

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Roberto Afonso Gonçalves Nascimento**

**CRITÉRIOS DE PROJETO E MANUTENÇÃO DE  
PISTAS DE POUSO SEMI-PREPARADAS NO  
CONTEXTO BRASILEIRO**

Trabalho de Graduação  
2025

**Curso de Engenharia Civil Aeronáutica**

**Roberto Afonso Gonçalves Nascimento**

**CRITÉRIOS DE PROJETO E MANUTENÇÃO DE  
PISTAS DE POUSO SEMI-PREPARADAS NO  
CONTEXTO BRASILEIRO**

Orientadora

Prof. Dr. Cláudia Azevedo (ITA)

**ENGENHERIA CIVIL AERONÁUTICA**

**SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Divisão de Informação e Documentação**

Nascimento, Roberto Afonso Gonçalves  
Critérios de Projeto e Manutenção de Pistas de Pouso Semi-Preparadas no Contexto Brasileiro  
/ Roberto Afonso Gonçalves Nascimento.  
São José dos Campos, 2025.  
75f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2025. Orientadora: Prof. Dr. Cláudia Azevedo.

I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

NASCIMENTO, Roberto Afonso Gonçalves. **Critérios de Projeto e Manutenção de Pistas de Pouso Semi-Preparadas no Contexto Brasileiro**. 2025. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

**CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Roberto Afonso Gonçalves Nascimento

TÍTULO DO TRABALHO: Critérios de Projeto e Manutenção de Pistas de Pouso Semi-Preparadas no Contexto Brasileiro.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2025

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

---

Roberto Afonso Gonçalves Nascimento  
Rua H8A, Ap. 139  
12.228-460 – São José dos Campos–SP

# **CRITÉRIOS DE PROJETO E MANUTENÇÃO DE PISTAS DE POUSO SEMI-PREPARADAS NO CONTEXTO BRASILEIRO**

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

---

Roberto Afonso Gonçalves Nascimento  
Autor

---

Cláudia Azevedo (ITA)  
Orientadora

São José dos Campos, 10 de novembro de 2025.

Aos amigos, colegas e professores da  
Graduação.

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter me concedido as oportunidades que me trouxeram até a finalização desta graduação com a qual sempre sonhei.

Agradeço à minha família, que sempre me apoiou, mesmo quando a simples ideia de estudar em um cursinho em outra cidade parecia uma façanha improvável.

Agradeço também aos amigos e colegas com quem convivi durante este período longe de casa — pessoas que, aos poucos, se tornaram minha família além da família em que nasci. Uma vez ouvi uma frase que diz que os amigos são os irmãos que escolhemos a dedo, e é com enorme satisfação que afirmo ter o prazer e o privilégio de viver essa alegria.

Sou grato também aos obstáculos que se colocaram no caminho, pois eles não me deixaram outra escolha senão crescer e me desenvolver.

Por fim, encerro dizendo que sou profundamente grato não apenas por vencer, mas por ter a oportunidade de compartilhar esta vitória com todos que depositaram alguma expectativa em mim e contribuíram para o meu sucesso — e que agora desfrutam desta felicidade junto comigo.

*"If I have seen farther than others,  
it is because I stood on the shoulders of giants."*

— SIR ISAAC NEWTON

# Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para definição de critérios de projeto, manutenção e avaliação aplicáveis a pistas de pouso semi-preparadas (ou não pavimentadas), considerando especialmente o contexto brasileiro, marcado pela baixa densidade populacional e pelo limitado desenvolvimento socioeconômico em regiões do Norte e de fronteira, onde a atuação da FAB é essencial. Nessas áreas, a escassez de aeroportos pavimentados e a baixa frequência de operações civis tornam economicamente inviável a pavimentação completa das pistas; contudo, é possível estabelecer critérios técnicos que garantam a segurança e a viabilidade operacional caso se faça necessária uma operação em tais localidades. Assim, a metodologia proposta é adaptada à realidade nacional e oferece soluções alternativas às normas convencionais, alinhando-se ao propósito de “fazer voar e fazer pousar em segurança”.

# Abstract

This work presents a methodology for defining design and maintenance criteria applicable to semi-prepared airstrips.

In the Brazilian context, especially in the northern regions and border areas where the Brazilian Air Force (FAB) plays a key role in ensuring national sovereignty and security, there is low population density and limited socioeconomic development.

As a result, there is a scarcity of active airports with properly paved runways. Most of these airstrips lack adequate paving or are not paved at all.

Given the low frequency of civil operations in these regions, fully paving these runways is economically unfeasible.

On the other hand, it is possible to establish technical criteria that ensure the operational viability and safety of operations on semi-prepared airstrips.

Thus, this work proposes a methodology adapted to the national reality, offering alternative solutions to the requirements of conventional standards, with the ultimate goal of fulfilling the mission of “making flight and landing safe.”

# Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Modelo simplificado de interação pneu–solo. . . . .	32
FIGURA 3.1 – C-105 <i>Amazonas</i> . . . . .	43
FIGURA 3.2 – C-95 <i>Bandeirante</i> . . . . .	44
FIGURA 3.3 – C-98 <i>Caravan</i> . . . . .	44
FIGURA 3.4 – Cessna 210. . . . .	45
FIGURA 3.5 – Aeronave C-123 considerada equivalente ao C-105 <i>Amazonas</i> . . . . .	46
FIGURA 3.6 – Aeronave ERJ-135 considerada equivalente ao C-95 <i>Bandeirante</i> . . . . .	46
FIGURA 3.7 – Resultado do dimensionamento das camadas no <i>FAARFIELD</i> com sub-base. . . . .	47
FIGURA 3.8 – Resultado do dimensionamento das camadas no <i>FAARFIELD</i> sem sub-base. . . . .	48
FIGURA 3.9 – Definição do <i>Network</i> no PCASE. . . . .	49
FIGURA 3.10 – Definição da <i>Branch</i> (pista) no PCASE. . . . .	49
FIGURA 3.11 – Criação da <i>Section</i> no PCASE (definição de comprimento, largura e tipo de superfície). . . . .	50
FIGURA 3.12 – <i>Section</i> criada no PCASE. . . . .	51
FIGURA 3.13 – Configuração do <i>Evaluation Manager</i> no PCASE (exemplo: seleção da estação meteorológica e parâmetros padrão). . . . .	51
FIGURA 3.14 – C-12F <i>Huron</i> , aeronave equivalente ao C-95 <i>Bandeirante</i> . . . . .	52
FIGURA 3.15 – C-41A <i>CASA 212</i> , aeronave equivalente ao C-98 <i>Caravan</i> . . . . .	53
FIGURA 3.16 – Configuração do <i>mix</i> de aeronaves e total de passagens para 5 anos de vida útil no software PCASE. . . . .	53
FIGURA 3.17 – Resultados da simulação no PCASE: configuração das camadas e número de passagens admissíveis. . . . .	55

---

FIGURA 3.18 – Geometria da seção transversal de uma pista semi-preparada com coroamento. . . . .	57
--	----

# Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Classificação da textura segundo a faixa de comprimento de onda. . .	27
TABELA 2.2 – Classificação da macrotextura (Baseada na Tabela 153.205-4 do RBAC n <sup>o</sup> 153). . . . .	28
TABELA 3.1 – Mix de aeronaves utilizado na simulação pelo <i>FAARFIELD</i> . . . . .	47
TABELA 3.2 – Camadas e propriedades adotadas no PCASE para o dimensionamento da pista. . . . .	54
TABELA 3.3 – Classificação do atrito segundo o Índice de Atrito Internacional (IFI). . . . .	59
TABELA 3.4 – Frequência recomendada de manutenção conforme o tipo de pista e o uso. . . . .	63

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	14
1.1	Introdução . . . . .	14
1.2	Motivação e Contexto . . . . .	14
1.3	A Doutrina da Engenharia de Campanha . . . . .	15
1.4	Objetivo . . . . .	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .	17
2.1	Capacidade de Suporte . . . . .	17
2.1.1	Tipos de Solo . . . . .	18
2.1.2	Métodos de Avaliação da Capacidade de Suporte . . . . .	19
2.1.3	Solo de Subleito . . . . .	22
2.1.4	Análise Estrutural . . . . .	22
2.2	Drenagem . . . . .	24
2.2.1	Drenagem Superficial . . . . .	25
2.2.2	Drenagem Subsuperficial . . . . .	25
2.3	Superfície da Pista . . . . .	26
2.3.1	Texturas . . . . .	26
2.3.2	Atrito e Resistência ao Rolamento . . . . .	31
2.3.3	Gerenciamento de Poeira . . . . .	34
2.4	Ciclo de Vida e Estudo de Deterioração . . . . .	38
2.4.1	Projeto, Construção e Operação . . . . .	38
2.4.2	Manutenção . . . . .	38
2.4.3	Reabilitação e Análise de Ciclo de Vida . . . . .	39

---

2.4.4	Perda de Material . . . . .	39
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA: CRITÉRIOS DE PROJETO E MANUTENÇÃO . . .</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Pista Exemplo . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Critérios Estruturais . . . . .</b>	<b>41</b>
3.2.1	Avaliação Geotécnica . . . . .	41
3.2.2	Subleito . . . . .	41
3.2.3	Dimensionamento das Camadas . . . . .	42
<b>3.3</b>	<b>Critérios para Drenagem e Geometria da Pista . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>3.4</b>	<b>Critérios para Superfície da Pista . . . . .</b>	<b>57</b>
3.4.1	Texturas . . . . .	57
3.4.2	Atrito . . . . .	58
3.4.3	Gerenciamento de Poeira . . . . .	59
<b>3.5</b>	<b>Critérios para o Ciclo de Vida . . . . .</b>	<b>62</b>
3.5.1	Critérios de Manutenção Programada . . . . .	62
3.5.2	Critérios de Reabilitação e Fim de Ciclo . . . . .	63
3.5.3	Critério Econômico e de Sustentabilidade . . . . .	64
<b>4</b>	<b>CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>4.1</b>	<b>Critérios de Avaliação Estrutural . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>4.2</b>	<b>Critérios para Avaliação de Drenagem . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>4.3</b>	<b>Critérios para Avaliação da Superfície da Pista . . . . .</b>	<b>67</b>
4.3.1	Texturas e Irregularidade . . . . .	67
4.3.2	Atrito . . . . .	68
4.3.3	Gerenciamento de Poeira e Granulometria . . . . .	68
<b>4.4</b>	<b>Critérios para o Ciclo de Vida . . . . .</b>	<b>69</b>
4.4.1	Planejamento de Manutenção . . . . .	69
4.4.2	Critério Econômico e Sustentabilidade . . . . .	70
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>73</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Introdução

A infraestrutura aeroportuária constitui um vetor estratégico fundamental para a integração, o desenvolvimento e a segurança de um país com as dimensões continentais do Brasil. A capacidade de projetar, construir e operar aeródromos, mesmo em condições austeras, é essencial para garantir a presença do Estado, o suporte logístico a operações militares e humanitárias, e a conexão de comunidades isoladas (ANAC, 2022a; ANAC, 2024).

No contexto brasileiro, a aviação de interior e a infraestrutura de pistas não pavimentadas desempenham papel crucial para a integração territorial, especialmente em regiões de baixa densidade populacional e infraestrutura precária. A operação segura e sustentável dessas pistas requer conhecimento técnico multidisciplinar, envolvendo princípios de engenharia de pavimentos, geotecnia e gestão operacional (RODRIGUES, 2022a; RODRIGUES, 2022b; RODRIGUES, 2022d; RODRIGUES, 2022c; ANAC, 2022b; PATERSON, 1987).

## 1.2 Motivação e Contexto

O Brasil apresenta uma extensa malha territorial, com diversas regiões de difícil acesso e baixo desenvolvimento socioeconômico, especialmente nas áreas do Norte e de fronteira. Nessas regiões, a presença da Força Aérea Brasileira (FAB) é fundamental para assegurar a soberania nacional, promover ações de integração e garantir suporte logístico em situações emergenciais (COMAER, 2017). Entretanto, a infraestrutura aeroportuária nesses locais é limitada, e a pavimentação convencional das pistas, embora desejável, mostra-se economicamente inviável. Nesse cenário, torna-se necessária uma abordagem alternativa, baseada em critérios técnicos adaptados às condições operacionais e de recursos disponíveis (RODRIGUES, 2022b).

Neste trabalho, define-se então uma pista de pouso semi-preparada - ou pista não pavimentada - como uma estrutura caracterizada por uma faixa de superfície natural ou

compactada, utilizada para operações aéreas, sem cobertura de concreto asfalto ou concreto de cimento Portland, por exemplo. A viabilidade dessas estruturas depende de uma engenharia adaptada, frequentemente empregada em cenários de urgência, contingência ou escassez de recursos. É nesse contexto que a doutrina da Engenharia de Campanha se torna indispensável, fornecendo os princípios e procedimentos necessários para a construção rápida e eficaz de infraestruturas em ambientes desafiadores.

### 1.3 A Doutrina da Engenharia de Campanha

De acordo com o Manual de Campanha EB70-MC-10.350 (EXÉRCITO BRASILEIRO, 2023), a Engenharia de Campanha tem como propósito empregar técnicas de construção e manutenção adaptadas ao terreno, clima e disponibilidade de recursos, com ênfase na rapidez, simplicidade e uso de materiais locais. Seu propósito é garantir a mobilidade, a sustentação e a proteção das forças, por meio da execução de obras e serviços essenciais ao cumprimento de qualquer missão cuja viabilidade depende dessas adaptações.

Os critérios de projeto e construção empregados pela Engenharia de Campanha divergem da engenharia civil convencional, pois priorizam a rapidez, a eficácia e o aproveitamento máximo dos recursos disponíveis localmente. Enquanto a engenharia convencional busca a máxima durabilidade e o menor custo de ciclo de vida, a engenharia de campanha privilegia a velocidade de implantação e a funcionalidade imediata, aceitando uma vida útil mais curta e a necessidade de manutenções frequentes (RODRIGUES, 2022b; COMAER, 2017).

Essa abordagem pragmática é particularmente relevante em missões da Força Aérea Brasileira (FAB), nas quais a prontidão operacional e a flexibilidade são fatores determinantes. Pistas semi-preparadas, portanto, inserem-se nesse contexto como soluções táticas de alta relevância estratégica para a aviação de defesa, logística e apoio humanitário, permitindo a projeção de poder e o atendimento a comunidades isoladas em condições de infraestrutura limitada (COMAER, 2017; EXÉRCITO BRASILEIRO, 2023).

### 1.4 Objetivo

O objetivo central deste trabalho é desenvolver uma metodologia técnica e sistemática para definição de critérios de projeto e de manutenção aplicáveis a pistas semi-preparadas, alinhada aos princípios da Engenharia de Campanha. Busca-se consolidar um corpo de conhecimento de acesso facilitado, que permita a engenheiros e gestores tomarem decisões fundamentadas para garantir a segurança e a viabilidade operacional dessas infraestruturas críticas.

O escopo deste trabalho abrange as seguintes áreas:

- **Revisao Bibliográfica:** Definição da abordagem adotada para a consolidação dos critérios, com base em revisão bibliográfica, normas técnicas e estudos de caso;
- **Metodologia aplicada a Critérios de Projeto:** Análise dos parâmetros estruturais (geotécnicos e de dimensionamento) e geométricos (drenagem) essenciais para a construção da pista;
- **Metodologia aplicada a Critérios de Avaliação de Desempenho:** Estabelecimento de métricas e parâmetros para a avaliação funcional (cuidados com a superfície e textura) e estrutural (capacidade de suporte e defeitos) da pista em operação;
- **Estratégias de Manutenção:** Apresentação de técnicas de manutenção rotineira e de melhoramento da superfície, com vistas a prolongar a vida útil e a operacionalidade da pista (RODRIGUES, 2022b; MERIGHI *et al.*, 2023).

## 2 Revisão Bibliográfica

A metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se em uma revisão bibliográfica voltada à Engenharia de Pavimentos, com ênfase em pistas não pavimentadas. Essas estruturas, frequentemente encontradas em aeródromos de menor porte ou em locais remotos, são tipicamente construídas a partir de técnicas de terraplenagem, nas quais o próprio solo local ou materiais granulares selecionados (como cascalho) constituem a camada de rolamento (PATERSON, 1987; RODRIGUES, 2022a). Em muitos casos, aplica-se um revestimento primário, não apenas para conferir estabilidade superficial, mas também para otimizar as condições de trafegabilidade e minimizar a geração de poeira.

A sustentabilidade operacional dessas pistas depende diretamente de um programa de manutenção bem planejado e executado. Intervenções como o rescascalhamento — reposição da camada granular desgastada — e o patrolamento — regularização da superfície com motoniveladora — são cruciais para garantir a integridade estrutural, a geometria transversal adequada à drenagem e a regularidade longitudinal compatível com as condições de segurança exigidas.

Nesse contexto, a drenagem assume um papel que permeia todas as fases do ciclo de vida da infraestrutura. Na engenharia de pavimentos, a água é apontada como um dos principais agentes de degradação dos solos e materiais granulares. O aumento da umidade reduz significativamente a resistência ao cisalhamento e a rigidez do solo, levando à perda de suporte e ao desenvolvimento de deformações permanentes sob cargas aeronáuticas (MANZATTO *et al.*, 2002). Assim, um sistema de drenagem eficaz — que assegure o escoamento superficial e limite a infiltração — é indispensável para a durabilidade e funcionalidade da pista.

### 2.1 Capacidade de Suporte

A análise da capacidade de suporte das camadas constituintes de uma pista de pouso é um elemento central na Engenharia de Pavimentos, pois determina como as tensões e deformações induzidas pelo carregamento aeronáutico são distribuídas e absorvidas pela estrutura (RODRIGUES, 2022a; ANAC, 2022). Em pistas semi-preparadas, construídas

com materiais naturais ou minimamente processados e espessuras reduzidas, a avaliação do suporte oferecido pelo subleito e pelas camadas de revestimento granular torna-se ainda mais crítica, influenciando o dimensionamento estrutural e as estratégias de manutenção.

