

**CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
MATERIAIS IMPERMEABILIZANTES A BASE DE ELASTÔMEROS
DE POLIURÉIA E POLIURETANO COM O DESEMPENHO DO
SISTEMA APLICADO EM LAJES ESTRUTURAS**

PAULO HENRIQUE C. DE O. VASCONCELOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
MATERIAIS IMPERMEABILIZANTES A BASE DE ELASTÔMEROS
DE POLIURÉIA E POLIURETANO COM O DESEMPENHO DO
SISTEMA APLICADO EM LAJES ESTRUTURAIS**

PAULO HENRIQUE C. DE O. VASCONCELOS

ORIENTADOR: ELTON BAUER

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS
E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM-005A/15
BRASÍLIA/DF ABRIL – 2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
MATERIAIS IMPERMEABILIZANTES A BASE DE ELASTÔMEROS
DE POLIURÉIA E POLIURETANO COM O DESEMPENHO DO
SISTEMA APLICADO EM LAJES ESTRUTURAIS**

PAULO HENRIQUE C. DE O. VASCONCELOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Elton Bauer, Dr. (UnB)
(Orientador)

Prof. Rosa Maria Sposto, Dr. (UnB)
(Examinador Interno)

Prof. João Fernando Dias, Dr. (UFU)
(Examinador Externo)

Prof. Claudio H. F. Pereira (UnB)
(Suplente)

BRASÍLIA/DF, 06 DE ABRIL DE 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

VASCONCELOS, PAULO H. C. DE O.

Correlação Entre as Propriedades Mecânicas de Materiais Impermeabilizantes a Base de Elastômeros de Poliuréia e Poliuretano com o Desempenho do Sistema Aplicado em Lajes Estruturais. [Distrito Federal] 2015.

xxii, 180p, 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2015).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Sistemas Impermeabilizantes

2. Poliuréia

3. Poliuretano

4. Desempenho

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VASCONCELOS, PAULO H. (2015). Correlação Entre as Propriedades Mecânicas de Materiais Impermeabilizantes a Base de Elastômeros de Poliuréia e Poliuretano com o Desempenho do Sistema Aplicado em Lajes Estruturais. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-005A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paulo Henrique C. de O. Vasconcelos

TÍTULO: Correlação Entre as Propriedades Mecânicas de Materiais Impermeabilizantes a Base de Elastômeros de Poliuréia e Poliuretano com o Desempenho do Sistema Aplicado em Lajes Estruturais.

GRAU: Mestre

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Paulo Henrique C. de O. Vasconcelos

SQSW 300 Bloco K apartamento 504 - Sudoeste.

CEP 70673-042 Brasília/DF, Brasil.

E-mail: phcanova@terra.com.br

Dedico esse trabalho à minha esposa Monique e aos meus filhos João Paulo e Nicole, por terem despertado em mim um amor que eu nem sabia que existia.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar por sempre me iluminar e me guiar.

A minha mãe, Ana Ester, pelo constante apoio, pelas orações, pelo interesse, pelo incentivo a todo o momento.

Ao meu pai, pelo exemplo de vida, caráter, organização e determinação.

Ao meu irmão, José Goes Vasconcelos Neto, pelo incentivo, pelo exemplo, pela inspiração e por ter me ajudado a montar todo o laboratório dessa pesquisa.

A minha sogra Márcia por ter ajudado tanto na rotina doméstica o que possibilitou que eu conseguisse trabalhar nessa pesquisa.

A minha esposa Monique, pelo amor, pela ajuda, pela paciência e por ter assumido muitas das minhas tarefas domésticas, o que foi fundamental para que eu conseguisse concluir não apenas mais um trabalho, mas sim esse sonho, esse desafio pessoal.

Ao professor Elton Bauer, não apenas pela orientação, mas por ter sido a pessoa mais importante em todo esse processo, desde o momento que me convidou a fazer a seleção para o mestrado, durante todo o período dos créditos, e depois na execução dessa pesquisa acadêmica. Ele foi muito mais que um orientador, foi o meu amigo no qual eu pude contar.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília.

Ao Anélton e sua equipe, Benedito, Marcos, André, Valter, Rodolfo, Rafael, Ivanildo, por ter ajudado na preparação, aplicação das membranas de poliuréia.

Ao amigo Everton Campioto por ter me ajudado muito nos fundamentos teórico dessa pesquisa e por ter sido o meu professor particular de química durante todo esse período.

Ao, agora engenheiro, João Ethel e também ao Marcelo, pela ajuda fundamental na execução do programa experimental dessa pesquisa.

À VIAPOL, a DOW QUÍMICA, BRASPREFER, BAUTECH pelo suporte no envio dos materiais pesquisados.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram, participaram ou incentivaram o desenvolvimento e a elaboração deste trabalho.

RESUMO

CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS IMPERMEABILIZANTES A BASE DE ELASTÔMEROS DE POLIURÉIA E POLIURETANO COM O DESEMPENHO DO SISTEMA APLICADO EM LAJES ESTRUTURAIS

Autor: Paulo Henrique C. de O. Vasconcelos

Orientador: Elton Bauer

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Abril de 2015

O uso dos sistemas elastoméricos impermeabilizantes, sobretudo a base de Poliuretano e Poliuréia, têm crescido muito no cenário mundial e nacional. No entanto, pouco ou nada se discute sobre suas propriedades mecânicas, presumindo-se, assim, que todos os tipos comercializados são adequados para aplicações em construção civil. Ainda é necessário lembrar que por serem totalmente aderidas ao substrato, passam a ser parte integrante das estruturas revestidas e devem suportar todas as suas deformações e demais solicitações como abrasão por tráfego e ataque de agentes agressivos sem que haja fissuramentos, descolamentos ou fadiga precoce, que os levariam a infiltrações indesejáveis. Este trabalho objetiva apresentar as mais relevantes propriedades mecânicas de algumas membranas de poliuréias e poliuretanos que são comercializadas no Brasil e correlaciona as mesmas com ensaios de desempenho dos respectivos sistemas devidamente aplicados em lajes estruturais, especificamente no ensaio de flexão de lajes e primas de concreto e ensaio de abrasão dos sistemas por ação de pneus, simulando tráfego veicular. Comparativamente, também são apresentados e discutidos os resultados de sistemas impermeabilizantes tradicionais a base de asfalto e resinas acrílicas. A questão da importância da consideração desses resultados nas especificações e projetos das impermeabilizações na construção civil, sobretudo nesse momento em que a norma de sistemas de impermeabilização a base de poliuréia esta sendo redigida, também é peça de discussão dessa pesquisa. Concluiu-se que os sistemas impermeabilizantes com poliuréia aplicada a quente apresentaram melhor desempenho do que os sistemas com os demais elastômeros e foi possível correlacionar o alongamento das poliuréias a quente e a abertura máximas das fissuras das lajes e prismas no ensaio de flexão no momento da ruptura de suas respectivas membranas. Foi também possível correlacionar a resistência à abrasão por ação de pneus com o índice de resistência à abrasão obtido pela metodologia da norma DIN ISO 4649.

ABSTRACT

CORRELATION BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES OF POLYUREA AND POLYURETHANE BASE WATERPROOFING ELASTOMERS WITH ITS SYSTEM PERFORMANCE APPLIED IN STRUCTURAL SLABS

Author : Paulo Henrique C. de O. Vasconcelos

Supervisor: Elton Bauer

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, April 2015

The use of elastomeric waterproofing systems, particularly the basis of Polyurethane and Polyurea, have grown a lot in the national and world stage. However, little or nothing is discussed about its mechanical properties, assuming therefore that all types sold are suitable for applications in construction. It is still necessary to remember that being fully adhered to the substrate, become an integral part of the coated structures and must withstand all its deformations and other requests as abrasion by traffic and aggressive agents attack without cracking, detachments or early fatigue, which would lead to unwanted infiltrations. This study aims to present the most relevant mechanical properties of some polyureas and polyurethane membranes which are marketed in Brazil and correlates it with performance tests of their systems properly applied in structural slabs, specifically in the bending tests of concrete slabs and abrasion tests by tire contact, simulating vehicular traffic. By comparison, are also presented and discussed the results of traditional waterproofing systems based on asphalt and acrylic resins. The question of the importance of considering these results in specifications and design of waterproofing in construction, especially in this time when the standard of waterproofing systems polyurea base is being drafted, is also discussion part of this research. It was concluded that the waterproofing systems with hot applied polyurea performed better than systems with other elastomers and it was possible to correlate the elongation of hot polyureas and maximum opening of cracks in the slabs and prisms bend test when rupture their respective membranes. It was also possible to correlate the abrasion resistance by tire contact with the abrasion resistance index obtained by the method of DIN ISO 4649.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA	23
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	Objetivo Geral	25
1.2.2	Objetivos Específicos	25
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	IMPERMEABILIZAÇÃO	27
2.2	MATERIAIS IMPERMEABILIZANTES	28
2.2.1	Asfaltos	29
2.2.2	Cimentícios	30
2.2.3	Poliméricos	31
2.3	SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES	31
2.4	SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES ELASTOMÉRICOS	33
2.5	SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES A BASE DE POLIURETANO E POLIURÉIA	34
2.5.1	Poliuretanos	34
2.5.2	Poliuréia	35
2.5.3	Estrutura Molecular de Poliuretanos e Poliuréias	35
2.5.4	Matérias Primas Constituintes dos Poliuretanos e Poliuréias	38
2.5.5	Fabricação das Matérias Primas Base dos Poliuretanos e Poliuréias	45
2.5.6	Técnicas de Aplicação das Membranas de Poliretano e Poliuréia	46
2.5.7	Normalização dos sistemas impermeabilizantes a base de Poliuretano e Poliuréia	52
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	57
3.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS E DEFINIÇÃO DOS SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES	58
3.1.1	Seleção dos materiais e membranas que compõe os sistemas impermeabilizantes	58

3.1.2	Definição dos sistemas impermeabilizantes a serem pesquisados.....	60
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
3.2.1	Corpos de Prova.....	63
3.2.2	Ensaio de Caracterização das Membranas dos Sistemas Impermeabilizantes	69
3.2.3	Ensaio de Desempenho dos Sistemas Impermeabilizantes Aplicados.....	74
3.2.4	Ensaio de flexão de prismas de concreto.....	77
3.2.5	Ensaio de Aderência das membranas ao substrato.....	79
3.2.6	Ensaio de Abrasão por atrito com pneus.....	79
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	83
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	83
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO DO SISTEMA APLICADO SOBRE LAJES ESTRUTURAIS.....	90
4.2.1	Resultados do ensaio de flexão de lajes.....	90
4.2.2	Resultados dos ensaios de flexão de prismas de concreto.....	101
4.2.3	Resultados do ensaio de aderência das membranas aplicadas sobre o piso de concreto.....	102
4.2.4	Resultados do ensaio de abrasão por ação de pneus.....	104
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	110
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MEMBRANAS DOS SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES.....	110
5.2	ANÁLISE DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES APLICADOS.....	119
5.2.1	Ensaio de flexão de lajes de concreto armado e de prismas de concreto.....	119
5.2.2	Ensaio de aderência das membranas em pisos de concreto.....	122
5.2.3	Ensaio de Abrasão de pneus sobre membranas aplicas no piso de concreto..	123
5.2.4	Ensaio de Abrasão de pneus sobre pastilhas coladas no piso de concreto.....	126
5.3	CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO COM OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS APLICADOS.....	129
5.3.1	Correlações entre Alongamento, Resistência à tração na ruptura e resistência ao rasgo de cada sistema com a capacidade de deformação até a ruptura de suas membranas sobre as fissuras das lajes e prismas no ensaio de flexão.....	129

5.3.2	Correlações entre Dureza, Resistência à abrasão pela norma DIN ISO 4649, com o comportamento dos sistemas submetidos ao ensaio de abrasão por pneus.....	137
6	CONCLUSÕES	142
6.1	Ensaio de caracterização e de desempenho das membranas impermeabilizantes	142
6.2	Correlações entre os ensaios de caracterização e desempenho	144
6.3	Sugestões para futuras pesquisas	146
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147
	APÊNDICES.....	152
	APÊNDICE A - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS OBJETOS DE ESTUDO DESSA PESQUISA.....	153
	APÊNDICE B - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FLEXÃO DAS LAJES	165
	APÊNDICE C – DIMENSIONAMENTO DAS LAJES QUE FORAM UTILIZADAS NO ENSAIO DE FLEXÃO	175

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - (a) Foto de laje de estacionamento com membrana de Poliuréia aplicada , (b) Detalhe do arremate em um ralo nesta mesma laje (Vasconcelos, 2012).....	33
Figura 2.2 - Reação de formação da poliuréia	37
Figura 2.3 - Reação de formação do poliuretano	37
Figura 2.4 - Processo de fabricação de TDI.....	38
Figura 2.5 - Reações de obtenção do MDI.....	39
Figura 2.6 - Reação de obtenção de prepolímero de isocianato.....	39
Figura 2.7 - Tipos de reação de Isocianatos	42
Figura 2.8 - Poliéter aminas	45
Figura 2.9 - (a) Aplicação de primer e camada base – (b) aspersão de agregado da camada intermediária – (c) selamento da camada intermediária – (d) Aplicação da camada superior - (Granato 2014).....	48
Figura 2.10 - (a) Máquina Aplicadora de Poliuréia modelo EXP2 GRACCO – (b) Pistola de aplicação modelo PROBLER GRACCO (Vasconcelos et. al. 2012).....	49
Figura 2.11 - Aplicação de Membrana de Poliuréia: (a) Aplicação de Primer Base epóxi - (b) Aplicação técnica “hot-spray” – (c) Detalhe pilar metálico aonde seria impossível a impermeabilização com sistemas tradicionais – (d) Resultado final de membrana aplicada. (Vasconcelos et. al. 2012)	50
Figura 2.12 - Fissura em camada de revestimento impermeabilizante a base de Poliuréia em laje de trânsito de veículos. (Vasconcelos, 2012)	56
Figura 3.1 - Fluxo do programa experimental.....	57
Figura 3.2 – Processo de estampagem dos corpos de prova com o auxílio de uma faca e da prensa hidráulica	64
Figura 3.3 – Preparação das formas das lajes para a concretagem.	65
Figura 3.4 - (a) Corpos de prova recebendo aplicação dos sistemas impermeabilizantes, (b) Vista geral das lajes que receberam a aplicação dos sistemas impermeabilizantes, (c) Lajes de concreto armado recebendo as membranas do programa experimental, (d) Piso de concreto recendo os sistemas que serão submetidos ao teste de abrasão por pneus.	66
Figura 3.5 - Aparelho de QUV utilizado nos ensaios de envelhecimento acelerado pela ASTM G154 dos corpos de prova das membranas dos sistemas impermeabilizantes.....	67
Figura 3.6 – Situação antes e depois do processo de envelhecimento acelerado com o aparelho Q.U.V.	67

Figura 3.7 - Estufa de envelhecimento acelerado com aplicação de radiação UVB.....	68
Figura 3.8 - (a) AME5 – Máquina Universal de Ensaios – (b) Corpo de Prova tipo D ASTM D412 (dezembro 2014)	69
Figura 3.9 - Corpo de prova tipo C da ASTM D624.....	70
Figura 3.10 - (a) Balança de precisão e abrasímetro de polímeros – (b) Corpos de prova do ensaio de abrasão segundo a DIN ISO 4649	73
Figura 3.11 - Durômetro escala SHORE A.....	73
Figura 3.12 - Modelo de cargas nas lajes da pesquisa	75
Figura 3.13 – Croqui ilustrativo da maneira de medição das aberturas das fissuras na lateral das lajes com os sistemas impermeabilizantes aplicados.....	76
Figura 3.14 - Prensa Hidráulica/pneumática com capacidade de 30 t utilizada nos rompimentos das lajes, com o detalhe da empilhadeira movimentando a laje.	77
Figura 3.15 - Ensaio de flexão no prisma de concreto.....	78
Figura 3.16 - (a) Equipamento utilizado na pesquisa para o teste tipo E da ASTM 4541:2010 - (b) Detalhe dos pinos de aço colados nas membras objeto deste estudo	79
Figura 3.17 - Projeto do equipamento de abrasão sobre pneus.....	80
Figura 4.1 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 1A para a idade de 30-40 dias.....	91
Figura 4.2 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 1B para a idade de 30 a 40 dias	92
Figura 4.3 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 1C para a idade de 30 a 40 dias	92
Figura 4.4 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 2A para a idade de 30 a 40 dias	93
Figura 4.5 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 2B para a idade de 30 a 40 dias	94
Figura 4.6 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 2C para a idade de 30 a 40 dias	94
Figura 4.7 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 3A para a idade de 30 a 40 dias	95
Figura 4.8 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 3B para a idade de 30 a 40 dias	96
Figura 4.9 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 3C para a idade de 30 a 40 dias	96

Figura 4.10 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 4A para a idade de 30 a 40 dias	97
Figura 4.11 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 4B para a idade de 30 a 40 dias	97
Figura 4.12 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 1A envelhecida em 500 horas na estufa com lâmpadas de U.V.B.	98
Figura 4.13 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 2A envelhecida em 500 horas na estufa com lâmpadas de U.V.B.	99
Figura 4.14 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 3A envelhecida em 500 horas na estufa com lâmpadas de U.V.B.	99
Figura 4.15 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 4A envelhecida em 500 horas na estufa com lâmpadas de U.V.B.	100
Figura 4.16 - Locais aonde foram realizados os testes de aderência.....	102
Figura 4.17 - Foto de cada intercorrência no ensaio de abrasão por pneus numeração de acordo com a Tabela 4.15	105
Figura 4.18 - (a) Situação geral do sistema após o ensaio de abrasão por pneus – (b) e (c) Sistema 1A e 2A, respectivamente, ainda em condições de serviço – (d) Sistema 3A descolado do substrato – (e) Sistema 4A completamente desgastado – (f) (g) (h) Situação dos sistemas 1C, 2C e 3C, respectivamente, descolados da camada de base.....	106
Figura 4.19 - Situação final de cada pastilha de acordo com a Tabela 4.17	108
Figura 5.1 - Comparativo dos resultados dos ensaios de alongamento.....	110
Figura 5.2 - Variação dos resultados do alongamento antes e após envelhecimento acelerado de 1000 horas no aparelho de Q.U.V.....	111
Figura 5.3 - Comparativo dos resultados dos ensaios de resistência à tração na ruptura..	112
Figura 5.4 - Variação dos resultados da resistência à tração na ruptura antes e após envelhecimento acelerado de 1000 horas no aparelho de Q.U.V.....	112
Figura 5.5 - Comparativo dos resultados dos ensaios de resistência ao rasgo	113
Figura 5.6 - Variação dos resultados de resistência ao rasgo antes e após envelhecimento acelerado de 1000 horas no aparelho de Q.U.V.....	114
Figura 5.7 - Comparativo dos resultados dos ensaios de dureza na escala shore A.....	114

Figura 5.8 - Variação dos resultados da dureza na escala shore A antes e após envelhecimento acelerado de 1000 horas no aparelho de Q.U.V.....	115
Figura 5.9 - Comparativo dos resultados de perda de volume obtidos através dos ensaios de abrasão pela norma DIN ISO 4649:2006	115
Figura 5.10 - Comparativo dos valores de Índice de Resistência à Abrasão (IRA) calculados à partir dos resultados dos ensaios de abrasão pela norma DIN ISO 4649:2006	116
Figura 5.11 - Comparativo da perda média de espessura dos corpos de prova utilizados nos ensaios de abrasão pela norma DIN ISO 4649:2006.....	117
Figura 5.12 - Comparativo da perda média de massa dos corpos de prova utilizados nos ensaios de abrasão pela norma DIN ISO 4649:2006.....	117
Figura 5.13 - Comparativo da abertura das fissuras nas lajes de concreto armado no rompimento da membrana (mm).....	120
Figura 5.14 - Comparativo da abertura das fissuras nos e prismas de concreto no rompimento da membrana (mm).....	121
Figura 5.15 - Comparativo de aderência à tração direta dos sistemas aplicados no piso de concreto	122
Figura 5.16 - Ciclos totais recebidos por cada sistema aplicado no piso e ciclos máximo que cada sistema permaneceu em estado de serviço	123
Figura 5.18 - Análise comparativa de perdas de espessura e massa no ensaio de abrasão por ação de pneus.	125
Figura 5.19 - Análise comparativa de perdas de espessura e massa por ciclos totais no ensaio de abrasão por ação de pneus.....	125
Figura 5.20 - Média de ciclos de passagem de pneus recebido pelas pastilhas dos sistemas objeto desse estudo em estado de serviço.	126
Figura 5.21 - Análise comparativa de perdas de espessura e massa das pastilhas no estado de serviço dos sistemas no ensaio de abrasão por ação de pneus.	127
Figura 5.22 - Análise comparativa de perdas de espessura e massa nas pastilhas de cada sistema pelo número de ciclos em serviço no ensaio de abrasão por ação de pneus.	127
Figura 5.23 - Análise comparativa de perdas de espessura e massa nas pastilhas de cada sistema pelo número de ciclos em serviço no ensaio de abrasão por ação de pneus, sem constar os sistemas 1C, 2C e 3C.	128
Figura 5.24 - Correlação entre a abertura de fissuras no ensaio de flexão das lajes e dos prismas de concreto com o alongamento do respectivo sistema.....	129

Figura 5.25 - Correlação entre a abertura de fissuras no ensaio de flexão das lajes e dos prismas de concreto com o alongamento do respectivo sistema envelhecido com 500 horas de lâmpadas U.V.B.....	130
Figura 5.26 - Correlação entre a abertura máxima das fissuras no ensaio de flexão das lajes e dos primas até o rompimento das membranas de concreto com o alongamento para os sistemas 1A 2A e 3A aos 30-40 dias de idade.	131
Figura 5.27 - Correlação entre a abertura máxima das fissuras no ensaio de flexão das lajes e dos primas de concreto até o rompimento das membranas com o alongamento para os sistemas 1A 2A e 3A com envelhecimento de 500 LUV.....	131
Figura 5.30 - Gráfico de carga (t) e da abertura das fissuras até o rompimento da membrana pela flecha no vão central dos ensaios de flexão de laje dos sistemas da poliuréia 1.	135
Figura 5.31 - Gráfico de carga (t) e da abertura das fissuras até o rompimento da membrana pela flecha no vão central dos ensaios de flexão de laje dos sistemas da poliuréia 2.	135
Figura 5.32 - Correlação entre a resistência à tração e a resistência ao rasgo dos sistemas com suas respectivas aberturas máxima de fissuras no momento do rompimento de suas respectivas membranas nos ensaios de flexão de lajes e primas.....	137
Figura 5.33 - Correlação entre a Dureza das membranas 1A, 2A e 3A com a perda de espessura e massa pela quantidade de ciclos no ensaio de abrasão por pneus.....	138
Figura 5.34 - Correlação entre a Dureza das membranas 1 A, 2 A e 3 A com a perda de espessura e massa pela quantidade de ciclos no ensaio de abrasão da norma DIN ISO 4649	138
Figura 5.35 - Correlação entre as perdas de espessura e de massa no método de ensaio de abrasão sobre pneus e abrasão segundo a DIN ISO 4649	139
Figura 5.36 - Correlação entre o IRA % e a perda de espessura e massa por ciclo no ensaio de abrasão por pneus.	140
Figura 5.37 - Correlação entre a Dureza das membranas dos sistemas da pesquisa com a perda de espessura e massa pela quantidade de ciclos no ensaio de abrasão por pneus nas pastilhas.....	140
Figura 5.38 - Correlação entre as perdas de massa e espessura entre os ensaios de abrasão pela norma DIN ISO 4649 e pelo ensaio de abrasão por pneus nas pastilhas.....	141
Figura 5.39 - Correlação entre o IRA (%) dos sistemas da pesquisa com a perda de espessura e massa pela quantidade de ciclos no ensaio de abrasão por pneus nas pastilhas	141

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Classificação dos sistemas impermeabilizantes pela ABNT NBR 9575:2010	32
Quadro 2.2 - Isocianatos de uso comercial (Vilar, 2004).....	41
Quadro 2.3 - Metodologia recomendada para a aplicação de membranas de Poliuretano para tráfego veicular (Granato 2014)	47
Quadro 2.4 - Principais Recomendações para Preparação Superficial e Aplicação de Sistema impermeabilizante a base de Poliuréia.	51
Quadro 2.5 - Requisitos de desempenho da Membrana de Poliuretano sem Estruturantes (NBR 15487:2007).....	52
Quadro 3.1 – Poliuréias selecionadas para a pesquisa (Bauer e Vasconcelos, 2014).....	58
Quadro 3.2 – Valores de referência de algumas propriedades dos poliuretanos selecionadas para a pesquisa (Granato, 2014).....	59
Quadro 3.3 – Características da manta asfáltica utilizada na pesquisa	60
Quadro 3.4 - Características de cada camada que compõe o sistema de membrana de poliuretano para tráfego veicular (Granato, 2014).	61
Quadro 3.5 - Sistemas impermeabilizantes objetos desta pesquisa.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Sistemas formados em função da composição do componente b dos sistemas de poliuréia e poliuretano (Primeaux et. al., 2006)	37
Tabela 2.2 - Classificação das Poliuréias em Função da Composição Química e e Tempo de Cura (SSPC 45)	53
Tabela 2.3 - Critérios de Desempenho Mínimo de Poliuréias não imersas (SSPC 45).	54
Tabela 2.4 - Critérios de Desempenho Mínimo de Poliuréias sob imersão (SSPC 45).	55
Tabela 3.1 - Descrição do ensaios de envelhecimento acelerado	68
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 1A	83
Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 2A	84
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 3A	84
Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 4A	85
Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 5A	86
Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 6A	86
Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 7A	87
Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 8A	88
Tabela 4.9 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 1C	89
Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 2C	89
Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 3C	90
Tabela 4.12 - Valores máximos no ensaio de flexão das lajes de concreto armado	100
Tabela 4.13 - Resultado do ensaio de flexão de prismas de concreto	101
Tabela 4.14 - Resultado do ensaio de aderência	103
Tabela 4.15 - Acompanhamento de intercorrências do ensaio de abrasão por pneus	104
Tabela 4.16 - Perda de massa e espessura ao término do ensaio de abrasão por pneus.	106
Tabela 4.17 - Intercorrências nas pastilhas coladas no piso no ensaio de abrasão por pneus	107
Tabela 4.18 - Perda de massa e de espessura nas pastilhas dos sistemas no ensaio de abrasão por pneus	109
Tabela 5.1 – Pontuação de cada um dos sistemas de acordo com o ensaio de caracterização.	118
Tabela 5.2 - “Ranking” final dos sistemas de acordo com o ensaio de caracterização.	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
EOTA	European Organisation for Technical Approvals
ISO	International Organization of Standardization
LEM	Laboratório de Ensaios de Materiais
NBR	Norma Brasileira Registrada no INMETRO
NM	Norma Mercosul
SPDA	Sistema de Proteção de Descargas Atmosféricas
SSPC	The Society for Protective Coatings
UnB	Universidade de Brasília

LISTA DE SÍMBOLOS

AA	ácido acrílico
BA	acrilatos de butila
°C	temperatura em Celsius
CAP	cimento asfáltico de petróleo
cm	centímetros
EA	acrilatos de etila
EPDM	etileno-propileno-dieno
EVA	etileno-vinil-acetato
f_{cj}	resistência média à compressão na idade de j dias
f_{ck}	resistência característica à compressão
f_{ckest}	valor estimado da resistência característica à compressão
f_{cd}	resistência de dosagem
f_{yd}	tensão de escoamento do aço
g	grama
HBA	4-hidroxibutila.
HDI	hexametileno diisocianato
HDMI	diciclohexilmetano diisocianato
HEA	2-hidroxietila
IPDI	isoforona diisocianato
kg	quilograma
Kmd	Constante de dimensionamento que indica a região de domínio estrutural
m	metros
m ²	metros quadrados
MDI	difenilmetano diisocianato
mm	milímetro
MMA	metacrilato de metila, ou
NOP	poliol base de óleos naturais
MPa	mega pascal
N	Newtons

PBLHS	polibutadienos líquidos hidroxilados
PEAD	polietileno de alta densidade
PPGS	polipropilenos glicóis
PTHF	poli(tetrahidrofurano) glicol
PTMEG	politetrametileno éter glicol
PU	poliuretano
PUR	poliuréia
PVC	cloro de polivinila
ρ	massa específica
RIM	moldagem por injeção e reação
s	segundos
ST	estireno
TDI	tolueno diisocianato
THF	tetrahidrofurano
TMXDI	meta-tetrametilxileno diisocianato
TPO	poliolefina termoplástica
t	Toneladas
UV	Raios ultra-violeta
UVB	Ultra-violeta espectro B

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas impermeabilizantes são definidos pela norma brasileira NBR 9575:2010, como sendo conjunto formado pelos materiais e demais insumos dispostos em camadas ordenadas que objetivam a impermeabilidade de uma construção, e tem apresentado considerável evolução tecnológica tanto no aspecto de novos materiais como em novas técnicas de aplicação.

Com o passar do tempo, sistemas a base de asfalto tem recebido adições poliméricas, as mais diversas, com o objetivo de melhorar o desempenho em obras de construção civil.

Em paralelo, sistemas a base de cimento também apresentaram evolução substancial tendo em vista o aparecimento e incorporação de novos polímeros que tem possibilitado até mesmo o surgimento de produtos com comportamento elastomérico.

No entanto, vários requisitos mecânicos, químicos ou logísticos, como a necessidade de um produto que tenha alto alongamento, todavia com alta dureza e resistência à tração, resistência ao contato com produtos químicos agressivos ou redução drástica de prazo de execução, não são possíveis de serem cumpridos com os sistemas tradicionais a base de cimento ou asfalto e vários sistemas puramente poliméricos vêm surgindo no âmbito comercial, com o intuito de atender essas solicitações.

Nesse cenário, surgiram, recentemente no Brasil, os impermeabilizantes a base de elastômeros de poliuréia e poliuretano entre os vários outros comercializados no mercado.

Com o advento desses novos materiais poliméricos, de performance mais elevada se comparado aos materiais tradicionais, outrora destinados a outras diversas aplicações, e hoje, sendo gradualmente modificados para o uso em construção civil, sobretudo como revestimentos impermeabilizantes, novos desafios são lançados. A questão do detalhamento executivo continua sendo importante, todavia, a discussão sobre os critérios de desempenho passa a ser fundamental, pois estes passam a interferir em um nível muito maior na qualidade e durabilidade futura do que os critérios executivos.

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os sistemas impermeabilizantes a base de elastômeros de poliuréia e poliuretano, por serem compostos por materiais de elevado desempenho, destinados a aplicações mais nobres e apresentarem custos mais elevados, justificam a necessidade de um melhor estudo sobre os seus respectivos desempenhos.

A norma NBR 9575 “Impermeabilização – Seleção e Projeto” apresenta, entre outras coisas, a:

- Listagem e classificação dos sistemas impermeabilizantes mais comuns no Brasil
- Um glossário de definições e termos abordados no tema
- Listagem dos serviços auxiliares aos serviços de impermeabilização
- Os requisitos que um projeto de impermeabilização deve contemplar
- Os detalhes construtivos que o projeto deve atender.

No item 6.3 “Características Gerais”, a NBR 9575:2010, cita que os sistemas de impermeabilização devem atender uma ou mais das seguintes exigências:

- a) Resistir às cargas estáticas e dinâmicas atuantes sobre a impermeabilização tais como, puncionamento, fendilhamento, ruptura por tração, desgaste, descolamento, esmagamento.
- b) Resistir aos efeitos dos movimentos de dilatação e retração do substrato e revestimentos, tais como ruptura por tração, fendilhamento, descolamento.
- c) Resistir à degradação ocasionada por influências climáticas, térmicas, químicas ou biológicas.
- d) Resistir às pressões hidrostáticas, de percolação, coluna d’água e umidade do solo.
- e) Apresentar aderência, flexibilidade, resistência e estabilidade físico-química compatíveis com as solicitações previstas nos demais projetos.
- f) Resistir ao ataque de raízes de plantas ornamentais.

Esperaria-se, portanto, que nas normas específicas de cada sistema impermeabilizante, os requisitos de dimensionamento em função do atendimento às características citadas na NBR 9575:2010, fossem abordados, mas o que se verifica é que essas normas se limitam a

tipificar os novos materiais impermeabilizantes com relação as suas propriedades e requisitos mínimos de fabricação sem que haja uma correlação entre eles e o desempenho desejado para o sistema aplicado.

Para elucidar o parágrafo anterior, toma-se como exemplo a NBR 15487:2007 “Membrana de Poliuretano para Impermeabilização”, que apresenta o requisito de que uma membrana de Poliuretano deve atingir um alongamento mínimo de 50% e resistência à tração na ruptura mínima de 2,0 MPa. No entanto, não sabemos se estes parâmetros são adequados e suficientes para a aplicação em uma laje de concreto armado que apresenta movimentações de origem térmica, estrutural, por carregamento e peso próprio, e até mesmo retrações plásticas e de outras origens.

Portanto, a impermeabilização de elementos construtivos se torna uma atividade totalmente empírica, projetada e especificada com base na experiência do profissional projetista sem qualquer proximidade com aspectos e abordagem científica.

Em paralelo a isso, constata-se a pouca quantidade de artigos técnicos e científicos sobre o tema que não incentivam a pesquisa sobre critérios de dimensionamento de sistemas de impermeabilização.

Nos novos sistemas elastoméricos de Poliuréia e Poliuretano, a aderência completa ao substrato, faz com que todos os esforços mecânicos da estrutura sejam totalmente transferidos para a camada de impermeabilizante. Este fato, associado à maior simplicidade de aplicação e facilidade nos arremates da camada impermeabilizante, faz com que a incidência de patologias seja alterada e faz-se necessário uma análise bem mais profunda do comportamento estrutural em conjunto com as propriedades do material impermeabilizante.

Pode-se citar um caso de uma obra de concessionária de veículos, executada em 2011, na qual foi concretada uma laje de tráfego veicular. O sistema de impermeabilização aplicado sobre a mesma apresentou fissuração, mesmo tendo o elastômero a base de poliuréia apresentado desempenho superior aos requisitos da norma SSPC 45 “Two-Component, Thick-Film Polyurea and Polyurea/Polyurethane Hybrid Coatings, Performance-Based”.

Percebe-se que é necessário uma maior compatibilidade das propriedades mecânicas desses elastômeros com os seus respectivos desempenhos enquanto sistemas impermeabilizantes aplicados, quando for analisada as solicitações aos quais serão submetidos .

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa se destina, a entender e elucidar as principais relações entre as propriedades mecânicas dos impermeabilizantes a base de elastômeros de Poliuretano e Poliuréia e os seus respectivos comportamentos quando aplicados em lajes de concreto armado e em prismas de concreto simples.

1.2.2 Objetivos Específicos

É nesse contexto que se enquadra esse trabalho científico, com os seguintes objetivos:

- Correlacionar as propriedades mecânicas dos sistemas mencionados com seus respectivos desempenhos aplicados em lajes de concreto, especialmente no que se refere à capacidade de resistir à fissuração e abrasão.
- Comparar o desempenho dos sistemas elastoméricos com os sistemas convencionais de base asfáltica e base acrílica.
- Fornecer subsídios para a norma de requisitos de desempenho de sistemas de elastômeros de poliuréia, que, atualmente, esta sendo redigida.
- Proporcionar uma base inicial para o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de desempenho de sistemas de elastômeros em lajes estruturais.
- Determinar para os materiais, objeto dessa pesquisa:
 - Alongamento, resistência à tração e resistência ao rasgo na ruptura.
 - Índice de resistência à abração
 - Dureza na escala SHORE A
- Avaliar para os sistemas impermeabilizantes aplicados:
 - O comportamento quando aderidos à lajes de concreto armado e também à primas de concreto simples

- O comportamento dos sistema aplicado em laje quando submetido à abrasão por ação de pneus de veículos de passeio.
- A aderência em lajes de concreto.
- Verificar possíveis correlações entre o desempenho dos sistemas impermeabilizantes aplicados em relação às propriedades mecânicas dos impermeabilizantes que compõe os mesmos.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo tem-se a introdução da dissertação, onde são apresentadas a justificativa e importância do tema, assim como os objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre impermeabilização, materiais e sistemas impermeabilizantes, elastômeros de poliuréia e poliuretano, onde são apresentados aspectos referentes ao histórico, matérias-primas, formulações, normas pertinentes, técnicas de aplicação entre outros.

No terceiro capítulo, descreve-se o programa experimental, iniciando-se pela escolha dos materiais a serem pesquisados bem como os ensaios de caracterização destes e seguindo pelos ensaios que desenvolvidos para a avaliação do desempenho dos respectivos sistemas.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos materiais e também do comportamento dos respectivos sistemas impermeabilizantes aplicados em lajes de concreto armado e em primas de concreto simples.

No quinto capítulo, é feita a discussão dos valores obtidos e feitas as devidas correlações entre os ensaios de caracterização com os respectivos desempenhos dos sistemas impermeabilizantes em relação à abrasão e à capacidade de resistir à fissuração das lajes e primas nos quais estão aplicados.

No sexto capítulo são apresentadas as principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 IMPERMEABILIZAÇÃO

A impermeabilização na construção civil tem como objetivo impedir o transporte indesejável de águas, fluidos e vapores nos materiais e componentes, podendo atuar na contenção ou no direcionamento desses elementos para algum local que se deseja. (Bauer et. al., 2007)

A norma NBR 15575-1, “Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais”, menciona “Devem ser previstos no projeto detalhes que assegurem a estanqueidade de partes do edifício que tenham a possibilidade de ficar em contato com a água gerada na ocupação ou manutenção do imóvel, devendo ser verificada a adequação das vinculações entre instalações de água, esgotos ou águas pluviais e estrutura, pisos e paredes, de forma que as tubulações não venham a ser rompidas ou desencaixadas por deformações impostas” e cita que os critérios de avaliação para os sistemas de piso estão na terceira parte da mesma norma.

A NBR 15575-3 “Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos”, traz a seguinte definição para sistemas de impermeabilização de pisos "Conjunto de operações e técnicas construtivas (serviços), composto por uma ou mais camadas que tem por finalidade proteger as construções contra a ação destrutiva por fluidos, vapores e umidade”.

Esta mesma norma também separa os tipos de pisos de uma edificação em três categorias:

- Áreas molhadas: áreas da edificação cuja condição de uso e exposição pode resultar na formação de lâmina d’água (por exemplo, banheiro com chuveiro, área de serviço e áreas descobertas)
- Áreas molháveis: áreas da edificação que recebem respingos de água decorrentes da sua condição de uso e exposição e que não resulte na formação de lâmina d’água (por exemplo, banheiro sem chuveiro, cozinhas e sacadas cobertas).
- Áreas secas: áreas onde, em condições normais de uso e exposição, a utilização direta de água (por exemplo, lavagem com mangueiras, baldes de água, etc.) não está prevista nem mesmo durante a operação de limpeza

Para as áreas molhadas, o critério de desempenho preconizado por esta norma é “Os sistemas de pisos de áreas molhadas não podem permitir o surgimento de umidade, permanecendo a superfície inferior e os encontros com as paredes e pisos adjacentes que os delimitam secas, quando submetidos a uma lâmina d’água de no mínimo 10 mm em seu ponto mais alto, durante 72 h.”.

Para as áreas molháveis e secas, esta norma cita que não se tratam de áreas estanques e portanto não é cabível o critério de desempenho mencionado no parágrafo anterior.

Sabe-se que esses fluídos quase sempre são meios de transporte de agentes agressivos e patológicos para os elementos construtivos, portanto, uma correta e eficiente impermeabilização esta intimamente ligada à proteção do patrimônio construído, e, por isso, deveria ser melhor estudada.

O Sucesso de um processo de impermeabilização esta ligado a qualidade de seus principais componentes: (Bauer et. al., 2007)

- Projeto de impermeabilização
- Materiais envolvidos
- Processo executivo
- Construção e preparação do substrato
- Fiscalização dos processos principais e auxiliares
- Preservação e manutenção da impermeabilização aplicada

2.2 MATERIAIS IMPERMEABILIZANTES

Materiais impermeabilizantes são produtos que possuem a capacidade de bloquear a passagem de fluídos (em forma líquida e/ou gases).

A NBR 9575:2010 agrupa os tipos de impermeabilização em função do material constituinte principal, que são, cimentícios, asfálticos e poliméricos:

A escolha do tipo de material esta relacionada basicamente às propriedades físicas, químicas e mecânicas deste bem como das solicitações do elemento construtivo que se esta impermeabilizando;

2.2.1 Asfaltos

O asfalto é um produto aglutinante, composto de mistura complexa de hidrocarbonetos alifáticos, aromáticos e naftalênicos, de alto peso molecular, com pequenas quantidades de ácidos orgânicos, bases, componentes heterocíclicos, contendo nitrogênio e enxofre. Na temperatura ambiente, possui elevada viscosidade, o que lhe dá uma característica semi-sólida. Por ser termoplástico, sua consistência varia em função da temperatura: é mais fluido em temperaturas mais elevadas, podendo sua viscosidade ser variável em função dos tipos de material asfáltico ou de sua origem. (Bauer et. al., 2007) .

Os asfaltos podem sofrer adições poliméricas para corrigir e melhorar propriedades como elasticidade, flexibilidade e estabilidade dimensional em temperaturas de uso, além de maior resistências a intempéries.

Industrialmente os impermeabilizantes a base de asfalto são obtidos principalmente da destilação de petróleo, ou seja, à partir do cimento asfáltico de petróleo (CAP).

Os impermeabilizantes asfálticos ainda podem ser divididos, de acordo com o seu tipo de comercialização, em:

2.2.1.1 Membranas Asfálticas

As membranas asfálticas são moldadas no local e possuem a característica de ser um sistema totalmente aderido ao substrato. Outra característica é a dificuldade de se manter uma espessura uniforme de aplicação. São aplicadas em forma líquida, ainda que para isso precisem ser aquecidas a temperaturas acima de 150^oC.

As membranas asfálticas mais utilizadas no Brasil são:

- Asfaltos oxidados
- Asfaltos diluídos

- Emulsões asfálticas
- Asfaltos policondensados,
- Asfaltos elastoméricos
- Soluções asfálticas elastoméricas
- Emulsões asfálticas elastoméricas
- Asfaltos modificados com poliuretano.

2.2.1.2 Mantas Asfálticas

A manta como material impermeabilizante consiste em “produto impermeável, pré-fabricado, obtido por calandragem, extensão, ou outros processos, com características definidas” (NBR 9575, ABNT, 2010).

São constituídas, principalmente por três partes:

- Massa Asfáltica: Composta basicamente por CAP, plastificantes, polímeros e carga mineral.
- Estruturante: É o material que é impregnado pela massa asfáltica e confere a resistência à tração da lâmina asfáltica.
- Acabamento Superficial: É colocado sobre a camada de massa asfáltica e pode ser constituído de filme plástico, papel alumínio, areia fina, grânulos de ardósia, entre outros.

2.2.2 Cimentícios

Os impermeabilizantes cimentícios são produtos em que o cimento é o veículo principal e que, sofrendo adições poliméricas, adquirem propriedades impermeabilizantes.

São membranas, em geral bi-componentes, portanto aplicadas de forma plástica ou líquida, com ou sem a presença de estruturantes usados para melhorar suas características mecânicas.

Atualmente são encontrados impermeabilizantes cimentícios além de flexíveis, com características elastoméricas, que foram projetados para substituir o uso de mantas asfálticas.

2.2.3 Poliméricos

Os impermeabilizantes poliméricos são constituídos por homopolímeros ou copolímeros com características elastoméricas. Em geral, são impermeabilizantes cujo veículo principal são os agentes modificadores dos impermeabilizantes base asfáltica ou cimentícia, como o Poliuretano, Acrílico, EVA(etileno-vinil-acetato) , entre outros.

Existem, nessa família de materiais impermeabilizantes, tal qual na família dos materiais asfálticos, membranas e mantas pré-moldadas, sendo que os principais encontrados no mercado da construção civil, são:

2.2.3.1 Mantas:

- Manta Butílica e EPDM (etileno-propileno-dieno)
- Manta de PVC (cloreto de polivinila)
- Manta de PEAD (polietileno de alta densidade)
- Manta de TPO(poliiolefina termoplástica)

2.2.3.2 Membranas:

- Membrana de Poliuréia
- Membrana de Poliuretano
- Membranas Acrílicas

2.3 SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES

Sistema de impermeabilização é o conjunto formado pelos materiais de demais insumos dispostos em camadas ordenadas que objetivam a impermeabilidade de uma construção (ABNT NBR 9575:2010).

Entende-se, portanto, que o sucesso de uma impermeabilização não depende apenas do material impermeabilizante utilizado, mas também da interação destes com o substrato que o recebe, da estrutura como um todo, da camada de proteção mecânica, de providências construtivas entre outros fatores. Os sistemas impermeabilizantes podem, didaticamente, ser divididos de acordo com a Tabela 2.3.1 à seguir:

Quadro 2.1 - Classificação dos sistemas impermeabilizantes pela ABNT NBR 9575:2010

TIPO DE CLASSIFICAÇÃO	CLASSIFICAÇÃO DO SISTEMA	DESCRIÇÃO
Flexibilidade	Flexíveis	Materiais com alta capacidade de deformação em relação ao substrato onde foi aplicado
	Rígidos	Materiais com pouca capacidade de deformação em relação ao substrato aonde foi aplicado
	Semiflexíveis	Materiais com características intermediárias
Metodologia de aplicação	Membranas	Moldados no local, aplicados na forma líquida ou pastosa
	Mantas	Pré-moldados, comercializados em rolos.
	Sistemas injetáveis	São resinas poliméricas, em geral a base de poliuretano, injetadas com o auxílio de equipamentos e bicos injetores no interior de fissuras por onde existem infiltrações e através de estruturas enterradas como cortinas e poços de elevador para que o produto impermeabilizante fique entre o solo e a estrutura.
Solicitações impostas pela água	Pressão unilateral ou bilateral	Pressão hidrostática positiva: sistemas impermeabilizantes que recebem pressões hidrostáticas no sentido ao da aderência do sistema ao substrato.
		Pressão hidrostática negativa: sistemas impermeabilizantes que recebem pressão hidrostática em sentido contrário ao da aderência do sistema ao substrato.
	Água por condensação	Sistemas que devem suportar a ação da água que atinge uma estrutura por condensação.
	Água de percolação	Sistemas que devem suportar a ação de água de percolação e sem confinamento, como lajes, calhas, floreiras, etc.
Exposição ao intemperismo	Resistentes ao intemperismo	Produtos ou sistemas cujas propriedades permitem sua exposição direta ao intemperismo
	Autoprotégidos	São produzidos com um acabamento superficial protetor, como uma manta asfáltica aluminizada.
	Pós-protégidos	São materiais ou sistemas que demandam a execução de um acabamento protetor compatível.
Aderência ao substrato	Aderidos ao substrato	Sua principal vantagem é de que não permitem a infiltração de água por entre o substrato e a camada impermeabilizante, e neste caso é mais fácil de localizar o problema. A desvantagem é que o sistema deve ser capaz de suportar totalmente a movimentação do substrato a fim de que não haja infiltrações.
	Parcialmente aderidos	Características parciais de aderência
	Não aderidos	Possuem a vantagem de não absorver nenhuma movimentação proveniente da estrutura.
Temperatura de Aplicação	A frio	Quando o produto não demanda elevação de temperatura para a aplicação tendo seu veículo básico água ou solventes.
	A quente	Quando é necessário o aumento da temperatura para haver aplicabilidade do material impermeabilizante.

2.4 SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES ELASTOMÉRICOS

São sistemas impermeabilizantes, aplicados a frio ou a quente, que podem ser ou não estruturados com telas, e, em alguns casos, dispensam o uso de camada de proteção mecânica. Atualmente, o tipo de impermeabilização que mais cresce no Brasil são as membranas elastoméricas e aderentes. (Vasconcelos et. al., 2012)

O rápido crescimento e popularização dos sistemas elastoméricos moldados em loco, como as membranas acrílicas, de Poliuréia e de Poliuretano se deu por fatores como:

- Maior simplicidade na aplicação
- Dispensa da camada de proteção mecânica, podendo inclusive haver tráfego de veículos por sobre os mesmos.
- Aderência completa no substrato, o que impede o espalhamento da água por sob a camada impermeabilizante em caso de defeitos
- Redução dos custos das matérias primas desses sistemas, o que aproximou dos custos dos sistemas convencionais como os asfálticos e cimentícios.
- Maior velocidade de aplicação
- Possibilidade de uso de mão de obra não profissional, como no caso das membranas acrílicas.

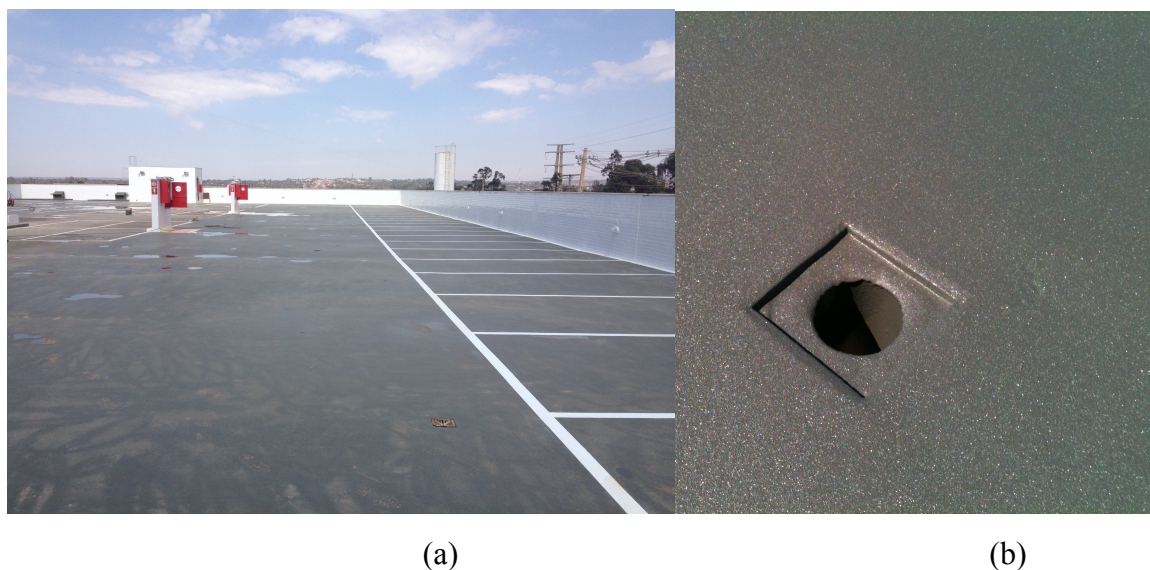


Figura 2.1 - (a) Foto de laje de estacionamento com membrana de Poliuréia aplicada , (b) Detalhe do arremate em um ralo nesta mesma laje (Vasconcelos, 2012)

2.5 SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES A BASE DE POLIURETANO E POLIURÉIA

Os sistemas impermeabilizantes a base de poliuréia e poliuretano possuem estruturas moleculares, matérias primas, meios de fabricação e técnicas de aplicação distintos que serão apresentados à seguir.

2.5.1 Poliuretanos

Os poliuretanos foram desenvolvidos por Otto Bayer, em 1937. São produzidos pela reação de um isocianato com um polioli e outros reagentes como: agentes de cura ou extensores de cadeia, catalisadores, agentes de expansão, surfactantes, cargas, agentes antienvelhecimento, corantes, pigmentos, retardantes de chama, desmoldantes entre outros. Os isocianatos podem ser aromáticos ou alifáticos. Os compostos hidroxilados podem variar quanto ao peso molecular, natureza química e funcionalidade. Os polióis podem ser poliéteres, poliésteres, ou possuir estrutura hidrocarbônica. A natureza química bem como a funcionalidade dos reagentes deve ser escolhida de acordo com as propriedades finais desejadas. Esta flexibilidade possibilita a obtenção de materiais com diferentes propriedades físicas e químicas fazendo que esse tipo de estrutura química tenha muita versatilidade na indústria (Vilar, 2004).

A cronologia do Poliuretano se iniciou na Alemanha no final da década de 1930 com fabricação de espumas rígidas, adesivos, e tintas e os elastômeros de poliuretano vieram a aparecer na década de 40. As espumas flexíveis vieram aparecer na década de 50. Na década de 60, o uso dos clorofluorcarbonos (CFCs) como agente de expansão das espumas rígidas possibilitou o uso deste material para isolamento térmico¹ (Vilar, 2004).

O consumo de Poliuretanos no segmento da construção civil aumentou em cerca de 41% entre os anos de 2001 e 2010 ocupando em torno de 24% do mercado mundial. No Brasil, a participação deste segmento no consumo de poliuretano é de apenas 5%, o que evidencia o grande potencial de crescimento do uso dessa resina e derivados nos próximos anos, se for seguida a tendência mundial (Vilar, 2004).

¹ Com a recente advento da preocupação com o meio ambiente, outros compostos de expansão em substituição ao CFC foram desenvolvidos e estão sendo utilizados.

2.5.2 Poliuréia

Poliuréia é o produto resultante da reação entre um poliisocianato e um mistura selecionada de resinas com terminações em Aminas (PDA apud Primeaux, 2006).

A Poliuréia como é conhecida atualmente foi desenvolvida por em meados dos anos 80 pelo então funcionário da “Texaco Chemical Company”, atualmente “Huntsman Chemical”, Dudley Primeaux (Tripp et. al. , 2002).

A primeira referencia sobre Poliuréia se deu em 1948 quando pesquisadores estavam comparando propriedades térmicas entre Poliesteres, Polietilenos, Poliuretanos, Poliamidas e Poliuréias e notaram que esta tinha muito mais estabilidade térmica à temperaturas mais elevadas (Primeaux et. al., 2006).

Segundo Primeaux et. al. (2006), o sistema de revestimento atual de poliuréia foi desenvolvido à partir de um sistema de injeção de Poliuréia em moldes de partes externas de veículos, utilizado na década de 80, devido a sua baixa densidade, baixo custo e capacidade de aceitar um tipo de pintura por deposição eletrolítica. Na ocasião, a poliuréia era injetada nas partes de veículos devidamente aquecida a mais de 200°C.

Apesar de algumas tentativas com insucesso na década de 70 para o uso de Poliuréias bi-componetes híbridas e modificadas, o primeiro sistema de revestimento 100% Poliuréia bi-componente, aplicada com equipamento de alta pressão foi num sistema de impermeabilização de telhados em 1989 nos Estados Unidos (Primeaux et. al., 2006).

Atualmente, no Brasil, a maior aplicação desse material é na construção civil, em sistemas de impermeabilização, mas é também utilizada em revestimentos de peças de desgaste em mineração, tubos de extração de petróleo, revestimentos automotivos, entre outros. (Vasconcelos et. al., 2012).

2.5.3 Estrutura Molecular de Poliuretanos e Poliuréias

Uma molécula de polímero pode ser definida como um conjunto de unidades repetitivas (meros), unidas por ligações covalentes. A polimerização é um processo químico onde os

monômeros se agrupam formando-se polímeros. Para que a reação de polimerização ocorra é necessário que as moléculas dos monômeros tenham no mínimo dois grupos funcionais. A depender do tipo de monômero (de seus grupos funcionais) a estrutura do polímero resultante pode ser linear ou ramificada. O processo de polimerização conduz a formação de cadeias poliméricas de diferentes tamanhos e de pesos moleculares.

A estrutura molecular dos Poliuretanos e Poliuréias podem variar desde os polímeros rígidos reticulados, até os elastoméricos de cadeias lineares e flexíveis. As estruturas flexíveis (espumas flexíveis e os elastômeros) possuem estruturas segmentadas constituídas de longas cadeias flexíveis (provenientes dos polióis) unidas por segmentos aromáticos rígidos de poliuretano e poliuréia. Os segmentos rígidos, especialmente os de poliuréia, formam ligações secundárias fortes e tendem a se aglomerar em domínios (Vilar, 2004).

As características dos elastômeros de Poliuretano e Poliuréia dependem grandemente das ligações hidrogênio entre os grupos polares da cadeia polimérica, principalmente entre os grupos N-H (doadores de próton) e as carbonilas (doadores de elétron) presentes nas estruturas uréia e uretano. Pontes de hidrogênio também podem ser formadas entre os grupos N-H e as carbonilas dos segmentos flexíveis de poliésteres e, mais dificilmente, com os oxigênios dos poliéteres (ligações fracas). Por outro lado, os Poliuretanos e Poliuréias rígidas têm um alto teor de ligações cruzadas, resultantes dos reagentes polifuncionais utilizados, e não apresentam as estruturas segmentadas, presentes nas estruturas flexíveis (Vilar, 2004).

A principal característica distintiva da tecnologia de poliuréia sobre poliuretanos é que são usadas resinas terminadas em amina (-NH₂) ao invés de hidroxilas (-OH). A reação das resinas terminadas em amina com o isocianato resultam na formação de uma ligação de ureia. O termo poliuréia aplica-se, em seguida, ao conjunto dessas unidades repetidas e ligadas (Primeaux et. al, 2006).

Segundo Primeaux et. al. (2006), as reações químicas de formação de poliuréia e poliuretano são as seguintes:

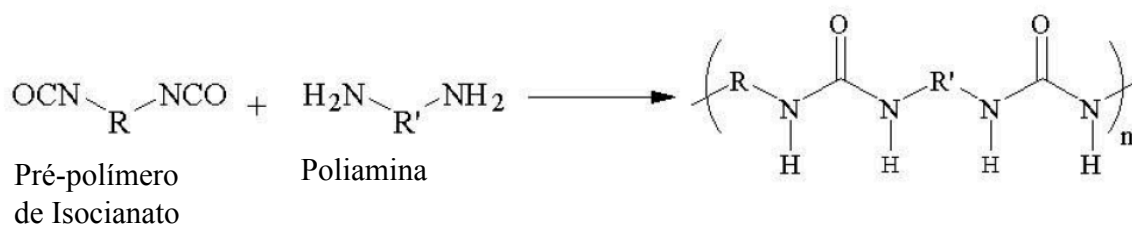


Figura 2.2 - Reação de formação da poliuréia

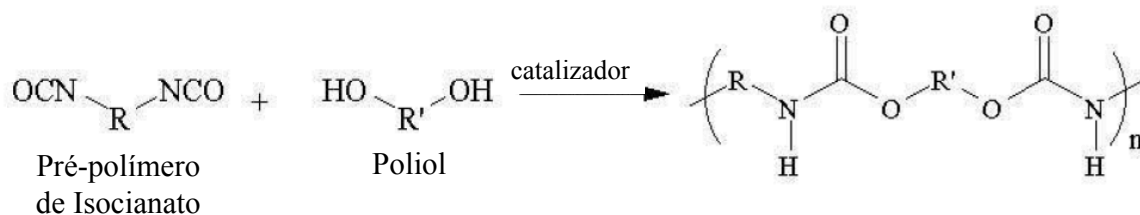


Figura 2.3 - Reação de formação do poliuretano

A questão é que no mercado existem muitas formulações híbridas que, em função dos tipos de resinas e dos extensores de cadeia, podem ser classificadas como citado na tabela 2.2:

Tabela 2.1 - Sistemas formados em função da composição do componente b dos sistemas de poliuréia e poliuretano (Primeaux et. al., 2006)

RESINA	EXTENSOR DE CADEIA	SISTEMA FORMADO
Poliéter-Amina	Terminação em Amina	Poliuréia Pura
Poliéter-Poliol	Terminação em Amina	Poliuréia Híbrida
Poliéter-Amina	Glicol	Poliuretano Híbrido
Poliéter-Poliol	Glicol	Poliuretano

Vale ainda mencionar que a depender do tipo de isocianato utilizado na reação, é possível obter cadeias aromáticas ou alifáticas. As cadeias alifáticas, diferentemente das aromáticas, tem boa estabilidade de cor, além de ter menores índices de perda de propriedades mecânicas, quando expostas aos raios UV.

2.5.4 Matérias Primas Constituintes dos Poliuretanos e Poliuréis

2.5.4.1 Isocianatos

Os isocianatos possuem o grupo NCO que reage com compostos que possuam átomos de hidrogênio ativo, como os polióis, a água, os extensores de cadeia, etc (Vilar 2004).

Todos os isocianatos usados comercialmente possuem no mínimo dois grupos funcionais. Deles, mais de 95% são aromáticos à base do TDI (31%) e dos diferentes tipos de MDI (66%). Como os poliuretanos produzidos com isocianatos aromáticos mostram tendência ao amarelecimento sem perda das propriedades mecânicas, quando a manutenção da cor é um fator preponderante devem ser utilizados os isocianatos alifáticos, como o hexametileno diisocianato (HDI), o isoforona diisocianato (IPDI), o dicitclohexilmetano diisocianato (HMDI), normalmente usados na forma de isocianatos modificados (Vilar, 2004).

a) Tolueno diisocianato (TDI)

O tolueno diisocianato (diisocianato de tolileno) é normalmente comercializado como uma mistura dos isômeros 2,4 e 2,6 nas proporções 80/20 (TDI-80/20), 65/35 (TDI-65/35), ou puro (TDI-100). As reações químicas envolvidas no processo de obtenção do TDI são mostradas à seguir (Vilar 2004).

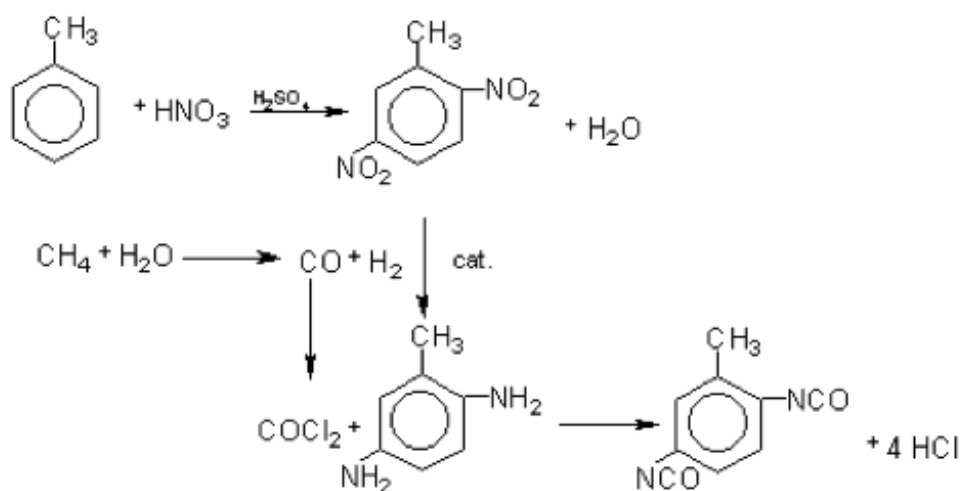


Figura 2.4 - Processo de fabricação de TDI

b) Difenilmetano diisocianato (MDI)

Os diferentes tipos de difenilmetano diisocianato (MDI) são os isocianatos mais consumidos pelo mercado de poliuretanos. A química do MDI é mais complexa do que a do TDI e permite um significativo grau de liberdade no seu aperfeiçoamento para atender as especificações desejadas (Vilar 2004).

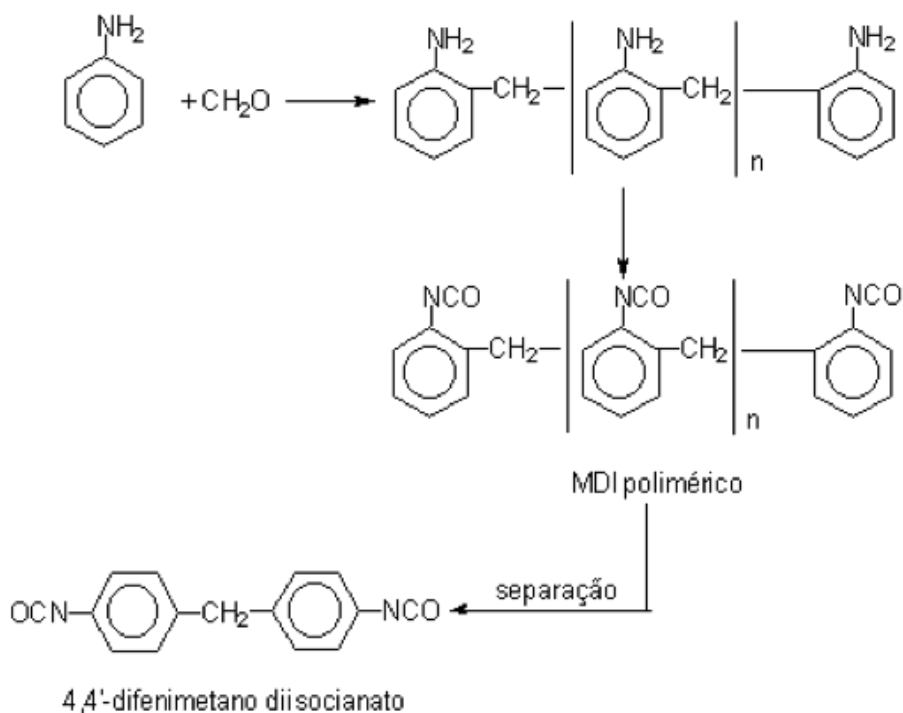


Figura 2.5 - Reações de obtenção do MDI

c) Prépolímeros de isocianato:

Os sistemas de Poliuretano e Poliuréia podem ser obtidos por processos em duas etapas, em que se faz a reação prévia do poliálcool, normalmente com excesso de isocianato formando um prepolímero com terminação NCO como se segue (Vilar 2004).

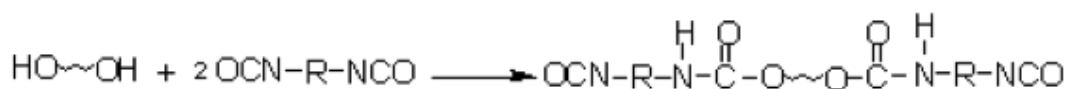


Figura 2.6 - Reação de obtenção de prepolímero de isocianato

O teor de NCO livre do prepolímero é dado pela relação isocianato/poliol (NCO/OH) utilizada na reação. Quando a relação NCO/OH é muito superior ao dobro da estequiométrica, o produto resultante, denominado semi- ou quasi-prepolímero, possui grande excesso de isocianato livre não reagido, que aumenta a sua toxicidade, e sofre restrições em muitas aplicações, principalmente com os isocianatos mais voláteis. Na segunda etapa do processo ocorre a formação dos poliuretanos e poliuréias de alto peso molecular pela reação dos prepolímeros terminados em NCO com os poliois. (Vilar, 2004).

d) Isocianatos alifáticos

Os poliuretanos produzidos com isocianatos aromáticos mostram tendência ao amarelecimento sem perda das propriedades mecânicas. Todavia quando a manutenção da cor é um fator preponderante, como em certos revestimentos os isocianatos alifáticos devem ser utilizados. Os diisocianatos alifáticos mais utilizados são o hexametileno diisocianato (HDI), o isoforona diisocianato (IPDI), o dicitclohexilmetano diisocianato (HMDI) ou MDI hidrogenado, e o meta-tetrametilxileno diisocianato (TMXDI).

e) Isocianatos modificados

Em aplicações como em formulações para tintas, revestimentos, adesivos, etc, é recomendado o uso de poliisocianatos com baixa pressão de vapor. Diisocianatos voláteis como o TDI, HDI e IPDI só são utilizados combinados quimicamente. Os isocianatos modificados menos voláteis e de maior peso molecular podem ser obtidos de diferentes formas como:

- a) Reação de formação de adutos, com polioliol e excesso de diisocianato;
- b) Formação de biuretos;
- c) Trimerização para formar isocianuratos.

Dessa maneira, é possível encontrar os seguintes isocianatos comerciais, organizados na forma de um quadro.

Quadro 2.2 - Isocianatos de uso comercial (Vilar, 2004)

NOME COMERCIAL	FÓRMULA	ESTRUTURA
2,4-tolueno diisocianato (TDI)/ 2,4-diisocianato de 1-metil- benzeno	$C_9H_6O_2N_2$	
2,6-tolueno diisocianato (TDI) / 2,6-diisocianato de 1-metil- benzeno	$C_9H_6O_2N_2$	
Tolueno diisocianato mistura 2,4:2,6=65:35 (TDI-65/35)	$C_9H_6O_2N_2$	
Tolueno diisocianato mistura 2,4:2,6=80:20 (TDI-80/20)	$C_9H_6O_2N_2$	
4,4'-difenil metano diisocianato (MDI)/1,1'- metileno bis (4-isocianato benzeno)	$C_{15}H_{10}O_2N_2$	
2,4'-difenil metano diisocianato (MDI)/ 1- isocianato-2-(4-isocianato fenil) metilbenzeno	$C_{15}H_{10}O_2N_2$	
2,2'-difenil metano diisocianato (MDI)/1,1'- metileno bis (2-isocianato benzeno)	$C_{15}H_{10}O_2N_2$	
Hexametileno diisocianato (HDI)/1,6-diisocianato hexano	$C_8H_{12}O_2N_2$	$OCN-(CH_2)_6-NCO$
Isoforona diisocianato (IPDI)/5- isocianato-1-(metilisocianato)- 1,3,3'- trimetil ciclohexano	$C_{12}H_{18}O_2N_2$	
Meta-tetrametilxileno diisocianato (TMXDI) / bis (isocianato-1-metil- 1-etil)-1,3- benzeno	$C_{14}H_{16}N_2O_2$	
4,4'-dicrolohexilmetano diisocianato (HMDI)/1,1'- metileno-bis(4-isocianato ciclohexano)	$C_{15}H_{22}O_2N_2$	
Trifenilmetano-4,4',4''- triisocianato/1,1',1''- metileno-tris (4 isocianato benzeno)	$C_{22}H_{13}O_3N_3$	$HC-(\text{C}_6\text{H}_4\text{NCO})_3$
Naftaleno 1,5-diisocianato (NDI)/1,5 diisocianato naftaleno	$C_{12}H_6O_2N_2$	

Segundo Vilar (2004), existem cinco reações principais dos isocianatos com:

- (1) Polióis, formando poliuretanos;
- (2) Aminas, formando poliuréias;
- (3) Água, originando poliuréia e liberando gás carbônico que é o principal agente de expansão nas espumas de poliuretanos;
- (4) Uretanos, formando alofanatos
- (5) Uréias, resultando na formação de ligações cruzadas alofanato e biureto, respectivamente.

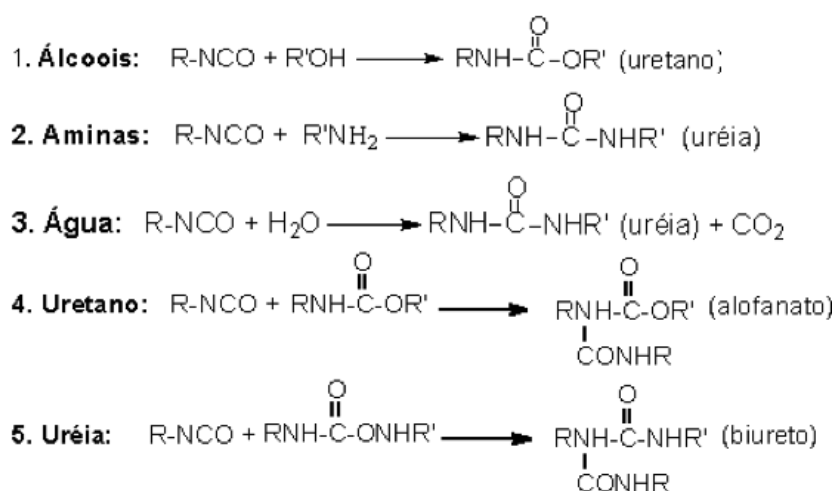


Figura 2.7 - Tipos de reação de Isocianatos

2.5.4.2 Polioli

O termo polioli abrange uma grande variedade de compostos contendo grupos de hidroxilas, capazes de reagir com os isocianatos para formar os poliuretanos e poliuréias. Normalmente, os polióis que dão origem às espumas flexíveis e elastômeros possuem peso molecular entre 1000 e 6000 e funcionalidade entre 1,8 e 3,0. Os Polióis de cadeia curta ($250 < 1000$) e alta funcionalidade (3 a 12) produzem cadeias rígidas com alto teor de ligações cruzadas e são usados nas espumas rígidas e nas tintas de alto desempenho (Vilar 2004).

Os polióis poliéteres são os mais utilizados e normalmente são derivados do poli(óxido de propileno) glicol e copolímeros de poli(óxidos de propileno/etileno) glicóis (PPG's). Outros polióis poliéteres são o poli(óxido de tetrametileno) glicol (PTMEG ou PTHF)

utilizados em fibras e elastômeros de alto desempenho; e os polióis poliméricos usados em espumas flexíveis de alta resiliência (HR). Além dos polióis poliéteres, temos: os polióis poliésteres alifáticos utilizados em aplicações de alta performance; os polióis poliéster aromáticos usados em espumas rígidas; os polióis obtidos de óleos naturais o polibutadieno líquido hidroxilado, entre outros (Vilar, 2004).

a) Polipropilenos glicóis (PPGS)

Os polioxipropilenos glicóis (PPGs) de diferentes tipos são os polióis mais consumidos na fabricação dos poliuretanos (Vilar 2004).

b) Polióis poliésteres

Os polióis poliésteres foram os primeiros polióis usados no início do desenvolvimento dos poliuretanos. Normalmente, são fabricados pela reação de policondensação de um diácido com excesso de um diol. Usualmente são utilizados quatro tipos principais de poliol poliéster: polióis poliéster alifáticos (poliadipatos) lineares ou ligeiramente ramificados; polióis poliésteres aromáticos de baixo peso molecular, usados em espumas rígidas; policaprolactonas; e polióis policarbonatos (Vilar 2004).

c) Poli(oxitetrametileno) glicol

O poli(oxitetrametileno) glicol, ou politetrametileno éter glicol (PTMEG) ou poli(tetrahidrofurano) glicol (PTHF) é fabricado pela polimerização catiônica do tetrahidrofurano (THF), com ácido fluorsulfônico. Os PTMEG's possuem cadeias lineares terminadas em hidroxilas primárias reativas e funcionalidade de 2,0. PTMEG's de pesos moleculares de 650, 1000 e 2000, são utilizados na fabricação de elastômeros de poliuretano, revestimentos e fibras elastoméricas, de alto desempenho, e elevada resistência à hidrólise (Vilar 2004).

d) Polióis de óleos vegetais (NOPS) e outras fontes renováveis

Uma tendência global no mercado de poliuretanos é a procura por polióis obtidos de fontes renováveis, como os à base de óleos naturais (NOPs), em função da substituição parcial de

matérias-primas de origem petroquímica. Dentre estes NOPs usados na fabricação de poliuretanos, podemos destacar: o óleo de mamona; os polióis derivados do óleo de mamona; e os obtidos a partir de óleos vegetais poliinsaturados (Vilar 2004).

e) Polibutadienos líquidos hidroxilados (PBLHS)

Dentre os diversos polióis com estrutura hidrocarbônica podemos citar o polibutadieno líquido com terminação hidroxílica (PBLH). O PBLH é obtido pela polimerização do butadieno, iniciada pelo peróxido de hidrogênio, utilizando um álcool como diluente (Vilar 2004).

f) Polióis acrílicos

Tradicionalmente, as resinas acrílicas são utilizadas em tintas e revestimento. Atualmente, os polióis acrílicos são bastante usados em vernizes poliuretânicos para acabamento automotivo com boa resistência química e durabilidade. Os polióis acrílicos são obtidos pela copolimerização dos monômeros acrílicos convencionais, como acrilatos de etila (EA), ou butila (BA), ácido acrílico (AA), metacrilato de metila (MMA), ou estireno (ST), com monômeros acrílicos hidroxilados como os acrilatos de 2-hidroxietila (HEA) ou 4-hidroxibutila (HBA) (Vilar 2004).

2.5.4.3 Poliamina

Existem diversos métodos para a conversão de grupos hidroxílicos terminais em amínicos. No processo mais utilizado, o polioxipropileno glicol (PPG) reage com uma mistura de amônia e hidrogênio, na presença de catalisador de níquel, resultando na conversão, pela aminação redutiva, de 98% dos grupos hidroxílicos secundários em grupos aminas (Vilar 2004).

As poliaminas mais utilizadas são as diaminas com peso molecular entre 1000 e 4000, que reagem extremamente rápido com os isocianatos formando poliuréias. São utilizadas nos processos em que a velocidade de reação extremamente rápida é desejada, como no processo RIM (moldagem por injeção e reação) e revestimentos elastoméricos aplicados

por spray. As poliaminas apresentam grande reatividade, que não é afetada pela umidade ou temperatura, sem necessidade de catalisadores. As poliuréias obtidas exibem elevadas propriedades mecânicas; durabilidade mesmo em condições ambientais adversas; adesão a diferentes substratos (Vilar, 2004).

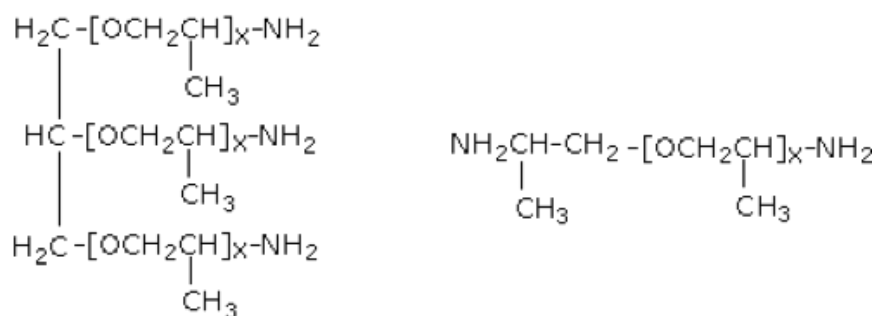


Figura 2.8 - Poliéter aminas

2.5.4.4 Extensores de Cadeia

Os extensores de cadeia ou agentes de cura, e os reticuladores são polióis ou poliaminas de baixo peso molecular utilizados para melhorar as propriedades dos Poliuretanos e Poliuréias. Eles reagem com o diisocianato para formar segmentos rígidos de poliuretano (álcoois) ou de poliuréia (aminas), que podem segregar, resultando em aumento no módulo e da temperatura de transição vítrea. Os segmentos rígidos de poliuréia apresentam maior densidade de ligações cruzadas secundárias (ligações hidrogênio) responsáveis pelas melhores propriedades do poliuretano/uréia (poliuréia Híbrida) e da poliuréia pura (Vilar 2004).

2.5.5 Fabricação das Matérias Primas Base dos Poliuretanos e Poliuréias

As matérias primas base dos elastômeros de poliuretano e poliuréia são os isocianatos e os poliois.

2.5.5.1 Fabricação do pré-polímero de isocianato (Componente A)

Os prepolímeros são geralmente líquidos viscosos, fabricados em batelada em reatores agitados. Inicialmente faz-se a adição a frio do diisocianato e do polioliol, nas proporções previamente determinadas para a obtenção do teor de NCO livre desejado. A reação é conduzida em atmosfera inerte e em ausência de água, na temperatura de no máximo

100°C para evitar a formação de ligações cruzadas alofanato e biureto. Para aumentar a estabilidade do prepolímero durante a estocagem adicionam-se estabilizadores. A presença de diisocianato não reagido aumenta a toxicidade do produto.

Existem diversos tipos comerciais de prepolímeros, fabricados com os diferentes tipos de isocianatos e polióis, possuindo teores de NCO livre, variando desde os mais elevados (20%) utilizados nos sistemas para fabricação de elastômeros microcelulares para solados de sapatos, até os com baixos teores usados em selantes. Para os elastômeros de Poliuretano e Poliuréia, são utilizados um teor de 10 a 15% de NCO.

No caso de aplicação de Poliuréia, a viscosidade dos prepolímeros, que depende da natureza química e do teor de NCO livre, é muito importante tendo em vista que a proporção entre os componentes A e B deve ser de 1:1. Caso haja muita diferença de viscosidade, e tendo em vista que a temperatura da mangueira de aplicação aquece os dois componentes, teremos uma diferença de pressão de bombeamento e conseqüente erro de proporcionamento. Prepolímeros com maior teor de NCO livre possuem menor viscosidade devido ao menor peso molecular, e o efeito solvente do isocianato livre.

2.5.5.2 Fabricação da mistura de resinas (Componente B)

O componente B pode ser obtido com a mistura a frio de resinas hidroxiladas (Poliol poliéteres) com terminações em Amina (poliuréia) ou hidroxila (Poliuretano), ou ambas (Poliuréia Híbridas, Poliuretanos Híbridos) com extensores de cadeia, com terminações em amina, óleos vegetais ou minerais, pigmentos, cargas, entre outros.

2.5.6 Técnicas de Aplicação das Membranas de Poliuretano e Poliuréia

2.5.6.1 Aplicação de Membranas de Poliuretano

Os sistemas elastoméricos de Poliuretano são, em geral, aplicados a frio e com ferramentas simples como rodos, rolos, pincéis, entre outras. Eles podem ser mono-componentes, ou bi-componentes (Vasconcelos et. al 2012).

Os sistemas de impermeabilização com base em poliuretano para tráfego direto, seja por veículos ou pessoas, se caracterizam por serem multi-camadas. Em geral há uma camada

de imprimação com resinas base epóxi ou poliuretânicas, seguida de uma camada base, na sequência outra intermediária, formada por agregados anti-derrapantes, e, finalmente, uma camada superior com propriedades resistentes à ação dos raios UV, maior abrasão e resistência ao rasgo.

Por se tratar de muitas camadas, a aplicação deve ser bem mais criteriosa para o sucesso do sistema. Granato (2014), instrui a metodologia apresentada na Quadro 2.1.

Quadro 2.3 - Metodologia recomendada para a aplicação de membranas de Poliuretano para tráfego veicular (Granato 2014)

Primer	Normalmente recomenda-se a aplicação de um primer para melhor aderência do revestimento.
Camada Base	A seguir é iniciada a aplicação da camada impermeabilizante de “base coat”, após homogeneização, com espessura definida. A aplicação é feita com rodo ou desempenadeira dentada, seguido da aplicação do rolo para melhor distribuição e eliminação de bolhas. Aguardar a cura entre 6 a 24 horas.
Camada Intermediária	<p>No caso de tráfego de veículos, é aplicada uma ou 2 camadas de “coat intermediário”, aspergindo em seguida agregado de malha 30, cobrindo toda a área, retirando o excesso com aspirador após 6 a 24 horas.</p> <p>A metodologia de aplicação do “coat intermediário” pode ser executada de duas formas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Imediatamente a aplicação do poliuretano, aspergir o agregado malha 30 cobrindo toda a área. Aguarde de curado produto, entre 2 a 6 horas, dependendo da temperatura e umidade. Varrer e aspirar para retirar o excesso de agregado. Aplique uma segunda camada de poliuretano sobre toda a área a ser tratada. Imediatamente após a aplicação aspergir o agregado malha 30 em excesso, cobrindo todo o produto. Aguarde a cura do produto 2 a 6 horas. • Imediatamente após a aplicação do poliuretano, aspergir o agregado malha 30 sobre toda a área com o produto ainda fresco. Passe o rolo sobre o sistema ainda fresco garantindo que todo o agregado fique coberto pelo poliuretano. Aguarde a cura de 2 a 6 horas. Aplique a segunda camada do poliuretano sobre toda a área a ser tratada e
Camada Superior	Após 6 horas até 24 horas desde a secagem da camada intermediária. É aplicada a frio com o uso de rolos de pintura.

A figura a seguir tem o objetivo de ilustrar os procedimentos descritos no Quadro anterior.

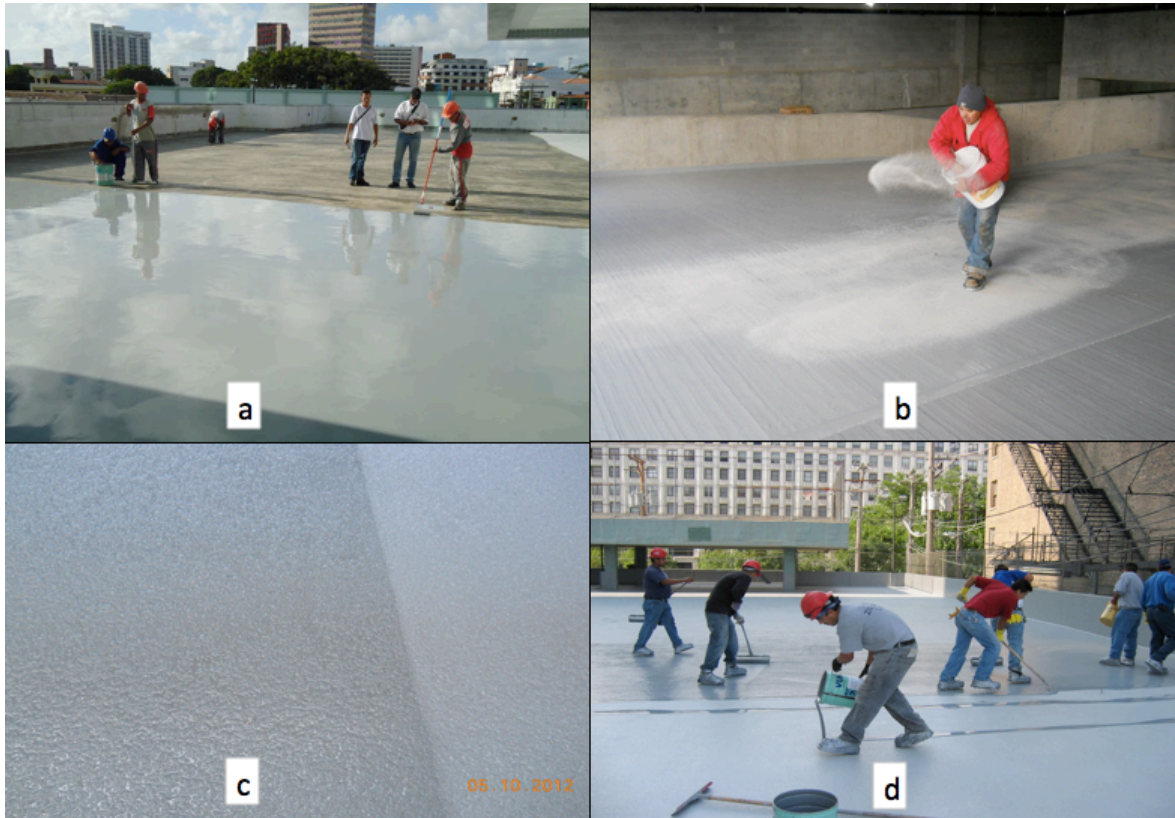


Figura 2.9 - (a) Aplicação de primer e camada base – (b) aspersão de agregado da camada intermediária – (c) selamento da camada intermediária – (d) Aplicação da camada superior - (Granato 2014)

As membranas de poliuretano diferem nas suas propriedades de dureza, alongamento e tensão, dependendo do tipo de tráfego da laje a ser impermeabilizada. Normalmente a camada impermeabilizante de base, chamada de “base coat”, é mais elástica para absorver a movimentação das possíveis fissuras do substrato e as camadas intermediárias e de acabamento são menos elásticas e de maior dureza, para resistir melhor à abrasão (Granato, 2013).

2.5.6.2 Aplicação de Membranas de Poliuréia

A família das poliuréias (puras e híbridas), são aplicadas, em geral a quente (em torno de 70 °C) e numa proporção de 1:1 entre os componentes A (isocianato) e B (mistura de resinas) em altas pressões e com o auxílio de equipamentos bem mais sofisticados.

Os equipamentos podem ser de fluxo contínuo, tal qual ilustrado na figura 2.10, ou por batelada.

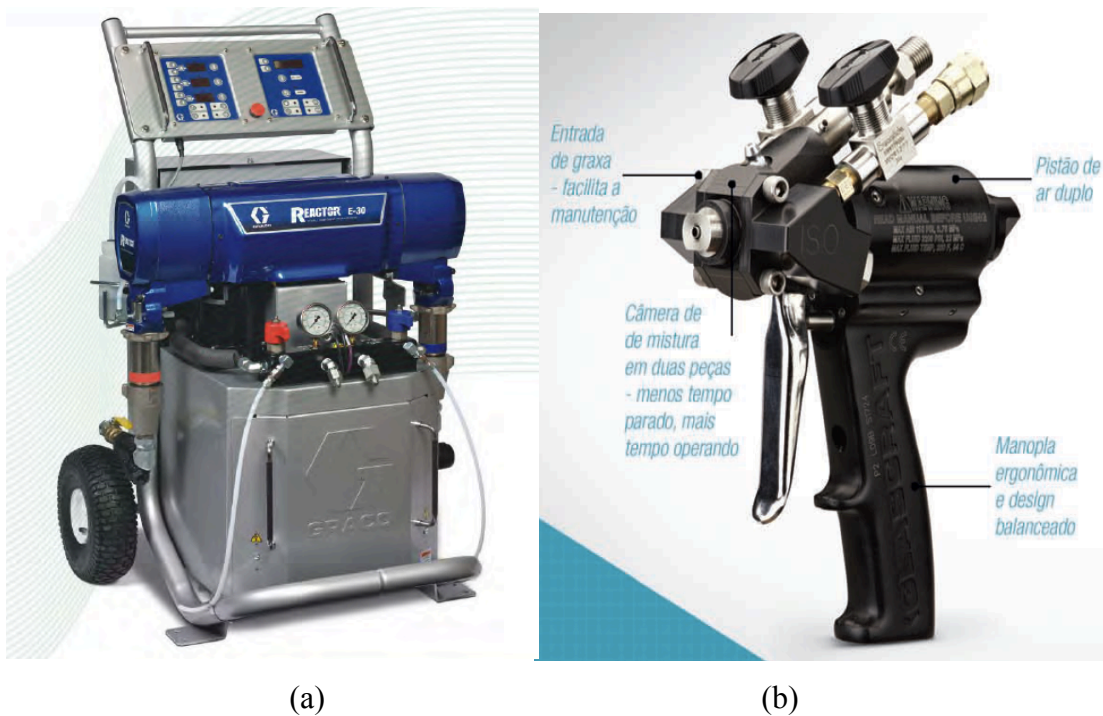


Figura 2.10 - (a) Máquina Aplicadora de Poliuréia modelo EXP2 GRACCO – (b) Pistola de aplicação modelo PROBLER GRACCO (Vasconcelos et. al. 2012)

As aplicações são feitas pela técnica conhecida como “hot-spray” e devido a secagem rápida do material ao toque e cura total rápida (cerca de 24 horas) o sistema possui grande produtividade se comparado com as aplicações tradicionais.

O preparo de superfície deve ser tal que não haja qualquer resquício de material desagregado ou sem resistência superficial. Após o devido lixamento e posterior hidrolavagem, é recomendado a aplicação de primer a base de resina epóxi.

Deve ser previsto o uso de EPI adequado para não haver contato do aplicador com as resinas.

O controle de espessura durante a aplicação é feito por método aproximado, através do controle de consumo de material por área aplicada, ou, em poliuréias de secagem mais lenta, com o uso das cartelas de medição de espessura de filmes. Após a aplicação, pode-se medir a espessura extraindo-se corpos de prova, que são também utilizados para avaliar a resistência de aderência, bem como através de técnica não destrutiva, com o uso de aparelho específico para tal finalidade.(Vasconcelos et. al. 2012)



Figura 2.11 - Aplicação de Membrana de Poliuréia: (a) Aplicação de Primer Base epóxi - (b) Aplicação técnica “hot-spray” – (c) Detalhe pilar metálico aonde seria impossível a impermeabilização com sistemas tradicionais – (d) Resultado final de membrana aplicada. (Vasconcelos et. al. 2012)

As principais recomendações de preparação de superfície e aplicação de poliuréia a quente sintetizadas à partir da norma americana SSPC 14:2013 (Application of Thick Film Polyurea and Polyurethane Coatings to Concrete and Steel Using Plural-Component Equipment) e dos principais fabricantes desse material estão organizadas no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Principais Recomendações para Preparação Superficial e Aplicação de Sistema impermeabilizante a base de Poliuréia.

PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIE	A laje já deve ter sido concretada com uma queda de 1% para os coletores de água.
	Fixar os coletores de água no locais de rebaixo da laje para de modo que não haja empoçamentos de água.
	A superfície deve ser de concreto liso (acabamento polido sem ser vitrificado).
	Caso a superfície de concreto não esteja lisa, utilizar uma lapidadora de concreto com diferentes segmentos de fresagem até que o concreto se torne liso.
	Mesmo que a superfície esteja no acabamento desejado liso, a camada superficial de 1 a 2 mm deve ser removida como uso de uma Politriz.
	Caso não haja queda de 1% para os coletores e não seja possível abrir coletores nos locais de empoçamento de água, será necessário executar um contra-piso em argamassa de cimento e areia na proporção 1:3 para que a queda de 1% seja estabelecida. Esta argamassa também devera ser lixada para que a nata superficial
	Lavar a área para retirar completamente o pó e o material removido pela politriz/lixadeira/lapidadora.
	Esperar secar até que o piso esteja com umidade não superior a 4%.
	Em torno dos coletores, cantos, e demais interferências deve ser aplicado também o mastique de Poliuretano.
	Com o auxílio de uma lixadeira manual, abrir as fissuras existentes na laje, e preenche-las com mastique a base de Poliuretano.
	Os parâmetros verticais devem estar devidamente regularizados com argamassa a base de cimento sem que a mesma apresente desagregação superficial.
	Fixas todas as devidas instalações de SPDA (sistema de proteção de descargas atmosféricas) e demais instalações que ficarão fixas na estrutura de modo que não seja necessário no futuro perfurar a camada impermeabilizante.
As instalações que perfurarem a estrutura ou a camada de regularização de argamassa devem ter seus respectivos locais de fixação preenchidos com selante a base de Poliuretano.	
APLICAÇÃO DA POLIURÉIA	Aplicar primer base epóxi resistente a umidade respeitando o consumo médio de 0,3 kg/m ² . A umidade superficial não deverá ser superior a 5% e deverá ser devidamente medida.
	Após a secagem do primer e com o auxílio de equipamento de aplicação específico e devidamente regulado, aplicar 2,0 kg/m ² de resina a base de poliuréia na cor desejada em passadas cruzadas de modo a atingir o consumo especificado.
	Nos locais aonde foram identificadas regiões de momento fletor negativo, aplicar uma camada mais espessa com 2,0 kg/m ² de resina de Poliuréia.
	Para evitar a formação de bolhas, pode ser necessário a aplicação em duas camadas, que não poderão ser intervaladas em mais de 24 horas.
	Após a aplicação da poliuréia, deverá ser testada a continuidade da membrana formada com o Holiday detector, que é um aparelho de medidor de continuidade de filmes, devidamente ajustado para a espessura planejada.
	Nos pontos aonde o ensaio detectar precipitações (micro-furos), ou descontinuidade do filme formado (fissuras), a região/local deverá ser preenchido com mastique a base de poliuretano e posteriormente ser aplicado jatos de poliuréia nessas regiões para a correção do filme.

2.5.7 Normalização dos sistemas impermeabilizantes a base de Poliuretano e Poliuréia

Existem normas internacionais que tratam da aplicação de membranas impermeabilizantes a base de elastômeros de Poliuretano, tal qual a ETAG 005: 2004 – partes 1 e 6 da EOTA (Organização Européia para Aprovações Técnicas) e a norma nacional NBR 15487:2007. No entanto, uma análise mais profunda destas normas resultará na conclusão que são muito genéricas, limitando-se a apresentar poucos requisitos mínimos a serem atingidos e deixando para cada fabricante apresentar as características, modo de aplicação e outras informações de seu produto.

De acordo com a norma nacional, ABNT NBR 15487:2007 são os seguintes requisitos mínimos que as membranas de poliuretano devem atingir:

Quadro 2.5 - Requisitos de desempenho da Membrana da Poliuretano sem Estruturantes (NBR 15487:2007)

Ensaio	Unidade	Parâmetros	Método de Ensaio
Resistência à Tração	MPa	2,0	NBR 7462
Alongamento na ruptura	%	50	NBR 7462
Deformação Permanente Máxima	%	20	NBR 1005
Resistência ao rasgo	kN/m	2,0	ASTM D-624
Flexibilidade a Baixa Temperatura (-5°C)	-	Atende	NBR 9952
Dureza Shore A	-	60-90	NBR 7456
Escorrimento (120°C)		Atende	NBR 9952
Tração e alongamento após intemperismo – 500 h - Perda Máxima	%	25%	ASTM G-154
Flexibilidade a Baixa Temperatura (5°C) após envelhecimento acelerado (4 semanas a 80°C)	-	Atende	NBR 9952
Determinação de resistência de aderência à tração - mínima	MPa	0,3	NBR 13528

Com relação aos elastômeros de Poliuréia, existem algumas normas internacionais sobre o tema, mas a norma nacional esta em fase de confecção com previsão de entrar em consulta nacional no ano de 2015.

A SSPC, entidade americana fundada em 1950 com o nome de Conselho de Pinturas de Estrutura de Aço e que teve seu nome alterado para Sociedade de Revestimentos de

Proteção em 1997, tendo em vista a entrada de novas tecnologias de revestimento, editou a norma “*Coating Standard No. 45 - Two-Component, Thick-Film Polyurea and Polyurea/Polyurethane Hybrid Coatings, Performance-Based*” (Norma de Revestimento número 45 – Requisitos de Performance de revestimentos finos de poliuréis e híbridos de poliuréia/poliuretano), que é atualmente a norma mais moderna sobre o tema, tendo sido publicada em dezembro de 2013.

Este documento está sendo utilizado como base para a redação da norma nacional, e é bem completo no que diz respeito a citar requisitos de desempenho, critérios de aplicação e preparo de superfície, tipificações, recomendações de espessura, definições entre outras informações.

De acordo com a norma SSPC 45, as poliuréis são divididas em função do seu tempo de reação e sua composição química:

Tabela 2.2 - Classificação das Poliuréis em Função da Composição Química e Tempo de Cura (SSPC 45)

Tecnologia	“Não Bloqueados” (pega livre rápida) Tempo ≤ 2 minutos	“Bloqueados” (pega livre moderada) Tempo > 2 minutos e < 30 minutos
Sistema Poliuréia	Tipo 1a	Tipo 1b
Sistema Híbrido Poliuréia/Poliuretano	Tipo 2a	Tipo 2b

Ainda de acordo com a norma SSPC 45, os critérios mínimos requeridos para uma membrana de poliuréia são os citados nas Tabelas 2.3 e 2.4.

Tabela 2.3 - Critérios de Desempenho Mínimo de Poliuréias não imersas (SSPC 45).

EXPOSIÇÃO DO TESTE	NÍVEL DE PERFORMANCE	TEMPO DE EXPOSIÇÃO	MÉTODO ASTM	CRITÉRIO MÍNIMO
Envelhecimento	Nível 1	2000 hs	G 154	Nenhuma das propriedades físicas listadas nessa Tabela poderá ter uma redução maior que 50% após submetida ao intemperismo artificial.
	Nível 2	3000 hs		
PROPRIEDADES TESTADAS				
Dureza usando tipo M, teste com espessura da amostra de 1270± 381 micrometro			D2240 Shore A ou Shore D	Valor mínimo de 75 A ou 40 D, o menor dos dois.
Resistência a solventes ou à água (conforme especificado)			D6943	Nenhum amolecimento. Redução de dureza máxima de 8A ou 5D, o maior dos dois.
Resistência a solvente (solvente especificado)			D471	Máximo de 10 por cento de mudança na massa / 15 por cento de variação do volume.
Resistência à tração na espessura da amostra de 1.270± 381 micrômetros (50 ± 15 mils) ou conforme especificado			D638	Tipo IV ou D412 Die C(2) Mínimo 8,3 Mpa (1200 psi)
Força de Rasgamento (Die C rasgo) a espessura da amostra de 1.270 ± 381 micrômetros (50 ± 15 mils)			D624	Mínimo 43,75 kN/m (250 pli)
Alongamento à espessura da amostra de 1270± 381 micrometers (50 ± 15 mils)			D638 Tipo IV ou D412 Tipo C	Mínimo de 100 por cento para as aplicações em substratos de concreto onde poderão ocorrer fissuramento e sobre áreas de movimento de costura em substratos de aço no mínimo 50 por cento para aplicação em substratos metálicos sólidos.
Encolhimento linear na cura			D6289, modificado	Em substratos sólidos menos de um por cento.
Resistência a abrasão			D4060	Perda de peso inferior a 250 mg (H-18 ciclos) (depende da aplicação / exposição).
Permeabilidade (espessura da amostra deve ser a mesma do revestimento aplicado para o projeto) SOMENTE SUBSTRATOS DE CONCRETO			E96	Para aplicações não imersa menos de 0.75 perms Para aplicações Imersas, menos de 0.10 perms .
Adesão (aço, imersão ou não imersão)			D4541, Métodos D, E, ou F	Iguais ou superior a 6,8 MPa (1000 psi) nos 3 corpos de prova.
Adesão (concreto)			D7234	Média de 3 trações são iguais ou superior a 2,0 MPa (300 psi) ou com igual ou maior do que 50 por cento de falha do substrato em cada uma das três repetições.
				2 trações, cada um, igual ou maior do que 2,0 MPa (300 psi) com igual ou maior de 50 por cento de falha de substrato em cada uma das três repetições.
				1 tração igual ou superior a 1,7 MPa (250 psi) com igual ou maior do que 50 por cento falha substrato em cada uma das três repetições.

Tabela 2.4 - Critérios de Desempenho Mínimo de Poliuréias sob imersão (SSPC 45).

PROPRIEDADES TESTADAS	MÉTODO ASTM	CRITÉRIO MÍNIMO
Dureza Retenção [Método ASTM D6943 A, durante 30 dias a 25°C (77°F)]	D2240, Shore A ou Shore D	Redução máxima dureza maior de 8A ou 5D.
Adesão ao revestimento aplicado anteriormente (imersão ou não imersão)	D4541, Métodos D, E, ou F (aço) D7234 (concreto)	Deve ser igual ou maior do que a força de aderência do revestimento ao substrato original usando mesmo método de ensaio ASTM.
Resistência à formação de bolhas, ASTM D6943 método B1 ou D471 ASTM (quando especificado) por 30 dias no mínimo.	D714	Classificação de "0" (sem formação de bolhas) em qualquer um dos três painéis.
Resistência à massa e a mudança de volume após 7 dias de exposição a 25°C (77°F) (imersão)	D471	Nenhum espécime deve apresentar uma mudança de massa superior a 10 por cento ou uma mudança de volume superior a 15 por cento.
Tempo de gel (obter estado sólido)		
Tipo 1a ou 2a (Cura rápida): Tipo 1b 2b ou revestimento (Cura moderada):	D1640	Menos de 2 minutos Menos de 30 minutos

No entanto, tal qual para norma brasileira de membranas de Poliuretano (NBR 15487), vale a ressalva de que, o fato de uma membrana de poliuréia atingir os requisitos de norma, não significa que a mesma será adequada para uma determinada aplicação demandada, é necessário conhecer o desempenho de cada produto devidamente aplicado para tal.

Na Figura 2.12 mostra-se uma camada de revestimento impermeabilizante com 2 mm de poliuréia, que apesar de ter alcançado nos ensaios de caracterização cerca de 120% de alongamento e 13,0 MPa de resistência à tração na ruptura, tendo, portanto, superado os critérios mínimos de desempenho mecânico, segundo a norma americana SSPC 45, não resistiu a deformação da base estrutural a qual estava aplicado e apresentou fissuração. A fissuração da membrana se deu após cerca de 6 meses do sistema impermeabilizante aplicado. Essa figura foi obtida na obra citada como exemplo na seção 1.1.



Figura 2.12 - Fissura em camada de revestimento impermeabilizante a base de Poliuréia em laje de trânsito de veículos. (Vasconcelos, 2012)

Apresenta-se, portanto, na seção seguinte, o programa experimental que, de acordo com os objetivos apresentados na introdução desse trabalho, pretende investigar as correlações entre os critérios mínimos de desempenho mecânico estipulados pelas normas dos sistemas impermeabilizantes a base de poliuréia e poliuretano e os respectivos comportamentos destes sistemas devidamente aplicados sobre lajes estruturais.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa foi dividido em três etapas:

- Seleção de materiais objetos da análise laboratorial.
- Ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos materiais selecionados.
- Ensaios de desempenho dos sistemas impermeabilizantes, compostos pelos materiais selecionados para esta pesquisa, devidamente aplicados em lajes e primas de concreto.

Após a obtenção dos resultados, serão realizadas análises buscando correlações entre as propriedades mecânicas dos materiais e dos respectivos comportamentos de seus sistemas impermeabilizantes.

Na figura 3.1 ilustram-se os processos citados.



Figura 3.1 - Fluxo do programa experimental

3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS E DEFINIÇÃO DOS SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES

Conforme já citado no capítulo anterior, sistemas impermeabilizantes são um conjunto de camadas ordenadas com o objetivo de impedir a passagem de fluidos indesejáveis através de uma superfície em que se deseja estanqueidade. Portanto, para a condução do programa experimental, inicialmente foram selecionados os materiais que iam compor os sistemas impermeabilizantes.

3.1.1 Seleção dos materiais e membranas que compõe os sistemas impermeabilizantes.

Para a seleção dos materiais e membranas a serem pesquisados foi feito uma busca no mercado sobre os elastômeros de poliuréia e poliuretano disponíveis e foi adotado como critério principal de escolha como sendo a maior diversificação possível no que diz respeito às características técnicas desses produtos aliado à aceitação dos mesmos na comunidade técnica.

Ou seja, buscou-se produtos que conseguissem a maior variação possível dentro espectro de valores de referência de alongamento, resistência à tração, resistência ao rasgo, dureza, resistências à abrasão e composição química.

3.1.1.1 Seleção das membranas de poliuréia

Foram escolhidas 4 famílias de poliuréias com características distintas com o objetivo de se ter uma maior representatividade do universo de produtos que são comercializados no Brasil.

Quadro 3.1 – Poliuréias selecionadas para a pesquisa (Bauer e Vasconcelos, 2014)

MEMBRANA SELECIONADA	TIPO DE APLICAÇÃO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	ELASTICIDADE	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E AO RASGO	DUREZA
POLIURÉIA 1	À QUENTE	HÍBRIDA	ALTO ALONGAMENTO	MÉDIA	MÉDIA
POLIURÉIA 2	À QUENTE	PURA	ALTO ALONGAMENTO	MÉDIA	MÉDIA
POLIURÉIA 3	À QUENTE	HÍBRIDA	BAIXO ALONGAMENTO	ALTA	ALTA
POLIURÉIA 4	À FRIO	HÍBRIDA	BAIXO ALONGAMENTO	BAIXA	MÉDIA

3.1.1.2 Seleção das membranas de poliuretano

Com relação aos poliuretanos, foram selecionados 2 tipos de membranas, sendo que a primeira delas é constituída de três camadas de poliuretanos distintos e a outra constituída por uma única camada de um poliuretano de origem vegetal. Ambos os materiais são amplamente utilizados no mercado brasileiro da construção civil.

No quadro 3.2 esta resumido as principais características de cada membrana selecionada.

Quadro 3.2 – Valores de referência de algumas propriedades dos poliuretanos selecionadas para a pesquisa (Granato, 2014)

Membrana Selecionada		Teor de sódios	Resistência à Tração na ruptura	Alongamento	Dureza Shore A
Membrana Multicamadas de Poliuretano	Camada de base	90-92%	3,0 – 3,2 MPa	600-700%	50-60
	Camada Intermediária	82%	5,2 MPa	90%	60-70
	Camada Superior	72%	22 MPa	120%	85-95
Membrana de Poliuretano de Origem Vegetal		99%	4,0 MPa	70%	70

3.1.1.3 Seleção dos materiais impermeabilizantes tradicionais

A título comparativo e com o objetivo de enriquecer o estudo, além dos materiais citados, foram selecionados uma membrana elastomérica de base acrílica, de largo consumo no mercado de construção não profissional aplicada sem o uso de estruturantes e uma manta asfáltica por ser o material mais utilizado como sistema impermeabilizante no segmento técnico de obras (Vasconcelos et. al. 2012).

As principais características da manta asfáltica supra-citada estão organizadas no Quadro 3.3

Quadro 3.3 – Características da manta asfáltica utilizada na pesquisa

Material Selecionado	Espessura	Classificação pela NBR 9972:2007	Alongamento
Manta Asfáltica	4 mm	Tipo III - B	30%

Em relação à membrana acrílica selecionada, o respectivo fabricante não fornece os valores de referência em relação ao alongamento, resistência à tração na ruptura e dureza do seu produto.

3.1.2 Definição dos sistemas impermeabilizantes a serem pesquisados

Os sistemas impermeabilizantes podem conter várias camadas de membranas e materiais impermeabilizantes, imprimações, camadas de regularização de caimentos, camadas de proteção mecânica, camadas separadoras entre outras (Bauer et. al. 2007).

Nessa pesquisa foram selecionados 14 sistemas a terem seus respectivos comportamentos estudados.

Os primeiros sistemas selecionados foram constituídos pelas membranas de poliuréia aplicadas sobre camada de imprimação base epóxi aplicados sobre base de concreto.

Com o objetivo de pesquisar a importância da imprimação base epóxi no desempenho dos sistemas pesquisados, foram definidos alguns sistemas com as membranas, objeto dessa pesquisa, sem a aplicação primer base epóxi, portanto, diretamente no concreto e outros aplicados devidamente sobre a camada de imprimação base epóxi.

Com o objetivo de estudar uma interação entre membranas, unindo a capacidade de absorver fissuras e movimentações do substrato de concreto, com a elevadas resistência à abrasão e ao rasgo, foram moldados sistemas híbridos compostos de duas camadas de membranas distintas, sendo a primeira membrana composta pela camada base do

poliuretano para tráfego veicular e a segunda sendo constituída pelas famílias de poliuréis aplicadas a quente.

O primeiro sistema de poliuretano selecionado é composto por várias camadas, sendo a camada base, com maior espessura, um poliuretano aromático chamado de “*base coat*”, uma camada intermediária chamada de “*middle coat*” na qual é aspergido um agregado anti-derrapante e uma camada superior chamada de “*top coat*” sendo a mesma uma membrana fina de poliuretano alifático resistente aos raios U.V. Este sistema multicamadas foi escolhido por ter ampla aceitação no mercado técnico e ser indicado locais com tráfego veicular.

Os dados das principais propriedades mecânicas, de acordo com Granato (2014) estão organizadas na tabela seguinte.

Quadro 3.4 - Características de cada camada que compõe o sistema de membrana de poliuretano para tráfego veicular (Granato, 2014).

Propriedade	Método de teste	Membrana de Poliuretano da Camada de base	Membrana de Poliuretano da Camada Intermediária	Membrana de Poliuretano da Camada Superior
Teor de sódios	ASTM D1353	90-92%	82%	72%
Secagem 24°C, URA 50%	ASTM D 1640	e = 760 micra 8 a 12 horas	e = 380 micra 2 horas	e = 250 micra 24 horas
Tensão	ASTM D 412	3,0 – 3,2 MPa	5,2 MPa	22 MPa
Alongamento	ASTM D 412	600-700%	90%	120%
Resistência Abrasão 1000 ciclos	ASTM D4060	N/A	N/A	100 mg
Dureza Shore A	ASTM C 2240	50-60	60-70	85-95
Permeabilidade	ASTM E 96(B)	N/A	N/A	2,0 perms
Resistencia ao intemperismo	ASTM D 822 350 horas	N/A	N/A	Sem alteração
Envelhecimento Acelerado	ASTM D 573	Sem perda no alongamento ou na tensão	Sem perdas no alongamento ou tensão	Sem perdas no alongamento ou tensão
Aderência	ASTM D4541	2,75 MPa	N/A	N/A

O segundo sistema impermeabilizante a base de poliuretano se trata de uma membrana de uma cadeia química aromática e de origem vegetal, aplicado em apenas uma camada, no entanto, não seria indicado para tráfego veicular. Para aumentar sua resistência à tração, sua aplicação pode vir acompanhada de um estruturante como uma tela de poliéster, que

não foi utilizada nessa pesquisa para que os resultados obtidos fossem apenas do produto e não do produto estruturado.

Por fim foram definidos os sistemas baseados nos materiais tradicionais citados na seção 3.1.1.3 deste trabalho com o objetivo de ilustrar e comparar com os sistemas impermeabilizantes a base de elastômeros de poliuréia e poliuretano, foco principal dessa pesquisa.

Portanto, tem-se os seguintes sistemas impermeabilizantes objetos dessa pesquisa organizados na tabela à seguir.

Quadro 3.5 - Sistemas impermeabilizantes objetos desta pesquisa.

MATERIAL PRINCIPAL DO SISTEMA		SISTEMA PESQUISADO	CÓDIGO DA PESQUISA	CAMADAS DO SISTEMA IMPERMEABILIZANTE	TÉCNICA DE APLICAÇÃO	ESPESSURA DESEJADA PARA O ESTUDO
NUMERO	DESCRIÇÃO					
1	POLIURÉIA HÍBRIDA APLICADA A QUENTE COM ALTO ALONGAMENTO	1	1A	PRIMER + POLIURÉIA 1	EQUIPAMENTO PLURAL	2 mm
		2	1B	POLIURÉIA 1 APLICADA SOBRE CONCRETO SEM PRIMER	EQUIPAMENTO PLURAL	2 mm
		3	1C	PRIMER + CAMADA BASE EM POLIURETANO + POLIURÉIA 1	EQUIPAMENTO PLURAL E DESEMPENADEIRA	3 mm
2	POLIURÉIA PURA APLICADA A QUENTE COM ALTO ALONGAMENTO	4	2A	PRIMER + POLIURÉIA 2	EQUIPAMENTO PLURAL	2 mm
		5	2B	POLIURÉIA 2 APLICADA SOBRE CONCRETO SEM PRIMER	EQUIPAMENTO PLURAL	2 mm
		6	2C	PRIMER + CAMADA BASE EM POLIURETANO + POLIURÉIA 2	EQUIPAMENTO PLURAL E DESEMPENADEIRA	3 mm
3	POLIURÉIA HÍBRIDA APLICADA A QUENTE COM BAIXO ALONGAMENTO	7	3A	PRIMER + POLIURÉIA 3	EQUIPAMENTO PLURAL	2 mm
		8	3B	POLIURÉIA 3 APLICADA SOBRE CONCRETO SEM PRIMER	EQUIPAMENTO PLURAL	2 mm
		9	3C	PRIMER + CAMADA BASE EM POLIURETANO + POLIURÉIA 3	EQUIPAMENTO PLURAL E DESEMPENADEIRA	3 mm
4	POLIURETANO	10	4A	MULTICAMADAS DE MEMBRANAS DE POLIURETANO	ROLO + DESEMPENADEIRA METÁLICA	2 mm
5	POLIURÉIA HÍBRIDA APLICADA A FRIO	11	5A	PRIMER + POLIURÉIA FAMÍLIA 5	ROLO	2 mm
6	POLIURETANO ORIGEM VEGETAL	12	6A	POLIURETANO A FRIO DE PRIGEM VEGEAL	ROLO	1,5 mm
7	ACRÍLICO	13	7A	MEMBRANA ACRÍLICA	ROLO	1 mm
8	ASFALTO	14	8A	MANTA ASFÁLTICA TIPO III B	MAÇARICO	4 mm

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção serão descritos os materiais e metodologias dos ensaios realizados no programa experimental.

3.2.1 Corpos de Prova

3.2.1.1 Corpos de Prova dos Ensaios de Caracterização das Membranas Elastoméricas

Para a execução dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas, foi necessário moldar as membranas de cada sistema. Para tal, foram utilizados como substrato para receber a moldagem das membranas, placas de porcelanato de dimensões 60 cm × 60 cm, com desmoldante aplicado sobre a face polida.

Todas as membranas foram aplicadas de acordo com a metodologia e as recomendações de seus respectivos fabricantes.

As membranas dos sistemas 1A, 2A, 3A, foram aplicadas sobre a placa de porcelanato a quente com o equipamento EXP2 de fabricação da GRACCO numa temperatura de 65°C e pressão de trabalho de 2500 psi com espessuras variando-se entre 1,5 e 2,0 mm.

As demais membranas foram aplicadas a frio com o uso de rolo de lã de carneiro de pelo curto e desempenadeira metálica.

Assim, após a cura de cada membrana a mesma era retirada facilmente do substrato. Uma vez que as membranas eram desmoldadas, as mesmas eram codificadas e armazenadas até o dia dos ensaios.

Para os ensaios de caracterização, os corpos de prova foram estampados no formato específico requerido cada norma utilizada. Para tal, foi utilizado uma prensa hidráulica e facas no formato de cada corpo de prova, que eram pressionadas pela prensa contra as membranas, cortando as mesmas no formato desejado conforme pode ser observado na figura 3.2.

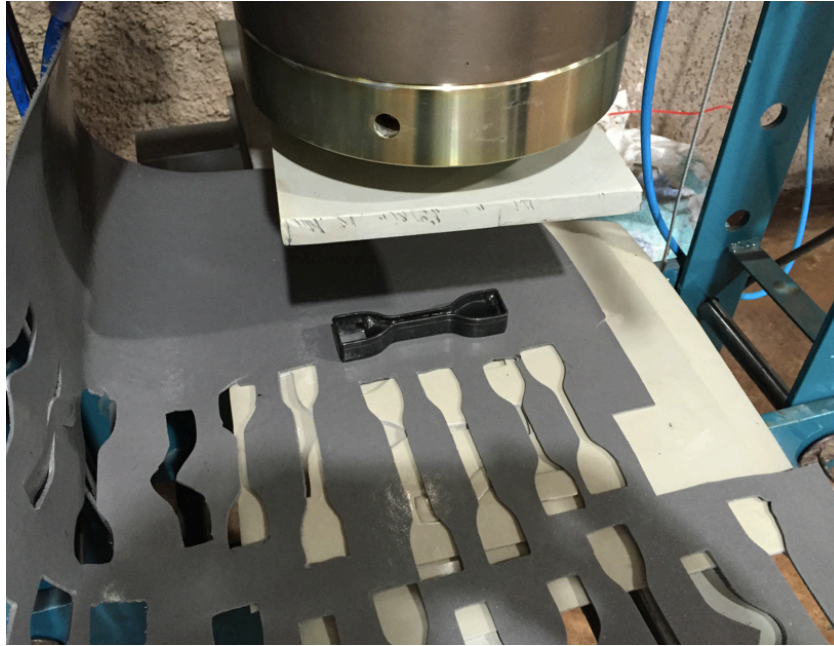


Figura 3.2 – Processo de estampagem dos corpos de prova com o auxílio de uma faca e da prensa hidráulica

3.2.1.2 Corpos de Prova dos Ensaios de Desempenho dos Sistemas Aplicados

Para os ensaios de avaliação do comportamento dos sistemas aplicados, foram moldados prismas e lajes de concreto.

Os prismas foram moldados em formas de madeira com dimensões de $16 \times 4 \times 2$ cm de concreto usinado de f_{ck} 30 MPa.

As lajes de concreto armado, de dimensões de $200 \times 50 \times 7$ cm, cujo dimensionamento está disponível no apêndice do presente trabalho, foram moldadas do mesmo concreto dos primas citados anteriormente na mesma ocasião, conforme pode ser verificado através de figura 3.3.



Figura 3.3 – Preparação das formas das lajes para a concretagem.

As lajes e primas receberam a aplicação dos sistemas impermeabilizantes relacionados no quadro 3.5 somente após 90 dias após a suas respectivas concretagens.

As lajes e prismas, receberam uma imprimação de uma resina base epóxi sem cargas com tempo de secagem de 8 horas, tempo de gel de 60 minutos e dureza 65 na escala shore D. Com exceção das lajes e primas que receberam os sistemas (1B, 2B, 3B, 6A, 7A, e 8A).

Parte dos corpos de prova receberam a aplicação da camada de base do poliuretano multicamadas através de uma desempenadeira metálica para a aplicação dos sistemas (1C, 2C, 3C e 4A)

Tal qual na preparação dos corpos de prova para os ensaios de caracterização, as membranas dos sistemas de poliuréia 1A, 2A, 3A, foram aplicadas na laje a quente com o equipamento EXP2 de fabricação da GRACCO numa temperatura de 65^oC e pressão de trabalho de 2500 psi com espessuras variando-se entre 1,5 e 2,0 mm.

Para efeito ilustrativo, seguem algumas fotos da confecção dos corpos de prova na figura 3.4.



Figura 3.4 - (a) Corpos de prova recebendo aplicação dos sistemas impermeabilizantes, (b) Vista geral das lajes que receberam a aplicação dos sistemas impermeabilizantes, (c) Lajes de concreto armado recebendo as membranas do programa experimental, (d) Piso de concreto recendo os sistemas que serão submetidos ao teste de abrasão por pneus.

3.2.1.3 Envelhecimento acelerado dos corpos de prova

Com o objetivo de aproximar os resultados de laboratório com a situação real de serviço, na qual os sistemas impermeabilizantes ficam sujeitos ao desgaste por envelhecimento, os corpos de prova, tanto dos ensaios de caracterização como os dos ensaios de desempenho foram submetidos a processos de envelhecimento acelerado.

No primeiro deles, os corpos de prova dos ensaios de caracterização das membranas foram colocados dentro de um equipamento chamado de QUV (Figura 3.5), aonde foram submetidos ao ciclo tipo 3 da ASTM G154, que consiste em permanecer por 8 horas a 70°C com exposição à radiação U.V.B. e 4 horas em condensação a 50°C . Os sistemas, objetos dessa pesquisa, foram ensaiados com 500 horas e com 1000 horas de envelhecimento nesse ciclo.



Figura 3.5 - Aparelho de QUV utilizado nos ensaios de envelhecimento acelerado pela ASTM G154 dos corpos de prova das membranas dos sistemas impermeabilizantes

Como efeito ilustrativo, é possível na figura 3.6 notar a diferença no aspecto visual dos corpos de prova que não foram (esquerda) e que foram (direita) submetidos ao processo envelhecimento acelerado, referido no parágrafo anterior.

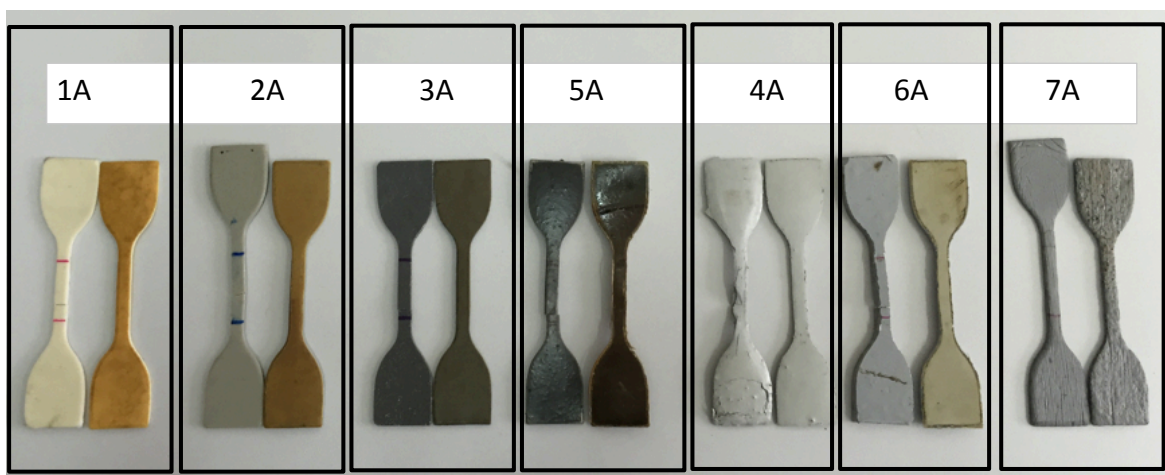


Figura 3.6 – Situação antes e depois do processo de envelhecimento acelerado com o aparelho Q.U.V.

Tendo em vista que esse equipamento não comporta objetos de grande porte, foi montado uma estufa aonde os corpos de prova (lajes, primas e as membradas) foram depositados a uma distância de 20 cm de lâmpadas de radiação UVB que são as mesmas utilizadas no equipamento QUV supra citado, pelo período de 500 horas.

Não houve ajuste de temperatura para este ensaio, apenas medição da mesma que variou de 28 a 30°C .



Figura 3.7 - Estufa de envelhecimento acelerado com aplicação de radiação UVB.

Nesse trabalho, os tipos de envelhecimento serão referenciados de acordo com a tabela seguinte.

Tabela 3.1 - Descrição do ensaios de envelhecimento acelerado

CÓDIGO	DESCRIÇÃO
L.U.V. 500	ENVELHECIMENTO NA ESTUFA DE LÂMPADAS DE U.V.B. POR 500 HORAS
Q.U.V. 500	ENVELHECIMENTO NO APARELHO DE Q.U.V. DE ACORDO COM O CICLO 3 DA ASTM G154 POR 500 HORAS
Q.U.V. 1000	ENVELHECIMENTO NO APARELHO DE Q.U.V. DE ACORDO COM O CICLO 3 DA ASTM G154 POR 1000 HORAS

Nessa pesquisa, os corpos de prova que não foram envelhecidos, foram ensaiados com idades variando entre 30 e 40 dias.

3.2.2 Ensaios de Caracterização das Membranas dos Sistemas Impermeabilizantes

Para o melhor entendimento dos sistemas pesquisados, foram executados os principais ensaios mecânicos de caracterização de membranas indicados nas normas de referência de requisitos mínimos de desempenho, SSPC 45 (poliuréia) e da NBR 15487:2007 (poliuretano). Os ensaios foram realizados no laboratório da BRASPREFER em Brasília DF.

3.2.2.1 Resistência à tração na ruptura – ASTM D412

Com o auxílio da máquina universal modelo AME 5, de fabricação da OSWALDO FILIZZOLA, com capacidade de carga máxima de 5 kN, foram executados os ensaios numa velocidade de tração de 500 mm / minuto, com o corpo de prova tipo D.

A resistência à tração é fornecida em MPa e é obtida pela divisão da carga máxima de ruptura pela área da seção central do corpo de prova.



Figura 3.8 - (a) AME5 – Máquina Universal de Ensaio – (b) Corpo de Prova tipo D ASTM D412 (dezembro 2014)

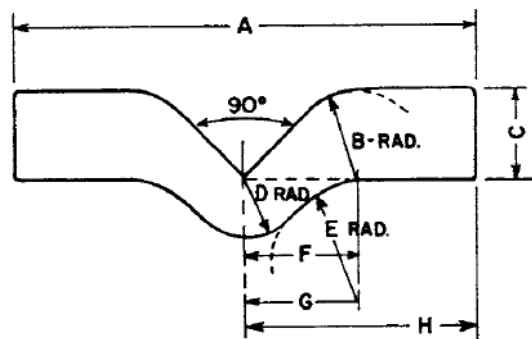
3.2.2.2 Alongamento da Ruptura - ASTM D412

O mesmo ensaio citado, baseado na norma ASTM D412, utilizando o equipamento da figura 3.5 acoplado a um extensômetro, fornece também o alongamento máximo na ruptura. O alongamento medido em porcentagem é obtido dividindo-se o deslocamento final do trecho central do corpo de prova por 25 mm que é o tamanho inicial deste trecho, devidamente identificado por marcas, como pode ser verificado na figura anterior.

3.2.2.3 Resistência ao Rasgo – ASTM D624

Com o auxílio do mesmo equipamento, contudo utilizando-se do método da norma ASTM D624 com o corpo de prova tipo C, conforme figura seguinte, foi possível determinar a resistência ao rasgo das membranas.

Este ensaio consiste basicamente na aplicação de carga de tração num corpo de prova com sua seção induzida ao rasgo. Divide-se a carga total pela espessura da membrana e tem-se o resultado em N / mm (Newtons por milímetro).



TIPO C

Dimensão	Milímetros		Polegadas	
	Valor	Tolerância	Valor	Tolerância
A	102	±0.50	4.0	±0.02
B	19	±0.05	0.75	±0.002
C	19	±0.05	0.75	±0.002
D	12.7	±0.05	0.5	±0.002
E	25	±0.05	1.0	±0.002
F	27	±0.05	1.061	±0.002
G	28	±0.05	1.118	±0.002
H	51	±0.25	2.0	±0.01

Figura 3.9 - Corpo de prova tipo C da ASTM D624

3.2.2.4 Resistência à Abrasão – DIN ISO 4649:2006

Para a determinação da resistência à abrasão, foi tomada como base a norma DIN ISO 4649:2007, que é o ensaio mais utilizado no Brasil para esse tipo de avaliação. Para tal foi utilizado o abrasímetro de polímeros de fabricação da MAQTEST.

Este ensaio constitui basicamente da aplicação de um peso de 5N sobre um corpo de prova circular contra uma lixa padrão com seu fator de lixa devidamente aferido. Este corpo de prova percorrerá toda a extensão da lixa numa velocidade padrão, enquanto esta faz o movimento de rotação.

De acordo com a norma de referencia, deve-se utilizar uma lixa que gere uma perda de massa no corpo de prova de referencia de borracha padrão na faixa de 220 mg a 180 mg.

Depois de cada série testada, foi obtido esse valor de massa perdida para os devidos cálculos.

A perda de volume relativo em mm^3 é dada pela equação à seguir:

$$\Delta V_{rel} = \frac{\Delta m_t \times \Delta m_{const}}{\rho_t \times \Delta m_r} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

- Δm_t Variação de massa da membrana testada em mg
- Δm_{const} Variação de massa da borracha de referencia (200 mg)
- Δm_r Variação de massa da borracha de referencia aferida em mg
- ρ_t densidade da membrana testada

O índice de resistência à abrasão, que é a relação entre a perda de volume da borracha de referência e a perda de volume da membrana testada, dentro das mesmas condições, é dado pela equação à seguir:

$$IRA = \frac{\Delta m_r \times \rho_t}{\Delta m_t \times \rho_r} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

- Δm_t Variação de massa da membrana testada em mg
- Δm_r Variação de massa da da borracha de referencia aferida em mg
- ρ_r densidade da borracha de referência
- ρ_t densidade da membrana testada

Para efeito de executar as comparações com os ensaios realizados de abrasão sobre pneus, será anotado também a perda de espessura e a perda de massa, todos devidamente corrigidos pelo fator da lixa, dado pela equação à seguir:

$$Fator da Lixa = \frac{\Delta m_r}{\Delta m_{const}} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

- Δm_r Variação de massa da da borracha de referencia aferida em mg
- Δm_{const} Variação de massa da borracha de referencia (200 mg)

Para a execução das pesagens iniciais e finais dos corpos de prova, foi utilizada a balança de precisão de 0,0001g de fabricação GEHAKA modelo GM200.



Figura 3.10 - (a) Balança de precisão e abrasímetro de polímeros – (b) Corpos de prova do ensaio de abrasão segundo a DIN ISO 4649

3.2.2.5 Dureza Shore A

A medição da dureza da membrana na escala SHORE A foi obtida com o auxílio de um durômetro, ilustrado na figura 3.11. O princípio desse ensaio é a contra-pressão que uma membrana de elastômero exerce no equipamento quando este imprime na membrana uma pressão através de uma ponta de aço. A Norma que balisa este ensaio é a ASTM D2240-05:2010

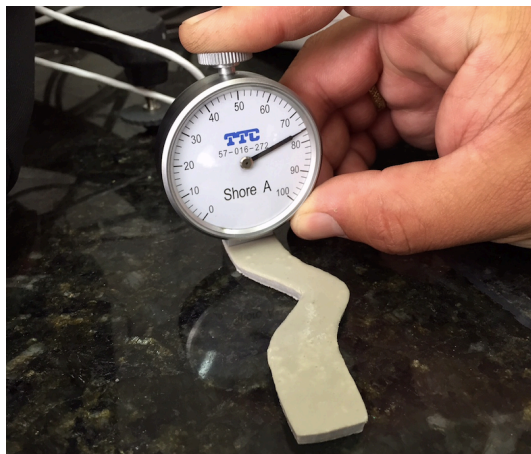


Figura 3.11 - Durômetro escala SHORE A

3.2.3 Ensaios de Desempenho dos Sistemas Impermeabilizantes Aplicados

Algumas das principais patologias de sistemas impermeabilizantes constituídos de membranas elastoméricas aplicados em lajes são:

- Desgaste por abrasão
- Fissuração
- Delaminação de camadas
- Perda de aderência ao substrato
- Envelhecimento e perda precoce de propriedades mecânicas

A terceira parte do programa experimental tem como objetivo reproduzir em laboratório solicitações mecânicas que ocorrem em lajes de tráfego veicular. Para tal foram desenvolvidos ensaios de desempenho, que visam a reprodução das patologias supracitadas, e que serão descritos à seguir.

3.2.3.1 Ensaio de Flexão de Lajes

As membranas elastoméricas de Poliuretano e Poliuréia tem uma série de vantagens sobre vários sistemas impermeabilizantes, como por exemplo o fato de não possuírem emendas, conforme foi descrito no capítulo 2; no entanto, pelo fato destas serem, em geral, totalmente aderidas ao substrato, suas principais patologias estão relacionadas com o aparecimento de fissuras, quando as lajes, sobre a qual estão aplicadas, são submetidas à trabalho, seja por ação de deformação estrutural, seja por ação térmica cíclica.

Para simular essa situação em laboratório, foram moldadas lajes (dimensões 200 cm × 50 cm × 7 cm), sobre as quais foram aplicados os sistemas objeto desta pesquisa. Não foram aplicados os sistemas 5A, 6A e 7A e 8A, conforme Quadro 3.5, tendo em vista que se tratam de sistemas que já não seriam indicados pelos fabricantes para lajes de grandes dimensões.

Neste ensaio, as lajes foram submetidas a uma deformação até uma flecha máxima de 3,5% ou 70 mm, com o auxílio de uma prensa hidráulica com capacidade de 30 t, e foram anotadas a abertura das fissuras na laje de concreto (pela lateral) com o auxílio de um

paquímetro até que o momento em que as membranas se rompessem, bem como a flecha no vão central e a carga atuante, melhor ilustrado no croqui da figura 3.10. Como isso foi avaliado a capacidade de cada sistema impermeabilizante de alongar-se sem rompimento de sua membrana pelo efeito da abertura de fissuras na estrutura de concreto.

Lajes dispostas na estufa montada com as lâmpadas de UVB também foram rompidas para avaliar o desempenho dos sistemas impermeabilizantes após uma simulação de envelhecimento, na tentativa de aproximar o ensaio à realidade das edificações que possuem esses sistemas expostos ao meio-ambiente.

Dado o sistema estrutural à seguir, aonde uma carga P é aplicada na viga 1, a mesma é igualmente transmitida para as vigas 2 e 3. A laje recebe a carga das vigas 2 e 3 e reações na sua face inferior são dadas nos apoios (vigas 4, 5 e 6):

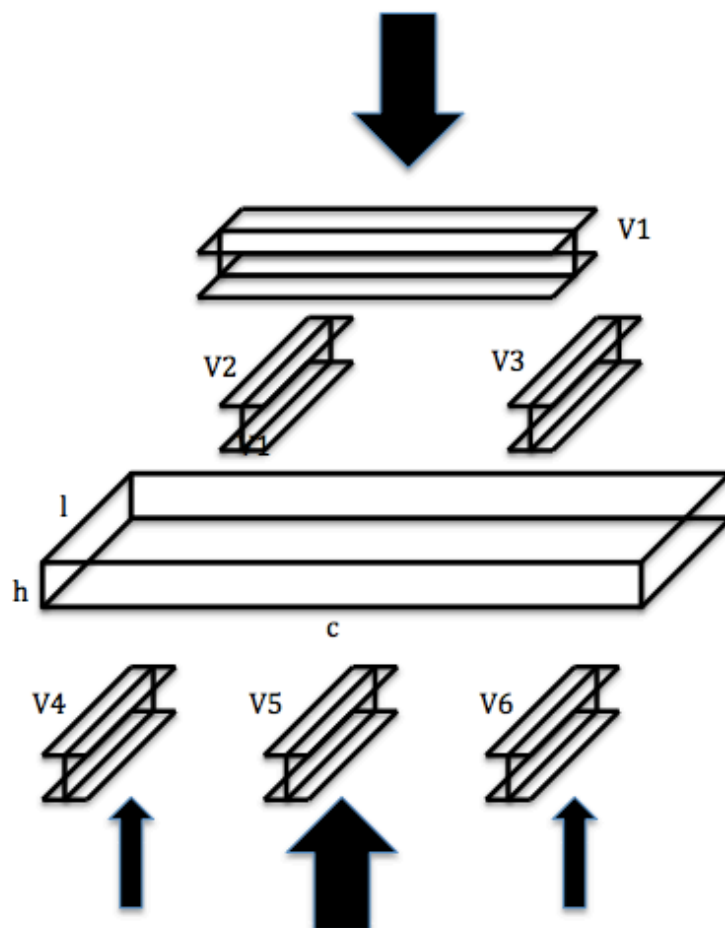


Figura 3.12 - Modelo de cargas nas lajes da pesquisa

O dimensionamento das lajes esta detalhado no anexo C do presente trabalho.

A carga máxima de ruptura estimada é em torno de 9 t, o que é compatível com o equipamento utilizado.

Foi adotado uma laje com as seguintes dimensões

- $C = 2 \text{ m}$
- $H = 7 \text{ cm}$
- $L = 45 \text{ cm}$
- Cobrimento da armadura = 1 cm

Conforme já citado, a medição da abertura das fissuras da laje foram excutadas pela lateral conforme figura 3.13.

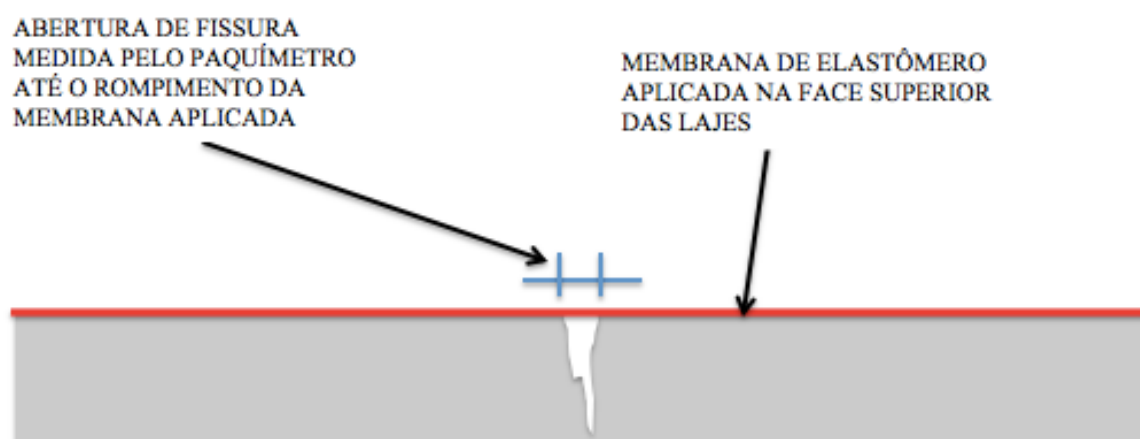


Figura 3.13 – Croqui ilustrativo da maneira de medição das aberturas das fissuras na lateral das lajes com os sistemas impermeabilizantes aplicados

A figura 3.14 ilustra a colocação, retirada e o ensaio de flexão das lajes.



Figura 3.14 - Prensa Hidráulica/pneumática com capacidade de 30 t utilizada nos rompimentos das lajes, com o detalhe da empilhadeira movimentando a laje.

3.2.4 Ensaio de flexão de prismas de concreto

Com o mesmo objetivo de averiguar o comportamento dos sistemas de impermeabilização após o aparecimento de fissuras em lajes, foram aplicadas as membranas, objeto dessa pesquisa em prismas de concreto de pequenas dimensões.

Esse ensaio se diferencia do anterior não apenas pelas reduzidas dimensões, mas também pela maior relação entre as espessuras da membrana e a dos primas do que a da membrana e das lajes. Igualmente importante é perceber que a dinâmica aparecimento e abertura destas fissuras são originárias de um rompimento frágil do concreto e não de um rompimento elásto-plástico de uma laje de concreto armado.

Contudo, o objetivo desse ensaio é verificar se seus resultados se assemelham aos ensaios de rompimento das lajes, o que, certamente, facilitaria estudos futuros.

O prisma adotado tem a metade da espessura do utilizado no ensaio de flexão de argamassas, portanto tem 2 cm de espessura, 4 cm de largura e 16 cm de comprimento, desta forma, pode ser ensaiado em equipamentos já existentes e adequados para tal. No caso dessa pesquisa, foi utilizado o mesma máquina universal AME 5, citada no item 3.2.1 da presente dissertação.

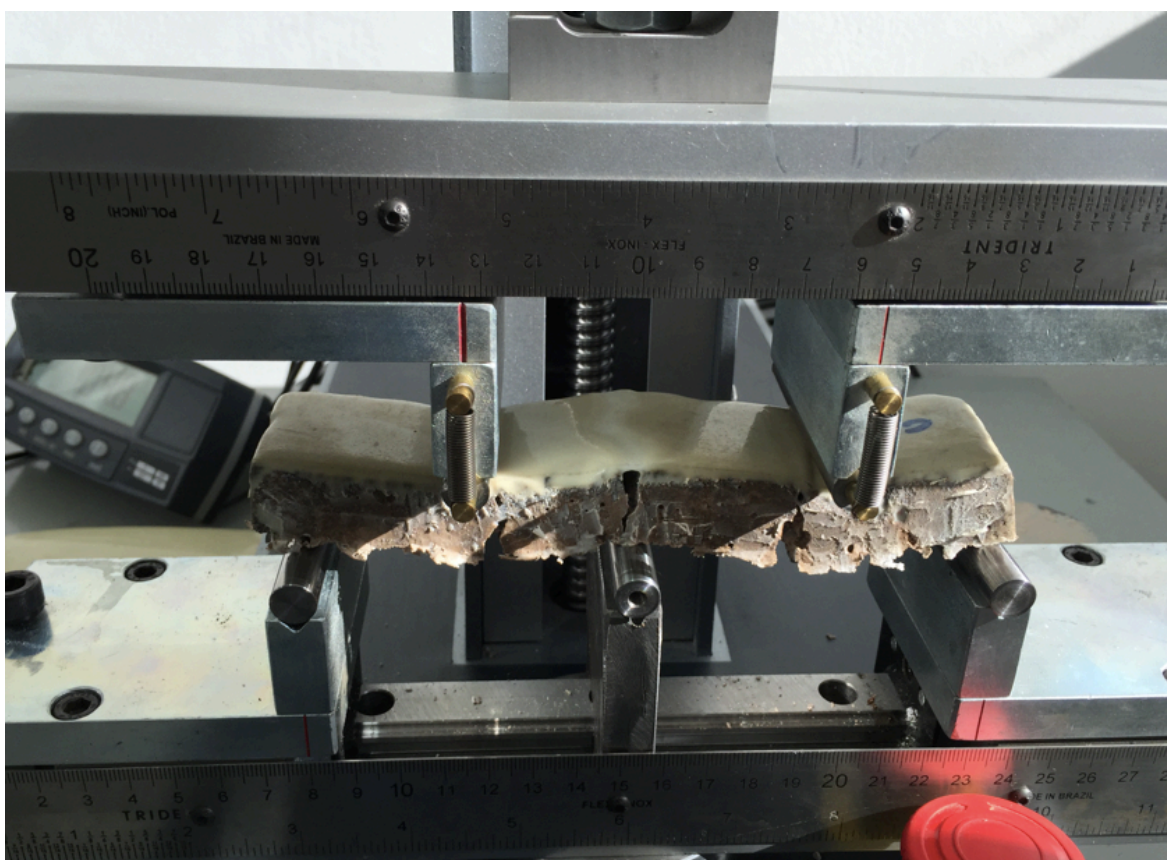


Figura 3.15 - Ensaio de flexão no prisma de concreto.

Diferentemente do ensaio de argamassas, este foi adaptado para ter três apoios na face inferior, para que a fissura aparecesse na superior, aonde o filme esta aplicado; o que facilita a análise dos resultados e aproxima o comportamento estrutural desse ensaio com o das lajes que também tem a mesma disposição de cargas e reações.

Tal qual no ensaio de flexão das lajes, a abertura das fissuras foi medida pela lateral dos prismas com o uso de paquímetro digital na medida em que a carga ia sendo aplicada, até que o rompimento das membranas dos sistemas aplicados.

3.2.5 Ensaio de Aderência das membranas ao substrato

Uma das patologias mais comuns em membras elastoméricas é a perda de aderência ao substrato, o que gera rasgos nas mesmas, quando estão aplicadas sobre lajes sujeitas à tráfego direto. Portanto, é relevante para esta pesquisa, avaliar a aderência ao substrato de concreto das membranas objeto deste estudo. No casos das membranas de poliuréia aplicadas à quente, que são indicadas ao tráfego veicular, foi executado este ensaio em substratos de concreto com e sem imprimação em resina de base epóxi.

Para esse ensaio foi utilizado o teste tipo E da norma ASTM 4541:2010.



Figura 3.16 - (a) Equipamento utilizado na pesquisa para o teste tipo E da ASTM 4541:2010 - (b) Detalhe dos pinos de aço colados nas membras objeto deste estudo

3.2.6 Ensaio de Abrasão por atrito com pneus

Esse ensaio foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento das membranas quando sujeitas ao desgaste pela ação de pneus.

Este ensaio foi focado principalmente nas membranas de poliuréia aplicadas a quente e no revestimento multi-camadas de poliuretano, que são os sistemas indicados pelos

respectivos fabricantes para tráfego veicular. Foram testadas, também, as membranas de poliuréia aplicadas sobre a camada base do sistema multi-camadas de poliuretano.

A figura 3.14 mostra o projeto do equipamento desenvolvido. É possível observar que um motor é acoplado num redutor que faz com que o eixo gire sobre a laje.

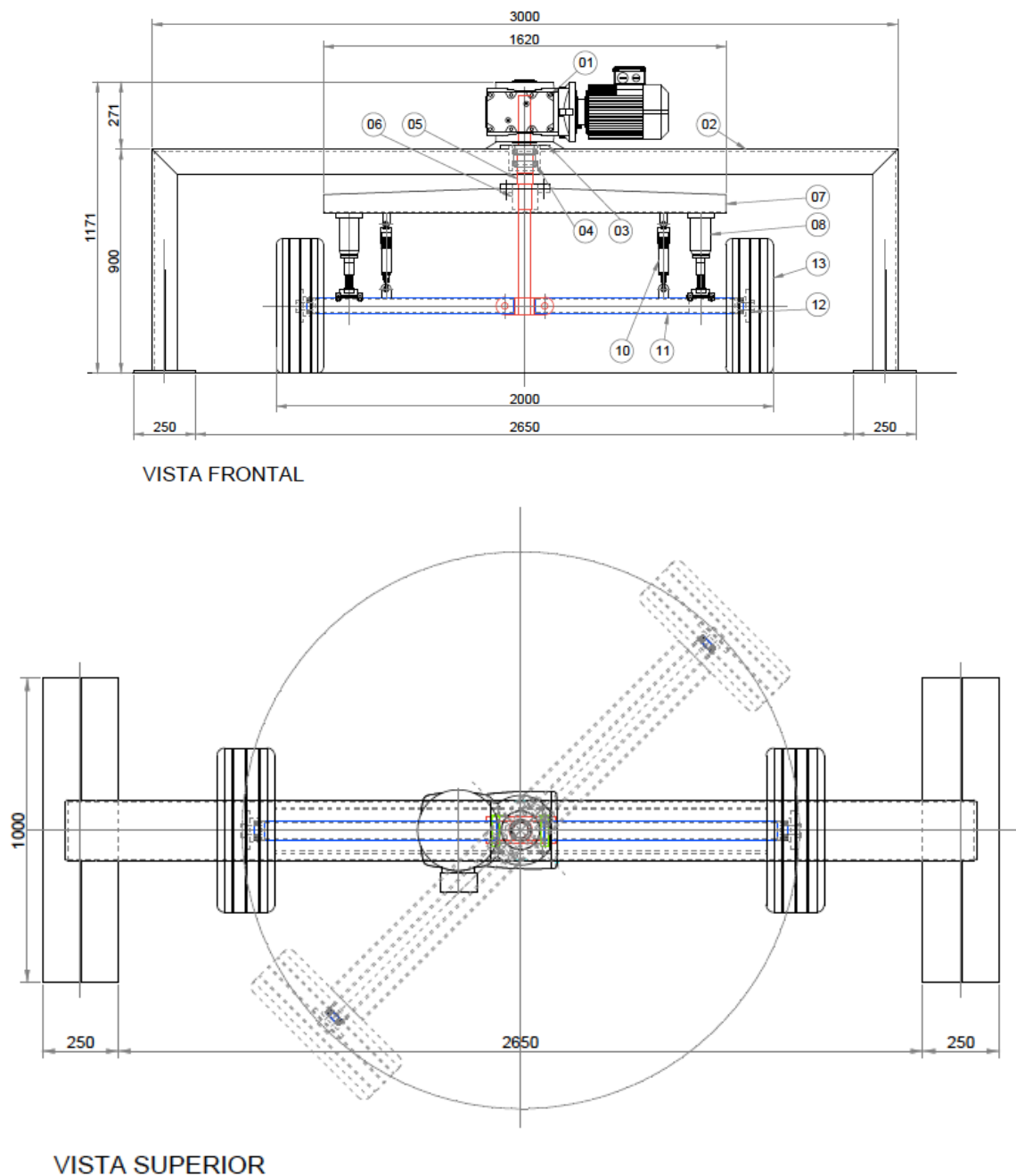


Figura 3.17 - Projeto do equipamento de abrasão sobre pneus.

Nesse ensaio, foi aplicada uma carga de 250 kg em cada macado hidráulico, perfazendo o mesmo valor de reação em cada pneu sobre o substrato. O valor de 250 kg foi baseado no peso normal de um veículo de passeio que é em torno de 1000 kg dividido em 4 apoios de pneus.

O motor elétrico acoplado ao redutor faz como que o conjunto gire a uma velocidade aproximada de 27,1 km/h (7,53 m/s).

O ensaio pode ser considerado severo, uma vez que a velocidade é consideravelmente alta para um carro fazendo uma curva com um raio tão baixo (cerca de 1 m).

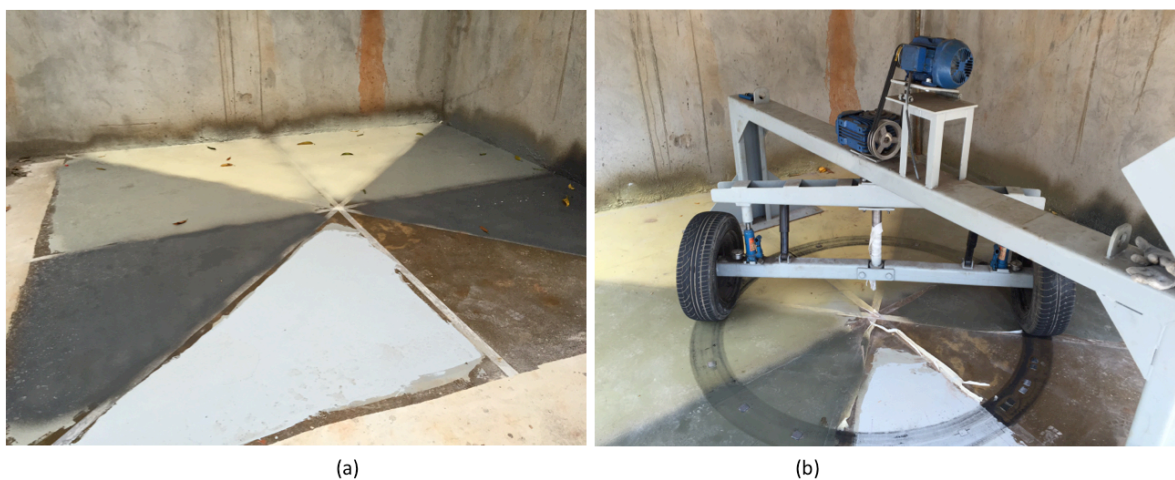


Figura 3.1 – (a) Membranas de poliuréia a quente sobre primer epóxi e também sobre a camada base do sistema de poliuretano e a mambra multicamadas do sistema de poliuretano aplicadas sobre laje de concreto (b) Equipamento de abrasão por atrito de pneus devidamente instalado para a execução do ensaio.

Os ciclos eram interrompidos a cada intercorrência relevante como descolamentos, rompimentos, fissuração das membranas.

Foram coladas pequenas pastilhas (dimensões de 2 cm × 2 cm) das membranas de todos os sistemas dessa pesquisa na trilha dos pneus para avaliar a perda de massa e de espessura.

Além das medições, foram observados e anotados detalhes de como se deu o início e a dinâmica da degradação de cada sistema avaliado.

O ensaio foi finalizado quando as membranas chegaram ao seu limite utilização, segundo a avaliação visual desse autor, que se baseou em dois critérios principais:

- Perda da aderência
- Desgaste superficial avançado

Foram colados elementos para o ensaio de aderência segundo a ASTM 4541 e foram avaliados, nos corpos de prova desaderidos pelo ensaio, a perda de espessura e a perda de massa. Para tal, foram colados 2 elementos fora da trilha dos pneus e um no centro da trilha do pneu. Dos dois elementos externos, foi tirada a média das espessuras e das massas. Esses resultados foram considerados como sendo a espessura e a massa inicial da membrana. A perda de massa e de espessura foi obtida subtraindo-se essas médias pelos valores obtidos do corpo de prova extraído do centro da trilha dos pneus.

Este longo programa experimental propiciou a coleta de uma grande quantidade de resultados que foram organizados em tabelas e gráficos que estão continudos no capítulo 4 do presente trabalho.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, de acordo com o programa experimental apresentado.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Foram executados os ensaios de alongamento, resistência à tração na ruptura, resistência ao rasgo, Dureza na escala shore A, resistência à abrasão.

Os ensaios foram executados em corpos de prova com idades entre 30 e 40 dias. Também foram realizados os ensaios nas mesmas membranas com tres tipos de envelhecimento, conforme descrito no capítulo 3:

- 500 horas na estufa de lâmpadas de U.V.B
- 500 horas no aparelho de Q.U.V.
- 1000 horas no aparelho de Q.U.V.

Os ensaios de abrasão foram executados somente em membranas com envelhecimento de 1000 horas no aparelho de Q.U.V.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 1A

ENSAIOS	PRIMER + POLIURÉIA 1				
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
ALONGAMENTO EM %	338	424	300	426	>500
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	7,12	4,79	5,12	6,41	>8
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	53,3	30,1	38,4	45,1	>45
DUREZA (SHORE A)	64	62	65	64	65-80
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	238,8	NE	NE	218,8	NI
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	90,0%	NE	NE	98,3%	NI
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	1,35	NE	NE	1,33	NI
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	251	NE	NE	230	< 140

NE – Não executado / NI – Não informado

Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 2A

ENSAIOS	PRIMER + POLIURÉIA 2				
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
ALONGAMENTO EM %	383	471	301	242	>400
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	7,01	6,82	5,72	4,68	>10
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	67,6	67,2	51,4	52,6	>80
DUREZA (SHORE A)	82	78	80	76	80
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	277,6	NE	NE	332,8	NI
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	77,5%	NE	NE	64,7%	NI
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	1,57	NE	NE	2,02	NI
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	292	NE	NE	349	NI

NE – Não executado / NI – Não informado

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 3A

ENSAIOS	PRIMER + POLIURÉIA 3				
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
ALONGAMENTO EM %	75	87	82	86	>180
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	8,80	8,81	10,09	9,37	>13,5
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	70,9	46,4	68,6	55,9	>80
DUREZA (SHORE A)	93	90	91	92	90
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	339,7	NE	NE	264,8	NI
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	63,3%	NE	NE	81,3%	NI
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	1,77	NE	NE	1,77	NI
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	357	NE	NE	278	< 150

NE – Não executado / NI – Não informado

Analisando-se os resultados das Tabelas 4.1 a 4.3 é possível perceber que a membrana de poliuréia 3A, apresentou uma característica mais rígida que as demais, o que pode ser constatado pelo menor alongamento e maiores resultados de resistência à tração na ruptura e dureza na escala SHORE A.

A membrana 3A apresentou resultados de alongamento e resistência à tração inferiores ao informado na ficha técnica do produto pelo fabricante. Estes valores deveriam estar em torno de 120% e 14 Mpa respectivamente.

As membranas 1A e 2A, apresentaram resultados de alongamento próximos aos valores de referência do fabricante, no entanto, as duas membranas obtiveram resultados de resistência à tração na ruptura inferiores, se considerarmos estes mesmos valores de referência.

Os valores obtidos de dureza na escala SHORE A das membranas 1A, 2A e 3A, estão próximo do que se esperava, em relação à ficha técnica do fabricante.

O sistema de multicamadas de poliuretano apresentou um resultado de alongamento abaixo do esperado. De acordo com o informado na ficha técnica do produto pelo fabricante, a camada de base deveria ter atingido resultados em torno de 600%, enquanto as camadas intermediárias e de acamento em torno de 90% e 120% respectivamente, conforme Tabela 4.4, no entanto, a membrana formada pelas tres camadas juntas apresentou um alongamento abaixo do menor alongamento das tres camadas.

Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 4A

ENSAIOS	MULTICAMADAS DE MEMBRANAS DE POLIURETANO				VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	
ALONGAMENTO EM %	82	36	42	31	O Fabricante não fornece esses valores de referência para a membrana constituída pelas tres camadas que a compõe, mas apenas os valores individuais de cada camada.
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	2,07	2,91	2,81	2,79	
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	21,0	16,7	20,0	21,4	
DUREZA (SHORE A)	76	80	80	80	
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	562,9	NE	NE	525,2	
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	38,2%	NE	NE	40,9%	
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	2,46	NE	NE	2,10	
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	675	NE	NE	630	

NE – Não executado

Os resultados obtidos para a membrana 5A indicaram, apesar de uma dureza compatível com um sistema a base de poliuréia, valores de alongamento, resistência à tração,

resistência ao rasgo abaixo do desempenho mínimo requerido pela norma SSPC 45, conforme Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 5A

ENSAIOS	PRIMER + POLIURÉIA FAMÍLIA 5				VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	
ALONGAMENTO EM %	120	98	65	65	Valores de referência não informados pelo fabricante
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	3,83	3,69	3,20	2,71	
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	32,5	25,8	21,1	24,6	
DUREZA (SHORE A)	82	84	84	86	
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	459,9	NE	NE	663,8	
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	46,8%	NE	NE	32,4%	
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	2,13	NE	NE	2,93	
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	644	NE	NE	929	

NE – Não executado

Os resultados da membrana 6A, estão dentro dos valores informados pelo fabricante na ficha técnica do produto, além de estarem dentro dos requisitos mínimos da NBR 15487:2007 que trata sobre as membranas de poliuretano para impermeabilização.

Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 6A

ENSAIOS	POLIURETANO A FRIO DE PRIGEM VEGEAL				VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	
ALONGAMENTO EM %	60	41	74	69	70%
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	4,33	3,53	3,64	3,63	4,00
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	20,8	18,5	17,6	21,9	NI
DUREZA (SHORE A)	81	80	84	82	NI
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	489,7	NE	NE	555,2	NI
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	44,0%	NE	NE	38,8%	NI
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	3,10	NE	NE	2,89	NI
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	734	NE	NE	833	NI

NE – Não executado / NI – Não informado

O sistema 7A foi incluído nessa pesquisa com o intuito comparativo com os resultados das membranas de poliuréia e poliuretano, e seus resultados de caracterização foram organizados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 7A

ENSAIOS	MEMBRANA ACRÍLICA				VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	
ALONGAMENTO EM %	511	431	190	238	Valores de referência não informados pelo fabricante
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	1,47	1,76	1,17	0,89	
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	10,3	15,4	10,4	12,0	
DUREZA (SHORE A)	56	38	36	36	
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	630,2	NE	NE	NE	
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	34,1%	NE	NE	NE	
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	3,14	NE	NE	NE	
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	819	NE	NE	NE	

NE – Não executado

Por se tratar de uma membrana acrílica, obteve alto valor de alongamento, conforme esperado, porém com baixas resistência à tração na ruptura e resistência ao rasgo. Não resistiu ao ensaio de abrasão e obteve um resultado para dureza muito baixo.

O sistema 8A, se trata de uma manta asfáltica e foi incluída na pesquisa com o objetivo de comparar seus resultados com os dos elastômeros objetos dessa pesquisa. O ensaio de abrasão não foi realizado por não ser aplicável nesse sistema. O ensaio de alongamento, apesar de não ter sido realizado através do método demandado pela norma pertinente, ABNT NBR 9952, mas sim pela ASTM D412, resultou no valor esperado para esse tipo de material que é em torno de 30%.

Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 8A

ENSAIOS	MANTA ASFÁLTICA TIPO III B				
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
ALONGAMENTO EM %	55	30	29	31	>30%
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	2,67	2,89	3,35	3,25	NA
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	17,8	17,5	17,5	18,1	NA
DUREZA (SHORE A)	44	45	48	48	NA
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	NA	NE	NE	NE	NA
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	NA	NE	NE	NE	NA
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	NA	NE	NE	NE	NA
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	NA	NE	NE	NE	NA

NE – Não executado

NA – Não aplicável

Conforme citado no capítulo 3 do presente trabalho, foram confeccionadas sistemas compostos por membranas da família das poliuréticas à quente, todavia, devidamente aplicadas sobre a camada de base de poliuretano (mesma camada de base do sistema 4A)

Foi possível notar que a camada de base não contribuiu em nada no que diz respeito à resistência à tração na ruptura e tão pouco na resistência ao rasgo, se os resultados forem comparados com os dos seus respectivos pares sem a camada de base. Aliás, percebe-se uma redução nos valores dessa tensão, tendo em vista que força de ruptura à tração é dividida por uma área de seção maior, devido ao acréscimo de espessura do sistema como um todo com a incorporação da camada de base de poliuretano.

Com relação ao alongamento, não houve alterações significativas em relação aos sistemas 1A, 2A e 3A .

Os resultados desses sistemas híbridos com camadas de poliuretano e poliurética estão formatados nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 à seguir.

Tabela 4.9 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 1C

ENSAIOS	PRIMER + CAMADA BASE EM POLIURETANO + POLIURÉIA 1				VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	
ALONGAMENTO EM %	342	491	279	305	Essa membrana é constituída de duas camadas de elastômeros famílias químicas e fabricantes diferentes, portanto não existem valores de referência para as mesmas.
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	4,50	3,74	3,72	3,78	
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	59,0	31,1	27,7	38,4	
DUREZA (SHORE A)	52	54	56	56	
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	302,0	NE	NE	372,1	
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	71,3%	NE	NE	57,9%	
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	1,38	NE	NE	2,03	
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	332	NE	NE	409	

NE – Não executado

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 2C

ENSAIOS	PRIMER + CAMADA BASE EM POLIURETANO + POLIURÉIA 2				VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	
ALONGAMENTO EM %	380	402	342	343	Essa membrana é constituída de duas camadas de elastômeros famílias químicas e fabricantes diferentes, portanto não existem valores de referência para as mesmas.
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	8,37	6,85	7,35	6,80	
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	68,1	83,9	76,2	83,7	
DUREZA (SHORE A)	82	78	83	78	
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	282,4	NE	NE	284,2	
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	76,7%	NE	NE	75,7%	
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	1,41	NE	NE	1,88	
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	304	NE	NE	313	

NE – Não executado

Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de caracterização da membrana 3C

ENSAIOS	PRIMER + CAMADA BASE EM POLIURETANO + POLIURÉIA 3				VALORES DE REFERÊNCIA DO FABRICANTE
	30/40 DIAS	500 HORAS LUV	500 HORAS QUV ASTM G154	1000 HORAS QUV ASTM G154	
ALONGAMENTO EM %	64	96	63	72	Essa membrana é constituída de duas camadas de elastômeros famílias químicas e fabricantes diferentes, portanto não existem valores de referência para as mesmas.
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	7,48	8,99	6,49	7,50	
RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)	64,0	47,0	49,1	38,5	
DUREZA (SHORE A)	88	88	90	89	
ABRASÃO - PERDA RELATIVA DE VOLUME (mm ³)	304,8	NE	NE	397,2	
ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)	70,6%	NE	NE	55,1%	
ABRASÃO - PERDA DE ESPESSURA (mm)	1,66	NE	NE	2,92	
ABRASÃO - PERDA DE MASSA (mg)	335	NE	NE	437	

NE – Não executado

De uma maneira geral, percebe-se que, com exceção da membrana 6 A, todas as demais apresentaram alguns dos seus resultados inferiores aos requisitos mínimos das normas SSPC 45 (poliuréia) e ABNT NBR 15487 e também inferiores aos valores de referencia de seus próprios fabricantes.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO DO SISTEMA APLICADO SOBRE LAJES ESTRUTURAIS

De acordo com o programa experimental apresentado, foram desenvolvidos e executados ensaios não normalizados que se prestavam à tentativa de simular o comportamento dos sistemas impermeabilizantes em situações reais de serviço, cujos resultados serão apresentados à seguir.

4.2.1 Resultados do ensaio de flexão de lajes

Foram realizados os ensaios de flexão em lajes com os sistemas, de acordo com o programa experimental, e os resultados são exibidos nesta seção em forma de gráficos.

No eixo horizontal, esta representada, em milímetros, a flecha no vão central da laje, enquanto no eixo vertical, estão representados a carga atuante na mesma em toneladas e

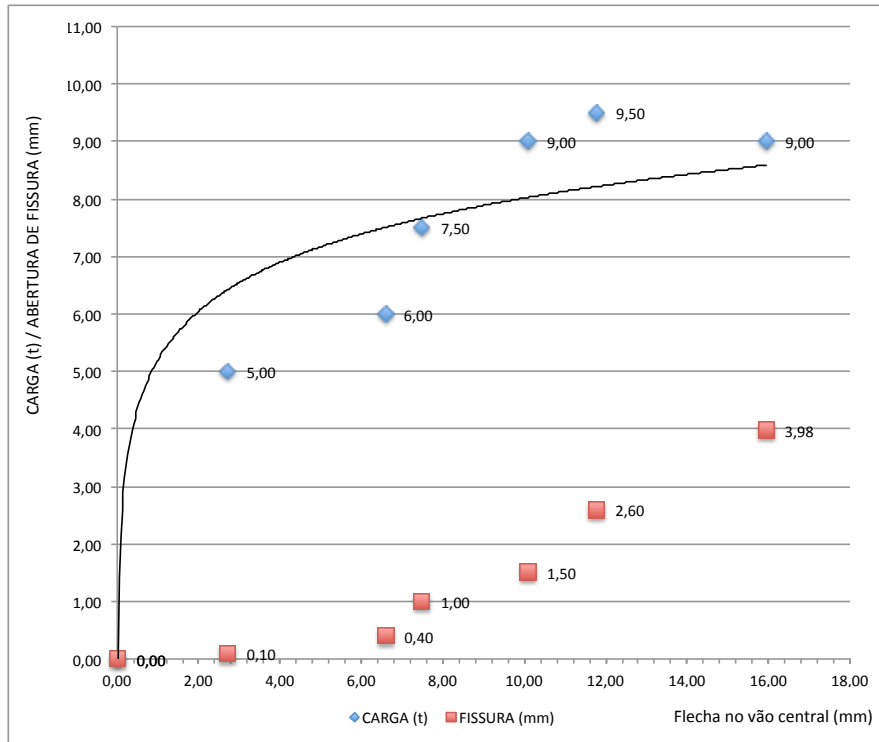


Figura 4.2 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 1B para a idade de 30 a 40 dias

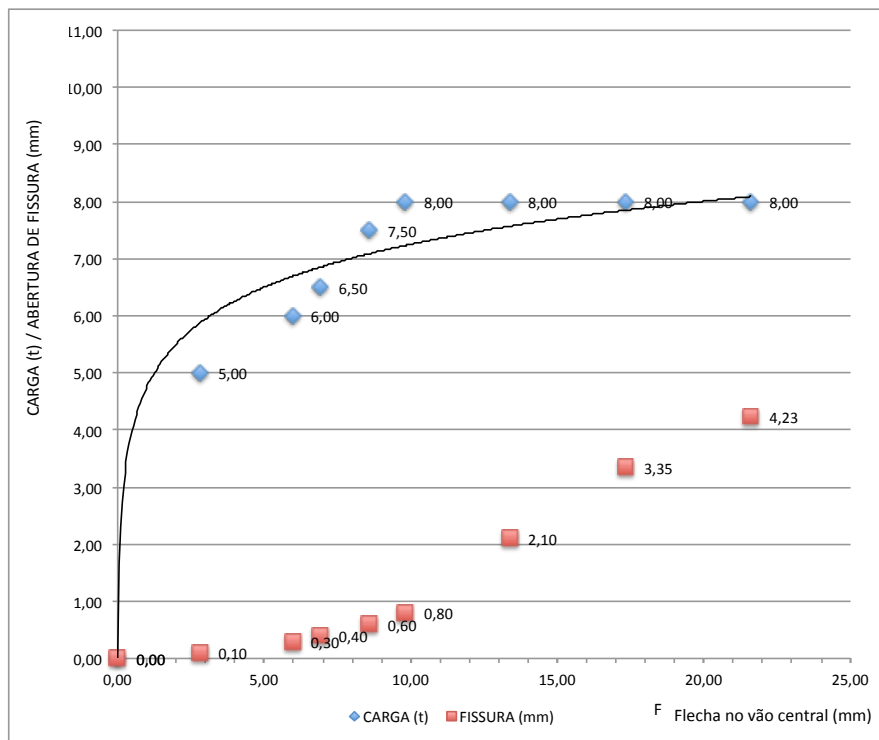


Figura 4.3 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 1C para a idade de 30 a 40 dias

Os sistemas compostos pela membrana da poliuréia 2 (poliuréia pura) apresentaram os maiores resultados para capacidade da membrana se acomodar à abertura das fissuras no vão central até seu rompimento. Vale ainda ressaltar que para a idade de 30 a 40 dias de moldagem do corpo de prova, nenhuma delas chegou a romper a membrana ao final do curso da flecha máxima permitida pelo aparelho. Esses resultados foram organizados nos gráficos à seguir.

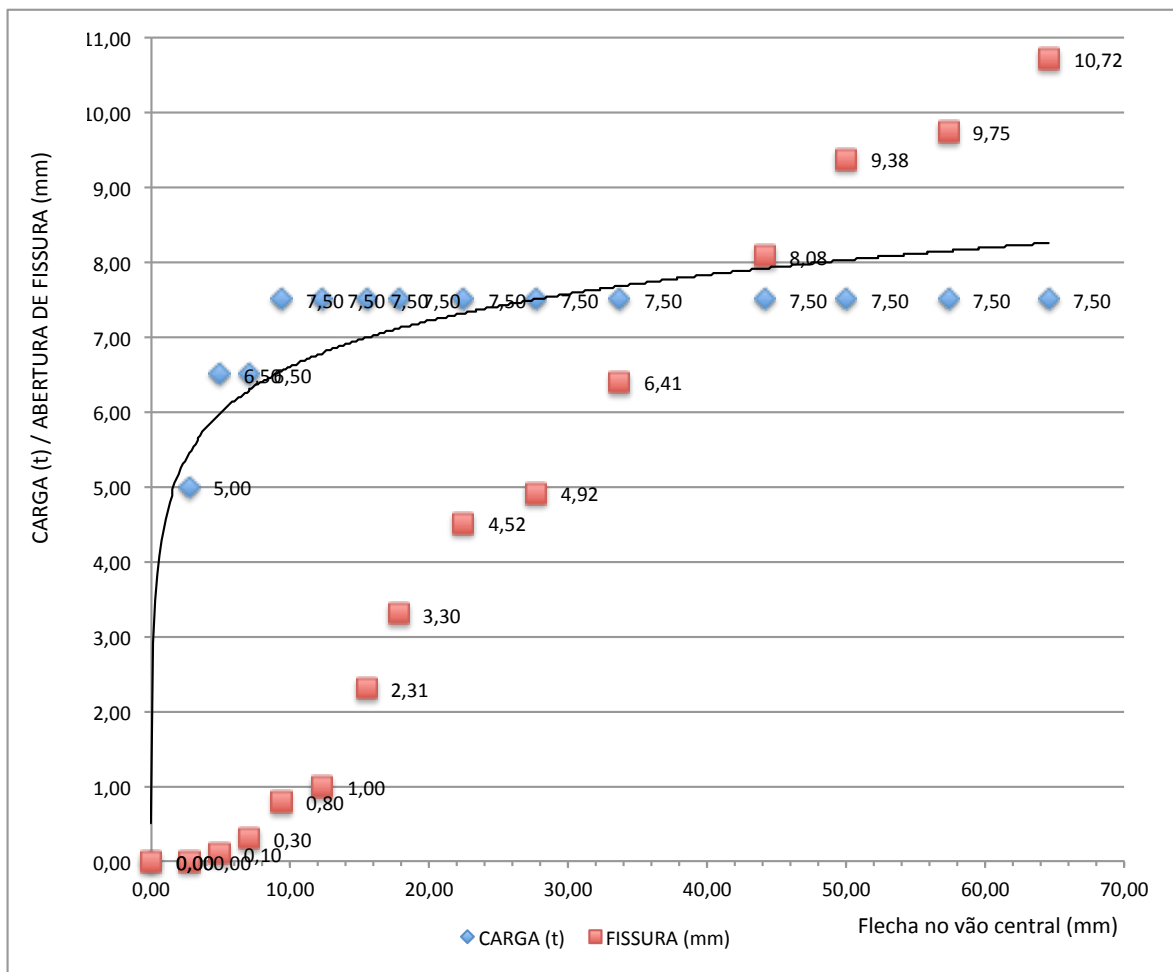


Figura 4.4 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 2A para a idade de 30 a 40 dias

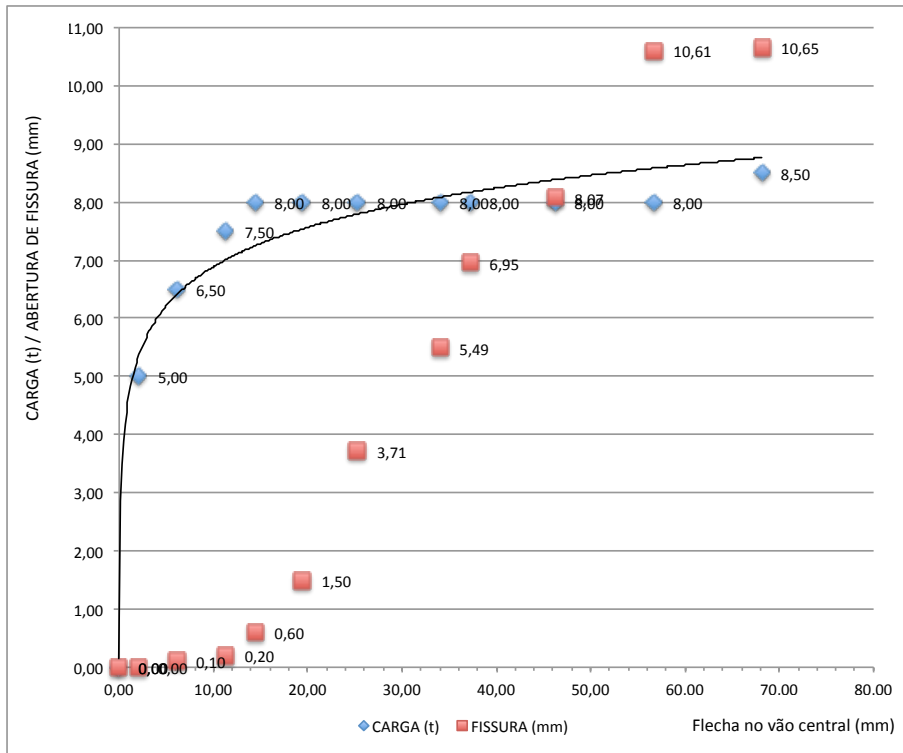


Figura 4.5 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 2B para a idade de 30 a 40 dias

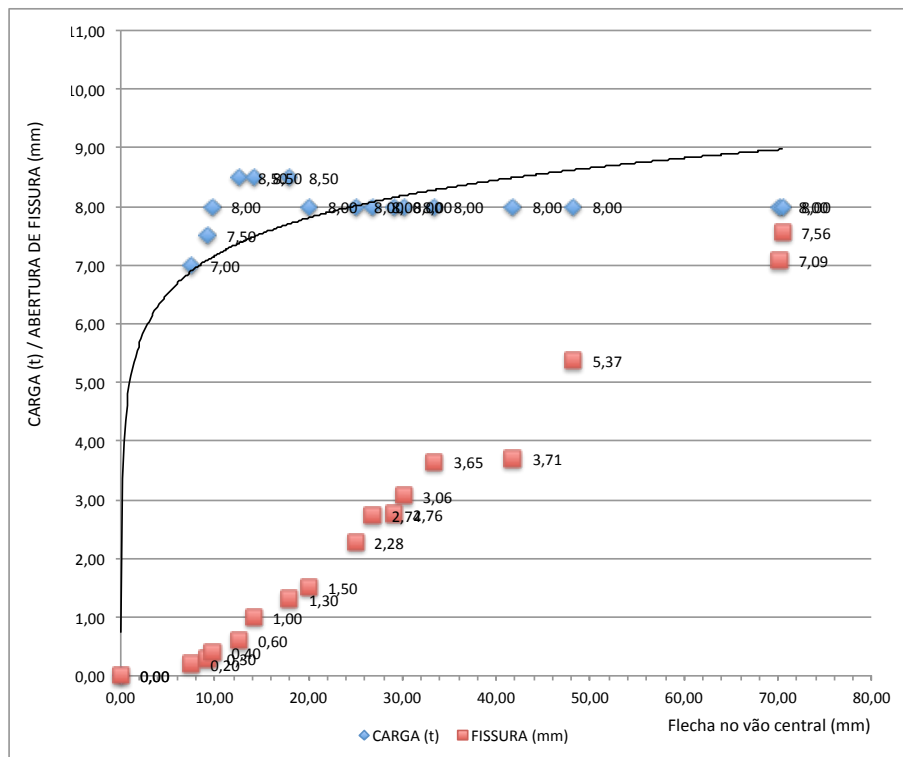


Figura 4.6 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 2C para a idade de 30 a 40 dias

Com relação à família de poliuréias 3 (híbridas de baixo alongamento), observou-se que em todos os substratos aplicados, concreto com primer (3A), concreto sem primer (3B) e sobre camada de base de poliuretano (3C), o tamanho máximo da abertura das fissuras antes do rompimento da membrana foi menor que a dos seus pares, e isso ocorreu para um baixo valor de flecha no vão central se comparado aos demais resultados dessa pesquisa. Isso pode ser verificado nos gráficos abaixo.

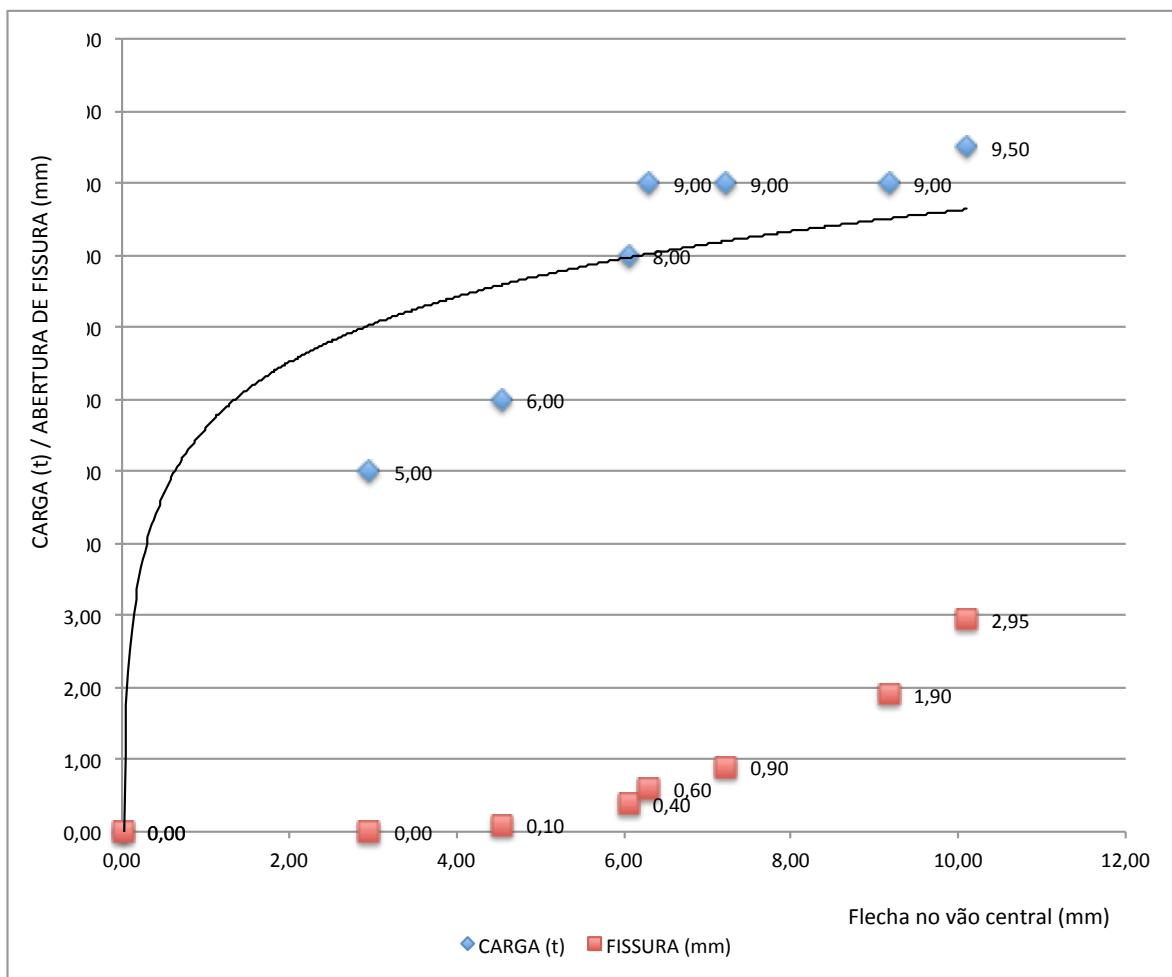


Figura 4.7 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 3A para a idade de 30 a 40 dias

No caso dos sistemas de poliuretano em multicamadas, aplicados sobre concreto com primer (4A) e sem primer (4B), observou-se uma menor capacidade deste de se acomodar à abertura das fissuras até seu rompimento; situando-se no mesmo patamar de ordem de grandeza dos sistemas da poluréia 3, conforme gráficos seguintes.

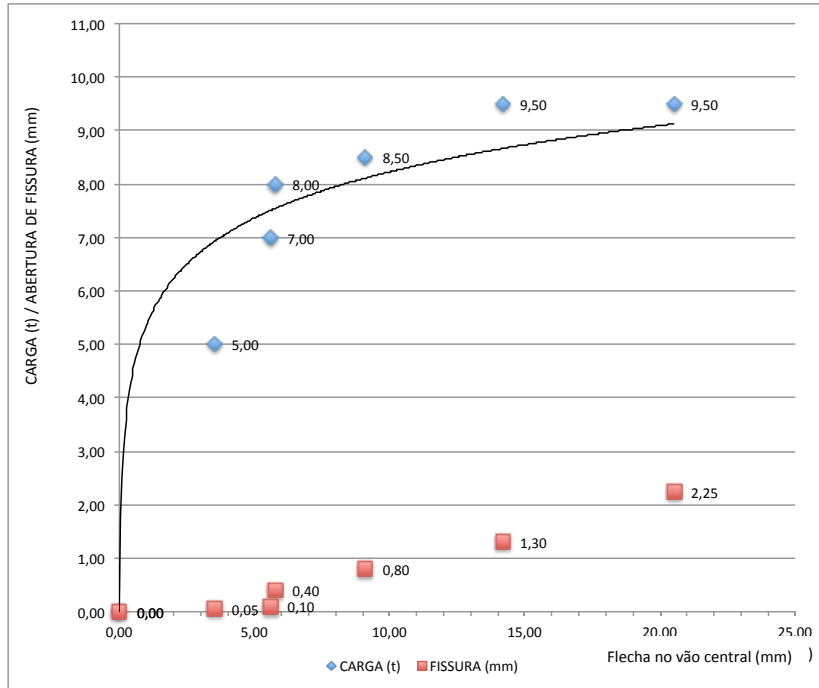


Figura 4.10 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 4A para a idade de 30 a 40 dias

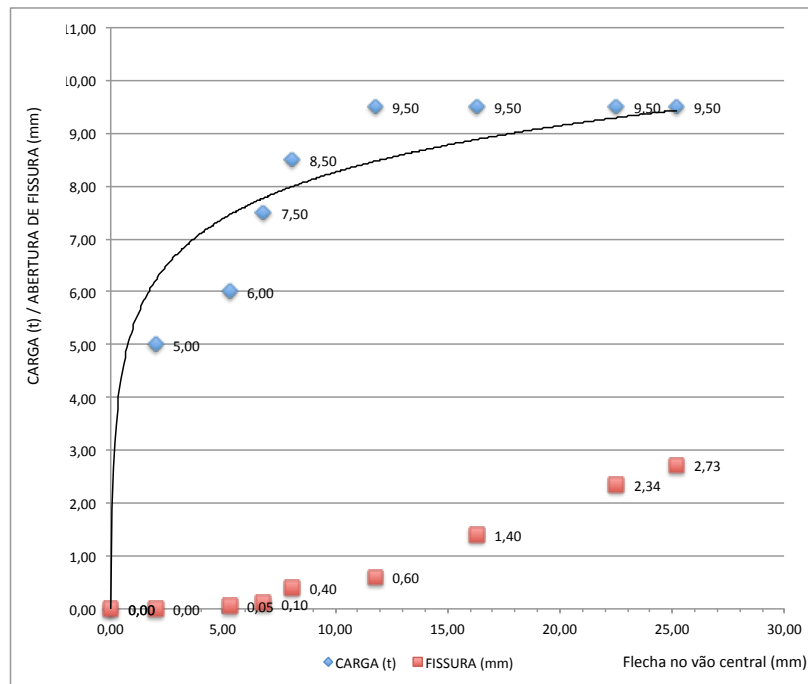


Figura 4.11 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 4B para a idade de 30 a 40 dias

Os resultados deste ensaio de flexão de lajes em corpos de prova moldados e envelhecidos na estufa de lâmpadas de U.V.B. por 500 horas não demonstraram relevantes diferenças para os sistemas impermeabilizantes a base de elastômetros objeto desse estudo, conforme gráficos seguintes.

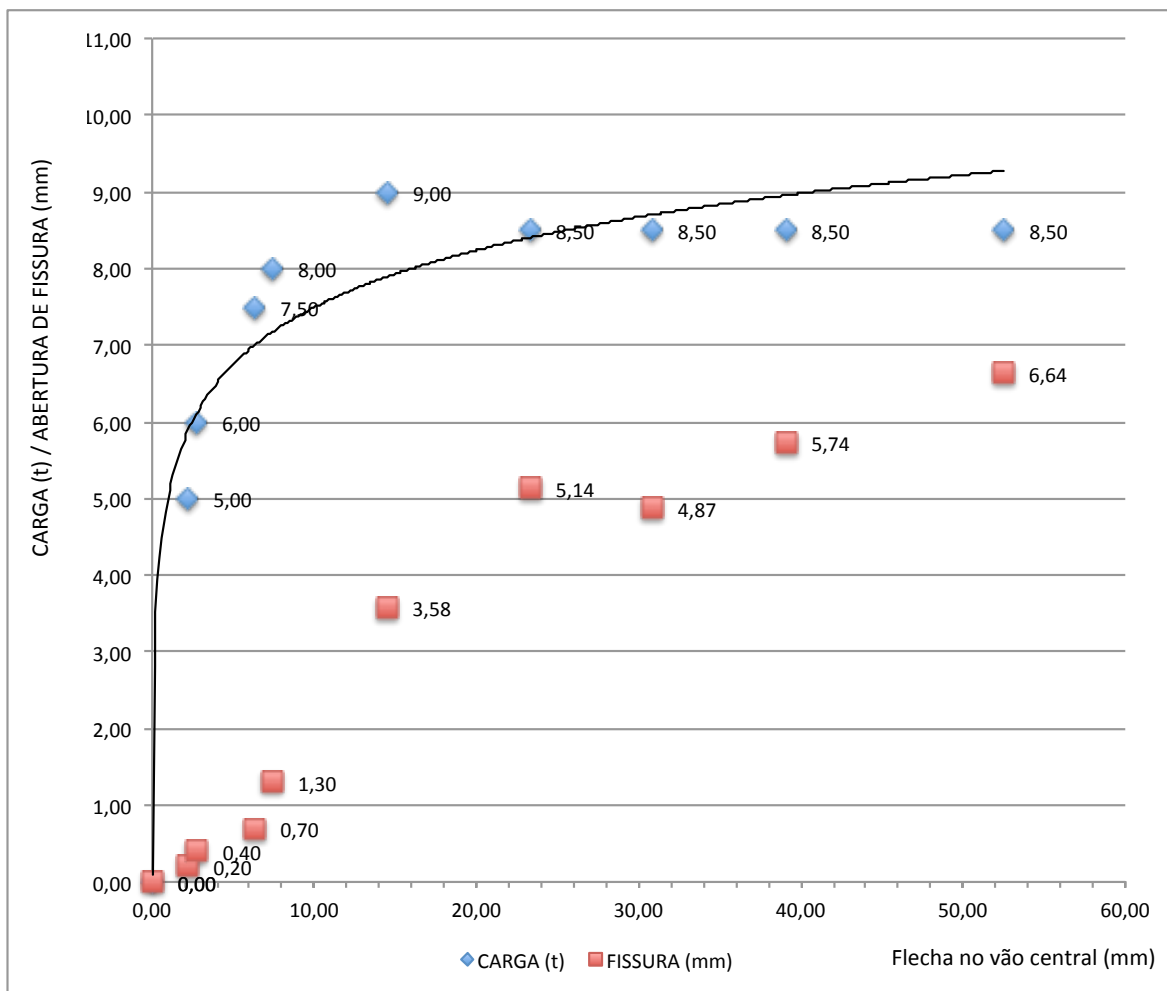


Figura 4.12 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 1A envelhecida em 500 horas na estufa com lâmpadas de U.V.B.

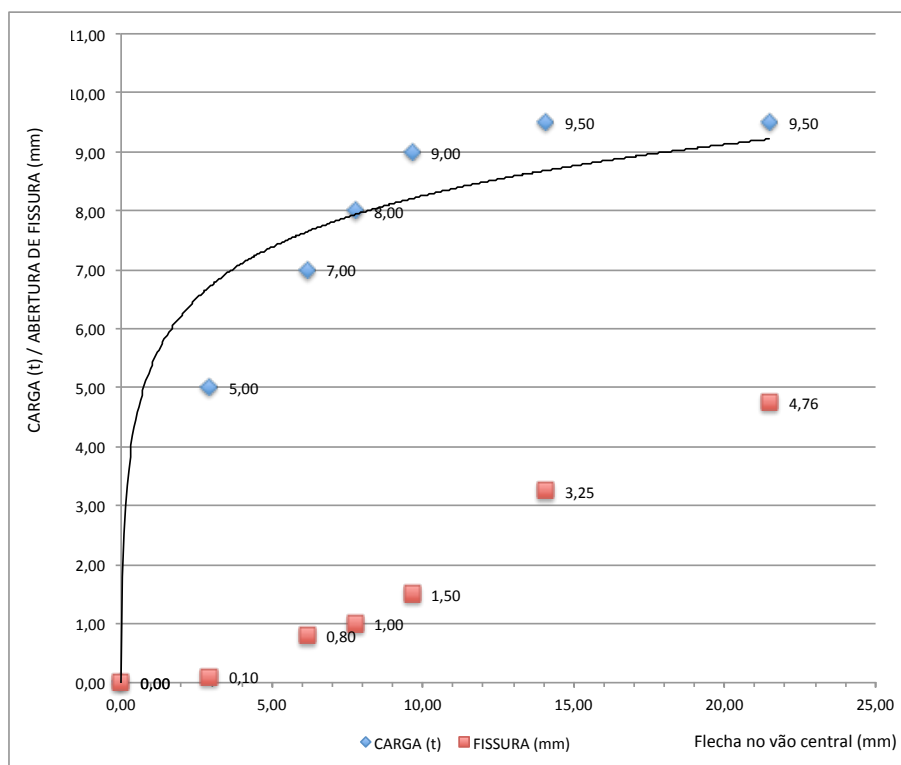


Figura 4.15 - Carga aplicada (t) e Abertura de fissura no vão central (mm) x Flecha no vão central (mm) da membrana 4A envelhecida em 500 horas na estufa com lâmpadas de U.V.B.

Organizou-se os dados de carga máxima, flecha máxima e abertura máxima das fissuras no momento do rompimento das membranas na tabela à seguir.

Tabela 4.12 - Valores máximos no ensaio de flexão das lajes de concreto armado

CÓDIGO	IDADE	FECHA MÁXIMA NO VÃO CENTRAL (mm)	CARGA NO MOMENTO DO ROMPIMENTO DA MEMBRANA (t)	ABERTURA MÁXIMA DAS FISSURAS NO ROMPIMENTO DA MEMBRANA NAS LAJES DE CONCRETO (mm)	OBSERVAÇÃO
1A	30/40 DIAS	64,94	6,00	4,98	
1B	30/40 DIAS	15,94	9,00	3,98	
1C	30/40 DIAS	21,60	8,00	4,23	
1A - 500 LUV	500 HORAS LUV	52,51	8,50	6,64	
2A	30/40 DIAS	64,53	7,50	10,72	MEMBRANA NÃO RASGOU
2B	30/40 DIAS	68,13	8,50	10,65	
2C	30/40 DIAS	68,13	8,50	10,65	MEMBRANA NÃO RASGOU
2A - 500 LUV	500 HORAS LUV	64,73	9,00	10,50	MEMBRANA NÃO RASGOU
3A	30/40 DIAS	10,10	9,50	2,95	
3B	30/40 DIAS	35,12	9,00	2,96	
3C	30/40 DIAS	11,42	9,50	3,97	
3A - 500 LUV	500 HORAS LUV	10,79	9,50	1,50	
4A	30/40 DIAS	20,51	9,50	2,25	
4A - 500 LUV	500 HORAS LUV	21,50	9,50	4,76	

4.2.2 Resultados dos ensaios de flexão de prismas de concreto

O ensaio de flexão dos primas de concreto foi realizado e os resultados de abertura máxima das fissuras no momento do rompimento da membrana foram organizados na tabela a seguir.

Tabela 4.13 - Resultado do ensaio de flexão de prismas de concreto

CÓDIGO	ABERTURA MÁXIMA DA FISSURA ATÉ O ROMPIMENTO DA MEMBRANA (mm)			
	30/40 DIAS	OBSERVAÇÃO	500 HORAS LUV	OBSERVAÇÃO
1A	14,36		12,29	
2A	18,33	NÃO RASGOU	9,86	
3A	4,06		3,37	
1B	11,94		N.E.	
2B	10,59		N.E.	
3B	5,33		N.E.	
4A	3,2		5,82	
5A	2,05		1,59	
6A	3,35		7,42	
7A	2,7		0	RUPTURA FRÁGIL
8A	N.E.		N.E.	
1C	19,27	NÃO RASGOU	N.E.	
2C	20,14	NÃO RASGOU	N.E.	
3C	3,11		N.E.	

N.E. – Não executado

Foi possível verificar que os valores das aberturas das fissuras dos substratos de concreto no momento do rompimento das membranas são significativamente maiores que as apresentadas nos ensaio de flexão das lajes para os mesmos sistemas. Verificou-se também que o envelhecimento dos sistemas na estufa de lâmpadas U.V.B. não apresentou a tendência esperada de perda de alongamento, tal qual já havia acontecido nos ensaios de caracterização. No entanto, a membrana acrílica, por já ter se mostrado muito susceptível ao envelhecimento apresentou fissuração concomitantemente à ruptura frágil do corpo de prova prismático.

4.2.3 Resultados do ensaio de aderência das membranas aplicadas sobre o piso de concreto.

O ensaio de aderência foi realizado no mesmo local do ensaio de abrasão sobre pneus. Foram executados os arrancamentos em pontos dentro e fora do local por onde passaram os pneus, após o término desse ensaio. Dessa maneira seria possível avaliar o efeito mecânico do trânsito dos pneus sobre a aderência da membrana no substrato.

Após o arrancamento das membranas do substrato, as mesmas foram preparadas e depois pesadas e tiveram as suas espessuras medidas, para a avaliação da perda de massa e de espessura por abrasão em decorrência da ação mecânica dos pneus.



Figura 4.16 - Locais aonde foram realizados os testes de aderência

Os resultados obtidos foram organizados, conforme tabela à seguir.

Tabela 4.14 - Resultado do ensaio de aderência

COD	ADERÊNCIA 1 FOR A (MPa)	LOCAL DO ROMPIMENTO	ADERÊNCIA CENTRO (MPa)	LOCAL DO ROMPIMENTO	ADERÊNCIA 2 FOR A (MPa)	LOCAL DO ROMPIMENTO
1A	2,42	10	1,63	10	2,7	5
2A	2,26	10	3,3	1	1,47	3
3A	2,38	1	N.E.	N.E.	2,42	1
4A	1,4	7	N.E.	N.E.	1,81	7
1C	1,69	10	N.E.	N.E.	1,26	10
2C	1,42	10	N.E.	N.E.	1,46	10
3C	1,75	10	N.E.	N.E.	1,35	6

LEGENDA:

TABELA LOCAL DO ROMPIENTO	
1	CONCRETO
2	CONCRETO - CAMADA DE BASE EM PU
3	CONCRETO - PRIMER
4	PRIMER - CAMADA DE BASE EM PU
5	PRIMER - MEMBRANA
6	CENTRO DA CAMADA DE BASE EM PU
7	CAMADA DE BASE EM PU - MEMBRANA
8	MEMBRANA - MEMBRANA
9	MEMBRANA - ADESIVO
10	ADESIVO - DISPOSITIVO METÁLICO

N.E.-Não executado em função da membrana já ter sido descolada do substrato

Pela tabela anterior é possível perceber que a aderência atingiu valores superiores ao requerido pela norma SSPC 45 que é de 1,7 MPa quando o rompimento se deu entre a membrana impermeabilizante e o primer. Um dos pontos da membrana 2A apresentou falha de aderência no primer.

As membranas de poliuréia aplicadas sobre camadas de base em poliuretano, se soltaram, principalmente entre o adesivo e o dispositivo metálico de arranchamento, todavia com valores próximos ao requerido como desempenho mínimo pela norma SSPC 45.

A membrana 4A (multicamadas de poliuretano) apresentou valores de aderência um pouco inferiores aos demais sistemas e, neste ensaio, se desprenderam na camada de base, no entanto, esse resultados foram maiores que 0,3 MPa, que é o valor mínimo requerido pela norma pertinente NBR 15487:2007

4.2.4 Resultados do ensaio de abrasão por ação de pneus

Neste ensaio, foi colocado o elemento giratório sobre pneus, desenvolvido para esta pesquisa para simular o tráfego veicular intenso, em funcionamento direto sobre os sistemas aplicados num piso de concreto devidamente curado. Por sobre o trilho dos pneus também foram coladas pastilhas dos sistemas pesquisados.

A cada intercorrência, foram ranqueados o nível de desgaste superficial de todas as membranas aplicadas no piso e a patologia que motivou a intercorrência, conforme a tabela a seguir.

Tabela 4.15 - Acompanhamento de intercorrências do ensaio de abrasão por pneus

TEMPO HH:MM	CICLOS	INTERCORRÊNCIA PRINCIPAL	FOTOS	PATOLOGIA MEMBRANA						DESGASTE SUPERFICIAL							
				1A	2A	3A	4A	1C	2C	3C	1A	2A	3A	4A	1C	2C	3C
00:00	0	INICIO DO ENSAIO	a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
00:27	2160	DESGASTE AVANÇO DO SISTEMA 4A	b	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1
00:58	4640	DESCOLAMENTO DA CAMADA DE BASE DO SISTEMA 3C	c	1	1	1	3	1	1	3	1	1	1	4	1	1	1
01:02	4960	DESGASTE TOTAL DO SISTEMA 4A	d	1	1	1	3	1	1	3	1	1	1	5	1	1	1
01:29	7120	DESCOLAMENTO DA CAMADA DE BASE DO SISTEMA 1C (BOLHAS)	e	1	1	1	3	3	1	3	1	1	1	5	1	1	1
01:46	8480	DESCOLAMENTO DA CAMADA DE BASE DO SISTEMA 2C (BOLHAS)	f	1	1	1	3	3	3	4	2	1	1	5	2	1	1
02:05	10000	FISSUROU O SISTEMA 3A	g	1	1	4	3	3	3	4	3	2	1	5	3	2	1
02:20	11200	DESCOLAMENTO EM TODO TRECHO DA CAMADA DE BASE NO SISTEMA 1C E 2C	h, i	1	1	4	3	4	4	4	3	2	1	5	3	2	1
03:35	17200	TÉRMINO DO ENSAIO COM OS SISTEMAS 1A E 2A PRÓXIMOS ÀS CONDIÇÕES FINAIS DE SERVIÇO	j, k, l	1	1	4	3	4	4	4	4	3	2	5	4	3	2

DESGASTE SUPERFICIAL	
1	SEM DESGASTE APARENTE
2	DESGASTE SUPERFICIAL INICIAL
3	DESGASTE SUPERFICIAL MEDIANO
4	DESGASTE SUPERFICIAL AVANÇADO
5	DESGASTE TOTAL

PATOLOGIA MEMBRANA	
1	NENHUMA
2	DESCOLAMENTO DO PRIMER
3	DESCOLAMENTO DA CAMADA DE BASE
4	FISSURAÇÃO

Para efeito de ilustração da pesquisa, a cada intercorrência, fotos eram tiradas e foram organizadas na figura 4.17.



Figura 4.17 - Foto de cada intercorrência no ensaio de abrasão por pneus numeração de acordo com a Tabela 4.15

Ao término deste experimento, foi realizado o ensaio de aderência. Os elementos arrancados foram preparados e devidamente estampados na dimensão do corpo de prova da norma de perda por abrasão DIN ISO 4649:2006, adotada nessa pesquisa. Foi obtida a média das espessuras e massas dos corpos de prova da área externa ao trilho do pneu e subtraído dos resultados de espessura e massa dos corpos de prova retirados da região do trilho do pneu. Com isso determinou-se a perda de massa e de espessura, conforme tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Perda de massa e espessura ao término do ensaio de abrasão por pneus.

MEMBRANA	CICLOS TOTAIS	CICLOS EM ESTADO DE SERVIÇO	ESPESSURA INICIAL (mm)	ESPESSURA FINAL (mm)	DIFERENÇA DE ESPESSURA (mm)	MASSA INICIAL (mg)	MASSA FINAL (mg)	DIFERENÇA DE MASSA (mg)	PERDA DE MASSA POR CICLO (mg X 1000)/ciclo	PERDA DE ESPESSURA POR CICLO (mm X 1000)/ciclo
1A	17200	17200	1,98	1,43	0,55	400	281	119	6,90	0,0320
2A	17200	17200	2,04	1,58	0,46	388	282	106	6,13	0,0267
3A	17200	10000	1,73	1,42	0,31	327	254	73	4,23	0,0180
4A	4960	2160	2,11	0,00	2,11	481	0	481	96,96	0,4254
5A	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
6A	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
7A	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
8A	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
1C	17200	7120	2,44	1,30	1,14	989	723	266	15,45	0,0663
2C	17200	8480	2,22	1,39	0,83	492	279	212	12,34	0,0483
3C	17200	4640	2,43	1,62	0,81	524	322	202	11,74	0,0471

N.E. – Não executado tendo em vista a não recomendação do fabricante para tráfego de veículos.



Figura 4.18 - (a) Situação geral do sistema após o ensaio de abrasão por pneus – (b) e (c) Sistema 1A e 2A, respectivamente, ainda em condições de serviço – (d) Sistema 3A descolado do substrato – (e) Sistema 4A completamente desgastado – (f) (g) (h) Situação dos sistemas 1C, 2C e 3C, respectivamente, descolados da camada de base.

No caso das pastilhas, foram anotadas as seguintes intercorrências.

Tabela 4.17 - Intercorrências nas pastilhas coladas no piso no ensaio de abrasão por pneus

TEMPO	CICLOS	FOTOS	INTERCORRÊNCIA
00:00	0		INICIO
00:03	240	a	PASTILHA 2C2 / 3C1 / 3C2 - DELAMINARAM-SE (DESCOLARAM-SE DA CAMADA DE BASE)
00:06	480	b	PASTILHAS 2C1 DELAMINOU-SE NA CAMADA DE BASE
00:08	640	c	PASTILHA 7A2 E 7A1- DEFORMARAM-SE TOTALMENTE E SE DESCOLARAM DO PISO
00:09	720	d	PASTILHA 1C1 DELAMINOU-SE NA CAMADA DE BASE
00:10	800	e, f	PASTILHA 1C2 E 4A1 DELAMINARAM-SE NA CAMADA DE BASE
00:12	960	g	PASTILHA 4A2 SE DELAMINOU-SE NA CAMADA DE BASE
01:26	6880	h	PASTILHA 6A2 DELAMINOU-SE SE SOLTOU DO PISO
01:28	7040	i	PASTILHA 3A1 FISSUROU-SE E SE SOLTOU DO PISO
01:29	7120	j	PASTILHA 3A2 FISSUROU-SE E SE SOLTOU DO PISO
01:37	7760	k	PASTILHA 5A2 DELAMINOU-SE E SE SOLTOU DO PISO
02:23	11440	l	PASTILHA 6A1 DELAMINOU-SE
03:35	17200		TÉRMINO DO ENSAIO COM AS PASTILHAS 1A1, 1A2, 2A1, 2A2, 5A1 AINDA EM CONDIÇÕES DE SERVIÇO

Na figura 4.19 estão as fotos para efeito de documentação e ilustração que foram devidamente organizadas a seguir e numeradas de acordo com a tabela 4.17.

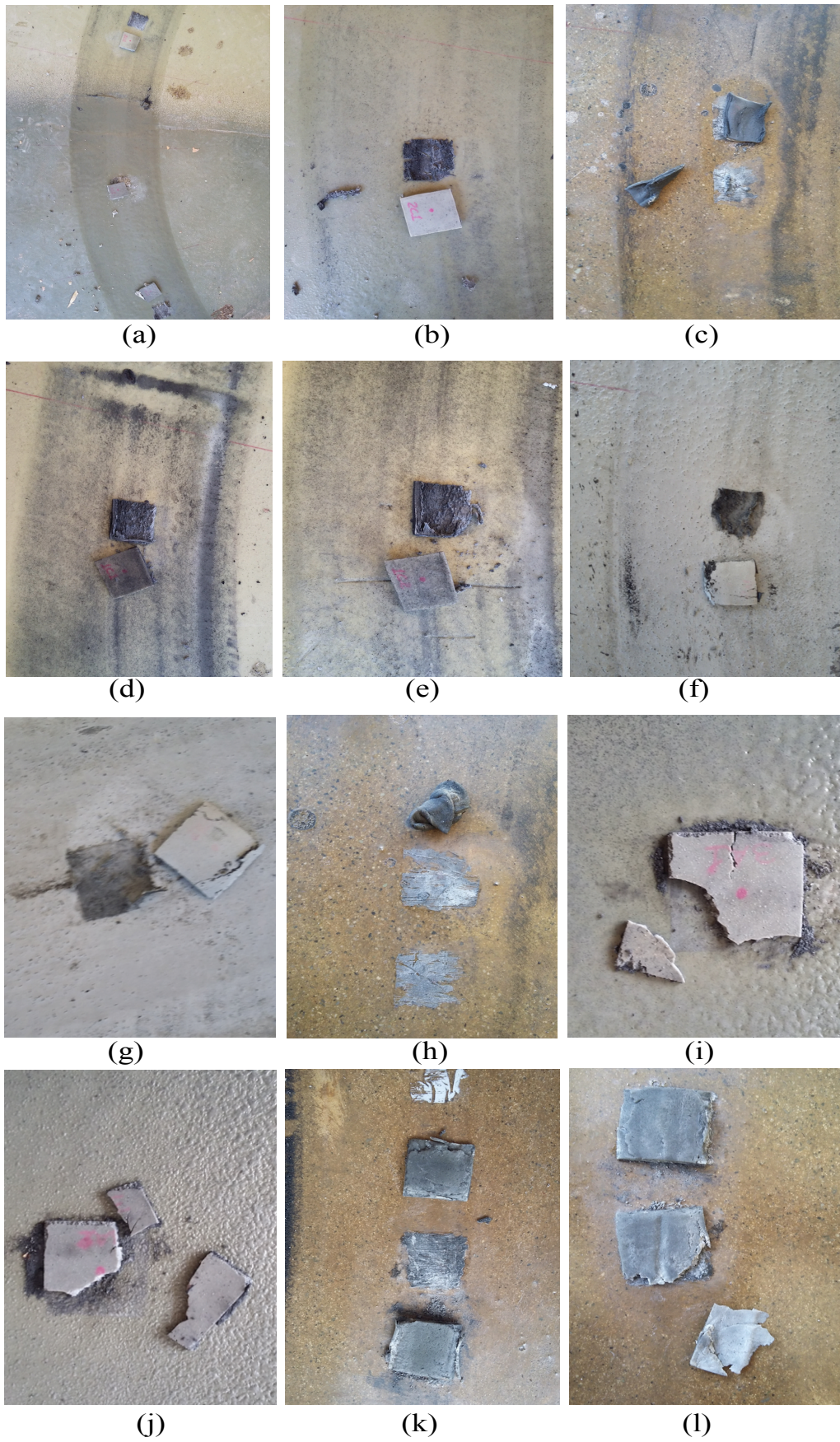


Figura 4.19 - Situação final de cada pastilha de acordo com a Tabela 4.17

Ao término do ensaio, cada uma das pastilhas foi pesada e teve sua espessura medida. Destes valores foram subtraídos as massas e espessuras iniciais, calculando-se assim as respectivas perdas.

Foram calculadas as perdas de massa e de espessura pela quantidade de ciclos que as pastilhas foram submetidas.

Os resultados foram organizados na tabela à 4.18.

Tabela 4.18 - Perda de massa e de espessura nas pastilhas dos sistemas no ensaio de abrasão por pneus

SISTEMA	PASTILHAS	NÚMERO MÉDIO DE CICLOS	ESPESSURA MÉDIA INICIAL (mm)	ESPESSURA MÉDIA FINAL (mm)	DIFERENÇA MÉDIA DE ESPESSURA (mm)	MASSA MÉDIA INICIAL (mg)	MASSA MÉDIA FINAL (mg)	DIFERENÇA DE MASSA (mg)	PERDA DE MASSA POR CICLO mg/ciclo	PERDA DE ESPESSURA POR CICLO mm X 1000/ciclo
1A	1A1 / 1A2	17200	1,99	1,68	0,30	1879	1516	362	0,021	0,018
2A	2A1 / 2A2	17200	3,27	2,82	0,45	3090	2538	552	0,032	0,026
3A	3A1 / 3A2	7080	1,88	1,81	0,08	1781	1627	154	0,022	0,011
4A	4A1 / 4A2	880	2,43	1,93	0,50	2628	1737	892	1,013	0,573
5A	5A1 / 5A2	12480	4,95	2,52	2,43	6234	2267	3967	0,318	0,195
6A	6A1 / 6A2	9160	3,35	2,52	0,83	4527	2267	2260	0,247	0,091
7A	7A1 / 7A2	640	2,26	NR	-	3487	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.
8A	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
1C	1C1 / 1C2	760	4,44	3,04	1,40	4595	2734	1861	2,448	1,844
2C	2C1 / 2C2	360	4,82	3,48	1,34	4986	3131	1855	5,151	3,717
3C	3C1 / 3C2	240	4,93	3,48	1,45	5100	3131	1969	8,202	6,034

N.E. – Não executado pelo ensaio não ser aplicável para esse tipo de material

N.R. – Não resistiu ao ensaio

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo se destina a apresentar uma discussão sobre dos resultados obtidos à partir dos ensaios laboratoriais e pesquisas de campo.

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MEMBRANAS DOS SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES

Os valores dos resultados para alongamento na ruptura de cada sistema e para cada idade, foram organizados na figura a seguir.

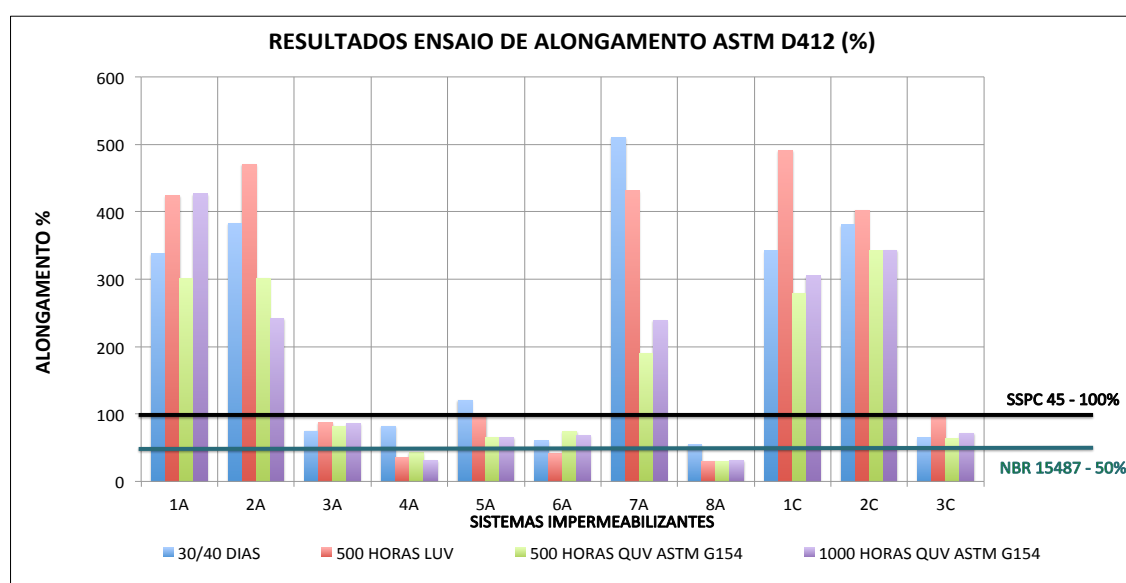


Figura 5.1 - Comparativo dos resultados dos ensaios de alongamento

É possível observar que os sistemas a base de poliuréia atingiram o valor mínimo requerido pela norma SSPC 45 (Two-Component, Thick-Film Polyurea and Polyurea/Polyurethane Hybrid Coatings, Performance-Based) com exceção do sistema 3A. E que os sistemas a base de poliuretano atingiram o valor requerido mínimo pela norma ABNT NBR 15487:2007.

Observa-se também, que os sistemas híbridos de poliuréia e poliuretano (1C, 2C, e 3C), mantiveram os patamares de alongamento de seus pares (1A, 2A, e 3A).

Numa análise mais geral, percebe-se que os sistemas 1A e 2A apresentaram valores que os colocam em um patamar mais alto de alongamento.

É possível também observar da figura 5.1 que a membrana acrílica apresentou o maior dos valores de alongamento, mas teve uma perda significativa após os respectivos envelhecimento nas condições mencionadas no capítulo 3 desse trabalho.

A norma SSPC 45 determina que uma membrana de poliuréia aplicada a quente não pode perder mais que 50% dos valores de suas propriedades após envelhecimento acelerado de 1000 horas e a NBR 15487 determina que a perda das propriedades físicas das membranas de poliuretano não podem ser superiores a 25% após envelhecimento acelerado por 500 horas.

Para essa análise foram confeccionados gráficos de análise dessa variação, como o seguinte, feito para os resultados do alongamento.

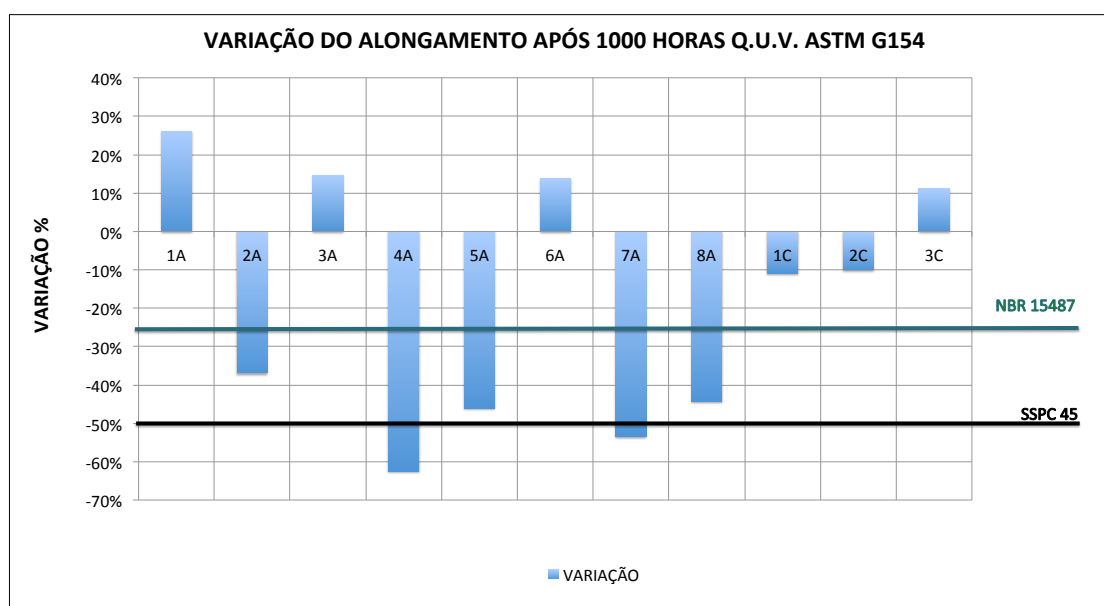


Figura 5.2 - Variação dos resultados do alongamento antes e após envelhecimento acelerado de 1000 horas no aparelho de Q.U.V.

Os sistemas baseados em poliuréia se enquadraram no requisito da SSPC 45, no entanto, percebe-se que a membrana 4A chegou a perder cerca de 60% do seu alongamento inicial.

A membrana de base acrílica perdeu mais do que 50% de seu alongamento enquanto que a manta asfáltica perdeu cerca de 45% de seu alongamento. No entanto, não existe requisito de limitações de perdas de propriedades mecânicas após envelhecimento para esses materiais.

Os resultados de resistência à tração foram organizados da mesma forma, na figura 5.3 e foi possível perceber que os sistemas a base de poliuréia aplicada a quente apresentaram, resultados que os colocam num patamar superior aos demais, sendo o sistema 3C, apesar de menores resultados de alongamento, o que obteve maiores resultados para essa avaliação.

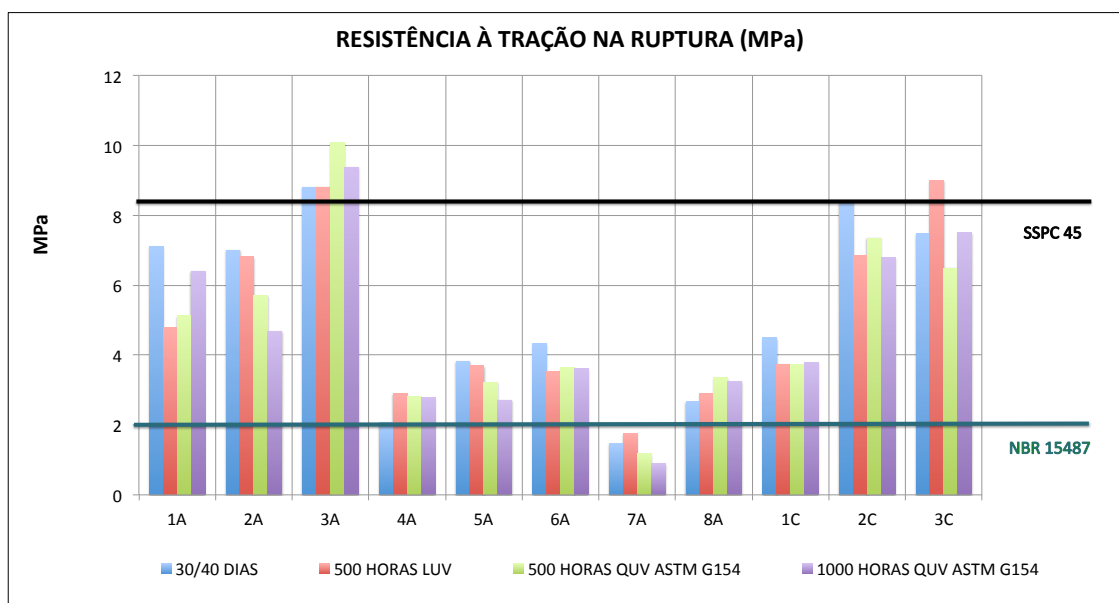


Figura 5.3 - Comparativo dos resultados dos ensaios de resistência à tração na ruptura Com relação à variação, todos os sistemas permaneceram no limite de perda requerido pelas suas respectivas normas.

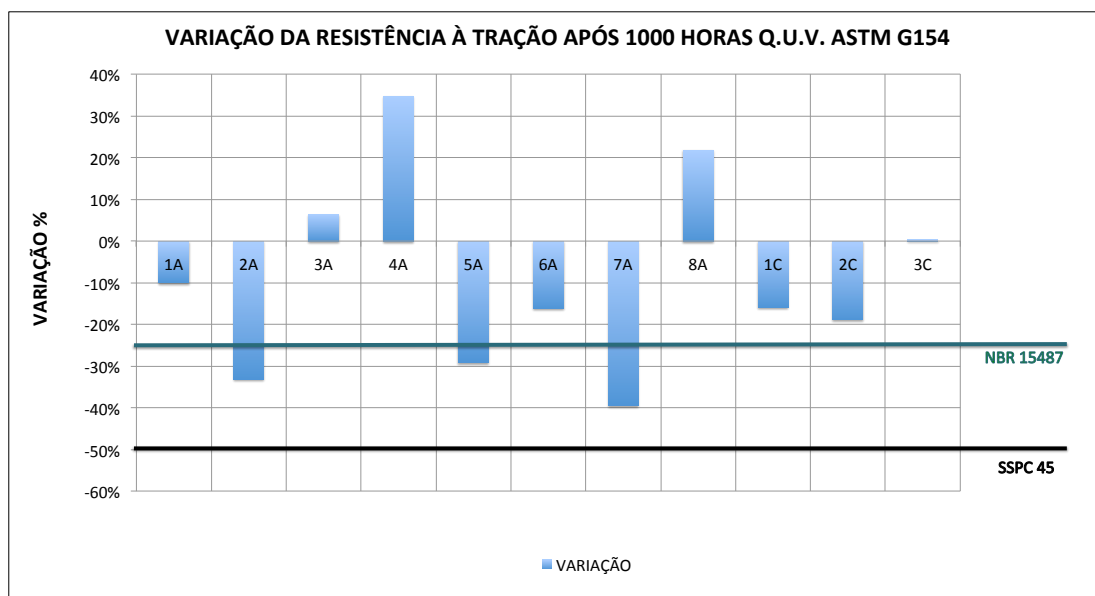


Figura 5.4 - Variação dos resultados da resistência à tração na ruptura antes e após envelhecimento acelerado de 1000 horas no aparelho de Q.U.V.

Os resultados obtidos para a resistência ao rasgo mostraram que o sistema 5A não atingiu o requerido pela norma SSPC 45, no entanto vale ressaltar que essa norma se aplica as poliuréia aplicadas a quente, que não é o caso deste. É interessante observar que a membrana acrílica 7A, apesar de ter obtido o maior resultado de alongamento, teve o menor dos resultados de resistência ao rasgo. Essa explicação pode estar relacionada à sua estrutura química, com poucas ligações cruzadas.

Mais uma vez verificou-se que as poliuréia aplicadas a quente apresentaram um patamar de resultados mais alto se comparados aos demais sistemas de elastômeros.

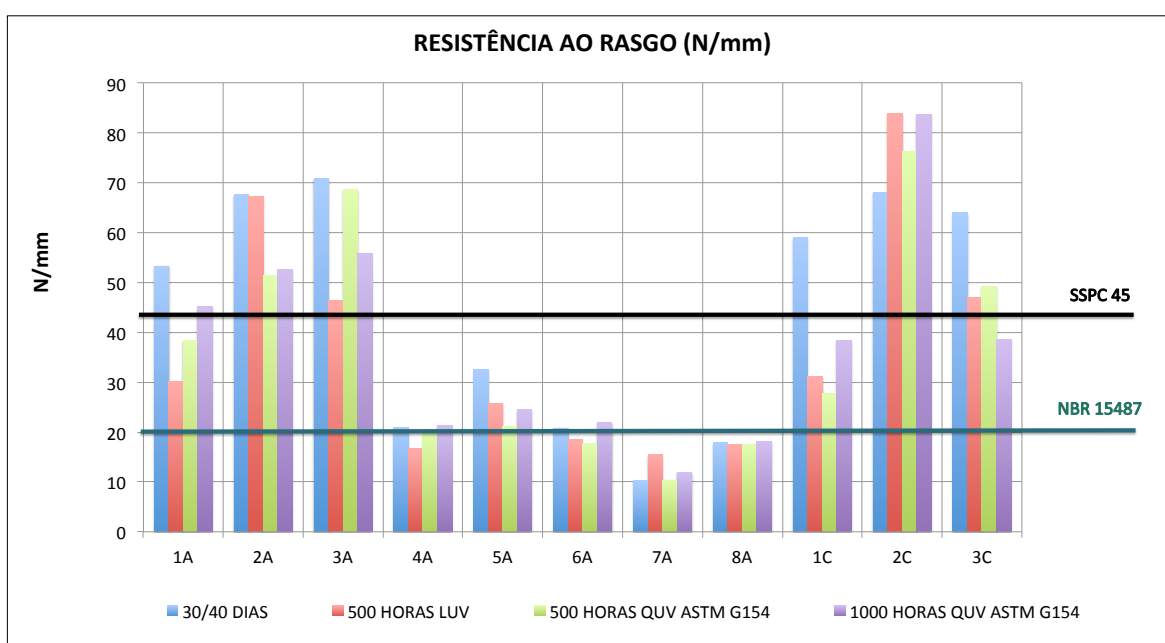


Figura 5.5 - Comparativo dos resultados dos ensaios de resistência ao rasgo

Com relação à variação de propriedade após envelhecimento, verificou-se que todos os sistemas permaneceram dentro dos limites de perda de duas respectivas normas, conforme figura a seguir.

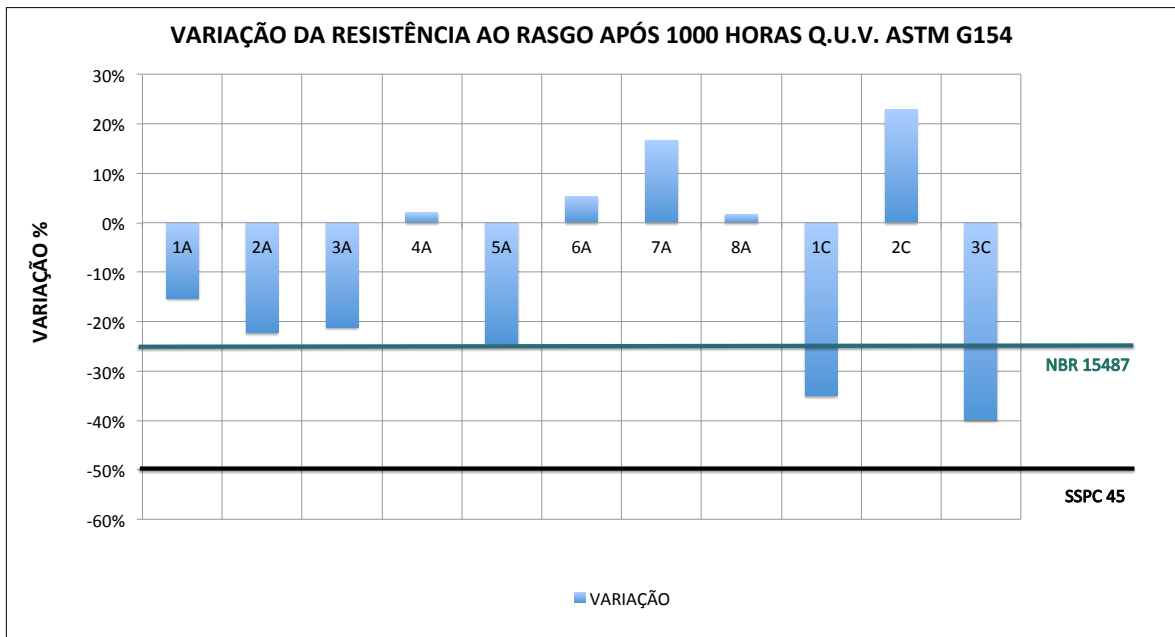


Figura 5.6 - Variação dos resultados de resistência ao rasgo antes e após envelhecimento acelerado de 1000 horas no aparelho de Q.U.V.

Com relação à dureza medida na escala shore A, verificou-se que o sistema 1A e 1C não obteve o valor mínimo requerido pela norma SSPC 45. A Membrana acrílica 7A e a manta asfáltica 8A, também obtiveram valores baixos para esse ensaio, conforme esperado.

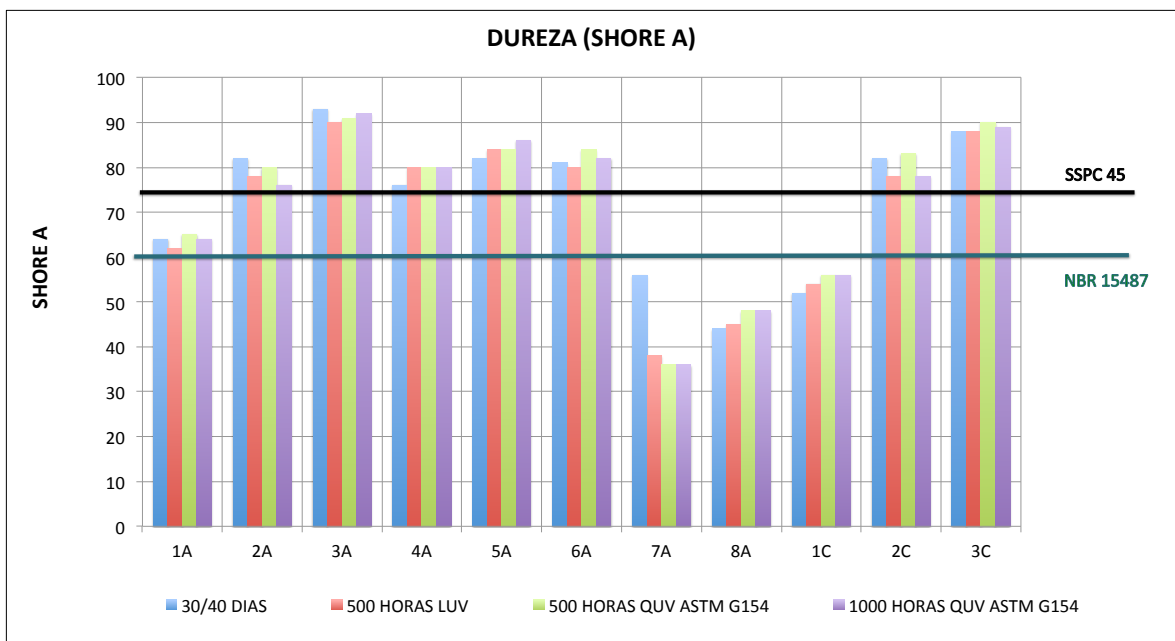


Figura 5.7 - Comparativo dos resultados dos ensaios de dureza na escala shore A

A variação das perdas dessa propriedade após envelhecimento foi muito baixa, com exceção da membrana base acrílica, que se apresentou muito mole após o envelhecimento acelerado de 1000 horas no aparelho de Q.U.V., conforme figura seguinte

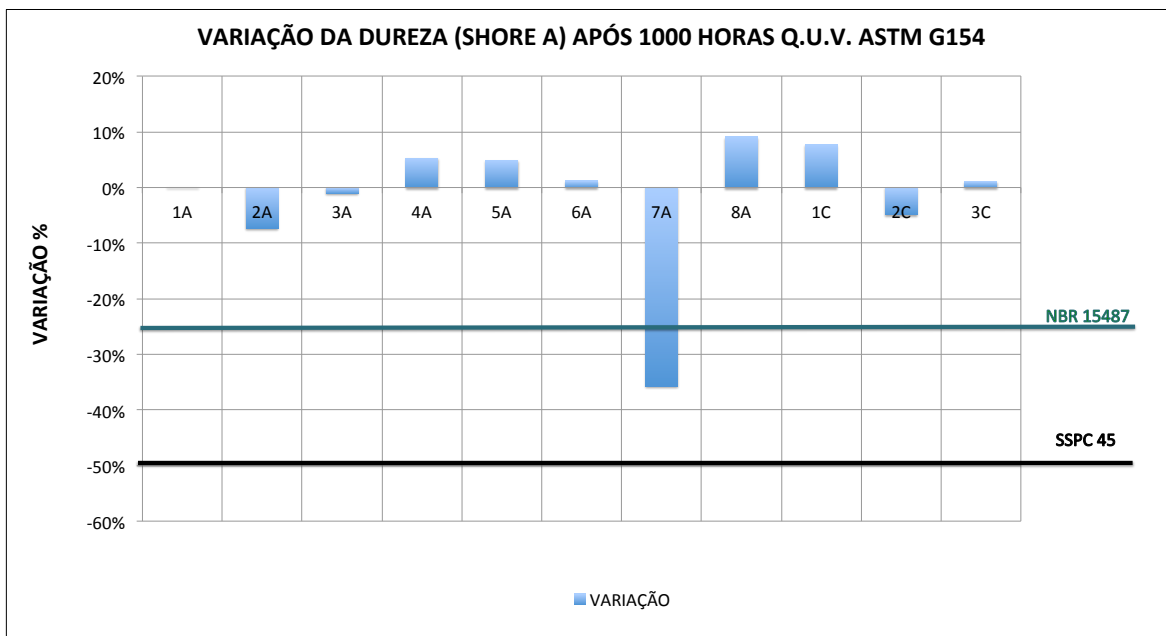


Figura 5.8 - Variação dos resultados da dureza na escala shore A antes e após envelhecimento acelerado de 1000 horas no aparelho de Q.U.V.

Os resultados do ensaio de abrasão pela norma DIN ISO 4649 foram organizados conforme figura seguinte.

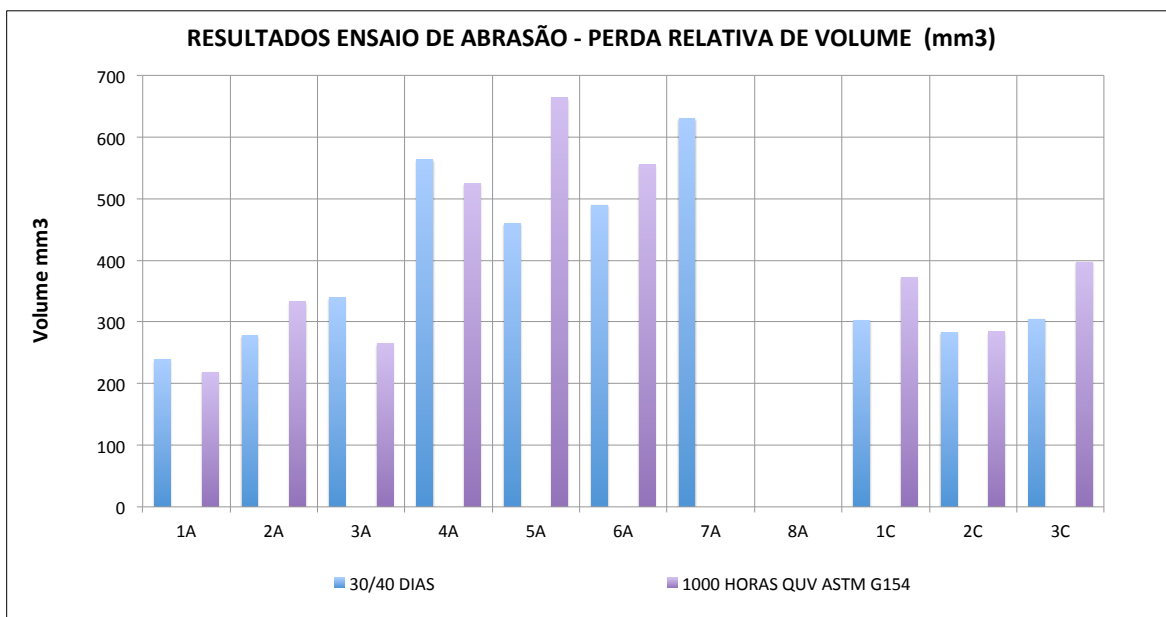


Figura 5.9 - Comparativo dos resultados de perda de volume obtidos através dos ensaios de abrasão pela norma DIN ISO 4649:2006

E os resultados de resistência à abrasão foram organizados na figura seguinte.

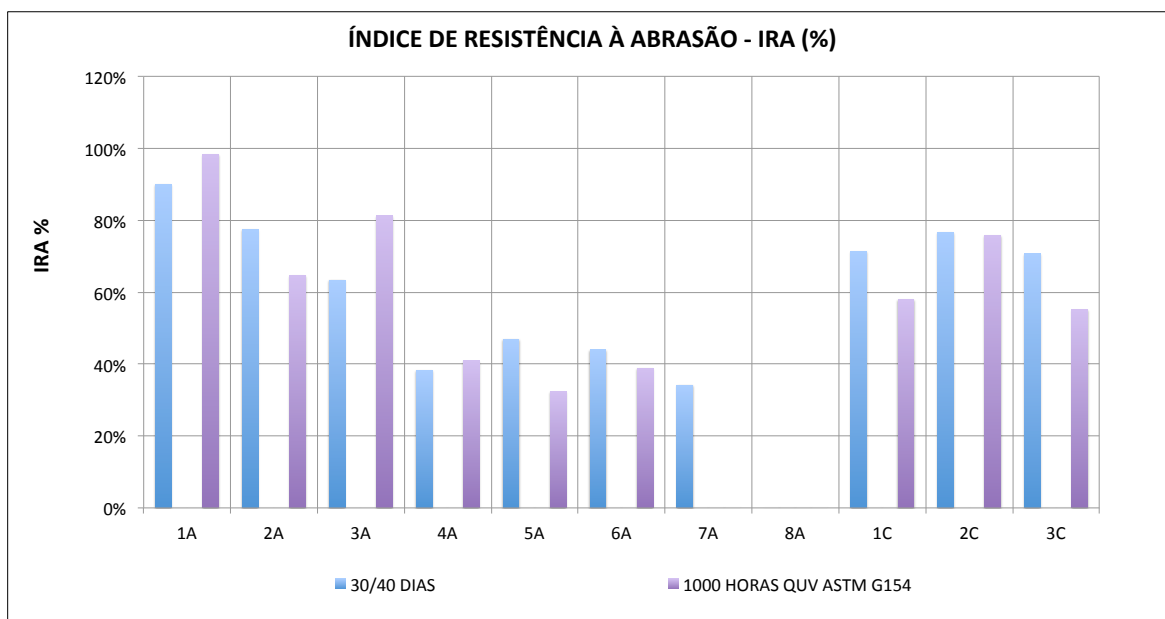


Figura 5.10 - Comparativo dos valores de Índice de Resistência à Abrasão (IRA) calculados à partir dos resultados dos ensaios de abrasão pela norma DIN ISO 4649:2006

Percebe-se que mais uma vez, os sistemas baseados em poliuréia a quente obtiveram uma melhor performance verificada pelo maior índice de resistência à abrasão, e por conseguinte, menor perda em volume.

Dentro dessa família de poliuréias aplicadas a quente (1A, 2, 3A, 1C, 2C, e 3C) verificou-se que a poliuréia mais dura (família 3) foi a que mais apresentou desgaste pela ação da lixa.

Vale considerar que a membrana acrílica (7A) não resistiu ao ensaio de abrasão após o envelhecimento acelerado. Vale também considerar que esse ensaio não foi feito para a manta asfáltica (8A) pela impossibilidade de execução do mesmo, tendo em vista que o asfalto impregnaria totalmente a lixa, sendo obrigatório o descarte.

Complementarmente e com o objetivo posterior de correlacionar com o ensaio de abrasão por pneus, as perdas de massa e de espessura de cada um dos sistemas foram organizadas nas figuras 5.11 e 5.12.

Os mesmos comportamentos obtidos para o índice de resistência à abrasão e perda relativa de volume foram encontrados nessas duas análises citadas.

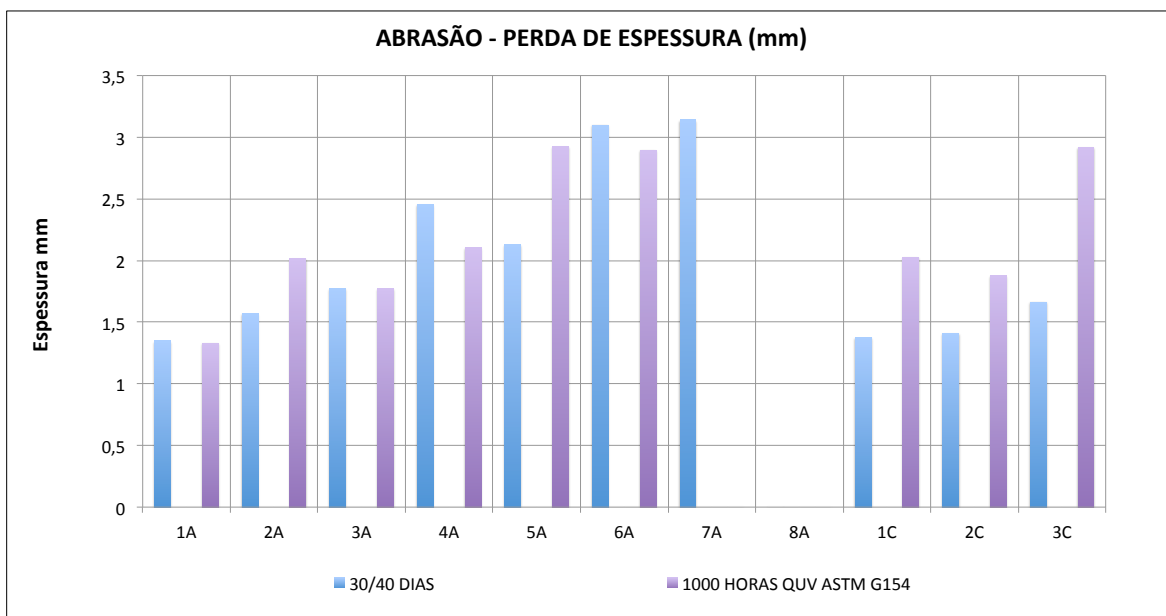


Figura 5.11 - Comparativo da perda média de espessura dos corpos de prova utilizados nos ensaios de abrasão pela norma DIN ISO 4649:2006

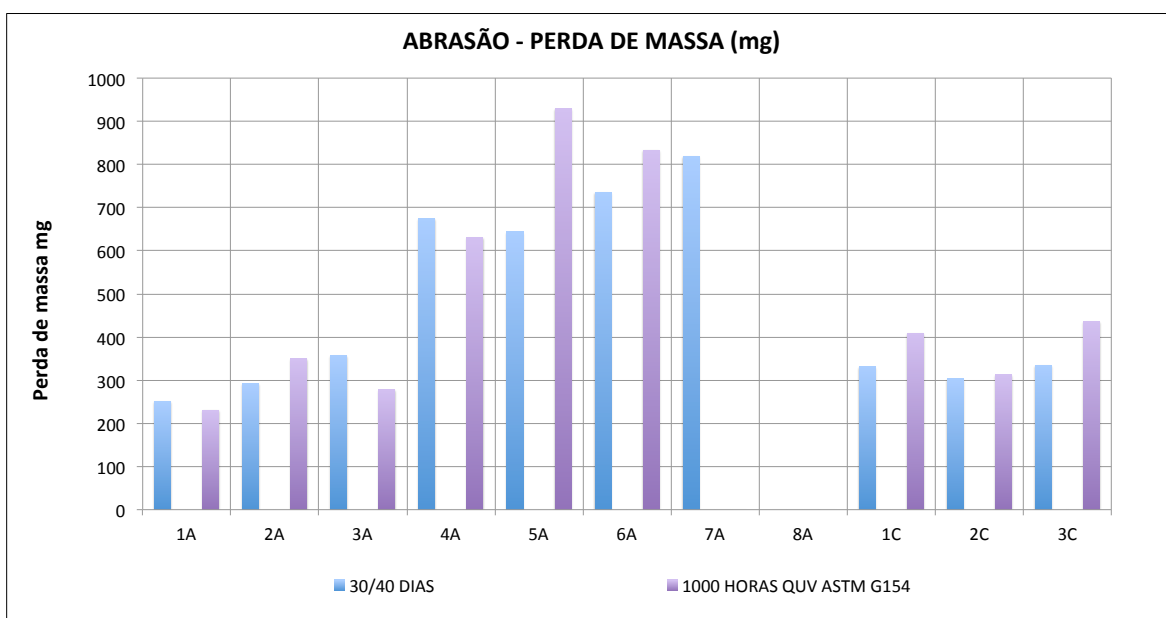


Figura 5.12 - Comparativo da perda média de massa dos corpos de prova utilizados nos ensaios de abrasão pela norma DIN ISO 4649:2006

Apenas como efeito ilustrativo, e no intuito de se avaliar comparativamente os sistemas em relação aos ensaios de caracterização de uma forma generalista, foi realizado um “ranking” dos sistemas como pode ser verificado na tabela 5.1.

De acordo com a metodologia utilizada para a execução dessa classificação, os sistemas foram pontuados de 0 a 10, de acordo com a sua colocação no ensaio referido.

Tabela 5.1 – Pontuação de cada um dos sistemas de acordo com o ensaio de caracterização.

ALONGAMENTO EM %		RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)		RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)		DUREZA (SHORE A)		ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)		NOTA
7A	511	3A	8,80	3A	70,88	3A	93	1A	90%	10
2A	383,20	2C	8,37	2C	68,12	3C	88	2A	78%	9
2C	380	3C	7,48	2A	67,61	2A	82	2C	77%	8
1C	342	1A	7,12	3C	64,00	5A	82	1C	71%	7
1A	338,00	2A	7,01	1C	58,97	2C	82	3C	71%	6
5A	120	1C	4,50	1A	53,29	6A	81	3A	63%	5
4A	82,00	6A	4,33	5A	32,48	4A	76	5A	47%	4
3A	74,67	5A	3,83	4A	20,97	1A	64	6A	44%	3
3C	64	8A	2,67	6A	20,80	7A	56	4A	38%	2
6A	60	4A	2,07	8A	17,84	1C	52	7A	34%	1
8A	55	7A	1,47	7A	10,28	8A	44	8A	0	0

Tabela 5.2 - “Ranking” final dos sistemas de acordo com o ensaio de caracterização.

SISTEMA	ALONGAMENTO EM %		RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)		RESISTÊNCIA AO RASGO (N/mm)		DUREZA (SHORE A)		ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO - IRA (%)		NOTA FINAL
	NOTA OBTIDA NESSE ENSAIO	PESO DO ENSAIO	NOTA OBTIDA NESSE ENSAIO	PESO DO ENSAIO	NOTA OBTIDA NESSE ENSAIO	PESO DO ENSAIO	NOTA OBTIDA NESSE ENSAIO	PESO DO ENSAIO	NOTA OBTIDA NESSE ENSAIO	PESO DO ENSAIO	
2A	9	4	6	1	8	1	8	2	9	2	84
2C	8		9		9		6		8		78
1A	6		7		5		3		10		62
3A	3		10		10		10		5		62
1C	7		5		6		1		7		55
3C	2		8		7		9		6		53
5A	5		3		4		7		4		49
7A	10		0		0		2		1		46
4A	4	1	3	4	2	32					
6A	1	4	2	5	3	26					
8A	0	2	1	0	0	3					

A importância do ensaio para o objetivo desejado para o sistema foi refletida no peso do mesmo. O critério de e pesos do ranking foi pensado para uma laje de tráfego de veículos que precisaria receber algum sistema impermeabilizante e foi baseado nos resultados que foram obtidos nos estudos do comportamento da membrana aplicada apresentado na seção seguinte desse trabalho.

Percebeu-se que, para evitar a fissuração na membrana impermeabilizante, a propriedade mecânica que apresentou mais importante foi o alongamento. A dureza e a resistência à abrasão também são importantes tendo em vista a necessidade da membrana impermeabilizante não ter a sua espessura reduzida ou se desgastar prematuramente com a pressão e abrasão por ação de pneus no tráfego veicular. A resistência à tração e ao rasgo não apresentaram influência direta na capacidade da membrana resistir à abertura das fissuras da base estrutural à qual esta aplicada. No entanto, comparando-se duas membranas de alongamentos próximos, a que apresentou maior resistência ao rasgo se comportou melhor no ensaio de flexão da lajes, quando esta sujeita se fissurou e transmitiu à membrana essa deformação.

Verificou-se portanto que os sistemas baseados em membranas de poliuréia, ocuparam as 7 primeiras posições, seguidos pela membrana acrílica, apenas porque obteve nota máxima no ensaio de alongamento, depois os poliuretanos e por fim, a manta asfáltica.

5.2 ANÁLISE DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS IMPERMEABILIZANTES APLICADOS

Nessa seção do trabalho são analisados os resultados dos ensaios de desempenho desenvolvidos para simular a situação de serviço dos sistemas devidamente aplicados em lajes de concreto.

5.2.1 Ensaio de flexão de lajes de concreto armado e de prismas de concreto

Os resultados de abertura máxima das fissuras de cada laje e seus vão central, antes do rompimento de cada membrana, foram organizados na figura comparativa a seguir

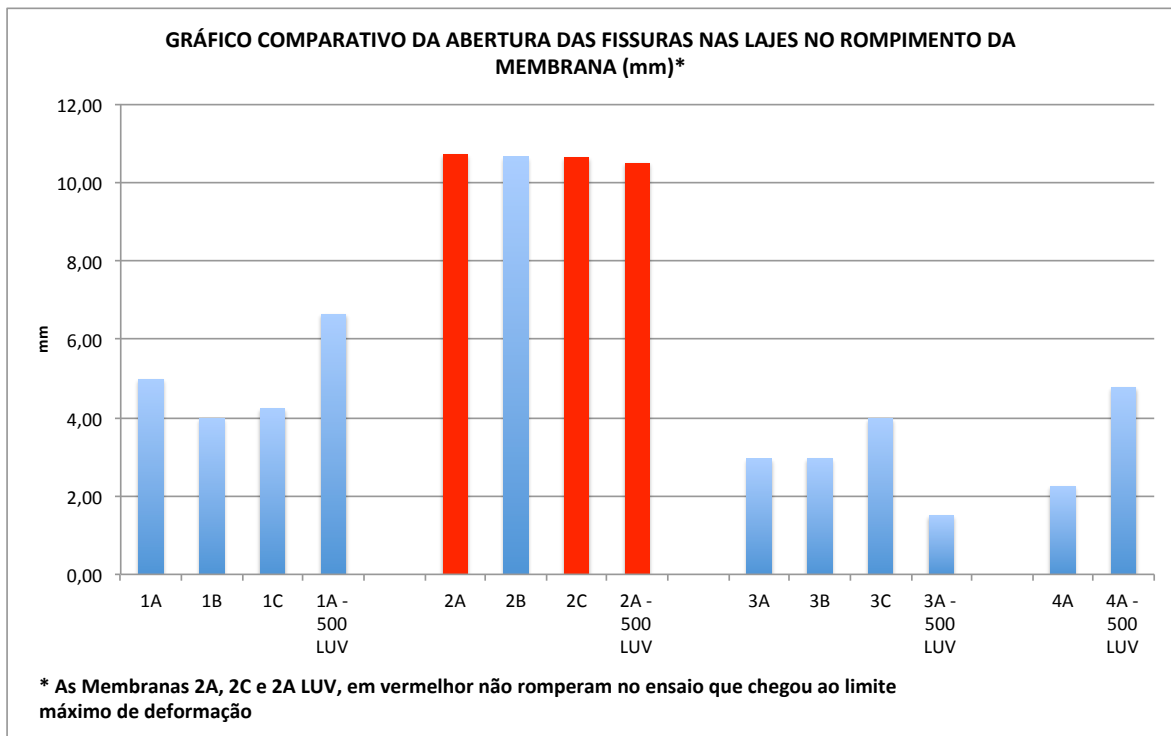


Figura 5.13 - Comparativo da abertura das fissuras nas lajes de concreto armado no rompimento da membrana (mm)

É possível perceber que das quatro famílias ensaiadas, a de poliuretano a quente pura obteve os valores mais altos, valendo ressaltar que em 3 de 4 lajes sequer foi possível romper a membrana.

É possível também perceber que tal qual no ensaio de alongamento, os sistemas de poliuretano 3, foi a que menos se deformou em relação à abertura das fissuras na laje e que o sistema de poliuretano multicamadas obteve resultados dentro deste mesmo patamar.

Os resultados dos ensaios de flexão dos prismas foram organizados na figura comparativa à seguir, e mostraram a mesma tendência observada no ensaio de flexão das lajes.

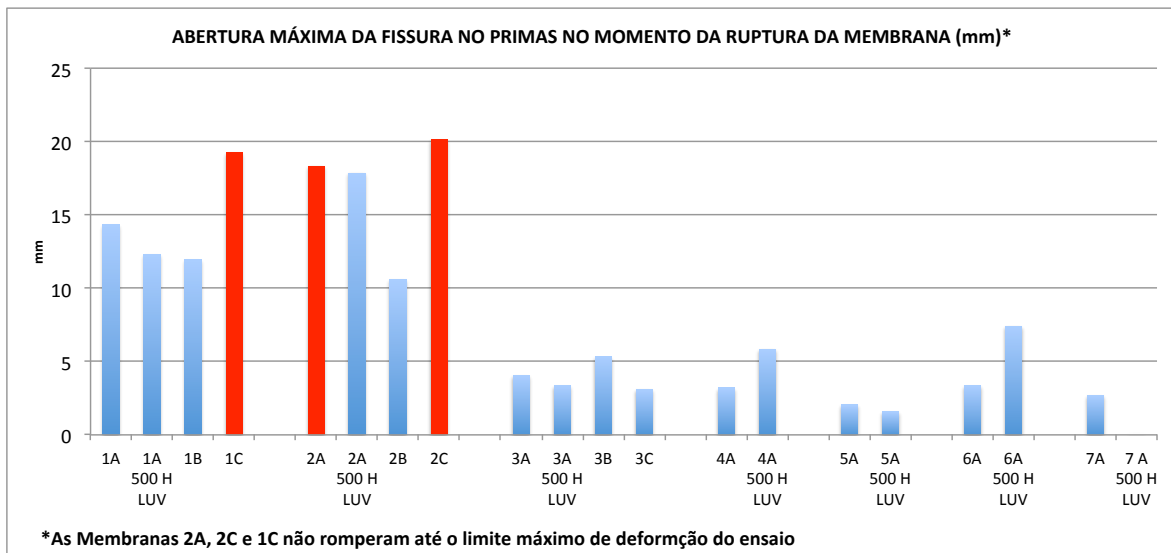


Figura 5.14 - Comparativo da abertura das fissuras nos e primas de concreto no rompimento da membrana (mm)

É interessante perceber que apesar da tendência de correlação que existe, o sistema de membrana acrílica, que obteve o maior resultado em relação ao alongamento, foi um dos que menos se deformou em relação à abertura da fissura quando da flexão dos primas.

Outro fato merecedor de nota é que o sistema da poliuréia 1 (híbrida, aplicada a quente e de alto alongamento), apresentou melhores resultados se comparado aos demais no ensaio de flexão com primas, todavia não ocorrendo o mesmo no ensaio de flexão das lajes.

Cabe comentar que era pretendido que o ensaio de flexão das lajes simulasse de maneira mais próxima a realidade do comportamento e da capacidade das membranas de se deformarem em relação à abertura das fissuras em situações de serviço.

No entanto, percebe-se que apesar de ter se aproximado muito mais realidade que o ensaio de flexão dos primas, a abertura das fissuras sem rompimento da membrana no flexão das lajes ainda apresentou resultados muito altos, que, pela experiência, estão acima dos encontrado em situações de serviço (Bauer e Vasconcelos 2014).

Para aprofundar nessa questão seria necessário avaliar a dinâmica comportamental dos ensaios de flexão, que será feito na seção 5.3.

5.2.2 Ensaio de aderência das membranas em pisos de concreto

Através da análise do ensaio de aderência, é possível constatar que as membranas de poliuréia aplicadas diretamente sobre o primer de concreto obtiveram os melhores resultados, inclusive acima do mínimo requerido pela norma SSPC 45, conforme figura seguinte.

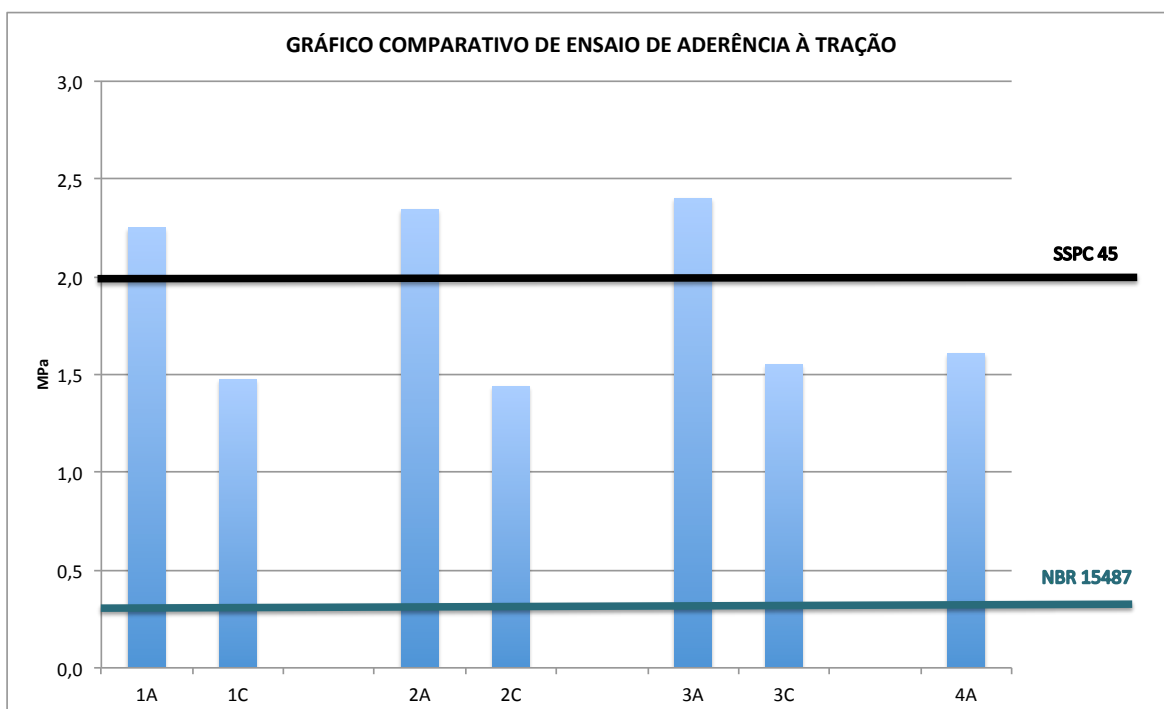


Figura 5.15 - Comparativo de aderência à tração direta dos sistemas aplicados no piso de concreto

É necessário observar, que esse resultado de aderência ainda poderia ser maior, tendo em vista que dos oito testes realizados nestes sistemas, em três deles a ruptura se deu no concreto e em outros três a ruptura se deu entre o adesivo e o dispositivo metálico de arrancamento. Em apenas dois casos, a ruptura se deu na região do primer.

No sistema de multicamadas de poliuretano e nos sistemas de membranas de poliuréia aplicadas sobre base de poliuretano, os valores se mantiveram num patamar próximo aos 1,5 MPa, o que é muito superior ao requerido pela norma brasileira para membranas de poliuretanos para impermeabilização, NBR 15487:2007, todavia, inferior ao requerido pela norma de desempenho de poliuréias, a SSPC 45.

5.2.3 Ensaio de Abrasão de pneus sobre membranas aplicas no piso de concreto

Nesse ensaio, o dispositivo criado para essa pesquisa para simular o tráfego de um carro, trafegava ciclicamente por cima de sete sistemas pesquisados. Quatro deles são recomendados para o tráfego de veículos (1A, 2A, 3A, e 4A), sendo que as membranas 1C, 2C, e 3C, conforme explicitado nos capítulos anteriores seriam uma tentativa de se criar um sistema híbrido de poliuréia com camada base em poliuretano que pudesse ter propriedades melhores que os seus sistemas originais. Todavia, isso não foi observado, também nesse ensaio.

Analisando-se o número de ciclos totais (no qual a membrana ficou recebendo a ação cíclica dos pneus) e os ciclos em condições de serviço do sistema (que é a quantidade de ciclos que a membrana recebeu sem que houvesse patologia que restringisse o uso em situações de serviço), obtém-se a figura 5.16.

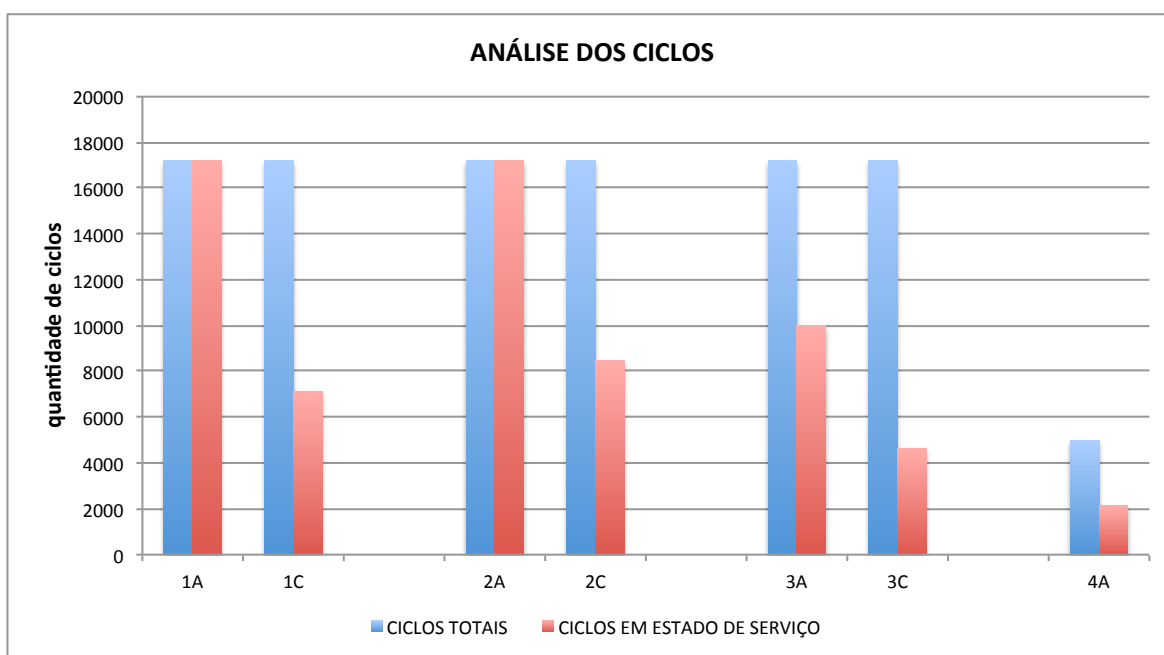


Figura 5.16 - Ciclos totais recebidos por cada sistema aplicado no piso e ciclos máximo que cada sistema permaneceu em estado de serviço

No caso da abrasão dos pneus é possível observar que os sistemas 1A e 2A, ao término do ensaio ainda estavam, apesar de desgastados, em condições de serviço, conforme a figura 4.18 apresentadas no capítulo 4. A membrana 3A resistiu, em condições de serviço, apenas

cerca da metade de seus pares 1A e 2A. Partindo do pressuposto que suas respectivas aderências à tração apresentaram resultados semelhantes, leva-se a crer que a hipótese mais provável para tal ocorrência está ligada à menor elasticidade do sistema 3A, principalmente se considerarmos que esta membrana chegou a se fissurar e posteriormente se descolar do piso, com a ação direta dos pneus.

As membranas que dispunham de camada de base em poliuretano (1C, 2C, 3C) resistiram cerca da metade dos ciclos que seus pares aplicados diretamente sobre primer base epóxi. A patologia apresentada em todos os esses sistemas esta relacionada ao descolamento da camada de base do poliuretano do piso. Tendo em vista que a resistência de aderência apresentou resultados satisfatórios, leva-se a crer que a hipótese mais provável para essa ocorrência seria a menor resistência da camada de base em poliuretano de resistir o esforço de cisalhamento imposto pela ação dos pneus, conforme o croqui ilustrado na figura 5.17.

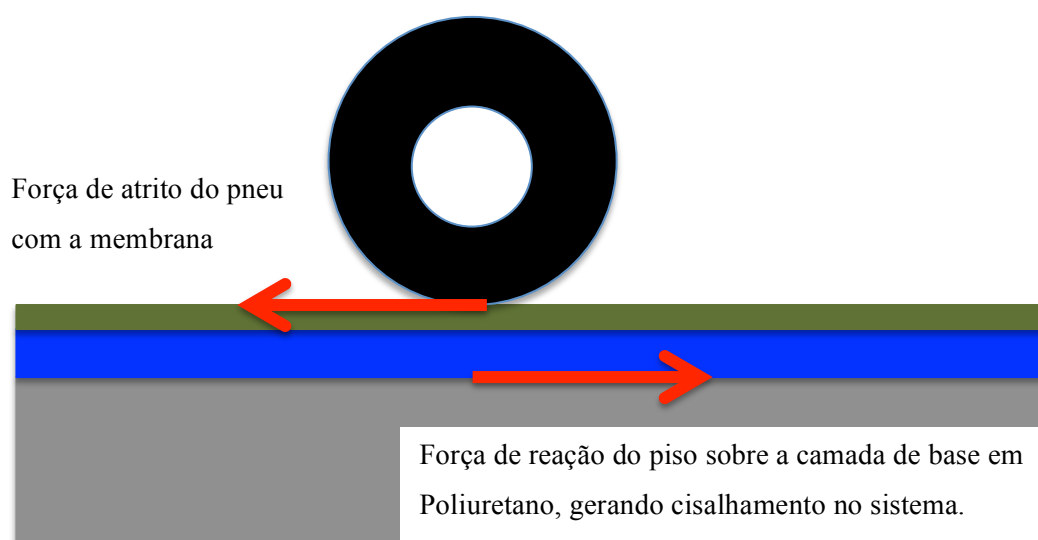


Figura 5.17 - Croqui esquemático do esquema de forças atuantes no ensaio de abrasão por ação de pneus sobre os sistemas com camada base em Poliuretano

Na figura 5.17 é possível observar o esquema de forças que atuam no sistema impermeabilizante. O atrito do pneu na camada superior do sistema (membrana de poliuréia) gera uma força de reação que é transmitida para a camada de base (poliuretano) gerando um esforço de cisalhamento nesta última camada, que não correspondeu a um bom desempenho se comparado aos sistemas de monocamada de membranas de poluréia (1A, 2A, 3A).

Outro fato que corrobora essa conclusão é que os sistemas 1C, 2C e 3C primeiro apresentaram o aparecimento de bolhas, para depois se rasgarem, o que demonstra que a nucleação da patologia se deu à partir da camada de base. O mesmo efeito ocorreu na membrana 4A, que se degradou muito rapidamente.

As perdas de espessura e de massa ao término do ensaio, bem como esta análise em função do número de ciclos totais, podem ser expressadas pelas figuras seguintes.

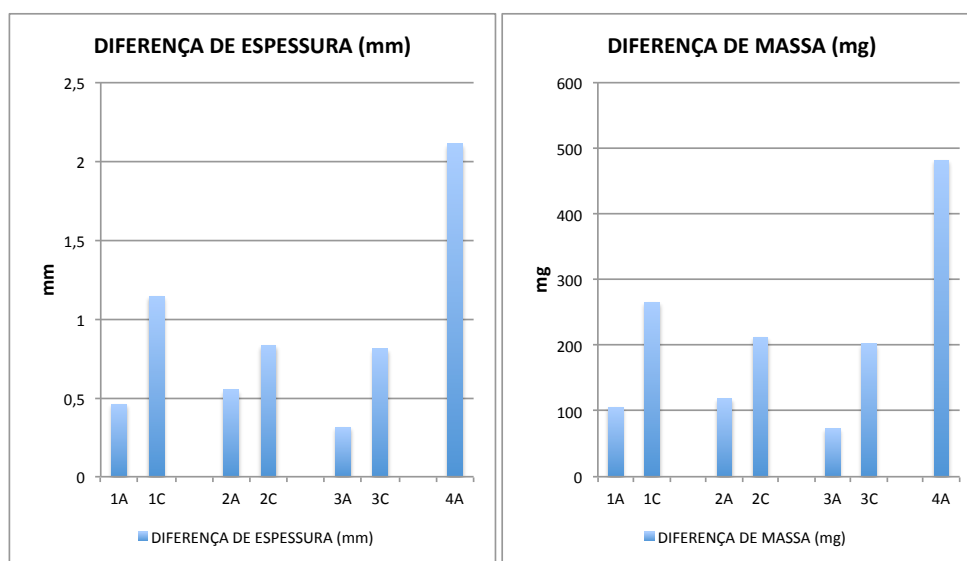


Figura 5.18 - Análise comparativa de perdas de espessura e massa no ensaio de abrasão por ação de pneus.

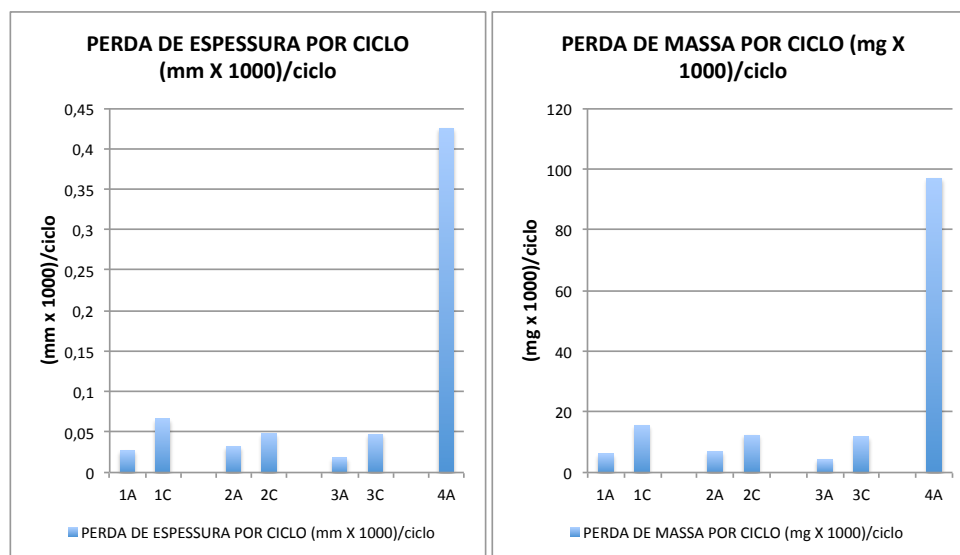


Figura 5.19 - Análise comparativa de perdas de espessura e massa por ciclos totais no ensaio de abrasão por ação de pneus.

5.2.4 Ensaio de Abrasão de pneus sobre pastilhas coladas no piso de concreto

Com o objetivo de verificar, complementarmente, a resistência à abrasão dos demais sistemas, foram aderidas pastilhas das membranas de casa sistema objeto dessa pesquisa, excetuando-se a manta asfáltica, que notoriamente, não resiste a tráfego veicular, no trilho por onde passavam os pneus, conforme explicado no capítulo 3.

Tal qual o comportamento observado no piso, os sistemas 1A, 2A, foram os que mais resistiram. E tal qual o ocorrido na membrana aplicada no piso, as pastilhas do sistema 3A fissuraram e se descolaram do substrato. O sistema 4A resistiu muito pouco em relação aos sistemas de poliuréia a quente. É possível observar que os sistemas 5A e 6A resistiram uma quantidade alta de ciclos e que o sistema de membrana acrílica 7A, praticamente não apresentou resistência à abrasão, o que já era esperado.

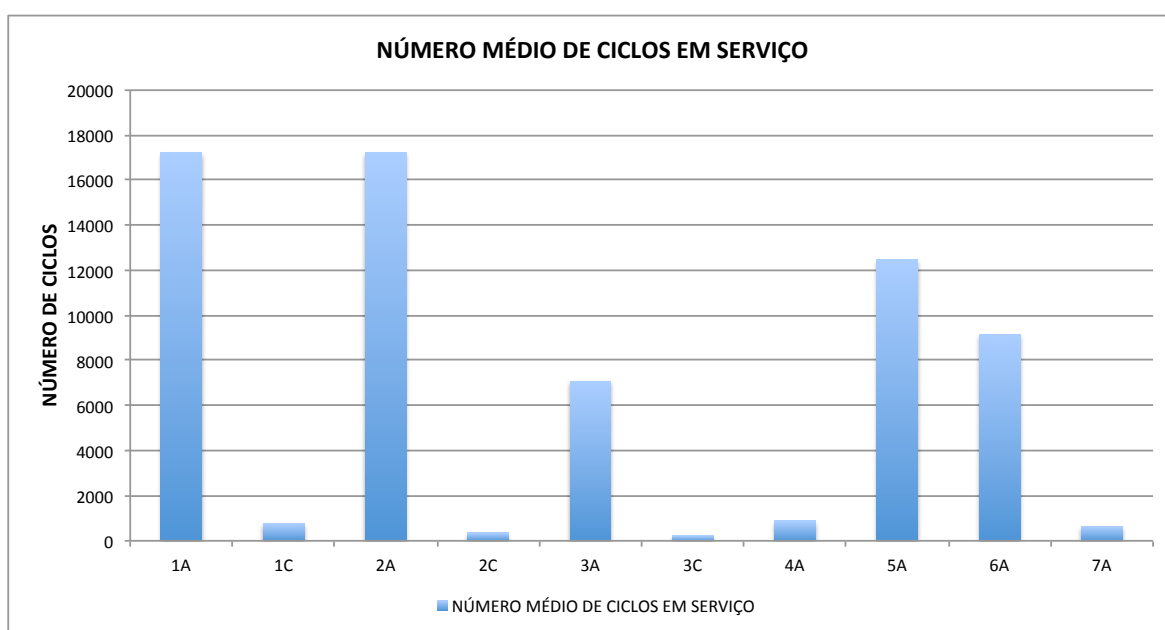


Figura 5.20 - Média de ciclos de passagem de pneus recebido pelas pastilhas dos sistemas objeto desse estudo em estado de serviço.

Os sistemas híbridos de poliuréia com camada de base em poliuretano foram os que menos resistiram. Isso, deve-se, principalmente pelo efeito já descrito na figura 5.17, todavia majorado em função das pastilhas ficarem sobressaltadas ao piso, gerando um impacto maior e cíclico a cada vez que os pneus passavam por elas.

As perdas de espessura e massa ao término do ensaio, após cada pastilha atingir o fim do seu estado de serviço, podem ser expressadas pela figura 5.21.

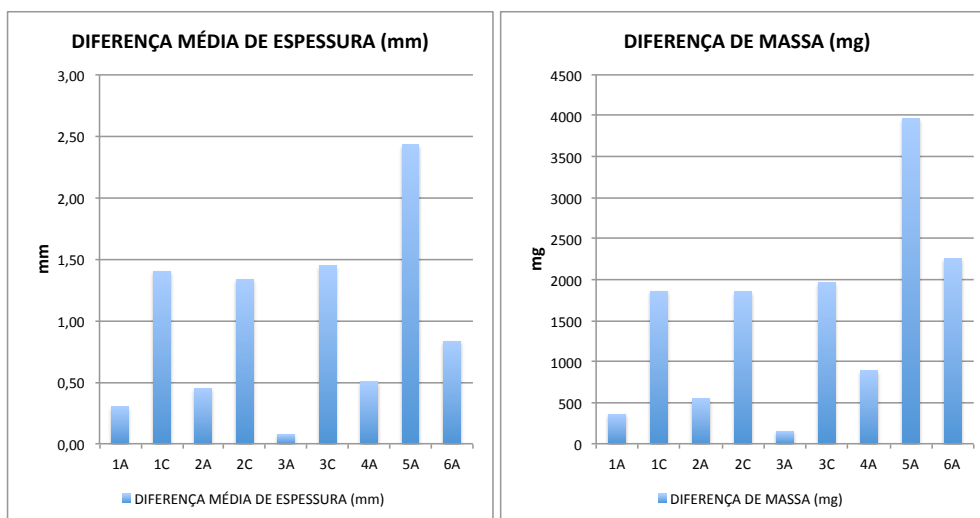


Figura 5.21 - Análise comparativa de perdas de espessura e massa das pastilhas no estado de serviço dos sistemas no ensaio de abrasão por ação de pneus.

Pela figura anterior, é possível perceber que conforme recomendações dos respectivos fabricantes, as membranas 5A e 6A não são destinadas ao uso em tráfego de veículos. Os resultados do sistema 7A não foram anotados na figura tendo em vista que ao término dos ciclos sobre suas pastilhas, era impossível medir sua espessura por terem se degradado completamente, conforme figura 4.19 (c). Se a mesma análise for feita levando-se em consideração o número de ciclos em estado de serviço, obtém-se a figuras 5.22.

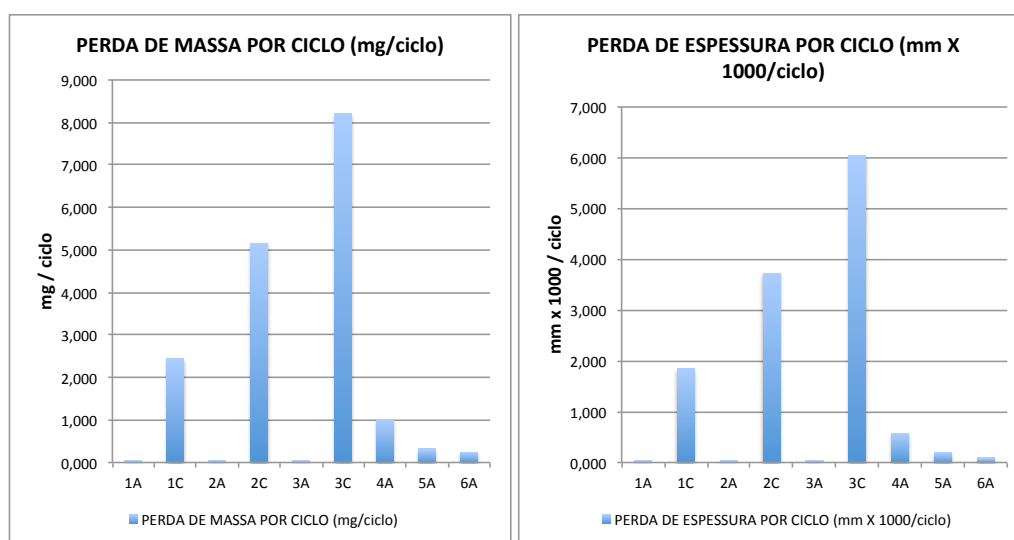


Figura 5.22 - Análise comparativa de perdas de espessura e massa nas pastilhas de cada sistema pelo número de ciclos em serviço no ensaio de abrasão por ação de pneus.

Verifica-se que as perdas por ciclo das membranas 1A, 2A e 3A ainda são bem menores e que os seus sistemas híbridos 1C, 2C e 3C. Tal qual os resultados da abrasão dos pneus diretamente sobre as suas respectivas membranas aplicadas no piso, os resultados não foram satisfatórios.

Tendo em vista que os resultados dos sistemas 1C, 2C e 3C, estarem em outra ordem de grandeza, foi refeito o gráfico sem os mesmos, facilitando a análise, conforme figura 5.23.

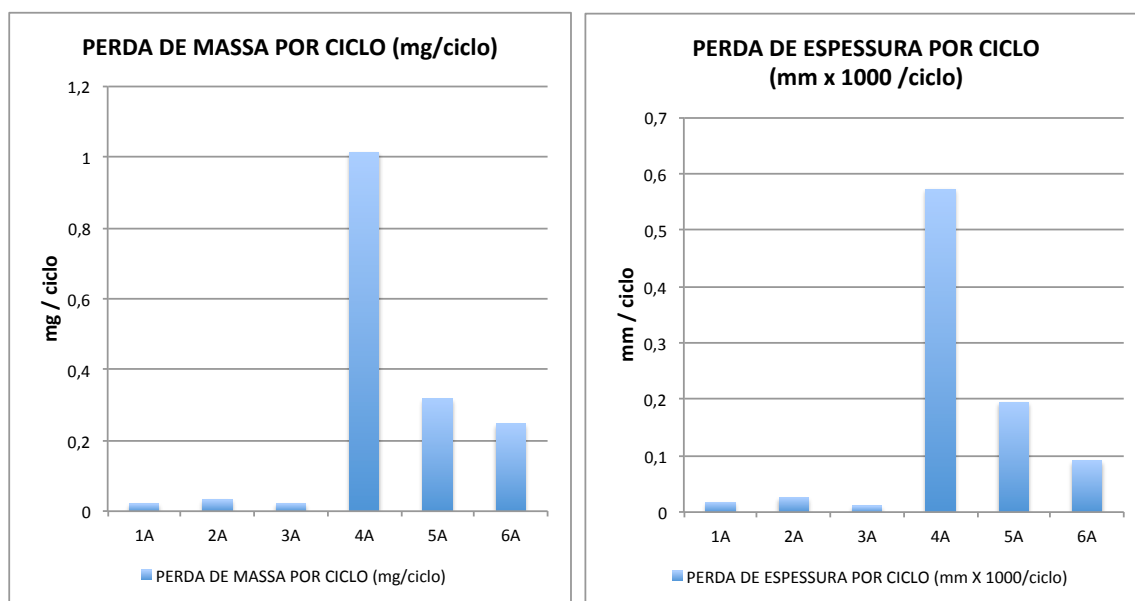


Figura 5.23 - Análise comparativa de perdas de espessura e massa nas pastilhas de cada sistema pelo número de ciclos em serviço no ensaio de abrasão por ação de pneus, sem constar os sistemas 1C, 2C e 3C.

Na figura anterior é mais perceptível que, também nesse ensaio, os sistemas baseados em poliuréia a quente obtiveram resultados bem melhores de resistência à abrasão por pneus se comparado aos os sistemas de membranas de poliuretano e também ao sistema de membrana de poliuréia aplicada a frio.

5.3 CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO COM OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS APLICADOS

Nesse parte do trabalho, serão apresentadas e discutidas as correlações que podem ser obtidas à partir dos resultados dos ensaios de caracterização das membranas com os resultados dos ensaios de desempenho dos respectivos sistemas aplicados em lajes e prismas.

5.3.1 Correlações entre Alongamento, Resistência à tração na ruptura e resistência ao rasgo de cada sistema com a capacidade de deformação até a ruptura de suas membranas sobre as fissuras das lajes e prismas no ensaio de flexão.

Colocando-se na mesma figura, as aberturas máximas das fissuras das lajes e dos primas no momento do rompimento das membranas, em relação ao alongamento obtido pelo respectivo sistema no ensaio da norma ASTM D412, tem-se as figuras seguintes.

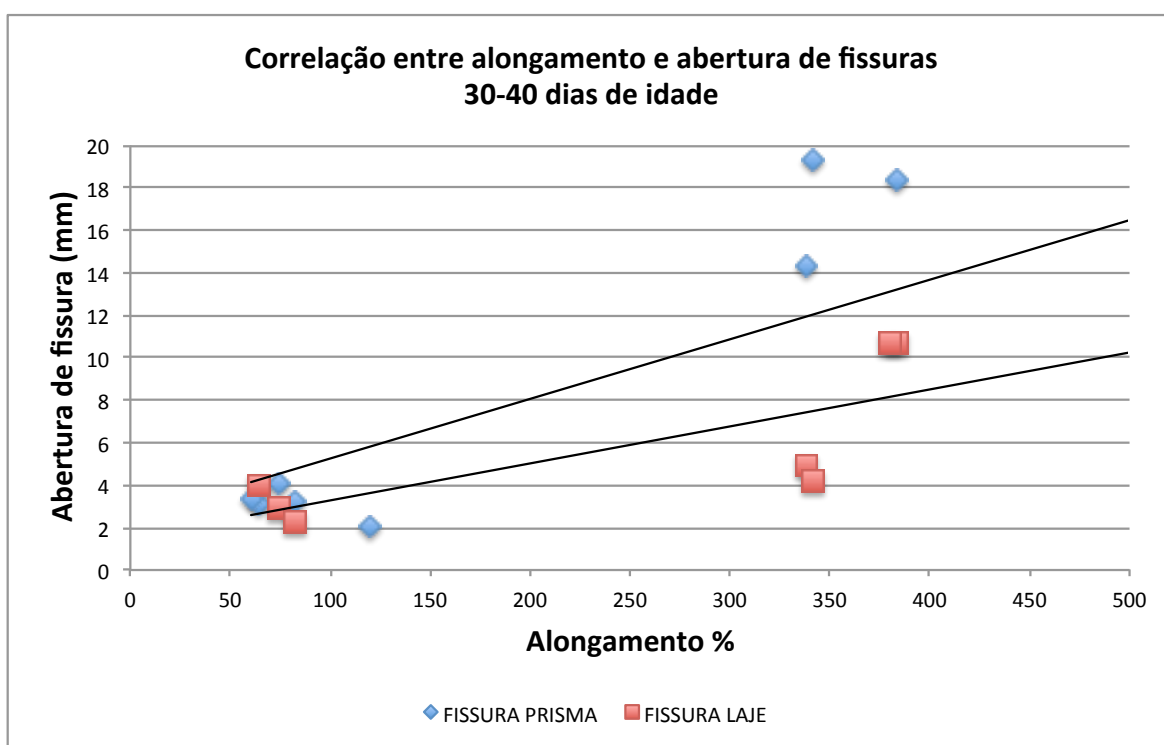


Figura 5.24 - Correlação entre a abertura de fissuras no ensaio de flexão das lajes e dos prismas de concreto com o alongamento do respectivo sistema.

O mesmo gráfico, todavia para os resultados dos corpos de prova envelhecidos na condição descrita na tabela 3.3 foi confeccionado, de acordo com a figura seguinte.

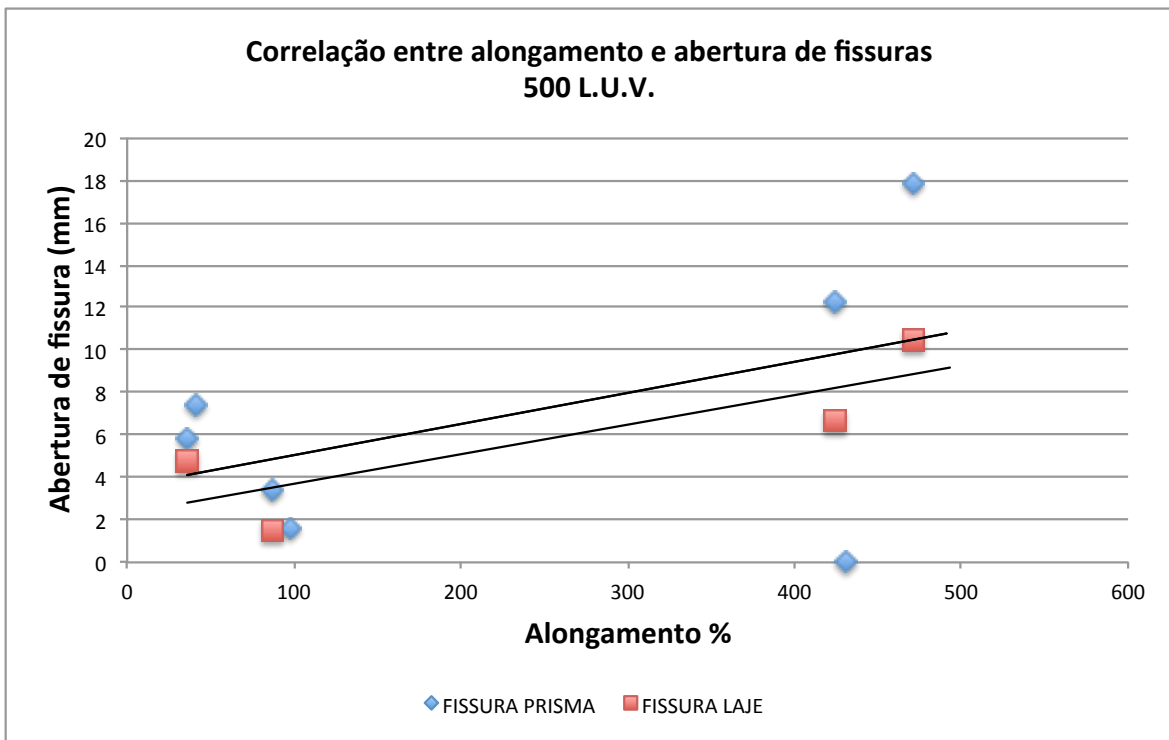


Figura 5.25 - Correlação entre a abertura de fissuras no ensaio de flexão das lajes e dos prismas de concreto com o alongamento do respectivo sistema envelhecido com 500 horas de lâmpadas U.V.B.

Não é possível observar nenhum comportamento definido tendo em vista a grande heterogeneidade entre os sistemas estudados, conforme era esperado.

No entanto se for isolado apenas a família das poliuréticas a quente aplicadas sobre primer é possível obter um gráfico que mostra uma tendência maior de correlação entre o alongamento e a abertura das fissuras até o rompimento das membranas, conforme figuras seguintes.

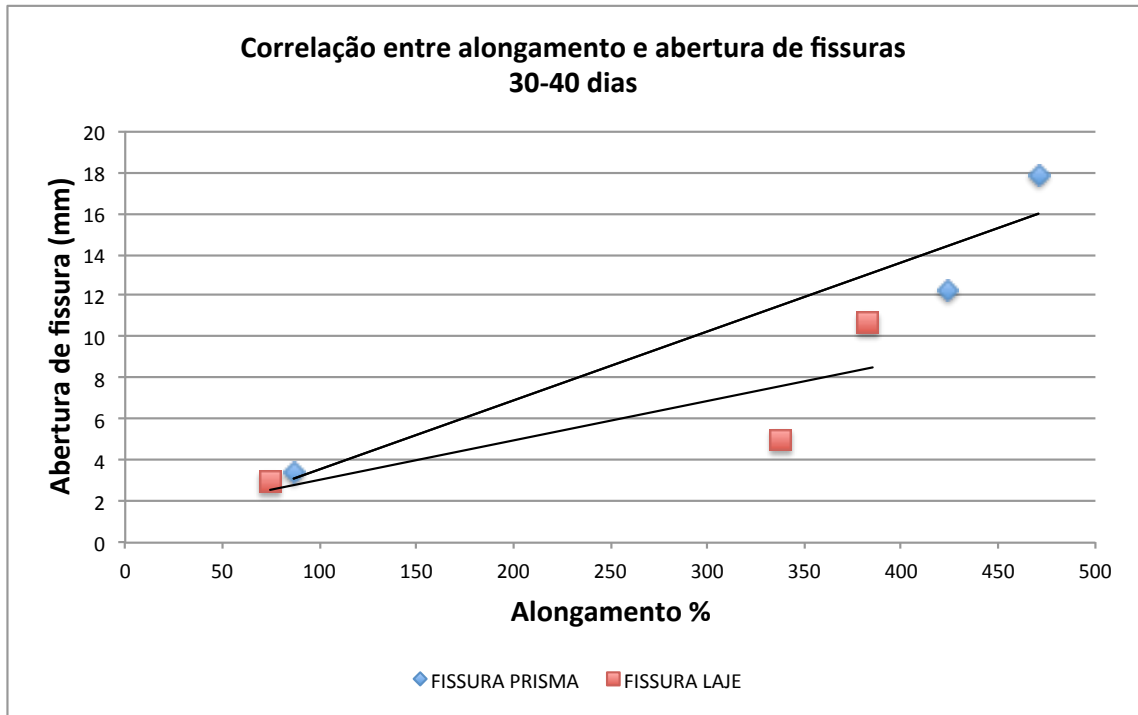


Figura 5.26 - Correlação entre a abertura máxima das fissuras no ensaio de flexão das lajes e dos primas até o rompimento das membranas de concreto com o alongamento para os sistemas 1A 2A e 3A aos 30-40 dias de idade.

O mesmo comportamento ocorreu para os sistemas devidamente envelhecidos na condição 500 L.U.V., conforme figura 5.27.

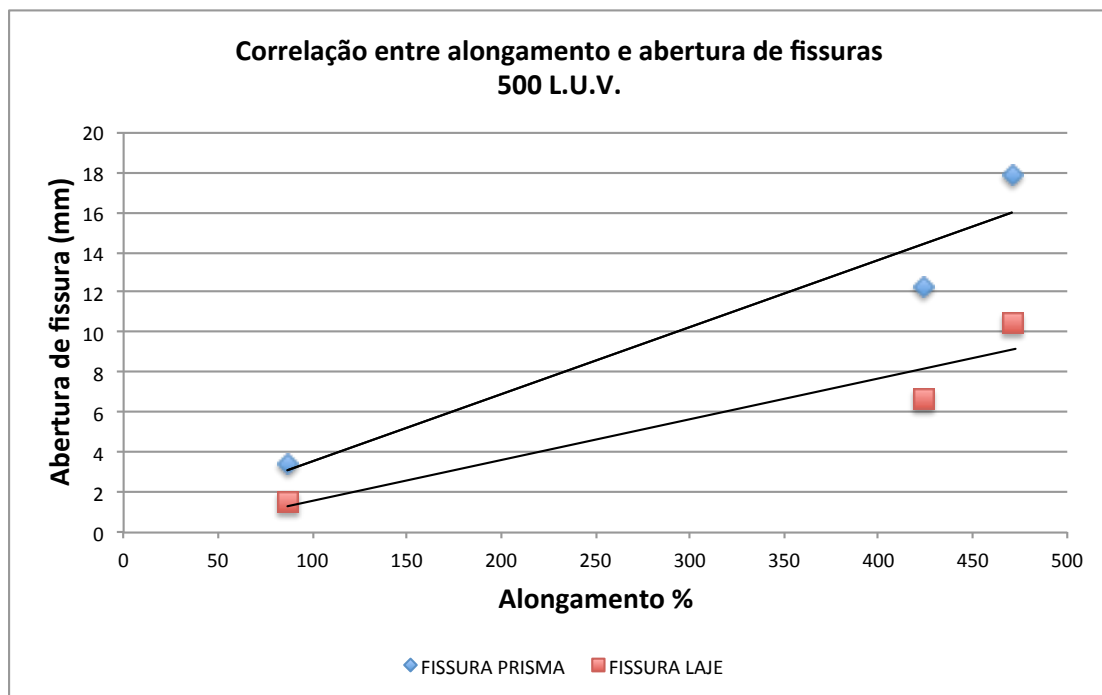


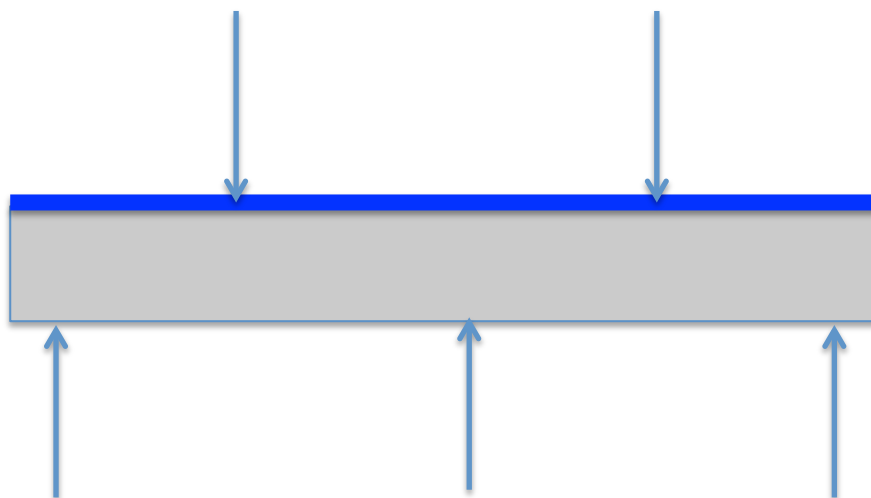
Figura 5.27 - Correlação entre a abertura máxima das fissuras no ensaio de flexão das lajes e dos primas de concreto até o rompimento das membranas com o alongamento para os sistemas 1A 2A e 3A com envelhecimento de 500 LUV.

É possível perceber que os valores das aberturas máximas de fissuras antes do rompimento das membranas dos sistemas são consideravelmente maiores no ensaio de flexão dos prismas do que na flexão das lajes. Também é possível observar que o ângulo de inclinação das linhas de tendência do ensaio feito nos prismas de concreto é maior que nas lajes de concreto armado.

A hipótese mais provável para tal ocorrido está relacionada ao comportamento estrutural dessas duas peças. O prisma possui um comportamento frágil e elástico. Após a ruptura do mesmo, a membrana passa a se deformar tal qual estivesse sendo submetida a um ensaio de alongamento por tração direta..

Essa hipótese da dinâmica do comportamento das membranas em cada um desses elementos estruturais estão melhor descritas nas figura 5.28.

SITUAÇÃO INICIAL



SITUAÇÃO APÓS CARGA E RUPTURA DO PRISMA

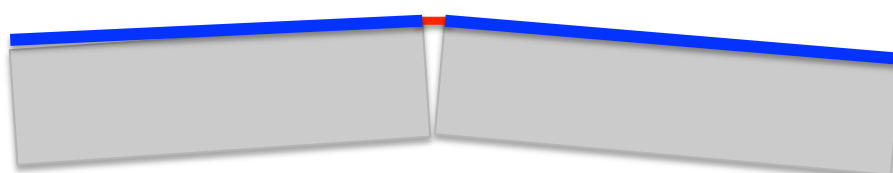


Figura 5.28 - Croqui da dinâmica do ensaio de flexão dos prismas de concreto

No caso dos prismas, na situação inicial, quando são imprimidas as cargas, quase não há deformação. No momento que esta ocorre, o prisma se rompe e a membrana se descola nesse local. O tamanho desse “descolamento” do prisma seria o comprimento inicial que a membrana começa a sofrer uma concentração de tensões e inicia seu processo de alongamento por tração direta. As demais regiões da membrana praticamente não estão recebendo essas tensões de tração. Por isso, esse ensaio teria se comportado mais próximo ao ensaio de alongamento por tração direta.

No caso do ensaio de flexão das lajes de concreto armado, o comportamento elasto-plástico, conforme foi apresentado no capítulo 4, leva os sistemas estudados a serem submetidos à tensões não somente no ponto de fissuração da laje, mas em toda a extensão da membrana aplicada.

Devido ao comportamento elasto-plástico do concreto armado, existe uma situação intermediária, aonde, depois do carregamento, a laje começa a se deformar como um todo, micro-fissurando-se em toda a sua extensão. Nesse momento, toda a membrana aderida ao substrato passa a estar submetida a uma tensão de tração e começa a se deformar em toda a sua extensão.

Somente após o rompimento da laje, quando aparecem fissuras de aberturas mais consideráveis, é que aparece o fenômeno de descolamento da membrana e concentração de tensões nesses pontos de descolamento, acontecendo o alongamento pela tração direta. Contudo, toda a extensão da membrana continua sendo submetida às tensões decorrentes da deformação anterior ao rompimento da membrana. Seria como se estivesse sendo feito o ensaio de alongamento, todavia numa membrana já previamente tensionada e deformada.

Essa hipótese de comportamento é melhor ilustrada através da figura 5.29.

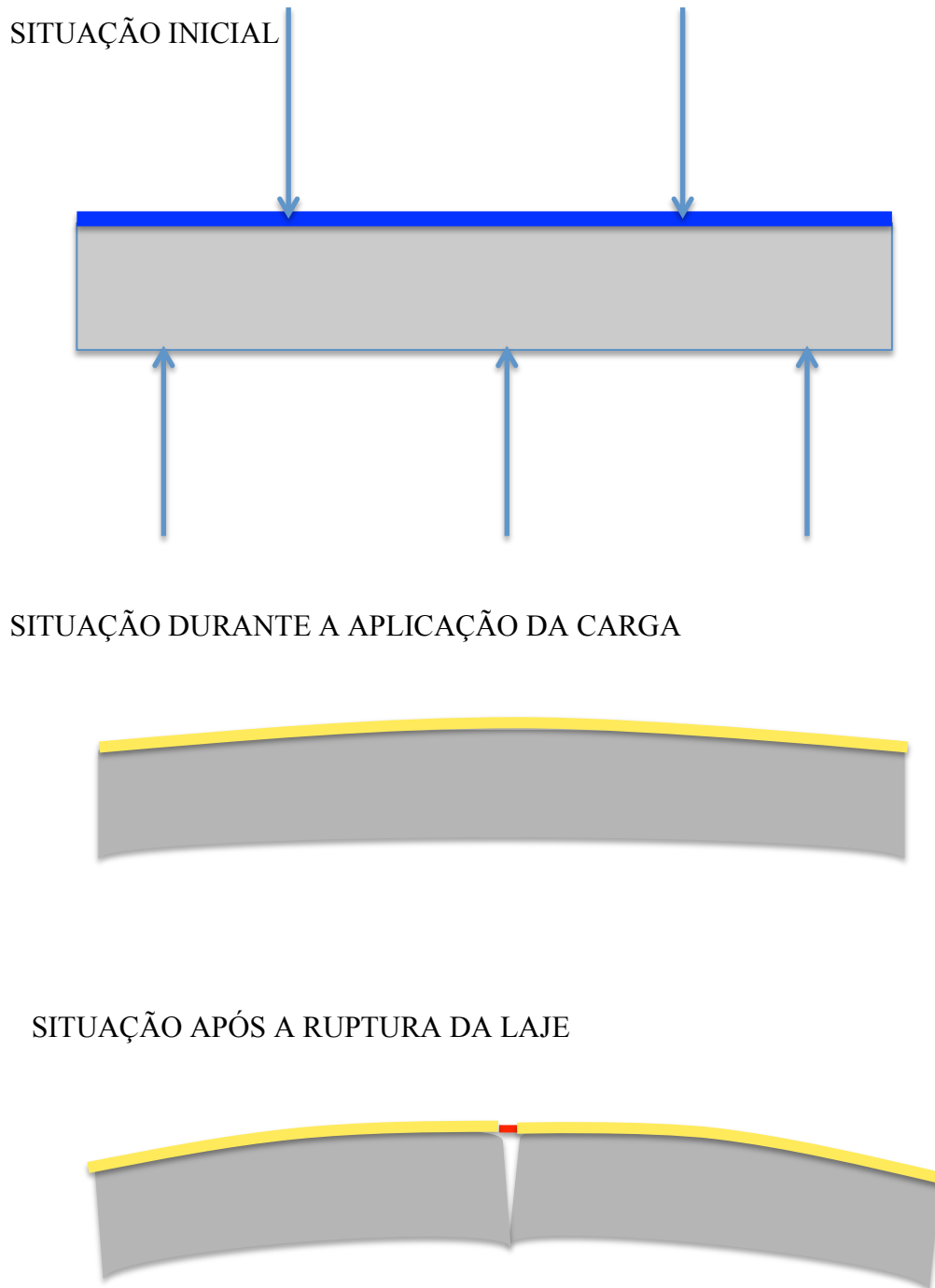


Figura 5.29 - Croqui da dinâmica do ensaio de flexão das lajes de concreto armado

É possível, analisando-se os gráficos apresentados no capítulo 4 obtidos à partir dos ensaios de flexão das lajes perceber esta hipótese apresentada.

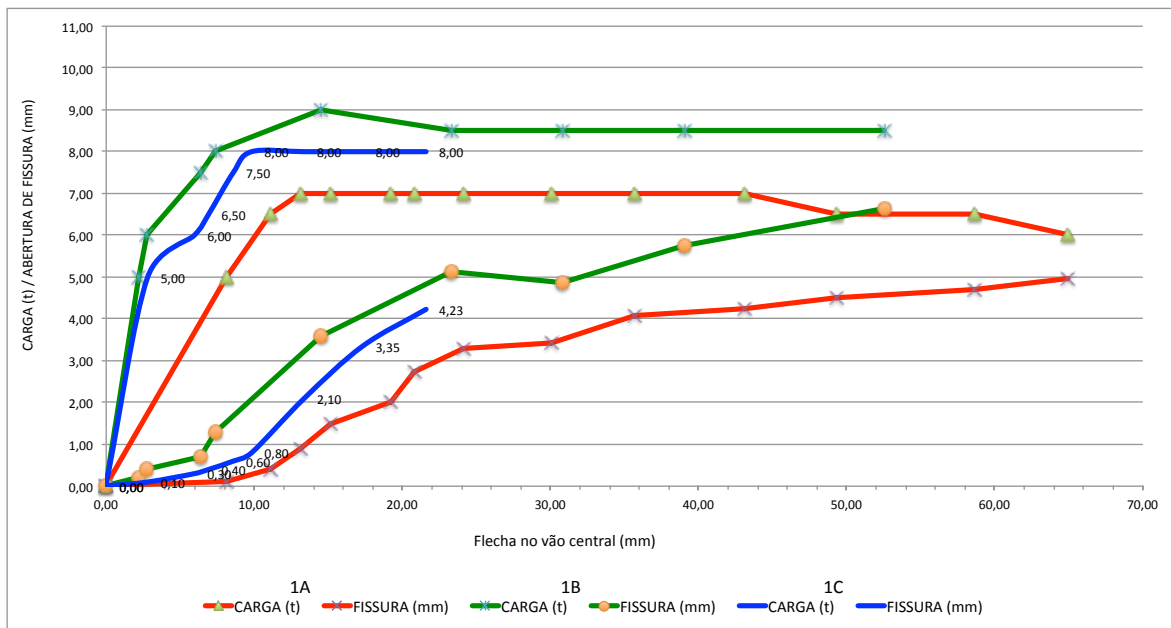


Figura 5.30 - Gráfico de carga (t) e da abertura das fissuras até o rompimento da membrana pela flecha no vão central dos ensaios de flexão de laje dos sistemas da poliuréia 1.

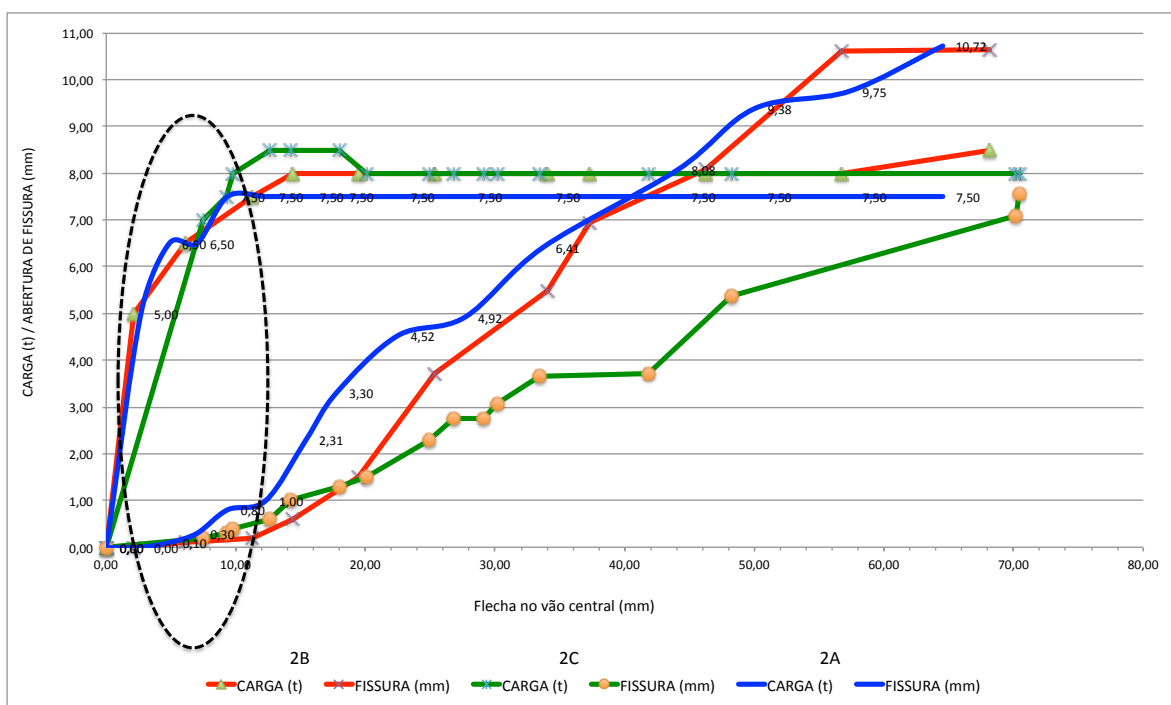


Figura 5.31 - Gráfico de carga (t) e da abertura das fissuras até o rompimento da membrana pela flecha no vão central dos ensaios de flexão de laje dos sistemas da poliuréia 2.

É possível observar nas figura 5.30 e 5.31 que existe uma zona inicial onde as aberturas de fissuras são muito baixas, mas que pré-tencionam a membrana de poliuréia. Nessa região, verifica-se que o ângulo de inclinação da abertura das fissuras é mais baixo.

Na zona de transição, devidamente circulada nas figuras, a abertura das fissuras começam a aumentar o ritmo de abertura, coincidindo com o início da fase plástica do concreto. A membrana do sistema, começaria nesse ponto, a ser mais solicitada, todavia, já estaria pré-tencionada conforme descrito nos parágrafos anteriores.

Na terceira fase, o concreto esta no estado plástico, a laje já pode ser considerada fora do seu estado de serviço e as membranas passam a se deformar junto com as fissuras de forma mais linear e com uma inclinação maior.

No caso de uma laje com um desses sistemas aplicados em situação real de serviço, há ainda que ser levado em consideração a questão da fadiga da membrana, associada à perda de propriedades mecânicas devido ao envelhecimento.

Percebe-se, portanto, que apesar de existir uma proporcionalidade entre alongamento e capacidade de deformação com as fissuras dos elementos estruturais, existem variáveis que certamente influenciam nessa correlação que não foram isoladas nessa pesquisa, como a fadiga mecânica.

Aprofundando um pouco mais essa análise, e verificando o caso da figura 2.12, a membrana impermeabilizante, se rompeu com a fissuração da laje, no entanto isso não ocorreu no primeiro dia de serviço, mas após cerca de 6 meses; o que demonstra o que foi citado no parágrafo anterior.

Analisando-se as demais propriedades mecânicas, como a resistência ao rasgo, resistência à tração, verificou-se que não foi possível correlacioná-las com a abertura das fissuras das membranas apresentadas nos ensaios de flexão dos prismas e das lajes, conforme figura 5.32.

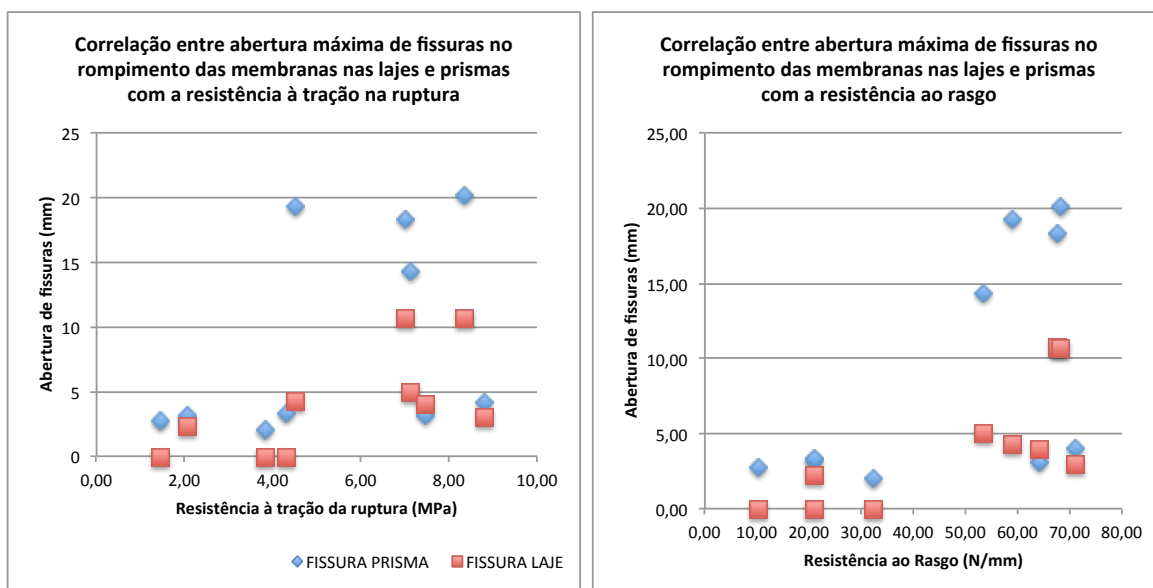


Figura 5.32 - Correlação entre a resistência à tração e a resistência ao rasgo dos sistemas com suas respectivas aberturas máximas de fissuras no momento do rompimento de suas respectivas membranas nos ensaios de flexão de lajes e prismas

5.3.2 Correlações entre Dureza, Resistência à abrasão pela norma DIN ISO 4649, com o comportamento dos sistemas submetidos ao ensaio de abrasão por pneus.

Analisando-se os gráficos das figuras 5.16, 5.18 e 5.19, observa-se que apesar do sistema 3A ter resistido apenas cerca de metade dos ciclos em estado de serviço que os sistemas 1A e 2A resistiram, foi o que menos perdeu massa e espessura. Foi considerada a hipótese dessa explicação estar na maior dureza desse sistema. Para a averiguação dessa possibilidade, os resultados da dureza dos sistemas dessa mesma família foram correlacionados com as perdas de massa e espessura, obtendo-se a figura 5.33.

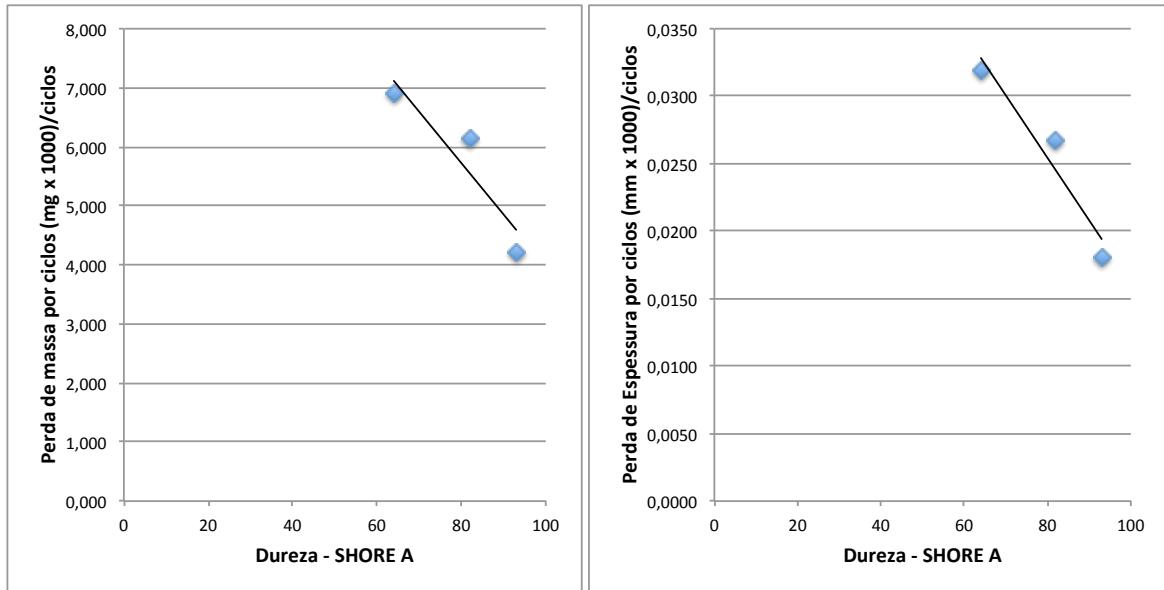


Figura 5.33 - Correlação entre a Dureza das membranas 1A, 2A e 3A com a perda de espessura e massa pela quantidade de ciclos no ensaio de abrasão por pneus

Analisando-se a figura 5.33, parece haver, de fato, uma boa correlação entre a dureza das membranas e o seu desgaste pela ação dos pneus. A mesma análise foi feita pela ação de desgaste pela abrasão da lixa segunda a norma DIN ISO 4649, obtendo-se a figura 5.34.

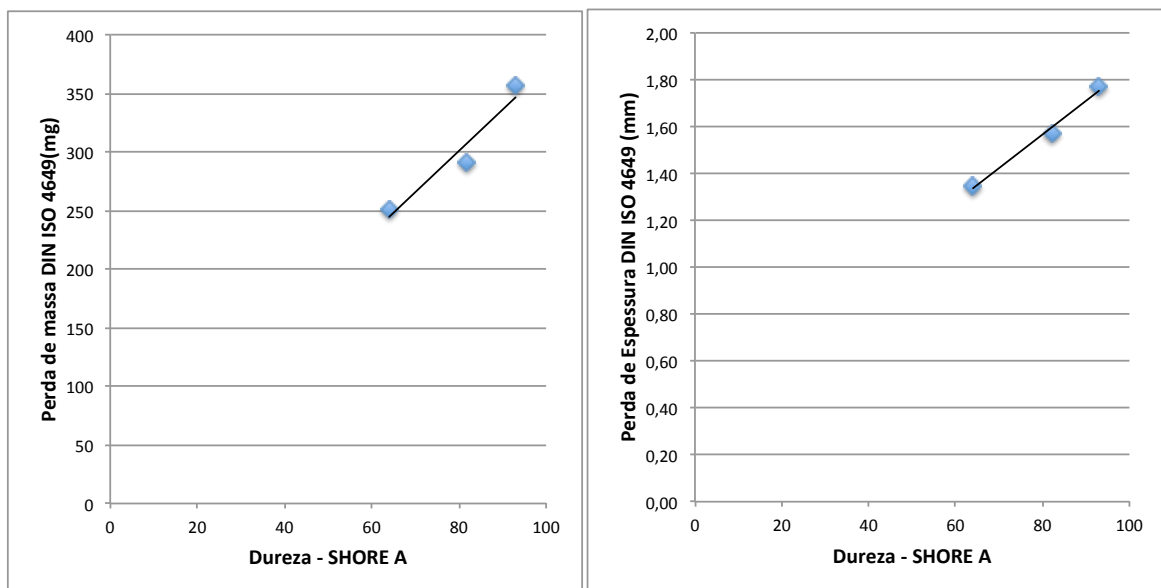


Figura 5.34 - Correlação entre a Dureza das membranas 1 A, 2 A e 3 A com a perda de espessura e massa pela quantidade de ciclos no ensaio de abrasão da norma DIN ISO 4649

Observou-se, que para a família dos sistemas a base de poliuréia aplicadas a quente, o comportamento entre a dureza e a abrasão pelos dois métodos foi inversamente proporcional, conforme figuras 5.33 e 5.34, apresentadas.

Isso também pode ser observado pelo gráfico que correlaciona as perdas de espessura e massa pelos dois métodos, que mostra que quanto maior a perda pela ação da lixa, menor foi a perda pela ação da borracha dos pneus.

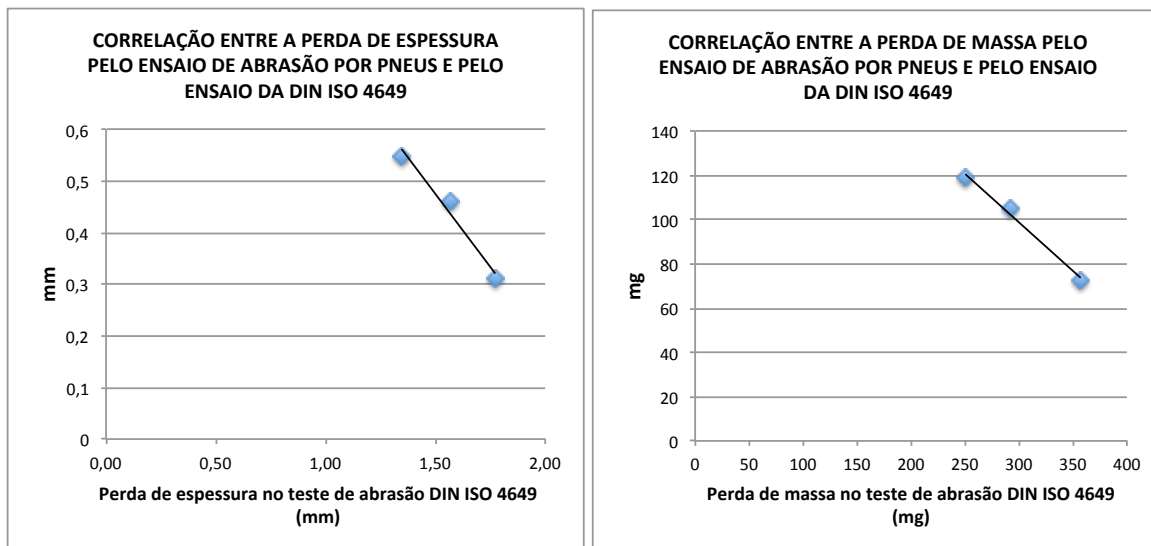


Figura 5.35 - Correlação entre as perdas de espessura e de massa no método de ensaio de abrasão sobre pneus e abrasão segundo a DIN ISO 4649

Estudando-se as figuras 5.33, 5.34 e 5.35, é possível concluir que o ensaio de abrasão depende, portanto, da natureza e da interação entre os materiais abrasivos e abradidos. Em última análise, na verdade, os dois materiais em contato estão sofrendo desgastes em taxas diferentes.

Mais uma vez, cabe a colocação da importância de se utilizar critérios de desempenho na definição e especificação de sistemas impermeabilizantes. Neste caso, por exemplo, se levado em consideração a menor perda pelo ensaio de abrasão pela DIN ISO 4649, para uma laje de tráfego de veículos, teria-se optado em utilizar o sistema 1A, no entanto verificou-se, através do ensaio de abrasão por pneus, que o sistema 3A ofereceu menor perda.

Foi possível também correlacionar o índice de resistência a abrasão (IRA%) com as perdas de massa e espessura por ciclo, conforme figura 5.36.

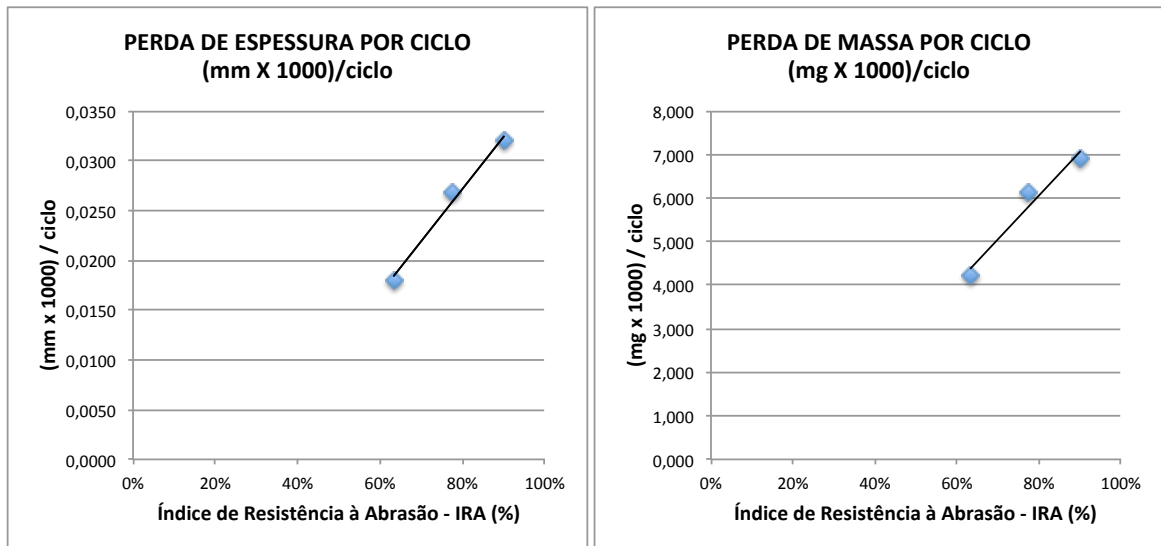


Figura 5.36 - Correlação entre o IRA % e a perda de espessura e massa por ciclo no ensaio de abrasão por pneus.

Não foi possível correlacionar a dureza, ou a abrasão pela norma DIN ISO 4649 com o ensaio de abrasão por pneus realizado nas pastilhas dos sistemas objeto desse estudo, conforme figuras 5.37, 5.38 e 5.39.

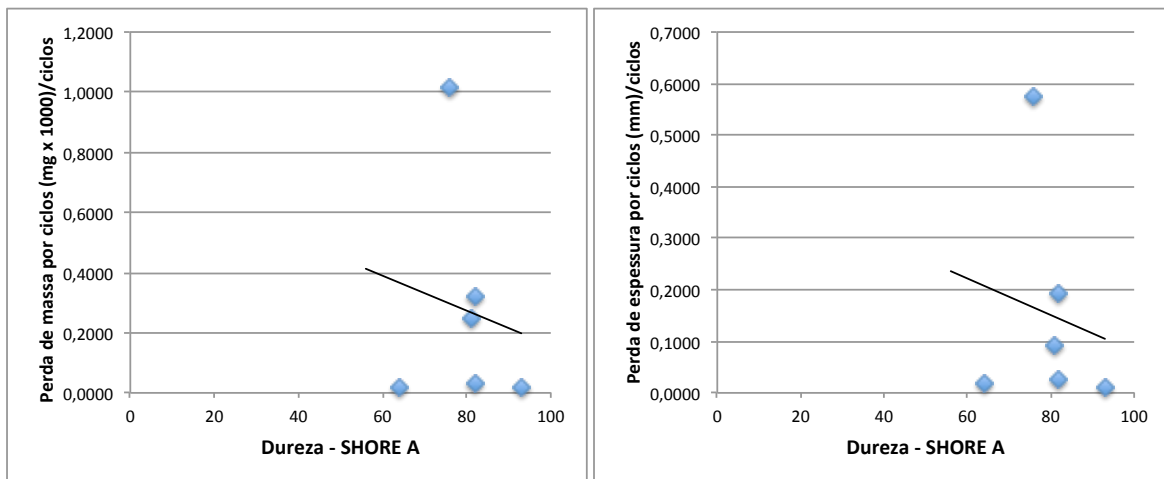


Figura 5.37 - Correlação entre a Dureza das membranas dos sistemas da pesquisa com a perda de espessura e massa pela quantidade de ciclos no ensaio de abrasão por pneus nas pastilhas

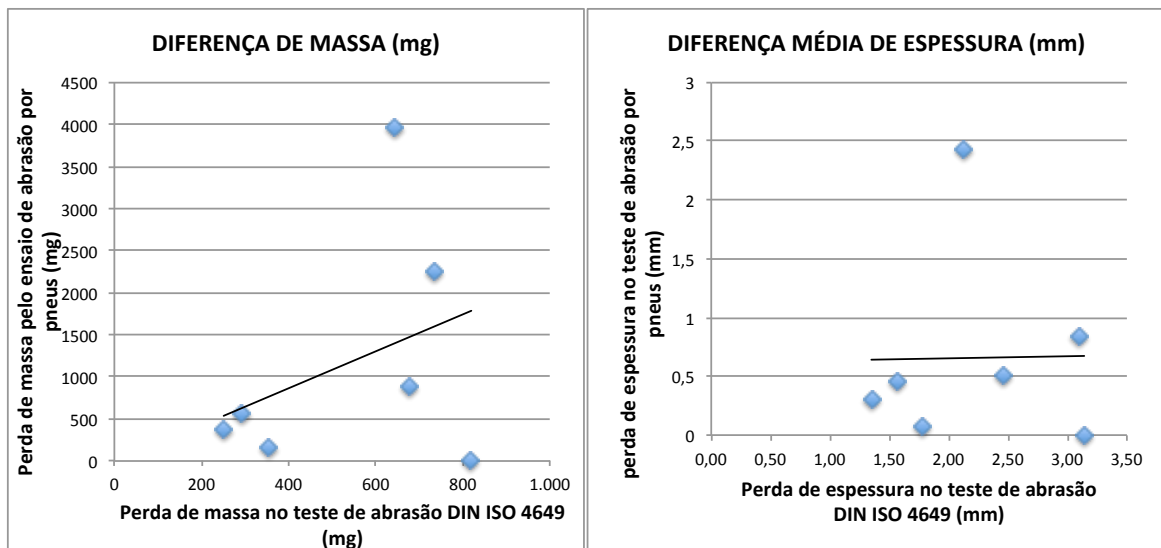


Figura 5.38 - Correlação entre as perdas de massa e espessura entre os ensaios de abrasão pela norma DIN ISO 4649 e pelo ensaio de abrasão por pneus nas pastilhas

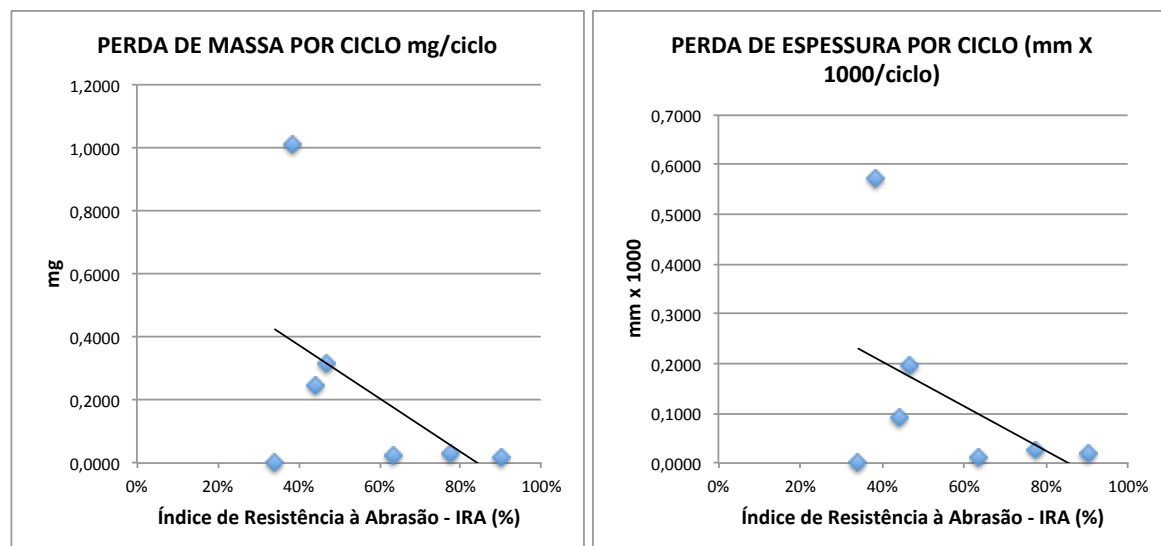


Figura 5.39 - Correlação entre o IRA (%) dos sistemas da pesquisa com a perda de espessura e massa pela quantidade de ciclos no ensaio de abrasão por pneus nas pastilhas

A explicação pode estar na questão das pastilhas ficarem coladas ao piso de concreto e por isso estarem sobressaltadas ao mesmo e por não terem a mesma espessura; dessa maneira a dinâmica dos esforços mecânicos é alterada com a presença de impacto, além, dos esforços de atrito e abrasão.

6 CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho é a entender e as relações entre as propriedades mecânicas das membranas impermeabilizantes a base de elastômeros de poliuretano e poliuréia e dos seus respectivos sistemas impermeabilizantes aplicados em lajes e ao término do trabalho foi possível alcançar as seguintes conclusões.

6.1 Ensaios de caracterização e de desempenho das membranas impermeabilizantes

- Em relação aos ensaios de caracterização, percebeu-se que os sistemas a base de poliuréia apresentaram resultados significativamente superiores aos demais. Na simulação de ranqueamento que foi feito na tabela 5.1 percebeu-se que os 7 sistemas a base de poliuréia ocuparam as sete primeiras posições.
- A poliuréia 1 obteve um bom resultado de alongamento se comparado aos demais sistemas, no entanto esse melhor resultado não se refletiu da mesma maneira no ensaio de flexão das lajes e prismas. A poliuréia 2, apesar de ter apresentado o mesmo patamar de resultado de alongamento da poliuréia 1, conseguiu se deformar e se acomodar por sobre aberturas maiores de fissuras nos ensaios de flexão das lajes e dos primas. Ainda nestes ensaios, a poliuréia 3, se comportou conforme se esperava tendo em vista os baixos resultados de alongamento obtidos no ensaio de caracterização de sua membrana.
- Com relação à resistência à tração, verificou-se que o melhor comportamento foi o dos sistemas da poliuréia 3. E no ensaio de resistência ao rasgo, o melhor comportamento foi obtido nos sistemas de poliuréia 2 e 3. No entanto, essa diferença para os valores obtidos nos sistemas da poliuréia 1 não é de grande relevância do ponto de vista de desempenho, pois não foram observadas correlações entre esses ensaios com os resultados do ensaio de flexão das lajes e nem no de abrasão por pneus.
- O sistema a base de poliuretano em multi-camadas (4A) apresentou resultados nos ensaios de caracterização abaixo do que se esperava, de acordo com a ficha técnica

do fabricante. As camadas que compõe o sistema, segundo Granato (2014), tem valores diferentes de alongamento, dureza e resistência à tração de acordo com os dados do quadro 2.5, no entanto, foi considerado, nessa pesquisa a caracterização da membrana final, ou seja, todas as três camadas juntas. O alongamento, resistência à tração, resistência ao rasgo, e a abrasão resultaram em valores baixos se comparados aos sistemas baseados em poliuréia. Os ensaios de desempenho desse sistema refletiram os baixos resultados dos ensaios de caracterização. No ensaio de flexão de lajes e vigas, se comportou no mesmo patamar dos sistemas da poliuréia 3. O destaque mais negativo ficou para o ensaio de abrasão por pneus. Apesar do ensaio de abrasão pela norma DIN ISO 4649 ter apresentado resultados em valores inferiores aos das membranas de poliuréia, no ensaio de abrasão por pneus, esse sistema não resistiu sequer a um terço dos ciclos em estado de serviço, do pior desempenho entre as poliuréias. Para uma conclusão mais precisa sobre o ocorrido, seria necessário repetir o ensaio, tendo em vista a enorme diferença entre o resultado de desempenho que se esperava e o que foi obtido.

- O sistema de poliuréia a frio (5A) mostrou baixo alongamento, alta dureza e medianos resultados de resistências ao rasgo e a tração. No ensaio de abrasão por lixamento (DIN ISO 4649) não apresentou um resultado alto para o índice de resistência à abrasão. Nos ensaios de desempenho, não obteve um bom resultado no ensaio de flexão dos primas e nem no resultado de abrasão por pneus. Sintetizando os resultados é possível concluir que esse material não pode ser aplicado em grandes lajes mais suscetíveis a sofrer maiores deformações e nem ao tráfego de veículos diretamente. No entanto, pela facilidade de aplicação pode ser uma boa alternativa ao uso das membranas acrílicas.
- O mesmo pode ser dito em relação ao sistema de poliuretano de origem vegetal (6A), que teve, no geral, comportamento muito semelhante em todos os ensaios com o sistema de poliuréia a frio (5A), com a vantagem comercial para o sistema 6A, por se aproximar mais do custo da membrana acrílica.
- A membrana base acrílica (7A), no ensaio de alongamento com as amostras não envelhecidas, obteve o maior resultado, mas isso não significou que ela comportou bem em relação à acomodação sobre abertura das fissuras nos ensaios de flexão de

lajes e prismas, atingindo valores muito baixos. A membrana acrílica apresentou uma perda muito grande de propriedades após o envelhecimento acelerado. A perda no alongamento foi superior a 50% e a mesma tendência foi observada na resistência à tração e dureza, com patamares de perda semelhantes. Conclui-se que para o uso desse tipo de membrana em lajes seria necessário uma nova avaliação, todavia, incorporando-se ao sistema um estruturante como tela de poliéster ou outro equivalente. Tendo em vista que a absorção de água é uma questão importante em membranas acrílicas, esse ensaio deveria ser também executado em caso de se avaliar desempenhos de produtos dessa mesma família; o que não foi feito nessa pesquisa, tendo em vista que o foco principal eram os elastômeros de poliuréia e poliuretano, onde a absorção de água é irrelevante.

- É interessante notar que a manta asfáltica (8A), apesar de sua facilidade de aplicação e ampla disponibilidade no mercado da construção civil, demonstrou características mecânicas bem inferiores que os demais sistemas, fazendo com que a mesma tenha que ser utilizada num sistema impermeabilizante que, obrigatoriamente, preveja que outras camadas sejam responsáveis pela resistência para ações mecânicas (camada de proteção mecânica e camada amortecedora por exemplo) e por não transmitir à manta asfáltica deformações que possam levar a mesma ao descolamento das emendas ou fissuração (camadas separadora, por exemplo).
- Entre os sistemas pesquisados nesse trabalho, o melhor sistema impermeabilizante para uma laje de concreto armado, foi o 2A (poliuréia pura aplicada a quente com alto alongamento), seguido do 1A (poliuréia híbrida, aplicada a quente com alto alongamento).

6.2 Correlações entre os ensaios de caracterização e desempenho

- Não foi possível obter correlações entre os ensaios de resistência à tração e resistência ao rasgo com a abertura máxima da fissura no vão central dos primas e lajes no momento da ruptura do sistema impermeabilizante nos ensaios de flexão de prismas e lajes.

- Todavia, foi possível obter uma boa correlação entre o resultado de alongamento segundo a ASTM D412 com a flexão de lajes e prismas, conforme figuras 5.26 e 5.27 para as famílias de poliuréias aplicadas a quente (1, 2, 3).
- O ensaio de flexão com lajes, resultou num valor menor de abertura de fissuras em relação ao de flexão dos prismas, o que trouxe esse ensaio para um patamar de valores mais próximos aos valores de serviço encontrados em obras.
- Foi proposto uma hipótese para esse comportamento diferente em relação à acomodação sobre as aberturas das fissuras no ensaio de flexão das lajes e prismas, que merece uma melhor avaliação sobre a ótica da modelagem estrutural por método de elementos finitos.
- Para o grupo de poliuréias aplicadas a quente, foi possível observar uma correlação entre a dureza e o ensaio de abrasão por pneus, bem como , entre o ensaio de abrasão por lixamento (DIN ISO 4649) e o ponto mais relevante é que essas correlações são inversamente proporcionais. Ou seja, as poliuréias mais duras, foram mais abradidas no ensaio da norma referida enquanto, quando submetida ao atrito dos pneus, pouco se desgastaram. No entanto, não se pode concluir que as poliuréias mais duras são melhores para tráfego veicular pela menor abrasão por ação de pneus, tendo em vista que resistiram menor quantidade de ciclos de tráfego dos pneus, por não terem suportado os esforços mecânicos inerentes ao ensaios, e com isso, terem se fissurado e posteriormente se descolado do substrato.
- Finalmente, conclui-se a importância de se valer cada vez mais de ensaios de desempenho para a realização de melhores especificações. A norma brasileira de requisitos mínimos de membranas de poliuréia está sendo redigida nesse momento e esse trabalho sugere fortemente que sejam nela incluídos requisitos e ensaios baseados em desempenho aplicado; além de agrupar e tipificar as poliuréias de acordo com as suas características para facilitar as futuras especificações e pesquisas.

6.3 Sugestões para futuras pesquisas

- Refazer os ensaios de flexão dos prismas com reforço em armadura para que o mesmo tenha comportamento elasto-plástico e não frágil na ruptura. Se os resultados obtidos forem satisfatórios, a facilidade na realização deste, faria com que o mesmo pudesse ser sugerido como ensaio da norma de poliuréias.
- Realizar estudos que permitam entender como a fadiga desses sistemas elastoméricos pesquisados, pode influenciar no desempenho final das membranas aplicadas.
- Desenvolver um modelo computacional baseado em métodos dos elementos finitos para analisar o comportamento de membranas elastoméricas sobre lajes, prevendo assim, já no projeto estrutural, quais os requisitos necessários para a especificação das características requeridas para um sistema impermeabilizante, do ponto de vista mecânico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D412; Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers - Tension (D412 – 06a). ASTM, West Conshohocken, 2013.

_____ **ASTM D2240**. “Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness (D2240 – 05)”. ASTM, West Conshohocken, 2010.

_____ **ASTM D624**. “Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers1 (D624 – 00)”. ASTM, West Conshohocken, 2012.

_____ **ASTM D4060**. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser (D4060 – 10).” ASTM, West Conshohocken, 2010.

_____ **ASTM D4541**. Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. ASTM, West Conshohocken, 2010.

_____ **ASTM G154**. “Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials (G154 – 12a)”. ASTM, West Conshohocken, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9229. Mantas de butil para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

_____ **NBR 9396**. Elastômeros em solução para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____ **NBR 9574**. Execução de impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____ **NBR 9575**. Impermeabilização - Seleção e projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____ **NBR 9685**. Emulsão asfáltica para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____ **NBR 9686**. Solução e emulsão asfálticas empregadas como material de imprimação na impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____ **NBR 9690**. Mantas de polímeros para impermeabilização (PVC). Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____ **NBR 9910**. Asfaltos modificados para impermeabilização sem adição de polímeros - Características de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

_____ **NBR 9952**. Manta asfáltica com armadura para impermeabilização - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____ **NBR 11797**. Mantas de etileno-propileno-dieno-monômero (EPDM) para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____ **NBR 11905**. Sistema de impermeabilização composto por cimento impermeabilizante e polímeros. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____ **NBR 12171**. Aderência aplicável em sistema de impermeabilização composto por cimento impermeabilizante e polímeros. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____ **NBR 13121**. Asfalto elastomérico para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____ **NBR 13321**. Membrana acrílica com armadura para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____ **NBR 13724**. Membrana asfáltica para impermeabilização, moldada no local, com estruturantes. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____ **NBR 15352**. Mantas termoplásticas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de polietileno linear (PEBDL) para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____ **NBR 15414**. Membrana de poliuretano com asfalto para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____ **NBR 15487**. Membrana de poliuretano para impermeabilização. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____ **NBR 15575-1**. Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____ **NBR 15575-3**. Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BAUER, Elton; GRANATO, José Eduardo; VASCONCELOS, Paulo H. IBRACON - MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, CAP 41 **Sistemas de Impermeabilização e Isolamento Térmico**. São Paulo, IBRACON, 2007.

BAUER, Elton; VASCONCELOS, Paulo H. **Comparação de Propriedades Mecânicas de alguns Impermeabilizantes a Base de Elastômeros de Poliuréia Disponíveis no Brasil**, Congresso Internacional de Poliuretanos, FEIPUR, São Paulo, 2014.

DEUTSCHE NORM ISO 4649:2006 - Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of abrasion resistance using a rotating cylindrical drum device; DIN, Berlin, 2006

EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL APPROVALS, ETAG 005: PART 1. General – Bruxelas, EOTA, 2004

_____, **ETAG 005: PART 6**. Specific Stipulations For Kits Based On Polyurethane – Bruxelas, EOTA, 2004

GRANATO, José Eduardo. **Sistemas de Impermeabilização de Poliuretano Expostos às Intempéries e Sujeitos a Trânsito de Pessoas ou Veículos**. Simpósio Brasileiro de Impermeabilização, IBI, São Paulo, 2014

OLIVEIRA, P. S.; **Engenharia de Polímeros – PU e Poliuréia**. Apostila – Qualificação profissional em projetos e consultoria de impermeabilização. São Paulo:PINI, 2004.

PICCHI, Flávio Augusto. **Impermeabilização de Coberturas**, PINI, São Paulo, 1986

PRIMEAUX, Dudley J. II; HANSON, Lee; SCOTT, Ray V. **The True Polyurea Spray Elastomer Story: Chemistry, Advances and Applications**, Apresentação no Encontro da Associação de Formuladores de Resinas Termofixas no Hyatt Regency Montreal em Montreal, Quebec, Canada; Setembro - 2006.

RAMAN S.N.; NGO T.; LU J.; MENDIS P. **Experimental Investigation on the Tensile Behavior of Polyurea at High Strain**, Materials and Design, Elsevier, Oxford, Reino Unido, 2013

RETO, Maria A. S.. **Poliuretano**, Revista PLASTICO MODERNO, edição 419; São Paulo, Setembro 2009

ROLAND, C.M.; TWIGG J.N.; VU Y.; MOTT, P.H.. **High strain rate mechanical behavior of polyurea**; Polymer, ScienceDirect, Whashington DC, EUA, 2006

TAKAGI, E. M.; ALMEIDA JUNIOR, W. **Utilização de tecnologias de injeção para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado**. IBRACON, São Paulo:, 2002.

TRIPP Ishmael; MOON, Neil; BLOSSER, Catherine. **Low Pressure Aplied Polyurea – The Next Generation**; Elastomer Specialties Division - 2002

THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATING, SSPC 14. Application of Thick Film Polyurea and Polyurethane Coatings to Concrete and Steel Using Plural-Component Equipment, Pittsburgh, EUA, 2013.

_____SSPC 45. “Two-Component, Thick-Film Polyurea and Polyurea/Polyurethane Hybrid Coatings, Performance-Based”. SSPC, Pittsburgh, EUA, 2013.

VASCONCELOS, Paulo Henrique; GRANATO, José Eduardo; CAMPIOTO, Everton; **Impermeabilização De Lajes De Estacionamento De Veículos**; Blog Materiais e Materiais – LEM - UnB, Brasília, 2012

VILAR, Walter - **Química e Tecnologia de Poliuretanos**, 3a Ed., Vilar Consultoria, Rio de Janeiro, Dez/2004.

APÊNDICES

**APÊNDICE A - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE
CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS OBJETOS DE ESTUDO
DESSA PESQUISA.**

ENSAIO DE ALONGAMENTO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO									
CODIGO	IDADE	ESPESSURA	LARGURA	ESPESSURA MEMBRANA PRINCIPAL	COMPRIMENTO INICIAL	FORÇA	TENSÃO	TENSÃO NA MEMBRANA PRINCIPAL	ALONGAMENTO
1A1	1 - 34D	1,84	5,25	1,84	115,20	68,78	7,12	7,12	340,00
1A2	1 - 34D	2,26	5,23	2,26	115,60	84,16	7,12	7,12	336,00
2A1	1 - 34D	3,02	5,17	3,02	114,26	104,30	6,68	6,68	386,40
2A2	1 - 34D	2,68	5,15	2,68	114,71	101,17	7,33	7,33	380,00
3A1	1 - 34D	1,84	5,89	1,84	114,95	94,94	8,76	8,76	80,00
3A2	1 - 34D	1,79	5,79	1,79	114,75	77,11	7,44	7,44	46,40
3A3	1 - 34D	1,81	5,78	1,81	114,50	106,71	10,20	10,20	97,60
4A1	1 - 34D	1,59	5,51	1,59	114,12	24,79	2,83	2,83	73,60
4A2	1 - 34D	1,58	5,88	1,58	115,46	12,17	1,31	1,31	91,20
5A1	1 - 34D	3,82	5,11	3,82	113,73	74,96	3,84	3,84	120,80
5A2	1 - 34D	4,15	5,14	4,15	113,08	81,27	3,81	3,81	119,20
6A1	1 - 34D	4,12	5,55	4,12	114,75	103,35	4,52	4,52	76,00
6A2	1 - 34D	3,48	5,48	3,48	114,93	78,76	4,13	4,13	44,80
7A1	1 - 34D	2,57	6,12	2,57	115,97	22,33	1,42	1,42	555,20
7A2	1 - 34D	2,11	6,03	2,11	116,01	19,34	1,52	1,52	466,40
1C1	1 - 34D	4,75	4,64	2,11	113,39	44,74	2,03	4,57	291,20
1C2	1 - 34D	5,04	4,96	2,40	113,20	52,75	2,11	4,43	392,80
2C1	1 - 34D	4,58	5,22	2,04	113,18	92,04	3,85	8,64	373,60
2C2	1 - 34D	3,64	4,97	2,04	113,74	82,13	4,54	8,10	387,20
3C1	1 - 34D	4,48	5,61	2,12	113,62	85,20	3,39	7,16	60,00
3C2	1 - 34D	4,82	5,21	2,66	113,30	107,98	4,30	7,79	68,80
8M1	1 - 34D	4,05	6,20	4,05	113,54	72,07	2,87	2,87	45,60
8M2	1 - 34D	4,13	6,92	4,13	114,75	70,31	2,46	2,46	64,80
1A1	3 - 500H Q.U.V	1,81	5,79	1,81	114,92	62,80	5,99	5,99	304,00
1A2	3 - 500H Q.U.V	2,23	5,53	2,23	115,00	52,41	4,25	4,25	296,80
2A1	3 - 500H Q.U.V	3,49	5,41	3,49	115,52	114,23	6,05	6,05	328,00
2A2	3 - 500H Q.U.V	3,44	5,65	3,44	115,69	104,60	5,38	5,38	274,40
3A1	3 - 500H Q.U.V	1,78	6,06	1,78	115,05	100,96	9,36	9,36	82,40
3A2	3 - 500H Q.U.V	1,71	6,02	1,71	114,98	111,38	10,82	10,82	81,60
4A1	3 - 500H Q.U.V	1,90	5,38	1,90	115,18	28,20	2,76	2,76	40,00
4A2	3 - 500H Q.U.V	1,86	5,53	1,86	115,43	29,40	2,86	2,86	44,80
5A1	3 - 500H Q.U.V	4,17	5,21	4,17	114,96	69,61	3,20	3,20	64,80
6A1	3 - 500H Q.U.V	4,11	5,35	4,11	114,92	87,01	3,96	3,96	89,60
6A2	3 - 500H Q.U.V	4,11	5,49	4,11	114,64	75,00	3,32	3,32	58,40
7A1	3 - 500H Q.U.V	3,78	5,52	3,78	114,02	25,25	1,21	1,21	162,40
7A2	3 - 500H Q.U.V	2,96	5,78	2,96	115,04	19,33	1,13	1,13	217,60
1C1	3 - 500H Q.U.V	4,10	5,60	1,57	114,61	39,67	1,73	4,51	316,00
1C2	3 - 500H Q.U.V	3,02	5,68	1,67	114,86	27,79	1,62	2,93	241,60
2C1	3 - 500H Q.U.V	4,10	5,65	2,15	114,90	88,19	3,81	7,26	335,20
2C2	3 - 500H Q.U.V	3,96	5,78	2,03	113,84	87,21	3,81	7,43	348,80
3C1	3 - 500H Q.U.V	3,94	5,60	3,09	115,08	116,06	5,26	6,71	60,80
3C2	3 - 500H Q.U.V	5,11	5,46	3,94	114,70	134,79	4,83	6,27	65,60
8M1	3 - 500H Q.U.V	4,07	5,73	4,07	115,00	82,09	3,52	3,52	30,40
8M2	3 - 500H Q.U.V	3,98	5,62	3,98	115,00	71,13	3,18	3,18	28,00

ENSAIO DE ALONGAMENTO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO									
CODIGO	IDADE	ESPESSURA	LARGURA	ESPESSURA MEMBRANA PRINCIPAL	COMPRIMENTO INICIAL	FORÇA	TENSÃO	TENSÃO NA MEMBRANA PRINCIPAL	ALONGAMENTO
1A1	4 - 1000 Q.U.V.	2,11	5,66	2,11	114,49	70,70	5,92	5,92	411,2
1A2	4 - 1000 Q.U.V.	1,64	5,96	1,64	115,08	67,35	6,89	6,89	441,6
2A1	4 - 1000 Q.U.V.	4,14	6,02	4,14	114,63	119,38	4,79	4,79	238,4
2A2	4 - 1000 Q.U.V.	3,93	6,26	3,93	115,47	112,43	4,57	4,57	245,6
3A1	4 - 1000 Q.U.V.	2,05	6,25	2,05	115,66	117,62	9,18	9,18	83,2
3A2	4 - 1000 Q.U.V.	1,93	5,84	1,93	115,39	107,75	9,56	9,56	88
4A1	4 - 1000 Q.U.V.	1,49	6,13	1,49	116,21	21,56	2,36	2,36	24,8
4A2	4 - 1000 Q.U.V.	1,28	5,86	1,28	115,13	24,15	3,22	3,22	36,8
5A1	4 - 1000 Q.U.V.	4,65	6,82	4,65	115,07	80,23	2,53	2,53	66,4
5A2	4 - 1000 Q.U.V.	4,28	6,74	4,28	114,93	83,37	2,89	2,89	63,2
6A1	4 - 1000 Q.U.V.	5,91	6,19	5,91	114,97	130,24	3,56	3,56	67,2
6A2	4 - 1000 Q.U.V.	5,19	5,91	5,19	115,05	113,18	3,69	3,69	70,4
7A1	4 - 1000 Q.U.V.	4,56	5,77	4,56	117,23	22,63	0,86	0,86	231,2
7A2	4 - 1000 Q.U.V.	4,11	6,01	4,11	116,76	22,73	0,92	0,92	245,6
1C1	4 - 1000 Q.U.V.	3,98	5,96	2,27	115,47	41,75	1,76	3,09	288
1C2	4 - 1000 Q.U.V.	5,86	4,11	2,29	113,71	42,15	1,75	4,48	321,6
2C1	4 - 1000 Q.U.V.	4,29	6,02	2,39	115,50	99,95	3,87	6,95	307,2
2C2	4 - 1000 Q.U.V.	4,01	6,06	2,37	115,47	95,50	3,93	6,65	378,4
3C1	4 - 1000 Q.U.V.	3,31	6,20	2,46	115,38	126,83	6,18	8,32	70,4
3C2	4 - 1000 Q.U.V.	3,47	6,30	2,70	115,25	113,68	5,2	6,68	72,8
8M1	4 - 1000 Q.U.V.	4,01	7,11	4,01	118,28	98,08	3,44	3,44	26,4
8M2	4 - 1000 Q.U.V.	4,03	6,30	4,03	118,09	77,44	3,05	3,05	35,2
1A1	2 - 500 L.U.V.	3,26	5,42	3,26	114,26	86,40	4,89	4,89	421,6
1A2	2 - 500 L.U.V.	3,21	5,67	3,21	114,39	85,36	4,69	4,69	427,2
2A1	2 - 500 L.U.V.	2,48	5,96	2,48	114,85	102,43	6,93	6,93	477,6
2A2	2 - 500 L.U.V.	2,31	6,02	2,31	114,97	93,31	6,71	6,71	463,6
3A1	2 - 500 L.U.V.	1,70	6,04	1,70	115,78	93,95	9,15	9,15	91,2
3A2	2 - 500 L.U.V.	1,92	6,17	1,92	114,91	100,22	8,46	8,46	82,4
4A1	2 - 500 L.U.V.	1,19	6,20	1,19	115,05	26,19	3,55	3,55	36,8
4A2	2 - 500 L.U.V.	1,55	6,23	1,55	114,57	21,82	2,26	2,26	35,2
5A1	2 - 500 L.U.V.	3,80	5,87	3,80	114,52	81,86	3,67	3,67	112
5A2	2 - 500 L.U.V.	3,91	5,85	3,91	115,58	81,43	3,56	3,56	88,8
5A3	2 - 500 L.U.V.	3,74	5,67	3,74	114,72	81,43	3,84	3,84	92,8
6A1	2 - 500 L.U.V.	3,35	6,20	3,35	115,17	77,68	3,74	3,74	38,4
6A2	2 - 500 L.U.V.	3,48	5,82	3,48	114,71	67,04	3,31	3,31	44
7A1	2 - 500 L.U.V.	2,21	6,01	2,21	115,03	25,10	1,89	1,89	436,8
7A2	2 - 500 L.U.V.	2,66	6,00	2,66	114,76	25,86	1,62	1,62	424,8
1C1	2 - 500 L.U.V.	3,74	5,38	2,02	114,64	39,24	1,95	3,61	387,2
1C2	2 - 500 L.U.V.	3,93	5,61	2,17	114,92	47,18	2,14	3,88	595,2
2C1	2 - 500 L.U.V.	3,40	5,91	2,27	114,73	85,20	4,24	6,35	327,2
2C2	2 - 500 L.U.V.	4,04	5,69	2,54	115,42	106,20	4,62	7,35	476
3C1	2 - 500 L.U.V.	4,04	5,67	2,35	115,34	114,76	5,01	8,61	98,4
3C2	2 - 500 L.U.V.	4,75	5,77	2,30	114,78	124,43	4,54	9,38	92,8

ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES RESIDUAIS			
CODIGO	COMPRIMENTO FINAL	COMPRIMENTO 24 HORAS	DEFORMAÇÃO RESIDUAL
1A1	119,87	116,51	1,1%
1A2	122,06	115,68	0,1%
2A1	128,82	120,6	5,5%
2A2	130,04	120,2	4,8%
3A1	116,41	114,96	0,0%
3A2	115,84	115,05	0,3%
3A3	117,24	114,5	0,0%
4A1	117,84	116,34	1,9%
4A2	115,82	115,65	0,2%
5A1	115,53	114,21	0,4%
5A2	115,14	113,77	0,6%
6A1	115,97	115,9	1,0%
6A2	115,44	114,91	0,0%
7A1	1137,36	123,13	6,2%
7A2	140,08	121,87	5,1%
1C1	117,41	114,91	1,3%
1C2	121,40	116,32	2,8%
2C1	124,89	113,67	0,4%
2C2	129,01	114,13	0,3%
3C1	114,64	118,16	4,0%
3C2	114,67	118,93	5,0%
8M1	128,47	124,77	9,9%
8M2	127,11	123,29	7,4%
1A1	121,29	116,52	1,4%
1A2	0,00	116,71	1,5%
2A1	128,33	118,97	3,0%
2A2	127,80	118,36	2,3%
3A1	118,80	115,97	0,8%
3A2	119,01	115,61	0,5%
4A1	117,77	116,8	1,4%
4A2	117,71	116,15	0,6%
5A1	116,00	115,01	0,0%
6A1	117,35	116,06	1,0%
6A2	116,30	115,59	0,8%
7A1	117,70	114,36	0,3%
7A2	119,08	115,36	0,3%
1C1	121,33	116,17	1,4%
1C2	119,06	115,62	0,7%
2C1	125,77	118,76	3,4%
2C2	126,09	119,36	4,8%
3C1	119,76	115,38	0,3%
3C2	116,92	115,25	0,5%
8M1	0,00	124,44	8,2%
8M2	0,00	123,24	7,2%

ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES RESIDUAIS			
CODIGO	COMPRIMENTO FINAL	COMPRIMENTO 24 HORAS	DEFORMAÇÃO RESIDUAL
1A1	0,00	115,91	1,2%
1A2	0,00	116,97	1,6%
2A1	0,00	117,33	2,4%
2A2	0,00	117,45	1,7%
3A1	0,00	116,41	0,6%
3A2	0,00	115,85	0,4%
4A1	0,00	116,75	0,5%
4A2	0,00	116,48	1,2%
5A1	0,00	115,44	0,3%
5A2	0,00	114,96	0,0%
6A1	0,00	115,56	0,5%
6A2	0,00	115,56	0,4%
7A1	0,00	118,7	1,3%
7A2	0,00	118,81	1,8%
1C1	0,00	115,48	0,0%
1C2	0,00	117,05	2,9%
2C1	0,00	119,21	3,2%
2C2	0,00	120,18	4,1%
3C1	0,00	115,67	0,3%
3C2	0,00	115,91	0,6%
8M1	0,00	122,34	3,4%
8M2	0,00	124,49	5,4%
1A1	114,69		NI
1A2	116,85		NI
2A1	125,28		NI
2A2	125,65		NI
3A1	116,95		NI
3A2	115,99		NI
4A1	116,46		NI
4A2	116,16		NI
5A1	116,17		NI
5A2	115,6		NI
5A3	115,88		NI
6A1	117,09		NI
6A2	115,48		NI
7A1	133,07		NI
7A2	134,64		NI
1C1	117,96		NI
1C2	120,23		NI
2C1	120,23		NI
2C2	123,04		NI
3C1	116,92		NI
3C2	115,56		NI

ENSAIO DE RASGO						
COD	IDADE	ESPESSURA	ESSURA PRINCI	FORÇA	RESISTÊNCIA AO RASGO	RESISTÊNCIA AO RASGO NA MEMBRANA
1A1	1 - 34D	1,82	1,82	107,60	59,1	59,1
1A2	1 - 34D	2,28	2,28	108,20	47,5	47,5
2A1	1 - 34D	3,01	3,01	188,00	62,5	62,5
2A2	1 - 34D	2,60	2,60	189,20	72,8	72,8
3A1	1 - 34D	1,87	1,87	114,80	61,4	61,4
3A2	1 - 34D	1,66	1,66	133,40	80,4	80,4
4A1	1 - 34D	1,74	1,74	44,60	25,6	25,6
4A2	1 - 34D	1,90	1,90	31,00	16,3	16,3
5A1	1 - 34D	3,89	3,89	128,00	32,9	32,9
5A2	1 - 34D	4,00	4,00	128,20	32,1	32,1
6A1	1 - 34D	3,87	3,87	79,00	20,4	20,4
6A2	1 - 34D	5,69	5,69	120,60	21,2	21,2
7A1	1 - 34D	3,10	3,10	32,20	10,4	10,4
7A2	1 - 34D	3,40	3,40	34,60	10,2	10,2
1C1	1 - 34D	4,85	2,43	105,20	21,7	43,3
1C2	1 - 34D	4,36	2,28	170,20	39,0	74,6
2C1	1 - 34D	3,77	2,06	153,80	40,8	74,7
2C2	1 - 34D	4,62	2,40	147,80	32,0	61,6
3C1	1 - 34D	4,34	1,99	130,20	30,0	65,4
3C2	1 - 34D	4,36	2,72	170,20	39,0	62,6
8M1	1 - 34D	3,96	3,96	75,80	19,1	19,1
8M2	1 - 34D	3,99	3,99	66,00	16,5	16,5
1A1	3 - 500H Q.U.V	2,37	2,37	91,00	38,4	38,4
2A1	3 - 500H Q.U.V	3,38	3,38	173,80	51,4	51,4
3A1	3 - 500H Q.U.V	1,81	1,81	124,20	68,6	68,6
4A1	3 - 500H Q.U.V	1,92	1,92	38,40	20,0	20,0
5A1	3 - 500H Q.U.V	4,15	4,15	87,40	21,1	21,1
6A1	3 - 500H Q.U.V	4,14	4,14	73,00	17,6	17,6
7A1	3 - 500H Q.U.V	3,90	3,90	40,40	10,4	10,4
1C1	3 - 500H Q.U.V	2,87	1,20	33,20	11,6	27,7
2C1	3 - 500H Q.U.V	4,25	2,07	157,80	37,1	76,2
3C1	3 - 500H Q.U.V	3,23	2,74	134,60	41,7	49,1
8M1	3 - 500H Q.U.V	4,10	4,10	71,60	17,5	17,5

ENSAIO DE RASGO						
COD	IDADE	ESPESSURA	ESSURA PRINCI	FORÇA	RESISTÊNCIA AO RASGO	RESISTÊNCIA AO RASGO NA MEMBRANA
1A1	4 - 1000H Q.U.V	2,22	2,22	100,2	45,1	45,1
2A1	4 - 1000H Q.U.V	4,04	4,04	212,4	52,6	52,6
3A1	4 - 1000H Q.U.V	1,92	1,92	107,25	55,9	55,9
4A1	4 - 1000H Q.U.V	1,57	1,57	33,6	21,4	21,4
5A1	4 - 1000H Q.U.V	4,26	4,26	104,6	24,6	24,6
6A1	4 - 1000H Q.U.V	6,2	6,20	135,9	21,9	21,9
7A1	4 - 1000H Q.U.V	4,29	4,29	51,4	12,0	12,0
1C1	4 - 1000H Q.U.V	3,94	2,03	77,88	19,8	38,4
2C1	4 - 1000H Q.U.V	4,08	2,19	183,4	45,0	83,7
3C1	4 - 1000H Q.U.V	3,35	2,62	100,8	30,1	38,5
8M1	4 - 1000H Q.U.V	4,1	4,10	74,4	18,1	18,1
1A1	3 - 500H L.U.V	3,56	3,56	99	27,8	27,8
1A2	3 - 500H L.U.V	3,43	3,43	111,2	32,4	32,4
2A1	3 - 500H L.U.V	2,66	2,66	185	69,5	69,5
2A2	3 - 500H L.U.V	2,86	2,86	185,6	64,9	64,9
3A1	3 - 500H L.U.V	2,08	2,08	121,2	58,3	58,3
3A2	3 - 500H L.U.V	1,4	1,40	48,4	34,6	34,6
4A1	3 - 500H L.U.V	2	2,00	33	16,5	16,5
4A2	3 - 500H L.U.V	1,95	1,95	33	16,9	16,9
5A1	3 - 500H L.U.V	4,31	4,31	115	26,7	26,7
5A2	3 - 500H L.U.V	4,09	4,09	101,8	24,9	24,9
6A1	3 - 500H L.U.V	3,93	3,93	73	18,6	18,6
6A2	3 - 500H L.U.V	3,55	3,55	65,4	18,4	18,4
7A1	3 - 500H L.U.V	2,61	2,61	38,2	14,6	14,6
7A2	3 - 500H L.U.V	2,56	2,56	41,4	16,2	16,2
1C1	3 - 500H L.U.V	3,95	2,03	62,8	15,9	30,9
1C2	3 - 500H L.U.V	3,62	2,03	63,6	17,6	31,3
2C1	3 - 500H L.U.V	4,21	2,19	182,2	43,3	83,2
2C2	3 - 500H L.U.V	4,18	2,19	185,2	44,3	84,6
3C1	3 - 500H L.U.V	3,78	2,62	127,8	33,8	48,8
3C2	3 - 500H L.U.V	3,99	2,62	118,4	29,7	45,2

ENSAIO DE DUREZA			
COD	TIPO DE MEMBRANA	IDADE	DUREZA SHORE A
1B	POLIURÉIA BRANCA	1 - 7D	64
1C	POLIURÉIA BRANCA + BASE VULKEM	1 - 7D	60
2B	POLIURÉIA CINZA CLARO	1 - 7D	82
2C	POLIURÉIA CINZA CLARO + BASE VULKEM	1 - 7D	76
3B	POLIURÉIA CINZA ESCURO	1 - 7D	92
3C	POLIURÉIA CINZA ESCURO + BASE VULKEM	1 - 7D	89
1B	POLIURÉIA BRANCA	2 - 34D	64
1C	POLIURÉIA BRANCA + BASE VULKEM	2 - 34D	52
2B	POLIURÉIA CINZA CLARO	2 - 34D	82
2C	POLIURÉIA CINZA CLARO + BASE VULKEM	2 - 34D	82
3B	POLIURÉIA CINZA ESCURO	2 - 34D	93
3C	POLIURÉIA CINZA ESCURO + BASE VULKEM	2 - 34D	88
4B	VULKEM	2 - 34D	76
5B	POLIURÉIA FRIA	2 - 34D	82
6B	VITPOLI ECO	2 - 34D	81
7B	MANTA LÍQUIDA	2 - 34D	56
8B	MANTA ASFÁLTICA 4MM PREMIUM	2 - 34D	44
1B	POLIURÉIA BRANCA	4 - 500H Q.U.V	65
1C	POLIURÉIA BRANCA + BASE VULKEM	4 - 500H Q.U.V	56
2B	POLIURÉIA CINZA CLARO	4 - 500H Q.U.V	80
2C	POLIURÉIA CINZA CLARO + BASE VULKEM	4 - 500H Q.U.V	83
3B	POLIURÉIA CINZA ESCURO	4 - 500H Q.U.V	91
3C	POLIURÉIA CINZA ESCURO + BASE VULKEM	4 - 500H Q.U.V	90
4B	VULKEM	4 - 500H Q.U.V	80
5B	POLIURÉIA FRIA	4 - 500H Q.U.V	84
6B	VITPOLI ECO	4 - 500H Q.U.V	84
7B	MANTA LÍQUIDA	4 - 500H Q.U.V	36
8B	MANTA ASFÁLTICA 4MM PREMIUM	4 - 500H Q.U.V	48

ENSAIO DE DUREZA			
COD	TIPO DE MEMBRANA	IDADE	DUREZA SHORE A
1B	POLIURÉIA BRANCA	5 - 1000H Q.U.V	64
1C	POLIURÉIA BRANCA + BASE VULKEM	5 - 1000H Q.U.V	56
2B	POLIURÉIA CINZA CLARO	5 - 1000H Q.U.V	76
2C	POLIURÉIA CINZA CLARO + BASE VULKEM	5 - 1000H Q.U.V	78
3B	POLIURÉIA CINZA ESCURO	5 - 1000H Q.U.V	92
3C	POLIURÉIA CINZA ESCURO + BASE VULKEM	5 - 1000H Q.U.V	89
4B	VULKEM	5 - 1000H Q.U.V	80
5B	POLIURÉIA FRIA	5 - 1000H Q.U.V	86
6B	VITPOLI ECO	5 - 1000H Q.U.V	82
7B	MANTA LÍQUIDA	5 - 1000H Q.U.V	36
8B	MANTA ASFÁLTICA 4MM PREMIUM	5 - 1000H Q.U.V	48
1B	POLIURÉIA BRANCA	3 - 500H L.U.V	62
1C	POLIURÉIA BRANCA + BASE VULKEM	3 - 500H L.U.V	54
2B	POLIURÉIA CINZA CLARO	3 - 500H L.U.V	78
2C	POLIURÉIA CINZA CLARO + BASE VULKEM	3 - 500H L.U.V	78
3B	POLIURÉIA CINZA ESCURO	3 - 500H L.U.V	90
3C	POLIURÉIA CINZA ESCURO + BASE VULKEM	3 - 500H L.U.V	88
4B	VULKEM	3 - 500H L.U.V	80
5B	POLIURÉIA FRIA	3 - 500H L.U.V	84
6B	VITPOLI ECO	3 - 500H L.U.V	80
7B	MANTA LÍQUIDA	3 - 500H L.U.V	38

ENSAIO DE ABRASÃO DIN ISO 4649															
COD	MASSA ESPECÍFICA	IDADE	FATOR LIXA	ESPESSURA INICIAL	MASSA INICIAL	ESPESSURA FINAL	MASSA FINAL	PERDA DE MASSA REFERÊNCIA	PERDA DE MASSA mg	PERDA DE ESPESSURA mm	PERDA DE ESPESSURA CORRIGIDA mm	PERDA DE VOLUME RELATIVO mm ³	IRA	FATOR DE LIXA	PERDA DE MASSA CORRIGIDA
1A2	1,05	34D	223,8	5,13	0,9210	3,08	0,6398	224	281	1,51	1,35	239	90,0%	0,891837104	251
2A1	1,05	34D	223,8	7,04	1,2910	4,94	0,9606	221	330	1,78	1,61	285	75,5%	0,905597772	299
2A2	1,05	34D	223,8	6,61	1,2990	4,95	0,9856	221	313	1,68	1,53	270	79,6%	0,905597772	284
2C1	1,05	34D	223,8	4,78	0,9550	3,22	0,8049	217	350	1,56	1,43	307	70,1%	0,919789736	322
2C2	1,05	34D	223,8	4,84	1,0623	3,41	0,7682	217	294	1,43	1,32	258	83,5%	0,919789736	271
3A1	1,05	34D	223,8	4,89	0,9718	3,13	0,5963	214	376	1,76	1,64	334	64,4%	0,934433598	351
3A2	1,05	34D	223,8	5,51	1,0562	3,48	0,6683	214	388	2,03	1,90	345	62,3%	0,934433598	362
1C1	1,1	34D	223,8	4,63	1,1170	2,97	0,7556	211	361	1,66	1,58	312	68,9%	0,94955129	343
1C2	1,1	34D	223,8	4,53	1,0610	3,29	0,7227	211	338	1,24	1,18	292	73,6%	0,94955129	321
2C1	1,1	34D	223,8	4,78	0,9550	3,22	0,8049	207	350	1,56	1,51	307	70,0%	0,965166187	338
2C2	1,1	34D	223,8	4,84	1,0623	3,41	0,7682	207	294	1,43	1,38	258	83,3%	0,965166187	284
3C1	1,1	34D	223,8	4,73	1,1284	3,09	0,7976	204	331	1,64	1,61	295	72,9%	0,98130323	325
3C2	1,1	34D	223,8	4,53	1,0747	2,78	0,7222	204	353	1,75	1,72	314	68,4%	0,98130323	346
4C2	1,2	34D	223,8	5,2	1,3555	2,76	0,6844	199	671	2,44	2,46	563	38,2%	1,006546579	675
5A1	1,4	34D	223,8	8,53	2,6179	6,65	2,01	197	608	1,88	1,91	441	48,8%	1,015252133	617
5A2	1,4	34D	223,8	8,59	2,6735	6,28	2,013	197	661	2,31	2,35	479	44,9%	1,015252133	671
6A1	1,5	34D	223,8	5,2	1,3638	2,51	0,6901	194	674	2,69	2,78	464	46,3%	1,033122955	696
6A2	1,5	34D	223,8	7,88	1,9860	4,57	1,2378	194	748	3,31	3,42	515	41,7%	1,033122955	773
7A2	1,3	34D	223,8	6,52	1,8536	3,56	1,0615	188	772	2,96	3,14	630	34,1%	1,061140811	819

**APÊNDICE B - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE
FLEXÃO DAS LAJES**

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	1A
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	8,15	5,00	0,10
3	11,12	6,50	0,40
4	13,10	7,00	0,90
5	15,19	7,00	1,50
6	19,19	7,00	2,00
7	20,77	7,00	2,74
8	24,17	7,00	3,28
9	30,08	7,00	3,44
10	35,69	7,00	4,07
11	43,08	7,00	4,24
12	49,35	6,50	4,52
13	58,70	6,50	4,71
14	64,94	6,00	4,98
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	1B
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	2,71	5,00	0,10
3	6,58	6,00	0,40
4	7,48	7,50	1,00
5	10,09	9,00	1,50
6	11,78	9,50	2,60
7	15,94	9,00	3,98
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	1C
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	2,80	5,00	0,10
3	5,95	6,00	0,30
4	6,91	6,50	0,40
5	8,58	7,50	0,60
6	9,82	8,00	0,80
7	13,37	8,00	2,10
8	17,32	8,00	3,35
9	21,60	8,00	4,23
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	2A
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	2,68	5,00	0,00
3	4,87	6,50	0,10
4	7,02	6,50	0,30
5	9,36	7,50	0,80
6	12,32	7,50	1,00
7	15,44	7,50	2,31
8	17,75	7,50	3,30
9	22,46	7,50	4,52
10	27,67	7,50	4,92
11	33,68	7,50	6,41
12	44,12	7,50	8,08
13	50,00	7,50	9,38
14	57,31	7,50	9,75
15	64,53	7,50	10,72
16			
17			
NÃO APRESENTOU RASGO NA MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	2B
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	2,11	5,00	0,00
3	6,13	6,50	0,10
4	11,29	7,50	0,20
5	14,45	8,00	0,60
6	19,46	8,00	1,50
7	25,32	8,00	3,71
8	34,06	8,00	5,49
9	37,25	8,00	6,95
10	46,24	8,00	8,07
11	56,72	8,00	10,61
12	68,13	8,50	10,65
13			
14			
15			
16			
17			
NÃO APRESENTOU RASGO NA MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	2C
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	7,50	7,00	0,20
3	9,26	7,50	0,30
4	9,74	8,00	0,40
5	12,58	8,50	0,60
6	14,15	8,50	1,00
7	18,01	8,50	1,30
8	20,05	8,00	1,50
9	24,96	8,00	2,28
10	26,82	8,00	2,74
11	29,11	8,00	2,76
12	30,13	8,00	3,06
13	33,44	8,00	3,65
14	41,83	8,00	3,71
15	48,22	8,00	5,37
16	70,16	8,00	7,09
17	70,44	8,00	7,56
NÃO APRESENTOU RASGO NA MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	3A
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	2,96	5,00	0,00
3	4,54	6,00	0,10
4	6,05	8,00	0,40
5	6,30	9,00	0,60
6	7,22	9,00	0,90
7	9,17	9,00	1,90
8	10,10	9,50	2,95
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
*RASGOU A POLIURÉIA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	3B
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	1,12	5,00	0,00
3	2,23	6,00	0,00
4	3,64	6,00	0,10
5	4,08	7,50	0,20
6	5,68	8,00	0,30
7	8,91	9,00	0,40
8	12,20	9,00	0,70
9	14,93	9,50	0,90
10	17,41	10,00	1,10
11	21,28	9,50	1,40
12	25,47	9,00	1,73
13	29,79	9,00	2,41
14	35,12	9,00	2,96
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	3C
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	1,98	5,00	0,00
3	4,09	6,00	1,00
4	5,18	6,50	2,63
5	6,96	7,50	2,95
6	10,27	9,00	3,13
7	11,42	9,50	3,97
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	4A
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	3,52	5,00	0,05
3	5,58	7,00	0,10
4	5,76	8,00	0,40
5	9,10	8,50	0,80
6	14,18	9,50	1,30
7	20,51	9,50	2,25
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	4B
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	2,00	5,00	0,00
3	5,30	6,00	0,05
4	6,82	7,50	0,10
5	8,09	8,50	0,40
6	11,76	9,50	0,60
7	16,31	9,50	1,40
8	22,52	9,50	2,34
9	25,19	9,50	2,73
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		30/40 DIAS	4B
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	2,00	5,00	0,00
3	5,30	6,00	0,05
4	6,82	7,50	0,10
5	8,09	8,50	0,40
6	11,76	9,50	0,60
7	16,31	9,50	1,40
8	22,52	9,50	2,34
9	25,19	9,50	2,73
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		500 LUV	1A
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	2,20	5,00	0,20
3	2,78	6,00	0,40
4	6,34	7,50	0,70
5	7,42	8,00	1,30
6	14,52	9,00	3,58
7	23,32	8,50	5,14
8	30,84	8,50	4,87
9	39,07	8,50	5,74
10	52,51	8,50	6,64
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		500 LUV	2A
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	1,82	5,00	0,00
3	1,84	7,00	0,20
4	4,59	7,00	0,40
5	5,31	9,00	0,90
6	7,62	9,50	1,40
7	14,16	9,50	2,21
8	20,36	9,50	2,47
9	25,06	9,50	2,70
10	35,56	9,50	2,89
11	52,06	9,50	7,48
12	64,73	9,00	10,50
13			
14			
15			
16			
17			
NÃO APRESENTOU RASGO NA MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		500 LUV	3A
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	1,99	5,00	0,20
3	6,01	8,00	1,00
4	7,22	9,00	1,50
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		500 LUV	3A
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	3,15	5,00	0,00
3	6,96	7,00	0,10
4	8,06	8,50	0,30
5	10,79	9,50	1,50
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJE		IDADE	COD
		500 LUV	4A
MEDIÇÃO	FLECHA CENTRAL (mm)	CARGA (t)	FISSURA (mm)
1	0,01	0,00	0,00
2	2,94	5,00	0,10
3	6,17	7,00	0,80
4	7,75	8,00	1,00
5	9,64	9,00	1,50
6	14,08	9,50	3,25
7	21,50	9,50	4,76
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
RASGOU A MEMBRANA			

**APÊNDICE C – DIMENSIONAMENTO DAS LAJES QUE FORAM
UTILIZADAS NO ENSAIO DE FLEXÃO**

No modelo estipulado, na figura 3.9 do presente trabalho, as reações são dadas por:

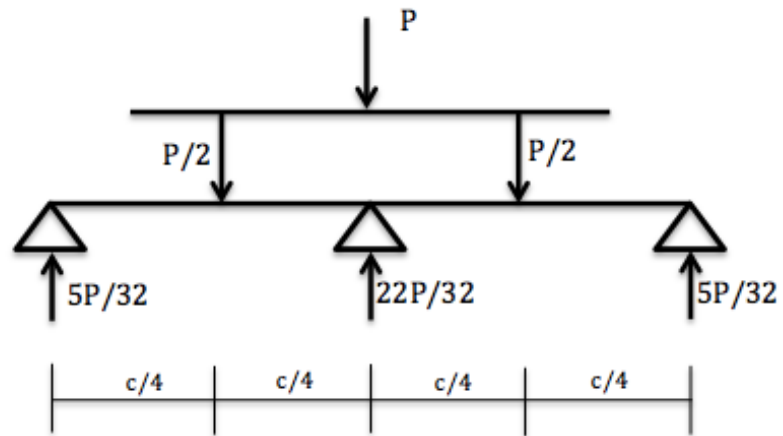


Figura 0.1 – Reações na laje da pesquisa

O Momento fletor máximo para que haja plastificação no ponto central de apoio é

$$Md = K_{md} \times l \times h^2 \times f_{cd} \quad \text{Equação 0.1}$$

onde:

K_{md} – Constante de dimensionamento que indica qual o região de deformação do aço/concreto que a estrutura vai trabalhar (domínio estrutural)

l = largura da laje (cm)

h = altura da laje (cm)

c = comprimento da laje (m)

f_{cd} = resistência do concreto (kg/cm²)

Logo, tem-se que:

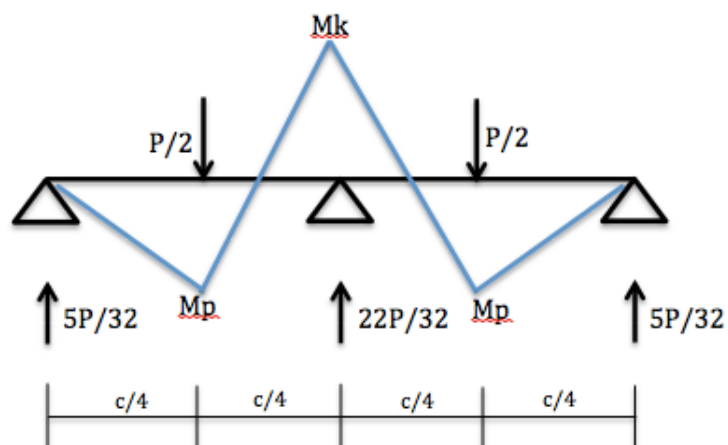


Figura 0.2 – Esquema do diagrama de momento fletor das lajes da pesquisa

Portanto,

$$M_p = \frac{5P}{32} \times \frac{c}{4} \quad \text{Equação 0.2}$$

No sistema a seguir, tem-se que:

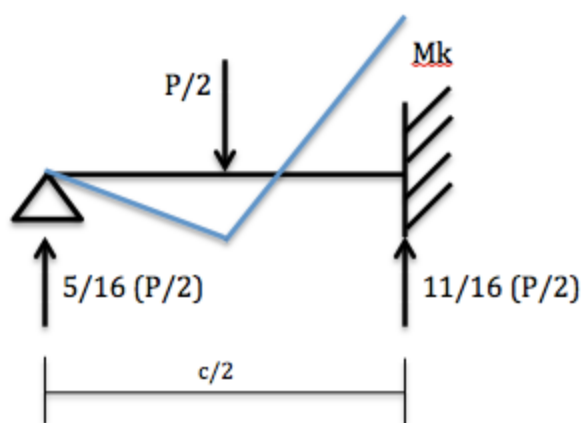


Figura 0.3 – Diagrama do momento fletor da metade da laje da pesquisa

Tem-se, portanto:

$$Mk = \frac{3}{16} \times \frac{P}{2} \times \frac{c}{2} \quad \text{Equação 0.3}$$

Sabe-se os valores de “Mk” e o “c”, logo obtem-se o valor de “P”

Se continuar com o aumento a carga além desse ponto, resultará na formação de uma rótula nos pontos entre os apoios que recebem a carga; neste momento, a estrutura entraria em colapso.

À partir da plastificação do ponto central da laje, forma-se uma rótula central e pode-se separar a análise, mais uma vez, da estrutura em duas sub-estruturas bi-apoiadas.

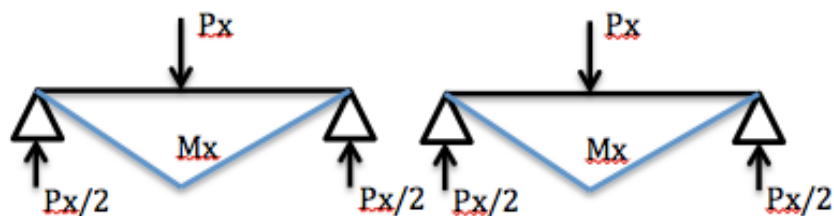


Figura 0.4 – Diagrama do momento fletor após a plastificação da rótula central.

Mx seria o momento fletor necessário para plastificar os vãos intermediários dos apoios e seria

$$Mx = Mk - Mp \quad \text{Equação 0.4}$$

Analisando-se o braço de alavanca, é possível obter o acréscimo de carga:

$$Mx = \frac{Px}{2} \times \frac{c}{4} \quad \text{Equação 0.5}$$

Assim, tem-se que a carga total a ser colocada na prensa seria de :

$$P_{total} = P + 2 Px \quad \text{Equação 0.6}$$

Para o cálculo da armadura, temos:

$$A_s = \frac{M_k}{K_z \times d \times f_{yd}} \quad \text{Equação 0.7}$$

K_z – Coeficiente K_z é obtido da região de trabalho estrutural

d – altura da laje (h) subtraindo-se o cobrimento

f_{yd} – Tensão de escoamento do aço (NBR 6118 adota 5.000 kg/cm²)

Foi adotado uma laje com as seguintes dimensões

- $C = 2$ m
- $H = 7$ cm
- $L = 45$ cm
- Cobrimento = 1 cm

Se o objetivo fosse dimensionar a armadura da laje considerando o critério de maior resistência pela seção da peça, seria adotado K_{md} e K_z no limite dos domínios 3 e 4 que consideram a deformação do concreto de 3,5‰ e do aço de 2,07‰, e obteríamos a seguinte situação:

Tabela 0.1 – Dimensionamento da laje entre os domínios 3 e 4

Dimensões	c	2	m
	l	45	cm
	h	7	cm
Cobrimento		1	cm
f_{yd}		5000	kg/cm ²
f_{cd}		300	kg/cm ²
K_{md}	Domínio 3-4	0,32	
K_z	Domínio 3-4	0,749	
M_d		1555,2	kg m
P		16589	kg
Carga Apoios 1 e 3		2592	kg
Carga Apoio 2 (central)		11405	kg
M_p		1296,0	kg m
M_x		259,2	kg m
P_x		1037	kg
P total (Carga Total Prensa na Ruptura)		18662	kg
As (Área de aço)		6,92	kg/m ²

No entanto, sabe-se que o aço deforma muito mais que 2,07‰, e se o objetivo da pesquisa é forçar o aparecimento de fissuras nas lajes para o estudo do comportamento dos revestimentos impermeabilizantes em relação às mesmas, foi decidido por dimensioná-las entre os domínios 2 e 3 (fracamente armadas), situação que o aço esta numa deformação de 10,0‰ e o concreto em 3,5‰.

Tabela 0.2 - Dimensionamento da laje entre os domínios 2 e 3

Dimensões	c	2	m
	l	45	cm
	h	7	cm
Cobrimento		1	cm
f_{yd}		5000	kg/cm ²
f_{cd}		300	kg/cm ²
K_{md}	Dominio 2-3	0,158	
K_z	Dominio 2-3	0,896	
M_d		767,9	kg m
P		8191	kg
Carga Apoios 1 e 3		1280	kg
Carga Apoio 2 (central)		5631	kg
M_p		639,9	kg m
M_x		128,0	kg m
P_x		512	kg
P total (Carga Total Prensa na Ruptura)		9215	kg
As (Área de aço)		2,86	kg/m ²

Assim, foi adotada como armadura para a laje em questão, 5 barras de 8,0 mm.