

## AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS PCN E PCR PARA AERÓDROMOS NÃO PAVIMENTADOS

 <https://doi.org/10.56238/arev7n1-192>

**Data de submissão:** 24/12/2024

**Data de publicação:** 24/01/2025

**Kahian Sierra Nascimento Oliveira**  
Engenheiro Civil  
Instituto Federal de Goiás  
E-mail: [kahiansierra@gmail.com](mailto:kahiansierra@gmail.com)  
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2325912961666990>

**Luis Henrique Oliveira Silva**  
Engenheiro Civil  
Instituto Federal de Goiás  
E-mail: [luishenriqueos.obras@gmail.com](mailto:luishenriqueos.obras@gmail.com)  
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3520468891705303>

**Jéssica Azevedo Coelho**  
Mestre em Arquitetura e Urbanismo  
Instituto Federal de Goiás  
E-mail: [jessica.coelho@ifg.edu.br](mailto:jessica.coelho@ifg.edu.br)  
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7619220931918842>

### RESUMO

Cerca de 72% das pistas registradas no DECEA não possuem camada de revestimento, e ainda assim os métodos ACN/PCN e ACR/PCR que são parâmetros que indicam a capacidade de suporte e são obrigatórios para aeronaves com peso superior a 5700Kg, são aplicáveis apenas a aeródromos pavimentados. Considerando que existem aeronaves aptas a operar em pistas não pavimentadas que ultrapassam esse limite de peso, e dada a viabilidade econômica da construção de aeródromos não pavimentados, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a aplicação desses parâmetros em aeródromos não pavimentados. O objetivo é comparar a diferença na capacidade de suporte, nas espessuras das camadas e nos materiais utilizados, assim como o CDF obtido, para pavimentos com e sem revestimento em ambos os métodos. Para isso, foi realizada uma pesquisa aplicada experimental, em que foram selecionadas aeronaves aptas a operar em pistas não pavimentadas, e assim realizado o dimensionamento de pavimentos com e sem revestimento em um aeródromo localizado na região do vale do Jequitinhonha e do Mucuri em Minas Gerais, através dos softwares COMFAA 3.0 e FAARFIELD 2.0. Diante dos dados obtidos, verifica-se que, os valores de PCN e PCR para ambas as situações foram semelhantes para cada aeronave, com pequenas variações. Além disso, a espessura e a necessidade de utilização da sub-base são influenciadas pela presença ou ausência de revestimento, assim como pelo peso da aeronave. A espessura da camada de base, em sua maioria, apresentou valores próximos a 150mm, com leves variações. A possibilidade de não utilizar uma camada de revestimento, revelou ser uma estratégia eficaz para diminuir os custos de execução, garantindo a capacidade de suporte da pista, principalmente para aeronaves de pequeno porte assim como o Pilatus PC-24.

**Palavras-chave:** ACN/PCN. ACR/PCR. Pavimento. Aeródromos.

## 1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte aéreo tem uma grande importância na economia e logística global, possibilitando uma rápida movimentação de cargas e pessoas em longas distâncias. Para atender essa crescente demanda, é fundamental que os aeroportos tenham uma infraestrutura adequada, tanto para a aviação comercial quanto para a executiva (RENZETTI, 2018).

Em relação a infraestrutura aeroportuária, o Manual de Projetos Aeroportuários de 2021, define que toda área estabelecida para chegada, partida e movimentação de aeronaves, seja em terra ou água é determinada como aeródromo, que pode ser classificado conforme seu tipo de uso, podendo ser: civil, militar, privado ou público. Um aeroporto é um tipo de aeródromo, classificado como público, que possui edificações, instalações e equipamentos que fornecem suporte seja no embarque e desembarque de pessoas ou na manipulação de cargas (MINFRA, 2021).

A estrutura física de um aeroporto é dividida em duas partes: o Lado Ar e o Lado Terra. O Lado Terra é a área pública em que não há acesso controlado, como o estacionamento de veículos e toda a parte do Terminal de Passageiros (TPS) anterior à inspeção de segurança. Já o Lado Ar corresponde à área operacional de acesso controlado, na qual encontramos diversos elementos, como as Pistas de Táxi, o Pátio de Aeronaves, a Seção Contra Incêndio (SCI) e o Parque de Abastecimento de Aeronaves (PAA). No entanto, o destaque dessa área é a Pista de Pouso e Decolagem (PPD), local onde ocorrem as principais movimentações das aeronaves (MINFRA, 2021).

Para que uma Pista de Pouso e Decolagem (PPD) possa ser utilizada, é necessário atender a diversas normas estabelecidas por órgãos reguladores, como a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o Departamento de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (DECEA) e a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI ou ICAO). Essas normas incluem requisitos relacionados ao comprimento e largura da pista, ao zoneamento de segurança, e sobretudo, à resistência do pavimento (MINFRA, 2021).

A partir do ano de 1936, as aeronaves começaram a ter dimensões e pesos cada vez maiores, devido à proximidade da segunda Guerra Mundial, o que acabou exigindo camadas de revestimento mais reforçadas nas pistas, aumentando os estudos e a implantação de novas tecnologias de dimensionamento. A partir do momento em que os acidentes começaram a ocorrer com mais frequência devido a falhas nas pistas, o United States Army Corps of Engineers (USACE) dedicou-se a desenvolver sistemas formalizados que abordavam a resistência em relação à espessura de cada pavimento, entre as décadas de 1950 e 1970 (CAVA, 2021).

Ao mesmo tempo que alguns pavimentos operavam com cargas consideravelmente altas, outros já acomodavam aeronaves pequenas, com um fator de carga menor, o que exigiu a criação de um padrão de classificação que informasse a resistência do pavimento de aeródromos (CAVA, 2021).

Assim, em 1981 entrou em vigor o método ACN (*Aircraft Classification Number*) e PCN (*Pavement Classification Number*), que indicam a resistência das Pistas de Pouso e Decolagem (PPD) pavimentadas e são abordados em todos os países, mantendo uma linguagem padrão da aviação estipulados pela ICAO. Enquanto o ACN está diretamente ligado às aeronaves e serve para classificá-las de acordo com os efeitos que são transmitidos para a pista, o PCN relaciona-se ao pavimento e apresenta valores de resistência para uma determinada lista de aeronaves (ANAC, 2020).

