

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Francisca Angélica Albuquerque Severo**

**ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA SALA  
LIMPA PARA PREPARAÇÃO DE CARGAS ÚTEIS  
ESPACIAIS**

Trabalho de Graduação  
2025

**Curso de Engenharia Civil Aeronáutica**

**Francisca Angélica Albuquerque Severo**

**ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA SALA  
LIMPA PARA PREPARAÇÃO DE CARGAS ÚTEIS  
ESPACIAIS**

Orientadora

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Giovanna Miceli Ronzani Borille (ITA)

Coorientador

1<sup>o</sup> Ten. Eng. Lucas Soares Rodrigues (CLBI)

**ENGENHARIA CIVIL AERONÁUTICA**

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

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

Severo, Francisca Angélica Albuquerque

Estudo de implementação de uma Sala Limpa para Preparação de Cargas Úteis Espaciais /  
Francisca Angélica Albuquerque Severo.

São José dos Campos, 2025.

81f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2025. Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Giovanna Miceli Ronzani Borille. Coorientador: 1<sup>o</sup> Ten. Eng. Lucas Soares Rodrigues.

1. Sala limpa. 2. Carga útil. 3. Contaminação. 4. Partículas. 5. Centro de Lançamento Barreira do Inferno. 6. Estudo de casos. 7. Engenharia Aeroespacial. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

SEVERO, Francisca Angélica Albuquerque. **Estudo de implementação de uma Sala Limpa para Preparação de Cargas Úteis Espaciais**. 2025. 81f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DA AUTORA: Francisca Angélica Albuquerque Severo

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo de implementação de uma Sala Limpa para Preparação de Cargas Úteis Espaciais.

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. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização da autora.

---

Francisca Angélica Albuquerque Severo  
Rua H8A, Ap. 105  
12.228-460 – São José dos Campos–SP

# **ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA SALA LIMPA PARA PREPARAÇÃO DE CARGAS ÚTEIS ESPACIAIS**

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

---

Francisca Angélica Albuquerque Severo

Autora

---

Giovanna Miceli Ronzani Borille (ITA)

Orientadora

---

Lucas Soares Rodrigues (CLBI)

Coorientador

São José dos Campos, 05 de novembro de 2025.

Dedico este trabalho à minha família, que me ensinou o valor da persistência e do trabalho duro. Aos amigos que estiveram ao meu lado nos dias de incerteza e que me inspiraram a sonhar alto, esta conquista também é de vocês.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à minha família. Aos meus pais, Fátima e Raimundo, pelo apoio em cada etapa da minha vida, por nunca medirem esforços para que meus sonhos se tornassem possíveis e por me ensinarem, com exemplo e afeto, a ser a pessoa de quem hoje me orgulho. À minha irmã, Gabrielly, pela cumplicidade de sempre e por, mesmo sem perceber, me impulsionar a buscar a minha melhor versão.

Agradeço também àquele que o ITA colocou no meu caminho e que se tornou parte essencial desta jornada: Thyago. Obrigada por tornar a caminhada mais leve e bonita, por ser ombro nas horas difíceis e porto seguro nos dias de incerteza. Não há agradecimento que seja suficiente para tudo o que você fez e faz.

Estendo meus agradecimentos às amizades construídas ao longo da graduação, que tornaram o percurso mais humano e suportável. Em especial, às minhas amigas Ana Caroline, Letícia e Isabella, por compartilharem risadas, cansaços, cafés e desabafos, e por me lembrarem, na prática, que a amizade é uma das formas mais bonitas de amor. Ao meu amigo, padrinho e coorientador, Lucas, que me acompanha desde antes do ITA e que, com muita generosidade, esteve presente em todos os momentos importantes, meu muito obrigada.

Por fim, agradeço aos professores do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica pelos ensinamentos e pela formação sólida que me proporcionaram. De modo especial, à Prof<sup>a</sup>. Giovanna, pela orientação atenciosa, pela confiança depositada e pelo apoio que foi determinante para a conclusão deste trabalho.

*“Da minha cabeça chata, do meu sotaque arrastado [...]*  
*Da terra de cultura viva, Chico Anysio, Gonzagão,*  
*de Renato Aragão, Ariano e Patativa.*  
*Gente boa, criativa*  
*Isso só me dá prazer, por isso, eu tenho orgulho em dizer*  
*Meu obrigado ao destino,*  
*Quanto mais sou nordestino, mais tenho orgulho de ser”*  
— BRÁULIO BESSA

# Resumo

O presente trabalho apresenta um estudo abrangente sobre salas limpas, abordando sua importância, princípios de funcionamento e requisitos técnicos e normativos que orientam seu projeto, construção e operação. Com base nas normas da série ABNT NBR ISO 14644 e em referências internacionais, foram discutidos os principais parâmetros de controle (especialmente concentração de partículas em suspensão, diferenciais de pressão, fluxo e renovação de ar) bem como os aspectos construtivos e de acabamento necessários para assegurar um ambiente com níveis controlados de contaminação.

A contribuição central desta pesquisa reside na aplicação metodológica desse referencial teórico a um desafio prático: a adaptação (*retrofit*) de uma infraestrutura existente. Para isso, desenvolveu-se um estudo de caso no Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI), no qual se propôs a conversão de uma sala convencional em um ambiente classificado como ISO 7, adequado às atividades de preparação de cargas úteis. Para a materialização dessa proposta, foram utilizados softwares de projeto, (AutoCAD, para elaboração da planta arquitetônica modificada, e SketchUp, para o desenvolvimento do modelo tridimensional da solução) além da elaboração de um conjunto de diretrizes técnicas voltadas a subsidiar a elaboração futura de um Estudo Técnico Preliminar (ETP), de modo a tornar o trabalho aplicável ao contexto real da Força Aérea Brasileira.

# Abstract

This work presents a comprehensive study on cleanrooms, addressing their importance, operating principles, and the technical and regulatory requirements that guide their design, construction, and operation. Based on the ABNT NBR ISO 14644 series standards and international references, the main control parameters were discussed—particularly airborne particle concentration, pressure differentials, airflow, and air renewal rates—as well as the construction and finishing aspects necessary to ensure an environment with controlled levels of contamination.

The central contribution of this research lies in the methodological application of this theoretical framework to a practical challenge: the adaptation (*retrofit*) of an existing infrastructure. To this end, a case study was developed at the Barreira do Inferno Launch Center (CLBI), proposing the conversion of a conventional room into an ISO 7-classified environment suitable for payload preparation activities. To materialize this proposal, design software tools were employed (AutoCAD for the development of the modified architectural floor plan and SketchUp for the creation of the three-dimensional model of the solution) along with the preparation of a set of technical guidelines aimed at supporting the future development of a Preliminary Technical Study (ETP), thereby making the work applicable to the real context of the Brazilian Air Force.

# Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Dispêndios nacionais em pesquisa e desenvolvimento (P&D) em relação ao produto interno bruto (PIB) de países selecionados, 2000-2020 (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brasil), 2023) . . . . .	23
FIGURA 2.2 – Número de infraestruturas mapeadas segundo ano de início de operação (NEGRI; SQUEFF, 2016) . . . . .	24
FIGURA 2.3 – Avaliação das condições gerais da infraestrutura, em porcentagem (NEGRI; SQUEFF, 2016) . . . . .	24
FIGURA 2.4 – Avaliação da capacidade técnica da infraestrutura, em porcentagem (NEGRI; SQUEFF, 2016) . . . . .	25
FIGURA 2.5 – Classes ISO de limpeza do ar por concentração de partículas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019a) . . . . .	26
FIGURA 2.6 – Classes intermediárias decimais de limpeza do ar por concentração de partículas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019a) . . . . .	26
FIGURA 2.7 – Pontos de medição em função da área da sala limpa (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019a) . . . . .	30
FIGURA 2.8 – Esquema de fluxo de ar em regime unidirecional (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019). . . . .	33
FIGURA 2.9 – Esquema de fluxo de ar em regime não unidirecional (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019). . . . .	34
FIGURA 2.10 – Indicação dos parâmetros recomendados para fluxo de ar por classe de limpeza (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019) . . . . .	35
FIGURA 3.1 – Fluxograma representativo da metodologia aplicada ao presente trabalho (Fonte: Arquivo pessoal) . . . . .	41
FIGURA 3.2 – Planta de construção do projeto de revitalização da sala limpa do PPCU do CLA (SERINFRA-SJ, 2023) . . . . .	44

---

FIGURA 3.3 – Legendas e tabelas relativas a planta da Figura 3.2 (SERINFRA-SJ, 2023) . . . . .	45
FIGURA 3.4 – Planta com fachadas lateral e frontal da sala a ser adaptada no CLBI (CLBI, 2012) . . . . .	46
FIGURA 3.5 – Planta com vista superior da sala a ser adaptada no CLBI (CLBI, 2012) . . . . .	46
FIGURA 3.6 – Vista 1 do modelo 3D da infraestrutura atual (Fonte: Arquivo Pessoal)	47
FIGURA 3.7 – Vista 2 do modelo 3D da infraestrutura atual (Fonte: Arquivo Pessoal)	47
FIGURA 3.8 – Vista 3 do modelo 3D da infraestrutura atual (Fonte: Arquivo Pessoal)	48
FIGURA 4.1 – Vista interna 1 da sala (Fonte: Arquivo Pessoal) . . . . .	51
FIGURA 4.2 – Vista interna 2 da sala (Fonte: Arquivo Pessoal) . . . . .	52
FIGURA 4.3 – Vista interna 3 da sala (Fonte: Arquivo Pessoal) . . . . .	52
FIGURA 4.4 – Indicação do valor recomendado de ACH para uma sala com classe de limpeza ISO 7 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019) . . . . .	56
FIGURA 4.5 – Recomendação de <i>layout</i> para o fluxo não-unidirecional utilizado . . . . .	57
FIGURA 4.6 – Esquematização do processo de paramentação de pessoas para entrada na zona limpa (Fonte: Arquivo pessoal) . . . . .	60
FIGURA 4.7 – Esquematização do fluxo de entrada de materiais na zona limpa (Fonte: Arquivo pessoal) . . . . .	61
FIGURA 4.8 – Fluxograma do processo para certificação de sala limpa (Fonte: Arquivo Pessoal) . . . . .	65
FIGURA 4.9 – Planta arquitetônica com as alterações sugeridas (Fonte: Arquivo pessoal) . . . . .	71
FIGURA 4.10 – Vista 1 do modelo 3D com as proposições de alterações (Fonte: Arquivo pessoal) . . . . .	72
FIGURA 4.11 – Vista 2 do modelo 3D com as proposições de alterações (Fonte: Arquivo pessoal) . . . . .	73
FIGURA 4.12 – Vista 3 do modelo 3D com as proposições de alterações (Fonte: Arquivo pessoal) . . . . .	73
FIGURA 4.13 – Vista 4 do modelo 3D com as proposições de alterações (Fonte: Arquivo pessoal) . . . . .	74
FIGURA 4.14 – Ilustração de sala limpa modular de parede flexível . . . . .	75

# Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Tipos de Cargas Úteis Espaciais (WERTZ <i>et al.</i> , 2011) . . . . .	20
TABELA 2.2 – Ensaio opcional para instalações de sala limpa, conforme ABNT NBR 14644-3:2019 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019b). . .	28
TABELA 3.1 – Classificação das áreas limpas do INPE . . . . .	42
TABELA 3.2 – Classificação das áreas limpas do CLA . . . . .	43
TABELA 4.1 – Materiais de acabamento recomendados pela literatura técnica . . .	54
TABELA 4.2 – Tabela-resumo das indicações para mobiliários . . . . .	64
TABELA 4.3 – Tabela-resumo com diretrizes para limpeza da sala . . . . .	70

# Lista de Abreviaturas e Siglas

PESE	Programa Estratégico de Sistemas Espaciais
COMAER	Comando da Aeronáutica
END	Estratégia Nacional de Defesa
PNAE	Programa Nacional de Atividades Espaciais
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CLBI	Centro de Lançamento da Barreira do Inferno
PPCU	Prédios de Preparação de Carga Útil
PPP	Predio de Preparação de Propulsores
ETP	Estudo Técnico Preliminar
VLS	Veículo Lançador de Satélites
PSM	Programa Espacial Militar
GPS	Sistema de Posicionamento Global
PIB	Produto Interno Bruto
C&T	Ciência e Tecnologia
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LDSE	Laboratório de Desenvolvimento de Subsistemas Espaciais
LIT	Laboratório de Integração e Testes
ESA	Agência Espacial Europeia
HEPA	<i>High Efficiency Particulate Air</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
ULPA	<i>Ultra Low Penetration Air</i>
EPI	Equipamentos de Proteção Individual

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	15
1.1	<b>Motivação e objetivos</b> . . . . .	16
1.1.1	Organização do trabalho . . . . .	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .	18
2.1	<b>Carga útil e centros de lançamento</b> . . . . .	18
2.2	<b>Sala limpa</b> . . . . .	21
2.2.1	Infraestrutura . . . . .	21
2.2.2	Infraestrutura laboratorial . . . . .	23
2.2.3	Infraestrutura laboratorial de uma sala limpa . . . . .	25
2.3	<b>Controle de sala limpa</b> . . . . .	29
2.3.1	Número de partículas . . . . .	29
2.3.2	Controle de ar . . . . .	33
2.3.3	Temperatura . . . . .	35
2.3.4	Umidade . . . . .	36
2.3.5	Certificação . . . . .	37
2.4	<b>Síntese da revisão</b> . . . . .	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .	40
3.1	<b>Estudos de caso</b> . . . . .	41
3.1.1	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais . . . . .	41
3.1.2	Centro de Lançamento de Alcântara . . . . .	42
3.1.3	Centro de Lançamento da Barreira do Inferno . . . . .	43
3.2	<b>Softwares</b> . . . . .	43

---

3.2.1	AutoCAD . . . . .	43
3.2.2	SketchUp . . . . .	44
<b>3.3</b>	<b>Plantas arquitetônicas . . . . .</b>	<b>44</b>
3.3.1	CLA . . . . .	44
3.3.2	CLBI . . . . .	45
<b>3.4</b>	<b>Modelo 3D . . . . .</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Estudo de caso - CLBI . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1.1	Estado atual . . . . .	50
4.1.2	Diretrizes para reforma . . . . .	53
4.1.3	Certificação . . . . .	64
4.1.4	Operação e manutenção . . . . .	65
4.1.5	Plano de limpeza . . . . .	67
4.1.6	Planta arquitetônica . . . . .	71
4.1.7	Modelo 3D . . . . .	72
4.1.8	Alternativas . . . . .	74
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXO A – DECLARAÇÃO DE USO DE IA . . . . .</b>	<b>81</b>

# 1 Introdução

Durante a Guerra Fria, a disputa entre Estados Unidos e União Soviética foi responsável por diversos avanços tecnológicos na exploração espacial, abrindo caminho para o desenvolvimento de tecnologias amplamente utilizadas atualmente, como satélites de comunicação e materiais mais leves e resistentes, por exemplo. No cenário global contemporâneo, poucos países possuem capacidade gerencial e operacional para utilizar o espaço em benefício próprio. Conforme citado no PESE (Programa Estratégico de Sistemas Espaciais), torna-se necessário o desenvolvimento de programas com o objetivo de permitir que o Brasil também possa utilizar o espaço em seu favor, especialmente no que se refere aos seus sistemas de defesa.

Com esse propósito, o COMAER (Comando da Aeronáutica) elaborou a END (Estratégia Nacional de Defesa), na qual a implantação de sistemas espaciais complexos ocupa papel de grande relevância. Por meio do PNAE (Programa Nacional de Atividades Espaciais) e do PESE, foram estabelecidas as prioridades e a metodologia a serem adotadas para a implementação desses sistemas. Destaca-se, nesse contexto, a importância dos satélites e de suas cargas úteis, que podem ser utilizados para diversos fins, como sensoriamento remoto e comunicação — tarefas fundamentais para o cumprimento da missão constitucional da Força Aérea: “Manter a soberania do espaço aéreo e integrar o território nacional, com vistas à defesa da Pátria”.

Nesse cenário, a preparação adequada das cargas úteis destinadas aos satélites lançados pelo Brasil torna-se essencial. Para isso, o uso de uma Sala Limpa é necessário, garantindo que o produto final apresente alta qualidade e desempenho compatível com as expectativas do cliente. Além disso, considerando os diversos requisitos técnicos, como controle de temperatura, umidade e presença de microrganismos, é fundamental que a infraestrutura voltada a esse tipo de ambiente seja cuidadosamente projetada, visando a alcançar um bom equilíbrio entre desempenho técnico e custo-benefício.

## 1.1 Motivação e objetivos

Atualmente, a Força Aérea Brasileira conta com dois Centros de Lançamento Aeroespaciais: o CLA (Centro de Lançamento de Alcântara), localizado em Alcântara, no Maranhão, e o CLBI (Centro de Lançamento da Barreira do Inferno), situado em Paranamirim, no Rio Grande do Norte. Ambos contribuem de maneira decisiva para a operacionalização do programa espacial brasileiro. Para o cumprimento de suas missões, os dois centros contam com uma infraestrutura que, embora ainda demande investimentos, tem obtido êxito em seus empreendimentos recentes. Entre os elementos que compõem essa infraestrutura, destacam-se os PPCU (Prédios de Preparação de Carga Útil), onde os equipamentos eletrônicos a serem lançados são preparados. Quanto mais controlado for o ambiente desses prédios, maior será a qualidade e a confiabilidade dos produtos finais entregues. Nesse sentido, o CLA já dispõe de Salas Limpas tanto no PPCU quanto no PPP (Prédio de Preparação de Propulsores), enquanto o CLBI, por outro lado, atualmente não possui nenhuma Sala Limpa em sua estrutura.

Além de sua relevância histórica como o primeiro centro de lançamento brasileiro, o CLBI desempenha atualmente um papel estratégico no programa aeroespacial da Força Aérea. Diante disso, é fundamental que sua infraestrutura esteja preparada para atender às demandas dos principais projetos espaciais em curso. Em 2025, por exemplo, o CLA operou com 85% de sua capacidade comprometida, evidenciando a necessidade de que o PPCU do CLBI esteja em conformidade com o do CLA ou, ao menos, disponha de estrutura e recursos que lhe permitam atuar de forma autônoma e eficiente no atendimento a clientes não absorvidos pelo centro de Alcântara. Nesse contexto, a implantação de uma sala limpa no CLBI representa uma medida essencial para ampliar sua capacidade operacional e fortalecer o suporte às atividades espaciais nacionais.

O presente trabalho tem como objetivo estudar a importância e os principais requisitos técnicos e normativos das salas limpas, ambientes fundamentais para o desenvolvimento de atividades que exigem controle rigoroso de contaminação, especialmente no setor aeroespacial. A partir desse embasamento teórico e normativo, realiza-se um estudo de caso aplicado ao CLBI, com o intuito de propor diretrizes para a adaptação de uma sala existente em um ambiente de classe ISO 7 destinado à preparação de cargas úteis.

Com essa finalidade, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Compreender a importância das salas limpas e reunir os principais requisitos técnicos e normativos para sua concepção e operação;
- Aplicar esses conceitos ao estudo de caso do CLBI, propondo diretrizes e soluções adequadas à realidade da instituição;

- Elaborar a planta arquitetônica da sala adaptada, representando as modificações propostas;
- Desenvolver o modelo tridimensional (3D) da sala, para melhor visualização e análise das alterações;
- Redigir um relatório com as diretrizes técnicas necessárias para subsidiar o desenvolvimento do ETP (Estudo Técnico Preliminar) do projeto.

### 1.1.1 Organização do trabalho

O presente trabalho está estruturado em capítulos que abordam desde o contexto estratégico até a proposta técnica final. Inicialmente, o Capítulo 2 fornece a fundamentação teórica, discutindo a importância das cargas úteis e os requisitos técnicos e normativos cruciais para o projeto de Salas Limpas no setor aeroespacial. O Capítulo 3 apresenta um estudo de caso aplicado ao CLBI, detalhando o diagnóstico da sala existente e propondo as diretrizes e soluções técnicas para a adaptação ao ambiente de classe ISO 7, culminando com os modelos arquitetônico e 3D do projeto. Por fim, o Capítulo 4 apresenta as considerações finais incluindo sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Carga útil e centros de lançamento

Para que o programa aeroespacial de um país seja plenamente exitoso, é fundamental que não apenas os institutos de pesquisa — responsáveis pelo desenvolvimento tecnológico — apresentem elevada qualidade, mas também suas estruturas operacionais. Nesse contexto, os centros de lançamento assumem papel de extrema importância, pois constituem os locais de partida dos veículos lançadores com suas cargas espaciais, além de abrigarem etapas essenciais de montagem e finalização desses veículos. Assim, torna-se imprescindível que a infraestrutura desses centros seja igualmente de alto padrão (Agência Espacial Brasileira, 2025).

Um centro de lançamento é tipicamente composto por diversas estruturas que desempenham funções específicas. Geralmente, há uma estrutura destinada à integração — etapa na qual o lançador e a carga útil são montados —, um centro de controle e operações, responsável pela supervisão de todo o lançamento, e o sítio de lançamento, onde ocorre a instalação, a ignição e a partida do veículo lançador (Agência Espacial Brasileira, 2025).

Nos anos de 1964 e 1965, a pesquisa espacial no Brasil apresentou crescimento significativo. Nesse contexto, estabeleceu-se uma forte cooperação entre os Estados Unidos e o Brasil, resultando na criação do primeiro Centro de Lançamento brasileiro, o CLBI, inaugurado em dezembro de 1965. Contudo, devido a restrições, oriundas do crescimento da cidade no entorno, o CLBI não possuía capacidade para o lançamento de veículos maiores, como o VLS-1 (Veículo Lançador de Satélites) e seus sucessores. Assim, surgiu a necessidade de criação de um novo centro, o CLA, localizado na cidade de Alcântara, no Maranhão, em razão, sobretudo, da proximidade com o Equador terrestre, que proporciona significativa economia de combustível durante os lançamentos (FILHO, 2000).

