocamento do Grupo 4 da obra.

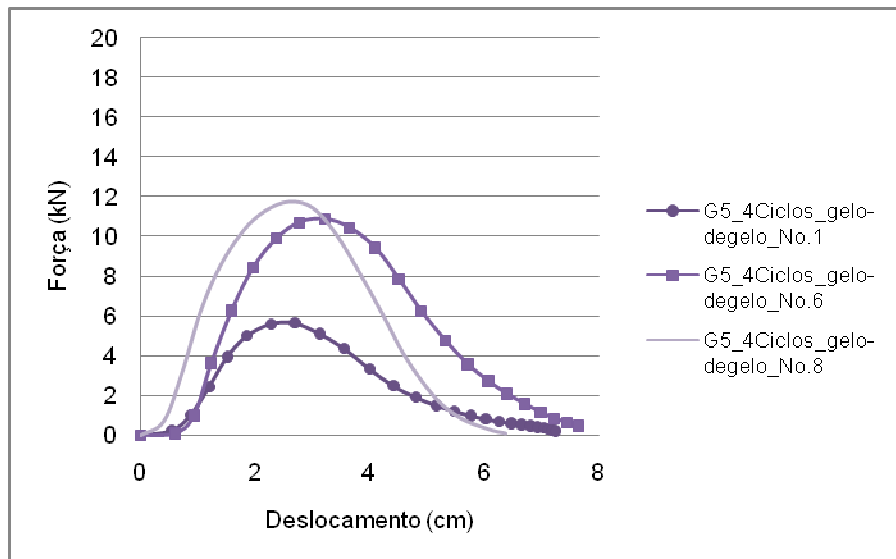


Gráfico 4. 16: Força Vs. Deslocamento do Grupo 5 da obra.

O Gráfico 4.17 apresenta os valores médios de carga e de deslocamento do Grupo 1 e do Grupo 4. Da análise do gráfico, relativamente aos valores de força, não é possível chegar a uma conclusão, pois o Grupo 4 apresenta um valor mais elevado que o Grupo 1. Como explicado anteriormente, tal pode dever-se à diferença significativa de percentagem de vazios, ou seja, o Grupo 1 tem 10% de vazios e o Grupo 4 tem 6% de vazios, daí que não se proceda a uma normalização dos resultados.

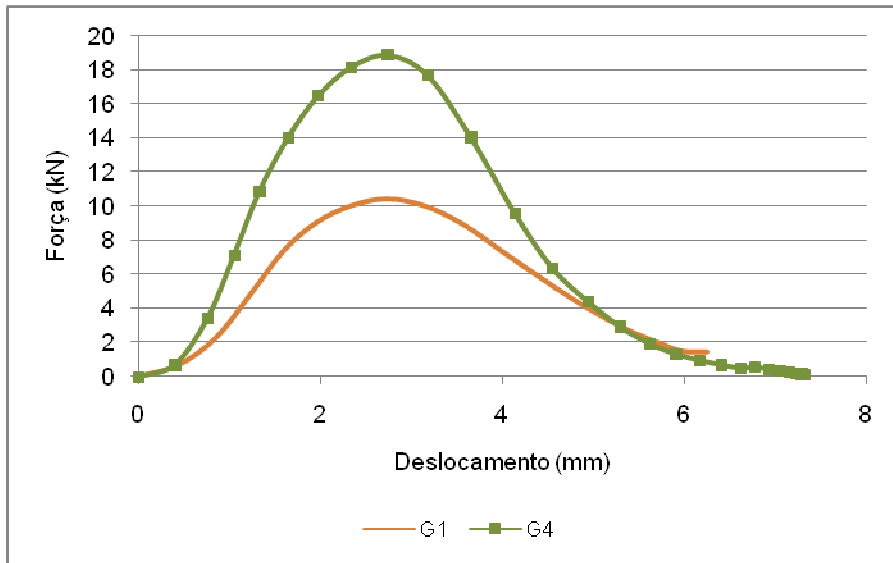


Gráfico 4. 17: Média da força e do deslocamento do Grupo 1 (sem condicionamento) e do Grupo 4 (1 ciclo de gelo-degelo) da obra.

No Gráfico 4.18 apresentam-se os valores médios de carga e de deslocamento do Grupo 1 e do Grupo 5. Da análise do gráfico, relativamente aos valores de força, pode concluir-se que o Grupo 1 apresenta resistência superior ao Grupo 5, isto é, os carotes do Grupo 5 ficaram danificados após os 4 ciclos de gelo-degelo.

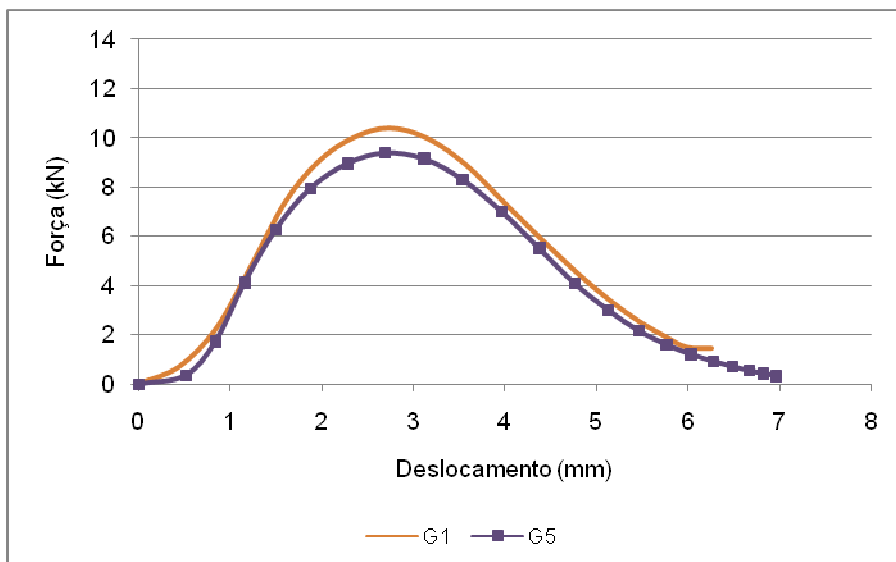


Gráfico 4. 18: Média da força e do deslocamento do Grupo 1 (sem condicionamento) e do Grupo 5 (4 ciclos de gelo-degelo) da obra.

No Gráfico 4.19 apresentam-se os valores de resistência conservada em tracção indirecta dos grupos condicionados.

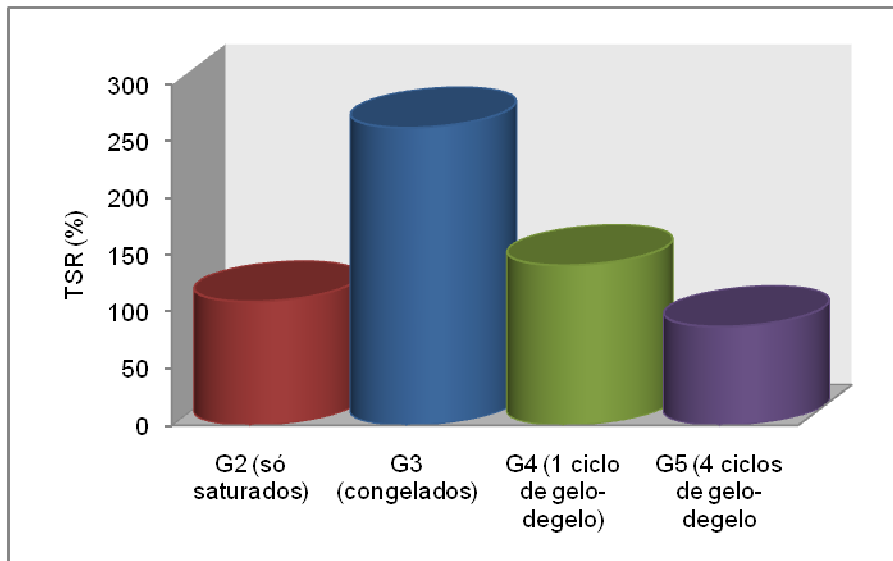


Gráfico 4. 19: Resistência conservada dos grupos de carotes condicionados.