Entretanto, esse método foi desenvolvido a mais de 40 anos, o que torna os resultados ultrapassados devido ao avanço tecnológico nessa área. Perante isso, a ICAO iniciou diversos estudos para introduzir novos parâmetros para o dimensionamento de pistas. Dessa forma, surgiu o método ACR (*Aircraft Classification Rating*) e PCR (*Pavement Classification Rating*), que foi promulgado pelo conselho da ICAO, em julho de 2020, através da emenda 15 anexo 14 da carta estadual AN 4/1.2.28-20/35 (FABRE, 2020), que estará em vigor simultaneamente com o ACN/PCN até novembro de 2024, após essa data, apenas o novo método poderá ser utilizado (ANAC, 2022).

No entanto, esses métodos são restritos apenas aos aeródromos com pistas pavimentadas e não abordam a determinação da resistência de pistas sem revestimento. É importante ressaltar que existem aeronaves capazes de operar nesse tipo de aeródromo, mas que excedem a carga limite estabelecida, elevando os riscos aos operadores e aumentando a possibilidade de danos às aeronaves. Além disso, as pistas de terra não pavimentadas apresentam custos menores de construção e manutenção se comparadas às pavimentadas. É nesse contexto que esse trabalho surge como uma possível solução para estudar o dimensionamento adequado de pistas não pavimentadas, a fim de estabelecer os parâmetros de resistência necessários para atender às exigências de novas aeronaves (ANAC, 2021).

Para isso, foi realizada uma pesquisa aplicada em um aeroporto localizado na região do vale do Jequitinhonha e do Mucuri em Minas Gerais, em que através da melhoria do solo, foi avaliado o dimensionamento do pavimento de novos aeródromos sem a necessidade da camada de revestimento, para a operação de aeronaves que possuem tecnologia suficiente para uma operação segura nesse tipo de pista.

## 2 METODOLOGIA

Esse estudo se classifica como uma pesquisa aplicada, pois tem como objetivo ampliar os conhecimentos já desenvolvidos a fim de solucionar problemas práticos. Para isso, o pavimento foi

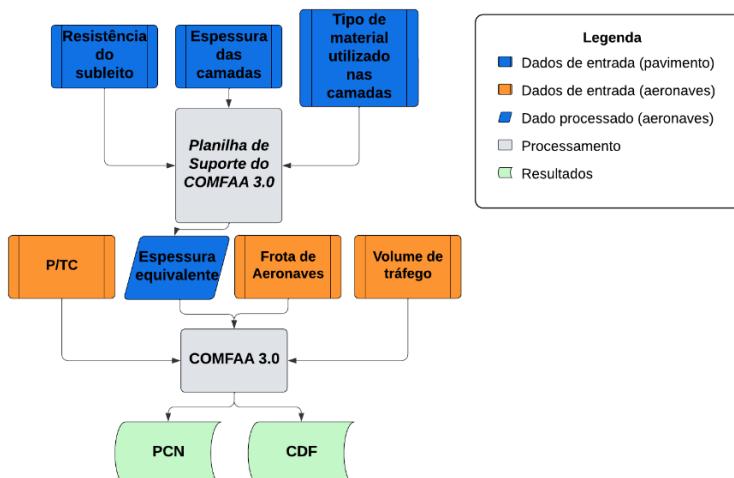
analisado com e sem a camada de revestimento, comparando as suas respectivas capacidades de suporte em relação a carga das aeronaves de projeto. Dessa forma, a pesquisa é considerada experimental devido aos procedimentos técnicos adotados, nos quais um objeto de estudo foi definido e seu comportamento foi avaliado em função do impacto gerado pelas variáveis (GIL, 2002).

Para a concretização do objetivo da pesquisa, estabeleceu-se como procedimentos metodológicos algumas etapas, sendo: (i) realização da revisão bibliográfica, com o foco em entender como as variáveis influenciam no dimensionamento do pavimento; (ii) programa experimental com a coleta das amostras de solo em uma região do Vale do Jequitinhonha e do Mucuri, em Minas Gerais; (iii) interpretação e organização dos dados dos ensaios de caracterização e compactação do solo, que foram fornecidos pela empresa contratada para a execução do aeroporto. Isso permitiu determinar o método de estabilização de solos mais apropriado, quando necessário; (iv) determinação das aeronaves de projeto e seu respectivo volume de tráfego. Em seguida, foi realizado o processamento computacional dos dados do pavimento com e sem revestimento nos softwares COMFAA 3.0 para a determinação do PCN e no FAARFIELD 2.0 para a definição do PCR. Dessa forma, os resultados obtidos foram comparados em termos de capacidade de suporte, espessura das camadas, CDF atingido, materiais utilizados e preço de execução do metro quadrado.

## 2.1 DIMENSIONAMENTO DO PCN UTILIZANDO O COMFAA 3.0

Para calcular o valor numérico do PCN, foi utilizado o COMFAA 3.0 juntamente com a sua Planilha de Suporte, seguindo o processo ilustrado no fluxograma da Figura 1 (ANAC, 2020).

Figura 1 - Fluxograma com o procedimento a ser realizado no COMFAA 3.0



Fonte: Autoria própria, 2023.

Esse procedimento consistiu na determinação de uma espessura equivalente com base nos dados do pavimento através da Planilha de Suporte do COMFAA 3.0. Porém, é importante ressaltar que diferente dos modelos de dimensionamentos atuais que consideram o Módulo de elasticidade dos materiais, o método ACN-PCN se baseia apenas no CBR do subleito e correlaciona os materiais que compõem a estrutura do pavimento com os materiais padrões do software.

Essa abordagem pode gerar possíveis inconsistências, já que não existe a possibilidade de personalizar as características dos materiais que constituem as camadas. Por conta disso, o método não permite analisar o comportamento das misturas ensaiadas para a base. Em virtude dessas limitações, a avaliação ficou restrita aos pavimentos com e sem revestimento para cada aeronave, sem a variação das misturas.

Para a obtenção da espessura equivalente, foi montada a estrutura do pavimento na Planilha de Suporte, em que para a camada de base, foi utilizado o material P-213 determinado como *Sand-Clay Base Course*, ou mistura de areia e argila, uma vez que as misturas ensaiadas tiveram seus parâmetros baseados nesse material, conforme os requisitos descritos pela AC 150/5370-10H.

