



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

ISABELLE RODRIGUES BRITO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE GRANITO E
MÁRMORE NO DESEMPENHO DE DESTILADORES SOLARES DO TIPO
SIMÉTRICO DE DUPLA INCLINAÇÃO**

CRATEÚS

2023

ISABELLE RODRIGUES BRITO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE GRANITO E
MÁRMORE NO DESEMPENHO DE DESTILADORES SOLARES DO TIPO SIMÉTRICO
DE DUPLA INCLINAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
do Campus Crateús da Universidade Federal do
Ceará, como requisito à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima.
Coorientadora: Profa. Me. Tiany Guedes Cota.

CRATEÚS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B875a Brito, Isabelle Rodrigues.

Análise da influência da introdução de resíduos de granito e mármore no desempenho de destiladores solares do tipo simétrico de dupla inclinação / Isabelle Rodrigues Brito. – 2023.
92 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima.

Coorientação: Profa. Ma. Tiany Guedes Cota.

1. Destilação solar. 2. Resíduos de rochas ornamentais. 3. Água potável. I. Título.

CDD 622

ISABELLE RODRIGUES BRITO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE GRANITO E
MÁRMORE NO DESEMPENHO DE DESTILADORES SOLARES DO TIPO SIMÉTRICO
DE DUPLA INCLINAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Minas
do Campus Crateús da Universidade Federal do
Ceará, como requisito à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Me. Tiany Guedes Cota (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Thayres de Sousa Andrade
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Kennedy da Silva Ramos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Aos meus pais, Maria da Conceição e José Brito,
pelo amor, carinho, dedicação, incentivo e
respeito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por guiar minha vida, me concedendo saúde e força para lutar pelos meus sonhos. Senhor, graças e louvores sejam dados a todo momento.

Agradeço à minha mãe, Maria da Conceição, por me incentivar em todos os momentos da minha vida e por abraçar cada um dos meus sonhos. Mãe, seu amor é a minha maior força.

Agradeço ao meu pai, José Brito, minha maior referência profissional, que sempre se esforçou para me oferecer todas as oportunidades possíveis, com muito amor, garra e perseverança.

Agradeço ao meu irmão, Ricardo Ítalo, que me ensina todos os dias a enxergar o mundo sob outras perspectivas, me conduzindo a ser uma pessoa melhor e mais forte frente às dificuldades.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Sandro Vagner de Lima, com quem eu tive a honra de trabalhar em boa parte da minha graduação. Obrigado pelo apoio, dedicação e respeito empregado em cada um dos trabalhos desenvolvidos neste período. Sem dúvidas é uma grande inspiração para mim.

Agradeço à minha coorientadora, Profa. Me. Tiany Guedes Cota, cujos conhecimentos compartilhados e desafios propostos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios de Geologia, Física, Química, Microscopia Eletrônica, Análises Térmicas, Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará (UFC), pela disposição e conhecimentos compartilhados.

Agradeço aos professores participantes da banca examinadora, Profa. Dra. Thayres de Sousa Andrade e Prof. Me. Kennedy da Silva Ramos, pelo tempo dedicado e pelas valiosas sugestões.

Agradeço aos meus amigos e companheiros de curso, Ana Glória Barbosa, Luana Carvalho, Wylhan Pereira e Danilo José, pelas longas horas de estudo compartilhadas e pela parceria durante todos esses anos.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

Diante da problemática causada pela escassez de água potável no planeta, a destilação solar apresenta-se como uma alternativa simples e não poluente para a produção de água limpa a partir de fontes contaminadas por sais, esgotos e microrganismos patogênicos. Contudo, os dispositivos de destilação solar se caracterizam por um baixo rendimento na produção de água potável. Na tentativa de encontrar alternativas para o desenvolvimento de destiladores solares mais eficientes, o presente trabalho teve como objetivo analisar a influência da concentração de resíduos finos de granito e mármore no desempenho de destiladores solares simétricos de dupla inclinação. Inicialmente, as principais propriedades das rochas utilizadas foram identificadas a partir da análise de seus resíduos finos e aparas por meio de ensaios de Picnometria, Método da Estufa, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), Termogravimetria, combinação Sedimentação/Peneiramento, descrição petrográfica macroscópica do granito e exposição do mármore ao ácido clorídrico. Para a avaliação do efeito dos resíduos na destilação solar foram realizados testes no intervalo de oito horas (8:00 às 16:00) utilizando três destiladores contendo 300 mL de água e concentrações de resíduos nos valores de 2, 4, 8, 12, 24 mg/mL, no qual no primeiro destilador foi adicionado granito, no segundo mármore e no terceiro destilador nenhum resíduo, funcionando como um sistema controle. Nos experimentos, a água a ser destilada foi coletada de um poço artesiano localizado no Campus da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Crateús. A avaliação da potabilidade da água produzida foi realizada mediante testes laboratoriais de pH, condutividade elétrica e cor. De acordo com os ensaios de caracterização, o resíduo de granito usado nos experimentos de destilação trata-se de um monzogranito com densidade de $2,52 \text{ g/cm}^3$, já o resíduo de mármore possui caráter dolomítico e densidade de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Nos dois resíduos, as partículas possuem formato irregular, não ocorreu variação de massa significativa na faixa de temperatura de 23 a 498°C , a umidade foi menor que 1% e a granulometria na fração silte (0,002 – 0,006 mm) se apresentou com maior percentual. Quanto à destilação, para todas as concentrações analisadas, os destiladores que operaram na presença dos resíduos rochosos foram mais eficientes do que o sistema controle, sendo o destilador que recebeu o resíduo de granito o mais eficiente dos três sistemas. Além disso, os resultados revelaram que a concentração com 8 mg/mL de resíduos traduziu o máximo de desempenho de destilação, representando 56,04% para o granito e 52,73% para o mármore, o que significou um aumento de 26,20% e 22,89%, respectivamente, quando comparados com ao sistema controle. Os resultados das análises físico-químicas da água produzida pelos destiladores apresentaram

padrões dentro dos limites indicados pelas normas de segurança sanitária vigentes. Nesta perspectiva, evidenciou-se que o uso de resíduos de granito e mármore se apresenta como uma alternativa para a melhoria dos destiladores quanto à produção de água potável, o que torna a destilação solar uma possível solução para a destinação adequada de materiais provenientes da atividade de mineração.

Palavras-chave: destilação solar; resíduos de rochas ornamentais; água potável.

ABSTRACT

Due to the problematic caused by the scarcity of drinking water on the planet, solar distillation has been presented as a simple and non-polluting alternative for the production of potable water from sources contaminated by salts, sewage and pathogenic microorganisms. However, solar stills devices are characterized by a low efficiency performance in the production of potable water. Searching for alternatives in the development of more efficient solar stills, the present work aimed to analyze the influence of the concentration of mining waste from granite and marble on the performance of symmetric double slope solar distillers. Initially, the main properties of the rocks of the granite and marble were identified from the analysis of their mining waste/chips by means of Pycnometry, humidity measurement, Scanning Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), Thermogravimetry, Sedimentation/Sieving test, macroscopic petrographic description of the granite, and of the marble response to hydrochloric acid attack. For the evaluation of the effect of the mining waste on solar distillation, tests were performed in an eight-hour interval (8:00 am to 4:00 pm) using three distillers containing 300 mL of aqueous solution containing mineral rejects in the concentrations of 2, 4, 8, 12, 24 mg/mL, in which granite waste was added in the first distiller, marble in the second, and no residue in the third distiller, functioning as a control system. In the experiments, the water to be distilled was collected from an artesian well located on the campus of the Universidade Federal do Ceará (UFC) in Crateús. The evaluation of the potability of the distilled water was performed through laboratory tests of pH, electrical conductivity and color. According to the characterization tests, the granite waste used in the distillation experiments is a monzogranite with a density of 2.52 g/cm³, while the marble residue has a dolomitic character and density of 2.65 g/cm³. In both wastes, the particles are irregularly shaped, there was no significant mass variation in the temperature range of 23 to 498°C, the humidity was less than 1% and granulometry in the silt fraction (0.002 - 0.006 mm) presented with highest percentage. As for distillation, for all concentrations analyzed, the distillers that operated in the presence of the mining wastes were more efficient than the control system, with the distiller containing the granite waste being the most efficient of the three systems. Furthermore, the results revealed that the concentration with 8 mg/mL of mineral residues was the one that led to the maximum distillation performance, corresponding to 56.04% for granite and 52.73% for marble, which meant an increase of 26.20% and 22.89%, respectively, when compared to the control system. The results of the physical-chemical analysis of the water produced by the distillers presented values within the limits indicated by current health safety

standards. In this perspective, it is evident that the use of granite and marble residues can be an alternative for the improvement of the solar stills in terms of the production of potable water, which makes solar distillation a possible solution for the adequate destination of wastes from the mining activity.

Keywords: solar distillation; ornamental rock waste; potable water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro eletromagnético da radiação solar que atinge o topo da atmosfera e a superfície do planeta Terra.....	21
Figura 2 - Mapa do total anual de irradiação solar direta normal no território brasileiro	22
Figura 3 - Instrumento histórico de destilação solar.....	23
Figura 4 - Projetos comuns de destiladores solares.....	24
Figura 5 - Princípio de funcionamento de um destilador solar convencional	25
Figura 6 - Produção acumulada e eficiência diária para a operação com diferentes concentrações de grãos de apatita	28
Figura 7 – Volume destilado em função da hora do dia para a produção de destiladores solares com e sem seixos	29
Figura 8 - Lavra a céu aberto em um maciço de rocha, pelo método de painéis verticais em bancadas altas	31
Figura 9 - Processos realizados no beneficiamento primário e secundário.....	32
Figura 10 – Processo realizado para a caracterização dos resíduos finos	37
Figura 11 - Homogeneização e Quarteamento da amostra de granito.....	38
Figura 12 - Homogeneização e Quarteamento da amostra de mármore.....	39
Figura 13 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de bancada, modelo HITACHI TM 3000 com periférico acoplado do tipo EDS SWIFT ED 3000	39
Figura 14 - Suporte de amostras da câmara de vácuo do equipamento, com detalhe para o resíduo de granito em (a) e o de mármore em (b)	40
Figura 15 - Equipamento de análise térmica NETZSCH STA 449 F3 Júpiter; (a) Vista frontal e (b) Detalhe para o suporte das amostras localizado na base do aparelho.....	40
Figura 16 - Ilustração do processo realizado para a determinação da massa específica das amostras usando o picnômetro	42
Figura 17 – Mistura das amostras com o defloculante hexametáfosfato de sódio	43
Figura 18 - Agitação mecânica do resíduo de granito (a) e de mármore (b) com o auxílio do copo dispersor.....	44
Figura 19 - Instrumentos utilizados na etapa de análise granulométrica: (a) densímetro imerso na amostra de mármore para a realização de uma leitura e em (b) o conjunto de peneiras utilizadas para a realização do peneiramento fino.....	45