Relativamente à tracção indirecta dos carotes e á sua percentagem de vazios, apresentados no Gráfico 4.20, pode concluir-se o já referido anteriormente, que a tracção indirecta diminui, com o aumento dos vazios (Bueche & Vanelstraete, 2006 e Claude et al., 2008).

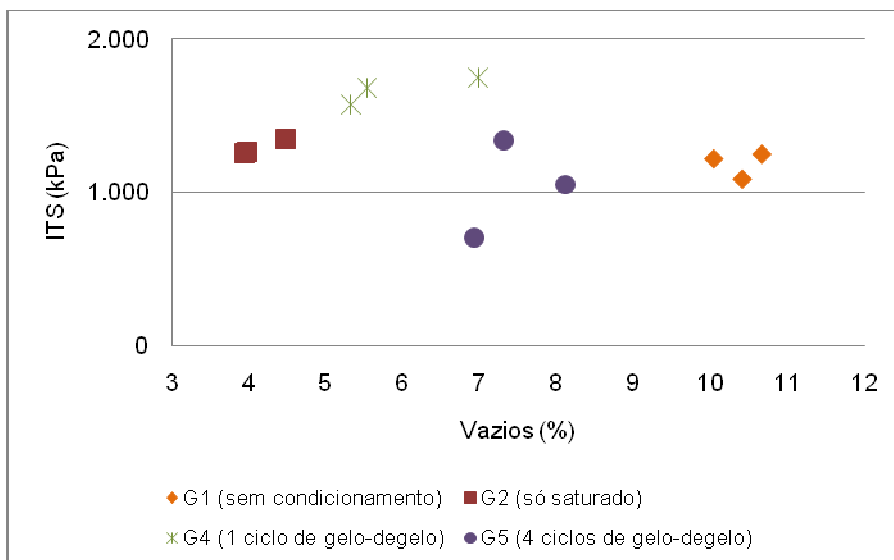


Gráfico 4. 20: Tracção indirecta Vs. Percentagem de vazios para os carotes submetidos ao ensaio de gelo-degelo.

4.5.2 ENSAIO DE SENSIBILIDADE À ÁGUA DE PROVETES BETUMINOSOS

A sensibilidade à água avalia-se com recurso a ensaios de resistência mecânica realizados sobre dois grupos de provetes acondicionados em condições distintas. Ou seja, a avaliação da sensibilidade à água obtém-se medindo a resistência à tracção indirecta (ITS), de acordo com a norma europeia EN 12697-23, em provetes sem condicionamento e provetes condicionados em água (72h a 40° C), de acordo com a EN 12697-12. O quociente entre a resistência à tracção indirecta média dos provetes condicionados (ITS_w) e a resistência à tracção indirecta média dos provetes sem condicionamento (ITS_d), fornece uma resistência conservada em tracção indirecta (ITSR), que se utiliza como indicador da sensibilidade à água. A temperatura de ensaio usado para todos os provetes foi de 25° C (Claude et al., 2008; Batista, Antunes & Fonseca, 2008; Bueche & Vanelstraete, 2006; Árnadóttir, 2008).

▪ Procedimento

Segundo a norma EN 12697-12, dividiram-se os 6 provetes em 2 grupos de 3 com, aproximadamente, a mesma densidade relativa média.

O grupo “seco” colocou-se numa estufa à temperatura de 25 °C, durante 74h. De seguida, determinou-se a resistência à tracção indirecta de cada provete deste grupo (ITS_d).

O outro grupo, o grupo “molhado”, saturou-se em vácuo com uma pressão de 670 mbar, durante 30 minutos e, de seguida, colocou-se num banho de água a 40° C durante 72 horas. Passado este tempo, colocaram-se os provetes deste grupo, durante 2 horas, num banho de água a 25° C. Após as 2 horas limpou-se a superfície de cada provete com uma toalha e determinou-se a resistência à tracção indirecta (ITS_w).

Para se determinar a força de tracção indirecta, colocou-se o provete entre duas tiras de carregamento, e este foi sujeito a uma carga de compressão, a qual origina uma tensão à tracção, ao longo do plano do diâmetro vertical, causando a fissuração do provete, como se demonstra na Figura 4.37. A carga diametral aplicou-se continuamente (50 mm/min) até que o pico de carga se tenha atingido, e continuou-se o carregamento até o provete entrar em rotura (Poulokakos et al., 2006 e Voskuilen, 2004).

A resistência à tracção indirecta é a máxima tensão à tracção calculada pelo pico de carga máxima aplicada pelas dimensões do provete, e é calculado pela eq. 4.8, (Sunarjono, 2007).

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \dots\dots\dots (eq. 4.8)$$

onde,

ITS – Resistência à tracção indirecta, kPa;

P – Força máxima, kN;

h – Altura do provete, sem condicionamento, mm;

D – Diâmetro do provete, mm.

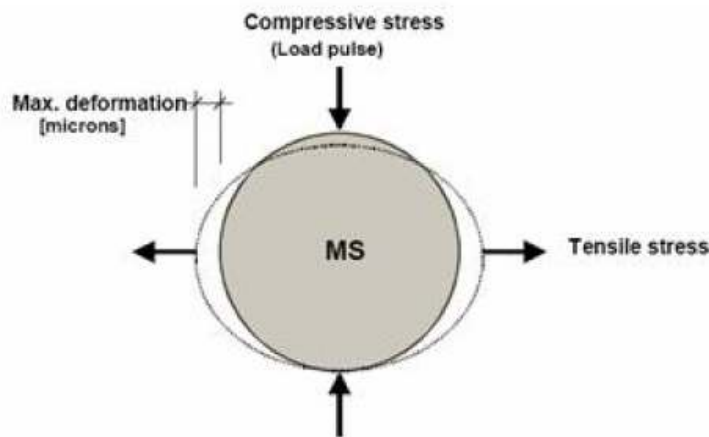


Figura 4. 37: Representação esquemática de um ensaio à tracção indirecta
Fonte: Nicholls (2006, p. 132)

Após se ter determinado a força de tracção indirecta média de cada grupo de provetes, determinou-se a razão da força de tensão indirecta, ITSR, de acordo com a seguinte equação:

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \dots\dots\dots (eq. 4.8)$$

onde,

ITSR – resistência conservada em tracção indirecta, %;

ITS_w – Média da resistência à tracção indirecta do grupo “molhado”, kPa;

ITS_d – Média da resistência à tracção indirecta do grupo “seco”, kPa.

Observou-se e registou-se o tipo de fractura e abriu-se o provete ensaiado e, visualmente, inspeccionou-se a aparência das superfícies de modo a evidenciarem-se agregados rachados ou quebrados. O tipo de fractura registou-se com base nos esquemas apresentados na Figura 4.38. De seguida, abriu-se o provete ensaiado e, visualmente, inspeccionou-se a aparência das superfícies de modo a evidenciarem-se agregados rachados ou quebrados.

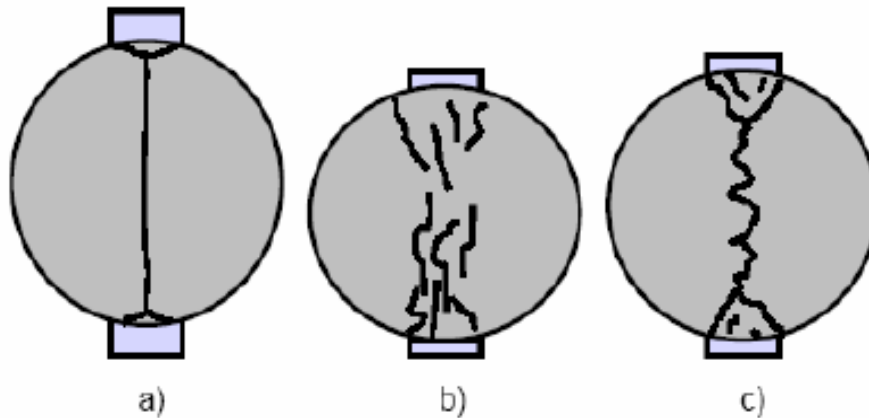


Figura 4. 38: Tipo de fractura nos provetes após ensaio para determinação da tracção indirecta
 Fonte: Sunarjono (2007, p. 3)

- a) “Tensão de rotura desobstruída” – provete claramente fissurado ao longo de uma linha diametral, talvez excepto para pequenas secções triangulares junto das tiras de carregamento;
- b) “Deformação” – provete sem uma clara visível linha de tensão de rotura;
- c) “Combinação” – provete com uma limitada linha de tensão de rotura e áreas deformadas perto das tiras de carregamento.