Atualmente, esses são os Centros de Lançamento brasileiros, ambos subordinados à Força Aérea Brasileira. O CLBI é responsável exclusivamente pelo lançamento de foguetes de sondagem e suborbitais, enquanto o CLA responde pelos lançamentos de sondagem e investigações científicas, incluindo a possibilidade de haver lançamento de satélites orbi-

tais. Embora as operações suborbitais no CLBI tenham sido interrompidas temporariamente, a operação Potiguar, iniciada em 2024, reiniciou as atividades no centro, com o objetivo de garantir ao Brasil um PSM (Programa Espacial Militar) integralmente nacional, assegurando soberania para a realização de experimentos científicos em condições de microgravidade (Força Aérea Brasileira, 2024).

Nesse sentido, torna-se cada vez mais imprescindível que o CLBI esteja estruturalmente preparado para conduzir de forma eficiente e segura o manuseio e a integração das cargas úteis a serem acopladas aos seus veículos lançadores, que são, por definição, todos os equipamentos eletrônicos transportados que interagem com o alvo da respectiva missão, podendo ser ativos ou passivos. Em outras palavras, as cargas úteis constituem a principal razão de existência da missão, definindo parâmetros fundamentais, como tamanho, custo e risco envolvidos. Por essa razão, é essencial que todo projeto de missão compreenda detalhadamente o tipo de carga útil a ser transportada, uma vez que ela influencia diretamente o design e a análise da missão como um todo. Ademais, as cargas úteis podem variar desde satélites até instrumentos científicos, abrangendo uma ampla gama de possibilidades, sendo comumente classificadas conforme o objetivo da missão a que se destinam (WERTZ *et al.*, 2011).

Os tipos gerais de carga útil não são particularmente numerosos; contudo, cada tipo pode ser empregado em uma ampla variedade de aplicações. As categorias mais comuns incluem cargas úteis destinadas à observação, à comunicação ou à navegação, à medições in situ, à atuação remota e à missões de voo espacial tripulado, entre outras. A Tabela 2.1 apresenta um resumo das principais categorias de carga útil, suas respectivas funções de coleta de dados e exemplos de missões associadas a cada tipo (WERTZ *et al.*, 2011).

TABELA 2.1 – Tipos de Cargas Úteis Espaciais (WERTZ *et al.*, 2011)

<b>Tipo de Carga Útil</b>	<b>Função de Amostragem</b>	<b>Exemplos</b>
<b>Observação</b>	Sensoriamento remoto	Telescópio Hubble
	Baseado no espaço	LandSat
	Baseado na Terra	Ativo: TerraSar X
	Clima espacial	Lidar de Vento
<b>Comunicações/ Navegação</b>	Comunicação unidirecional	TV de Transmissão Direta
	Comunicação bidirecional	Telefone
	Navegação	GPS/GLONASS/GNSS
<b>In-Situ</b>	Rastreamento	Internet sem Fio (WiFi)
	Rovers	Rovers de Marte ou Lunares
	Manufatura espacial	Lander Viking Mars
	Medições in-situ	Medidas de campo magnético
<b>Ação à Distância</b>	Exploração	Medidas de gravidade
	Armas espaciais	Laser baseado no espaço
	Transmissão de energia	Radar baseado no espaço
	Segurança nacional	Energia solar via satélite
	Rastreamento de espaçonaves	Orientação
<b>Pessoas (Voo Espacial Humano)</b>	Exploração	Apollo
	Turismo espacial	Turismo espacial
	Construção e reparo	Colônia lunar
	Experimentos espaciais	ISS

É relevante destacar que praticamente todas as chamadas aplicações “pacíficas” das cargas úteis espaciais possuem também um potencial de uso militar. Um exemplo emblemático é o GPS (Sistema de Posicionamento Global), amplamente utilizado pela população civil para navegação e mobilidade, mas que também desempenha um papel estratégico ao permitir a localização precisa de tropas, veículos militares e pilotos de aeronaves de combate. Por essa razão, tais tecnologias tornaram-se elementos centrais nas operações militares contemporâneas (FORTESCUE *et al.*, 2011).

No contexto brasileiro, a importância estratégica dos sistemas espaciais é amplamente reconhecida. Além de serem reiteradamente mencionados na END (Estratégia Nacional de Defesa), foram instituídos programas espaciais específicos com o objetivo de assegurar a autonomia nacional nesse setor. Esses programas enfatizam a necessidade de o Brasil desenvolver capacidades próprias de gestão, operação e desenvolvimento de sistemas espaciais complexos, reduzindo assim a dependência tecnológica de outros países (Ministério da Defesa (Brasil), 2020) (Agência Espacial Brasileira, 2022).

Conforme discutido anteriormente, as cargas úteis desempenham papel fundamental

em qualquer missão espacial. Nesse sentido, é imprescindível que sua manipulação ocorra de forma a evitar contaminações, uma vez que estas podem comprometer o desempenho do hardware da espaçonave. Contaminações — sejam de natureza molecular ou particulada — podem alterar a razão de absorção/emissão em superfícies de controle térmico, afetando negativamente o equilíbrio térmico do sistema; podem ainda reduzir a transmissão de sinal em instrumentos ópticos ou provocar diminuição na potência de saída em painéis solares, resultando, conseqüentemente, em menor geração de energia. Ademais, os requisitos relacionados à contaminação integram o próprio processo de projeto da carga útil, o qual passa por diversas iterações até que se alcance uma solução de design economicamente viável. Dessa forma, falhas nessa etapa podem prolongar desnecessariamente o ciclo de desenvolvimento da missão (NASA Glenn Research Center, 2001).

A contaminação de cargas úteis pode ser classificada em dois grandes grupos: contaminação molecular e contaminação particulada. A contaminação molecular caracteriza-se pela deposição de moléculas individuais e/ou materiais estranhos sobre as superfícies da carga útil, sendo mais comum em ambiente orbital, embora também possa ocorrer durante as etapas em solo. Por sua vez, a contaminação particulada, mais frequente durante a manipulação da carga útil em solo, consiste na deposição de partículas em escala micrométrica e/ou aglomerados de matéria. O principal desafio relacionado ao controle da contaminação reside na dificuldade de se quantificar o nível crítico aceitável e, a partir disso, estabelecer medidas de controle eficazes. Uma das estratégias adotadas para mitigar esse problema é a utilização de ambientes controlados, cuja qualidade do ar possa ser monitorada por parâmetros específicos — especialmente quanto à concentração de partículas em suspensão — como ocorre nas denominadas salas limpas (NASA Glenn Research Center, 2001).

## 2.2 Sala limpa

### 2.2.1 Infraestrutura

De maneira simplificada, infraestrutura refere-se ao conjunto de elementos físicos que proporcionam suporte a determinada atividade, bem como aos serviços associados a esse aparato, em uma escala mais complexa. No âmbito da Engenharia Civil, destaca-se a infraestrutura civil, que abrange sistemas de transporte, estruturas (incluindo edificações, pontes, barragens e diques — foco deste estudo), sistemas de abastecimento e tratamento de água, sistemas de energia (geração, transmissão e distribuição), entre outros. Assim, evidencia-se que o conceito de infraestrutura é amplo e permeia grande parte das atividades econômicas e sociais de um país, ressaltando-se, dessa forma, a relevância dos investimentos nesse setor por parte de Estados que almejam o desenvolvimento (PENN;

PARKER, 2011).

Diversos estudos internacionais demonstram a relação direta entre a qualidade da infraestrutura de um país e seu desenvolvimento econômico, especialmente porque uma infraestrutura adequada implica crescimento das atividades econômicas e, conseqüentemente, desenvolvimento econômico. Embora a modelagem da infraestrutura enquanto elemento influenciador do desenvolvimento seja complexa, os resultados demonstram, de forma inequívoca, sua importância tanto como insumo direto quanto como agente impulsionador da produtividade, dada a sua influência sobre outros insumos (CALDERÓN; SERVÉN, 2014).

Ademais, uma infraestrutura de qualidade superior não se limita a impactar o PIB (Produto Interno Bruto) nacional, mas também exerce efeito sobre a distribuição de renda, contribuindo para a redução das desigualdades sociais, conforme apontam estudos realizados no Brasil. Tal fato decorre do melhor acesso das camadas menos favorecidas a estradas, escolas, serviços de saúde e demais bens e serviços essenciais proporcionado por uma infraestrutura eficiente, denotando assim a importância de investimentos nesse setor (MEDEIROS; OLIVEIRA, 2020).

A partir da crise econômica da década de 1990, o setor de infraestrutura brasileiro necessitou reestruturar seus mecanismos de investimento, abrindo espaço para a era das concessões privadas. Contudo, tal medida mostrou-se insuficiente para posicionar o Brasil de forma competitiva em relação a outros países. A baixa eficiência na formulação e execução de projetos, bem como a escassez e incerteza quanto ao fluxo de recursos, configuram-se como os principais obstáculos a investimentos mais robustos. Atualmente, o investimento em infraestrutura representa menos de 2% do PIB nacional, com uma proporção entre investimentos públicos e privados significativamente distinta daquela observada em outras nações, condicionando o país à continuidade do fluxo financeiro, o que pode ser problemático sobretudo em períodos recessivos (ROCHA; RIBEIRO, 2022).

No que tange aos investimentos em infraestrutura, é oportuno mencionar a infraestrutura laboratorial, imprescindível ao setor de C&T (Ciência e Tecnologia), área com elevado potencial para posicionar o Brasil na vanguarda da inovação tecnológica. Nesse contexto, a parcela do PIB destinada à C&T ainda é insuficiente quando comparada à de outros países, conforme evidenciado na Figura 2.1, indicando amplo espaço para incremento dos investimentos e aprimoramento da infraestrutura laboratorial nacional (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brasil), 2023).

País	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
África do Sul	-	0,72	-	0,76	0,81	0,86	0,90	0,88	0,89	0,84	0,74	0,73	0,73	0,72	0,77	0,80	0,82	0,83	0,75	0,68	-
Alemanha	2,41	2,40	2,44	2,47	2,44	2,44	2,47	2,46	2,62	2,74	2,73	2,81	2,88	2,84	2,88	2,93	2,94	3,05	3,11	3,17	3,13
Argentina	0,39	0,38	0,35	0,37	0,40	0,42	0,45	0,46	0,47	0,59	0,56	0,57	0,64	0,62	0,59	0,62	0,53	0,56	0,49	0,46	-
Brasil	1,05	1,06	1,01	1,00	0,96	1,00	0,99	1,08	1,13	1,12	1,16	1,14	1,13	1,20	1,27	1,37	1,29	1,12	1,17	1,21	1,14
Canadá	1,86	2,02	1,97	1,97	2,00	1,97	1,94	1,90	1,86	1,92	1,83	1,79	1,77	1,71	1,71	1,69	1,73	1,69	1,74	1,75	1,84
China	0,89	0,94	1,06	1,12	1,21	1,31	1,37	1,37	1,45	1,66	1,71	1,78	1,91	2,00	2,02	2,06	2,10	2,12	2,14	2,23	2,40
Coreia	2,13	2,28	2,21	2,28	2,44	2,52	2,72	2,87	2,99	3,15	3,32	3,59	3,85	3,95	4,08	3,98	3,99	4,29	4,52	4,63	4,81
Espanha	0,88	0,89	0,96	1,02	1,04	1,10	1,18	1,24	1,32	1,36	1,36	1,33	1,30	1,28	1,24	1,22	1,19	1,21	1,24	1,25	1,41
Estados Unidos	2,62	2,64	2,55	2,55	2,49	2,50	2,55	2,62	2,74	2,79	2,71	2,74	2,67	2,70	2,72	2,79	2,85	2,91	3,01	3,18	3,45
França	2,09	2,14	2,17	2,12	2,09	2,05	2,05	2,02	2,06	2,21	2,18	2,19	2,23	2,24	2,28	2,23	2,22	2,20	2,20	2,19	2,35
Índia	0,74	0,72	0,71	0,71	0,74	0,81	0,80	0,79	0,84	0,82	0,77	0,76	0,74	0,71	0,70	0,69	0,67	0,67	0,65	-	-
Israel	3,93	4,18	4,13	3,89	3,87	4,04	4,14	4,42	4,33	4,12	3,92	4,00	4,14	4,07	4,16	4,26	4,51	4,66	4,80	5,14	5,44
Itália	1,00	1,04	1,08	1,06	1,05	1,04	1,08	1,13	1,16	1,22	1,22	1,20	1,26	1,30	1,34	1,37	1,37	1,42	1,46	1,51	1,51
Japão	2,86	2,92	2,97	2,99	2,98	3,13	3,23	3,29	3,29	3,20	3,10	3,21	3,17	3,28	3,37	3,24	3,11	3,17	3,22	3,21	3,27
México	0,31	0,32	0,35	0,39	0,39	0,40	0,37	0,40	0,44	0,48	0,49	0,47	0,42	0,43	0,44	0,43	0,39	0,33	0,31	0,28	0,30
Portugal	0,72	0,76	0,72	0,70	0,73	0,76	0,95	1,12	1,44	1,58	1,54	1,46	1,38	1,32	1,29	1,24	1,28	1,32	1,35	1,40	1,62
Reino Unido	1,61	1,60	1,62	1,58	1,53	1,55	1,57	1,61	1,60	1,66	1,64	1,64	1,57	1,61	1,63	1,63	1,65	1,66	1,71	1,71	-
Rússia	0,98	1,10	1,16	1,20	1,07	0,99	1,00	1,04	0,97	1,17	1,05	1,02	1,03	1,03	1,07	1,10	1,10	1,11	0,99	1,04	1,10

Fontes: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Main Science and Technology Indicators, MSTI 2022 Sept; Índia: Research and Development Statistics 2019-20 e Brasil: Coordenação-Geral de Indicadores de Ciência e Tecnologia - CGDI/DGIT/SETEC/MCTI

FIGURA 2.1 – Dispendios nacionais em pesquisa e desenvolvimento (P&D) em relação ao produto interno bruto (PIB) de países selecionados, 2000-2020 (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brasil), 2023)

## 2.2.2 Infraestrutura laboratorial

No ano de 2022, foram investidos quase R\$ 37 bilhões em atividades internas de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) em empresas industriais com mais de 100 funcionários. Portanto, trata-se de uma área cujo investimento tem crescido, especialmente por representar uma forma de diferenciação no quesito inovação, sendo a infraestrutura laboratorial parte crucial para o êxito desses investimentos (NERY; SIQUEIRA, 2024).

Em razão da importância de estabelecer um sistema de inovação que contribua de forma eficaz para o desenvolvimento tecnológico nacional, diversos países têm direcionado recursos para projetos cujo objetivo é o fortalecimento da infraestrutura científica e tecnológica. No Brasil, o cenário não é diferente, e grande parte desses investimentos ocorreu nas últimas duas décadas, em virtude do ciclo recente de investimentos nacionais na área de C&T. Tal constatação é corroborada pela pesquisa realizada pelo IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), que coletou dados sobre diversas infraestruturas por meio das respostas dos respectivos coordenadores a uma *web survey* hospedada no Diretório de Instituições da Plataforma Lattes do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). Essa pesquisa mapeou a quantidade de infraestruturas que iniciaram suas atividades em cada década, conforme ilustrado na Figura 2.2, evidenciando o crescimento do número de infraestruturas de C&T nas últimas duas décadas (NEGRI; SQUEFF, 2016).

**Número de infraestruturas mapeadas segundo ano de início de operação**

Início de operação	Número de infraestruturas	(%)
Antes de 1970	50	2,8
De 1970 a 1979	110	6,3
De 1980 a 1989	193	11,0
De 1990 a 1999	410	23,3
De 2000 a 2009	654	37,2
De 2010 a 2012	343	19,5
<b>Total</b>	<b>1.760</b>	<b>100</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

FIGURA 2.2 – Número de infraestruturas mapeadas segundo ano de início de operação (NEGRI; SQUEFF, 2016)

No contexto de P&D no setor de Defesa, a relevância de uma infraestrutura laboratorial adequada torna-se ainda mais acentuada, pois além de ser um fator essencial para o crescimento econômico, configura-se como um elemento fundamental para a segurança nacional, sendo responsável por prover um sistema moderno, ágil e eficiente.

No âmbito da Força Aérea Brasileira, o órgão de direção-geral do setor de C&T é o DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial), que possui unidades na cidade-sede, São José dos Campos, além de centros de lançamento em diferentes regiões, como o CLA e o CLBI. A mesma pesquisa do IPEA anteriormente mencionada avaliou as condições gerais das infraestruturas laboratoriais associadas às Forças Armadas, com base na opinião dos profissionais que as utilizam. Conforme mostram as Figuras 2.3 e 2.4, apenas 27,27% dos avaliadores consideraram a estrutura física como boa ou excelente, e somente 7% acreditam que a infraestrutura brasileira é avançada e compatível com as melhores instalações do gênero no exterior, indicando que essa ainda é uma área que demanda atenção e investimentos, sobretudo quando se trata dos Centros de Lançamento, cuja qualidade de infraestrutura é determinante para o sucesso das missões (SQUEFF, 2016).

**Avaliação das condições gerais da infraestrutura**  
(Em %)

Avaliação das condições	Muito bom	Bom	Regular	Ruim	Não se aplica
Insumos	36,36	54,55	2,27	2,27	4,55
Equipamentos	15,91	36,36	34,09	11,36	2,27
Manutenção	20,45	56,82	15,91	4,55	2,27
Instalações físicas	9,09	18,18	45,45	25,00	2,27

Fonte: Dados da pesquisa.

FIGURA 2.3 – Avaliação das condições gerais da infraestrutura, em porcentagem (NEGRI; SQUEFF, 2016)

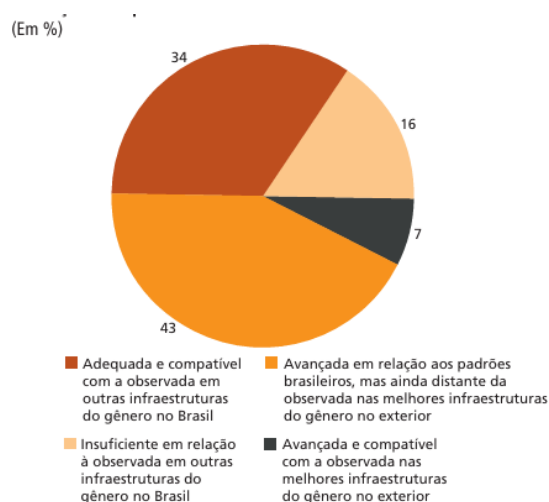


FIGURA 2.4 – Avaliação da capacidade técnica da infraestrutura, em porcentagem (NEGRI; SQUEFF, 2016)

### 2.2.3 Infraestrutura laboratorial de uma sala limpa

Salas limpas são ambientes projetados para o controle da contaminação do ar e/ou superfícies, destinados à realização de atividades sensíveis a esse tipo de contaminação. Trata-se, portanto, de um espaço no qual a introdução, geração e retenção de partículas são rigorosamente controladas, conforme as exigências específicas da atividade realizada no local. Esse tipo de ambiente é fundamental para a proteção da integridade de produtos em processos industriais, incluindo o setor aeroespacial. Em salas limpas, o controle estrito concentra-se principalmente na quantidade de partículas suspensas no ar, embora outros parâmetros, como temperatura, umidade, ruído, iluminação e vibração, também possam ser monitorados. Ademais, a classificação das salas limpas é definida pela norma ABNT NBR ISO 14644-1:2019, que estabelece o número máximo admissível de partículas de determinado tamanho em um ambiente. As classes ISO de limpeza do ar previstas na norma encontram-se ilustradas nas Figuras 2.5 e 2.6 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019a) (WHYTE, 2001). Note que o nível de limpeza da sala diminui com o aumento do número da classe ISO, ou seja, uma sala de classe ISO 2 exige menor controle de partículas por  $m^3$  do que uma sala de classe ISO 2, por exemplo.

Número da classe ISO (M)	Máximas concentrações permitidas (partículas/m <sup>3</sup> ) para partículas iguais ou maiores do que os tamanhos considerados abaixo <sup>a</sup>					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
1	10 <sup>b</sup>	d	d	d	d	e
2	100	24 <sup>b</sup>	10 <sup>b</sup>	d	d	e
3	1 000	237	102	35 <sup>b</sup>	d	e
4	10 000	2 370	1 020	352	83 <sup>b</sup>	e
5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	d, e, f
6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
7	c	c	c	352 000	83 200	2 930
8	c	c	c	3 520 000	832 000	29 300
9 <sup>g</sup>	c	c	c	35 200 000	8 320 000	293 000

<sup>a</sup> Todas as concentrações na Tabela são cumulativas, por exemplo: para ISO classe 5, as 10 200 partículas ≥ 0,3 µm incluem todas as partículas iguais ou maiores que este tamanho.

<sup>b</sup> Estas concentrações levam a grandes volumes de amostras de ar para a classificação. Pode ser aplicado o procedimento de amostragem sequencial; ver Anexo D.

<sup>c</sup> Os limites de concentração não são aplicáveis nesta região da Tabela devido à concentração de partículas muito elevada.

<sup>d</sup> Limitações estatísticas e de amostragem para baixas concentrações de partículas tornam a classificação inadequada.

<sup>e</sup> Limitações na coleta da amostra para partículas em concentrações baixas e de tamanho superior a 1 µm tornam a classificação imprópria para este tamanho de partícula, devido à perda potencial de partículas no sistema de amostragem.

<sup>f</sup> A fim de especificar este tamanho de partícula em associação com a ISO classe 5, o indicador de macropartículas M pode ser adaptado e utilizado em conjunto com pelo menos um outro tamanho de partícula. (Ver C.7).

<sup>g</sup> Esta classe é aplicável somente ao estado em operação.