Figura 20 - Vista superior e corte transversal (a : a') do modelo proposto	48
Figura 21 – Componentes do protótipo de destilador solar utilizado no trabalho.....	49
Figura 22 - Esquema de ligação dos sensores de temperatura DS18B20 ao Arduino.....	49
Figura 23 - Componentes internos (a) e externos (b) do sistema Arduino	50
Figura 24 – Bacias introduzidas nos sistemas de destilação durante a execução dos ensaios .	52
Figura 25 - Experimento montado, com detalhe para o posicionamento dos destiladores em (a) e a instrumentação dos sistemas com os sensores de temperatura em (b).....	53
Figura 26 - Análise de pH das amostras de água bruta e destilada.....	56
Figura 27 - Procedimento realizado no ensaio de condutividade elétrica	56
Figura 28 - Posicionamento da célula no interior do espectrofotômetro.....	57
Figura 29 - Micrografias da amostra de granito: (a) varredura espectral por área, (b) varredura espectral no ponto 1 (VP1) e (c) varredura espectral no ponto 2 (VP2)	59
Figura 30 –Micrografias da amostra de mármore: (a) varredura espectral por área, (b) varredura espectral no ponto 3 (VP3) e (c) varredura espectral no ponto 4 (VP4)	60
Figura 31 - Variação de massa dos resíduos em função da temperatura	62
Figura 32 - Curva granulométrica da amostra de granito	64
Figura 33 - Curva granulométrica da amostra de mármore	65
Figura 34 - Amostra utilizada na análise macroscópica da rocha.....	66
Figura 35 – Classificação da rocha granítica segundo o diagrama QAP.....	67
Figura 36 – Ataque químico com ácido clorídrico na amostra de mármore	68
Figura 37 - Curvas de eficiência para a análise do efeito da concentração das partículas nos sistemas.....	72
Figura 38 - Produção horária e perfil de temperatura nos ensaios: 2 em (a), 6 em (b), 9 em (c), 12 em (d) e 14 em (e).....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Recipientes, técnicas de preservação e armazenamento para ensaios físico-químicos inorgânicos de água	55
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perfil da produção brasileira por tipo de rocha em 2020.....	33
Tabela 2 - Composição química da amostra de granito detectada na varredura espectral por área e nas análises pontuais VP1 e VP2 via EDS.....	59
Tabela 3 - Composição química da amostra de mármore detectada na varredura espectral por área e nas análises pontuais VP3 e VP4 via EDS.....	61
Tabela 4 - Teor de umidade dos resíduos de granito e mármore	62
Tabela 5 - Massas específicas dos resíduos de granito e mármore obtidas pelo método do picnômetro	63
Tabela 6 - Nomenclatura com base no diâmetro das partículas	63
Tabela 7 - Dados do ensaio de granulometria da amostra de granito	64
Tabela 8 – Dados do ensaio de granulometria da amostra de mármore	65
Tabela 9 - Tamanho dos grãos da amostra dispersos na matriz	67
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de calibração dos protótipos	69
Tabela 11 - Produção de água destilada para cada ensaio realizado.....	70
Tabela 12 - Eficiência total dos sistemas de destilação para cada ensaio realizado	71
Tabela 13 - Parâmetros físico-químicos da água produzida pelos destiladores e da água bruta	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CIN	Centro Internacional de Negócios do Ceará
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
FIEC	Federação das Indústrias do Estado do Ceará
GM	Gabinete do Ministro
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LME	Laboratório de Microscopia Eletrônica
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MHE	Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert
MS	Ministério da Saúde
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NC	Número de cor
ONU	Organização das Nações Unidas
SAC	Spectral Absorption Coefficient
TGA	Análise Termogravimétrica
UFC	Universidade Federal do Ceará
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância
VMP	Valor Máximo Permitido

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da assadeira
Abs	Absorbância
D	Massa específica
D1	Destilador que operou com resíduo de granito na bandeja
D2	Destilador que operou com resíduo de mármore na bandeja
D3	Destilador que operou sem resíduos na bandeja
h	Teor de umidade
h _{lv}	Calor latente da água
I	Irradiação média
l	Espessura
M1	Massa do solo úmido mais a massa do recipiente
M2	Massa do solo seco mais a massa do recipiente
M3	Massa do recipiente
m _t	Taxa de destilação
P1	Peso do picnômetro vazio e seco
P2	Peso do picnômetro mais amostra
P3	Peso do picnômetro mais amostra e água
P4	Peso do picnômetro mais água
T _b	Temperatura do fluido de trabalho na bacia
T _c	Temperatura da cobertura dos destiladores
VP	Varredura espectral pontual
η	Eficiência térmica total

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	18
<i>1.1.1 Objetivo geral</i>	18
<i>1.1.2 Objetivos específicos</i>	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Escassez de água potável	19
2.2 Radiação Solar	20
2.3 Destilação Solar	23
2.4 Destiladores solares convencionais	24
<i>2.4.1 Desempenho térmico e técnicas para a melhoria da eficiência dos destiladores solares convencionais</i>	26
<i>2.4.2 Exemplos de aplicações de materiais rochosos em destiladores</i>	28
2.5 Rochas Ornamentais	30
<i>2.5.1 Cenário das Rochas Ornamentais no Ceará</i>	33
<i>2.5.2 Produção de resíduos de rochas ornamentais nas diversas atividades associadas à mineração</i>	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 Caracterização dos resíduos utilizados	36
<i>3.1.1 Homogeneização e Quarteamento</i>	37
<i>3.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)</i>	39
<i>3.1.3 Análise Termogravimétrica</i>	40
<i>3.1.4 Teor de umidade pelo Método da Estufa</i>	41
<i>3.1.5 Massa específica por Picnometria à água</i>	41
<i>3.1.6 Análise granulométrica</i>	43
<i>3.1.7 Análise macroscópica da amostra de granito</i>	45
<i>3.1.8 Ataque químico com ácido clorídrico na amostra de mármore</i>	46
3.2 Ensaios de destilação solar	46
<i>3.2.1 Desenvolvimento da construção dos protótipos</i>	47
<i>3.2.1.1 Instrumentação dos protótipos com sensores de temperatura</i>	49
<i>3.2.2 Avaliação dos sistemas de destilação solar na presença dos resíduos utilizados</i>	51
<i>3.2.2.1 Determinação da eficiência térmica dos sistemas de destilação solar</i>	54
3.3 Análise da qualidade da água produzida	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1 Caracterização dos resíduos utilizados	58
<i>4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva</i>	

<i>(EDS)</i>	58
<i>4.1.2 Análise Termogravimétrica</i>	61
<i>4.1.3 Teor de umidade pelo Método da Estufa</i>	62
<i>4.1.4 Massa específica por Picnometria à água</i>	63
<i>4.1.5 Análise granulométrica</i>	63
<i>4.1.6 Análise macroscópica da amostra de granito</i>	66
<i>4.1.7 Ataque químico com ácido clorídrico na amostra de mármore</i>	67
4.2. Ensaios de destilação solar	68
<i>4.2.1 Calibração dos protótipos</i>	68
<i>4.2.2 Avaliação dos sistemas de destilação na presença dos resíduos utilizados</i>	69
<i>4.2.2.1 Produção de água destilada acumulada</i>	69
<i>4.2.2.2 Eficiência térmica total</i>	71
<i>4.2.2.3 Concentração ótima de resíduos nos sistemas</i>	72
<i>4.2.2.4 Diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a cobertura dos sistemas propostos</i>	73
4.3 Análise da qualidade da água produzida	76
5 CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água em quantidade e qualidade é considerado um direito humano básico pela Organização das Nações Unidas (ONU), previsto na resolução nº64/292, aprovada por sua Assembleia Geral em 28 de julho de 2010, que tem como título “O direito humano à água e ao saneamento” (ONU, 2010). No entanto, o uso inconsciente da água durante décadas, aliado à ocorrência de eventos climáticos extremos, potencializaram a sua escassez em algumas regiões do planeta nos últimos anos, fazendo com que muitos indivíduos não disponham sequer do mínimo de água recomendado pelas autoridades de saúde para consumo diário (UNICEF, 2021). Diante desse cenário, a ONU resolveu abordar sobre a escassez de água potável em seu Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, publicado em 2016. O documento apresenta estimativas preocupantes para a saúde de milhões de pessoas e para o desenvolvimento industrial, caso nenhuma providência seja tomada até 2050 (ONU, 2016).

Nessa perspectiva, além da conscientização da população quanto à gestão dos recursos hídricos, existe uma grande necessidade de se produzir água limpa a partir de águas que inicialmente não atendem às especificações exigidas para consumo, tais como águas salgadas, salobras e poluídas. Dentre algumas técnicas disponíveis para a produção de água potável, a destilação solar se destaca por ser uma das mais baratas e promissoras, pois utiliza a radiação solar como fonte de energia, possui fácil operação e necessita de pouca manutenção (JORGE, 2011). Além disso, a tecnologia também se destaca pela qualidade da água produzida, dado que elimina eficientemente os sais, metais pesados e microrganismos patogênicos que possam estar presentes na substância (MOTA e ANDRADE, 1986).

Contudo, devido à baixa eficiência na produção da água pelos destiladores solares convencionais e a dependência direta dos parâmetros climáticos, o processo de destilação solar ainda é restrito a pequenas demandas, sendo a sua utilização recomendada apenas para locais áridos e remotos que disponham de altos níveis de insolação. Por outro lado, mesmo em regiões onde as condições meteorológicas são favoráveis, a produção de água potável nos destiladores é pequena, com uma média de 4 litros por metro quadrado produzidos por dia (MALUF, 2005).

Pelo exposto, fica evidenciado que a destilação solar possui um grande potencial para minimizar, mesmo que parcialmente, não somente os efeitos da escassez de água potável, mas também problemas energéticos e ambientais enfrentados atualmente, já que a energia utilizada é limpa, gratuita e silenciosa. Todavia, é necessário que os seus gargalos sejam

eliminados do processo para que a técnica consiga responder a níveis satisfatórios de produção de água (HOLANDA, 2019).

Como os parâmetros climáticos não podem ser controlados, o desempenho dos destiladores solares só pode ser melhorado através da modificação de seus fatores operacionais e de projeto (BOUÇANOVA, 2021). Uma forma de proporcionar esse aumento na eficiência dos sistemas é fornecendo um acréscimo de calor ao fluido de trabalho a partir da introdução de resíduos rochosos, pois a adição de rochas na superfície da bandeja tende a aumentar a temperatura da água e, conseqüentemente, a taxa de evaporação do sistema (DIAS, 2012).

Além disso, a introdução de fragmentos de rocha na bandeja de destiladores solares pode oferecer uma solução integrada para os problemas relacionados ao seu desempenho, bem como para os problemas ambientais causados pela produção de resíduos sólidos na atividade de mineração. Portanto, em meio a crescente abordagem sobre desenvolvimento sustentável, essa técnica apresenta-se como uma alternativa promissora, especialmente para locais como o Ceará, que apresenta altos níveis de insolação, dada a sua posição geográfica e por ser um dos maiores produtores brasileiros de rochas ornamentais e, como consequência, causar a geração de uma grande quantidade de resíduos sólidos.

Nesta direção, o presente trabalho de conclusão de curso buscou responder a seguinte questão de pesquisa:

- Será que os resíduos de granito e mármore são capazes de melhorar a eficiência de destiladores solares convencionais e produzir água potável?

O trabalho, a partir desse ponto, está dividido em cinco seções principais, sendo elas: **1.1, os objetivos**, dividido entre geral e específicos; **2.0, a fundamentação teórica**, que possui todos os conceitos que fundamentam o presente trabalho; **3.0, os materiais e métodos**, que descreve os protocolos e ensaios usados com a finalidade de atingir todos os objetivos; **4.0, os resultados e discussões**, expondo uma análise dos principais efeitos observados com a introdução dos resíduos de granito e mármore nos destiladores solares; **5.0, a conclusão**, que responde o problema de pesquisa com base nos resultados dos ensaios realizados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência da concentração de resíduos de granito e mármore no desempenho de destiladores solares do tipo simétrico de dupla inclinação quanto à produção de água potável nos Sertões de Crateús.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar o volume de água produzido por meio de experimentos realizados em três destiladores, o primeiro contendo resíduos de granito, o segundo de mármore e o terceiro apenas água;
- Comparar o volume de água produzido no destilador convencional (na ausência de granito e mármore) com relação aos sistemas propostos neste trabalho;
- Analisar como a concentração dos resíduos de granito e mármore afeta a eficiência térmica de destilação dos sistemas propostos;
- Avaliar a qualidade da água produzida nos sistemas propostos via análise físico-química.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Escassez de água potável

Essencial para a manutenção da vida no planeta, a água é um dos recursos naturais mais abundantes da Terra, cobrindo cerca de três quartos de sua superfície. Desse total, 97% correspondem à água salgada existente nos oceanos, enquanto que os outros 3% restantes representam à água doce presente em geleiras, aquíferos profundos, rios e lagos (KALOGIROU, 2013).

Apesar da grande quantidade disponível na natureza, somente uma pequena parcela de água é realmente aproveitada pelo ser humano, mais especificamente a água doce encontrada na superfície, ou seja, em rios, lagos, reservatórios e aquíferos pouco profundos. Lima (2001) explica que isso ocorre devido a acessibilidade, sendo que somente cerca de 0,27% da água doce do planeta está armazenada nesses locais. Braga *et al.* (2005) destaca que desse todo ainda é preciso subtrair a fração que está localizada em regiões de difícil acesso e aquela que apresenta taxas de poluição.

Portanto, além de ser um recurso que possui limitações quantitativas, a água com condições próprias para o consumo não é geograficamente distribuída de forma homogênea. Em seus estudos, Heller (2016) destaca que a distribuição dos recursos hídricos no planeta apresenta variação no espaço, uma vez que existem zonas extremamente abundantes de água e outras extremamente escassas.