No Quadro 4.25 e no Quadro 4.27 apresentam-se os resultados da resistência à tracção indirecta (ITS), dos provetes de laboratório e dos carotes de obra, respectivamente. Os resultados obtidos de resistência conservada em tracção indirecta dos provetes de laboratório e dos carotes de obra, apresentam-se no Quadro 4.26 e Quadro 4.28, respectivamente.

Na Figura 4.39 e na Figura 4.41 apresenta-se o grupo de provetes de laboratório “seco” e “molhado” após o ensaio de tracção indirecta, respectivamente. No grupo “seco” as fissuras dos provetes foram classificadas com o tipo c) e no grupo “molhado” a fissura do provete 2 foi classificada com o tipo b) e a fissura dos provetes 3 e 5 com o tipo c).

Pode observar-se na Figura 4.40 e na Figura 4.42 o interior de um provete de laboratório do grupo “seco” e do grupo “molhado”, respectivamente. Relativamente ao grupo “seco”, observou-se que houve fractura dos agregados e descolagem, quanto ao grupo “molhado”, observou-se que apenas existiu descolagem dos agregados.



Figura 4. 39: Fissuras de cada provete de laboratório do grupo “seco”.



Figura 4. 40: Interior de um provete de laboratório do grupo “seco”, após ensaio à tracção indirecta.



Figura 4. 41: Fissuras de cada provete de laboratório do grupo “molhado”.



Figura 4. 42: Interior de um provete de laboratório do grupo “molhado”, após ensaio à tracção indirecta.

Quadro 4. 25: Resultados de resistência à tracção indirecta (ITS) para os provetes de laboratório.

N.º provete	Diâmetro do provete D mm	Altura do provete h mm	Carga máxima P kN	Resistência à tracção indirecta		
				ITS		
				GPa	kPa	
Grupo "seco"	1	101.6	63.0	11.995	0.001	1193,0
	4	101.6	63.0	12.197	0.001	1213,1
	6	101.6	64.0	13.247	0.001	1297,0
Grupo "molhado"	2	101.6	63.0	12.015	0.001	1195,0
	3	101.6	63.0	12.359	0.001	1229,2
	5	101.6	64.0	12.258	0.001	1200,1

Quadro 4. 26: Resistência conservada em tracção indirecta (ITSR), dos provetes de laboratório.

ITS _d kPa	ITS _w kPa	ITSR %
1234.375	1208.103	98

Na Figura 4.43 e na Figura 4.45 apresenta-se o grupo de carotes de obra “seco” e “molhado” após o ensaio de tracção indirecta, respectivamente. No grupo “seco” as fissuras dos provetes foram classificadas com o tipo c), tal como no grupo “molhado”.

Pode observar-se na Figura 4.44 e na Figura 4.46 o interior de um carote de obra do grupo “seco” e do grupo “molhado”, respectivamente. Relativamente ao grupo “seco”, observou-se que houve fractura dos agregados e descolagem, quanto ao grupo “molhado”, observou-se que existiu maioritariamente fractura dos agregados, havendo também alguns agregados descolados.



Figura 4. 43: Fissuras de cada carote de obra do grupo “seco”.



Figura 4. 44: Interior de um carote de obra do grupo “seco”, após ensaio à tracção indirecta.



Figura 4. 45: Fissuras de cada carote de obra do grupo “molhado”.



Figura 4. 46: Interior de um carote de obra do grupo “molhado”, após ensaio à tracção indirecta.

Quadro 4. 27: Resultados de resistência à tracção indirecta (ITS) para os carotes de obra.

N.º provete	Diâmetro do provete D mm	Altura do provete h mm	Carga máxima P kN	Resistência à tracção indirecta		
				ITS		
				GPa	kPa	
Grupo "seco"	24	104.0	79.0	16.4	0.001	1272,1
	31	104.0	67.0	14,0	0.001	1276,7
	32	104.0	79.0	16.0	0.001	1240,8
Grupo "molhado"	22	104.0	74.5	12.6	0.001	1033,7
	23	104.0	55.0	10.8	0.001	1200,2
	30	104.0	55.5	8.5	0.001	942,1

Quadro 4. 28: Resistência conservada em tracção indirecta (ITSR), dos carotes de obra.

ITS _d kPa	ITS _w kPa	ITSR %
1263.227	1058.673	84

A Figura 4.47 apresenta um esquema resumo do procedimento para o ensaio de sensibilidade à água e o Quadro 4.29 apresenta a calendarização efectuada para o ensaio atrás mencionado.

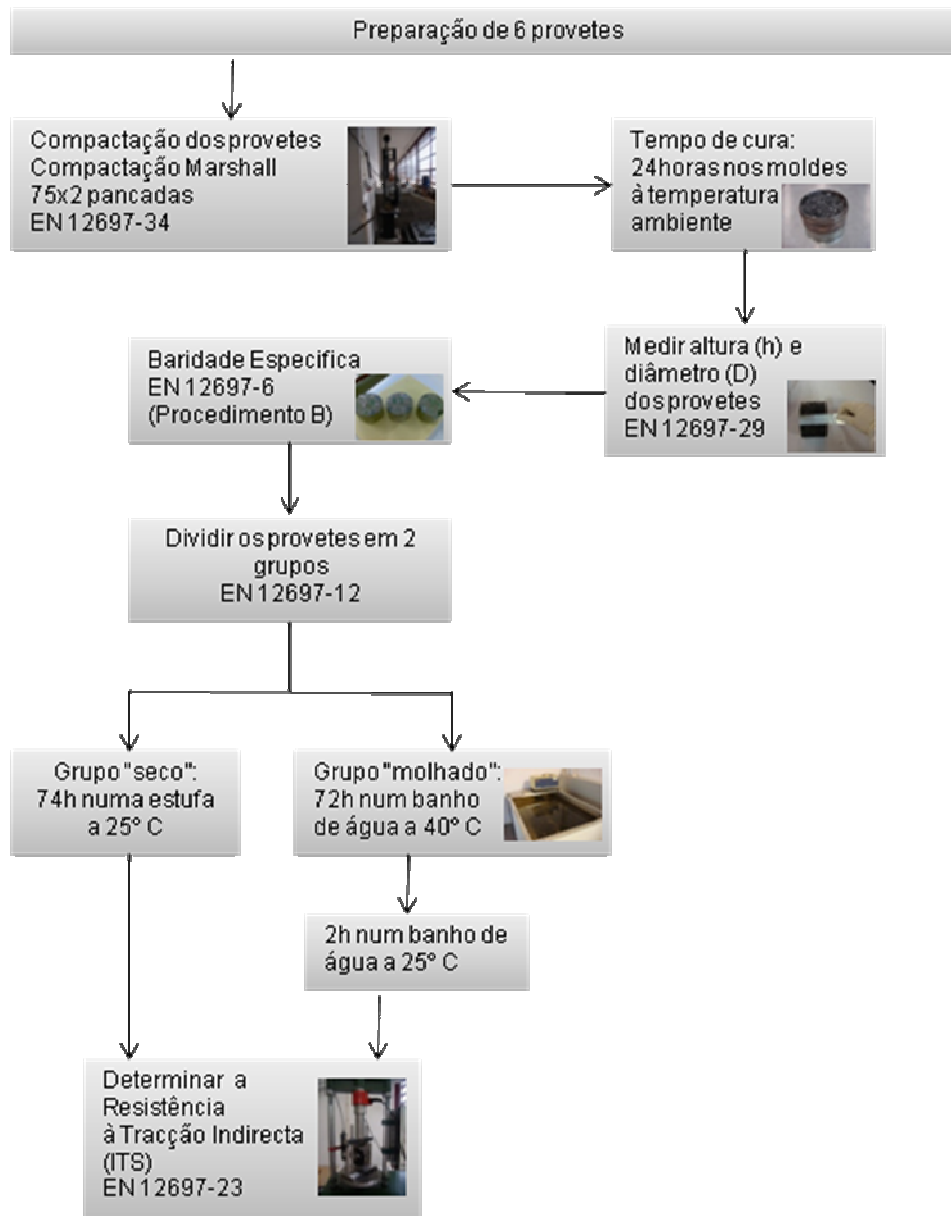


Figura 4. 47: Esquema do procedimento do ensaio de sensibilidade à água.