Além da resistência estrutural, as condições funcionais — conforto, aderência e segurança — também são determinantes para a operação. Nesses casos, os parâmetros ligados à superfície da pista, como irregularidade e atrito, tornam-se essenciais para o desempenho global da infraestrutura.

### 2.1.1 Tipos de Solo

A vasta extensão territorial do Brasil abriga uma notável diversidade geotécnica, com predominância, em muitas regiões, de solos tropicais resultantes de processos pedogenéticos específicos.

Destacam-se os solos lateríticos, formados sob condições de intemperismo químico intenso, caracterizado pela lixiviação de bases (Ca, Mg, K, Na) e sílica, com concentração residual de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (sesquióxidos). Esse processo de laterização pode conferir aos solos propriedades geotécnicas vantajosas para aplicações rodoviárias e aeroportuárias. Frequentemente, solos lateríticos apresentam menor plasticidade, melhor trabalhabilidade, boa capacidade de drenagem interna (quando não excessivamente finos) e, crucialmente, uma capacidade de suporte considerável quando compactados adequadamente — muitas vezes superior à de solos não lateríticos de mesma granulometria.

Por outro lado, deve-se considerar o risco de expansão volumétrica em alguns tipos de solos tropicais, particularmente naqueles com presença significativa de minerais argilosos expansivos, como montmorilonita ou esmectita. Esses minerais apresentam elevada capacidade de adsorção de água, levando a variações volumétricas expressivas quando submetidos a ciclos de umedecimento e secagem. Tal comportamento pode resultar em soerguimento diferencial, perda de suporte e fissuração, comprometendo a regularidade e a estabilidade da superfície das pistas semi-preparadas (BAIA *et al.*, 2020).

Esse fenômeno é agravado em regiões de clima sazonal, onde a alternância entre períodos secos e chuvosos favorece os ciclos de expansão e retração. Assim, a análise detalhada da mineralogia e do comportamento expansivo do solo é fundamental para a concepção de medidas preventivas — como controle rigoroso da umidade durante a compactação, estabilização química (com cal ou cimento) e implantação de sistemas eficientes de drenagem superficial e subsuperficial (MANZATTO *et al.*, 2002).

## 2.1.2 Métodos de Avaliação da Capacidade de Suporte

A quantificação do suporte oferecido pelos solos é realizada por meio de ensaios padronizados, em laboratório ou *in situ*, que fornecem índices representativos do comportamento mecânico do material sob carregamento.

### 2.1.2.1 Índice de suporte CBR

O ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) é um dos métodos mais consagrados para avaliação da capacidade de suporte de solos e materiais granulares, sendo amplamente empregado tanto em pavimentos rodoviários quanto aeroportuários. Esse índice expressa a pressão necessária para a penetração de um pistão padronizado em uma amostra compactada, em relação à pressão requerida para penetrar uma brita padrão. O valor é determinado, em geral, na condição imersa, representando o cenário mais crítico de saturação.

Estudos apontam, contudo, que o CBR é sensível ao teor de umidade, à energia de compactação e à granulometria, e por ser essencialmente uma comparação com uma brita padrão e não representar a condição *in situ* do material, acaba não refletindo diretamente as propriedades elásticas ou de cisalhamento do solo analisado. Por isso, deve ser interpretado com base em uma compreensão integrada do comportamento do material.

### 2.1.2.2 Índice de suporte DCP

Para avaliações expeditas *in situ*, particularmente úteis no controle de qualidade durante a construção ou na avaliação de pistas existentes, o *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) apresenta-se como uma ferramenta valiosa para estimar a capacidade de suporte de solos e materiais granulares (FERNANDES, 2015).

O ensaio consiste na cravação dinâmica de uma ponta cônica padronizada no solo, registrando-se o número de golpes de um peso padrão, em queda livre, necessário para penetrar uma determinada profundidade (ou a penetração por golpe, em mm/golpe). A resistência à penetração oferecida pelo material correlaciona-se com sua capacidade de suporte, sendo o ensaio amplamente utilizado em obras de pavimentação rodoviária e aeroportuária, devido à sua simplicidade e rapidez de execução.

As leituras de penetração no ensaio DCP são realizadas após um número fixo de golpes do martelo, conforme a rigidez do solo. Os intervalos típicos são:

- 1 golpe para solos moles;
- 5 golpes para solos medianamente compactos;

- 10 golpes para solos rígidos.

Para cada intervalo, ou a cada mudança significativa na composição ou rigidez do solo, a profundidade de penetração é registrada com precisão de 1 mm. A **profundidade média de penetração por golpe**, utilizando um martelo de 8 kg, define o **índice DCP**. Recomenda-se uma penetração mínima de 25 mm entre medições, pois intervalos menores podem resultar em dados não representativos (FERNANDES, 2015).

O índice DCP é calculado pela Equação 2.1, conforme expressão clássica presente na literatura.

$$\text{DCP (mm/golpe)} = \frac{\text{Profundidade de penetração (mm)}}{\text{Número de golpes}} \quad (2.1)$$

*Exemplo:* Uma penetração de 25 mm com 5 golpes resulta em:

$$\text{DCP} = \frac{25}{5} = 5 \text{ mm/golpe} \quad (2.2)$$

Diversos estudos estabeleceram correlações empíricas entre o índice de penetração do DCP (geralmente expresso em mm/golpe) e o *California Bearing Ratio* (CBR). Essas correlações, embora devam ser utilizadas com cautela e preferencialmente calibradas localmente, permitem estimar o perfil de CBR ao longo da profundidade de forma rápida e econômica, auxiliando na identificação de camadas fracas e na verificação da uniformidade da compactação (FERNANDES, 2015).

A literatura e as normas técnicas fornecem uma equação empírica amplamente reconhecida para estimar o valor do CBR a partir do índice DCP, conforme apresentado na Equação 2.3 (ASTM INTERNATIONAL, 2015).

$$\text{CBR} = \frac{292}{(\text{DCP})^{1,12}} \quad (2.3)$$

Essa expressão é válida para a maioria dos solos, exceto para argilas altamente plásticas (tipos CL e CH), nas quais o comportamento expansivo e a baixa drenabilidade alteram significativamente a relação entre penetração e resistência. Em tais casos, recomenda-se a calibração das correlações com ensaios laboratoriais de CBR sob condições representativas de umidade e compactação, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados obtidos em campo.

### 2.1.2.3 Índice de suporte LWD

Equipamentos mais modernos, como o *Light Weight Deflectometer* (LWD), oferecem uma abordagem não destrutiva para avaliar o suporte das camadas do pavimento. O equipamento aplica uma carga de impacto na superfície e mede a deflexão resultante, permitindo calcular o módulo de elasticidade dinâmico (ou módulo resiliente) do solo ou do material granular.

Esse parâmetro é particularmente representativo do comportamento elástico do material sob carregamentos rápidos, como os decorrentes do tráfego aeronáutico, sendo considerado uma alternativa prática aos ensaios laboratoriais convencionais. No entanto, surge uma questão crítica e relevante no contexto aeronáutico: a validade da extrapolação dos módulos obtidos sob as cargas relativamente baixas aplicadas pelo LWD (tipicamente na ordem de poucos kN) para as cargas significativamente mais elevadas impostas pelas aeronaves (dezenas ou centenas de kN).

Os solos e materiais granulares exibem comportamento não linear, ou seja, seu módulo de rigidez depende do nível de tensões aplicado. Módulos medidos sob baixas tensões, como as geradas pelo LWD, podem superestimar a rigidez do material sob as altas tensões induzidas por uma aeronave, levando a interpretações excessivamente otimistas da capacidade estrutural.

Portanto, a aplicação direta dos resultados obtidos com o LWD em análises e dimensionamentos aeronáuticos exige validação e calibração cuidadosas. Recomenda-se que tais validações sejam realizadas por meio de correlações com ensaios de laboratório executados sob níveis de tensão representativos ou, quando possível, com deflectômetros de impacto mais pesados, como o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), capazes de reproduzir melhor as condições reais de carregamento.

Por outro lado, no contexto de Engenharia de Campanha, em que a disponibilidade de equipamentos sofisticados pode ser limitada, a utilização de deflectômetros mais pesados pode ser inviável. Nesses casos, recomenda-se validar os resultados obtidos com o LWD por meio da comparação com outros índices de suporte, como o CBR e o DCP, assegurando a coerência entre os diferentes métodos de avaliação.

Além disso, conforme o estudo comparativo apresentado no trabalho de (RODRIGUES *et al.*, 2021), pode-se relacionar o LWD com o CBR, pois há uma tendência linear entre ambos, expressa na Equação 2.4.

$$\text{CBR} = 0,4527 (\text{LWD}) + 1,8468 \quad (2.4)$$

Esta equação é válida para os solos observados no estudo original (RODRIGUES *et al.*, 2021),

formulada a partir de regressão linear com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,7918$ .

### 2.1.3 Solo de Subleito

O subleito constitui a fundação natural sobre a qual a estrutura da pista é construída. Sua capacidade de suporte e sua estabilidade volumétrica frente às variações de umidade são fatores determinantes para o desempenho global e a durabilidade da pista, especialmente em estruturas semi-preparadas.

A inadequada capacidade de suporte do subleito manifesta-se, sob ação do tráfego, como deformação permanente excessiva (afundamento nas trilhas de roda), comprometendo a regularidade longitudinal e transversal da pista e, conseqüentemente, a segurança operacional. A avaliação do suporte do subleito, comumente expressa pelo valor do CBR obtido em condições representativas de serviço (considerando a umidade de equilíbrio esperada), é um parâmetro de entrada essencial nos métodos de dimensionamento, sejam eles empíricos ou mecanístico-empíricos.

Conforme indicado por Rodrigues (2022a), diversas ações podem ser adotadas quando o subleito natural apresenta características inadequadas — desde a simples adequação da espessura das camadas superiores, passando por reforços estruturais (como camadas de solo selecionado ou estabilizado), até a substituição do material ou a implementação de sistemas de drenagem profunda para controle da umidade. A compactação controlada do subleito, visando atingir a densidade especificada em projeto na umidade ótima, é uma etapa construtiva fundamental para maximizar sua resistência, reduzir sua deformabilidade e minimizar sua suscetibilidade à água.

### 2.1.4 Análise Estrutural

A análise estrutural de uma pista semi-preparada tem como objetivo determinar as espessuras e qualidades das camadas necessárias para que a estrutura suporte as solicitações do tráfego aéreo previsto ao longo de sua vida útil, sem que os níveis de deterioração — principalmente deformação permanente (afundamento em trilha de roda) e irregularidade superficial — ultrapassem limites considerados aceitáveis para uma operação segura.

Devido à natureza dos materiais utilizados e às condições operacionais dessas pistas, métodos empíricos baseados na observação do desempenho de estruturas semelhantes são frequentemente empregados no dimensionamento.

### 2.1.4.1 Pistas de terra (sem revestimento)

Em pistas não revestidas, onde o próprio subleito ou uma camada de solo selecionado constitui a superfície de rolamento, o critério predominante é a limitação do afundamento acumulado na trilha de roda. A equação a seguir, conforme Rodrigues (2022d) estabelece o valor mínimo de CBR do subleito necessário para manter o afundamento abaixo de um valor limite (geralmente 75 mm):

$$\text{CBR}_{SL,\min} = 0,0138 \cdot N^{0,172} \cdot \text{CRSE}^{0,58} \cdot p_i^{0,49} \quad (2.5)$$

Onde:

- $\text{CBR}_{SL,\min}$ : CBR mínimo do subleito;
- $N$ : número acumulado de passagens equivalentes de carga;
- CRSE: Carga de Roda Simples Equivalente (kN);
- $p_i$ : pressão de inflação dos pneus (kPa).

Essa equação destaca a forte influência dos parâmetros de carga sobre a exigência estrutural do subleito, especialmente a pressão de inflação dos pneus, frequentemente subestimada em projetos.

### 2.1.4.2 Pistas com revestimento primário (cascalho)

Para pistas com revestimento granular, a análise visa determinar a espessura mínima da camada de cascalho ( $H_G$ ) que assegure proteção ao subleito e desempenho adequado. A equação empírica abaixo, conforme Rodrigues (2022d), permite estimar essa espessura com base em parâmetros mecânicos e operacionais:

$$\log(H_G) = 1,4 + 0,856 \cdot \text{CRSE}^{0,235} \cdot \text{CBR}_1^{-0,466} \cdot \text{CBR}_2^{-0,142} \cdot N^{0,124} \cdot \text{ATR}_{cr}^{-0,5} \quad (2.6)$$

Onde:

- $H_G$ : espessura da camada de cascalho (mm);
- $\text{CBR}_1$ : CBR do cascalho (camada de revestimento);
- $\text{CBR}_2$ : CBR do solo de subleito;

- $N$ : número acumulado de passagens equivalentes de carga;
- CRSE: Carga de Roda Simples Equivalente (kN);
- $ATR_{cr}$ : afundamento admissível na trilha de roda (mm).

Essa equação mostra que:

- A espessura  $H_G$  cresce com o aumento do tráfego ( $N$ ) e da carga (CRSE);
- Diminui com a melhoria da qualidade dos materiais ( $CBR_1$ ,  $CBR_2$ );
- É inversamente proporcional ao valor admissível de afundamento ( $ATR_{cr}$ ).

Ambas as equações são ferramentas práticas e úteis para dimensionamento preliminar, mas sua aplicação exige conhecimento cuidadoso dos parâmetros de entrada, caracterização geotécnica representativa dos materiais locais e, sempre que possível, validação com ensaios de campo ou calibração empírica para a realidade específica do sítio aeroportuário.

Entretanto, vale ressaltar que pistas revestidas com cascalho geram problemas relacionados a material solto: fragmentos de cascalho ou brita que se desprendem da pista podem atingir a aeronave e causar danos, tanto no pouso quanto na decolagem.

## 2.2 Drenagem

A gestão da água é, indiscutivelmente, um dos fatores mais críticos que governam o desempenho e a durabilidade de pistas semi-preparadas. A engenharia geotécnica e de pavimentos reconhece universalmente que a presença excessiva de umidade nos solos e materiais granulares compromete severamente sua capacidade de suporte, principalmente pela redução da sucção matricial e das tensões efetivas, o que leva à diminuição da resistência ao cisalhamento (RODRIGUES, 2022a; MANZATTO *et al.*, 2002).

Em pistas não pavimentadas, onde não há proteção por camadas impermeáveis, o controle eficaz da água superficial e subsuperficial é vital. A falha em gerenciar a drenagem acelera processos de deterioração como afundamentos, formação de painéis, erosão e perda de material, podendo inclusive levar à interdição da pista em períodos chuvosos (PATERSON, 1987).

O desempenho funcional e estrutural dessas pistas depende fortemente do equilíbrio hídrico do subleito, cuja saturação excessiva reduz drasticamente o módulo de resiliência e o CBR. Por isso, medidas de drenagem devem ser tratadas como parte essencial do dimensionamento e da manutenção (RODRIGUES, 2022b; ANAC, 2022b).

### 2.2.1 Drenagem Superficial

A drenagem superficial tem por objetivo remover rapidamente a água da chuva que incide sobre a plataforma da pista e áreas adjacentes. Isso é obtido principalmente por meio da conformação de um perfil transversal adequado, com declividade de 3% a 5%, direcionando a água para as laterais, e pela adoção de dispositivos complementares como valetas, canais e sarjetas, dimensionados conforme a vazão de projeto e protegidos contra erosão.

A escolha do tipo de revestimento das valetas, como vegetação, *rip-rap*, concreto magro ou dissipadores de energia, depende da intensidade das chuvas, da erodibilidade do solo e da capacidade de infiltração local. A manutenção desses dispositivos, garantindo sua capacidade de escoamento e integridade, é tão importante quanto o projeto inicial, uma vez que o entupimento ou o assoreamento pode comprometer o desempenho global da pista.

### 2.2.2 Drenagem Subsuperficial

Em locais com lençol freático elevado, solos de baixa permeabilidade ou fluxo subterrâneo lateral, torna-se necessária a adoção de medidas de controle de umidade, especialmente em pistas de terra ou com revestimento granular, onde a retenção de água deteriora rapidamente a superfície e reduz o suporte do subleito.

As soluções de drenagem subsuperficial mais usuais incluem:

- **Drenos longitudinais profundos:** trincheiras com material drenante e tubos perfurados, projetadas para interceptar fluxos laterais e reduzir a saturação do subleito;
- **Colchão drenante:** camada de material granular de alta permeabilidade sob a estrutura, empregada quando o subleito apresenta baixa drenabilidade ou tendência à ascensão capilar;
- **Intercepção do lençol freático:** poços de alívio e drenos de recalque aplicados em locais com pressão hidrostática significativa;
- **Controle de sedimentos:** dispositivos auxiliares como caixas de retenção, bocas de valeta e dissipadores, que reduzem a velocidade do fluxo e evitam o assoreamento do sistema.

No entanto, a adoção dessas soluções em pistas semi-preparadas nem sempre é eficaz, pois o tráfego e a própria natureza não coesa dos materiais podem provocar o carreamento e o entupimento dos dispositivos drenantes. Assim, em locais onde o lençol freático

é persistentemente elevado ou onde a demanda por intervenções de drenagem seria excessiva para manter condições operacionais mínimas, uma alternativa mais viável pode ser a reavaliação da própria implantação da pista em tal localidade, priorizando áreas naturalmente mais favoráveis.