Além dos problemas relacionados à quantidade de água disponível para consumo, também existem aqueles associados à qualidade da água. A poluição dos corpos d'água pela ação antrópica impede o seu aproveitamento para o abastecimento de cidades, agravando assim a escassez desse recurso (BRAGA *et al.*, 2005).

Nessa perspectiva, nos últimos anos têm crescido o debate sobre a escassez de água potável, pois algumas regiões do globo já enfrentam consequências devido esse problema. A Organização das Nações Unidas (ONU) estima que 2,3 bilhões de pessoas vivem em países que sofrem com escassez de água, das quais 733 milhões residem em países com altos níveis de falta desse recurso (ONU, 2021).

No Brasil a escassez de água potável também se faz presente, mesmo possuindo uma das maiores reservas de água doce do mundo. O contexto geográfico, altitude, extensão territorial, relevo e a dinâmica das massas de ar são alguns dos aspectos que fazem com que o Brasil apresente uma vasta diversificação climática e, conseqüentemente, grande variação

pluviométrica (REBOUÇAS, 2003).

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em seu relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil em 2017, aborda que a variabilidade na distribuição de chuvas é um processo natural, entretanto, o Brasil tem passado por eventos extremos de seu excesso ou escassez nos últimos anos. Em termos de seca e estiagens, cerca de 48 milhões de pessoas foram atingidas no país entre os anos de 2013 e 2016, sendo que desse total 83% vivem no Nordeste (ANA, 2017).

De acordo com Martins *et al.* (2013) a localização da região Nordeste condiciona parte do seu problema com a escassez hídrica, pois mais da metade de sua área territorial está inserida em uma zona com média anual de precipitação de 800 mm e com potencial de evapotranspiração superior a 2.000 mm, denominada inicialmente de Polígono das Secas. Contudo, após a Conferência Internacional das Nações Unidas para o Combate à Desertificação em Nairóbi, no Quênia, em 1977, esse território passou a ser chamado de Semiárido Brasileiro, sendo sua delimitação atualizada no decorrer dos anos (ANA, 2017).

Segundo o Ranking do Saneamento 2022 divulgado pelo Instituto Trata Brasil, em termos de qualidade da água, cerca de 35 milhões de brasileiros não têm acesso ao serviço de tratamento da substância, sendo as regiões Norte e Nordeste as que mais sofrem com o problema (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2022). Nessa perspectiva, o consumo de água diretamente dos rios ou de águas subterrâneas fora dos parâmetros estabelecidos pela Portaria GM/MS N° 888 do Ministério da Saúde, de 04 de maio 2021, é uma realidade perigosa dessa população, dado que essa prática pode ocasionar uma série de complicações para a saúde.

Diante desse panorama, algumas tecnologias para a produção de água potável vêm sendo estudadas em face da emergente necessidade de se garantir a segurança hídrica global. Osmose reversa, eletrodíálise, compressão de vapor e destilação solar são exemplos de técnicas de dessalinização de água que podem ser utilizadas para esta finalidade. Dentre estes métodos, a destilação solar é o processo mais indicado para lugares remotos, cuja água salgada é o único recurso disponível e que geralmente são desprovidos de energia elétrica. Aliado a isso, a destilação solar se destaca por apresentar a radiação solar como fonte de energia, ter baixa manutenção, operação simples e ser ambientalmente sustentável (TIWARI, SINGH e TRIPATHI, 2003).

2.2 Radiação Solar

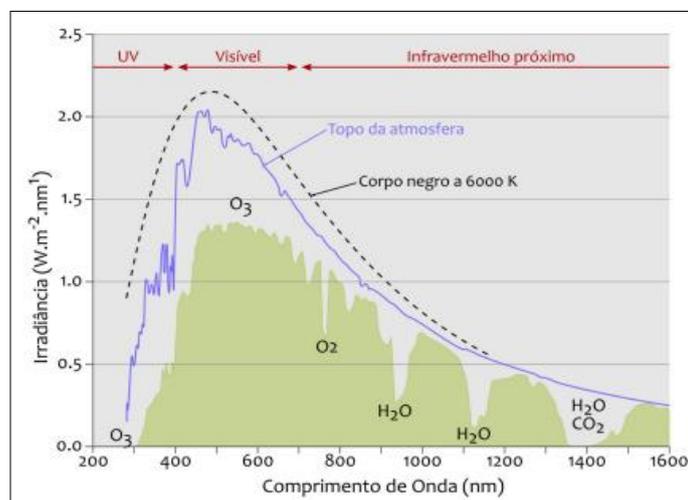
Situado no centro do sistema solar, o Sol é a estrela essencial para a vida na Terra, dado que a sua energia impulsiona inúmeros processos que ocorrem no planeta, tais como a

fotossíntese, ciclos da água, mudança de clima e as estações do ano. Hidrogênio, hélio e uma pequena fração de elementos mais pesados compõem a massa desse astro, que possui uma temperatura superficial de aproximadamente 5.500 K. Sua energia é resultado dos processos de fusão nuclear, que ocorrem em seu núcleo, onde átomos de hidrogênio são convertidos em hélio com liberação de uma grande quantidade de energia que irradia para o espaço (KALOGIROU, 2013).

Pereira *et al.* (2017) explica que a energia proveniente do Sol é transmitida para o espaço sob a forma de radiação eletromagnética (radiação solar) que abrange uma ampla faixa do espectro. Ao incidir sobre o planeta Terra, os diferentes comprimentos de onda da radiação solar interagem com os constituintes atmosféricos (gases e aerossóis), sofrendo absorção e espalhamento. Dessa forma, nem toda a energia radiante emitida pela estrela chega de fato à superfície do planeta. O autor ainda acrescenta que a variabilidade do recurso energético solar também está ligada diretamente com fatores astronômicos, tais como a distância entre o Sol e a Terra, bem como com a localização geográfica, tendo em vista que a radiação solar apresenta uma tendência de diminuir do equador para os pólos, ou seja, varia com latitude.

A Figura 1 apresenta o espectro eletromagnético da radiação solar que incide sobre o topo da atmosfera e da superfície terrestre após a sua interação com os constituintes atmosféricos (área verde do gráfico). Observa-se que a superfície do planeta não recebe alguns comprimentos de onda da radiação solar, pois ao passar pela atmosfera os mesmos são atenuados. Além disso, como apresentado na Figura 1, a radiação solar pode ser expressa como irradiância ao atingir uma superfície, tal como a da Terra, sendo definida como a potência da radiação por área da superfície incidente (PEREIRA *et al.* 2017).

Figura 1 - Espectro eletromagnético da radiação solar que atinge o topo da atmosfera e a superfície do planeta Terra



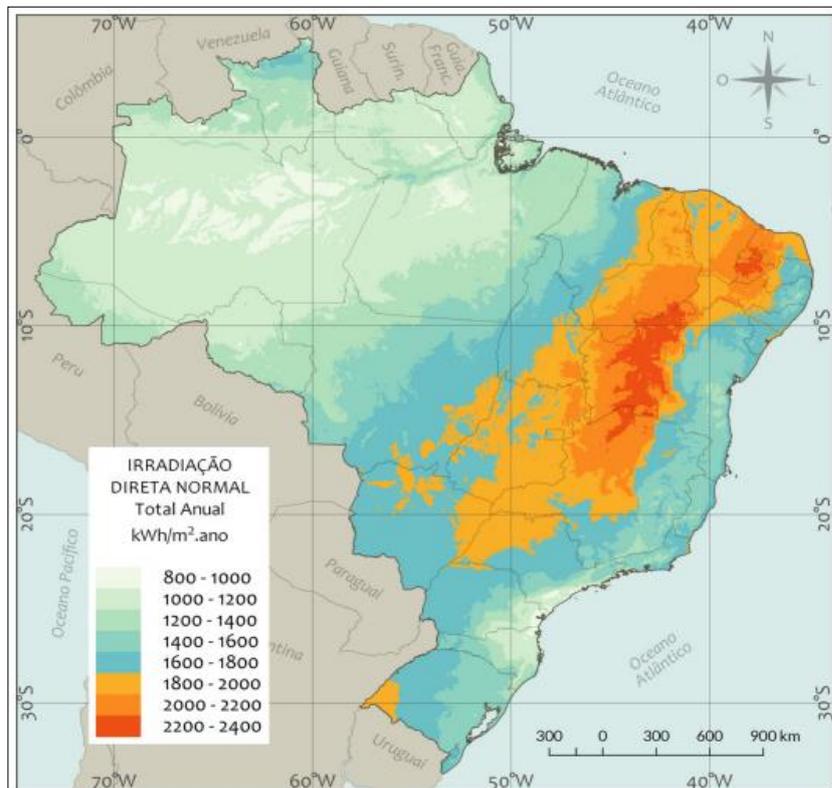
Fonte: Pereira *et al.* 2017.

De acordo com Duffie e Beckman (2013), a irradiância solar que incide sobre uma unidade de área é composta por suas componentes direta e difusa. A irradiância solar direta corresponde a parcela de radiação que não sofreu absorção ou espalhamento durante a sua passagem pela atmosfera. Enquanto que a irradiância solar difusa representa a fração da radiação que a direção foi alterada devido a dispersão na atmosfera. A soma dessas duas parcelas representa a irradiância solar global na superfície.

Em geral, para se avaliar o potencial de energia solar em uma determinada região, é necessário quantificar a radiação solar que atinge a área em um tempo definido (irradiação solar). Duffie e Beckman (2013) explicam que esse fator é encontrado através da integração da irradiância ao longo de um tempo especificado.

Das cinco regiões brasileiras, o Nordeste apresenta as maiores taxas de irradiação solar direta (Figura 2). Esse aspecto faz com que os estados nordestinos tenham um grande potencial de aproveitamento da radiação solar. Dessa forma, a utilização do seu recurso energético solar para a complementação das demais fontes de energia já consolidadas, assim como outras tecnologias, se apresenta como uma possibilidade para potencializar a matriz energética e/ou solucionar problemas recorrentes locais (PEREIRA *et al.* 2017).

Figura 2 - Mapa do total anual de irradiação solar direta normal no território brasileiro



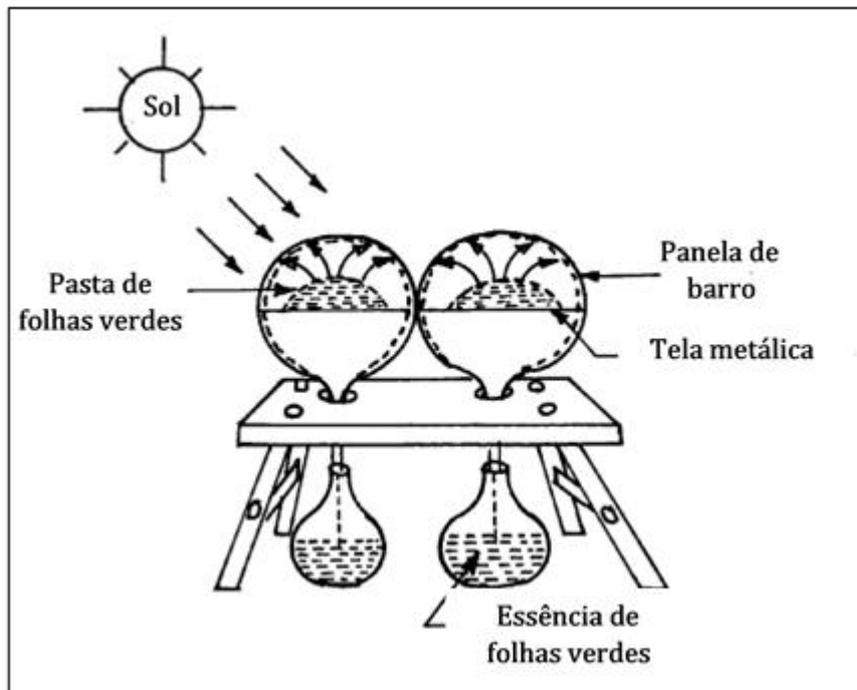
Fonte: Pereira *et al.* 2017.

2.3 Destilação Solar

A destilação solar é uma técnica de dessalinização que utiliza o princípio básico da evaporação e condensação para a produção de água potável. Nesse processo, a água, inicialmente líquida, muda para o seu estado de vapor através da absorção da radiação solar, tornando-se pura após a sua condensação. Dessa forma, esse método apresenta-se como uma alternativa promissora para suprir, mesmo que parcialmente, a demanda de água potável que vem crescendo continuamente ao longo dos anos (MARIANO, 2019).

Segundo Tiwari, Singh e Tripathi (2003), a purificação da água via destilação solar é um processo realizado desde a antiguidade. Contudo, os trabalhos realizados na área só começaram a ser documentados no século XVI, na época em que os alquimistas árabes aplicaram esta técnica para o tratamento de água. Em 1589, Della Portela expôs painéis de barro ao sol para evaporar água e recolher o condensado em recipientes alocados abaixo do suporte, obtendo-se assim um instrumento histórico de destilação (Figura 3).

Figura 3 - Instrumento histórico de destilação solar



Fonte: Adaptado de Tiwari, Singh e Tripathi, 2003.

O primeiro destilador solar moderno foi construído em 1872, para fornecer água potável aos animais que trabalhavam nas minas de sal-gema do norte do Chile. No desenvolvimento desse sistema foram utilizados uma bacia preta rasa, uma estrutura de

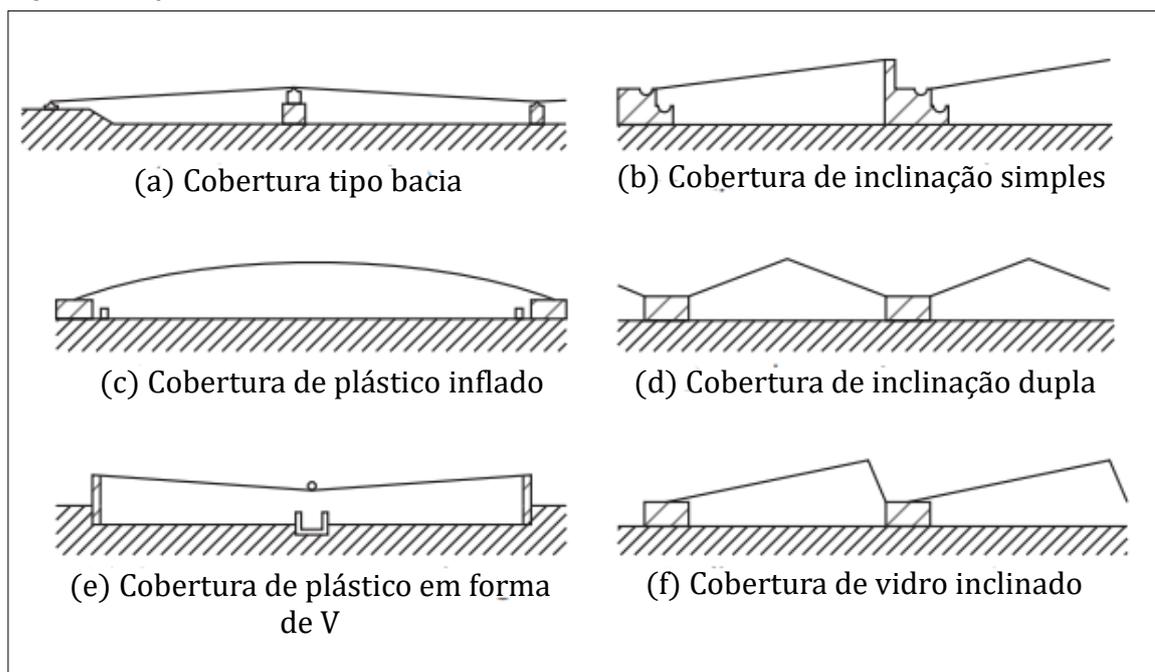
cobertura inclinada e tanques para o armazenamento de água destilada. O conceito empregado na construção desse destilador é utilizado até os dias de hoje para o desenvolvimento de novas unidades de destilação, embora existam variações de geometria, métodos construtivos e materiais de fabricação (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

2.4 Destiladores solares convencionais

Um destilador solar é um equipamento que possui uma estrutura simples, constituída pelos seguintes elementos construtivos: cobertura transparente, bacia de contenção de água, superfície de base e canaletas (JORGE, 2011).

No que tange à arquitetura dos destiladores solares, estes exibem uma série de modelos construtivos. Mariano (2019) ressalta que a maior diferença entre as configurações desses equipamentos se encontra no projeto da sua cobertura, que pode ser fabricada em vidro ou plástico, de inclinação simples ou dupla. A Figura 4 destaca as configurações mais comuns de destiladores solares, onde é possível observar em (a) a cobertura do tipo bacia, em (b) a cobertura de inclinação simples, em (c) a cobertura de plástico inflado, em (d) a cobertura de inclinação dupla, em (e) a cobertura de plástico em forma de V e em (f) a cobertura de vidro inclinado.

Figura 4 - Projetos comuns de destiladores solares

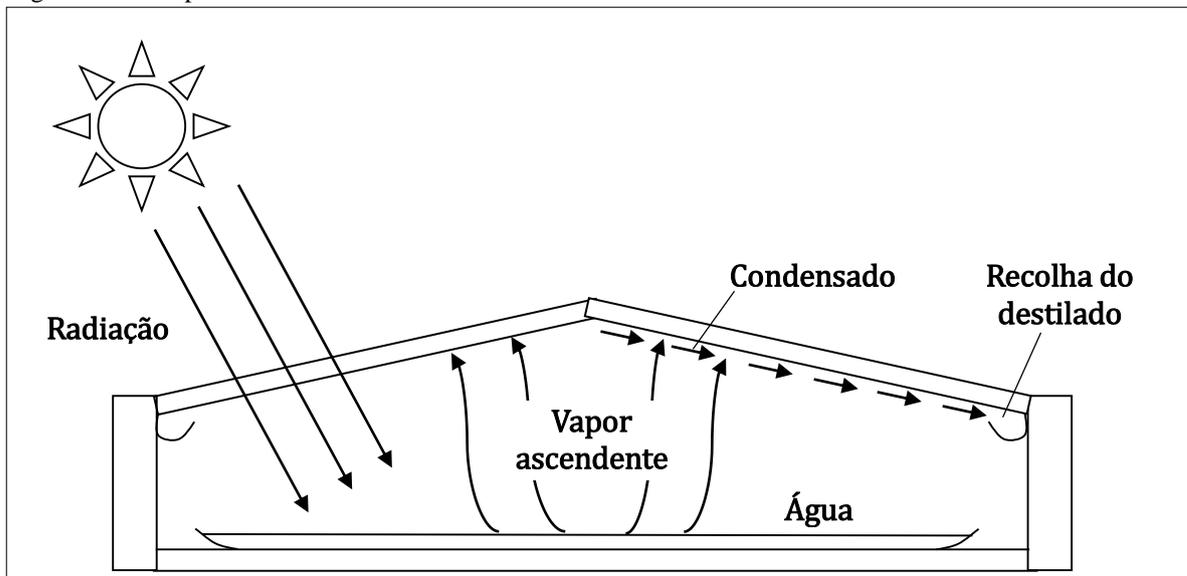


Fonte: Adaptado de Kalogirou, 2013.

Jorge (2011) explica que os destiladores podem ser classificados como passivos ou ativos, dependendo do tipo de energia aplicada ao sistema. Se apenas a energia solar for utilizada no processo, o sistema é classificado como passivo. Por outro lado, se uma parcela extra de energia for imposta a unidade de destilação para aumentar a sua taxa de evaporação, esse sistema passa a ser definido como ativo. De acordo com Kalogirou (2013), a energia adicional pode ser derivada de um painel coletor-concentrador, bem como do desperdício de energia térmica de uma planta industrial ou de uma caldeira convencional.

Na operação de um destilador solar, a radiação solar atravessa a cobertura transparente e aquece a água contida no interior da bacia. Esse processo, faz com que a água inicie o seu processo de evaporação. O vapor de água gerado, por empuxo, devido variação de densidade, alcança a cobertura do destilador que, por apresentar uma temperatura inferior à do fluido de trabalho, recebe calor do vapor, promovendo a sua condensação. Os fluxos de condensados, inicialmente por tensão superficial, molham a superfície da cobertura, e, posteriormente, deslizam por gravidade para as canaletas localizadas nas bordas inferiores da cobertura do destilador até chegar a um ponto de coleta de água destilada (DUFFIE e BECKMAN, 2013). A Figura 5 apresenta o esquema simplificado do princípio de funcionamento de um destilador solar convencional, segundo Mariano (2019).

Figura 5 - Princípio de funcionamento de um destilador solar convencional



Fonte: Adaptado de Mariano, 2019.

De acordo com Silveira (2010), o processo de evaporação da água pode acontecer a qualquer temperatura abaixo da temperatura de ebulição. Mello (2021) destaca que esse fenômeno ocorre, pois em um aglomerado de moléculas de água, a velocidade com a qual as

mesmas se movimentam pelo líquido é variável, umas mais lentas, outras mais rápidas e a maioria com velocidades intermediárias numa distribuição normal. Assim, em dada temperatura, as moléculas mais ágeis, por apresentarem uma energia cinética maior que a média, podem ser capazes de desprender das forças moleculares na interface água-ar e, assim, mudar para a fase gasosa, mesmo em temperaturas abaixo do ponto de ebulição. Mello (2021) ainda explica que, ao se elevar a temperatura, a agitação das moléculas aumenta e, conseqüentemente, um número maior de moléculas atingem a energia suficiente para escapar da fase líquida.

Neste sentido, quando ocorre a evaporação da água em destiladores solares, as impurezas associadas a ela são deixadas na bacia de contenção, já que vapores são gerados sem a necessidade de se atingir o ponto de ebulição da água e de fusão e/ou ebulição de suas impurezas. No caso de águas salobras, por exemplo, seria necessária uma temperatura de 1.400°C para o sal evaporar e, como consequência, contaminar a água destilada (MALUF, 2005).

Apesar de todas as vantagens associadas à destilação solar, a sua utilização ainda é restrita a níveis experimentais em pequena escala. De acordo com Jorge (2011), a baixa eficiência térmica dos destiladores solares e a dependência das condições meteorológicas são dois fatores que implicam diretamente na expansão dessa tecnologia.

2.4.1 Desempenho térmico e técnicas para a melhoria da eficiência dos destiladores solares convencionais

Segundo Kalogirou (2013), a eficiência térmica de um destilador solar é determinada através da razão entre a parcela da energia incidente que de fato foi usada para gerar vapor de um fluido e a energia total solar incidente no sistema de destilação. Dessa forma, considera-se um sistema eficiente aquele que consegue promover a maior quantidade de água destilada, utilizando a menor irradiância solar.

Além disso, é necessário evidenciar que diversos parâmetros climáticos, operacionais e de projeto influenciam no desempenho de um destilador solar. De acordo com Garg e Mann (1975), a radiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento, umidade atmosférica e as condições do céu, são os fatores climáticos mais influentes para a performance de uma unidade de destilação. Como fatores de projeto, os autores mencionam as propriedades dos materiais utilizados na construção dos destiladores, inclinação da cobertura de vidro e isolamento da base. Além disso, são apontados como parâmetros de operação, a profundidade

de água na bandeja, temperatura inicial da água, bem como a absorvância e transmitância do destilador que também influenciam na sua eficiência de destilação.

Kalogirou (2013) ressalta que, devido a dependência desses fatores, os destiladores solares convencionais, isto é, aqueles que só utilizam métodos construtivos mencionados no tópico 2.4 e as propriedades da água em sua operação, possuem uma eficiência típica de destilação relativamente baixa, apresentando valores em torno de 35%. Bouçanova (2021) explica que alguns desses parâmetros não podem ser controlados, em especial os fatores climáticos. Assim, na literatura da área, existem uma série de estudos documentados que investigaram a eficiência desses sistemas por meio da mudança de suas características estruturais e operacionais.

Mariano (2019) explica que, dependendo da localização do destilador solar, a configuração da sua cobertura pode influenciar diretamente no seu desempenho. Segundo o autor, o destilador de inclinação simples possui maior eficiência em regiões de clima frio comparado aos sistemas de inclinação dupla, pois estes apresentam menores perdas por convecção e radiação, devido a sua menor área de exposição ao meio exterior. Em locais quentes, por sua vez, os destiladores de inclinação dupla apresentam melhor desempenho, por causa da sua maior área de exposição à radiação solar.

A diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a cobertura do destilador também influencia na eficiência do sistema. Quanto maior for essa diferença, mais vapor será produzido e, conseqüentemente, maior será a produção de água destilada. Para analisar esse aspecto, Arunkumar *et al.* (2012) observou o efeito do resfriamento da cobertura de destiladores solares para a melhoria de sua eficiência. Em seus experimentos, o autor utilizou um sistema sem e outro com fluxo de água na cobertura. Os resultados mostraram que o resfriamento da cobertura dos destiladores colabora para um melhor desempenho das unidades, dado que o sistema sem fluxo obteve uma eficiência de 34%, enquanto que o sistema com fluxo apresentou 42%.

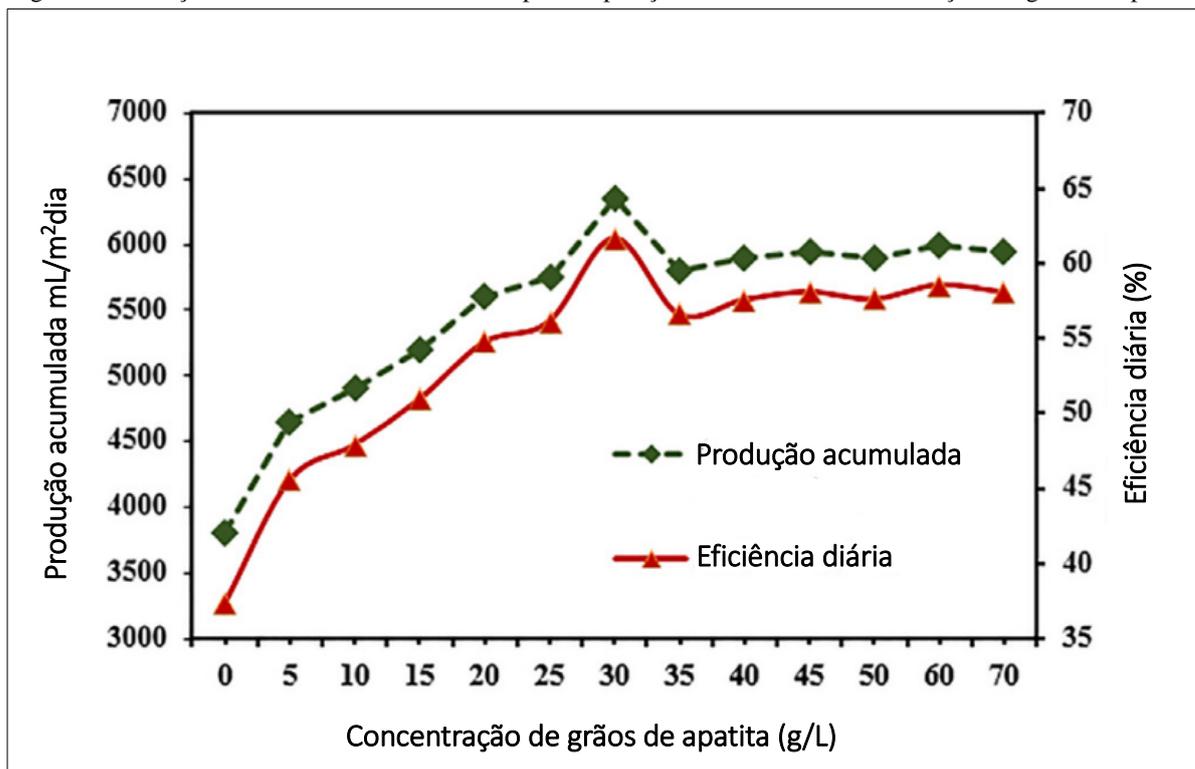
Outra forma de aumentar a diferença de temperatura entre esses componentes é modificando as propriedades térmicas do fluido de trabalho. Diante disso, Bouçanova (2021) analisou experimentalmente a eficiência térmica de destiladores solares contendo nanopartículas metálicas de ouro, prata e cobre. Ao realizar a análise dos experimentos, verificou-se que o uso de nanopartículas ouro, prata e cobre aumentaram a produção de água em 28,12%, 19,23% e 21,74%, respectivamente, quando comparados a um sistema convencional.

Além da utilização de nanopartículas metálicas, também é possível alterar as propriedades térmicas do fluido de trabalho com a utilização de outros materiais. A utilização de resíduos de materiais rochosos tem se mostrado bastante promissora, pois além de promover o aumento da eficiência das unidades de destilação, possuem a vantagem de serem materiais baratos e de grande abundância.

2.4.2 Exemplos de aplicações de materiais rochosos em destiladores

Attia *et al.* (2022) analisou a influência de diferentes concentrações de grãos de apatita no desempenho de destiladores solares. Com o intuito de se estabelecer a concentração ótima de grãos de apatita no sistema, foram estabelecidas doze diferentes concentrações (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60 e 70 g/L). Em seus experimentos, foram utilizados três sistemas de destilação, onde o primeiro recebia apenas água (destilador de controle) e no segundo e terceiro foram adicionadas concentrações de apatita. Os resultados indicaram que a concentração ideal para alcançar a maior produtividade dos destiladores solares foi de 30 g/L. Utilizando essa concentração, a produção de água acumulada atingiu o valor de 6500 mL/m²/dia e a eficiência diária do sistema foi de 60%, apresentando uma melhoria de 23% em relação ao destilador de controle (Figura 6).

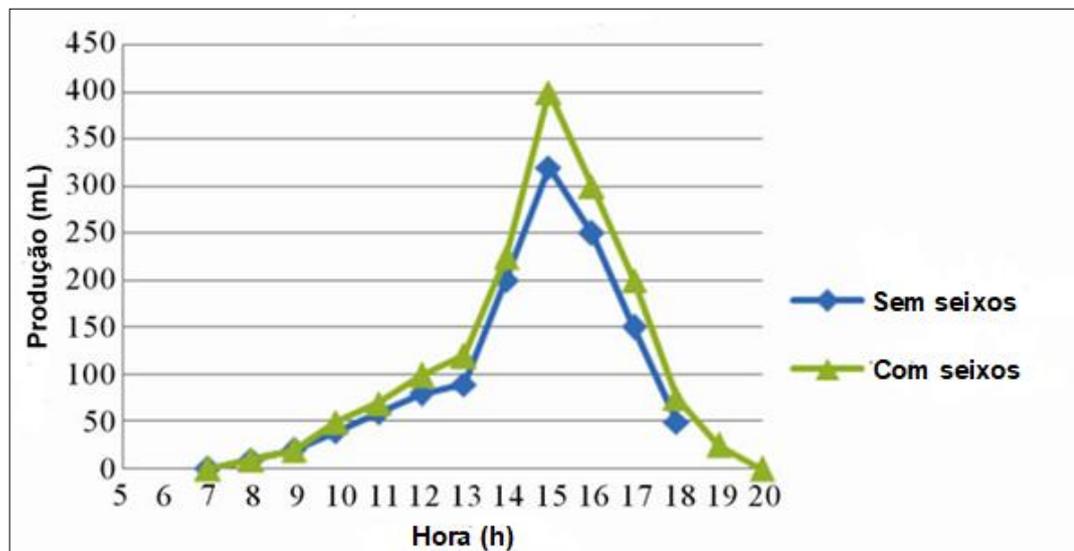
Figura 6 - Produção acumulada e eficiência diária para a operação com diferentes concentrações de grãos de apatita



Fonte: Adaptado de Attia *et al.* 2022.

Moses *et al.* (2011) utilizou seixos de diâmetro uniforme de 10 mm na bandeja de destiladores solares para aumentar a sua produção. Segundo o autor, a escolha desse material para a realização dos seus experimentos está relacionada ao fato de que os seixos apresentam uma alta taxa de armazenamento de energia térmica solar, dado o seu elevado calor específico. Dessa forma, a adição de seixos na bacia de sistemas de destilação aumenta a temperatura da água, que traduz em um aumento da diferença de temperatura do fluido de trabalho e a cobertura e, conseqüentemente, um aumento na taxa de evaporação. Os resultados constataram que a introdução de seixos na superfície da bandeja de destiladores solares promove um aumento na sua produção, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Volume destilado em função da hora do dia para a produção de destiladores solares com e sem seixos



Fonte: Adaptado de Moses *et al.*, 2011.

Uma mistura de cimento Portland e areia de aluvião em proporções iguais foi utilizada por Sellami *et al.* (2016) como meio de armazenamento de calor para aumentar o rendimento de destiladores solares convencionais. Em seus experimentos, foram analisadas diferentes quantidades da mistura desses dois elementos. Ao analisar os resultados obtidos, constatou-se que 300 g foi a quantidade que promoveu o melhor ganho de produtividade para o sistema, cerca de 39,70% com relação aos sistemas que utilizam apenas água.

Dias (2012) analisou o efeito de britas basálticas na bandeja de destiladores solares. Para isso, construiu-se duas unidades de destilação, uma para receber os materiais rochosos e outra para trabalhar apenas com água. Os experimentos foram realizados na cidade de Foz do Iguaçu - PR durante os meses de setembro a dezembro de 2012. A introdução das pedras britadas na bacia dos destiladores se mostrou bastante eficiente, pois durante os quatro meses

de operação, o destilador que trabalhou com os materiais em sua bacia produziu 25,1 litros de água, enquanto que o sistema que não recebeu a brita gerou um total de 14,8 litros.

2.5 Rochas Ornamentais

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 15012:2013, define rocha ornamental como “material pétreo natural, utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária”. Além disso, a norma acrescenta que o termo rocha para revestimento, corresponde a toda "rocha ornamental submetida a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizada no revestimento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas".

Como o próprio nome sugere, as rochas ornamentais são utilizadas como elementos decorativos ou de revestimento. Portanto, além de uma boa estrutura, esses materiais precisam ser esteticamente belos para combinar com o ambiente onde estarão dispostos. Nesse sentido, Alencar (2013) ressalta que o padrão estético é o aspecto mais influente para o mercado de rochas ornamentais, sendo a cor e a conformidade do desenho as propriedades estéticas mais importantes do material.

Comercialmente, as rochas ornamentais são basicamente subdivididas em dois grupos principais, os “mármore” e os “granitos”. Contudo, essa classificação não coincide com os conceitos apontados pela geologia, dado que para o mercado, o primeiro representa todas as rochas carbonatadas, de gênese sedimentar ou metamórfica, tais como o calcário, o dolomito e o mármore propriamente dito, enquanto que o segundo corresponde a qualquer rocha não calcária, apta a passar pelos processos de corte e acabamento superficial, com boas características estéticas, como os basaltos, gabros, gnaisses e alguns quartzitos. Vale lembrar que a partir da evolução do mercado e da variedade de materiais utilizados, essa classificação foi expandida e, hoje, as rochas passaram a ser designadas também como “quartzitos”, “arenitos”, “travertinos” e “ardósias” (VIDAL, CASTRO, FRASCÁ, 2013).

Segundo Rodrigues e Filho (2020) as atividades de lavra das rochas ornamentais são hoje realizadas, principalmente, em maciços de rocha por meio de bancadas baixas, bancadas altas ou fatias verticais (Figura 8). A lavra de matacões se tornou obsoleta com o tempo, sendo utilizada somente em raras situações nos dias de hoje, destacam os autores. Campos *et al.* (2013) ressalta que, devido às características do próprio jazimento e/ou processo do corte das rochas, nessa etapa da cadeia produtiva são gerados inúmeros resíduos, especialmente materiais grossos, irregulares e com defeitos.

Figura 8 - Lavra a céu aberto em um maciço de rocha, pelo método de painéis verticais em bancadas altas



Fonte: Rodrigues e Filho, 2020.

Silveira, Vidal e Souza (2013) destacam que o beneficiamento de rochas ornamentais é dividido em dois estágios, o primário e o secundário. No beneficiamento primário, ocorre a serragem dos blocos em chapas, com o auxílio de equipamentos como os teares multilâminas, tear monolâmina, talha-bloco de disco diamantado, teares multifio diamantados ou monofio diamantado. No beneficiamento secundário, por sua vez, as chapas passam por processos de acabamento superficial, como polimento, escovação, apicoamento, flameamento, dentre outros. A Figura 9 apresenta em (a) a serragem de um bloco em um tear multifio diamantado e em (b) o processo de flameamento realizado na face de uma chapa, que são processos realizados no beneficiamento primário e secundário, respectivamente.

De acordo com Campos *et al.* (2013) tanto no beneficiamento primário quanto no secundário são geradas uma grande quantidade de resíduos que, dependendo da atividade realizada, variam muito em relação à granulometria: grossos (> 2 mm) das aparas das chapas; finos ($2-0,075$ mm) e ultrafinos ($< 0,075$ mm) do corte e polimento.

Figura 9 - Processos realizados no beneficiamento primário e secundário



Fonte: Rodrigues e Filho, 2020.

O Brasil apresenta um amplo destaque no segmento das rochas ornamentais devido à geodiversidade do seu embasamento cristalino. De acordo com Mendes, Lima e Marques (2013), a grande ocorrência de eventos tectônicos ocorridos, em especial, durante o Proterozóico, condicionou a formação de jazidas de rochas ornamentais reconhecidas internacionalmente por sua beleza.

Em termos de produção, a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS) estimou que o Brasil produziu um total de 9 milhões de toneladas de materiais rochosos para fins ornamentais em 2020, tais como granitos, pegmatitos, mármore, travertinos, ardósias, quartzitos maciços e foliados, basaltos, calcários, arenitos, dentre outros. A Tabela 1 exibe o perfil da produção brasileira por tipo de rocha no ano de 2020, onde é

possível observar que os materiais comercializados como granitos representam a maior parcela da produção nacional.

Tabela 1 - Perfil da produção brasileira por tipo de rocha em 2020

Tipo de Rocha	Produção (Mt)	Participação (%)
Granito e similares	4	45
Mármore e Travertino	2,3	25
Quartzito Maciço	1,5	16
Ardósia	0,4	5
Quartzito Foliado	0,2	2
Pedra Miracema	0,2	2
Outros (Basalto, Pedra Cariri, Pedra-Sabão, Pedra Morisca etc.)	0,4	5
Total estimado	9	100

*Mt = Milhões de toneladas.

Fonte: Adaptado de ABIROCHAS, 2021.

Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia e Ceará são os principais pólos de lavra de rochas ornamentais do Brasil. Em 2019, mais da metade de toda a produção nacional foi realizada somente nesses estados, isto é, cerca de 6,8 milhões de toneladas (ABIROCHAS, 2021). Em 2021, essas regiões também foram responsáveis pela maior parcela das exportações brasileiras, sendo o Espírito Santo responsável por 85% das exportações, seguido por Minas Gerais com 11%, Ceará com 2% e Bahia com 1% (IBRAM, 2021).

2.5.1 Cenário das Rochas Ornamentais no Ceará

Destaque pela grande quantidade de rochas ornamentais e de revestimento produzidas e exportadas nos últimos anos, o Ceará apresenta bastante potencial para continuar figurando entre os principais produtores e exportadores do setor durante muito tempo.

A Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC) apontou alguns aspectos favoráveis ao crescimento da indústria de rochas ornamentais que tornaram o Ceará um grande exportador desse tipo de material, com destaque para: variedade de rochas da região, processos de caracterização tecnológica disponíveis no estado, disponibilidade de reservas minerais, boa infraestrutura, potencial de mercado, localização estratégica e excelente logística de fretes marítimos (FIEC, 2018).

O estudo "Setorial em Comex de Rochas Ornamentais - Edição: Anual de 2021" realizado pelo Centro Internacional de Negócios do Ceará (CIN) da Federação das Indústrias

do Estado do Ceará (FIEC), estima que o Ceará faturou US\$ 37,7 milhões com exportações de rochas ornamentais em 2021. Os quartzitos e os granitos foram os materiais mais exportados pelo estado, confirmando a terceira posição no ranking de maiores exportadores de rochas ornamentais e de revestimento do Brasil no período (CIN, 2022).

De acordo com Vidal *et al.* (2005) cerca de 75% da área territorial do Ceará é ocupada pelo embasamento cristalino, condição que contribui para a ocorrência de diversos materiais com características ornamentais e de revestimento em muitas regiões do estado. Granitos, mármore, quartzitos, calcários e conglomerados, são alguns exemplos de rochas encontradas no Ceará que podem ser utilizadas para fins estéticos.

Pinéo e Palheta (2021) destacam que os trabalhos de pesquisa e lavra de rochas ornamentais e de revestimento, cresceram continuamente nos últimos anos e, a perspectiva, é que continuem crescendo nos próximos. Os autores ainda acrescentam que a mais importante zona de extração desse tipo de material, encontra-se na região Noroeste do estado, onde estão localizadas as cidades de Sobral, Massapê, Santa Quitéria, região de Banabuiú, entre outras. Nessa área são extraídas grandes quantidades de granitóides, quartzitos, arenitos, conglomerados, além de outros materiais.

2.5.2 Produção de resíduos de rochas ornamentais nas diversas atividades associadas à mineração

A Lei N° 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelece que qualquer tipo de material, substância ou objeto, resultante de atividades humanas em sociedade, no qual as suas características não possibilitem a sua disposição direta em corpos de água ou na rede de esgoto, exigindo para isso, tratamento prévio e gerenciamento, é definido como resíduo sólido. A Lei ainda acrescenta que os rejeitos, correspondem aos resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as alternativas de tratamento e recuperação, não apresentem outra possibilidade que não seja a sua disposição responsável no meio ambiente.

A mineração é uma das atividades econômicas que mais produz resíduos sólidos durante seus processos. No que tange ao setor das rochas ornamentais, Campos *et al.* (2013) acentua que a sua cadeia produtiva gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, por causa das baixas taxas de aproveitamento. De acordo com o autor, em média, para a produção de 330 m² de chapas, são lavrados 30 m³ de rocha. No entanto, desse número, cerca de 20 m³ permanecem na pedreira como resíduos grossos. Na etapa de beneficiamento, por sua vez, ainda

são perdidos 1,5 m³ em aparas e 2,6 m³ em finos durante o corte da rocha. Dessa forma, dos 30 m³ de material extraídos inicialmente do maciço rochoso, somente 5,9 m³ são de fato transformados em chapas.

Nessa perspectiva, além da geração de enormes prejuízos econômicos para as empresas, a produção acentuada de resíduos de rochas ornamentais impacta diretamente na ideia de desenvolvimento sustentável defendida pela sociedade moderna. Portanto, minimizar a quantidade produzida e encontrar maneiras de aproveitamento dos seus resíduos sólidos, tem sido uma das principais preocupações para a indústria de rochas ornamentais nos últimos anos.

Diferentes alternativas para a utilização dos resíduos gerados na produção de rochas ornamentais vêm sendo estudadas nos últimos anos. Em seus estudos, Moreira, Freire e Holanda (2003) concluíram que o resíduo de serragem de granito, pode ser utilizado como aditivo na fabricação de produtos cerâmicos para a construção civil. Ribeiro (2013), por sua vez, utilizou pó de rocha ornamental para a produção de tijolo solo-cimento, constatando que o mesmo tende a aumentar a resistência à compressão e diminuir a absorção de água para corpos de prova com 40% do resíduo.

Com o intuito de apresentar uma nova possibilidade para o aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e, conseqüentemente, contribuir para a minimização dos problemas ambientais causados pela sua produção, o presente trabalho teve como objetivo analisar a influência da introdução de resíduos de granito e mármore no desempenho de destiladores solares.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando atender os objetivos de pesquisa, o trabalho foi dividido em três etapas principais: caracterização dos resíduos utilizados, ensaios com os destiladores solares propostos e avaliação da potabilidade da água produzida.

3.1 Caracterização dos resíduos utilizados

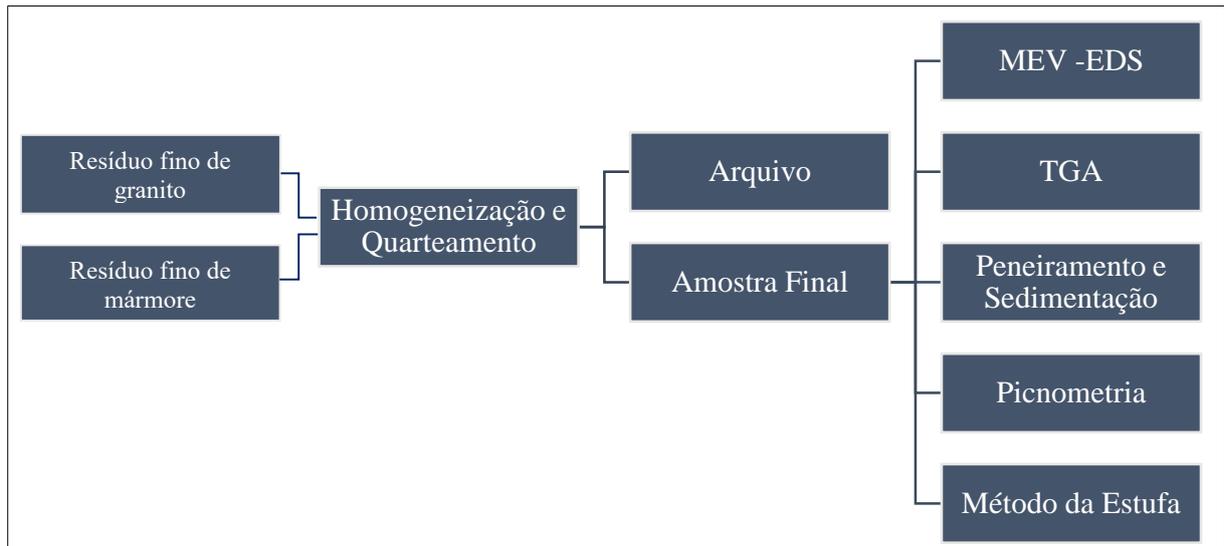
Como ponto de partida para a caracterização dos resíduos utilizados no presente trabalho, realizou-se a coleta de resíduos finos de dois tipos de rochas ornamentais, um comercialmente classificado como granito e o outro como mármore.

A amostra de granulometria fina de granito foi coletada em uma pilha de resíduo proveniente de um filtro prensa de um empreendimento mineiro localizado na cidade de Santa Quitéria - CE. Na oportunidade foram amostrados cerca de 4,2 kg da amostra de granito. O resíduo fino de mármore, por sua vez, é resultado da etapa de beneficiamento secundário de uma marmoraria localizada na cidade de Crateús – CE. Neste caso, foram coletados cerca de 330 g da amostra de mármore.

A Figura 10 apresenta um fluxograma dos ensaios que foram realizados para o conhecimento das principais propriedades físicas, químicas e mineralógicas destes resíduos finos. A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) foram usadas para identificar os principais minerais presentes nas amostras e correlacionar a composição química com a morfologia dos resíduos. A Análise Termogravimétrica (TGA), por sua vez, foi aplicada para verificar possíveis variações de massa dos resíduos em função da temperatura. Por meio da combinação dos ensaios de Peneiramento e Sedimentação foram determinadas as distribuições granulométricas das amostras. O Método da Estufa e a Picnometria, permitiram a determinação da umidade e da densidade dos resíduos, respectivamente.

Além dos resíduos finos coletados para os ensaios de destilação, também foram adquiridas aparas de chapas de cada material a fim de se realizar, no caso do granito, a sua descrição petrográfica macroscópica através da análise da sua composição mineral, estrutura e textura e, no caso do mármore, a observação de seu comportamento frente a sua exposição ao ácido clorídrico. Ambas as práticas foram selecionadas com base nas características individuais de cada rocha, conforme detalhado nos tópicos 3.1.7 e 3.1.8.

Figura 10 – Processo realizado para a caracterização dos resíduos finos



Fonte: Autor, 2022.

3.1.1 Homogeneização e Quarteamento

Os processos de homogeneização e quarteamento dos resíduos finos foram realizados no Laboratório de Geologia do Campus da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Crateús. Na execução dos procedimentos, adotou-se a metodologia proposta por Sampaio, França e Braga (2007).

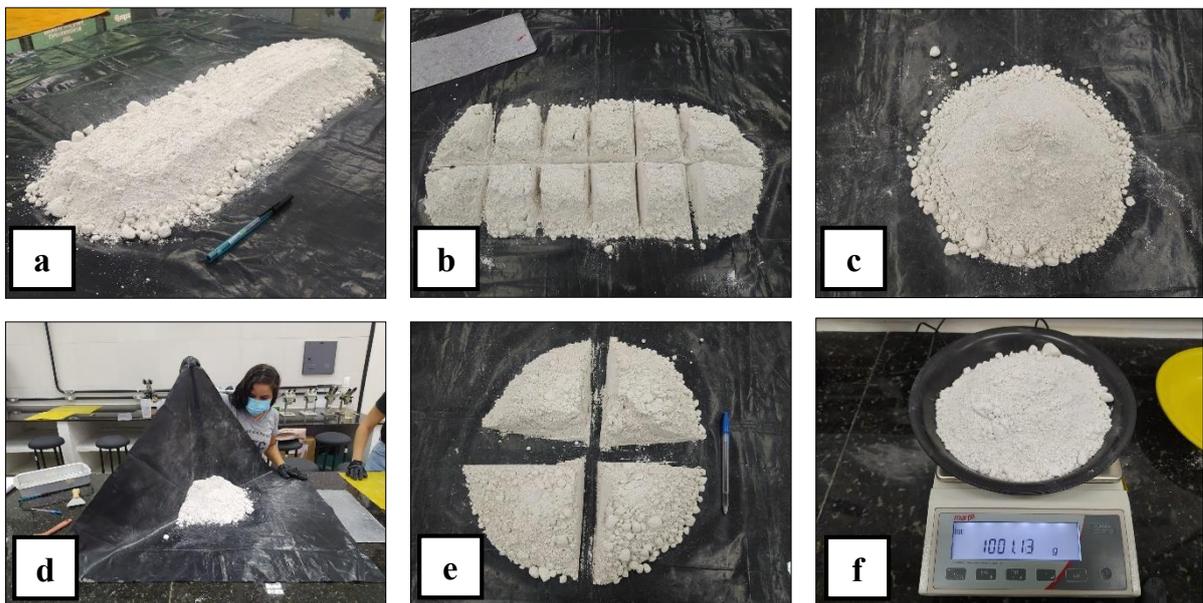
Para a amostra de granito foram realizados tanto os processos de homogeneização e quarteamento por pilha longitudinal quanto por pilha cônica, pois havia uma grande quantidade de material disponível e apenas a metade desse todo seria suficiente para os ensaios de caracterização e destilação. Dessa forma, para a formação da pilha longitudinal, o material foi distribuído longitudinalmente sobre uma lona, mediante sucessivas passagens de um extremo ao outro. Posteriormente, o material das extremidades da pilha foi retomado e distribuído novamente ao longo de seu corpo. A pilha formada foi dividida em segmentos com o auxílio de uma pá e, em seguida, as suas seções foram unidas de maneira alternada, formando-se duas novas pilhas.

Após a execução desse passo, uma porção foi arquivada e a outra foi submetida à homogeneização e quarteamento pelo método de pilha cônica. Para a homogeneização, o material foi colocado sobre uma lona quadrada. Em seguida, os vértices da lona foram levantados sucessivas vezes, para que o material disposto na base fosse alocado no topo da pilha. O cone formado foi dividido em quatro porções numeradas de 1 a 4. Posteriormente, formaram-se duas novas pilhas cônicas, a primeira composta pelas suas partes ímpares e a outra pelas partes pares. Para a execução dos ensaios de caracterização física, química e mineralógica,

bem como para os experimentos de destilação, apenas a pilha composta pelas partes ímpares foi utilizada. À vista disso, a pilha formada pelas partes pares foi arquivada.

A Figura 11 apresenta o processo realizado durante a homogeneização e quarteamento da amostra de granito, onde é possível visualizar em (a) o formato da pilha longitudinal ao final da distribuição, em (b) a divisão da pilha longitudinal em 12 segmentos, em (c) a porção selecionada para a etapa de homogeneização e quarteamento pelo método de pilha cônica, em (d) a execução dos movimentos realizados com os vértices da lona quadrada a fim de homogeneizar o material, em (e) a divisão do cone em quatro seções e em (f) a amostra final do resíduo utilizada para os ensaios de caracterização e destilação.

Figura 11 - Homogeneização e Quarteamento da amostra de granito



Fonte: Autor, 2022.

No caso da amostra de mármore, foram realizados apenas os processos de homogeneização e quarteamento pelo método da pilha cônica, dado que a massa disponível nesse caso era reduzida, cerca de 332 g. Para a formação da pilha cônica, foram adotados os mesmos procedimentos realizados para o resíduo de granito.

A Figura 12 exhibe algumas etapas do processo executado para homogeneizar e quartear a amostra de mármore, onde é possível visualizar em (a) a homogeneização do material através de sucessivos levantamentos dos vértices da lona, em (b) a divisão da pilha formada em quatro seções e em (c) a união das suas porções pares e ímpares para a formação de duas novas pilhas cônicas, onde a primeira foi arquivada e a segunda utilizada nos ensaios de caracterização e destilação solar.

Figura 12 - Homogeneização e Quarteamento da amostra de mármore



Fonte: Autor, 2022.

3.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

A análise mineralógica das amostras de granito e mármore foi realizada com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura acoplado com um sistema de espectroscopia por energia dispersiva (MEV/EDS), modelo Hitachi TM 3000 (Figura 13). Os experimentos foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza.

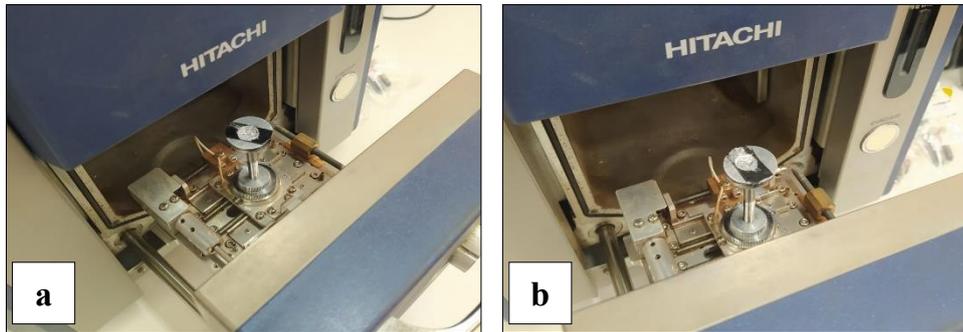
Figura 13 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de bancada, modelo HITACHI TM 3000 com periférico acoplado do tipo EDS SWIFT ED 3000



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica – Geologia/UFC, 2022.

Na realização das análises, inicialmente utilizou-se um fixador (grafite coloidal) para colar os resíduos no suporte de amostras da câmara de vácuo do equipamento (Figura 14). Com as amostras acondicionadas no aparelho, deu-se início a visualização da imagem gerada pelo MEV no monitor do computador, bem como o mapeamento da distribuição dos elementos químicos presente nas amostras com o auxílio do EDS.

Figura 14 - Suporte de amostras da câmara de vácuo do equipamento, com detalhe para o resíduo de granito em (a) e o de mármore em (b)

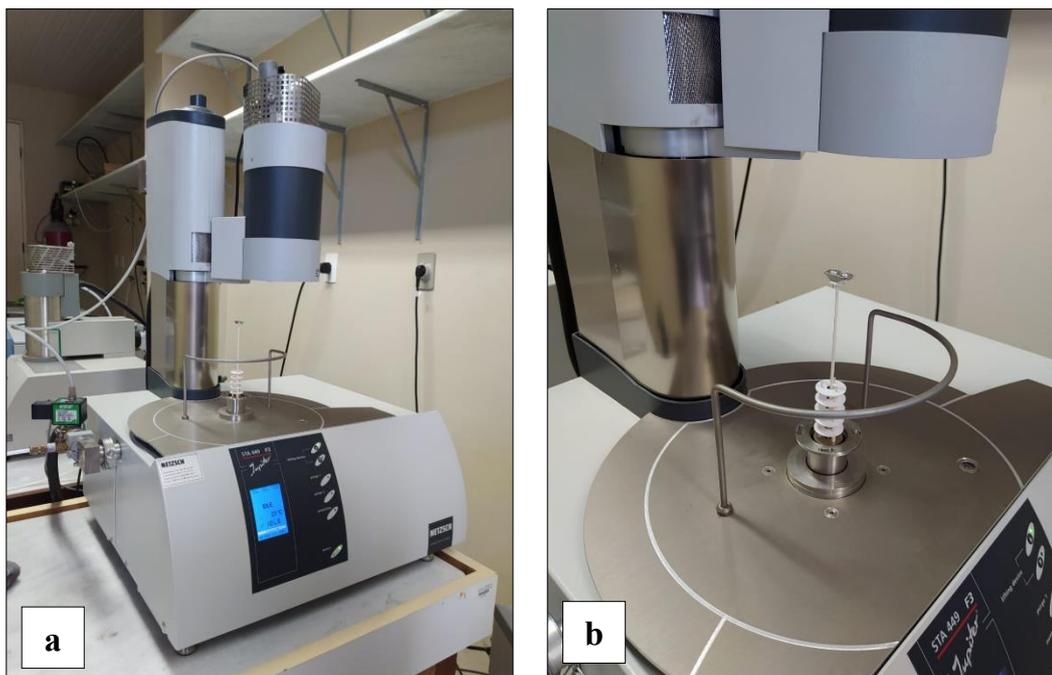


Fonte: Autor, 2022.

3.1.3 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica dos resíduos de granito e de mármore foi efetuada utilizando o equipamento NETZSCH STA 449 F3 Júpiter (Figura 15), situado no Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza. Os ensaios foram realizados utilizando uma rampa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ com uma temperatura final de 498°C via fluxo de nitrogênio analítico. Para as análises foram utilizadas 1 g de cada amostra.

Figura 15 - Equipamento de análise térmica NETZSCH STA 449 F3 Júpiter; (a) Vista frontal e (b) Detalhe para o suporte das amostras localizado na base do aparelho



Fonte: Autor, 2022.

3.1.4 Teor de umidade pelo Método da Estufa

Os teores de umidade dos resíduos de granito e mármore foram determinados mediante o método da estufa, padronizado pela NBR 6457/1986. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Química do Campus da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Crateús.

Na execução dos ensaios, inicialmente, foram colocados 20g de cada amostra em cápsulas metálicas. Posteriormente, os conjuntos (cápsulas + resíduos) foram levados em estufa, à temperatura de 105°C durante 24 horas, visando atingir a constância das massas. Ao final desse período, retirou-se os conjuntos (cápsulas + resíduos) da estufa e, em seguida, os mesmos foram pesados. Após a realização desses processos, utilizou-se a Equação 1 para a determinação da umidade (h) das amostras.

$$h = \frac{M1-M2}{M2-M3} \times 100 \quad (1)$$

onde,

h = teor de umidade, em (%);

M1 = massa do solo úmido mais a massa do recipiente, em g;

M2 = massa do solo seco mais a massa do recipiente, em g;

M3 = massa do recipiente (cápsula metálica), em g.

3.1.5 Massa específica por Picnometria à água

A determinação da massa específica das amostras de granito e de mármore foi realizada através dos procedimentos descritos pela norma DNER-ME 093/94, no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza.

Foram realizados dois ensaios, o primeiro para a determinação da massa específica do granito e o segundo para o mármore. Inicialmente, as amostras foram secadas em estufa por 24 h a uma temperatura de 105°C até que os seus pesos atingissem constância. Em seguida, foram coletados 10 g de cada resíduo para a realização dos experimentos.

Na execução dos ensaios, o picnômetro vazio, limpo e seco foi pesado inicialmente (P1). A amostra a ser ensaiada foi colocada no picnômetro e o conjunto (picnômetro + amostra) foi pesado novamente (P2). Água destilada foi adicionada até cobrir a amostra. O conjunto foi

submetido a uma fonte de calor (fogão) para que a solução aquecesse durante 15 minutos e o ar entre as partículas fosse liberado. Após o recipiente esfriar, adicionou-se água destilada até transbordar e o conjunto (picnômetro + amostra + água) foi pesado (P3). Em seguida, todo o conteúdo foi retirado do picnômetro e o mesmo foi lavado. Posteriormente, apenas água destilada foi adicionada no picnômetro até transbordar e o conjunto (picnômetro + água) foi pesado (P4).