Quadro 4. 29: Calendarização usada para a realização do ensaio de sensibilidade à água.

Fonte: adaptado de Zaniewski e Viswanathan (2006, p. 49)

Dia	Horas	P	Gmb	Grupo "seco"		Grupo "molhado"			
				BA 25° C	ITS	Vácuo	BA 40° C	BA 25° C	ITS
5ª F	9								
	10	■							
	11								
	12								
	13								
6ª F	11		■						
	12			■		■			
	13			■			■		
	14			■			■		
SÁB	11			■			■		
	12			■			■		
	13			■			■		
	14			■			■		
DOM	11			■			■		
	12			■			■		
	13			■			■		
	14			■			■		
2ª F	11			■			■		
	12			■			■		
	13			■				■	
	14				■			■	
	16								■
	17								

NOTA: P-Provete; BA-Banho de água; Vác.-Vácuo

4.5.2.1 Análise dos resultados e conclusões

▪ Laboratório

O Gráfico 4.21 apresenta os valores de carga atingidos pelos provetes do grupo “seco” e o Gráfico 4.22 apresenta os valores atingidos pelos provetes do grupo “molhado”. Como era de prever, o grupo “molhado” perdeu resistência relativamente ao grupo “seco”, visto este ter sido submetido a um banho de 40 °C durante 3 dias.

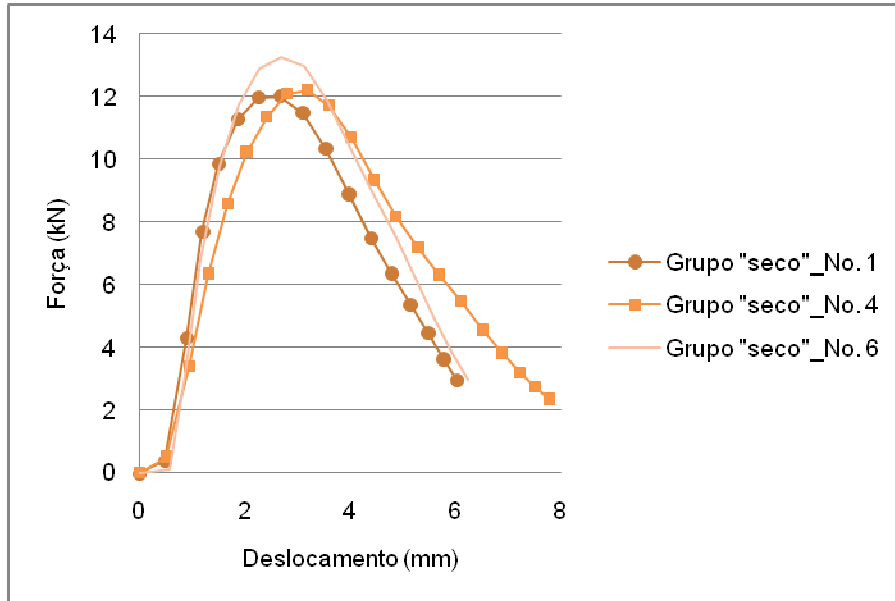


Gráfico 4. 21: Carga atingida pelos provetes do grupo "seco".

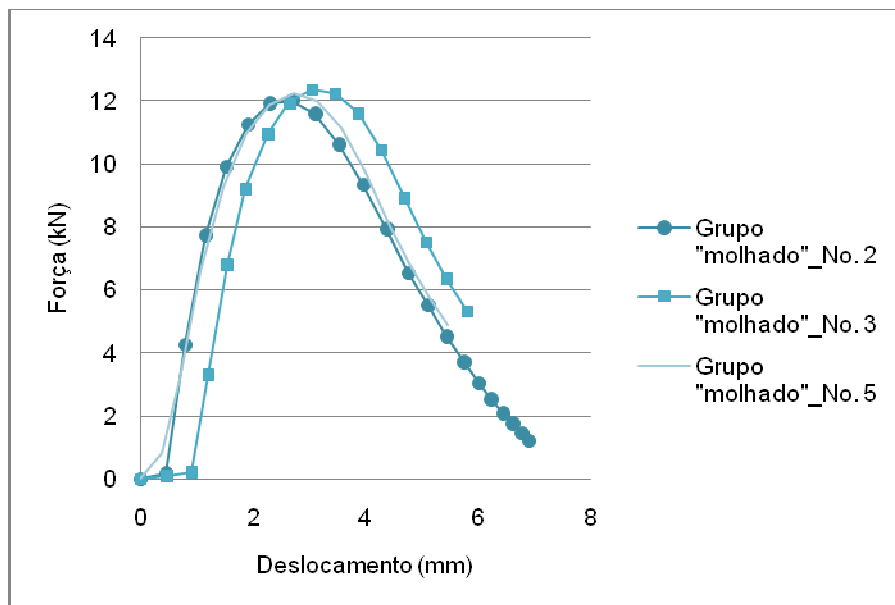


Gráfico 4. 22: Carga atingida pelos provetes do grupo "molhado".

Assim sendo, o grupo “seco” (com 1234 kPa) apresenta um valor de tracção indirecta superior ao do grupo “molhado” (com 1208 kPa), tal como se pode verificar no Gráfico 4.23.

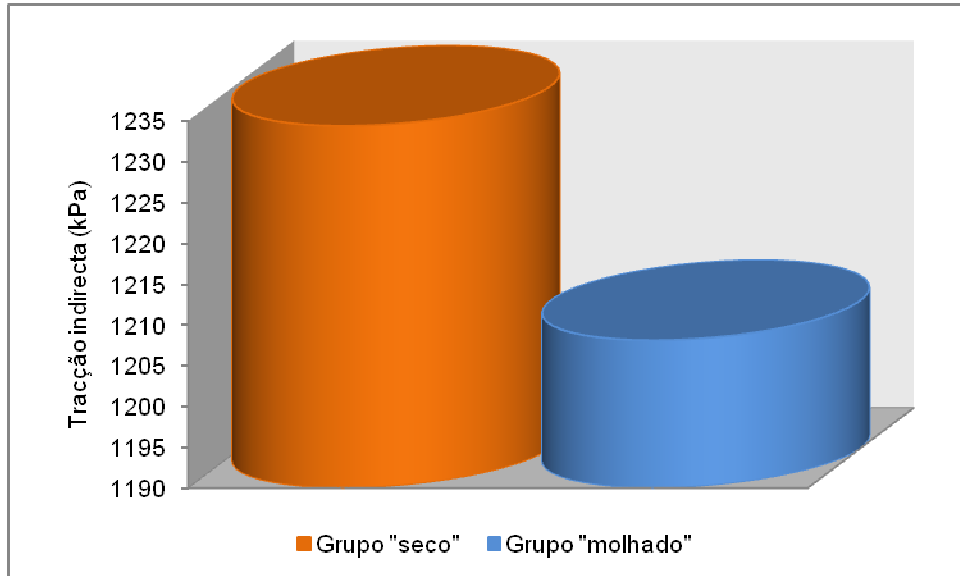


Gráfico 4. 23: Resultados de tracção indirecta do ensaio de sensibilidade à água com provetes.

▪ **Obra**

O Gráfico 4.24 apresenta os valores de carga atingidos pelos carotes do grupo “seco” e o Gráfico 4.25 apresenta os valores atingidos pelos carotes do grupo “molhado”. Tal como aconteceu com os provetes, nos carotes o grupo “molhado” perdeu resistência relativamente ao grupo “seco”.

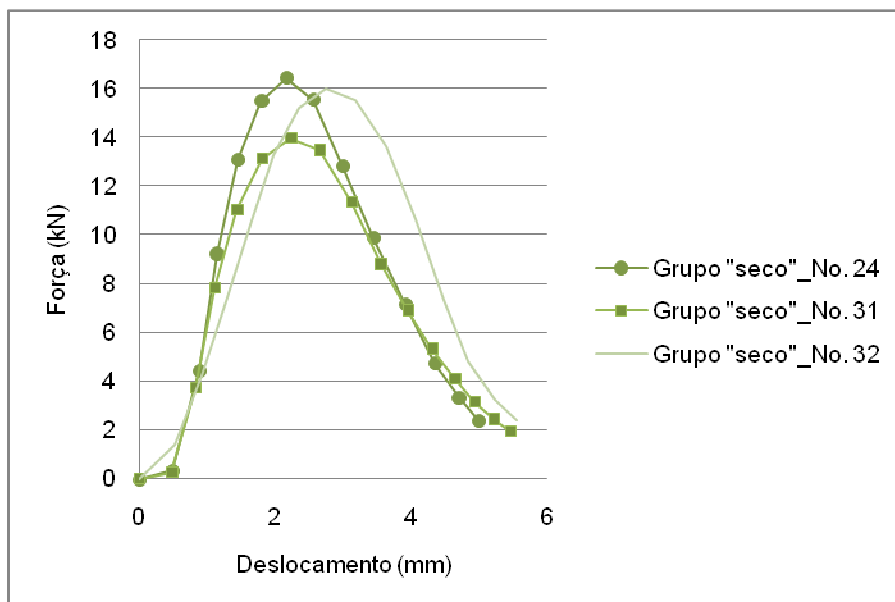


Gráfico 4. 24: Carga atingida pelos carotes do grupo "seco".

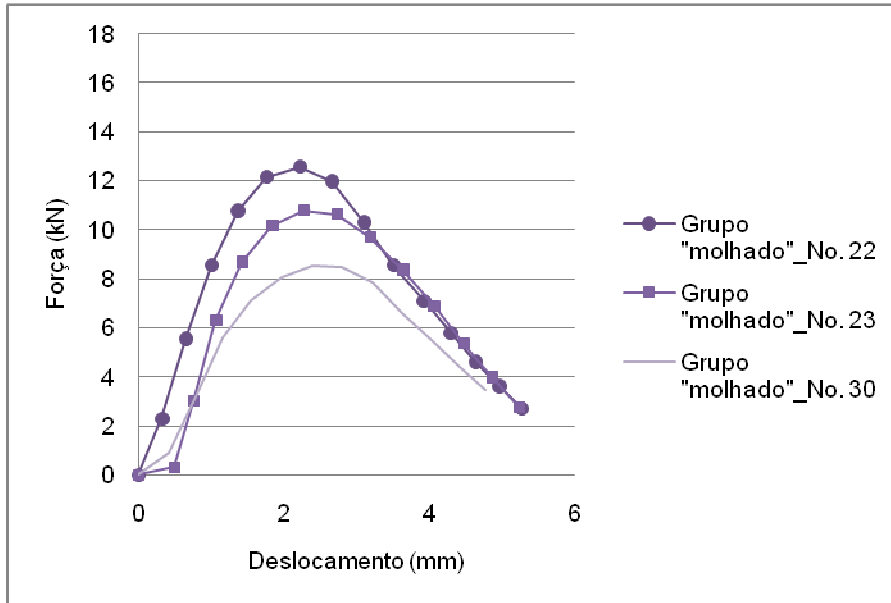


Gráfico 4. 25: Carga atingida pelos carotes do grupo "molhado".

Deste modo, a partir do Gráfico 4.26, conclui-se que, o grupo “seco” (com 1263 kPa) apresenta um valor de tracção indirecta superior ao do grupo “molhado” (com 1059 kPa).

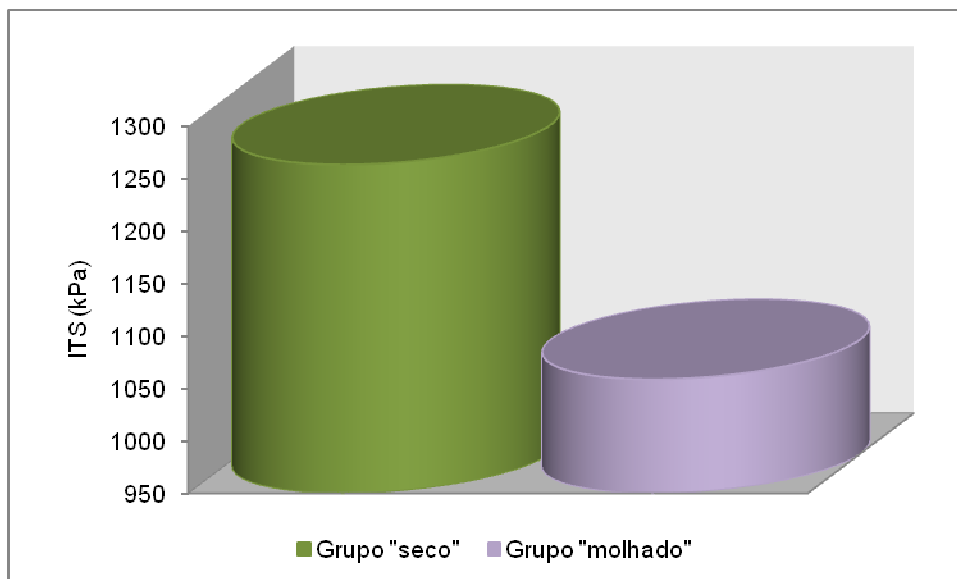


Gráfico 4. 26: Resultados de tracção indirecta do ensaio de sensibilidade à água com carotes.

▪ **Laboratório VS. Obra**

No Gráfico 4.27 apresentam-se os valores percentuais da resistência conservada em tracção indirecta obtidos para os provetes de laboratório e para os carotes de obra.

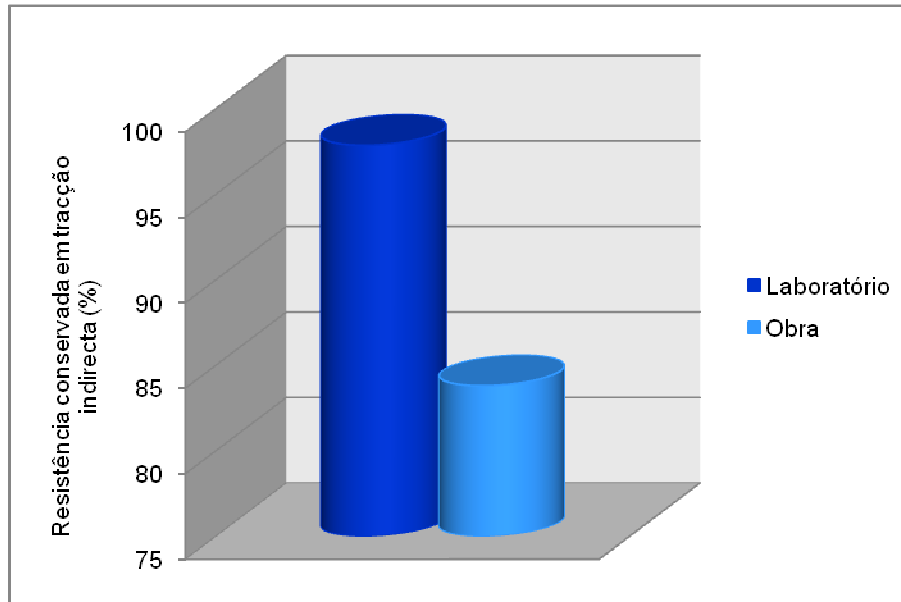


Gráfico 4. 27: Resistência conservada em tracção indirecta do laboratório e da obra.

Deste Gráfico pode concluir-se que se obtiveram bons valores de resistência conservada em tracção indirecta, de 98% para os provetes e de 84% para os carotes. Segundo Bueche e Vanelstraete (2006), estes resultados indicam que não existe sensibilidade à água para esta mistura.

4.5.3 ENSAIO DE IMERSÃO-COMPRESSÃO

Para a realização deste ensaio teve-se por base a norma espanhola NLT-162/00. Este ensaio permite determinar a perda de coesão provocada pela acção da água numa mistura betuminosa.

▪ **Procedimento**

Após se terem calculado as densidades relativas dos 6 provetes, estes dividiram-se em dois grupos de três, de forma a que a densidade relativa média de cada grupo fosse aproximadamente a mesma.

Seguindo o procedimento 2, colocaram-se os três provetes do primeiro grupo, numa estufa à temperatura de 25° C durante 24 horas. Após este tempo, colocaram-se, durante 2 horas, num banho de água a 25° C e de seguida, determinou-se a resistência à compressão de acordo com a norma espanhola NLT-161 (R1).

Os três provetes do segundo grupo, colocaram-se num banho de água a 60° C durante 24 horas. Passado este tempo, retiraram-se do banho e colocaram-se durante 2 horas à temperatura ambiente. De seguida introduziram-se num banho de água a 25° C com a duração de 2 horas e determinou-se a resistência à compressão (R2), com base na norma anteriormente referida (Anguas, 2004).

Após se ter determinado a resistência à compressão de cada provete, tal como se demonstra na Figura 4.48 para os provetes de laboratório e na Figura 4.49 para os carotes de obra, calculou-se o valor médio da resistência à compressão simples de cada grupo. Com estes dois valores calculou-se o índice de resistência conservada ou índice de susceptibilidade à água, aplicando-se a seguinte equação:

$$\text{Índice de resistência conservada} = \frac{R_2}{R_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots \text{(eq. 4.9)}$$

onde,

Índice de resistência conservada, %

R1 – Valor médio da resistência à compressão do Grupo 1

R2 – Valor médio da resistência à compressão do Grupo 2



Figura 4. 48: Ensaio de compressão a um provete de laboratório.



Figura 4. 49: Ensaio de compressão a um carote de obra.

Os resultados de resistência à compressão simples, assim como o índice de resistência conservada, apresentam-se no Quadro 4.30 para os provetes de laboratório e no Quadro 4.31 para os carotes de obra.

Quadro 4. 30: Resultados de resistência à compressão simples e índice de resistência conservada dos provetes de laboratório.

Grupo de provetes		Densidade relativa g/cm ³	Resistência à compressão simples		Índice de resistência conservada %
			kPa	kgf/cm ²	
Provetes "secos"	R1	2,365	4.719,4	48,1	88
Provetes "imersos"	R2	2,363	4.134,7	42,2	

Quadro 4. 31: Resultados de resistência à compressão simples e índice de resistência conservada dos carotes de obra.

Grupo de provetes		Densidade relativa g/cm ³	Resistência à compressão simples		Índice de resistência conservada %
			kPa	kgf/cm ²	
Provetes "secos"	R1	2,306	5.082,6	51,8	97
Provetes "imersos"	R2	2,305	4.946,6	50,5	

Na Figura 4.50 apresenta-se uma representação esquemática do procedimento para a execução do ensaio de imersão-compressão. O Quadro 4.32 apresenta a calendarização usada para a realização do ensaio já referido.

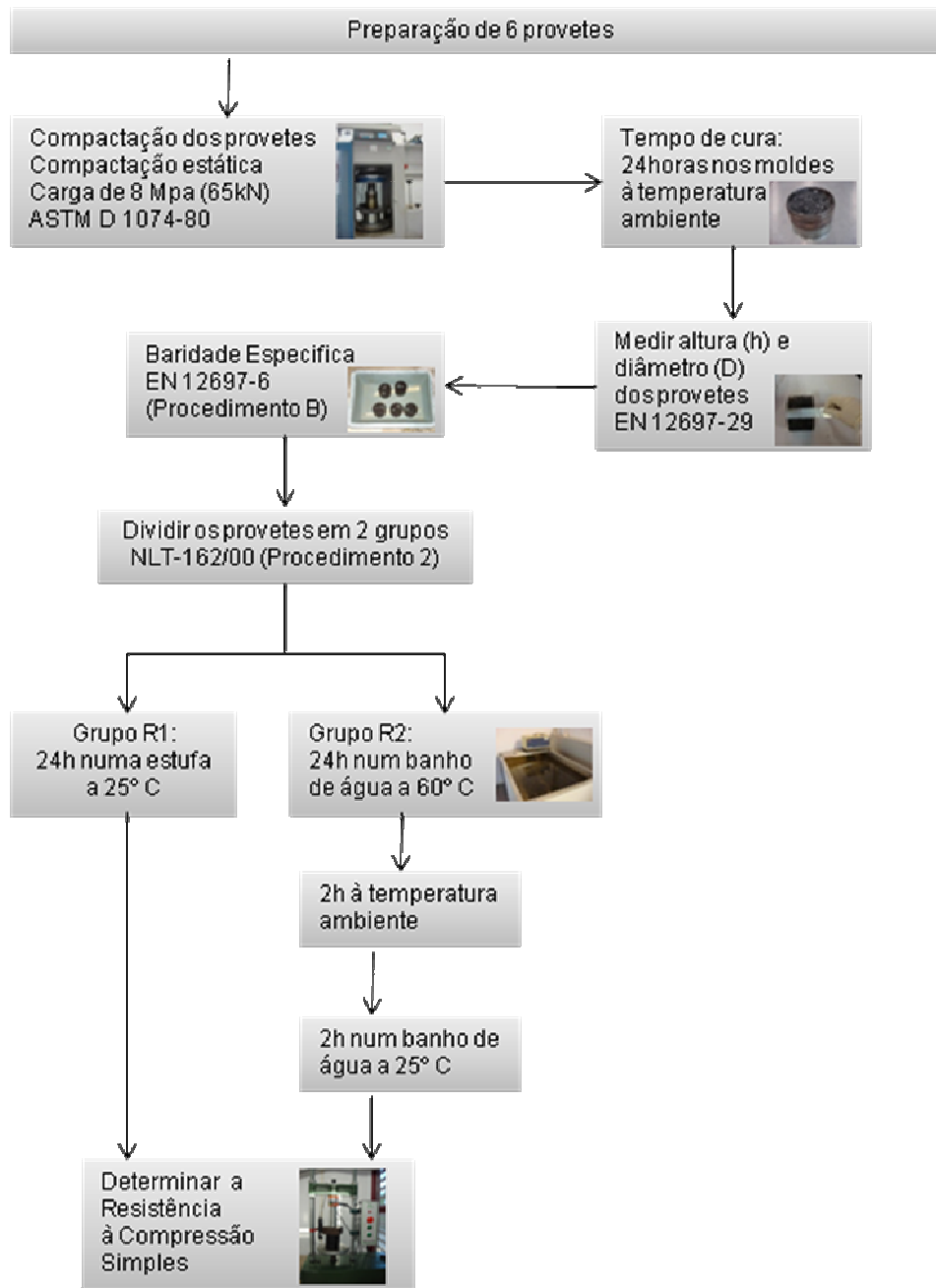


Figura 4. 50: Esquema do procedimento do ensaio de imersão-compressão.

Quadro 4. 32: Calendarização usada para a realização do ensaio de imersão-compressão.

Fonte: adaptado de Zaniewski e Viswanathan (2006, p. 49)

Dia	Horas	P	Gmb	Grupo R1		Grupo R2				
				BA 25° C	ITS	BA 60° C	TA	BA 25° C	ITS	
2ª F	9									
	10	■								
	11	■								
	12									
	13									
3ª F	11									
	12		■							
	13			■		■				
	14			■		■				
	15			■		■				
4ª F	11			■		■				
	12			■		■				
	13				■		■			
	14									
	15							■		
	16							■		
	17									■
	18									

NOTA: P-Provete; BA-Banho de água

4.5.3.1 Análise dos resultados e conclusões

- **Laboratório**

No Gráfico 4.28 apresentam-se os valores de carga máxima obtidos pelos provetes do grupo R1 – grupo “seco” e no Gráfico 4.29 apresentam-se os valores de carga máxima dos provetes do grupo R2 – grupo “molhado”. Da análise destes dois gráficos pode concluir-se que os provetes do grupo R1 são mais resistentes dos que os do grupo R2.