No entanto, a Planilha de Suporte não permite a utilização direta desse material, exigindo a realização de correlações com materiais disponíveis na interface. Para realizar esse processo, o software disponibiliza uma planilha com valores de conversão, conforme indicado na tabela 1.

Tabela 1: Informações para conversão de materiais

Item estrutural	Descrição	Faixa de conversão para P-209	Fator de conversão recomendado para P-209	Faixa de conversão para P-209	Fator de conversão recomendado para P-209
P-501	Concreto de Cimento Portland	-	-	-	-
P-401/P-403	Mistura Asfáltica Quente	1.2 a 1.6	1.6	1.7 a 2.3	2.3
P-306	Concreto Magro	1.2 a 1.6	1.2	1.6 a 2.3	1.6
P-304	Base de agregado tratada com cimento	1.2 a 1.6	1.2	1.6 a 2.3	1.6
P-213	Areia e argila	-	-	-	-
P-220	Caliche	-	-	-	-
P-209	Agregado britado	1.0	1.0	1.2 a 1.6	1.4
P-208	Agregado	1.0	1.0	1.0 a 1.5	1.2
P-211	Pedra de Cal	1.0	1.0	1.0 a 1.5	1.2
P-301	Solo Cimento	n/a	-	1.0 a 1.5	1.2
P-154	Agregado não britado	n/a	-	1.0	1.0

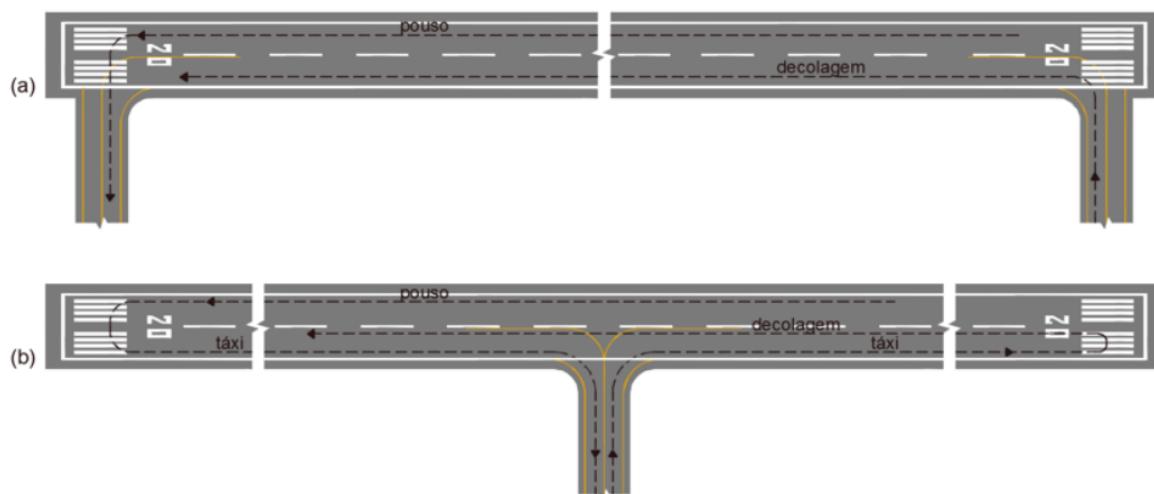
Fonte: Adaptada de FAA, 2022.

No entanto, vale ressaltar que os valores correspondentes ao material Sand-Clay não foram fornecidos. Diante disso, optou-se por considerar o valor de conversão como 1, fundamentado na natureza predominantemente argilosa das misturas. Essa escolha se justifica pelo fato de que o parâmetro de conversão varia entre 1 e 2.3, sendo que valores mais próximos de 1 indicam materiais mais granulares.

Após a definição das camadas que integram a estrutura do pavimento, foram calculadas as espessuras equivalentes para cada situação através da Planilha de Suporte. Esse parâmetro, juntamente com o CBR do subleito, foi então introduzido no COMFAA 3.0.

Em seguida, cada aeronave do estudo foi incorporada ao software, juntamente com a movimentação previamente definida para cada uma. Além disso, foi considerado um valor de 2 para a variável P/TC, refletindo a configuração da pista conforme ilustrada na Figura 2. Esse aeródromo possui apenas uma pista de táxi em uma das cabeceiras, resultando em um total de duas movimentações sobre a pista durante a operação.

Figura 2 - Padrões de Taxiways que acessam a PPD



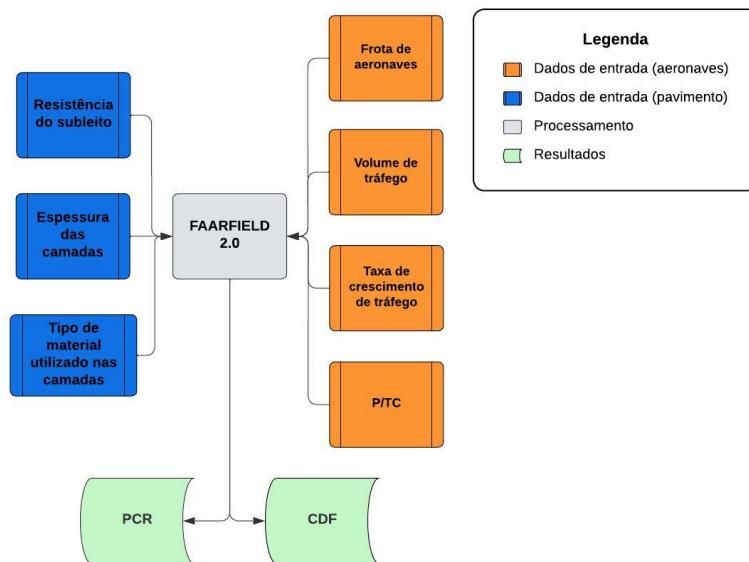
Fonte: ANAC, 2020.

Por fim, foi realizado o processamento desses dados da estrutura por meio do software, a fim de obter um PCN que atenda ao ACN das aeronaves e um CDF que esteja entre 0,15 e 1, conforme disposto pela FAA (2014).

## 2.2 DIMENSIONAMENTO DO PCR UTILIZANDO O FAARFIELD 2.0

O processo para se obter o PCR, foi realizado através do software FAARFIELD 2.0, conforme o procedimento representado no fluxograma da Figura 3 (ANAC, 2022).

Figura 3 - Fluxograma com o procedimento a ser realizado no FAARFIELD 2.0



Fonte: Autoria própria, 2023.

Primeiramente, foram definidas siglas para melhor visualização de qual amostra está em estudo, que são:

- SCSR – Sem cimento sem revestimento;
- SCCR – Sem cimento com revestimento;
- CCSR – Com cimento sem revestimento;
- CCCR – Com cimento com revestimento.

Em seguida, foi selecionado no software o tipo de pavimento *New Flexible*, já que esse modelo fornece mais liberdade para modificar a estrutura e as características da pista. Assim, foi inserido o valor do CBR do subleito adotado, que o software fez a conversão para o módulo de elasticidade utilizando a correlação da Equação 1.

$$E=10,34*CBR \quad (1)$$

Logo após, para constituir a sub-base da estrutura do pavimento, semelhantemente ao processo no COMFAA 3.0, foi utilizado o material P-154 *Uncrushed Aggregate*, ou agregado não triturado, conforme recomendado pela AC 150/5370-10H.

Já para a camada de base, foi utilizado o material personalizável *User defined*, já que esse modelo permite a inserção do CBR ensaiado, o qual é convertido em módulo de elasticidade pela correlação citada anteriormente. Essa personalização é essencial, pois é nessa camada que serão

realizadas as alterações no estudo, utilizando os dados de ensaio realizados com as misturas de solo 1 e 2.

Por fim, a camada de revestimento asfáltico é representada pelo material P-401/P-403 HMA Surface, ou agregado mineral e ligante asfáltico conforme as recomendações da AC 150/5370-10H.

Com as camadas que compõem a estrutura do pavimento já estabelecidas, foram inseridas as espessuras mínimas para cada uma delas. Assim, o software reprocessa a extensão de cada camada através da opção *Thickness Design*, ou projeto de espessura, a fim de atender ao ACR da aeronave de projeto, além de aproximar o valor de CDF a 1.

Após o redimensionamento das camadas, o pavimento está devidamente dimensionado. Isso permitiu a determinação do PCR para cada uma das pistas, utilizando a opção correspondente. Como resultado, o código final foi gerado, acompanhado de um relatório abrangente contendo todos os parâmetros considerados para a aeronave em questão.

### 2.3 CUSTO DE EXECUÇÃO DOS PAVIMENTOS

É fundamental avaliar o impacto financeiro das escolhas dos materiais utilizados, visto o grande volume de movimentação de terra necessário nesse tipo de obra, foi calculado o custo de execução do m<sup>3</sup> de pavimento.

## 3 RESULTADOS

Com a execução do dimensionamento utilizando os softwares COMFAA 3.0 e FAARFIELD 2.0, foi possível obter os valores de PCN e PCR necessários para cada tipo de pavimento, garantindo a conformidade com o horizonte de projeto de 20 anos e mantendo o CDF próximo de 1. Além disso, foram determinadas as espessuras das camadas para atender às operações específicas de cada aeronave.

Com base nos resultados obtidos para o pavimento com e sem camada de revestimento, foram realizadas as seguintes análises e comparações:

- a) PCN e PCR: Foi comparada a resistência do pavimento nas duas opções, ou seja, foi avaliado como a remoção do revestimento afeta a capacidade de suporte da estrutura.
- b) Espessuras das camadas: Foram analisadas as espessuras necessárias para atender a demanda de aeronaves considerada. Isso permitiu determinar em qual proporção a presença do revestimento diminui a espessura necessária para atender a mesma frota de projeto.

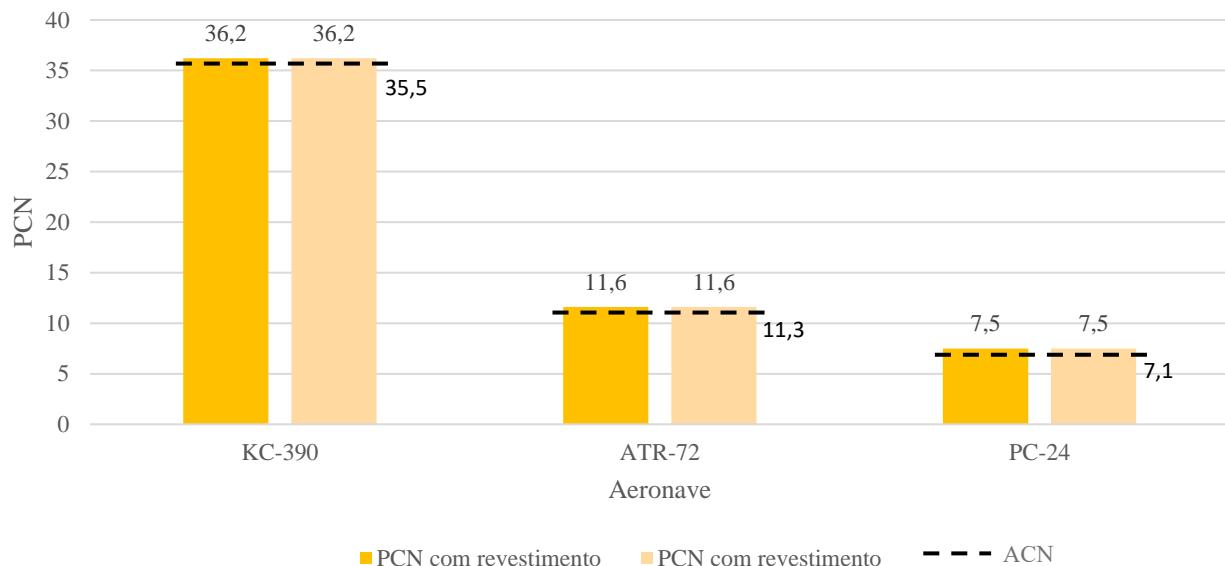
- c) Custo de execução: Foi comparado o custo de aquisição e execução para produzir 1m<sup>3</sup> de cada tipo de pavimento, através dos dados fornecidos pelas tabelas SINAPI – MG e SICRO-MG.

Dessa forma, foram obtidos os seguintes resultados detalhados por meio dos programas utilizados.