FIGURA 2.5 – Classes ISO de limpeza do ar por concentração de partículas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019a)

Número da classe ISO (N)	Concentração de partículas (partículas/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>					
	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	5,0
ISO classe 1,5	[32] <sup>b</sup>	d	d	d	d	e
ISO classe 2,5	316	[75] <sup>b</sup>	[32] <sup>b</sup>	d	d	e
ISO classe 3,5	3 160	748	322	111	d	e
ISO classe 4,5	31 600	7 480	3 220	1 110	263	e
ISO classe 5,5	316 000	74 800	32 200	11 100	2 630	e
ISO classe 6,5	3 160 000	748 000	322 000	111 000	26 300	925
ISO classe 7,5	c	c	c	1 110 000	263 000	9 250
ISO classe 8,5 <sup>f</sup>	c	c	c	11 100 000	2 630 000	92 500

<sup>a</sup> Todas as concentrações na tabela são cumulativas, por exemplo, para ISO classe 5,5, as 11 100 partículas de 0,5 µm indicadas incluem todas as partículas maiores ou iguais a este tamanho.

<sup>b</sup> Estas concentrações acarretam grandes volumes de amostras de ar para a classificação. Ver Anexo D, Procedimento de amostragem sequencial.

<sup>c</sup> Limites de concentração não são aplicáveis nesta região da tabela, devido à concentração muito elevada de partículas.

<sup>d</sup> Limitações estatísticas e de amostragem para partículas em baixas concentrações tornam a classificação inadequada.

<sup>e</sup> Limitações na coleta da amostra para partículas de tamanhos maiores que 1 µm, em baixas concentrações, tornam a classificação inadequada, devido às perdas potenciais de partículas no sistema de amostragem.

<sup>f</sup> Esta classe só é aplicável para o estado em operação.

FIGURA 2.6 – Classes intermediárias decimais de limpeza do ar por concentração de partículas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019a)

A estrutura geral de uma sala limpa, embora à primeira vista aparente simplicidade, apresenta alta complexidade e particularidades em seus componentes, como os materiais de revestimento utilizados no ambiente. Considerando a necessidade de controle rigoroso do particulado, é imprescindível que os materiais empregados em pisos, paredes e forros sejam adequados, de modo a evitar o acúmulo de partículas e, conseqüentemente, o aumento do particulado total no ambiente. Ressalta-se, ainda, a importância do controle dos acessos à sala limpa, uma vez que as aberturas de comunicação entre a sala e as áreas adjacentes devem ser minimizadas. O ingresso de pessoas e materiais deve ocorrer por meio de antecâmaras, com o objetivo de reduzir ao máximo o contato direto e a contaminação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

Outro elemento de extrema relevância para o projeto de salas limpas são os sistemas de ar condicionado responsáveis pela filtragem do ar, pois são eles que garantem o controle do número de partículas presentes no ambiente. Conforme a ABNT NBR ISO 14644-4, a

filtração do ar deve ser realizada em três etapas: pré-filtração do ar externo; filtração secundária na instalação de tratamento do ar, destinada a proteger os filtros finais; e filtração final, que corresponde ao último estágio antes do insuflamento do ar na sala limpa. Embora a filtração secundária seja uma etapa intermediária, sua presença é necessária para assegurar que a filtração final mantenha a classe de limpeza desejada e para preservar a frequência de troca dos filtros finais dentro de limites financeiramente viáveis (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

Apesar do controle do particulado ser o aspecto mais frequentemente citado em relação às salas limpas, e o ensaio de contagem de partículas em suspensão no ar ser o único obrigatório para a classificação da instalação segundo a ABNT NBR ISO 14644-1:2019, existem outros ensaios opcionais que podem ser exigidos dependendo do projeto de certificação. A normatização desses ensaios opcionais é realizada pela ABNT NBR ISO 14644-3:2019, e os respectivos testes e seus objetivos estão apresentados na Tabela 2.2 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019b).

TABELA 2.2 – Ensaio opcionais para instalações de sala limpa, conforme ABNT NBR 14644-3:2019 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019b).

<b>Ensaio</b>	<b>Objetivo</b>
<b>Contagem de partículas ultrafinas e macropartículas em suspensão no ar</b>	Determinar a classe de limpeza do ar ambiente.
<b>Fluxo de ar</b>	Avaliar a vazão do ar em fluxos não unidirecionais e a distribuição da velocidade em fluxos unidirecionais.
<b>Medição da diferença de pressão do ar</b>	Verificar a capacidade de manter as diferenças de pressão especificadas entre a sala limpa e áreas adjacentes.
<b>Vazamento em filtros instalados</b>	Confirmar a correta instalação e integridade dos filtros de alta eficiência, assegurando ausência de vazamentos.
<b>Sentido e visualização do fluxo de ar</b>	Garantir conformidade do sentido e configuração do fluxo de ar com o projeto e especificações técnicas. Demonstrar a eficácia do sistema de tratamento de ar em manter níveis de temperatura e umidade dentro dos limites preestabelecidos.
<b>Temperatura e umidade</b>	Avaliar níveis de carga eletrostática em superfícies e o desempenho do ionizador na eliminação dessas cargas.
<b>Eletrostático e do gerador de íons</b>	Medir a quantidade ou efeito das partículas depositadas sobre superfícies em qualquer direção.
<b>Partículas sedimentadas</b>	Determinar o tempo necessário para retorno ao nível de limpeza especificado após geração temporária de partículas.
<b>Recuperação</b>	Verificar infiltração de ar não filtrado proveniente de áreas externas por meio de juntas, portas e forros pressurizados.
<b>Contenção</b>	

Embora as salas limpas sejam tradicionalmente associadas a atividades hospitalares e farmacêuticas, sua aplicação estende-se a diversas indústrias que requerem controle rigoroso de partículas, incluindo os setores alimentício, eletrônico, automotivo e aeroespacial (ModumTech, 2023). Particularmente neste último, destaca-se o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), que dispõe de áreas limpas tanto no LDSE (Laboratório de Desenvolvimento de Subsistemas Espaciais) quanto no LIT (Laboratório de Integração e Testes). Este último conta com zonas classificadas até a ISO Classe 2, evidenciando a apli-

cação e importância dessa infraestrutura no Brasil (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2024b)(Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2024a).

No contexto mais restrito da Força Aérea Brasileira, as salas limpas também desempenham papel relevante. Além do Laboratório Químico Farmacêutico localizado no Rio de Janeiro, onde tais ambientes são essenciais, a Força Aérea mantém ainda dois Centros de Lançamento sob sua jurisdição, responsáveis pela manipulação de cargas úteis de veículos lançadores espaciais que possuem grande necessidade de salas limpas em suas instalações (Centro de Aquisições Específicas, 2022) (SERINFRA-SJ, 2023).

## 2.3 Controle de sala limpa

### 2.3.1 Número de partículas

No que se refere ao controle do número de partículas é interessante conhecer três nomenclaturas bastante comum na literatura e normas associadas ao estado de ocupação da Sala no momento do ensaio:

- Como construído: Estado da sala limpa totalmente funcional, porém vazia, sem equipamentos, móveis, materiais ou pessoal;
- Em repouso: Estado em que a sala limpa está completa, com equipamentos de produção instalados e operando, mas sem presença de pessoal;
- Em operação: Estado da sala limpa funcionando nas condições especificadas, com equipamentos trabalhando e com o número especificado de pessoas presentes (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019b).

Os ensaios para demonstração de conformidade são feitas com a sala em operação, entretanto, ensaios nas demais condições podem ser realizados periodicamente a depender da necessidade do usuário. Além disso, os instrumentos utilizados nos ensaios de contagem de partículas devem ter a capacidade de exibir ou registrar o tamanho e a quantidade de partículas discretas em suspensão no ar, atualmente o instrumento mais comum é o LSAPC, um contador por espalhamento de luz. Ademais, o certificado de calibração do contador deve estar válido e, sempre que possível, a frequência e o método de calibração do aparelho devem seguir as normas de calibração adequadas. A quantidade de contadores de partículas utilizados nos ensaios depende da área total da sala limpa, conforme mostrado na Figura 2.7.

Área da sala limpa (m <sup>2</sup> ) menor ou igual a	Número mínimo de pontos de medição a serem ensaiados (N <sub>L</sub> )
2	1
4	2
6	3
8	4
10	5
24	6
28	7
32	8
36	9
52	10
56	11
64	12
68	13
72	14
76	15
104	16
108	17
116	18
148	19
156	20
192	21
232	22
276	23
352	24
436	25
636	26
1 000	27
> 1 000	Ver Equação (A.1)

NOTA 1 Se a área considerada ficar entre dois valores na tabela, convém que o maior dos dois seja selecionado.

NOTA 2 No caso de fluxo de ar unidirecional, a área pode ser considerada a seção transversal ao ar em movimento, perpendicular à direção do fluxo de ar. Em todos os outros casos, a área pode ser considerada a área do plano horizontal da zona ou sala limpa.

FIGURA 2.7 – Pontos de medição em função da área da sala limpa (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019a)

Na etapa de projeto da sala limpa é importante inicialmente definir o tamanho de partículas cujo limite será definido, dependendo da atividade fim da zona limpa, um tamanho diferente de partícula pode ser medida, entretanto, o mais comum e o valor em cima do qual as classificações ISO foram definidas são as partículas com diâmetro igual ou superior a  $0,5\mu m$  e são essas partículas que serão contadas nos ensaios.

Na parte de projeto, os principais requisitos relacionados a Engenharia Civil normati-

zados pela ISO 14644 e que devem ser analisados em uma sala limpa é a parte arquitetônica do ambiente e os sistema de tratamento de ar. Na parte arquitetônica, existem algumas especificidades quanto ao acessos de pessoas e materiais, aos métodos construtivos e a seleção de materiais, já que se trata de um ambiente em que qualquer condição que favoreça a introdução, geração e/ou retenção de partículas deve ser evitada, portanto, a escolha de materiais é crucial (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

Para que a contaminação da zona limpa devido a entrada e saída de pessoas e materiais seja minimizada é importante que as mesmas sejam feitas por meio de antecâmaras e que a quantidade de aberturas de comunicação entre a zona limpa e o exterior seja minimizada, recomenda-se ainda que as passagens de pessoas e materiais sejam distintas. Nas antecâmaras deve-se garantir que as portas de entrada (para a zona limpa) e saída (para o ambiente externo) não sejam simultaneamente abertas, podendo ser utilizados sistemas de intertravamento eletrônico ou mecânico (sistemas que travam a abertura de uma porta quando a outra está aberta) para esse fim ou ainda indicadores audiovisuais (sinais sonoros ou visuais que uma das portas está aberta). Além disso, é possível e recomendado instalar visores nas portas para proporcionar uma linha de visão dos ambientes envolvidos. Por último, recomenda-se que na passagem de materiais hajam procedimentos apropriados de descontaminação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

As entradas e saídas de pessoal são os chamados vestiários e requerem algumas especificidades também, como a separação de pessoal entrando e saindo que pode ser feito tanto garantindo que não haja pessoas entrando e saindo ao mesmo tempo quanto por separações físicas de acesso. Esses vestiários podem ainda conter chuveiros de ar, limpadores de calçados e tapetes adesivos como forma de controle de contaminação. Ademais, as instalações dessas antecâmaras devem ser definidas levando em conta o número de usuários total e simultâneo, a frequência de substituição das vestimentas e o procedimento utilizados, sendo esse último baseado no tipo de peça a ser vestida e retirada, se são ou não reutilizáveis e no procedimento que assegura a limpeza da vestimenta (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

No que tange aos métodos construtivos é possível dividi-los em dois: Convencionais e modulares. Os métodos convencionais para as salas limpas se resumem aos mesmos métodos de construção de ambientes simples com o cuidado de escolher materiais adequados a sala limpa. Além disso, a literatura recomenda que para uma limpeza mais fácil e menor retenção de partículas os cantos de encontro entre paredes e entre pisos e paredes sejam abaulados com curvas dentro de uma faixa específica. Entretanto, é importante frisar que a utilização desse método só serve para salas com menor rigor na classificação de limpeza, aproximadamente da classe ISO 8 e para os corredores de acesso e áreas controladas externas a sala limpa (WHYTE, 2001)(Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

Além disso, os métodos construtivos modulares subdividem-se em dois tipos principais:

sistemas de parede com estrutura de montantes e sistemas de parede sem montantes estruturais. No sistema com estrutura de montantes, a parede é composta por montantes verticais, geralmente de metal ou madeira, que servem como suporte para a fixação dos painéis. Esse método é especialmente indicado quando há necessidade de passagem de instalações elétricas e hidráulicas. Já o sistema sem montantes estruturais caracteriza-se pelo uso de painéis autoportantes, com espessura suficiente para garantir a rigidez da estrutura, os quais são acoplados a trilhos instalados no teto e no piso (WHYTE, 2001).

Para os acabamentos superficiais é necessário tomar o cuidado de projetá-lo de modo que o acúmulo de partículas seja minimizado e a limpeza seja fácil e não ocorra reações químicas no momento de sua execução, além de ser suficientemente resistente a impactos e desintegrações. É comum o uso de *drywall* nesse tipo de estrutura, entretanto sua finalização deve ser bem resistente para que no caso de impactos com a estrutura de *drywall* não haja liberação de pó de gesso. Além disso, existe ainda a preocupação com a geração de cargas eletrostáticas já que isso pode acarretar tanto falhas em componentes quanto atração de partículas presentes no ar e consequente deposição das mesmas, portanto, é importante escolher materiais de construção que minimizem a ocorrência dessas cargas (WHYTE, 2001).

Quanto a seleção de materiais para pisos é comum o uso de concreto como base e a sobreposição de superfícies lisas e impermeáveis, normalmente chapas ou revestimentos poliméricos e placas com juntas apropriadas ou ainda terrazzo, se corretamente selado com resinas impermeabilizantes, devido a sua durabilidade. Já para as paredes e tetos, os materiais típicos de acabamento são chapas de inox, alumínio anodizado e chapas ou revestimento polimérico para paredes e forros, podendo os tetos serem do tipo “teto falso” para facilitar o acesso aos dutos de ar condicionado (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019) (WHYTE, 2001).

Já quando se trata de esquadrias, é importante considerar tanto seu material e revestimento quanto sua vedação e sistema de fechamento, no caso das portas. A existência de janelas é recomendada para minimizar a entrada de pessoal que não irá necessariamente trabalhar na sala, mas apenas visualizar o que está acontecendo no ambiente, entretanto, a quantidade deve ser a mínima possível, o material utilizado deve ser sempre vidro e as juntas devem ser de fácil limpeza. Além disso, janelas do tipo visor são requeridas tanto nas portas que separam as antecâmaras da zona limpa quanto nas que separam as antecâmaras do ambiente externo (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019)(WHYTE, 2001).

### 2.3.2 Controle de ar

O sistema de ar-condicionado é um dos elementos mais críticos em uma sala limpa, pois é ele que assegura o controle da quantidade de partículas no ambiente, especialmente em situações de introdução ou geração acima dos limites normativos. Esse sistema pode operar com três tipos de fluxo de ar: unidirecional, não unidirecional ou misto.

No fluxo unidirecional, a limpeza do ambiente ocorre por arraste, com o ar filtrado movendo-se em linhas paralelas e velocidade uniforme, atuando como um “pistão”. Esse regime, é comum em salas de classe ISO 5 ou superiores, remove contaminantes diretamente, sem depender da diluição. Podem ser adotados dois *layouts* para a disposição de difusores e grelhas: um em que os difusores são instalados no teto e as grelhas de exaustão na porção inferior das paredes, e outro em que o ar é insuflado por difusores em uma das paredes da sala e extraído por grelhas na parede oposta, conforme ilustrado na Figura 2.8. Esse tipo de fluxo garante remoção contínua, minimizando a contaminação cruzada e mantendo a zona de trabalho no mais alto nível de pureza.

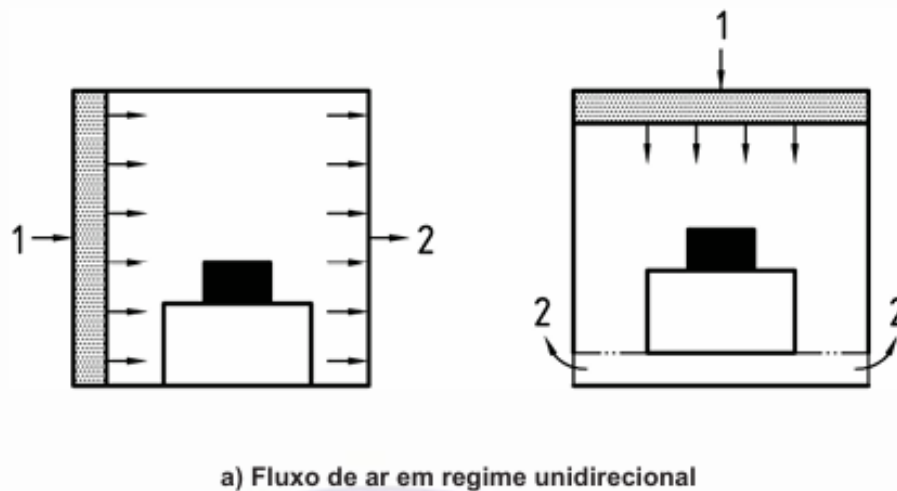


FIGURA 2.8 – Esquema de fluxo de ar em regime unidirecional (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

Já no regime de fluxo não unidirecional, o ar tratado é insuflado na sala, promovendo sua mistura com o ar interno e, conseqüentemente, a diluição das partículas geradas no ambiente. O retorno ocorre por meio de grelhas posicionadas afastadas dos pontos de insuflamento, favorecendo a eficiência do padrão de circulação previsto em projeto. Podem ser adotados dois *layouts* para a disposição de difusores e grelhas: um em que os difusores são instalados no teto e as grelhas de exaustão na porção inferior das paredes, e outro em que o ar é insuflado por difusores inferiores e extraído por grelhas superiores, conforme ilustrado na Figura 2.9.

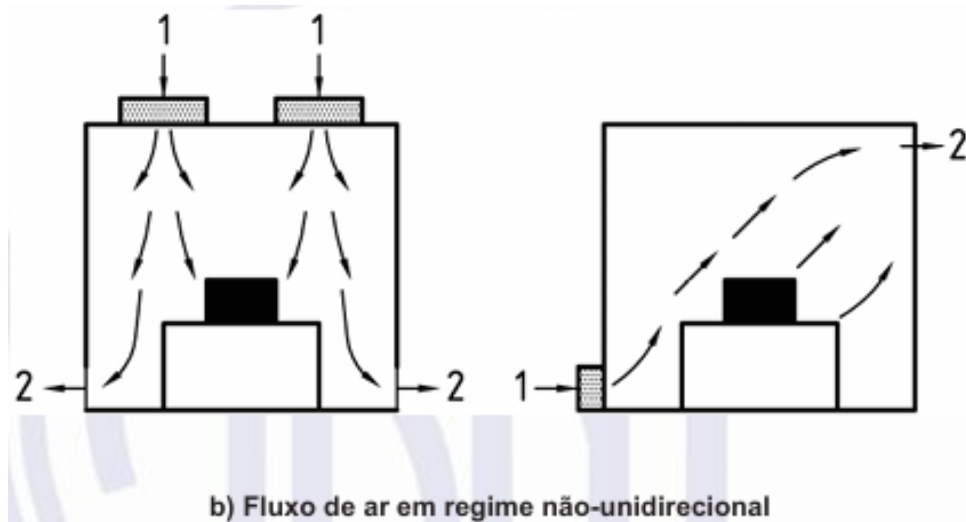


FIGURA 2.9 – Esquema de fluxo de ar em regime não unidirecional (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

Enquanto a taxa de desempenho de uma sala operando com fluxo unidirecional é medida pela velocidade média do fluxo de ar, expressa em metros por segundo (m/s), a eficiência de uma sala com fluxo não unidirecional é avaliada pela taxa de trocas de ar por hora (ACH), que indica quantas vezes o volume total de ar do ambiente é renovado em uma hora. As indicações da norma brasileira para esses parâmetros de acordo com a classe de limpeza da sala são mostradas na Figura 2.10.

Tabela B.2 – Exemplos de salas limpas para microeletrônica

Classe de limpeza do ar <sup>a</sup> (Classe ISO) Em operação	Regime do fluxo de ar <sup>b</sup>	Velocidade média do fluxo de ar <sup>c</sup> m/s	Trocas de ar por hora <sup>d</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h	Exemplos de aplicações
2	U	0,3 a 0,5	n.a.	Fotolitografia, zona de processamento de semicondutores <sup>e</sup>
3	U	0,3 a 0,5	n.a.	Zonas de trabalho, zona de processamento de semicondutores
4	U	0,3 a 0,5	n.a.	Zonas de trabalho, processamento de máscaras de multicamadas ( <i>multilayer</i> ), fabricação de <i>compact discs</i> (CD), zona de serviço em semicondutores, zona de utilidades
5	U	0,2 a 0,5	n.a.	Zonas de trabalho, processamento de máscaras de multicamadas ( <i>multilayer</i> ), fabricação de <i>compact discs</i> (CD), zona de serviço em semicondutores, zona de utilidades
6	N ou M <sup>f</sup>	n.a.	70 a 160	Zonas de utilidades, processamento de multicamadas, zonas de serviço para semicondutores
7	N ou M	n.a.	30 a 70	Zonas de serviço, tratamento de superfícies
8	N ou M	n.a.	10 a 20	Zonas de serviço

NOTA n.a = não aplicável.

<sup>a</sup> Estado de ocupação associado à classe ISO, que deve ser definido e acordado previamente ao estabelecimento das condições ótimas de projeto.

<sup>b</sup> Quando o regime de fluxo de ar é relacionado, são indicadas as características de fluxo para salas limpas desta classe: U = unidirecional; N = não-unidirecional; M = misto (combinação de U e N).

<sup>c</sup> A velocidade média de fluxo do ar é o parâmetro pelo qual normalmente se especifica o fluxo de ar unidirecional em salas limpas. As exigências para a velocidade do fluxo de ar unidirecional dependem de parâmetros locais, tais como geometria e correntes térmicas. Não é necessariamente a velocidade de face do filtro.

<sup>d</sup> O número de trocas por hora é o parâmetro pelo qual os fluxos de ar não-unidirecional e misto são especificados. O número de trocas de ar sugeridos são para uma sala de 3,0 m de altura.