A escolha da solução mais adequada depende de uma análise hidrogeológica e geotécnica detalhada do local. A interação entre drenagem e capacidade de suporte é direta: um subleito mantido em condição de umidade controlada apresenta maior resistência, menor deformabilidade e vida útil significativamente prolongada (RODRIGUES, 2022a; RODRIGUES, 2022b).

## **2.3 Superfície da Pista**

### **2.3.1 Texturas**

A análise da irregularidade e da rugosidade da superfície é de importância crítica para a segurança das operações em pistas semi-preparadas. Para além do conforto dos ocupantes, essas características impactam diretamente a integridade estrutural da aeronave e a sua controlabilidade durante as fases de pouso e decolagem. Conforme destacado em estudos da NASA (MORRIS; STICKLE, 1960), operações em superfícies rugosas podem induzir acelerações verticais significativas, gerando preocupações com danos estruturais e fadiga dos componentes da aeronave.

A definição de critérios de projeto para estas pistas, portanto, exige uma adaptação das normas rigorosas aplicadas a pavimentos convencionais à realidade operacional e econômica do contexto brasileiro, conforme o objetivo deste trabalho. Para tal, é fundamental classificar as diferentes escalas de textura que compõem a superfície de uma pista. Essa abordagem é compatível com as orientações da ANAC na IS nº 153.205-001, que trata da medição e manutenção da irregularidade e da textura superficial de pistas (ANAC, 2022b).

#### **2.3.1.1 Definição das Escalas de Textura**

A caracterização da superfície de um pavimento é realizada por meio da avaliação de sua textura em diferentes escalas. Com base na norma ASTM E1960-98 (ASTM INTERNATIONAL, 1996), citada por Filho e Oliveira (2014), a textura superficial pode ser classificada de acordo com a faixa de comprimento de onda de suas ondulações, conforme detalhado na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Classificação da textura segundo a faixa de comprimento de onda.

Classificação da Textura	Faixa de Comprimento de Onda
Microtextura	0 – 0,5 mm
Macrotextura	0,5 mm – 50 mm
Megatextura	50 mm – 500 mm
Irregularidade	0,5 m – 50 m

A **microtextura** refere-se à aspereza individual das partículas do agregado, sendo perceptível ao tato, mas não a olho nu. Essa escala caracteriza a aspereza do pavimento, no contato direto entre o pneu e o pavimento.

A **macrotextura** é a textura visível a olho nu, formada pelo arranjo e espaçamento dos agregados. Sua função primordial é proporcionar canais para a drenagem superficial da água, sendo um fator-chave para mitigar o risco de hidroplanagem, assegurando a aderência em altas velocidades (FILHO; OLIVEIRA, 2014; ANAC, 2022b).

A **megatextura** corresponde a ondulações com comprimentos de onda entre 50 mm e 500 mm. É frequentemente associada a defeitos construtivos, degradação superficial ou perda de material, sendo particularmente crítica em pistas não pavimentadas, onde o tráfego e as variações de umidade alteram constantemente a conformação da superfície.

Por sua vez, a **irregularidade** caracteriza-se pelos desvios de maior dimensão, que afetam diretamente a dinâmica da aeronave, a resistência ao rolamento e o conforto da operação. São as ondulações de maior comprimento de onda na superfície da pista e constituem o principal parâmetro funcional de avaliação, conforme indicado pela ANAC e por estudos recentes sobre irregularidade funcional em pistas não pavimentadas (MERIGHI *et al.*, 2023).

É importante destacar, contudo, que essa classificação é derivada de estudos voltados a pistas pavimentadas, nas quais a textura superficial é permanente e controlável. Em pistas semi-preparadas, a superfície é composta por materiais granulares e solos naturais, cuja conformação e rugosidade variam continuamente em função da umidade, da compactação e do tráfego. Assim, os conceitos de microtextura e macrotextura devem ser interpretados apenas de forma análoga.

Além disso, no contexto deste trabalho, optou-se por abordar de forma mais detalhada a macrotextura e a irregularidade, pois são escalas de textura que possuem maior significado significativo para a análise das pistas.

Além disso, no contexto deste trabalho, optou-se por aprofundar apenas as escalas de **macrotextura** e **irregularidade**. Essa escolha fundamenta-se no fato de que tais parâmetros exercem influência direta e predominante no desempenho operacional: a macrotextura

por governar a drenagem superficial, a interação pneu–solo e o risco de hidroplanagem; e a irregularidade por afetar de maneira decisiva a resposta dinâmica da aeronave, o conforto, a resistência ao rolamento e a segurança durante as operações.

### 2.3.1.2 Macrotextura

A principal função da macrotextura é facilitar o escoamento da água da superfície da pista, o que a torna um parâmetro de projeto essencial para a segurança operacional. Uma macrotextura adequada cria caminhos que impedem a formação de uma lâmina d'água contínua sob o pneu, reduzindo drasticamente o risco de hidroplanagem (FILHO; OLIVEIRA, 2014; ANAC, 2022b).

O Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) n<sup>o</sup> 153, em sua Tabela 153.205-4, classifica a macrotextura com base na profundidade média, conforme apresentado na Tabela 2.2 (ANAC, 2022b).

TABELA 2.2 – Classificação da macrotextura (Baseada na Tabela 153.205-4 do RBAC n<sup>o</sup> 153).

<b>Profundidade – P (mm)</b>	<b>Classificação</b>
$P \leq 0,2$	Muito fechada
$0,2 < P \leq 0,4$	Fechada
$0,4 < P \leq 0,8$	Média
$0,8 < P \leq 1,2$	<b>Aberta</b>
$P > 1,2$	Muito aberta

Em pistas pavimentadas, onde a superfície é revestida e apresenta características estáveis ao longo do tempo, a macrotextura é normalmente medida pelo ensaio da Mancha de Areia (ASTM INTERNATIONAL, 1996), que determina a profundidade média da textura superficial. Contudo, em pistas de solo ou cascalho, esse método se torna inviável, pois a areia utilizada no ensaio tende a se misturar ao material da pista, comprometendo a medição volumétrica.

No contexto de pistas semi-preparadas, a macrotextura pode ser compreendida como a morfologia superficial média da pista, isto é, o conjunto de pequenas ondulações, sulcos e depressões que controlam o escoamento da água e a distribuição dos esforços de contato pneu-solo. Em vez de ser quantificada por ensaios laboratoriais, pode ser avaliada de forma indireta, por meio da observação da drenagem superficial, do grau de compactação e da regularidade geométrica da superfície.

Tal sugestão fundamenta-se no fato de que, o ganho que a macrotextura traz para as pistas pavimentadas é de proporcionar uma melhor drenagem (FILHO; OLIVEIRA, 2014), ou seja, uma vez que a drenagem está com um desempenho satisfatório, assume-se que a

macrotextura da pista está adequada.

Essa abordagem analógica permite incorporar o conceito de macrotextura como parâmetro qualitativo de desempenho, adaptado à realidade operacional das pistas semi-preparadas, onde a variabilidade dos materiais e das condições de uso inviabiliza a aplicação direta das metodologias padronizadas desenvolvidas para pavimentos convencionais.

### 2.3.1.3 Irregularidade

A irregularidade longitudinal, ou rugosidade, é um dos principais indicadores funcionais da condição de uma pista de pouso. Ela representa os desvios do perfil longitudinal em relação a um plano de referência e impacta diretamente a qualidade do rolamento, o conforto, a segurança e a vida útil das aeronaves (ANAC, 2022b). Níveis elevados de irregularidade induzem vibrações durante o pouso, a decolagem e o taxiamento, podendo gerar fadiga em componentes estruturais, desconforto para a tripulação e passageiros e, em casos extremos, perda de contato pneu-pista e comprometimento do controle direcional (MORRIS; STICKLE, 1960).

Além disso, a irregularidade longitudinal da pista está diretamente correlacionada com a resposta dinâmica da aeronave, influenciando as cargas verticais impostas à estrutura. O estudo da NASA (MORRIS; STICKLE, 1960) quantificou essa relação ao taxiar uma aeronave leve sobre pistas não pavimentadas com diferentes níveis de rugosidade. Os resultados, convertidos para o sistema métrico, são apresentados a seguir:

- **Pista lisa** (*smooth grass runway*): apresentou um desvio médio ( $\sigma$ ) da elevação de aproximadamente 0,02 m, resultando em acelerações de pico na aeronave de até 0,14g;
- **Pista rugosa** (*rough grass runway*): apresentou um desvio médio ( $\sigma$ ) de aproximadamente 0,077 m, gerando acelerações de pico de até 0,23g.

Esses resultados demonstram que o aumento da irregularidade superficial provoca um crescimento quase linear nas acelerações verticais transmitidas à aeronave, confirmando a influência direta da rugosidade na segurança e no conforto operacional. Em pistas semi-preparadas, portanto, o controle da irregularidade deve ser tratado como parâmetro essencial de desempenho, devendo ser acompanhado periodicamente para garantir níveis aceitáveis de regularidade e mitigar esforços estruturais excessivos (MORRIS; STICKLE, 1960; MERIGHI *et al.*, 2023; ANAC, 2022b). Nessas pistas, a irregularidade tende a evoluir mais rapidamente do que em pavimentos convencionais, em função da menor rigidez estrutural e da suscetibilidade da superfície (composta por materiais não ligados permanentemente) a defeitos como afundamentos, corrugações e panelas (RODRIGUES, 2022b).

A avaliação pode ser realizada com equipamentos perfilométricos (a laser ou ultrassônicos), sendo o *International Roughness Index* (IRI) um dos índices mais utilizados mundialmente, expresso em m/km. O IRI resulta do movimento vertical acumulado de um modelo de suspensão de um quarto de carro padrão, normalizado pela distância percorrida. No entanto, por ter sido concebido originalmente para rodovias, o IRI pode não representar adequadamente as condições de pistas de pouso, especialmente nas velocidades típicas de operações aeronáuticas (MERIGHI *et al.*, 2023).

Para aeroportos, destacam-se outros índices complementares. O *Boeing Bump Index* (BBI), recomendado pela FAA e pela ICAO, avalia o desvio da superfície em relação a uma linha de referência, considerando comprimentos de onda críticos para a resposta dinâmica das aeronaves. Embora aplicável tanto a pistas pavimentadas quanto não pavimentadas, sua principal limitação é a detecção apenas de eventos isolados de irregularidade. Já o *Runway Roughness Index* (RRI), desenvolvido pela FAA, combina o BBI com avaliações subjetivas de pilotos (*Pilot Subjective Rating*) e medições de aceleração vertical, oferecendo uma visão mais próxima da experiência operacional. Contudo, o RRI não localiza precisamente as anomalias no pavimento e é válido apenas para pistas de pouso e decolagem, não se aplicando a pátios e taxiways.

Modelos de previsão de irregularidade, como o do *Highway Development and Management Model* (HDM) mencionado em Rodrigues (2022c), relacionam a progressão do IRI com o tráfego acumulado, o número estrutural e fatores ambientais. Uma formulação simplificada é apresentada na Equação 2.7:

$$IRI(t) = \left[ IRI_0^e + \frac{k \cdot N(t)}{SN^m} \right]^{1/e} \cdot e^{f \cdot t} \quad (2.7)$$

onde  $IRI(t)$  é a irregularidade ao longo do tempo  $t$ ,  $IRI_0$  a irregularidade inicial,  $N(t)$  o tráfego acumulado,  $SN$  o número estrutural da pista, e  $k$ ,  $m$ ,  $e$ ,  $f$  são coeficientes de calibração. O modelo evidencia que a irregularidade cresce com o tráfego e o tempo, mas pode ser controlada por manutenções adequadas — especialmente o patrolamento — que reinicia o ciclo de deterioração da regularidade (RODRIGUES, 2022b; MERIGHI *et al.*, 2023).

Em síntese, nenhum índice isolado é capaz de caracterizar plenamente a condição de pistas semi-preparadas. Assim, a literatura sugere o uso combinado de diferentes indicadores (IRI, BBI e RRI), de modo a assegurar maior confiabilidade na avaliação funcional e subsidiar estratégias de manutenção que garantam a segurança das operações (MERIGHI *et al.*, 2023; ANAC, 2022b).

### 2.3.2 Atrito e Resistência ao Rolamento

A interação pneu–pista constitui um dos principais determinantes da segurança operacional e do desempenho das aeronaves em pistas semi-preparadas. Entre os fenômenos envolvidos, o atrito e a resistência ao rolamento assumem papel importante na definição dos critérios de projeto e de avaliação funcional dessas superfícies, tendo considerações que se apoiam nas normas e instruções da ANAC relativas ao RBAC nº 153 (ANAC, 2022a) e à Instrução Suplementar IS nº 153.205-001 (ANAC, 2022b), bem como em estudos experimentais sobre resistência ao rolamento em pistas não pavimentadas e em pesquisas sobre macrotextura e atrito (GUO *et al.*, 2025; FILHO; OLIVEIRA, 2014).

#### 2.3.2.1 Interação Pneu–Pista em Superfícies Semi-Preparadas

Conforme definido no RBAC nº 153, a “aderência da pista” é a propriedade física que assegura resistência à derrapagem e controle direcional durante pouso e decolagem (ANAC, 2022a). Em pavimentos convencionais, a textura superficial e o coeficiente de atrito do revestimento controlam largamente essa aderência; já em pistas semi-preparadas (solo compactado, cascalho, misturas granulares), a interação pneu–pista apresenta caráter geotécnico, fortemente dependente de parâmetros como umidade, grau de compactação e granulometria (GUO *et al.*, 2025).

O atrito é, portanto, um parâmetro funcional indispensável à segurança operacional (frenagem e controle direcional). Paralelamente, a resistência ao rolamento, geralmente desprezível em superfícies rígidas, assume importância crítica em superfícies deformáveis por influenciar o comprimento de pista requerido para decolagem e aumentar os esforços sobre o trem de pouso (GUO *et al.*, 2025).

#### 2.3.2.2 Fatores que Influenciam o Atrito

O coeficiente de atrito em pistas semi-preparadas não é uma propriedade material fixa, mas um resultado dinâmico da interação pneu–solo sob condições operacionais variáveis. Os principais fatores determinantes são:

- **Presença de contaminantes:** água, lama, areia solta e poeira reduzem a aderência por lubrificação ou por diminuição do contato efetivo entre pneu e superfície. Em solos finos saturados, a camada viscosa de lama atua como lubrificante, reduzindo severamente a capacidade de frenagem. A formação localizada de lâminas d’água em sulcos pode provocar perda de contato análoga à hidroplanagem (ANAC, 2022b).
- **Características do material superficial:** a microtextura (aspereza das partículas) e a macrotextura (morfologia e canais de drenagem) controlam a capacidade da

superfície de dissipar água e gerar atrito mesmo em condições úmidas. Superfícies com macrotextura insuficiente tendem a reter água e reduzir o coeficiente de atrito; por isso, a normativa prescreve medição e limites mínimos de macrotextura para garantir drenagem adequada (ANAC, 2022b; FILHO; OLIVEIRA, 2014).

- **Condições operacionais e temporais:** variabilidade temporal (chuvas, ciclos de secagem, tráfego) faz com que o atrito oscile; inspeções visuais e relatos operacionais dos pilotos são, em muitos casos, essenciais para avaliar a condição real da pista (ANAC, 2022b).

### 2.3.2.3 Modelagem da Resistência ao Rolamento

A resistência ao rolamento é a força opositora ao movimento durante a rolagem em solo. Em superfícies deformáveis, essa resistência resulta majoritariamente da deformação plástica do solo sob a roda: o solo é compactado e deslocado, sendo a energia dissipada neste processo convertida em resistência ao avanço.

Modelos clássicos de interação pneu–solo, como os propostos por Bekker, relacionam a pressão de contato  $p$  e a profundidade de afundamento  $z$  por equações do tipo apresentadas na Equação 2.8:

$$p = \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n, \quad (2.8)$$

onde  $k_c$  e  $k_\phi$  são parâmetros de rigidez coesiva e friccional do solo,  $b$  é a largura de contato e  $n$  o expoente de afundamento. A integração da distribuição de pressão permite obter expressões para a força resistente ao rolamento  $F$ , dependente de  $z_0$  (profundidade máxima de afundamento) e das propriedades do solo e do pneu (GUO *et al.*, 2025).

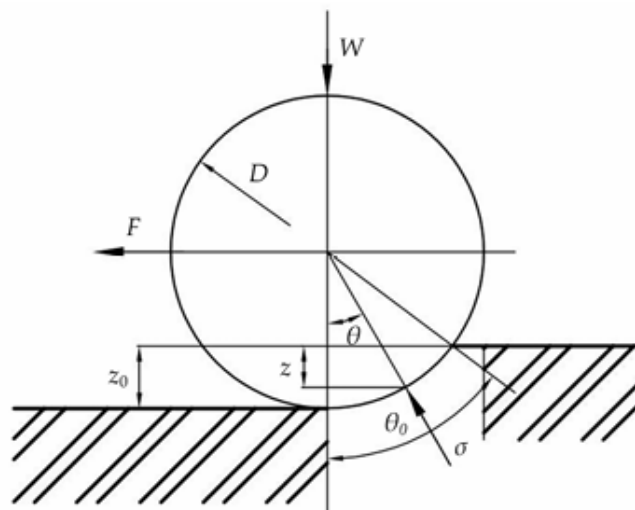


FIGURA 2.1 – Modelo simplificado de interação pneu–solo.

Na Figura 2.1, adaptada de Guo *et al.* (2025), observa-se o modelo mecânico simplificado de interação pneu–solo. Os principais parâmetros são:

- $D$ : diâmetro externo da roda;
- $F$ : força de resistência ao rolamento;
- $W$ : carga vertical aplicada;
- $z_0$ : profundidade máxima de afundamento do solo;
- $z$ : profundidade local de afundamento;
- $\theta$ : ângulo entre a pressão radial e o eixo vertical;
- $\theta_0$ : ângulo de entrada do solo.

Análises experimentais e de sensibilidade indicam que os parâmetros que mais influenciam  $F$  são o índice de deformação do solo ( $n$ ) e a carga vertical aplicada ( $W$ ), enquanto variáveis geométricas do pneu (largura  $b$ ) têm efeito secundário. A partir dos resultados empíricos, Guo *et al.* (2025) propuseram a forma simplificada indicada na Equação 2.9:

$$F = A m^N, \quad (2.9)$$

em que  $m$  é a massa da aeronave (t), e  $A$  e  $N$  são parâmetros empíricos dependentes do tipo de solo e da configuração do pneu. Para solos coesivos compactados a aproximadamente 90% da densidade, os autores reportaram  $A = 181,2$  e  $N = 1,39$ , obtendo a expressão da Equação 2.10:

$$F = 181,2 m^{1,39}, \quad (2.10)$$

com erro médio relativo da ordem de 13,7% em relação aos dados experimentais de decolagem — valor que torna o modelo adequado para estimativas preliminares de projeto em pistas semi-preparadas, desde que aplicado com cautela.

### 2.3.2.4 Fatores Determinantes e Implicações Operacionais

A resistência ao rolamento e suas implicações práticas decorrem, sobretudo, de:

- **Deformabilidade do solo:** solos com baixa compactação ou elevado teor de umidade apresentam maior afundamento e, conseqüentemente, maior  $F$ . A elevação da poropressão diminui as tensões efetivas entre partículas e amplifica a deformação induzida pela roda (GUO *et al.*, 2025).

- **Irregularidade longitudinal e rugosidade:** ondulações e rutting aumentam a energia dissipada pelos sistemas de suspensão (efeito dinâmico), elevando a resistência ao rolamento e afetando conforto e segurança operacional. A Instrução Suplementar IS nº 153.205-001 detalha exigências de monitoramento da irregularidade (IRI) justamente por estas implicações.
- **Conservação e condicionamento da pista:** práticas de manutenção (controle de umidade, reposição e nivelamento do material, remoção de material solto) são determinantes para manter a resistência ao rolamento dentro de limites aceitáveis de projeto e preservar a viabilidade operacional (ANAC, 2022a).

As limitações de aplicabilidade dos ensaios instrumentais padronizados — originalmente concebidos para pavimentos rígidos — em superfícies não pavimentadas tornam necessária a adoção de métodos complementares, práticos e recorrentes. As recomendações aplicáveis incluem:

- Inspeções visuais frequentes para detecção de acúmulo de água, perda de compactação, presença de material solto (areia, cascalho) e formação de sulcos;
- Coleta sistemática de relatos operacionais dos pilotos sobre desempenho de frenagem, necessidade de correções direcionais e aceleração na decolagem;
- Em pistas pavimentadas, estudos como o de Filho e Oliveira (2014) demonstram que a macrotextura, isoladamente, não assegura um bom coeficiente de atrito de forma direta. Por outro lado, há evidências de que ela desempenha papel essencial na drenagem superficial, a qual, ao favorecer a rápida secagem da pista, contribui significativamente para o aumento da aderência em condições molhadas. Assim, ao transpor esse princípio para pistas semi-preparadas — onde o conceito de macrotextura não se aplica -, a recomendação é manter o controle rigoroso das condições de drenagem propriamente dita, de modo a garantir a secagem eficiente da superfície e, conseqüentemente, melhores níveis de aderência (ANAC, 2022b).

Com isso, a integração entre a avaliação geotécnica (compactação, granulometria e umidade), o monitoramento operacional (inspeções e feedback de pilotos) e o uso de modelos empíricos — quando calibrados localmente, como o proposto por Guo *et al.* (2025) — constitui a base metodológica recomendada para a definição dos critérios de projeto, manutenção e avaliação de pistas semi-preparadas neste trabalho.

### 2.3.3 Gerenciamento de Poeira

O gerenciamento eficaz da poeira é um importante componente estratégico para a operação segura e sustentável de pistas de pouso semi-preparadas. A poeira fugitiva,

gerada pela interação das aeronaves com a superfície não pavimentada, representa um problema que vai muito além do simples desconforto (FHWA-CFL, 2013; FHWA, 2008).

A negligência no controle de poeira resulta em três categorias principais de risco, que devem ser cuidadosamente gerenciadas no projeto e na manutenção de pistas semi-preparadas:

- **Riscos Operacionais e de Segurança:** A principal consequência da poeira não controlada é a drástica redução da visibilidade durante as operações de pouso e decolagem. Nuvens de poeira podem obscurecer a visão dos pilotos e da equipe de solo, comprometendo a segurança em um momento crítico do voo e dificultando a coordenação das atividades em solo.
- **Danos Mecânicos às Aeronaves:** Um dos riscos mais severos é a ingestão de poeira e areia pelas turbinas das aeronaves. Em altas temperaturas, as partículas de areia sofrem vitrificação, transformando-se em vidro. Esse material se deposita em componentes internos da turbina — como palhetas e câmaras de combustão — podendo levar a falhas mecânicas críticas e até à perda do motor. Vale ressaltar que, embora a operação de aeronaves com motor a turbina seja possível em pistas semi-preparadas, ela deve ser evitada pois depende de uma série de fatores que não simples de se controlar, o que aumenta o risco desse tipo de operação.
- **Degradação Estrutural da Pista:** As partículas finas atuam como agente aglutinante e conferem coesão à matriz de agregados da camada de rolamento. A perda desses finos enfraquece a estrutura, tornando a pista suscetível a defeitos como corruações, painéis e trilhas de roda. Essa deterioração não apenas reduz a segurança e o conforto, como também eleva significativamente os custos e a frequência das manutenções, diminuindo a vida útil operacional.

### 2.3.3.1 Granulometria

A granulometria caracteriza a distribuição do tamanho das partículas que compõem o material da camada de rolamento e constitui parâmetro fundamental para a previsão da formação de poeira. A curva granulométrica é obtida por peneiramento (frações grosseiras) e, quando necessário, por sedigrafia (frações finas), traçando-se a porcentagem acumulada que passa em cada abertura de peneira em função da dimensão da malha. Essa curva permite identificar se o material é bem graduado (ampla distribuição de tamanhos) ou mal-graduado (predomínio de uma única fração), influenciando diretamente a compactabilidade, a resistência ao desgaste e a tendência à geração de poeira.

Dois coeficientes derivados da curva granulométrica são amplamente utilizados para caracterizar a gradação:

- **Coefficiente de Uniformidade**  $C_u$  (ou Coeficiente de Não-Uniformidade): indica o grau de dispersão dos diâmetros das partículas e é definido pela Equação 2.11:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \quad (2.11)$$

onde  $D_x$  é o diâmetro (ou abertura de peneira, em mm) que deixa passar  $x\%$  da massa do material. Materiais com  $C_u$  elevado tendem a apresentar melhor empacotamento e menores vazios.

- **Coefficiente de Curvatura**  $C_c$  (também chamado coeficiente de granulometria): indica a forma da curva entre as frações intermediárias e é definido pela Equação 2.12:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}, \quad (2.12)$$

Valores de  $C_c$  fora de faixas adequadas podem indicar gradação com irregularidades que prejudicam o empacotamento e a estabilidade. Em conjunto,  $C_u$  e  $C_c$  permitem avaliar se o material é bem graduado ou mal-graduado e se há necessidade de mistura ou beneficiamento.

### 2.3.3.2 Ensaios pertinentes

A seguir são descritos, em termos práticos e teóricos, os ensaios normalmente exigidos em projetos de superfícies não pavimentadas ou semi-preparadas.

#### Índices de Atterberg

Os limites de Atterberg caracterizam o comportamento plástico e a sensibilidade à água das frações finas de um solo, principalmente argilas e siltes. O Limite Líquido (LL) corresponde à umidade na qual o solo passa do estado plástico para o líquido; o Limite de Plasticidade (PL) é a umidade limite entre o estado semissólido e o estado plástico.

O Índice de Plasticidade (PI) é determinado pela Equação 2.13:

$$PI = LL - PL \quad (2.13)$$

A presença de finos plásticos confere plasticidade e coesão, mas valores elevados indicam maior deformabilidade, maior suscetibilidade ao encharcamento e maior retração/expansão com variação de umidade — fatores indesejáveis para a camada de rolamento de pistas. Em superfícies de operação de aeronaves, finos excessivamente plásticos aumentam a tendência à formação de lama em tempo úmido e à geração de poeira quando

secos. Por isso, é comum estabelecer limites superiores para o PI.

**Procedimento resumido:**

1. Determinação do LL pelo aparelho de Casagrande (ou métodos alternativos);
2. Determinação do PL por moldagem e corte da amostra (ou método do *roll* ou método do rolo);
3. Cálculo do PI e classificação segundo o sistema Casagrande.

Materiais com  $PI < 12$  são preferíveis para a camada de rolamento de pistas semi-preparadas, pois apresentam baixa plasticidade e menor sensibilidade à variação de umidade. Para materiais com fração de finos  $> 12\%$ , recomenda-se análise complementar (carta de plasticidade) e, possivelmente, combinação com materiais mais grosseiros ou estabilização.

**Ensaio de Compactação (Proctor)**

O ensaio Proctor Normal determina a relação entre teor de umidade e massa específica seca máxima (densidade seca máxima), permitindo estabelecer a umidade ótima de compactação que produz maior densidade para um esforço padronizado.

Amostras de solo são compactadas em camadas numa forma padronizada por um número definido de golpes com um soquete de massa definida; varia-se o teor de água entre amostras para obter a curva de compactação (densidade seca vs. umidade). A massa específica seca máxima  $\rho_{d,max}$  e a umidade ótima são obtidas da curva. Em campo, o compactador deve procurar atingir um percentual da  $\rho_{d,max}$  (por exemplo, 95%) para garantir resistência e durabilidade.

Exigir  $\geq 95\%$  da densidade máxima é importante porque esse nível reduz vazios, aumenta resistência à deformação e à penetração das rodas, diminui a suscetibilidade à erosão pelo tráfego e à perda de finos por aspiração, e reduz a geração de poeira. Para pistas, uma compactação inferior aumenta a necessidade de manutenção e acelera o surgimento de defeitos (corrugações, afundamentos). A exigência de 95% é prática comum em engenharia de camadas de rolamento não pavimentadas quando se deseja desempenho próximo ao ótimo.

## 2.4 Ciclo de Vida e Estudo de Deterioração

Assim como os pavimentos convencionais, as pistas semi-preparadas seguem um ciclo de vida composto pelas fases de projeto, construção, operação, manutenção e, eventualmente, reabilitação ou reconstrução. A compreensão desse ciclo é fundamental para uma gestão eficiente que busque otimizar os investimentos e garantir a funcionalidade da infraestrutura ao longo do tempo.

A análise de ciclo de vida (*Life Cycle Cost Analysis* – LCCA), embora mais complexa em pistas não pavimentadas devido à maior variabilidade no desempenho e na resposta à manutenção, fornece o arcabouço conceitual necessário à tomada de decisão (PATERSON, 1987).

### 2.4.1 Projeto, Construção e Operação

Na fase de projeto, são definidos aspectos como traçado, geometria, materiais, espessuras e sistema de drenagem. A construção envolve a execução da terraplenagem, conformação das camadas e sua compactação.

Com a entrada em operação, a pista passa a sofrer deterioração progressiva causada pela interação entre cargas do tráfego aéreo e fatores ambientais, como chuva, vento e temperatura. A taxa de deterioração depende da intensidade desses fatores e da resistência estrutural da pista.

### 2.4.2 Manutenção

A manutenção é essencial para controlar a deterioração e prolongar a vida útil da pista, mantendo-a em condições operacionais adequadas. Ela pode ser classificada em:

- **Manutenção rotineira:** ações frequentes e de baixo custo, como o patrolamento com motoniveladora, para restaurar o perfil transversal, corrigir irregularidades (corrugações, panelas incipientes) e remover material solto. Também inclui a limpeza e desobstrução dos dispositivos de drenagem.
- **Manutenção periódica:** intervenções mais intensivas, como o rescascalhamento, que repõe material perdido por desgaste e erosão, restaurando a espessura e a capacidade de suporte. Outras ações incluem escarificação e recompactação de camadas que perderam densidade ou apresentam deformações.

A frequência ótima dessas manutenções é decisiva para o desempenho da pista e depende do tráfego, dos materiais e das condições climáticas.

### 2.4.3 Reabilitação e Análise de Ciclo de Vida

Quando a deterioração acumulada torna a manutenção ineficaz ou antieconômica, torna-se necessária uma reabilitação estrutural ou mesmo a reconstrução da pista. A análise do ciclo de vida, utilizando modelos de previsão de desempenho e modelos de custos, permite avaliar diferentes estratégias de manutenção e identificar aquela que minimiza o custo total ao longo do tempo, considerando tanto os custos da agência (obras e serviços) quanto os custos dos usuários (desgaste de aeronaves, segurança, regularidade das operações).

### 2.4.4 Perda de Material

O estudo dos mecanismos e da progressão da deterioração é fundamental para o desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho, essenciais na gestão de pavimentos e no dimensionamento racional.

A perda de material da camada de revestimento é um processo contínuo e inevitável em pistas não pavimentadas ou com revestimento primário de cascalho. Resulta da combinação da ação mecânica do tráfego (abrasão e deslocamento de partículas pelos pneus) e da ação dos agentes climáticos (remoção de finos pelo vento em tempo seco; carreamento de finos e erosão pela água da chuva).

Conforme discutido em Paterson (1987), a taxa de perda de material (geralmente expressa em mm/ano ou mm/veículo-km) é influenciada por diversos fatores:

- **Tráfego:** volume, peso e velocidade das aeronaves. Maior tráfego e maior velocidade aumentam a perda.
- **Material de Revestimento:** granulometria, plasticidade dos finos (coesão), dureza do agregado. Materiais bem graduados, com plasticidade adequada (nem muito baixa, nem excessiva) e agregados resistentes tendem a apresentar menor perda.
- **Clima:** intensidade e frequência das chuvas, velocidade do vento. Chuvas intensas causam erosão; períodos secos e ventosos favorecem a perda de finos por deflação.
- **Geometria da Pista:** declividades longitudinais e transversais. Rampas acentuadas e abaulamento excessivo podem aumentar a erosão hídrica.
- **Manutenção:** o patrolamento, embora necessário para manter a regularidade, pode, se mal executado ou excessivo, soltar material e acelerar a perda.

As consequências da perda de material são significativas: redução da espessura da camada de revestimento, o que compromete a capacidade estrutural e a proteção do

subleito; aumento da irregularidade superficial pela exposição de partículas maiores ou formação de sulcos; geração de poeira, que afeta a segurança (visibilidade), o conforto e pode danificar motores das aeronaves; e alteração das propriedades da superfície (atrito, permeabilidade).

Modelos empíricos foram desenvolvidos para estimar a perda de material. Um modelo frequentemente citado, baseado nos estudos do Banco Mundial (incluindo o realizado no Brasil, conforme *Paterson*), tem a seguinte forma conceitual:

$$ML = \frac{K \cdot T^a \cdot P^b}{CBR^c \cdot D^d} \quad (2.14)$$

Onde:

- $ML$ : perda anual de material (mm/ano);
- $T$ : volume de tráfego anual;
- $P$ : precipitação anual ou outro índice climático;
- $CBR$ : indicador da qualidade/resistência do material;
- $D$ : diâmetro máximo do agregado ou outro parâmetro do material;
- $K, a, b, c, d$ : coeficientes de calibração.

Esses modelos permitem estimar a vida útil de uma camada de revestimento e planejar a frequência necessária do rescascalhamento — uma das principais atividades de manutenção periódica — essencial para garantir a operacionalidade e a segurança da pista a longo prazo.

# 3 Metodologia: Critérios de Projeto e Manutenção

## 3.1 Pista Exemplo

Para introduzir a discussão sobre os critérios de projeto, propõe-se o dimensionamento de uma pista exemplo, de forma a tornar o estudo mais prático e contextualizado. A pista considerada possui as seguintes dimensões:

- **Comprimento:** 1.200 m
- **Largura:** 60 m

Tais dimensões são referência à pista de pouso não pavimentada em que foram realizados testes com o KC-390, conforme noticiado pela FAB (s.d.).

## 3.2 Critérios Estruturais

### 3.2.1 Avaliação Geotécnica

O sucesso de uma pista semi-preparada depende de um projeto que equilibre rigor técnico com a simplicidade exigida pela engenharia de campanha. Na ausência de revestimento asfáltico ou de concreto, a responsabilidade de suporte recai sobre o subleito e as camadas granulares superiores. Assim, a investigação geotécnica (investigação *in situ* com ensaios como DCP/LWD ou ensaios de laboratório como CBR) é condição indispensável para o dimensionamento.

### 3.2.2 Subleito

O subleito é a fundação sobre a qual a estrutura da pista será construída; sua capacidade de suporte determina as espessuras e a necessidade de tratamentos das camadas

superiores. Quando os ensaios indicarem subleito inadequado (baixa resistência ou alta suscetibilidade à umidade), são necessárias intervenções precedentes à construção das camadas de pavimento, tais como reforços estruturais, substituição do material ou melhorias de drenagem.

Para estimar o CBR mínimo do subleito adotou-se a equação 2.5. Considerando 5 anos de vida útil da pista e adotando a aeronave crítica C-105 (*Amazonas*), utilizou-se a seguinte entrada (valores estimados conforme proposta anterior):

- Número acumulado de passagens equivalentes (5 anos):  $N = 52 \times 5 = 260$ ;
- Carga de Roda Simples Equivalente:  $CRSE \approx 146,5$  kN;
- Pressão de inflação dos pneus:  $p_i \approx 700$  kPa.

O número acumulado de passagens está relacionado ao numero total de operações da aeronave crítica, abordado adiante na discussão sobre o *mix* de aeronaves.

Substituindo na equação 2.5, obtém-se um valor aproximado de:

$$CBR_{SL,\min} \approx 16 \text{ (valor arredondado).}$$

Assim, recomenda-se adotar **CBR mínimo de projeto do subleito = 16–17**, ou proceder a medidas de melhoria caso o subleito natural apresente CBR inferior a esse valor.

Considerando que os solos predominantes na região proposta sejam Latossolos e Argissolos, foi adotado **CBR = 10** para o solo de subleito, o que é abaixo do CBR mínimo de projeto. A solução consiste em reforçar com uma sub-base de solo compactado ou fazer uma camada de base com brita mais espessa, conforme foi feito no topco seguinte.

### 3.2.3 Dimensionamento das Camadas

Com o objetivo de propor um *mix* de aeronaves aderente à realidade operacional, foi realizada consulta a militares com experiência na Região Norte do Brasil. Segundo o relato, é comum a operação conjunta das aeronaves C-105 *Amazonas*, C-95 *Bandeirante* e C-98 *Caravan*.

Nesse contexto, o C-105 *Amazonas* (Figura 3.1) é considerado a aeronave crítica tanto para o dimensionamento geométrico quanto estrutural do pavimento. Idealizando um cenário de reabastecimento mais pesado no PAA (*Parque de Abastecimento de Aeronaves*), o C-105 operaria aproximadamente uma vez por semana.

O C-98 *Caravan* (Figura 3.3), por sua vez, pode operar duas a três vezes por dia durante o auge de uma operação, considerando também os voos fretados que empregam

o *Grand Caravan*. O C-95 *Bandeirante* (Figura 3.2) representa aeronaves regionais de médio porte, frequentemente empregadas em missões conjuntas, enquanto o Cessna 210 (Figura 3.4) foi incluído por representar aeronaves leves amplamente utilizadas por empresas amazônicas de táxi aéreo.



FIGURA 3.1 – C-105 *Amazonas*.



FIGURA 3.2 – C-95 *Bandeirante*.



FIGURA 3.3 – C-98 *Caravan*.



FIGURA 3.4 – Cessna 210.

### 3.2.3.1 Método do FAARFIELD

#### Mix de aeronaves

Com o método do FAARFIELD (USACE, 2013) é possível dimensionar as espessuras das camadas do pavimento. Entretanto, nem todas as aeronaves reais estão disponíveis na base de dados do programa. Assim, foram selecionados modelos equivalentes com características estruturais e operacionais compatíveis, conforme listado a seguir:

- C-123: representando o C-105 *Amazonas*;
- ERJ-135: representando o C-95 *Bandeirante*;
- Single Wheel 10: representando o C-98 *Caravan*;
- Single Wheel 5: representando o Cessna 210.



FIGURA 3.5 – Aeronave C-123 considerada equivalente ao C-105 *Amazonas*.



FIGURA 3.6 – Aeronave ERJ-135 considerada equivalente ao C-95 *Bandeirante*.

O **mix de aeronaves** utilizado na simulação pelo *FAARFIELD* é apresentado na Tabela 3.1, com os respectivos pesos de táxi bruto e frequências anuais de operação.

TABELA 3.1 – Mix de aeronaves utilizado na simulação pelo *FAARFIELD*.

Aeronave	Peso de Decolagem (t)	Número de Decolagens Anuais
C-123	27,216	52
ERJ-135	19,100	156
Single Wheel 10	4,536	730
Single Wheel 5	2,268	260

### Camadas da pista

O dimensionamento das espessuras das camadas foi realizado por meio do software *FAARFIELD*. Como as opções de revestimento superficial disponíveis no programa são voltadas para materiais de pavimentação convencional, adotou-se um revestimento do tipo *User Defined*, com propriedades mecânicas calibradas para representar o comportamento de pistas semi-preparadas (granulometria, módulo de elasticidade, resistência do agregado, entre outros parâmetros relevantes).

A Figura 3.7 apresenta o primeiro resultado gráfico gerado pelo *FAARFIELD*, correspondente ao dimensionamento realizado com a inclusão de uma sub-base constituída por solo compactado.

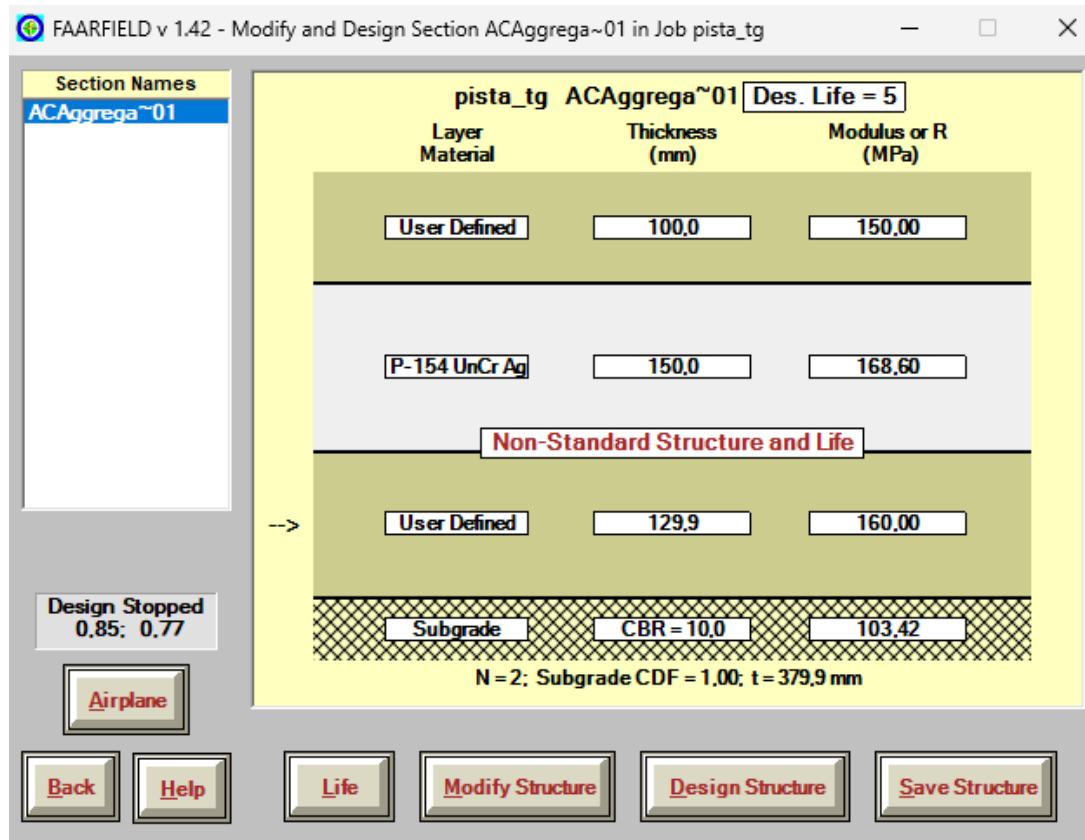


FIGURA 3.7 – Resultado do dimensionamento das camadas no *FAARFIELD* com sub-base.

A Figura 3.8 apresenta o segundo resultado gráfico, correspondente ao dimensionamento realizado sem a utilização de sub-base.

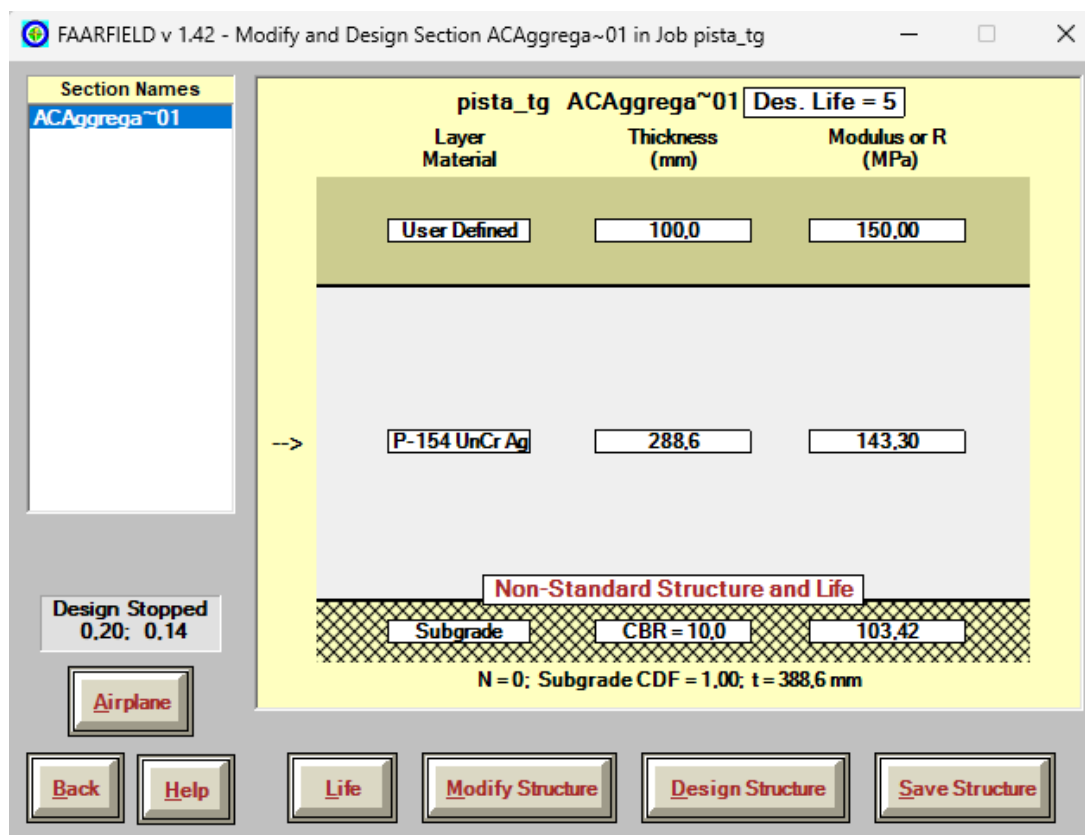


FIGURA 3.8 – Resultado do dimensionamento das camadas no *FAARFIELD* sem sub-base.

No primeiro caso (Figura 3.7), a espessura total da seção transversal é de aproximadamente **379,9 mm**. Já no segundo caso (Figura 3.8), a espessura total aumenta para cerca de **388,6 mm**.

Embora ambas as alternativas atendam ao critério de vida útil estabelecido pelo método, é importante destacar que, em regiões onde se pretende implantar pistas semi-preparadas, a disponibilidade de brita ou de agregados adequados tende a ser limitada. Assim, o uso de uma sub-base de solo compactado permite reduzir o consumo de material granular nobre e, portanto, apresenta-se como a solução mais viável do ponto de vista logístico e econômico.

### 3.2.3.2 Método do PCASE

Conforme o ANAC (2025), o método do FAARFIELD é considerado conservador — isto é, tende a apresentar resultados que privilegiam a segurança. Entretanto, a ANAC recomenda o uso do método do PCASE por ser mais apropriado para pistas não pavimentadas ou semi-preparadas (unpaved/semi-prepared). O procedimento detalhado do

PCASE e instruções de uso também podem ser consultados no manual do usuário e no guia de instalação do ERDC/USACE (USACE, 2024; USACE, 2025).

Uma vez instalado o software PCASE, o primeiro passo para preparar a avaliação é definir o *Inventory* (inventário), conforme ilustram as capturas de tela do programa a seguir.

### Define Inventory

Na Figura 3.9, o campo *Network* refere-se ao aeródromo em questão — aqui nomeado como *aerodromo\_exemplo* para fins do dimensionamento proposto.

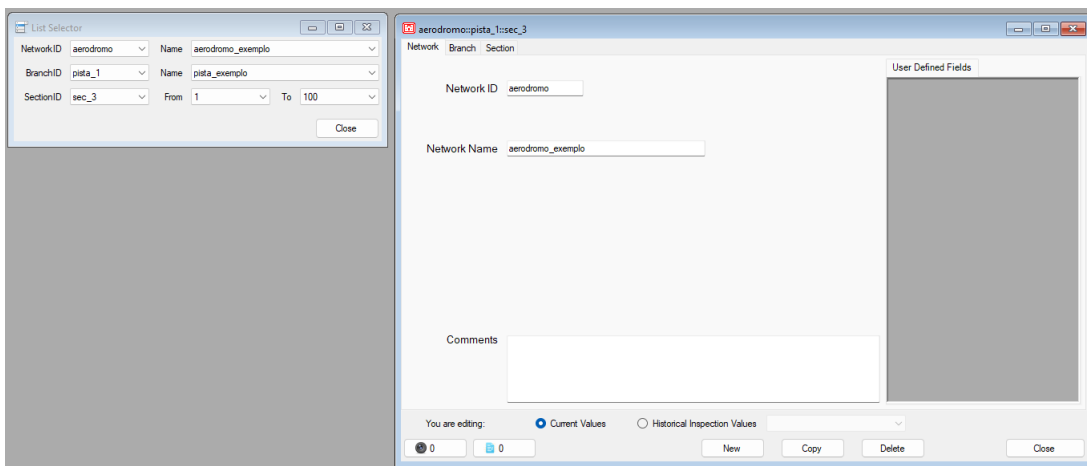


FIGURA 3.9 – Definição do *Network* no PCASE.

Na Figura 3.10, o campo *Branch* refere-se à pista do aeródromo (neste trabalho: *pista\_exemplo*).

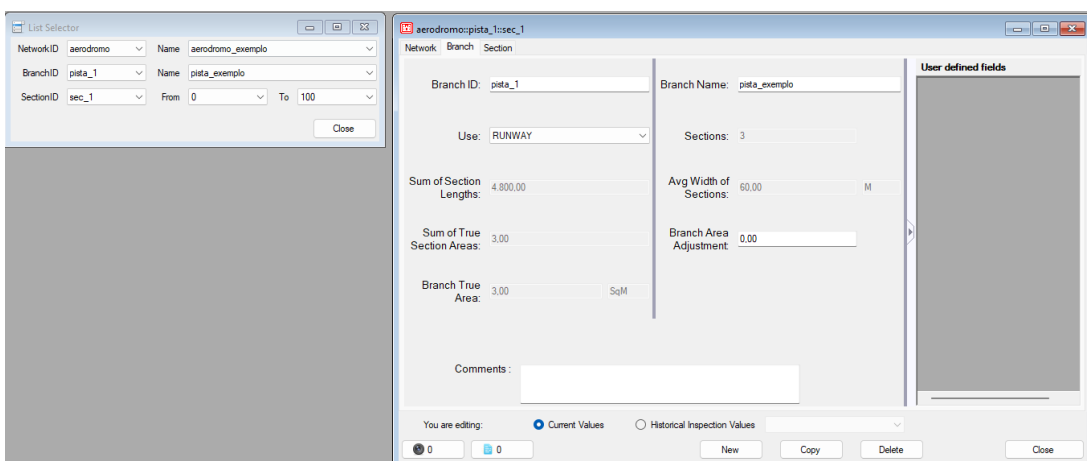


FIGURA 3.10 – Definição da *Branch* (pista) no PCASE.

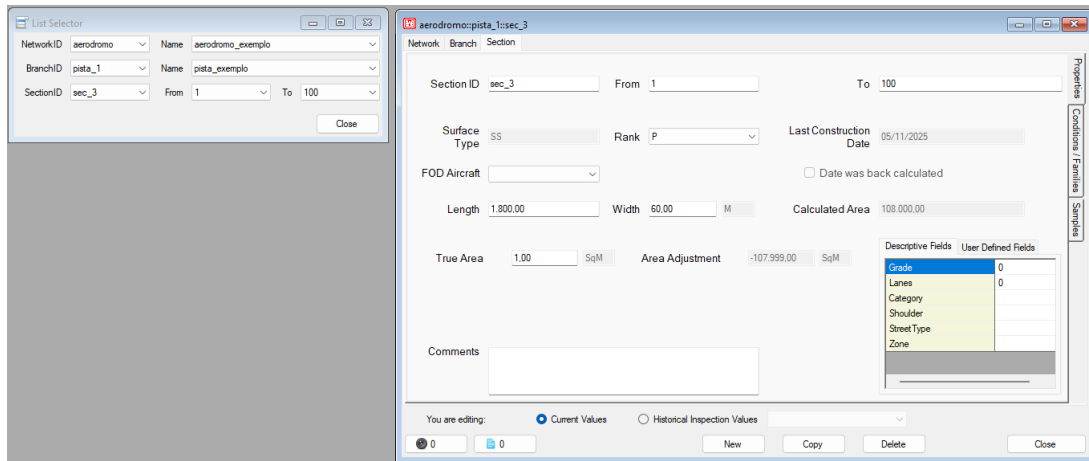
Na Figura 3.11, o campo *Section* refere-se às características geométricas e superficiais da pista — por exemplo, comprimento, largura e tipo de superfície. Para a criação da *Section* no dimensionamento proposto devem ser observados os seguintes parâmetros:

- **Length (comprimento):** 1200 m;
- **Width (largura):** 60 m;
- **Surface Type (tipo de superfície):** selecionar “SS” (*Stabilized Surface – Unsurfaced*), que representa superfície não pavimentada ou semi-preparada.

The image shows a software dialog box titled "New Section". It contains several input fields and dropdown menus. The fields are: "Section ID: \*" (empty), "From:" (empty), "To:" (empty), "Constructed: \*" (18/11/2025), "Length: 1200", "Width: 60 M", "Rank: \*" (P), "Surface Type: \*" (PCC), and "True Area: \*" (1 SqM). Below these is a "Slab Data" section with "Slab Length (Typical)" (empty) and "Slab Width" (empty M). At the bottom, there is a red error message: "Section ID is in use or a required property is blank." and a "Cancel" button.

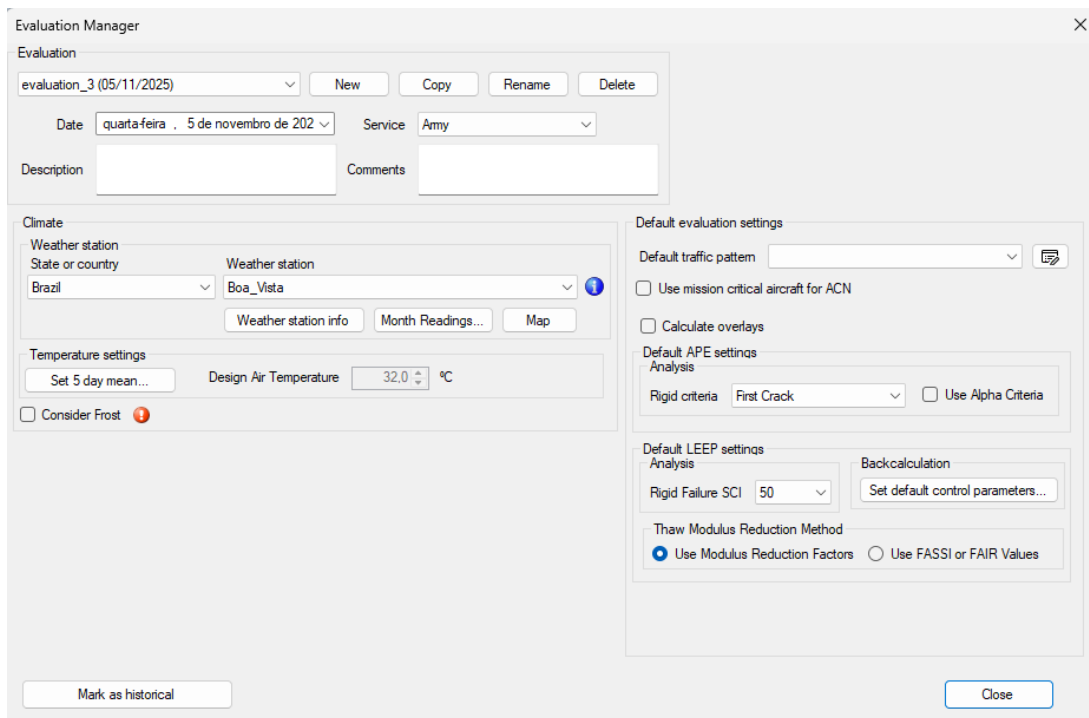
FIGURA 3.11 – Criação da *Section* no PCASE (definição de comprimento, largura e tipo de superfície).

Com isso, a *Section* é criada conforme mostrado na Figura 3.12.

FIGURA 3.12 – *Section* criada no PCASE.

### APE Evaluation

Para o dimensionamento estrutural, a ANAC recomenda utilizar o método *APE Evaluation* do PCASE. Antes de rodar a avaliação, é necessário configurar o *Evaluation Manager* (definir estação meteorológica, critérios padrão de análise e demais parâmetros locais). Na Figura 3.13 apresenta-se a tela de configuração do *Evaluation Manager* — neste trabalho escolheu-se a estação *Boa\_Vista* para representar condições climáticas típicas da Região Norte do Brasil (ANAC, 2025; USACE, 2024).

FIGURA 3.13 – Configuração do *Evaluation Manager* no PCASE (exemplo: seleção da estação meteorológica e parâmetros padrão).

Quanto ao *traffic pattern* (mix de aeronaves), o processo no PCASE é análogo ao

utilizado no FAARFIELD: algumas aeronaves reais não constam literalmente na base de dados do software, sendo, portanto, necessário recorrer a aeronaves equivalentes, escolhidas com base em critérios estruturais — como massa total, configuração do trem de pouso e pressão dos pneus (USACE, 2024).

Dessa forma, as aeronaves foram representadas da seguinte maneira:

- **C-105 Amazonas:** o software dispõe do modelo *C-295 CASA*, que é a designação internacional da própria aeronave C-105, caracterizada como uma turboélice bimotor de porte médio utilizada em missões de transporte e carga pela Força Aérea Brasileira (FAB), ilustrada pela figura 3.1.
- **C-95 Bandeirante:** modelada como *C-12F HURON*, bimotor de configuração estrutural e peso máximo de decolagem semelhantes ao *Embraer EMB-110 Bandeirante*, representando adequadamente o comportamento de aeronaves leves de transporte regional.



FIGURA 3.14 – C-12F *Huron*, aeronave equivalente ao C-95 *Bandeirante*.

- **C-98 Caravan:** modelada como *C-41A CASA 212*, aeronave de pequeno porte e trem de pouso simples, representando o comportamento de aeronaves monomotoras utilitárias, como o *Cessna 208B Grand Caravan*.



FIGURA 3.15 – C-41A CASA 212, aeronave equivalente ao C-98 Caravan.

- **Cessna 210:** modelada por *FAA SNGL WHL-5*, representando aeronaves leves de pequeno porte amplamente empregadas na aviação regional e executiva.

A inserção dos dados de tráfego e a contabilização das passagens seguiram as orientações do *PCASE User Guide* (USACE, 2024). Para o dimensionamento proposto, considerou-se uma vida útil de projeto de **5 anos**, contabilizando o número total de passagens acumuladas nesse período para cada aeronave, conforme apresentado na Figura 3.16.

Além disso, garantiu-se que o parâmetro *Pavement Type* fosse configurado como “**Unsurfaced**”, de modo a representar adequadamente as condições de pista semi-preparada.

ACN/ACR Curves

Traffic	Load (kg)		Passes		Equivalent Passes
	Areas A, B	Areas C, D	Areas A, B, C	Area D	
C-12F HURON	6.804	5.103	780	8	366
C-41A CASA 212	8.000	6.000	3.650	36	1.751
C-295 CASA	23.201	17.401	260	3	260
FAA SNGL WHL-5	2.268	1.701	1.300	13	294

Controlling Vehicle					
C-295 CASA	23.201	17.401	260	3	2.671

Auto Detect Controlling    Select Controlling Vehicle: C-295 CASA (23.201,20)    Close

FIGURA 3.16 – Configuração do *mix* de aeronaves e total de passagens para 5 anos de vida útil no software PCASE.

De volta ao módulo *APE Evaluation*, o próximo passo foi definir as camadas do pavimento e propor suas respectivas espessuras. As camadas e parâmetros utilizados no dimensionamento estão apresentados na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 – Camadas e propriedades adotadas no PCASE para o dimensionamento da pista.

Tipo de Camada	Tipo de Material	Espessura (mm)	CBR (%)
Não revestida	Agregado não ligado	100	15,0
Base	Brita graduada	100	50,0
Subleito natural	Solo não coesivo	—	10,0

O modelo adotado reflete a estrutura típica de uma pista semi-preparada ou não pavimentada, composta por materiais granulares e solo natural compactado, cujas camadas são descritas a seguir:

- **Camada superficial (Unsurfaced):** Corresponde à superfície de rolamento exposta, composta por material granular não ligado (*Unbound Aggregate*). Essa camada é responsável pela distribuição inicial das cargas aplicadas e deve possuir resistência suficiente para evitar deformações excessivas e manter a operacionalidade da pista. Foi proposta a espessura de 100 mm e CBR de 15%, valor compatível com materiais lateríticos compactados em pistas de campanha e aeródromos expedicionários.
- **Camada de base (Base):** Constituída por brita graduada (*Unbound Crushed Stone*) de alta resistência e boa drenagem, cuja função principal é distribuir os esforços provenientes do tráfego e reduzir as tensões transmitidas ao subleito. Foi proposta a espessura de 100 mm e CBR de 50%, representando um material granular denso de boa qualidade, compatível com as recomendações do *PCASE User Guide* (USACE, 2024).
- **Subleito (Natural Subgrade):** Representa o solo de fundação natural, sobre o qual se apoiam as demais camadas. Este componente controla a capacidade de suporte global da estrutura e influencia diretamente na vida útil da pista. O valor de CBR adotado foi de 10%, correspondente a um solo arenoso ou argiloso compactado, conforme identificado nas condições geotécnicas locais e nas diretrizes da ANAC.

Após a definição das camadas, foi realizada a análise estrutural no módulo *APE Evaluation* do PCASE, obtendo-se os resultados apresentados na Figura 3.17.

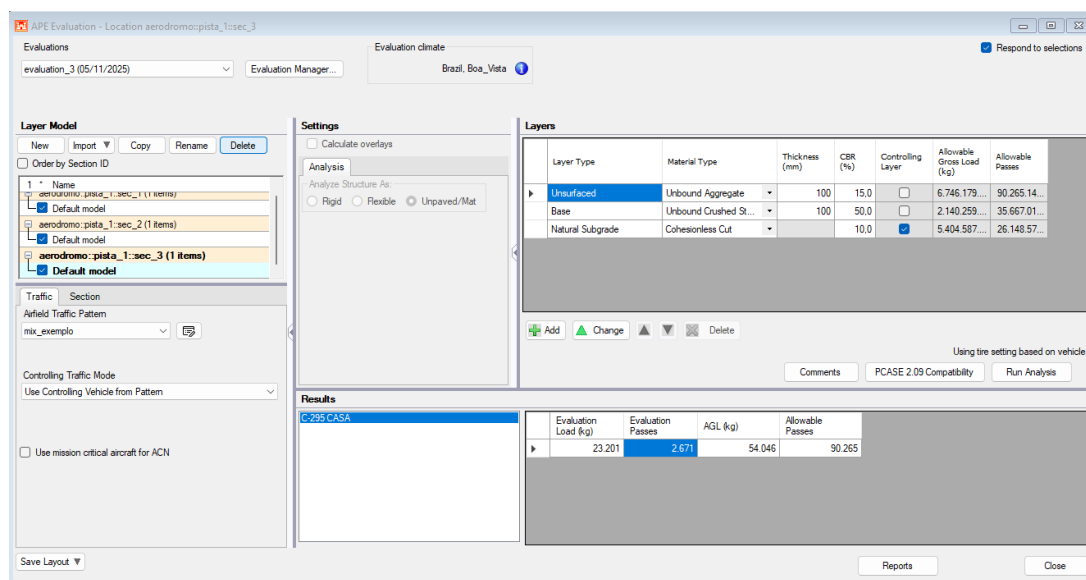


FIGURA 3.17 – Resultados da simulação no PCASE: configuração das camadas e número de passagens admissíveis.

Os resultados indicaram que a camada de subleito (*Natural Subgrade*) foi identificada como a *camada controladora* do desempenho estrutural, conforme assinalado na interface do software (coluna *Controlling Layer*). Isso significa que o comportamento estrutural da pista é limitado pela resistência do solo de fundação, o qual apresenta as maiores deformações sob o tráfego aplicado.

O cálculo resultou em um total de aproximadamente **90.265 passagens admissíveis da aeronave crítica C-295 CASA**, considerando a carga total de 23.201 kg e as propriedades das camadas definidas. Esse número de passagens (*Allowable Passes*) representa a quantidade de operações que o pavimento pode suportar até atingir o limite estrutural correspondente a um fator de dano cumulativo (*Cumulative Damage Factor – CDF*) igual a 1,0.

Comparando-se ao número de operações previsto para a vida útil de projeto (2.671 passagens equivalentes, ao longo dos 5 anos de vida útil), observa-se que a estrutura projetada apresenta uma ampla margem de segurança, evidenciando que o conjunto de camadas adotado é adequado para as condições operacionais simuladas.

Dessa forma, a configuração proposta mostra-se compatível com as diretrizes do (ANAC, 2025), uma vez que o desempenho estrutural calculado está em conformidade com o esperado para pistas semi-preparadas: a camada granular superficial tende a apresentar deformações plásticas localizadas, mas o sistema como um todo mantém capacidade estrutural e funcionalidade operacional dentro dos limites admissíveis.

Com isso, observa-se que o elevado número de passagens admissíveis indica uma boa capacidade estrutural da pista semi-preparada. O principal desafio, nesse caso, não reside

na resistência das camadas inferiores, mas sim na gestão e manutenção da superfície exposta, que permanece suscetível à ação do intemperismo e à degradação provocada por tráfego repetido em condições climáticas adversas.

Além disso, na intenção era de manter a camada da base (composta por brita graduada) com a espessura de pelo menos 100 mm, não foi necessário fazer a análise com o acréscimo de uma camada de sub-base, pois essa estratégia só faz sentido em um cenário em que a intenção é diminuir a espessura da camada de brita.

### 3.3 Critérios para Drenagem e Geometria da Pista

Para pistas **semi-preparadas**, a água é o principal agente de falha. Na ausência de uma camada de revestimento impermeável, o projeto de drenagem deixa de ser um item acessório — que, no caso de pistas pavimentadas, tem muitas vezes a função de acelerar a secagem — e passa a **governar** a longevidade da estrutura e sua disponibilidade operacional. Em pistas de terra, a saturação superficial provoca amolecimento, formação de sulcos e erosões, tornando o controle do escoamento superficial crítico para a manutenção e segurança das operações.

Cabe destacar que o objetivo operacional não é realizar voos durante eventos chuvosos persistentes; mesmo em pistas pavimentadas na Região Norte, evita-se, via de regra, operar em chuva intensa. O propósito do projeto de drenagem é, portanto, evitar a saturação do subleito e das camadas granulares, condição que reduz drasticamente a resistência do sistema e acelera o aparecimento de defeitos (afundamentos, erosões, “panelas”) podendo, em casos extremos, levar à interdição e à necessidade de reconstrução.

O projeto geométrico deve priorizar a remoção rápida e eficiente da água superficial. Dois elementos essenciais são:

- **Abaulamento (coroamento):** em pistas semi-preparadas, a pista deve apresentar perfil transversal convexo, com o eixo mais elevado que as bordas, de modo a promover o escoamento lateral. Recomenda-se declividade transversal de projeto entre **4% e 6%**. Declividades inferiores podem não garantir escoamento suficiente e favorecer acúmulo de água; declividades superiores aumentam o risco de erosão superficial e podem dificultar operações terrestres e a manutenção por máquinas. Para pistas de terra recomenda-se ainda compactação adequada do leito e, onde aplicável, aplicação de camada de rolamento granular ou tratamento superficial que reduza a suscetibilidade ao espalhamento e à erosão.

A imagem abaixo ilustra o abaulamento da pista semi-preparada; as setas em azul representam o sentido do fluxo da água drenada e os percentuais indicam a faixa de

projeto recomendada.

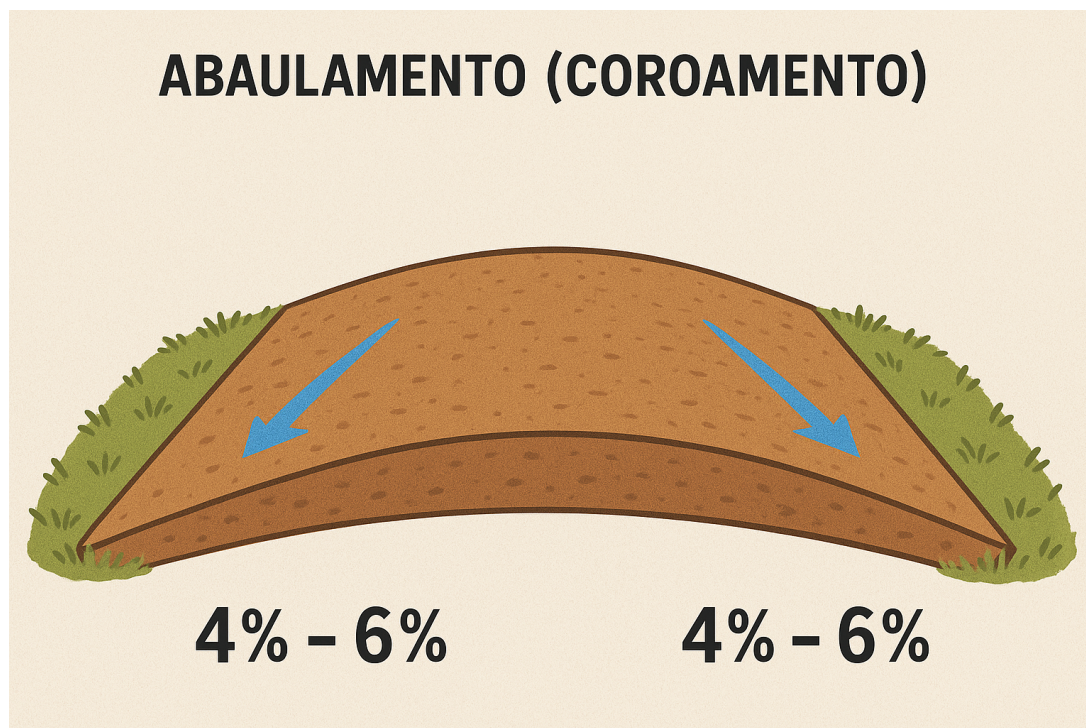


FIGURA 3.18 – Geometria da seção transversal de uma pista semi-preparada com coroamento.

- **Sistemas de drenagem lateral:** valetas e canaletas devem recolher a água do coroamento e conduzi-la para locais de escoamento seguros, com proteção contra erosão (enchimento com pedra rip-rap, revestimento vegetal estabilizado, dissipadores de energia, geomantas etc.). Em pistas de terra, convém prever bermas/ombros consolidados para reduzir a erosão lateral. O dimensionamento deve considerar a intensidade pluviométrica de projeto (chuva de retorno apropriada — ex.: 10, 25 ou 50 anos, conforme criticidade) e o potencial de transporte de sedimentos.

## 3.4 Critérios para Superfície da Pista

### 3.4.1 Texturas

Conforme discutido no Capítulo 2, dentre as escalas de textura aplicáveis a pavimentos, para pistas de pouso não pavimentadas ou semi-preparadas, a variável de maior relevância é a irregularidade longitudinal da superfície. As demais escalas — como macrotextura e microtextura — apresentam pouca aplicabilidade prática neste contexto devido à natureza solta e heterogênea dos solos, à dificuldade de medição e à variabilidade rápida das partículas superficiais frente ao uso e às condições climáticas.

As razões que justificam o foco na irregularidade são, resumidamente:

- partículas de solo soltas e heterogeneidade granulométrica tornam inviável a aplicação direta de critérios e equipamentos concebidos para revestimentos asfálticos ou de concreto;
- medidas de macrotextura convencionais (por exemplo, manchas de areia) não são aplicáveis em pistas não pavimentadas; e
- equipamentos de alta precisão, como perfilômetros a laser, embora capazes de medir macrotextura e IRI (*International Roughness Index*), normalmente não estarão disponíveis em contextos de engenharia de campanha ou operações remotas.

Dessa forma, para projetos de pistas de pouso não pavimentadas ou semi-preparadas, adota-se o *Runway Roughness Index* (RRI) como índice de referência para caracterizar a irregularidade da superfície. O RRI considera aspectos dinâmicos e operacionais específicos das aeronaves, sendo composto por dois componentes principais:

1. **BBI (*Boeing Bump Index*)**: índice que quantifica a irregularidade física, por meio de parâmetros associados à aceleração vertical e ao desvio da superfície em relação a uma linha de referência. O BBI busca ponderar comprimentos de onda críticos para a resposta das aeronaves (aqueles que mais influenciam a dinâmica do trem de aterragem e a sensação de irregularidade durante pouso, decolagem e táxi).
2. **PSR (*Pilot Subjective Rating*)**: avaliação subjetiva e qualitativa obtida a partir da experiência dos pilotos ao operar na pista (sensação de aspereza, presença de ondulações perceptíveis, bruscos impactos durante rolagem, etc.). O PSR incorpora o julgamento operacional humano, elemento relevante para segurança e conforto que índices puramente físicos podem não captar integralmente.

### 3.4.2 Atrito

O atrito é um critério de segurança primordial, pois governa a aderência das aeronaves à pista, refletindo na capacidade de frear e manobrar. Ele resulta de uma complexa interação entre o pneu e o pavimento, envolvendo dois mecanismos principais: **adesão**, que corresponde às forças moleculares de contato entre o pneu e a superfície, e **histerese**, relacionada à perda de energia devido à deformação da borracha do pneu ao contornar as asperezas da superfície.

Para harmonizar as medições de atrito realizadas por diferentes equipamentos e velocidades, foi desenvolvido o **Índice de Atrito Internacional (IFI)**. O IFI padroniza os resultados, correspondendo ao coeficiente de atrito que seria medido a uma velocidade de referência de 60 km/h, denominada  $F_{60}$ . Esse índice é composto por duas grandezas principais: a *macrotextura* da superfície e a medição de atrito em uma velocidade

específica, transformadas por meio de equações de correlação padronizadas pela ASTM INTERNATIONAL (1999).

A classificação conceitual dos valores de IFI permite uma interpretação direta da condição da superfície quanto à segurança operacional, conforme ilustrado na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 – Classificação do atrito segundo o Índice de Atrito Internacional (IFI).

Valores IFI ( $F_{60}$ )	Conceito
> 0,30	Ótimo
0,20 – 0,30	Bom
0,13 – 0,16	Regular
0,06 – 0,12	Ruim
< 0,06	Péssimo

A coleta de dados de atrito em campo é realizada com equipamentos especializados, como o *GripTester*, o *Mu-Meter* ou o *Surface Friction Tester*, que medem a força de resistência ao escorregamento de uma roda de teste sob condições controladas. Os ensaios podem ser conduzidos em diferentes níveis de umidade e em trechos representativos da pista, permitindo a determinação de valores médios de atrito e a identificação de pontos críticos.

Para pistas não pavimentadas, embora o IFI ainda seja aplicável conceitualmente, a medição direta pode ser limitada por fatores como:

- variação excessiva da textura superficial e umidade do solo;
- dificuldade de obtenção de velocidade constante e controle de carga sobre a roda de teste;
- ausência de padrão internacional específico para pistas semi-preparadas.

Ainda assim, a adoção do IFI como parâmetro de referência no nível de projeto e manutenção é recomendada, pois permite estabelecer limites mínimos de desempenho.

### 3.4.3 Gerenciamento de Poeira

Antes da aplicação de qualquer tratamento químico superficial, a estratégia mais eficaz e sustentável para o controle de poeira está na integração de critérios de projeto e de construção da própria pista. Produtos químicos ou paliativos são ferramentas úteis para manter uma pista em bom estado, mas não corrigem deficiências estruturais ou materiais inadequados.

A base de um programa de controle de poeira bem-sucedido é, portanto, uma pista composta por materiais adequados e com geometria que favoreça a drenagem superficial e a estabilidade estrutural.

A capacidade da camada de rolamento de resistir à abrasão, minimizar a geração de poeira e manter estabilidade depende diretamente da granulometria e da mineralogia dos agregados. A seleção e a especificação dos materiais dessa camada são, portanto, o primeiro e mais crítico passo.

O teor de finos — percentual de material que passa na peneira #200 (0,075 mm) — é um parâmetro essencial. Conforme FHWA (2008), FHWA-CFL (2013), recomenda-se a seguinte faixa indicativa:

- **Teor de finos (P#200):**  $8\% \leq P\#200 \leq 15\%$ .

Teores de finos muito baixos ( $< 8\%$ ) resultam em superfícies pouco coesas e propensas à desagregação, enquanto teores excessivos ( $> 15\text{--}20\%$ ) podem gerar poeira intensa em períodos secos e instabilidade em condições úmidas.

Para uma especificação mais precisa, recomenda-se o uso de índices granulométricos combinados, como o *Coefficiente de Granulometria* ( $G_c$ ) e o *Produto de Retração* ( $S_p$ ), definidos por:

$$G_c = \frac{(P_{1.0 \text{ in}} - P_{\#8}) \cdot P_{\#4}}{100} \quad (3.1)$$

$$S_p = (PI \times 0,5) \cdot P_{\#40} \quad (3.2)$$

Onde  $P_x$  é o percentual de massa passando na peneira indicada e PI é o Índice de Plasticidade (Atterberg).

As faixas de desempenho recomendadas, sujeitas à calibração conforme os materiais locais, são:

- **Coefficiente de Granulometria ( $G_c$ ):** 15 a 35; materiais fora dessa faixa tendem a apresentar pobre intertravamento ( $G_c$  baixo) ou excesso de partículas graúdas ( $G_c$  alto).
- **Produto de Retração ( $S_p$ ):** 100 a 365; valores baixos indicam deficiência de finos coesivos, enquanto valores altos indicam excesso de plasticidade e risco de instabilidade quando úmido.

### 3.4.3.1 Interpretação prática

- Gc e Sp permitem diagnosticar o comportamento provável do material:  
*Baixo Gc + baixo Sp* → propensão à desagregação;  
*Sp alto* → instabilidade em pista molhada;  
*Gc adequado + Sp moderado* → bom desempenho esperado.
- Esses índices funcionam como ferramentas preditivas para seleção de jazidas e formulação de misturas (blendagem) de agregados.

### 3.4.3.2 Critérios de Aceitação e Ensaio Recomendados

Para o controle de qualidade e aceitação dos materiais da camada de rolamento, recomenda-se incluir os seguintes critérios mínimos no projeto:

- **Granulometria:** P#200 entre 8% e 15%; curva granulométrica contínua e bem graduada.
- **Índices de Atterberg:** PI < 12, para limitar a plasticidade.
- **Compactação:** pelo menos 95% da densidade máxima obtida no ensaio Proctor Normal.
- **Controle de umidade:** teor de umidade de compactação dentro de  $\pm 2\%$  do teor ótimo.

### 3.4.3.3 Recomendações de Projeto e de Obra

- Priorizar materiais bem graduados e com teor de finos dentro da faixa recomendada.
- Quando necessário, realizar *blendagem* de materiais de jazidas distintas para ajustar Gc e Sp.
- Incluir no projeto um plano de controle tecnológico contendo ensaios de peneiramento, Atterberg, Proctor e CBR/DCP.
- Definir em especificação os métodos e a frequência de compactação, bem como os critérios de aceitação por área.

### 3.4.3.4 Medidas Complementares de Controle de Poeira

Se, mesmo com materiais e geometria adequados, persistirem problemas de poeira, podem ser adotadas medidas complementares:

- **Medidas físicas/operacionais:** controle de velocidade, limpeza regular da superfície e reposição de material superficial (*rescasalhamento*).
- **Tratamentos mecânicos:** compactação adicional ou mistura com finos não plásticos para aumentar a coesão superficial.
- **Tratamentos químicos pontuais:** aplicação de lignossulfonatos, cloretos de cálcio e magnésio, polímeros ou emulsões betuminosas de baixa espessura — apenas como manutenção preventiva, e não como correção estrutural. Deve-se avaliar previamente os impactos ambientais, a durabilidade e as condições de aplicação.

### 3.5 Critérios para o Ciclo de Vida

O desempenho de uma pista semi-preparada ao longo do tempo depende diretamente da sua capacidade de resistir à deterioração e de manter níveis adequados de funcionalidade e segurança operacional. Por se tratar de uma estrutura exposta a condições ambientais e submetida a carregamentos cíclicos, é essencial estabelecer critérios de projeto que contemplem todo o seu ciclo de vida.

A definição desses critérios deve considerar tanto os aspectos estruturais (capacidade de suporte, deformações acumuladas, resistência à erosão) quanto os funcionais (regularidade, atrito, drenagem e controle de poeira). Além disso, o planejamento das manutenções periódicas deve ser parte integrante do projeto, assegurando previsibilidade orçamentária e continuidade operacional.

Assim, a pista é projetada para operar de forma eficiente dentro de um ciclo de deterioração controlado e conhecido, de modo que seja razoável propor uma manutenção programada.

#### 3.5.1 Critérios de Manutenção Programada

Em pistas não pavimentadas ou semi-preparadas, a manutenção programada representa o principal instrumento de controle da deterioração, mostrando-se significativamente mais eficiente do que ações reativas. Quando a manutenção é desencadeada apenas após a ocorrência de um evento gatilho, geralmente isso indica a presença de danos mais avançados, cujo reparo tende a ser mais complexo, oneroso e com maior impacto operacional. Por outro lado, intervenções rotineiras realizadas antes do surgimento desses eventos são mais simples, menos custosas e preservam melhor a integridade da superfície. Assim, é fundamental estabelecer critérios objetivos que orientem a frequência e o tipo de intervenção, considerando tanto a relação custo-benefício quanto os requisitos de segurança

operacional.

A título de exemplo, a Tabela 3.4 sugere uma diretriz conceitual de frequência das manutenções conforme o tipo de pista e as condições operacionais.

TABELA 3.4 – Frequência recomendada de manutenção conforme o tipo de pista e o uso.

<b>Tipo de pista</b>	<b>Manutenção rotineira</b>	<b>Manutenção periódica</b>
Baixo tráfego (aviões leves)	A cada 3–6 meses	A cada 2–3 anos
Tráfego moderado (regionais)	A cada 1–3 meses	Anualmente
Tráfego intenso (operações regulares)	Mensal	A cada 6–12 meses

A manutenção rotineira consiste, em geral, na realização de inspeções visuais regulares para identificar defeitos pontuais na superfície, seguidas dos reparos necessários para evitar sua evolução. Já a manutenção periódica envolve uma avaliação mais aprofundada das condições estruturais e funcionais da pista, incluindo ensaios *in situ*, como DCP ou CBR, para verificar a capacidade de suporte, bem como medições de irregularidade longitudinal e outras características relevantes ao desempenho operacional.

### 3.5.2 Critérios de Reabilitação e Fim de Ciclo

A necessidade de reabilitação deve ser avaliada quando:

- A perda acumulada de material exceder o limite admissível (por exemplo, 25% da espessura original do revestimento).
- O índice de irregularidade (RRI) ultrapassar o valor crítico definido em projeto.
- O atrito (IFI) atingir níveis inferiores ao conceito “Ruim” ( $F_{60} < 0,12$ ).
- O subleito apresentar sinais de saturação ou recalques diferenciais significativos.
- Os custos de manutenção se tornarem superiores ao custo de reabilitação.

Quando atingidos esses limites, deve ser executada uma intervenção de maior porte, podendo incluir:

- substituição total ou parcial da camada de revestimento;
- correção da drenagem e do perfil transversal;
- estabilização do material superficial com aglutinantes (cimento, cal ou polímeros) para aumento da durabilidade.

### 3.5.3 Critério Econômico e de Sustentabilidade

A aplicação da *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) fornece um critério racional para comparar estratégias de manutenção e reabilitação, considerando o custo total de propriedade da pista ao longo do tempo. Devem ser computados:

- custos diretos da agência (mão de obra, combustível, maquinário e materiais);
- custos indiretos (interrupção temporária de operações e impacto logístico);
- custos dos usuários (maior desgaste das aeronaves, tempo adicional de operação, riscos de segurança).

A estratégia ótima é aquela que mantém a pista dentro dos níveis aceitáveis de desempenho (RRI, IFI, espessura mínima de revestimento) ao menor custo total no período de análise.

# 4 Critérios de Avaliação

Para uma dada pista semi-preparada já existente, discute-se os critérios de avaliação que a pista deve atender para que a operação segura da pista seja possível, além de propor técnicas para que o nível mínimo seja atingido nos casos em que a avaliação tiver resultados não satisfatórios.

## 4.1 Critérios de Avaliação Estrutural

Para a verificação da condição estrutural adequada para suportar o tráfego previsto sem risco de falha estrutural, manter regularidade e atrito dentro de limites aceitáveis para a aeronave crítica e garantir disponibilidade operacional com manutenção previsível, recomenda-se os seguintes critérios:

### 1. Inspeção visual diária / pré-operação

- Verificar painelas, corrugações, trilhas de roda, material solto e pontos de erosão.
- **Gatilhos imediatos:** presença de painelas com profundidade  $> 50$  mm em trecho contínuo  $> 5$  m; camada solta contínua  $> 10$  mm em trilha de rolamento  $\Rightarrow$  patrolamento ou isolamento do trecho.

### 2. Profundidade de trilha de roda (*rut depth*)

- Medir em pontos amostrais ao longo das faixas de operação.
- **Critério sugerido:**
  - $Rut\ depth \leq 25$  mm — condição preferencial (sem ação imediata);
  - $25\ mm < Rut\ depth \leq 50$  mm — programar manutenção corretiva (patrolamento + reposição);
  - $Rut\ depth > 75$  mm — considerar interdição parcial/total até reparo estrutural.

### 3. Capacidade de suporte (CBR e DCP)

- Executar ensaios CBR em pontos representativos ou realizar campanha DCP com correlação para CBR.
- **Critério sugerido:** adotar o CBR mínimo de projeto (ex.:  $CBR_{\min} = 16$  para aeronave crítica C-105 equivalente). Para operações menos críticas,  $CBR_{\min} = 10$  pode ser aceitável; entretanto, quando aeronaves médias/pesadas estiverem presentes, priorizar  $CBR \geq 15-20$ .
- Quando se utiliza DCP, empregar a correlação:

$$CBR \approx \frac{292}{(DCP)^{1,12}}$$

e validar localmente.

#### 4. Espessuras e perda de material

- Medir espessura de revestimento superficial em pontos críticos; se perda acumulada de espessura exceder 25% do valor projetado, programar recascalhamento.

## 4.2 Critérios para Avaliação de Drenagem

A fim de se assegurar que o sistema de drenagem superficial e subsuperficial está apto para proteger o subleito da saturação e minimizar erosões que comprometam a função estrutural e a segurança operacional, recomenda-se os seguintes critérios e inspeções:

### 1. Formação de poças:

- Inspeccionar após precipitação.  
**Critério:** Não devem existir poças persistentes na faixa de rolamento; poças que não forem drenadas em até 30 minutos após o término da precipitação requerem ação corretiva imediata, no sentido de reestabelecer a capacidade de drenagem naquele ponto.

### 2. Coroamento (abaulamento):

- Medir declividade transversal em pontos amostrais.  
**Critério de projeto:** Coroamento entre 4% e 6%. Valores menores que 3% indicam risco de escoamento insuficiente e requerem correção; valores maiores que 7% podem indicar deformidade na pista e requerem uma investigação mais detalhada.

### 3. Valetas e dispositivos laterais:

- Verificar capacidade, obstruções e proteção contra erosão.  
**Critério:** Valetas livres e com revestimento íntegro; dimensionamento capaz de escoar chuva de projeto.

#### 4. Drenagem subsuperficial / lençol freático:

- Monitorar níveis em piezômetros rasos ou pontos de umidade.  
**Critério:** teor de umidade que leve a redução do CBR efetivo abaixo do  $CBR_{\min}$   
→ implementar drenos, colchão drenante ou elevar plataforma.

#### 5. Erosão e estabilidade:

- Detectar perda de seção em bordas, taludes e pontos de descarga.  
**Critério:** perda de seção detectável ou talude com movimentos requer intervenção de estabilização (*rip-rap*, geotêxtil, revegetação).

Por fim, vale ressaltar que todos os limiares e critérios numéricos são sugestões iniciais que se aplicam à pista sugerida como exemplo no Capítulo 3; recomenda-se calibrá-los com base em dados locais (ensaios DCP/CBR, histórico operacional e pluviométrico) e adaptar ao tipo de aeronave crítica que utilizará a pista.

## 4.3 Critérios para Avaliação da Superfície da Pista

A superfície da pista é o elemento funcional mais sensível e dinâmico de uma infraestrutura semi-preparada. Ela concentra as solicitações diretas do tráfego e dos agentes climáticos, sendo o primeiro indicador da condição operacional da pista.

### 4.3.1 Texturas e Irregularidade

Conforme discutido no Capítulo 2, dentre as escalas de textura aplicáveis a pavimentos, para pistas de pouso *não pavimentadas* ou *semi-preparadas*, a variável mais relevante é a **irregularidade** longitudinal da superfície. As demais escalas — macrotextura e microtextura — são de aplicabilidade limitada neste contexto devido à natureza solta e heterogênea dos solos e à inviabilidade de medição direta por métodos convencionais.

Dessa forma, adota-se o **Runway Roughness Index (RRI)** como índice de referência para a avaliação funcional da superfície, com os seguintes critérios de medição e avaliação em campo:

- **Inspeção visual sistemática:** registro padronizado de ondulações, trilhas de roda, segregação de finos e erosões, especialmente após chuvas intensas.

- **Avaliação subjetiva (PSR):** formulário de relato dos pilotos, com escala de 1 a 5 para conforto e regularidade percebida.
- **Medição simplificada:** uso de acelerômetros portáteis ou sensores de smartphone para estimar o BBI; calibração periódica para permitir comparabilidade temporal.

Em pistas não pavimentadas, o controle da irregularidade constitui um dos parâmetros mais relevantes para garantir a segurança operacional e o desempenho da infraestrutura, pois além de atuar no conforto e na segurança, auxilia na drenagem, prevenindo problemas mais sérios relacionados ao excesso de umidade.

O índice RRI pode ser adotado como principal indicador funcional, pois integra medições físicas, representadas pelo BBI, e percepções operacionais, obtidas por meio do PSR, fornecendo uma visão suficientemente abrangente da condição da superfície. Além disso, métodos híbridos e de baixo custo — como o uso de aplicativos que utilizam o próprio acelerômetro de smartphones — representam alternativas viáveis para o acompanhamento contínuo da condição da superfície, permitindo maior frequência de monitoramento e tomada de decisão mais ágil.

### 4.3.2 Atrito

O atrito é um critério de segurança essencial, determinando a aderência entre pneu e superfície e, portanto, a capacidade de frenagem e controle direcional da aeronave. Mesmo em pistas semi-preparadas, o conceito de **Índice de Atrito Internacional (IFI)** é útil para estabelecer padrões mínimos.

Recomenda-se classificar o atrito conforme o parâmetro  $F_{60}$ , que corresponde ao coeficiente de atrito corrigido para 60 km/h, conforme Tabela 3.3.

Em pistas semi-preparadas, o atrito deve ser acompanhado por:

- Inspeções visuais (detecção de lama, finos soltos e zonas encharcadas);
- Observações operacionais dos pilotos (dificuldade de frenagem ou perda de controle);
- Ensaios pontuais com equipamentos simplificados (por exemplo, tração controlada de roda livre).

### 4.3.3 Gerenciamento de Poeira e Granulometria

O controle da poeira é fundamental tanto para a segurança (visibilidade e ingestão de partículas pelas aeronaves) quanto para a conservação da pista (FHWA, 2008; FHWA-CFL, 2013).

Os principais critérios de aceitação são:

- **Teor de finos (P#200):** entre 8% e 15%; valores abaixo reduzem coesão e acima favorecem formação de lama ou poeira.
- **Índice de Plasticidade (PI):** inferior a 12 para evitar instabilidade e alta sensibilidade à umidade.
- **Compactação:** pelo menos 95% da densidade máxima obtida no ensaio Proctor Normal.
- **Coefficiente de Granulometria (Gc):** 15–35.

O controle de poeira deve priorizar medidas preventivas:

- **Operacionais:** limitação de velocidade pode não ser viável no contexto de uma pista de pouso pois a operação das aeronaves requer velocidades mínimos, por isso deve-se adotar limpeza regular e patrolamento recorrente, bem como manter o controle de umidade enquanto aeronaves estiverem em operação na pista.
- **Mecânicas:** recompactação e reposição de material com granulometria adequada.
- **Químicas (pontuais):** uso de ligantes como lignosulfonatos ou sais higroscópicos como manutenção preventiva.

## 4.4 Critérios para o Ciclo de Vida

A avaliação do ciclo de vida da pista visa garantir desempenho previsível, manutenção planejada e custo operacional mínimo. Para pistas semi-preparadas, o ciclo de vida é fortemente influenciado pela qualidade inicial de construção e pela regularidade da manutenção.

### 4.4.1 Planejamento de Manutenção

A manutenção programada é o instrumento principal para prolongar o ciclo de vida útil:

- **Rotineira:** patrolamento e limpeza de drenagem — intervalos de 1 a 3 meses conforme o tráfego.
- **Periódica:** rescascalhamento e recompactação — a cada 1 a 3 anos ou quando atingidos os limites de RRI ou perda de material.

- **Reabilitação:** substituição parcial ou total do revestimento quando o custo de manutenção superar o custo de reabilitação.

#### 4.4.2 Critério Econômico e Sustentabilidade

A aplicação da *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) é recomendada para definir a estratégia ótima de manutenção e reabilitação. Devem ser considerados:

- Custos diretos de manutenção e materiais;
- Impactos sobre a disponibilidade operacional da pista;
- Custos indiretos aos usuários (desgaste das aeronaves, riscos operacionais, atrasos);
- Impactos ambientais e sustentabilidade das soluções adotadas.

A estratégia de menor custo global é aquela que mantém a pista dentro dos níveis aceitáveis de desempenho (RRI, IFI, espessura e drenagem) com mínima frequência de intervenção, assegurando tanto a segurança quanto a viabilidade econômica e ambiental.

## 5 Conclusão

Este trabalho apresentou uma metodologia prática e adaptada para a definição de critérios de projeto, avaliação e manutenção de pistas semi-preparadas, com ênfase na realidade brasileira — em particular para regiões remotas e de fronteira onde a pavimentação total é economicamente inviável. A metodologia integrou parâmetros geotécnicos (suporte do subleito, ensaios CBR/DCP/LWD), parâmetros funcionais (irregularidade — RRI/BBI, atrito — IFI) e critérios operacionais (gestão de drenagem, controle de poeira e plano de manutenção).

A aplicação numérica foi ilustrada por uma pista-exemplo e por um mix operacional coerente com a experiência regional (C-105/C-95/C-98 e aeronaves leves). A partir das equações empíricas adotadas, obteve-se um CBR mínimo de projeto do subleito na ordem de 16 (condição soaked) para a aeronave crítica e vida de projeto de 5 anos; esse valor serviu de referência para propor intervenções estruturais quando o subleito real apresentar resistência inferior (por exemplo, inclusão de sub-base, estabilização química ou substituição do material).

Os critérios propostos priorizam ações preventivas e de baixo custo logístico, compatíveis com cenários de Engenharia de Campanha. Um projeto geométrico que assegure drenagem eficiente (coroamento de 4–6% e valetas laterais), aliado à seleção criteriosa dos materiais de rolamento (teor de finos controlado, índices granulométricos dentro de faixas orientativas e compactação superior a 95% do Proctor), constitui a base para reduzir a variabilidade da pista ao longo do tempo. Do ponto de vista operacional, medidas rotineiras como patrolamento, limpeza de drenos e rescascalhamento periódico devem ser guiadas por limites de alerta estabelecidos a partir de indicadores funcionais (RRI e IFI), permitindo intervenções direcionadas e de baixo impacto logístico.

As equações empíricas e modelos adotados foram destacados como ferramentas úteis para dimensionamento preliminar e planejamento; entretanto, enfatiza-se que sua aplicação prática exige calibração local por meio de campanhas de ensaios (CBR soaked, DCP, Proctor, Atterberg, granulometria) e monitoramento de desempenho para reduzir incertezas e ajustar parâmetros (coeficientes empíricos, limites de RRI/IFI, frequência de manutenção).

Como perspectiva para trabalhos futuros, destaca-se a necessidade de aplicação prática da metodologia em pistas reais, permitindo validar os critérios propostos e aprimorar os modelos de projeto, avaliação e manutenção à luz de dados observacionais.

Finalmente, a metodologia proposta fornece um arcabouço técnico aplicável para projetar, avaliar e manter pistas semi-preparadas com foco na segurança operacional e na otimização de recursos. Quando aplicada com campanhas locais de investigação e monitoramento, permite decisões técnicas robustas que viabilizam operações seguras em contextos remotos, contribuindo para a missão de “fazer voar e pousar em segurança”.

# Referências

ANAC. **Emenda ao RBAC nº 153: Operação, manutenção e resposta à emergência em aeródromos**: Consulta pública nº 03/cp/07/2022. Brasília, 2022. Minuta de Emenda ao RBAC 153.

ANAC. **Instrução Suplementar IS nº 153.205-001: Monitoramento da irregularidade longitudinal, atrito e macrotextura do pavimento da pista de pouso e decolagem**: Revisão c. Brasília, 2022. Aprovação por Portaria SIA, 2022.

ANAC. **Manual para o Cálculo de PCR de Pavimentos Aeroportuários**. Brasília, 2022. Elaborado por Giovano Palma, Fábio Lopes Magalhães, Lucas Bernardino Travagin, Lucius de Albuquerque Prado e equipe técnica. Publicação institucional.

ANAC. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil RBAC nº 154: Projeto de Aeródromos**: Emenda nº 08. Brasília, 2024. Resolução nº 751, de 10 jul. 2024.

ANAC. **Manual de Avaliação da Capacidade de Suporte de Áreas Não Pavimentadas por Meio do Software PCASE**. Brasília, aug 2025. Elaborado por Giovano Palma, Eduardo Henn Bernardi, Rafael Ribeiro Rocha, Lucius de Albuquerque Prado e equipe técnica. Publicação institucional.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E965-96: Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. West Conshohocken, PA, 1996. Reprinted from Annual Book of ASTM Standards. Originally published as E965-83. Last previous edition: E965-87(1995)e1. Available at: <https://www.astm.org/e0965-96.html>. Accessed on: 2025-11-17.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E1960-98: Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface**. West Conshohocken, PA, 1999. Reimpressa do *Annual Book of ASTM Standards*. Aprovação: 10 jul. 1998.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6951/D6951M-09(2015): Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications**. West Conshohocken, PA, 2015. Reapproved Standard. DOI: 10.1520/D6951\_D6951M-09R15. Available at: [https://www.astm.org/d6951\\_d6951m-09r15.html](https://www.astm.org/d6951_d6951m-09r15.html). Accessed on: 2025-11-17.

BAIA, M. V. M.; SOUZA, E. S.; ALMEIDA, D. J.; CAMPELO, N. d. S. Classificação de solos tropicais oriundos da região metropolitana de manaus, com a utilização da metodologia g-mct. *In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e*

**Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG) / IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas / IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens / VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens. Proceedings [...].** Campinas, SP: [s.n.], 2020. p. –.

COMAER. **ICA 100-12: Manual de Engenharia de Aeródromos.** Brasília, DF, 2017. Publicada pela Portaria DECEA nº 86/DGCEA, de 10 nov. 2017. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/>. Acesso em: 2 nov. 2025. Available at: <https://publicacoes.decea.mil.br/>. Accessed on: 2025-11-02.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **Manual de Campanha EB70-MC-10.350: Brigada de Infantaria de Selva.** Brasília, DF, 2023. Aprovado pela Portaria COTER/C Ex nº 341, de 11 out. 2023. Publicado no Boletim do Exército nº 44, de 1 nov. 2023.

FAB. **KC-390 é testado em pista de cascalho.** s.d. Notícia institucional sobre testes do KC-390 em pista de cascalho, realizada na pista não pavimentada de Gavião Peixoto (GPX), Embraer. Available at: <https://forcaaerea.com.br/video-kc-390-e-testado-em-pista-de-cascalho/>. Accessed on: 18 nov. 2025.

FERNANDES, R. **Desenvolvimento de correlação entre os ensaios DCP e CBR: estudo de caso na pista de testes da UFSC–Joinville.** 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC), Joinville, 2015. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Heidemann.

FHWA. **Managing Dust on Unpaved Roads and Airports.** Washington, DC, 2008. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/>. Acesso em: 18 nov. 2025.

FHWA-CFL. **Unpaved Road Dust Management: A Successful Practitioner’s Handbook.** Lakewood, CO, 2013. Relatório técnico FHWA-CFL/TD-13-001. Disponível em: <http://www.cflhd.gov>. Acesso em: 18 nov. 2025.

FILHO, C. I. F. B.; OLIVEIRA, F. H. L. d. Análise da correlação entre a macrotextura e o coeficiente de atrito em pavimentos aeroportuários. **Anais da Universidade de Fortaleza – Centro de Ciências Tecnológicas**, Fortaleza, p. 1–15, trabalho acadêmico disponibilizado pela UNIFOR., 2014.

GUO, P.; CHONG, X.; WANG, Z. Research on a simplified estimation method for wheel rolling resistance on unpaved runways. **Applied Sciences**, MDPI, Basel, v. 15, p. 6566, 2025. Available at: <https://doi.org/10.3390/app15126566>. Accessed on: 2025-11-17.

MANZATTO, C. V.; JUNIOR, E. d. F.; PERES, J. R. R. **Uso agrícola dos solos brasileiros.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 174 p. Available at: [http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/pdfs/uso\\_agricola\\_solos\\_brasileiros.pdf](http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/pdfs/uso_agricola_solos_brasileiros.pdf). Accessed on: 2025-11-17.

MERIGHI, L.; PEREIRA, C.; SCHIAVON, J. Evaluation of longitudinal irregularity in airport pavements and unpaved runway. *In: Proceedings of the Second International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Constructed Infrastructure Facilities. Proceedings [...].* Basel: MDPI, 2023. (Engineering Proceedings, v. 36), p. 64. Available at: <https://doi.org/10.3390/engproc2023036064>.

MORRIS, G. J.; STICKLE, J. W. **Response of a Light Airplane to Roughness of Unpaved Runways**. Washington, D.C., set. 1960. Langley Research Center. Digitalizado por Google Books. Available at: [https://books.google.com/books?id=3s2h\\_ingnmQC](https://books.google.com/books?id=3s2h_ingnmQC). Accessed on: 2025-11-17.

PATERSON, W. D. O. **Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management**. Washington, DC: World Bank, 1987. (World Bank Technical Paper, v. 2).

RODRIGUES, R. M. **Engenharia de Pavimentos: Parte I — Estrutura e Dimensionamento**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 2022. Material didático.

RODRIGUES, R. M. **Engenharia de Pavimentos: Parte II — Gerência de Pavimentos**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 2022. Material didático.

RODRIGUES, R. M. **MATERIAL DIDÁTICO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS - Avaliação de Pavimentos: Condição Funcional e Estrutural**. Brasil, 2022. Apostila técnica.

RODRIGUES, R. M. **MATERIAL DIDÁTICO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS - Conceitos Gerais de Engenharia de Pavimentos**. Brasil, 2022. Apostila técnica.

RODRIGUES, T. N.; LUCENA, A. E. d. F. L.; GUERRA, T. D.; SILVÉRIO, L. C.; GUEDES, S. B. Estudo comparativo do cbr “in situ” & lwd para determinação da capacidade de suporte de subleitos. **Anuário do Instituto de Geociências**, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ), Rio de Janeiro, v. 44, p. 35022, 2021. Available at: [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2021\\_44\\_35022](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_35022). Accessed on: 2025-11-17.

USACE. **Manual para o Cálculo de PCR de Pavimentos**. Washington, D.C., 2013. Documento técnico institucional.

USACE. **PCASE 7.0.7 User Guide**. Washington, D.C., 2024. Versão 7.0.7, dezembro de 2024.

USACE. **PCASE Installation and Configuration Guide**. Washington, D.C., jan. 2025. Guia de instalação e configuração do PCASE 7.0.x.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 24 de novembro de 2025	3. REGISTRO Nº DCTA/ITA/TC-133/2025	4. Nº DE PÁGINAS 75
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Critérios de Projeto e Manutenção de Pistas de Pouso Semi-Preparadas no Contexto Brasileiro.			
6. AUTOR(ES): <b>Roberto Afonso Gonçalves Nascimento</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Pista de Pouso; Semi-Preparada; Não Pavimentada; Critperios; Projeto; Avaliação; Manutenção; Revisão Bibliográfica			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Pistas (de pouso e decolagem); Manutenção; Pavimentos; Segurança operacional; Limite de segurança; Requisitos; Engenharia aeroportuária; Transportes.			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientadora: Profa. Dra. Cláudia Azevedo. Publicado em 2025.			
11. RESUMO: Este trabalho apresenta uma metodologia para definição de critérios de projeto, manutenção e avaliação aplicáveis a pistas de pouso semi-preparadas (ou não pavimentadas), considerando especialmente o contexto brasileiro, marcado pela baixa densidade populacional e pelo limitado desenvolvimento socioeconômico em regiões do Norte e de fronteira, onde a atuação da FAB é essencial. Nessas áreas, a escassez de aeroportos pavimentados e a baixa frequência de operações civis tornam economicamente inviável a pavimentação completa das pistas; contudo, é possível estabelecer critérios técnicos que garantam a segurança e a viabilidade operacional caso se faça necessária uma operação em tais localidades. Assim, a metodologia proposta é adaptada à realidade nacional e oferece soluções alternativas às normas convencionais, alinhando-se ao propósito de “fazer voar e fazer pousar em segurança”.			
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO			