

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO VÍTOR TOIGO COSTA

**ANÁLISE DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA - ISC DE SOLOS
TÍPICOS DO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL – RS.**

CAXIAS DO SUL

2020

PEDRO VÍTOR TOIGO COSTA

**ANÁLISE DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA - ISC DE SOLOS
TÍPICOS DO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL – RS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul como requisito final à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a Ma. Jaqueline Bonatto.

CAXIAS DO SUL

2020

PEDRO VÍTOR TOIGO COSTA

**ANÁLISE DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA - ISC DE SOLOS
TÍPICOS DO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL – RS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul como requisito final à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a Ma. Jaqueline Bonatto.

Aprovado em ___/ ___/ ___

Banca Examinadora

Prof.^a Ma. Jaqueline Bonatto
Universidade de Caxias do Sul – UCS / Orientadora

Prof. Me. Matheus Lemos Nogueira
Universidade de Caxias do Sul – UCS / Convidado Interno

Prof.^a Ma. Jéssica Flesch Novaes
IMED / Convidado Externo

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise do Índice de Suporte Califórnia – ISC de três solos típicos do município de Caxias do Sul, classificando-os quanto à sua capacidade de suporte e quanto a sua aplicabilidade em subleitos de projetos de pavimentação. Ensaio de caracterização realizados indicaram que ambas amostras analisadas apresentaram aspecto grosseiro, não coesivo, fracamente plástico e pouco expansivo. O ensaio ISC foi realizado em três etapas: Obtenção da curva de compactação e moldagem dos corpos de prova a umidade ótima; análise da expansão da amostra submersa; rompimento dos corpos de prova na prensa. A amostra denominada Caxias foi a que obteve a melhor performance no ensaio ISC, com índice de 12,67 %, seguido das amostras Canyon e Forqueta, com índices respectivos de 7,61% e 7,33%. Ambos materiais estudados demonstraram índices expansivos dentro dos parâmetros estabelecidos pelo DNIT, contudo os valores de ISC obtidos foram abaixo do esperado, tendo em vista valores indicados pela bibliografia.

Palavras-chave: ISC, CBR, pavimentação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente aos meus Pais Nelson, Helena e minha avó Maria. Essa conquista só foi possível graças ao seu apoio incondicional, e é a vocês que eu a dedico.

Agradeço minha namorada Aline, pelo apoio e compreensão nos momentos de dificuldade. Essa conquista também é sua.

Agradeço, em especial, à minha orientadora Jaqueline Bonatto, por me auxiliar no desenvolvimento desse trabalho. Levo comigo para a vida seu exemplo de profissionalismo e paixão pela profissão. Aproveito para agradecer também todo corpo docente do curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul. Cada um de vocês fez a diferença na minha formação, e por isso, serei eternamente grato.

Agradeço ao governo federal pela oportunidade de cursar o ensino superior por meio do Programa Universidade para Todos. A educação transforma e liberta, e só por meio dela será possível construir um país digno e justo para todos.

E por fim, quero agradecer a todos meus amigos do CCET e da vida. Vocês foram meu apoio e inspiração durante toda minha trajetória acadêmica, me guiando e orientando através dessa jornada.

SUMÁRIO

1. INTODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	14
1.1.1. Objetivo geral.....	14
1.1.2. Objetivos específicos.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1.1. Generalidades	15
2.1.2. Origem e formação	16
2.1.3. Compactação dos solos.....	18
2.2. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	20
2.2.1. Generalidades	20
2.2.2. SUCS: Sistema Unificado de Classificação dos Solos.....	20
2.2.3. TRB - Transportation Reasearch Board	22
2.2.4. Índice de grupo (IG)	23
2.3. CONFIGURAÇÕES DOS PAVIMENTOS	25
2.3.1. Distribuição das tensões no pavimento.....	25
2.3.2. Classificação dos pavimentos.....	26
2.3.2.1. Pavimentos Flexíveis	26
2.3.2.2. Pavimento semi-rígido.....	26
2.3.2.3. Pavimento Rígido.....	27
2.3.3. Constituição dos pavimentos	28
2.3.3.1. Revestimento	28
2.3.3.2. Camadas de ligação	29
2.3.3.3. Base	29
2.3.3.4. Sub-Base	30

2.3.3.5. Subleito	30
2.3.3.6. Reforço do subleito	31
2.4. CAPACIDADE DE SUPORTE DOS SOLOS	31
2.4.1. Índice De Suporte Califórnia.....	31
3. METODOLOGIA.....	36
3.1. ÁREA DE ESTUDO	36
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	41
3.2.1. Análise granulométrica	41
3.2.2. Limite de liquidez - LL.....	42
3.2.3. Limite de plasticidade - LP	44
3.2.4. Limites de consistência	45
3.2.5. Índice de Suporte Califórnia	46
3.2.5.1. Ensaio de Compactação Proctor	46
3.2.5.2. Imersão do corpo de prova e ensaio de expansão.	46
3.2.5.3. Rompimento do corpo de prova	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.2. DESCRIÇÃO DO MATERIAL COLETADO	48
4.3. ANÁLISE GREULOMÉTRICA	50
4.4. LIMITES DE CONSISTÊNCIA	53
4.4.1. Limite de liquidez e limite de plasticidade	53
4.5. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	55
4.5.1. Classificação SUCS.....	55
4.5.2. Classificação HRB	56
4.6. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO.....	56
4.7. ENSAIO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA	59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil típico de um solo residual	15
Figura 2 - Processo de erosão eólica	16
Figura 3 - Curva de compactação	18
Figura 4 - Curvas de compactação características.....	19
Figura 5 - Terminologias utilizadas na Classificação unificada.....	21
Figura 6 - Esquema para classificação pelo método unificado	21
Figura 7 - Esquema para classificação dos solos pelo método TRB	22
Figura 8 - Relações prováveis entre as metodologias de classificação SUCS e TRB....	23
Figura 9 - Relações entre HRB e IG.....	24
Figura 10- Modelo genérico de distribuições das tensões em um pavimento	25
Figura 11- Revestimento asfáltico sobre base granular.....	26
Figura 12 - Pavimento rígido - Serra da Rocinha - SC.....	27
Figura 13 - Classificação dos Revestimentos	28
Figura 14 - Terminologia das bases.....	29
Figura 15 - Subleito regularizado	30
Figura 16 - Compactação do corpo de prova.....	32
Figura 17- Verificação das leituras de expansão	32
Figura 18 - Rompimento do corpo de prova na prensa manual Marshall/CBR	33
Figura 19 - Correlações entre classificação HRB e valores de ISC	34
Figura 20 - Correlações entre IG e ISC	35
Figura 21 - Solos do município de Caxias do Sul	36
Figura 22 - Arcabouço geológico do município de Caxias do Sul.....	37
Figura 23 - Unidades geotécnicas da área urbana do município de Caxias do Sul.	38
Figura 24- Contato entre os materiais Caxias e Canyon	39
Figura 25 - Preparação da amostra com secagem prévia.....	39
Figura 26 - Afloramento do dacito Caxias	40
Figura 27-Solo residual tipo Canyon.....	40
Figura 28 – Ensaio de limite de liquidez	43
Figura 29 - Ensaio de limite de plasticidade.....	44

Figura 30-Classificação das argilas segundo IC.....	45
Figura 31 - Leituras padrão ISC	47
Figura 32 - Dacito Caxias/Carijó.....	48
Figura 33 - Dacito Forqueta	49
Figura 34 - Amostragem solo Canyon.....	49
Figura 35 - Curvas granulométricas	50
Figura 36 - Peneiramento fino solo Forqueta	51
Figura 37 - LL e LP - Solo Caxias/Carijó	53
Figura 38 - LL e LP - Solo Forqueta	54
Figura 39 - LL e LP Solo Cândia	54
Figura 40- Curva de compactação - Solo Caxias/Carijó	57
Figura 41 - Curva de compactação - Solo Forqueta	57
Figura 42- Curva de compactação - Canyon	58
Figura 43 - Pressão x penetração - Caxias/Carijó.....	59
Figura 44 - Pressão x Penetração - Forqueta	60
Figura 45 - Pressão x Penetração - Canyon.....	61
Figura 46-Pressão x penetração - Caxias, Forqueta e Canyon	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores ISC e expansão parâmetro para as camadas do pavimento.....	34
Tabela 2 - Classificação granulométrica	41
Tabela 3-Quantidade de amostra para análise granulométrica.....	42
Tabela 4- Peneiras ABNT.....	42
Tabela 5 - Distribuição Granulométrica solo Caxias/Carijó	51
Tabela 6 - Distribuição granulométrica solo Forqueta	52
Tabela 7 - Distribuição granulométrica solo Cândia	52
Tabela 8 - Resumo índices de consistência	55
Tabela 9 - Resumo parâmetros granulométricos SUCS	55
Tabela 10 - Parâmetros granulométricos HRB.....	56
Tabela 11 - Tabela resumo classificação e índice de grupo	56
Tabela 12 – Tabela resumo umidade ótima e massa específica aparente seca máxima .	58
Tabela 13 - Expansão e ISC - Caxias/carijó.....	59
Tabela 14 - Expansão e ISC Forqueta	60
Tabela 15 - Expansão e ISC Canyon	61

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1	(22)
EQUAÇÃO 2	(41)
EQUAÇÃO 3	(41)
EQUAÇÃO 4	(44)
EQUAÇÃO 5	(44)

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CBR - Califórnia Bearing Ratio;

CNT – Confederação Nacional dos Transportes

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes;

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia Estatística

IC - Índice de Consistência

IG – Índice de Grupo

IP - Índice de Plasticidade

ISC – Índice de Suporte Califórnia

HRB/TRB - *Highway Research Board*

LL - Limite de Liquidez

LP - Limite de Plasticidade

Mpa – Megapascal

NBR - Normas Brasileiras;

1. INTODUÇÃO

Em um país de proporções continentais como o Brasil, com diversas regiões produtoras de alimentos ou matéria-prima, o sistema de transportes ganha grande relevância, tornando-se estratégico para a economia, afirma Senço (2006). Segundo dados da Confederação Nacional dos Transportes, o modal rodoviário representa 61,1% da movimentação de cargas no país e só o setor de transporte, armazenagem e correio, em 2019, foi responsável por 2,2% do PIB (CNT, 2019). A mesma pesquisa revela que cerca de 17,4% dos pavimentos avaliados encontram-se em estado ruim/péssimo, sendo que no Rio Grande do Sul quase 20% delas encontram-se em estado ruim/péssimo. Isso se reflete na economia, pois eleva o custo operacional dos transportes – em torno de 28,5 %, resultando no aumento dos custos finais e queda de arrecadação.

Em obras rodoviárias, o solo entra como solução para muitos problemas, pois constitui um bom material para ser empregado e geralmente encontra-se disponível nas proximidades da obra, expõe Senço (2006). Isso realça a necessidade de se investigar e conhecer os solos e suas propriedades de engenharia, afim de projetar obras econômicas e seguras, afirma Massad (2016).

Em aterros rodoviários, o ensaio de Índice de Suporte Califórnia, ou *Califórnia Bearing Ratio* é um dos mais aceitos para avaliação do comportamento de um solo, afirma Senço (2006); seu resultado é parâmetro utilizado em diversas metodologias de dimensionamento de pavimentos flexíveis, afirma Balbo (2007), além de servir como parâmetro para realização dos ensaios de controle tecnológico, necessários para garantia da qualidade da obra. Embora existam novas tecnologias aplicadas a ensaios de solos, o ISC não deixa de ser um importante parâmetro para avaliar as condições de suporte de um dado solo para aplicação rodoviária.

Diante do contexto, esse trabalho visa analisar o comportamento de três solos típicos do município de Caxias do Sul por meio do ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC, verificando assim, sua aplicabilidade em projetos de pavimentação rodoviária.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Analisar 3 diferentes tipos de solo característicos do município de Caxias do Sul em função do seu Índice de Suporte Califórnia.

1.1.2. Objetivos específicos

- a) Caracterizar fisicamente os 3 solos selecionados para o estudo, classificando-os nas metodologias SUCS e TRB;
- b) Caracterizar geotecnicaamente os solos selecionados;
- c) Realizar o Ensaio de ISC.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

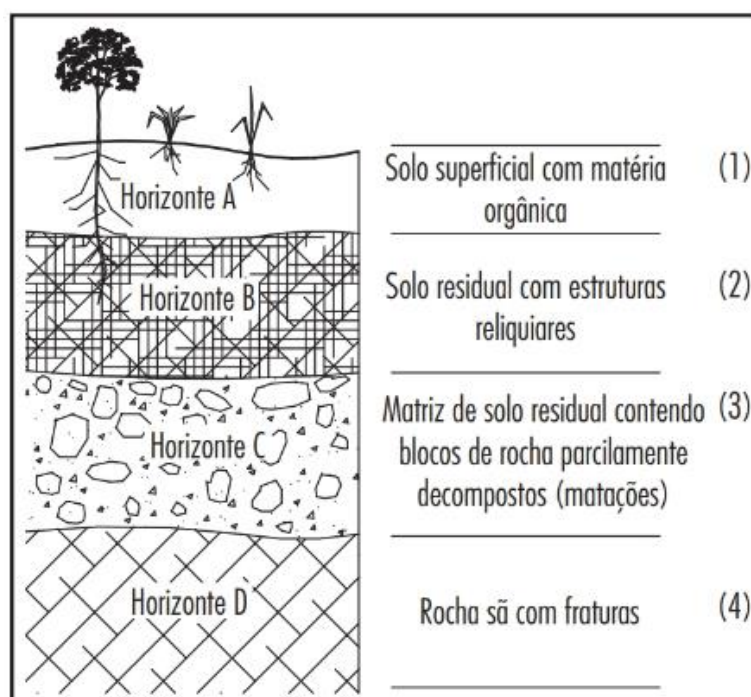
2.1.SOLO

2.1.1. Generalidades

O solo é um dos materiais mais antigos utilizados na construção civil (SENÇO, 2007). Sua utilização remonta às primeiras civilizações, sendo utilizado na construção de diques, barragens, estradas e etc. Obras das quais muitas estão conservadas até hoje e são testemunhas da evolução da engenharia pelos séculos, como por exemplo, as famosas estradas romanas, que na antiguidade, ligavam todo império à capital Roma, em uma extensa malha de estradas, somando mais de 80.000 km. (BALBO, 2007).