<sup>e</sup> Devem ser consideradas técnicas de barreira intransponível.

<sup>f</sup> Com separação efetiva entre a fonte de contaminação e zonas a serem protegidas. Pode ser por meio de barreira física ou de fluxo de ar.

FIGURA 2.10 – Indicação dos parâmetros recomendados para fluxo de ar por classe de limpeza (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019)

### 2.3.3 Temperatura

No contexto de salas limpas, mesmo na presença de um sistema eficiente de controle do particulado, a simples presença de pessoas e equipamentos no ambiente pode gerar, em contato com o ar insuflado, gradientes de temperatura que, por sua vez, podem ocasionar

a agregação de matéria particulada, afetando a contagem de partículas em suspensão. Ademais, dependendo da atividade-fim realizada na sala limpa, pode ser necessário um controle de temperatura mais restrito. Não é incomum que algumas instalações incluam dispositivos capazes de alertar sobre variações bruscas de temperatura no ambiente (USELLER, 1969).

O controle de temperatura em uma sala limpa é realizado conforme os objetivos específicos de uso da infraestrutura. Embora não seja obrigatório para que o ambiente seja classificado como “sala limpa”, o controle térmico é considerado importante. Além disso, é possível realizar ensaios para verificar a capacidade do sistema de tratamento de ar em manter a temperatura dentro dos limites estipulados pela norma ABNT NBR ISO 14644-3:2019. Dois tipos de ensaios podem ser empregados para essa finalidade: o ensaio geral e o ensaio completo de temperatura (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019b).

O ensaio geral é mais simples e deve ser executado após a conclusão dos testes de uniformidade da vazão do ar e o ajuste completo dos controles do sistema de ar condicionado. Recomenda-se que o ensaio seja realizado somente após o sistema estar em operação e com condições estabilizadas. É conveniente que as medições sejam efetuadas durante, no mínimo, cinco minutos, registrando-se a temperatura a cada minuto. As medições podem ser realizadas por meio de termômetros, dispositivos resistivos para mudança de temperatura ou termistores, desde que possuam certificado de calibração válido e resolução mínima equivalente a 1/5 da faixa de temperatura avaliada (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019b).

Para ambientes que demandam controle térmico mais rigoroso, recomenda-se o ensaio completo de temperatura, que apresenta critérios mais detalhados. Esse ensaio deve ser realizado, no mínimo, uma hora após o início do funcionamento do sistema de ar condicionado e com condições estabilizadas. Para a execução do ensaio, a área de trabalho é dividida em partes iguais, das quais ao menos duas são selecionadas para a medição. O tempo mínimo de medição e o intervalo entre os registros são os mesmos do ensaio geral (cinco minutos e um minuto, respectivamente). Os requisitos quanto aos instrumentos utilizados também permanecem os mesmos, com a diferença de que, neste ensaio, deve-se observar a distância mínima de 300 mm entre o sensor e as superfícies de teto, paredes ou piso da instalação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019b).

### 2.3.4 Umidade

Nas salas limpas, a umidade relativa do ar constitui um parâmetro fundamental, pois, além dos fatores internos, como processos de evaporação, as condições externas, tais como variações climáticas, exercem forte influência sobre a umidade ambiente. O desvio excessivo da umidade ideal para a sala limpa acarreta riscos: níveis muito baixos favorecem a

geração de cargas eletrostáticas devido ao movimento de pessoas no ambiente, enquanto valores elevados podem promover a corrosão de determinados materiais. Portanto, o controle da umidade relativa é imprescindível para a manutenção da integridade dos processos e equipamentos. Os valores ideais de umidade variam conforme a utilização específica da sala limpa, mas, na ausência de especificações, costuma-se adotar uma faixa típica entre 30% e 65% (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019) (USELLER, 1969).

Assim como no controle térmico, os limites de umidade relativa também são flexíveis e dependem do uso do ambiente, mas sua manutenção adequada é igualmente importante. Para verificar a capacidade do sistema de tratamento de ar em controlar a umidade, é possível realizar ensaios normatizados pela ABNT NBR ISO 14644-3:2019, sendo realizado apenas um tipo de ensaio para essa finalidade (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019b).

Esse ensaio deve ser efetuado após a conclusão dos testes de uniformidade da vazão do ar e o ajuste completo dos controles do sistema de ar condicionado. Recomenda-se que seja realizado somente após o sistema estar em operação e estabilizado. As medições devem ser feitas durante, no mínimo, cinco minutos, sendo comum a execução conjunta com o ensaio de temperatura. Os instrumentos utilizados podem ser sensores de umidade com capacitor dielétrico de filme fino, sensores de ponto de orvalho ou psicrômetros, desde que possuam certificado de calibração válido e resolução mínima correspondente a 1/5 da faixa de umidade desejada (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019b).

### 2.3.5 Certificação

Para garantir a certificação de uma sala limpa — isto é, assegurar que o ambiente atenda aos limites de concentração de partículas por metro cúbico e às demais condições especificadas pelo usuário — é indispensável seguir uma sequência lógica de etapas que se inicia muito antes da execução dos ensaios por empresas especializadas. A primeira etapa consiste em um projeto detalhado e bem fundamentado, no qual os requisitos operacionais e de desempenho sejam claramente definidos e traduzidos em especificações técnicas de projeto, de modo a evitar ambiguidades na fase de implementação.

Durante a construção, devem ser adotados protocolos de construção limpa, prevenindo a introdução de contaminantes na estrutura da sala e nos dutos de ar. Ao término da obra, é obrigatória a realização de uma limpeza profunda de todas as superfícies e sistemas, seguida da verificação funcional do HVAC, assegurando que o sistema de tratamento de ar opere conforme os parâmetros definidos em projeto.

Concluída essa etapa, deve-se proceder à qualificação da instalação, conduzida por empresas certificadas e tecnicamente habilitadas. Nessa fase, são executados os ensaios

de certificação de acordo com a ABNT NBR ISO 14644-3:2019, que compreendem:

- Teste de integridade dos filtros, para verificar a ausência de vazamentos nos filtros HEPA;
- Medição de velocidade e vazão de ar, para confirmar a conformidade com o projeto e a taxa de renovação exigida;
- Medição do diferencial de pressão entre salas, assegurando a manutenção da cascata de pressão positiva;
- Contagem de partículas em suspensão, para comprovar o atendimento aos limites da classe ISO 7;
- Ensaio opcionais, incluindo visualização de fluxo de fumaça, teste de tempo de recuperação, e medições de temperatura e umidade.

Uma vez aprovados todos os ensaios, são emitidos os relatórios técnicos e certificados de conformidade, os quais comprovam o enquadramento da sala à classe de limpeza especificada. Esses certificados devem ser revalidados periodicamente, com frequência definida conforme a classe da instalação — no caso de salas ISO 7, recomenda-se intervalo máximo de 12 meses — mediante repetição dos ensaios de qualificação. Somente após a emissão dos certificados é que a sala pode ser formalmente considerada apta para entrada em operação regular.

## 2.4 Síntese da revisão

A revisão bibliográfica evidenciou lacunas significativas na infraestrutura nacional voltada ao setor aeroespacial, sobretudo quanto à disponibilidade de ambientes controlados adequados às exigências das operações espaciais. Esse cenário reforça a necessidade de investimentos contínuos em modernização, qualificação técnica e ampliação da capacidade dos centros de lançamento brasileiros. O CLA e o CLBI, estruturas complementares e estratégicas, são fundamentais para o avanço do programa espacial nacional. No caso do CLBI, sua capacidade de apoiar missões suborbitais e programas de relevância nacional depende diretamente de uma infraestrutura que atenda aos padrões técnicos e operacionais requeridos. As cargas úteis, por constituírem o núcleo das missões, demandam rigoroso controle de contaminação, já que partículas podem comprometer o desempenho térmico, óptico e elétrico dos equipamentos. Nesse contexto, as salas limpas se tornam indispensáveis, regidas por normas como a ABNT NBR ISO 14644, que define classes de limpeza e procedimentos de ensaio. O projeto arquitetônico e a escolha dos materiais

devem priorizar superfícies de fácil higienização, baixa geração e retenção de partículas e controle de cargas eletrostáticas. Destaca-se também a importância das antecâmaras e da definição criteriosa dos fluxos de entrada e saída de pessoas e materiais, para minimizar o risco de contaminação e preservar as condições internas do ambiente. O sistema de climatização (HVAC) é um componente crítico, responsável por manter o fluxo de ar, a pressão diferencial e a qualidade do ambiente, com filtragem em múltiplas etapas e controle das taxas de renovação. O controle de temperatura e umidade é essencial não apenas para o conforto térmico, mas para evitar falhas eletrônicas, deformações estruturais, corrosão e acúmulo de cargas eletrostáticas. Por fim, verificou-se que a certificação e manutenção de salas limpas dependem de um planejamento detalhado, com ensaios periódicos, calibração de instrumentos e revalidações regulares, garantindo conformidade com as normas e eficiência operacional das instalações.

## 3 Materiais e métodos

Esta seção tem como objetivo apresentar os materiais e os métodos que serão empregados neste trabalho, de modo a alcançar os objetivos estabelecidos na seção 1.

Para o presente estudo, a metodologia foi estruturada em quatro etapas principais: inicialmente, realizou-se a seleção dos estudos de caso, definindo o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e o CLA (Centro de Lançamento de Alcântara) como referências consolidadas em ambientes de preparação de cargas úteis e salas limpas, e o CLBI (Centro de Lançamento da Barreira do Inferno) como objeto de intervenção; em seguida, procedeu-se à análise desses casos de referência, por meio de visitas técnicas, levantamento de informações operacionais e estudo das plantas arquitetônicas disponíveis (como as do CLA), a fim de subsidiar a formulação de diretrizes aplicáveis; na terceira etapa, elaborou-se o diagnóstico do ambiente de intervenção no CLBI, com análise das plantas arquitetônicas atuais em AutoCAD e modelagem tridimensional da situação existente no SketchUp, considerando que o local ainda não opera como área limpa; por fim, a metodologia culminou na elaboração da proposta de adaptação da sala do CLBI, incluindo a planta arquitetônica modificada e o modelo 3D da solução final, permitindo a comparação entre a configuração original e a proposta projetada. Essa metodologia pode ser melhor visualizada pelo fluxograma apresentado na Figura 3.1.

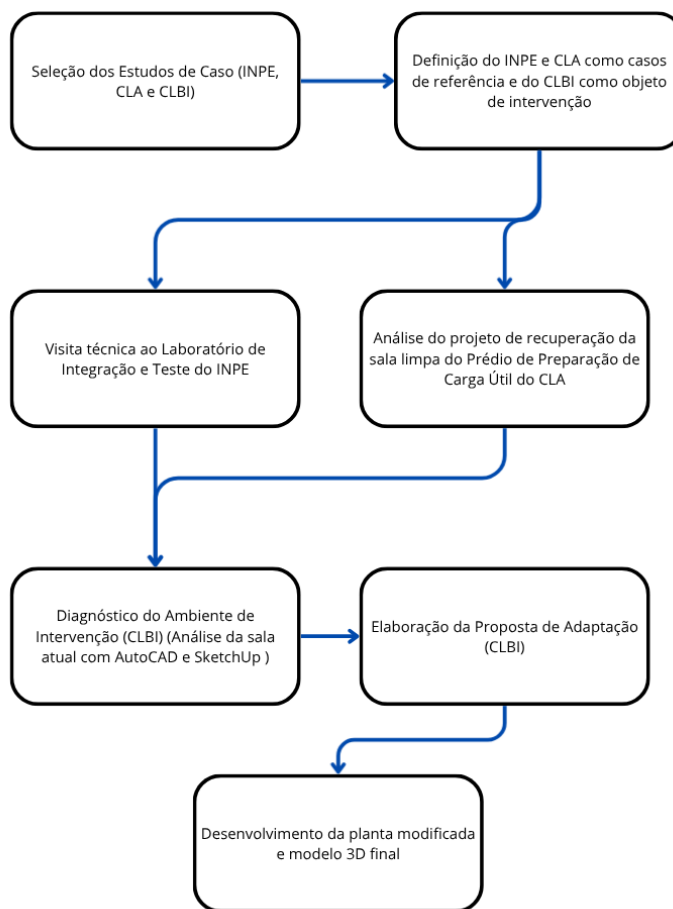


FIGURA 3.1 – Fluxograma representativo da metodologia aplicada ao presente trabalho (Fonte: Arquivo pessoal)

## 3.1 Estudos de caso

Diante da complexidade das arquiteturas de salas limpas, conforme demonstrado nas seções anteriores, optou-se por realizar um estudo de caso dos aspectos arquitetônicos de diferentes infraestruturas no Brasil. Essa abordagem visa subsidiar a elaboração de um documento com diretrizes técnicas para o projeto de salas limpas. Para atingir o objetivo deste trabalho, foram selecionadas as infraestruturas do INPE, do CLA e do CLBI. Nos dois primeiros, já existem salas limpas consolidadas, cujas características contribuirão para a definição das diretrizes. No terceiro, o estudo de caso tem como propósito compreender o ambiente a ser adaptado para funcionamento como sala limpa.

### 3.1.1 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, cuja sede está localizada na cidade de São José dos Campos, em São Paulo, atua nas áreas de pesquisa e exploração espacial,

sendo uma referência nacional no setor. O instituto também é responsável pela produção de parte das cargas úteis destinadas ao CLBI, onde ocorrem os lançamentos.

No campus do INPE em São José dos Campos, encontra-se o Laboratório de Integração e Testes, que constitui o foco deste estudo de caso. Este laboratório é um dos mais avançados do Brasil, sendo responsável por ensaios que simulam as condições enfrentadas pelos satélites desde o lançamento até o término de sua vida útil no espaço. Além disso, o LIT executa as etapas de integração dos satélites, desde o nível de componente até a configuração final.

Atualmente, o LIT dispõe de cinco áreas limpas: no laboratório de soldagem e no de pintura, no hall de teste e no de integração e na lavanderia, onde é realizada a higienização das vestimentas utilizadas nas demais áreas limpas. Durante a visita técnica realizada em maio de 2025, no contexto do desenvolvimento deste trabalho, foram apresentadas três dessas áreas: os dois halls e a lavanderia. De acordo com a classificação ISO, essas áreas limpas estão categorizadas conforme apresentado na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Classificação das áreas limpas do INPE

<b>Ambiente</b>	<b>Classificação ISO</b>
<b>Hall de testes</b>	8
<b>Hall de integração</b>	7
<b>Laboratório de pintura</b>	8
<b>Laboratório de solda</b>	7
<b>Lavanderia</b>	5

### 3.1.2 Centro de Lançamento de Alcântara

O CLA, localizado na cidade de Alcântara, no estado do Maranhão, também subordinado ao DCTA. Nesse contexto, um estudo aprofundado dessa infraestrutura permite uma melhor compreensão da implantação de salas limpas no âmbito das Forças Armadas, especialmente no que se refere à Força Aérea. Essa análise mostra-se particularmente relevante, considerando que uma das motivações deste trabalho é promover a equiparação entre os dois centros de lançamento brasileiros ou, ao menos, viabilizar que o PPCU do CLBI opere de forma autônoma e eficiente.

Atualmente, o CLA conta com duas áreas limpas: uma localizada no PPCU e outra no PPP. De acordo com a classificação ISO, essas áreas limpas apresentam as categorias indicadas na Tabela 3.2. Além disso, foi obtido os documentos relativos ao projeto de revitalização da sala limpa do PPCU para auxiliar no desenvolvimento desse trabalho.

TABELA 3.2 – Classificação das áreas limpas do CLA

Ambiente	Classificação ISO
Prédio de Preparação de Cargas Úteis	7
Prédio de Preparação de Propulsores	8

### 3.1.3 Centro de Lançamento da Barreira do Inferno

O Centro de Lançamento da Barreira do Inferno, localizado na cidade de Parnamirim, no Estado do Rio Grande do Norte, é subordinado ao DCTA. A escolha do CLBI como objeto de estudo de caso justifica-se pelo fato de ser um dos focos centrais deste trabalho. Essa análise mostra-se particularmente relevante para uma compreensão mais precisa do ambiente a ser trabalhado, bem como para a identificação de possíveis singularidades que não seriam perceptíveis apenas por meio das plantas arquitetônicas disponíveis.

É importante frisar que, atualmente, o CLBI não dispõe de áreas limpas em sua infraestrutura e a sala utilizada para a manipulação das cargas úteis é uma sala comum localizada no Prédio de Preparação de Carga Útil.

## 3.2 Softwares

### 3.2.1 AutoCAD

O *AutoCAD* é um *software* amplamente utilizado nas áreas de Engenharia Civil e Arquitetura para a visualização, edição e elaboração de desenhos técnicos e modelos tridimensionais, além de disponibilizar licença educacional. No contexto do estudo de caso descrito na subseção 3.1, a realização de uma visita técnica, por si só, não é suficiente para a compreensão integral dos aspectos arquitetônicos envolvidos. Assim, torna-se necessária a análise das plantas arquitetônicas da sala do CLBI, que será adaptada para funcionamento como área limpa, e da sala limpa do PPCU do CLA, já existente e revitalizada em 2023. Essa análise demanda o uso de um *software* capaz de abrir e manipular os desenhos técnicos fornecidos, o que justifica a escolha do *AutoCAD* neste estudo. Ademais, um dos objetivos finais deste trabalho é apresentar a planta arquitetônica da sala do CLBI com as modificações propostas, de forma a atender aos requisitos normativos de controle da qualidade do ar para sua classificação como área limpa. Para isso, é imprescindível a utilização de um *software* que permita a edição precisa da planta arquitetônica.

## 3.2.2 SketchUp

Para uma melhor visualização tanto do ambiente atualmente disponível no CLBI quanto das alterações sugeridas ao final deste estudo, optou-se pela criação de modelos tridimensionais representando, respectivamente, a configuração original e a proposta com as modificações arquitetônicas recomendadas após a elaboração do relatório com diretrizes para o desenvolvimento do ETP. Para esse fim, escolheu-se utilizar o *SketchUp*, *software* amplamente empregado na elaboração de esboços iniciais de projetos em 3D, que possui uma versão *online* gratuita e oferece uma interface intuitiva e de fácil manuseio.

## 3.3 Plantas arquitetônicas

### 3.3.1 CLA

A planta arquitetônica disponibilizada para este estudo refere-se ao projeto de revitalização da sala limpa do Prédio de Preparação de Cargas Úteis do CLA, realizado em 2023. Trata-se, portanto, de um documento recente, que será utilizado para a análise de aspectos arquitetônicos, bem como para a identificação de peculiaridades específicas do contexto da Força Aérea que possam ser aplicadas à realidade do CLBI. O projeto de revitalização do PPCU foi dividido em três fases principais, sendo que as alterações na área limpa ocorreram exclusivamente na primeira fase. A planta da sala é apresentada na Figura 3.2, enquanto as legendas e tabelas correspondentes encontram-se na Figura 3.3.

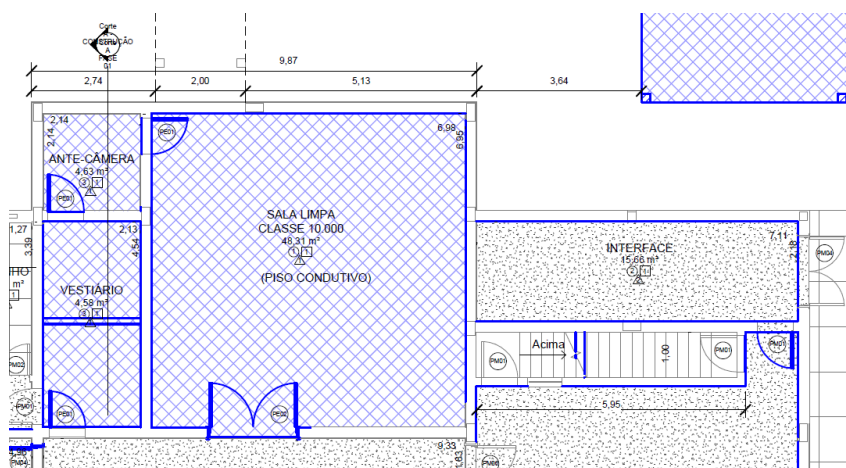


FIGURA 3.2 – Planta de construção do projeto de revitalização da sala limpa do PPCU do CLA (SERINFRA-SJ, 2023)

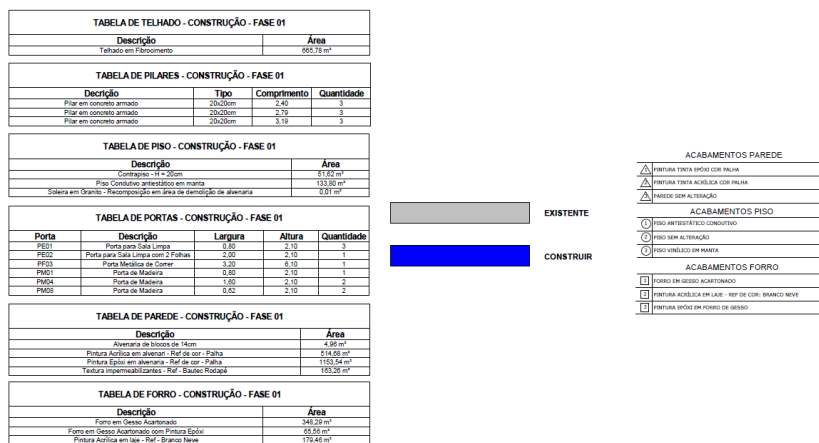


FIGURA 3.3 – Legendas e tabelas relativas a planta da Figura 3.2 (SERINFRA-SJ, 2023)

### 3.3.2 CLBI

A planta arquitetônica utilizada neste estudo corresponde à sala a ser adaptada no Prédio de Preparação de Carga Útil, datada de 2012. Ressalta-se que, por se tratar de um documento anterior, pode haver modificações no ambiente que não estejam refletidas na planta. Esse material será empregado na análise de aspectos arquitetônicos e na identificação de peculiaridades específicas que devem ser consideradas no desenvolvimento do projeto. As plantas com as vistas lateral e frontal, bem como a planta com vista superior, estão apresentadas nas Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente.

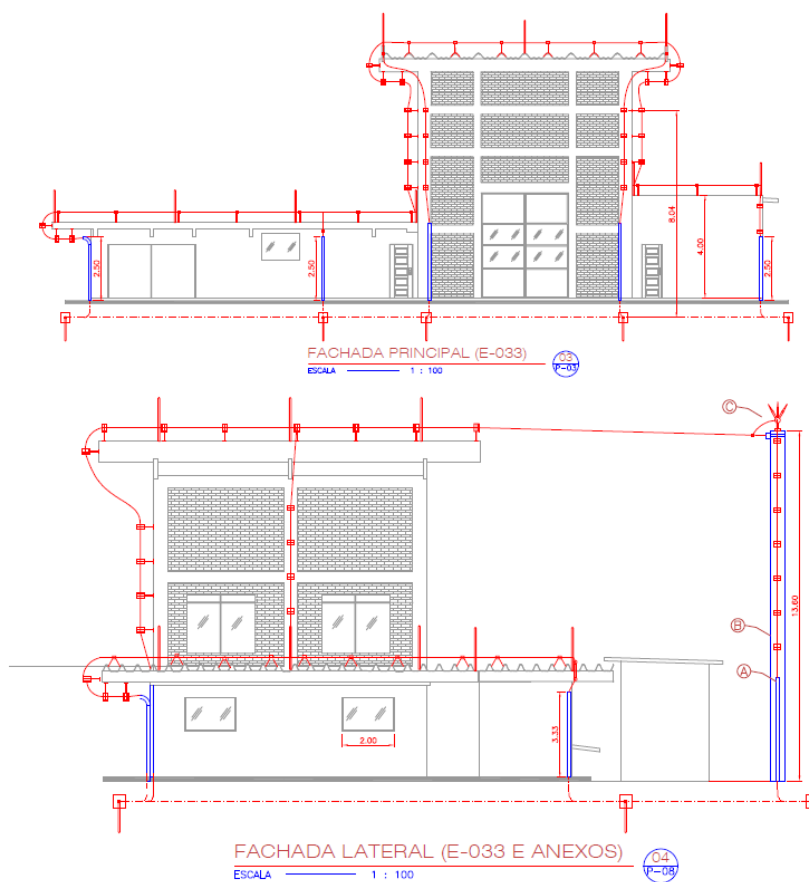


FIGURA 3.4 – Planta com fachadas lateral e frontal da sala a ser adaptada no CLBI (CLBI, 2012)

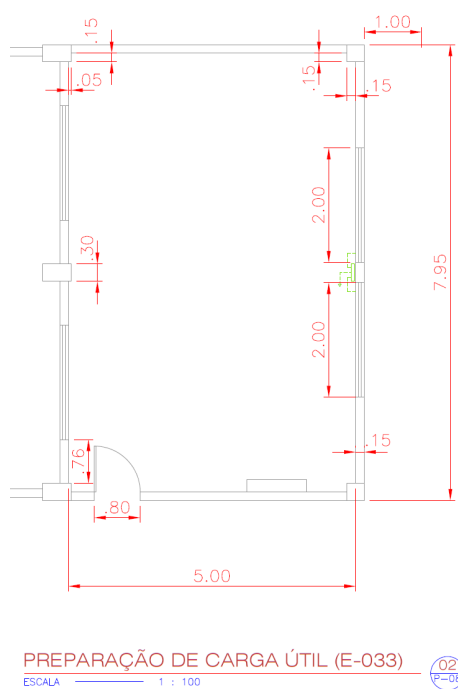


FIGURA 3.5 – Planta com vista superior da sala a ser adaptada no CLBI (CLBI, 2012)

### 3.4 Modelo 3D

Com o objetivo de facilitar a visualização do ambiente, foi gerado um modelo tridimensional da infraestrutura existente, sem o mobiliário. Ao final deste estudo, será elaborado um modelo 3D incorporando todas as alterações sugeridas, permitindo a comparação entre os dois modelos. O modelo da configuração atual do ambiente é apresentado em três vistas distintas, conforme ilustrado nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8.

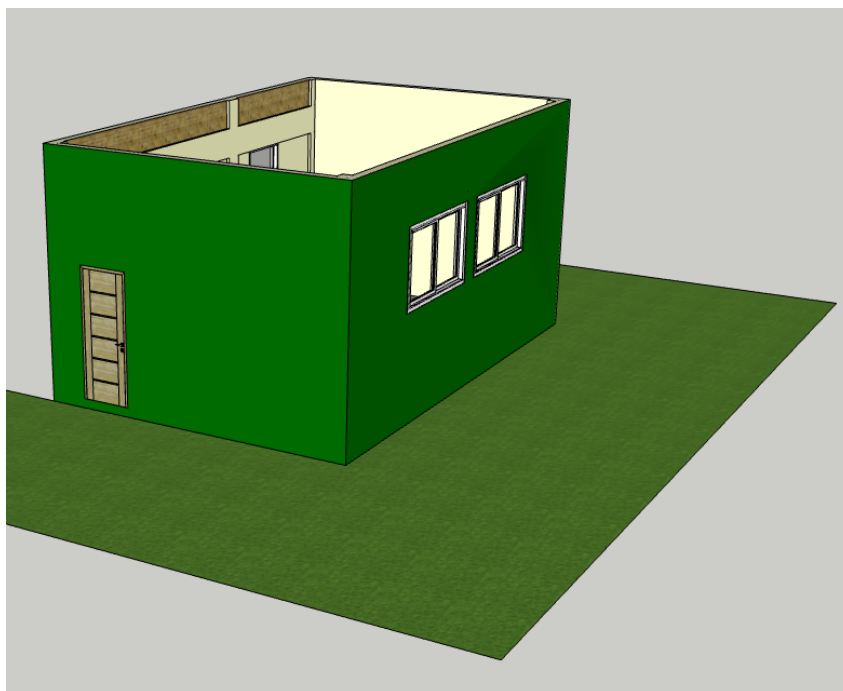


FIGURA 3.6 – Vista 1 do modelo 3D da infraestrutura atual (Fonte: Arquivo Pessoal)

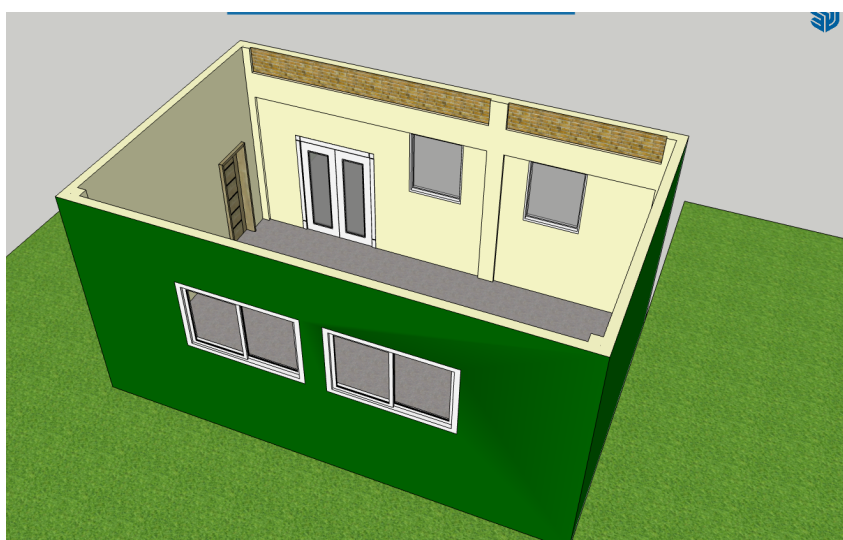


FIGURA 3.7 – Vista 2 do modelo 3D da infraestrutura atual (Fonte: Arquivo Pessoal)

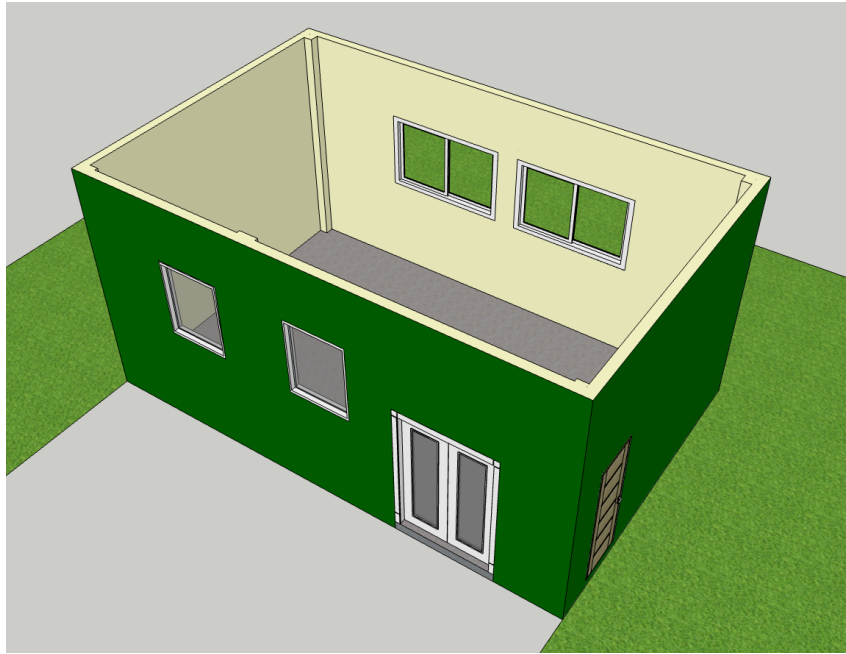


FIGURA 3.8 – Vista 3 do modelo 3D da infraestrutura atual (Fonte: Arquivo Pessoal)

## 4 Resultados e discussões

### 4.1 Estudo de caso - CLBI

Visando auxiliar o CLBI na adaptação de uma sala já existente em suas instalações para uma configuração de sala limpa, será realizado um estudo de caso com o objetivo de definir diretrizes a serem seguidas durante a reforma, bem como apresentar recomendações relacionadas à certificação, operação e manutenção da instalação após a conclusão da obra. Todas as diretrizes e recomendações apresentadas neste estudo foram estruturadas segundo três princípios norteadores: (1) minimização de custos; (2) minimização do tempo de conclusão da obra; e (3) minimização da geração e da introdução de partículas no ambiente.

Atualmente, o CLBI dispõe de uma sala com área de 38,25 m<sup>2</sup>, cujo projeto original não contemplava requisitos específicos de sala limpa, uma vez que essa não era sua finalidade inicial. Para o presente estudo de caso, considera-se como meta a obtenção da Classe ISO 7 de limpeza, conforme a ABNT NBR ISO 14644-1:2019. Essa escolha fundamenta-se no fato de que essa é a classe de limpeza adotada no PPCU do CLA, o que permitiria equiparar a qualidade dos processos entre ambos os centros. Ademais, trata-se de uma classe de limpeza tecnicamente viável no contexto da Força Aérea Brasileira, alinhada aos princípios (1) e (2), por representar uma solução de relação desempenho–custo favorável e com prazos de implantação mais realistas quando comparada a classes mais restritivas.

A sala em questão já é utilizada para atividades de preparação de cargas úteis espaciais e continuará a ser destinada a essa finalidade após a adaptação para sala limpa. As operações realizadas em seu interior envolvem a manipulação e integração de cargas úteis. Conforme discutido na Seção 2, é fundamental que esses ambientes apresentem controle rigoroso de partículas em suspensão, de modo a evitar problemas que possam comprometer a qualidade do projeto ou, em casos mais críticos, o sucesso da missão como um todo, em estrita aderência ao princípio (3) — reduzir ao mínimo a geração e a introdução de partículas no ambiente controlado.

Além disso, organizações internacionais e agências espaciais reconhecem formalmente a relevância das salas limpas para garantir a integridade de missões aeroespaciais. A

NASA, por exemplo, estabelece rigorosos padrões de controle de contaminação para seus satélites e sondas, enfatizando que partículas e contaminantes moleculares podem comprometer sensores, sistemas ópticos e painéis solares. Outro exemplo é a ESA (Agência Espacial Europeia), que adota normas equivalentes para suas instalações de integração e teste. No âmbito nacional, institutos como o INPE também utilizam salas limpas em seus laboratórios de teste de satélites e cargas úteis. Esse arcabouço de boas práticas converge diretamente com o princípio (3), reforçando que o projeto da sala do CLBI deve priorizar soluções que minimizem a contaminação particulada e molecular, ao mesmo tempo em que observa os princípios (1) e (2) para garantir viabilidade orçamentária e cronograma exequível.

#### 4.1.1 Estado atual

É fundamental, para o presente estudo de caso, a realização de uma análise inicial detalhada da instalação existente. Essa etapa constitui um pré-requisito em projetos de adaptação, pois permite identificar as condições construtivas, os materiais de acabamento já empregados e as limitações da infraestrutura disponível, sendo essencial para a definição do escopo das intervenções necessárias ao atendimento da classe de limpeza pretendida.

A sala proposta para adaptação no CLBI é, atualmente, um ambiente comum de 38,25 m<sup>2</sup>, utilizado para a manipulação de cargas úteis, cujas características construtivas não atendem aos requisitos de uma área limpa. O piso é em cerâmica convencional; as paredes são em alvenaria com pintura comum; e o teto é composto por forro modular removível, no qual estão instaladas luminárias fluorescentes padrão.

Os vãos de portas e janelas também utilizam materiais usuais, não específicos para ambientes controlados. O espaço conta com quatro janelas de vidro, com esquadrias em alumínio, e duas portas: uma porta simples de madeira, que conecta a sala ao ambiente externo que circunda o PPCU, e uma porta dupla de vidro, também com esquadrias de alumínio, que liga a sala a um ambiente interno adjacente. Nenhuma delas possui sistemas de vedação hermética, o que inviabiliza o controle de pressão e a estanqueidade do ar exigidos em salas limpas.

O sistema de climatização atualmente existente é composto por aparelhos de ar-condicionado do tipo *split* de parede, sistema que não é adequado ao controle de contaminação, uma vez que não dispõe de filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air), nem de recursos para controle de pressão diferencial e tampouco de taxas de renovação de ar compatíveis com uma sala ISO 7. As instalações elétricas são do tipo convencional, com pontos de iluminação no forro e tomadas em parede, e não há, na área principal da sala, instalações hidráulicas como pias ou pontos de drenagem.

Apesar de se tratar de um ambiente originalmente não projetado como sala limpa, o espaço encontra-se em bom estado de conservação, sem manifestações patológicas aparentes, como fissuras, infiltrações ou destacamentos de revestimento. A configuração atual do ambiente é apresentada nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, e as plantas arquitetônicas originais da edificação, datadas de 2012, são mostradas nas Figuras 3.4 e 3.5.



FIGURA 4.1 – Vista interna 1 da sala (Fonte: Arquivo Pessoal)



FIGURA 4.2 – Vista interna 2 da sala (Fonte: Arquivo Pessoal)



FIGURA 4.3 – Vista interna 3 da sala (Fonte: Arquivo Pessoal)

## 4.1.2 Diretrizes para reforma

### 4.1.2.1 Materiais de acabamento

Como já amplamente discutido ao longo deste trabalho, toda a concepção, operação e manutenção de uma sala limpa baseia-se na minimização da geração e retenção de partículas. Dessa forma, os materiais de construção e acabamento devem ser selecionados de modo a atender aos requisitos de limpeza do ambiente, considerando, entre outros fatores, a classe de limpeza desejada, os efeitos de abrasão e impacto, o plano de higienização e a resistência a agentes químicos ou microbiológicos.

Idealmente, os materiais escolhidos não devem apresentar tendência à fragmentação ou liberação de partículas, tampouco possuir superfícies ásperas ou porosas. Quando a utilização de materiais com essas características for inevitável, recomenda-se o uso de revestimentos adequados que garantam a estanqueidade e facilidade de limpeza. A escolha dos materiais deve ser feita em conjunto com a definição dos produtos e procedimentos de limpeza, uma vez que essa atividade é recorrente durante a operação da sala.

Como será abordado em subseção posterior, neste estudo recomenda-se que as antecâmaras destinadas à entrada de pessoas e materiais sejam implantadas dentro do ambiente já existente, em vez de construídas externamente. Assim, cabe destacar os métodos construtivos aplicáveis, conforme as normas vigentes no Brasil:

- **Utilização de sistemas pré-fabricados:** construção em alvenaria simples ou painéis de *drywall*, ambos com posterior aplicação de revestimento superficial adequado.
- **Montagem no local:** utilização de elementos pré-fabricados e sistemas modulares de painéis prontos para uso no momento da instalação.

A definição do método construtivo mais apropriado deve ocorrer durante a etapa de pré-projeto, por meio de uma análise criteriosa dos requisitos do ambiente, incluindo capacidade estrutural, tipo de acabamento desejado, altura disponível, facilidade de movimentação de equipamentos, restrições de manutenção e custos associados.

No que se refere ao forro da sala, é essencial que este seja completamente vedado, evitando qualquer forma de infiltração ou contaminação do ambiente interno. Além disso, filtros de ar, quadros de fixação, caixas de filtragem e difusores instalados no teto devem ser devidamente selados. O número de passagens e aberturas deve ser reduzido ao mínimo necessário, evitando perturbações no fluxo de ar projetado.

As paredes, por sua vez, devem apresentar elevada resistência ao impacto, considerando o tráfego frequente de pessoas e materiais, que pode ocasionar colisões e consequente geração de partículas. Recomenda-se a utilização de tiras de borracha ou barras de proteção

nas superfícies mais suscetíveis a danos.

Para os pisos, devem ser priorizados materiais condutivos e antiderrapantes, capazes de suportar cargas estáticas e dinâmicas, contribuindo para a segurança operacional e o controle de eletricidade estática.

Ao término da execução da obra, todos os acabamentos devem apresentar superfície lisa, não porosa, isenta de fissuras, saliências ou quaisquer características que favoreçam o acúmulo de partículas ou dificultem a limpeza. Os cantos vivos devem ser minimizados, adotando-se, sempre que economicamente viável, cantos e junções arredondadas, especialmente nas interseções parede-parede e parede-piso. A escolha dos materiais deve considerar não apenas o custo inicial, mas também sua vida útil, uma vez que a manutenção da classe de limpeza pode exigir intervenções periódicas de reparo e substituição. Com base nas literaturas analisadas, as recomendações de materiais de acabamento estão apresentadas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Materiais de acabamento recomendados pela literatura técnica

<b>Tipo de superfície</b>	<b>Materiais de acabamento</b>
Paredes e forros	Chapas de aço inox, alumínio anodizado, chapas ou revestimentos poliméricos.
Pisos	Chapas ou revestimentos poliméricos, placas com juntas apropriadas.

#### 4.1.2.2 Portas e janelas

Os cuidados aplicados às portas e janelas seguem os mesmos princípios adotados para os acabamentos de superfícies: utilização de materiais que minimizem a geração e o acúmulo de partículas, apresentem boa resistência a impactos e abrasão, e facilitem os processos de limpeza. Dependendo da localização, pode ser necessária a selagem total dessas estruturas.

As juntas e arremates dos painéis devem ser lisos e arredondados. Quando houver necessidade de instalação de visores nas portas, o que é recomendado, conforme será abordado na seção referente ao fluxo de pessoas, estes devem ser fixos, preferencialmente do tipo vidro duplo com selagem estanque.

Embora o uso de venezianas e persianas não seja recomendado, sua instalação pode ser admitida na parte externa da sala limpa. As molduras dos vidros devem possuir superfícies lisas, e tanto portas quanto janelas devem apresentar o menor número possível de áreas horizontais que favoreçam o acúmulo de partículas. Sempre que possível, deve-se evitar a presença de soleiras. Por fim, recomenda-se a utilização de maçanetas lisas, sem reentrâncias ou saliências, facilitando a limpeza e reduzindo o risco de contaminação.

### 4.1.2.3 Controle de ar

Inicialmente, é importante destacar que o sistema de ar-condicionado a ser utilizado neste ambiente é significativamente mais complexo do que sistemas convencionais de climatização. Trata-se de um Sistema de HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) projetado especificamente para salas limpas, o qual deve atender a requisitos rigorosos de controle de partículas, pressão, temperatura e umidade. Por esse motivo, sua concepção deve ser precedida de estudos específicos elaborados por empresa especializada, responsável pelo dimensionamento técnico do sistema e pela definição de suas particularidades de operação. Esta subseção, portanto, apresenta apenas diretrizes e parâmetros iniciais a serem considerados nessa análise. Ressalta-se ainda que, em razão da robustez do sistema, poderá ser necessária a construção de uma sala de máquinas para abrigar os equipamentos associados ao tratamento de ar.

Considerando que o ambiente em estudo deverá atingir a Classe ISO 7 de limpeza, não se faz necessária a adoção de fluxo de ar unidirecional — normalmente recomendado apenas para salas ISO 5 ou superiores, conforme citado anteriormente. Assim, recomenda-se a utilização de um fluxo de ar não unidirecional, cujo desempenho é expresso pela taxa de renovação de ar por hora (ACH). A faixa indicada para ambientes ISO 7 é entre 30 a  $70 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot h$  considerando uma sala de 3 m de altura, conforme mostrado na Figura 4.4.

**Tabela B.2 – Exemplos de salas limpas para microeletrônica**

Classe de limpeza do ar <sup>a</sup> (Classe ISO) Em operação	Regime do fluxo de ar <sup>b</sup>	Velocidade média do fluxo de ar <sup>c</sup> m/s	Trocas de ar por hora <sup>d</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h	Exemplos de aplicações
2	U	0,3 a 0,5	n.a.	Fotolitografia, zona de processamento de semicondutores <sup>e</sup>
3	U	0,3 a 0,5	n.a.	Zonas de trabalho, zona de processamento de semicondutores
4	U	0,3 a 0,5	n.a.	Zonas de trabalho, processamento de máscaras de multicamadas ( <i>multilayer</i> ), fabricação de <i>compact discs</i> (CD), zona de serviço em semicondutores, zona de utilidades
5	U	0,2 a 0,5	n.a.	Zonas de trabalho, processamento de máscaras de multicamadas ( <i>multilayer</i> ), fabricação de <i>compact discs</i> (CD), zona de serviço em semi condutores, zona de utilidades
6	N ou M <sup>f</sup>	n.a.	70 a 160	Zonas de utilidades, processamento de multicamadas, zonas de serviço para semicondutores
7	N ou M	n.a.	30 a 70	Zonas de serviço, tratamento de superfícies
8	N ou M	n.a.	10 a 20	Zonas de serviço

NOTA n.a = não aplicável.

<sup>a</sup> Estado de ocupação associado à classe ISO, que deve ser definido e acordado previamente ao estabelecimento das condições ótimas de projeto.

<sup>b</sup> Quando o regime de fluxo de ar é relacionado, são indicadas as características de fluxo para salas limpas desta classe: U = unidirecional; N = não-unidirecional; M = misto (combinação de U e N).

<sup>c</sup> A velocidade média de fluxo do ar é o parâmetro pelo qual normalmente se especifica o fluxo de ar unidirecional em salas limpas. As exigências para a velocidade do fluxo de ar unidirecional dependem de parâmetros locais, tais como geometria e correntes térmicas. Não é necessariamente a velocidade de face do filtro.

<sup>d</sup> O número de trocas por hora é o parâmetro pelo qual os fluxos de ar não-unidirecional e misto são especificados. O número de trocas de ar sugeridos são para uma sala de 3,0 m de altura.

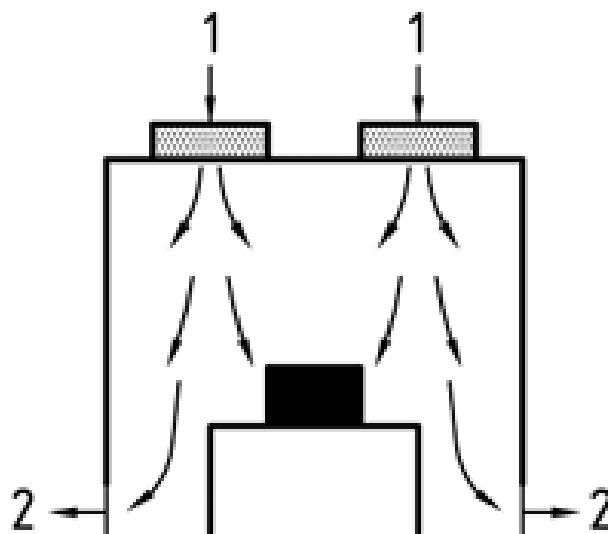
<sup>e</sup> Devem ser consideradas técnicas de barreira intransponível.

<sup>f</sup> Com separação efetiva entre a fonte de contaminação e zonas a serem protegidas. Pode ser por meio de barreira física ou de fluxo de ar.

FIGURA 4.4 – Indicação do valor recomendado de ACH para uma sala com classe de limpeza ISO 7 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019)

Para esse projeto, recomenda-se, por usualidade e boa prática de engenharia, a insuflação superior combinada com extração inferior, como mostrado na Figura 4.5. Além disso, para viabilizar essa configuração, serão necessárias adaptações arquitetônicas específicas, especialmente para a instalação das grelhas de exaustão na faixa inferior das paredes.

Além disso, para garantir a qualidade do ar insuflado na sala limpa, recomenda-se a

FIGURA 4.5 – Recomendação de *layout* para o fluxo não-unidirecional utilizado

adoção de um sistema de filtração em três etapas, conforme já mencionado anteriormente. Para a etapa de pré-filtragem, recomenda-se a utilização de filtros de baixa eficiência, uma vez que essa fase tem como objetivo principal a retenção de partículas de maior tamanho, oferecendo uma solução de bom custo-benefício ao proteger os estágios subsequentes do sistema. Na etapa de filtração secundária, propõe-se a adoção de filtros de alta eficiência — ainda que seja tecnicamente possível utilizar filtros de média eficiência —, optando-se pelos de maior desempenho a fim de reduzir a carga de partículas sobre os filtros finais, prolongando sua vida útil e reduzindo custos de manutenção. Por fim, para a filtração final, propõe-se neste estudo a utilização de filtros do tipo HEPA, os quais apresentam eficiência superior a 99% para partículas com diâmetro igual ou superior a  $0,3 \mu\text{m}$ , conforme indicado na literatura. Embora filtros ULPA (*Ultra Low Penetration Air*) também possam ser empregados nessa etapa, sua aplicação é mais comum em ambientes com classes de limpeza mais restritivas, como ISO 4 ou superior, não se justificando para a Classe ISO 7 adotada neste projeto.

Outro parâmetro relevante a ser considerado na adaptação da sala é o conceito de segregação por pressão positiva. Esse critério é fundamental para assegurar que a sala limpa opere com pressão estática superior à das áreas adjacentes, como corredores e zonas de apoio, estabelecendo uma barreira aerodinâmica que inibe a infiltração de ar potencialmente contaminado. De acordo com as normas vigentes, recomenda-se a adoção de um diferencial de pressão entre o ambiente controlado e as áreas vizinhas na faixa de 5 Pa a 20 Pa. Essa faixa é considerada adequada por proporcionar um equilíbrio entre a prevenção de contrafluxo de ar e a manutenção de condições operacionais seguras, sem comprometer a abertura de portas ou gerar turbulência excessiva no interior da sala limpa.

Para garantir a segregação por pressão positiva, o sistema HVAC deve ser projetado de modo que o volume de ar insuflado na sala limpa seja ligeiramente superior ao volume de

ar removido pelos pontos de retorno, promovendo a pressurização contínua do ambiente. Esse excedente controlado de ar assegura que eventuais vazamentos ocorram sempre no sentido de dentro para fora, impedindo a infiltração de partículas provenientes de áreas menos controladas. Para a manutenção eficaz desse gradiente de pressão, é imprescindível que as antecâmaras — tanto de acesso de pessoal quanto de materiais — também sejam atendidas pelo sistema de tratamento de ar, recebendo ar filtrado e pressurizado. Dessa forma, estabelece-se a chamada cascata de pressão, na qual a zona limpa principal (ISO 7) opera com pressão superior à das antecâmaras (ISO 8), que, por sua vez, mantém pressão superior à do ambiente externo. Essa configuração é essencial para preservar a integridade do ambiente limpo, evitando o contrafluxo de ar e reduzindo o risco de contaminação cruzada.

Como recomendações adicionais, destaca-se a importância da utilização de filtros provisórios durante a fase de obra, com o objetivo de evitar a contaminação precoce dos filtros finais pela poeira gerada nas atividades de construção e acabamento. Recomenda-se, também, que a instalação dos filtros HEPA seja realizada apenas na etapa final da obra, de modo a preservar sua integridade e desempenho, e exclusivamente em dutos previamente limpos, inspecionados e aprovados quanto à ausência de partículas residuais e vazamentos.

No que se refere à verificação do sistema de tratamento de ar, recomenda-se que, após a conclusão da instalação e antes do início da operação regular da sala limpa, sejam realizados ensaios de desempenho com o objetivo de validar a eficácia do sistema de controle ambiental. Em conformidade com as boas práticas descritas na literatura técnica e nas normas aplicáveis, destacam-se os seguintes ensaios recomendados:

- **Ensaio de fluxo de ar:** verifica a conformidade das vazões de insuflamento com os valores de projeto, bem como a uniformidade do padrão de distribuição do ar no interior da sala;
- **Ensaio de integridade dos filtros finais:** avalia a existência de possíveis vazamentos, falhas de vedação ou danos nos filtros HEPA instalados, garantindo que o ar insuflado esteja devidamente filtrado;
- **Ensaio de diferencial de pressão:** comprova a manutenção da pressão positiva da sala limpa em relação às áreas adjacentes, assegurando o fluxo de ar sempre do ambiente mais limpo para o menos limpo;
- **Ensaio de recuperação:** determina o tempo necessário para que a sala retorne ao nível especificado de classe de limpeza após a introdução controlada de partículas.

Embora tais ensaios não sejam obrigatórios para a classificação formal do ambiente como sala limpa, são essenciais para demonstrar a consistência operacional e a confiabilidade do sistema de controle de contaminação adotado. Além disso, devem ser conduzidos

por equipe qualificada, utilizando equipamentos calibrados e procedimentos rastreáveis, sendo os resultados devidamente registrados em relatórios técnicos que integrem a documentação de validação inicial da instalação.

Por fim, ainda que a adoção do regime de fluxo de ar não unidirecional tenha sido considerada adequada para atender aos requisitos de Classe ISO 7 estabelecidos para este projeto, registra-se a possibilidade de implementação futura de um sistema de fluxo misto — combinação de fluxo unidirecional e não unidirecional —, caso seja identificada a necessidade de obtenção de uma classe de limpeza mais restritiva (ISO 5 ou superior) em áreas específicas do ambiente. Essa solução é tecnicamente viável e pode representar uma alternativa economicamente mais favorável em um cenário de modernização progressiva do sistema de tratamento de ar, sem a necessidade de reformulação completa da instalação existente.

#### 4.1.2.4 Fluxo de pessoas e materiais

Para a adequação completa da sala existente no CLBI à configuração de uma sala limpa de Classe ISO 7, recomenda-se a construção de duas antecâmaras: uma destinada à entrada e saída de pessoas e outra exclusiva para o fluxo de materiais, a fim de evitar contaminação cruzada entre ambos. Após deliberação com os servidores do CLBI, chegou-se ao consenso de que a área útil da sala pode ser reduzida sem prejuízo às atividades previstas. Assim, orienta-se que ambas as antecâmaras sejam implantadas no interior do ambiente já existente, em vez de construídas externamente, de modo a manter o escopo do projeto como uma reforma e, simultaneamente, reduzir os custos associados. Sugere-se que a antecâmara para fluxo de pessoal tenha dimensão de  $4,8\text{m}^2$  ( $4,8\text{m} \times 1\text{m}$ ) e seja construída aproveitando a porta de entrada já existente, que liga o ambiente externo à sala. Já a antecâmara para entrada de materiais sugere-se que possua  $8\text{m}^2$  ( $4\text{m} \times 2\text{m}$ ) e que seja construída na parede que liga a sala a ser adaptada e a sala adjacente, para, caso seja necessário, aproveitar parte da área útil desse ambiente adjacente.

Visando minimizar a criação de novas zonas térmicas, bem como reduzir custos e tempo de implantação, sugere-se adotar uma separação apenas temporal entre a entrada e a saída de pessoas, por meio da instalação de um sistema de intertravamento eletrônico nas portas. Esse sistema impede que indivíduos que estejam ingressando e aqueles que estejam saindo ocupem simultaneamente o mesmo espaço na antecâmara.

Na antecâmara destinada ao acesso de pessoal, devem ser instalados armários para armazenamento das vestimentas utilizadas na zona limpa e, em caso de utilização de trajés descartáveis, uma área específica para o descarte após a saída da sala. Recomenda-se, ainda, a instalação de tapetes adesivos na porta de acesso, com o objetivo de reduzir a transferência de partículas para o piso.

Devem ser previstas instalações para assepsia dos usuários, incluindo, no mínimo, uma pia de acionamento não manual, dispensers de sabão líquido e álcool em gel, além de, opcionalmente, um espelho de corpo inteiro, que possibilite a verificação da paramentação adequada antes do ingresso na área controlada. Recomenda-se, também, a delimitação entre a zona suja e a zona limpa dentro da antecâmara, a fim de evitar contaminações cruzadas. Essa separação pode ser implementada por meio de uma demarcação no piso, indicando visualmente o limite de acesso, ou pela instalação de um banco de transição, que permita ao usuário sentar-se e realizar a troca de calçados ou o calçamento de pró-pés descartáveis antes de adentrar a zona limpa. Por fim, recomenda-se que o processo de entrada de pessoas siga o esquema apresentado na Figura 4.6.

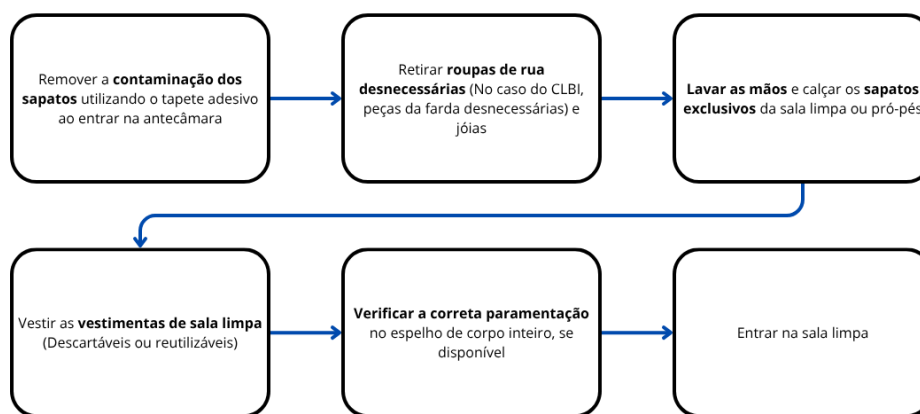


FIGURA 4.6 – Esquemática do processo de paramentação de pessoas para entrada na zona limpa (Fonte: Arquivo pessoal)

Para o fluxo de materiais, propõe-se a construção de uma antecâmara com duas portas amplas: uma conectando o ambiente externo à antecâmara e outra ligando a antecâmara à zona limpa. Essas portas não devem ser abertas simultaneamente; portanto, recomenda-se o uso de sinalização luminosa que indique o estado de abertura de cada uma. Diferentemente da antecâmara de pessoal, essas portas não devem possuir sistema de intertravamento eletrônico, de modo que possam ser utilizadas como saídas de emergência em eventuais situações que exijam evacuação rápida da zona limpa.

O fluxo de entrada de materiais deve seguir o esquema apresentado na Figura 4.7. As embalagens externas consideradas “suja” — ou seja, com potencial de gerar partículas em suspensão — devem ser removidas antes da introdução dos materiais na antecâmara. Sempre que possível, recomenda-se que os fornecedores utilizem embalagens adequadas ao ambiente controlado. Embora a norma e a literatura técnica indiquem a presença de uma bancada que separe fisicamente o “lado sujo” do “lado limpo” da antecâmara, igual ao sugerido para a entrada de pessoal, porém, após consulta aos funcionários do CLBI concluiu-se que esse *layout* não é viável, devido ao grande volume dos materiais a serem

manipulados. Ainda assim, deve-se manter o princípio de separação entre zonas e de progressão da limpeza.

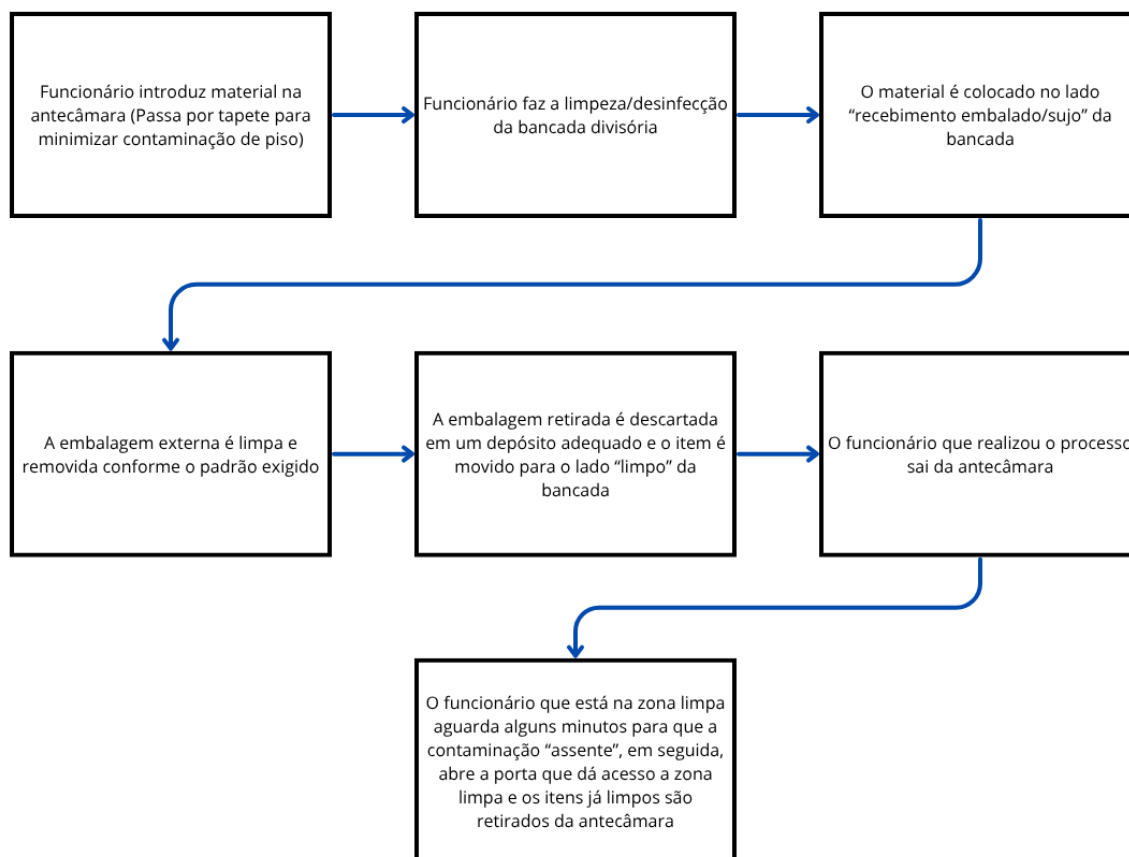


FIGURA 4.7 – Esquemática do fluxo de entrada de materiais na zona limpa (Fonte: Arquivo pessoal)

O ideal seria que os próprios fornecedores produzissem os materiais destinados ao PPCU em salas limpas de padrão equivalente. Contudo, considerando que isso nem sempre é possível, recomenda-se, ao menos, que as embalagens sejam adequadas ao ambiente controlado, evitando-se o uso de papelão — material que libera grande quantidade de fibras. Caso não seja possível substituí-lo, tais embalagens não devem ingressar na antecâmara.

Como recomendação final referente ao fluxo de materiais, propõe-se o armazenamento de itens de uso recorrente dentro da própria zona limpa, de modo a minimizar a necessidade de repetição do processo de entrada desses materiais.

Por fim, com o intuito de atender às recomendações normativas e reduzir o fluxo desnecessário de pessoas no interior da sala limpa, recomenda-se a instalação de uma janela de observação próxima às mesas de trabalho, permitindo o acompanhamento das atividades internas sem a necessidade de entrada de observadores. Caso haja necessidade de sigilo em determinadas operações, a janela pode ser equipada com uma persiana instalada na

face externa da sala limpa.

#### 4.1.2.5 Instalações prediais

Não se aprofundará, neste trabalho, nas especificações detalhadas das instalações prediais, visto que essas devem ser analisadas por um profissional especializado. No entanto, ressalta-se a necessidade de que o dimensionamento das instalações seja realizado de modo a suportar adequadamente o sistema de ar-condicionado e de filtragem a ser adotado. Recomenda-se, ainda, a utilização de forro falso para permitir o acesso a dutos e demais serviços, bem como para integrar filtros terminais e luminárias embutidas, garantindo que todos os elementos sejam devidamente vedados, a fim de minimizar possíveis vazamentos de ar.

Ademais, é essencial a implementação de um sistema de prevenção e controle de eletricidade estática. Todos os materiais de construção e acabamento devem ser condutivos e devidamente aterrados, de forma a dissipar cargas eletrostáticas e manter a resistência elétrica dentro de uma faixa segura — tipicamente entre  $10^6$  e  $10^9 \Omega \cdot cm$  —, prevenindo riscos ao pessoal e descargas que possam comprometer os processos realizados no ambiente.

Por fim, para otimizar as etapas de operação e limpeza, recomenda-se a instalação de pontos adicionais de água nas antecâmaras destinadas à entrada de pessoas e de materiais, facilitando a higienização desses espaços. Sugere-se, também, a inclusão de novos pontos de energia na sala, caso seja necessária a melhoria da iluminação para a execução das atividades, garantindo, entretanto, que sua disposição e detalhamento não criem nichos de acúmulo de partículas nem dificultem a limpeza. Além disso, recomenda-se a substituição das luminárias existentes por modelos selados e embutidos — ou rasantes ao forro — devidamente integrados ao sistema e com vedação adequada, reduzindo infiltrações e minimizando a retenção de partículas em superfícies expostas.

#### 4.1.2.6 Mobiliário e equipamentos

Inicialmente, em deliberação com os usuários do ambiente, identificou-se a necessidade de instalação de uma bancada de trabalho com assentos, de pelo menos um armário destinado ao armazenamento de ferramentas e de uma área útil livre para a manipulação de cargas de grande volume. Além disso, recomenda-se a instalação, na zona limpa, de um total de 13 contadores de partículas, bem como de termohigrômetros — recomenda-se, no mínimo, um em cada antecâmara e um na zona limpa —, visando manter o monitoramento contínuo dos níveis de contaminação da sala. Como as antecâmaras constituem ambientes distintos da zona limpa, a quantidade de pontos de medição foi definida separadamente

para cada setor: três pontos para a antecâmara de pessoal (área de 4,8 m<sup>2</sup>), quatro pontos para a antecâmara de materiais (área de 8 m<sup>2</sup>) e seis pontos para a zona limpa (área de 20,84 m<sup>2</sup>). Esses equipamentos devem ser distribuídos ao longo do ambiente em pontos estrategicamente selecionados, de forma a representar adequadamente as condições gerais da sala e permitir o monitoramento contínuo de seu desempenho.

Quanto ao *layout* do mobiliário, considerou-se uma configuração que não comprometa o fluxo de ar, facilite a limpeza e minimize a existência de cantos vivos ou áreas suscetíveis ao acúmulo de partículas. Dessa forma, recomenda-se que a mesa de trabalho seja posicionada na parede oposta à porta de entrada de pessoal, uma vez que essa é a única disposição que permite a instalação de uma janela de observação ao lado da mesa, possibilitando que visitantes acompanhem, a partir da sala adjacente, as atividades realizadas na zona limpa.

Sugere-se que o armário de ferramentas seja instalado próximo à bancada de trabalho, na mesma parede, a fim de reduzir a distância percorrida entre o ponto de entrada de materiais e o local de armazenamento de ferramentas, otimizando o fluxo operacional.

Embora a localização exata dos medidores não tenha sido previamente definida, é recomendado, em função da simetria da antecâmara de materiais, que os pontos sejam posicionados nos encontros de paredes, garantindo uma cobertura homogênea do ambiente. Na antecâmara de pessoal, por sua vez, os medidores podem ser dispostos ao longo da parede, igualmente espaçados, iniciando-se a partir do ponto de acesso. Já na zona limpa, sugere-se a distribuição também de forma equidistante ao longo do perímetro, porém com prioridade para a instalação de um ponto de medição próximo a cada porta de ligação com as antecâmaras e de um ponto próximo às áreas de trabalho — a bancada e o setor destinado à manipulação de cargas de grande porte. Os pontos remanescentes podem ser alocados conforme necessidade operacional ou conforme indicado pelo plano de monitoramento ambiental.

Além disso, os materiais utilizados na fabricação dos mobiliários devem seguir as mesmas recomendações aplicáveis aos materiais de acabamento das paredes, tetos e pisos. Dessa forma, devem apresentar superfícies lisas, contínuas e não porosas, evitando-se, sempre que possível, a presença de juntas, fendas, rebites ou costuras.

O material mais indicado para a confecção da bancada, do armário e do carrinho de transporte de materiais é o aço inoxidável ou o alumínio, em razão de sua resistência, durabilidade e facilidade de higienização. Caso sejam utilizados materiais total ou parcialmente plásticos, é imprescindível verificar a emissão de gases voláteis e, quando necessário, substituí-los por versões antiestáticas. No caso dos armários, recomenda-se que sejam suspensos do piso, facilitando o processo de limpeza, e que possuam portas planas, sem reentrâncias.

As cadeiras destinadas à mesa de trabalho não devem, sob nenhuma hipótese, possuir tecidos, espumas ou revestimentos porosos. Devem ser fabricadas em aço inoxidável, alumínio ou poliuretano integral e, caso possuam rodas, estas devem ser antiestáticas. No entanto, considerando que cadeiras com rodízios favorecem o acúmulo de partículas, recomenda-se o uso de modelos fixos, com base fechada.

Uma síntese das recomendações de materiais e requisitos aplicáveis ao mobiliário da sala encontra-se apresentada na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 – Tabela-resumo das indicações para mobiliários

<b>Mobiliário</b>	<b>Material indicado</b>	<b>Requisitos</b>
Bancadas	Aço inoxidável/Alumínio	Superfície lisa e base fechada
Cadeiras	Aço inoxidável/Alumínio/PU integral	Sem tecido, material antiestático e base fechada
Armários	Aço inoxidável/Plástico rígido ESD	Portas lisas e, de preferência, suspenso
Carrinhos	Aço inoxidável/Materiais ESD	Rodas lisas

### 4.1.3 Certificação

Aplicando a metodologia descrita para a certificação da sala, encontra-se, como resultado, o fluxograma do processo, apresentado na Figura 4.8, como resultado.

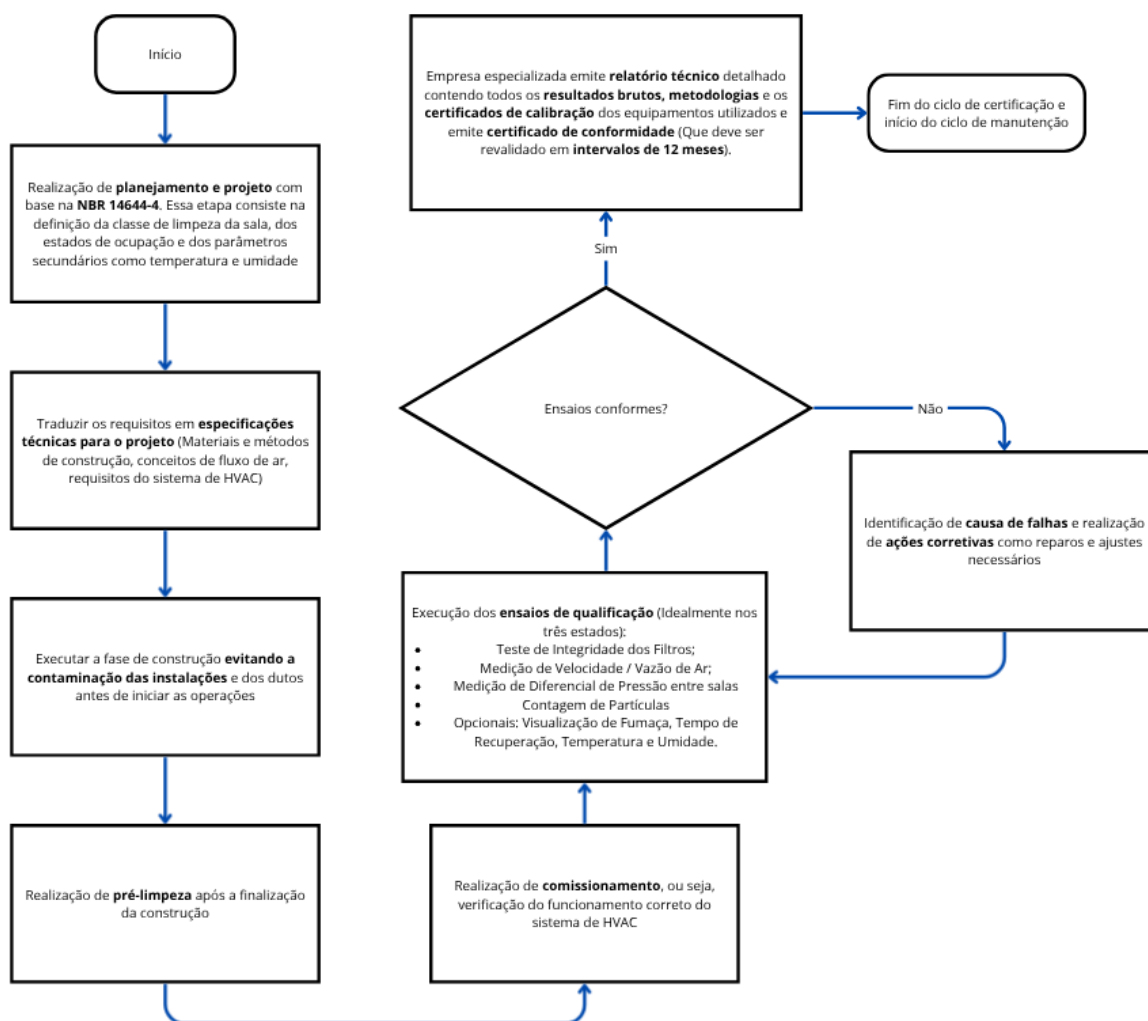


FIGURA 4.8 – Fluxograma do processo para certificação de sala limpa (Fonte: Arquivo Pessoal)

#### 4.1.4 Operação e manutenção

Para garantir a manutenção da certificação da sala limpa ao longo do tempo, é indispensável a implementação de um plano formal de operação e limpeza, devidamente documentado e rastreável. Tal plano é fundamental para o controle contínuo da contaminação gerada pelas atividades rotineiras, constituindo uma das principais ferramentas de preservação da conformidade ambiental entre os ciclos de revalidação. O documento deve especificar de forma detalhada os produtos de limpeza e descontaminação aprovados, bem como os métodos, equipamentos e frequências de aplicação para cada tipo de superfície ou área da instalação. Além disso, deve estabelecer claramente as responsabilidades operacionais, indicando se as rotinas de limpeza serão executadas por equipe interna treinada em procedimentos de sala limpa ou se determinadas intervenções — como limpezas profundas ou descontaminações corretivas — demandarão a contratação de empresa especializada e certificada em higienização de ambientes controlados.

Paralelamente, torna-se necessária a elaboração de um plano de monitoramento ambiental, com o objetivo de assegurar que os níveis de contaminação da sala permaneçam dentro dos limites especificados entre os períodos de reclassificação ou certificação formal. Esse plano deve ser desenvolvido em conjunto com os usuários do ambiente, de modo a considerar as características operacionais e os pontos críticos do processo produtivo executado na instalação. Deve, ainda, contemplar a definição de limites de alerta e de ação para os parâmetros monitorados, permitindo intervenções preventivas antes que ocorra a perda de controle do ambiente. Além do monitoramento quantitativo de partículas em suspensão, temperatura, umidade e diferencial de pressão, o plano deve incluir inspeções periódicas de itens qualitativos não mensuráveis instrumentalmente, como a integridade das vedações da sala, a funcionalidade do sistema de intertravamento de portas e o estado de conservação das barreiras físicas e elementos construtivos.

No que se refere ao sistema de ar-condicionado, a manutenção da Classe ISO 7 em uma sala limpa exige que o sistema assegure, de forma contínua, a concentração de partículas dentro dos limites estabelecidos para essa classe, mantenha as velocidades e vazões de ar definidas em projeto — ou seja, controle adequado do padrão de movimentação do ar — e preserve os diferenciais de pressão entre ambientes adjacentes, garantindo que o fluxo de ar ocorra sempre do ambiente mais limpo para o menos limpo. Embora não exista uma periodicidade fixa para atividades de manutenção preventiva, como substituição de componentes ou limpeza de serpentinas, há intervalos máximos para verificação de desempenho que devem ser rigorosamente atendidos. Assim, o plano de manutenção deve ser dimensionado de modo a assegurar que a instalação seja aprovada nessas verificações periódicas e mantenha a conformidade ao longo do tempo.

Para ambientes classificados como ISO 7, de acordo com as normatizações brasileiras, a verificação formal por contagem de partículas deve ser realizada em intervalos máximos de 12 meses. Contudo, esse intervalo pode ser estendido quando houver monitoramento contínuo ou frequente tanto das partículas quanto dos diferenciais de pressão — o que será o caso da sala a ser adaptada, conforme previsto na Seção 4.1.2.6, que estabelece a instalação de contadores de partículas fixos no ambiente. As medições de velocidade e vazão de ar, bem como de pressão diferencial, seguem o mesmo limite máximo de 12 meses e também podem ter sua periodicidade ampliada mediante avaliação de risco documentada e monitoramento contínuo. Caso os usuários do CLBI julguem necessário, podem ser incluídos ensaios complementares bienais, tais como teste de integridade de filtros instalados (*leak test*), visualização de fluxo e ensaio de recuperação (*recovery*). Recomenda-se, ainda, a realização de classificação periódica anual, ajustável conforme análise de desempenho operacional e histórico de monitoramento.

Dessa forma, a manutenção do sistema de ar-condicionado deve ocorrer com frequência compatível com os requisitos de desempenho de uma sala limpa Classe ISO 7. Entre as

ações necessárias destacam-se: limpeza de serpentinas e drenos, substituição oportuna de pré-filtros, inspeção e vedação de alojamentos de filtros terminais — para evitar o *bypass* de ar não filtrado — e balanceamento de vazões, a fim de manter velocidades e pressões dentro das faixas especificadas em projeto. Além disso, sempre que houver intervenções significativas no sistema, como troca de filtros terminais ou reconfiguração de vazão ou pressão, deve ser realizada nova classificação da sala antes do retorno ao regime normal de operação, conforme previsto nas normatizações. Por fim, os instrumentos de monitoramento, como contadores de partículas e manômetros diferenciais, devem permanecer calibrados de acordo com as normas aplicáveis, assegurando a confiabilidade das medições e a validade das verificações de desempenho.

É fundamental estabelecer um programa contínuo de treinamento de pessoal para a correta utilização da sala limpa, contemplando procedimentos de entrada, paramentação, condutas durante a permanência no ambiente e rotinas de limpeza e descarte, a fim de minimizar fontes de geração e transporte de partículas e evitar desvios de contaminação. Como medida complementar e de fácil disseminação, recomenda-se a confecção de cartilhas ilustradas e objetivas, disponibilizadas em pontos de acesso e áreas de apoio, reunindo os principais cuidados que devem ser observados por visitantes e por usuários não familiarizados com o espaço, por exemplo: requisitos de higiene pessoal, sequência de vestir EPI (Equipamentos de Proteção Individual), proibições de itens e comportamentos (maquiagem, jóias, uso de papel comum, entre outros), fluxos permitidos de materiais e pessoas e orientações de resposta a incidentes—de modo a padronizar práticas e reduzir o risco operacional.

#### 4.1.5 Plano de limpeza

No que se refere aos procedimentos de limpeza da sala limpa, o objetivo central consiste em remover partículas e reduzir a geração e dispersão de particulados durante o processo de higienização, assegurando que o ambiente permaneça dentro do desempenho exigido. Para a elaboração de um plano de limpeza adequado a esse tipo de instalação, algumas premissas fundamentais devem ser consideradas:

- Superfícies horizontais, como pisos e bancadas, acumulam maior quantidade de partículas por ação da gravidade, quando comparadas às superfícies verticais, como paredes;
- Pontos de contato frequente, como maçanetas e portas, acumulam sujidades mais rapidamente do que áreas com menor interação humana ou operacional.

Com isso, recomenda-se um plano de limpeza estruturado em diferentes frequências: limpeza por turno (ou, no mínimo, diária) de pisos e bancadas nas áreas de processo;

limpeza semanal de paredes e portas; e limpeza quinzenal ou mensal de tetos e superfícies elevadas. Nas antecâmaras — especialmente na destinada ao acesso de pessoal —, devido ao maior fluxo de entrada e saída, a limpeza deve ser preferencialmente diária. Essa periodicidade busca equilibrar o comportamento natural de acúmulo de partículas nas superfícies com a necessidade de evitar a transferência de sujidades de áreas gerais para áreas críticas, devendo ser ajustada posteriormente com base nos dados do programa de monitoramento ambiental.

No que se refere às técnicas empregadas, recomenda-se evitar o uso de vassouras secas e mops domésticos, uma vez que esses métodos tendem a dispersar e redistribuir partículas no ambiente. A remoção de particulados deve ser realizada, preferencialmente, com aspiradores equipados com filtros HEPA ou ULPA, instalados após o motor, a fim de impedir que partículas oriundas do próprio equipamento retornem ao ambiente. Métodos de limpeza úmida devem ser priorizados, pois, além de promoverem maior eficiência na remoção de partículas por ação de solventes, favorecem a rápida retomada das condições operacionais do ambiente. Quando o uso de mop for indispensável, devem ser utilizados modelos específicos para salas limpas, confeccionados em poliéster ou PVA/poliuretano poroso. Para superfícies lisas, recomenda-se também a utilização de rolos adesivos, dada sua alta eficácia na remoção mecânica de partículas. Adicionalmente, devem ser adotados sistemas de dois ou três baldes — separando-se solução ativa, enxágue e água limpa — para evitar a reintrodução de sujidades nas superfícies.

Considerando que o foco da limpeza deste ambiente não envolve controle microbiológico rigoroso, recomenda-se priorizar o uso de detergentes neutros associados a água limpa — preferencialmente deionizada ou destilada —, os quais facilitam a remoção de partículas por fricção e reduzem a adesão partícula-superfície. Para remoção de resíduos oleosos ou pontos que demandem maior eficiência de limpeza, pode-se empregar álcool etílico (60–70%) ou álcool isopropílico (70–100%), devido à boa capacidade de desengorduramento, rápida evaporação e baixo resíduo.

Quando se desejar intensificar a higienização, recomenda-se o uso complementar de clorexidina, ainda que seu emprego não seja obrigatório. Em áreas menos críticas, agentes à base de quaternários de amônio ou compostos fenólicos podem ser utilizados conforme necessidade. Não se recomenda a utilização de compostos clorados, em virtude de seu potencial corrosivo e redução de eficácia na presença de matéria orgânica, além de demandarem trocas frequentes da solução.

Todas as soluções de limpeza devem ser preparadas imediatamente antes do uso, em recipientes higienizados, evitando-se a prática de completar frascos previamente utilizados. Ao término da limpeza, as sobras das soluções devem ser descartadas e os recipientes, panos e baldes devidamente lavados e secos, a fim de evitar que se tornem fontes de recontaminação.

Como recomendações gerais, os procedimentos de limpeza devem ser realizados com o sistema de ar-condicionado operando em regime normal, de modo que o fluxo de ar e o diferencial de pressão auxiliem na remoção de partículas geradas durante o processo. A equipe responsável deve utilizar os mesmos trajes de sala limpa empregados nas atividades operacionais e executar os procedimentos de forma lenta e metódica, evitando movimentos bruscos que favoreçam a dispersão de partículas. Sugere-se que a sequência operacional de limpeza seja iniciada pela aspiração de partículas maiores, seguida da limpeza úmida com passadas sobrepostas, sempre do ambiente mais limpo para o menos limpo, de cima para baixo e no sentido da saída. Todas as etapas do processo — incluindo data, horário, responsáveis, métodos e materiais empregados, entre outros — devem ser registradas sistematicamente, de modo a integrar o plano de monitoramento e fornecer rastreabilidade às condições do ambiente.

As indicações de frequência de limpeza, materiais e métodos de limpeza a serem utilizados para cada tipo de área são condensados na tabela-resumo 4.3.

TABELA 4.3 – Tabela-resumo com diretrizes para limpeza da sala

<b>Item</b>	<b>Frequência</b>	<b>Método</b>	<b>Materiais e Produtos</b>
Pisos	Por turno ou diária	Aspiração (se necessário) seguido de limpeza úmida com mop (técnica de 2 ou 3 baldes, passadas sobrepostas)	Aspirador com filtro HEPA na exaustão e Mop específico para sala limpa (Poliéster ou PVA/Poliuretano poroso). Solução: Detergente neutro + Água (pref. deionizada/destilada)
Bancadas e sup. horizontais	Por turno ou diária	Limpeza úmida com panos (movimentos lentos, sentido único) e, se aplicável, rolos adesivos para remoção seca de partículas	Panos de poliéster ou outro material que não solte fibras. Solução: Detergente neutro + Água (deionizada/destilada) e para gordura/resíduos, álcool Isopropílico (70-100%) ou Etílico (60-70%).
Antecâmaras	Diária	Aspiração (se necessário) seguida de limpeza úmida de pisos e pontos de alto contato.	Aspirador com filtro HEPA e Mop e Panos específicos para sala limpa. Solução: Detergente neutro + Água.
Paredes e portas	Semanal	Limpeza úmida com panos ou mop vertical, de cima para baixo.	Panos/Mop Vertical específicos para sala limpa. Solução: Detergente neutro + Água e para pontos de contato, álcool Isopropílico (70%).
Tetos, luminárias e sup. elevadas	Quinzenal ou mensal	Aspiração cuidadosa (se aplicável) seguido de limpeza úmida (mop de teto ou panos).	Aspirador com filtro HEPA e acessórios adequados e mop ou panos específicos para sala limpa. Solução: Detergente neutro + Água.



### 4.1.7 Modelo 3D

Além da atualização da planta arquitetônica, faz-se necessária a elaboração de um modelo tridimensional (3D) que permita visualizar de forma abrangente todas as alterações propostas, identificar eventuais inconsistências e quantificar com maior precisão algumas das recomendações apresentadas. Esse modelo foi desenvolvido utilizando o *software* SketchUp (versão online) e contempla tanto as modificações estruturais e arquitetônicas sugeridas neste estudo de caso quanto o *layout* proposto para a disposição dos mobiliários a serem inseridos no ambiente. O modelo desenvolvido é ilustrado nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.12.

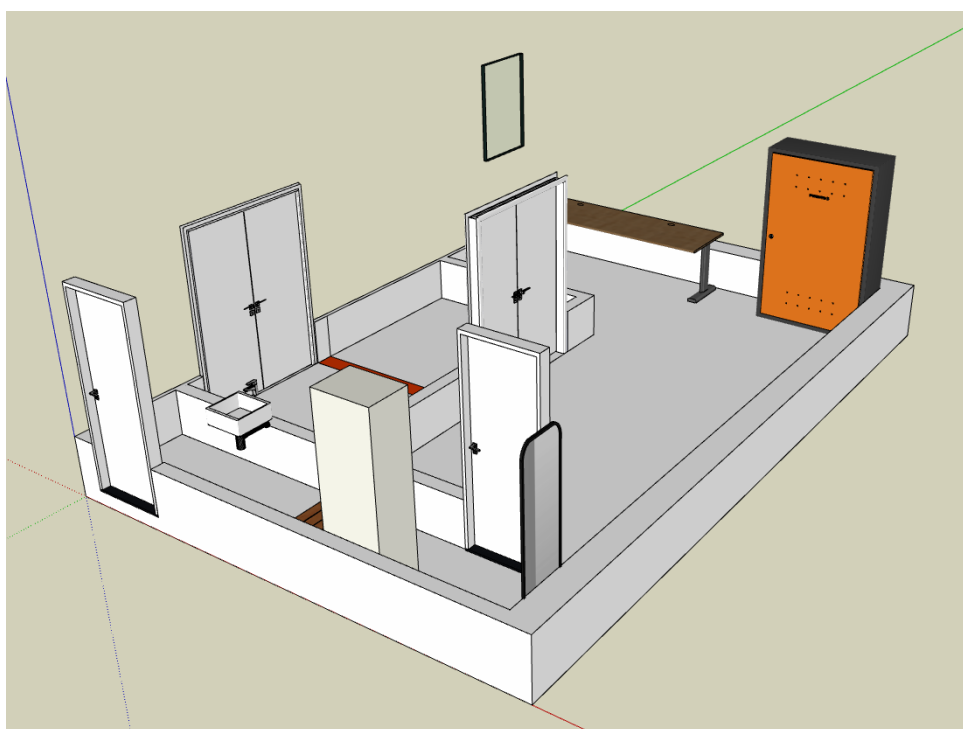


FIGURA 4.10 – Vista 1 do modelo 3D com as proposições de alterações (Fonte: Arquivo pessoal)

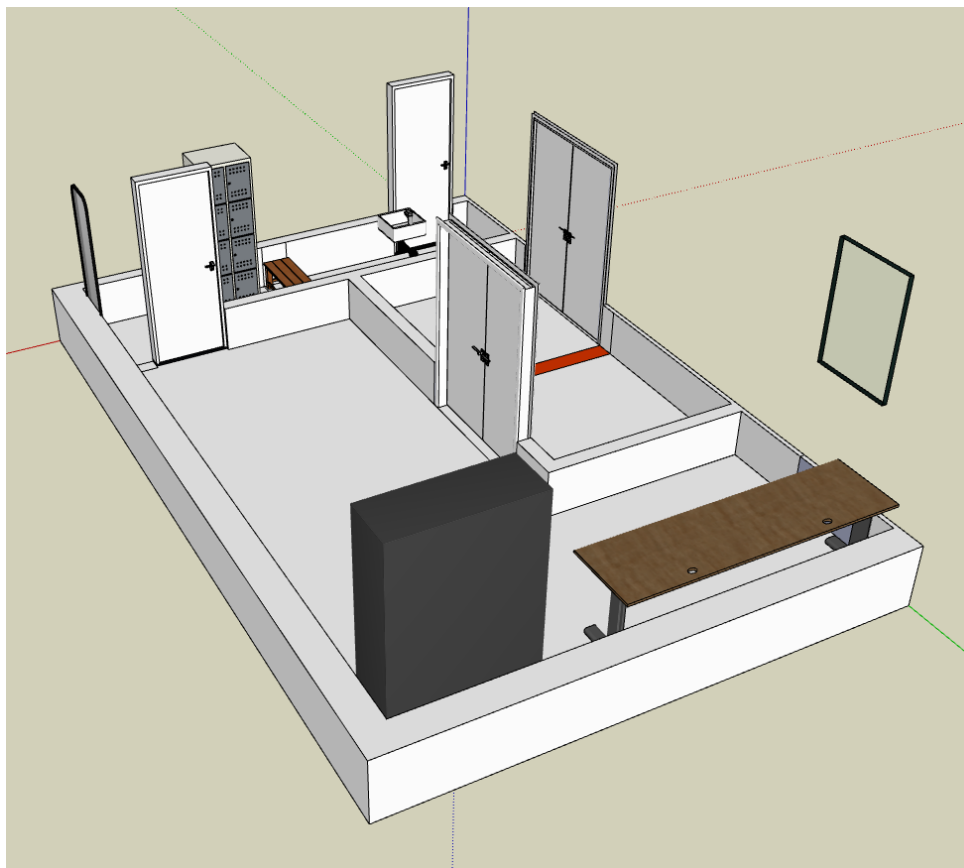


FIGURA 4.11 – Vista 2 do modelo 3D com as proposições de alterações (Fonte: Arquivo pessoal)

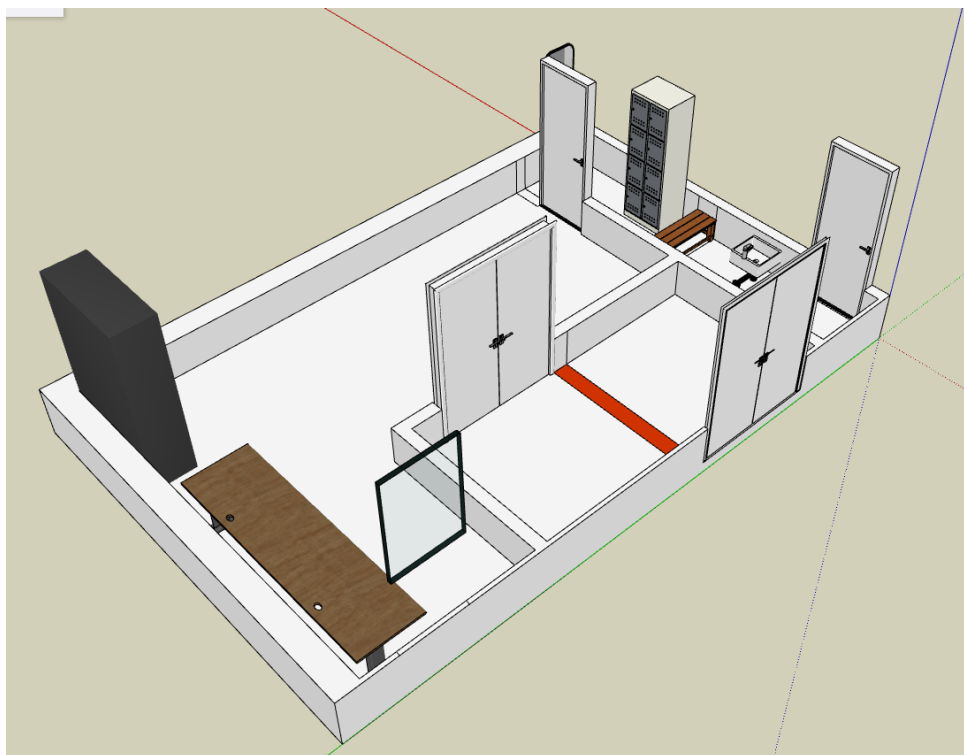


FIGURA 4.12 – Vista 3 do modelo 3D com as proposições de alterações (Fonte: Arquivo pessoal)

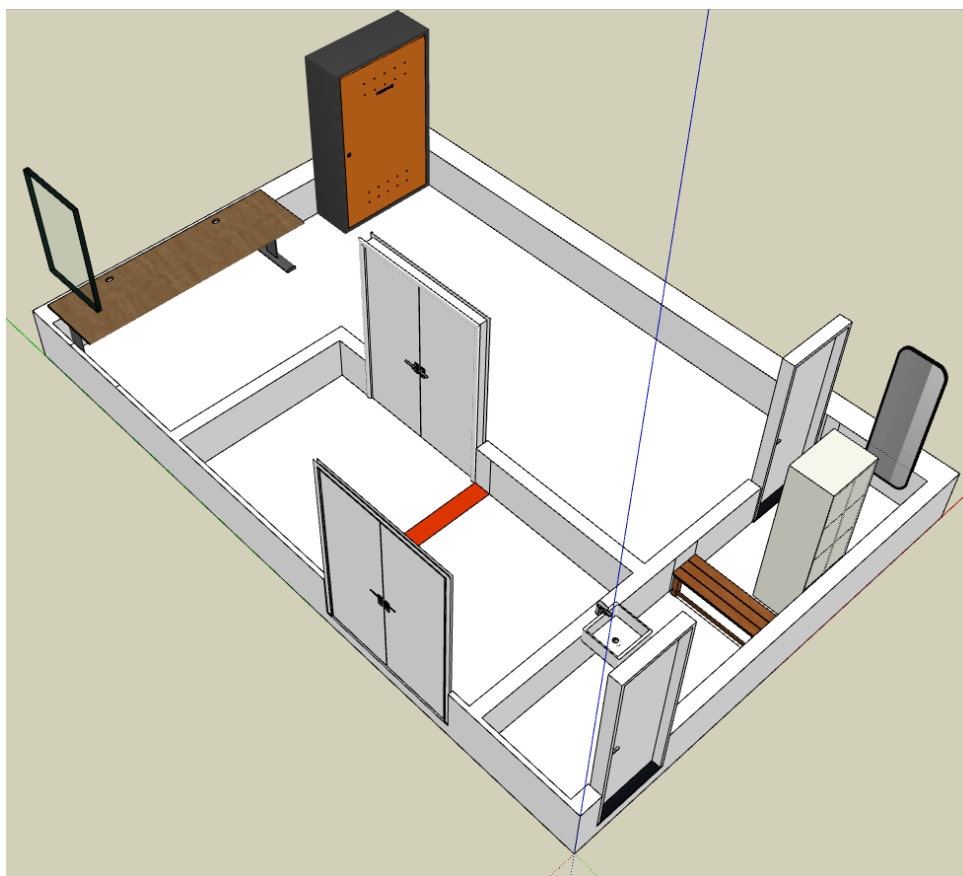


FIGURA 4.13 – Vista 4 do modelo 3D com as proposições de alterações (Fonte: Arquivo pessoal)

#### 4.1.8 Alternativas

Considerando a complexidade e o elevado custo associado à execução desta obra, todas as recomendações apresentadas foram elaboradas com o intuito de minimizar despesas, de modo a viabilizar sua implementação por parte da Força Aérea. Entretanto, tendo em vista a longa duração dos processos administrativos relacionados à solicitação da obra pela Organização Militar, bem como os trâmites de licitação e demais etapas correlatas, apresentam-se a seguir algumas alternativas que podem ser aplicadas ao CLBI.

A primeira alternativa consiste na execução das modificações propostas para a sala limpa com o objetivo inicial de atender à Classe ISO 8, realizando, em um momento posterior, a adaptação para a Classe ISO 7. Essa abordagem possibilita que as atividades do Prédio de Preparação de Cargas Úteis sejam conduzidas em um ambiente controlado, conforme requerido, mas com custos iniciais reduzidos, uma vez que a Classe ISO 8 demanda uma menor taxa de renovação de ar. Assim, a proposta torna-se mais viável no contexto orçamentário e operacional da Força Aérea.

Em segundo lugar, propõe-se a instalação de uma estrutura modular inflável dentro da sala já existente, que funcionaria como uma zona limpa interna, isolada do ambiente

ao redor e mantida sob leve pressão positiva de ar filtrado. Essa “casinha inflável” — já utilizada em aplicações semelhantes no INPE e mostrada na Figura 4.14 — atua como um miniambiente capaz de garantir níveis controlados de limpeza do ar sem necessidade de grandes reformas estruturais.



FIGURA 4.14 – Ilustração de sala limpa modular de parede flexível

Essa solução pode ser adotada tanto como uma alternativa temporária, permitindo o uso da sala enquanto a adaptação definitiva não é concluída, quanto como uma opção mais econômica e imediata para implantação de uma área limpa funcional. Além de reduzir custos e prazos, essa proposta segue o conceito de dispositivos de separação previstos na ABNT NBR ISO 14644-7, podendo atender às necessidades operacionais do PPCU até que a sala limpa completa esteja pronta.

## 5 Considerações finais

A realização deste trabalho possibilitou uma compreensão mais aprofundada sobre o funcionamento e a importância das salas limpas, bem como dos principais requisitos técnicos e normativos que orientam sua concepção e operação. A partir desse embasamento teórico, foi desenvolvido um estudo de caso no Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI), que serviu como aplicação prática dos conceitos estudados, resultando na proposição de soluções arquitetônicas e construtivas voltadas à adaptação de uma sala existente para atender à classe ISO 7.

A principal contribuição deste trabalho reside na aplicação prática e direcionada dos conceitos teóricos a um problema real da infraestrutura espacial brasileira. Ao focar no CLBI — que atualmente não dispõe de áreas limpas formais — este estudo materializa a primeira etapa de um projeto de modernização. Embora não tenha o objetivo de apresentar um projeto executivo, a elaboração das plantas arquitetônicas propostas no AutoCAD, do modelo tridimensional em SketchUp e das diretrizes para o Estudo Técnico Preliminar (ETP) não se limita a um exercício acadêmico; oferece subsídios técnicos concretos que podem ser diretamente aproveitados pela instituição para as futuras fases de planejamento e decisão. Dessa forma, o trabalho preenche uma lacuna ao fornecer uma visualização clara das intervenções necessárias e um entendimento dos desafios de implantação, servindo como uma ferramenta de apoio para a adaptação da sala no Prédio de Preparação de Carga Útil.

Conclui-se, portanto, que o estudo cumpriu seu propósito de conciliar o entendimento teórico sobre salas limpas com uma aplicação prática, oferecendo um ponto de partida para discussões e desenvolvimentos futuros relacionados à modernização das infraestruturas de apoio às atividades espaciais no país.

Como sugestão para trabalhos futuros no campo de estudo de salas limpas, recomenda-se a investigação de temas correlatos que não puderam ser aprofundados neste trabalho, tais como uma análise da eficiência energética em projetos de salas limpas, avaliando de que forma diferentes soluções arquitetônicas, materiais de acabamento e configurações de layout impactam o consumo dos sistemas de HVAC, que ainda representam uma parcela significativa dos custos de implantação e, sobretudo, de operação desse tipo de instala-

---

ção. Outra vertente promissora é o estudo da flexibilidade e da modularidade no design desses ambientes, com foco em soluções construtivas que permitam futuras adaptações, ampliações ou mesmo mudanças de classe de limpeza de maneira mais ágil e economicamente viável — aspecto que foi apenas indicado neste estudo de caso, mas que pode ser aprofundado em pesquisas posteriores.

# Referências

Agência Espacial Brasileira. **Plano Nacional de Atividades Espaciais 2022–2031 (PNAE)**. 2022. Documento institucional. Available at: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/assuntos/pnae>.

Agência Espacial Brasileira. **Centros de Lançamento**. 2025. Acesso em: 30 maio 2025. Available at: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/acoes-e-programas/aplicacoes-espaciais/infraestrutura-de-solo/centros-de-lancamento>.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 14644-4:2019 — Salas limpas e ambientes controlados associados – Parte 4: Projeto, construção e partida**. Rio de Janeiro: ABNTc, 2019. Norma técnica.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 14644-1:2019 — Salas limpas e ambientes controlados associados – Parte 1: Classificação da limpeza do ar com base na concentração de partículas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a. Norma técnica.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 14644-3:2019 — Salas limpas e ambientes controlados associados – Parte 3: Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b. Norma técnica.

CALDERÓN, C.; SERVÉN, L. **Infrastructure, Growth, and Inequality: An Overview**. Washington, DC, September 2014. Development Research Group, Macroeconomics and Growth Team. Available at: <https://papers.ssrn.com/abstract=2497234>.

Centro de Aquisições Específicas. **Dispensa Nº 5/2022 - Certificação de Área Limpa do CENFAR/LAQFA**. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], jun 2022. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/licitacoescontratos/index.php/cae/5767-dispensa-n-05-2022-certificacao-de-area-limpa-do-cenfar-laqfa>. Acesso em: 20 jun. 2025. Available at: [https://www2.fab.mil.br/licitacoescontratos/index.php-cae/5767-dispensa-n-05-2022-certificacao-de-area-limpa-do-cenfar-laqfa](https://www2.fab.mil.br/licitacoescontratos/index.php/cae/5767-dispensa-n-05-2022-certificacao-de-area-limpa-do-cenfar-laqfa).

CLBI. **Projeto Executivo SPDA**. Parnamirim, 2012. Documento interno.

FILHO, E. de J. C. **A política científica e tecnológica no setor aeroespacial brasileiro: da institucionalização das atividades ao fim da gestão militar — uma análise do período 1961–1993**. Dissertation (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP, agosto 2000. Orientador: Prof. Dr. André Tosi Furtado.

FORTESCUE, P.; SWINERD, G.; STARK, J. **Spacecraft Systems Engineering**. 4. ed. Chichester, UK: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-75012-4.

Força Aérea Brasileira. **FAB realiza lançamento do foguete VS-30 V15 no Centro de Lançamento da Barreira do Inferno**. 2024. Acesso em: 30 maio 2025. Available at: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/43511>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Caracterizar e testar sistemas eletro-ópticos em salas limpas classe 10.000 no LDSE do INPE**. 2024. Acesso em: 31 maio 2025. Available at: <https://www.gov.br/pt-br/servicos/caracterizar-e-testar-sistemas-eleto-opticos-em-salas-limpas-classe-10.000-no-ldse-do-inpe>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Áreas do LIT – Laboratório de Integração e Testes**. 2024. Acesso em: 31 maio 2025. Available at: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/area-conhecimento/montagem-integracao-e-testes/areas-do-lit>.

MEDEIROS, V.; OLIVEIRA, A. M. H. C. de. O acesso à infraestrutura e a pobreza no Brasil: uma investigação empírica. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER), v. 58, n. 2, acesso em: 23 maio 2025, 2020. Available at: <https://www.scielo.br/j/resr/a/4H5r6N8KWmJJfB3RTJWqYjC/?format=pdflang=pt>.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brasil). **Indicadores Nacionais de Ciência, Tecnologia e Inovação - 2022**. Brasília, 2023. 168 p. Acesso em: 27 maio 2025. Available at: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/indicadores>.

Ministério da Defesa (Brasil). **Plano Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE)**. mar. 2020. Documento institucional. Available at: <https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/politicas-e-estrategias/pese>.

ModumTech. **Quais setores precisam ter salas limpas?** 2023. Acesso em: 31 maio 2025. Available at: <https://modumtech.com.br/quais-setores-precisam-ter-salas-limpas/>.

NASA Glenn Research Center. **Contamination Control Engineering Guidelines for the Aerospace Community**. Cleveland, OH, 2001. Technical Memorandum. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20010047721>.

NEGRI, F. D.; SQUEFF, F. de H. S. O mapeamento da infraestrutura científica e tecnológica no Brasil. *In*: NEGRI, F. D.; SQUEFF, F. de H. S. (Ed.). **Sistemas Setoriais de Inovação e Infraestrutura de Pesquisa no Brasil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2016. p. 15–62. ISBN 978-85-7811-268-4. Available at: <https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/5147>.

NERY, C.; SIQUEIRA, B. **Empresas industriais de médio e grande porte investiram R\$ 36,9 bilhões em P&D em 2022**. mar. 2024. Agência de Notícias do IBGE. Available at: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias-noticias/39503-empresas-industriais-de-medio-e-grande-porte-investiram-r-36-9-bilhoes-em-p-d-em-2022>.

PENN, M.; PARKER, P. **Introduction to Infrastructure: An Introduction to Civil and Environmental Engineering**. Wiley, 2011. ISBN 9780470411919. Available at: <https://books.google.com.br/books?id=kJYLEQAAQBAJ>.

ROCHA, I. L.; RIBEIRO, R. S. M. Infraestrutura no Brasil: contexto histórico e principais desafios. *In*: SILVA, M. S. (Ed.). **Concessões e Parcerias Público-Privadas: políticas públicas para provisão de infraestrutura**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2022. p. 24–. ISBN 978-65-5635-040-0. Available at: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11462>.

SERINFRA-SJ. **Projeto de Recuperação da Sala Limpa do PPCU**. São José dos Campos, 2023. Documento interno.

SQUEFF, F. de H. S. Sistema setorial de inovação em defesa: análise do caso do Brasil. *In*: NEGRI, F. D.; SQUEFF, F. de H. S. (Ed.). **Sistemas Setoriais de Inovação e Infraestrutura de Pesquisa no Brasil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2016. p. 63–114. ISBN 978-85-7811-268-4. Acesso em: 26 maio 2025. Available at: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/6016>.

USELLER, J. W. **Clean Room Technology**. Cleveland, OH, USA, 1969. NASA Technical Note D-4918. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19690024397/downloads/19690024397.pdf>.

WERTZ, J. R.; EVERETT, D. F.; PUSCHELL, J. J. (Ed.). **Space Mission Engineering: The New SMAD**. 1. ed. Hawthorne, CA: Microcosm Press, 2011. First edition. ISBN 9781881883159. Available at: <https://www.amazon.com.br/Space-Mission-Engineering-New-Smad/dp/1881883159>.

WHYTE, W. **Cleanroom Technology: Fundamentals of Design, Testing and Operation**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2001. ISBN 9780471868426.

## **Anexo A - Declaração de uso de IA**

A autora utilizou a versão 5 Thinking do ChatGPT para aprimorar a gramática e melhorar a legibilidade geral do texto. Após o uso dessas ferramentas de IA, a autora revisou e editou o conteúdo conforme necessário para manter o controle total autoral sobre a substância do trabalho.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 13 de novembro de 2025	3. DOCUMENTO Nº DCTA/ITA/TC-060/2025	4. Nº DE PÁGINAS 81
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Estudo de implementação de uma Sala Limpa para Preparação de Cargas Úteis Espaciais			
6. AUTORA(ES): <b>Francisca Angélica Albuquerque Severo</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELA AUTORA: Sala limpa; Controle de partículas; Cargas Úteis			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Sala limpa; Carga útil; Contaminação; Partículas; Centro de Lançamento Barreira do Inferno; Estudo de casos; Engenharia Aeroespacial.			
10. APRESENTAÇÃO: <span style="float: right;"><input checked="" type="checkbox"/> Nacional    <input type="checkbox"/> Internacional</span> ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientadora: Prof <sup>a</sup> . Dr <sup>a</sup> . Giovanna Miceli Ronzani Borille. Coorientador: 1 <sup>o</sup> Ten. Eng. Lucas Soares Rodrigues. Publicado em 2025.			
11. RESUMO: O presente trabalho apresenta um estudo abrangente sobre salas limpas, abordando sua importância, princípios de funcionamento e requisitos técnicos e normativos que orientam seu projeto, construção e operação. Com base nas normas da série ABNT NBR ISO 14644 e em referências internacionais, foram discutidos os principais parâmetros de controle (especialmente concentração de partículas em suspensão, diferenciais de pressão, fluxo e renovação de ar) bem como os aspectos construtivos e de acabamento necessários para assegurar um ambiente com níveis controlados de contaminação. A contribuição central desta pesquisa reside na aplicação metodológica desse referencial teórico a um desafio prático: a adaptação ( <i>retrofit</i> ) de uma infraestrutura existente. Para isso, desenvolveu-se um estudo de caso no Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI), no qual se propôs a conversão de uma sala convencional em um ambiente classificado como ISO 7, adequado às atividades de preparação de cargas úteis. Para a materialização dessa proposta, foram utilizados softwares de projeto, (AutoCAD, para elaboração da planta arquitetônica modificada, e SketchUp, para o desenvolvimento do modelo tridimensional da solução) além da elaboração de um conjunto de diretrizes técnicas voltadas a subsidiar a elaboração futura de um Estudo Técnico Preliminar (ETP), de modo a tornar o trabalho aplicável ao contexto real da Força Aérea Brasileira.			
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO			