



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA EM UNIÃO E REVESTIMENTO DE MATERIAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AEROESPACIAL

**ESTUDO SOBRE VIABILIDADE DO CONCRETO CELULAR PARA UTILIZAÇÃO EM
EMAS PARA AEROPORTOS DE PISTA CURTA**

ADSON FERREIRA RÉGIS DA SILVA

Recife, 2024

ADSON FERREIRA RÉGIS DA SILVA*

**ESTUDO SOBRE VIABILIDADE CONCRETO CELULAR PARA UTILIZAÇÃO EM EMAS
PARA AEROPORTOS DE PISTA CURTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aero espacial da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Aeroespacial. Área de concentração: Correspondente ao indicado na ata de defesa

Orientador: Prof. Dr Kleber Gonçalves Bezerra Alves

Coorientador: Prof.^a Dr. Nathália Bezerra de Lima .

*Bolsista FACEPE

Recife, 2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Silva, Adson Ferreira Regis da.

Estudo sobre viabilidade do concreto celular para utilização em EMAS para aeroportos de pista curta / Adson Ferreira Regis da Silva. - Recife, 2024.

106f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (Rede), 2024.

Orientação: Kleber Gonçalves Bezerra Alves.

Coorientação: Nathália Bezerra de Lima.

1. Concreto Celular; 2. EMAS; 3. Análise química do cimento. I. Alves, Kleber Gonçalves Bezerra. II. Lima, Nathália Bezerra de. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ADSON FERREIRA RÉGIS DA SILVA

**ESTUDO SOBRE VIABILIDADE CONCRETO CELULAR PARA UTILIZAÇÃO EM EMAS
PARA AEROPORTOS DE PISTA CURTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial, RNA (Rede Nordeste Aeroespacial), da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Aeroespaciais. Área de concentração: Ciências e Tecnologias Aeroespaciais. Aprovada em: 07/08/2024.

Aprovada em: 07/08/2024

Banca examinadora

Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Leonardo Barbosa Torres dos Santos (Examinador Externo)

Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Ricardo Henrique de Lida Silva (Examinador Externo)

Instituto Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Nathalia Bezerra de Lima (Coorientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, minha esposa e família que me deram forças para prosseguir o desafio. Agradeço aos meus orientadores pelo auxílio na condução do projeto e ao professor Tiago Felipe de Abreu Santos. E agradeço a FACEPE pelo fomento, bem como o INTM e a UFPE por disponibilizar instrumentos, salas e equipamentos necessários para as análises necessárias.

1. RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade do uso do concreto celular espumoso para a construção de um Engineered Material Arresting System (EMAS) em aeroportos de pista curta no Brasil, bem como realizar a caracterização do material. O estudo foi motivado pela necessidade de soluções alternativas para melhorar a segurança de aeronaves em aeroportos localizados em centros urbanos densamente povoados, como o Aeroporto de Fernando de Noronha, que não possuem espaço suficiente para a ampliação das pistas. O EMAS é um sistema de segurança composto por materiais destrutíveis que desaceleram aeronaves em caso de avanço de pista. Utilizando concreto celular de alta porosidade, a tecnologia tem se mostrado eficiente nos Estados Unidos e China, mas ainda é pouco explorada no Brasil.

A metodologia deste estudo incluiu a produção de concreto celular espumoso com diferentes proporções de aditivo espumante e cimento CP II-Z, material amplamente disponível na região de Pernambuco. Foram realizados ensaios de compressão uniaxial e de penetração em células para avaliar a resistência do concreto, além de análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX) para caracterizar as propriedades químicas e físicas do material. Os resultados indicaram que densidades de concreto entre 600 kg/m³ e 900 kg/m³ apresentam comportamento mecânico adequado para a aplicação em sistemas EMAS, com capacidade de suportar o impacto e a pressão exercidos pelo trem de pouso das aeronaves sem comprometer sua segurança estrutural. O uso de materiais nacionais, como o cimento CP II-Z, demonstrou ser uma alternativa viável para reduzir custos em relação aos sistemas importados. Ainda se observou que em altas porosidades existem indícios de alteração nas fases do cimento devido à hidratação do material através de análises de microscopia eletrônica e difração de raios-X.

Demonstrando que a implementação de um sistema EMAS utilizando concreto celular espumoso no Brasil é tecnicamente viável e pode contribuir significativamente para a segurança em aeroportos de pista curta. No entanto, estudos adicionais são recomendados para o aprimoramento do desempenho do material em diferentes condições climáticas e de carga, sendo esta bem definida para a modelagem dinâmica do material durante a ruptura.

Palavras-Chave: Concreto Celular; EMAS; análise química do cimento.

ABSTRACT

This work aims to analyze the feasibility of using foam cellular concrete for the construction of an Engineered Material Arresting System (EMAS) in short-runway airports in Brazil, as well as to characterize the material. The study was motivated by the need for alternative solutions to improve the safety of aircraft in airports located in densely populated urban areas, such as Fernando de Noronha Airport, which lack sufficient space for runway expansion. EMAS is a safety system composed of crushable materials designed to decelerate aircraft in the event of a runway overrun. Utilizing high-porosity cellular concrete, the technology has proven effective in the United States and China but remains underexplored in Brazil.

The methodology of this study included the production of foam cellular concrete with different proportions of foaming agent and CP II-Z cement, a material widely available in the Pernambuco region. Uniaxial compression tests and cell penetration tests were performed to evaluate the concrete's strength, in addition to scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and X-ray fluorescence (XRF) analyses to characterize the material's chemical and physical properties. The results indicated that concrete densities between 600 kg/m³ and 900 kg/m³ demonstrate adequate mechanical behavior for application in EMAS systems, with the ability to withstand the impact and pressure exerted by the aircraft landing gear without compromising structural safety. The use of domestic materials, such as CP II-Z cement, proved to be a viable alternative to reduce costs compared to imported systems. Furthermore, high porosity was shown to influence alterations in the cement phases due to material hydration, as observed through SEM and XRD analyses.

This demonstrates that the implementation of an EMAS system using foam cellular concrete in Brazil is technically feasible and can significantly contribute to the safety of short-runway airports. However, additional studies are recommended to enhance the material's performance under varying climatic and load conditions, with a clear definition for dynamic modeling of the material during rupture.

Keyword: Foamconcrete; EMAS; cement Chemical analysis.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Célula do EMAS. Fonte: EMASMAX.....	6
Figura 2 – Dimensões Boeing. Fonte Manual da Boeing	13
Figura 3 – Forças Máximas atuantes no trem de poiso de um Boeing 737. Fonte Manual da Boeing...	13
Figura 4 - Ensaio de Penetração em Células. Fonte:[40]	27
Figura 5 - Ensaio de Penetração em Célula. Fonte: [66]	28
Figura 6 - Normas regentes para o CII-32-RS. Fonte: cimento.org	30
Figura 7 - Aditivo Incorporador de Ar. Fonte: Autor	31
Figura 8 - Argamassadeira Digital. Fonte: Autor	32
Figura 9 - Fabricação da espuma	34
Figura 10 - Pasta de Cimento e Espuma	34
Figura 11 - Moldagem Concreto Celular	35
Figura 12 - Cura à seco Concreto Celular.....	35
Figura 13 - Ensaio de Compressão Uniaxial. Fonte: Autor	37
Figura 14 – Dados para Moldagem do Ensaio de Penetração.....	39
Figura 15 - Projeto simplificado de suporte para ensaio de penetração. Fonte: Autor	40
Figura 16 - Difratoograma de raios-X da pasta de cimento sem aditivo. Fonte: Autor.....	41
Figura 17 - Difratoograma de raios-X, grupo B, CP B2. Fonte: Autor	42
Figura 18 - Difratoograma de raios-X, grupo B, CP E3. Fonte: Autor.....	42
Figura 19 - Difratoograma de raios-X, grupo E, CP A3. Fonte: Autor	42
Figura 20 - Difratoograma de raios-X, grupo G, CP G3. Fonte: Autor	43
Figura 21 - Difratoograma de raios-X, grupo A, CP D3. Fonte: Autor	43
Figura 22 - Difratoograma de raios-X, grupo C, CP C2. Fonte: Autor	43
Figura 23 - Espectro de FRX - A3 - linhas de Ca. Fonte: Autor	44

Figura 24 - Espectro de FRX - C2 - linhas de Ca. Fonte: Autor.....	45
Figura 25 – Espectro de FRX - D3 - linhas de Ca. Fonte: Autor.....	45
Figura 26 - Espectro de FRX - E3 - linhas de Ca. Fonte: Autor.....	46
Figura 27 – Espectro de FRX - G3 - linhas de Ca. Fonte: Autor.....	46
Figura 28 - Espectro FRX - B2 – Ponto 2. Fonte: Autor	47
Figura 29 - Imagens MEV da Amostra B. Fonte: Autor.....	49
Figura 30 - Análise MEV da Amostra B. Fonte: Autor	50
Figura 31 - Imagens MEV da Amostra A. Fonte: Autor	52
Figura 32 - Imagens MEV da Amostra F. Fonte: Autor	54
Figura 33 - Imagens MEV da Amostra D. Fonte: Autor	55
Figura 34 - Imagens MEV da Amostra C. Fonte: Autor.....	57
Figura 35 - - Termogravimetria CP-B2. Fonte: Autor	58
Figura 36	58
Figura 37 - Termogravimetria CP-A3. Fonte: Autor	59
Figura 38 - Termogravimetria CP-G3. Fonte: Autor	59
Figura 39 - Termogravimetria CP-D3. Fonte: Autor	60
Figura 40 - Termogravimetria CP-C2. Fonte: Autor	60
Figura 41 – Cura à seco das amostras. Fonte: Autor.	61
Figura 42 - Ensaio de compressão uniaxial	61
Figura 43 - Gráfico Densidade e Tensão. Fonte: Autor.....	66
Figura 44 - Relatório de Resultado. Fonte: Autor.....	70
Figura 45 - Gráfico de ensaio de Penetração em Célula. Fonte: Autor	71
Figura 46 - Carregamento vs Penetração. Fonte: [40]	71
Figura 47 - Célula C para ensaio de compressão. Fonte: Autor.	72

Figura 48 - Célula B para ensaio de Penetração. Fonte: Autor.....	72
Figura 49 - Difratograma amostra A3 - Fonte: Autor.....	76
Figura 50 - Difratograma amostra B2 - Fonte: Autor.....	76
Figura 51 - Difratograma amostra C2 - Fonte: Autor.....	77
Figura 52 - Difratograma amostra D3 - Fonte: Autor.....	77
Figura 53 - Difratograma amostra E2 - Fonte: Autor.....	77
Figura 54 - Difratograma amostra G3 - Fonte: Autor.....	78
Figura 55 - MEV DO CP A3. FONTE: AUTOR.....	79
Figura 56 - MEV DO CP B2. FONTE: AUTOR.....	80
Figura 57 - MEV DO CP C2. FONTE: AUTOR.....	81
Figura 58 - MEV DO CP D3. FONTE: AUTOR.....	82
Figura 59 - MEV DO CP E2. FONTE: AUTOR.....	83
Figura 60 - Imagem dos CPS 1.Fonte: Autor.....	84
Figura 61 - Imagem dos CPS 2.Fonte: Autor.....	85
Figura 62 - Imagem dos CPS 3.Fonte: Autor.....	86
Figura 63 - Imagem dos CPS 4.Fonte: Autor.....	87
Figura 64 - Imagem dos CPS 5.Fonte: Autor.....	88
Figura 65 - Imagem dos CPS 6.Fonte: Autor.....	89
Figura 66 - Imagem dos CPS 7.Fonte: Autor.....	90
Figura 67 - Imagem dos CPS 8.Fonte: Autor.....	91
Figura 68 - Imagem dos CPS 9.Fonte: Autor.....	93
Figura 69 - Imagem do Ensaio de Penetração, Célula A. Fonte: Autor.....	96
Figura 70 - Imagem do Ensaio de Penetração, Célula B. Fonte: Autor.....	97
Figura 71 - Imagem do Ensaio de Penetração, Célula C. Fonte: Autor.....	98

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Estado da Arte Regulamentos Internacionais	8
Tabela 2 - Estado da Arte Regulamentos Internacionais	9
Tabela 3 - Dados de Pista Aeroporto Fernando de Noronha	10
Tabela 4 - Tabela de Dados do ATR-72 para Aeródromos	11
Tabela 5 - Limite de Pesos em Projeto para ATR 72-600	12
Tabela 6 - Dados de carga em trem de pouso para Boeing 737.....	14
Tabela 7 - Histórico de Patentes do EMAS	15
Tabela 8 - Referências Histórico EMAS por Ano	16
Tabela 9 – Referências do Estudo do Concreto Celular no Brasil.....	18
Tabela 10 - Referência dos Cimentos Utilizados no EMAS.....	20
Tabela 11 - Trabalhos Base para Metodologia	20
Tabela 12 - Trabalhos para Análise comparativa.....	22
Tabela 13 - Referências para Análise DRX	23
Tabela 14 - Referências para Análise FRX.....	24
Tabela 15 - Referências para Análise MEV.....	25
Tabela 16 - Referências para TG/DSC	26
Tabela 17 - Normas para Ensaio	26
Tabela 18 – Artigos Selecionados para Compressão Uniaxial	28
Tabela 19 - Dados técnicos do aditivo. Fonte: Autor, adaptado de Camargo Química.....	31
Tabela 20 - Tabela de Proporções preparadas.	35
Tabela 21 – Dados para Moldagem do Ensaio de Penetração	38
Tabela 22 - Legenda imagens DRX.....	41

Tabela 23 - Tabela Resultados de FRX Amostra G3.....	46
Tabela 24 - Tabela FRX para amostra B2.....	47
Tabela 25 - Ensaio de Compressão Uniaxial em 7 dias.....	62
Tabela 26 - Ensaio de Compressão Uniaxial em 28 dias.....	62
Tabela 27 - Densidade da Massa.....	63
Tabela 28 - Parâmetros do Concreto celular. Fonte: Adaptado de Zhang,2013	69
Tabela 29 - Distâncias de parada. Fonte: Adaptado de Zhang 2013.....	69
Tabela 30 - Resultados do Esaio de Penetração. Fonte: Autor	70

SUMÁRIO

1.	RESUMO	4
2.	INTRODUÇÃO.....	4
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
3.1.	NORMAS INTERNACIONAIS.....	7
3.2.	NORMAS BRASILEIRAS PARA AERÓDROMOS.....	9
3.3.	AEROPORTO DE FERNANDO DE NORONHA	10
3.4.	AERONAVES ANALISADAS PARA O AEROPORTO	11
3.5.	REFERENCIAL DO CONCRETO CELULAR.....	14
3.5.1.	Breve Histórico.....	14
3.5.2.	Estudo Do Concreto Celular No Brasil	17
3.5.3.	Aditivos Incorporadores De Ar	18
3.5.4.	Material Cimentício.....	19
3.6.	REFERENCIAL DAS METODOLOGIAS BASE	20
3.6.1.	Análise Comparativa	21
3.7.	REFERENCIAL TEÓRICO DAS CARACTERIZAÇÕES.....	22
3.7.1.	Análise de Difração de Raios-X.....	22
3.7.2.	Análise de Fluorescência de Raios-X.....	23
3.7.3.	Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura e Energia Dispersiva ..	24
3.7.4.	Análise de Termogravimetria e Calorimetria Diferencial	25
3.7.5.	Ensaio de Compressão Uniaxial.....	26
3.7.6.	Ensaio de Penetração em Célula.....	27
4.	OBJETIVOS.....	29

4.1.	OBJETIVO GERAL	29
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
5.1.	MATERIAIS.....	30
5.1.1.	Cimento	30
5.1.2.	Aditivo Espumígeo	31
5.2.	Equipamentos.....	32
5.2.1.	Argamassadeira	32
5.2.2.	Furadeira de Alta Rotação	32
5.3.	METODOLOGIA	33
5.3.1.	Moldagem.....	33
5.3.2.	Densidade	36
5.3.3.	Análise de DRX.....	36
5.3.4.	Análise de FRX	36
5.3.5.	Análise de TG/DSC	36
5.3.6.	Ensaio de Compressão Uniaxial	37
5.3.7.	Ensaio de Penetração em Célula.....	37
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
6.1.	ANÁLISES DO MATERIAL ESTUDADO	40
6.1.1.	Difratometria de Raios-X (DRX)	40
6.1.2.	Análise por fluorescência de Raio-X (FRX)	44
6.1.3.	Análise por MEV/EDS	48
6.1.4.	Análise de termogravimetria (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) 57	
6.2.	ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL	60

6.3.	ENSAIO PENETRAÇÃO EM CÉLULA.....	70
7.	CONCLUSÃO.....	73
8.	PERSPECTIVAS	74
9.	APÊNDICE	75
9.1.	APÊNDICE A (RESULTADOS FRX)	75
9.2.	APÊNDICE B (DIFRATOGRAMAS NÃO TRATADOS).....	76
1.1.	APÊNDICE C (IMAGENS DE MEV).....	78
1.1.	APÊNDICE D (IMAGENS DOS CPS).....	84
1.1.	APÊNDICE E (IMAGENS DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO)	95
2.	ANEXOS.....	99
2.1.	ANEXO A.....	99
1.1.	ANEXO B.....	99
2.	REFERÊNCIAS	100

2. INTRODUÇÃO

No Brasil desde o ano de 2010 com os preparativos para a copa do mundo de 2014 os aeroportos brasileiros passaram por um processo de reforma e modernização, alterando tamanho de pista, área de hub de passageiros e adição de diversas tecnologias.

Relatórios anteriores da Força Aérea Brasileira atestando problemas para expansão em aeroportos de pista curta [1], pois com a crescente demanda por maior extensão de pista para as novas aeronaves. Com isso grande parte dos aeroportos urbanos apresentaram limitações de expansão devido à carência de área de expansão devido à grande densidade populacional, e cidades como Natal tiveram que construir aeroportos longe dos centros urbanos para atender às novas demandas.

Além da extensão de pista, outro fator de grande importância em um aeródromo é a existência de pistas de fuga. Essas pistas permitem ao piloto manobrar a aeronave para uma área segura fora do trânsito de decolagem e pouso de modo a evitar colisões ou acidentes graves; porém também necessitam de considerável extensão pelos padrões internacionais, 600 pés (aprox. 180 m). Também chamadas de RSA (Runway Safety Areas), as pistas de fuga, que são localizadas nas cabeceiras da pista de pouso e decolagem, necessitam de uma grande área que muitos dos aeroportos não dispõem.

Em reunião da Comissão de Ciência e Tecnologia realizada em 2007 [2], o EMAS (Engineered Material Arresting System) foi apontado como a única solução de segurança em pistas curtas para a aviação comercial, sendo cabos e redes soluções restritas ao meio militar. Esta solução permite reduzir a distância necessária para desacelerar uma aeronave até sua parada de forma segura, consequentemente reduzindo a extensão total da RSA.

O EMAS consiste de um cubo de concreto celular unido a uma camada polimérica de proteção e envolvido por um material impermeável. A sua principal função está na quebra ao receber o peso ou impacto do trem-de-pouso de uma aeronave, agindo como um desacelerador controlado. Este produto patentado nos EUA possui alto custo de produção, que dificulta a aquisição pela viabilidade financeira de alguns aeroportos.

Como nos apresenta [3] em uma análise sobre os incidentes de excursão de pista, que são a maioria dos incidentes aéreos, a necessidade de utilização deste sistema em aeroportos

apresenta grande importância. Mesmo que poucos casos de utilização do sistema tenham ocorrido, a maioria dos incidentes ocorridos causaram ferimentos em passageiros e danos substanciais às aeronaves. De forma semelhante nos apresenta [4], demonstrando a viabilidade econômica deste sistema quando comparado aos danos da integridade pessoal dos passageiros e da integridade estrutural da aeronave, bem como os custos gerados pela paralisação de parte ou totalidade do aeródromo causado pelo incidente.

É importante destacar que este sistema é uma medida preventiva de segurança, que cada dia se torna mais necessário pelo aumento do fluxo de aeronaves e pelo aumento de carga e tamanho destas como nos mostra [5]. Mesmo sendo um sistema já trabalhado a 40 anos nos EUA, e normatizado, o Brasil ainda está iniciando o debate, tendo a primeira instalação do sistema no Aeroporto de Congonhas em 2022 como nos apresenta a matéria do Ministério da Infraestrutura [6]. E nos EUA, onde se iniciou o sistema, ainda tem-se vários aeroportos em busca da instalação do sistema, onde se discute em cada estado a necessidade real ou não deste investimento, como o aeroporto de Chicago, que só recebeu em 2015 o EMAS após um longo debate com a FAA, após um incidente em 2003 no qual uma aeronave parou próximo a uma rodovia [7].

O Sistema EMAS é atualmente um segredo empresarial, com poucas empresas dominando. Se considerar a autorização da agência norte americana FAA (Federal Aviation Administration) para implementação em aeroportos é possível apontar 2 empresas a Runaway Safety e a Zodiac (atual EMASMAX), o que orna um nicho de mercado muito específico e de conhecimento restrito a um pequeno grupo de pessoas. Por isso buscando quebrar o monopólio dos Estados Unidos em fabricação e uso deste sistema, vários países começaram a pesquisar o EMAS, procurando desenvolver um modelo próprio utilizando materiais que possuem comportamento semelhante.

Este trabalho busca analisar as especificações necessárias para um material ser considerado um EMAS e propor uma proporção adequada para um concreto celular de modo que se utilize materiais nacionais e baratos para a fabricação de um material semelhante, para a aplicação em aeroportos. Tendo como motivação a utilização em aeroportos de pista curta como o Aeroporto de Fernando de Noronha; este foi escolhido exatamente pelas suas peculiaridades e necessidades, visto que o turismo é a principal fonte de renda no local e limita-se a pequenas aeronaves pela pequena extensão de pista,

1840m, o que poderia mudar e dar maior segurança ao tráfego caso se realizasse a instalação do EMAS.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho teve como inspiração o EMA (Engineered Material Arresting System) que é uma superfície instalada ao fim da pista de pouso e decolagem de aeronaves. Seu primeiro uso na aviação civil foi realizado pela empresa Zodiac Aerospace com o nome de EMASMAX®, atualmente outra empresa, a Runway Safe, desenvolveu um produto para atender às regulações da FAA (Federal Aviation Administration) nos EUA, como mostra Skybrary[8]. O sistema é composto de diversas células a serem destruídas durante um evento de saída de pista, desacelerando de forma segura a aeronave; na Figura 1 podemos observar a imagem disponibilizada pela empresa sobre o sistema.

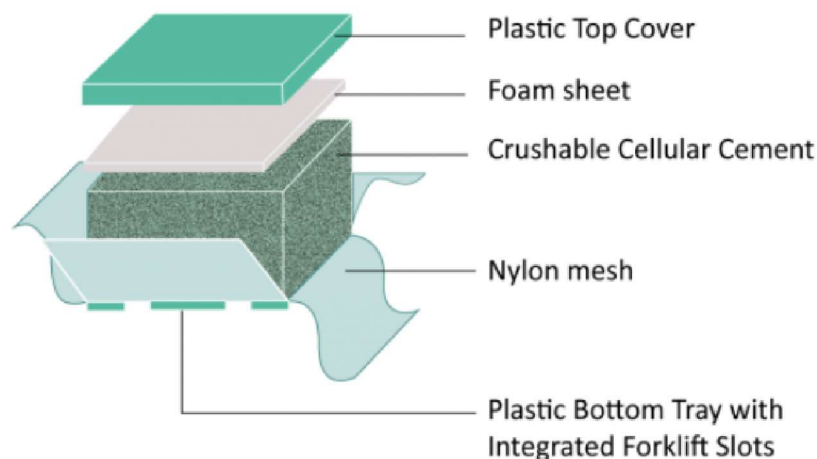


Figura 1 – Célula do EMAS. Fonte: EMASMAX

Visto isso é necessário avaliar as regulações deste órgão que foi o pioneiro na regulação deste sistema, bem como verificar as normas nacionais que regulam aeroportos, pistas de segurança e os materiais serem utilizados.

A seguir será detalhado ainda os artigos utilizados como referência para a estruturação da metodologia deste trabalho, tanto em sua parte de fabricação, ensaios, como de caracterização e simulação.

3.1. NORMAS INTERNACIONAIS

O EMAS é o Engineered Materials Arresting System, material que foi desenvolvido em meados de 1990 em uma parceria da FAA com a Zodiac®. A Circular AC 150/5220-22B[9] nos traz alguns conceitos e os materiais reconhecidos pelo órgão por estarem dentro dos parâmetros aceitáveis.

De acordo com regulamento da Agência Federal de Aviação dos EUA (FAA), e conforme circulares da Federal Aviation Administration dos Estados Unidos [9] e [10], o EMAS é Sistema de Material de Arrasto projetado para agir nas Áreas de Fuga Segura (Runway Safety Area) das pistas de pouso e decolagem atuando no trem de pouso de uma aeronave para desacelera-la de forma segura e dimensionada, mitigando danos a estrutura da aeronave, e portanto dos passageiros. O sistema dispõe de um tempo de vida de 20 anos de operação, caso não seja necessária sua substituição por eventos de excursão de pista, evento este que quebrará células do sistema, necessitando de reposição.

Em 2012 após uma ampla pesquisa comparando a eficiência de diversos sistemas EMAS instalados e buscando melhorar a eficiência e segurança destes foi gerada a circular de Projetos de Aeroportos [11] afirmando que as RSA deveriam ter no mínimo 600 *pés* (182,88m), para serem consideradas eficientes e seguras.

Um projeto de EMAS necessita considerar os parâmetros da aeronave que o utilizará, como: peso próprio e carga transportada da aeronave, pressão de contato do pneu, configuração dos pneus, centro de gravidade da aeronave e velocidade. O modelo deve considerar a desaceleração na aeronave e passageiros. Algumas das características exigidas pela FAA para o sistema são:

- a) A menor largura do EMAS deve ser a largura da Runway
- b) A Base deve ser construída pavimentada, não necessariamente com a mesma resistência da pista de decolagem e pouso, mas suportando uma aeronave completamente carregada.
- c) Velocidade de Entrada. Deve ser projetado para desacelerar uma aeronave conforme velocidade de fuga, 70 nós, sem impor cargas que excedam os limites de projeto da aeronave. Caso não exista RSA suficiente para o projeto padrão de EMAS, deve-se projetar para a máxima desaceleração da aeronave. Os modelos de EMAS apresentados na circular de 2012 da FAA não se mostraram eficientes para aeronaves com 25000 *pounds* (11.339,8 kg).
- d) EMAS deve permitir de forma segura entrada e saída da aeronave, tanto para equipes de resgate que precisarem entrar como para passageiros a serem retirados.
- e) Manutenção. EMAS deve ser capaz de suportar tráfego regular de pedestre, mas NÃO de veículos.
- f) EMAS deve prover proteção na área padrão de uma RSA, 600 *pés* (182,88m).

g) Drenagem, deve existir um sistema de drenagem que preveja acúmulo de água na superfície.

Além do funcionamento do sistema, pode-se destacar exigências para o material:

- a) Resistente a água, de modo a não alterar a performance;
- b) Não atrair vermes, aves ou animais;
- c) Não refletivo ou brilhante
- d) Não inflamável
- e) Não comburente
- f) Não emitir fumaça durante incêndio
- g) Não suportar crescimento de plantas, permitindo uso de herbicida;
- h) Exibir resistência e densidade constante nas variações climáticas;

i) Ser resistente à deterioração por: sal, fluidos aeronáuticos, combustíveis aeronáuticos, UV, água, tinta e herbicidas.

A circular [9] nos traz ainda os três materiais que foram aceitos como EMAS, o concreto celular e o *foam glass* da Zodiac® e a *foamed silica bed* da Runaway Safe®. Ainda existe uma outra empresa que utiliza um modelo de concreto celular aprovada somente pela China pelo Civil Aviation Administration of China's (CAAT), a empresa Lanza-1 EMAS® em uma pesquisa finalizada em 2010 pela China Academy of Civil Aviation Science and Technology (CAST)[12].

Tabela 1 - Estado da Arte Regulamentos Internacionais

CIRCULAR	TÍTULO	OBJETIVO
FAA AC 150/220-22B	EMAS for Aircraft Overrun	Parâmetros para o EMAS
FAA AC 150/5325-4B	Runway Length Requirements for Airport Design	Parâmetros de extensão para RESA
FAA AC 150/5300-13	Airport Design	Alterações sobre taxi aéreo e eventos de fuga de pista
International Civil Aviation Organization (ICAO) vol. A40-WP/331. 2019, p. 3-5.	EMAS Implementation in China	Análise de implementação de Sistema EMAS na China

FONTE: Autor

3.2. NORMAS BRASILEIRAS PARA AERÓDROMOS

Conforme a Lei 11.182/2005 [13] que determina a criação da Agência Nacional de Aviação Civil, incumbindo esta de administrar, fiscalizar e desenvolver a aviação nacional, enquanto submetida ao Ministério da Defesa. Esta através de seus regulamentos e normatizações faz a gestão dos aeroportos e do transporte aéreo civil pelo país.

Os projetos de aeródromos brasileiros seguem as diretrizes do Regulamento Brasileiro da Aviação Civil, sendo regido por diversos parâmetros normativos, para esta dissertação ater-se-á a dois principais o RBAC nº 01 Emenda 08 [14] e RBAC nº 154 Emenda 06 [15]. A partir dos quais definem-se os termos a serem usados no presente texto.

A incursão de pista é definida como qualquer ocorrência em que uma aeronave, veículo, pessoa ou animal está na zona protegida, designada para aterrissagem e decolagem de aeronaves. Para este trabalho serão consideradas somente as incursões de aeronaves durante o pouso e a decolagem nos parâmetros da FAA.

A Zona de Parada (Stopway) se define pelo RBAC nº1 como uma área retangular cuja largura deve ser igual ou superior ao da pista, feita junto à pista como um prolongamento desta a partir do eixo em ambos sentidos da pista. O objetivo é preparar uma zona segura caso uma decolagem seja abortada sem causar danos estruturais e permitindo a desaceleração necessária. Pelo RBAC 154 [16] essa zona é denominada de Área de Segurança de Fim de Pista (RESA). Mantendo-se uma confiabilidade na manutenção da aeronave e focando no taxiamento da aeronave após o pouso. Esta área possui as seguintes dimensões:

- a) Comprimento maior de 90m;
- b) Largura igual ou superior a pista requerida para a aeronave crítica associada;
- c) Um sistema de desaceleração, se instalado, as dimensões devem ser adequadas ao projeto do sistema utilizado
- d) Limpeza mantida a todo tempo, para evitar danos a turbinas de aeronaves;
- e) Declividades mantidas conforme projeto de pista;
- f) Quanto à resistência se pede que atenda ao projeto determinado para ela, tendo um sistema de desaceleração ou não.

Tabela 2 - Estado da Arte Regulamentos Internacionais

NORMA	TÍTULO	OBJETIVO
Lei 11.182/2005	ANAC	Criação da ANAC e competências
RBAC 01/E-08	Definições, regras de redação e unidades de medidas para uso nos normativos da ANAC	Definir padrões para normatização nacional
RBAC 154/E-06	Projeto de Aeródromos	Extensão de pistas
RBAC 154/E-07	Projeto de Aeródromos	Determinar Incidentes e RESA

FONTE: Autor.

3.3. AEROPORTO DE FERNANDO DE NORONHA

A observação da aplicação de um sistema como o EMAS exige, antes de tudo, um aeródromo de estudo onde seja necessária sua aplicação, tanto para segurança operacional quanto pela viabilidade econômica. Como exemplo para análise foi escolhido o aeroporto de Fernando de Noronha. Segundo informações do Departamento de Controle de Tráfego Aéreo [17] o aeroporto possui as seguintes dimensões da Tabela 3:

Tabela 3 - Dados de Pista Aeroporto Fernando de Noronha

NOME	Valores 1	Valores 2
RWY	12 m	30 m
TORA	1845 m	1845 m
TODA	1845 m	1845 m
ASDA	1845 m	1845 m
LDA	1845 m	1845 m
ALT. Geoidal	-5,46	-5,46
Coordenadas	S 03 51 14	S 03 51 19
	W 032 25 52	W 032 24 52

FONTE: DCEA adaptado por autor

As informações sobre as siglas e suas definições podem ser encontradas no Glossário da Aviação Civil [18], bem como no Regulamento de Aviação Civil [15]

RWY = Extensão de Pista (Runway Direction)

TORA = Corrida de Decolagem (TORA - Take-Off Run Available)

TODA = Distância Disponível para Decolagem (TODA - Take-Off Distance Available)

ASDA = Distância Disponível para Aceleração e Parada (ASDA - Accelerate-Stop Distance Available)

LDA = Distância Disponível para Pouso (LDA - Landing Distance Available)

ALT. Geoidal = Altitude Geoidal

Com essas informações ele é classificado como aeródromo de pista curta, não podendo receber grandes aeronaves. Um exemplo disso está nas aeronaves que atualmente transitam neste meio desde 2012, o EMBRAER EMB-175 com 86 assentos e o Turbo hélice ATR 72-600 com 67 vagas [19]; é importante observar que durante a elaboração desta dissertação está ocorrendo uma interrupção temporária imposta pela ANAC para aeronaves de turbohélice devido à operação de manutenção da pista principal do aeródromo iniciada em outubro de 2022 [20].. Para uma localidade que depende quase que exclusivamente de transporte aéreo para levar passageiros, comidas, itens diversos e até lixo, o custo gerado por não poder utilizar aeronaves maiores é muito grande.

3.4. AERONAVES ANALISADAS PARA O AEROPORTO

Para a aeronave ATR 72-600 utilizada no aeroporto de Fernando de Noronha temos os seguintes dados conforme o Manual. Em condições normais a distância necessária para pouso em pista é de aproximadamente 915m, e necessitando de 1333m, no mínimo, para decolagem conforme folder [21] e manual [22].

Para a análise do sistema EMAS já foi demonstrado que um dos fatores determinantes é conhecer a aeronave que será utilizada para simulação no sistema. Como o aeroporto de Fernando de Noronha foi utilizado para a análise, as aeronaves consideradas serão as que operam no aeródromo nesse momento.

Uma das aeronaves é o ATR 72-600, em que podemos observar os seguintes requisitos conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de Dados do ATR-72 para Aeródromos

AERONAVE ATR 72-600 PERFORMANCE EM AERÓDROMOS	
DISTÂNCIA DE TAKE OFF	
Básico (MTOW – ISA – SL)	1.333m – 4.373 ft
Opcional (MTOW – ISA – SL)	1.367m – 4.485 ft
Em TOW por 300 Nm (Max pax – ISA – SL)	1.175m – 3.855 ft
Em TOW por 300 Nm (Max pax – ISA +10 – 3000 pés)	1.410m – 4.626 ft
Velocidade de TAKE OFF (V2 min MTOW)	115 KIAS
DISTÂNCIA DE POUSO (JAR25)	
Básico (MLW – SL)	915m – 3.002 ft

Em LW (Max pax + reservas + SL)	862m – 2.828 ft
Velocidade de Referência ao pousar	113 KIAS

Fonte: Adaptado de Folder ATR 72-600, Tabela em ANEXO 1

As limitações de peso da aeronave a ser distribuída podem ser avaliadas a partir da carga máxima estimada de projeto, conforme Tabela 5. De acordo com o manual deve-se considerar condições de clima e dos limites, porém não foi encontrado informações sobre carga máxima no trem de pouso como descrito e outras aeronaves como o BEM-175 e o Boeing 737, que serão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Limite de Pesos em Projeto para ATR 72-600

LIMITE DE PESOS EM PROJETO PARA ATR 72-600	
PESO MÁXIMO	KG
TAXI	22.970
TAKE OFF	22.800
POUSO	22.350
ZERO FUEL	20.800

Fonte: Adaptado de Folder ATR 72-600, Tabela em ANEXO 1

Outra aeronave a considerar para este aeródromo é o Boeing 737, modelo utilizado nos artigos que serão citados a seguir como base para análise de um sistema EMAS e uma RESA. Ao observar a Figura 2 e a Figura 3 é possível observar os 3 pontos de contato da aeronave com o sistema, o trem de pouso frontal sendo o primeiro e descrito como Nose Gear (NG), este trem de pouso frontal é o que possui menor resistência, sendo o principal para analisar a resistência máxima de um EMAS de modo a não danificá-lo.

Os trens pouso traseiros, denominados Main Gears (MG), que serão os responsáveis pelos cálculos principais de frenagem da aeronave por terem maior ponto de contato e maior resistência. Um resumo de informações ainda pode ser observado na Tabela 6.

Neste trabalho não será realizada simulação das forças atuantes, porém a compreensão do funcionamento é necessária para comparar os resultados obtidos com as simulações selecionados e os artigos já existentes. Sendo o foco na fabricação e caracterização do material fabricado, buscando atender parâmetros estabelecidos em trabalhos anteriores.

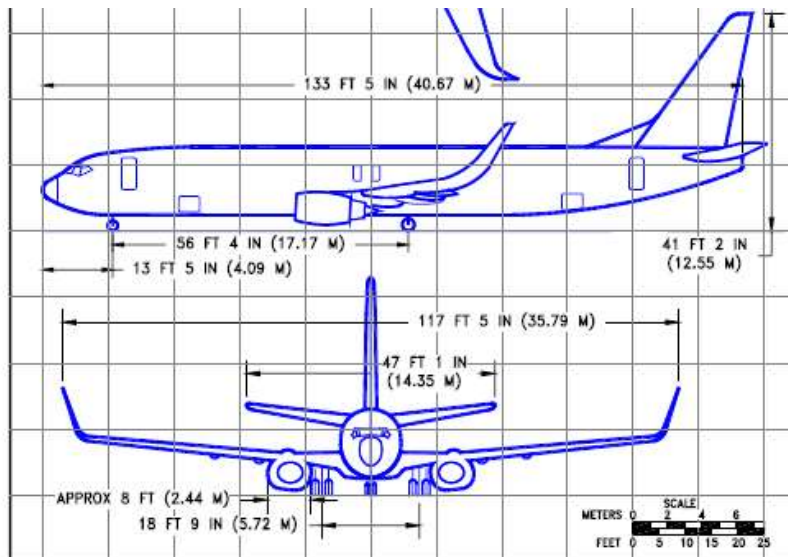


Figura 2 – Dimensões Boeing. Fonte Manual da Boeing

V_{NG} = MAXIMUM VERTICAL NOSE GEAR GROUND LOAD AT MOST FORWARD CENTER OF GRAVITY
 V_{MG} = MAXIMUM VERTICAL MAIN GEAR GROUND LOAD AT MOST AFT CENTER OF GRAVITY
 H = MAXIMUM HORIZONTAL GROUND LOAD FROM BRAKING
 NOTE: ALL LOADS CALCULATED USING AIRPLANE MAXIMUM DESIGN TAXI WEIGHT

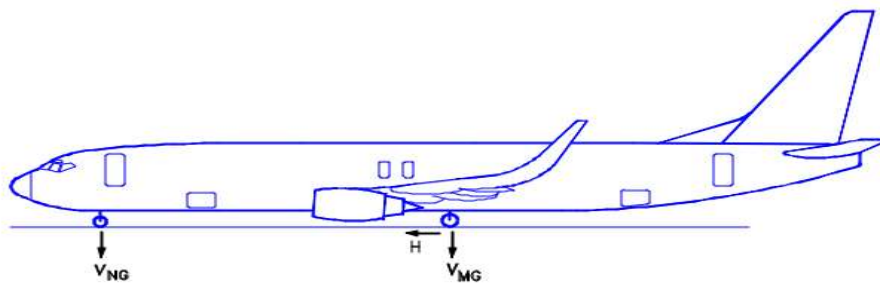


Figura 3 – Forças Máximas atuantes no trem de poiso de um Boeing 737. Fonte Manual da Boeing

Tabela 6 - Dados de carga em trem de pouso para Boeing 737

MODEL O	UD	PESO MÁXIMO DE TAXIAME NTO	V _{NG}		V _{MG}	H	
			CARGA ESTÁTIC A	CARGA DE FRENAG EM ft/s ²		CARGA ESTÁTIC A	CARGA DE FRENAGE M ft/s ²
737 BBJ	Kg	77.800	7.900	13.340	35.700	12.100	28.550
737 BBJ2	Kg	79.250	6.850	11.300	37.050	12.300	29.650

Fonte: Adaptado de Manual da Boeing, Tabela em ANEXO 2

3.5. REFERENCIAL DO CONCRETO CELULAR

O concreto celular ou foam concrete é um material cujo uso e aplicação vem desde a década de 90. Seus usos iniciais focaram em alvenaria de vedação, pelas suas boas propriedades de controle térmico devido à alta porosidade. Com aplicações variadas ao longo do tempo.

3.5.1. Breve Histórico

Concreto celular é um tipo especial de concreto que se caracteriza pela menor densidade e maior porosidade. A NBR 6118 (2003) classifica o concreto celular como um concreto com incorporação de ar e de densidade entre 2000 kg/m³ e 2400 kg/m³. Enquanto conforme [23] os concretos celulares possuem densidade entre 400 e 1600 kg/m³, variando o uso a que se propõem.

A porosidade é uma das variáveis principais para analisar o comportamento dos materiais, em estudos como [24] a densidade do concreto celular se encontra em relação direta com sua resistência a compressão.

Pôde-se classificar o concreto celular em dois tipos conforme [25], os fabricados pela incorporação de ar e os fabricados pela incorporação de agregados leves. A norma ACI 523.2R (1996) define como concreto celular densidades menores que 800 kg/m³.

Como é apresentado por Fu [23], o concreto celular teve seu início de estudo em 1923 puramente voltado para uma escala comercial, patenteado por Axel Eriksson. Sendo apenas a partir da década de 50 que iniciaram investigações do comportamento mecânico do material voltado para substituir a alvenaria de vedação, sua alta porosidade traz ao material um menor peso e sua estrutura forma um colchão de ar interno que gera um maior conforto térmico ao usuário. Outros usos como embasamento de pontes, enchimento e pisos em lajes despontaram na década de 70 tanto nos EUA quanto na Europa.

Outras aplicações como é apresentada por [26], em um breve histórico, demonstra um grande crescimento do uso do *foamed concrete* no Reino Unido, onde se caracterizou o material pelo modo de produção de espuma, onde está recebeu dois nomes espuma seca e espuma úmida, que varia conforme sua aplicação.

A espuma úmida (wet foam), como foi chamada, possui um foco maior para densidades acima de 1100 kg/m^3 e um menor controle tecnológico, enquanto a espuma seca (dry foam) trabalha com densidades menores, necessitando de um controle tecnológico maior, o que permite um maior controle da fabricação do material.

Existem ainda aplicações para preenchimento de fissuras em alvenaria para melhor conforto térmico e preenchimento de embasamento de pontes [26], observa-se ainda utilização para preenchimento em áreas de cavernas em que a mineração estava esgotada, ou inviável economicamente, com a aplicação de concreto celular com densidade de 600 kg/m^3 .

A visibilidade do material para fins com o EMAS começou em meados de 1980 nos EUA, onde a fragilidade ao impacto antes vista como defeito foi observada como um ponto positivo para uma nova aplicação em materiais destrutíveis, a pesquisa foi uma parceria entre o governo norte-americano e a empresa Engineered Arresting Systems Corporation (ESCO). A patente foi formada em meados da década de 1990 mantendo-se até momento como um segredo, sendo possível conhecer somente os parâmetros definidos pela FAA. Podemos observar na Tabela 7 abaixo algumas das primeiras patentes sobre o sistema registrada nos EUA.

Tabela 7 - Histórico de Patentes do EMAS

REF	PATENTE	ASSUNTO	DATA
[27]	5.789.681	Aparatos de teste e métodos para o EMAS	04/08/1998
[28]	5.885.025	Registro de um dos primeiros EMAS	23/03/1999
[29]	5.902.068	Métodos de fabricação de célula unitária de EMAS	11/05/1999

A partir disto várias pesquisas seguiram, buscando materiais que obtivessem comportamento semelhante e uma maior dedicação em pesquisas buscando realizar modelagens matemáticas que pudessem projetar e simular situações de excursão de pista onde o sistema fosse usado. Um exemplo disso pode-se encontrar no artigo [30] (2008), e em sequência [31] (2009), onde uma busca pela modelagem matemática ideal para cada material mostra o interesse pela regulamentação de modo a trazer uma proteção jurídica. Proteção esta que só vem em 2013 com a norma, já citada, da FAA AC-150-5220-22B. Onde após definidos vários parâmetros de projetos, e testes realizados em escala real, foi possível se estabelecer o que seria este material.

Como nos mostra Homero [32], em 2009, observando 3 aeroportos dos EUA que já operavam o EMAS e avalia os problemas encontrados como: selantes entre células se rompendo, descascamento de revestimento, eflorescência nas juntas entre os blocos.

É importante destacar que a instalação do sistema nos aeroportos datava entre 2002 e 2004. Além de apresentar os problemas ao sistema existente na época, apresenta 2 alternativas que estavam em análise na época: o concreto celular e uma área de solo macio com cascalhos. A importância de compreender isto vem da compreensão de que no momento somente uma empresa detinha a tecnologia EMAS, e a falta de competitividade tornava o preço do material caro; logo surge a necessidade de buscar soluções e materiais alternativos para se criar sistemas semelhantes e de menor custo.

Outro detalhe importante de observar no artigo de Homero está na observação em sua conclusão, o sistema operava em fase experimental e ainda enfrentava desafios quanto à manutenção, onde nem sempre era possível repor o material original, então se buscava uma forma de operadores utilizarem materiais alternativos para realizar reparos no sistema, de modo que ele tivesse sua eficácia continuada.

Tabela 8 - Referências Histórico EMAS por Ano

REF	TÍTULO	OBJETIVO	ANO
[26]	Introduction to foamed concrete: What, why, how?	Estudo sobre as aplicações do CC no Reino Unido e análise do comportamento mecânico	2005
[30]	Sensitivity analysis of engineered material arrestor systems to aircraft and arrestor material characteristics	Modelagem da interação cinética e do comportamento do sistema durante um evento de excursão de pista	2008
[31]	Perform. Predict. Strong Company's Soft Gr. Arrestor Syst. using a Numer. Ana	Modelagem da interação cinética e do comportamento do sistema durante um evento de excursão de pista	2009
[32]	Investigation of existing engineered material arresting system at three U.S. Airports	Avaliação dos principais problemas de manutenção do sistema EMAS e proposição de reparos com material similar.	2009
[25]	Estudo das Propriedades Físicas E Mecânicas do Concreto Celular Estrutural	Verificar comportamento mecânico, bem como benefícios e problemas ao utilizar o CC para fins estruturais.	2015
[23]	Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review	Revisão Bibliográfica sobre o assunto	2020
[24]	Investigation of mechanical and foamcrete physical Properties	Avaliar comportamento mecânico do <i>foam concrete</i>	2021

3.5.2. Estudo Do Concreto Celular No Brasil

Em 1992 pode-se observar ainda o trabalho de [33], que traz características do concreto celular e seus primeiros estudos no Brasil. Os estudos mantiveram o foco na utilização em alvenarias e para preenchimento de fissuras. Não muito distante em 2006 ainda observa-se várias pesquisas utilizando o concreto celular autoclavado como demonstra [34], onde o concreto celular é colocado em uma câmara para ser aplicada alta pressão, adquirindo uma maior resistência à água do que o usual, bem como maior resistência à compressão.

Foi demonstrado por [35] que o concreto celular não se mostrou um bom material para uma alvenaria de vedação externa, por apresentar problemas de retração e baixa resistência ao impacto. A utilização externa deste material traria problemas de estanqueidade da alvenaria, pois um chapisco e uma argamassa para trazer impermeabilização à parede seria mais custoso que os blocos cerâmicos usuais, e, dependendo da região, pode estar suscetível a projéteis como granizo.

Já o trabalho apresentado por Alvarenga [36] traz uma análise estrutural e um breve estudo da utilização do concreto celular autoclavado para fins estruturais, onde avalia a contribuição deste material para evitar deformações prejudiciais a pórticos metálicos enquanto mantém suas características e integridade estrutural. O material apresentou comportamento aceitável, mas a autora constata a dificuldade do cálculo, pois em 2002 ainda carecia de softwares e modelos para o dimensionamento mais preciso.

Fica claro que o Brasil, assim como outros países já citados, Reino Unido e Holanda, possui um contínuo estudo para o CC e suas aplicações, porém é perceptível o foco na aplicação para preenchimento em estruturas e utilizando como uma alvenaria para melhor conforto térmico. As pesquisas que focam na aplicação deste material para um EMAS são relativamente recentes ao comparar com EUA ou Suécia, por exemplo.

Acidentes como o ocorrido em 2007 no voo da TAM 3054 no Aeroporto de Congonhas como descrito por [5], trazem alguns argumentos sobre a necessidade do EMAS como descrito na introdução; porém o autor observa que não se encontram estudos sobre o material no Brasil e propõe utilizar o concreto celular pelo comportamento semelhante.

A construção do EMAS no aeroporto de Congonhas pelas empresas *Runway Safety* e KIBAG feito com espuma de sílica, a partir de vidro reciclado, trouxe novos trabalhos ao debate do sistema como é possível observar na publicação feita no Jornal da USP [37] e no trabalho de análise de risco realizado por [38] onde se realiza uma análise de risco sobre o sistema e seus benefícios para implantação em aeroportos.

A seguir a tabela de referências organizada cronologicamente, de modo a permitir observar estudos sobre o concreto celular ao longo do tempo, a partir dos artigos encontrados.

Tabela 9 – Referências do Estudo do Concreto Celular no Brasil

REF	TÍTULO	OBJETIVO	ANO
[33]	Considerações sobre algumas Propriedades dos Concretos Celulares Espumosos	Estudar principais propriedades do Concreto Celular Espumoso	1992
[34]	Método construtivo de alvenaria de vedação de blocos de concreto celular autoclavado	Estudar a utilização de Concreto Celular Autoclavado em alvenarias de Vedação	1996
[36]	Análise Teórico-Experimental de Estruturas Compostas de Pórticos de Aço Preenchidos com Alvenaria de Concreto Celular Autoclavado	Realizar estudo, dimensionamento e modelagem do comportamento de um pórtico metálico e sua interação com paredes de Concreto Celular Autoclavado	2002
[35]	Avaliação de desempenho estrutural dos sistemas construtivos de solo-cimento e concreto celular aplicados em edificações de casas populares no estado do Amazonas	Avaliar comportamento e desempenho qualitativo de aplicação do Concreto Celular	2006
[5]	Prevenção de acidentes em pistas aeroportuárias	Estudo apresentando o EMAS como possível alternativa para evitar o acidente fatal ocorrido em 2007 no aeroporto de Congonhas	2017
[37]	Tecnologia adotada em Congonhas aumenta segurança em pouso de aviões grandes	Breve texto do Jornal da USP apresentando o EMAS e sua importância	2022
[38]	Implantação de EMAS em Aeroportos Sujeitos à Excursão de Pista por meio de Análise de Risco	Trabalho realizando análise de riscos e o benefício do EMAS para reduzir riscos em excursões de pista.	2022

3.5.3. Aditivos Incorporadores De Ar

Os aditivos incorporadores de ar, adicionam porosidade ao concreto, podendo-se chamá-lo também de concreto leve. De acordo com a NBR 12645-1992 “o concreto leve é obtido pela introdução, nas argamassas, de bolhas de ar, com dimensões milimétricas, homogêneas, uniformemente distribuídas, estáveis, incomunicáveis e indeformadas ao fim do processo, cuja densidade de massa aparente no estado fresco deve estar compreendida entre 1300 kg/m³ e 1900 kg/m³”.

As bolhas de ar podem ser obtidas na forma de uma espuma pré-formada ou geradas no interior do misturador por ação mecânica, devido a um agente espumante.” É importante observar que esta norma tem por foco a definição de um material para utilização em paredes, onde além da resistência necessária aos esforços de compressão e flambagem exige-se resistência para instalar equipamentos nela por perfuração, neste caso com a contribuição da resistência da argamassa a ser aplicada. Por isso, uma densidade maior do que a utilizada para preenchimento no EMAS é necessária.

A norma ainda enfatiza que não se deve utilizar equipamentos de vibração e adensamento, com tempo mínimo de desforma em 12h ou quando apresentar rigidez mínima necessária. Quanto a cura, recomenda-se umedecimento por no mínimo 2 dias, ou a utilização de películas impermeáveis. As normas utilizadas para o concreto celular são: NBR 5732, 5733, 5735 e 5736.

Pode-se definir um agente incorporador de ar ao concreto como: um produto químico que através de bolhas de ar estáveis em espuma podem ser adicionados em cimentos e argamassas. Sendo importante que essas bolhas resistam aos esforços decorrentes da mistura, do bombeamento, permanecendo majoritariamente estáveis até o início do endurecimento do cimento.

Os aditivos incorporadores de ar possuem origem sintética, acetatos e sulfatos, ou orgânica, proteínas e resinas saponificáveis. A espuma pode ser preparada fora e incorporada ao material em uma segunda etapa ou adicionados já na preparação cimentícia. Por esse material que foi amplamente utilizado o concreto celular também foi chamado de concreto espumoso ou foram concrete, com diversas aplicações na construção civil.

3.5.4. Material Cimentício

Muitos dos artigos analisados como [31],[24], [39]–[41], apresentam a utilização do cimento análogo ao CP V ARI. Conforme a [42], um cimento não composto, muito utilizado em aplicações industriais e com foco na utilização de pré-moldados pela sua característica principal de alta resistência inicial, que permite ser retirado da forma mais rapidamente, trazendo maior eficiência à fabricação de pré-moldados.

Sua eficiência e aplicação já possuem um uso consolidado, mas devido aos cimentos compostos que possuem preços maiores que os cimentos mais usuais no mercado, outros estudos para barretar e utilizar cimentos locais vem sendo realizados como nos mostra [43]. Onde uma avaliação de menor de custo de material nem sempre corresponde à economia em função da produtividade e da aplicação, mas à facilidade de aquisição do material no local.

Ao levar em consideração que um sistema EMAS, utilizando concreto celular não necessariamente necessita de uma produção industrial, mas de uma instalação planejada e com um mercado restrito, aeroportos com grande movimentação, então optou-se por utilizar o cimento CP II – Z [44], disponível na região, Recife, com um preço bem menor do que o CP V – ARI. Para observar a diferença, na aquisição do material em abril de

2022 o preço do CP II-Z era de R\$ 31,50 o saco, enquanto o CP V-ARI estava por R\$ 52,00, um aumento de 65% no valor do material em relação ao mais barato; que por ser principal composto vai impactar diretamente no custo final do material.

Tabela 10 - Referência dos Cimentos Utilizados no EMAS

REF	TÍTULO	OBJETIVO	ANO
[42]	NBR 5733 Cimento de Alta Resistência Inicial	Determinar parâmetros para o cimento CP V - ARI	1991
[43]	Análise da Resistência à Compressão de Concretos Produzidos com CP II-F e CP V	Avaliar melhores aplicações e desempenho dos cimentos CP V e CP II - F	2017
[44]	NBR 5736 Cimento Pozolânico	Determinar parâmetros para o cimento CP II - Z	1991

3.6. REFERENCIAL DAS METODOLOGIAS BASE

Para a formulação da metodologia do trabalho foram separados como base 3 trabalhos realizados. Estas publicações foram escolhidas pela clareza da metodologia e pela exequibilidade de seus métodos, bem como por apresentarem as proporções dos materiais utilizados de forma mais descritiva. Estes foram:

Tabela 11 - Trabalhos Base para Metodologia

REF	TÍTULO	OBJETIVO	ANO
[24]	Investigation of Foam Concrete Mechanical and Physical Properties	Caracterizar comportamento mecânica de um concreto celular espumoso	2021
[39]	Avaliação Experimental de Materiais de Componentes de Sistemas de Arraste Aeroportuários; concreto com o aditivo espumante e Perlita	Avaliar a aplicação de um concreto celular com a adição de perlita e comparar com o simples para utilização em EMAS	2017
[40]	Foamed Concrete Based Material as a Soft Ground Arresting System for Runways and Airfields	Avaliar a aplicação do concreto celular espumoso para um EMAS	2016

3.6.1. Análise Comparativa

Ao observar trabalhos como de [45] observa-se que ao utilizar menores as dosagens de aditivos as resistências obtidas ao longo do tempo do concreto são maiores, como também a relação entre a densidade e a resistência sendo inversamente proporcionais. O que se pode observar nos trabalhos encontrados, possivelmente pela redução da estrutura do concreto e do aumento de vazios nas amostras.

Porém, o importante a ser obtido além da resistência é a capacidade do material de absorver o impacto ao se colapsar. Enquanto [39] utilizou um modelo de tese de impacto próprio para o seu ensaio observa-se [40] um modelo que simula a área de contato das rodas do trem-de-pouso da aeronave através de discos; outros trabalhos como o de [46] tenta utilizar modelagem computacional para facilitar o ensaio dos corpos de prova ao modelo uniaxial usual. O que todos demonstram concordar é na relação em que a resistência do concreto projeto deve ser igual ou inferior à resistência do trem de pouso, de modo a evitar problemas ao eixo dos pneus e evitar grandes desacelerações.

Ao observar o trabalho com as cinzas volantes é possível inferir que o de cinzas volantes apresentou resistência e densidades maiores, apresentando um bom comportamento mecânico para grandes aeronaves, porém pouco eficaz, nos traços apresentados para aeronaves menores.

O trabalho com perlita apresentou uma maior deformação da amostra com o impacto e menor densidade, podendo apresentar um ótimo custo benefício para aeroportos menores que utilizam aeronaves de menor porte; mas também permitindo a utilização em aeroportos maiores com a dosagem que permita maior resistência.

O que se observa nos três trabalhos, e se destaca no terceiro, é a influência de cada material na resistência, pode-se destacar entre os fatores observados os que mais alteram a resistência, em ordem decrescente os seguintes:

- I) O aditivo espumante é o principal responsável, ao adicionar vazios e alterar a densidade modifica grandemente os valores das propriedades físicas. Sendo a porcentagem ideal de aditivo entre 40% e 60% da proporção cimento-aditivo.
- II) A relação água-cimento. Essa relação apresentou grande regência quanto aos valores de resistência, tanto à sua ação quanto ao aditivo quando ao próprio concreto que necessita adsorvê-la na estrutura;
- III) Os materiais adicionais como fillers ou outros componentes calcários como a perlita apresentam uma contribuição importante para o ganho de resistência. E, ao analisar, os trabalhos observa que o ganho de resistência ao longo da cura é diretamente alterado pela presença desses materiais. Possivelmente ao preencherem os vazios menores da estrutura permite-se maior estabilidade do material.

Tabela 12 - Trabalhos para Análise comparativa

REF	TÍTULO	OBJETIVO	ANO
[24]	Investigation of Foam Concrete Mechanical and Physical Properties	Caracterizar comportamento mecânica de um concreto celular espumoso	2021
[39]	Avaliação Experimental de Materiais de Componentes de Sistemas de Arraste Aeroportuários; concreto com o aditivo espumante e Perlita	Avaliar a aplicação de um concreto celular com a adição de perlita e comparar com o simples para utilização em EMAS	2017
[40]	Foamed Concrete Based Material as a Soft Ground Arresting System for Runways and Airfields	Avaliar a aplicação do concreto celular espumoso para um EMAS	2016
[45]	Influence of the foamed additive on the dosage and properties of the aerated cellular concrete	Avaliar o impacto do aditivo nas principais características mecânicas do material	2018
[46]	Investigating the potential of using glass foam for an EMAS material to mitigate aircraft overrun accidents	Avaliar a utilização de glass foam para EMAS	2021

3.7. REFERENCIAL TEÓRICO DAS CARACTERIZAÇÕES

A Caracterização do Material foi realizada buscando verificar o comportamento mecânico e alterações químicas no material provocadas pela utilização do aditivo espumígeo.

3.7.1. Análise de Difração de Raios-X

Esta análise é uma técnica que utiliza um difratômetro[47] para analisar amostras pulverizadas ou cristalinas, através da leitura do ângulo e intensidade de um raio-X após sofrer difração na amostra. Desta forma através da intensidade e do ângulo de difração, ângulo entre a chapa plana da amostra a linha do raio incidente, é possível avaliar estruturas cristalinas de materiais. Gerando assim o difratograma, um gráfico com abscissa sendo o ângulo e ordenada a intensidade do raio.

Desta forma ao comparar com difratogramas conhecidos é possível identificar estruturas presentes na amostra, sendo o tamanho e geometria da célula a partir dos ângulos onde se apresentam os picos, enquanto o arranjo de átomos é identificado pela intensidade dos picos.[48]

Para comparação dos resultados, além dos difratogramas conhecidos serão observados 2 artigos que tratam da hidratação do cimento. Visto que uma maior porosidade vai resultar em uma menor retenção de água e, portanto, uma alteração na hidratação do cimento.[49], [50]

Tabela 13 - Referências para Análise DRX

REF	TÍTULO	OBJETIVO	ANO
[47]	Ciência e Engenharia de Materiais	Compreender o funcionamento da difração nos materiais	2012
[48]	Elements of X-Ray Diffraction	Compreender e analisar difratogramas	2014
[49]	Síntese e caracterização das fases minerais C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A e C ₄ AF para utilização em cimento tipo Portland	Caracterizar as principais fases do cimento	2019
[50]	Cement-based materials: Pozzolanic activities of mineral additions are compromised by the presence of reactive oxides	Avaliar as formações cimentícias de compostos pela adição de compostos	2021

3.7.2. Análise de Fluorescência de Raios-X

De acordo com a C2Lab [51], pode-se definir essa análise como uma técnica de emissão atômica que emite átomos energizados na amostra, através da irradiação de um feixe de raios-X, que ao causar uma produção de raios-X secundária permite caracterizar os elementos presentes na amostra. Desta forma classifica-se como uma análise, semiquantitativa focada em materiais mais pesados. O range de materiais identificáveis vai variar conforme a capacidade do equipamento e da qualidade de amostra. O ensaio é regulado pela NBR 14656 [52].

As análises de FRX em materiais cimentícios se tornaram comuns, pela facilidade da operação e pela sua capacidade de análise. Onde se é possível avaliar alteração de

atividade pozolânica de finos como vemos em [53], ainda é possível observar a importância do uso desta técnica combinada com outras como DRX e MEV como no artigo de [54] sobre argamassas, e por fim ainda observa-se uma dificuldade em encontrar sulfatos e outros materiais comuns em detergentes e espumas de aditivos, como é possível observar no artigo [55].

Tabela 14 - Referências para Análise FRX

REF	TÍTULO	OBJETIVO	ANO
[51]	Espectrometria por Fluorescência de Raios X – Entenda como funciona	Explicar funcionamento do equipamento e análise FRX	2022
[52]	NBR 14656	Normatizar metodologia de Ensaio	2001
[53]	Substituição parcial do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha em argamassas: estudo da atividade pozolânica	Avaliar atividade pozolânica	2016
[54]	Adição de escória de alto forno em argamassas colantes tipo AC-I	Avaliar adição de escória com diversas caracterizações	2012
[55]	Análise do ataque por sulfatos em argamassas de cimento geopolimérico	Avaliar ataque de sulfatos em argamassas	2018

3.7.3. Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura e Energia Dispersiva

Microscopia Eletrônica de Varredura é uma técnica que aplica um feixe de elétrons na superfície do material analisado, permitindo uma resolução maior que os microscópios óticos por não utilizar fótons que geram o problema fotoelétrico por causa da dualidade do elétron. Um dos primeiros (MEV) foi criado por Von Ardenne em 1938 ao adaptar bobinas aos microscópios [56].

Com o tempo os equipamentos foram se aprimorando e o EDS foi adicionado, uma análise por energia dispersiva. Nesta um detector de sinais de raios-X permitindo verificar a energia dispersa na superfície da amostra pela relação da frequência eletromagnética gerada pela aplicação de fótons no material. Como cada átomo possui características e valências específicas, é possível então quantificar os elementos na superfície, comumente utilizado em conjunto com as imagens geradas pelo MEV.

Na área de materiais cerâmicos, a técnica de MEV/EDS é utilizada para verificar formações das fases do cimento, permitindo analisar a hidratação e verificar formação de impurezas que possam alterar a resistência e o comportamento do material, como em, [50], [57], [58]

Tabela 15 - Referências para Análise MEV

REF	TÍTULO	OBJETIVO	ANO
[50]	Cement-based materials: Pozzolanic activities of mineral additions are compromised by the presence of reactive oxides	Verificar fases do cimento e relação com hidratação	2021
[56]	Microscopia Eletrônica De Varredura - Aplicações E Preparação De Amostras - Materiais Poliméricos, Metálicos E Semicondutores	Livro texto para compreensão das análises de MEV e EDS	2007
[57]	Effect of nano-magnesium oxide on the expansion performance and hydration process of cement-based materials	Demonstrar fases do cimento pela hidratação	2021
[58]	Microestrutura E Propriedades Físicas E Mecânicas De Cimento Portland Tipo Ii Álcali-Ativado / Microstructure and Physical and Mechanical Properties of Alkali-Activated Type Ii Portland Cement	Verificar como a relação a/c influência nas formações de fases	2020

3.7.4. Análise de Termogravimentria e Calorimetria Diferencial

A técnica de termogravimentria (TG) é realizada através de um equipamento muito específico, em que através de uma balança de precisão e um forno de temperatura controlável e programável é medido a perda de massa em relação à aplicação de calor em uma amostra. Pela grande quantidade de sensores e a necessidade de controlar ao máximo as variáveis a amostra possui tamanho bastante reduzido, sendo utilizado para analisar a perda de água física, desidratação química e desintegração térmicas de materiais pela mudança de fase [59].

A análise de calorimetria diferencial (DSC) utiliza um material de referência para comparar a amostra verificando diferença entre a absorção de calor entre os dois materiais resultando em uma análise a partir do fluxo de calor que passa entre ambos. Cada equipamento vai possuir tamanhos específicos para as amostras exatamente para permitir uma melhor análise comparativa.

Em materiais cerâmicos tanto TG quando DSC são utilizados para analisar a hidratação, principalmente em materiais cimentícios, permitindo analisar e caracterizar as principais fases do cimento como é possível ver em Tabela 16

Tabela 16 - Referências para TG/DSC

REF	TÍTULO	OBJETIVO	ANO
[59]	Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications.	Compreender e estudar as técnicas e análises de TG e DSC	1990
[60]	Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica	Estudar Hidratação do cimento	2006
[61]	DSC and TG Analysis of a Blended Binder Based on Waste Ceramic Powder and Portland Cement	Analisar alteração na hidratação com adição de materiais à pasta de cimento	2016
[62]	Efeito do teor de água e tamanho de partícula na decomposição térmica de pastas de cimento moídas	Analisar decomposição do cimento e a relação com a água	2020

3.7.5. Ensaio de Compressão Uniaxial

O ensaio foi realizado a partir das seguintes NBRs.

Tabela 17 - Normas para Ensaio

REF	NORMA	NOME	ANO
[63]	NBR12655	Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento	2015

[64]	NBR 5739	Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos	1994
[65]	NBR 9778	Argamassa e Concreto endurecidos - Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica.	2009

3.7.6. Ensaio de Penetração em Célula

Este ensaio consiste em comparar os resultados com 2 artigos observados [40] e [66], que juntamente aos artigos de modelagem já citados previamente[31], [67] e [68], nos mostram outro parâmetro importante para o dimensionamento de um EMAS.

E como análises dinâmicas podem ser custosas a avaliação da penetração de carga em uma célula é apresentada como uma das formas de analisar o comportamento do CC após ser esmagado pelo trem de pouso da aeronave.

Como exemplo podemos observar as Figura 4 e Figura 5, em que temos o ensaio realizado em dois artigos. Como não existe uma norma padronizada para este ensaio, é visto que o tamanho da célula varia, porém o diâmetro do disco ou cilindro que comprime o concreto é baseado na área de contato entre o trem de pouso da aeronave desejada e o sistema EMAS.

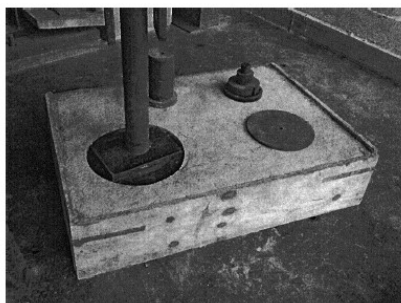


Figura 4 - Ensaio de Penetração em Células. Fonte:[40]



Figura 5 - Ensaio de Penetração em Célula. Fonte: [66]

Tabela 18 – Artigos Seleccionados para Compressão Uniaxial

REF	TÍTULO	OBJETIVO	ANO
[40]	Foamed Concrete-Based Material as a Soft Ground Arresting System for Runways and Airfields	Avaliar comportamento do concreto celular para EMAS	2016
[66]	Arresting Behavior of foamed Concrete used in EMAS subjected to wind erosion and wet-dry cycles	Avaliar o quanto os fatores ambientais alteram a resistência do EMAS	2022

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar o concreto celular e verificar se suas características mecânicas o permitem ser aplicado num sistema EMAS, avaliando a produção a partir de um cimento mais usado na região de Pernambuco o CP II e um aditivo espumígeo.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fabricar um material cimentício de alta porosidade com cimento CP II-Z e aditivo espumígeo (bloco celular);
- Analisar alterações de desempenho do material causados pela variação do tempo de mistura entre a pasta de cimento e a espuma;
- Comparar desempenho mecânico do material com outros produzidos para este sistema;
- Caracterizar o material através de DRX, MEV e TG-DSC.
- Agregar parâmetros importantes para um material ser considerado do sistema e explicar o funcionamento do sistema.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. MATERIAIS

Para a realização deste trabalho foram utilizados 3 materiais, para a fabricação do concreto celular, sendo estes: água, cimento e aditivo incorporador de ar. Além destes materiais ainda foi necessário fabricar 3 caixas para realizar um ensaio, não normatizado, de modo a comparar com um dos artigos bases e analisar a penetração do material à carga limite.

5.1.1. Cimento

O cimento utilizado foi o CP II – Z 32 RS da marca Poty. Conforme a norma [69], que determina as características dos cimentos compostos. Este cimento possui adição de pozolana, que pode variar entre 6 e 14% da massa do cimento. Conforme o site cimento.org, que traz de forma resumida as características deste cimento utilizado conforme a Figura 6 abaixo.

CP II-Z-32	Especificações ABNT	
ENSAIOS FÍSICOS		
Blaine (cm²/g)	≥2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	≤12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	–	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	–	NBR NM 43
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	–	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥10,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥20,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	≥32,0	NBR 7215
ENSAIOS QUÍMICOS		
Perda ao fogo (%)	≤6,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	≤16,0	NBR 5744
Trióxido de enxofre – SO ₃ (%)	≤4,0	NBR 5745
Óxido de cálcio livre – CaO Livre (%)	–	NBR 7227
Óxido de magnésio – MgO (%)	≤6,5	NBR 9203
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	–	NBR 9203
Óxido de silício – SiO ₂ (%)	–	NBR 9203
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	–	NBR 9203
Óxido de cálcio – CaO (%)	–	NBR 9203

Figura 6 - Normas regentes para o CPII-32-RS. Fonte: cimento.org

5.1.2. Aditivo Espumígeo

O aditivo utilizado é o CQ CELMIX®, que foi fornecido pela empresa CAMARGO Química. Um aditivo espumante desenvolvido para concretos celulares e concretos leves. Conforme orientação do fabricante este material para cada 1L de aditivo diluído em 40L de água produz 550 L de espuma, sendo necessário a produção através de um sistema de pressão semelhante ao aerossol ou através de uma máquina misturadora de alta rotação. O recipiente recebido aparece na Figura 7, e os dados técnicos fornecidos estão conforme a Tabela 19.

Tabela 19 - Dados técnicos do aditivo. Fonte: Autor, adaptado de Camargo Química

Dados Técnicos	
Função	Incorporador de Ar
Aspecto	Líquido Azul
pH	8 -10
Densidade	1,00 ~1,04 g/cm ³



Figura 7 - Aditivo Incorporador de Ar. Fonte: Autor

5.2. EQUIPAMENTOS

Para a moldagem do material foram utilizados equipamentos específicos, como uma argamassadeira automática, uma furadeira de alta rotação e moldes de zinco. Para uma melhor replicação do trabalho buscou-se utilizar equipamentos que possuem menor interferência humana. A descrição destes está a seguir.

5.2.1. Argamassadeira

Para o preparo da pasta de cimento foi utilizada uma argamassadeira Engetotus, de 5L, 50 Hz com 2 velocidades 140 e 28 rpm, e potência de 112W e 224W. Conforme a NBR 7215 [70]. O equipamento utilizado pode ser observado na Figura 8.



Figura 8 - Argamassadeira Digital. Fonte: Autor

5.2.2. Furadeira de Alta Rotação

Conforme sugestão da própria empresa, não havendo um sistema próprio para produzir a espuma, a melhor solução para moldagem em loco seria adquirir uma furadeira de alta rotação, e utilizar um adaptador para um misturador. Conforme a, os materiais utilizados foram:

- 1) Martelele eletropneumático Vonder MPV 620 amarelo e preto frequência de 50Hz/60Hz com 620W de potência, 220V, que chega a 800 rpm.
- 2) Haste para misturador de argamassa 120mm.

5.3. METODOLOGIA

A metodologia adotada levou em consideração 3 trabalhos utilizados, já citados no item 6.6, o objetivo é atingir as densidades mais estudadas nos artigos de base, entre 600 e 900 kg/m³.

No artigo de Meng [66], onde avalia valores de densidades inferiores a 650 kg/m³ e o quanto a alta porosidade vai influenciar na erosão; obtém-se que valores próximos a 350 kg/m³, pelo método de fabricação utilizado, seriam os melhores para resistir a uma tensão de 1,5 MPa de modo eficiente.

5.3.1. **Moldagem**

Visto que entre os autores e métodos observado existe uma divergência entre a densidade ótima, baseada principalmente no método de fabricação da espuma e da mistura com a pasta de cimento decidiu-se variar a quantidade de espuma e o tempo de mistura entre a pasta de cimento e a espuma. Buscando observar o quanto esses parâmetros podem influenciar na densidade do material, parâmetro importante inclusive para simulações como as de Heymsfield [31].

Inicialmente tentou-se misturar o cimento, a água e o aditivo em um mesmo recipiente; porém o material não teve consistência suficiente para ficar no molde, apresentando grande perda de água, mesmo fechando o molde com plástico insulfilm. O resultado foi um material de baixa resistência.

Para a fabricação foram separadas algumas proporções para a pasta de cimento e para a espuma conforme a Tabela 20, o procedimento utilizado foi o seguinte:

- 1) Adição de cimento e água com o aparelho desligado;
- 2) Ligar o aparelho para início da operação;
- 4) Esperar o equipamento realizar a mistura, descanso e mistura final conforme norma, e de forma automática
- 5) Enquanto a argamassadeira prepara a pasta de cimento num recipiente grande são colocadas as quantidades de água e aditivo para a produção de espuma, então com a utilização da furadeira e do bico e mistura a espuma é produzida até adquirir consistência desejada, conforme Figura 9;
- 6) Colocar o cimento e a espuma em um recipiente onde serão misturados. Para isso foi utilizada a função “reverso” da furadeira para reduzir a velocidade de mistura e evitar alterar muito a constituição da espuma, conforme Figura 10;
- 7) Retirar o material e colocar nos moldes(os moldes estão previamente preparados com desmoldante), cobrindo-os com plástico insulfilm para reduzir ao máximo a perda de água, visto que o material final possui constituição semelhante a um creme e dispensa adensamento;

- 8) Esperar 48h para desmoldagem;
- 9) Retirar o material do molde, manuseando com cuidado para não bater ou gerar impacto, visto que pode danificar o material devido à porosidade alta;
- 10) Embalar os CPs em plástico para cura à seco, conforme mostrado nas Figura 11 e Figura 12



Figura 9 - Fabricação da espuma



Figura 10 - Pasta de Cimento e Espuma



Figura 11 - Moldagem Concreto Celular



Figura 12 - Cura à seco Concreto Celular

A decisão para alterar os tempos de mistura veio durante o processo de fabricação, pois observou-se que durante a mistura da pasta de cimento e da espuma a textura da mistura final se alterava com o tempo de mistura. Os tempos podem variar de equipamento e de como for misturado manualmente

Tabela 20 - Tabela de Proporções preparadas.

Traços utilizados						
Nome	a/c	Água p/ Cimento	Cimento (g)	Água para Espuma	Espuma (ml)	T Mistura (min)
A	0,4	200	500	250	12	1
B	0,4	400	1000	325	10	2
C	0,4	800	2000	650	20	2
D	0,4	600	1500	650	20	3
E	0,3	300	1000	300	10	2
G	0,4	600	1500	650	20	3

Fonte: Autor

5.3.2. Densidade

A medição da densidade foi realizada à seco, não sendo possível determinar a massa saturada dos corpos de prova conforme a NBR 9778[65], visto que em densidades menores como 400 e 600 kg/m³ não era possível se pesar sem que a água retida nos poros ficasse retida. E como já foi visto em trabalhos anteriores, a porosidade e densidade são intrinsecamente ligadas no Concreto Celular Espumoso, sendo a densidade e não a porosidade uma das variáveis principais para determinar as características do material

5.3.3. Análise de DRX

As análises de Difractometria de Raios-X foram realizadas em um equipamento de modelo DRX Shumadzu 7000, com goniômetro Bragg-Bretano e com tubo de raios-X. Os parâmetros para análise são: Escaneamento contínuo, com uma varredura: 5 – 70 °, 30kV, 30mA, Passo de 0,5 °/min de θ a 2 θ , fenda de espalhamento 1,0° e fenda fixa de 0,1

- a) Escaneamento = Contínuo
- b) Varredura = 5/ – 70°
- c) Passo = 0,5°/min de θ a 2 θ ;
- d) Fenda de Espalhamento = 1,0°
- e) Fenda Fixa = 0,1°

5.3.4. Análise de FRX

As análises por Fluorescência de Raios-X foram realizadas em um equipamento **Horiba Scientific** modelo **FRX-3000**. 6 amostras foram analisadas de modo que cada uma representasse uma das proporções, determinando valores das concentrações de espécies química, em termos percentuais, presente nas amostras, comparando com o DRX para avaliar as impurezas do material. Os parâmetros utilizados foram:

- a) Voltagem = 15kV
- b) Filtro = baixo
- c) Tempo médio = 60s
- d) Corrente = 200 μ A
- e) Colimador = 3mm

5.3.5. Análise de TG/DSC

A análise de Termogravimentria foi realizada num equipamento da Netzsch modelo Júpiter STA, a amostra padrão é a do próprio equipamento e os parâmetros aplicados na amostra foram os seguintes:

- a) Faixa = 35 °C a 1000°C
- b) Velocidade = 10 K/min
- c) Cadinho = DSC/TG Pan Al₂O₃

- d) Gás = Nitrogênio
- e) Range Corrente TG= 20/35000mg
- f) Range Corrente DSC = 20/5000 μ V

5.3.6. Ensaio de Compressão Uniaxial

Para a resistência à compressão uniaxial foram utilizados as normas NBR12655 [63] e NBR 5739 [64]. A análise foi realizada com uma Prensa Manual para Ensaaios em Corpos de Prova de até 20 toneladas de carga, da marca Engetotus. Na Figura 13 é possível observar o bloco rompido durante o ensaio.



Figura 13 - Ensaio de Compressão Uniaxial. Fonte: Autor

5.3.7. Ensaio de Penetração em Célula

Para a realização deste ensaio foram fabricados 3 moldes em madeiras para a fabricação de pequenas células. As caixas foram feitas com madeira compensada de 5 mm, 4 folas, presa a pregos e revestida internamente com plástico para evitar vazamentos, procurando ao máximo evitar que a caixa gere grandes esforços na resistência do material, além dos necessários para manter a forma durante a moldagem. Os dados das caixas e dos moldes estão conforme os dados da Tabela 21:

Tabela 21 – Dados para Moldagem do Ensaio de Penetração

Célula	Dimensões da Base (cm x cm)	Altura da Caixa (cm)	Altura da Célula (cm)	Volume da Célula (cm ³)	Massa cimento (g)
A	23,0x25,0	14	5,5	3162,5	1657,0
B	23,0x25,0	15	6,0	3450,0	1285,5
C	23,5x25,0	15	6,5	3818,8	1731,5

A proporção utilizada para a moldagem foi de 2kg e cimento, 650 ml de água e 20ml de aditivo, fabricando do mesmo modo que os moldes para compressão uniaxial; excetuando-se na moldagem final.

As imagens das células antes e após o ensaio podem ser encontradas no 11.1 Apêndice E.

O ensaio foi realizado em um equipamento EMIC DL 10000 No10731. Com uma célula Trd2. Não foi utilizado um extensômetro, pois a célula de carga deve ser parada a aproximadamente 1, MPa de compressão e então verificar o quanto foi de penetração.

O valor de 1,5 MPa foi escolhido conforme artigos anteriores por ser o valor aplicado da roda do B-737 conforme o 3.4. A seguir tem-se na Figura 14 uma imagem da realização do ensaio.



Figura 14 – Dados para Moldagem do Ensaio de Penetração

O suporte para ensaio foi usinado laboratório INTM para simular uma área de 150 mm de contato entre o pneu e o sistema. Foi utilizada uma usinagem em uma chapa metálica de ½ polegada de espessura, com tolerância de até 5 mm na fabricação, visto que existem imperfeições em uma roda do trem de pouso. O suporte visto dentro da célula B na Figura 14 seu projeto pode ser observado na Figura 15.

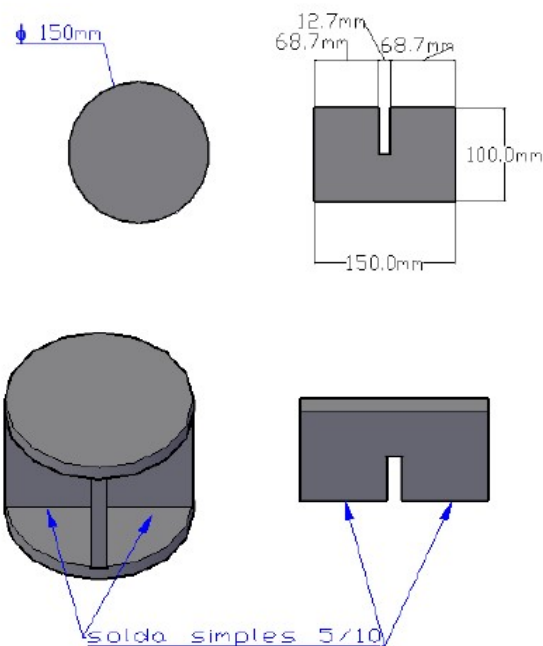


Figura 15 - Projeto simplificado de suporte para ensaio de penetração. Fonte: Autor

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. ANÁLISES DO MATERIAL ESTUDADO

6.1.1. Difratometria de Raios-X (DRX)

A análise foi realizada em um CP escolhido aleatoriamente de cada grupo, de modo a avaliar se houve alteração na composição do cimento. Não é esperado que ocorra alteração na composição ou que uma grande quantidade de espuma sobre como resíduo do material. As figuras 13 a 18 foram organizadas em ordem crescente de densidade, sendo a Figura 17 a de menor densidade e a Figura 22 a de maior densidade.

Ao observar as figuras 16-22 é possível observar que não ocorrem grandes variações na estrutura do material pela mudança de densidade e da utilização do incorporador de ar se comparado com um cimento formado só pela adição da água na Figura 16. Ruídos aparecem devido à composição do cimento pozolânico como é descrito na Figura 3.

As Figura 21 e Figura 22, demonstram uma maior densidade do difratograma na área entre os ângulos 30° e 60°, provavelmente pelo aumento de densidade do material, que por ter menos vazios permitiu que uma quantidade maior de água fosse preservada na cura à seco resultando numa melhor carbonatação e num material com melhor hidratação.

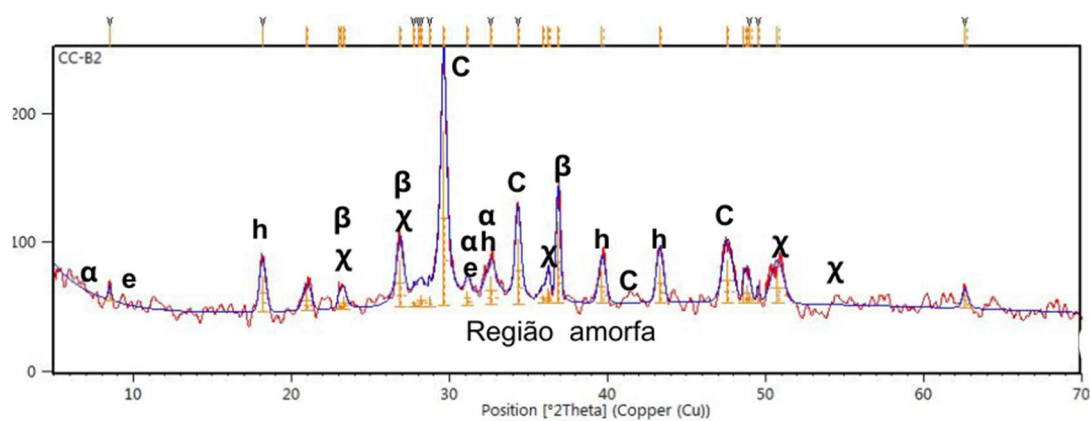


Figura 17 - Difratoograma de raios-X, grupo B, CP B2. Fonte: Autor

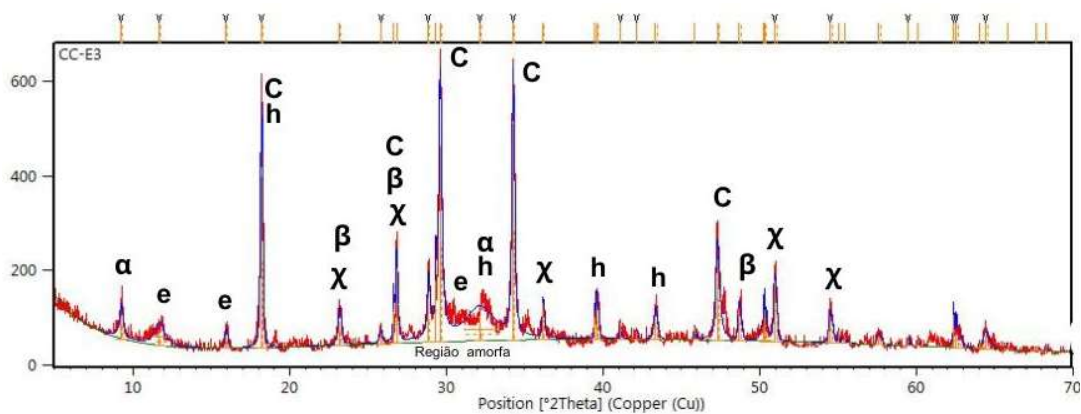


Figura 18 - Difratoograma de raios-X, grupo B, CP E3. Fonte: Autor

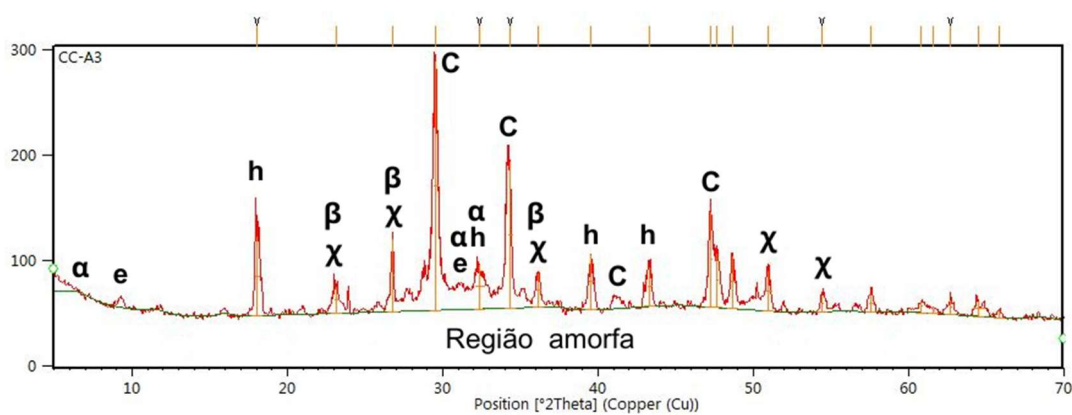


Figura 19 - Difratoograma de raios-X, grupo E, CP A3. Fonte: Autor

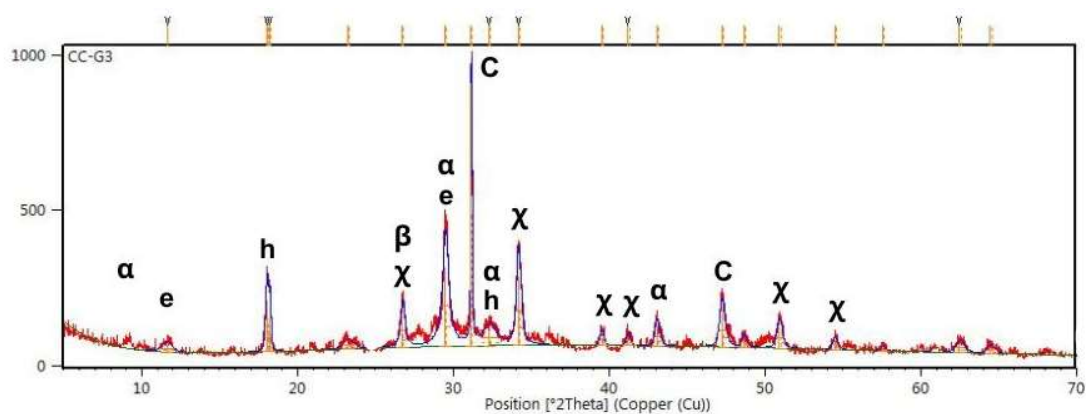


Figura 20 - Difratoograma de raios-X, grupo G, CP G3. Fonte: Autor

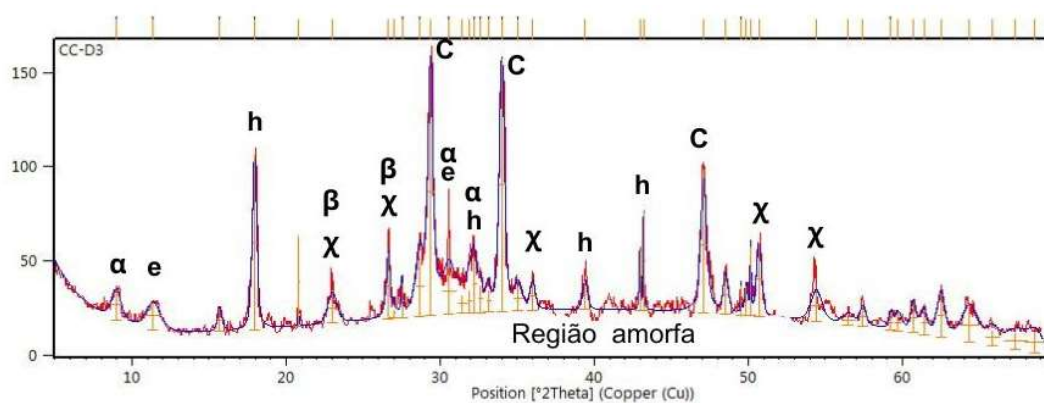


Figura 21 - Difratoograma de raios-X, grupo A, CP D3. Fonte: Autor

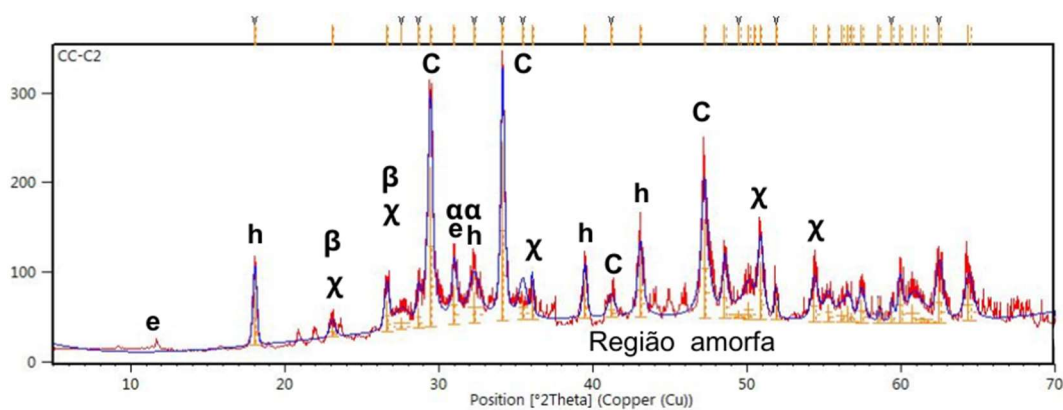


Figura 22 - Difratoograma de raios-X, grupo C, CP C2. Fonte: Autor

6.1.2. Análise por fluorescência de Raio-X (FRX)

As análises foram realizadas nas mesmas amostras escolhidas para a análise de DRX, permitindo assim uma melhor compreensão do material estudado e unido uma análise semiquantitativa do FRX com uma qualitativa do DRX. A expectativa estava em observar se haveria presença de algum composto residual da espuma como enxofre ou fósforo. O que não foi detectado na maioria das análises nas figuras de 23-27.

Ainda assim é possível observar um ruído de pequenas impurezas de pouca expressão pelo material, estas podem ser características do próprio CPII-Z, como de algum provável resíduo da espuma. A probabilidade de haver uma grande quantidade de espuma residual seria pequena, visto que na hidratação do cimento durante uma cura à seco, o líquido presente das bolhas seria retirado e absorvido, o que explica o retardamento de pega. Algo reforçado pelo isolamento plástico com a atmosfera para reduzir a troca de umidade entre o material e o meio.

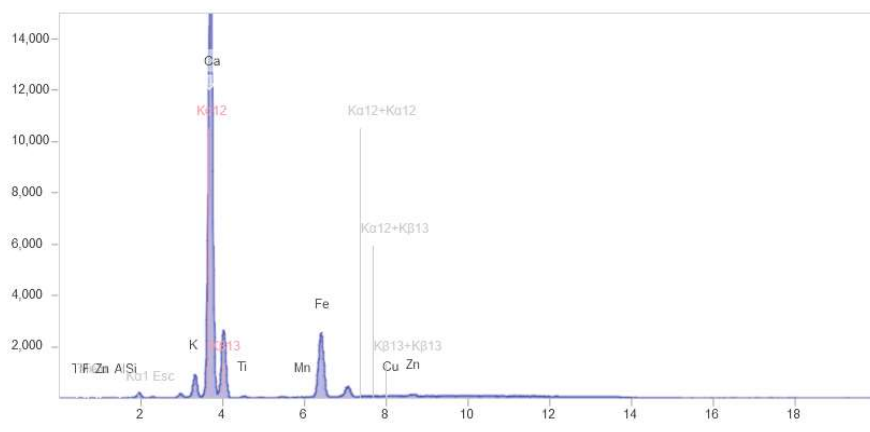


Figura 23 - Espectro de FRX - A3 - linhas de Ca. Fonte: Autor

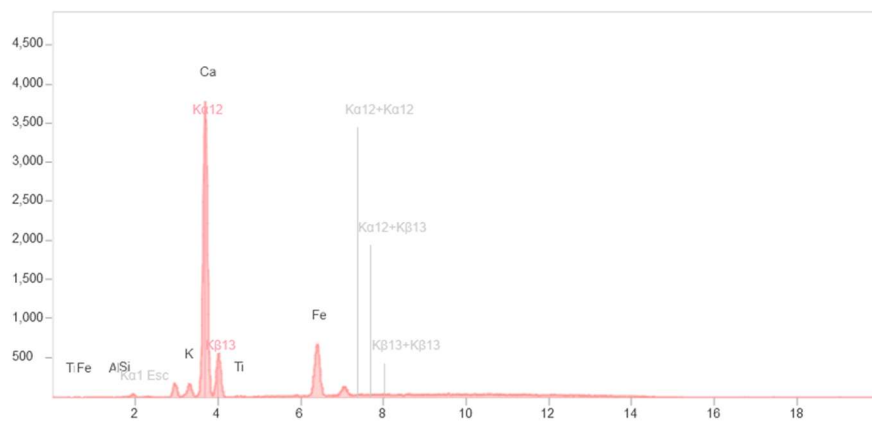


Figura 24 - Espectro de FRX - C2 - linhas de Ca. Fonte: Autor

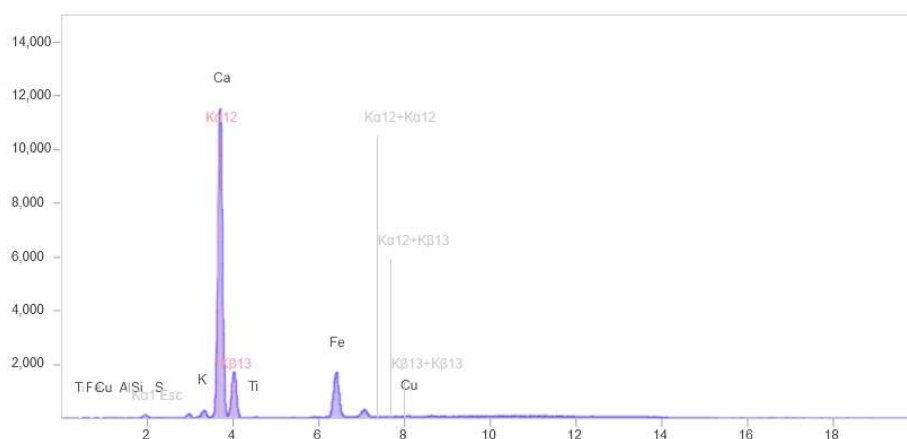


Figura 25 – Espectro de FRX - D3 - linhas de Ca. Fonte: Autor

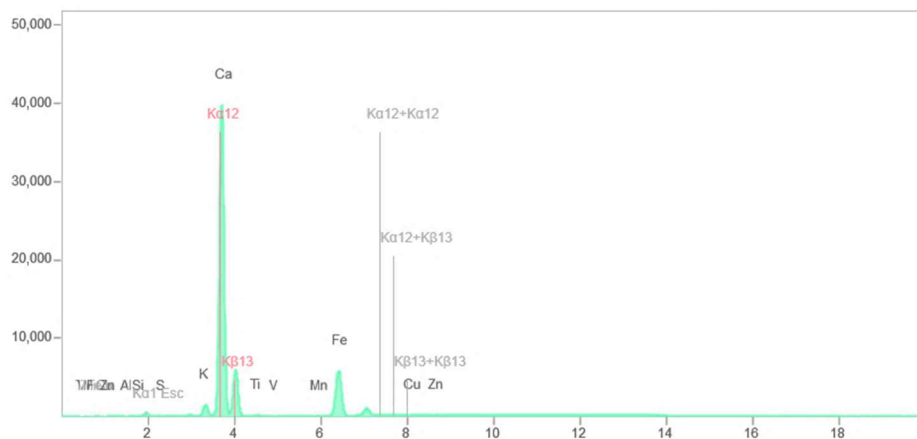


Figura 26 - Espectro de FRX - E3 - linhas de Ca. Fonte: Autor

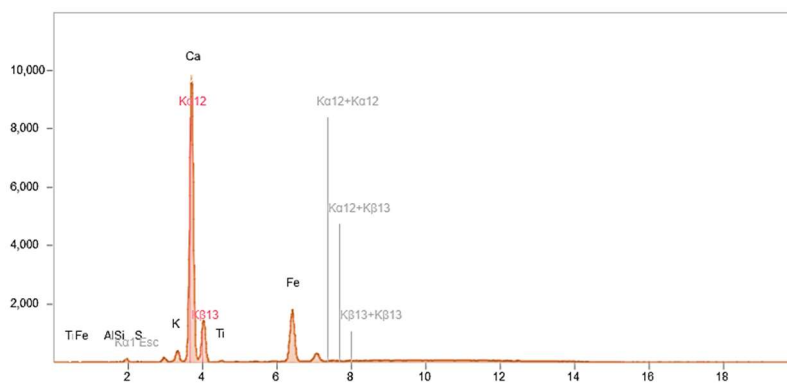


Figura 27 – Espectro de FRX - G3 - linhas de Ca. Fonte: Autor

Tabela 23 - Tabela Resultados de FRX Amostra G3

ELEMENTO	CONCENTRAÇÃO (w%)
Fe ₂ O ₃	4,48
K ₂ O	2,82
CaO	75,64
Al ₂ O ₃	2,40
SiO ₂	13,92

ZnO	0,05
S	0,25
Mn	0,02
Impurezas	0,42

Fonte: Adaptado do Apêndice 1

Os grupos B e E apresentaram menor densidade devido a uma maior proporção de espuma e nestes foi detectado uma presença maior de enxofre em comparação às demais amostras. Ao observar a Figura 27 e a Tabela 23 observa-se o enxofre com uma concentração de 0,2529 wt%, valor semelhante ao observado na Figura 28 e Tabela 24 de 0,2534 wt%

As amostras observadas possuem as respectivas densidades 930kg/m³ e 850 kg/m³, valores menores se comparados às demais amostras analisadas. Ainda assim, o valor não se torna prejudicial ao cimento como foi discutido no 7.5.4 não afastando muito do que seria permitido para o próprio cimento fornecido, o que não descarta que este contaminante ainda possa ser do próprio material cimentício e não de uma espuma residual que aderiu às paredes dos poros.

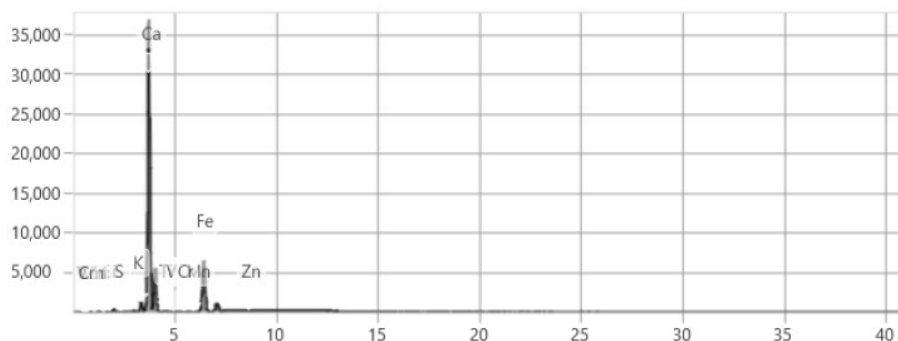


Figura 28 - Espectro FRX - B2 – Ponto 2. Fonte: Autor

Tabela 24 - Tabela FRX para amostra B2

ELEMENTO	CONCENTRAÇÃO (w%)
Fe₂O₃	4,76
K₂O	2,44
CaO	7,02

Al₂O₃	0,99
SiO₂	20,92
ZnO	0,7
S	0,25
Mn	0,04
Impurezas	0,06

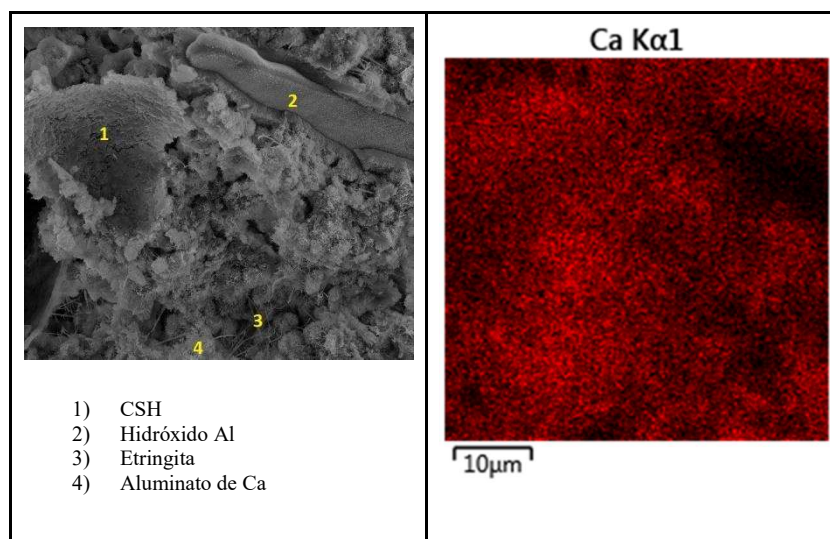
Fonte: Adaptado do Apêndice 1

6.1.3. Análise por MEV/EDS

A análise de MEV/EDS foi realizada nas mesmas amostras estudadas nas demais análises, o ponto escolhido para observação se localizou na superfície de interface entre as bolhas como é possível observar no aumento observado no APÊNDICE C . A superfície de todas as amostras apresentou vários poros e será analisada por amostras a seguir. As amostras serão apresentadas da menor densidade (maior porosidade) para as de maior densidade (menor porosidade), de modo a facilitar a compreensão.

6.1.3.1. AMOSTRA B

Neste conjunto de imagens vemos CHS, hidróxido de cálcio e pequenos pontos de etringita, provavelmente pela menor hidratação gerada pela maior porosidade e maior tamanho das bolhas. Através do EDS é possível observar na parte de baixo da imagem alumínio, em pequena quantidade, esperado da composição do cimento e já identificado em outras análises; este, porém, não gera interferência na estrutura do cimento de forma prejudicial.



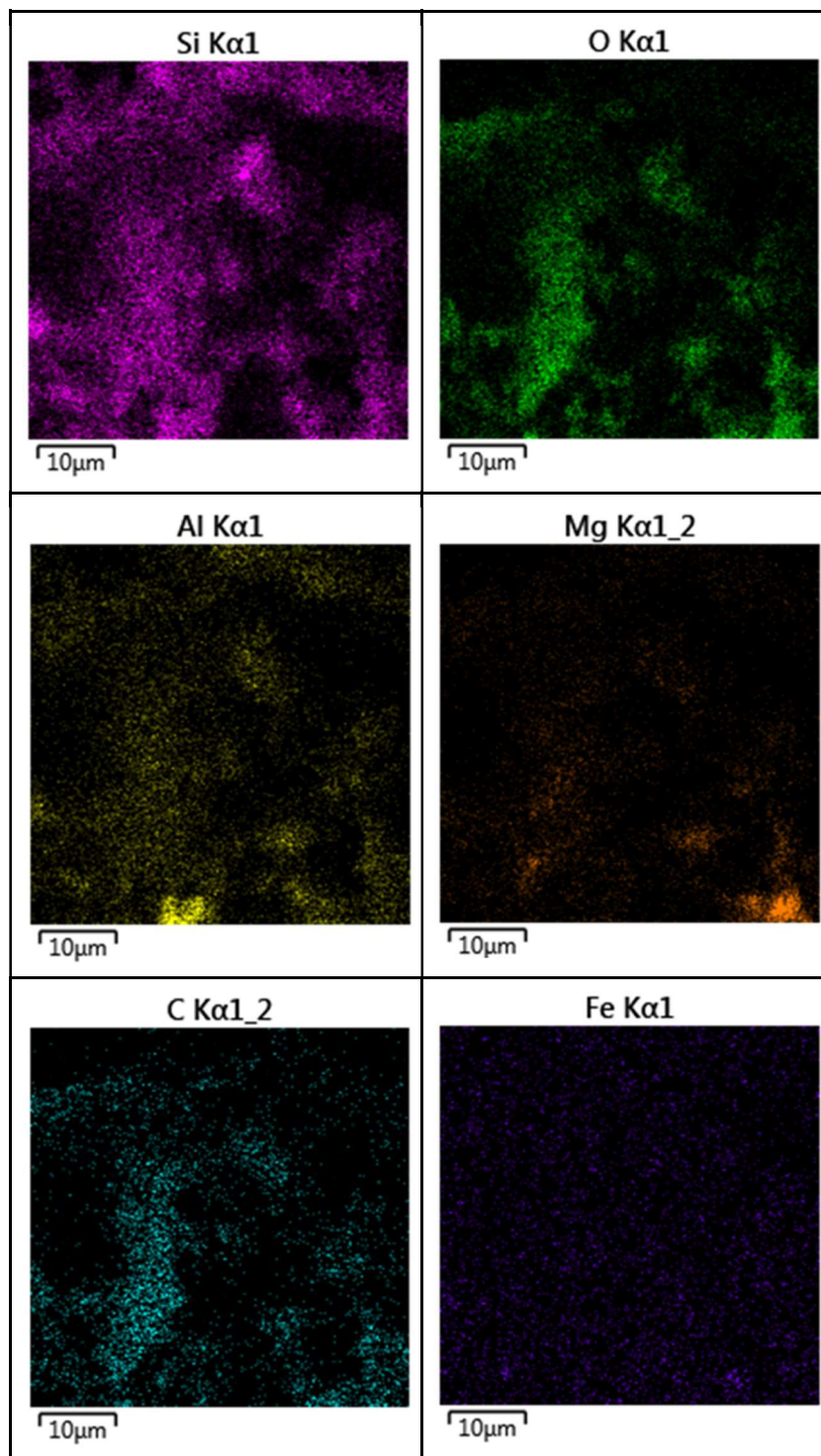


Figura 29 - Imagens MEV da Amostra B. Fonte: Autor

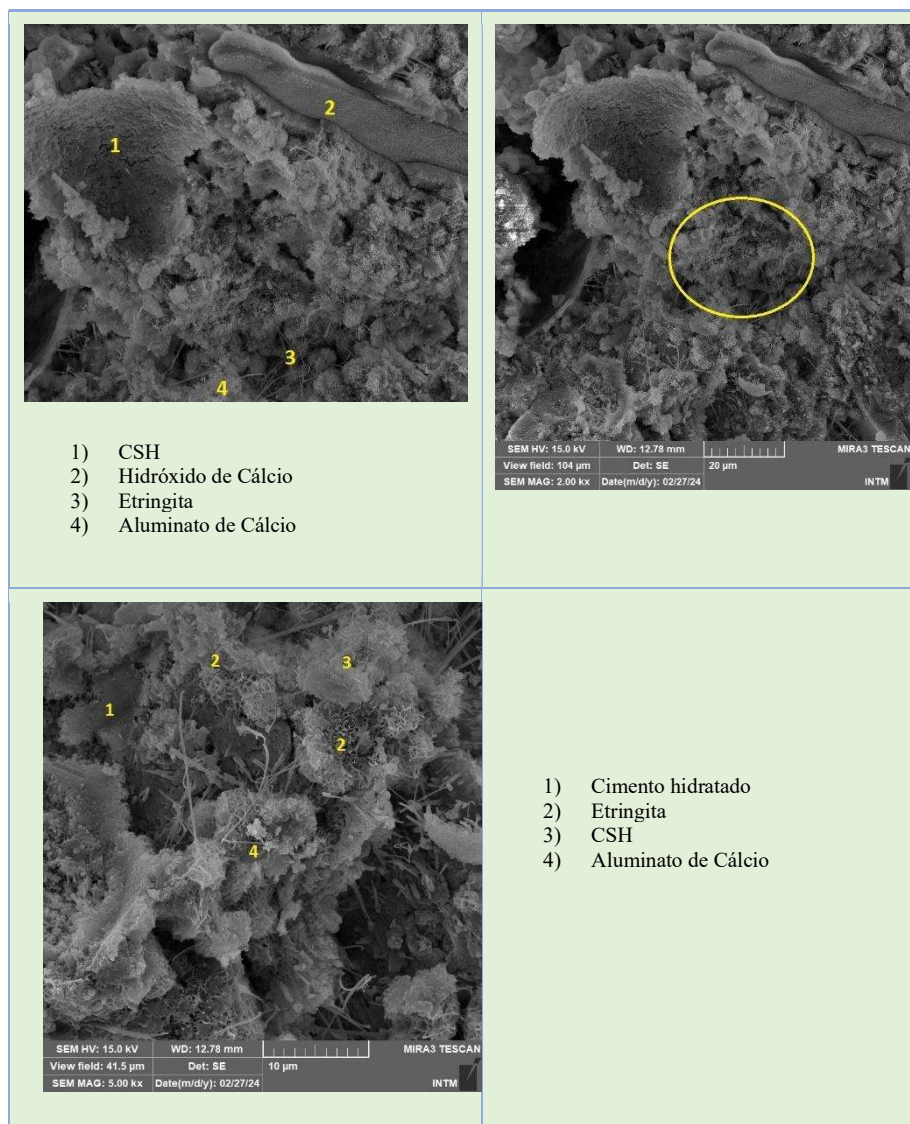
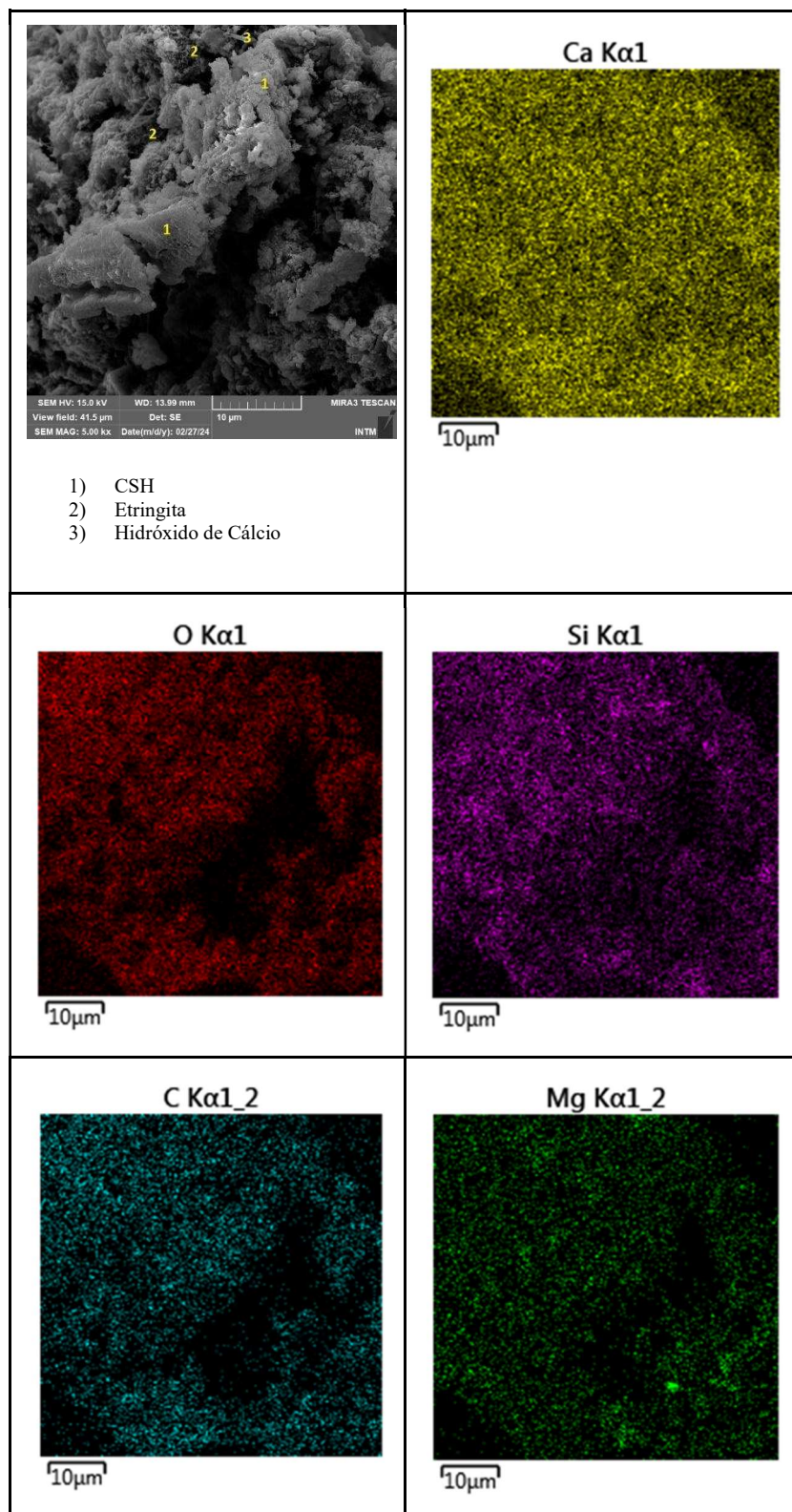


Figura 30 - Análise MEV da Amostra B. Fonte: Autor

6.1.3.2. AMOSTRA A

Nesta amostra é possível ver a predominância de CSH com pequenas formações de etringita. Ainda é possível observar na parte superior compostos com magnésio presentes da própria impureza do cimento utilizado, apresentando junto a análise de DRX e de FRX a presença desses elementos. Esta amostra apresenta muitos vazios



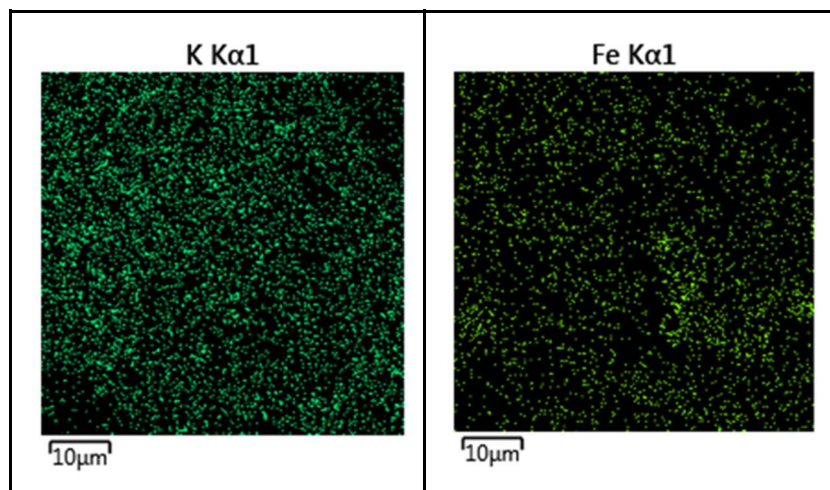
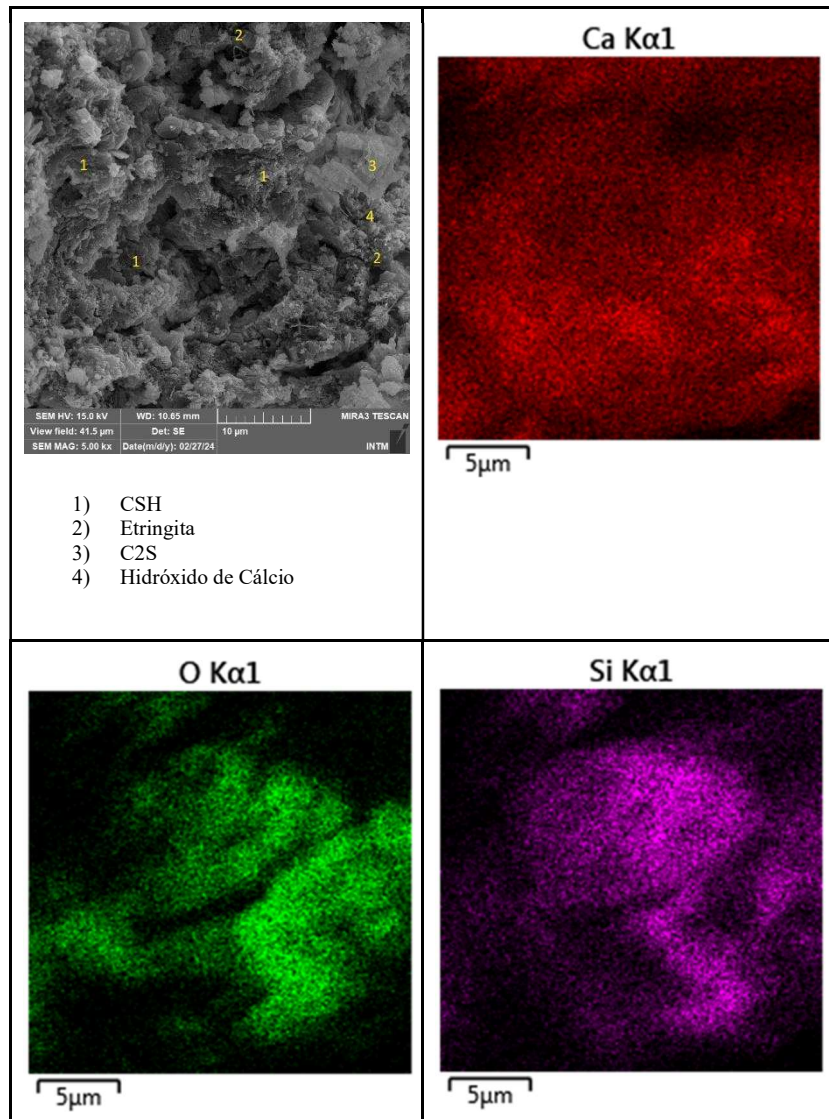


Figura 31 - Imagens MEV da Amostra A. Fonte: Autor

6.1.3.3. AMOSTRA F

Esta amostra já apresenta uma formação mais consolidada na região de interface entre as bolhas, onde é possível ver formações de silicatos e fases de maior hidratação como silicático dicálcico e silicato dihidratado. É possível observar ainda pequenos cristais de hidróxido de cálcio e formações de carbonato de cálcio, próximo ao centro da imagem.



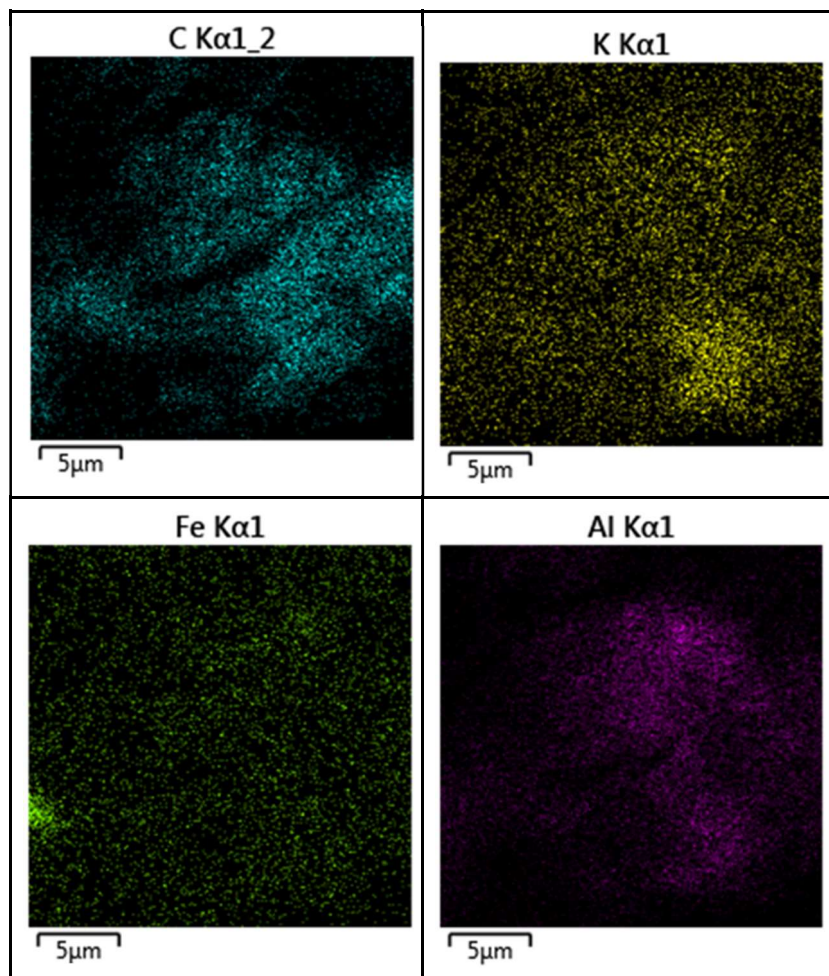


Figura 32 - Imagens MEV da Amostra F. Fonte: Autor

6.1.3.4. AMOSTRA D

Ao possuir menor porosidade e maior hidratação a zona de interface mostra isso de forma visível, apresentando fases comuns a uma argamassa usual. É possível encontrar CSH e C2S, hidróxido de cálcio não é perceptível. Pequenas formações com óxido de ferro são encontradas ao topo e próximo ao centro da imagem como mostra o EDS.

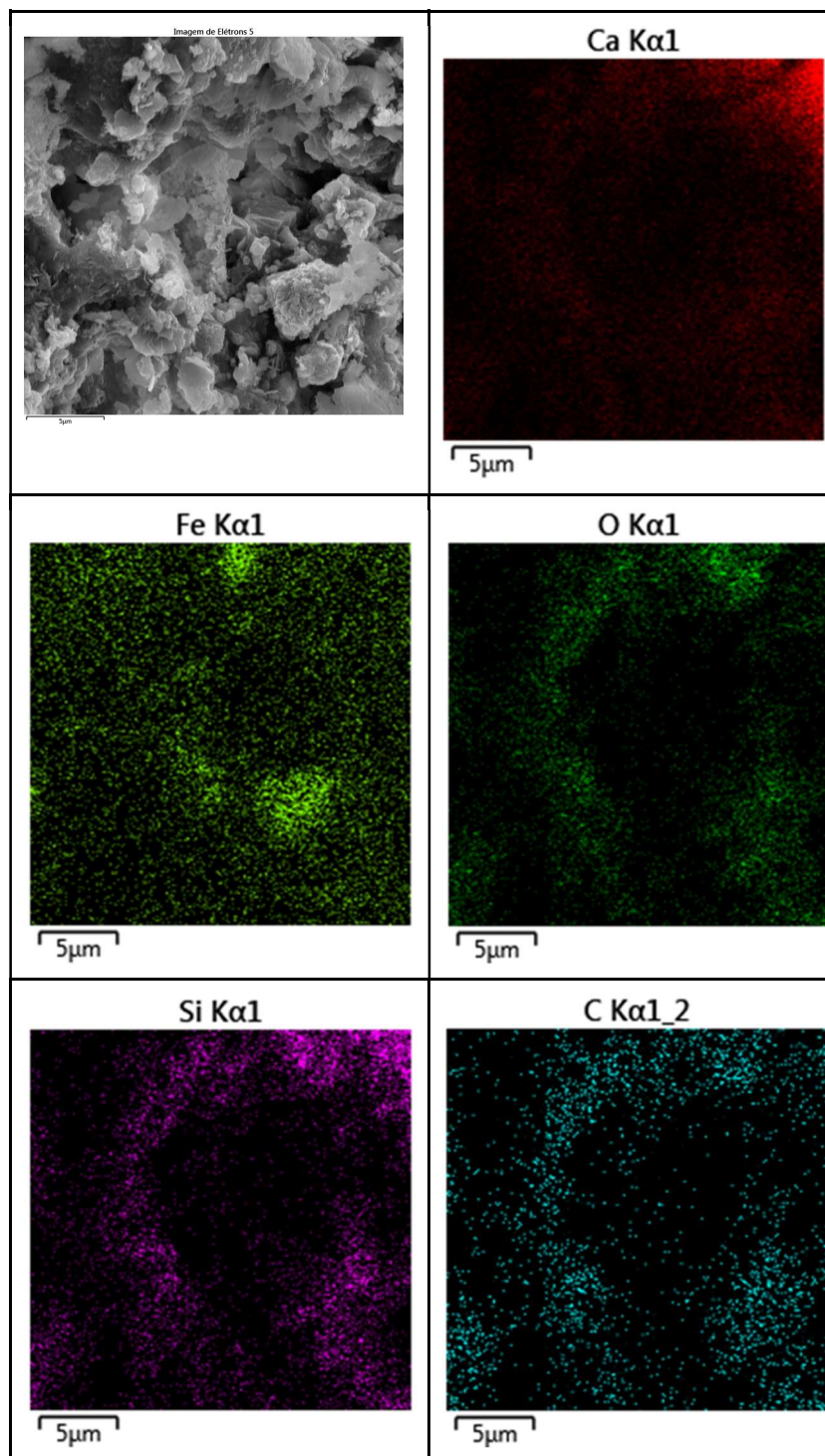
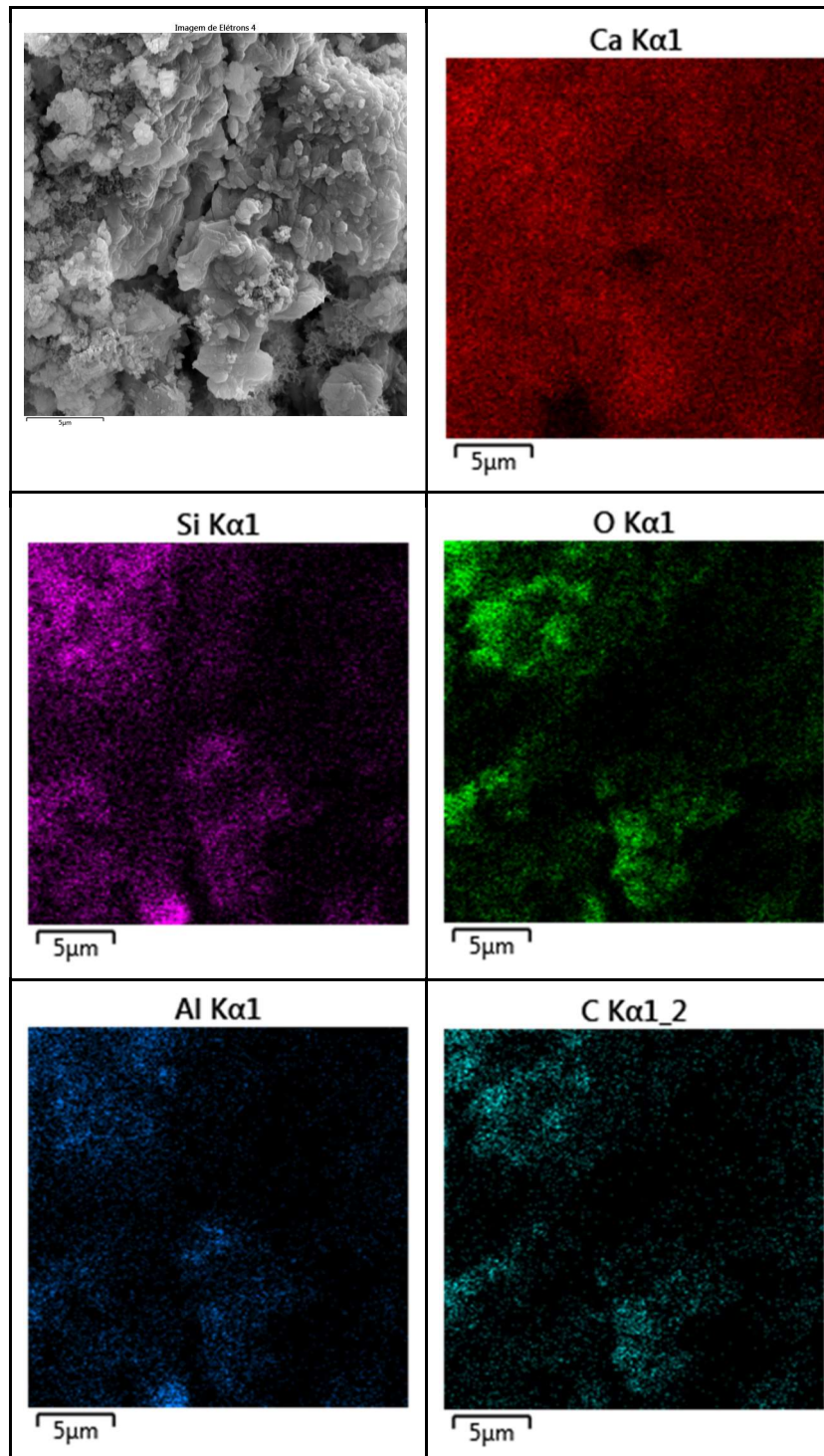


Figura 33 - Imagens MEV da Amostra D. Fonte: Autor

6.1.3.5. AMOSTRA C

A amostra de menor densidade analisada não apresentou poros microscópios como os demais, ficando restrita quase que os poros formados pelas bolhas como é possível observar no APÊNDICE C (IMAGENS DE MEV), as formações visualizadas são CSH e C2S. O que explica maior resistência ao material pela maior coesão como já avaliado no referencial.



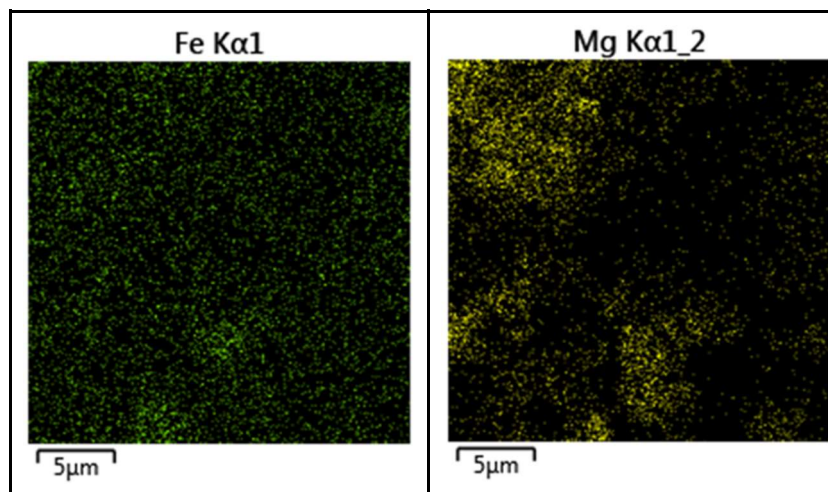


Figura 34 - Imagens MEV da Amostra C. Fonte: Autor

6.1.4. Análise de termogravimetria (TG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC)

As amostras também foram analisadas a partir dos termogramas obtidos nas análises, conforme [60] e [61], podemos observar os picos endotérmicos nos demonstram 3 intervalos principais através da linha azul, nomeados pelo grupo característico conforme Figuras 34-39 . Onde pode-se observar 3 picos principais, destacados, CSH Portlandita e Calcita.

O primeiro pico no intervalo de 100 °C a 120°C corresponde a perda de água pelos poros de forma física, em combinação com a desidratação dos grupos CSH. O segundo pico no intervalo entre 425°C e 450 °C corresponde a decomposição usual da portlandita. E o terceiro pico que varia entre as amostras entre o intervalo de 700 °C e 800 °C, mostra a decomposição da calcita e demais carbonatos na amostra.

As imagens das Figuras 34-39 foram organizadas de forma crescente à densidade, sendo a primeira da amostra mais porosa e a última de menos porosa. Onde é possível observar que possivelmente a grande variação de densidade do material alterou na formação da portlandita e da calcita, tendo uma redução na perda de massa no primeiro pico à medida que a densidade diminui, o que corrobora com a relação entre a porosidade e a perda física predominante do primeiro pico.

A análise de TG/DSC não apresentou uma diferença perceptível na maioria dos termogramas. Com exceção das primeiras amostras, onde a perda de massa ocorreu de forma diferente.

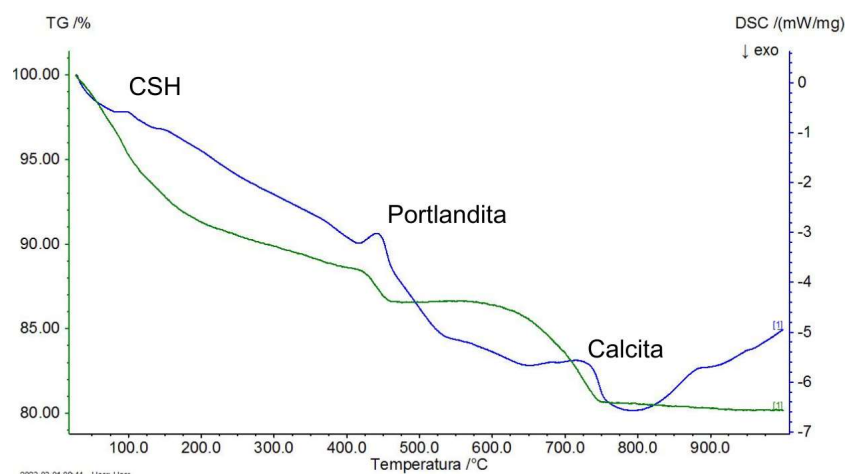


Figura 35 - - Termogravimetria CP-B2. Fonte: Autor

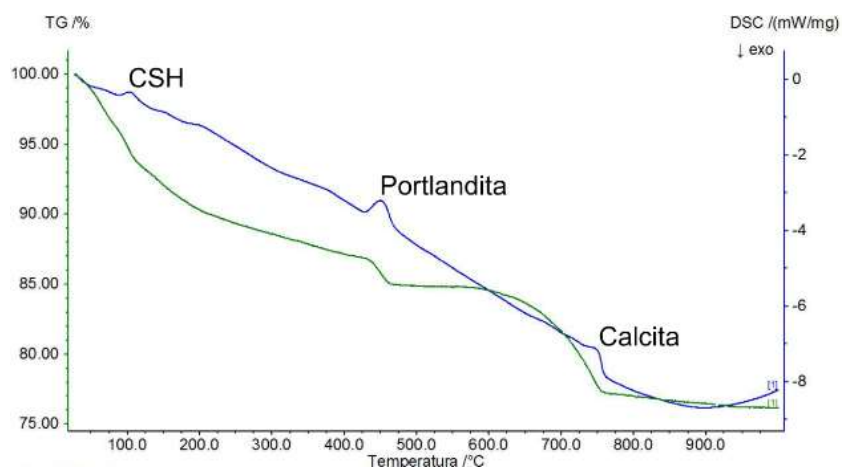


Figura 36

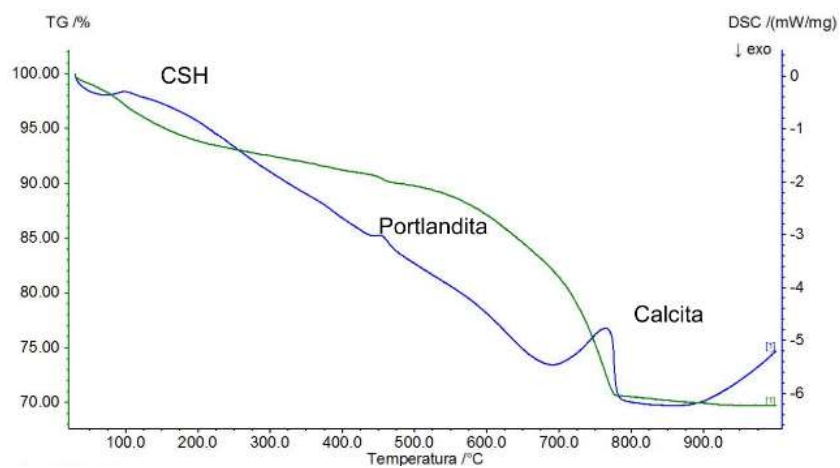


Figura 37 - Termogravimetria CP-A3. Fonte: Autor

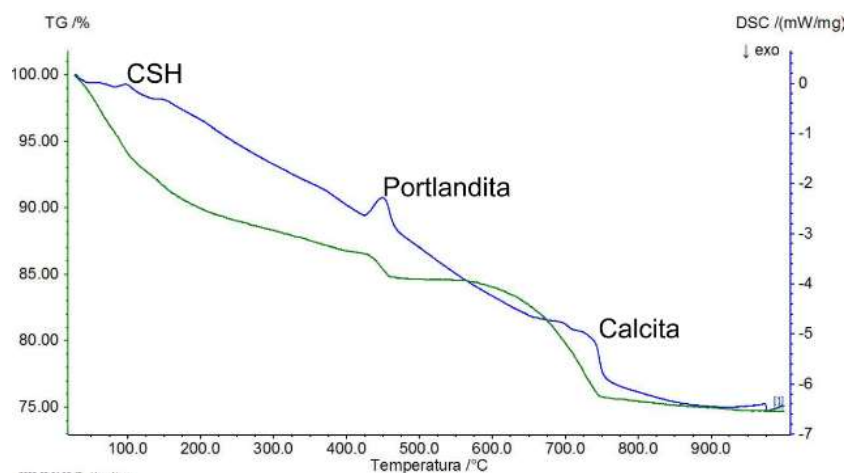


Figura 38 - Termogravimetria CP-G3. Fonte: Autor

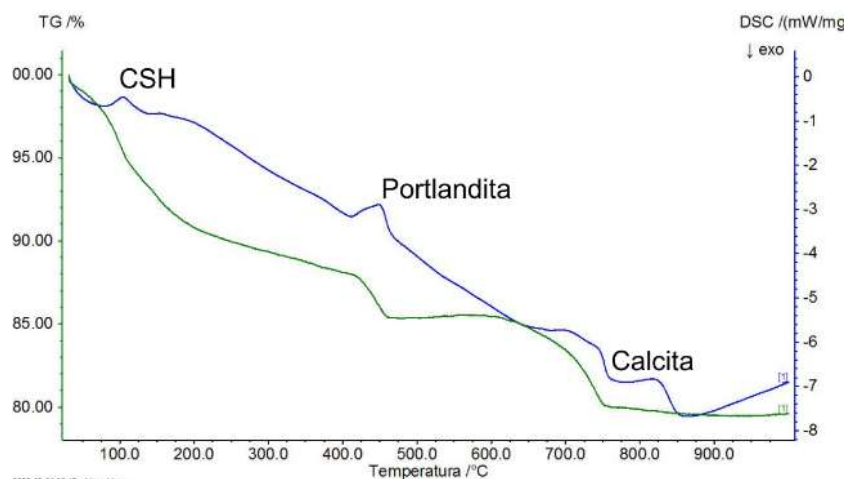


Figura 39 - Termogravimetria CP-D3. Fonte: Autor

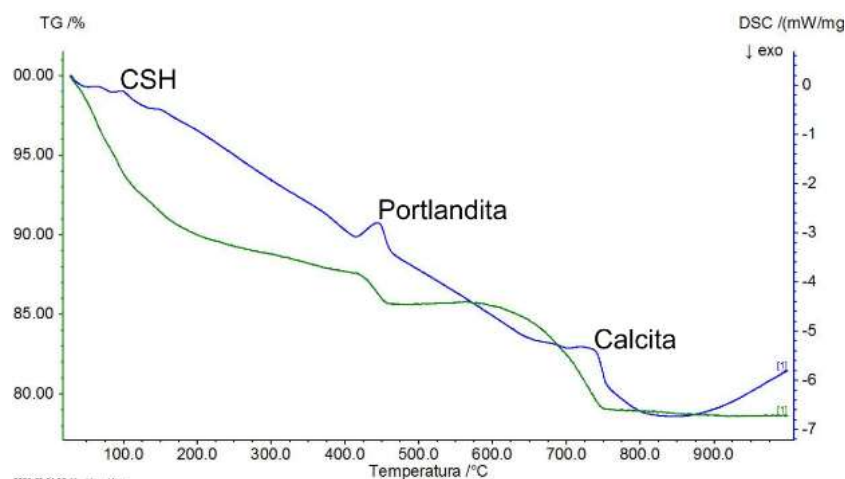


Figura 40 - Termogravimetria CP-C2. Fonte: Autor

6.2. ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Após o preparo da pasta de cimento e da espuma os materiais são misturados e colocados em molde cilíndrico (5x10cm), onde são envolvidos por plástico para reduzir a perda de água. Após 3 dias o material é desmoldado e envolvido para reduzir a perda de água durante o processo de cura, não necessitando que a cura ocorra em água, conforme Figura 41 –.



Figura 41 – Cura à seco das amostras. Fonte: Autor.

Os materiais apresentaram diferentes densidades devido ao processo de homogeneização e mistura com a espuma. É importante observar que o tempo de mistura também influenciou muito na densidade final do material, quanto maior o tempo de mistura menos espuma “sobra” no material.

Foram realizados ensaios de compressão uniaxial de 7 e 28 dias, intercalando entre as densidades obtidas. É possível observar abaixo a Figura 42 dos blocos após a ruptura:



Figura 42 - Ensaio de compressão uniaxial

Mais imagens dos blocos rompidos podem ser encontradas no APÊNDICE D (IMAGENS DOS CPS), enquanto os resultados obtidos no ensaio de compressão uniaxial podem ser lidos na Tabela 24 para ruptura após 7 dias de moldagem, a Tabela 25 para

ruptura 28 dias após moldagem e a que apresenta a variação de densidade das diferentes proporções, Tabela 26, em relação ao tempo de mistura entre a espuma e a pasta de cimento.

Tabela 25 - Ensaio de Compressão Uniaxial em 7 dias

Ensaio de Compressão Uniaxial 7 dias				
Nome	Densidade (kg/m³)	Kgf	Trup	MPa
B1	807	454	7d	2.3
B2	805	385	7d	1.9
C1	1240	1252	7d	6.3
C5	1289	1791	7d	8.9
C7	1379	2284	7d	11.4
C8	1502	1892	7d	9.5
D1	1240	5125	7d	25.6
D3	1237	4403	7d	22
E2	873	138	7d	0.7
E4	947	174	7d	0.9
E6	1180	352	7d	1.8

Tabela 26 - Ensaio de Compressão Uniaxial em 28 dias

Ensaio de Compressão Uniaxial 28 dias				
Nome	Densidade (kg/m³)	Kgf	Trup	MPa
A1	671	316	28d	1.6
A2	692	296	28d	1.5
A3	960	389	28d	1.9
A4	1136	826	28d	4.1

B3	795	681	28d	3.4
B4	828	572	28d	2.9
B5	857	860	28d	4.3
B6	1011	778	28d	3.9
B7	1442	937	28d	4.7
C2	1346	1595	28d	8
C3	1237	1563	28d	7.8
C4	1286	1650	28d	8.2
C6	1330	1815	28d	9.1
C9	1528	2168	28d	10.8
D2	1346	7053	28d	35.2
D4	1286	9322	28d	46.6
D5	1289	7647	28d	38.2
E1	856	125	28d	0.6
E3	930	141	28d	0.7
E5	967	180	28d	0.9
G1	1080	630	28d	3.1
G2	1034	634	28d	3.2
G3	1044	786	28d	3.9
G4	1062	689	28d	3.4
G5	1095	755	28d	3.8

Tabela 27 - Densidade da Massa

Nome	Densidade Média (kg/m³)	Desvio Padrão (kg/m³)	Tempo de Mistura (min)
------	-------------------------	-----------------------	------------------------

A	864,8	223,6	1
B	935,0	235,7	2
C	1348,6	105,3	2
D	1279,0	44,5	3
E	958,8	116,5	2
G	1063,0	25,1	3

Os resultados confirmam a influência da alteração de densidade do material por causa da espuma como é observado no artigo de Cledson (2018) [45], bem como essa relação entre a espuma e densidade vistos nos artigos de Youssef [24] e Steyn [40]. Porém algumas considerações iniciais devem ser observadas.

Enquanto o artigo [45] buscou automatizar ao máximo a fabricação do material, descrevendo bem as proporções a utilização de areia na mistura mostra ao comparar com os demais artigos um impacto na densidade. Mesmo que a areia reduza o volume de cimento utilizado, ela é inerte ao cimento e a espuma, o que pode alterar a absorção de água; diferente do artigo de [24] onde a adição de filler permite um melhor desempenho para a utilização do cimento nesta aplicação, provavelmente porque o filler permite uma melhor disposição das bolhas de ar nos vazios, impactando na absorção final.

Para concretos com aditivos espumantes ainda é possível observar que a densidade do material está diretamente ligada à sua resistência [45] assim como nos agregados utilizados no traço em sua fabricação [72], com densidades que variam de 300 a 900 kg/m³ apresentando valores de resistência, respectivamente, entre 0,345 e 6,5 MPa e apresentando ganhos de resistência aos 28 dias. É possível analisar que este tipo de material necessita de um rígido controle de fabricação, pois desde a consistência da espuma até o modo de mistura com a pasta de cimento diversas alterações podem ocorrer.

No Brasil ainda não existe uma norma para determinar os usos do concreto celular, embora o projeto de norma ABNT/CEE 185 [73] apresente algumas características para uso deste material em edificações. É possível observar em alguns estudos mais recentes como o aditivo e a porosidade do concreto impactam diretamente na resistência do concreto [45], mantendo-o ainda eficiente para uso e com um peso menor, o que evita sobrecargas em estruturas.

A avaliação principal entre os diversos artigos, ainda se dá pelo método de fabricação da espuma e do processo de mistura entre os materiais, pois como é possível observar na Tabela 25, ao utilizar um mesmo equipamento e um mesmo método de mistura, a densidade é alterada pelo tempo. Logicamente um maior tempo de mistura impactará numa ruptura das bolhas, reduzindo o volume de ar incorporado. O que mostra uma grande necessidade de padronização de uma produção do material para obter o melhor controle possível da densidade produzida.

Para a análise do comportamento mecânico, dois nomes se destacam Heymsfield e Zhang, cujo foco do trabalho está na modelagem matemática das aeronaves no sistema EMAS [31], [67]. Foram analisados concretos celulares de baixa densidade “274.6 kg/m³ 302.4 kg/ m³ and 337 kg/ m³”, com resistências respectivas de 2,13 MPa; 2,09 MPa e 2,15 MPa. E foi demonstrado que estes são capazes de desacelerar aeronaves de médio porte dentro da desaceleração permitida de 1g.

No artigo de [67], é realizada uma simulação para concretos celulares numa densidade entre 270 e 340 kg/m³, submetidos a uma tensão de aproximadamente 0,35 MPa, sendo o $\sigma_{\text{espaço}}$ a tensão de uma ruptura inicial do material e K uma tensão secundária gerada para ruptura contínua da célula com a adição de uma força adesiva entre o pneu e o material. No artigo de [31], a análise é realizada entre as tensões de 0,26 e 0,68 MPa, de um material cimentício para utilizar em diversas aeronaves, ambos artigos concluem que a distância de um EMAS vai variar completamente com a geometria do sistema e sua densidade, sendo uma tensão de resistência do material de 0,68 Mpa (ou 100 psi) determinante para o uso em grandes aeronaves como um Boeing 737. Este sendo importante para grandes aeroportos comerciais, mas não observado como foco para este trabalho que tem o ATR-72 como principal aeronave para o aeroporto analisado.

Ao observar a Figura 43, podemos observar que o material possui um incremento de resistência conforme aumenta a densidade, o que é esperado, pois uma maior densidade implica num menor volume de vazios e porosidade, portanto dando maior resistência ao material. É possível verificar ainda que as densidades estudadas neste trabalho entre 600 kg/m³ e 900 kg/m³ apresentaram a tensão ideal para os resultados analisados nas simulações dos artigos previamente citados. Podendo ser viáveis, pela análise de resposta mecânica do material para o uso em EMAS.

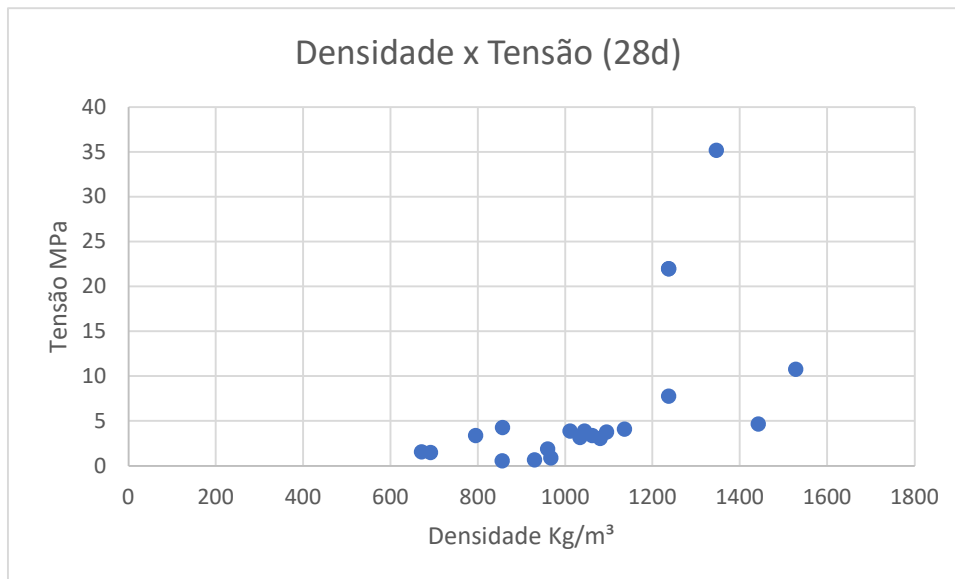


Figura 43 - Gráfico Densidade e Tensão. Fonte: Autor

Ao observar a Figura 43 é possível verificar pontos de queda, tanto entre 800 kg/m³ e 1000kg/m³, como próximo a 1200kg/m³ e 1400 kg/m³. Estes materiais, apesar de terem densidade maior apresentaram uma queda de tensão, provavelmente causada por falhas internas geradas pela espuma. O que pode ter sido ocasionado pelo erro humano no processo de mistura ou na hora de moldagem onde o ar pode ter sido incorporado junto a espuma gerando vazios maiores e pontos de erro, aumentando a fragilidade do material.

Heymsfield [31] já demonstra que além da densidade, a geometria do EMAS durante o SGAS é de extrema importância, podendo-se “setorizar” de modo a ter uma espessura maior no final da área permitindo desacelerar aeronaves maiores, enquanto aeronaves menores poderiam parar antes com um material de densidade menor ou espessura menor, como Zhang demonstra na

Tabela 28 e relaciona com as distâncias de parada na Tabela 25.

Desta forma para que um Boeing 737 possa parar dentro da área usual de 140m é necessário aplicar uma tensão de esmagamento σ_0 109,3 psi ou 0,76 MPa através da utilização de camadas com espessuras diferentes do mesmo material. Ainda observando que a penetração da roda no material e a resistência deste têm influência direta na desaceleração da aeronave como é possível observar nas

Tabela 28 e Tabela 29.

Tabela 28 - Parâmetros do Concreto celular. Fonte: Adaptado de Zhang,2013

Casve	Densidade (kg/m ³)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Última
FC1	274,6	0,29	2,13
FC2	302,4	0,35	2,09
FC3	337	0,43	2,15

Tabela 29 - Distâncias de parada. Fonte: Adaptado de Zhang 2013

Aircraft Type	Weight Case	FC1	FC2	FC3
B737-900ER	MLW	129,2	119,7	117,9
	MTW	133,2	125,0	121,6
B707-320C	MLW	168,0,	155,4	147,5
	MTW	196,6	180,4	167,6
B747-100	MLW	190,3	175,7	163,5
	MTW	213,8	193,4	174,7

6.3. ENSAIO PENETRAÇÃO EM CÉLULA

Este ensaio consiste em aplicar uma carga em uma célula dimensionada de concreto celular, utilizando um molde cilíndrico quem tem por base a área de contato entre o trem de pouso de uma aeronave estudada e o solo, neste ensaio se executa a compressão do material na maior velocidade possível até a tensão estudada.

O ensaio foi feito para atingir a carga de 1,5 MPa considerando uma célula nas dimensões já especificadas em 5.3.7. Devido a uma densidade bem maior do que os CPs ensaiados a carga resistida foi logicamente maior e a penetração menor, como pode-se observar na Tabela 30.

Tabela 30 - Resultados do Esaio de Penetração. Fonte: Autor

Célula	Densidade (kg/m ³)	Penetração (cm)
A	523,95	2,0
B	372,61	3,8
C	453,41	2,0

Ao observar as Figura 44 e Figura 45 que trazem o relatório do ensaio é possível identificar a aplicação de carga até o ponto de parada que foi determinado ao chegar em 1,5 MPa na peça auxiliar colocada sobre a célula de concreto celular.

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Compr. Base (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (N)
CP 1	150	55	0.26	4657.99
CP 2	150	55	1.01	17928.33
CP 3	150	55	1.56	27629.89
CP 4	150	60	1.42	25074.79
CP 5	150	65	1.50	26510.55
Número CPs	5	5	5	5
Média	150.0	58.00	1.152	20360
Desv.Padrão	0.0000	4.472	0.5408	9557
Coef.Var.(%)	0.0000	7.711	46.94	46.94
Mínimo	150.0	55.00	0.2636	4658
Máximo	150.0	65.00	1.564	27630

Figura 44 - Relatório de Resultado. Fonte: Autor

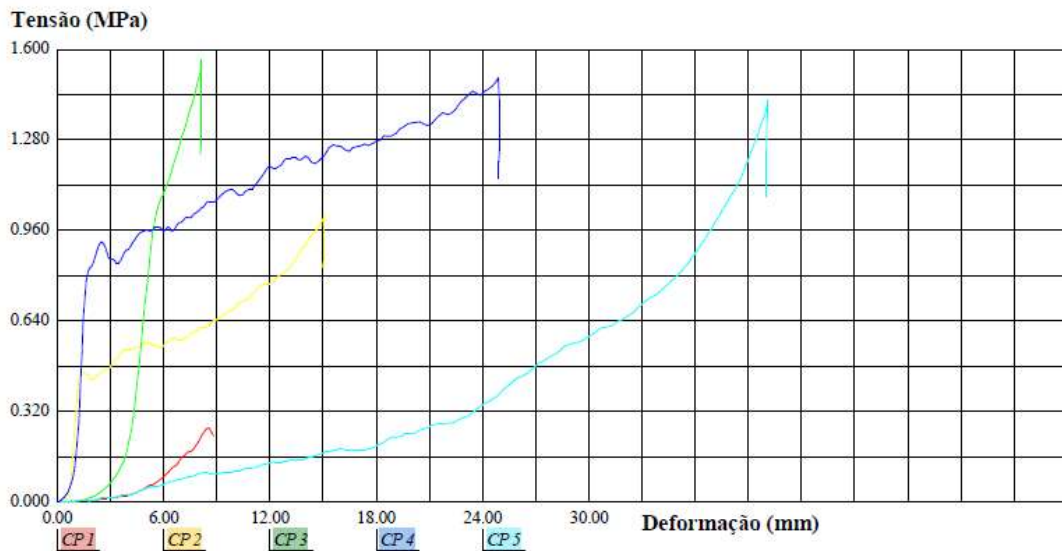


Figura 45 - Gráfico de ensaio de Penetração em Célula. Fonte: Autor

Os valores encontrados, apesar de utilizarem uma carga bem menor, apresentam resultados condizentes com [40] como podemos ver nos dados que ele apresenta na Figura 45. Os resultados também condizem com o apresentado por [66], acrescentando que um estudo para otimizar a dispersão de energia do material em relação a sua densidade e penetração é importante para obter o melhor sistema a aeronave desejada.

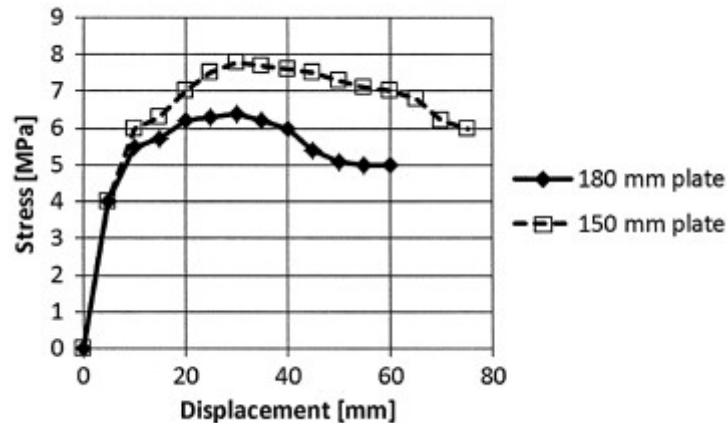


Figura 46 - Carregamento vs Penetração. Fonte: [40]

Apesar de uma pequena amostragem esse breve ensaio nos demonstra como materiais porosos reagem ao serem esmagados em grande carga. Na Figura 47, por exemplo, pode-se observar que a célula C foi esmagada gerando uma superfície mais porosa e liberando menos detritos que a célula B, Figura 48, estes geram problema para a segurança de aeronaves com turbinas podendo causar acidentes.

Ao observar as Figura 45 e Figura 46, observa-se que o material apresenta um comportamento um pouco divergente do normalmente observado pela Lei de Hooke. Um

dos motivos está na grande alteração de densidade que ocorre ao comprimir o material, pois o concreto inicialmente poroso e frágil sofrerá uma compactação, com um aumento na resistência à compressão à medida que a penetração da célula (ou roda da aeronave) penetrar.

Logo, é recomendado utilizar densidades superiores a da célula C, conforme mostra a norma da FAA em 3.1. Pela pouca amostragem essa inferência não é conclusiva, mesmo comparando aos demais artigos, sendo necessário mais estudos sobre o comportamento dessas células com aplicação de carga em suas variadas densidades.



Figura 47 - Célula C para ensaio de compressão. Fonte: Autor.



Figura 48 - Célula B para ensaio de Penetração. Fonte: Autor

7. CONCLUSÃO

Ao observar os resultados do cimento utilizado, conclui-se que é possível utilizar o concreto celular como base para o EMAS, principalmente entre as densidades de 600 kg/m³ e 800 kg/m³. Densidades menores resultaram em um material frágil, não só do ponto de vista físico, mas de formulação química pela menor hidratação.

O ensaio de Penetração em célula também indica que valores mais próximos a 600 kg/m³ são melhores que valores de densidade próximos a 400 kg/m³, devido a geração de resíduo com a ruptura do material, que pode trazer risco à aeronaves de turbinas e foge às especificações da FAA.

A adição do aditivo espumígeno demonstrou que as principais alterações no cimento são na porosidade, alteração física, e na hidratação causada pela porosidade a partir das fases observadas. Não restando quantidades significativas do aditivo que torne o concreto celular inflamável ou com reatividade diferente de uma pasta de cimento normal.

A partir das análises de TG/DSC, MEV e DRX foi possível observar alterações morfológicas nas fases do cimento, provavelmente causadas pela porosidade e hidratação do cimento, demonstrando diminuição de resistência não só pela adição de vazios no material.

Ao observar as interfaces do material entre as áreas de contato com as bolhas da espuma percebe-se que estas geram preferencialmente uma formação diferenciada nos poros, provavelmente por causa da retenção de água pelo detergente lipídico, que permitiu a estas superfícies uma maior hidratação, bem como uma maior atração de água do material para este ponto. Podendo-se inferir que ao gerar maior volume de poros pela adição de espuma altera-se a própria forma de hidratação do cimento, o que explica a diferença morfológica entre as amostras de maior porosidade.

O material apresentou boa resistência, mas careceu de boa reprodutividade pela dificuldade de manipulação e preparo da espuma; percebendo-se pela variação de resistência das amostras de um mesmo grupo, onde as primeiras tem maior porosidade por estarem na parte superior e as últimas maior densidade por estarem na parte inferior do recipiente, e, portanto, com mais pasta de cimento e menos espuma. Algo que logicamente vai acontecer com materiais com diferentes densidades.

As resistências identificadas no material com as proporções estudadas apontam para que este o material possa ser utilizado, assim como no sistema EMAS MAX®, de modo encapsulado por um plástico ou resina para proteger de plantas e intempéries, e permitindo a adição de uma camada superior de asfalto.

8. PERSPECTIVAS

Para uma melhor compreensão do concreto celular e seus usos acredito que se deve realizar um amplo estudo buscando padronizar sua fabricação de modo a adquirir maior repetibilidade de resultados. Tanto na densidade da espuma, bem como no tempo de mistura desta com a pasta de cimento. Visto que esses fatores são essenciais para determinar a resistência e a porosidade do material, desta forma, permitindo utilizar o concreto celular com maior eficiência para diversos usos específicos, que vão variar de um isolante térmico, uma divisória leve de cômodos a um material quebrável para segurança em aeroportos.

9. APÊNDICE

9.1. APÊNDICE A (RESULTADOS FRX)

Element	Concentration	Unit	Line	Intensity	Judgment
Fe2O3	4.4751	wt%	K α	7331.80	---
TiO2	0.3808	wt%	K α	165.19	---
K2O	2.8186	wt%	K α	1560.06	---
CaO	75.6366	wt%	K α	42158.96	---
Al2O3	2.4012	wt%	K α	2.59	---
SiO2	13.9229	wt%	K α	56.16	---
ZnO	0.0470	wt%	K α	114.56	---
S	0.2534	wt%	K α	20.40	---
Cu	0.0263	wt%	K α	82.41	---
Mn	0.0208	wt%	K α	39.63	---
V	0.0173	wt%	K α	19.03	---

Tabela FRX – G3 - Ponto 1. Fonte: autor

Element	Concentration	Unit	Line	Intensity	Judgment
Fe2O3	4.7593	wt%	K α	8498.59	---
TiO2	0.4840	wt%	K α	229.71	---
K2O	2.4387	wt%	K α	1336.73	---
CaO	70.0180	wt%	K α	40431.85	---
Al2O3	0.9933	wt%	K α	1.12	---
SiO2	20.9246	wt%	K α	89.78	---
ZnO	0.0666	wt%	K α	175.96	---
S	0.2529	wt%	K α	19.87	---
Mn	0.0360	wt%	K α	74.93	---
V	0.0157	wt%	K α	18.81	---
Cr	0.0111	wt%	K α	18.05	---

Tabela FRX - B2 - Ponto 2. Fonte: autor

9.2. APÊNDICE B (DIFRATOGRAMAS NÃO TRATADOS)

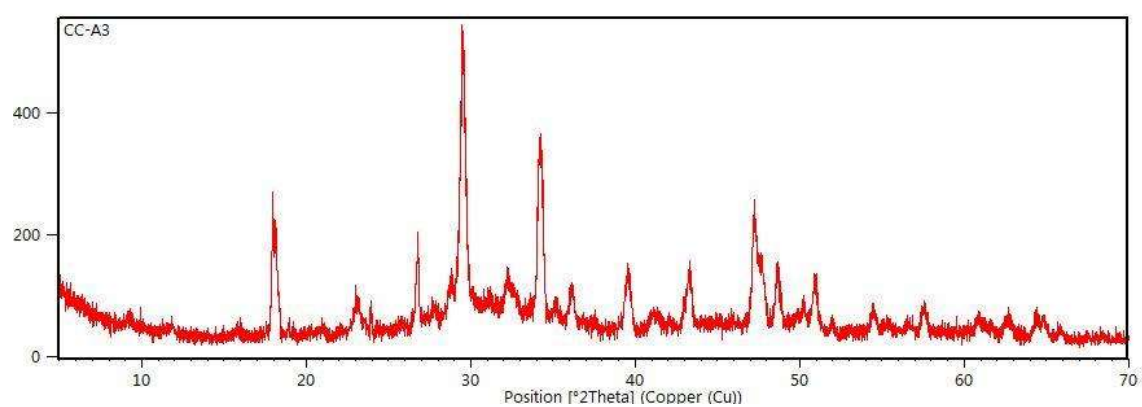


Figura 49 - Difratrograma amostra A3 - Fonte: Autor

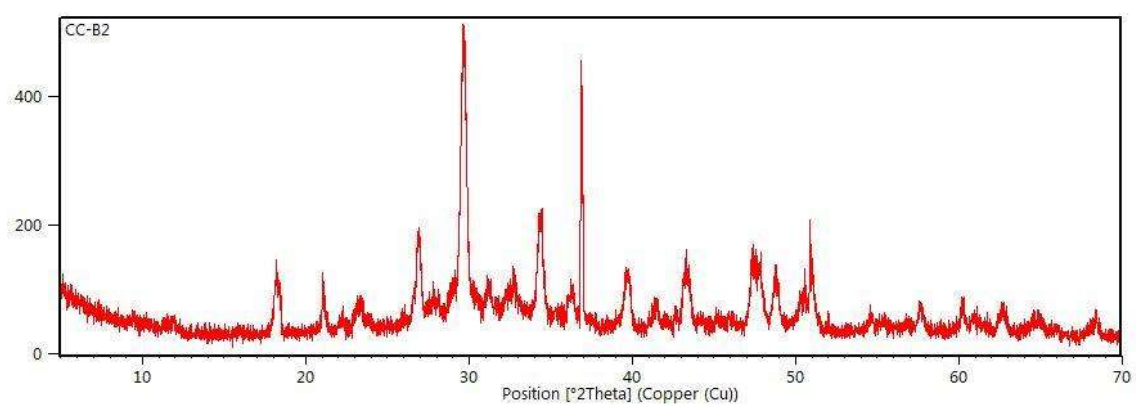


Figura 50 - Difratrograma amostra B2 - Fonte: Autor

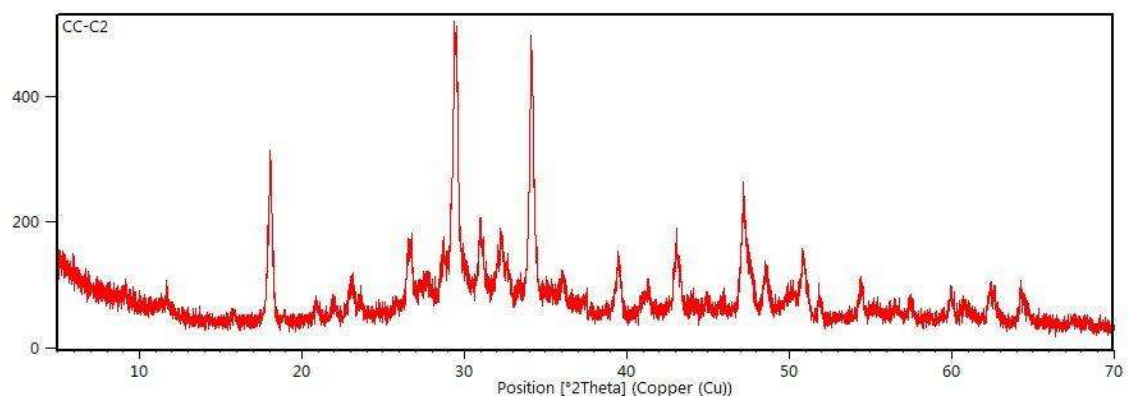


Figura 51 - Difratograma amostra C2 - Fonte: Autor

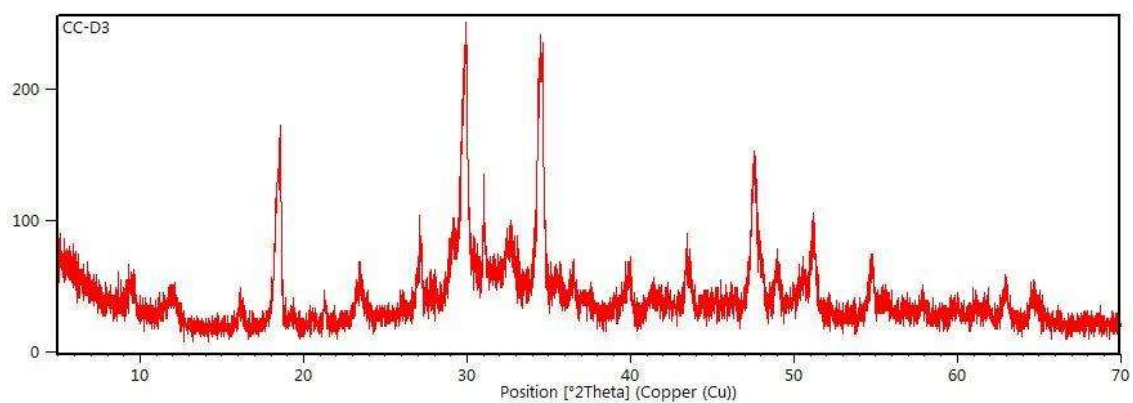


Figura 52 - Difratograma amostra D3 - Fonte: Autor

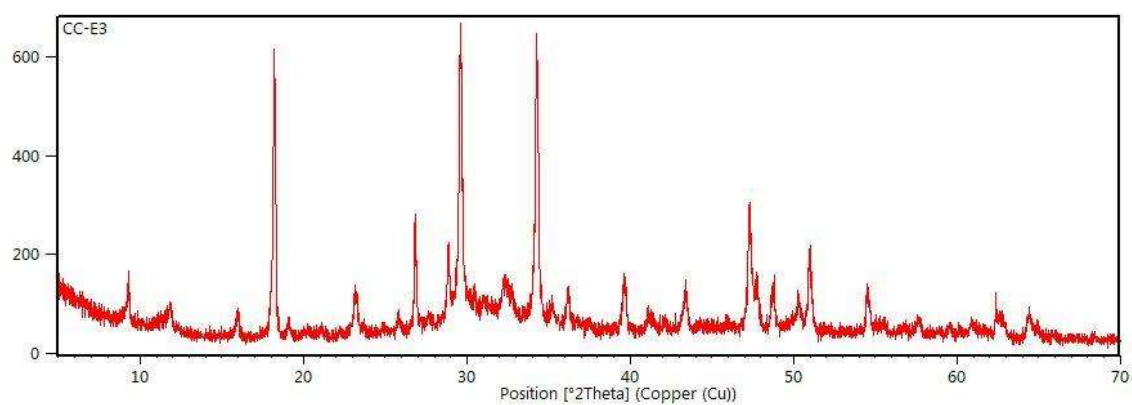


Figura 53 - Difratograma amostra E2 - Fonte: Autor

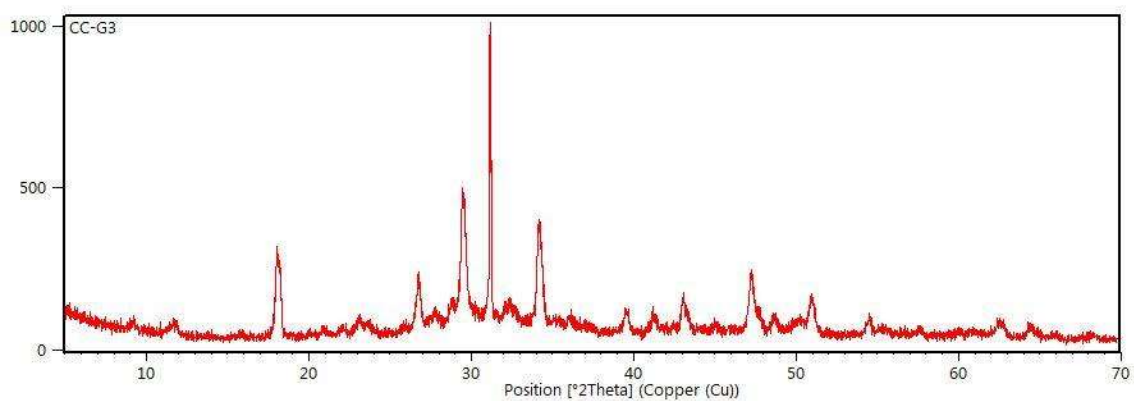
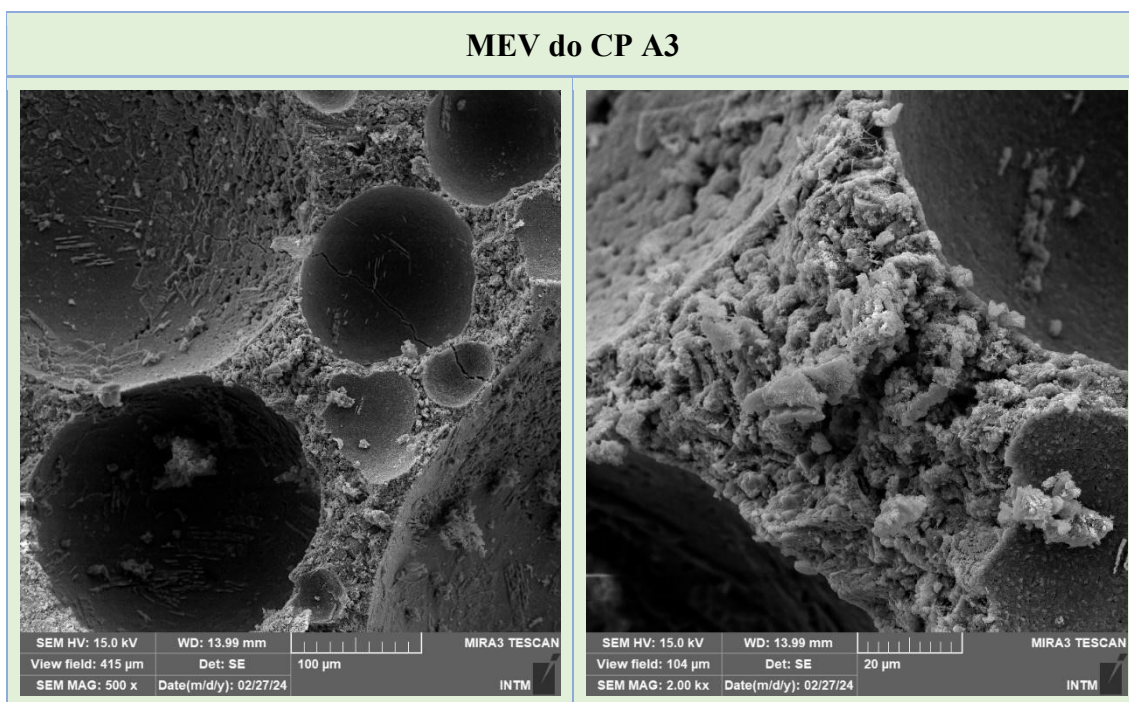


Figura 54 - Difratoograma amostra G3 - Fonte: Autor

1.1. APÊNDICE C (IMAGENS DE MEV)



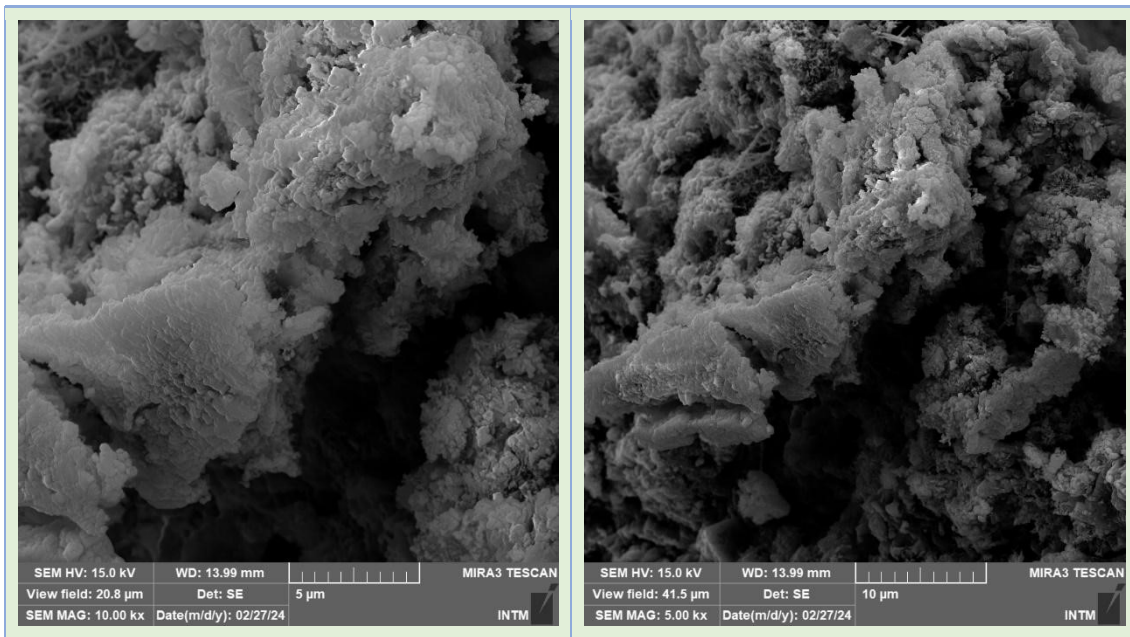


Figura 55 - MEV DO CP A3. FONTE: AUTOR

MEV do CP B2

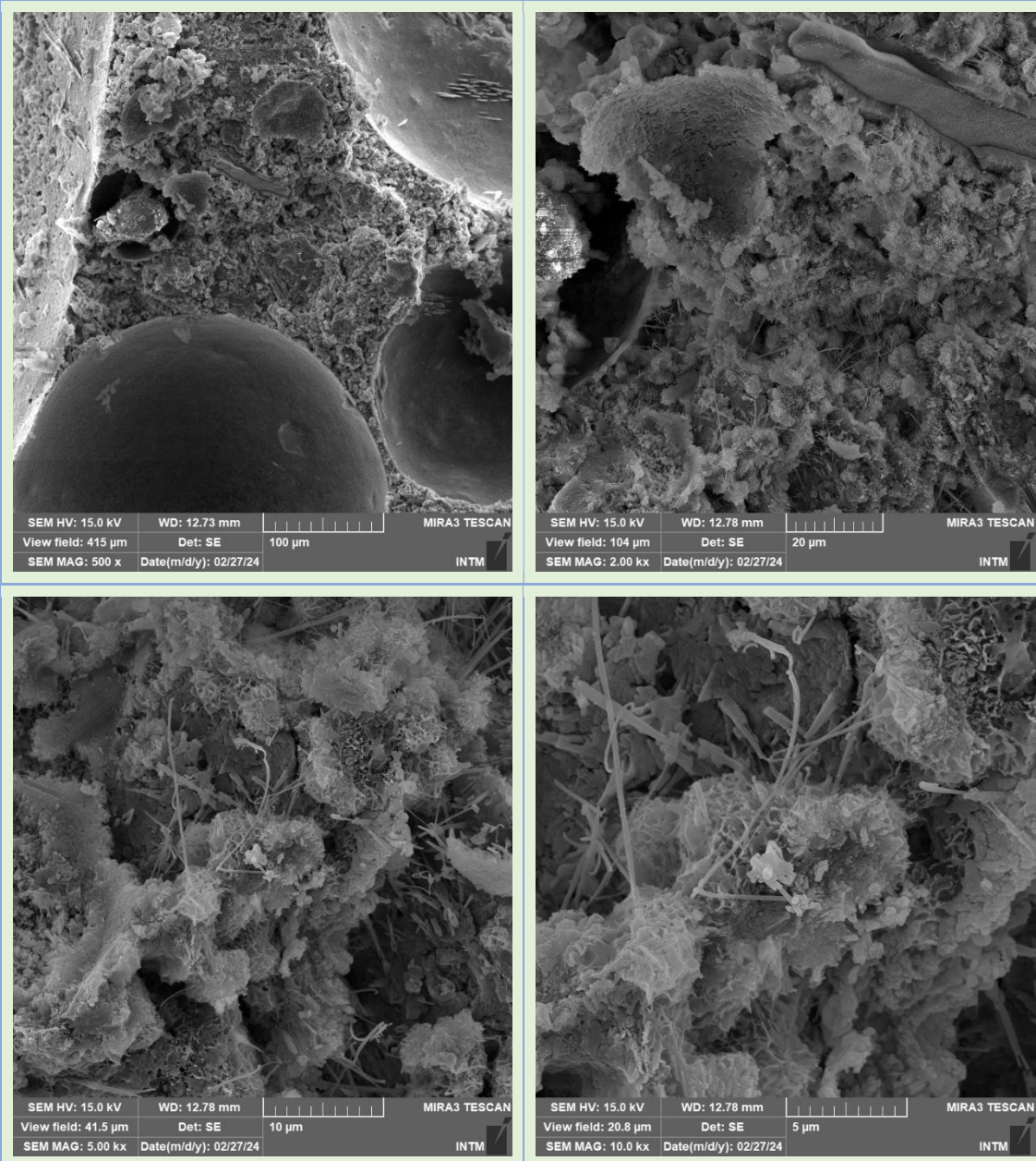


Figura 56 - MEV DO CP B2. FONTE: AUTOR

MEV do CP C2

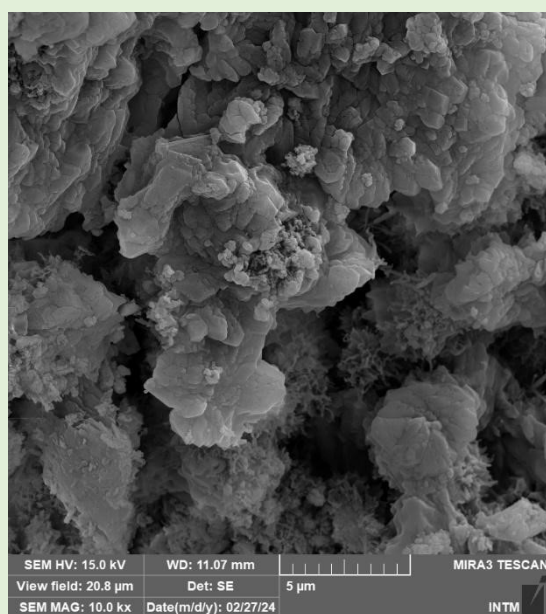
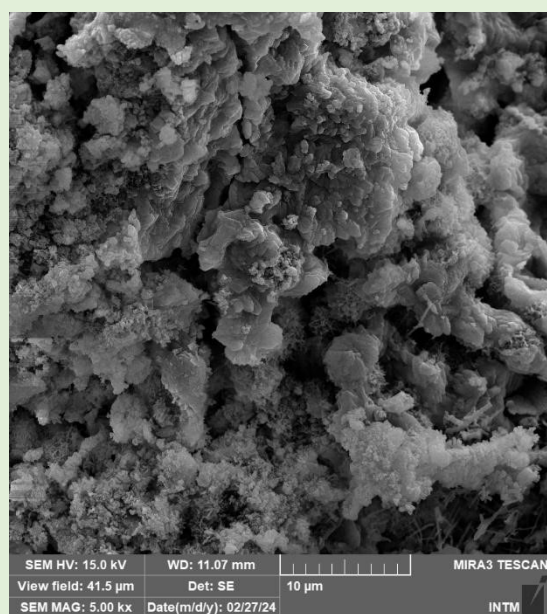
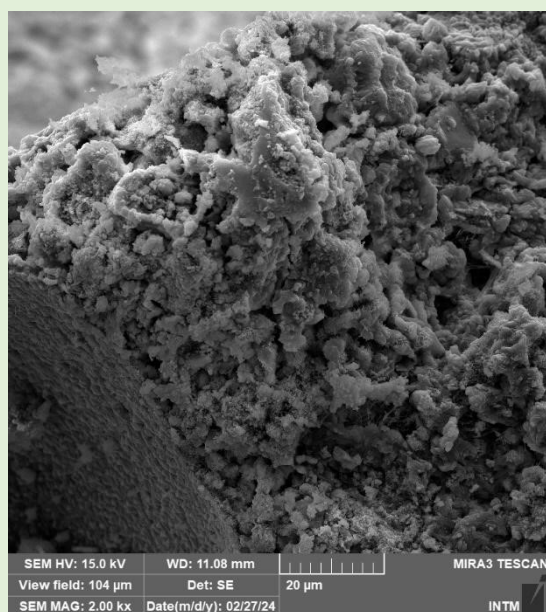
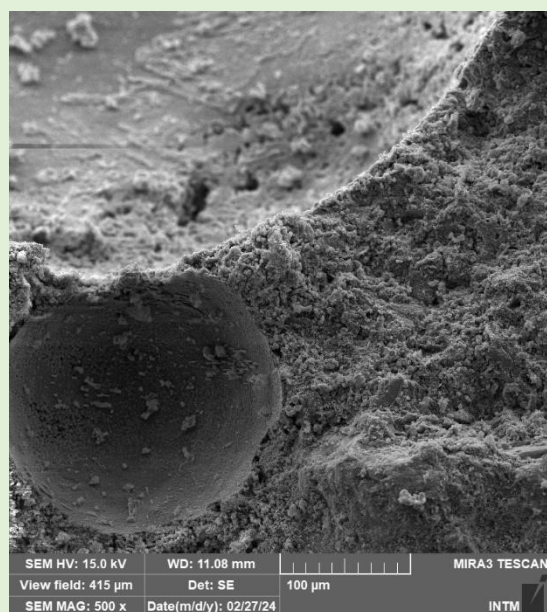


Figura 57 - MEV DO CP C2. FONTE: AUTOR

MEV do CP D3

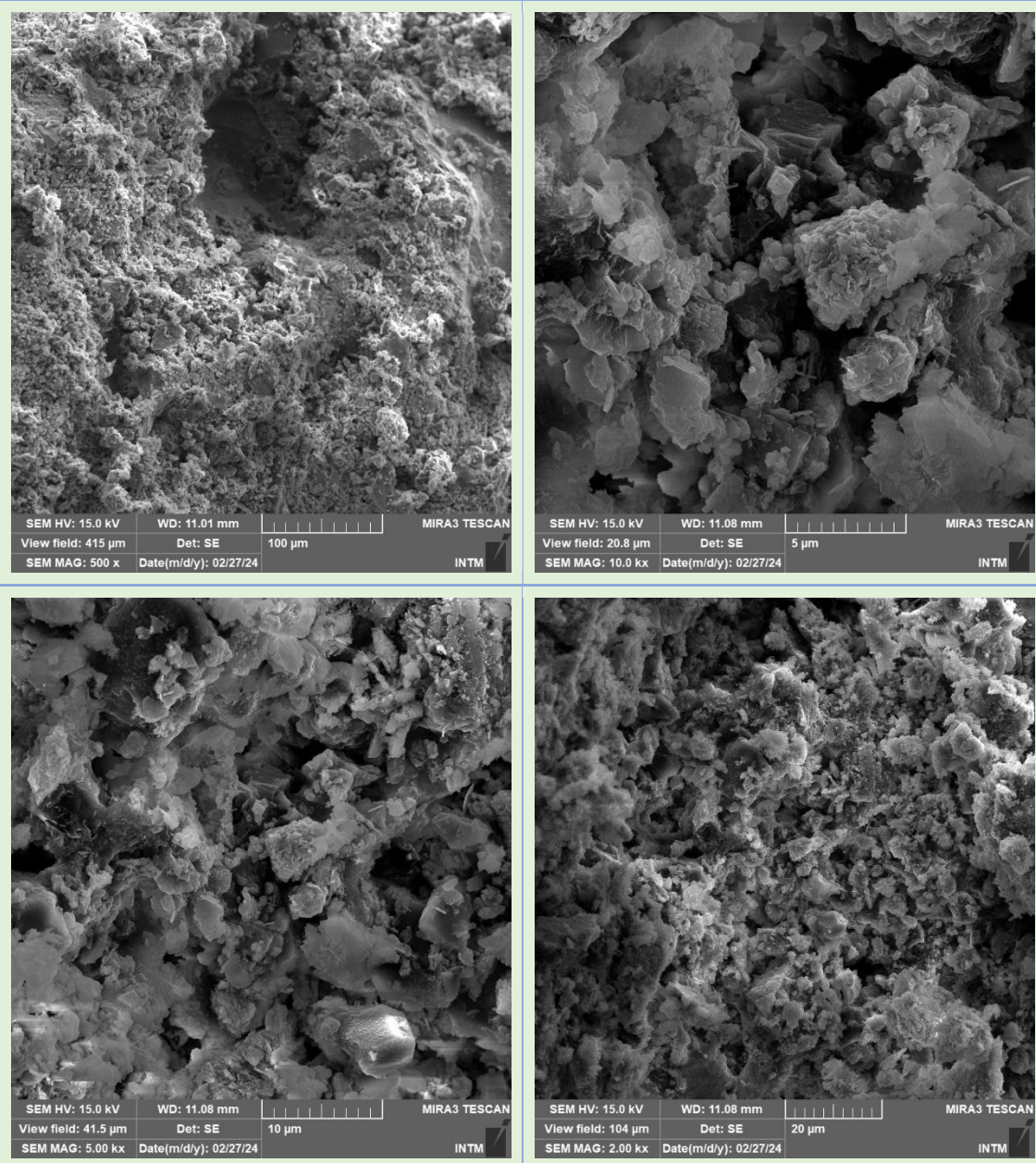


Figura 58 - MEV DO CP D3. FONTE: AUTOR

MEV do CP E2

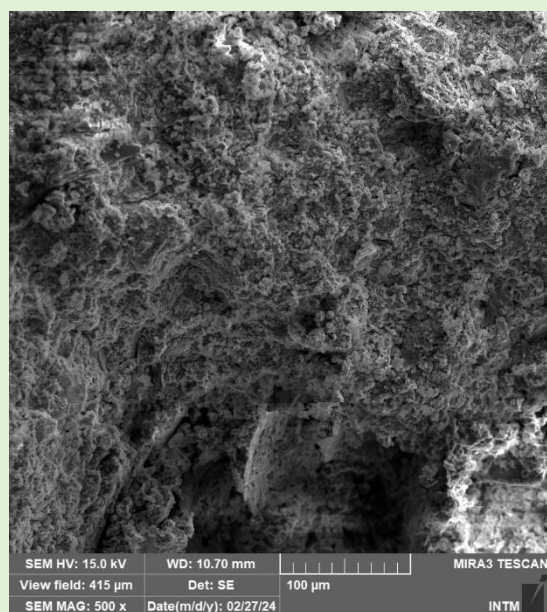
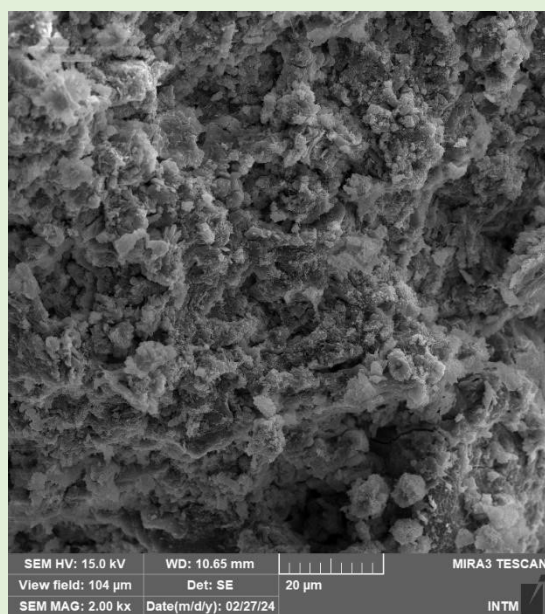
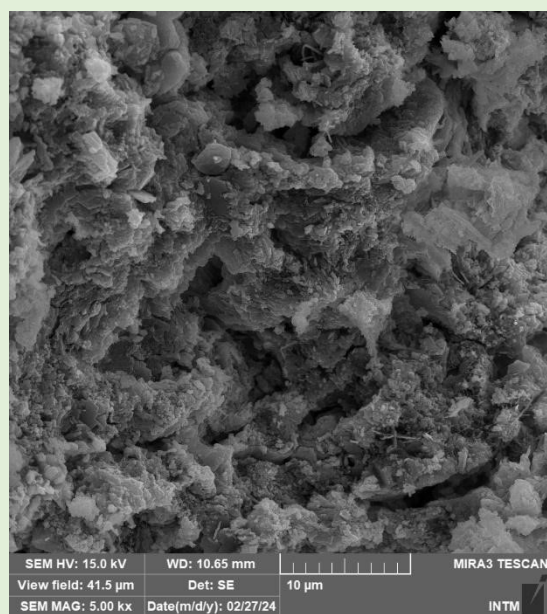
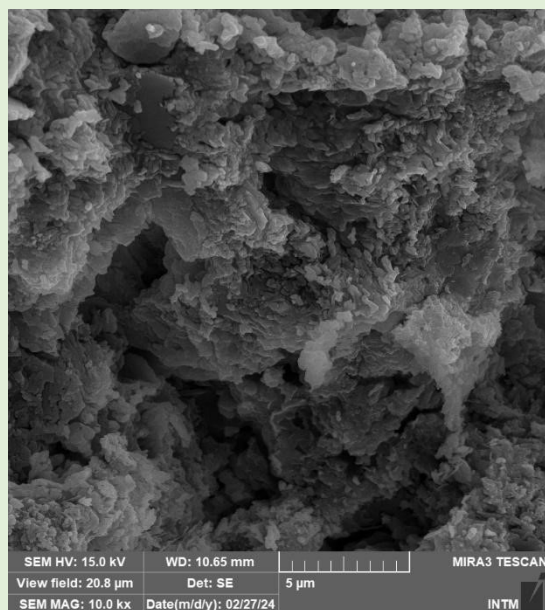


Figura 59 - MEV DO CP E2. FONTE:
AUTOR



1.1. APÊNDICE D (IMAGENS DOS CPS)

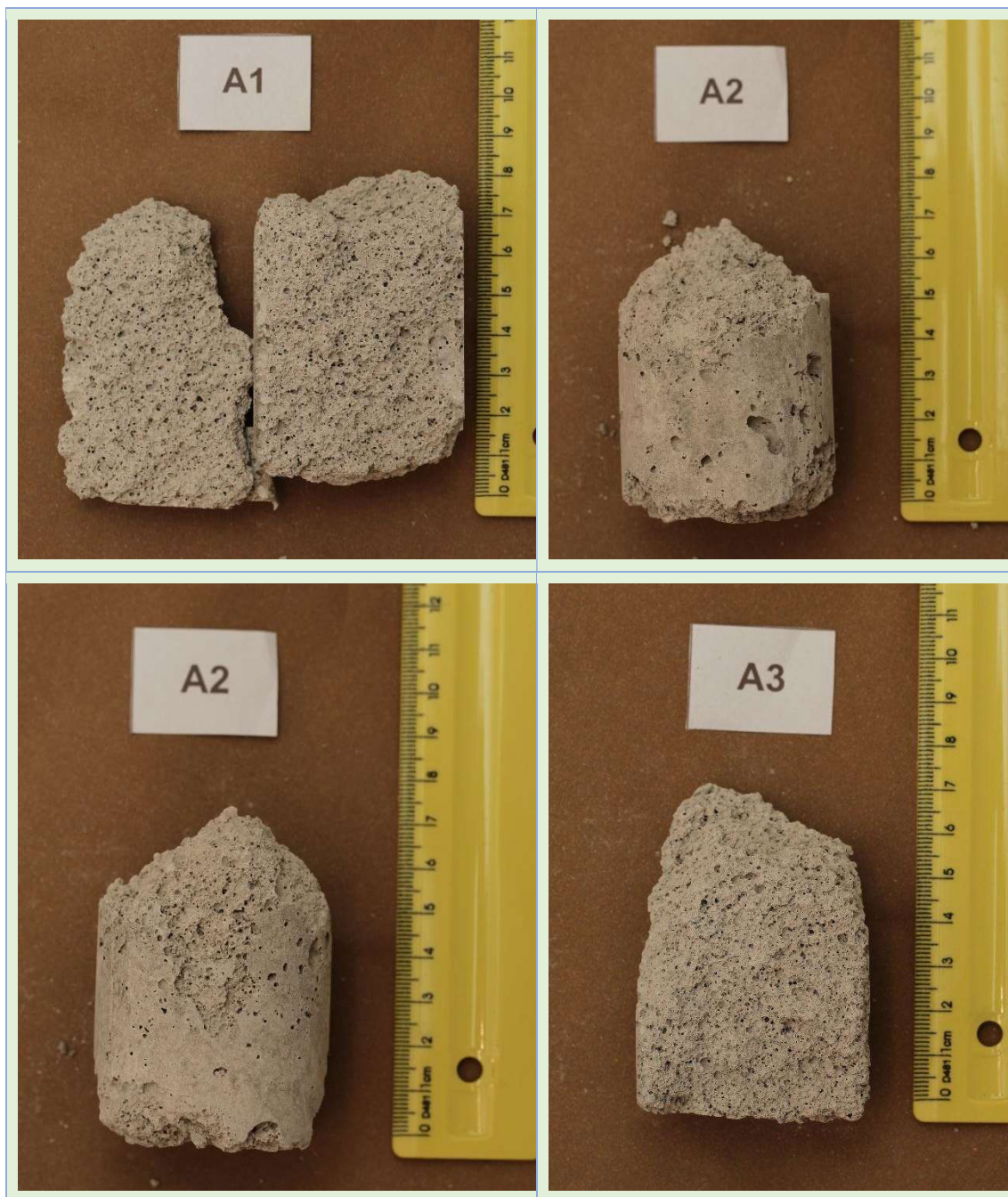


Figura 60 - Imagem dos CPS 1. Fonte: Autor

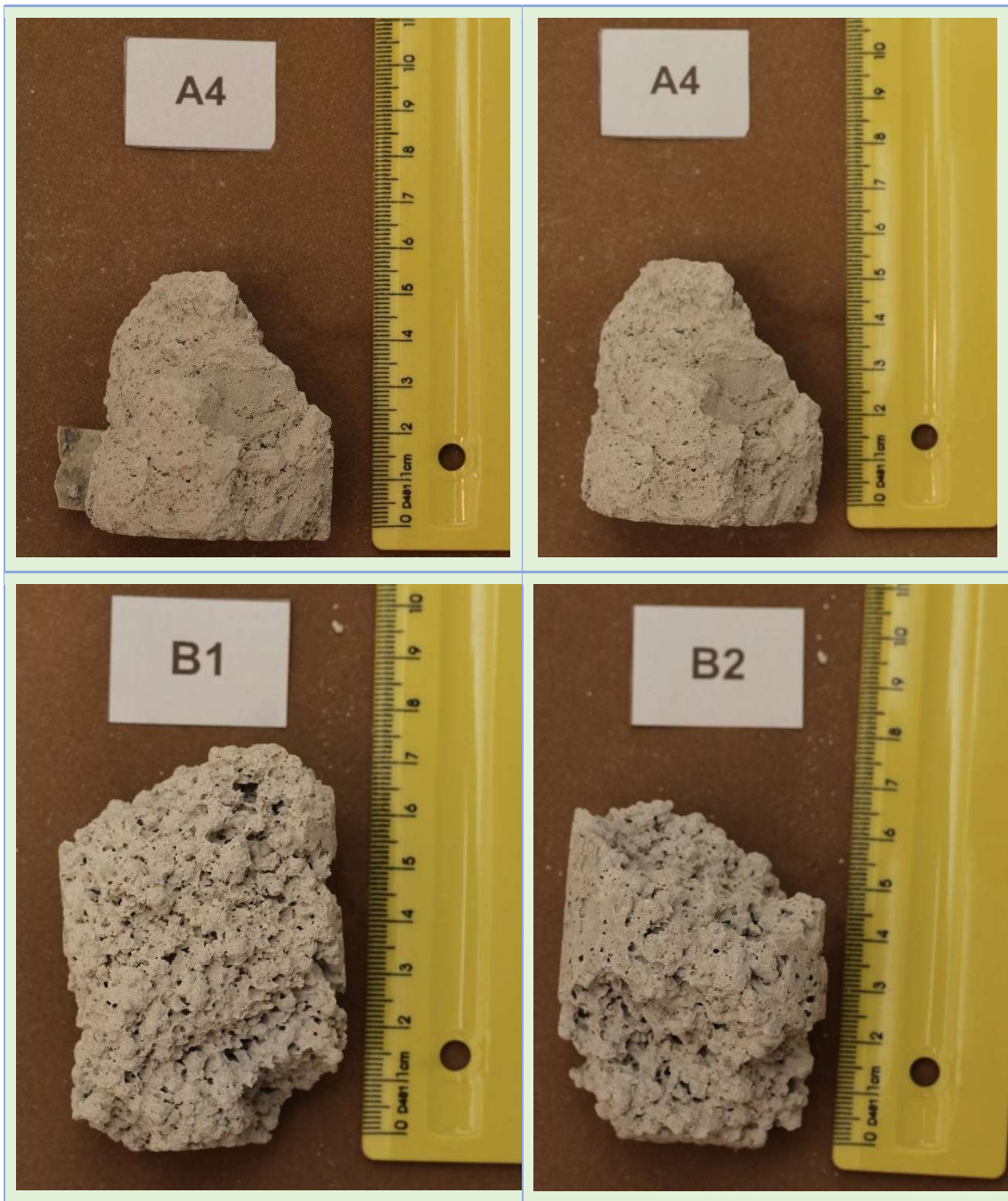


Figura 61 - Imagem dos CPS 2.Fonte: Autor

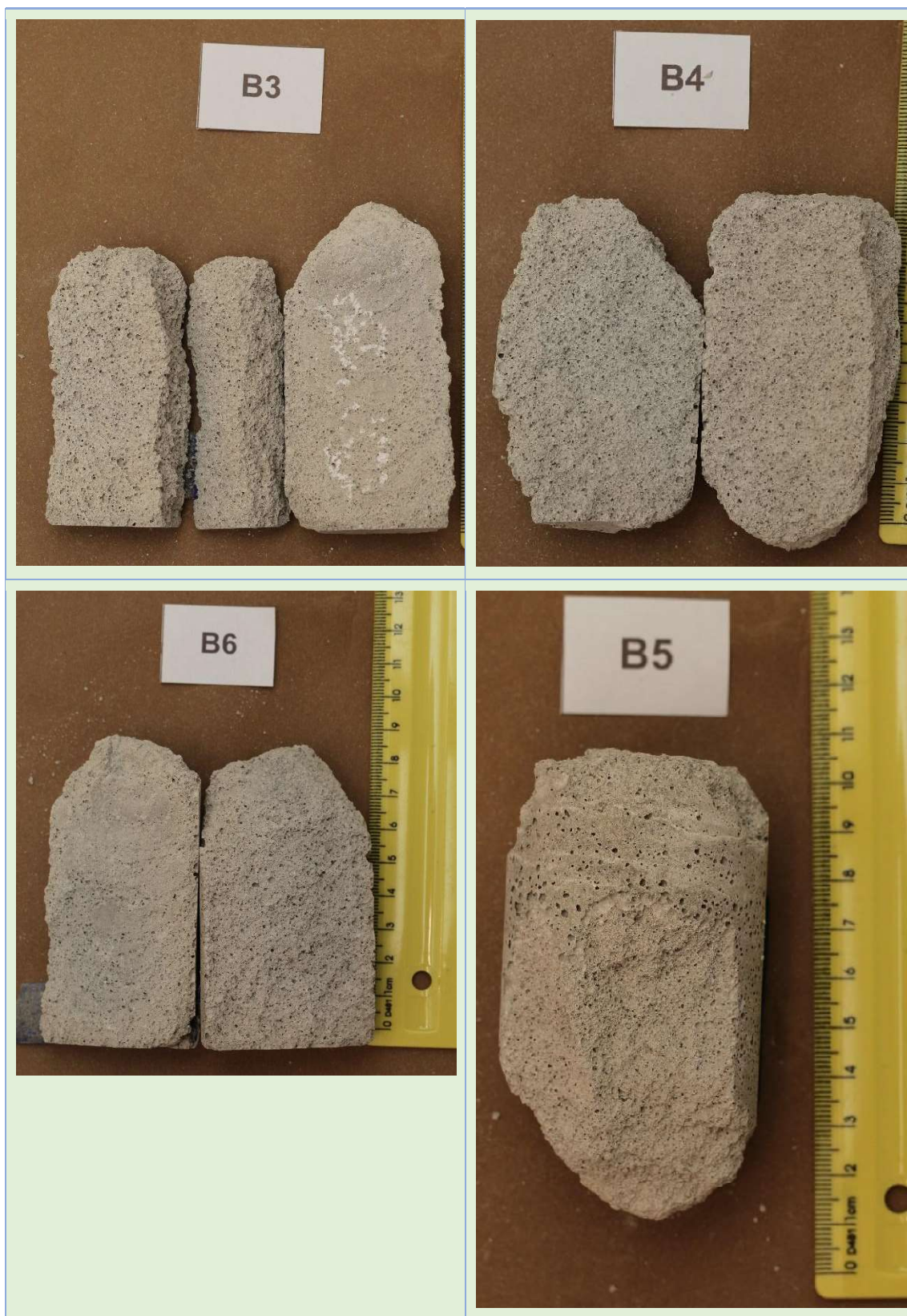


Figura 62 - Imagem dos CPS 3. Fonte: Autor

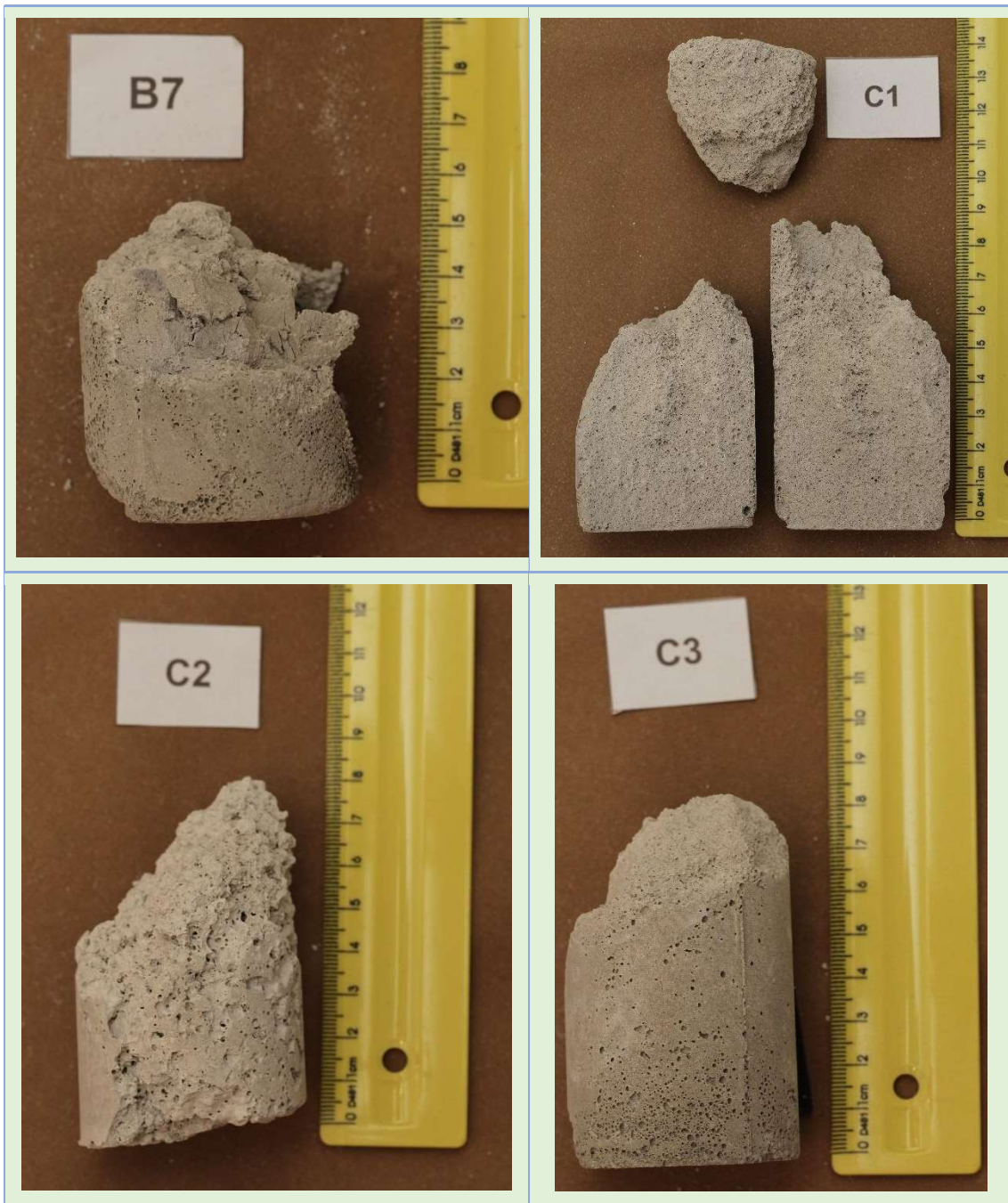


Figura 63 - Imagem dos CPS 4. Fonte: Autor

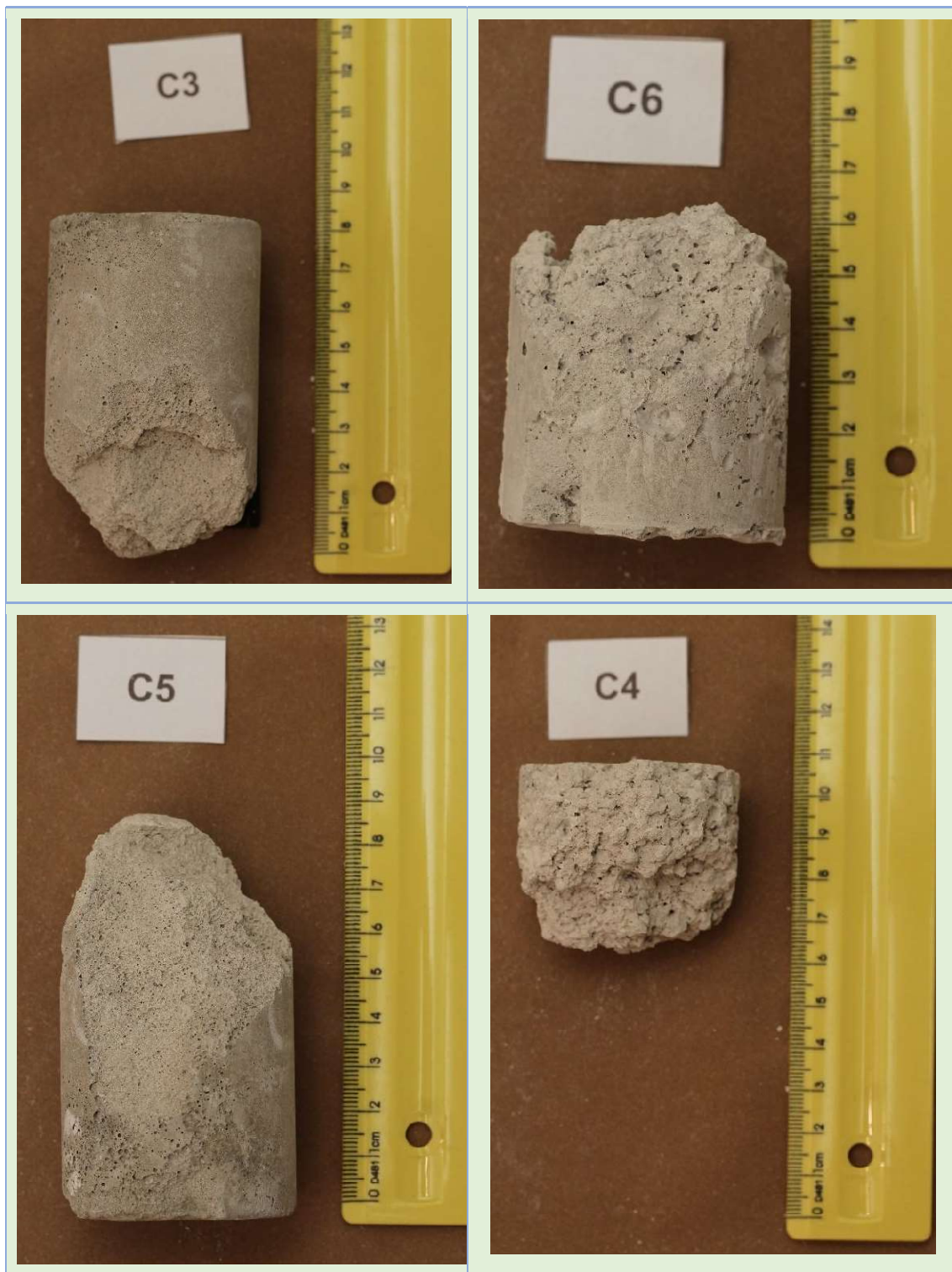


Figura 64 - Imagem dos CPS 5. Fonte: Autor

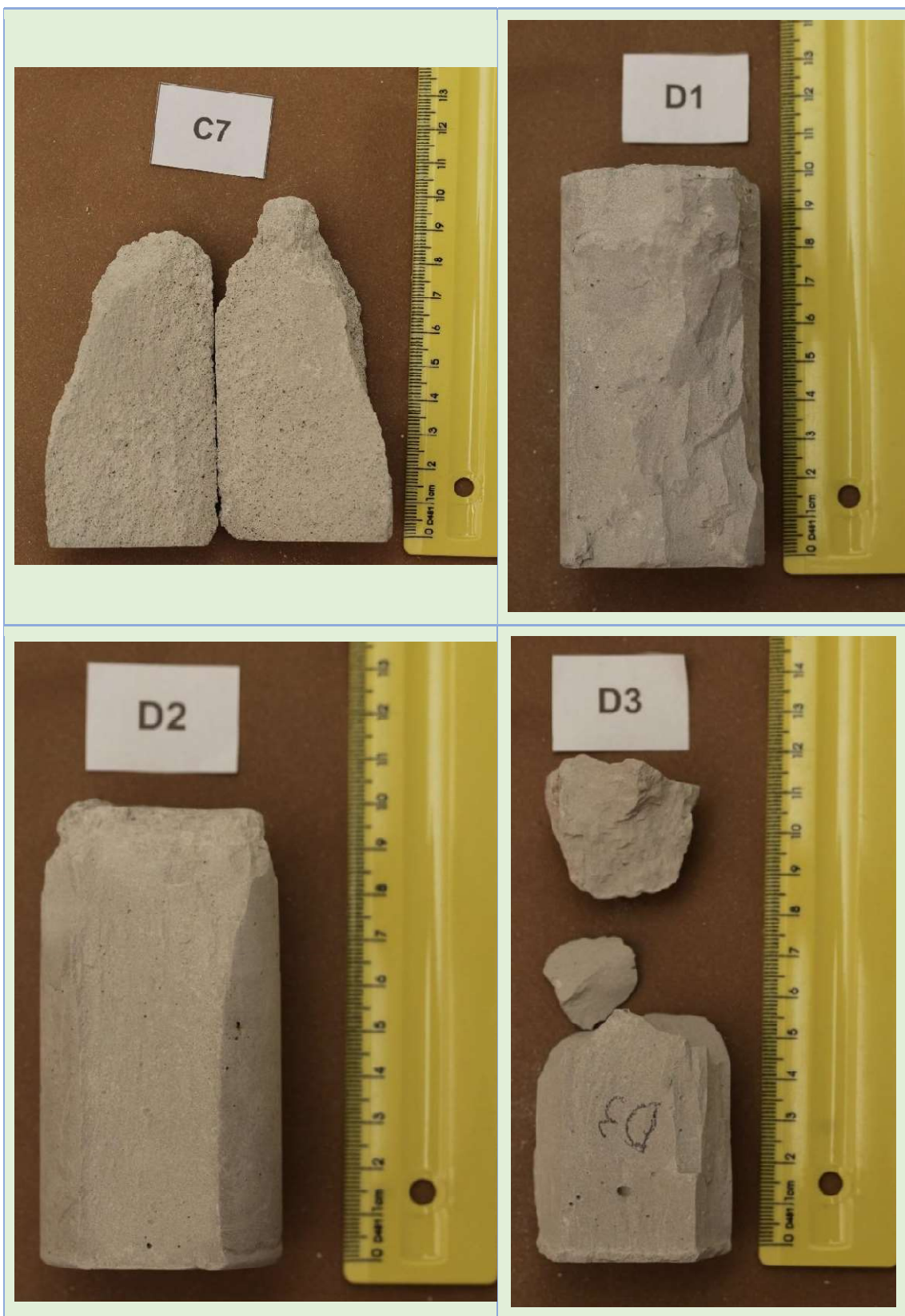


Figura 65 - Imagem dos CPS 6. Fonte: Autor



Figura 66 - Imagem dos CPS 7. Fonte: Autor



Figura 67 - Imagem dos CPS 8. Fonte: Autor

Figura 62 - Imagem dos CPs 8. Fonte: Autor



Figura 68 - Imagem dos CPS 9. Fonte: Autor

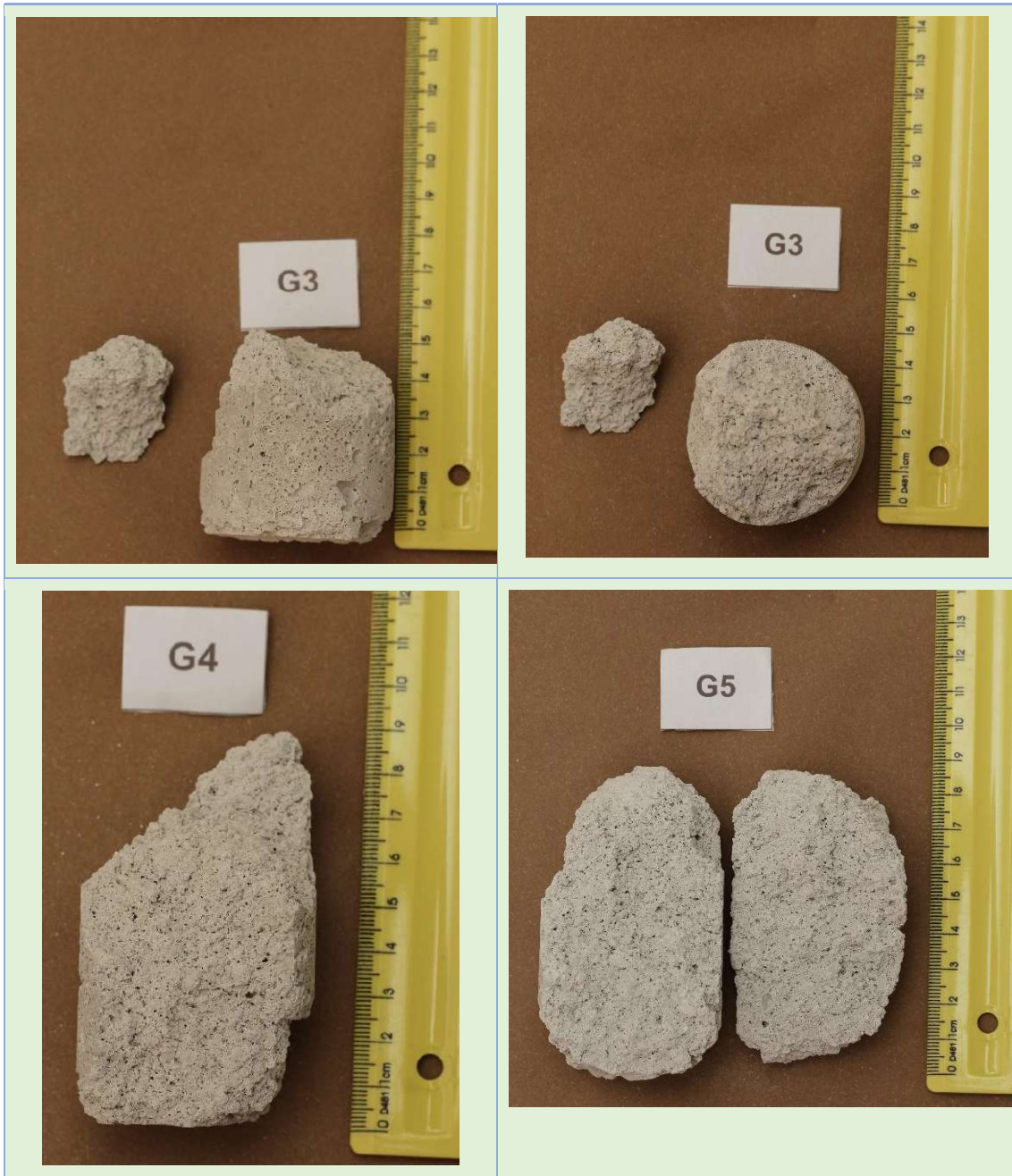


Figura 64 - Imagem dos CPs 10. Fonte: Autor

1.1. APÊNDICE E (IMAGENS DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO)

Célula A





Figura 69 - Imagem do Ensaio de Penetração, Célula A. Fonte: Autor

Célula B



Figura 70 - Imagem do Ensaio de Penetração, Célula B. Fonte: Autor

Célula C



Figura 71 - Imagem do Ensaio de Penetração, Célula C. Fonte: Autor

2. ANEXOS

2.1. ANEXO A

AIRFIELD PERFORMANCE

TAKE-OFF DISTANCE:

Basic (MTOW - ISA - SL)	1,333 m - 4,373 ft
Option (MTOW - ISA - SL)	1,367 m - 4,485 ft
At TOW for 300 Nm (Max pax - ISA - SL)	1,175 m - 3,855 ft
At TOW for 300 Nm (Max pax - ISA+10 - 3,000ft)	1,410 m - 4,626 ft
TAKE-OFF SPEED (V2 min @ MTOW)	115 KIAS

LANDING DISTANCE (JAR25):

Basic (MLW - SL)	915 m - 3,002 ft
At LW (Max pax + reserves - SL)	862 m - 2,828 ft
REFERENCE SPEED AT LANDING	113 KIAS

DESIGN WEIGHT LIMITATIONS

MAXIMUM WEIGHT	KG	LB
TAXI	22 970	50 640
TAKE OFF	22 800	50 265
LANDING	22 350	49 273
ZERO FUEL	20 800	45 856

1.1. ANEXO B

MODEL	UNITS	MAXIMUM DESIGN TAXI WEIGHT	V _{NG}		V _{MG} PER STRUT AT MAX LOAD AT STATIC AFT C.G.	H PER STRUT	
			STATIC AT MOST FWD C.G.	STATIC + BRAKING 10 FT/SEC ² DECEL		STEADY BRAKING 10 FT/SEC ² DECEL	AT INSTANTANEOUS BRAKING (μ= 0.8)
737 BBJ	LB	171,500	17,400	29,400	78,700	26,600	62,900
	KG	77,800	7,900	13,340	35,700	12,100	28,550
737 BBJ2	LB	174,700	15,100	24,900	81,700	27,100	65,400
	KG	79,250	6,850	11,300	37,050	12,300	29,650

2. REFERÊNCIAS

- [1] IAC-FAB, “Demanda Detalhada dos Aeroportos Brasileiros”, 2005.
- [2] A. Senado, “Especialistas indicam adoção de nova tecnologia para evitar acidentes em aeroportos de pista curta”, 26/09/2007, 2007. <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2007/09/26/especialistas-indicam-adocao-de-nova-tecnologia-para-evitar-acidentes-em-aeroportos-de-pista-curta> (acessado jan. 12, 2022).
- [3] A. A. Mashkani, “Analysing the Efficiency of EMAS at FAR Par 139 Airports in the USA”, Middle Tennessee State University, 2019.
- [4] R. van Eekeren e R. van Eekeren, “Estimated Cost-Benefit Analysis of Runway Accident Severity Reduction Based on Actual Emas Arrestments”, *Proc. Third Int. Conf. Traffic Transp. Eng.*, p. 55–61, 2016.
- [5] G. C. Costa, “Prevenção de acidentes em pistas aeroportuárias : Estudo de caso e proposta de solução através de EMAS”, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.
- [6] Ministério da Infraestrutura, “Pista do Aeroporto de Congonhas tem tecnologia Emas, para reduzir risco de acidentes, dois meses antes do prazo”, *www.ggov.com.br*. Governo Federal, Brasília, p. 1, 2022, Acessado: fev. 22, 2023. [Online]. Available at: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2022/04/pista-do-aeroporto-de-congonhas-tem-tecnologia-emas-para-reduzir-risco-de-acidentes-dois-meses-antes-do-prazo>.
- [7] N. J. LOGAN TOWNSHIP, “EMAS installation at Chicago Executive Airport Provides a Complete Runway Safety Net”, *PRLOG Press Release Distribution*, 2015. <https://www.prlog.org/12517436-emas-installation-at-chicago-executive-airport-provides-complete-runway-safety-net.html> (acessado fev. 22, 2023).
- [8] Skybrary, “Engineered Materials Arresting System (EMAS)”, *Skybrary*, 2023. <https://www.skybrary.aero/articles/engineered-materials-arresting-system-emas> (acessado jun. 29, 2023).
- [9] FAA, “AC 150/5220-22B: Engineered Materials Arresting Systems (EMAS) for Aircraft Overruns”, *Aviation*, vol. 1, n° AC 25.1529-1A, p. 1–2, 2012, [Online]. Available at: http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_90-114.pdf http://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/media/150-5345-51A/150_5345_51a.doc.
- [10] FAA, “AC 150/5325-4B: Guidelines for Airport Designing Length”, *Aviation*, vol. 1, n° and 2, p. 2–4, 2005, [Online]. Available at: http://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/media/150-5345-51A/150_5345_51a.doc.

- mechanical and physical properties”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1172, nº 1, p. 012030, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1172/1/012030.
- [25] T. L. da S. e Lima, “ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO CELULAR ESTRUTURAL”, Universidade Federal de São Carlos, 2015.
 - [26] D. Aldridge, “Introduction to foamed concrete: What, why, how?”, *Proc. Int. Conf. Use Foam. Concr. Constr.*, p. 1–14, 2005.
 - [27] F. Richard D. Angley, Aston; Michael S. Ciesielski. Broomall; Christopher T. Dial, Lansdowne; Peter T. Mahal, Ardmore, all of Pa.; Robert F. Cook, Chipley, “PATENT: ARRESTING MATERIAL TEST APPARATUS AND METHODS”, 5789681, 1998.
 - [28] A. M. S. Richard D. Angley e F. Ciesielski, Broomall; Christopher T. Dial, Lansdowne; Peter T. Mahal, Ardmore, all of Pa.; Robert F. Cook, Chipley, “PATENT: VEHICLE ARRESTING BED SYSTEMS”, 5885025, 1999.
 - [29] all of P. Richard D. Angley, Aston; Michael S. Ciesielski, Broomall; Christopher T. Dial, Lansdowne; Peter T. Mahal, Ardmore, “United States Patent Date of Patent”, 5902068, 1999.
 - [30] E. Heymsfield e T. L. Halsey, “Sensitivity analysis of engineered material arrestor systems to aircraft and arrestor material characteristics”, *Transp. Res. Rec.*, nº 2052, p. 110–117, 2008, doi: 10.3141/2052-13.
 - [31] E. P. Heymsfield, “Performance Prediction of the Strong Company’s Soft Ground Arrestor System using a Numerical Analysis”, *Perform. Predict. Strong Company’s Soft Gr. Arrestor Syst. using a Numer. Anal.*, nº October, 2009.
 - [32] C. H. Ho e P. Romero, “Investigation of existing engineered material arresting system at three U.S. Airports”, *50th Annu. Transp. Res. Forum 2009*, vol. 1, nº 801, p. 510–524, 2009.
 - [33] F. J. Teixeira Filho, “Considerações sobre algumas Propriedades dos Concretos Celulares Espumosos”, Universidade de São Paulo, 1992.
 - [34] M. do R. de M. M. da Costa, “Metodo construtivo de alvenaria de vedacao de blocos de concreto celular autoclavado”, Universidade de São Paulo, 1996.
 - [35] R. ACRIZ MENEZES, “Avaliação de desempenho estrutural dos sistemas construtivos de solo-cimento e concreto celular aplicados em edificações de casas populares no estado do Amazonas”, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
 - [36] R. de C. S. S. Alvarenga, “Análise Teórico-Experimental de Estruturas Compostas de Pórticos de Aço Preenchidos com Alvenaria de Concreto Celular Autoclavado”, Universidade de São Ppaulo, 2002.

- [37] J. da USP, “Tecnologia adotada em Congonhas aumenta segurança em pouso de aviões grandes”, *Jornal da USP no Ar 1ª Edição*, São Paulo, p. 1, mar. 09, 2022.
- [38] A. Y. M. de A. D. G. R. F. S. de C. P. T. L. Okuma;, “Implantação de EMAS em Aeroportos Sujeitos à Excursão de Pista por meio de Análise de Risco”, FEI, São Bernardo do Campo, 2022.
- [39] J. B. P. do Nascimento, “Universidade Federal do Rio Grande do Norte”, *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, nº 2. UFRN, Natal-RN, p. 19, 2017.
- [40] W. J. Steyn, S. Lombard, e E. Horak, “Foamed Concrete-Based Material as a Soft Ground Arresting System for Runways and Airfields”, *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 30, nº 1, p. 1–7, 2016, doi: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000692.
- [41] X. Yang, Z. Zhang, Y. Xing, J. Yang, e Y. Sun, “A new theoretical model of aircraft arresting system based on polymeric foam material”, *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 66, p. 284–293, 2017, doi: 10.1016/j.ast.2017.03.019.
- [42] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Nbr 5733”, *Cim. Portl. alta Resist. inicial*, p. 5, 1991.
- [43] R. Andreatta, G. L.; Voziniak, R. Alves, M. H. ; Medeiros, A.; Medeiros, “Análise da resistência à compressão de concretos produzidos com CP II-F-40”, *An. do 59º Congr. Bras. Concreto*, vol. ISSN 2175-, nº June, p. 0–13, 2017, [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Matheus-Alves-7/publication/325527427_Analise_da_resistencia_a_compressao_de_concretos_produzidos_com_CP_II-F-40_e_CP_V-ARI/links/5b1228bfaca2723d997b49e7/Analise-da-resistencia-a-compressao-de-concretos-produzidos-com.
- [44] ABNT, “NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico”, *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 6, 1991.
- [45] C. André, D. O. Silva, P. César, C. Gomes, F. De Assis, e V. Binas, “Influência do aditivo espumígeno na dosagem e nas propriedades do concreto celular aerado Influence of the foamed additive on the dosage and properties of the aerated cellular concrete”, 2018.
- [46] E. Heymsfield, “Investigating the potential of using glass foam for an EMAS material to mitigate aircraft overrun accidents”, *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 22, nº 7, p. 807–821, 2021, doi: 10.1080/10298436.2019.1646914.
- [47] William D. Callister; David G. Rethwisch, *Callister - 8ª Ed - Livro - Português.pdf*, 8º ed. GEN - LTC, 2012.
- [48] B. D. C. S. R. Stock, “Elements of X-Ray Diffraction”, *FEBS Lett.*, vol. 1, nº 1, p. 649, dez. 2014, [Online]. Available at: <https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1016/0014-5793%2879%2980596-7>.

- [49] W. Barbosa e K. F. Portella, “Síntese e caracterização das fases minerais C3S, C2S, C3A e C4AF para utilização em cimento tipo Portland”, *Cerâmica*, vol. 65, nº 373, p. 54–62, jan. 2019, doi: 10.1590/0366-69132019653732460.
- [50] R. Berenguer *et al.*, “Cement-based materials: Pozzolan activities of mineral additions are compromised by the presence of reactive oxides”, *J. Build. Eng.*, vol. 41, nº March, p. 102358, set. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102358.
- [51] G. Vieira, “Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX): Entenda como funciona”, 2023. [https://c2lab.com.br/espectrometria-por-fluorescencia-de-raios-x-frx-entenda-como-funciona/#:~:text=No caso do FRX%2C a,características dos elementos presentes nela. \(acessado dez. 23, 2023\).](https://c2lab.com.br/espectrometria-por-fluorescencia-de-raios-x-frx-entenda-como-funciona/#:~:text=No caso do FRX%2C a,características dos elementos presentes nela. (acessado dez. 23, 2023).)
- [52] ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR-14656- Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio”. ABNT, p. 6, 2001.
- [53] A. R. Silva, K. C. Cabral, E. N. De, e M. G. L. Pinto, “Substituição Parcial Do Cimento Portland Por Resíduo De Cerâmica Vermelha Em Argamassas: Estudo Da Atividade Pozolânica”, *22º CBECiMat - Congr. Bras. Eng. e Ciência dos Mater.*, nº 2009, p. 1144–1154, 2016, [Online]. Available at: <http://www.cbecimat.com.br/anais/PDF/104-228.pdf>.
- [54] J. Rossa e K. F. Portella, “Adição de escória de alto forno em argamassas colantes tipo AC-I”, *Cerâmica*, vol. 58, nº 348, p. 542–548, 2012, doi: 10.1590/S0366-69132012000400021.
- [55] E. C. de O. D. dos S. da S. G. A. M. Bernardin, “ANÁLISE DO ATAQUE POR SULFATOS EM ARGAMASSAS DE”, *Univ. do Extrem. Sul Catarinense*, vol. 1, nº 1, p. 1–21, 2015.
- [56] B. A. Dedavid, C. I. Gomes, e G. Machado, *MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - Aplicações e preparação de amostras - Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores*. 2007.
- [57] Y. Ye *et al.*, “Effect of nano-magnesium oxide on the expansion performance and hydration process of cement-based materials”, *Materials (Basel)*, vol. 14, nº 13, 2021, doi: 10.3390/ma14133766.
- [58] L. M. Feuchard, C. M. de A. Santana, E. F. C. Pires, F. L. B. de Abreu, E. C. Mounzer, e F. J. da Silva, “Microestrutura E Propriedades Físicas E Mecânicas De Cimento Portland Tipo Ii Álcali-Ativado / Microstructure and Physical and Mechanical Properties of Alkali-Activated Type Ii Portland Cement”, *Brazilian J. Dev.*, vol. 6, nº 11, p. 84929–84951, 2020, doi: 10.34117/bjdv6n11-055.
- [59] D. J. Morgan, *M. E. Brown. Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications.*, vol. 53, nº 373. 1989.
- [60] J. P. Gonçalves, R. D. T. Filho, e E. de M. R. Fairbairn, “Estudo da hidratação de

pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica”, *Ambient. Construído*, vol. 6, nº 4, p. 83–94, 2006, [Online]. Available at: <http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3721>.

- [61] Z. Pavlík *et al.*, “DSC and TG Analysis of a Blended Binder Based on Waste Ceramic Powder and Portland Cement”, *Int. J. Thermophys.*, vol. 37, nº 3, p. 1–14, 2016, doi: 10.1007/s10765-016-2043-3.
- [62] R. M. R. O. Menezes, L. M. Costa, L. R. C. Tavares, A. C. da S. Bezerra, e M. T. P. Aguilar, “Efeito do teor de água e tamanho de partícula na decomposição térmica de pastas de cimento moídas”, *Matéria (Rio Janeiro)*, vol. 25, nº 1, 2020, doi: 10.1590/s1517-707620200001.0888.
- [63] ABNT, “NBR 12655 - Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento”, 2015.
- [64] ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 5739. Concrete - Compression test of cylindrical specimens”, *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 14, 2018.
- [65] ABNT, “NBR-9778-2009”. ABNT, p. 4, 2009.
- [66] Y. Meng, W. Zhang, e L. Gao, “Arresting behavior of foamed concrete used in EMAS subjected to wind erosion and wet-dry cycles”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 331, nº 0850–0618, p. 127299, maio 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127299.
- [67] Z. Q. Zhang, J. L. Yang, e Q. M. Li, “An analytical model of foamed concrete aircraft arresting system”, *Int. J. Impact Eng.*, vol. 61, p. 1–12, nov. 2013, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2013.05.006.
- [68] M. Ketabdari, E. Toraldo, M. Crispino, e V. Lunkar, “Evaluating the interaction between engineered materials and aircraft tyres as arresting systems in landing overrun events”, *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, p. e00446, 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00446.
- [69] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 11578 - Cimento Portland composto”, *Assoc. Bras. Normas Técnicas*, p. 5, 1991.
- [70] ABNT, “NBR 7215 Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão”, p. 1–8, 1996.
- [71] L. S. M. V. F. D. Hotza, “HIDRATAÇÃO DO CIMENTO CP V ARI - RS: INFLUÊNCIA DA ÁGUA NAS REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO”, in *49º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 2005, vol. 1, nº 1, p. 1–12.
- [72] J. B. P. Peixoto, C. A. Lopes, F. A. da S. Fernandes, e L. B. de Moraes, “CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO CELULAR PRODUZIDO EM PALMAS-TO”, *73º Congr. Anu. da ABM*, p. 16,

2018, [Online]. Available at: https://www.toxement.com.co/media/4911/periodico_eucoconcreto_marzo.pdf.

- [73] C. Editorial, *ABNT/CEE 185 (Projeto Norma)*, Atena Edit. Ponta Grossa – Paraná – Brasil: Atena Editora, 2021.