Segundo Maciel (1994) sua abundância está diretamente relacionada com suas peculiaridades regionais. Todo solo se origina a partir do processo de intemperismo de alguma rocha ocorrente. Isso faz com que as propriedades físicas e geotécnicas do solo estejam diretamente ligadas com as propriedades da rocha decomposta, como demonstrado na figura 01, onde é mostrado um perfil típico de solo residual.

Figura 1 - Perfil típico de um solo residual



Fonte: Queiroz, 2016

2.1.2. Origem e formação

Solo, conforme Caputo (1987) é o conglomerado de partículas de rocha, matéria orgânica, gases e água. É considerado produto final da decomposição de rochas através dos processos de intemperismo na qual a rocha é submetida sendo esses processos de natureza física, química ou biológica. Fatores como clima, vegetação ocorrente, vento e presença de água influenciam diretamente nesse processo, produzindo com mais intensidade um ou outro tipo de intemperismo. Uma rocha exposta na superfície em um local de clima frio resulta, após determinado período, em um produto final (solo) diferente da mesma rocha exposta em um local de clima tropical e úmido (QUEIROZ, 2016).

Os processos de intemperismo, conforme Pinto (2006), são lentos, graduais e não necessariamente ocorrem separadamente. O intemperismo físico ocorre predominantemente através das ações do vento (figura 01), da água e da variação de temperatura, ocasionando a fratura da rocha e possibilitando o ataque de outros agentes, como a infiltração de água e a penetração de raízes por entre as fraturas, fragilizando a rocha.

Figura 2 - Processo de erosão eólica



Fonte: Prefeitura de Ponta Grossa – PR, 2020

Intemperismo químico, conforme DAS (2019), ocorre em áreas de temperatura e umidade constantes, como as regiões tropicais. Os minerais originais da rocha são transformados outros por meio de reações químicas, como carbonatação, oxidação, hidrólise e lixiviação (PINTO, 2006). Um exemplo é a reação da água e do dióxido de

carbono da atmosfera, formando o ácido carbônico, que reage com os minerais existentes nas rochas, originando novos minerais e sais solúveis. Os sais solúveis presentes nos lençóis freáticos e os ácidos orgânicos formados pela decomposição de matéria também contribuem para o intemperismo químico (QUEIROZ,2016).

De acordo com Pinto (2006) e Caputo (1987), a composição mineralógica da rocha matriz influencia diretamente nos elementos resultantes da decomposição química. Caputo (1987) classifica os minerais em quatro grandes grupos:

- Silicatos – Feldspato, mica, quartzo, clorita, talco;
- Óxidos – Hematita, magnetita, clorita;
- Carbonatos – Calcita, dolomita;
- Sulfatos – Gesso, andrinita;

Minerais como o quartzo, por exemplo, presente na grande maioria das rochas, pouco se altera frente à ataques químicos, devido à sua dureza e estabilidade química, sendo encontrado na composição de areias e siltes. Já os feldspatos, mais suscetíveis a esses ataques, dão origem aos argilominerais.

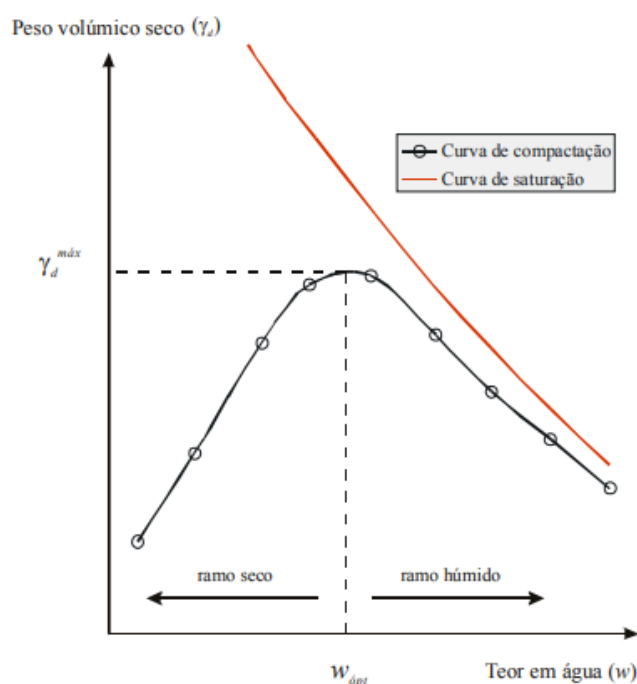
Os argilominerais são considerados de grande importância para a engenharia geotécnica, devido ao seu comportamento plástico e expansivo na presença de água, podendo causar problemas em obras geotécnicas (QUEIROZ, 2016).

2.1.3. Compactação dos solos

A compactação dos solos, segundo Senço (2006), é uma técnica de engenharia desenvolvida por R. Proctor na qual se quer obter, por meio de processos mecânicos, uma maior quantidade de partículas de solo por unidade de volume. Nesse processo, ocorre a redução de índice de vazios do solo, resultando em um melhoramento desse solo, conferindo-lhe uma maior resistência, afirma Pinto (2006).

O processo de compactação pode ser explicado, segundo Pinto (2006), através da curva de compactação, como na figura 04. A curva é obtida pelo ensaio de Proctor, normatizado no Brasil pela NBR 7.182 (ABNT,2016) e apresenta o comportamento de um determinado solo ao ser compactado, em uma energia padronizada, sob diferentes teores de umidade. Campos (2015) divide a curva em dois trechos.

Figura 3 - Curva de compactação



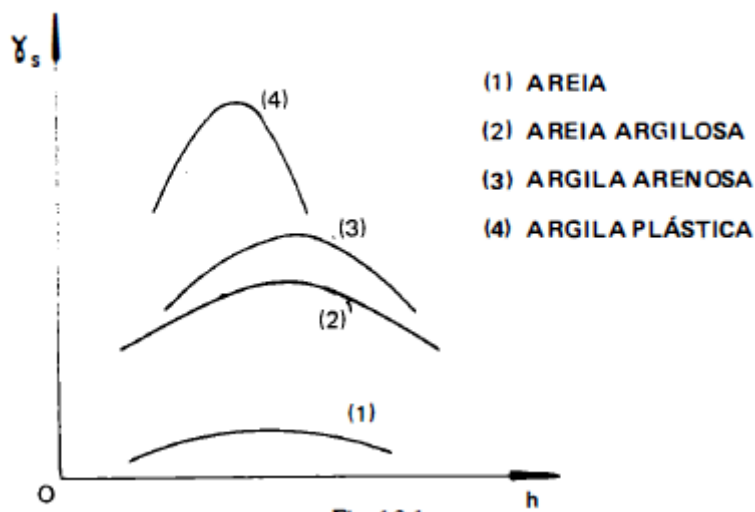
Fonte: Adaptado de Pinto, (2006)

a) ramo seco - encontra-se abaixo do teor de umidade ótima. A medida que se adiciona água, ocorre um efeito de lubrificação, o que possibilita uma maior aproximação das partículas de solo, ocasionando uma densidade maior de solo.

b) ramo úmido – encontra-se acima do teor de umidade ótima. Nesse trecho, a água passa a existir em excesso, o que provoca um afastamento das partículas de solo e a consequente diminuição da densidade. A umidade ótima é aquela correspondente ao peso específico seco máximo na curva de compactação.

Para Lambe (1958, apud. Campos, 2015), com baixos teores de umidade (ramo seco), a concentração eletrolítica é elevada, o que propicia a predominância das forças atrativas, do tipo da de Van der Waals. Adicionando-se água, aquela concentração diminui, permitindo um aumento das forças repulsivas e uma diminuição das atrativas. A figura 05 demonstra curvas de compactação de alguns tipos de solos.

Figura 4 - Curvas de compactação características



Fonte: Caputo, 1986

2.2. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

2.2.1. Generalidades

A diversidade dos solos faz necessário um sistema de classificação, com o intuito de agrupar e classificar os solos conforme suas características e finalidade de seu uso. Pinto (2006) coloca que, no ponto de vista da engenharia, a finalidade da classificação dos solos é prever o seu comportamento e orientar tecnicamente sobre as os melhores métodos executivos.

Sistemas de classificação estão relacionados à padronização e agrupamento de solos em grupos com as mesmas características físicas e/ou geotécnicas, presumindo-se que apresentem o mesmo comportamento, conforme DNIT (2006). Propriedades essas como, teor de umidade, capacidade de suporte, granulometria, consistência, entre outros. Os dois, últimos, em especial, são um dos principais parâmetros à serem analisados por diversas metodologias, devido a facilidade de se obter os resultados via ensaios de caracterização, conforme Senço (2006).

Caputo (1987) enfatiza que os métodos de classificação são importantes, pois constituem um primeiro passo para a avaliação do comportamento de determinado solo, porém, o engenheiro deverá sempre observar outras ferramentas de análise, afim de complementar as investigações necessárias para realização de um projeto.

2.2.2. SUCS: Sistema Unificado de Classificação dos Solos

Idealizado por Casagrande em 1942 surge como ferramenta para os engenheiros da época analisarem dados e dimensionarem obras de terra, facilitando, em um primeiro momento, a classificação por conta da simplicidade dos ensaios, conforme Pinto (2006). De maneira geral, o SUCS classifica os solos em dois grandes grupos, G e S. As terminologias adotadas por esse método estão representadas na figura 05

- a) Solos grossos: percentual passante na peneira #200 (0,075mm) < 50%
- b) Solos finos: percentual passante na peneira #200 > 50%

Figura 5 - Terminologias utilizadas na Classificação unificada

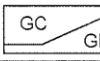
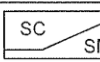
Símbolos	Significado	
	inglês	português
G	gravel	cascalho (pedregulho)
S	sand	areia
C	clay	argila
W	well graded	bem graduado
P	poor graded	mal graduado
F	finer	finos (passando na peneira nº 200)
M	mo	mó ou limo (areia fina)
O	organic	matéria orgânica
L	low liquid limit	LL baixo
H	high liquid limit	LL alto
Pt	peat	turfa

Fonte: DNIT (2006)

A classificação dos solos grosseiros está relacionada à dois parâmetros: CNU (coeficiente de não uniformidade) e CC (coeficiente de curvatura), obtidos através da distribuição granulométrica. Esses solos são representados, conforme Pinto (2006), pelos grupos G e S.

A classificação dos solos finos está ligada às propriedades de liquidez e plasticidade. Essas propriedades estão relacionadas com a fração de finos e sua atividade. São os índices de consistência que expõem melhor esse comportamento, conforme Caputo (1987). Na figura 06 está o esquema para classificação dos solos por essa metodologia.

Figura 6 - Esquema para classificação pelo método unificado

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3
		% P #200 > 12	GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3
		5 < #200 < 12	GC GM 
	S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
		% P #200 > 12	SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3
		5 < #200 < 12	SC SM 
% P #200 > 50	C	CL	
		CH	
	M	ML	
		MH	
	O	OL	
		OH	

Fonte: Pinto (2006)

2.2.3. TRB - Transportation Research Board

TRB (*Transportation Research Board*) também chamado, é um dos métodos mais empregado na engenharia rodoviária, sendo amplamente adotado no mundo todo, afirma Senço (2006).

Ainda de acordo com Senço (2006), a classificação de solos do TRB baseia-se em ensaios de Limite de Liquidez, índice de Plasticidade e o ensaio de granulometria. O método classifica os solos em granulares e coesivos, conforme demonstra a figura 7.

- a) Solos granulares : % passante na peneira #200 <35% - Grupos A1, A2 e A3; Os subgrupos dos solos granulares são determinados por meio de frações granulométricas passantes nas peneiras #10 (2mm) e #40 (0,2mm).
- b) Solos finos: % passante na peneira #200 >35% - Grupos A4, A5, A6 e A7. Os subgrupos dos solos finos são determinados por meio da atividade das argilas, determinada pelos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade.