### 3.1 COMFAA 3.0

Os resultados de PCN para as situações analisadas foram obtidos através do processamento de dados no software, sendo representados nos gráficos da Figura 4.

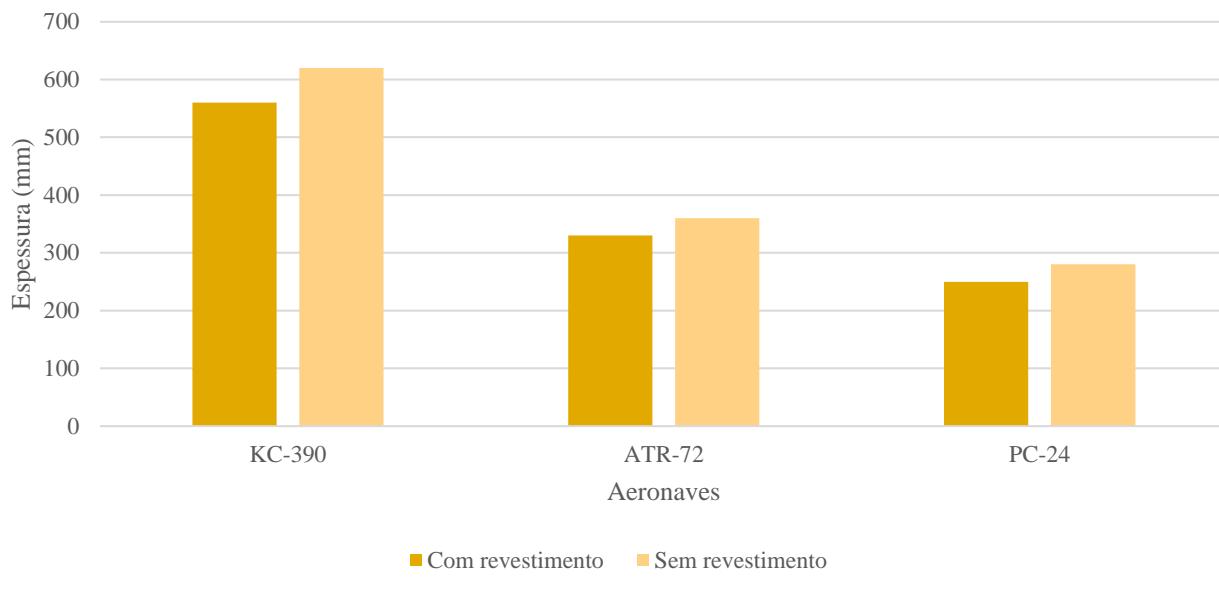
Figura 4: PCN e ACN das aeronaves



Fonte: Autoria própria, 2023.

Quanto às espessuras (Figura 5), para o KC-390, observou-se um aumento de 20mm na sub-base e de 140mm na base. Para o ATR-72, a espessura da camada de sub-base da pista não passou por alterações, se mantendo fixa no valor de 180mm, enquanto a base foi modificada, sendo necessário um acréscimo de 80mm de material na ausência de revestimento para atender ao PCN desejado. Na camada de revestimento foi necessário apenas 50mm de espessura, metade do solicitado para o KC-390.

Figura 5: Espessura final da pista para cada modelo de aeronave

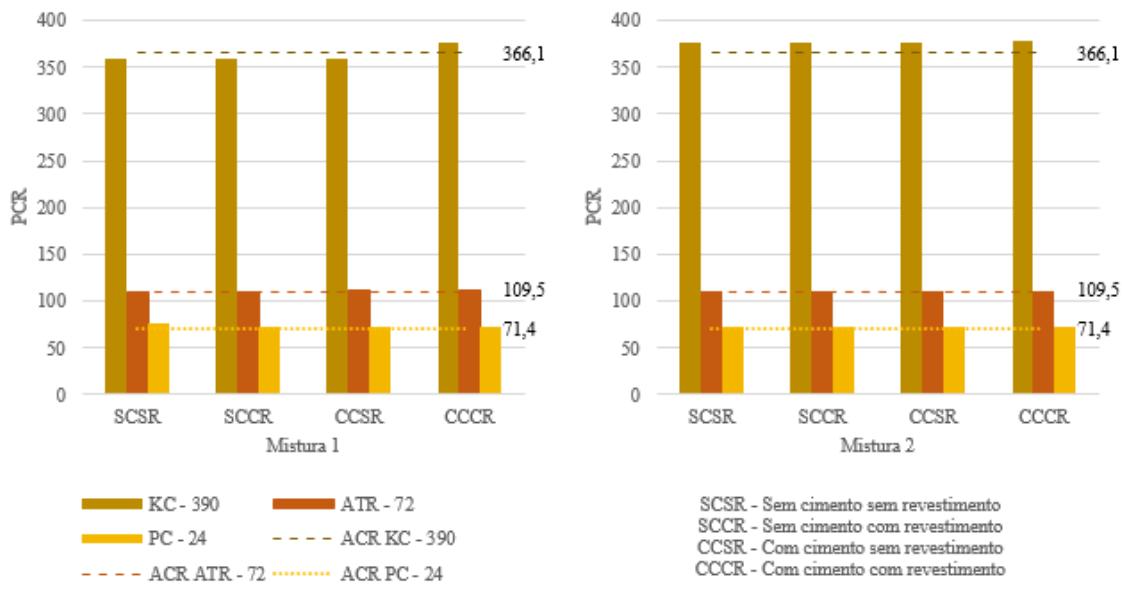


Fonte: Autoria própria, 2023.

### 3.2 FAARFIELD 2.0

Após o processamento, foram obtidos os valores de PCR para cada combinação, atendendo ao ACR de cada modelo, conforme apresentado na Figura 6 a seguir.

Figura 6: Espessura final da pista para cada modelo de aeronave



Fonte: Autoria própria, 2023.

### 3.3 CUSTO DE EXECUÇÃO DO PAVIMENTO

O custo de execução do  $m^3$  das pistas com e sem revestimento está apresentado na tabela 2, evidenciando a diferença de valores quando se tem a camada de revestimento asfáltico.

Tabela 2: Espessura final da pista para cada modelo de aeronave

Aeronaves		KC - 390		ATR - 72		PC - 24	
Valor da pista (R\$)	Com revestimento	193,22		97,55		98,33	
	Sem revestimento	12,56		7,39		5,04	
Mistura		1	2	1	2	1	2
Valor por camada (R\$)	SCSR - Sem cimento sem revestimento	10,89	18,79	6,99	15,67	6,18	8,79
	SCCR - Sem cimento com revestimento	13,61	23,93	9,67	19,76	6,32	11,35
	CCSR - Com cimento sem revestimento	193,78	193,78	142,95	146,64	143,41	148,33
	CCCR - Com cimento com revestimento	196,38	206,55	144,91	149,19	144,82	151,65

Fonte: Autoria própria, 2023.

#### 4 DISCUSSÃO

Considerando que o CBR do subleito atingiu 9,4, encontrando-se entre 8 e 13, a sua classificação é definida como média (B), enquanto a pressão dos pneus é classificada como alta (X). Assim, com os resultados de PCN obtidos por meio do método técnico (T), foram estabelecidos os códigos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Código PCN das pistas

Aeronave	Código PCN
KC-390	36/F/B/X/T
ATR-72	12/F/B/X/T
PC24	8/F/B/X/T

Fonte: Autoria própria, 2023.

Foi possível verificar que o PCN para os pavimentos com e sem revestimento obtiveram o mesmo valor. Isso acontece devido ao fato de que o único parâmetro do pavimento que o COMFAA 3.0 utiliza para o dimensionamento é a espessura equivalente. Além disso, durante esse processo, as modificações na estrutura para atender a um CDF adequado resultaram em valores iguais de espessura equivalente para ambas as situações, e consequentemente, em valores idênticos de CDF.

Dado que o módulo de resiliência do subleito registrou 97,22, situando-se entre 60 MPa e 100 MPa, sua classificação é categorizada como baixa (C), enquanto a pressão dos pneus é considerada alta (X). Portanto, com base nos resultados de PCR foram definidos os seguintes códigos calculados pelo método técnico (T), representados na tabela 4.

Tabela 4: Código PCR das pistas do estudo

Mistura	Amostra	Código PCR KC-390	Código PCR ATR-72	Código PCR PC24
1	SCSR	360/F/C/X/T	110/F/C/X/T	76/F/C/X/T

1	SCCR	360/F/C/X/T	109/F/C/X/T	73/F/C/X/T
1	CCSR	359/F/C/X/T	111/F/C/X/T	72/F/C/X/T
1	CCCR	377/F/C/X/T	112/F/C/X/T	73/F/C/X/T
2	SCSR	377/F/C/X/T	111/F/C/X/T	72/F/C/X/T
2	SCCR	377/F/C/X/T	111/F/C/X/T	73/F/C/X/T
2	CCSR	377/F/C/X/T	111/F/C/X/T	72/F/C/X/T
2	CCCR	378/F/C/X/T	111/F/C/X/T	73/F/C/X/T

Fonte: Autoria própria, 2023.

Embora não haja uma correlação matemática direta entre os resultados dos métodos ACN/PCN e ACR/PCR, nota-se que o valor do PCR é aproximadamente 10 vezes maior do que o PCN. Essa relação é evidenciada nos resultados, onde a média do PCR para cada aeronave é semelhante ao valor do PCN multiplicado por 10, conforme demonstrado na tabela 5.

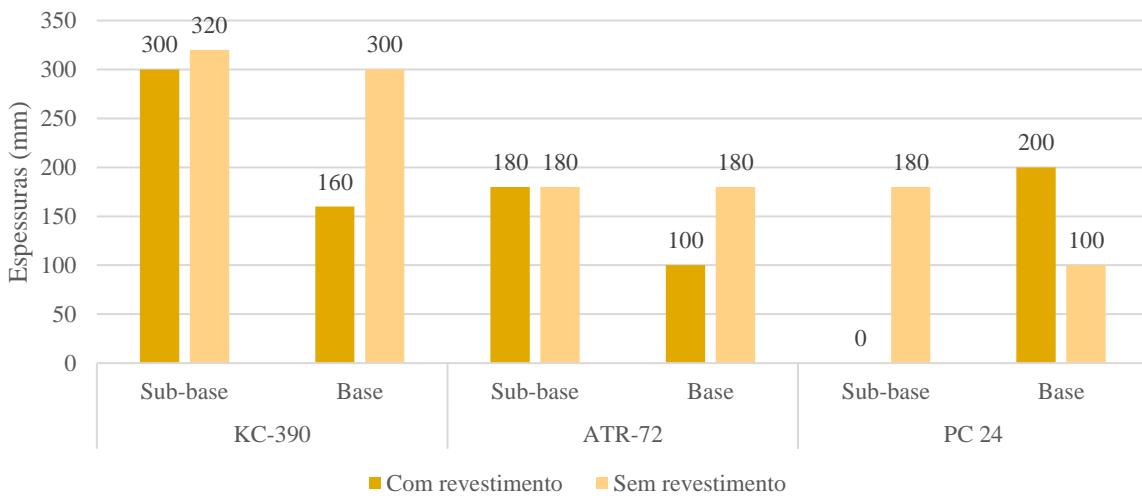
Tabela 5: Comparativo entre os códigos dos PCN e PCR obtidos

Pavimento	KC-390		ATR72		PC-24	
	PCN	PCR	PCN	PCR	PCN	PCR
Com revestimento	36	373	12	111	8	73
Sem revestimento	36	368	12	111	8	73

Fonte: Autoria própria, 2023.

Embora a espessura equivalente tenha o mesmo valor para cada aeronave, foi possível notar diferenças significativas nas espessuras das camadas de sub-base e base, conforme evidenciado no gráfico da Figura 7.

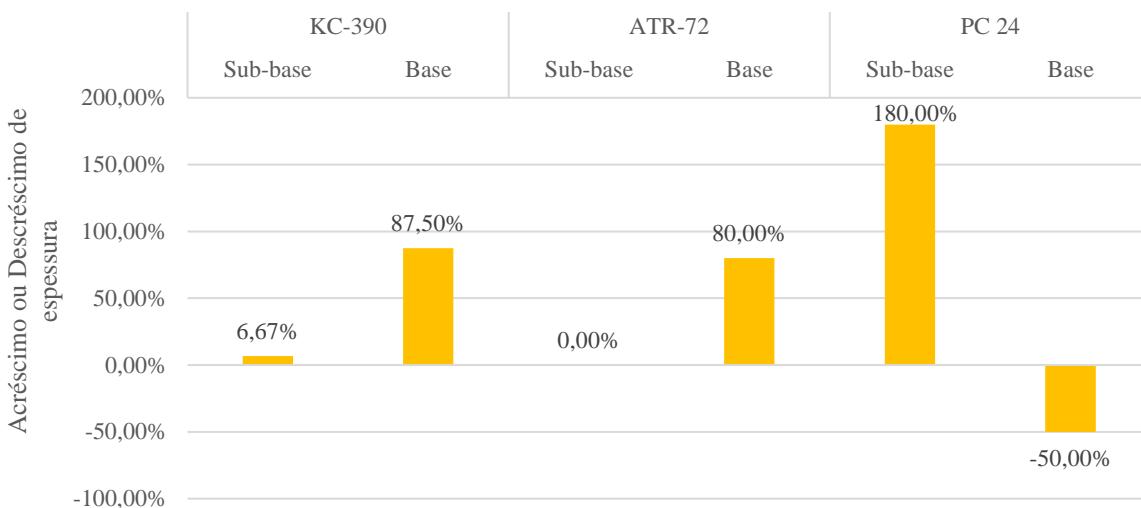
Figura 7: Gráfico de espessuras das camadas de sub-base e base por aeronave



Fonte: Autoria própria, 2023.

Observa-se que a presença do revestimento impacta significativamente nas espessuras das camadas. O KC-390, exibiu uma variação de 6,67% de material adicional na sub-base e 87,50% na base, como ilustrado no gráfico da Figura 8. Além disso, o Pilatus PC-24 não necessitou da camada de sub-base ao se adicionar o revestimento, logo, ao se retirar tal camada, foi acrescido uma camada de 180 mm de sub-base e a base foi reduzida em 100 mm, o que gerou um valor negativo no gráfico.

Figura 8: Gráfico da variação percentual das camadas ao se retirar a camada de revestimento



Fonte: Autoria própria, 2023.

Devido às semelhanças nas espessuras de base, com pequenas variações entre as amostras, o custo final foi impactado pelos custos unitários dos materiais. Assim, a amostra 01 apresentou um custo unitário inferior em comparação com a amostra 02 em todos os cenários, o que resultou em um valor final mais econômico.

A partir disso, foi realizado o custo total da pista, ilustrado na tabela 6, levando em consideração as medidas de 1500 m de comprimento e 30 m de largura.

Tabela 6: Custo final da pista para a amostra 1 sem cimento para cada modelo de aeronave

KC-390 - Mistura 1 sem cimento sem revestimento			
Comprimento (m)	Largura (m)	Preço Unitário total (R\$)	Preço total (R\$)
1500	30	R\$ 10,88	R\$ 489.814,20
KC-390 - Mistura 1 sem cimento com revestimento			
Comprimento (m)	Largura (m)	Preço Unitário total (R\$)	Preço total (R\$)
1500	30	R\$ 193,78	R\$ 8.720.176,05
ATR-72 - Mistura 1 sem cimento sem revestimento			
Comprimento (m)	Largura (m)	Preço Unitário total (R\$)	Preço total (R\$)

1500	30	R\$ 6,99	R\$ 314.613,00
ATR-72 - Mistura 1 sem cimento com revestimento			
Comprimento (m)	Largura (m)	Preço Unitário total (R\$)	Preço total (R\$)
1500	30	R\$ 142,95	R\$ 6.432.666,75
Pilatus PC-24 - Mistura 1 sem cimento sem revestimento			
Comprimento (m)	Largura (m)	Preço Unitário total (R\$)	Preço total (R\$)
1500	30	R\$ 6,18	R\$ 278.290,80
Pilatus PC-24 - Mistura 1 sem cimento com revestimento			
Comprimento (m)	Largura (m)	Preço Unitário total (R\$)	Preço total (R\$)
1500	30	R\$ 143,41	R\$ 6.453.551,25

Fonte: Autoria própria, 2023.

Observa-se que os aeródromos projetados para o KC-390 apresentaram o maior custo de execução dentre as aeronaves da frota, isso acontece devido ao seu peso elevado que por sua vez exige uma estrutura de pavimento mais robusta. É possível observar também, que nos pavimentos com revestimento, as pistas dimensionadas para o PC-24 exibiram um custo mais elevado em comparação com o ATR-72. Essa diferença decorreu da falta de sub-base no Pilatus, o que fez a espessura da base aumentar e elevar o preço.

## 5 CONCLUSÃO

Com o final dos estudos é possível apontar, que o método ACN/PCN, ao realizar uma análise baseada no CBR do sub-leito e adotar características das camadas conforme os padrões disponíveis na biblioteca interna do programa, limita a personalização dos materiais que compõem estrutura, e impede a representação mais precisa de suas características, conforme o que de fato será utilizado na execução.

Além disso, a abordagem de utilizar a espessura equivalente obtida através de uma conversão realizada pela Planilha de Suporte pode resultar em valores idênticos de PCN e CDF para estruturas com propriedades distintas.

Destaca-se também, que a falta de dados sobre as propriedades mecânicas das camadas do pavimento e a ausência de dados para a conversão de materiais dentro da própria Planilha de Suporte pode resultar em inconsistências entre as análises feitas e a realidade.

Dessa forma, a realização das análises através do COMFAA 3.0 resultou em 6 configurações de pavimentos, sendo 3 com camada de revestimento e 3 sem essa camada. Importante destacar que ambas as categorias apresentaram os mesmos valores de PCN e CDF para cada tipo de aeronave. Para

atender aos requisitos de ACN de cada aeronave na ausência da camada de revestimento, foram realizados ajustes significativos nas espessuras das camadas de base e sub-base.

Já o FAARFIELD 2.0 se baseia em princípios de métodos empírico-mecanísticos, incorporando os estudos mais recentes nessa área. Embora proporcione dimensionamentos mais precisos e simplificados em comparação com o COMFAA 3.0, sua utilização requer ensaios para determinar os parâmetros elásticos dos materiais. Em situações em que esses ensaios não são acessíveis, é necessário recorrer a correlações.

No entanto, é importante destacar que o uso de correlações pode não representar as propriedades dos materiais utilizados nas estruturas com precisão. Essas correlações não desqualificam o uso do software, que continua sendo empregado para dimensionamentos, seguindo as normas estabelecidas pela FAA.

Com isso, a análise dos pavimentos, considerando as misturas 1 e 2 ensaiadas com material de base, resultou em oito configurações de pavimentos para cada tipo de aeronave. Essas configurações variam na utilização ou não da camada de revestimento asfáltico e na mistura utilizada na base. Os valores de PCR obtidos foram semelhantes para cada aeronave, com variações mínimas.

Para a composição da estrutura dos pavimentos, optou-se pela utilização de materiais recomendados pela AC 150/5370-10H. Foi empregado o P-154 *Uncrushed Aggregate* como agregado não triturado para a sub-base, enquanto as misturas 1 e 2 foram formuladas com base no material P-213, identificado como *Sand-Clay Base Course*, uma mistura de areia e argila destinada à camada de base. Já para a camada de revestimento, adotou-se o P-401/P-403 HMA Surface, uma composição de agregado mineral e ligante asfáltico.

Em relação aos resultados obtidos, o ensaio de CBR indicou valores positivos para o sub-leito, já para a utilização nas outras camadas destaca-se a necessidade de realizar uma redistribuição mais adequada das frações do solo, levando a realização de uma estabilização física baseada no material Sand-Clay, e em uma estabilização química com cimento.

Observa-se também que, apesar da adição de 1,5% de cimento ter gerado um ganho de resistência no ensaio de CBR das misturas, essa contribuição não colaborou de forma significativa para a diminuição da espessura da camada de base. Com isso, é possível afirmar que, a adição de cimento não se mostra vantajosa em termos de resistência, considerando o seu custo mais elevado.

Especificamente, no caso do PC24, a camada de sub-base não foi necessária na presença de revestimento, sendo necessário removê-la para evitar um superdimensionamento da estrutura, isso fez com que o preço final de sua pista ficasse superior ao do ATR-72, uma vez que a camada de base é

mais cara que a da sub-base. Sendo assim, a espessura e a necessidade de utilização da sub-base são influenciadas pela presença ou ausência de revestimento, assim como pelo peso da aeronave.

Nota-se também que, a espessura das camadas apresentou variações consideráveis, sendo que a sub-base variou proporcionalmente ao peso da aeronave e inversamente proporcional à presença de revestimento tanto no COMFAA 3.0 como no FAARFIELD 2.0. A espessura da camada de base manteve-se, em sua maioria, próxima aos 150mm, com leves variações. Destaca-se que a camada de sub-base sofreu mais alterações, uma vez que o software realiza o dimensionamento, alterando principalmente as camadas mais inferiores.

Além disso, tanto para as pistas dimensionadas pelo FAARFIELD 2.0 como para os pavimentos determinados através do COMFAA 3.0, a mistura 01 demonstrou ser economicamente mais viável em todos os casos analisados, custando até 44,61% a menos, em comparação com a mistura 02.

Em conclusão, a abordagem de ausência de revestimento provou ser uma forma eficaz de reduzir significativamente os custos de execução e garantir a capacidade de suporte do pavimento, principalmente para aeronaves de pequeno porte assim como o Pilatus PC-24. Nesse contexto, mesmo com as variações nas espessuras das camadas, a diferença de custo é notavelmente expressiva, chegando a diferenças superiores a 2000%.

Além de que a execução de uma pista sem a camada de revestimento é notavelmente mais ágil em comparação com aquela que possui pavimento. É possível também, realizar essa tarefa em locais mais remotos, devido à simplicidade dos materiais envolvidos, evitando a necessidade de grandes deslocamentos de caminhões carregados com massa asfáltica, por exemplo. Entretanto, é importante ressaltar que não foram considerados parâmetros de durabilidade e manutenção, o que pode afetar o desempenho da pista.

## AGRADECIMENTOS

Expressamos nossos sinceros agradecimentos aos nossos pais, Mauro Carlos e Lázaro José, e às nossas mães, Helizabete Ferreira e Marta Helena, por todo o cuidado e carinho que têm dispensado a nós.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Manual de cálculo de PCN de pavimentos aeroportuários usando o COMFAA. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/aeroportos-e-aerodromos/manuais-e-cartilhas/manual-de-calcular-de-pcn-de-pavimentos-aeroportuários-usando-o-comfaa-3.0>>. Acesso em: 16 maio 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Manual de cálculo de PCR de pavimentos aeroportuários. Brasília, 2022. 84 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/aeroportos-e-aerodromos/manuais-e-cartilhas/manual-de-calcular-de-pcr-de-pavimentos-aeroportuários>>. Acesso em: 16 maio 2023.

CAVA, F. H. Análise da influência da pressão de enchimento dos pneus e da condição de aderência das camadas no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2021.

FABRE, C. New ICAO pavement rating system. Toulouse, 12 out. 2020. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/new-icao-pavement-rating-system-cyrilfabre/?trackingId=J5C8bGDjSv%2B7ti68N5qB1w%3D%3D>>. Acesso em: 08 maio 2023.

FABRE, Cyril; VAURS, Géraud. Paradox: Why the Heaviest Commercial Airplane Remains the Most Pavement Friendly Aircraft at Large Hub Airports. In: AL-QADI, Imad et al. Airfield and Highway Pavements 2019: Innovation and Sustainability in Highway and Airfield Pavement Technology. Illinois, Chicago: Asce, 2019. p. 333-342. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784482476.033>>. Acesso em: 17 maio 2023.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Standardized method of reporting airport pavement strength PCN. 2014. Advisory Circular 150/5335-5C. Washington, DC.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Standardized method of Reporting Pavement Strength - PCR. Washington, DC, 2022. Advisory Circular 150/5335-5D. Washington, DC.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Manual de projetos aeroportuários: Manual de Projetos Aeroportuários. 1 ed. Brasília, 2021. 378 p.

RENZETTI, Bruno Polonio. INFRAESTRUTURA E CONCORRÊNCIA: o caso dos aeroportos brasileiros São Paulo 2018. 2018. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Direito e Desenvolvimento, Escola de Direito de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2018. Disponível em: <[https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/23917/2018-05-16%3b%20Dissertação\\_Versão%20Biblioteca\\_FGV.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/23917/2018-05-16%3b%20Dissertação_Versão%20Biblioteca_FGV.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 21 maio 2023.