

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**TATHYANE CAMARA DE SOUZA AMORIM**

**APLICAÇÃO DE MÉTODO ALTERNATIVO**  
**PARA ESTUDO DO COEFICIENTE DE ATRITO**  
**DE REVESTIMENTO DE CALÇADAS**

MARINGÁ  
2018

**TATHYANE CAMARA DE SOUZA AMORIM**

**APLICAÇÃO DE MÉTODO ALTERNATIVO  
PARA ESTUDO DO COEFICIENTE DE ATRITO  
DE REVESTIMENTO DE CALÇADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, da Universidade Estadual de Maringá, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Jesner Sereni Ildefonso

MARINGÁ  
2018

**Candidata:** Engenheira **TATHYANE CAMARA DE SOUZA AMORIM**

Título da dissertação: "Aplicação de método alternativo para o estudo do coeficiente de atrito de revestimento de calçadas"

Data da defesa: 12 de março de 2018

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. **Jesner Sereni Ildfonso (Orientador)**  
(Universidade Estadual de Maringá - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana)

---

Prof. Dr. **Bruno Vieira Bertoncini**  
(Universidade Federal do Ceará - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes)

---

Prof. Dr. **Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis**  
(Universidade Estadual de Maringá - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil)

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. **Juliana Azoia Lukiantchuki**  
(Universidade Estadual de Maringá - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana: Prof. Dr. **Marcelo Luiz Chicati**

A Deus, pelo dom da vida, à minha família que me levantou sempre que tropecei nesse caminho e amigos pelo constante apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida, e pela possibilidade de viver essa intensa jornada com plena saúde.

À Universidade Estadual de Maringá, na figura dos professores e colaboradores do Departamento de Engenharia Civil que estiveram sempre prontos para ajudar.

Ao Douglas Bueno Fernandes pelo apoio junto à Secretaria do Programa de Engenharia Urbana, por sua dedicação e pela palavra amiga.

Ao Professor Jesner Sereni Ildefonso pela orientação e pelas cobranças que permitiram que esse trabalho fosse concluído.

Aos professores do Programa de Engenharia Urbana que colaboraram para a construção de todo o conhecimento adquirido com esse mestrado.

Aos funcionários dos laboratórios, principalmente ao Valtão, à Lúcia, ao Júlio e ao Paulo, pela disposição, dedicação e prontidão nos momentos em que mais precisei.

Aos meus chefes, Vera e Leonardo, pelo apoio no trabalho naqueles momentos em que necessitei de adaptações na jornada para conseguir tempo para fazer meus ensaios.

Aos meus pais, que me colocaram nesse mundo, que me deram sempre todo o apoio e que sempre acreditaram em mim; neste quesito, principalmente à minha mãe, por aguentar minhas inseguranças.

Aos meus amigos da vida que foram essenciais nos desabafos e puxões de orelha, a Fernanda Baldin, a Carolina Garcia, a Andressa Oliveira, Karla Santos, William Plínio e Rayssa, Carlos Henrique e Amanda Kovaltchuk.

Aos amigos que o mestrado trouxe e que viveram juntos esse momento, a Jéssica, a Juliana e a Bárbara.

Aos meus afilhados que são os amores da minha vida, Aline, Pedro e Maitê.

Aos meus familiares que também dividiram todos os dias do “tenho que ir embora pra estudar”, meus sogros Cleide e Manoel, meus avós Maria e Luiz, meus tios Ana Paula e Junior, e meus amados irmãos Karyna e Leandro.

Ao meu querido pai, Antônio Mauro, que além de apoio, foi o meu “faz tudo”, me ajudando sempre que eu o solicitava, e sem o qual esse trabalho nunca teria saído do mundo das ideias.

Por fim, ao meu amado marido Rhuan Felipe Reino Amorim, por toda a parceria e amor que teve em mim ao longo desse processo, estando ao meu lado e me apoiando o tempo todo, mesmo quando eu mesma não acreditava em mim.

Deus me conceda falar com propriedade e pensar de forma correspondente aos dons que me foram dados, porque ele é o guia da sabedoria e orientador dos sábios.

Sabedoria 7.15

## **RESUMO**

AMORIM, T. C. S. **Aplicação de método alternativo para o estudo do coeficiente de atrito de revestimento de calçadas**. 125 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

Com o objetivo de estudar um método alternativo de medição do coeficiente de atrito de materiais de revestimento de calçadas, foi aprimorado o método utilizado por Silva (2012), aqui nomeado de Método de Inclinação da Superfície (MIS), que permitiu a análise da interação, sob diferentes condições de superfície, entre o látex e os revestimentos de calçadas. A norma nacional que trata sobre o padrão de execução de calçadas traz que o revestimento das mesmas deve ser antiderrapante, mas não indica nenhum ensaio para essa verificação, nem mesmo valores de referência para reconhecer um piso com as características desejadas. Diante disso, o estudo se faz necessário devido a importância das calçadas para os deslocamentos dos pedestres nas cidades, bem como a necessidade de que os revestimentos utilizados nas mesmas possam conferir segurança nos deslocamentos, principalmente contra escorregamentos e quedas. O Método é de reprodução simples e de baixo custo, e consiste na observação do momento em que se inicia o deslizamento de um corpo de prova sobre uma superfície inclinável revestida com materiais de revestimento de calçadas, sob diferentes condições de interação, como sob umidade e com espalhamento de areia. Como resultados, verificou-se que, entre os revestimentos analisados, o ladrilho hidráulico é o mais resistente a deslizamentos, com coeficiente de atrito de 0,83 quando ensaiado seco contra o corpo de prova de látex e de 0,80 quando úmido. Foi possível também a determinação de uma faixa de referência para que uma superfície possa ser considerada antiderrapante a partir da determinação dos valores de coeficiente de atrito pelo Método de Inclinação da Superfície. Tal faixa aponta que são antiderrapantes os revestimentos cujos valores de coeficiente de atrito são iguais ou superiores à 0,65, em condição seca e úmida. Desse modo permite-se a definição de valor mínimo que pode ser utilizado para suprir a falta de referências normativas, bem como o estudo de demais pavimentos sob diferentes condições de superfície.

**Palavras-chave:** Escorregamento. Método de Inclinação da Superfície. Segurança.

## ABSTRACT

AMORIM, T. C. S. **Application of alternative method for the study of the friction coefficient of sidewalk covering.** 125 p. Master Thesis - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

In order to study an alternative method of measuring the coefficient of friction of pavement materials, the method used by Silva (2012), here named Surface Slope Method (MIS), has been improved, allowing the analysis of the interaction, under different surface conditions, between latex and sidewalk coatings. The national standard dealing with the pattern of sidewalks implementation must be non-slip, but does not indicate any test for this verification, nor even reference values to recognize a floor with the desired characteristics is necessary because of the importance of the sidewalks for the pedestrian movements in the cities and the need for the coatings used in them to give safety in the displacements, especially against slips and falls. The method is simple and low cost reproduction and consists in observing the moment when the sliding of a test piece on a tiltable surface coated with sidewalk materials under different conditions of interaction, such as under humidity and with sand scattering. As a result it was found that, among the coatings analyzed, the hydraulic tile is the most resistant to sliding, with a coefficient of friction of 0.83 when tested dry against the latex test body and 0.80 when wet. It was also possible to determine a reference range so that a surface can be considered non-slip from the determination of the values of coefficient of friction by the Method of Surface Slope. Such a strip indicates that coatings whose coefficient of friction values are equal to or greater than 0.65 in dry and wet conditions are non-slip. In this way, it is possible to define reference values that can be used to overcome the lack of normative references, as well as the study of other pavements under different surface conditions.

Keywords: Slippage. Surface Slope Method. Safety.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Decomposição de uma força em duas componentes perpendiculares	29
Figura 2.2	Atrito e ângulo de atrito	30
Figura 2.3	Medição do ângulo de atrito	31
Figura 2.4	Equilíbrio de forças no plano inclinado	34
Figura 2.5	A força de atrito causada pela simetria do contato adesivo	36
Figura 2.6	Esquema de forças no ensaio de cisalhamento	41
Figura 2.7	Relação entre tensão de cisalhamento e o deslocamento no ensaio de cisalhamento direto	42
Figura 2.8	Tensão de cisalhamento máxima relacionada à tensão normal no ensaio de cisalhamento direto	43
Figura 2.9	Demonstração da variação do volume no deslocamento entre superfícies de contato	44
Figura 3.1	Representação do projeto do equipamento desenvolvido para o Método de Inclinação da Superfície	47
Figura 3.2	Representação do Método com o corpo de prova sobre a superfície inclinada	47
Figura 3.3	Representação do conjunto de ensaio	48
Figura 3.4	Revestimentos de calçadas ensaiados	49
Figura 3.5	Imagens da produção do primeiro caixote	50
Figura 3.6	Corpos de prova para o ensaio do Método de Inclinação da Superfície	52
Figura 3.7	Esquema de montagem do ensaio do Método do Deslizamento do Bloco	52
Figura 3.8	Aferição do aplicativo de celular para medição da inclinação	53
Figura 3.9	Curva de calibração do aplicativo de Inclinômetro para celular	54
Figura 3.10	Encaixe entre os pesos adicionais e os corpos de prova	56
Figura 3.11	Umedecimento dos revestimentos	57
Figura 3.12	Espalhamento manual da areia	57
Figura 3.13	Processo de validação dos resultados do método	58
Figura 3.14	Processo de aplicação do método	58

Figura 3.15	Prensa de Cisalhamento Direto – Autosherr	60
Figura 3.16	Produção dos corpos de prova de pavimento	61
Figura 3.17	Revestimento do molde para concretagem	61
Figura 3.18	Corpo de prova de látex 2 mm colado na madeira, adaptado à caixa de cisalhamento	62
Figura 3.19	Adaptação do corpo de prova à caixa de cisalhamento	63
Figura 3.20	Processo de execução do ensaio	64
Figura 4.1	Comportamento dos diferentes materiais em contato com a superfície de concreto seco na curva coeficiente de atrito x sobrecarga (kg)	67
Figura 4.2	Comportamento dos diferentes pavimentos na condição natural (seco) em contato com a superfície de látex na curva coeficiente de atrito x sobrecarga (kg)	70
Figura 4.3	Comportamento dos diferentes pavimentos na condição úmida em contato com a superfície de látex na curva coeficiente de atrito x sobrecarga (kg)	73
Figura 4.4	Comportamento dos diferentes pavimentos com areia em contato com a superfície de látex na curva coeficiente de atrito x sobrecarga (kg)	76
Figura 4.5	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.1-D	79
Figura 4.6	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.6-O	79
Figura 4.7	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.7-P	80
Figura 4.8	Curva tensão x deslocamento concreto-látex 25 kg	81
Figura 4.9	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.2-E	82
Figura 4.10	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.8-Q	82
Figura 4.11	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.9-R	83
Figura 4.12	Curva tensão x deslocamento concreto-látex 50 kg	84

Figura 4.13	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.3-F	84
Figura 4.14	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.4-J	85
Figura 4.15	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.5-L	85
Figura 4.16	Curva tensão x deslocamento concreto-látex 75 kg	86
Figura 4.17	Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal	87
Figura 4.18	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.1-D úmido	89
Figura 4.19	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.6-O úmido	89
Figura 4.20	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.7-P úmido	90
Figura 4.21	Curva tensão x deslocamento concreto úmido-látex 25 kg	91
Figura 4.22	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.2-E úmido	92
Figura 4.23	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.8-Q úmido	92
Figura 4.24	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.9-R úmido	93
Figura 4.25	Curva tensão x deslocamento concreto úmido-látex 50 kg	94
Figura 4.26	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.3-F úmido	95
Figura 4.27	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.4-J úmido	95
Figura 4.28	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.5-L úmido	96
Figura 4.29	Curva tensão x deslocamento concreto úmido-látex 75 kg	97
Figura 4.30	Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal	98
Figura 4.31	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2-B	99
Figura 4.32	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	100

	CP9-M	
Figura 4.33	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	100
	CP8-N	
Figura 4.34	Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico-látex 25 kg	101
Figura 4.35	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	102
	CP1-A	
Figura 4.36	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	102
	CP6-K	
Figura 4.37	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	103
	CP7-I	
Figura 4.38	Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico-látex 50 kg	104
Figura 4.39	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	105
	CP3-F	
Figura 4.40	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	105
	CP4-G	
Figura 4.41	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	106
	CP5-H	
Figura 4.42	Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico-látex 75 kg	107
Figura 4.43	Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal	108
Figura 4.44	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	109
	CP2-B úmido	
Figura 4.45	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	109
	CP9-M úmido	
Figura 4.46	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	110
	CP8-N úmido	
Figura 4.47	Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico úmido-látex 25 kg	111
Figura 4.48	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	111
	CP1-A úmido	
Figura 4.49	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	112
	CP6-K úmido	
Figura 4.50	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical	112
	CP7-I úmido	

Figura 4.51	Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico úmido-látex 50 kg	113
Figura 4.52	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP3-F úmido	114
Figura 4.53	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP4-G úmido	114
Figura 4.54	Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP5-H úmido	115
Figura 4.55	Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico-látex 75 kg	116
Figura 4.56	Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Aferição do aplicativo de celular para medição da inclinação.	54
Tabela 3.2	Custo para reprodução do método MIS	59
Tabela 4.1	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto seco-metal	65
Tabela 4.2	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto seco-madeira	66
Tabela 4.3	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto seco-látex	66
Tabela 4.4	Coeficiente de atrito para as diferentes superfícies de contato	68
Tabela 4.5	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico seco-látex	68
Tabela 4.6	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico com tinta seco-látex	68
Tabela 4.7	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: paver seco-látex	69
Tabela 4.8	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto seco-látex	69
Tabela 4.9	Coeficiente de atrito para os diferentes pavimentos na condição natural (seco) em contato com a superfície de látex	71
Tabela 4.10	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico úmido-látex	71
Tabela 4.11	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico com tinta úmido-látex	71
Tabela 4.12	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: paver úmido-látex	72
Tabela 4.13	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto úmido-látex	72

Tabela 4.14	Coeficiente de atrito para os diferentes pavimentos na condição úmida em contato com a superfície de látex	74
Tabela 4.15	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico com areia-látex	74
Tabela 4.16	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico com tinta com areia-látex	75
Tabela 4.17	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: paver com areia-látex	75
Tabela 4.18	Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto com areia-látex	75
Tabela 4.19	Coeficiente de atrito para os diferentes pavimentos na com areia em contato com a superfície de látex	76
Tabela 4.20	Resumo dos resultados dos ensaios pelo MIS	77
Tabela 4.21	Tensão cisalhante máxima e tensão normal concreto-látex	87
Tabela 4.22	Tensão cisalhante máxima e tensão normal concreto úmido-látex	98
Tabela 4.23	Tensão cisalhante máxima e tensão normal ladrilho hidráulico-látex	107
Tabela 4.24	Tensão cisalhante máxima e tensão normal ladrilho hidráulico úmido-látex	116

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta$	Ângulo de decomposição de forças em componentes normal e cisalhante, entre a força atuante e a horizontal
$\beta$	Ângulo de decomposição de forças em componentes normal e cisalhante, entre a força atuante e a normal
<b>P</b>	Força atuante
<b>N</b>	Força normal
<b>F</b>	Força cisalhante/força de atrito
<b>W</b>	Força peso
<b>R</b>	Força de reação
<b>F<sub>máx</sub></b>	Força cisalhante máxima necessária para iniciar o movimento de uma massa
$\mu$	Coefficiente de atrito
$\Delta$	Ângulo de atrito
$f_e$	Módulo da força de atrito estático
$\mu_e$	Coefficiente de atrito estático
$f_c$	Módulo de força de atrito cinético
$\mu_c$	Coefficiente de atrito cinético
$N_0$	Constante dependente das propriedades das superfícies e da verdadeira superfície de contato entre elas
$\Sigma$	Tensão normal
<b>A</b>	Área da seção transversal do corpo
<b>T</b>	Tensão de cisalhamento
$\tau_f$	Máxima tensão de cisalhamento
$\theta_e$	Ângulo limite entre o plano inclinado e a horizontal para o corpo permanecer estático
<b>D</b>	Distância percorrida pelo bloco em um determinado intervalo de tempo t



<b>T</b>	Intervalo de tempo
<b><i>a</i></b>	Aceleração
<b>G</b>	Módulo da aceleração da gravidade
<b>L</b>	Dimensão do lado da caixa utilizada no ensaio de cisalhamento direto
<b>C</b>	Coesão
<b><i>d<sub>c</sub></i></b>	Distância crítica à qual ocorre a separação das superfícies

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	19
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS	21
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	21
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	23
2.1	CALÇADAS	23
<b>2.1.1</b>	<b>Acidentes em calçadas</b>	26
2.2	COEFICIENTE DE ATRITO	28
<b>2.2.1</b>	<b>Conceituação sobre coeficiente de atrito</b>	28
<b>2.2.2</b>	<b>Trabalhos com medições do coeficiente de atrito</b>	36
<b>2.2.3</b>	<b>O ensaio de cisalhamento direto</b>	40
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	47
3.1	MÉTODO DE INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE	47
<b>3.1.1</b>	<b>Custos para reprodução do método</b>	59
3.2	MÉTODO DO CISALHAMENTO DIRETO	59
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	65
4.1	ENSAIO DO METÓDO DE INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE	65
4.2	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	77
<b>4.2.1</b>	<b>Ensaio do concreto seco</b>	78
<b>4.2.2</b>	<b>Ensaio do concreto úmido</b>	88
<b>4.2.3</b>	<b>Ensaio do ladrilho hidráulico seco</b>	99
<b>4.2.4</b>	<b>Ensaio do ladrilho hidráulico úmido</b>	108
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	118
	<b>REFERÊNCIAS</b>	123

## 1 INTRODUÇÃO

A calçada é a parte da via destinada especificamente à circulação de pedestres, dessa forma, a qualidade de seu revestimento, o estado de conservação e a ausência de obstruções e desníveis são essenciais aos seus usuários no momento de deslocamento, de tal forma que possam transitar com segurança e conforto.

No contexto de busca ao cumprimento da Lei nº 12587 de 2012, que institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana, houve a disseminação dos conceitos de planejamento das cidades com priorização de transporte pelos modos a pé, não motorizados e coletivos, assim a calçada ganhou mais atenção e, quando se trata de calçadas, há que se considerar o seu dimensionamento e o tipo de revestimento a ser aplicado.

Existe uma vasta gama de materiais utilizados para revestir as calçadas, porém existem recomendações mínimas que devem ser seguidas em todos os casos e que, segundo a ABNT NBR 9050:2015, devem conferir superfície regular, estável, sem trepidação aos dispositivos com rodas e antiderrapante em condições secas e molhadas.

Pela palavra antiderrapante, entende-se a propriedade daquele piso de não permitir derrapagens, ou seja, escorregamentos ao se transitar sobre ele. Entretanto, normas de referência nacional, como a ABNT NBR 9050:2015, que traz as orientações para execução de calçadas, bem como as características que os pavimentos das mesmas devem conter, não apresentam, em momento algum, qualquer determinação de como deve se comportar um pavimento para que esse possa ser considerado como antiderrapante, tampouco cita parâmetros de referência, como o coeficiente de atrito mínimo que esse material deve ter.

Essa falta de definição e parametrização propicia que diversos tipos de pavimentos sejam comercializados como antiderrapantes, mas, quando aplicados aos espaços públicos, são motivos de acidentes devidos aos escorregamentos e quedas, os quais podem ter graves consequências, como ferimentos e mortes.

Uma das formas de se determinar a resistência ao deslizamento de um pavimento é por meio da medição do coeficiente de atrito, que é o quociente entre a força máxima à qual um pavimento pode resistir contra o deslizamento de um corpo sobre ele, pela reação normal que o pavimento tem devido ao peso dessa massa.

São vários os métodos existentes que possibilitam a obtenção dessa medida, como por exemplo o ensaio de cisalhamento direto, o pêndulo britânico, entre outros, porém, normalmente são ensaios patenteados, de alto custo e complexidade, e que para sua reprodução se faz necessário recorrer à laboratórios especializados; além disso faltam

referências científicas e bibliografias de estudos destinados à revestimentos de calçadas e suas particularidades.

Diante dessa lacuna de valores de referência para definição de um revestimento como antiderrapante, do fato de os métodos já conhecidos para esse fim serem patenteados e de reprodução custosa e complexa, e da falta estudos relacionados aos revestimentos de calçadas é que se buscou o estudo de um método alternativo de baixo custo e fácil reprodução que possa medir o coeficiente de atrito de diferentes superfícies e sob diferentes condições de interação e assim difundir tal avaliação com a obtenção de valores de referência para a classificação de pavimentos como antiderrapantes.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As calçadas, necessárias para os deslocamentos nos espaços externos das cidades, são espaços públicos onde todos passam a fim de cumprir as funções de seus deslocamentos e normalmente não oferecem aos usuários a opção de utilizá-las ou não, porque os demais espaços das vias estão ocupados por carros e outros veículos estacionados ou em movimentos.

O tipo de revestimento está intimamente ligado à condição de superfície oferecida pela calçada, e a sua escolha resulta em características que serão atribuídas ao caminho, como segurança e conforto ao andar, resistência ao escorregamento, diminuição de acidentes de quedas, conforto visual, entre outros.

A qualidade do revestimento quanto à resistência aos escorregamentos, em condições secas e úmidas, está intimamente ligada à expressiva quantidade de ocorrência de acidentes de quedas e escorregamentos.

Dados do Conselho Nacional de Segurança (NSC - *National Safety Council*), uma organização não governamental dos Estados Unidos, no relatório de fatores de lesão (*Injury Facts*) de 2015, apontam que, nos Estados Unidos, as quedas são a terceira maior causa de mortes por lesões involuntárias e foram a principal causa de encaminhamentos ao departamento de emergência relacionados a lesões, totalizando em 2011, 11,3 milhões de atendimentos emergenciais.

Um estudo feito no Brasil pelo Projeto Diretrizes, da Associação Médica Brasileira e Conselho Federal de Medicina, de autoria de Pereira, Buksman e Perracini (2001), intitulado Queda de Idosos, mostra que ao menos 30% dos idosos caem no mínimo uma vez por ano, e que a ocorrência de quedas por faixa etária é de 32% para pacientes de 65 a 74 anos, 35% para pacientes de 75 a 84 anos e de 51% em pacientes acima de 85 anos.

As quedas estão relacionadas a 12% das causas de óbitos na população geriátrica e constitui a sexta causa de óbito em pacientes com mais de 65 anos. A soma de fatores como as alterações relacionadas à idade, doenças e meio ambiente inadequado podem culminar em mais quedas. Quanto aos fatores ambientais, esses podem ter importância em até 50% de todas as quedas, sendo que, entre esses fatores, tem-se a presença de superfícies escorregadias.

Pode-se perceber que a escolha do revestimento adequado influi inclusive em questões de saúde pública e, pelo fato de não existir na norma de referência nacional para acessibilidade em calçadas, valores ou ensaios de indicados para avaliar o valor do coeficiente de atrito dos revestimentos e pela necessidade de encontrar tal referência, propõe-se a análise de um método para a medição do coeficiente de atrito entre pavimentos de calçadas e materiais de solado de sapato que seja de fácil reprodução, de baixo custo, e de resultados condizentes, a fim de possibilitar o desenvolvimento de um ensaio que envolva os conceitos básicos para medição do coeficiente de atrito, com resultados representativos.

Dentro dos ensaios existentes, que poderiam auxiliar na avaliação dos resultados do método alternativo, a Universidade Estadual de Maringá conta com a prensa eletrônica para a realização de ensaios de cisalhamento direto, portanto este foi o ensaio e o método aplicados em alguns dos revestimentos e condições de superfície similares ao método alternativo, de modo a auxiliar na análise dos resultados.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Essa pesquisa tem por objetivo a aplicação de um método alternativo, de baixo custo e fácil reprodução, para a determinação do coeficiente de atrito de revestimentos de calçadas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver e aplicar um método de fácil reprodução e baixo custo para medição do coeficiente de atrito de pavimentos de calçadas;
- Indicar uma faixa de referência aceitável para o coeficiente de atrito de pavimentos de calçadas;

- Analisar parte dos materiais usados em revestimentos de calçadas no município de Maringá quanto à resistência ao escorregamento por meio da medição coeficiente de atrito em diferentes situações;
- Avaliar o ensaio de cisalhamento direto para medição do coeficiente de atrito entre o látex, material comumente utilizado em solado de sapato, e o material de revestimento da calçada.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O principal objeto de estudo no presente trabalho é a calçada e, diante disso, faz-se uma contextualização a respeito do tema. Vale destacar que as calçadas não costumam ser objeto de estudos de produções científicas, o que dificulta a obtenção de bibliografia sobre o assunto.

### 2.1 CALÇADAS

A calçada, segundo o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) e a ABNT NBR 9050:2015, é a parte da via, normalmente segregada e em nível diferente, não destinada à circulação de veículos, reservada ao trânsito de pedestres e, quando possível, a implantação de mobiliário urbano, sinalização, vegetação e outros fins.

Para a livre circulação dos pedestres é necessário que as calçadas tenham um piso que proporcione estabilidade ao caminhar, de forma a evitar acidentes e consequentes lesões.

A ABNT NBR 9050:2015, que trata da acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos, traz que as calçadas, assim como os demais locais de circulação, devem ter pisos com superfície regular, firme, estável, não trepidante para dispositivos com rodas e antiderrapante, sob qualquer condição (seco ou molhado), porém, a norma não indica quais materiais, técnicas construtivas e tipos de revestimentos são adequados para se obter calçadas que atendam tais exigências, nem parâmetros de referência, como o valor mínimo do coeficiente de atrito, para a segurança contra escorregamentos.

A norma Norte Americana ASTM F1646 de 2013, que se refere à terminologia padrão relativa à segurança e à tração para calçados, define passeio como sendo a superfície de caminhada construída para o uso do pedestre, incluindo os pisos, rampas, rotas, calçadas, escadas, estacionamentos e demais áreas pavimentadas similares que possam previsivelmente servir de forma razoável como caminhos para pedestres. Já para a ABNT NBR 9050:2015, passeio é a parte da calçada ou da pista de rolamento, neste último caso separada por pintura ou elemento físico, livre de interferências, destinada à circulação exclusiva de pedestres e, excepcionalmente, de ciclistas.

Percebe-se que a população e os planejadores urbanos vêm se voltando novamente às calçadas e à priorização dos pedestres. Dessa forma, as calçadas passam a se tornar um referencial de qualidade do ambiente urbano, pois uma calçada com dimensões adequadas,

padronizada, com manutenção do pavimento e boas condições de superfície é característica de um ambiente acessível, com qualidade e conforto de deslocamentos para os pedestres.

A calçada é o fator principal quando se fala em acessibilidade urbana, visto que, em todos seus deslocamentos, as pessoas, independentemente do tipo de transporte utilizado, em algum momento são pedestres e, para acesso ao espaço público, utilizam-se das calçadas.

Em face disso, a acessibilidade é parte integrante de um conceito maior, a mobilidade urbana, que segundo a Lei Federal nº 12.587 de 2012, que institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana, a define como: “Condição em que se realizam os deslocamentos de pessoas e cargas nos espaços urbano”.

Para a manutenção e execução correta das calçadas, com materiais apropriados, é necessária a ação do poder público. Nessa direção, Malatesta (2007), em seu trabalho sobre as calçadas da cidade de São Paulo, cita que, apesar de o poder público estar constantemente legislando sobre a calçada, este não fiscaliza e não pune quem não cumpre a legislação, porém a legislação está em nível técnico bastante satisfatório a fim de atender às necessidades de caminhada e, se essa fosse seguida, seria suficiente para dar solução imediata ao impasse de mobilidade que atinge a cidade, visto que pequenas viagens migrariam do automóvel para as calçadas e assim realocariam verbas hoje destinadas a acidentes nos passeios e às doenças advindas das práticas sedentárias dos motoristas para a implementação de calçadas.

Apesar do autor apontar as legislações existentes como de nível técnico satisfatório, ainda faltam referências quanto à segurança dos materiais ao escorregamento, nas diversas situações: seco, úmido, com poeira etc.; bem como ensaios padrões para a medição e fiscalização dessas propriedades.

No Brasil existem algumas normas que trazem padrões a respeito de calçadas, e a principal delas é a já citada anteriormente, a ABNT NBR 9050:2015, que trata de acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos e, nesse contexto, traz referências à construção de calçadas que são reproduzidas em uma série de leis municipais que regulamentam o assunto.

O Decreto Federal nº 5.296, de 2 de dezembro de 2004, que regulamenta a Lei Federal nº 10.048 de 8 de novembro de 2000 e a Lei Federal nº 10.098 de 19 de dezembro de 2000, traz em seu artigo 15 que “No planejamento e na urbanização das vias, praças, dos logradouros, parques e demais espaços de uso público, deverão ser cumpridas as exigências dispostas nas normas técnicas de acessibilidade da ABNT”, logo tem-se que a ABNT NBR 9050:2015 tem validade de lei em território nacional no assunto de calçadas. Os municípios



podem também legislar sobre a matéria, a fim de adequar a norma às condições da cidade, porém devem ter por base o cumprimento da norma anteriormente citada.

No município onde foi desenvolvida a presente pesquisa, em Maringá – PR, a Norma Regulamentadora Municipal NRM U-20001, intitulada “Das calçadas – Desenho, acessibilidade e mobilidade”, traz que, quanto à pavimentação das calçadas, os pisos utilizados deverão proporcionar uma superfície regular, livre de saliências ou ondulações, estável e antiderrapante, conforme as disposições das normas técnicas brasileiras (ABNT/NBR) relativas ao assunto. Porém, também não traz definições quanto aos tipos de piso e propriedades de resistência ao escorregamento a ser consideradas.

Vale ressaltar que, por meio da Lei Complementar Municipal nº1.045 de 23 de março de 2016, que institui o Código de Edificações e Posturas Básicas para projeto, implantação e licenciamento de edificações no Município de Maringá, em seu artigo 30 traz que:

“Os proprietários de imóveis com frente para logradouros públicos pavimentados, ou dotados de meio-fio e sarjeta, serão obrigados a pavimentar às suas expensas, a calçada em toda(s) a(s) testada(s) do lote. Caberá ao proprietário também a manutenção e conservação do pavimento da calçada e das faixas de permeabilidade exigidas”.

Portanto, a calçada, apesar de ser um bem público no município, tem sua construção e manutenção sob responsabilidade do proprietário, o que dificulta ainda mais o processo de controle sobre os tipos de revestimento aplicados para o revestimento de calçadas.

Códigos e padrões de passeio, como muitos outros códigos e padrões, são frequentemente criados por meio de consenso em comitês, baseados em uma série de fatores, incluindo precedente histórico, práticas comuns, custos e dados empíricos (KENNETH; JOHNSON; VIDAL, 2016, p. 309).

O Código Internacional de Construção (IBC - *International Building Code*), a Administração de Segurança e Saúde no Trabalho (OSHA - *Occupational Safety and Health Administration*) e muitos outros códigos, regulamentações, legislações e padrões consensuais, mencionam a necessidade de resistência ao escorregamento nas superfícies, porém ainda não definiram o que seria antiderrapante e como medir isso. O padrão consensual da ANSI/ASSE A1264.2 de 2012 é o único que cita o valor de coeficiente de atrito geralmente aceito como sendo de 0,50, e indicou métodos adequados para medir a resistência ao deslizamento em um passeio (KENNETH; JOHNSON; VIDAL, 2016, p. 313).

Durante os últimos anos, trabalhos consideráveis foram feitos para aumentar o conhecimento das variáveis que afetam a resistência ao deslizamento, como o fator humano, a biomecânica e a tribologia, sendo que esta última é a ciência e tecnologia do atrito,

lubrificação e desgaste, e tribometria é definida como a medição do atrito em uma superfície, que é feito com o tribômetro, equipamento que mede o atrito disponível.

O termo “resistência ao escorregamento” se refere à força relativa que resiste à tendência do calçado ou do pé de escorregar em um passeio e é função da superfície do passeio, do calçado e do que há entre eles. Diferentes tribômetros afirmam medir diferentes componentes físicos, como o coeficiente de atrito estático, o dinâmico, o transicional e o índice de deslizamento. A presença de materiais estranhos é o que diferencia “resistência ao escorregamento” e “coeficiente de atrito” (KENNETH; JOHNSON; VIDAL, 2016, p. 314).

O atrito necessário para um pedestre não derrapar (atrito solicitado), não deve exceder a capacidade de atrito entre a superfície do passeio e a sola do sapato do pedestre ou a sola do pé (atrito disponível).

O atrito disponível é tipicamente medido usando uma placa de força que registra as forças transmitidas à superfície a medida que uma pessoa caminha sobre a placa. Uma série de estudos tem mostrado que o coeficiente de atrito estático mínimo requerido para caminhadas lentas, médias e rápidas sobre uma superfície nivelada deve estar entre 0,20 e 0,40 (STRANDBERG, 1983; GRONQVIST et al., 1990; POWERS et al., 2002;).

O valor de 0,50 é comumente referido como o valor do coeficiente de atrito disponível, abaixo do qual é inseguro e acima do qual é seguro. Este valor utilizado possui um fator de segurança em relação aos valores citados acima (KENNETH; JOHNSON; VIDAL, 2016, p. 314).

Baseado em precedentes históricos, pesquisas e consenso, o valor de 0,50 para o coeficiente de atrito para passeios se mantém como o valor guia mais aceito nos Estados Unidos para a segurança dos pedestres (KENNETH; JOHNSON; VIDAL, 2016, p. 314).

Revestimentos de calçada com resistência ao escorregamento inferior à necessária são motivos de acidentes de quedas e escorregamentos de pedestres. Dados desses tipos de ocorrências serão apresentados no item a seguir.

### **2.1.1 Acidentes em calçadas**

Segundo dados do Conselho Nacional de Segurança, (NSC - *National Safety Council*), uma organização não governamental dos Estados Unidos, no relatório Fatores de Lesões 2015 (*Injury Facts 2015*), aponta que as mortes por quedas nos Estados Unidos ocorrem principalmente com os maiores de 75 anos, representando 71% das ocorrências. As quedas são a terceira maior causa de mortes por lesões involuntárias e foram a principal causa de

encaminhamentos ao departamento de emergência relacionados a lesões, totalizando 11,3 milhões de atendimentos emergenciais em 2011.

Este mesmo estudo mostra que quedas para níveis mais baixos, que seria a queda ocorrida em função da falta de apoio para os pés, como no caso de degraus, são a segunda causa de fatalidades ocorridas no trabalho, atrás apenas das colisões em rodovias, e a sexta causa entre eventos que envolvem dias de afastamento do trabalho. Quedas no mesmo nível são a segunda causa de eventos que causam dias de afastamento, porém, não estão entre as 10 principais causas de eventos que resultam em fatalidades.

Quanto a ferimentos involuntários domésticos relatados, as quedas foram a segunda principal causa de eventos fatais, atrás apenas dos casos de envenenamento, sendo novamente os maiores de 75 anos os mais vitimados.

Dos acidentes causados devido a distrações ao caminhar, o celular é o responsável em 74% dos casos, resultando em quedas em 80% dos casos.

Neste mesmo estudo foram apresentados os dados de acidentes involuntários em nível mundial, quanto à Classificação Internacional de Doenças (CID) em acidentes e causas externas, que incluem acidentes de transporte, envenenamento não intencional, quedas, queimaduras, entre outros, e foram responsáveis por 3,6 milhões de mortes em 2011, resultando na taxa de 52 mortes a cada 100.000 pessoas. O estudo mostrou também que no Brasil, em 2010, foram 70.000 óbitos devidos a esse tipo de ocorrência, sendo que destas, 10.426 foram devidas às quedas. As quedas causaram 647.000 mortes por todo o mundo em 2011, resultando em uma taxa de mortalidade de 9 a cada 100.000 habitantes.

Um meio de se evitar quedas é projetar, construir e manter os passeios de modo que os pedestres possam utilizá-los de forma segura e assim servir ao seu propósito. Segundo Kenneth, Johnson e Vidal (2016, p. 309), em sua experiência e estudos, as quedas ocorrem devido a uma série de fatores, dentre eles, os componentes construtivos do passeio, o calçado, as práticas de limpeza e manutenção, e as políticas e práticas de segurança.

Segundo Zamora et al. (2008), as quedas relacionadas com escorregamentos ainda representam um dos maiores problemas sociais, principalmente na velhice. Os autores trazem uma abordagem para esse problema, considerando a adaptação das pessoas às condições de atrito dependendo da sua percepção de segurança e assim analisam a influência do desenho dos elementos de pisos na percepção de pessoas idosas, usando a análise conjunta de parâmetros ambientais e do piso. Os entrevistados nesse estudo, dependendo do ambiente em que vivem, residência ou casa assistencial, elencaram, de acordo com a sua percepção de segurança, oito imagens de pisos, do melhor ao pior. Como resultado, quanto às

características de projeto, a textura foi o fator mais influente, enquanto a coloração foi o menos influente, sendo a presença de juntas visíveis um fator inesperado de transmissão de segurança.

É importante reforçar que o piso não tem que somente passar segurança quanto ao escorregamento, o mesmo deve ser antiderrapante, pois um piso escorregadio que passa visivelmente a sensação de segurança, pode ser um risco para as pessoas, ao não adaptarem seu padrão de caminhada a fim de evitar escorregamento e queda. Da mesma forma, um piso antiderrapante não pode passar a sensação de insegurança quanto ao escorregamento, pois pode resultar em desconforto ao caminhar, e inclusive levar pessoas idosas a recusar a caminhada, limitando e até acabando com a sua independência (ZAMORA et al., 2008, p. 996).

Para permitir a análise das condições de superfície de revestimentos de calçadas, quanto à resistência ao escorregamento, optou-se por utilizar o conceito de coeficiente de atrito, que é a referência utilizada para tais estudos quando aplicados à pavimentos viários, em que o conhecimento de tal característica é utilizado para a avaliação das condições de segurança e desempenho das vias e de sua interação com o material dos pneus.

O conceito de coeficiente de atrito envolve teorias que se estendem desde a física básica até teorias de cisalhamento. Para entendê-lo, faz-se necessária uma conceituação dessas teorias, desde a origem do conceito até trabalhos recentes, que serão apresentados nesse capítulo.

## 2.2 COEFICIENTE DE ATRITO

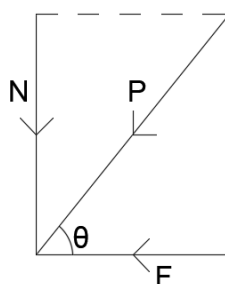
### 2.2.1 Conceituação sobre coeficiente de atrito

O conceito de coeficiente de atrito parte do estudo das forças atuantes nas superfícies considerando que força é o agente físico capaz de alterar o estado de repouso ou de movimento uniforme de um corpo material. A unidade de força corresponde a uma unidade de massa, movida ao longo de uma unidade de distância a uma unidade de aceleração. No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de força é Newton (N), que corresponde a um quilograma metro por segundo ao quadrado. Em problemas de estática, é mais relevante pensar em força com a influência que causa ou tende a causar deformação quando aplicada em um corpo. A deformação pode ser óbvia, como quando um elástico é estirado por um

puxar, ou pode ser imperceptível, como a compressão nas pernas de uma cadeira quando alguém senta nela.

Valendo-se do conceito de força como vetor, e considerando-a sobre eixos coordenados, a mesma pode ser decomposta em componentes com um certo ângulo  $\theta$  entre si, como ilustrado na Figura 2.1.

**Figura 2.1 – Decomposição de uma força em duas componentes perpendiculares**



Fonte: Elaborada pela autora.

A força  $P$  é decomposta em duas forças, a componente  $N$  agindo de forma normal à superfície e a componente  $F$  aplicada tangencialmente à superfície.

$$N = P \cdot \sin \theta \quad (2.1)$$

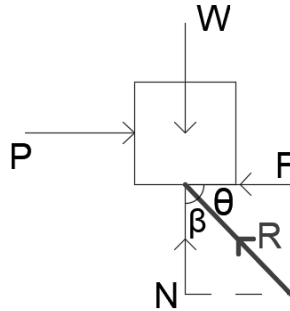
$$F = P \cdot \cos \theta \quad (2.2)$$

Segundo Halliday e Resnick (1983), sempre que a superfície de um corpo escorrega sobre a de outro, cada qual exerce uma força paralela às superfícies de contato. A força de atrito sobre cada corpo tem sentido oposto ao seu movimento em relação ao outro, se opondo automaticamente ao movimento. Entretanto, mesmo quando não há movimento relativo, podem existir forças de atrito entre as superfícies, chamadas forças de atrito estático, e a força máxima de atrito estático é igual à força mínima necessária para começar o movimento, já o atrito cinético é composto pelas forças que atuam entre superfícies em movimento relativo.

Considerando-se um bloco de peso  $W$  (unidade de força) em repouso sobre a superfície de uma mesa, a qual não é perfeitamente lisa, a força de reação  $N$  da mesa sobre o bloco age verticalmente, em sentido contrário e com mesma intensidade do peso  $W$ . Se o corpo é empurrado por uma pequena força horizontal  $P$ , menor que a requerida para movê-lo, uma força igual e em sentido oposto  $F$  vai agir no bloco na superfície de contato, se opondo à

tendência de movimento. Essa força é devida ao atrito entre o bloco e o topo da mesa. A reação  $R$  resultante no bloco pela mesa é obtida pela combinação dos vetores das forças  $N$  e  $F$ , conforme apresentado na Figura 2.2 (HEAD, 1992).

**Figura 2.2 – Atrito e ângulo de atrito**



Fonte: Elaborada pela autora.

A resultante  $R$  é inclinada a um ângulo  $\beta$  em relação a força normal  $N$  agindo na superfície de contato. Assim que a força  $P$  vai gradualmente aumentando, a força de atrito  $F$  aumenta até atingir o seu valor limite  $F_{\text{máx}}$ , quando o bloco começa a se mover. Desde que a força  $N$  se mantenha constante, o ângulo  $\beta$  aumenta gradualmente conforme a força  $F$  aumenta até atingir o seu valor máximo  $\delta$ , quando  $F$  atinge seu valor máximo  $F_{\text{máx}}$ . O coeficiente  $F_{\text{máx}}/N$  é conhecido como o coeficiente de atrito entre o bloco e a mesa, e é denominado  $\mu$ , conforme apresentado na Equação 2.3. O ângulo  $\delta$ , que é a máxima obliquidade da reação  $R$ , é conhecido como ângulo de atrito (HEAD, 1992).

$$\tan \delta = F_{\text{máx}}/N = \mu \quad (2.3)$$

A força máxima de atrito estático entre um par qualquer de superfícies secas, não lubrificadas, obedece a duas leis empíricas: (1) é aproximadamente independente da área de contato, dentro de amplos limites, e (2) é proporcional à força normal. Esta força normal é a que cada corpo exerce sobre outro, perpendicularmente à sua interface comum. O quociente do módulo da força de atrito estático máxima pelo módulo da força normal chama-se coeficiente de atrito estático para as duas superfícies. Representado por  $f_e$ , o módulo da força de atrito estático, é representado pela Equação 2.4 (HALLIDAY E RESNICK, 1983).

$$f_e \leq \mu_e \cdot N \quad (2.4)$$

Sendo:

$\mu_e$ : coeficiente de atrito estático;

$N$ : módulo da força normal.

O sinal de igualdade só é válido quando  $f_e$  assume seu valor máximo,  $F_{\text{máx}}$ .

A força de atrito cinético,  $f_c$ , entre superfícies secas e não lubrificadas obedecem às mesmas duas leis do atrito estático. A força de atrito cinético também é razoavelmente independente da velocidade com a qual cada superfície se move em relação à outra. O quociente do módulo da força de atrito cinético pelo módulo da força normal chama-se coeficiente de atrito cinético. Representado por  $\mu_c$ , para o módulo da força de atrito cinético, tem-se a Equação 2.5 (HALLIDAY E RESNICK, 1983).

$$f_c = \mu_c \cdot N \quad (2.5)$$

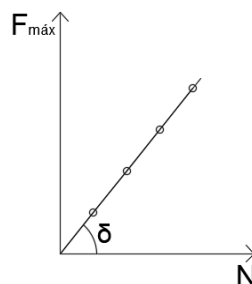
Sendo:

$\mu_c$ : coeficiente de atrito cinético;

$N$ : módulo da força normal.

Quanto ao atrito estático, se um número de medição de  $F_{\text{máx}}$  é feito para blocos de pesos variáveis, ou seja, com valores variáveis de  $N$ , um gráfico pode ser feito relacionando  $F_{\text{máx}}$  a  $N$  conforme apresentado na Figura 2.3 (HEAD, 1992).

**Figura 2.3 – Medição do ângulo de atrito**



Fonte: Elaborada pela autora.

Os pontos obtidos formam uma linha reta partindo da origem e com um ângulo  $\delta$  em relação ao eixo horizontal. Isso permite que o ângulo de atrito seja obtido experimentalmente (HEAD, 1992).

Segundo Gao et al. (2004), uma força de atrito é diferente de uma força convencional aplicada, a qual, na definição Newtoniana, age em um corpo do lado de fora e causa nele uma aceleração. A força de atrito não é uma força externa independente que age em um corpo, mas uma força interna que se opõe à força externa aplicada; ela pode ser pensada como uma força de reação devida à uma força de ação. Neste sentido, ela é similar à força de adesividade entre dois corpos, que aparece somente quando uma força tenta separá-los.

Ao longo dos anos, as observações empíricas permitiram algumas considerações: que a força de atrito dobra quando o peso dobra; que a força de atrito é independente da forma que o objeto é posicionado na superfície, ou seja, que a força de atrito independe da área de contato entre as superfícies em movimento e que a força de atrito é independente da velocidade, o que reforça a consideração que o coeficiente de atrito pode ser expressado por meio da Equação 2.6, sendo  $\mu$  o coeficiente de atrito,  $F$  a força de atrito e  $N$  a reação normal da superfície sob a ação do peso.

$$\mu = \frac{F}{N} = \text{constante} \quad (2.6)$$

Segundo Gao et al. (2004), mesmo estudos mostrando que a Equação 2.6 não é válida para uma gama de carregamentos e/ou velocidades de deslocamento, ela se mantém surpreendentemente positiva para descrever a maioria das superfícies de atrito envolvendo tanto superfícies secas como lubrificadas (desde que não sejam adesivas), bem como contatos macroscópicos e microscópicos. Porém a adesividade nunca é considerada, pois o modelo se aplica apenas para superfícies não aderentes.

Derjaguin (1934), em seus estudos sobre o atrito entre superfícies, desenvolveu uma teoria para superfícies aderentes que se resume na Equação 2.7, em que se considera a existência de uma constante  $N_0$  que depende das propriedades das superfícies e da verdadeira superfície de contato entre elas, sendo  $F$  a força de atrito,  $\mu$  o coeficiente de atrito e  $N$  a força normal (carga).

$$F = \mu \cdot (N + N_0) \quad (2.7)$$



Quando Head (1992) conceitua o coeficiente de atrito como a base para o entendimento à teoria utilizada no ensaio de cisalhamento direto, a fim de conhecer a resistência ao cisalhamento para uma dada massa de solo, ele inicia com o conceito de tensão, o qual explicita que, quando uma força externa é aplicada a um corpo, ela gera uma força interna que proporciona uma reação de mesma dimensão e em sentido oposto. Assume-se que a intensidade dessa força é distribuída uniformemente por toda a área de seção e a isso chama-se tensão, que é a força interna por unidade de área. As unidades são as mesmas utilizadas para pressão, porém pressão é um termo usualmente aplicado à fluidos. A unidade mais usual de tensão é quilonewton por metro quadrado ( $\text{kN/m}^2$ ), também conhecida como quilopascal (kPa).

Como essa teoria foi desenvolvida a partir de considerações realizadas em solos, é necessário fazer analogias ao utilizá-la para se compreender a interação entre superfícies de materiais diferentes, como no caso do presente estudo, entre os materiais de revestimentos de calçadas e o material da sola dos sapatos (látex) e, para tanto, considera-se o plano de interação existente entre duas superfícies diferentes como plano de ruptura.

Tensões de compressão e de tração que agem em uma direção normal ao plano de ruptura considerado são referenciadas como tensão normal e podem ser positivas ou negativas de acordo com a convenção de sinais utilizada. A tensão normal ( $\sigma$ ) é gerada em um corpo quando esse está sujeito a forças perpendiculares compressivas ou de tração e resiste respectivamente à tendência de encurtamento ou estiramento em seu comprimento. Se em um corpo é aplicada uma força de compressão ou tração  $N$ , e a área da seção transversal do corpo for conhecida por  $A$ , a tensão normal em qualquer seção horizontal é igual a  $N/A$ , conforme apresentado na Equação 2.8, e o sinal depende da convenção de sinais utilizada.

$$\sigma = N/A \quad (2.8)$$

A tensão de cisalhamento age paralelamente ao plano considerado e é gerada quando são aplicadas forças que tendem a causar sucessivas linhas de deslizamento entre as camadas, e assim o corpo resiste à tendência de uma mudança angular.

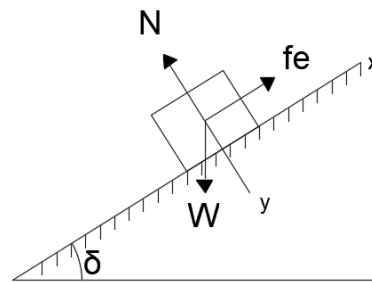
Se em um corpo com área da seção transversal  $A$ , for aplicada uma força horizontal  $F$ , a tensão de cisalhamento  $\tau$  é dada por  $F/A$ , conforme exposto na Equação 2.9, e o sinal depende da convenção de sinais utilizada.

$$\tau = F/A \quad (2.9)$$

Para um corpo em repouso sobre um plano inclinado, que forma um ângulo  $\theta$  com a horizontal, conforme mostrado na Figura 2.4, aumentando o ângulo de inclinação, verifica-se que, para um valor  $\delta$ , o bloco começa a escorregar. As forças que atuam no bloco, considerado como partícula, estão indicadas na Figura 2.4, em que  $W$  é o peso do bloco,  $N$  a força normal exercida sobre ele pelo plano, e  $f_e$  a força paralela à superfície exercida por esta sobre o bloco, então o equilíbrio é dado por meio da Equação 2.10 (HALLIDAY E RESNICK, 1983).

$$N + f_e + W = 0 \quad (2.10)$$

**Figura 2.4 - Equilíbrio de forças no plano inclinado**



Fonte: Elaborada pela autora.

Considerando-se a situação estática, ou seja, antes que o corpo comece a deslizar sobre a superfície, quando a inclinação da superfície é dada pelo ângulo  $\theta$ , tem-se que, ao se decompor as forças segundo os eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente paralelo e perpendicular ao plano, obtém-se as Equações 2.11 e 2.12.

$$N - W \cos\theta = 0 \quad (2.11)$$

$$f_e - W \sin\theta = 0 \quad (2.12)$$

Aumentando-se lentamente o ângulo de inclinação, até que o escorregamento apenas comece, tem-se que o ângulo  $\theta = \delta$ , podendo-se usar  $f_e = \mu_e N$ , e a substituição na Equação 2.3 origina a Equação 2.13.

$$\mu_e = \frac{W \operatorname{sen}\delta}{W \operatorname{cos}\delta} \quad (2.13)$$

Assim, conclui-se a Equação 2.14.

$$\mu_e = \operatorname{tan}\delta \quad (2.14)$$

Portanto, tem-se um método experimental simples para se determinar o coeficiente de atrito estático entre duas superfícies, basta medir o ângulo de inclinação para o qual o escorregamento apenas se inicia.

Para se determinar o coeficiente de atrito cinético por esse método, tem-se algumas formas. Uma delas considera que se uma dada distância  $D$  for percorrida pelo bloco em um determinado intervalo de tempo  $t$ , sua aceleração  $a$  é determinada pela Equação 2.15.

$$a = \frac{D}{t^2} \quad (2.15)$$

Aplicando-se a segunda lei de Newton, considerando-se que quando o corpo entra e movimento sobre uma superfície inclinada, a força resultante que impulsiona o movimento é a resultante da componente da força peso menos a força de atrito cinético e substituindo-se o valor da aceleração da Equação 2.15, obtém-se a Equação 2.16 para o cálculo do coeficiente de atrito cinético.

$$\mu_c = \frac{\left(g \cdot \operatorname{sen}\theta - \frac{D}{t^2}\right)}{g \cdot \operatorname{cos}\theta} \quad (2.16)$$

Em que  $g$  é o módulo da aceleração da gravidade, e para fins de aproximação será considerado  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Portanto, Silva (2012) propõe que, para a medição do coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o pavimento, o corpo de prova seja fixado em um ângulo superior àquele em que se iniciou o deslocamento do bloco e, demarcadas duas linhas a uma distância  $D$  conhecida. Em seguida o bloco é solto na primeira linha e é medido com o auxílio de um cronômetro o tempo até que ele atinja a segunda linha. Conhecendo-se o ângulo  $\theta$ , entre o

corpo de prova e a superfície, a distância  $D$  e o tempo  $t$ , que o bloco leva para percorrer essa distância, é possível calcular o coeficiente de atrito cinético por meio da Equação 2.16.

Quando considerado o coeficiente de atrito estático como sendo a tangente do ângulo de atrito, tem-se que seus valores são adimensionais e vão de 0 a 1. Medidas próximas de 0 representam superfícies com baixa resistência de atrito, que tendem a ser mais escorregadias, enquanto valores mais próximos de 1 representam superfícies com maior resistência de atrito, logo, conferem maior segurança contra escorregamentos.

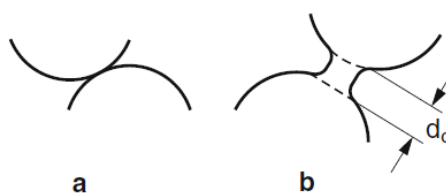
Dos fatores que influenciam no valor do coeficiente de atrito, Do e Cerezo (2015) trazem que entre pneu e pavimento são as características da superfície do pavimento, como textura, propriedades do agregado e do betume; as características do pneu, como tamanho, largura, profundidade do sulcos e a borracha; as condições de contato, como velocidade da roda, taxa de deslizamento, carregamento normal e pressão do pneu; e presença de contaminantes na interface, como água, neve, gelo e poeira.

### **2.2.2 Trabalhos com medições do coeficiente de atrito**

Ao longo dos anos, alguns trabalhos foram desenvolvidos na área de estudo da interação entre diferentes tipos de superfícies para diversos fins, desde analisar o atrito entre peças de máquinas para reconhecer os efeitos da lubrificação na maior durabilidade dessas peças, até os estudos da interação pneu-pavimentos para fins de segurança das viagens de veículos. É nesse contexto que a seguir são apresentados alguns estudos sobre fenômenos da interação entre superfícies em diversas áreas, a fim de dar embasamento para a interpretação de dados do presente trabalho.

Heise e Popov (2010), em seu trabalho que buscava compreender a contribuição da adesão entre as superfícies na medida do coeficiente de atrito, consideraram um modelo no qual a força de atrito era dada somente em função das interações adesivas. Para isso, considerou-se que a força de atrito é devida à assimetria do processo ocorrido durante a formação e destruição dos contatos adesivos, considerando-se que duas asperezas próximas primeiramente entram em contato quando os seus contornos geométricos se interceptam, e que se separam apenas após uma dada distância entre elas seja alcançada, conforme apresentado na Figura 2.5. Assim a força da adesão pode ser caracterizada pela distância crítica  $d_c$  à qual ocorre a separação das superfícies.

**Figura 2.5 – A força de atrito causada pela assimetria do contato adesivo**



Fonte: Heise e Popov (2010)

Os resultados desse estudo mostraram que, quando comparadas, as interações borracha-borracha e metal-metal, na ausência de força normal, tem-se que o coeficiente de atrito devido à adesividade, é de  $\mu \approx 0,5 \cdot 10^{-5} \sqrt{z}$  para o metal e de  $\mu \approx 1,1 \sqrt{z}$  a borracha, sendo  $\sqrt{z}$  o valor médio do quadrado da raiz das alturas das rugosidades da superfície de deslizamento, ou seja, a contribuição da adesão na superfície metal-metal para o coeficiente de atrito é muito pequena, enquanto entre elastômeros há contribuição notável.

Em medições de campo, realizadas no estudo de Areiza et al. (2015), do coeficiente de atrito de trilhos de trens utilizando tribômetro puxado à mão, foram utilizados lubrificantes de flange e água, aplicados manualmente no topo das superfícies de contato, onde duas pressões de contato diferentes, de 1,0 e 1,2 GPa, foram aplicadas. O coeficiente de atrito esteve entre 0,42 e 0,55 para os testes secos; entre 0,39 e 0,44 para testes com lubrificação por água; e entre 0,13 a 0,22 quando da adição de lubrificantes de flange. Percebeu-se que camadas mais espessas de lubrificantes e maiores pressões de contato levam a menores valores de coeficiente de atrito, e que, quando comparado à situação seca, o efeito da pressão de contato foi muito menos significativo quando um produto interfacial foi aplicado. Para a superfície seca, a redução do coeficiente de atrito com o aumento da pressão de contato pode ser explicado considerando que o atrito é dominado pelas interações adesivas na interface, em vez das deformações subsuperficiais, então o coeficiente de atrito é determinado principalmente pela relação entre a tensão de cisalhamento e a dureza do componente mais “macio” da interação; devido ao contato entre o trilho e o aço da roda ser bastante plástico, um aumento significativo do efeito localizado de endurecimento em função da tensão é esperado para maiores carregamentos, e assim ocorre uma redução do coeficiente de atrito. O atrito foi medido em um trecho de rugosidade média ( $R_a$ ) de  $3,0 \pm 0,6 \mu\text{m}$  (obtido após 30 medições).

Hinrichs et al. (2011) realizaram estudos sobre os detritos gerados em testes de coeficiente de atrito em pastilhas de freios. Nesses testes, após a polimerização, as pastilhas foram submetidas a procedimentos de desaceleração constantes com 1000 ciclos adicionais de

parada completa iniciando todos a 46 ou 96 km/h (testes de baixa e alta velocidade), a fim de estabelecer o coeficiente de atrito em regimes de baixa e alta velocidades. Os resultados mostraram que nos testes de baixa velocidade, realizados após 100 ciclos de polimerização, o coeficiente de atrito convergiu muito rápido para um valor final, já depois de 200 ciclos de polimerização ele levou mais tempo para atingir a saturação, porém a estabilização ocorreu com o mesmo valor de coeficiente. Nos testes de alta velocidade, o coeficiente de atrito mostrou um comportamento mais errático, independentemente do número de ciclos de polimerização e foi sistematicamente mais baixo nos testes de alta velocidade do que nos testes de baixa velocidade. A tendência de estabilização ocorreu com  $\mu \approx 0,40$  nos testes de baixa velocidade e  $\mu \approx 0,38$  nos de alta velocidade. As pastilhas foram testadas em um banco dinamômetro de escala real, reproduzindo as condições de frenagem de um veículo.

Apesar de não ser a realidade brasileira, em locais com ocorrência de neve, a superfície do pavimento influencia nos escorregamentos também devido às suas condições de drenagem superficial, visto que um pavimento com drenagem insuficiente permite a formação de camada de água que, ao se congelar, torna-se bastante escorregadia. Neste contexto foi que Yekkelar, Haselbach e Langfitt (2016) desenvolveram um método de avaliação qualitativa e quantitativa do coeficiente de atrito estático para diferentes tratamento superficiais de calçadas de concreto drenante, usando corpos de prova de 30 cm x 20 cm x 10 cm que foram moldados para cada tipo de tratamento; e o ensaio quantitativo foi realizado por meio de um dinamômetro de molas, em que foi aplicada uma força horizontal em uma base de madeira, com uma dada massa sobre ela, até que entrasse em movimento, no qual a força era medida, e o coeficiente de atrito calculado dividindo-se essa força pelo produto da massa com a aceleração da gravidade. O modelo qualitativo consistiu na observação do operador ao tentar deslizar o pé sobre a superfície. Como resultado para a superfície úmida e seca, para os cinco diferentes tratamentos superficiais, obtiveram valores de coeficiente de atrito semelhantes, pelo método quantitativo, entre 0,5 a 0,9. A confiabilidade obtida por meio do coeficiente de Kendall foi de 0,739, sendo o método considerado de alta consistência.

Quanto ao estudo da rugosidade da superfície de pavimentos e sua interação com pneus dos veículos, Kanafi e Tuononen (2017) constataram que se a profundidade de penetração do pneu nas asperezas da superfície do pavimento está no seu maior nível, na prática, a borracha não pode atingir as asperezas mais profundas, ou seja, a aspereza do pavimento é efetiva até a altura em que pode ser alcançada pela penetração do material em contato com ela e, no caso desse estudo, a borracha do pneu, o que excede a isso acaba não sendo ativo. Para correlacionar a rugosidade da superfície com o coeficiente de atrito da

mesma, quando em contato com o pneu, os autores consideraram a penetração pneu-pavimento em cada condição de contato e então analisaram apenas a porção de topo da topografia da superfície que realmente contribui no estudo do atrito.

Quando analisado o risco de ocorrência de acidentes em função da resistência ao deslizamento e da macrotextura, em todos os ambientes rodoviários estudados, há aumento no risco de acidentes com a redução do coeficiente de atrito e da profundidade da textura superficial. Para esses mesmos ambientes rodoviários os valores de coeficiente de atrito deveriam ser mantidos entre 0,4 e 0,6 bem como a profundidade da textura entre 0,4 mm e 0,6 mm como valores limites. Em geral, os cenários frutos de simulação apontaram que os valores de coeficiente de atrito para prevenir acidentes devem estar entre 0,5 e 0,6. (FERNANDES E NEVES, 2014)

A resistência ao deslizamento (além de outros fatores, como fatores operacionais, tributários e ambientais) depende em grande parte da textura do pavimento, especialmente em seus componentes de escala fina abaixo de 1 mm. Tem-se que um aumento da microtextura (comprimentos de onda abaixo de 0,5 mm) é o responsável pelos valores de pico de coeficiente de atrito em superfícies úmidas e que uma diminuição da macrotextura (comprimentos de onda entre 0,5 e 50 mm) é a responsável pela queda nos valores do coeficiente de atrito, visto que a macrotextura é a responsável pela obtenção de melhor qualidade de drenagem da superfície (UECKERMANN et al., 2015). Portanto, tem-se que o valor mais expressivo do coeficiente de atrito entre superfícies é dado pela microtextura da mesma, porém, é dependente também das condições da macrotextura.

Em seu estudo sobre a contribuição de medições da resistência ao deslizamento sem contato, Ueckermann et al. (2015) consideraram que o coeficiente de atrito é determinado pela textura do topo das asperezas onde ocorre o contato entre a borracha do pneu e o pavimento. O perfil superficial visa focar na textura dos elementos que a borracha “toca” no pavimento e, mostra que ocorre melhor concordância entre os valores calculados e os efetivamente medidos do coeficiente de atrito quando se considera apenas o topo da superfície, que nesse estudo foi de 33% da profundidade do perfil original.

Ueckermann et al. (2015), a fim de validar seu método de cálculo, utilizaram 2 métodos laboratoriais para a medida do coeficiente de atrito, o *W/S machine*, que corresponde a um teste de travamento de pneu em frenagem e o *ViaFriction* que mede a resistência ao escorregamento sob condições controladas de deslizamento horizontal e corresponde às condições de frenagem ABS (*Anti-lock Breaking System* – Sistema antibloqueio de freios). Devido à temperatura (como resultado da velocidade de deslizamento) e à influência da água,

o coeficiente de atrito gerado pela *W/S machine* (valores entre 0,17 e 0,64 para as diferentes amostras) é significativamente menor que o atrito que pode ser gerado pelo dispositivo *ViaFriction* (valores entre 0,65 a 0,71 para as diferentes amostras) e isso pode ser explicado pelo fato de os dois dispositivos não utilizarem a mesma borracha. Porém, quanto à comparação entre o modelo de cálculo obtido a partir da textura medida usando um sensor branco cromático e os valores medidos experimentalmente obtiveram forte indicação de que a resistência ao deslizamento pode ser medida sem contato.

Fernandes e Neves (2014), em seu trabalho sobre valores limites de propriedades da superfície do pavimento, para fins de manutenção, baseada em modelagem de acidentes, obtiveram resultados interessantes e que apontaram ser aceitável que, em seguimentos de via mais retos, a resistência ao deslizamento não é o fator de maior contribuição para ocorrência de acidentes, sendo que outras variáveis como geometria e tráfego obtiveram maior significância e que é comum a necessidade de manobras de frenagem de emergência em segmentos caracterizados por zonas urbanas, o que demanda cuidado especial com o respeito das propriedades de aderência do pavimento, visto que para manter a segurança na frenagem, valores maiores de coeficiente de atrito são necessário para a redução da distância de frenagem.

No contexto de análise de interações entre diferentes superfícies, o ensaio de cisalhamento é também utilizado, pois permite a análise do comportamento das superfícies quando da aplicação de uma força normal e o simultâneo aumento da tensão cisalhante que busca a movimentação relativa entre elas. No item que se segue é apresentada a teoria e alguns casos de aplicação do ensaio de cisalhamento direto.

### **2.2.3 O ensaio de cisalhamento direto**

Os ensaios de cisalhamento direto são comumente aplicados para o estudo das propriedades dos solos sob condições de carregamento normal e aplicação de tensão de cisalhamento. Entretanto, também podem ser utilizados para análise da interação entre diferentes superfícies.

Os ensaios de resistência ao cisalhamento, segundo Head (1992), podem ser divididos em dois tipos, o de cisalhamento direto e o *Vane test*. Ambos envolvem o deslizamento de uma porção de solo em outra, sendo que o primeiro corresponde ao movimento de duas metades de um bloco quadrado de solo ao longo de uma superfície horizontal, e o segundo consiste no movimento rotacional relativo entre um volume cilíndrico de solo e o material que



o envolve. Quando realizado em solos, o ensaio de resistência ao cisalhamento tem seu resultado dependente das condições estabelecidas no mesmo, como o carregamentos e velocidade de execução.

O ensaio de cisalhamento direto é de simples reprodução e entendimento e permite a medição da resistência ao cisalhamento em termos de tensão total. Ele mede o ângulo de atrito a partir do deslizamento de um material sobre o outro pela aplicação de uma força cisalhante enquanto uma força normal constante é aplicada ao plano onde ocorre o movimento relativo.

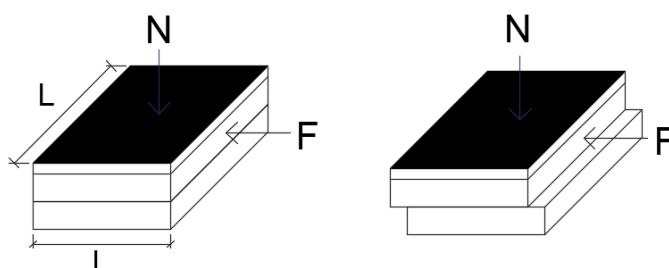
Quando se trata de ensaio em solo, a amostra é moldada com medidas padronizadas, e então é posicionada em uma forma, de duas metades, que em sua parte de cima pode se mover com a aplicação de uma certa força em velocidade constante, enquanto uma tensão normal é aplicada sobre a superfície por meio de um peso constante. Os equipamentos atualmente utilizados ainda se baseiam no princípio do controle de deslocamento e oferecem uma série de velocidades de deslocamento.

Durante o ensaio, o deslocamento relativo das duas partes pode ser medido, bem como a força aplicada ao longo do tempo e os possíveis movimentos verticais da superfície da amostra, que aponta mudança de volume ou rearranjo de partículas.

A possibilidade de deslocamento de uma superfície sobre a outra quando da aplicação de uma tensão normal, permite que o mesmo ensaio seja utilizado para a medição da força necessária para que ocorra o deslocamento entre superfícies de materiais diferentes, permitindo, assim, conhecer o ângulo de atrito entre essas superfícies e determinar o valor do coeficiente de atrito entre elas.

O princípio do ensaio da caixa de cisalhamento parte de um carregamento normal  $N$ , aplicado ao solo, que produz uma tensão normal  $\sigma_n$ , sendo  $\sigma_n = N/L^2$ , e  $L$  a dimensão do lado da caixa quadrada, conforme apresentado na Figura 2.6.

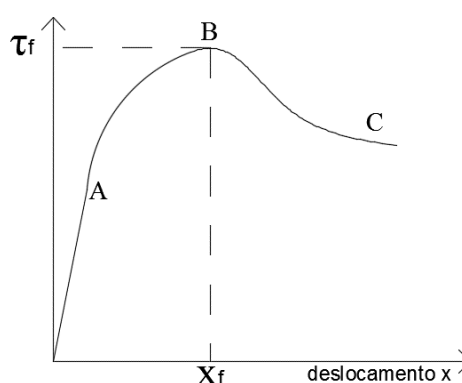
**Figura 2.6 – Esquema de forças no ensaio de cisalhamento**



Fonte: Elaborada pela autora.

Um deslocamento gradativo e constante, que causa aumento na força de cisalhamento  $F$ , é aplicado em uma metade da amostra em direção horizontal, enquanto a outra metade é mantida fixa. A tensão de cisalhamento induzida no plano de deslizamento pré-determinado  $\tau$  é igual a  $F/L^2$ . Ao contrário do bloco sobre a mesa, o deslocamento relativo do solo sobre a metade inferior fixa acontece gradualmente enquanto a força  $F$  aumenta, conforme mostrado no gráfico da Figura 2.7 (HEAD, 1992).

**Figura 2.7 – Relação entre tensão de cisalhamento e o deslocamento no ensaio de cisalhamento direto**

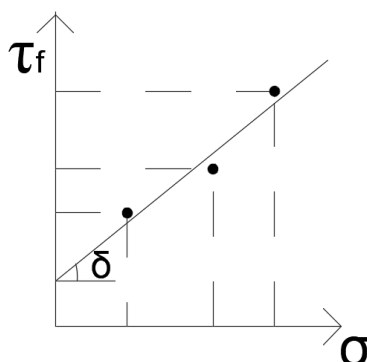


Fonte: Elaborada pela autora.

Conforme o gráfico apresentado na Figura 2.7, o ponto B é atingido quando a máxima tensão de cisalhamento  $\tau_f$  é oferecida pelo solo para sustentar a superfície de deslizamento. Essa tensão de cisalhamento é a resistência ao cisalhamento do solo sob a tensão normal  $\sigma$  e o ponto B é conhecido como o pico da curva de tensão de cisalhamento por deslocamento. Após o pico, a resistência ao cisalhamento cai, como indicado pelo trecho BC, e isso mostra que ocorreu a ruptura do solo em cisalhamento (HEAD, 1992).

Usualmente, no mínimo três ensaios são realizados em amostras do mesmo solo sob diferentes carregamentos normais (denominados  $N_1$ ,  $N_2$  e  $N_3$ ), atribuindo três valores diferentes para a tensão normal  $\sigma$ . Para cada curva tensão/deslocamento, o valor da tensão de cisalhamento máxima  $\tau_f$  pode ser encontrado e plotado contra o correspondente valor de  $\sigma$ , como ocorre no gráfico apresentado na Figura 2.8. Esse gráfico normalmente se aproxima de uma reta, cuja inclinação com o eixo horizontal é igual ao ângulo de resistência ao cisalhamento do solo,  $\delta$ , também conhecido como ângulo de atrito, e cuja intersecção com o eixo vertical (tensão de cisalhamento) representa a coesão aparente, representada por  $c_u$  (HEAD, 1992).

**Figura 2.8 – Tensão de cisalhamento máxima relacionada à tensão normal no ensaio de cisalhamento direto**

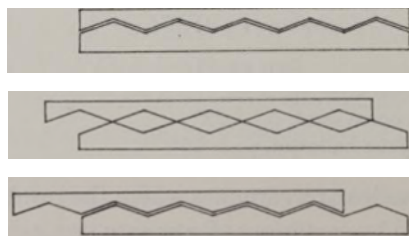


Fonte: Elaborada pela autora.

Quando essa teoria é aplicada ao deslizamento entre duas superfícies de materiais diferentes, o ensaio é realizado da mesma maneira, e os materiais se comportam de forma semelhante, de modo que, após de atingida a máxima tensão de cisalhamento, a resistência das superfícies ao cisalhamento cai, mostrando que o deslocamento entre os corpos de prova ocorreu. A determinação do ângulo de atrito também se procede de forma análoga, porém, o ponto de interseção com o eixo vertical não representa a coesão, pois não se trata de solos, mas mostra a resistência inicial gerada pela interação entre a rugosidade das duas superfícies, é como se elas se “encaixassem” em função da aplicação da tensão normal (dilatância). Quando um material elástico é analisado nessa interação, à interseção com o eixo vertical pode demonstrar a adesividade entre as superfícies, visto que essa resistência ocorre mesmo sem a aplicação de uma tensão normal.

Em seu estudo sobre a relação de tensão-dilatância para equilíbrio estático para uma montagem de partículas em contato, Rowe (1962) propôs que, para superfícies de montagens descontínuas, como areias, argilas e asfaltos, o movimento das partículas durante a deformação e a ruptura não é necessariamente na direção da tensão de cisalhamento aplicada. Ele considera como se as superfícies em contato fossem duas “serras encaixadas” em que, para ocorrer a primeira ruptura horizontal, é necessário que haja deslocamento vertical, de modo a ultrapassar o primeiro pico do encaixe e, após isso, as faces vão retornar ao contato original e é necessária que seja mantida uma força que permita o vencimento desses obstáculos a fim de continuar o deslocamento horizontal, conforme representado na Figura 2.9. A esse deslocamento vertical, sentido como variação de volume no cisalhamento, dá-se o nome de dilatância.

**Figura 2.9 – Demonstração da variação do volume no deslocamento entre superfícies de contato**



Fonte: Rowe (1962)

A relação geral entre a máxima resistência ao cisalhamento,  $\tau_f$ , e a tensão normal,  $\sigma$ , para solos, pode ser representada pela Equação 2.17.

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2.17)$$

Essa relação foi constatada inicialmente por Coulomb, em 1773, e é conhecida como lei de Coulomb. Em solos, para proposições práticas, essa relação linear mantém boa aproximação e representa um critério de ruptura aceitável. O gráfico que representa essa ‘lei’ é conhecido como envoltória de Coulomb (HEAD, 1992).

Por meio da equação de Coulomb é demonstrado que a resistência ao cisalhamento em solos, em simples termos, geralmente é composta por dois componentes, o atrito e a coesão. O atrito, denotado por  $\tan \delta$ , se dá em função da interligação das partículas e o atrito entre elas quando sujeitas à tensão normal. A coesão, denotada por  $c$ , se dá em função das forças internas que mantêm as partículas de solo unidas em uma massa sólida.

A componente do atrito aumenta conforme a tensão normal aumenta, porém, a componente da coesão se mantém constante. Se não há tensão normal o atrito desaparece quando entre as superfícies não existem forças adesivas.

Para observação do atrito ao deslizamento em materiais geológicos em laboratório, Cole (2014) utilizou carregamentos normais e aplicou uma força de cisalhamento gradativa a um carregamento constante de 1 N/s e, como resultado, obteve que, para materiais naturais de superfícies relativamente ásperas, o coeficiente de atrito  $\mu$  variou entre 0,1 a 0,9 em níveis de forças normais ( $F_N$ ) inferiores a 10 N, mas tendeu a convergir para um intervalo mais estreito (entre 0,24 e 0,62) em forças normais de maiores intensidades. Já os grãos com baixa rugosidade superficial, como grãos de vidro, material sintético e areia, apresentaram tendência

de diminuição do valor do coeficiente de atrito com o aumento do valor da força normal, com valores entre 0,1 e 0,2 para carregamentos entre 10 N e 20 N. Esse comportamento é parcialmente explicado em termos da relação entre o carregamento normal e a verdadeira área de contato.

Em estudo a fim de investigar a interação entre o concreto asfáltico e a areia, em impermeabilização de barragens de aterro, Tajdini, Mahinroosta e Taherkhani (2014) utilizaram o equipamento de teste de cisalhamento direto em pequena escala, no qual também é aplicada uma tensão normal na amostra, e então aplicada uma taxa constante de deslocamento até que ocorra a ruptura. Os diferentes materiais foram moldados de forma a preencher as metades da caixa de cisalhamento. Como resultado, obteve-se que os parâmetros de resistência ao cisalhamento aumentam com o aumento da densidade e do nível de tensão normal, e também que os parâmetros de resistência ao cisalhamento diminuíram com o aumento do teor de umidade na interface, o que representa que situação de umidade, como chuva, são mais favoráveis aos deslocamentos.

A fim de conhecer melhor as condições de ligação das interfaces entre camadas de concreto asfáltico que influenciam diretamente no desempenho do pavimento, Ai et al. (2017) utilizaram um procedimento para estimar a resistência ao cisalhamento entre as camadas de asfalto por meio de um teste de cisalhamento direto, em que as tensões normais e as tensões de cisalhamento são aplicadas na interface. Os autores consideram que se o teste de cisalhamento é realizado sem tensão vertical, o que imitaria o confinamento induzido como resultado da pressão de contato entre o pneu e a superfície do pavimento, o teste não pode avaliar com precisão a resistência ao cisalhamento dentro do pavimento. Para tanto eles desenvolveram um dispositivo suplementar anexo a uma prensa de teste Marshall. O dispositivo de cisalhamento direto utilizado nesse estudo impõe uma carga normal horizontal e uma carga de cisalhamento vertical na interface de uma amostra cilíndrica de duas camadas.

Potyondy (1961), em seu trabalho sobre atrito superficial entre solos variados e materiais de construção, utilizou o ensaio de cisalhamento direto com a finalidade de medir o ângulo de atrito e a adesão entre esses diferentes materiais, sendo que, para as superfícies estudadas, foram utilizadas duas condições de superfície, lisa e áspera, descritas de forma a poderem ser reproduzidas com precisão razoável por qualquer pessoa e também trabalhou com variações da carga normal entre as superfícies de contato.

O ângulo de atrito mostrou ser maior para os solos quando em contato com superfícies rugosas, bem como mostrou ser maior para o contato da superfície de um dado tipo de solo com a superfície de concreto, seguida pela de madeira e posteriormente pela de metal. O

incremento na tensão normal causou variações não superiores a  $5^\circ$  no ângulo de atrito para as superfícies em contato com a areia e o silte. Constatou-se também que o incremento no carregamento normal não necessariamente acarreta o aumento do ângulo de atrito da interface, pois foram registradas reduções. O ângulo de atrito efetivo da interface entre concreto liso e areia seca foi de  $39^\circ 30'$  para carregamento normal de 50 kPa e de  $38^\circ 30'$  para carregamento normal de 150 kPa (POTYONDY, 1961). Considerando o coeficiente de atrito igual à tangente do ângulo de atrito, o mesmo corresponderia à aproximadamente 0,82 para o carregamento de 50 kPa e 0,79 para o carregamento de 150 kPa.

Vários estudos, como os citados anteriormente, analisam a interação entre superfícies, sendo comumente aplicados para superfícies de solos e pavimento, porém o presente trabalho busca utilizar essas referências para o estudo de revestimento de calçadas e sua interação com o látex (material comum de solado de sapato), e, portanto, no próximo item tem-se algumas informações sobre calçadas e seus revestimentos.

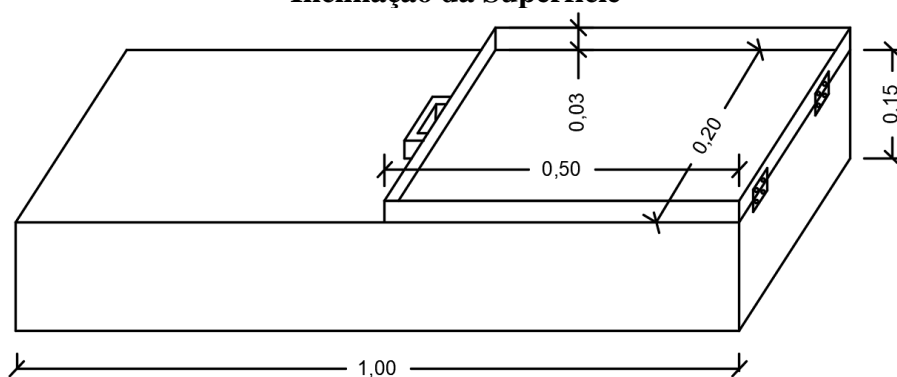
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando atingir os objetivos do presente trabalho foram estudadas e implementadas duas propostas metodológicas diferentes, o Método de Inclinação da Superfície e o Método do Cisalhamento Direto, apresentados a seguir.

#### 3.1 MÉTODO DE INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE (MIS)

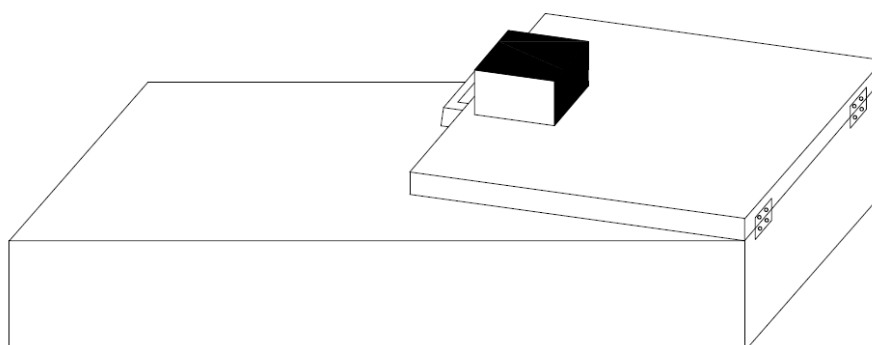
A proposta metodológica aprimorada neste trabalho foi baseada no trabalho de Silva et al. (2012), a qual, aqui, deu-se o nome de Método de Inclinação da Superfície (MIS), que foi escolhida por suas características de baixo custo e fácil reprodução e consiste em um dispositivo, composto por uma base projetada e executada com chapa de Madeirit plastificado 14 mm, em projeto conforme apresentado nas Figuras 3.1 e 3.2, além de um pórtico de sustentação.

**Figura 3.1 – Representação do projeto do equipamento desenvolvido para o Método de Inclinação da Superfície**



**Obs.: Valores em metros.**

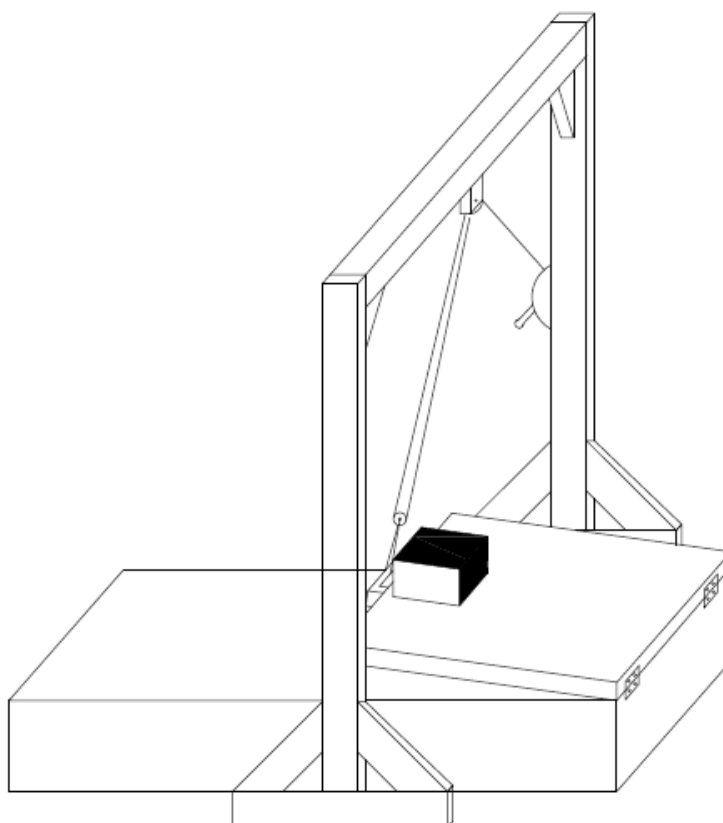
**Figura 3.2 – Representação do Método com o corpo de prova sobre a superfície inclinada**



O objetivo desse método é possibilitar a avaliação do coeficiente de atrito de materiais de pavimentos de calçadas de forma simples e direta, com custo relativamente baixo de produção e com resultados condizentes, a fim de difundir a possibilidade de realização de avaliação de pavimentos previamente à sua instalação e, assim, conferir maior segurança aos pedestres quanto aos acidentes devidos aos escorregamentos e às quedas.

O equipamento de ensaio é composto por duas partes, divididas em base e pórtico. A primeira consiste em uma base de apoio e uma tampa fixa à base por meio de dobradiças, as quais conferem à ela uma condição de engaste em uma das extremidades e tem seu funcionamento considerando a possibilidade de preenchimento/assentamento da tampa com o pavimento que se deseja ensaiar. Uma mesma base permite a realização de dois ensaios diferentes, o de coeficiente de atrito estático e dinâmico, bem como a repetição dos mesmos para diversos tipos de pavimento apenas trocando a tampa e seu material de preenchimento. O pórtico foi executado em madeira, com altura livre de 1,30 m e distância entre os pilares de 0,80 m. O projeto do posicionamento do conjunto para a realização do ensaio está apresentado na Figura 3.3.

**Figura 3.3 – Representação do conjunto de ensaio**



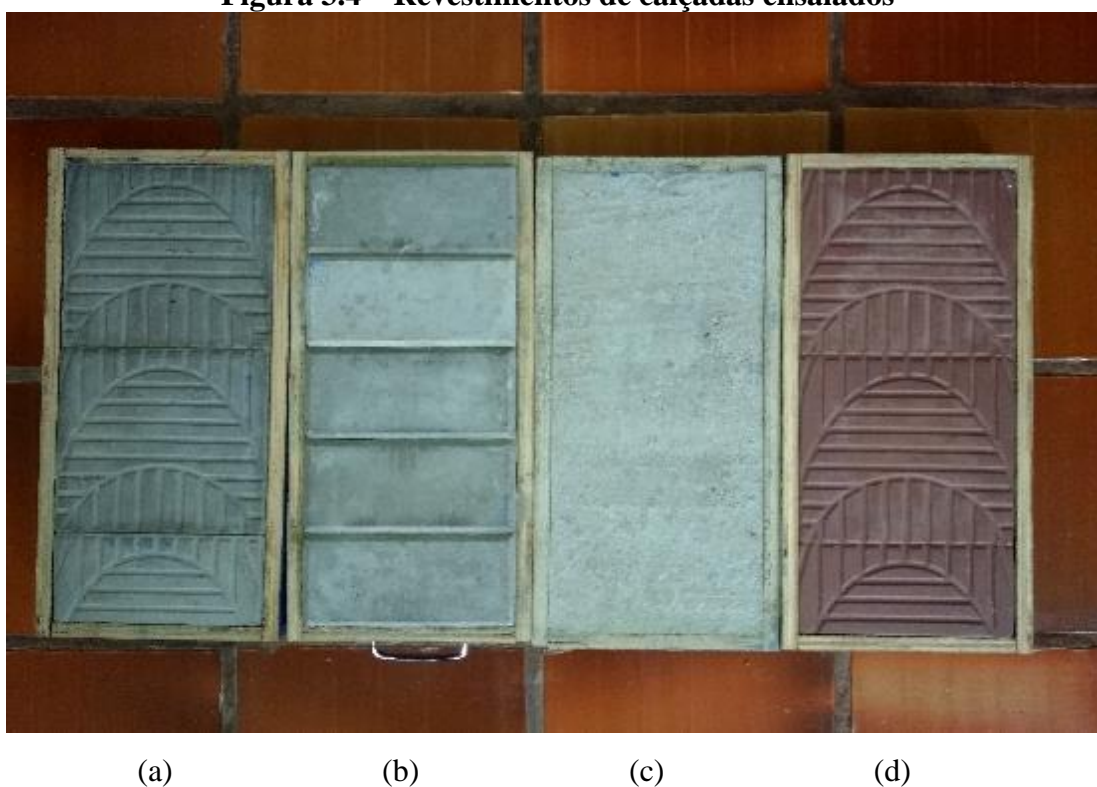


Conforme a teoria desenvolvida com base em Halliday e Resnick (1993), a qual diz que, a partir do equilíbrio de forças em um plano inclinado, tem-se que o ângulo de inclinação da superfície, no momento em que se inicia o movimento do corpo, corresponde ao ângulo de atrito e, assim, considera-se que o coeficiente de atrito corresponde ao valor da tangente desse ângulo; portanto, define-se o valor do coeficiente de atrito para cada situação de interação.

O ensaio foi realizado com o posicionamento do corpo de prova (CP) na extremidade oposta ao engaste; a tampa começou a ser levantada, com o auxílio de uma manivela comumente utilizada em varais domésticos, de modo que a corda passava por duas roldanas, que dividiam o peso, e no instante em que o corpo de prova entrava em movimento, o içamento era cessado e se media o ângulo de inclinação entre a tampa e a base, com o auxílio do aplicativo inclinômetro do celular previamente calibrado. Esse ensaio foi gravado para que, por meio da análise das imagens, fosse possível determinar com maior precisão o instante exato em que ocorria o início do movimento.

Para o presente trabalho foram ensaiadas quatro superfícies comumente utilizadas para revestimento de calçadas no Município de Maringá, as quais são apresentadas na Figura 3.4, sendo o ladrilho hidráulico (a), o paver de concreto (b), o concreto (c) e o ladrilho hidráulico com a aplicação de uma camada de tinta do tipo acrílica para pisos exteriores e interiores “Dacar” (d).

**Figura 3.4 – Revestimentos de calçadas ensaiados**



Apesar do potencial para a realização por meio deste método de medições do coeficiente de atrito estático e do dinâmico, optou-se apenas pela realização dos ensaios do coeficiente de atrito estático, devido ao tempo limitado para o desenvolvimento da pesquisa.

No primeiro momento foi ensaiado o concreto, que foi executado conforme traço base aplicado para pavimentos de calçadas no SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, que é indicado pelo Decreto 7938/2013 como referência de obras e serviços de engenharia, contratados e executados com recursos de orçamentos da União para referência de custo, e que também é amplamente utilizado em municípios de todo o país como referência de custo e composição.

O traço base do concreto definido pela tabela SINAPI como com resistência característica aos 28 dias ( $f_{ck}$ ) de 20 MPa, foi 1:2,7:3:0,63, em massa, com cimento CP II-F-32, areia média úmida e brita 1. Foram realizados ensaios de massa específica dos agregados, seguindo os métodos apresentado nas normas DNER-ME 081/98 e DNER-ME 084/95 e com os resultados de densidade do agregado graúdo de 2,74 e densidade real do agregado miúdo de 2,665.

Na primeira tentativa de definição do método, o caixote foi projetado com dimensões de 1,00 m de largura, 1,00 m de comprimento e 0,10 m de profundidade, onde foi concretada uma camada de 3 cm de altura orientada por taliscas e corrigida superficialmente com o auxílio de uma régua. A base do caixote tinha 0,30 m de altura, conforme mostrado na Figura 3.5.

**Figura 3.5 – Imagens da produção do primeiro caixote**



Após o período de 7 dias de cura, pode-se perceber que o caixote ficou muito pesado e, mesmo com a utilização da roldana para o içamento da tampa, o ensaio seria muito difícil de ser realizado e com condições de controle ineficientes, por esse motivo, definiu-se readequar o projeto.

Após um primeiro insucesso, a definição do segundo projeto permitiu a realização dos ensaios, porém, o comprimento de 1,00 m dificultou o alinhamento no momento do içamento. Entretanto, apesar da dificuldade, o ensaio da primeira superfície de concreto pôde ser realizado. Diante das dificuldades de içamento e partindo-se do princípio que a maior dimensão para o comprimento se faria necessária apenas para o ensaio de atrito dinâmico (no qual a aceleração seria medida a partir tempo necessário para que o corpo percorresse uma dada distância), optou-se pela redução das dimensões da tampa para o corpo de prova, que passou a ter 0,20 m de largura, 0,50 m de comprimento e 0,03 m de espessura.

As dimensões da base se mantiveram com 0,20 m de largura, 1,00 m de comprimento e 0,15 m de altura, visto a possibilidade da sua utilização (com as devidas adaptações) para futuros estudos do atrito dinâmico.

Com o novo dimensionamento, percebeu-se que a tampa com altura de 0,03 m facilitou a regularização da superfície, quando de concreto, por meio de régua, além de servir como referência para o assentamento dos demais tipos de revestimentos a serem ensaiados.

A tampa com concreto foi executada e posteriormente nivelada com régua, a fim de se ter uma superfície apenas com a rugosidade típica dos grãos de sua confecção e de fáceis condições de reprodução para novos ensaios, e foi curada por 7 dias antes do ensaio. A tampa preenchida por pavers teve suas paredes como referência de assentamento sobre uma camada de pó de pedra, e as preenchidas por ladrilhos hidráulicos também tiveram suas paredes como referência para o assentamento sobre uma camada de argamassa. Os assentamentos dos pavers e dos ladrilhos foram realizados conforme orientação dos fabricantes das peças, reproduzindo condições reais de execução.

Como peça a fim de ser deslocada sobre a superfície do revestimento, foram produzidos corpos de prova de blocos de madeira, originados do corte de peças de vigas, porém a superfície de contato com o material do pavimento foi revestida com dois diferentes materiais, além da superfície natural da peça. Portanto, um corpo de prova foi mantido em madeira, o outro revestido com uma placa de alumínio e o outro com uma camada de látex de 2 mm comumente utilizado para consertos em solas de sapatos, conforme representado na Figura 3.6.

As dimensões da superfície de contato foram de 0,16 m por 0,09 m e os parafusos neles presentes foram utilizados para fins de apoio das cargas adicionais anexadas durante o ensaio, que foram anilhas de ferro, com 1 kg cada uma.

**Figura 3.6 – Corpos de prova para o ensaio do Método de Inclinação da Superfície**



Para o içamento da tampa foi utilizado um pórtico com um sistema de corda, roldanas e manivela, conforme representado na Figura 3.7.

**Figura 3.7 – Esquema de montagem do ensaio do Método de Inclinação da superfície**



Para realização do ensaio, procedeu-se anteriormente da seguinte forma:

- Foi produzido o caixote, conforme projeto, em Madeirit 14 mm que permite resistência à umidade presente nos processos de concretagem, assentamento e umedecimento, sem causar danos como o empenamento;
- As tampas do caixote foram preenchidas pelos materiais a serem ensaiados;
- A estrutura de execução do ensaio foi preparada com a fixação de uma roldana móvel no caixote, que permitiu a sua ligação à roldana fixa na parte superior do pórtico, por meio de corda de varal fixa à uma manivela comumente utilizada para içar varais de roupas, que permitiu o levantamento controlado da tampa do caixote, com ritmo de aproximadamente uma rotação a cada 4 segundos, bem como a parada quando o bloco inicia o movimento;
- Para a medição do ângulo de inclinação no momento exato do início do movimento do corpo de prova foi acoplado à tampa da base do equipamento um aparelho celular Motorola G5, com o aplicativo de inclinômetro, que foi devidamente aferido conforme procedimento apresentado em seguida.

Para a aferição do aplicativo de inclinômetro, nomeado “clinometer + bubble level”, disponível para download gratuito nas plataformas Android, desenvolvido por “plaincode”, foi utilizado o equipamento profissional para medições de inclinação da marca *BOSCH*, modelo *GLM 80 Professional*, de precisão de  $\pm 0,2^\circ$ , conforme apresentado na Figura 3.8 e os resultados da aferição, em graus, seguem apresentados na Tabela 3.1.

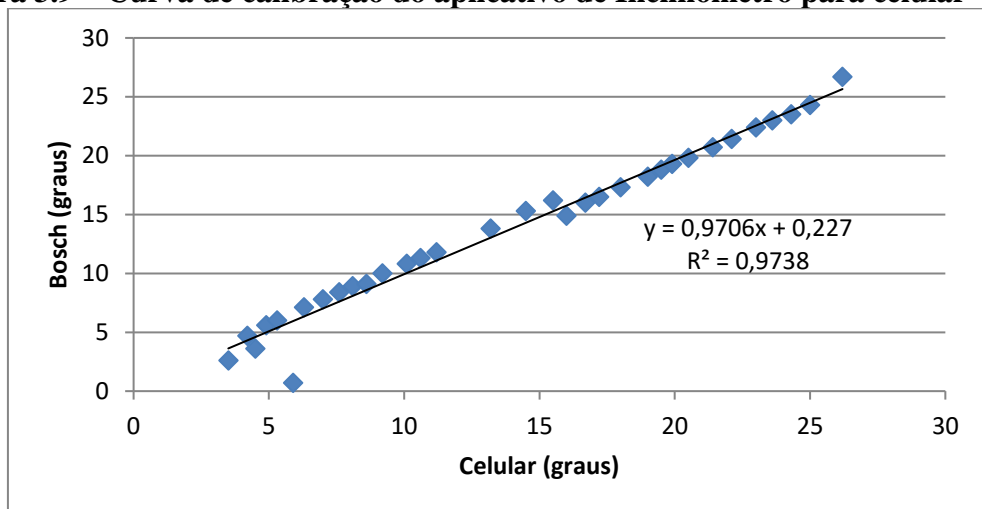
**Figura 3.8 – Aferição do aplicativo de celular para medição da inclinação**



**Tabela 3.1 – Aferição do aplicativo de celular para medição da inclinação**

AFERIÇÃO DA MEDIÇÃO ANGULAR DO APLICATIVO DO CELULAR PARA MEDIÇÃO DA INCLINAÇÃO (°)														
Equipamento profissional	4,2	26,2	3,5	4,5	4,9	5,3	5,9	6,3	7,0	7,6	8,1	8,6	9,2	10,1
Aplicativo do celular	4,7	26,7	2,6	3,6	5,6	6,0	6,7	7,1	7,8	8,4	8,9	9,1	10,0	10,8
Desvio Padrão	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,3
Equipamento profissional	10,6	11,2	13,2	14,5	15,5	16,0	16,7	17,2	18,0	19,0	19,5	19,9	20,5	21,4
Aplicativo do celular	11,3	11,8	13,8	15,3	16,2	14,9	16,0	16,5	17,3	18,2	18,8	19,3	19,8	20,7
Desvio Padrão	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3
Equipamento profissional	22,1	23,0	23,6	24,3	25,0									
Aplicativo do celular	21,4	22,4	23,0	23,5	24,3									
Desvio Padrão	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4									
<b>Desvio Padrão Médio</b>	<b>0,4</b>													

A Tabela 3.1 permitiu a produção da curva de calibração com a respectiva equação, conforme mostrado no gráfico da Figura 3.9.

**Figura 3.9 – Curva de calibração do aplicativo de Inclinômetro para celular**

Como o principal objetivo deste ensaio é ser de fácil e acessível reprodução, e considerando que o valor do equipamento profissional é de aproximadamente 1000 reais, e que possui a mesma precisão de decimal, considera-se que o desvio padrão de 0,4 é aceitável, sendo assim, optou-se por efetuar as medições do ensaio com o aplicativo para celulares, considerando que apesar de ter um valor também alto, o celular é um equipamento de mais fácil acesso, e normalmente é possuído pela maioria das pessoas para outros fins, mas que nesse contexto poderia servir como componente do equipamento de ensaio, portanto não seria incluído como despesa para a reprodução do experimento.

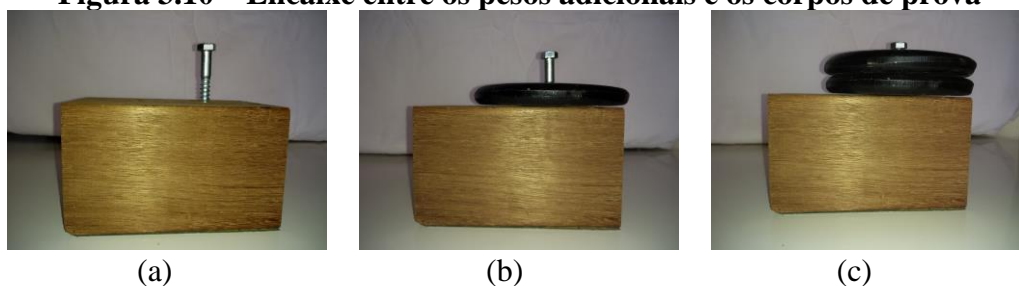
O procedimento para elaboração do ensaio para cada condição experimental foi conforme segue:

- Após o correto posicionamento do equipamento, posicionou-se o corpo de prova na extremidade oposta ao engaste, com a superfície de contato contra o pavimento;
- Fixou-se o aparelho celular com o aplicativo de inclinômetro no local devidamente demarcado para tal fim;
- Foi posicionada a câmera a fim de fazer o registro do ensaio, de forma que, por meio da imagem, fosse possível reconhecer o momento exato em que o corpo entra em movimento, bem como a leitura do inclinômetro nesse momento;
- Iniciou-se o acionamento da alavanca manualmente, a uma taxa aproximada de 1 rotação a cada 4 s;
- Quando o corpo de prova entra em movimento é parada a rotação da manivela e conclui-se a medição por meio da análise posterior das imagens;
- O ensaio foi realizado primeiramente com o corpo de prova sem sobrecarga e repetido por 3 vezes, após isso foi adicionada uma sobrecarga (anilha) de 1 kg sobre o corpo de prova e o ensaio foi repetido novamente por 3 vezes, e por último o ensaio foi repetido mais 3 vezes para a sobrecarga de 2 kg.

Vale ressaltar que a utilização de outro aparelho celular para a marcação do momento exato do início do deslocamento do corpo de prova foi a fim de aumentar a precisão do ensaio, visto que como o controle de içamento é humano, pode haver um atraso na paralização do ensaio.

Para fins de avaliação do método, foram utilizados os blocos de corpo de prova com superfícies de contato de madeira, metal e látex sobre o revestimento de concreto seco e, para prosseguimento das análises de pavimento, foi apenas ensaiado o corpo de prova de látex em contato com os diferentes tipos de revestimento de calçadas, visto que o látex reproduz o solado comum de sapato, que é o real objetivo do estudo.

O primeiro corpo de prova ensaiado foi o de superfície de contato com chapa de metal e com o pavimento de concreto em condição seca, sendo repetido para todas as condições de sobrecarga, sendo sem sobrecarga (a), com sobrecarga de 1 kg (b) e com sobrecarga de 2 kg (c), conforme representação na Figura 3.10.

**Figura 3.10 – Encaixe entre os pesos adicionais e os corpos de prova**

Este mesmo procedimento foi repetido para o CP com superfície de contato em madeira e o pavimento de concreto seco e, por fim, com a superfície de contato em látex e o pavimento de concreto seco.

O resultado que importa para o presente estudo é o valor do coeficiente de atrito entre a superfície em látex e o pavimento em concreto em suas várias condições e com as três variações de peso do corpo de prova, porém, em primeiro momento, realizou-se as comparações com as superfícies de madeira e alumínio a fim de corroborar o procedimento metodológico.

A continuidade do ensaio se deu utilizando-se apenas o bloco com superfície de látex, que foi ensaiado nas 3 diferentes configurações de peso (sem sobrecarga, 1 kg e 2 kg) para 4 tipos de pavimento diferentes, que foram: concreto, paver de concreto, ladrilho hidráulico e ladrilho hidráulico com tinta. Porém, foram modificadas a condição da superfície do pavimento, sendo realizados os ensaios com o revestimento de calçada seco, úmido (simulando uma situação de chuva) e com o espalhamento manual de areia (simulando os detritos acumulados nas calçadas). O umedecimento do revestimento foi feito com o auxílio da manutenção de uma toalha de pano úmida (encharcada) sobre a superfície pelo período de 4 horas, conforme mostrado na Figura 3.11.



**Figura 3.11 – Umedecimento dos revestimentos**



A areia usada para simular os detritos foi lançada e espalhada manualmente, a fim de se obter uma superfície com distribuição visualmente uniforme, em quantidade total de 100 g, conforme exposto na Figura 3.12.

**Figura 3.12 – Espalhamento manual da areia**

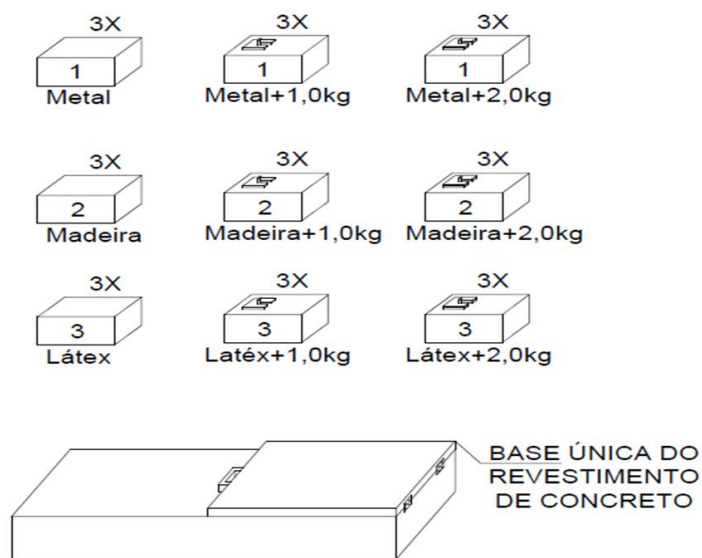


O ensaio foi realizado 3 vezes para cada condição de superfície (seco, úmido e com areia) para cada um dos 4 tipos de revestimento e para cada condição de sobrecarga (sem sobrecarga, com sobrecarga de 1 kg e com sobrecarga de 2 kg), totalizando 27 repetições para cada um dos 4 tipos de revestimentos de calçada.

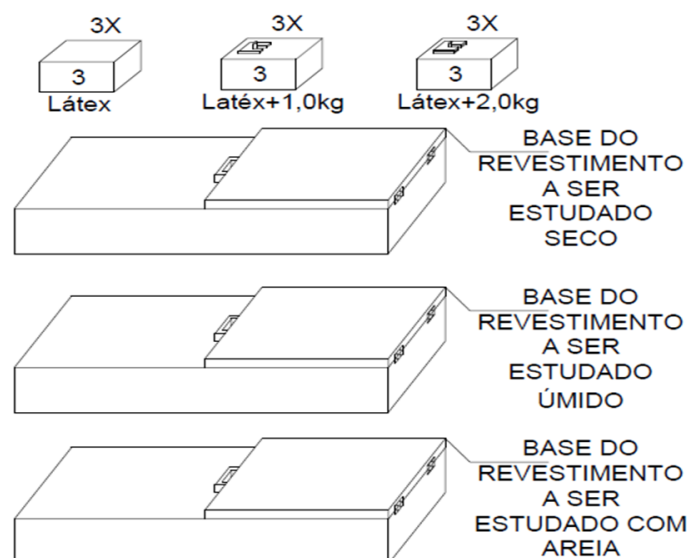
Durante os ensaios úmidos, quando era observada a perda de água pela superfície, a mesma era repostada por meio do posicionamento da toalha encharcada sobre a superfície por 2 minutos e na realização dos ensaios com areia a mesma era coletada e espalhada manualmente sobre a superfície a cada repetição.

Nas Figuras 3.13 e 3.14 é possível observar a sequência de realização dos ensaios de forma simplificada e esquemática.

**Figura 3.13 – Processo de validação dos resultados do método**



**Figura 3.14 – Processo de aplicação do método**



### 3.1.1 Custos para reprodução do método

O custo total para reprodução do método está apresentado na Tabela 3.2, onde são considerados os custos com a montagem do equipamento, não incluindo apenas o valor dos corpos de prova dos materiais a ser ensaiados, visto que são variáveis para cada situação. Esse custo foi de aproximadamente R\$ 430,00, valor relativamente baixo, visto que se gasta uma vez com sua confecção, porém o mesmo equipamento pode reproduzir vários ensaios. No presente trabalho, o equipamento foi utilizado para a análise de 4 materiais para revestimento de calçadas sob 3 condições diferentes de superfície.

**Tabela 3.2 – Custo para reprodução do Método MIS**

MATERIAIS	UNIDADE	QUANTIDADE	PREÇO (R\$)	
			UNITÁRIO	TOTAL
Viga de madeira aparelhada, de (6 x 12) cm, macaranduba, angelim ou equivalente da região	m	12,00	8,80	105,60
Chapa de madeira compensada plastificada para forma de concreto, de (2,20 x 1,10) m, e = 18 mm	m <sup>2</sup>	2,42	27,04	65,44
Sistema de fixação (parafusos, cordas)	un.	1	20,00	20,00
Capa de celular	un.	1	15,00	15,00
Roldanas para deslizamento de portão	un.	2	10,00	20,00
Fita 3M profissional dupla face VHP 4910 12 mm x 5 m	un.	1	34,00	34,00
Manivela para varal de teto, com corda, suporta até 15 kg	un.	1	105,00	105,00
Mão de obra para montagem – marceneiro	h	4,00	16,05	64,20
			<b>TOTAL (R\$)</b>	<b>429,24</b>

Em uma tentativa de validar o Método da Inclinação da Superfície a partir de algum método já reconhecido, e devido ao fato de haver uma prensa de cisalhamento direto na Universidade Estadual de Maringá, optou-se pelo ensaio de parte dos materiais ensaiados pelo MIS também pelo Método de Cisalhamento Direto, conforme segue no item abaixo.

### 3.2 MÉTODO DE CISALHAMENTO DIRETO

Para a realização do presente ensaio, utilizou-se a prensa de cisalhamento digital, da marca *Wykeham Farrance*, modelo *Autosherr*, apresentada na Figura 3.15.

**Figura 3.15 – Prensa de Cisalhamento Direto – Autosherr**



Como referência para o procedimento de execução do ensaio, considerou-se as orientações da ASTM D3080/ D3080M – 11, que padroniza o Teste de Cisalhamento Direto de Solos sob Condições Consolidado Drenado, porém com as devidas adaptações necessárias para o ensaio de cisalhamento direto para medição do coeficiente de atrito da interação entre látex (utilizado para reparo de solas de sapatos) e os revestimentos de calçadas selecionados, no caso o ladrilho hidráulico e o concreto. Considerou-se também os procedimentos recomendados no manual de instruções da prensa.

Para chegar à fase de ensaio, primeiro foram moldados os corpos de prova, que, por não se tratarem de solos, não utilizaram o molde padrão da prensa para ser modelados. Eles foram fruto de operações de corte da placa de piso, no caso do ladrilho hidráulico, com dimensões que permitiam o encaixe na caixa de cisalhamento. No caso do piso de concreto, foi desenvolvida uma forma que deixou os corpos de prova com dimensões próximas às necessárias para encaixar na caixa de ensaio, apenas foram necessárias operações de lixamento para as peças que não couberam no primeiro momento; a produção está representada na Figura 3.16. Na Figura 3.16a é representado o procedimento de corte das peças de ladrilho hidráulico para adequação ao molde, enquanto na Figura 3.16b, tem-se o molde para peças de concreto sendo preenchido pelo material.

**Figura 3.16– Produção dos corpos de prova de pavimento**



(a)

(b)

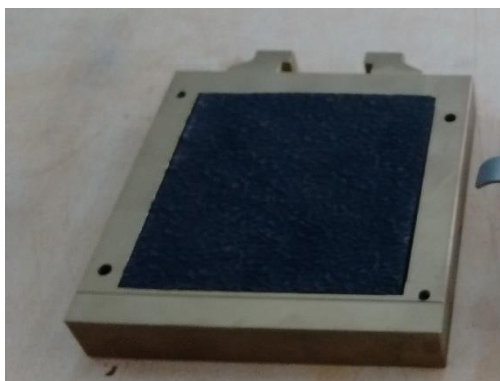
Vale ressaltar que, para que o concreto não aderisse às laterais da forma, as mesmas foram envolvidas por fita de EVA, conforme apresentado na Figura 3.17, que facilitaram no processo de desforma dos CPs.

**Figura 3.17 – Revestimento do molde para concretagem**



Para a produção dos corpos de prova, cujas superfícies de contato seria o recorte de uma placa de látex de 2 mm utilizado para recuperação de solas de sapatos, utilizou-se peças de madeira recortadas e lixadas como base, de modo a se adaptarem ao formato do caixa de cisalhamento, e os CPs ficaram conforme representado na Figura 3.18.

**Figura 3.18 – Corpo de prova de látex de 2 mm colado na madeira, adaptado à caixa de cisalhamento**



Para a realização do ensaio, foram utilizados 9 corpos de prova de concreto, nomeados de 2.1 a 2.9, 9 corpos de prova de ladrilho hidráulico, nomeados de 2 a 9, e 18 corpos de prova de superfície revestida de látex, nomeados de A à S. Os ensaios foram realizados com a interação de superfícies entre os materiais de revestimento de calçadas e os CPs revestidos de látex, sem repetir os mesmos corpos de prova.

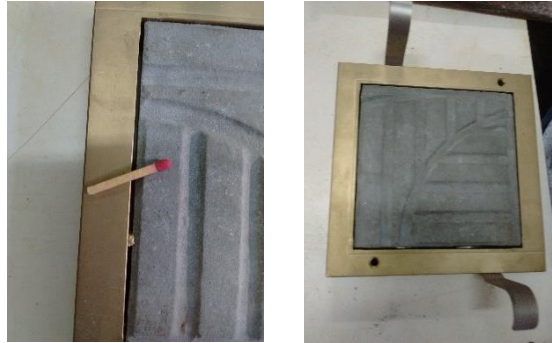
O ensaio foi realizado com a aplicação de 3 carregamentos normais, sendo de 25 kg, de 50 kg e de 75 kg. Para cada carregamento foram ensaiados 3 interações entre ladrilho hidráulico e látex e 3 interações entre concreto e látex.

O procedimento de ensaio necessitou de adaptações para ser executado e os procedimentos realizados estão descritos a seguir:

- Os corpos de prova, em função de não serem compostos por material facilmente moldável como o solo, necessitaram de operações de corte e lixamento para se adequarem ao formato do molde, processo esse que produziu imperfeições no encaixe ao molde, que necessitaram ser corrigidos no momento do ensaio. Esse ajuste do CP foi realizado com o auxílio de palitos de fósforo filetados, de modo que os operadores do ensaio sentissem que o corpo estava aderido ao molde, conforme representado na Figura 3.15. As adaptações

foram feitas nas laterais perpendiculares ao sentido de aplicação da força de cisalhamento, com o objetivo de ter menor influência no resultado do ensaio.

**Figura 3.19 – Adaptação do corpo de prova à caixa de cisalhamento**



- As duas partes da caixa de cisalhamento foram “unidas” por meio dos parafusos específicos para tal fim;
- A caixa de cisalhamento foi posicionada na prensa;
- Ajustou-se, conforme instruções, o dinamômetro à direita da prensa, os dispositivos de ajuste para aplicação do carregamento na parte superior da caixa;
- Posicionou-se os aparatos necessários para a aplicação de forma centralizada e uniformemente distribuída da carga normal à superfície de deslocamento, bem como o medidor de deslocamentos verticais;
- Inseriu-se os pesos normais aplicados em cada ensaio, de forma cuidadosa e sem solavancos;
- Retirou-se os parafusos que uniam as duas partes da caixa de cisalhamento;
- No leitor eletrônico, zerou-se as tensões cisalhantes;
- Configurou-se a velocidade de carregamento horizontal do ensaio em 0,5 mm/min;
- Deu-se início ao ensaio realizado mecanicamente;
- Os dados medidos durante o ensaio foram enviados para um sistema computacional que permite a transformação dos dados em planilhas para a obtenção dos parâmetros desejados, que são o deslocamento horizontal, deslocamento vertical e a tensão de cisalhamento.

O ensaio foi repetido para as mesmas superfícies, porém, dessa vez, após um período de imersão em água de 24 h e, portanto, úmidas.

Na Figura 3.20 pode-se observar a sequência de realização dos ensaios de forma simplificada e esquemática.

**Figura 3.20 – Processo de execução do ensaio**

25kg	50kg	75kg	25kg	50kg	75kg
CONCRETO	CONCRETO	CONCRETO	LADRILHO	LADRILHO	LADRILHO
LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX
CONCRETO	CONCRETO	CONCRETO	LADRILHO	LADRILHO	LADRILHO
LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX
CONCRETO	CONCRETO	CONCRETO	LADRILHO	LADRILHO	LADRILHO
LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX	LÁTEX



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ENSAIO DO MÉTODO DE INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Os ensaios pelo Método de Inclinação da Superfície (MIS) foram realizados conforme definido na proposta metodológica, com três repetições (a, b e c) para cada condição de superfície de contato com um peso determinado.

Como resultado da análise das gravações do ensaio, demarcando o momento exato em que o corpo inicia seu movimento por meio da paralização do vídeo e, então, anotando o valor da inclinação da superfície nesse instante, obteve-se como resultados os valores apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, que representam a verificação da aplicabilidade da teoria utilizando os corpos de prova com superfície de metal, madeira e látex sobre a base de superfície de concreto seco.

**Tabela 4.1 – Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto seco-metal**

CORPO DE PROVA	INCLINAÇÃO (°)	INCLINAÇÃO (°) MÉDIA	COEFICIENTE DE ATRITO
METAL (a)	17,7		
METAL (b)	17,5	17,4	0,31
METAL (c)	16,9		
METAL + 1,0 kg (a)	17,9		
METAL + 1,0 kg (b)	22,1	21,8	0,40
METAL + 1,0 kg (c)	25,6		
METAL + 2,0 kg (a)	22,0		
METAL + 2,0 kg (b)	22,4	21,5	0,39
METAL + 2,0 kg (c)	20,0		
DESVIO PADRÃO		2,0	0,04

**Tabela 4.2– Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto seco-madeira**

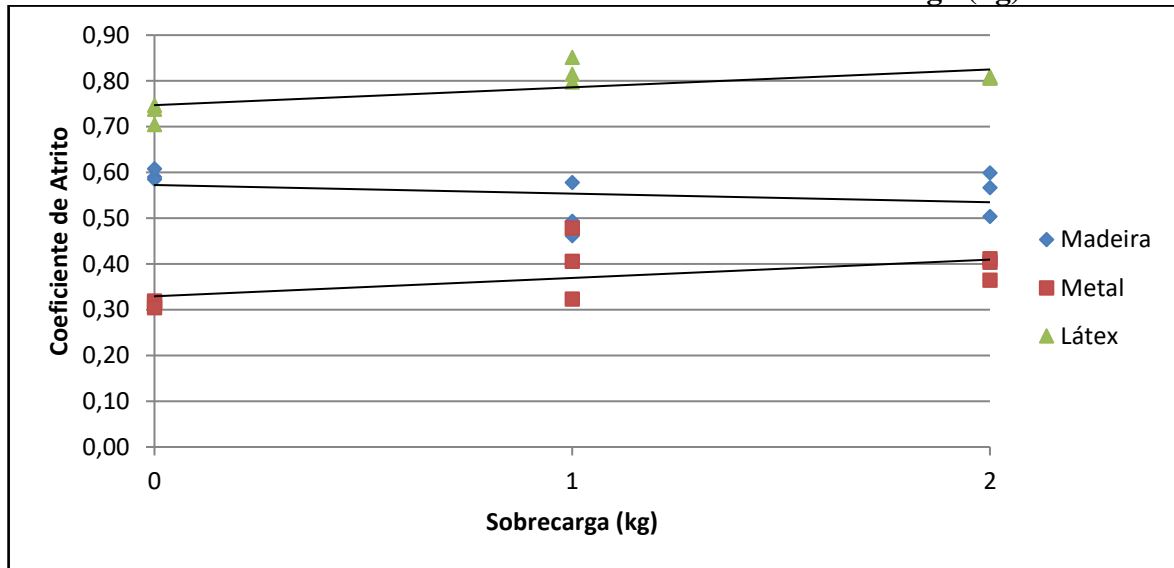
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>INCLINAÇÃO (°)</b>	<b>INCLINAÇÃO (°) MÉDIA</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
MADEIRA (a)	30,5		
MADEIRA (b)	30,3	30,7	0,59
MADEIRA (c)	31,3		
MADEIRA + 1,0 kg (a)	26,2		
MADEIRA + 1,0 kg (b)	30,0	27,0	0,51
MADEIRA + 1,0 kg (c)	24,8		
MADEIRA + 2,0 kg (a)	30,9		
MADEIRA + 2,0 kg (b)	26,7	29,1	0,56
MADEIRA + 2,0 kg (c)	29,5		
DESVIO PADRÃO		1,5	0,03

**Tabela 4.3– Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto seco-látex**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>INCLINAÇÃO (°)</b>	<b>INCLINAÇÃO (°) MÉDIA</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
LÁTEX (a)	36,4		
LÁTEX (b)	35,2	36,1	0,73
LÁTEX (c)	36,7		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	38,6		
LÁTEX + 1,0 kg (b)	39,1	39,4	0,82
LÁTEX + 1,0 kg (c)	40,4		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	39,0		
LÁTEX + 2,0 kg (b)	39,0	38,9	0,81
LÁTEX + 2,0 kg (c)	38,9		
DESVIO PADRÃO		1,4	0,04

Como resumo das Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 foi possível gerar o gráfico apresentado na Figura 4.1, que facilita a visualização dos resultados.

**Figura 4.1 – Comportamento dos diferentes materiais em contato com a superfície de concreto seco na curva Coeficiente de Atrito x Sobrecarga (kg)**



Com esses resultados, percebe-se que a equação  $\mu_e = \tan\theta_e$ , que considera que o coeficiente de atrito é independente da massa do corpo e da área de contato entre a superfície, fez-se corroborar por meio da presente metodologia, pois, partindo-se do princípio de que a massa dos corpos de prova originalmente eram de aproximadamente 1,0 kg e que foram feitos incrementos de massa na ordem de 100% (1,0 kg) e 200% (2,0 kg), e mesmo assim os valores de coeficiente de atrito se mantiveram com baixa variação, sendo o desvio padrão de 0,04 para a concreto-metal, 0,03 para concreto-madeira e 0,04 para concreto-látex, e não houve padrão de aumento do coeficiente de atrito com o aumento do peso do corpo.

A forma utilizada para a avaliação do ensaio foi por meio da utilização de 3 superfícies de contato diferentes nos corpos de prova, conhecidamente sendo o metal a superfície mais lisa, a madeira intermediária e o látex a superfície mais rugosa. Dessa forma, para que o método se fizesse condizente com a teoria, faz-se necessário que o coeficiente de atrito aumentasse conforme fosse maior a rugosidade da superfície, visto que o concreto foi a mesma superfície de contato em todos os ensaios.

Conforme apresentado na Tabela 4.4, que traz o valor médio do coeficiente de atrito medido para cada dupla de superfícies de contato, percebe-se que houve a confirmação da teoria por meio do ensaio, sendo que o coeficiente de atrito aumentou com o aumento da rugosidade das superfícies e, assim, entende-se que o presente método pode ser aplicado para o estudo da interação entre superfícies de materiais de calçamento de sapato e materiais de pavimento de calçadas, a fim de se analisar a resistência ao escorregamento da superfície.

**Tabela 4.4 – Coeficiente de atrito para as diferentes superfícies de contato**

<b>SUPERFÍCIE DE CONTATO</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
CONCRETO-METAL	0,37
CONCRETO-MADEIRA	0,55
CONCRETO-LÁTEX	0,79

A partir desses resultados, que mostraram a boa correlação entre os resultados empíricos e os esperados em virtude da teoria aplicada, os ensaios foram repetidos para a interação entre os diversos tipos de revestimento de calçada e a superfície de látex, que representa o material do solado dos sapatos.

Primeiramente são apresentadas nas Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, as interações das diferentes superfícies em seu estado natural (seco) em contato com a superfície de látex.

**Tabela 4.5 – Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico seco-látex**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>INCLINAÇÃO (°)</b>	<b>INCLINAÇÃO MÉDIA (°)</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
LÁTEX (a)	40,0		
LÁTEX (b)	40,5	40,0	0,84
LÁTEX (c)	39,5		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	39,4		
LÁTEX + 1,0 kg (b)	39,4	39,2	0,82
LÁTEX + 1,0 kg (c)	38,9		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	40,7		
LÁTEX + 2,0 kg (b)	39,0	40,0	0,84
LÁTEX + 2,0 kg (c)	40,3		
DESVIO PADRÃO		0,4	0,01

**Tabela 4.6 – Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico com tinta seco-látex**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>INCLINAÇÃO (°)</b>	<b>INCLINAÇÃO MÉDIA (°)</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
LÁTEX (a)	39,4		
LÁTEX (b)	39,1	39,5	0,83
LÁTEX (c)	40,0		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	39,6		
LÁTEX + 1,0 kg (b)	38,5	38,9	0,81
LÁTEX + 1,0 kg (c)	38,6		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	39,9		
LÁTEX + 2,0 kg (b)	38,5	39,1	0,81
LÁTEX + 2,0 kg (c)	38,8		
DESVIO PADRÃO		0,3	0,01

**Tabela 4.7 – Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: paver seco-látex**

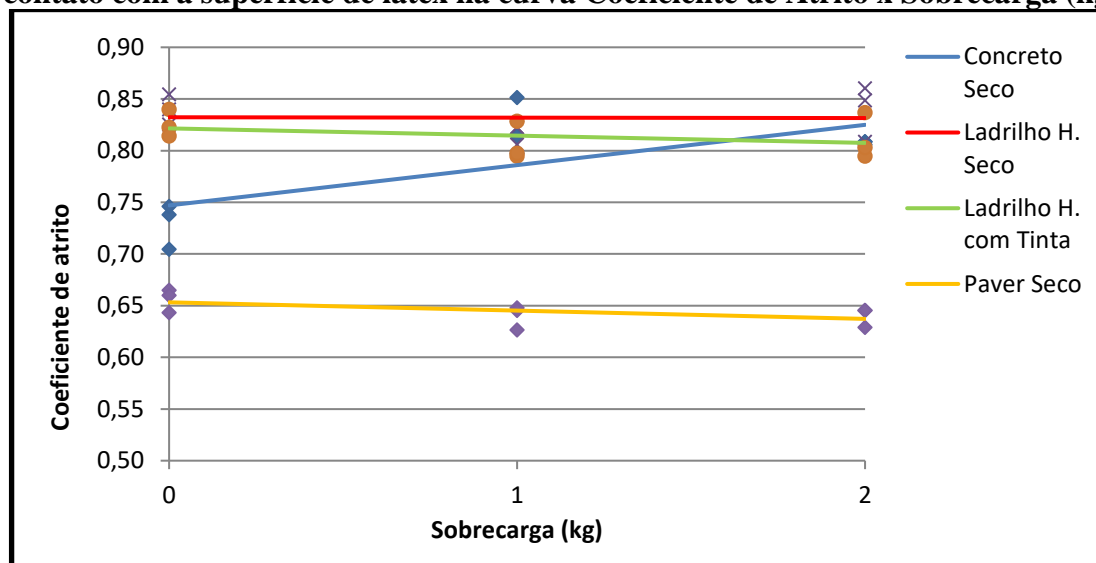
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>INCLINAÇÃO (°)</b>	<b>INCLINAÇÃO (°) MÉDIA</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
LÁTEX (a)	33,6		
LÁTEX (b)	33,4	33,3	0,66
LÁTEX (c)	32,7		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	32,9		
LÁTEX + 1,0 kg (b)	32,1	32,6	0,64
LÁTEX + 1,0 kg (c)	32,8		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	32,2		
LÁTEX + 2,0 kg (b)	32,8	32,6	0,64
LÁTEX + 2,0 kg (c)	32,8		
DESVIO PADRÃO		0,3	0,01

**Tabela 4.8 – Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto seco-látex**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>INCLINAÇÃO (°)</b>	<b>INCLINAÇÃO (°) MÉDIA</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
LÁTEX (a)	36,4		
LÁTEX (b)	35,2	36,1	0,73
LÁTEX (c)	36,7		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	38,6		
LÁTEX + 1,0 kg (b)	39,1	39,4	0,82
LÁTEX + 1,0 kg (c)	40,4		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	39,0		
LÁTEX + 2,0 kg (b)	39,0	38,9	0,81
LÁTEX + 2,0 kg (c)	38,9		
DESVIO PADRÃO		1,4	0,04

Como resumo das Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, foi possível gerar o gráfico apresentado na Figura 4.2, que facilita a visualização dos resultados.

**Figura 4.2 – Comportamento dos diferentes pavimentos na condição natural (seco) em contato com a superfície de látex na curva Coeficiente de Atrito x Sobrecarga (kg)**



Com os resultados apresentados na Figura 4.2, percebe-se novamente que a teoria é aplicável aos diferentes tipos de materiais em seu estado seco quando trata que a variação de peso não influencia no valor do Coeficiente de Atrito. O resultado para o concreto seco se apresentou com pequena variação na medida do coeficiente quando sem sobrecarga, o que faz com que os resultados pareçam aumentar com o aumento do peso, porém tal situação pode ser analisada como uma variação de ensaio, visto que após isso os valores do coeficiente de atrito para sobrecargas de 100% e 200% são equivalentes.

Conforme apresentado na Tabela 4.9, que traz o valor médio do coeficiente de atrito medido para cada dupla de superfícies de contato, percebe-se que o resultado do coeficiente de atrito para os materiais secos mostrou que, nas condições naturais, o ladrilho hidráulico possui maior coeficiente de atrito (0,83), seguido pelo ladrilho hidráulico com tinta (0,81), depois pelo concreto (0,79) e por fim pelo paver (0,65). Entretanto, a diferença entre os três melhores resultados é muito pequena, dessa forma pode-se considerá-los equivalentes, na prática.

Ao início dos estudos esperava-se que o concreto tivesse o coeficiente de atrito superior ao ladrilho hidráulico visto que a rugosidade da superfície do concreto é maior. Porém, acredita-se que, como o concreto teve para os ensaios apenas 7 dias de cura, atribui-se a redução do valor do coeficiente de atrito ao esfarelamento dos grãos das superfícies que levaram ao concreto características semelhantes a uma superfície com certa quantidade de areia.

A rugosidade da superfície do ladrilho hidráulico comum, do ladrilho hidráulico com tinta e do paver eram semelhantes entre si, com acabamento considerado liso. Porém, com os

resultados percebeu-se que o paver possui coeficiente de atrito consideravelmente menor que os dois tipos de ladrilho hidráulico estudados, atribui-se essa diferença ao número de juntas e frisos do ladrilho que é muito maior que o do paver.

**Tabela 4.9 – Coeficiente de atrito para os diferentes pavimentos na condição natural (seco) em contato a superfície de látex**

SUPERFÍCIE DE CONTATO	COEFICIENTE DE ATRITO
PAVER-LÁTEX	0,65
CONCRETO-LÁTEX	0,79
LADRILHO HIDRÁULICO COM TINTA-LATÉX	0,81
LADRILHO HIDRÁULICO-LÁTEX	0,83

Prosseguindo com a discussão dos resultados, analisou-se a interação das superfícies em seu estado úmido (conforme descrito nos procedimentos metodológicos) em contato com a superfície de látex, novamente representando o solado do calçado. Os resultados estão descritos nas Tabelas 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13.

**Tabela 4.10 – Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico úmido-látex**

CORPO DE PROVA	INCLINAÇÃO (°)	INCLINAÇÃO (°) MÉDIA	COEFICIENTE DE ATRITO
LÁTEX (a)	37,3		
LÁTEX (b)	38,1	37,9	0,78
LÁTEX (c)	38,3		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	38,7		
LÁTEX + 1,0 kg (b)	38,7	39,2	0,82
LÁTEX + 1,0 kg (c)	40,2		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	41,0		
LÁTEX + 2,0 kg (b)	40,1	39,4	0,82
LÁTEX + 2,0 kg (c)	37,1		
DESVIO PADRÃO		0,7	0,02

**Tabela 4.11 – Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico com tinta úmido-látex**

CORPO DE PROVA	INCLINAÇÃO (°)	INCLINAÇÃO (°) MÉDIA	COEFICIENTE DE ATRITO
LÁTEX (a)	33,6		
LÁTEX (b)	33,4	34,1	0,68
LÁTEX (c)	35,2		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	35,0		
LÁTEX + 1,0 kg (b)	35,8	35,5	0,71
LÁTEX + 1,0 kg (c)	35,8		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	35,8		
LÁTEX + 2,0 kg (b)	35,7	35,6	0,72
LÁTEX + 2,0 kg (c)	35,4		
DESVIO PADRÃO		0,7	0,02

**Tabela 4.12 – Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: paver úmido-látex**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>INCLINAÇÃO (°)</b>	<b>INCLINAÇÃO (°) MÉDIA</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
LÁTEX (a)	34,3	33,8	0,67
LÁTEX (b)	32,9		
LÁTEX (c)	34,2		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	32,5	32,5	0,64
LÁTEX + 1,0 kg (b)	32,8		
LÁTEX + 1,0 kg (c)	32,3		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	32,8	32,4	0,63
LÁTEX + 2,0 kg (b)	32,5		
LÁTEX + 2,0 kg (c)	31,8		
DESVIO PADRÃO		0,6	0,02

**Tabela 4.13 – Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto úmido-látex**

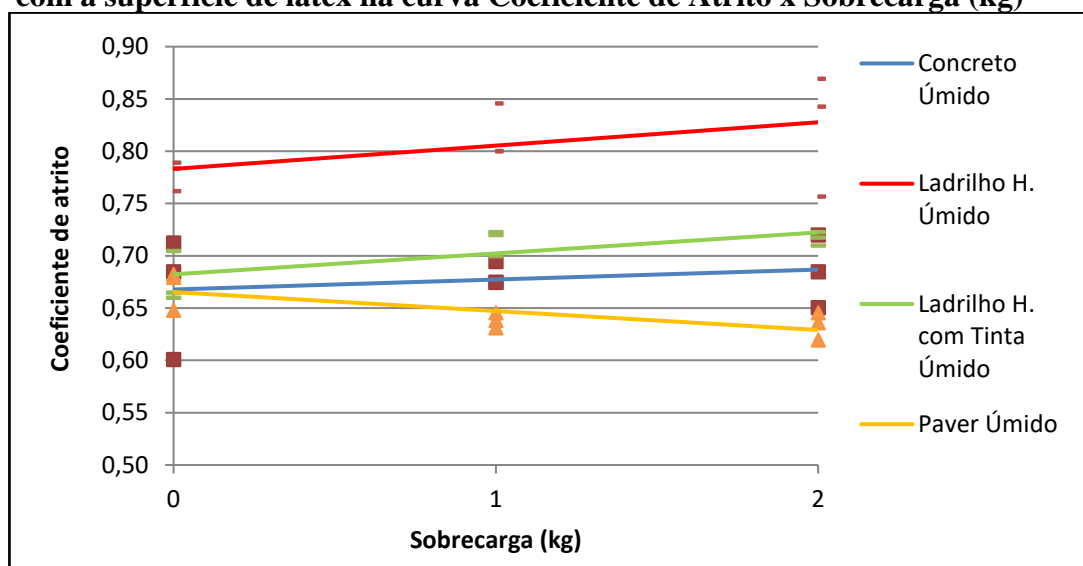
<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>INCLINAÇÃO (°)</b>	<b>INCLINAÇÃO (°) MÉDIA</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
LÁTEX (a)	34,4	33,6	0,66
LÁTEX (b)	35,5		
LÁTEX (c)	31,0		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	34,8	34,3	0,68
LÁTEX + 1,0 kg (b)	34,0		
LÁTEX + 1,0 kg (c)	34,0		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	34,4	34,4	0,68
LÁTEX + 2,0 kg (b)	35,8		
LÁTEX + 2,0 kg (c)	33,0		
DESVIO PADRÃO		0,3	0,01

Para melhor visualizar os dados das Tabelas 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 gerou-se o gráfico apresentado na Figura 4.3.

Mais uma vez percebe-se, conforme mostrado na Figura 4.3, que o peso não possui influência real sobre a variação do Coeficiente de Atrito, mesmo quando os pavimentos são avaliados na condição úmida, visto que as variações com o acréscimo de cargas são mínimas e não mostram padrão constante de aumento.



**Figura 4.3 – Comportamento dos diferentes pavimentos na condição úmida em contato com a superfície de látex na curva Coeficiente de Atrito x Sobrecarga (kg)**



A Tabela 4.14, que traz o valor médio do coeficiente de atrito medido para cada dupla de superfícies de contato, mostrou novamente, mesmo que para a condição úmida, que o ladrilho hidráulico possui maior coeficiente de atrito (0,80), seguido pelo ladrilho hidráulico com tinta (0,70), depois pelo concreto (0,68) e por fim pelo paver (0,65).

Imputa-se a pequena perda de coeficiente de atrito do ladrilho hidráulico (0,03, aproximadamente 4%), apresentado na Tabela 4.14, em relação ao ladrilho seco, Tabela 4.9, à quantidade de juntas e frisos presentes no pavimento de ladrilho, o que diminui a área de contato da água com a superfície de látex. O mesmo é válido para o pavimento de paver que não possui perda de coeficiente de atrito entre as condições seca e molhada devido as juntas que possui entre seus blocos.

Já a perda de 0,11 no coeficiente de atrito úmido (aproximadamente 14%) quando se compara o ladrilho pintado nas condições seca e úmida, pode ser atribuída à impermeabilização da superfície com a utilização da tinta própria para materiais de calçamento, impedindo a penetração de certa quantidade de água, o que implica em maior quantidade de água na superfície aumentando sua lubrificação. No município de Maringá é comumente sentida a redução do coeficiente de atrito do pavimento em função da aplicação de tinta esmalte, porém, como esta tinta não é recomendada para aplicação em calçadas, neste trabalho a mesma não foi ensaiada, optando-se aqui pela utilização da tinta específica para matérias de calçamento.

Em análise do pavimento de concreto é possível identificar a perda de 0,11 (aproximadamente 14%) de coeficiente de atrito entre as condições seca e úmida, isso devido

ao concreto não possuir frisos ou juntas que permitiriam a diminuição da lâmina d'água sobre a superfície.

**Tabela 4.14 – Coeficiente de atrito para os diferentes pavimentos na condição úmida em contato a superfície de látex**

<b>SUPERFÍCIE DE CONTATO</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
PAVER-LÁTEX	0,65
CONCRETO-LÁTEX	0,68
LADRILHO HIDRÁULICO COM TINTA-LATÉX	0,70
LADRILHO HIDRÁULICO-LÁTEX	0,80

Por último, apresentam-se, nas Tabelas 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18, os resultados entre a interação dos pavimentos com uma camada de areia sobre os mesmos (conforme descrito nos procedimentos metodológicos) em contato com a superfície de látex.

**Tabela 4.15– Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico com areia-látex**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>INCLINAÇÃO (°)</b>	<b>INCLINAÇÃO (°) MÉDIA</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
LÁTEX (a)	20,9	20,6	0,38
LÁTEX (b)	20,8		
LÁTEX (c)	20,2		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	23,7	19,9	0,36
LÁTEX + 1,0 kg (b)	17,7		
LÁTEX + 1,0 kg (c)	18,4		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	22,2	21,7	0,40
LÁTEX + 2,0 kg (b)	22,3		
LÁTEX + 2,0 kg (c)	20,6		
DESVIO PADRÃO		0,7	0,01

**Tabela 4.16– Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: ladrilho hidráulico com tinta com areia-látex**

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>INCLINAÇÃO (°)</b>	<b>INCLINAÇÃO (°) MÉDIA</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
LÁTEX (a)	22,8	22,7	0,42
LÁTEX (b)	22,5		
LÁTEX (c)	22,8		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	20,8	21,0	0,38
LÁTEX + 1,0 kg (b)	20,3		
LÁTEX + 1,0 kg (c)	22,0		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	19,0	17,8	0,32
LÁTEX + 2,0 kg (b)	17,4		
LÁTEX + 2,0 kg (c)	17,0		
DESVIO PADRÃO		2,0	0,04

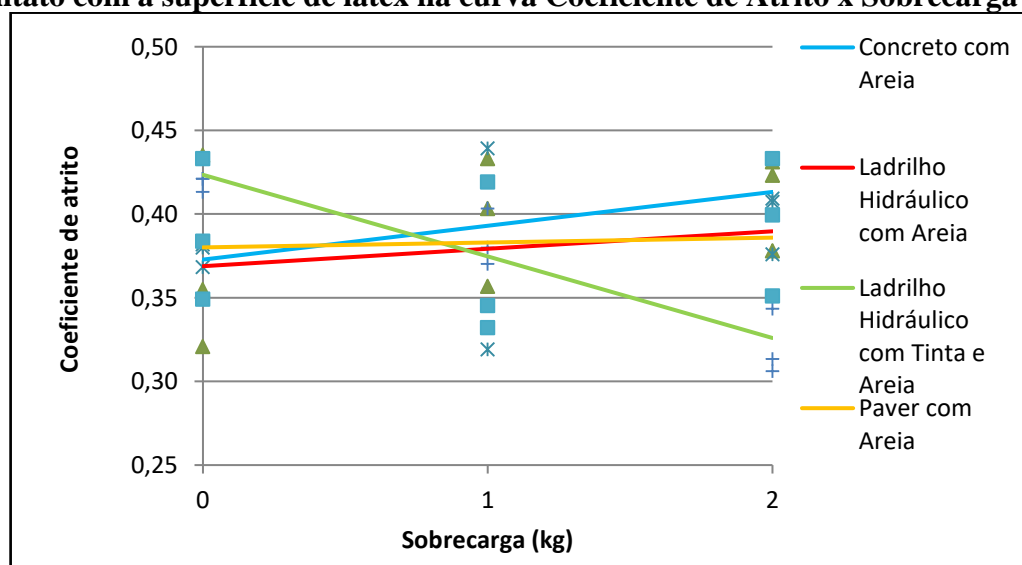
**Tabela 4.17– Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: paver com areia-látex**

CORPO DE PROVA	INCLINAÇÃO (°)	INCLINAÇÃO (°) MÉDIA	COEFICIENTE DE ATRITO
LÁTEX (a)	23,4		
LÁTEX (b)	19,3	21,2	0,39
LÁTEX (c)	21,0		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	22,7		
LÁTEX + 1,0 kg (b)	18,4	20,1	0,37
LÁTEX + 1,0 kg (c)	19,1		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	19,3		
LÁTEX + 2,0 kg (b)	21,8	21,5	0,39
LÁTEX + 2,0 kg (c)	23,4		
DESVIO PADRÃO		0,6	0,01

**Tabela 4.18– Inclinação e coeficiente de atrito da superfície no momento em que o corpo de prova inicia o movimento: concreto com areia-látex**

CORPO DE PROVA	INCLINAÇÃO (°)	INCLINAÇÃO (°) MÉDIA	COEFICIENTE DE ATRITO
LÁTEX (a)	17,8		
LÁTEX (b)	19,5	20,3	0,37
LÁTEX (c)	23,5		
LÁTEX + 1,0 kg (a)	23,4		
LÁTEX + 1,0 kg (b)	22,0	21,7	0,40
LÁTEX + 1,0 kg (c)	19,6		
LÁTEX + 2,0 kg (a)	20,7		
LÁTEX + 2,0 kg (b)	22,9	22,3	0,41
LÁTEX + 2,0 kg (c)	23,3		
DESVIO PADRÃO		0,9	0,02

**Figura 4.4 – Comportamento dos diferentes pavimentos com areia na superfície em contato com a superfície de látex na curva Coeficiente de Atrito x Sobrecarga (kg)**



Analisando-se a Figura 4.4, a teoria de Halliday e Resnick (1993) se mostra válida também para superfície com partículas roladas (areia), ou seja, o peso não influencia de forma proporcional e significativa no comportamento da variação do coeficiente de atrito.

**Tabela 4.19 – Coeficiente de atrito para os diferentes com areia na superfície em contato a superfície de látex**

<b>SUPERFÍCIE DE CONTATO</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO</b>
PAVER-LÁTEX	0,38
CONCRETO-LÁTEX	0,38
LADRILHO HIDRÁULICO COM TINTA-LATÉX	0,37
LADRILHO HIDRÁULICO-LÁTEX	0,38

Por meio de análise da Tabela 4.19, percebe-se que, quando cobertos por areia, os diferentes tipos de pavimento possuem coeficiente de atrito iguais quando em contato com o látex. Entretanto, os valores dos coeficientes são significativamente menores, aproximadamente 50%, do que nas condições úmida e seca. Imputa-se essa constatação ao fato de que a areia é um material granular arredondado e que confere características de rolamento à superfície do pavimento. Vale ressaltar que, apesar de areia ter sido utilizada como representante da poluição nas calçadas, a característica dos grãos de areia é diferente dos grãos de poeira. Porém, entende-se que o efeito provocado por eles é o mesmo, ou seja, de rolagem dos grãos que favorece o processo de escorregamento da superfície de látex sobre o pavimento.

Por fim, na Tabela 4.20, é apresentado o resumo dos resultados dos ensaios realizados pelo MIS.

**Tabela 4.20 – Resumo dos resultados dos ensaios pelo MIS**

<b>SUPERFÍCIE DE CONTATO</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO Superfície seca</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO Superfície úmida</b>	<b>COEFICIENTE DE ATRITO Superfície com areia</b>
PAVER-LÁTEX	0,65	0,65	0,38
CONCRETO-LÁTEX	0,79	0,68	0,38
LADRILHO HIDRÁULICO COM TINTA-LATÉX	0,81	0,70	0,37
LADRILHO HIDRÁULICO-LÁTEX	0,83	0,80	0,38

Com os resultados, torna-se possível a análise dos dados para a obtenção de uma faixa de valores referenciais para que um dado tipo de pavimento possa ser considerado como antiderrapante.

Entende-se que o pavimento mais seguro quanto à resistência ao escorregamento sob as condições úmida e seca é aquele com maior valor de coeficiente de atrito tanto sob a

condição seca quanto úmida. Dentre os pavimentos ensaiados o que obteve essas melhores características foi o ladrilho hidráulico sem aplicação de tinta, com o coeficiente de atrito de 0,83 quando seco e de 0,80 quando úmido.

Trabalhos de referência como Strandberg (1983), Gronqvist et al. (1990), Powers et al. (2002) e Kenneth, Johnson e Vidal (2016) trazem que pavimentos antiderrapantes teriam o coeficiente de atrito entre 0,40 e 0,50 em condição seca, porém pelos resultados do Método de Inclinação da Superfície (MIS) estes valores estão próximos ao atrito oferecido por uma superfície recoberta de areia, que segundo o presente trabalho diminuem drasticamente a resistência ao escorregamento da superfície.

Diante disso, os outros pavimentos ensaiados pelo MIS e que apresentam condição de superfície consideradas como antiderrapantes pelos que as comercializam, tiveram o menor valor de coeficiente de atrito seco e úmido de 0,65 (paver de concreto), portanto, o presente trabalho sugere que, para determinação do pavimento como antiderrapante, o valor do coeficiente de atrito deve ser igual ou superior à 0,65 pelo método MIS, sob as condições seca e úmida, conferindo assim ao revestimentos condições de superfície mínimas semelhantes às do paver de concreto.

## 4.2 ENSAIO DE CILHAMENTO DIRETO

Para analisar os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto, os dados fornecidos pela leitura da prensa de cisalhamento foram transformados em gráficos.

### 4.2.1 Ensaios do concreto seco

Os corpos de prova de concreto com superfície de contato com os CPs de látex foram ensaiados com carregamentos normais de 25 kg, 50 kg, e 75 kg, que, ao se considerar a aceleração da gravidade de  $9,81 \text{ m/s}^2$  e a área de contato entre os corpos de  $0,01 \text{ m}^2$ , tem-se que as tensões normais aplicadas foram respectivamente de 24,53 kPa, 49,05 kPa e 73,58 kPa.

Esses gráficos permitem a obtenção dos valores da tensão cisalhante máxima, buscando-se reconhecer um ponto de pico de tensão após o qual há uma queda na tensão, conforme a teoria de Head (1992), de que o deslocamento relativo da parte superior sobre a inferior acontece gradualmente enquanto a força cisalhante (que se torna tensão quando distribuída pela área de contato) aumenta, e que, quando o ponto máximo (tensão de cisalhamento máxima) é atingido, significa que a maior resistência foi oferecida pela

interação entre as superfícies para sustentar o plano de deslizamento e após ser atingida a resistência ao cisalhamento cai, mostrando que houve a ruptura entre as superfícies.

Nesses gráficos também foi plotado, no eixo secundário das ordenadas, o deslocamento vertical. No ensaio de corpos de provas de solo na prensa de cisalhamento, essa medição demonstra a variação de volume no cisalhamento. Neste caso, como está sendo estudada a interação entre superfícies, o deslocamento vertical pode representar a rugosidade da superfície ensaiada, visto que um corpo de prova, ao deslizar sobre o outro, segundo a teoria de Rowe (1962), tem que as superfícies em contato se comportam como se fossem duas “serras encaixadas”, onde, para ocorrer a primeira ruptura horizontal, é necessário que haja um deslocamento vertical para ultrapassar o primeiro pico do encaixe e, após isso, as faces vão retornar ao contato original, sendo necessária que seja mantida uma força tal que permita o vencimento desses obstáculos a fim de continuar o deslocamento horizontal.

Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de concreto, CPs 2.1, 2.6 e 2.7, ensaiados com 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, D, O e P, sob um carregamento normal de 25 kg, podem ser observados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

**Figura 4.5– Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.1-D**

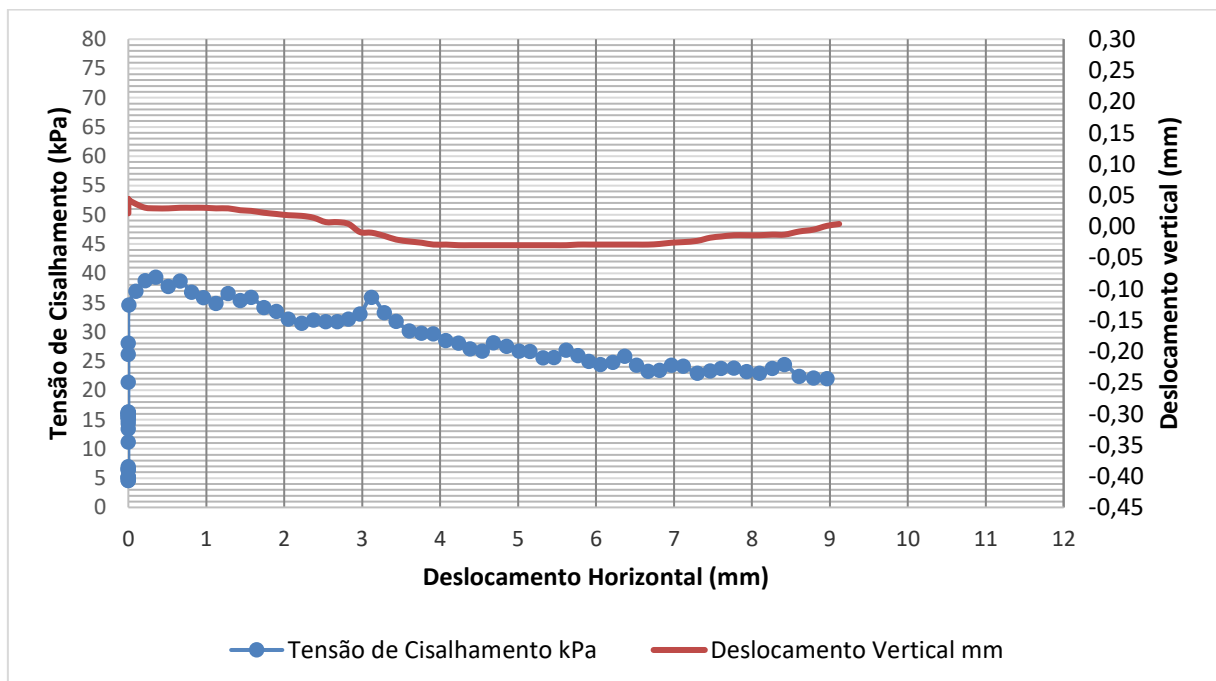


Figura 4.6 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.6-O

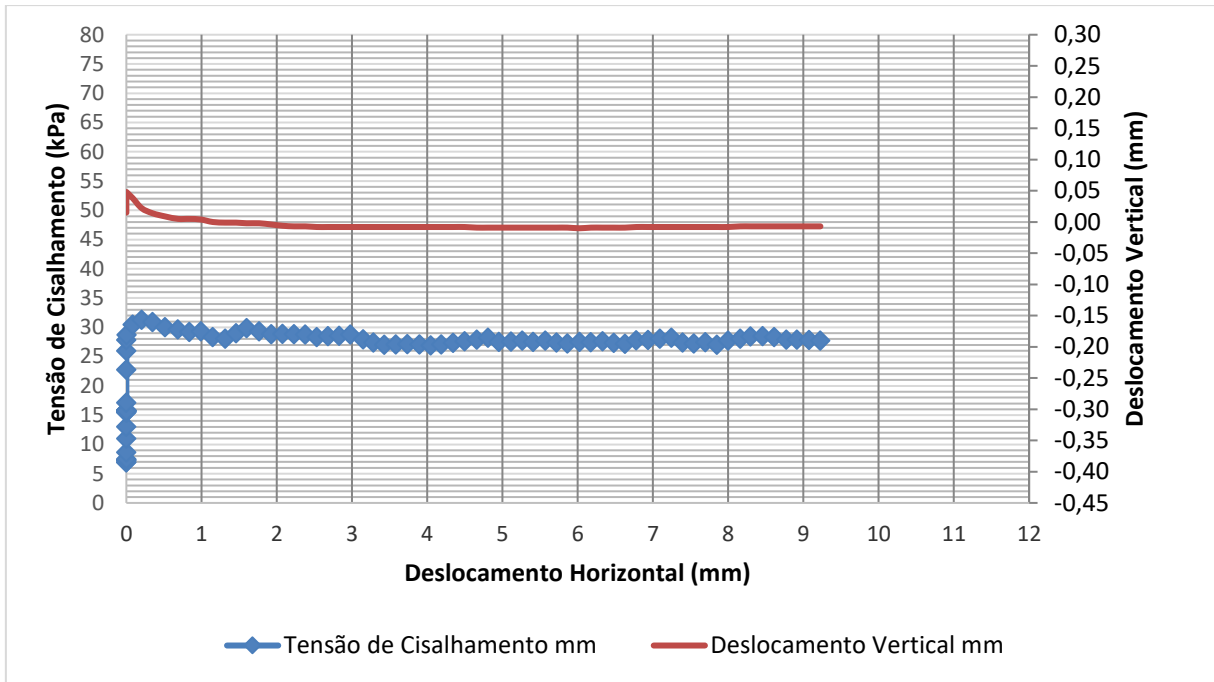
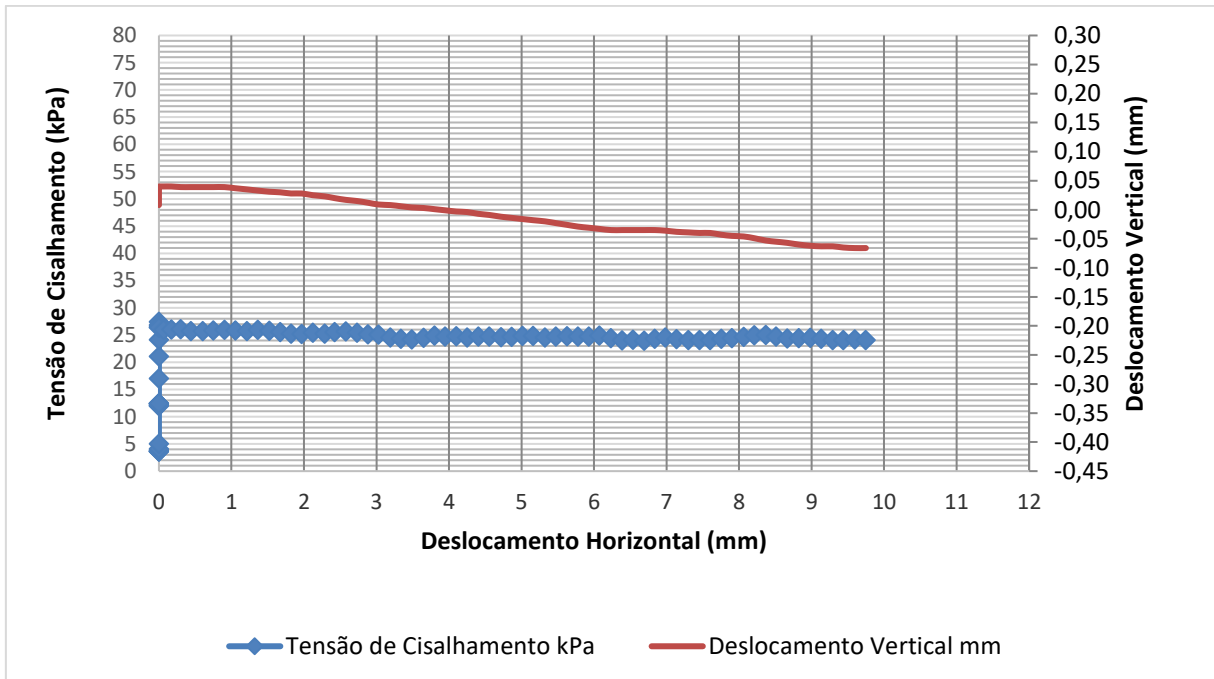


Figura 4.7 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.7-P



O ensaio da Figura 4.5 teve o valor de 39,34 kPa como tensão cisalhante máxima, que foi atingido ao deslocamento de 0,354 mm, o da Figura 4.6 apresentou tensão cisalhante

máxima de 31,32 kPa ao deslocamento de 0,205 mm e o da Figura 4.7 apresentou tensão cisalhante máxima de 27,40 kPa atingido quando ainda não houve deslizamento.

Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber variação da rugosidade das superfícies entre -0,066 mm e 0,048 mm, sendo diferentes para cada corpo de prova, mas não apresentando grande variação, conforme o que se espera de superfícies de concreto alisado com régua, onde a rugosidade das mesmas é dada pelos grãos dos materiais que as compõem.

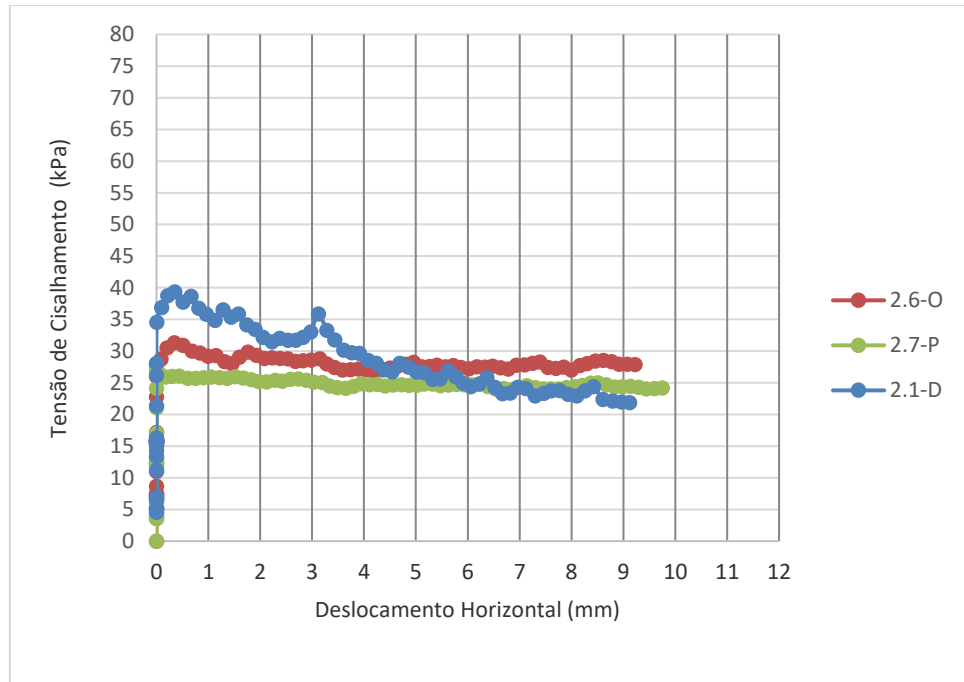
Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova é perceptível um comportamento de “escalada” do deslocamento vertical, que é seguido de uma redução após o início de deslocamento horizontal, o que concorda com a teoria de Howe (1962) e mostra um padrão de dilatância, com a necessidade de uma força que permita o vencimento de uma superfície sobre a outra para que se faça o início do deslocamento horizontal entre elas. No contexto das superfícies ensaiadas, em se tratando de uma superfície rígida (concreto) em contato com uma superfície não rígida (látex), atribui-se esse deslocamento vertical à força necessária para vencer a adesividade existente entre as superfícies, visto que o látex penetra os vazios do concreto quando da aplicação de uma tensão normal, o que vai ao encontro da teoria de Heise e Popov (2010), que diz que a formação e destruição de contatos adesivos se dá considerando que duas asperezas próximas primeiramente entram em contato quando os seus contornos geométricos se interceptam, e se separam apenas após que uma dada distância entre elas seja alcançada,

Quando plotados todos em um gráfico só, como apresentado da Figura 4.8, pode-se notar que, apesar do ensaio 2.1-D ter tido um padrão diferente de redução da tensão de cisalhamento após atingir a resistência máxima, percebe-se que todos se comportaram conforme a teoria apresentada.

Nos ensaios 2.6-O e 2.7-P, percebe-se determinada tendência de manutenção quase constante da tensão necessária para manter a taxa de deslocamento em 0,5 mm/min logo após a tensão máxima, o que pode indicar que o atrito dinâmico foi atingido. No ensaio 2.1-D apesar dessa “estabilização” ter ocorrido um pouco após ter sido atingida a tensão máxima ela mostra sua tendência quando o deslocamento horizontal já se aproxima de 10 mm.

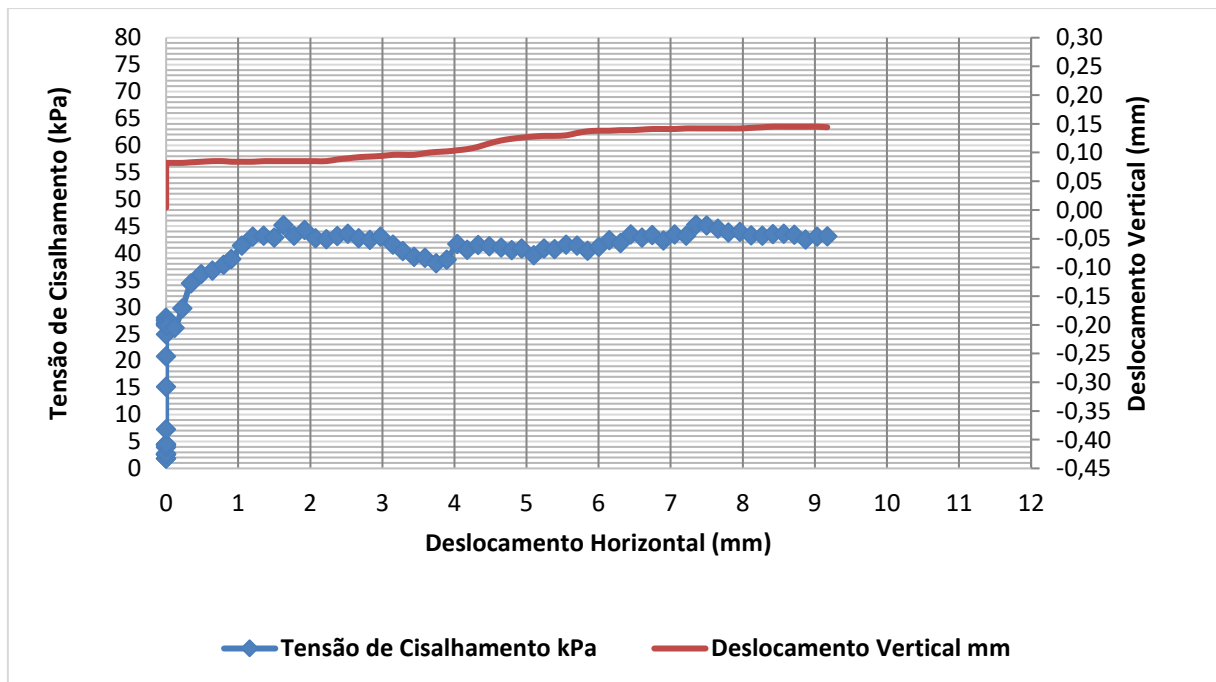


**Figura 4.8 – Curva tensão x deslocamento concreto-látex 25 kg**

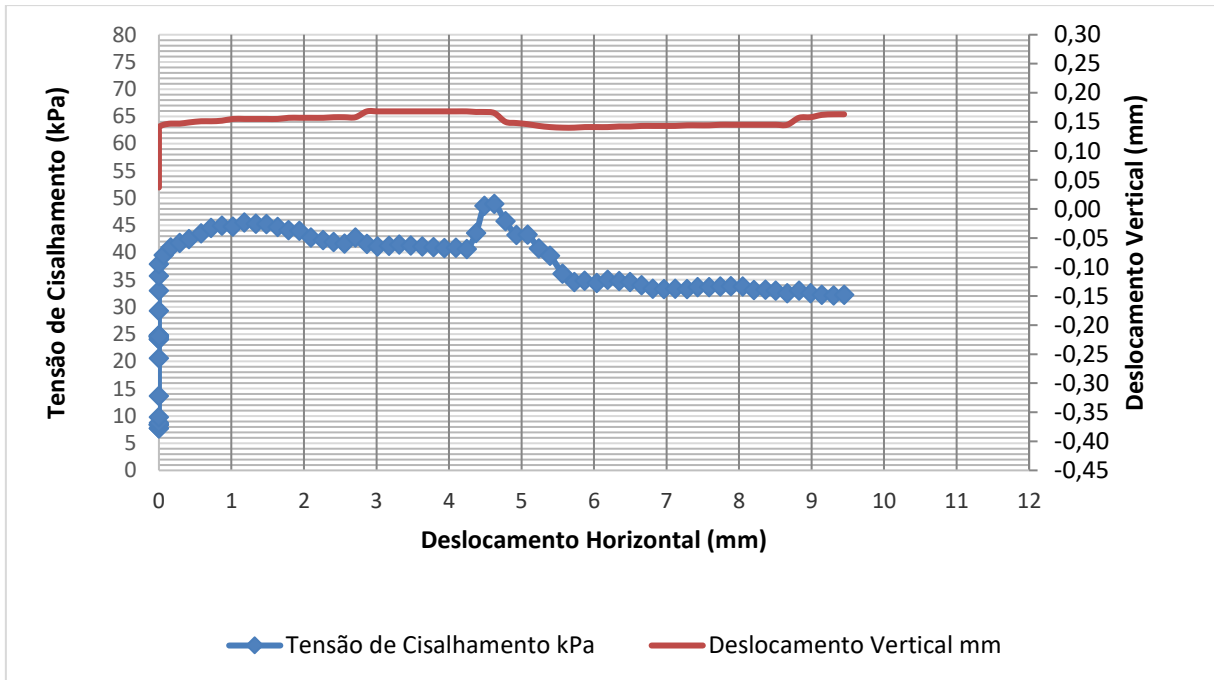


Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de concreto, CPs 2.2, 2.8 e 2.9, ensaiados contra 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, E, Q e R, sob um carregamento normal de 50 kg, podem ser observados nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11.

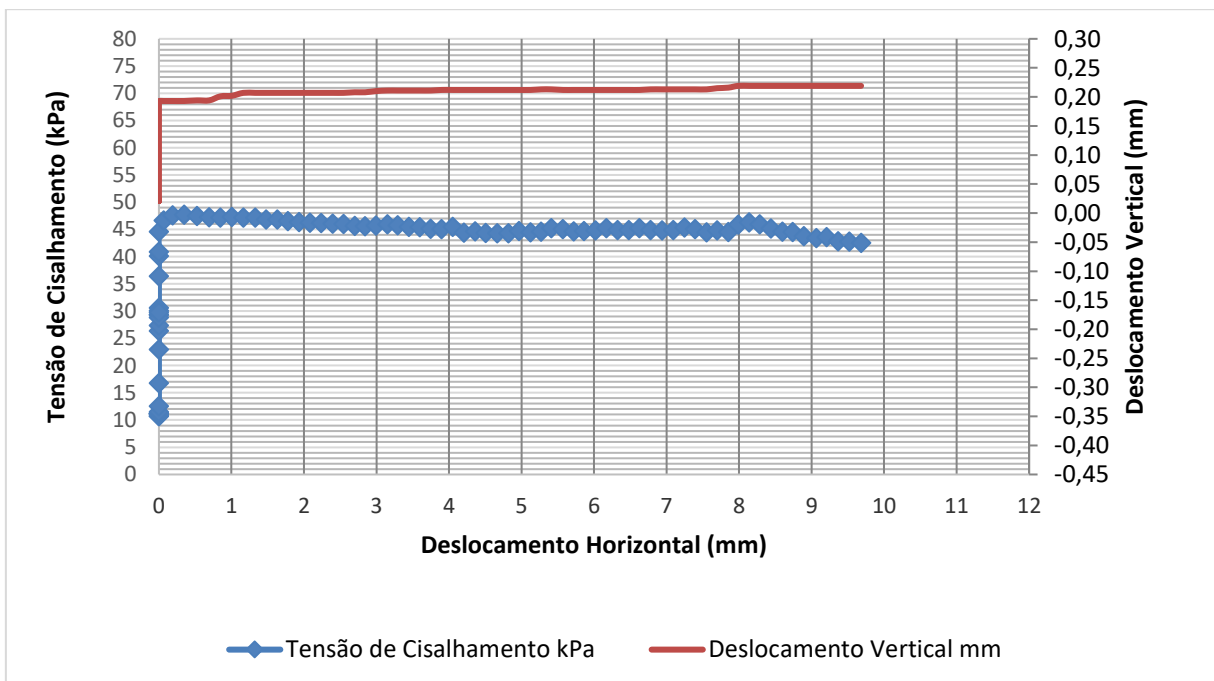
**Figura 4.9 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.2-E**



**Figura 4.10 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.8-Q**



**Figura 4.11 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.9-R**



O ensaio cujo resultado está apresentado na Figura 4.9, teve como tensão cisalhante máxima o valor de 45,18 kPa, que foi atingido ao deslocamento de 1,628 mm, o da Figura 4.10 apresentou tensão cisalhante máxima de 45,56 kPa ao deslocamento de 1,178 mm e o da

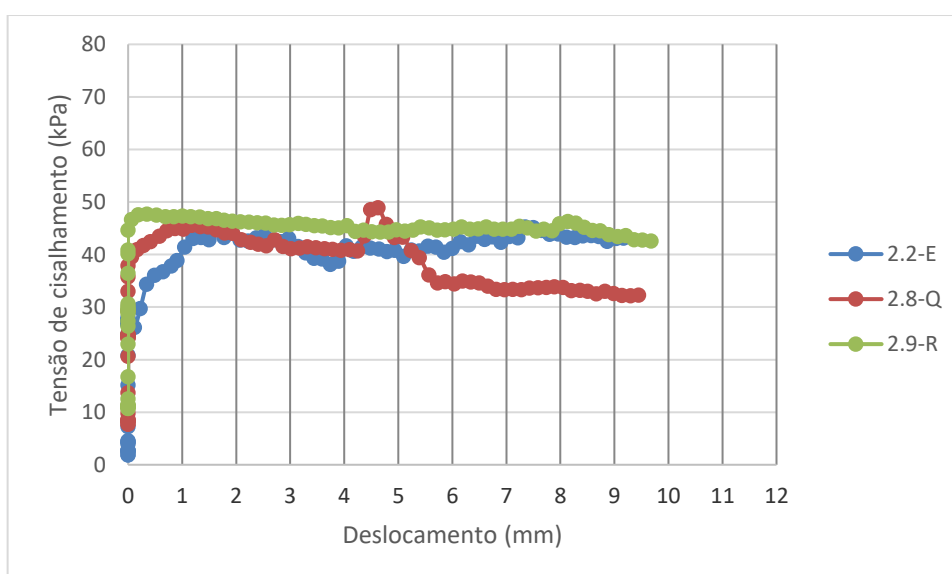
Figura 4.11 apresentou tensão cisalhante máxima de 47,70 kPa, atingida ao deslocamento de 0,347 mm.

Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber uma variação da rugosidade das superfícies entre 0,021 mm e 0,219 mm, sendo diferentes para cada corpo de prova, e apresentando maior variação quando comparada ao CPs com carregamento de 25 kg, assim, entende-se que houve maior penetração do látex nos vazios do concreto com o aumento do carregamento horizontal, tornando as rugosidades mais difíceis de serem vencidas.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova é perceptível um comportamento de “escalada” do deslocamento vertical, que é seguido de uma redução após o início de deslocamento horizontal.

Quando plotados todos em um gráfico só, como apresentado da Figura 4.12, pode-se notar que, apesar do ensaio 2.8-Q ter tido um padrão diferente com um outro pico de tensão de cisalhamento ao longo do ensaio, que pode ser atribuído ao fim de uma rugosidade maior representada no deslocamento vertical, percebe-se que todos apresentaram um pico inicial de tensão seguido de sua queda, bem como uma tendência de estabilização da tensão ao fim do ensaio.

**Figura 4.12 – Curva tensão x deslocamento concreto-látex 50 kg**



Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de concreto, CPs 2.3, 2.4 e 2.5, ensaiados contra 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, F, J e L, sob um carregamento normal de 75 kg, podem ser observados nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15.

Figura 4.13 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.3-F

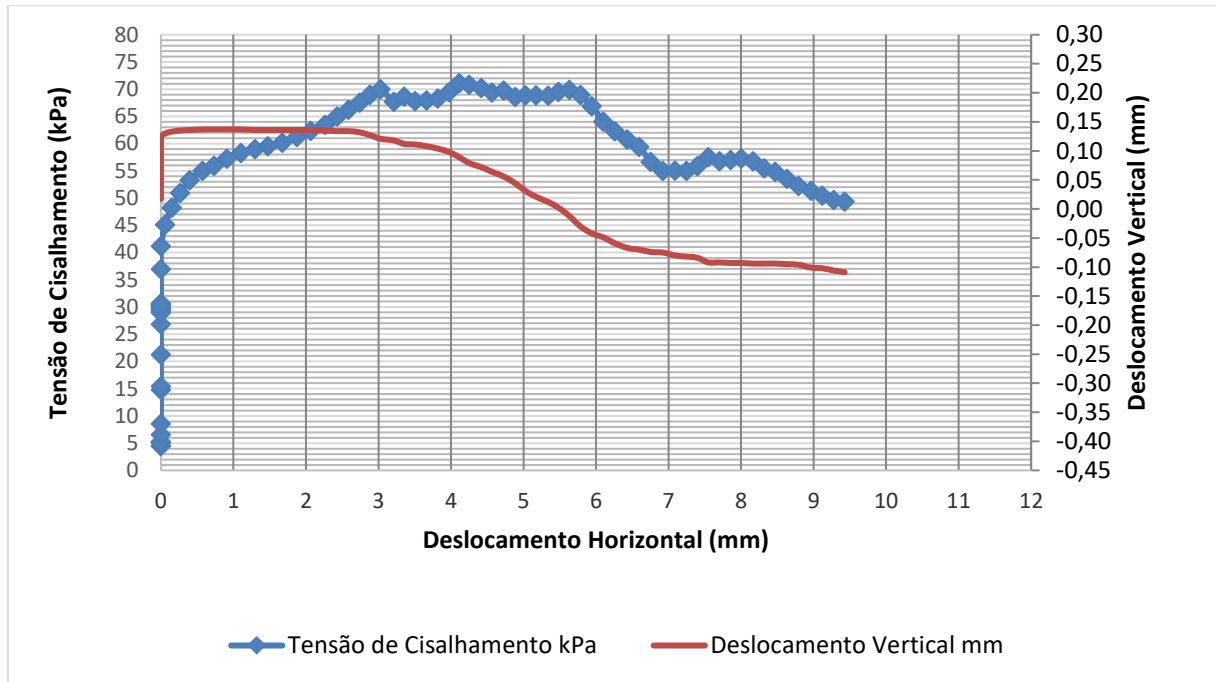
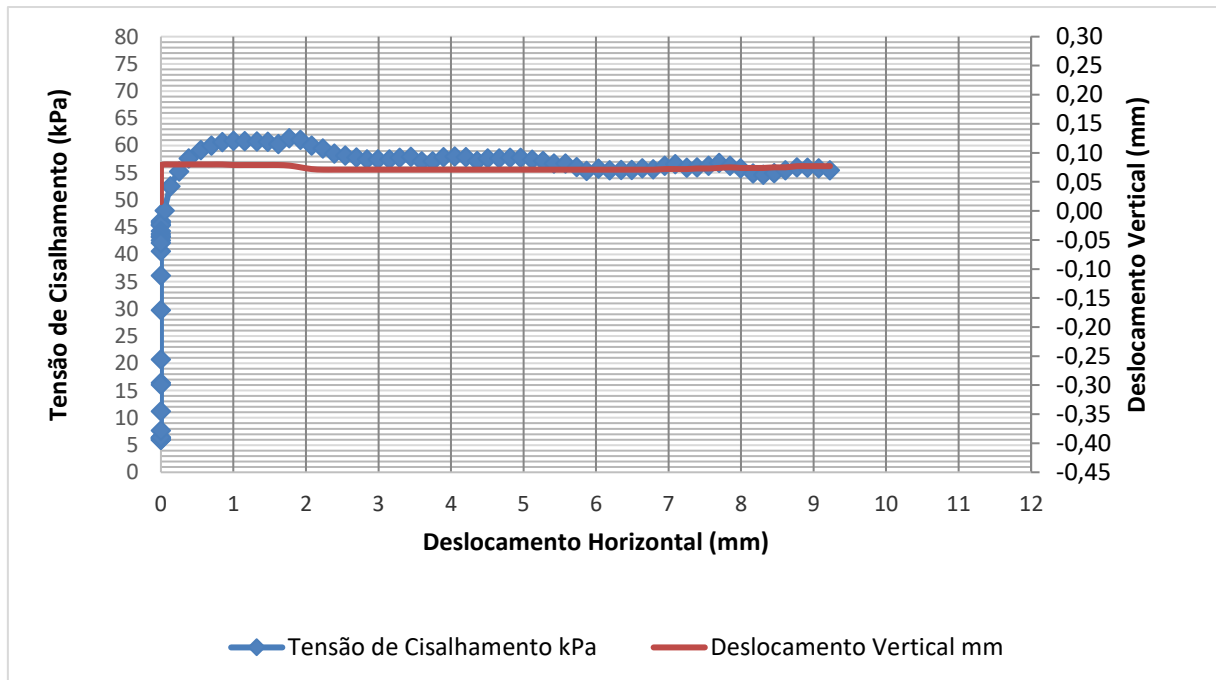
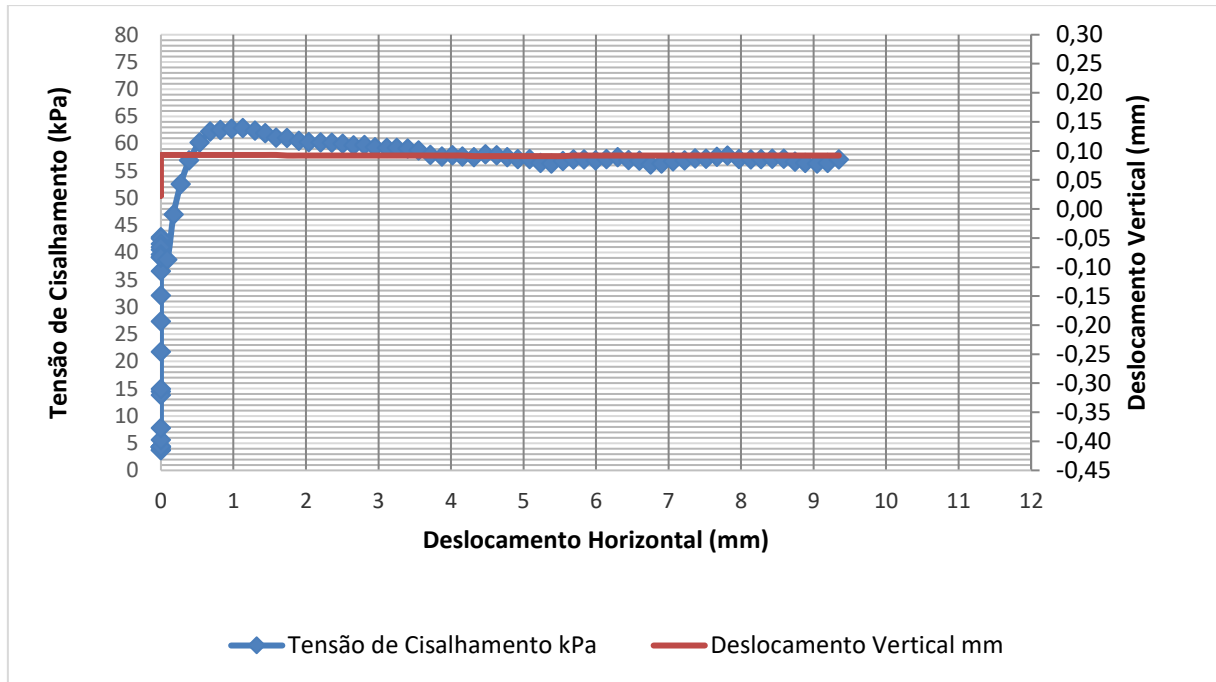


Figura 4.14 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.4-J



**Figura 4.15 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.5-L**



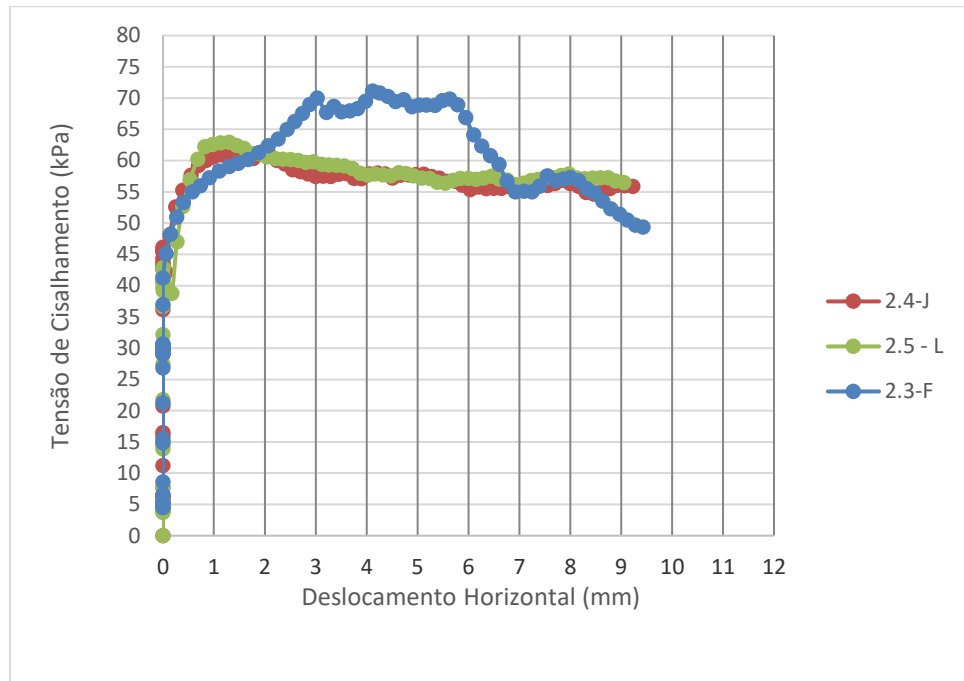
O ensaio com resultados representados na Figura 4.13 teve como tensão cisalhante máxima o valor de 70,00 kPa, que foi atingido ao deslocamento de 3,027 mm, o da Figura 4.14 apresentou tensão cisalhante máxima de 61,33 kPa ao deslocamento de 1,770 mm e o da Figura 4.15 apresentou tensão cisalhante máxima considerada de 62,90 kPa, atingida ao deslocamento de 1,129 mm, visto que nesse caso a tensão continua ainda crescendo, porém percebe-se que neste ponto houve a tensão máxima em um intervalo de constância da tensão vertical, atribuindo que o outro pico ocorre devido a irregularidade da superfície.

Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber variação da rugosidade das superfícies entre 0,015 mm e 0,093 mm, para os CPs 2.4-J e 2.5-L, e variação de -0,109 mm a 0,137 mm para o CP 2.3-F. Nos corpos de prova com menor variação da rugosidade, pode ter havido maior alisamento da superfície, tornando-as menos rugosas, e permitindo menor penetração do látex nos vazios do concreto. Já o corpo de prova com maior variação nos resultados é resultante de uma superfície muito mais rugosa, com deslocamento vertical acentuado, permitindo maior penetração do látex nos vazios do concreto devido ao aumento do carregamento horizontal, tornando as rugosidades mais difíceis de serem vencidas.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova, é perceptível um comportamento de “escalada” do deslocamento vertical, que é seguido de uma redução após o início de deslocamento horizontal.

Quando plotados todos em um gráfico só, como apresentado da Figura 4.16, pode-se notar que, apesar do ensaio 2.3-F ter tido padrão diferente com um pico de tensão de cisalhamento ao longo do ensaio – o que pode ser atribuído a irregularidade da superfície –, percebe-se que todos apresentaram tendência de estabilização da tensão ao fim do ensaio.

**Figura 4.16 – Curva tensão x deslocamento concreto-látex 75 kg**

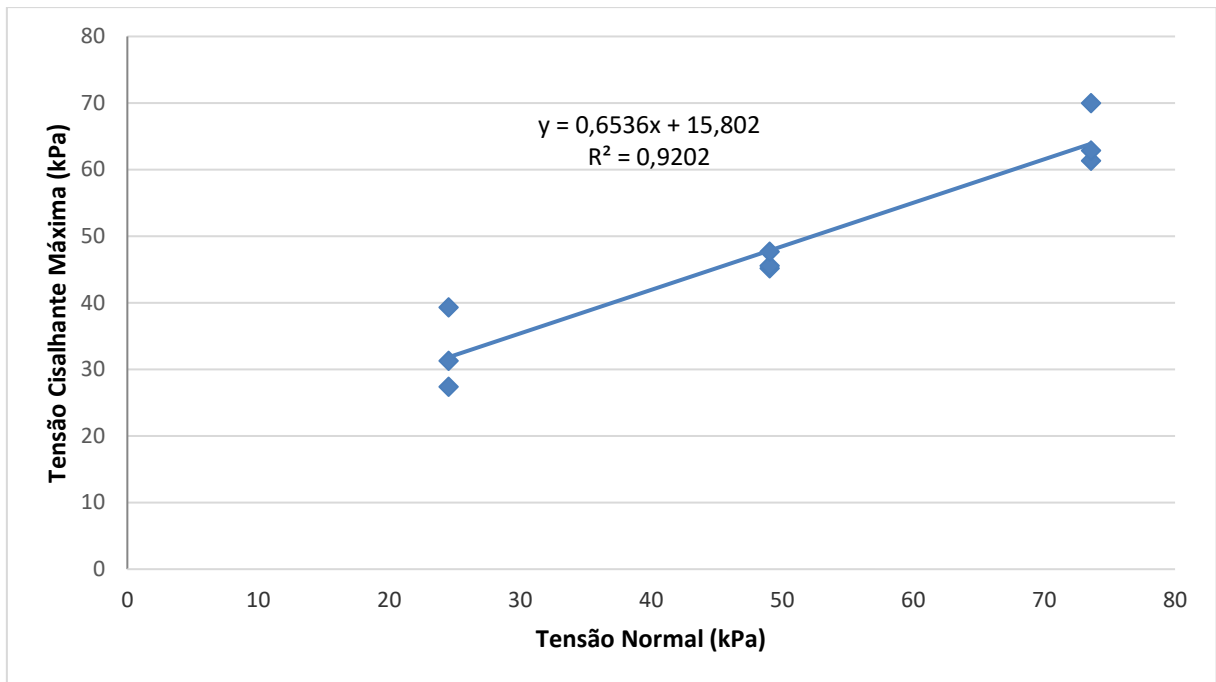


Para a obtenção do gráfico entre a tensão de cisalhamento máxima e a tensão normal aplicada (Figura 4.17), foram plotados os dados de tensão cisalhamento máximo e tensão normal, presentes na Tabela 4.21, a qual representa um resumo dos resultados.

**Tabela 4.21 – Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal concreto-látex**

Tensão Normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)
24,525	39,34
24,525	31,32
24,525	27,40
49,050	45,18
49,050	45,56
49,050	47,70
73,575	70,00
73,575	61,33
73,575	62,90

**Figura 4.17 – Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal**



Por meio da Figura 4.17, obtém-se a Envoltória de Coulomb, sob a Equação 4.1, que pode ser interpretada como  $\tau_f = c_u + \sigma_n \cdot \tan \varphi$ , sendo  $\tau_f$  a máxima resistência ao cisalhamento,  $\sigma_n$  a tensão normal, e  $c_u$  a coesão.

$$y = 0,6536 \cdot x + 15,802 \quad (4.1)$$

Portanto, o valor de  $\tan \varphi$  correspondente ao coeficiente de atrito é de 0,6536 e tem-se o valor de 15,802 kPa, que em solos seria considerado como a coesão, porém, no presente estudo, caracteriza-se como resistência inicial conferida pelo “encaixe” entre a rugosidade das superfícies de concreto e látex, a dilatância, bem como pode ser composto também pelas forças adesivas existentes entre as rugosidades da superfície de látex e do concreto.

#### 4.2.2 Ensaio do concreto úmido

Os corpos de prova de concreto com superfície de contato com os CPs de látex foram ensaiados com carregamentos normais de 25 kg, 50 kg, e 75 kg, que ao considerar a aceleração da gravidade de 9,81 m/s<sup>2</sup> e a área de contato entre os corpos de 0,01 m<sup>2</sup>, tem-se que as tensões normais aplicadas foram respectivamente de 24,53 kPa, 49,05 kPa e 73,58 kPa.

Os CPs de concreto para este ensaio ficaram imersos em água por 24 horas, sendo retirados apenas no momento de montagem da estrutura de ensaio.

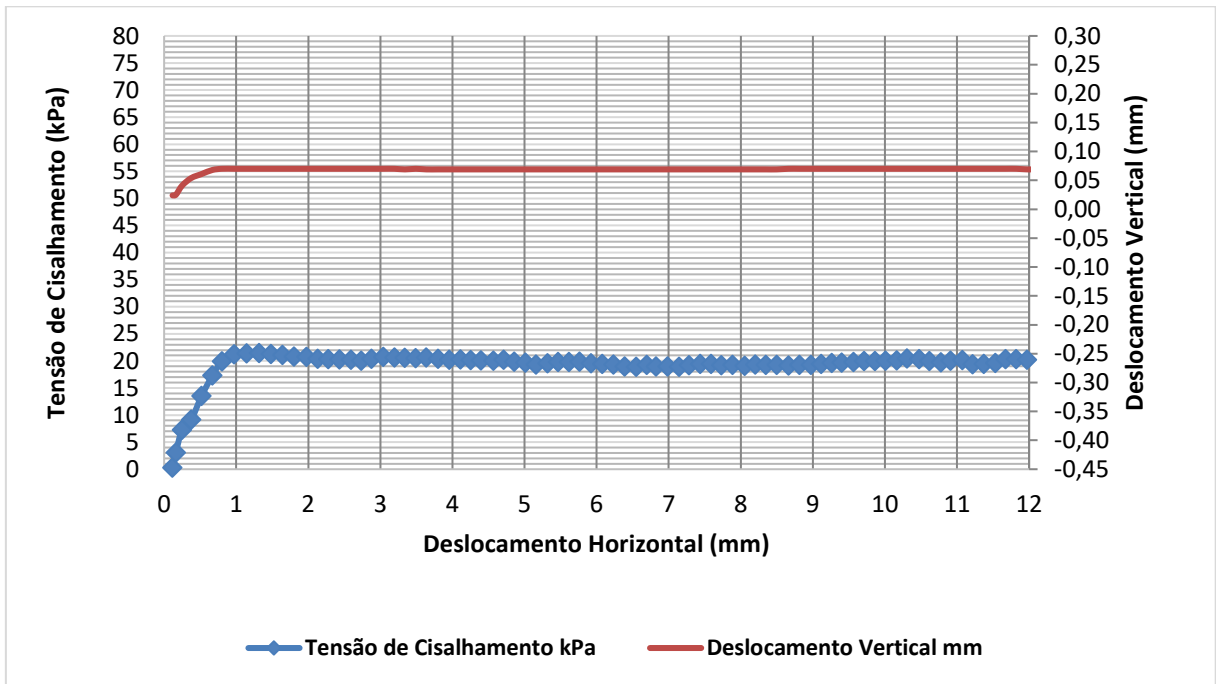
Na análise dos valores da tensão cisalhante máxima, feita graficamente, buscou-se reconhecer um ponto de pico de tensão após o qual há uma queda na tensão, conforme a teoria de Head (1992), de que o deslocamento relativo da parte superior sobre a inferior acontece gradualmente enquanto a força cisalhante (que se torna tensão quando distribuída pela área de contato) aumenta, e que quando o ponto máximo (tensão de cisalhamento máxima) é atingido, significa que a maior resistência foi oferecida pela interação entre as superfícies para sustentar o plano de deslizamento e após ser atingida a resistência ao cisalhamento cai, e mostra que houve a ruptura entre as superfícies.

Nestes gráficos também foi plotado o deslocamento vertical no eixo secundário das ordenadas. No ensaio de corpos de provas de solo, na prensa de cisalhamento, essa medição representa a variação de volume no cisalhamento. Neste caso, como está sendo estudada a interação entre superfícies, o deslocamento vertical pode representar a rugosidade da superfície ensaiada, visto que um corpo de prova ao deslizar sobre o outro, segundo a teoria de Rowe (1962), apresenta comportamento entre as superfícies em contato semelhante a duas “serras encaixadas” onde, para ocorrer a primeira ruptura horizontal, é necessário que haja um deslocamento vertical para ultrapassar o primeiro pico do encaixe e, após isso, as faces retornam ao contato original e é necessária que seja mantida uma tal força que permita o vencimento desses obstáculos a fim de continuar o deslocamento horizontal.

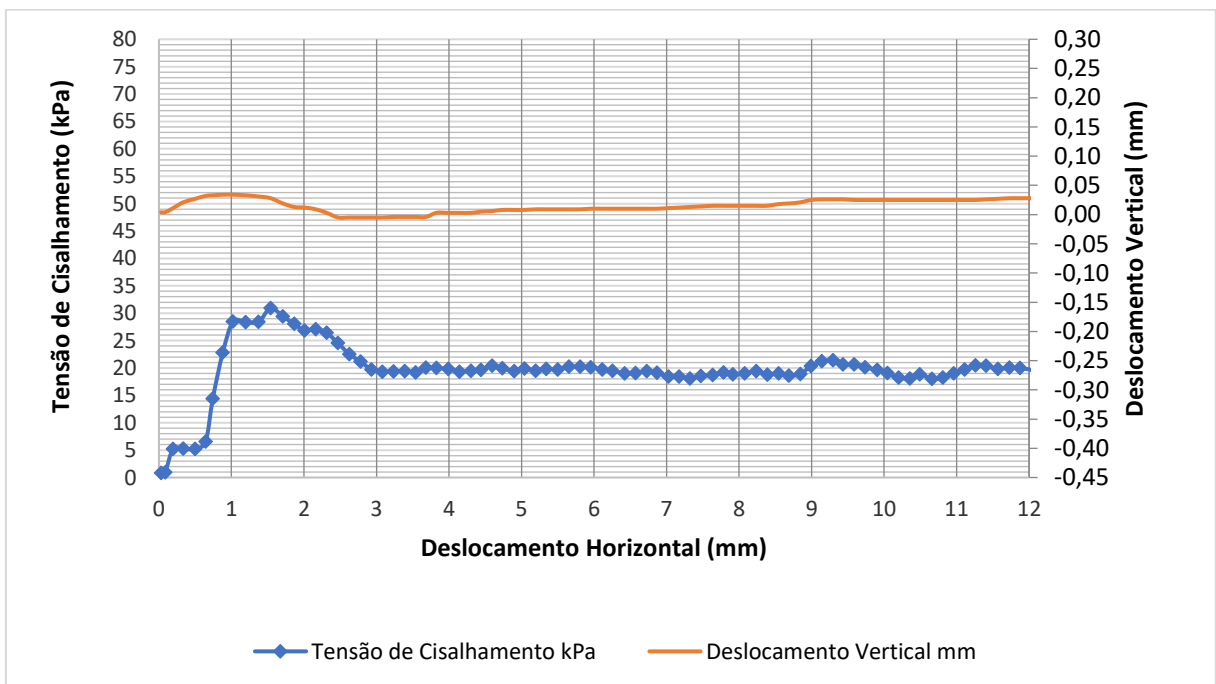
Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de concreto úmido, CPs 2.1, 2.6 e 2.7, ensaiados com 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, D, O e P, sob um carregamento normal de 25 kg, podem ser observados nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20.



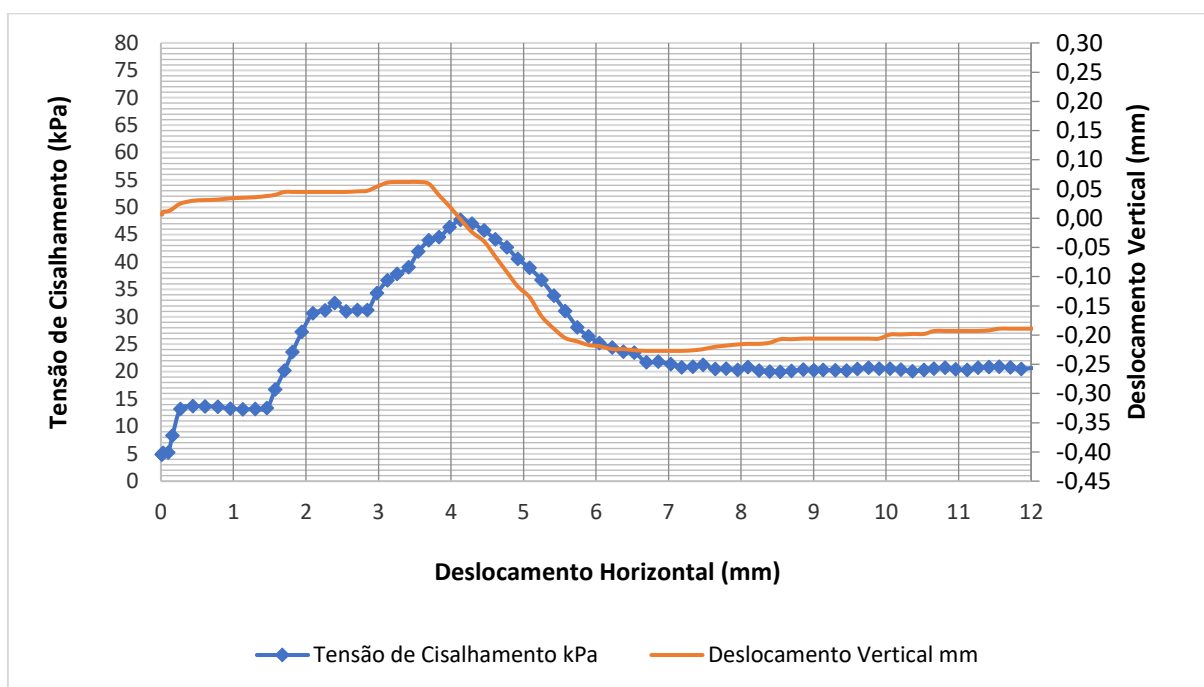
**Figura 4.18 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.1-D úmido**



**Figura 4.19 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.6-O úmido**



**Figura 4.20– Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.7-P úmido**



O ensaio com resultados expressos na Figura 4.18 teve como tensão cisalhante máxima o valor de 21,18 kPa, que foi atingido ao deslocamento de 0,974 mm, o da Figura 4.19 apresentou tensão cisalhante máxima de 28,44 kPa ao deslocamento de 1,021 mm e o da Figura 4.20 apresentou tensão cisalhante máxima considerada de 32,53 kPa, atingida ao deslocamento de 2,399 mm. Nos dois primeiros gráficos (Figuras 4.18 e 4.19), a tensão máxima foi identificada como o ponto de pico de tensão seguido de discreta queda, já no terceiro gráfico (Figura 4.20), o primeiro pico seguido de queda acontece com uma tensão ainda muito baixa, provavelmente em função de alguma condição de superfície que culminou no escorregamento do CP, visto que nessa situação a tensão quase constante causa um deslocamento horizontal, porém, após isso, é perceptível um aumento significativo na tensão seguido de queda, onde foi determinado o pico como tensão máxima cisalhante.

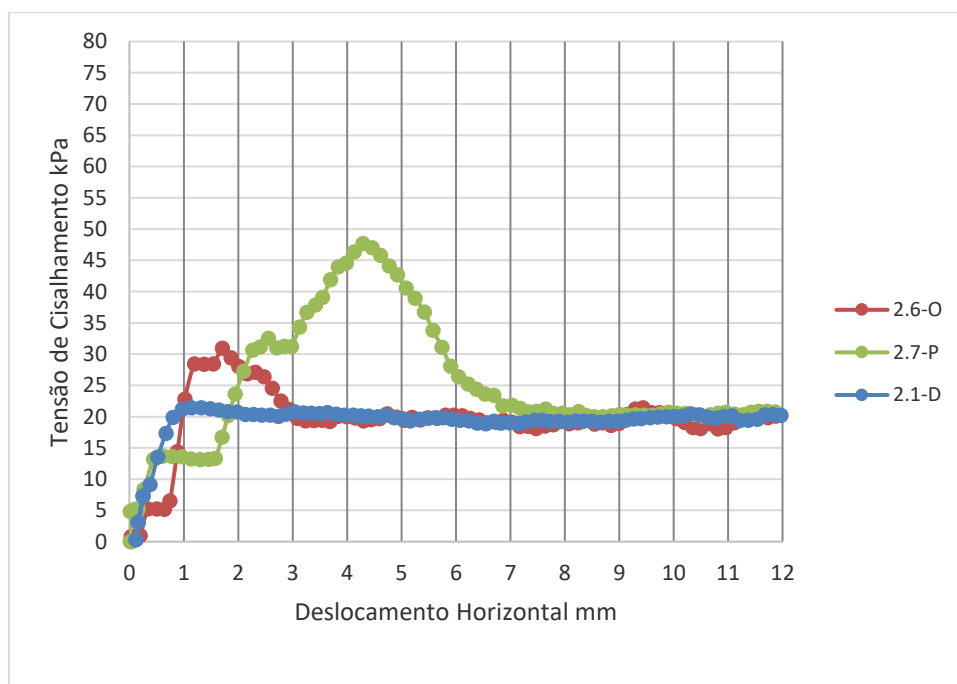
Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber variação da rugosidade das superfícies entre -0,005 mm e 0,070 mm, para os CPs 2.1-D e 2.6-O, e variação de -0,227 mm a 0,062 mm para o CP 2.3-F. Nos corpos de prova com menor variação da rugosidade, pode ter havido um alisamento maior da superfície, tornando-as menos rugosas, permitindo, dessa forma, menor penetração do látex nos vazios do concreto. Já o corpo de prova com maior variação, apresentou-se com uma superfície muito mais rugosa, com deslocamento vertical acentuado, permitindo maior penetração do látex nos vazios do concreto devido ao aumento do carregamento horizontal, tornando as rugosidades mais difíceis de serem vencidas. No

entanto, quando o mesmo CP foi ensaiado em condição de superfície seca, tal comportamento não foi obtido, portanto supõe-se que a superfície sofreu mudanças após o umedecimento, podendo ter havido retirada de partículas pela água.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova úmidos, não é perceptível o comportamento de “escalada” do deslocamento vertical seguido de uma redução após o início de deslocamento horizontal, como acontece nos CPs secos, visto que a água lubrifica a superfície, reduzindo o atrito e, por consequência, o deslocamento horizontal ocorre assim que uma força cisalhante é aplicada.

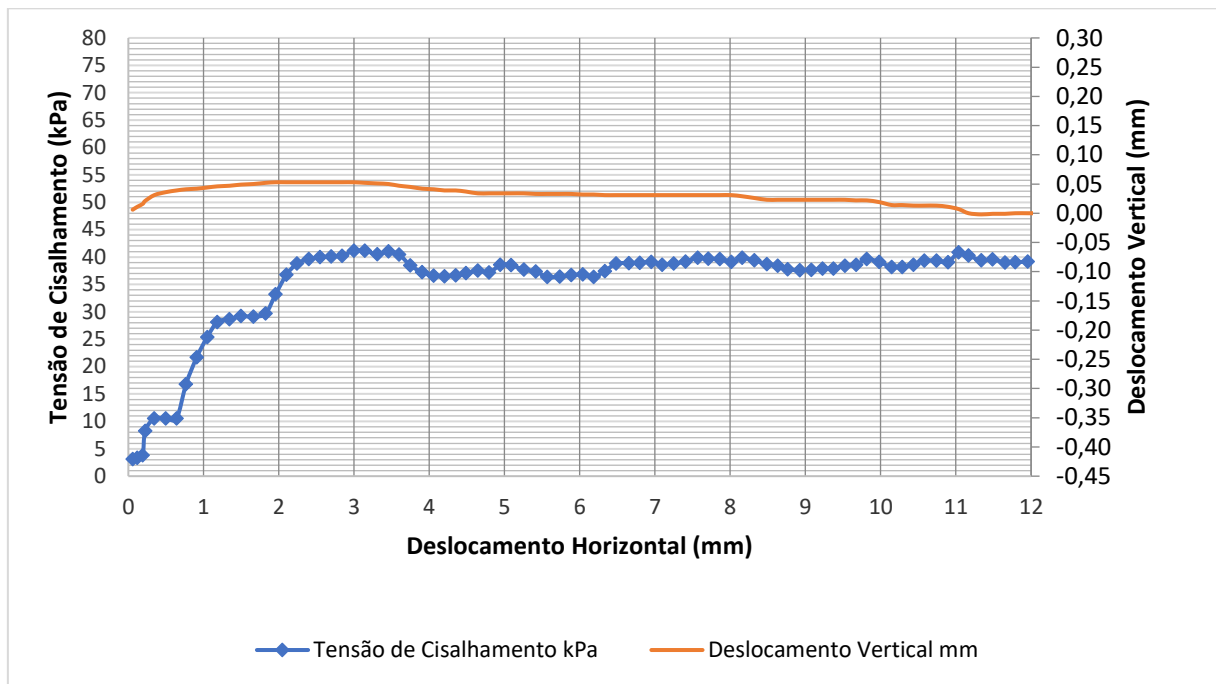
Quando plotados todos em um único gráfico, como apresentado da Figura 4.21, pode-se notar que, apesar do ensaio 2.7-P ter tido um padrão diferente com um pico de tensão de cisalhamento mais alto ao longo do ensaio, o qual pode ser atribuído a irregularidade da superfície, percebe-se que todos apresentaram tendência de estabilização da tensão ao fim do ensaio.

**Figura 4.21 – Curva tensão x deslocamento concreto úmido-látex 25 kg**

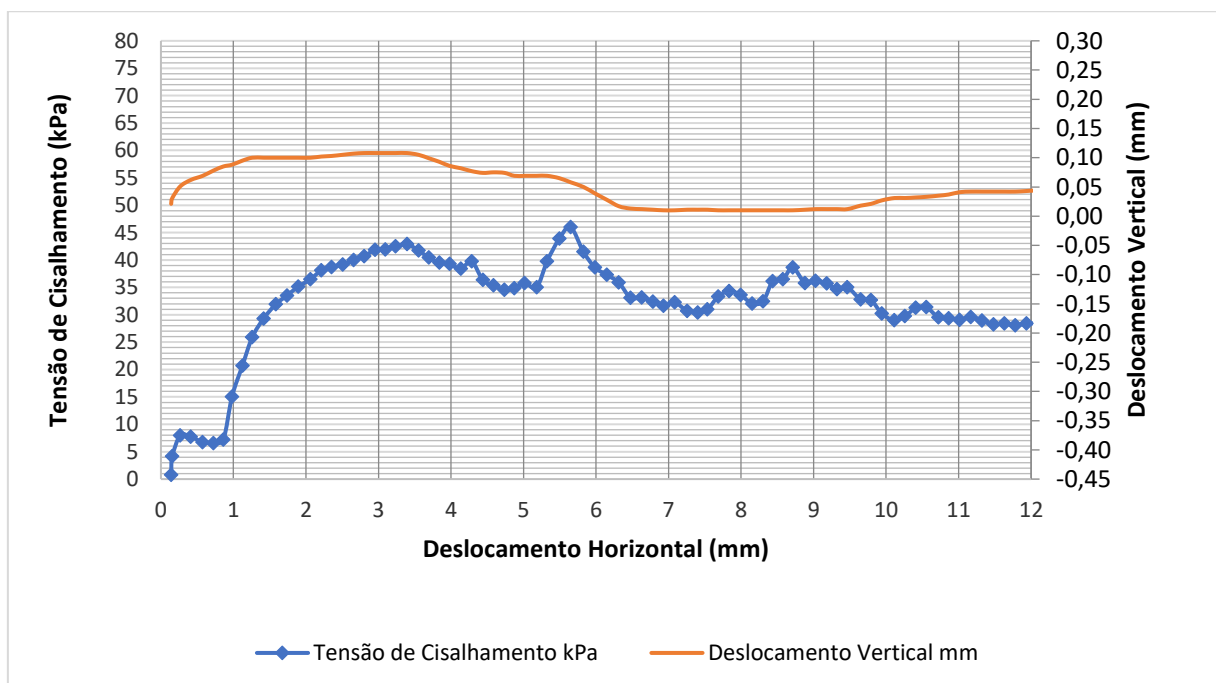


Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de concreto úmido, CPs 2.2, 2.8 e 2.9, ensaiados contra 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, E, Q e R, sob um carregamento normal de 50 kg, podem ser observados nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24.

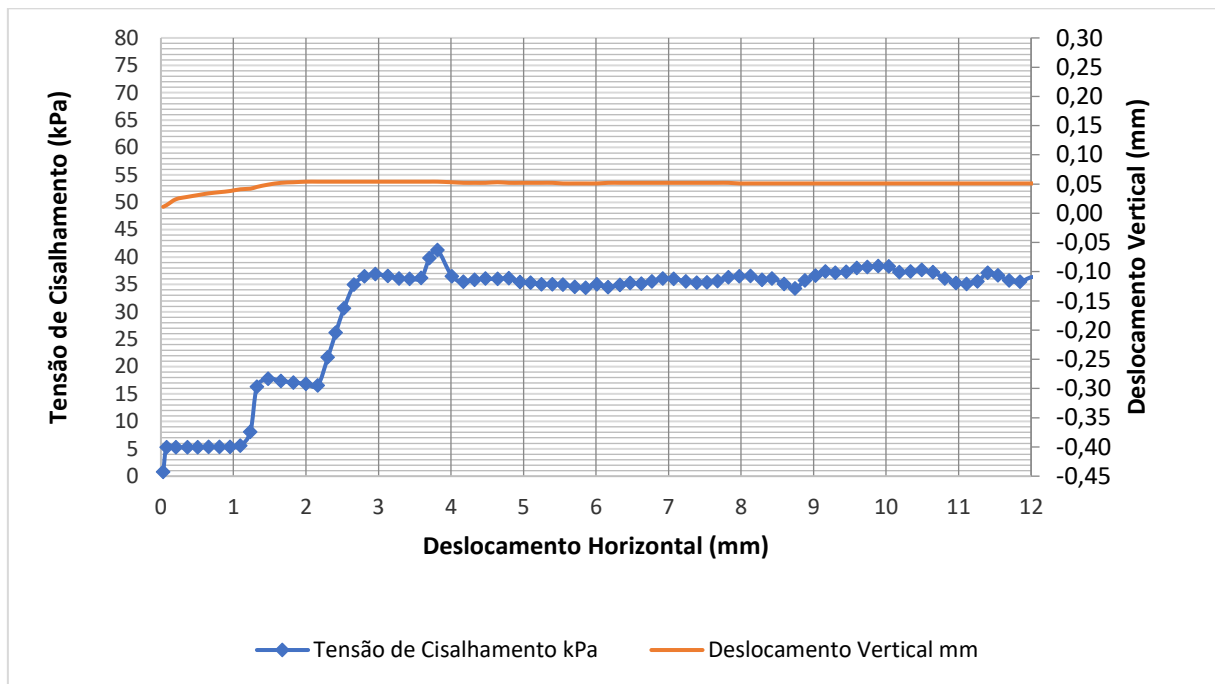
**Figura 4.22 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.2-E úmido**



**Figura 4.23 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.8-Q úmido**



**Figura 4.24 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.9-R úmido**



O ensaio cujos resultados estão apresentados na Figura 4.22, teve como tensão cisalhante máxima o valor de 41,15 kPa, que foi atingido ao deslocamento de 2,997 mm, o da Figura 4.23 apresentou tensão cisalhante máxima de 42,90 kPa ao deslocamento de 3,395 mm e o da Figura 4.24 apresentou tensão cisalhante máxima considerada de 36,90 kPa atingida ao deslocamento de 2,960 mm. Para a definição dos pontos de tensão máxima, foi seguindo o critério de primeiro ponto de pico após constância vertical (a partir de 3 repetições), visto que antes desse ponto definido ocorrem pontos seguidos de queda, mas isso em função de irregularidades da superfície, e não da obtenção da tensão máxima.

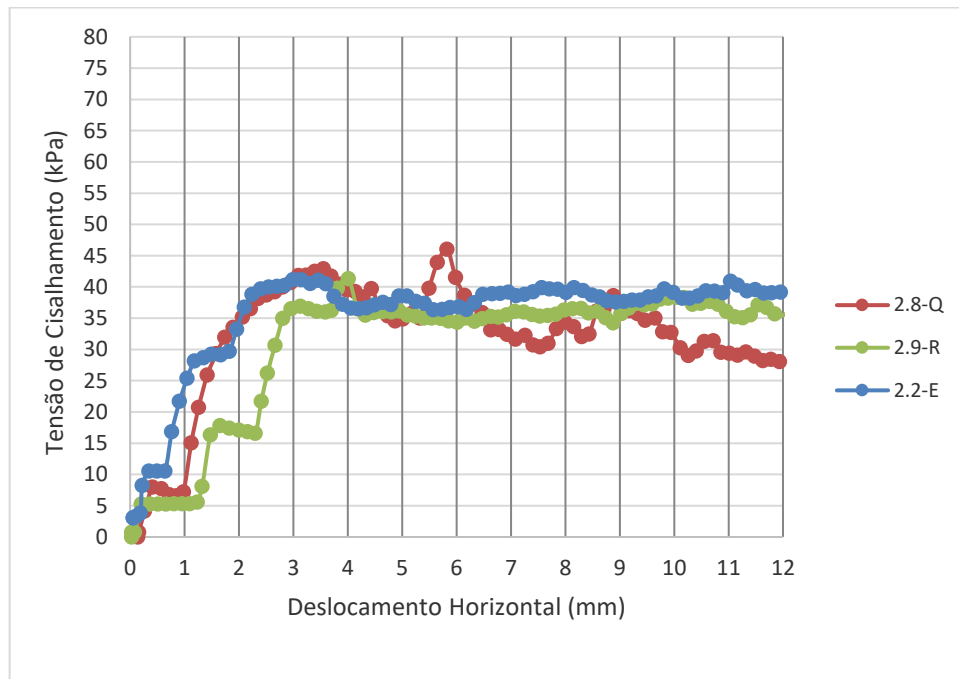
Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber variação da rugosidade das superfícies entre -0,002 mm e 0,054 mm, para os CPs 2.2-E e 2.9-R e variação de 0,010 mm a 0,108 mm para o CP 2.3-F. Nos corpos de prova com menor variação da rugosidade, pode ter havido maior alisamento das superfícies, tornando-as menos rugosas, permitindo menor penetração do látex nos vazios do concreto. Já o corpo de prova com maior variação, apresentou-se com uma superfície muito mais rugosa, com deslocamento vertical acentuado, permitindo uma maior penetração do látex nos vazios do concreto devido ao aumento do carregamento horizontal, tornando as rugosidades mais difíceis de se vencer, porém quando o mesmo CP foi ensaiado em condição de superfície seca tal comportamento não foi obtido,

portanto, supõe-se que a superfície sofreu mudanças após o umedecimento, podendo ter havido retirada de partículas pela água.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova úmidos, não é perceptível o comportamento de “escalada” do deslocamento vertical seguido de redução após o início de deslocamento horizontal, como acontece nos CPs secos, visto que a água lubrifica a superfície, reduzindo o atrito, e por consequência o deslocamento horizontal ocorre assim que uma força cisalhante é aplicada.

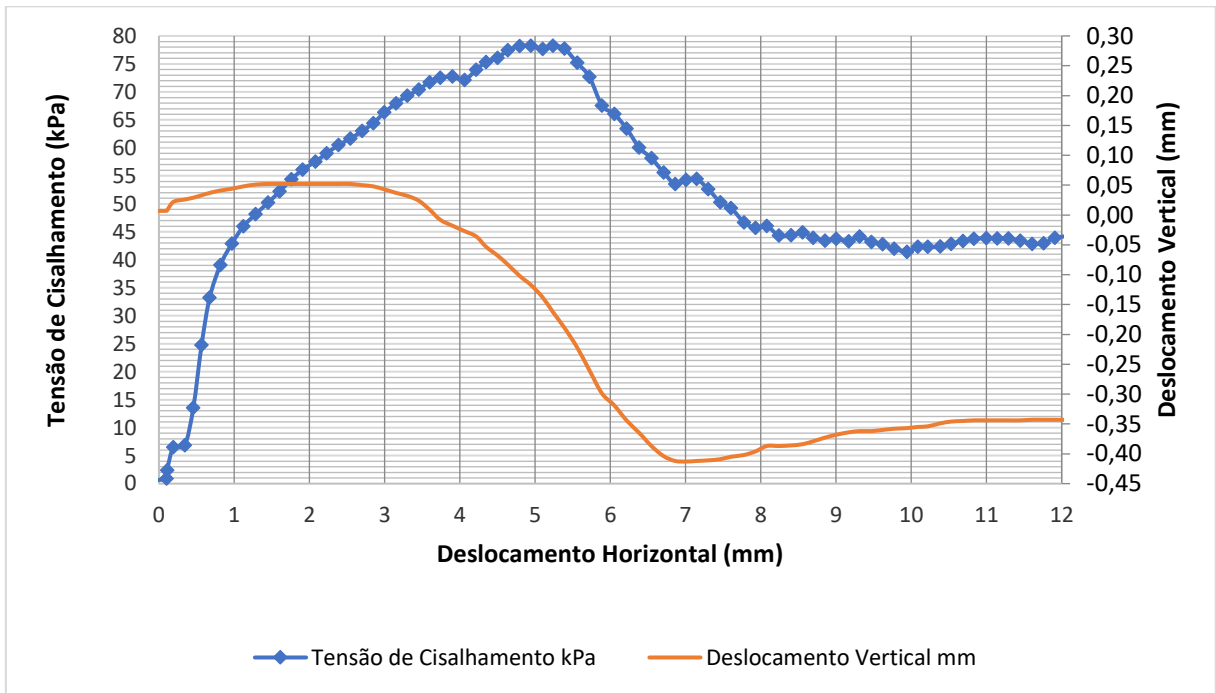
Quando plotados todos em um gráfico só, como apresentado da Figura 4.25, pode-se notar que todos apresentaram um comportamento semelhante no início e uma tendência de estabilização da tensão ao fim do ensaio.

**Figura 4.25 – Curva tensão x deslocamento concreto úmido-látex 50 kg**

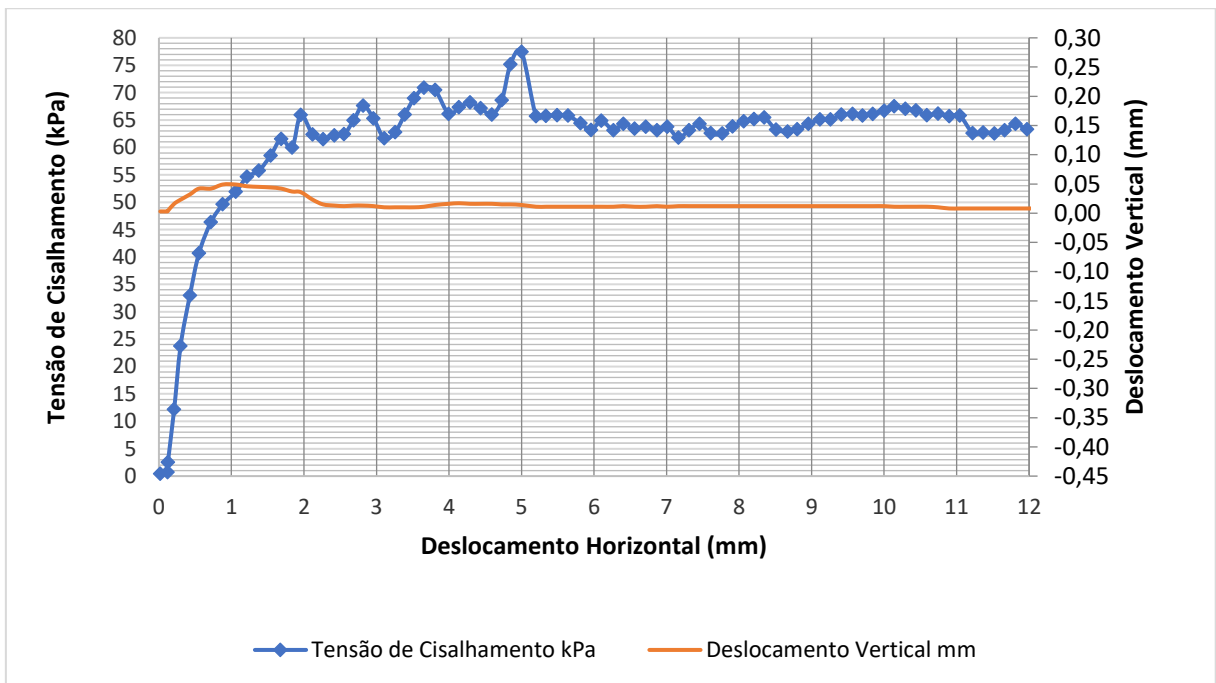


Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de concreto úmido, CPs 2.3, 2.4 e 2.5, ensaiados contra 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, F, J e L, sob um carregamento normal de 75 kg, podem ser observados nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28.

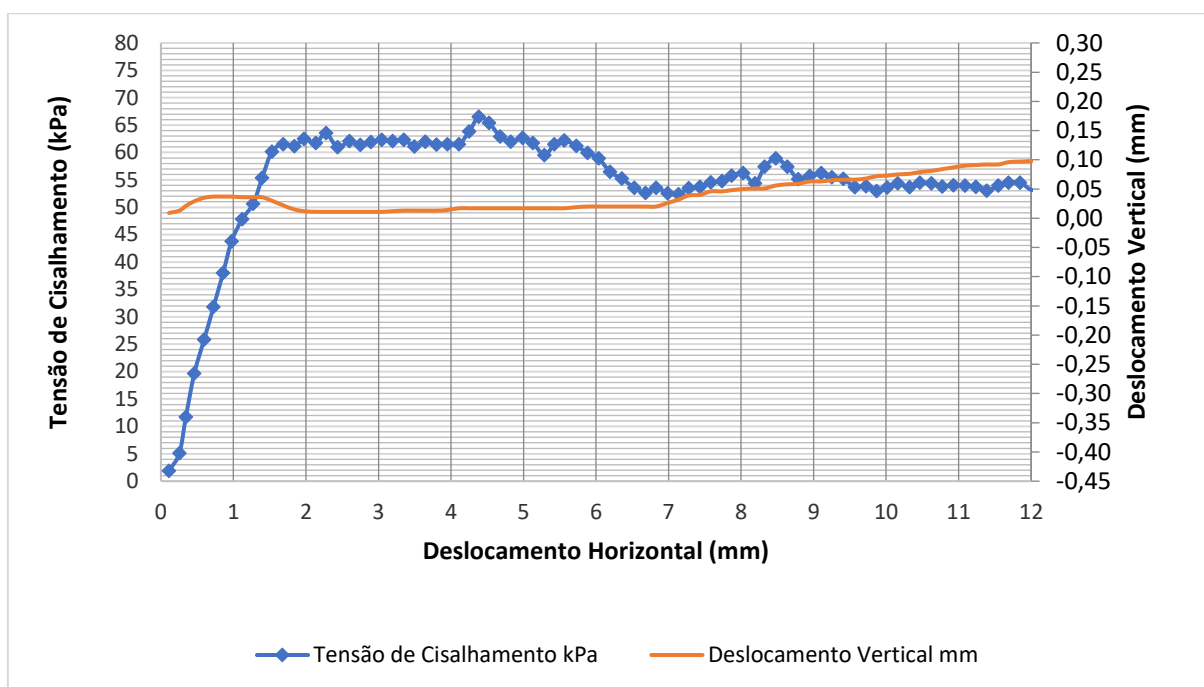
**Figura 4.26 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.3-F úmido**



**Figura 4.27 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.4-J úmido**



**Figura 4.28 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2.5-L úmido**



O ensaio cujos resultados estão apresentados na Figura 4.26, teve como tensão cisalhante máxima o valor de 61,64 kPa, que foi atingido ao deslocamento de 2,543 mm, o da Figura 4.27 apresentou tensão cisalhante máxima de 61,55 kPa ao deslocamento de 1,686 mm e o da Figura 4.28 apresentou tensão cisalhante máxima considerada de 61,46 kPa, atingida ao deslocamento de 1,685 mm. Para a definição dos pontos de tensão máxima, na Figura 2.26 foi seguido o critério de primeiro ponto de pico após uma constância vertical (a partir de 3 repetições), visto que antes desse ponto definido ocorrem pontos seguidos de queda, mas isso em função de irregularidades da superfície, e não da obtenção da tensão máxima, porém nos outros gráficos foi possível a visualização de um ponto de pico de tensão seguido por queda.

Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber variação da rugosidade das superfícies entre 0,003 mm e 0,049 mm, para o CP 2.4-J, para o CP 2.5-L uma variação de 0,009 mm a 0,109 mm e para o CP 2.3-F uma variação de -0,413 mm a 0,052 mm. No corpo de prova com menor variação da rugosidade, pode ter havido maior alisamento da superfície, tornando-a menos rugosa, e permitindo menor penetração do látex nos vazios do concreto. Já os corpos de prova com maior variação, apresentam-se com superfície muito mais rugosa, com deslocamento vertical acentuado, permitindo maior penetração do látex nos vazios do concreto devido ao aumento do carregamento horizontal, tornando as rugosidades mais difíceis de serem vencidas. Porém, quando o CP 2.5-L foi ensaiado em condição de superfície

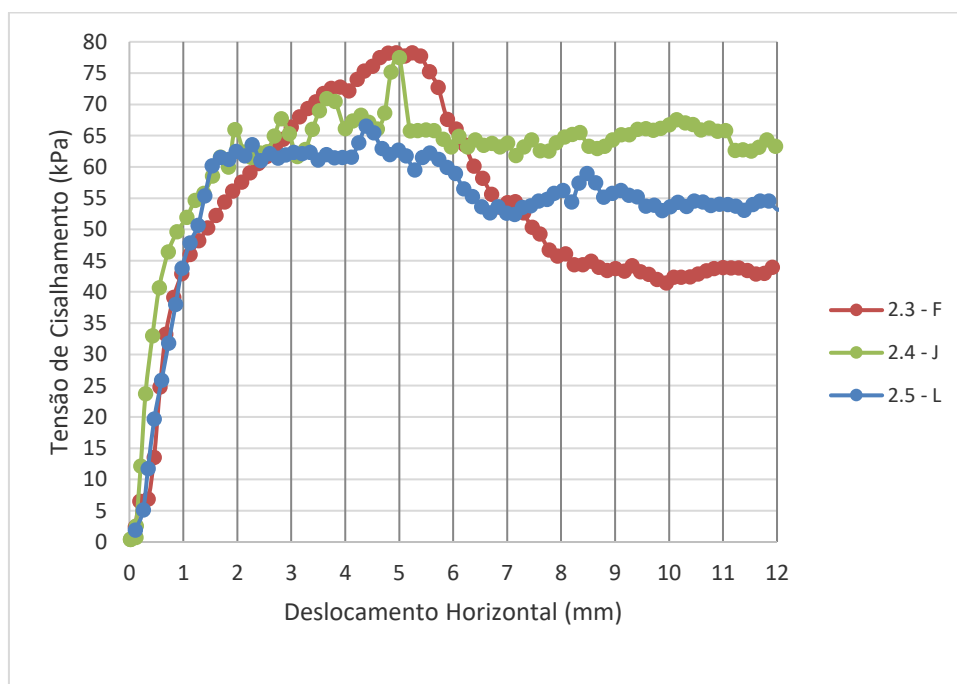


seca, tal comportamento não foi obtido, portanto supõe-se que a superfície sofreu mudanças após o umedecimento, podendo ter havido retirada de partículas pela água.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova úmidos, não é perceptível um comportamento de “escalada” do deslocamento vertical seguido de redução após o início de deslocamento horizontal, como acontece nos CPs secos, visto que a água lubrifica a superfície, reduzindo o atrito e, por consequência, o deslocamento horizontal ocorre assim que uma força cisalhante é aplicada.

Quando plotados todos em um mesmo gráfico, como apresentado da Figura 4.29, pode-se notar que todos apresentaram comportamento semelhante no início e tendência de estabilização da tensão ao fim do ensaio.

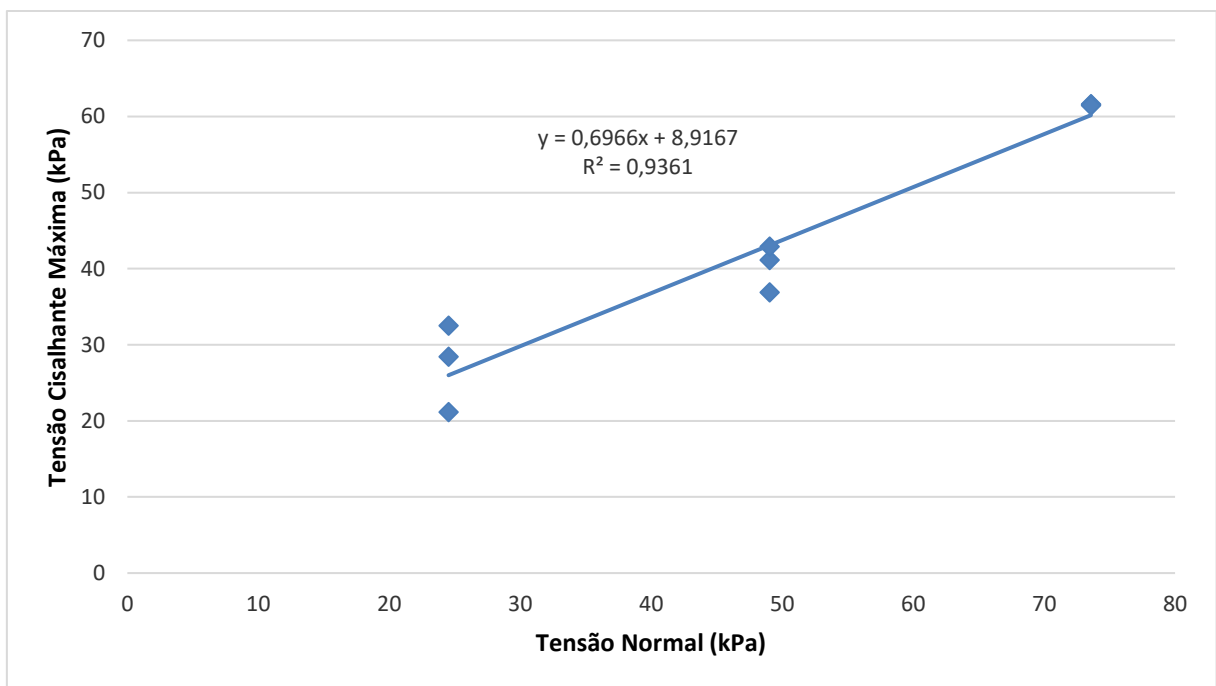
**Figura 4.29 – Curva tensão x deslocamento concreto úmido-látex 75 kg**



Para a obtenção do gráfico entre a tensão de cisalhamento máximo e a tensão normal aplicada para concreto úmido, Figura 4.30, foram plotados os dados de tensão cisalhamento máximo e tensão normal, presentes na Tabela 4.22, que representa um resumo dos resultados.

**Tabela 4.22 – Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal concreto úmido-látex**

Tensão Normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)
24,525	21,18
24,525	28,44
24,525	32,53
49,050	41,15
49,050	42,90
49,050	36,90
73,575	61,64
73,575	61,55
73,575	61,46

**Figura 4.30 – Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal**

Por meio da Figura 4.30 obtém-se a Envoltória de Coulomb, sob a Equação 4.2, que pode ser interpretada como  $\tau_f = c_u + \sigma_n \cdot \tan \varphi$ , sendo  $\tau_f$  a máxima resistência ao cisalhamento,  $\sigma_n$  a tensão normal, e  $c_u$  a coesão.

$$y = 0,6966 \cdot x + 8,9167 \quad (4.2)$$

Portanto, o valor de  $\tan \cdot \varphi$  correspondente ao coeficiente de atrito é de 0,6966 e tem-se o valor de 8,9167 kPa, que em solos seria considerado como a coesão, porém, no presente estudo, caracteriza-se como resistência inicial conferida pelo “encaixe” entre a rugosidade das superfícies de concreto e látex, a dilatância, bem como pode ser composto também pelas forças adesivas existentes entre as rugosidades da superfície de látex e do concreto.

### 4.2.3 Ensaio do ladrilho hidráulico seco

Os corpos de prova de ladrilho hidráulico com superfície de contato com os CPs de látex foram ensaiados de forma análoga aos CPs de concreto, com carregamentos normais de 25 kg, 50 kg, e 75 kg, que, ao se considerar a aceleração da gravidade de  $9,81 \text{ m/s}^2$  e a área de contato entre os corpos de  $0,01 \text{ m}^2$ , tem-se que as tensões normais aplicadas foram respectivamente de 24,53 kPa, 49,05 kPa e 73,58 kPa.

Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de ladrilho hidráulico, CPs 2, 9 e 8, ensaiados contra 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, B, M e N, sob um carregamento normal de 25 kg, podem ser observados nas Figuras 4.31, 4.32 e 4.33.

**Figura 4.31– Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2-B**

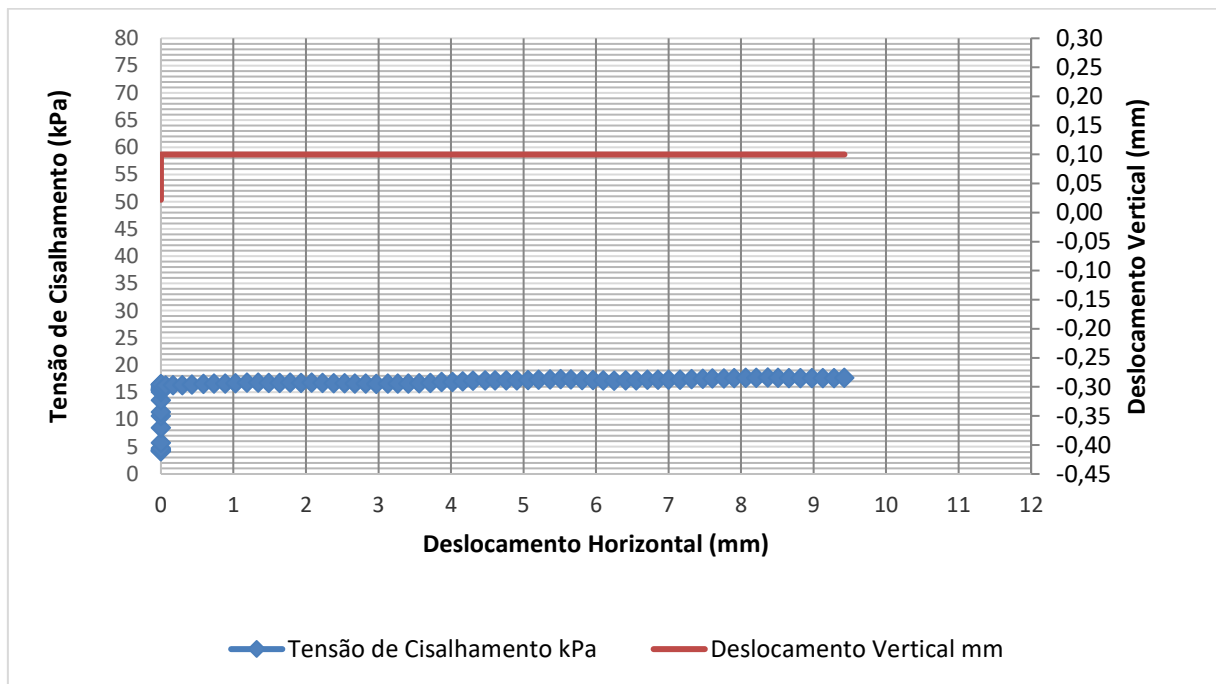


Figura 4.32 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP9-M

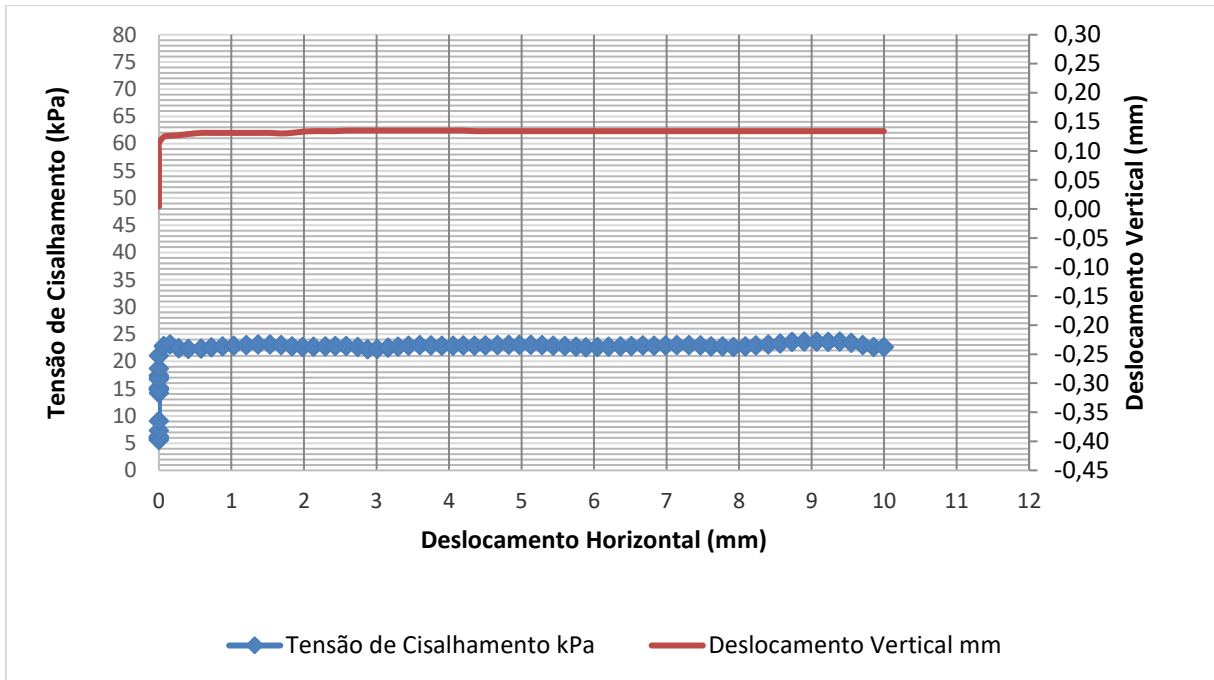
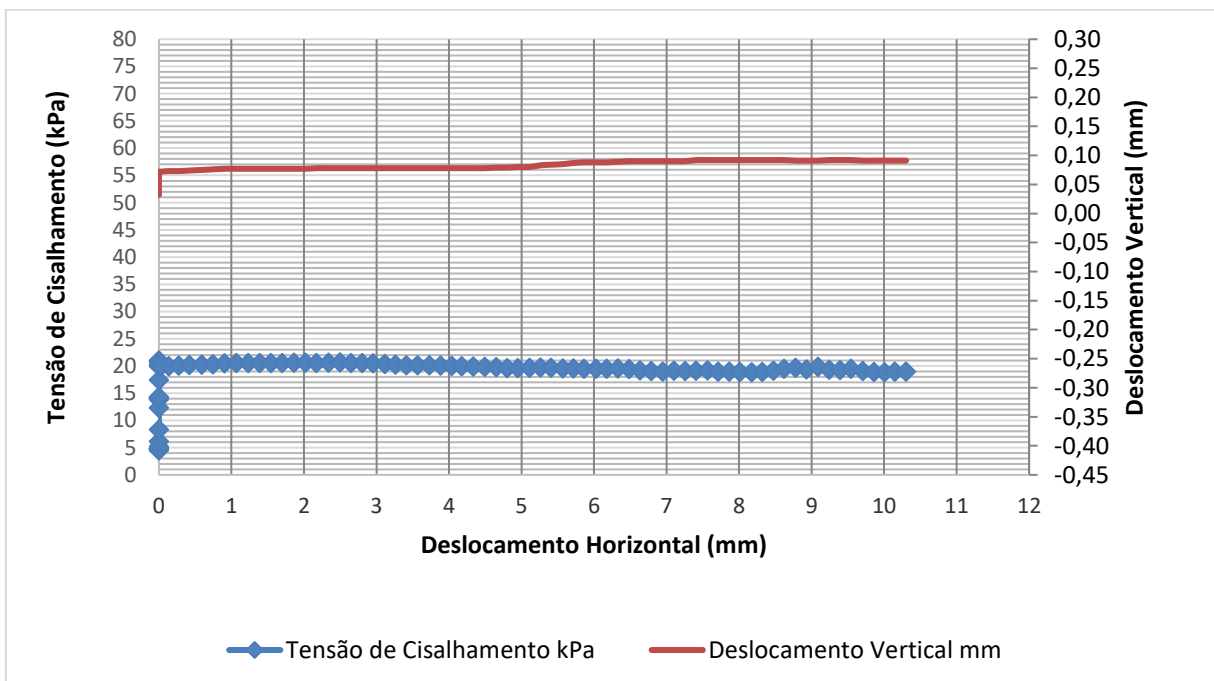


Figura 4.33 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP8-N



O resultado apresentado na Figura 4.31 teve como tensão cisalhante máxima o valor de 16,62 kPa, que foi atingido quando ainda não houve deslizamento, o da Figura 4.32 apresentou tensão cisalhante máxima de 23,13 kPa ao deslocamento de 0,157 mm e o da

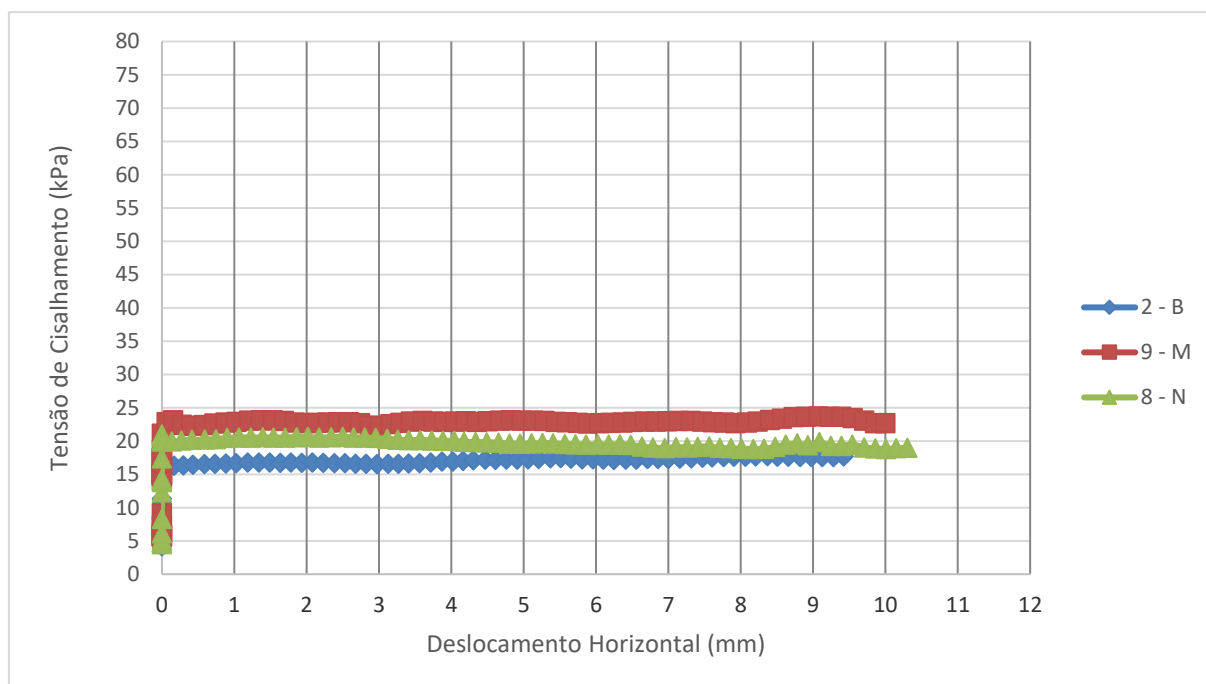
Figura 4.33 apresentou tensão cisalhante máxima de 20,98 kPa, atingida quando ainda não houve deslizamento.

Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber variação da rugosidade das superfícies entre 0,004 mm e 0,35 mm, sendo diferentes para cada corpo de prova, mas não apresentando grande variação, conforme o que se espera de superfícies de ladrilho hidráulico prensadas em formas, e apresentando baixa rugosidade da área de contato, embora sejam presentes sulcos que formam desenhos nas peças.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova é perceptível o comportamento de “escalada” do deslocamento vertical, que é seguido de uma redução após o início de deslocamento horizontal.

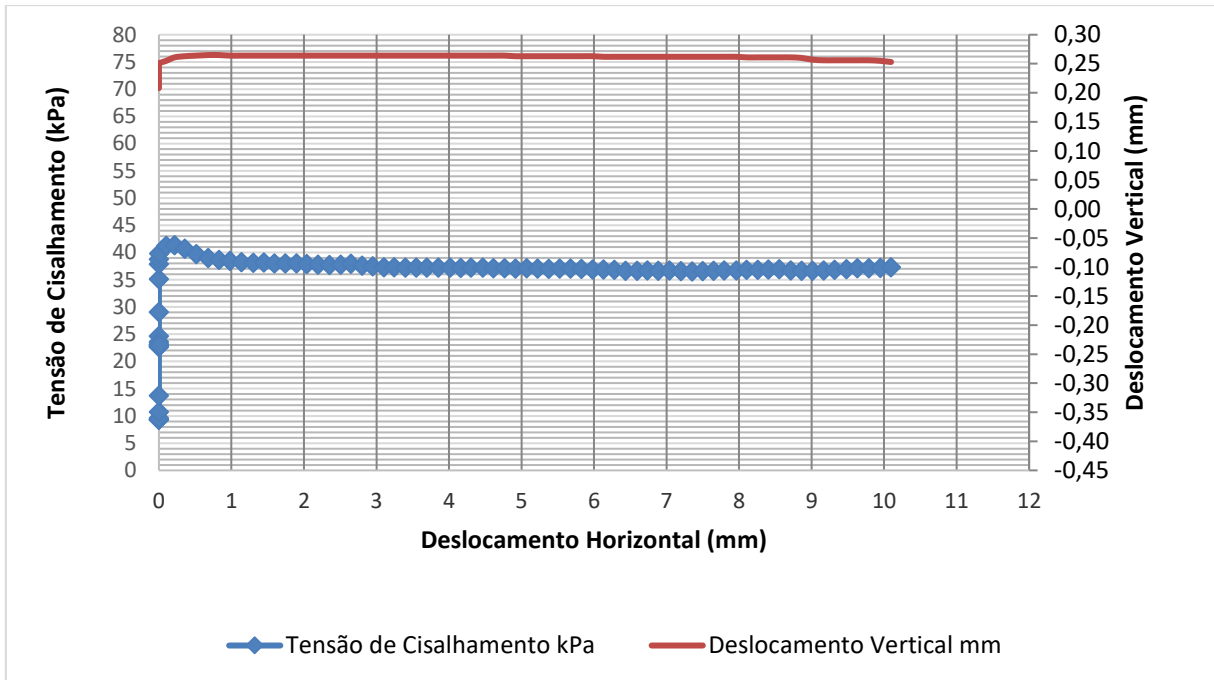
Quando plotados todos em um único gráfico, como apresentado da Figura 4.34, pode-se notar que todos se comportaram conforme a teoria apresentada, com um pico de tensão seguido de queda e no fim uma tendência de constância de tensão.

**Figura 4.34 – Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico-látex 25 kg**

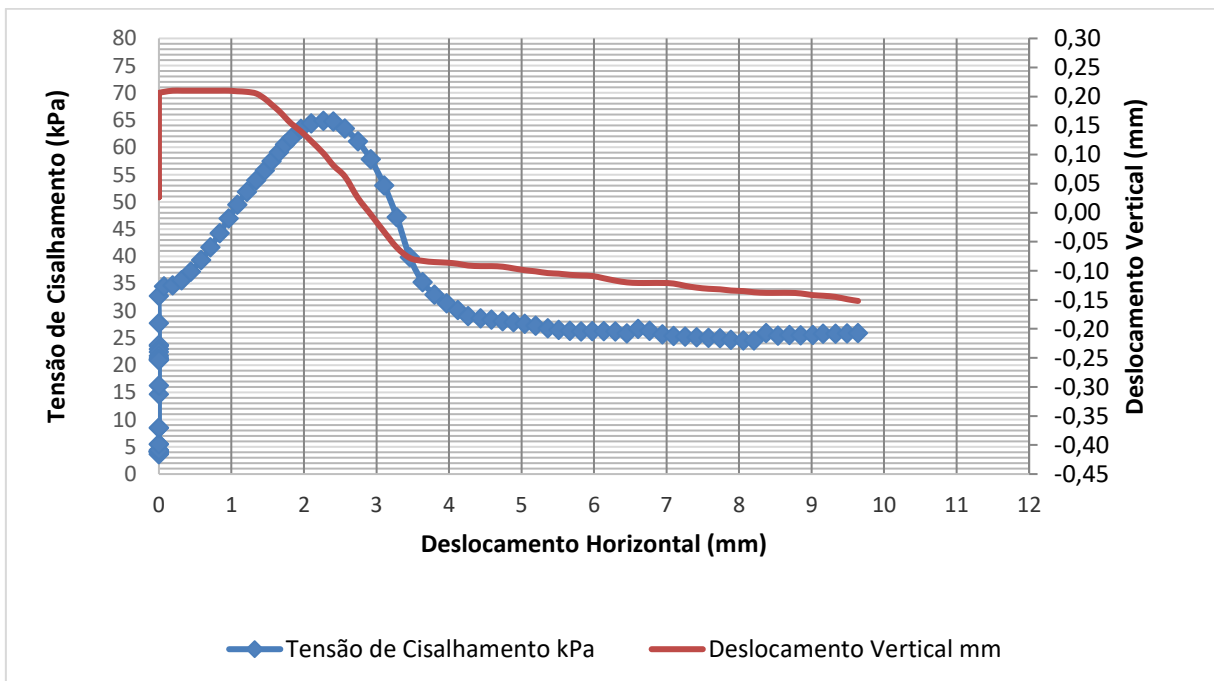


Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de ladrilho hidráulico, CPs 1, 6 e 7, ensaiados em contato com 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, A, K e I, sob carregamento normal de 50 kg, podem ser observados nas Figuras 4.35, 4.36 e 4.37.

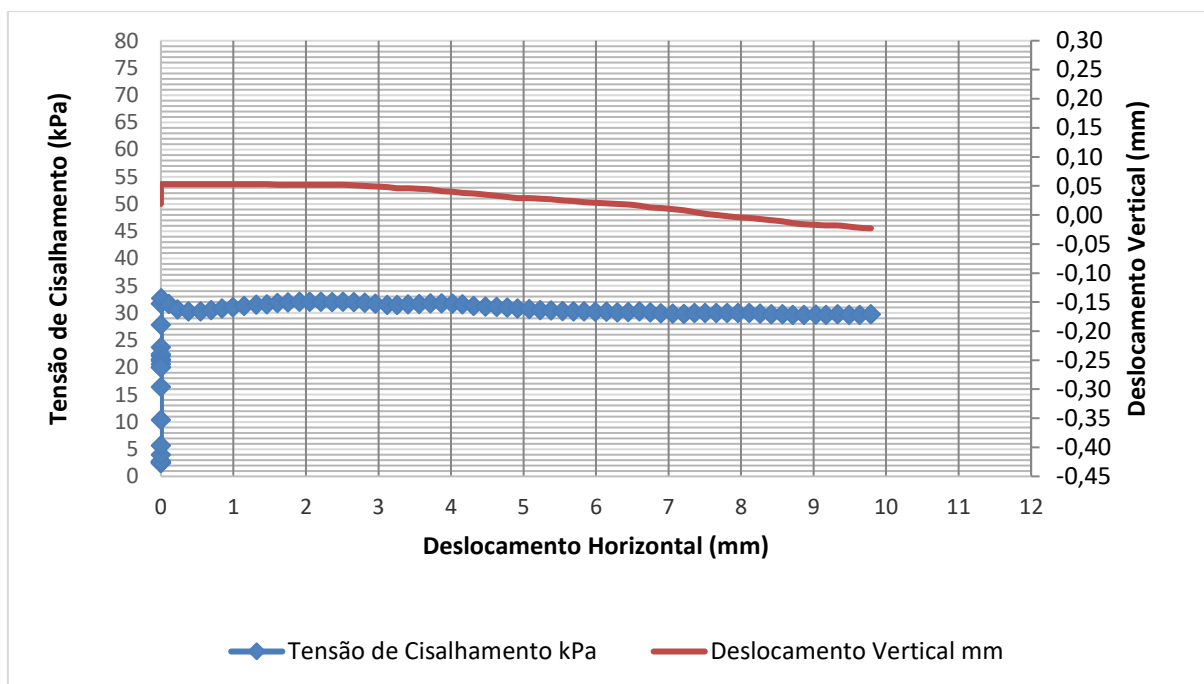
**Figura 4.35– Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP1-A**



**Figura 4.36 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP6-K**



**Figura 4.37 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP7-I**



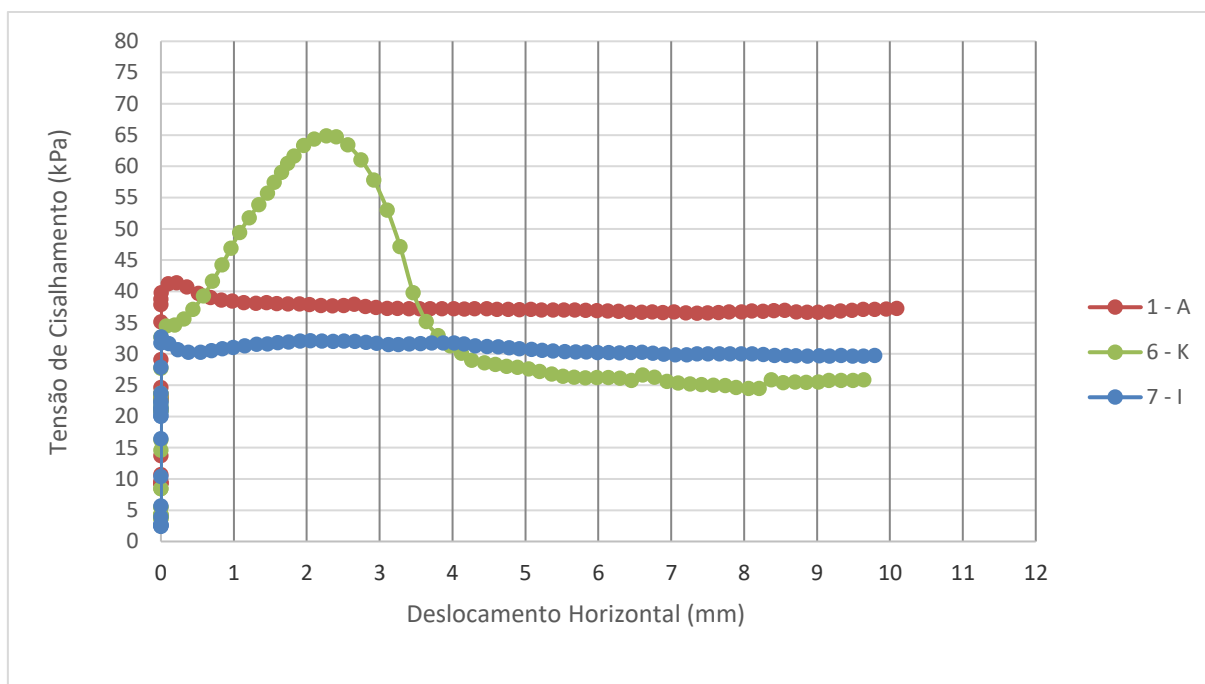
O ensaio CP 1-A, cujos resultados são apresentados na Figura 4.35, teve como tensão cisalhante máxima o valor de 41,36 kPa, que foi atingido ao deslocamento de 0,216 mm, o CP 6-K, com resultados apresentados na Figura 4.36, apresentou tensão cisalhante máxima de 46,92 kPa, ao deslocamento de 0,961 mm e o CP 7-I, com resultados apresentados na Figura 4.37, apresentou tensão cisalhante máxima de 32,74 kPa, atingida ao deslocamento de 0,003 mm. A definição do ponto de cisalhamento máximo para o CP 6-K foi seguindo o critério de primeiro ponto de pico após uma constância vertical (a partir de 3 repetições), visto que depois desse ponto definido ocorre o aumento da tensão à um valor alto seguido de queda, mas isso em função de irregularidades da superfície, porém nos outros gráficos foi possível a visualização de um ponto de pico de tensão seguido por queda.

Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber uma variação da rugosidade das superfícies entre 0,208 mm e 0,265 mm para o CP 1-A e de 0,020 mm a 0,050 mm para o CP 7-I, apontando para baixa rugosidade e, para o CP 6-K, houve grande variação do deslocamento vertical de -0,152 mm a 0,210 mm, representando uma superfície mais rugosa.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova é perceptível um comportamento de “escalada” do deslocamento vertical, que é seguido de uma redução após o início de deslocamento horizontal.

Quando plotados todos em um gráfico só, como apresentado da Figura 4.38, pode-se notar que apesar do comportamento de pico elevado no gráfico do CP 6-K todos os gráficos têm um início semelhante e mostram uma tendência de constância de tensão ao fim do ensaio.

**Figura 4.38 – Curva tensão x deslocamento ladrilho-látex 50 kg**



Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de ladrilho hidráulico, CPs 3, 4 e 5, ensaiados contra 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, F, G e H, sob carregamento normal de 75 kg, podem ser observados nas Figuras 4.39, 4.40 e 4.41.



Figura 4.39– Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP3-F

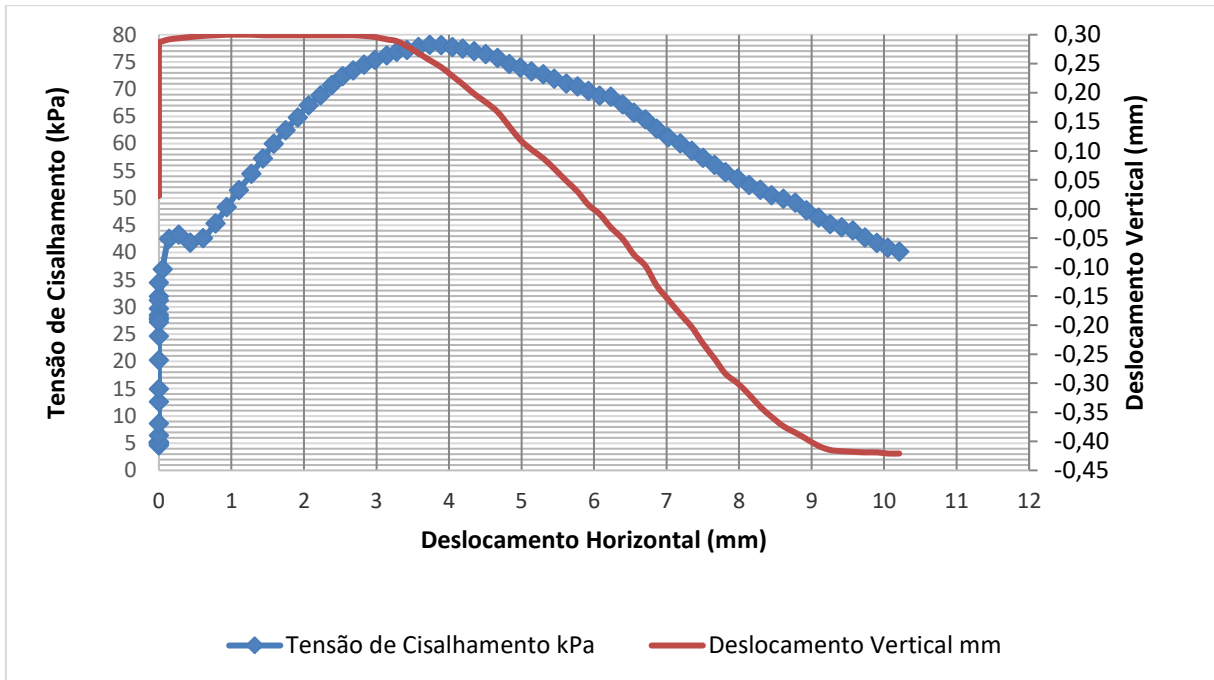
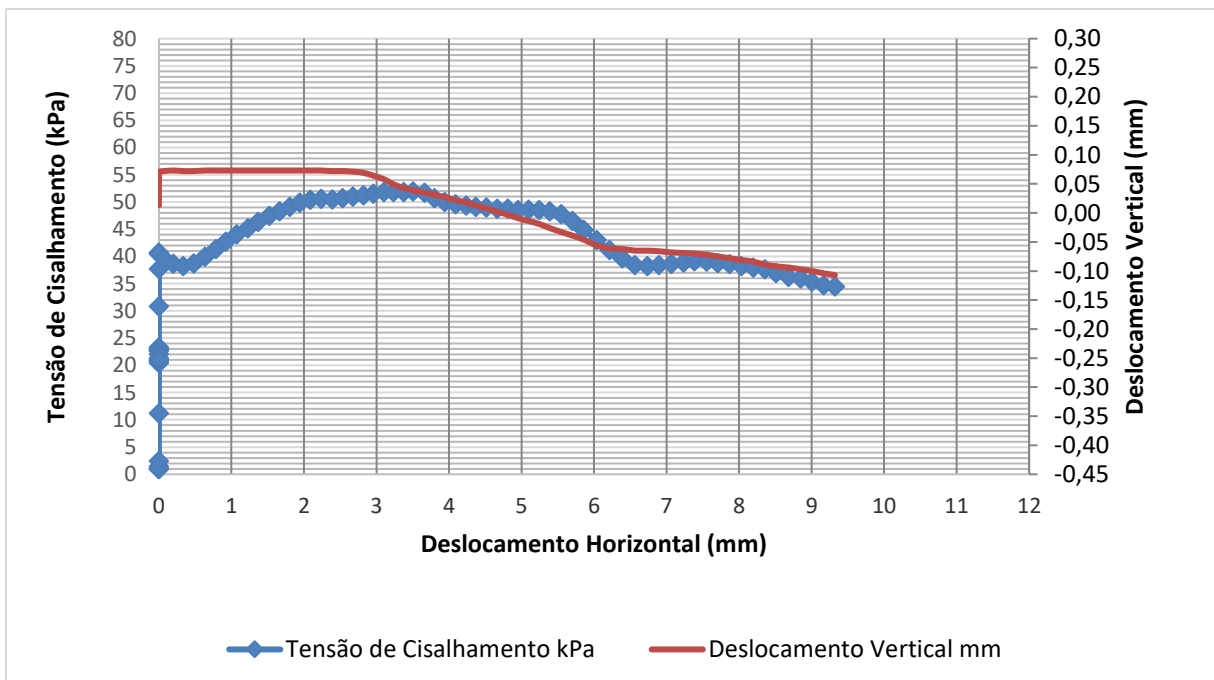
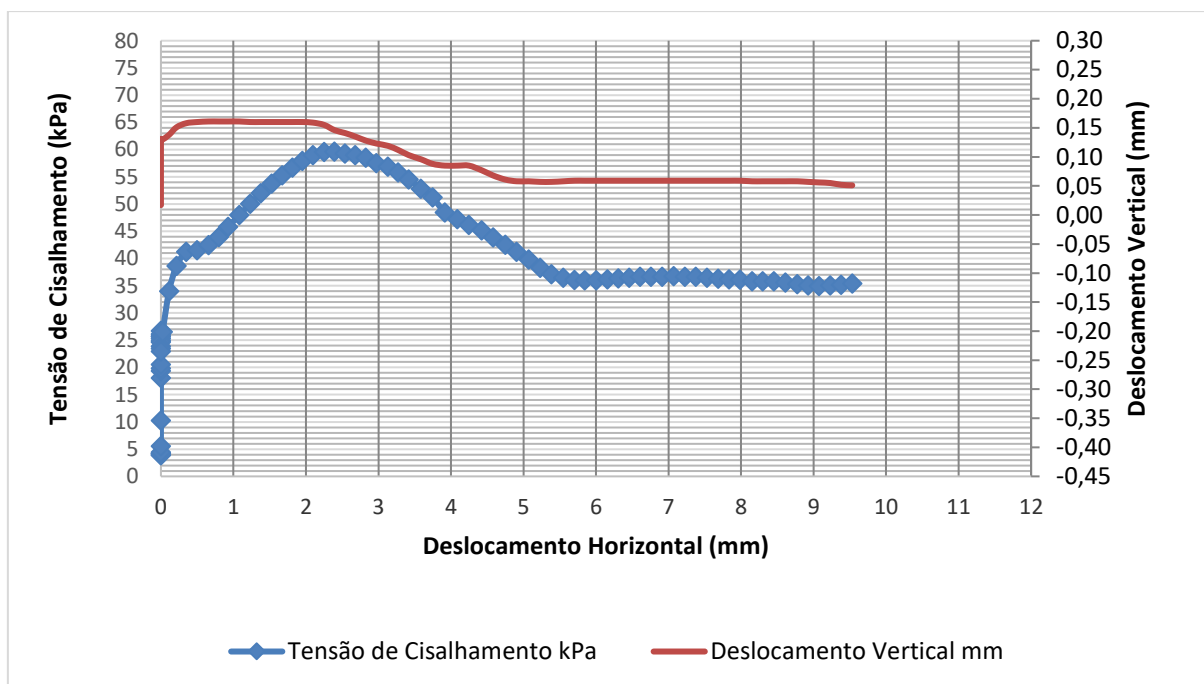


Figura 4.40 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP4-G



**Figura 4.41 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP5-H**



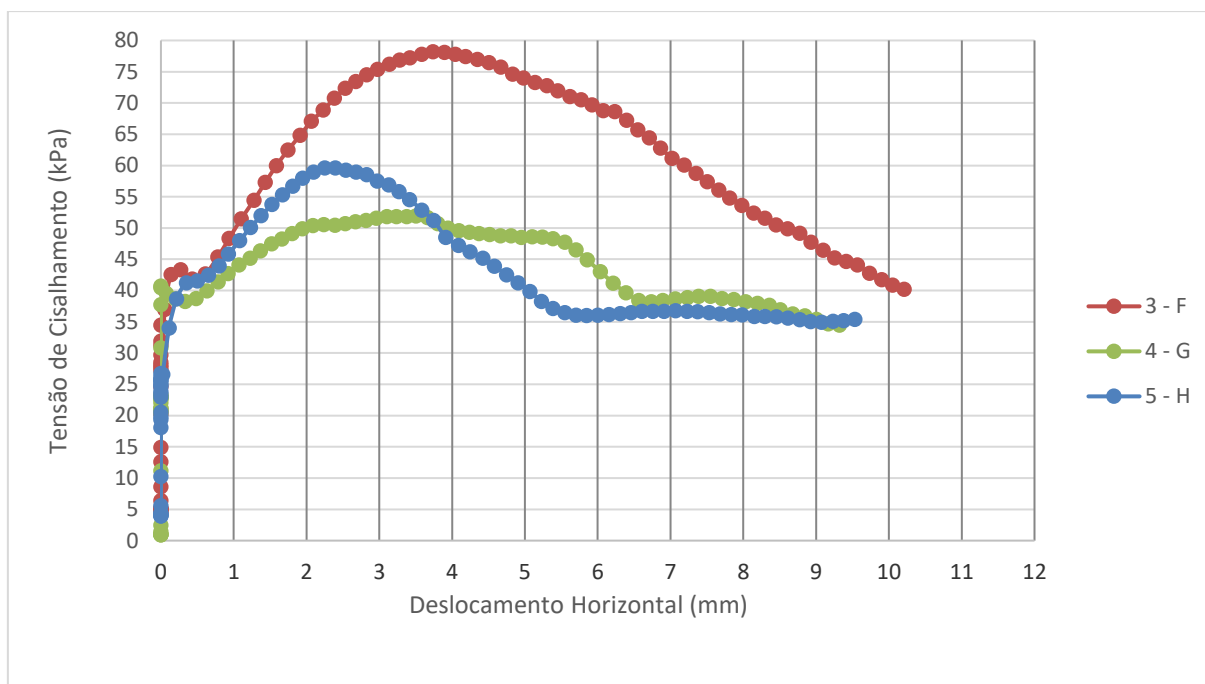
O resultado apresentado na Figura 4.39 teve como tensão cisalhante máxima o valor de 43,32 kPa, que foi atingido ao deslocamento de 0,274 mm, o da Figura 4.40 apresentou tensão cisalhante máxima de 40,74 kPa ocorrido quando ainda não houve deslocamento e o da Figura 4.41 apresentou tensão cisalhante máxima de 41,25 kPa, atingida ao deslocamento de 0,350 mm. A definição do ponto de cisalhamento máximo para o CP 5-H foi por meio gráfico considerando que após o mesmo a tensão tende a uma constância.

Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber uma variação considerável da rugosidade das superfícies entre -0,421 mm e 0,300 mm para o CP 3-F e de -0,107 mm a 0,073 mm para o CP 4-G, e para o CP 5-H houve variação de 0,017 mm a 0,161 mm, representando considerável variação vertical, que reflete em gráficos mais diferentes.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova é perceptível o comportamento de “escalada” do deslocamento vertical, que é seguido de uma redução após o início de deslocamento horizontal.

Quando plotados todos em um gráfico só, como apresentado da Figura 4.42, pode-se notar que apesar de comportamento divergente ao longo do ensaio, todos os gráficos mostram um início semelhante e mesma tendência de constância de tensão ao fim do ensaio.

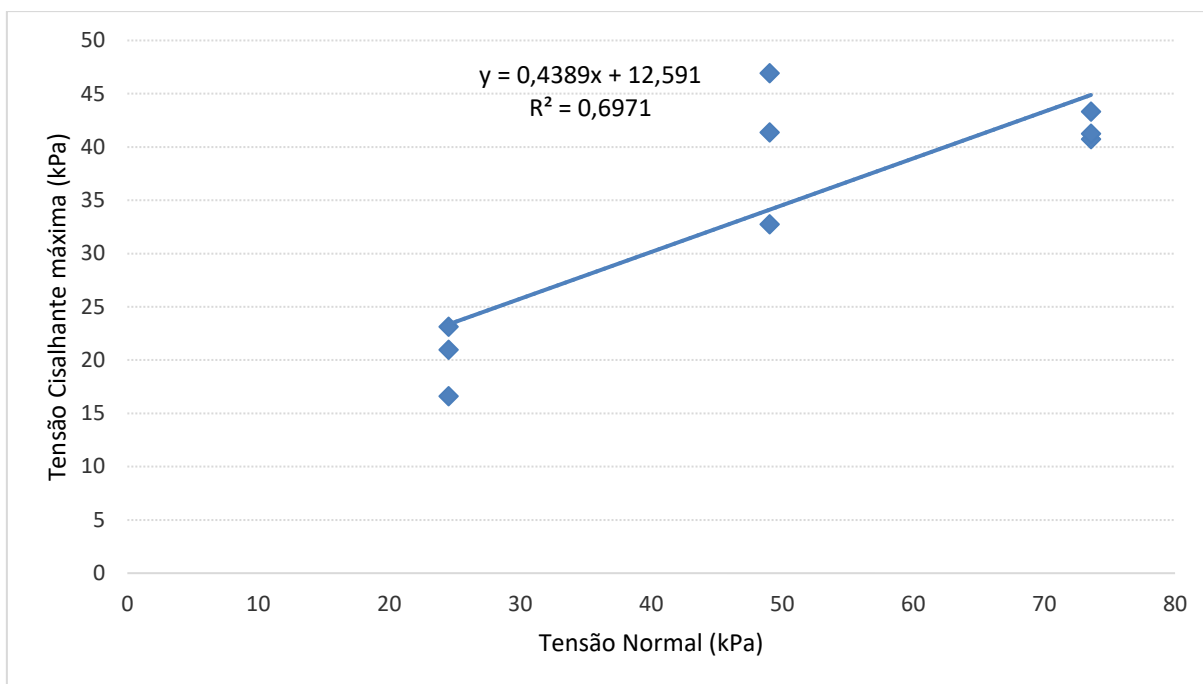
**Figura 4.42 – Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico-látex 75 kg**



Para a obtenção do gráfico entre a tensão de cisalhamento máxima e a tensão normal aplicada, Figura 4.43, foram plotados os dados de tensão cisalhamento máximo e tensão normal, presentes na Tabela 4.23, que representa um resumo dos resultados.

**Tabela 4.23 – Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal ladrilho hidráulico-látex**

Tensão Normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)
24,525	16,62
24,525	23,13
24,525	20,98
49,050	41,36
49,050	46,92
49,050	32,74
73,575	43,32
73,575	40,74
73,575	41,25

**Figura 4.43 – Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal**

Por meio da Figura 4.43 obtém-se a Envoltória de Coulomb, sob a Equação 4.3, que pode ser interpretada como  $\tau_f = c_u + \sigma_n \cdot \tan \phi$ , sendo  $\tau_f$  a máxima resistência ao cisalhamento,  $\sigma_n$  a tensão normal, e  $c_u$  a coesão.

$$y = 0,4389 \cdot x + 12,591 \quad (4.3)$$

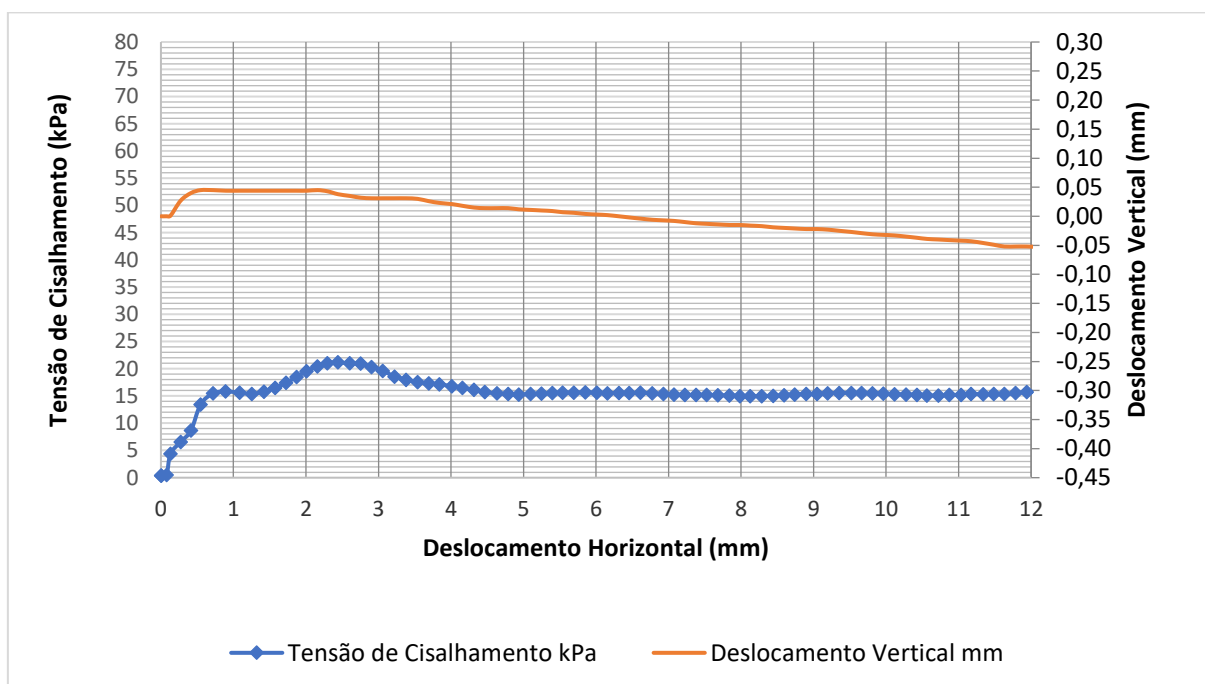
Portanto, o valor de  $\tan \phi$ , correspondente ao coeficiente de atrito, é de 0,4389 e tem-se o valor de 12,591 kPa, que em solos seria considerado como a coesão, porém no presente estudo se caracteriza como resistência inicial conferida pelo “encaixe” entre a rugosidade das superfícies de concreto e látex, a dilatância, bem como pode ser composto também pelas forças adesivas existentes entre as rugosidades da superfície de látex e do ladrilho.

#### 4.2.4 Ensaios do ladrilho hidráulico úmido

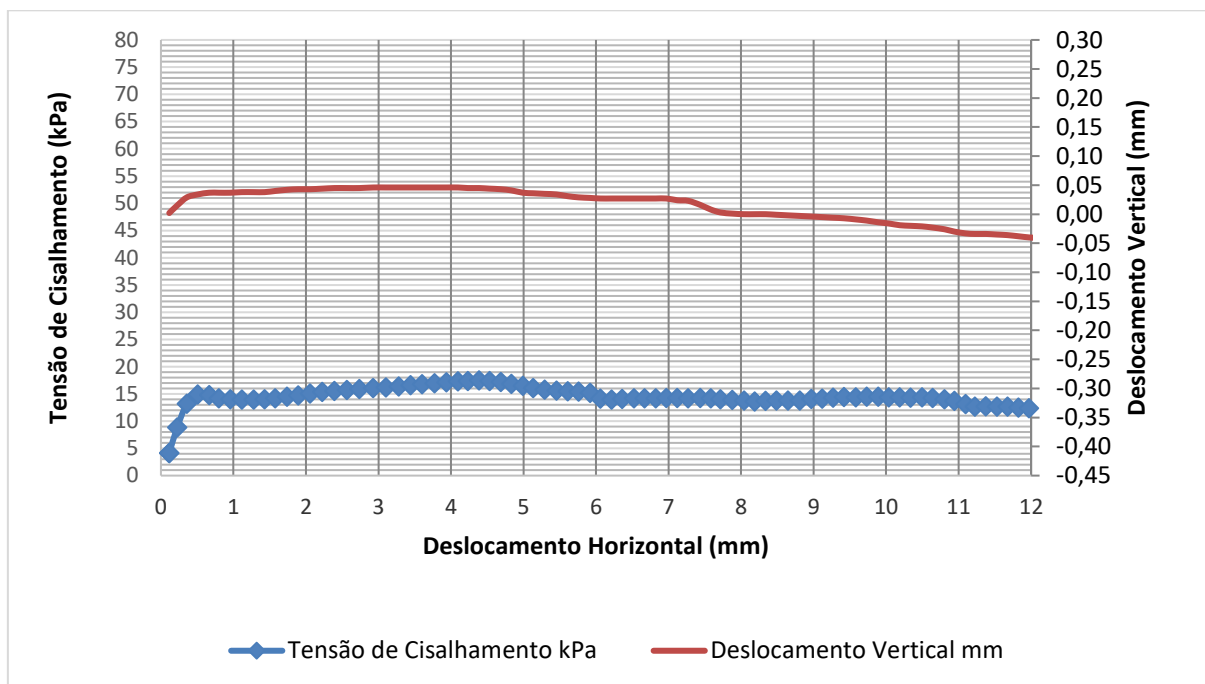
Os corpos de prova compostos de ladrilho hidráulico úmido, com superfície de contato com os CPs de látex foram ensaiados de forma análoga aos de concreto úmido, com carregamentos normais de 25 kg, 50 kg, e 75 kg, que, ao se considerar a aceleração da gravidade de  $9,81 \text{ m/s}^2$  e a área de contato entre os corpos de  $0,01 \text{ m}^2$ , tem-se que as tensões normais aplicadas foram respectivamente de 24,53 kPa, 49,05 kPa e 73,58 kPa.

Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de ladrilho hidráulico úmidos, CPs 2, 9 e 8, ensaiados contra 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, B, M e N, sob um carregamento normal de 25 kg, podem ser observados nas Figuras 4.44, 4.45 e 4.46.

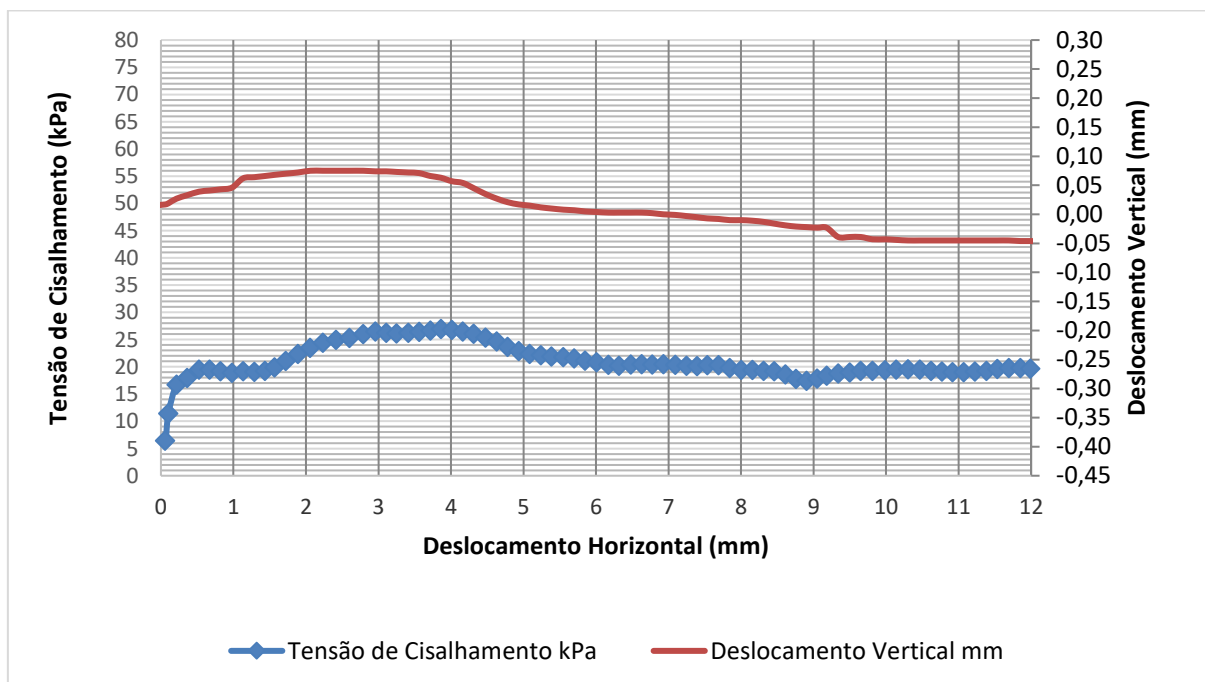
**Figura 4.44– Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP2-B úmido**



**Figura 4.45 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP9-M úmido**



**Figura 4.46 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP8-N úmido**



O resultado apresentado na Figura 4.44 teve como tensão cisalhante máxima o valor de 15,83 kPa, que foi atingido ao deslocamento de 0,894 mm, o da Figura 4.45 apresentou

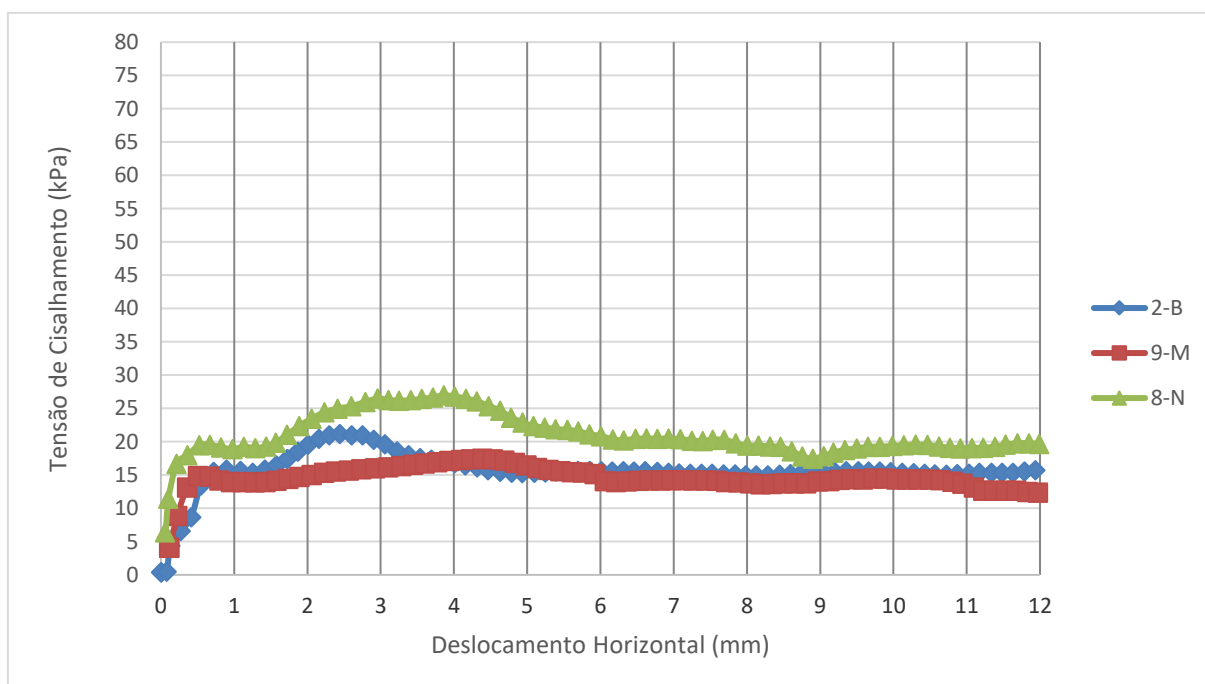
tensão cisalhante máxima de 14,89 kPa ao deslocamento de 0,507 mm e o da Figura 4.46 apresentou tensão cisalhante máxima de 19,51 kPa, atingida ao deslocamento de 0,671 mm.

Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber variação da rugosidade das superfícies entre -0,059 mm e 0,075 mm, sendo diferentes para cada corpo de prova, mas não apresentando grande variação, conforme o que se espera de superfícies de ladrilho hidráulico prensadas em formas, onde a rugosidade da área de contato é baixa, mas são presentes sulcos que formam desenhos nas peças.

Quanto aos deslocamentos verticais, assim como para os corpos de prova de concreto úmido, o comportamento de “escalada” no deslocamento vertical não é perceptível, sendo que o deslocamento horizontal inicia logo que uma força cisalhante é aplicada, visto que a água funciona como um lubrificante da superfície de contato.

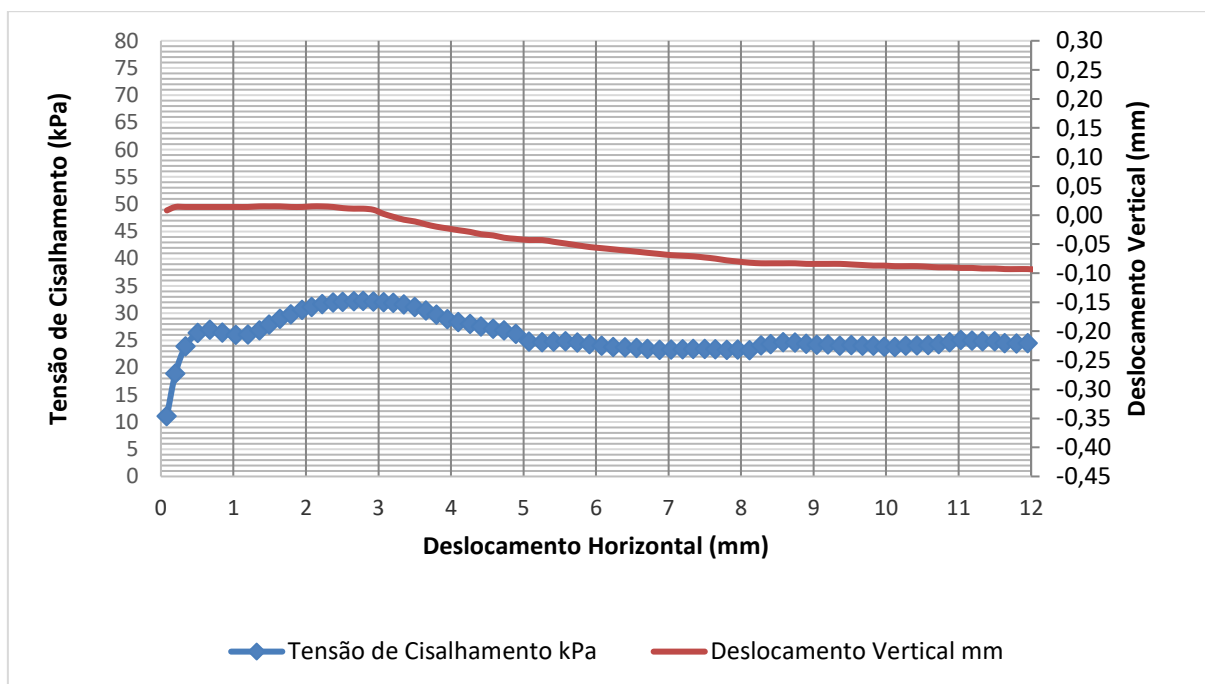
Quando plotados todos em um gráfico só, como apresentado da Figura 4.47, pode-se notar que houve um pico de tensão seguido de queda em todos, que em alguns voltou a crescer devido condições de superfície, e no fim percebe-se uma tendência de constância de tensão.

**Figura 4.47 – Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico úmido-látex 25 kg**



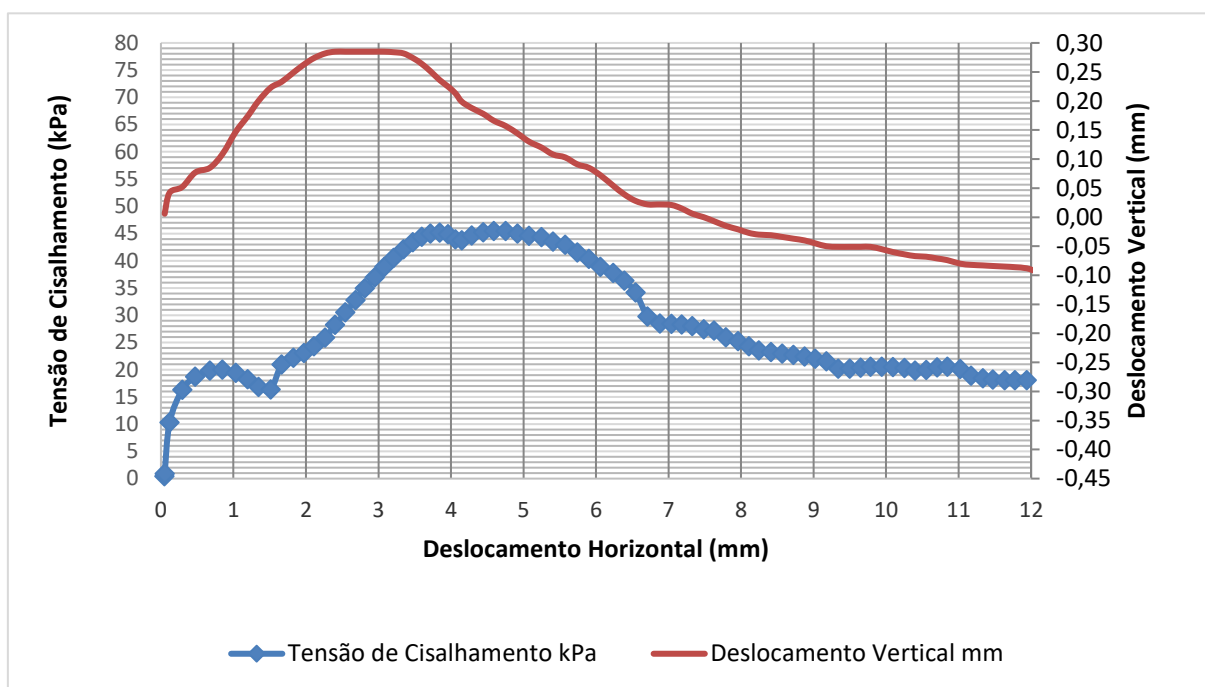
Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de ladrilho hidráulico, CPs 1, 6 e 7, ensaiados contra 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, A, K e I, sob um carregamento normal de 50 kg, podem ser observados nas Figuras 4.48, 4.49 e 4.50.

**Figura 4.48– Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP1-A úmido**

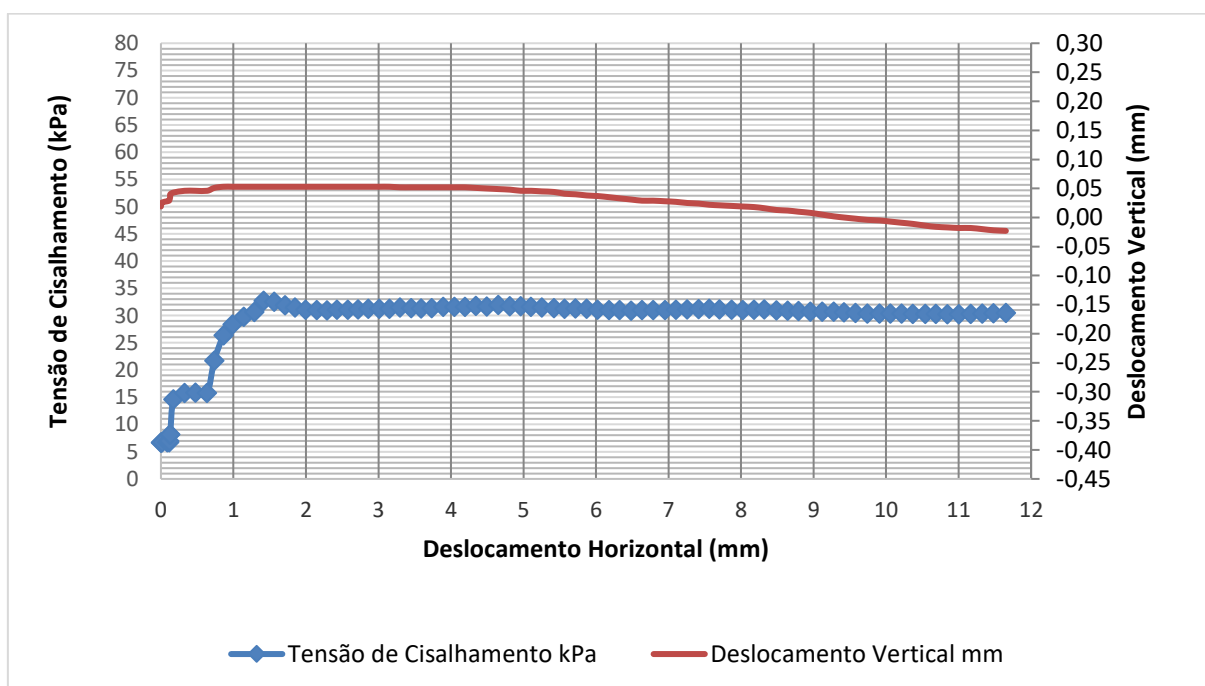




**Figura 4.49 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP6-K úmido**



**Figura 4.50 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP7-I úmido**



O ensaio da Figura 4.48 teve como tensão cisalhante máxima o valor de 26,95 kPa, que foi atingido ao deslocamento de 0,677 mm, o da Figura 4.49 apresentou tensão cisalhante máxima de 19,98 kPa ao deslocamento de 0,850 mm e o da Figura 4.50 apresentou tensão

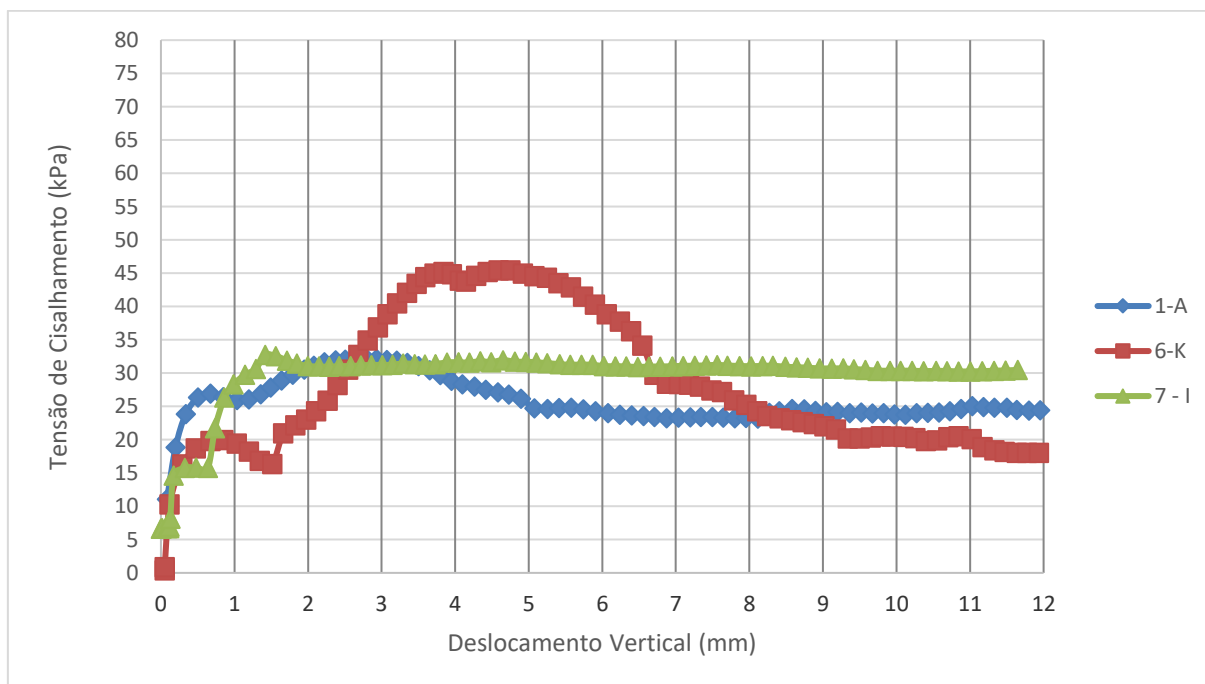
cisalhante máxima de 32,56 kPa, atingida ao deslocamento de 1,564 mm. A definição do ponto de cisalhamento máximo foi seguindo o critério de primeiro ponto de pico seguido de queda.

Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber uma variação da rugosidade das superfícies entre -0,096 mm e 0,015 mm para o CP 1-A e de -0,023 mm a 0,050 mm para o CP 7-I, apontando para uma baixa rugosidade e, para o CP 6-K houve grande variação do deslocamento vertical de -0,094 mm a 0,285 mm, representando uma superfície mais rugosa mesmo sob condição úmida.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova não é perceptível um comportamento de “escalada” do deslocamento vertical que é seguido de uma redução após o início de deslocamento horizontal, pois como a água funciona como lubrificante da superfície o deslocamento horizontal inicia assim que é aplicada uma força horizontal.

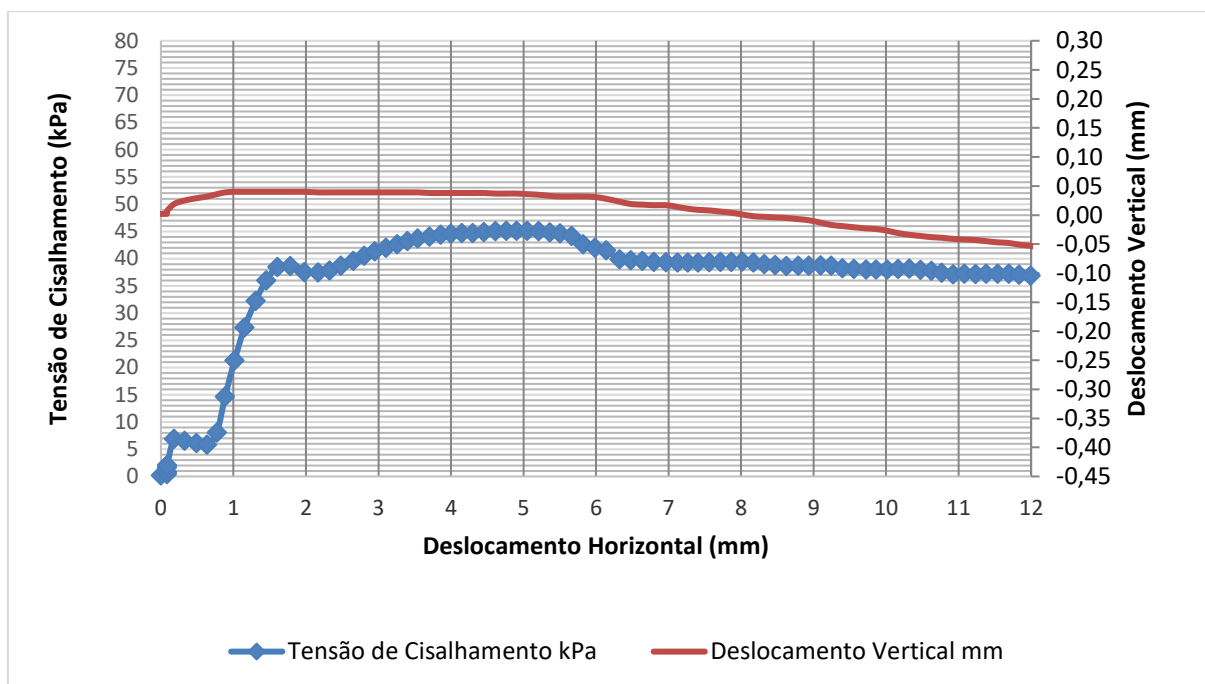
Quando plotados todos em um gráfico só, como apresentado da Figura 4.51, pode-se notar que apesar do divergentes ao longo do ensaio todos os gráficos mostram uma tendência de constância de tensão ao fim do ensaio.

**Figura 4.51 – Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico úmido-látex 50 kg**

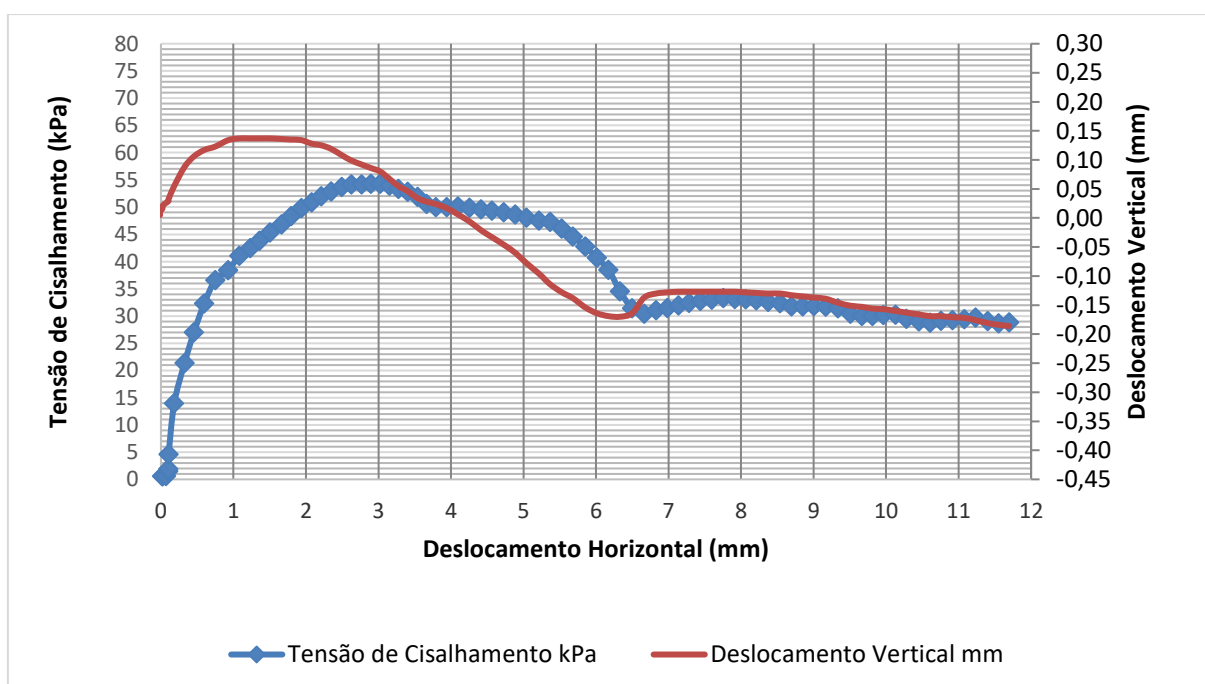


Os gráficos obtidos a partir dos ensaios de 3 corpos de prova de ladrilho hidráulico, CPs 3, 4 e 5, ensaiados contra 3 corpos de prova com superfície de contato em látex, F, G e H, sob carregamento normal de 75 kg, podem ser observados nas Figuras 4.52, 4.53 e 4.54.

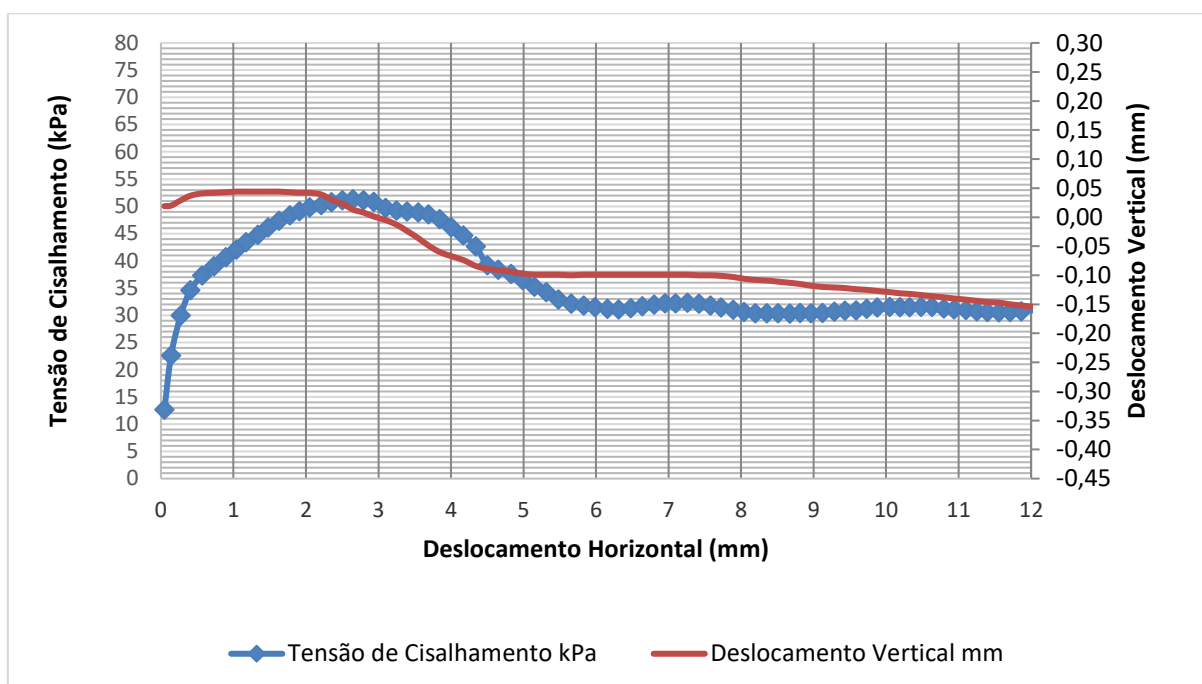
**Figura 4.52– Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP3-F úmido**



**Figura 4.53 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP4-G úmido**



**Figura 4.54 – Curva tensão x deslocamento horizontal x deslocamento vertical CP5-H úmido**

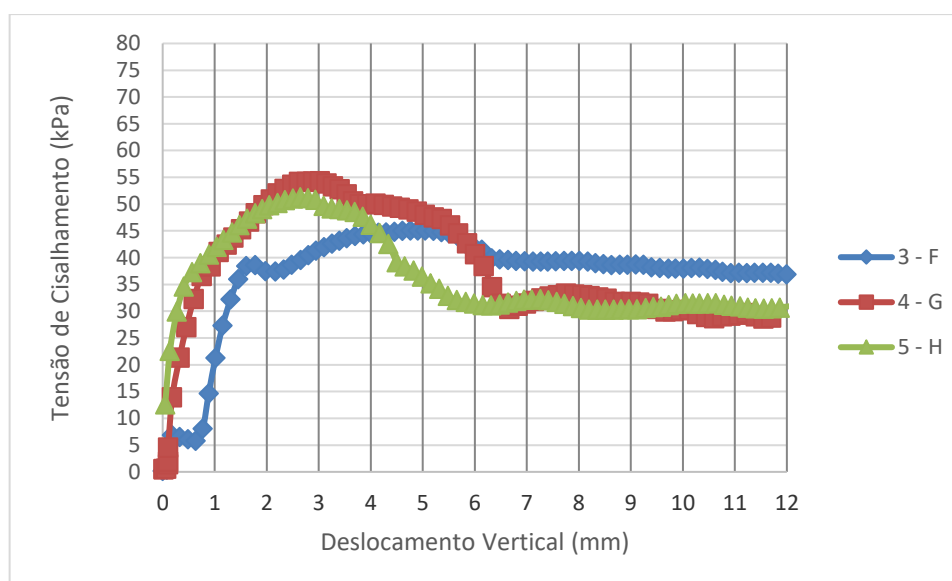


O resultado do ensaio apresentado na Figura 4.52 teve como tensão cisalhante máxima o valor de 38,60 kPa, que foi atingido ao deslocamento de 1,980 mm, o da Figura 4.53 apresentou tensão cisalhante máxima de 54,27 kPa ocorrido ao deslocamento de 3,024 mm e o da Figura 4.54 apresentou tensão cisalhante máxima de 51,28 kPa, atingida ao deslocamento de 2,651 mm. A definição do ponto de cisalhamento máximo para o CP 3-F foi o segundo pico seguido de queda, visto que o primeiro ocorreu a uma tensão muito baixa em função da condição de superfície.

Na análise dos deslocamentos verticais, é possível perceber a redução da variação da rugosidade das superfícies quando úmidas para entre -0,058 mm e 0,040 mm para o CP 3-F, já para o CP 4-G manteve-se relativamente alta de -0,186 mm a 0,138 mm e também para o CP 5-H com variação de -0,169 mm a 0,044 mm.

Ainda quanto aos deslocamentos verticais, para todos os corpos de prova não é perceptível um comportamento de “escalada” do deslocamento vertical devido a lubrificação com água.

Quando plotados todos em um gráfico só, como apresentado da Figura 4.55, pode-se notar que apesar de um comportamento divergente ao longo do ensaio, todos os gráficos mostram uma tendência de constância de tensão ao fim do ensaio.

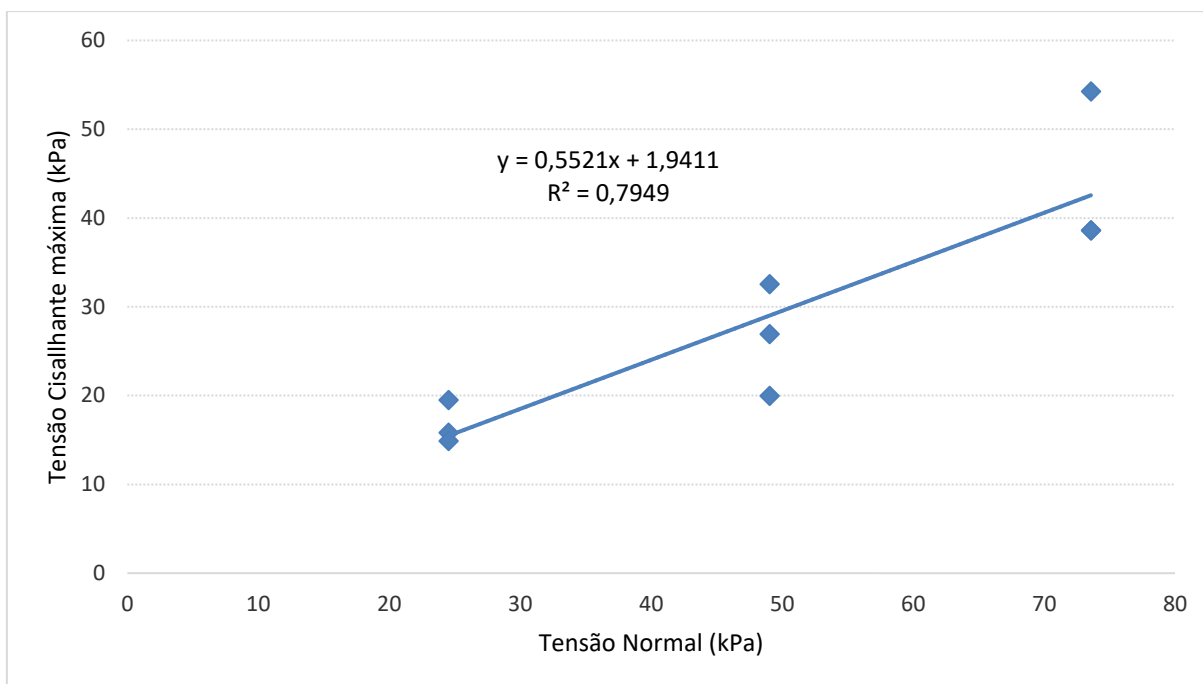
**Figura 4.55 – Curva tensão x deslocamento ladrilho hidráulico úmido-látex 75 kg**

Para a obtenção do gráfico entre a tensão de cisalhamento máxima e a tensão normal aplicada para as superfícies úmidas, Figura 4.56, foram plotados os dados de tensão cisalhamento máximo e tensão normal, presentes na Tabela 4.24, que representa um resumo dos resultados.

**Tabela 4.24– Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal ladrilho hidráulico úmido-látex**

Tensão Normal (kPa)	Tensão cisalhante máxima (kPa)
24,525	15,83
24,525	14,89
24,525	19,51
49,050	26,95
49,050	19,98
49,050	32,56
73,575	38,60
73,575	54,27
73,575	51,28

**Figura 4.56 – Tensão Cisalhante máxima e Tensão Normal**



Por meio da Figura 4.56 obtém-se a Envoltória de Coulomb, sob a Equação 4.4, que pode ser interpretada como  $\tau_f = c_u + \sigma_n \cdot \tan \varphi$ , sendo  $\tau_f$  a máxima resistência ao cisalhamento,  $\sigma_n$  a tensão normal, e  $c_u$  a coesão.

$$y = 0,5521x + 1,9411 \quad (4.4)$$

Portanto, o valor de  $\tan \cdot \varphi$  correspondente ao coeficiente de atrito é de 0,5521 e tem-se o valor de 1,9411 kPa, que em solos seria considerado como a coesão, porém no presente estudo se caracteriza como resistência inicial conferida pelo “encaixe” entre a rugosidade das superfícies de ladrilho hidráulico úmido e látex, a dilatância, bem como pode ser composto também pelas forças adesivas existentes entre as rugosidades da superfície de látex e do ladrilho.

Portanto, os ensaios permitiram obter os seguintes resultados: coeficiente de atrito do concreto seco de 0,65 e constante de 15,80 kPa; coeficiente de atrito do concreto úmido de 0,70 e constante de 8,92 kPa; coeficiente de atrito do ladrilho hidráulico de 0,44 com constante de 12,59 kPa; e, por fim, coeficiente de atrito do ladrilho hidráulico úmido de 0,55 com constante de 1,94 kPa.

## 5 CONCLUSÃO

Com o objetivo de desenvolver e aplicar um método de fácil reprodução e baixo custo para medição do coeficiente de atrito de pavimentos de calçadas, desenvolveu-se o Método de Inclinação da Superfície (MIS), a partir do aprimoramento do método previamente desenvolvido por Souza (2012).

Quando os revestimentos foram ensaiados pelo MIS com a superfície em contato com o látex, sob 3 condições diferentes de sobrecarga, obteve-se baixo desvio padrão, mostrando que a variação do peso não influencia na medição do coeficiente de atrito e os pavimentos, quando secos, podem ser listados do maior coeficiente de atrito para o menor como segue: ladrilho hidráulico (0,83), ladrilho hidráulico com tinta (0,81), concreto (0,79) e, por fim, o paver (0,65).

O ladrilho hidráulico seco e o ladrilho hidráulico com tinta seco foram os revestimentos que se mostraram com os maiores coeficientes de atrito, portanto, em situações secas, são os mais resistentes ao escorregamento.

O valor do coeficiente de atrito para o concreto foi um pouco inferior ao do ladrilho, porém bastante próximo, o que permite a determinação de que, sob condições secas, os pavimentos mais recomendados para implantação em calçadas são o ladrilho hidráulico (sem tinta e com tinta) e o concreto.

A rugosidade da superfície do ladrilho hidráulico sem tinta, do ladrilho hidráulico com tinta e do paver eram semelhantes entre si, com acabamento considerado liso. Porém, percebeu-se que o paver possui coeficiente de atrito consideravelmente menor que os dois tipos de ladrilho hidráulico estudados e atribui-se essa diferença ao número de juntas e frisos do ladrilho que é muito maior que o do paver, indicando que as juntas e frisos têm forte influência nos resultados.

Para os mesmos materiais de revestimento de calçada, os resultados dos ensaios sob a condição úmida podem ser listados do maior coeficiente de atrito para o menor como segue: ladrilho hidráulico (0,80), ladrilho hidráulico com tinta (0,70), concreto (0,68) e por fim o paver (0,65).

O ladrilho hidráulico úmido e o ladrilho hidráulico com tinta úmido foram os pavimentos que apresentaram os maiores coeficientes de atrito. Porém, percebe-se que houve maior queda no valor do coeficiente de atrito para o ladrilho hidráulico com tinta quando comparado com a condição seca (aproximadamente 14%), em relação ao ladrilho hidráulico sem tinta (aproximadamente 4%).

O concreto teve redução no seu coeficiente de atrito de 0,11 (aproximadamente 14%) sob a presença de água, mesma perda apresentada pelo ladrilho hidráulico com tinta, o que torna esses pavimentos menos recomendáveis, visto que as condições de resistência da superfície devem ser mantidas sob as condições seca e úmida, conforme apresentado na ABNT NBR 9050:2015.

Portanto, mesmo diante da condição úmida, em que a água funciona como um material lubrificante para a superfície, o ladrilho hidráulico se mostra o pavimento mais resistente ao escorregamento, e com menor variação das condições de superfície em função da presença de água.

O paver manteve o valor do coeficiente de atrito constante sob as condições seca e úmida, porém esse valor é inferior ao do ladrilho hidráulico, e do concreto, o que desfavorece sua avaliação.

Esses revestimentos, quando ensaiados com a superfície de contato com distribuição de areia, obtiveram os seguintes valores de coeficiente de atrito: ladrilho hidráulico sem tinta (0,38), ladrilho hidráulico com tinta (0,37), concreto (0,38) e por fim o paver (0,38). Assim, percebe-se que, mesmo com características de superfície diferentes, os revestimentos tiveram o mesmo valor de coeficiente de atrito quando ensaiados com areia em sua face, mostrando que a areia influencia muito na rugosidade das superfícies, e em sua presença a característica do atrito passa a ser a característica da areia, por isso o valor do coeficiente se torna o mesmo para todos os tipos de revestimento.

Diante dos resultados conclui-se que a poeira e demais impurezas (aqui representadas pela areia), são os principais fatores de queda na resistência ao escorregamento do pavimento, chegando à redução de 0,45 (aproximadamente 55%) no coeficiente de atrito quando comparado à superfície seca.

O desenvolvimento do MIS permitiu a obtenção de um método de fácil reprodução, com materiais simples de serem encontrados e de fácil montagem, e de baixo custo, aproximadamente R\$ 430,00 (quatrocentos e trinta reais), para a medição do coeficiente de atrito de pavimentos de calçadas.

Quanto ao objetivo de indicar uma faixa de referência aceitável para o coeficiente de atrito de pavimentos de calçadas, entende-se que o pavimento mais seguro quanto à resistência ao escorregamento sob as condições úmida e seca é o ladrilho hidráulico sem aplicação de tinta, com o coeficiente de atrito de 0,83 quando seco e de 0,80 quando úmido. Trabalhos de Strandberg (1983), Gronqvist et al. (1190), Powers et al. (2002) e Kenneth, Johnson e Vidal (2016) trazem que pavimentos antiderrapantes teriam o coeficiente de atrito



entre 0,40 e 0,50 em condição seca, porém este valor está próximo ao atrito oferecido por uma superfície recoberta de areia.

Os outros pavimentos ensaiados e que apresentam condição de superfície consideradas como antiderrapantes pelos que as comercializam, tiveram o coeficiente de atrito de 0,65 (paver de concreto), 0,79 (concreto alisado com régua) e 0,81 (ladrilho hidráulico com tinta), portanto, o presente trabalho sugere que, para determinação do pavimento como antiderrapante, o valor do coeficiente de atrito deve ser igual ou superior à 0,65 pelo método MIS, sob as condições seca e úmida.

Apesar de Halliday e Resnick (1983) terem desenvolvido sua teoria considerando superfícies secas e não lubrificadas, assim como Gao et al. (2014) entendeu que ela se mantém surpreendentemente positiva para descrever a maioria das superfícies de atrito envolvendo tanto superfícies secas como lubrificadas (desde que não adesivas), aqui também entende-se que a teoria se faz valer, apesar de o látex poder ter propriedades adesivas, quando o carregamento é baixo, como no caso do MIS (carregamento máximo 3 kg), essas propriedades não influenciam nos resultados.

Diante do objetivo de analisar parte dos materiais usados em revestimentos de calçadas no município de Maringá quanto à resistência ao escorregamento por meio da medição do coeficiente de atrito sob diferentes situações, foram selecionados o concreto alisado manualmente por régua niveladora, o paver de concreto, o ladrilho hidráulico e o ladrilho hidráulico com aplicação de tinta, sendo assim, foram esses os revestimentos ensaiados pelo método MIS, ainda foram ensaiados os revestimentos de concreto e de ladrilho hidráulico sem tinta pelo método do cisalhamento direto.

Quanto ao objetivo de avaliar o ensaio de cisalhamento direto para a medição do coeficiente de atrito entre o látex, material comumente utilizado em solado de sapatos, e o material de revestimento de calçadas, teve-se que os ensaios foram realizados para o concreto e o ladrilho hidráulico sem tinta sob as condições seca e úmida.

Como resultado obteve-se para o concreto com superfície seca o coeficiente de atrito de 0,65 e notou-se a presença de uma constante representando a resistência existente entre as superfícies mesmo na ausência de carregamento normal, de 15,80 kPa. Quando a mesma superfície foi ensaiada úmida, obteve-se coeficiente de atrito de 0,70 e a constante de 8,92 kPa. Essa resistência constante é atribuída a adesividade existente na ligação entre o concreto e o látex, devido à plasticidade do último.

O fato de o coeficiente de atrito ser maior quando a superfície está úmida é contrário ao esperado pela teoria, visto que a presença de água atua como lubrificante entre as

superfícies, entretanto, isso pode ser explicado pela adesividade entre as superfícies, que culmina na presença de uma tensão constante, existente mesmo quando há ausência de tensão normal, o que ocorre em função do látex ser um material termoplástico, que se deforma sob situações de carregamento.

Entende-se que a contribuição da adesividade é presente no ensaio de cisalhamento devido aos maiores carregamentos verticais, de 25 kg, 50 kg e 75 kg, conforme a teoria de Heise e Popov (2010), de que a força de atrito é devida à assimetria do processo ocorrido durante a formação e destruição dos contatos adesivos, considerando que duas asperezas próximas primeiramente entram em contato quando os seus contornos geométricos se interceptam, e se separam apenas após que uma dada distância entre elas seja alcançada, e nos seus resultados mostra que a contribuição da adesão na superfície metal-metal para o coeficiente de atrito é muito pequena, enquanto entre elastômeros há uma contribuição notável.

O fato acima exposto pode explicar os resultados encontrados nos ensaios do ladrilho hidráulico sem tinta, nos quais se obteve o coeficiente de atrito menor e a constante maior em comparação com o mesmo material úmido.

Com a análise dos resultados, tem-se que o ensaio de cisalhamento, com a aplicação de sobrecargas, teve condições de contorno divergentes do ensaio pelo MIS principal quanto à proporção dos carregamentos, que no cisalhamento direto foram 25 vezes maiores, fazendo com que os materiais se comportassem de forma diferente, tornando mais difícil a correção entre os resultados.

Alguns ajustes nas condições de contorno podem permitir a melhor utilização do ensaio de cisalhamento direto para a medição do coeficiente de atrito em calçadas em contato com o látex, como, por exemplo, a redução dos carregamentos à cargas semelhantes ao do MIS de 1 kg, 2 kg e 3 kg.

Mesmo com a necessidade de adequações para a aplicação do ensaio de cisalhamento direto para validar os resultados do MIS, entende-se que o objetivo geral do trabalho foi atingido com o Método da Inclinação da Superfície, visto que se trata da aplicação de um método alternativo, de baixo custo e fácil reprodução, para a determinação do coeficiente de atrito de revestimentos de calçadas.

## SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Não foi possível com este trabalho, porém, para estudos futuros sugere-se a avaliação destes ensaios segundo a teoria de Derjaguin (1934) para superfícies aderentes de que  $F = \mu(N + N_0)$ , sendo  $N_0$  uma constante que depende das propriedades das superfícies e da verdadeira superfície de contato entre elas.

Quanto ao ensaio do cisalhamento direto, devido ao fato de a sobrecarga deste ser muito maior quando comparado ao MIS, para conseguir correlacionar os resultados obtidos pelos dois métodos, sugere-se a reprodução dos ensaios da prensa com carregamentos verticais iguais ao do MIS, sem sobrecarga e com sobrecarga de 1 kg e 2 kg.

Outro estudo que pode ser realizado para a medição do coeficiente de atrito de materiais de revestimento de calçadas, é adaptar o MIS com os revestimentos em contato com uma interface recoberta de material mais rígido, como a madeira ou até mesmo o metal, a fim de tornar os resultados menos influenciáveis por materiais passíveis de deformação como o látex e compara-los aos resultados obtidos no presente trabalho.

Indica-se também a reprodução do MIS para ensaios de demais tipos de revestimento e condições de interface, como por exemplo, ensaiar materiais comercializados a fim de conferir características antiderrapantes a superfícies, bem como ensaiar o comportamento dos pisos quando a interface está recoberta de folhas caídas das árvores.

## REFERÊNCIAS

AI, C.; RAHMAN, A.; SONG, J.; GAO, X.; LU, Y. Characterization of interface bonding in asphalt pavement layers based on direct shear tests with vertical loading. *Journal of Materials in Civil*, Vol 29, 04017102 1-7.

AREIZA, Y. A. et al. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. *Tribology International*, v. 82, p. 274-279, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9050**: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro, 2015.

ASTM – American Society for Testing Materials. **ASTM D 3080 – 11 – Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. ASTM International, 2011.

ASTM – American Society for Testing Materials. **ASTM F 1646 – 13 – Standard Terminology Relating to Safety and Traction for Footwear**. ASTM International, 2013.

BENEVOLO, Leonardo Benevolo. (1981) **História da cidade**. 4ª edição. São Paulo: Editora Perspectiva, 2005.

BRASIL ACESSÍVEL – Programa Brasileiro de Acessibilidade Urbana, vol 2, Construindo a cidade acessível: Ministério das Cidades, 2006.

BRASIL, Lei nº 9.503, de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro.

BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana.

COLE, D. M. Laboratory observations of frictional sliding of individual contacts in geologic materials. *Granular Matter*, Vol. 17, 95–110, Nov 2014.

DERJAGUIN, B. Molekulartheorie der äußeren Reibung. *Zeitschrift für physik a hadrons and nuclei*, v. 88, n. 9, p. 661-675, 1934.

DO, M; CERESO. V. Road surface texture and skid resistance. *Surface Topography: Metrology and properties*, Vol 3, 1-17, 2015.

FERNANDES, Ana; NEVES, José. Threshold values of pavement surface properties for maintenance purposes based on accidents modelling. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 15, n. 10, p. 917-924, 2014.

GAO, J; LUEDTKE, W. D.; GOURDON, D.; RUTHS, M.; ISRAELACHVILI, J.N.; LANDMAN, U. Friction forces and Amontons' law: from molecular to the macroscopic scale, *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol 108, No. 11, 3410 – 3425, 2004.

GRÖNQVIST, Raoul et al. Slip resistance versus surface roughness of deck and other underfoot surfaces in ships. *Journal of occupational accidents*, v. 13, n. 4, p. 291-302, 1990.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Física 1**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. , 1983.

HEAD, K. H. *Manual of Soil Laboratory Testing, Soil Classification and Compaction Tests*, vol. 1. **2nd. ed.) Pentech press, London**, 1992.

HEISE, Rainer; POPOV, Valentin L. Adhesive contribution to the coefficient of friction between rough surfaces. **Tribology letters**, v. 39, n. 3, p. 247-250, 2010.

HINRICHS, Ruth et al. Phase characterization of debris generated in brake pad coefficient of friction tests. **Wear**, v. 270, n. 7, p. 515-519, 2011.

Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas aglomerações urbanas brasileiras: relatório executivo / Ipea, ANTP. - Brasília : Ipea : ANTP, 2003.

Injury Facts. National Safety Council, edição 2015.

JACOBS, Jane. (1961) **Morte e vida de grandes cidades**. 1º edição. São Paulo: Livraria Martins Fontes Editora, 2000.

KANAFI, Mona Mahboob; TUONONEN, Ari Juhani. Top topography surface roughness power spectrum for pavement friction evaluation. **Tribology International**, v. 107, p. 240-249, 2017.

MALATESTA, M. E. B. **Andar a pé: um modo de transporte para a cidade de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Paisagem e Ambiente) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

MARINGÁ. Lei Complementar N. 1.045. de 23 de março de 2016. Institui o Código de Edificações e Posturas Básicas para projeto, implantação e licenciamento de edificações no Município de Maringá e dá outras providências.

MARINGÁ. NRM U-20001, de 28 de agosto de 2016. Das calçadas – desenho, acessibilidade e mobilidade.

NEMIRE, K.; JOHNSON, D. A.; VIDAL, K. The science behind codes and standards for safe walkways: Changes in level, stairways, stair handrails and slip resistance. *Applied Ergonomics*, Vol. 52, 306 – 316, Jan 2016.

Normas ABNT. Disponível em: <<http://www.pessoacomdeficiencia.gov.br/app/normas-abnt>>. Acesso em 28 out. 2017.

POTYONDY, J. Gl. Skin friction between various soils and construction materials. **Geotechnique**, v. 11, n. 4, p. 339-353, 1961.

POWERS, Christopher M. et al. Utilized coefficient of friction during walking: static estimates exceed measured values. *Journal of Forensic Science*, v. 47, n. 6, p. 1303-1308, 2002.

ROWE, Peter W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. In: **Proceedings of the royal society of London a: mathematical, physical and engineering sciences**. The Royal Society, 1962. p. 500-527.

SINAPI – Índices da Construção Civil – Caixa Econômica Federal, 2016. Cadernos técnicos de composição para produção de concreto. Lote 1. Disponível em: <[http://www1.caixa.gov.br/gov/gov\\_social/municipal/programa\\_des\\_urbano/SINAPI/index.asp](http://www1.caixa.gov.br/gov/gov_social/municipal/programa_des_urbano/SINAPI/index.asp)>. Acesso em: 01 set. 2017.

SILVA, S. L.; SOUZA, A. M. R.; SILVA, B. J.; JUNIOR, C.V.C.; ALVES, D. F.; TEIXEIRA, F.M.C.; AUGUSTO, I.C.F.; VIDOTTI, J.M. Avaliação do coeficiente de atrito de calçada com adição de grãos de borracha de pneus no concreto. **ISSN 2178-0471**, v.3, n. 2, p. 40-46, 2012.

STRANDBERG, Lennart. On accident analysis and slip-resistance measurement. *Ergonomics*, v. 26, n. 1, p. 11-32, 1983.

TAJDINI, M.; MAHINROOSTA, R.; TAHERKHANI, H. An investigation on the mechanical properties of granular materials in interface with asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 62, 85 – 95, 2014.

UECKERMANN, Andreas et al. A contribution to non-contact skid resistance measurement. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 7, p. 646-659, 2015.

YÁZIGI, Eduardo. **O mundo das calçadas**: por uma política democrática de espaços públicos. 1º edição. São Paulo: Humanitas/FFLCH6/USP, 2000.

YEKKALAR, M.; HASALBACH, L.; LANGFITT, Q. Testing development of diferente surface treatments on pervious concrete. *Frontiers of Structural and Civil*, Vol 10(4), 385-393, 2016.

ZAMORA, T.; ALCÁNTARA, E.; ARTACHO, M.A.; CLOQUELL, V. Influence of pavement desing parameters in safety perception in the elderly. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol 38, 992-996, 2008.