Figura 7 - Esquema para classificação dos solos pelo método TRB

		% P #10 2,0 mm	% P #40 0,42 mm	% P #200 0,075 mm	IP
% P #200 < 35	A-1a	< 50	< 30	< 15	< 6
	A-1b		< 50	< 25	< 6
	A-3	> 50	< 10	NP	
	A-2	IP			
A-2-5					
A-2-7					
% P #200 > 35	IP				
				A-4	
				A-5	
				A-6	
				A-7-5	
				A-7-6	

Fonte: Pinto (2006)

As metodologias SUCS e TRB apresentam certa similaridade, pois baseiam-se nos mesmos ensaios. Senço (2006) elaborou uma tabela correlacionando as duas metodologias, apresentada na figura 08.

Figura 8 - Relações prováveis entre as metodologias de classificação SUCS e TRB

Grupo USC	Grupo HRB
GW	A-1-a
GP	A-1-a
GM	A-1-b, A-2-4, A-2-5 e A-2-7
GC	A-2-6 e A-2-7
SW	A-1-b
SP	A-3 e A-1-b
SM	A-1-b, A-2-4, A-2-5 e A-2-7
SC	A-2-7 e A-2-6
ML	A-4 e A-5
CL	A-6 e A-7-6
MH	A-7-5 e A-5
CH	A-7-6
OL	A-4 e A-5
OH	A-7-5 e A-7-6

Fonte: Senço (2006)

2.2.4. Índice de grupo (IG)

O Índice de Grupo parametriza os diferentes solos numericamente, por meio da equação 1.

$$IG = 0.2a + 0,05ac + 0,01bd \quad (1)$$

Onde;

p: porcentagem de finos passantes na peneira #200

a: p - 35 ; se $p > 75$, $p=75$; também se $p < 35$, $p=35$

b: p - 15; se $p > 55$, $p=55$; também se $p < 15$, $p=15$

b: LL - 40; se $LL > 60\%$, $LL= 60\%$; também se $LL < 40\%$, $LL=40\%$

d= IP - 10; se $IP > 30$, $IP=30$; também se $IP < 10$, $IP = 10$

O índice varia de zero a vinte, sendo que $IG=0$ representa um ótimo solo para aplicação rodoviária e $G=20$, de má qualidade, devendo ser evitados afirma Caputo (1987). Senço (2006) estabelece relações entre a classificação HRB e os valores de Índice de Grupo, apresentadas na figura 9.

Figura 9 - Relações entre HRB e IG

Classe	Grupo	Comportamento sob o pavimento	Principais características	Índice de Grupo	
Solos graúdos (35% ou menos passando na peneira nº 200)	pedregulho	A-1	Ótimo	Bem graduado	0
		A-2	Satisfatório	Bem ligante	4 (máx.)
	areia	A-3	Precário quanto ao ligante Bom com base	Sem finos	0 (N. P.)
Solos finos (mais de 35% passando na peneira nº 200)	Solos siltosos	A-4	Precário quanto a inchamento devido às chuvas	Siltos e argilas de baixa plasticidade	8 (máx.)
		A-5	Contra-indicado total como base Tolerado como sub-base	Siltos elásticos	12 (máx.)
	Solos argilosos	A-6	Contra-indicado como base ou sub-base	Argilas inorgânicas de média e alta plasticidade	16 máx.)
		A-7	Empregado só com finalidades especiais	Grande maioria de argilas inorgânicas e solos orgânicos	20 (máx.)
Turfa		A-8	Imprestáveis	Solos orgânicos e turfas	

Fonte: Senço (2006)

A maioria dos métodos de classificação foram desenvolvidos fora do país, podendo causar certa confusão na interpretação de dados obtidos via ensaios. Levando isso em conta, diversos autores, entre eles Pinto (2006), alertam que sempre que possível, é necessário ajustar a prospecção para a realidade local, buscando sempre comparar com valores regionais característicos.

2.3. CONFIGURAÇÕES DOS PAVIMENTOS

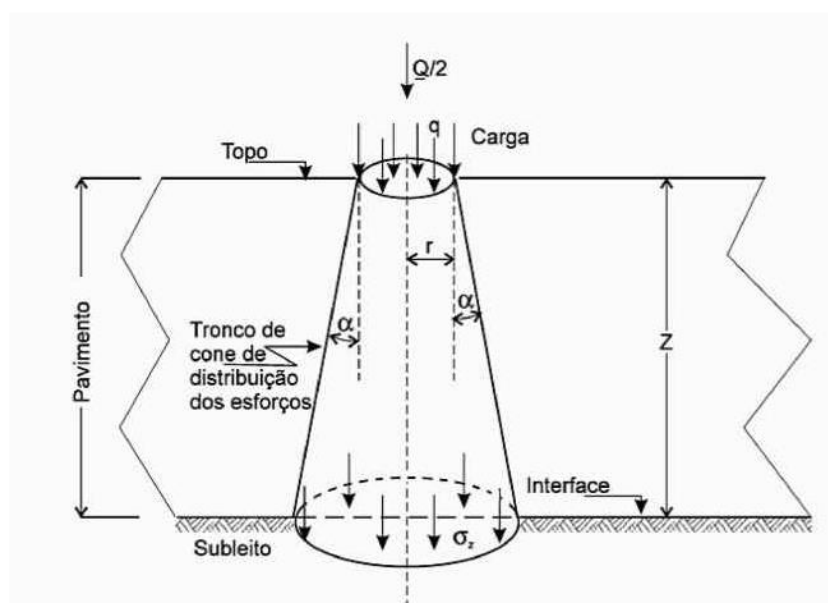
2.3.1. Distribuição das tensões no pavimento

Pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem e destinada, técnica e economicamente, a:

- Resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los às camadas subjacentes, até o solo de fundação;
- Melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança;
- Resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento (SENÇO, 2006).

Trata-se de um sistema constituído de camadas de diferentes materiais, cada qual com sua qualidade e função específicas. Conforme Bernucci et. al (2008) Deverá ser dimensionado para o tráfego previsto no período de projeto e para as condições climáticas as quais estará sujeito (BALBO, 2007). Senço (2006) coloca que de maneira geral, solos com capacidade de suporte ruins ou cargas altas, implicam em pavimentos mais espessos; solos com boa capacidade de suporte e cargas leves, pavimentos delgados. Na figura 10 está exemplificado um modelo genérico que representa a distribuição das cargas no pavimento.

Figura 10- Modelo genérico de distribuições das tensões em um pavimento



Fonte: Senço (2006)

2.3.2. Classificação dos pavimentos

2.3.2.1. Pavimentos Flexíveis

De acordo com Senço (2006) nesse tipo de pavimento, a camada de base é o principal elemento resistente da estrutura. Admite deformação até determinado limite, sendo que em excesso, pode levar a estrutura à ruína por fadiga (CEPSA, 2014). Exemplo: Pavimentos constituídos com base de brita graduada (figura 14), macadame ou solo pedregulhoso, revestidos com material betuminoso.

Figura 11- Revestimento asfáltico sobre base granular



Fonte: DAER, 2018

2.3.2.2. Pavimento semi-rígido

O pavimento semi-rígido se distingue do pavimento flexível por apresentar maior rigidez nas camadas que o constitui, reduzindo assim os esforços transmitidos ao subleito. Segundo Balbo (2007) é recorrente o uso de ligantes, como cimento ou pozolanas com a finalidade de cimentar os agregados que constituem a base. O principal mecanismo de ruína desse tipo de pavimento é pela tração à flexão na qual é submetida a camada de base, cuja repetição leva à ruptura por fadiga (CESPA, 2014). Um exemplo de pavimento semi-rígido: Camada de revestimento asfáltico em base de solo-cimento.

2.3.2.3. Pavimento Rígido

É reconhecido por ter uma camada de revestimento que apresenta elevada rigidez e baixa deformação, absorvendo praticamente todos os carregamentos provenientes do uso, conforme Bernucci et. al, (2008). De certo modo, trata-se de uma placa de concreto de cimento (pode ser armada ou não – figura 15) apoiada sobre o solo de fundação, ou sobre uma ou mais camadas de suporte, conforme CEPSA (2014).

Rompem por tração na flexão quando submetidos a deformações excessivas (SENÇO, 2006). Um exemplo clássico dessa configuração são os pavimentos de concreto, onde as placas podem exercer simultaneamente as funções de revestimento e base.

Figura 12 - Pavimento rígido - Serra da Rocinha - SC



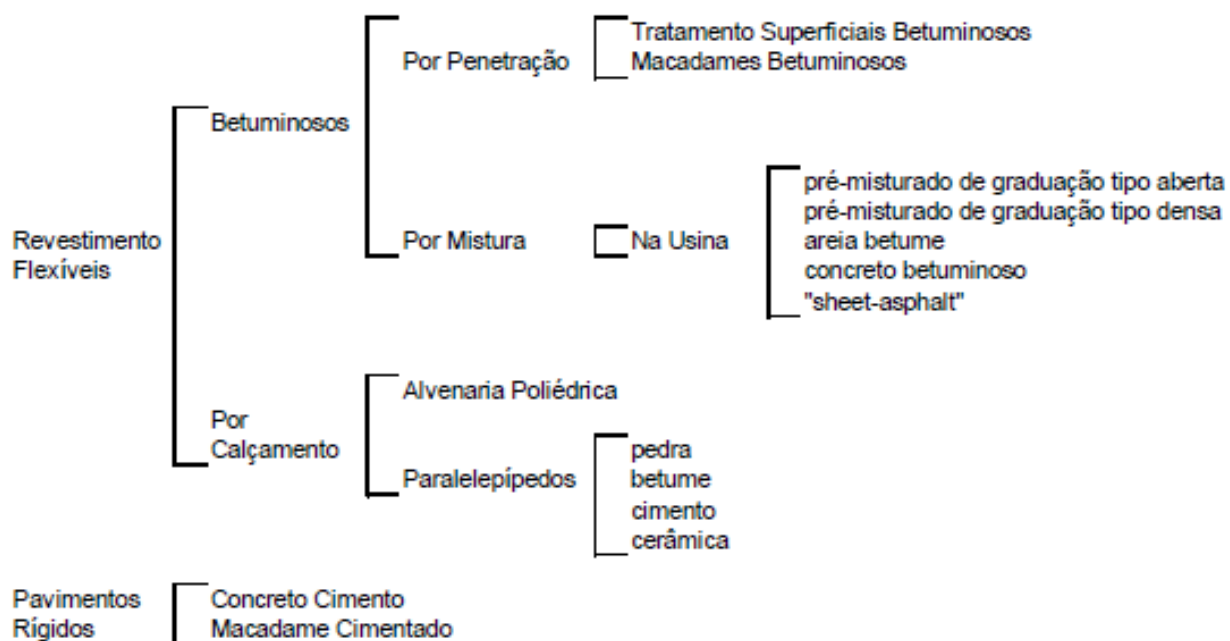
Fonte: DYNAMIS SCEEG, 2019

2.3.3. Constituição dos pavimentos

2.3.3.1.Revestimento

Sua função é melhorar as condições de rolamento, proporcionando conforto e segurança ao usuário (SENÇO, 2006). Deverá resistir à deformação e a abrasão. Por ser a primeira camada responsável pela absorção de esforços de tráfego, requer materiais de boa qualidade em seu emprego. Na figura 11 está a classificação dos revestimentos segundo o DNIT (2006)

Figura 13 - Classificação dos Revestimentos



Fonte: DNIT, 2006

2.3.3.2. Camadas de ligação

As camadas de ligação são compostas de dois processos, denominados imprimação e pintura de ligação. Segundo Balbo (2007), ao executar revestimentos betuminosos como o concreto asfáltico, é necessário criar uma zona de transição entre os dois materiais, impermeabilizando a camada de base. Esse processo é denominado imprimação; esse processo é necessário também ao executar camadas sobrepostas de concreto asfáltico, sendo chamado pintura de ligação.

2.3.3.3. Base

Segundo Senço (2006) trata-se da camada responsável por suportar os esforços oriundos do tráfego e aliviar as tensões para as camadas subsequentes. Constituída geralmente de material granular, pode ter também algum agente aglutinante.

Senço (2006) as classifica (figura 12) em bases granulares e estabilizadas, de maneira que quando a estabilização decorre da própria distribuição granulométrica dos grãos, permitindo a obtenção de uma base densa e relativamente impermeável recebe o nome de base estabilizada granulometricamente. Quando a granulometria ideal é conseguida por meio da adição de pedra britada para suprir a ausência de material graúdo, a camada recebe o nome de solo brita (SENÇO, 2006).

Figura 14 - Terminologia das bases

Bases	Rígidas	Concreto de cimento	
		Macadame de cimento	
		Solo-cimento	
	Flexíveis	Solo estabilizado	Granulometricamente - SAFL
			Solo-betume - Solo-cal
			Solo-brita
		Macadame hidráulico	
		Brita graduada com ou sem cimento	
		Macadame betuminoso	
		Alvenaria poliédrica	por aproveitamento
		Paralelepípedos	

Fonte: Senço (2006)

2.3.3.4. Sub-Base

Quando, por motivos técnicos, a base requerer uma grande espessura, ou não for aconselhável executá-la em uma camada, aconselha-se o dimensionamento de uma sub-base, aponta Balbo (2007). Senço (2006) coloca que, de maneira geral, em pavimentos flexíveis, seu material constituinte deverá ter características tecnológicas superiores às do material da camada inferior e, por sua vez, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base.