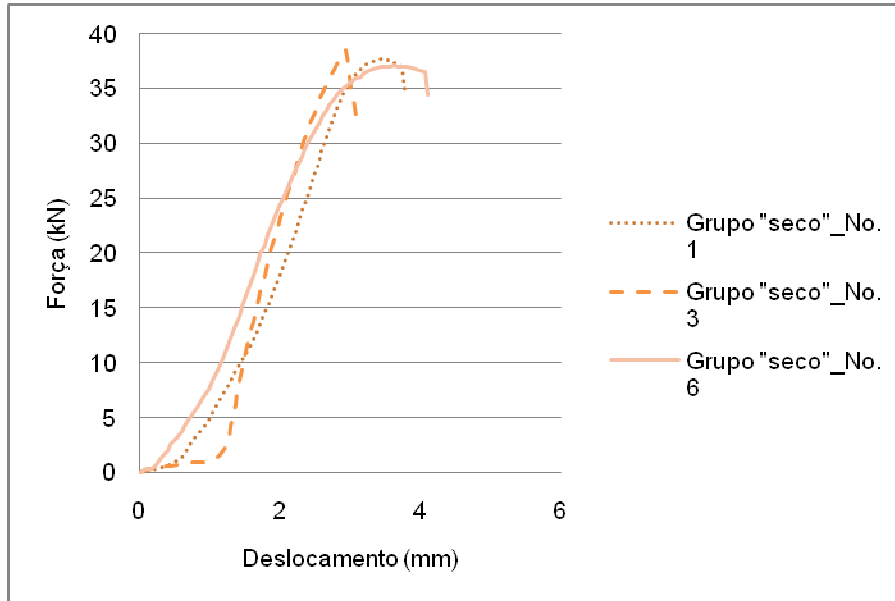


Gráfico 4. 28: Carga máxima obtida pelos provetes do grupo R1 - grupo "seco".

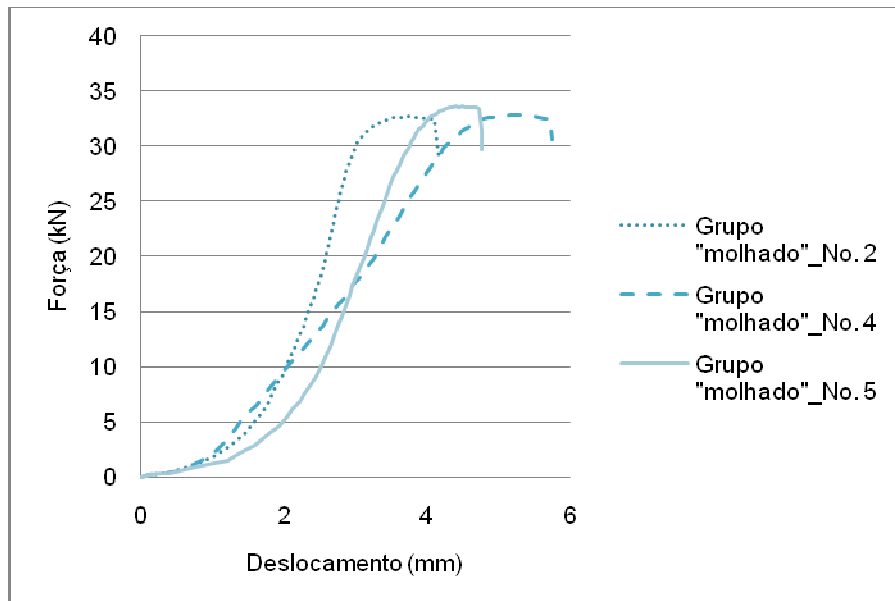


Gráfico 4. 29: Carga máxima obtida pelos provetes do grupo R2 - grupo "molhado".

O grupo R1 (com 48 kgf/cm^2) apresenta uma resistência à compressão simples superior à do grupo R2 (com 42 kgf/cm^2), tal como se pode constatar no Gráfico 4.30.

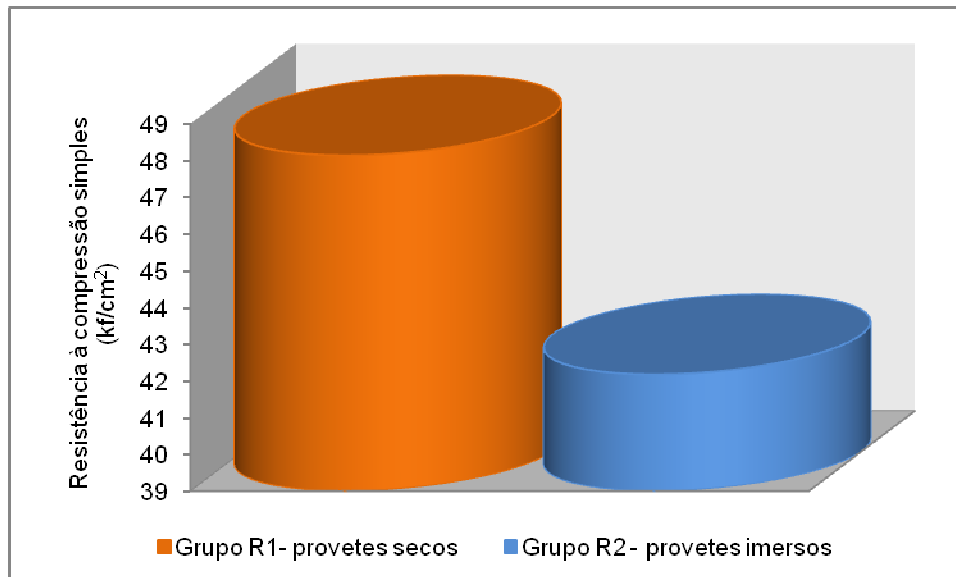


Gráfico 4. 30: Resistência à compressão simples dos grupos de provetes após o ensaio de imersão-compressão.

▪ **Obra**

No Gráfico 4.31 e no Gráfico 4.32 apresentam-se os valores de carga máxima obtidos pelos carotes do grupo R1 e do grupo R2, respectivamente. Os valores atingidos pelos carotes dos dois grupos foram bastante próximos, entre os 35 e 40 kN, aproximadamente, o que nos leva a concluir que o grupo R2 não é sensível à presença de água.

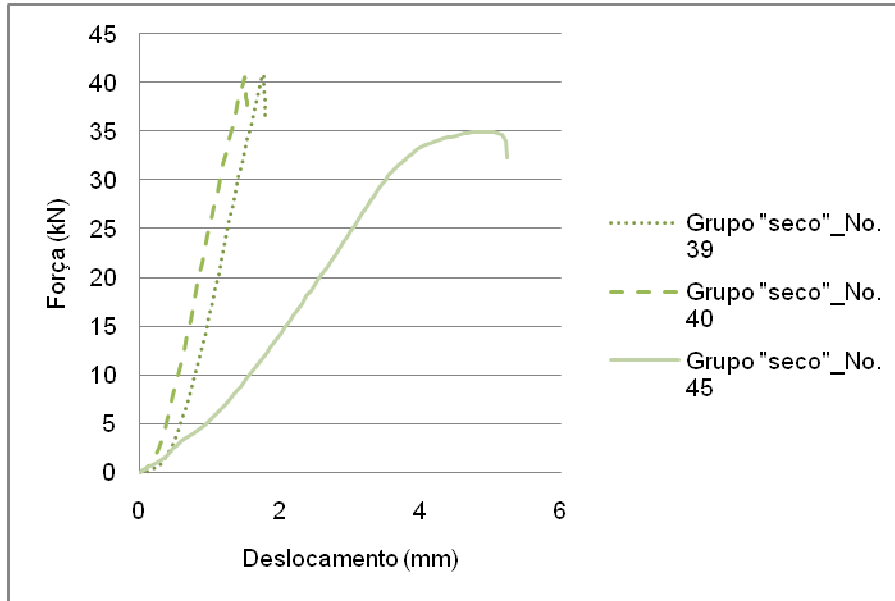


Gráfico 4. 31: Carga máxima atingida pelos carotes do grupo R1.

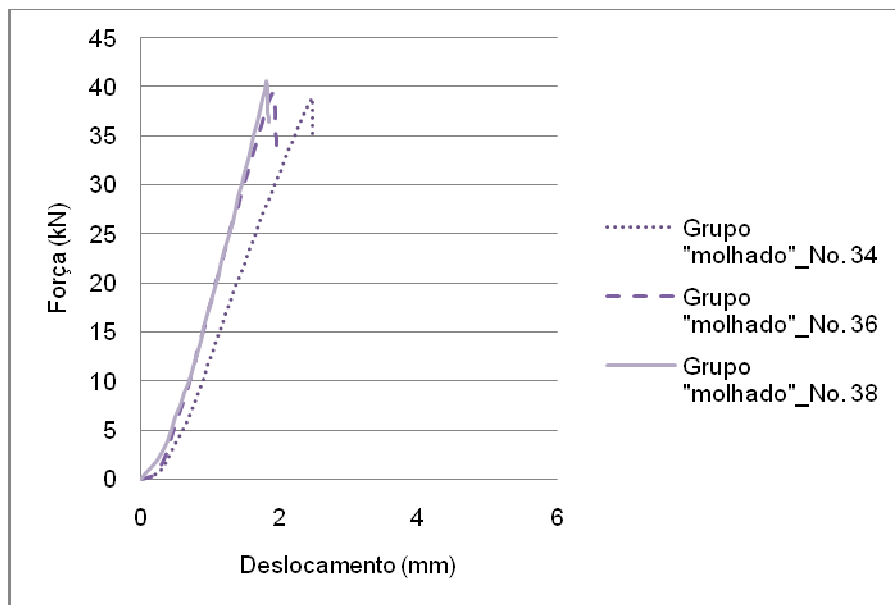


Gráfico 4. 32: Carga máxima atingida pelos carotes do grupo R2.

Como se pode verificar no Gráfico 4.33, os grupos de carotes apresentam valores de resistência conservada muito próximos, contudo o grupo R1 (com 52 kgf/cm^2) apresenta valor superior ao grupo R2 (com 50 kgf/cm^2).

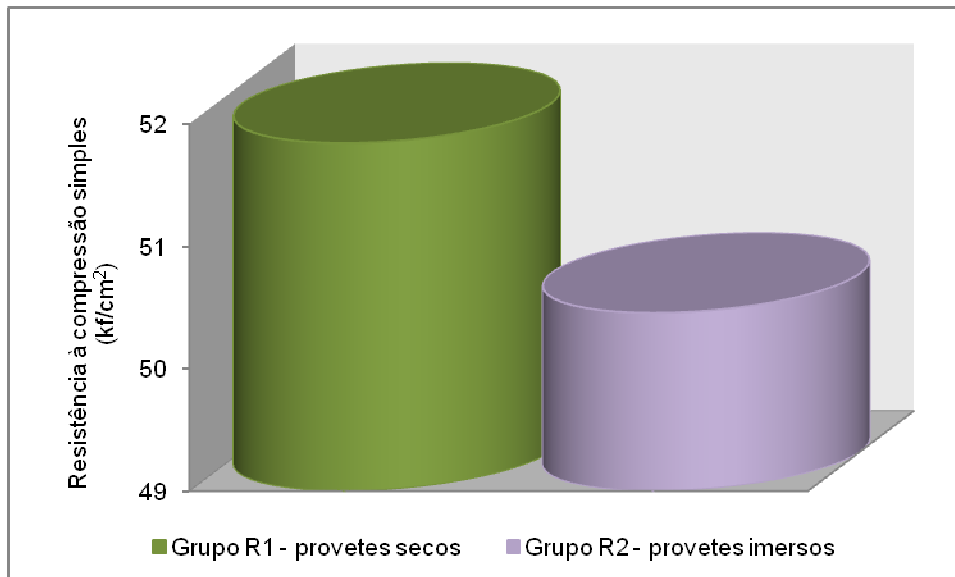


Gráfico 4. 33: Resistência à compressão simples dos carotes após submetidos ao ensaio de imersão-compressão.

▪ **Laboratório VS. Obra**

Do Gráfico 4.34 pode concluir-se que os carotes possuem maior índice de resistência conservada que os provetes realizados em laboratório.

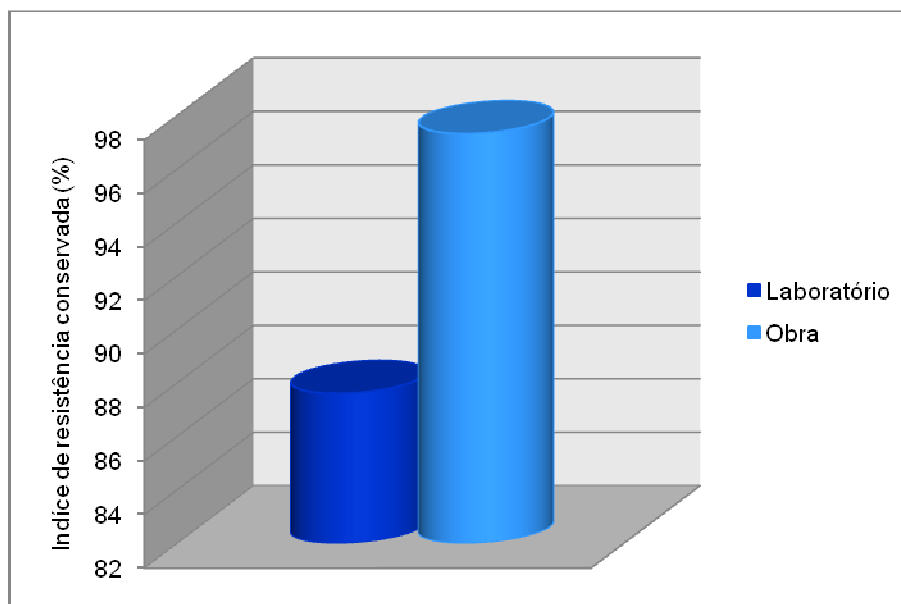


Gráfico 4. 34: Índice de resistência conservada do laboratório e da obra.

Os valores apresentados por Tavares e Vieira (2006) relativamente ao valor da resistência conservada para provetes de laboratório é de 83%, o que nos permite concluir que os nossos provetes apresentam uma boa resistência conservada, de 88%.

Relativamente aos carotes, comparando os resultados que se obtiveram, de 97%, com os valores mínimos impostos pelo Caderno de Encargos da obra (Anexo A), de 75%, pode concluir-se que o valor de resistência conservada é superior, sendo este bastante mais elevado, ou seja os carotes não são sensíveis à presença de água.

4.6. SÍNTESE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

No Quadro 4.33 apresenta-se a síntese dos resultados obtidos para os ensaios de gelo-degelo, sensibilidade à água e imersão-compressão.

Quadro 4. 33: Quadro síntese do trabalho experimental.

	Gelo-degelo		Sensibilidade à água	Imersão-compressão
	TSR (%)		ITSR (%)	IRC (%)
	G4 (1 ciclo gelo-degelo)	G5 (4 ciclos gelo-degelo)		
Laboratório	113	112	98	88
Obra	141	87	84	97

A variabilidade presente nestes resultados pode estar relacionada com diversos factores, nomeadamente, com a diferença de compactação do laboratório para a obra, com a diferença de porosidade dos provetes e possivelmente com o facto de o tempo de cura de 24 horas poder ser insuficiente para garantir que todos os corpos de prova se encontram sem água e nas mesmas condições.

Outro factor que pode estar relacionado com a variabilidade de valores tem a ver com o facto de existirem dois tipos de betume (betume novo e o betume velho) cuja interação ainda não é bem conhecida. Tratando-se de misturas com 100% de material fresado, o que acontece é que quando se adiciona o betume novo este fica em contacto com o betume velho e parcialmente em contacto com os agregados, o que vai influenciar os resultados da resistência à tracção indirecta e à compressão simples, podendo isto contribuir para a sua variabilidade.

Relativamente aos gráficos Força Vs. Deslocamento, apresentados ao longo deste capítulo, ajudaram a perceber a variabilidade dos resultados, na medida em que, as curvas sem condicionamento, são praticamente verticais na parte ascendente da carga, e têm menores deslocamentos para a carga máxima, enquanto que, as curvas obtidas após o efeito da água, para menores aumentos de força, apresentam maiores aumentos de deslocamento.