2.3.3.5. Subleito

É o solo de fundação da rodovia, como mostra a figura 13. Suas características físicas e geotécnicas influenciam diretamente na espessura das camadas. Em síntese, Senço (2006) coloca que subleitos ruins requerem soluções mais dispendiosas – em outras palavras, camadas mais robustas ou materiais empregados de melhor qualidade, gerando assim, custos maiores à obra.

Figura 15 - Subleito regularizado



Fonte: ANC Urbanizadora, 2016

2.3.3.6. Reforço do subleito

É a camada suplementar do subleito. Geralmente são executados em camadas espessas, em função da má qualidade do material de subleito, ou de cargas de tráfego elevadas, afirma Senço (2006). Por ser a primeira camada construída do pavimento, deverá atender a alguns parâmetros geotécnicos, como $CBR > 2\%$, expansão $< 2\%$ (DNIT, 2006). Além disso, tanto na camada de reforço como nas camadas sequentes, deverá ser controlado o grau de compactação, por meio de ensaios de controle tecnológico, a fim de garantir que parâmetros de projeto, como umidade ótima e peso específico aparente seco máximo tenham sido atingidos.

2.4. CAPACIDADE DE SUPORTE DOS SOLOS

2.4.1. Índice De Suporte Califórnia

O Índice de Suporte Califórnia ou CBR (*California Bearing Ratio*) foi concebido no final da década de 1930 para avaliar a capacidade de suporte dos solos e suas condições de ruptura (SENÇO, 2006). É um dos ensaios mais aceitos para avaliar o comportamento de um solo na aplicação rodoviária, sendo no Brasil normatizado pela NBR 9895 (ABNT, 2016).

Consiste, segundo NBR 9598 (ABNT, 2016) na determinação da pressão necessária para penetrar um cilindro maciço em uma amostra compactada de solo. Através desse ensaio, é possível observar o comportamento de suporte do solo no estado saturado, em diferentes níveis de compactação e teores de umidade.

O ensaio se dá em três etapas: Compactação do solo segundo a normativa NBR 7182 (ABNT, 1986 – figura 16), verificação da expansão da amostra saturada (figura 17) e verificação da resistência à penetração na prensa CBR/Marshall (figura 18). O valor de ensaio se dá em porcentagem, em referência à valores de pressão e penetração padronizados em ensaio com amostra de brita graduada (ISC equivalente 100%).

Figura 16 - Compactação do corpo de prova



Fonte: Britto, 2017.

Figura 17- Verificação das leituras de expansão



Fonte: Britto, 2017.

Figura 18 - Rompimento do corpo de prova na prensa manual Marshall/CBR



Fonte: Britto, 2017.

A resistência ou capacidade de suporte ISC foi correlacionada empiricamente com o desempenho das estruturas levando a um método de dimensionamento de pavimentos que fixa espessuras mínimas da estrutura dependendo do índice de suporte do subleito, de modo a limitar tensões e protegê-lo da ruptura (BERNUCCI et al, 2008).

O ISC é o valor médio calculado para as penetrações de 2,54mm e 5,08mm seguindo as expressões 1 e 2:

$$(1) ISC_{0.1''} = \frac{P_{0.1''}}{70} \cdot 100$$

$$(2) ISC_{0.2''} = \frac{P_{0.2''}}{105} \cdot 100$$

Onde $P_{0.1''}$ = Pressão equivalente (MPa) à penetração de 2.54mm

$P_{0.2''}$ = Pressão equivalente (MPa) à penetração de 5.08 mm

Tabela 1 - Valores ISC e expansão parâmetro para as camadas do pavimento

Camada	ISC	Expansão
Subleito	$\geq 2\%$	$\leq 2\%$
Reforço do subleito	maior que do subleito	$\leq 1\%$
Sub-base	$\geq 20\%$	$\leq 1\%$
Base	$\geq 80\%$	$\leq 0.5 \%$

Fonte: DNIT,2006

Senço (2006) apresenta uma tabela com correlações entre a classificação HRB e os valores de ISC – figura 19. Pode-se observar a influência dos solos mais grosseiros na obtenção de valores elevados de ISC.

Figura 19 - Correlações entre classificação HRB e valores de ISC

Solo (Classificação H. R. B.)	CBR provável (%)
A-1-a	40 a 80 (ou mais)
A-1-b	20 a 80 (ou mais)
A-2-4 e A-2-5	25 a 80 (ou mais)
A-2-6 e A-2-7	12 a 30
A-3	15 a 40
A-4	4 a 25
A-5	2 (ou menos) a 10
A-6 e A-7	2 (ou menos) a 5

Fonte: Senço, 2006.

Senço (2006) também expõe correlações entre valores de ISC e o índice de grupo (figura 20). Segundo ele, de maneira geral, os valores de suporte diminuem com o acréscimo do índice de plasticidade, resultante da presença de finos na amostra.

Figura 20 - Correlações entre IG e ISC

CBR	IG
2	20
3	16
4	13
5	11
7	8
10	5
15	2
20	0

Fonte: Senço, 2006.

3. METODOLOGIA

3.1. ÁREA DE ESTUDO

De acordo com Borsatto (2011) em Caxias do Sul predominam afloramentos de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e arenitos da Formação Botucatu, esses de menor ocorrência. As rochas vulcânicas ocorrentes na região são classificadas como ácidas do tipo Palmas e as básicas do tipo Gramado, sendo que no município de Caxias do Sul há predominância de derrames Dacíticos do tipo Palmas. Borsatto

(2011) classificam os solos ocorrentes no município em cinco unidades distintas, conforme a figura 21. A figura 22 apresenta o arcabouço geológico do município.

Figura 21 - Solos do município de Caxias do Sul

Solo	Cor	Características principais
Ana Rech	Bruno-amarelado	solos não-plásticos horizonte B incipientes e solos saprolíticos
Forqueta	Bruno-avermelhado	solos plásticos (IP ~ 20) bandas de alteração originados, na sua maioria, da porção superior vitrea do Dacito Caxias
Caxias/Carijó	Cinza (carijó) com nuances de vermelho	solos saprolíticos pouco ou não plásticos (IP variável) estruturas estratificadas horizontais geralmente bem visíveis originados da alteração da porção mediana do Dacito Caxias/Carijó
Canyon	Avermelhados e bruno-avermelhados	solos plásticos a muito plásticos, vermelhos a bruno-avermelhados, podem conter argilas expansivas originados da decomposição da espessa porção superior do Dacito Canyon
Galópolis	Bruno-avermelhado	solos plásticos originados dos Dacitos Galópolis. Devido à declividade das zonas de ocorrência, encontram-se geralmente misturados com materiais transportados de cotas superiores (colúvios) - muito heterogêneos, geralmente com alta umidade.

Fonte: Borsatto, 2011

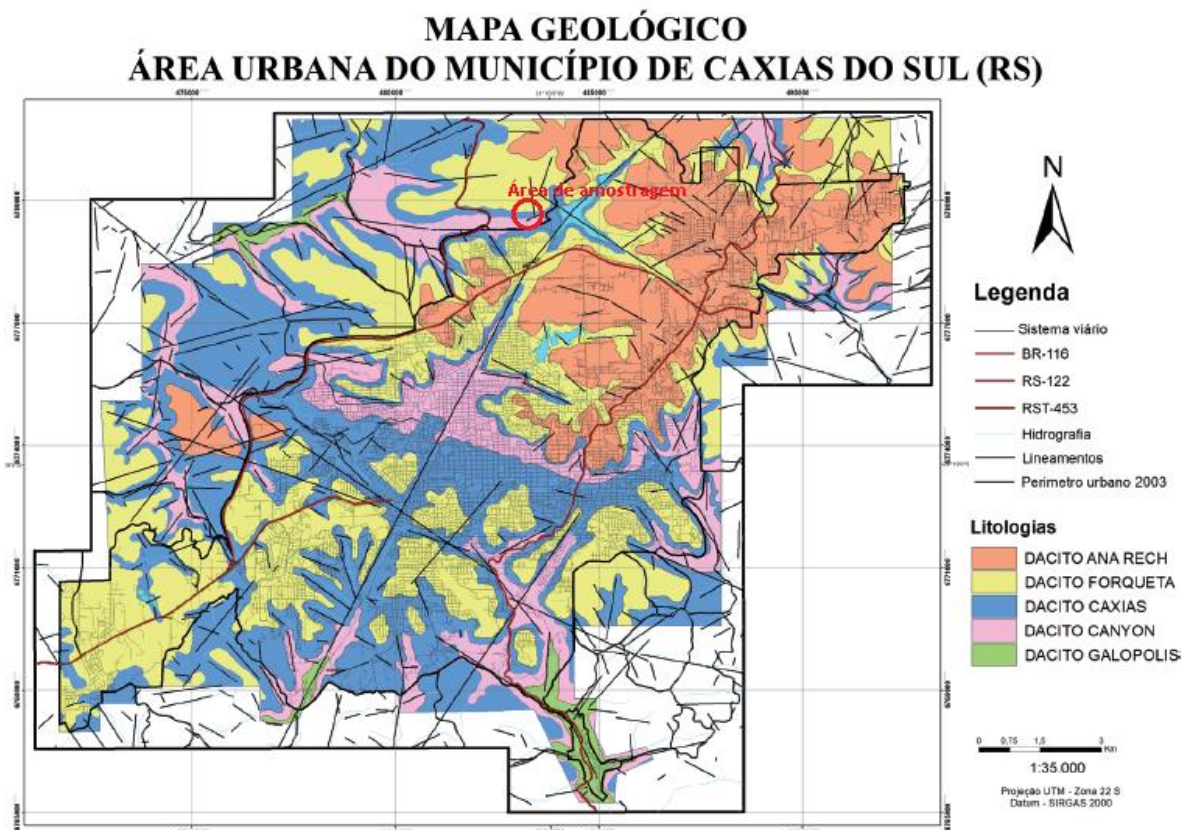
Figura 22 - Arcabouço geológico do município de Caxias do Sul

PERÍODO	IDADE Ma	UNIDADE LITOES- TRATIGRA- FICA	ROCHAS		ESPESSURA	SOLOS
CRETÁCIO INF.	128	FORMAÇÃO SERRA GERAL	TIPO CAXIAS	DACITO ANA RECH	80m	ANA RECH
				DACITO CAXIAS/ CARIJÓ	170m	FORQUETA CAXIAS/CAR
				DACITO CANYON	70m	CANYON
				DACITO GALÓPOLIS	70m	GALOPOLIS
			BASALTOS E ANDESIBASALTOS TIPO GRAMADO		450m	
JURÁS- SICO	138	FORMAÇÃO BOTUCATU	ARENITOS EÓLICOS		160	

Fonte: Borsatto,2011

A área de coleta, localizada na região norte do município, está indicada na figura 23. Trata-se de uma área de contato litológico entre dacitos distintos (figura 24), expõe Borsatto (2011). A justificativa do local escolhido se dá pela facilidade da identificação visual de regiões onde ocorrem contatos entre materiais distintos (figura 24), por meio de afloramentos de rochas e taludes escavados no local.

Figura 23 - Unidades geotécnicas da área urbana do município de Caxias do Sul.

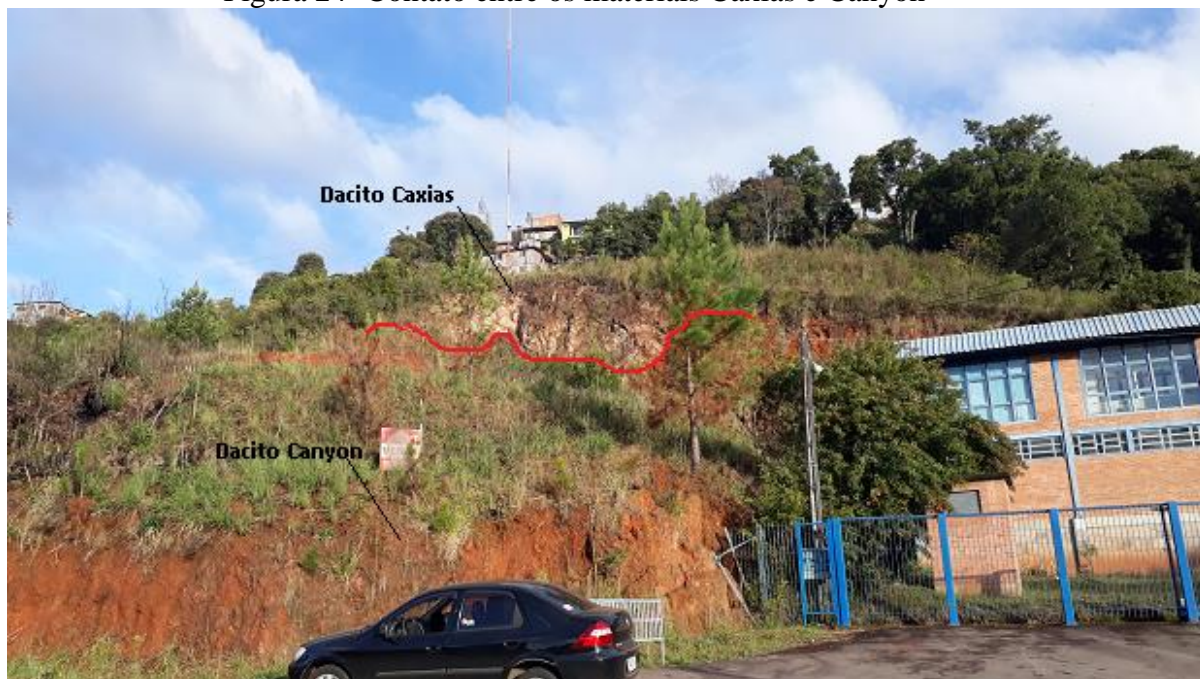


Fonte: Borsatto,2011.

No mapa das unidades geotécnicas, é indicado que na área de coleta há incidência de solos tipo Caxias (figura 27), Forqueta e Canyon (figura 26).

A preparação da amostra ocorreu conforme preconiza a NBR 6.457 (ABNT, 2016), onde a amostra coletada foi colocada para secar ao ar, até atingir humidade próxima à higroscópica, conforme figura 25.

Figura 24- Contato entre os materiais Caxias e Canyon



Fonte: Autor, 2020.

Figura 25 - Preparação da amostra com secagem prévia



Fonte: O Autor, 2020.

Figura 26 - Afloramento do dacito Caxias



Fonte: Autor, 2020.

Figura 27-Solo residual tipo Canyon



Fonte: Autor, 2020.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

3.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica consiste, conforme Senço (2006) em decompor a fase sólida do solo em faixas granulométricas, classificadas de acordo com o diâmetro de suas partículas. A NBR 6.502 (ABNT,1993) define as faixas granulométricas conforme indicado na tabela 02.

Tabela 2 - Classificação granulométrica

Matacão	Entre 1m e 200mm
Pedra de mão	Entre 200 mm a 60 mm
Pedregulho grosso	Entre 60 mm a 20 mm
Pedregulho médio	Entre 20 mm a 6 mm
Pedregulho fino	Entre 6 mm a 2 mm
Areia grossa	Entre 2 mm a 0.6 mm
Areia média	Entre 0.6 mm a 0.2 mm
Areia fina	Entre 0.2 mm a 0.06 mm
Silte	Entre 0.06 mm a 0.002 mm
Argila	Partículas < 0.002 mm

Fonte: ABNT, 1993

A preparação da amostra para o ensaio segue critérios da NBR 6.457 (ANBT, 2016), onde é indicada a secagem prévia da amostra na sombra, em local seco e arejado, até apresentar umidade próxima à higroscópica; e o destorroamento, tomando cuidado para evitar a quebra dos grãos. Após a secagem, toma-se três amostras de solo em cápsulas para determinação do teor de umidade. Logo em seguida, se homogeneíza e quarteia a amostra, tomando uma quantidade de solo representativa para os ensaios de sedimentação e peneiramento. A quantidade de solo separada para o ensaio é indicada na figura 42, onde previamente, passa-se o material através da peneira 76 mm, e com o material passante, define-se a massa de amostra a ser tomada para os ensaios de análise granulométrica.

Tabela 3-Quantidade de amostra para análise granulométrica

Dimensão dos grãos maiores e contidos na amostra(mm)	Quantidade mínima a tomar(Kg)
<5	1
5a 25	4
>25	8

Fonte: ABNT, 2016

O ensaio ocorre, conforme NBR 7.181 (ABNT, 2017) em duas etapas distintas, através dos ensaios de peneiramento e sedimentação das partículas. Para fins desse trabalho, será realizado o ensaio de peneiramento para determinação da distribuição granulométrica das amostras. O ensaio de peneiramento é iniciado passando a amostra previamente preparada conforme NBR 6.457 (ABNT, 2016) por meio da peneira 2,0 mm. Do material passante nessa peneira será realizado o peneiramento fino, e do material retido, o peneiramento grosso, executado com o auxílio do peneirador mecânico. Na figura 43 estão indicadas as peneiras utilizadas nos ensaios de peneiramento.

Tabela 4- Peneiras ABNT

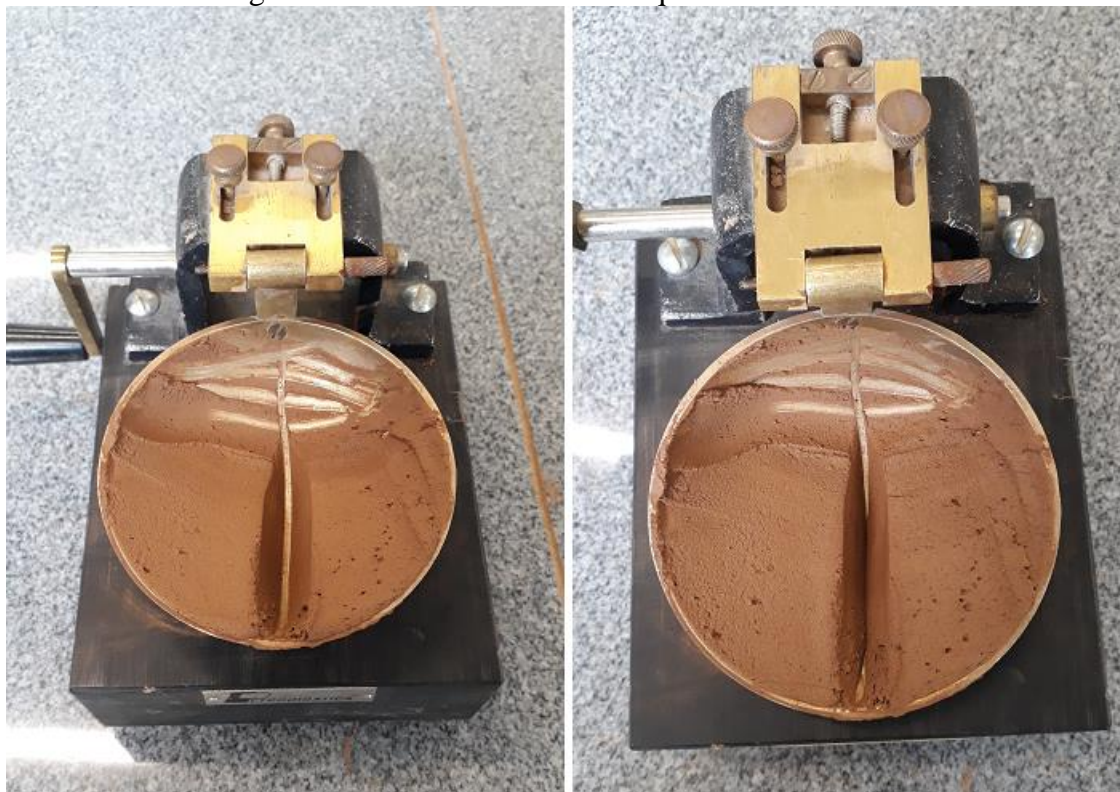
	peneiramento fino	Peneiramento grosso
malha (mm)	50	1.2
	38	0.6
	25	0.42
	19	0.25
	9.5	0.15
	4.8	0.075

Fonte: ABNT, 2016

3.2.2. Limite de liquidez - LL

Como foi visto no capítulo 2, a fração fina dos solos influencia em seu comportamento, através das propriedades plásticas. O limite de liquidez, segundo Senço (2006) é a transição do estado de consistência plástica para o estado de consistência líquida, com o acréscimo de umidade, expresso em porcentagem. A determinação desse parâmetro é normatizada através da NBR 6.459 (2016).

Figura 28 – Ensaio de limite de liquidez



Fonte: O Autor, 2020.

O ensaio consiste em moldar a amostra de solo, previamente preparada conforme NBR 6.457 (ABNT, 2016) no aparelho de Casagrande (figura 27), abrir uma ranhura no meio da concha, e verificar com quantos golpes a ranhura se fecha (a ranhura é considerada fechada quando ambas partes se encostarem por pelo menos 1 cm). São moldadas diversas amostras de maneira que o teor de umidade adicionado em cada uma seja crescente. Após um ser ensaiada, recolhem-se três cápsulas de solo para determinação do teor de umidade em na estufa, sendo que a norma indica a realização do ensaio em 5 pontos, cada um com um teor de umidade diferente. O Limite de liquidez é o teor de umidade, expresso em porcentagem, na qual a ranhura se feche aos 25 golpes.

A NBR 6.459 (ABNT, 2016) alerta sobre o cuidado de sempre ser calibrado o aparelho de Casagrande antes de cada ensaio, afim de garantir uma altura de queda constante, conferindo maior confiabilidade no ensaio.

3.2.3. Limite de plasticidade - LP

O ensaio para determinação do limite de plasticidade, realizado de acordo com a NBR 7.180 (ABNT, 2016) é relativamente simples de executar, porém exige cuidado ao manusear a amostra, pois por se tratar de um ensaio empírico, qualquer descuido poderá acarretar em dados errôneos.

O ensaio consiste tomar uma amostra de solo de 10g previamente preparada, conforme citam as NBR 6.457 (ABNT, 2016) e NBR 7.180 (ABNT, 2016); moldando na palma da mão até que se atinja formato esférico. Após isso, sobre uma placa de vidro esmerilhada, molda-se a amostra em formato cilíndrico até atingir as dimensões aproximadas de 3mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, sem que ocorram trincas ou rachaduras no cilindro moldado, como na figura 28. Utiliza-se um gabarito metálico para verificar se a mesma atingiu os parâmetros desejados. Feito isso, recolhe-se a amostra em 3 cápsulas para determinação do teor de umidade em estufa.

O Limite de plasticidade será o teor mínimo de umidade, expresso em porcentagem, adicionada à amostra para moldar o cilindro com as características acima. A norma exige que sejam feitos pelo menos três pontos, considerando o resultado satisfatório quando houver variação de umidade não superior a 5% entre as amostras. Quando a amostra não possuir as características que permitam a moldagem do cilindro nas condições citadas acima, a mesma será definida como NP – não plástico.

Figura 29 - Ensaio de limite de plasticidade



Fonte: O Autor, 2020.

3.2.4. Limites de consistência

Realizados os ensaios de limite de plasticidade e liquidez, calcula-se os limites de consistência.

- a) Índice de plasticidade – IP; É a zona, definida por Caputo (1987) em que o solo se encontra no estado plástico, sendo assim, quanto maior o IP, tanto mais plástico será o solo. É determinado através da equação 4.

$$IP = LL - LP \quad (4)$$

Sendo que de acordo com Caputo (1987):

Solos francamente plásticos – $1 < IP < 7$

Solos mediantemente plásticos – $7 < IP < 15$

Solos altamente plásticos – $IP > 15$

- b) Índice de consistência – IC; Expresso pela equação abaixo, na qual confere-se a consistência natural de um dado solo por meio da equação 5 Na figura 28 estão indicados os valores referentes.

$$(5) IC = \frac{LL-h}{LL-LP}$$

Figura 30-Classificação das argilas segundo IC

Consistência	Índice de consistência
mole	< 0,5
média	0,5 a 0,75
rija	0,75 a 1,0
dura	> 1,0

Fonte: Pinto (2006)

Uma vez obtidos os dados referentes aos ensaios de análise granulométrica e limites de consistência, será possível classificar as amostras de acordo com a metodologia HRB.

3.2.5. Índice de Suporte Califórnia

3.2.5.1. Ensaio de Compactação Proctor

A primeira etapa do ensaio de Índice de Suporte Califórnia consiste na realização do ensaio de compactação Proctor. A preparação da amostra segue os termos da NBR 6.457 (ABNT, 2016), onde o solo é passado na peneira 19 mm e moldado no cilindro CBR empregando-se a energia de compactação normal (5 camadas, com 13 golpes em cada camada, utilizando o soquete grande), conforme prescreve a NBR 7.182 (ABNT, 2016).

São compactados 5 corpos de prova, sendo 3 no ramo seco e 2 o ramo úmido da curva de compactação. O ensaio deverá começar com o primeiro corpo de prova compactado com teor de água adicionado cerca de 5% abaixo da umidade ótima. De acordo com a NBR 7.182 (ABNT, 2016), se o teor de umidade inicial for acertado no primeiro corpo de prova, será possível observar a massa de cilindro mais solo compactado aumentar até o terceiro ponto do ensaio. Após isso, os dois próximos pontos tendem a ter uma massa específica menor, indicando que o peso específico aparente seco máximo já foi encontrado, cita a NBR 7.182 (ABNT, 2016)). Após a compactação, serão recolhidas cápsulas da amostra para verificação do teor de umidade.

3.2.5.2. Imersão do corpo de prova e ensaio de expansão.

Imediatamente após a compactação, os corpos de prova deverão ser mergulhados em água, com uma lâmina de 3 polegadas sobre eles. Sobre o cilindro é colocada uma sobrecarga de 5kg e um relógio comparador. São anotadas leituras diárias da expansão do solo (em mm).

3.2.5.3. Rompimento do corpo de prova

Após a última leitura, no quinto dia, ocorre o rompimento dos corpos de prova. Para isso, será utilizada a prensa CBR Marshall, equipada com célula de carga, e acionamento automático. O equipamento funciona da seguinte maneira: Acionado o comando, pressiona-se o corpo de prova por meio de um pistão, onde são realizadas

leituras de pressão (por meio da célula de carga) e penetração (por meio de relógios comparadores). As leituras ocorrem de acordo com critérios estabelecidos na NBR 9.895 (ABNT, 1987), como na figura 29.

Figura 31 - Leituras padrão ISC

<i>Tempo (min.)</i>	<i>Penetração (mm)</i>
0,5	0,63
1	1,27
1,5	1,9
2	2,54
2,5	3,17
3	3,81
3,5	4,44
4	5,08
5	6,35
6	7,62
7	8,89
8	10,16
9	11,43
10	12,7

Fonte:ABNT, 2016

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.2. DESCRIÇÃO DO MATERIAL COLETADO

Ao realizar a campanha de coleta de solos, foi possível observar algumas características apresentadas por cada tipo de material, por meio de análise tátil visual. Solos tipo Caxias tem coloração cinza, aspecto grosseiro e pouca plasticidade. Esse material apresenta uma dureza ao destorroar maior que os demais solos estudados. Pode ser identificado através da sua coloração e das estratificações tabulares que o dacito Caxias apresenta, como pode ser observado na figura 32.

Figura 32 - Dacito Caxias/Carijó



Fonte: O Autor, 2020

Solos do tipo Forqueta, de coloração bruno avermelhada também tem aspecto grosseiro, porém, mais plástico que o Caxias. Encontram-se, em topos de erosão e taludes próximos, decorrentes de dacitos com grau de intemperização maior que o material Caxias. Possui algumas características vítreas, como bandas de alteração e um fluxo verticalizado bem marcado, o que justifica perfis mais maduros de solo, como na figura 31.

Figura 33 - Dacito Forqueta



Fonte: O Autor, 2020

Solo Canyon, de coloração bruno-avermelhada, apresenta o aspecto mais plástico entre os demais. É encontrado nas encostas, taludes e áreas de maior declividade, com ocorrência recorrente nos vales da zona norte do município. É possível identificar em campo a presença de fluxo verticalizado, conforme cita Borsatto (2011), ocasionando perfis mais espessos de solo e gerando bandas de alteração, com coloração cinza e amarela, conforme figura 32.

Figura 34 - Amostragem solo Canyon

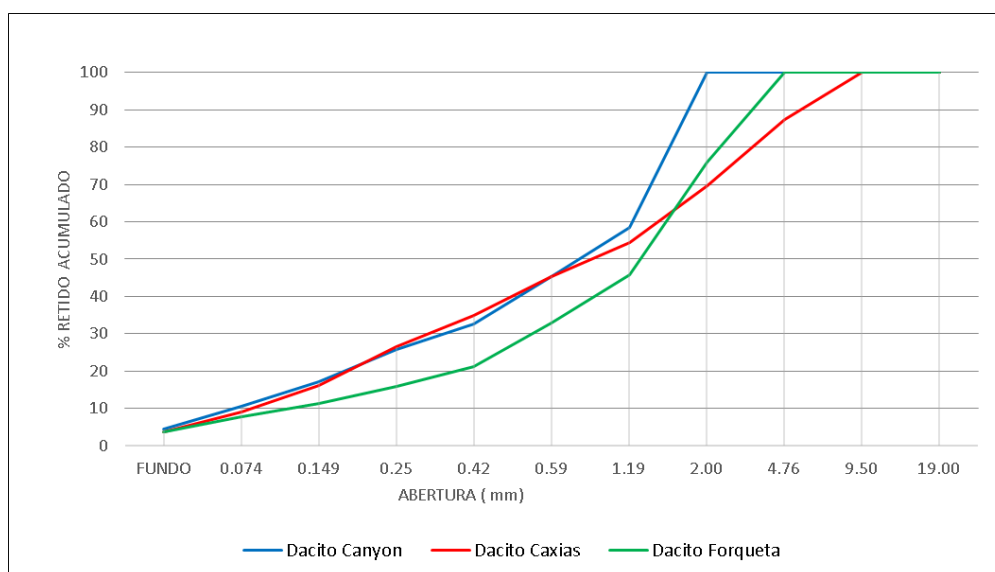


Fonte: O Autor

4.3. ANÁLISE GREULOMÉTRICA

Foram realizados ensaios de granulometria por peneiramento, descartando-se o ensaio de sedimentação, uma vez que todas amostras apresentaram teor de finos (silte e argila) inferior a 5 %, como pode ser observado nas curvas granulométricas, apresentadas na figura 33. Nas tabelas 05, 06 e 07 são apresentadas as distribuições granulométricas. Na figura 35 são apresentadas as curvas granulométricas.

Figura 35 - Curvas granulométricas



Fonte: O Autor, 2020

Figura 36 - Peneiramento fino solo Forqueta



Fonte: O Autor, 2020.

Tabela 5 - Distribuição Granulométrica solo Caxias/Carijó

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA- CAXIAS/CARIJÓ						
Nº	Abertura (mm)	Peso retido (g)	% Retido	% Retido Acumulado	%	Tipo de solo
FUNDO	FUNDO	19.03	3.80	3.80	3.80	Silte-Argila
200	0.074	26.68	5.33	9.13	12.33	Areia fina
100	0.149	35.01	7.00	16.13		
60	0.25	52.13	10.42	26.55	29.29	Areia média
40	0.42	41.74	8.34	34.89		
30	0.59	52.69	10.53	45.42		
16	1.19	44.85	8.96	54.38	8.96	Areia grossa
10	2.00	76.50	15.29	69.67	45.62	Pedregulho
4	4.76	88.91	17.77	87.44		
3/8"	9.50	62.87	12.56	100.00		
3/4"	19.00	0.00	0.00	100.00		
Total pesado nas peneiras:		500.41				

Fonte: O Autor, 2020

Tabela 6 - Distribuição granulométrica solo Forqueta

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA - FORQUETA						
Nº	Abertura (mm)	Peso retido (g)	% Retido	% Retido Acumulado	%	Tipo de solo
FUNDO	FUNDO	18.93	3.80	3.80	3.80	Silte-Argila
200	0.074	20.54	4.13	7.93	7.51	Areia fina
100	0.149	16.84	3.38	11.31		
60	0.25	22.95	4.61	15.92	21.56	Areia média
40	0.42	26.34	5.29	21.21		
30	0.59	58.02	11.66	32.87		
16	1.19	64.87	13.03	45.90	13.03	Areia grossa
10	2.00	150.00	30.13	76.03	54.10	Pedregulho
4	4.76	119.32	23.97	100.00		
3/8"	9.50	0.00	0.00	100.00		
3/4"	19.00	0.00	0.00	100.00		
Total pesado nas peneiras:		497.81				

Fonte: O Autor, 2020

Tabela 7 - Distribuição granulométrica solo Cândia

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA - CANYON						
Nº	Abertura (mm)	Peso retido (g)	% Retido	% Retido Acumulado	%	Tipo de solo
FUNDO	FUNDO	22.32	4.48	4.48	4.48	Silte-Argila
200	0.074	30.18	6.06	10.54	12.70	Areia fina
100	0.149	33.09	6.64	17.18		
60	0.25	43.52	8.73	25.91	28.10	Areia média
40	0.42	33.68	6.76	32.67		
30	0.59	62.85	12.61	45.28		
16	1.19	66.22	13.29	58.57	13.29	Areia grossa
10	2.00	206.47	41.43	100.00	41.43	Pedregulho
4	4.76	0.00	0.00	100.00		
3/8"	9.50	0.00	0.00	100.00		
3/4"	19.00	0.00	0.00	100.00		
Total pesado nas peneiras:		498.33				

Fonte: O Autor, 2020

Os dados apontam um solo grosseiro, com baixa presença de finos (% passante na peneira # 200 < 5%). Ambos materiais apresentaram composição granulométrica semelhante, onde predominam pedregulho e areia, sendo a porção fina (argila e silte)

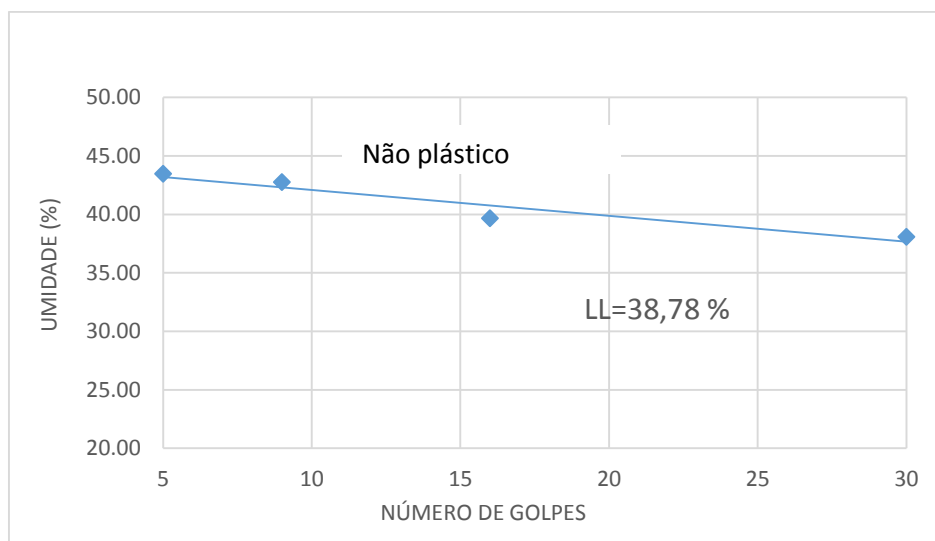
pouco presente. As curvas granulométricas são similares, e apontam uma distribuição contínua, bem distribuída.

4.4. LIMITES DE CONSISTÊNCIA

4.4.1. Limite de liquidez e limite de plasticidade

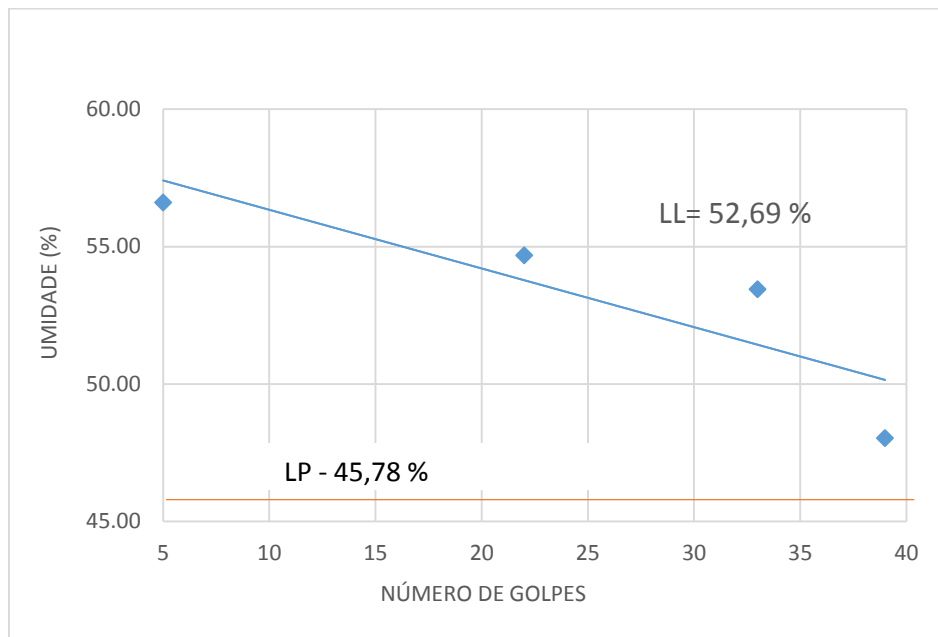
Os ensaios que complementam a caracterização do solo são os limites de consistência. Foram realizados ensaios de limite de liquidez no aparelho de Casagrande e de plasticidade. Os dados são apresentados nas figuras 34, 35 e 36 e tabela 08.

Figura 37 - LL e LP - Solo Caxias/Carijó



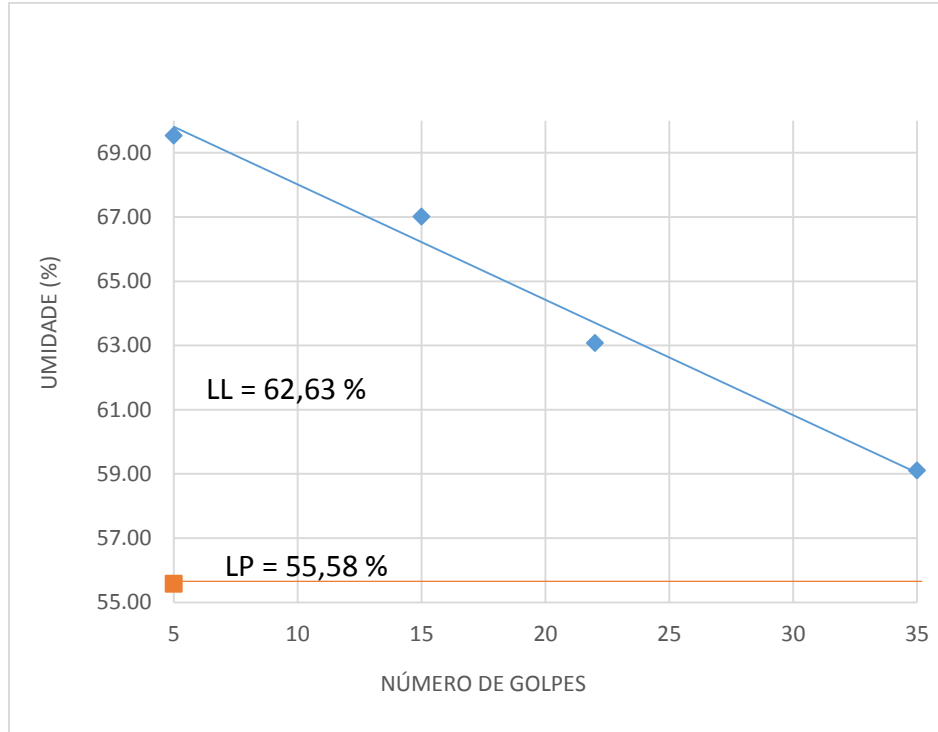
Fonte: O Autor, 2020

Figura 38 - LL e LP - Solo Forqueta



Fonte: O Autor, 2020

Figura 39 - LL e LP Solo Cândia



Fonte: O Autor, 2020

Tabela 8 - Resumo índices de consistência

Solo	LL (%)	LP (%)	IP
Caxias	38.78	NP	-
Forqueta	52.69	45.78	6.91
Canyon	62.63	55.58	7.09

Fonte: O Autor, 2020

Os solos analisados apresentaram baixa plasticidade, consequência da baixa presença de finos em sua composição. Conforme Caputo (1986), podemos classifica-los como fracamente plásticos a não plásticos, como no caso do solo Caxias.

4.5. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

4.5.1. Classificação SUCS

De acordo com o sistema de classificação unificado (Figura 37), os solos analisados foram classificados como GW e GP: areias bem (GW – forqueta e Canyon) e mal graduadas (GP – Caxias/carijó). Os parâmetros de classificação são listados na tabela 09.

Tabela 9 - Resumo parâmetros granulométricos SUCS

Solo	% Passante #200	% Passante #10	D60	D10	D30	Cu	Cc	SUCS
Caxias	3.80%	54.38%	1.6	0.074	0.335	21.62	0.95	GP
Forqueta	3.80%	45.90%	1.6	0.11	0.55	14.54	1.72	GW
Canyon	4.48%	58.57%	1.19	0.074	0.335	15.87	1.26	GW

Fonte: O Autor, 2020

4.5.2. Classificação HRB

De acordo com o sistema de classificação HRB (Figura 38), os solos analisados foram classificados como A1 e A2, correspondentes aos solos grosseiros. Ambos os materiais apresentaram índice de grupo igual a zero, o que representa, segundo Pinto (2006), solos ótimos para aplicação rodoviária. Os parâmetros utilizados na classificação HRB e as subclassificações dos materiais estão listados nas tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 - Parâmetros granulométricos HRB

Solo	LL (%)	LP (%)	IP	% Passante #200	% Passante #10	HRB
Caxias	38.78	NP	-	3.8	54.38	A 2-6
Forqueta	52.69	45.78	6.91	3.8	45.9	A 1-a
Canyon	62.63	55.58	7.05	4.48	58.57	A 2-5

Fonte: O Autor

Tabela 11 - Tabela resumo classificação e índice de grupo

Solo	SUCS	HRB	IG
Caxias	GP	A 2-6	0
Forqueta	GW	A 1-a	0
Canyon	GW	A 2-5	0

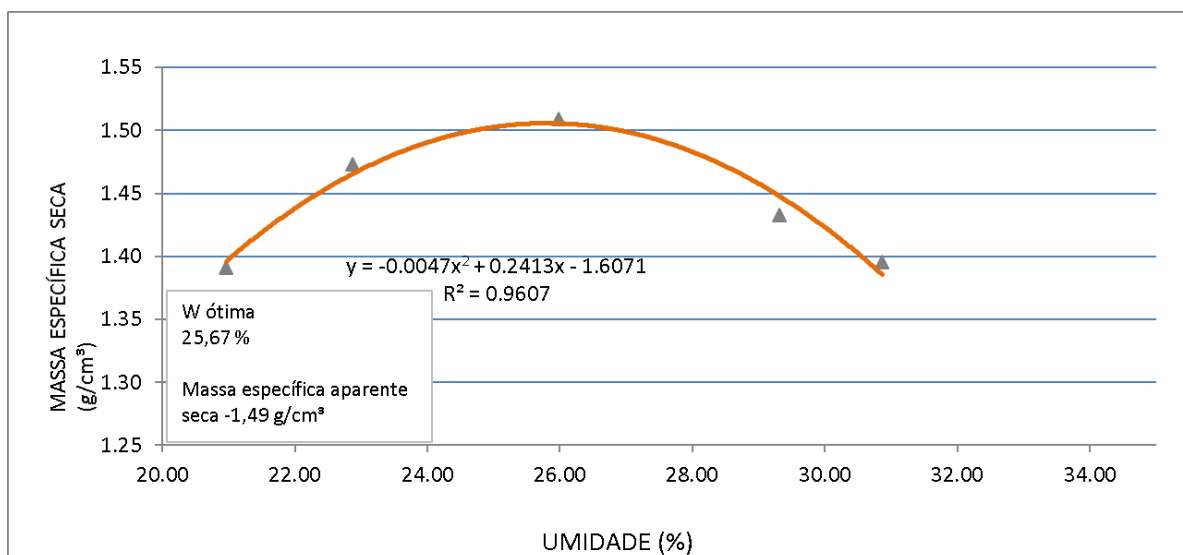
Fonte: O Autor, 2020

4.6. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Para determinação da umidade ótima de compactação e massa específica aparente seca máxima respectiva, foram realizados ensaios de compactação Proctor. Optou-se por realizar o ensaio com a energia normal de compactação e sem reuso de material. A curva de compactação (figuras 39,40 e 41) é obtida com auxílio de recurso gráfico, onde uma

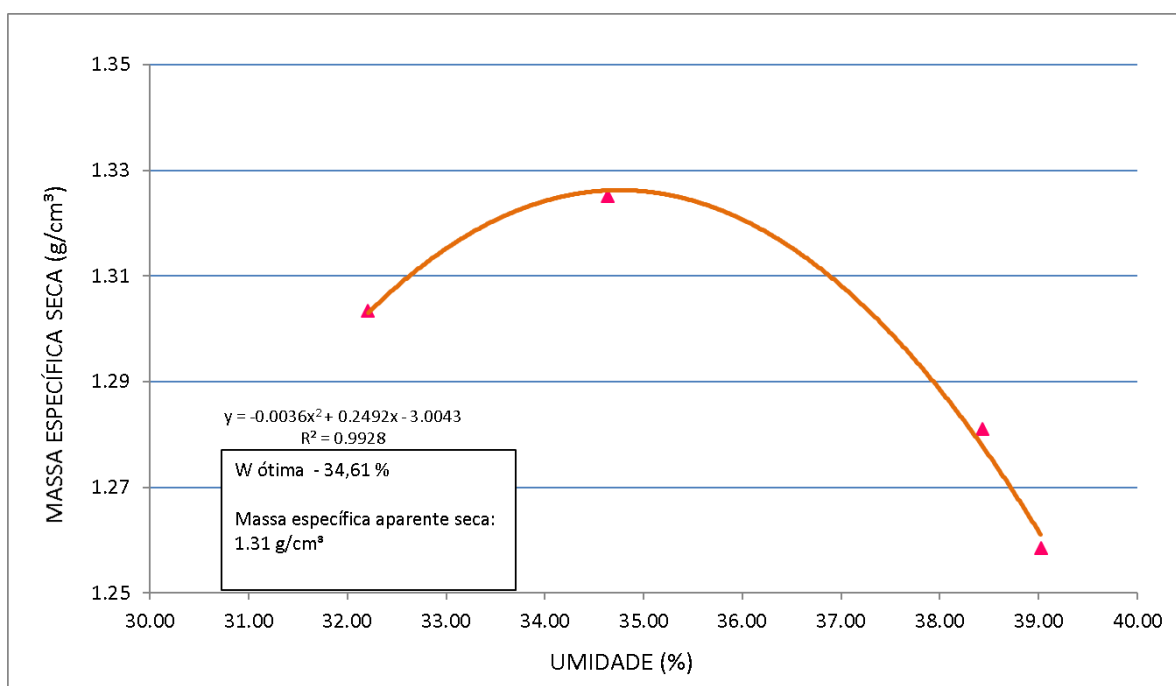
vez plotados os dados de massa específica aparente seca e umidade, se estabelece uma linha de tendência quadrática, sendo assim possível calcular os parâmetros de compactação por meio da equação da curva.

Figura 40- Curva de compactação - Solo Caxias/Carijó



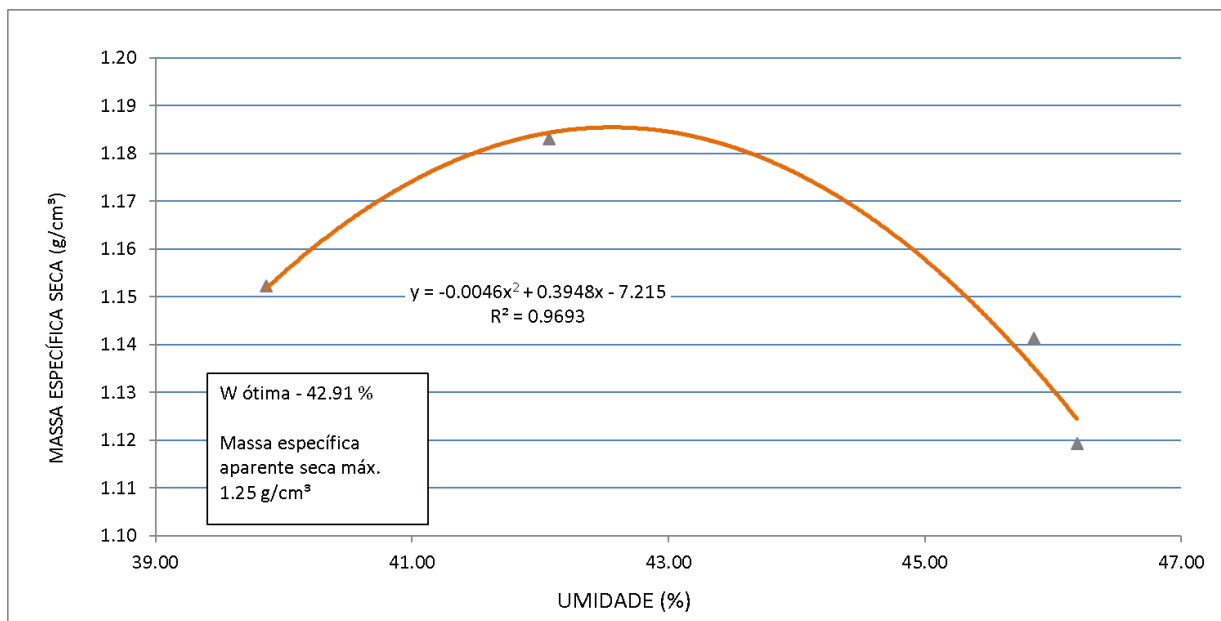
Fonte: O Autor, 2020

Figura 41 - Curva de compactação - Solo Forqueta



Fonte: O Autor, 2020

Figura 42- Curva de compactação - Canyon



Fonte: O Autor, 2020

Os resultados, como pode ser observado na tabela 12, nos mostram que as maiores massas específicas obtidas estão diretamente relacionadas com as menores umidades ótimas de compactação. Isso pode ser explicado pelo fato de que solos granulares praticamente não sofrem influência de propriedades coesivas

Tabela 12 – Tabela resumo umidade ótima e massa específica aparente seca máxima

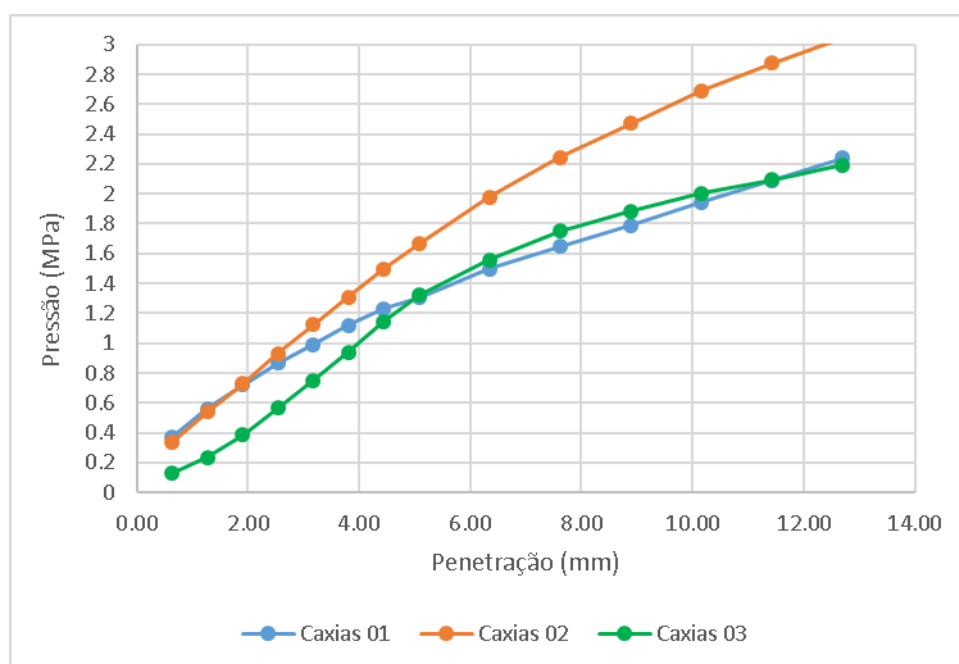
Solo	W ótima	M. esp. Máx.
Caxias	25.67	1.49
Forqueta	34.61	1.31
Canyon	42.91	1.25

Fonte: O Autor, 2020

4.7. ENSAIO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Com os dados de compactação obtidos pela curva de Proctor, foi realizado o ensaio de ISC, onde os corpos de prova foram compactados com o teor de umidade ótima. Para cada amostra de solo foram executados três ensaios, para fins de comparação de resultados. Findada essa etapa, é realizada a imersão das amostras em água, na qual acompanha-se diariamente as leituras de expansão. No quinto dia de ensaio é feito o rompimento dos corpos de prova na prensa CBR. Os gráficos obtidos são apresentados abaixo, nas figuras 43, 44 e 45. Os valores de expansão e o cálculo do ISC é apresentado nas tabelas 13, 14 e 15.

Figura 43 - Pressão x penetração - Caxias/Carijó



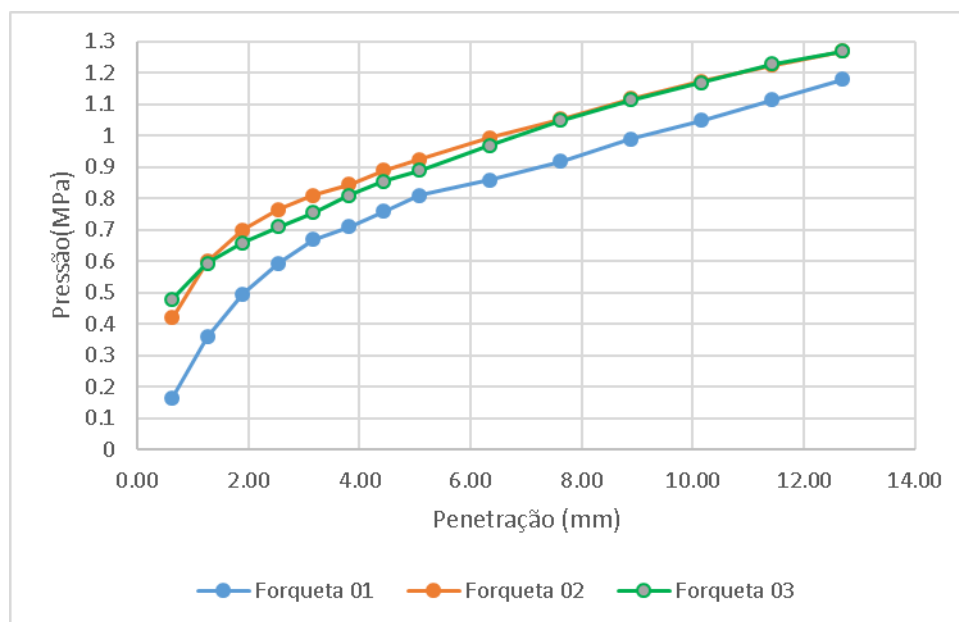
Fonte: O Autor, 2020

Tabela 13 - Expansão e ISC - Caxias/carijó

Amostra	expansão(%)	Média (%)	ISC (%)	Média (%)
CAX 01	0.11	0.49	13	12.67
CAX 02	1.27		15	
CAX 03	0.09		10	

Fonte: O Autor,2020

Figura 44 - Pressão x Penetração - Forqueta



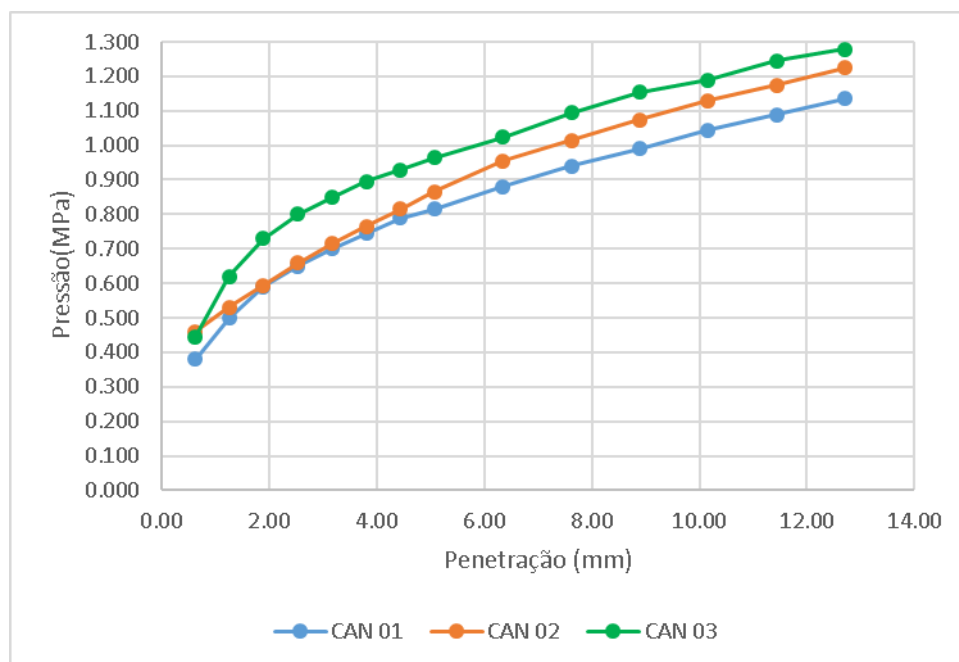
Fonte: O Autor, 2020

Tabela 14 - Expansão e ISC Forqueta

Amostra	expansão(%)	Média (%)	ISC (%)	Média (%)
FQT 01	0.69	0.51	8	7.33
FQT 02	0.27		5	
FQT 03	0.58		9	

Fonte: O Autor, 2020

Figura 45 - Pressão x Penetração - Canyon



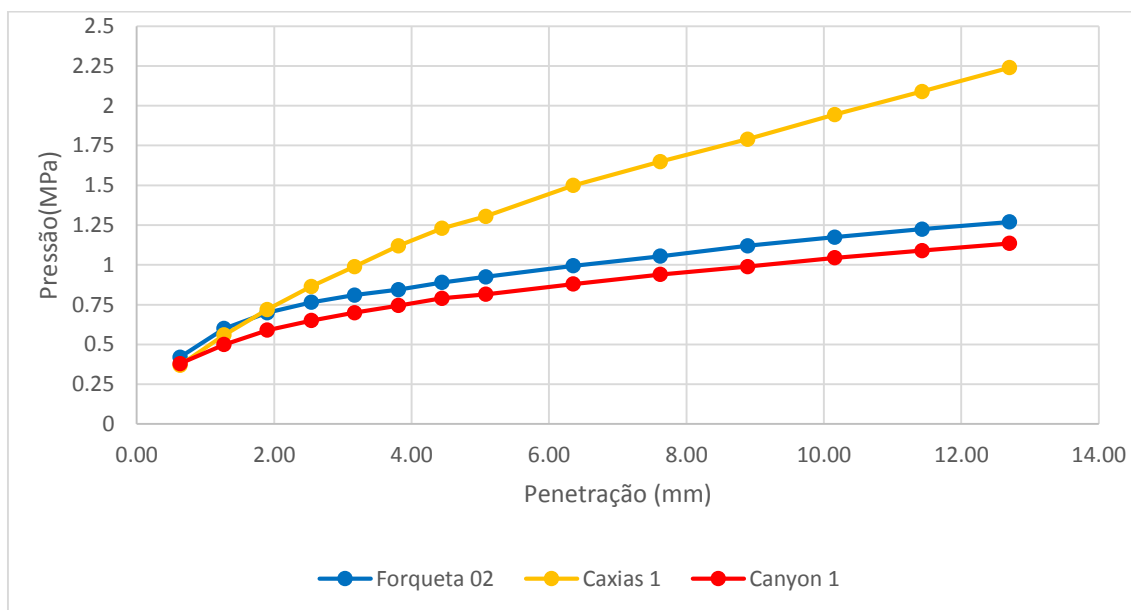
Fonte: O Autor, 2020

Tabela 15 - Expansão e ISC Canyon

Amostra	expansão(%)	Média (%)	ISC (%)	Média (%)
CAN 01	0.56	0.44	8.6	7.61
CAN 02	0.32		5.33	
CAN 03	0.63		8.9	

Fonte: O Autor, 2020

Figura 46- Pressão x penetração- Caxias, Forqueta e Canyon



Fonte: O Autor, 2020

As amostras apresentaram uma expansão baixa, em torno de 0,5%, dentro dos parâmetros estipulados pelo DNIT, onde a expansão máxima admitida por um subleito é de 2%. Os valores de ISC ficaram entre 7.33 e 12.67. Em uma comparação entre os valores de expansão e ISC de cada amostra, é possível observar que as amostras com as maiores expansões obtiveram os maiores valores de ISC.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dados os resultados dos ensaios de caracterização e de índice de suporte, vale destacar alguns aspectos observados. Analisando os dados de pressão x penetração juntamente com as composições granulométricas de cada material, observa-se que a fração de finos nas amostras expressa pouca influência no seu comportamento geotécnico, no que diz respeito à capacidade de suporte desses solos. Solos do tipo Caxias, com o menor teor de finos entre as amostras estudadas, apresentou os melhores resultados de índice de suporte frente aos demais solos, embora esperava-se valores maiores de ISC tendo em vista os parâmetros exibidos na bibliografia, onde são relacionados os valores prováveis de ISC em relação ao índice de grupo.

Embora os valores apresentados se mostraram relativamente baixos, vale a pena destacar que a metodologia ISC ou CBR tem uma abordagem empírica, e mesmo sendo normatizada e aceita pelo DNIT, está dando passagem para outros ensaios e metodologias, explorando outras características. Autores como Luz (2003) e Souza (2015) afirmam que tão importante quanto a capacidade de suporte de um solo, é conhecer sua capacidade resiliente, visando uma compreensão mais realista da condição do material empregado em um subleito. Existem condições em que solos com baixo ISC podem apresentar alta resistência a deformação permanente, expõe Souza et. al. (2015).

Tendo em vista isso, ao se estudar determinado tipo de solo, é recomendada uma análise criteriosa, com o maior número de dados possíveis para que os solos locais possam ser utilizados de maneira racional, satisfazendo as condições necessárias para seu emprego.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.457: Solo- Amostras de Solo, Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

_____ NBR 6459: Solo- **Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 2017.

_____ NBR 6502: **Solo- Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, 1993.

_____ NBR 7180: Solo- **Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____ NBR 7181: Solo - **Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

_____ NBR 7182: **Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

_____ NBR 9895: **Solo: Índice de Suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 1987.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560 p

BERNUCCI, Liedi Bariani - **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobrás: Abeda, 2008. 504 p.

BORSATTO, Saulo. **Contribuição ao estudo geológico-geotécnico da área urbana de Caxias do Sul**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2011.

BRASIL. Ministério de Infraestrutura. **Anuário estatístico dos Transportes. 2018**

53pg. Disponível em

http://infraestrutura.gov.br/images/2019/Documentos/anuario/Sum%C3%A1rio_Executivo_AET_-_2010_-_2018_11_07_2019.pdf

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações** – vol. 2. 6a ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1987. 498 p.

CAMPOS, João Carlos de. **Elementos de fundações de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CEPSA. Portuguesa Petróleos, AS. **Manual de Pavimentação**. Lisboa, 2014. 179p.

CNT. Confederação Nacional dos transportes. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. 11p.

Disponível em

https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/resumo_de_imprensa.pdf

DAS, Braja M.. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 9. ed. São Paulo: Cengage, 2019. 712 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT - **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2. ed. – Rio de Janeiro, 2006. 272p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. **Nota técnica de logística de transportes no Brasil. 2014**. Disponível em

<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/redes-e-fluxos-geograficos/15793-logistica-dos-transportes.html?t=acesso-ao-produto>

LUZ, Marta da. **Análise dos resultados do ensaio CBR realizado em condições variadas de umidade pós compactação**. 2003. 111 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

MACIEL FILHO, C.L. **Introdução à geologia de engenharia**. Santa Maria: Cprm, 1994. 284 p.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 354p.

QUEIROZ, Rudney C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. São Paulo: Blucher, 2016. 386 p.

SENÇO, Wlastermiler de, 1929 – **Manual de técnicas de pavimentação: volume 1** 2^a ed. – São Paulo: Pini, 2006. 761p.

SENÇO, Wlastermiler de, 1929 – **Manual de técnicas de pavimentação: volume 2** 1^a ed. – São Paulo: Pini, 2006. 671p.

SOUZA, Mayara Gomez; HELAL, Adão Marcílio Pedrosa; FILHO, José Carlos - **Análise do comportamento mecânico de um pavimento ferroviário através de um estudo comparativo entre os ensaios de cbr e módulo de resiliência**. Revista do CEDS: Periódico do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNDB, São Luiz, v. 1, n. 3, p. 1-20, 2015. Semestral.