A densidade da amostra foi obtida a partir da Equação 2, apresentada a seguir:

$$D = \frac{(P2-P1)}{(P4-P1)-(P3-P2)} \quad (2)$$

onde,

D = Massa específica;

P1 = Peso do picnômetro vazio e seco, em g;

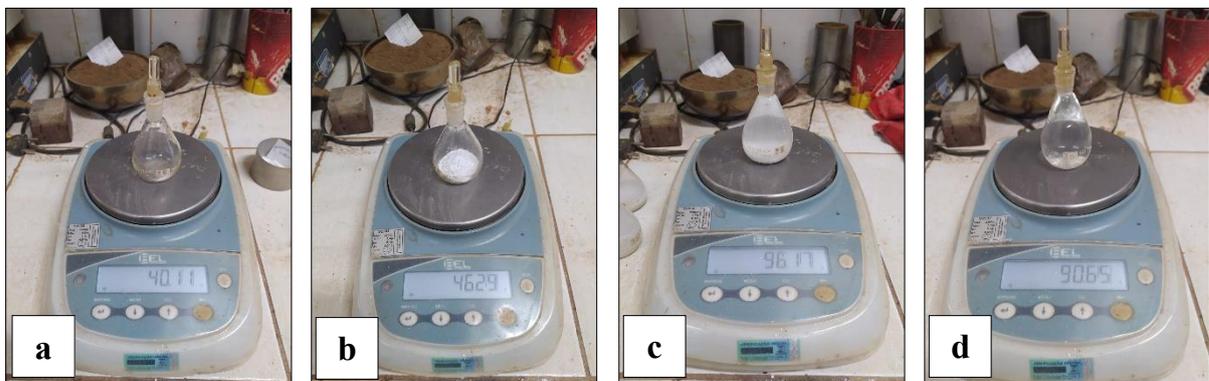
P2 = Peso do picnômetro mais amostra, em g;

P3 = Peso do picnômetro mais amostra e água, em g;

P4 = Peso do picnômetro mais água, em g;

A Figura 16 apresenta um exemplo das etapas do processo realizado para a determinação da massa específica das amostras. Em (a) observa-se a pesagem do picnômetro vazio (P1), em (b) a pesagem do conjunto picnômetro + amostra (P2); em (c) a pesagem do picnômetro + amostra + água (P3) e, por fim, em (d) a pesagem do conjunto picnômetro + água (P4).

Figura 16 - Ilustração do processo realizado para a determinação da massa específica das amostras usando o picnômetro



Fonte: Autor, 2022.

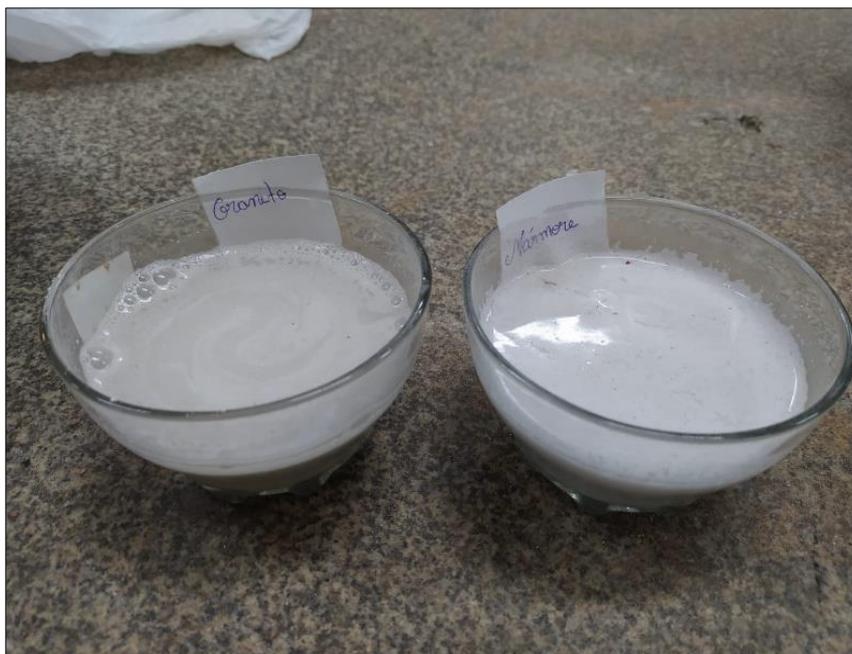
3.1.6 Análise granulométrica

Para a determinação dos diâmetros das partículas de granito e mármore, foram realizados uma combinação dos ensaios de peneiramento e sedimentação, de acordo com a NBR 7181/1984. Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza.

Inicialmente, as amostras de granito e mármore foram passadas individualmente na peneira de 2 mm, com o objetivo de separar a porção grosseira da fração fina dos materiais. Em seguida, tanto a parcela de granito retida na peneira de 2 mm, quanto a parcela de mármore, foram lavadas em água corrente, a fim de se eliminar o material fino aderente aos seus grãos grossos. Após esse passo, as frações grossas residuais de granito e mármore foram secadas em estufa a 105°C por 24 horas e, posteriormente, submetidas à peneiramento grosso com o auxílio das peneiras de 19,0; 12,5; 9,52; 4,76 e 2,0 mm.

Para a etapa de sedimentação e peneiramento fino, foram separadas 70 g do material passante na peneira de 2,0 mm de cada resíduo. Em seguida, cada amostra foi colocada em uma solução de hexametáfosfato de sódio por um período de 24 horas, com o objetivo de desagregar partículas aglomeradas e, conseqüentemente, permitir a sedimentação destes grãos de forma isolada (Figura 17).

Figura 17 – Mistura das amostras com o defloculante hexametáfosfato de sódio



Fonte: Autor, 2022.

Após esse tempo, as duas misturas foram submetidas à agitação mecânica através de um copo dispersor durante 15 minutos (Figura 18). Posteriormente, cada composto foi transferido para uma proveta graduada e com o auxílio de uma bisnaga, adicionou-se água destilada até a marca de 1000 mL de cada recipiente. Para que as partículas continuassem em suspensão, as provetas foram agitadas energeticamente durante 1 minuto.

Figura 18 - Agitação mecânica do resíduo de granito (a) e de mármore (b) com o auxílio do copo dispersor



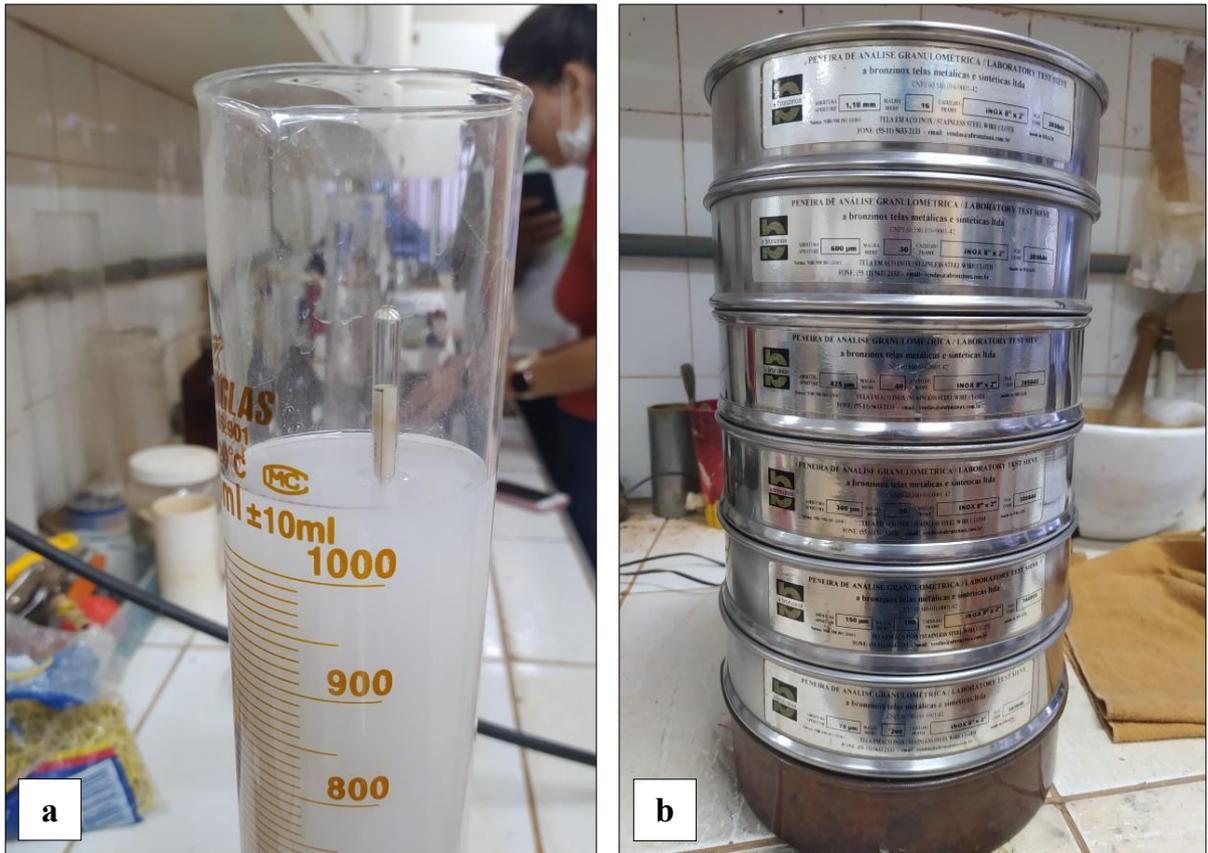
Fonte: Autor, 2022.

Após a execução desse passo, as provetas foram levadas para uma mesa e anotou-se o tempo inicial da sedimentação nos dois casos. O densímetro foi colocado nas dispersões nos tempos de 30, 60, 120, 240, 480, 900, 1800, 3600, 7200, 14400, 28800 e 86400 segundos após o início de cada sedimentação.

Com o término da sedimentação, as amostras foram transferidas para a peneira de 0,075 mm e lavadas em água corrente durante 5 minutos. Em seguida, os materiais retidos na peneira mencionada, foram levados para a estufa à temperatura de 105°C por 24 horas. Após a finalização desse processo, as amostras foram submetidas ao processo de peneiramento fino nas peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15; 0,075 mm. Por fim, os valores de massa retida em cada peneira foram anotados para a construção da curva granulométrica.

A Figura 19 apresenta em (a) o densímetro imerso na mistura do resíduo de mármore utilizado para a realização dos ensaios de densidade e em (b) o conjunto de peneiras usado para a realização do peneiramento fino dos resíduos de granito e mármore.

Figura 19 - Instrumentos utilizados na etapa de análise granulométrica: (a) densímetro imerso na amostra de mármore para a realização de uma leitura e em (b) o conjunto de peneiras utilizadas para a realização do peneiramento fino



Fonte: Autor, 2022.

3.1.7 Análise macroscópica da amostra de granito

De acordo com Menezes (2013) a análise macroscópica de rochas permite determinar o nome da espécie por meio da observação de suas características visíveis. Segundo ele, para o reconhecimento de uma rocha, além da composição mineral, é necessário analisar a sua estrutura (maciça ou orientada) e a sua textura (análise da granulação). Nessa direção, a análise macroscópica da amostra de granito foi realizada no Laboratório de Geologia do Campus da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Crateús.

Para a análise da textura e da estrutura da rocha, mediu-se com uma régua o tamanho médio de seus grãos e observou-se macroscopicamente a sua orientação,

respectivamente. Enquanto que o procedimento para a avaliação da composição mineralógica, consistiu em identificar os diferentes minerais presentes na rocha e estimar o volume ocupado na amostra. Essa prática permitiu a construção do diagrama QAP, um método de classificação de rochas ígneas concebido por Streckeisen (1976), bem como relacionar essa prática com os resultados de MEV/EDS.

3.1.8 Ataque químico com ácido clorídrico na amostra de mármore

De acordo com o Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert – MHE (2022), a gênese dos mármore está associada a um metamorfismo de contato ou regional de calcários e dolomitos. Assim, dependendo da mineralogia predominante, os mármore podem apresentar composição calcítica ou dolomítica.

Segundo o Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (2022), quando calcítico, o mármore caracteriza-se por apresentar efervescência na presença de ácido clorídrico diluído (HCl), devido ao desprendimento de gás carbônico (CO₂) durante a reação. Por outro lado, quando apresenta composição dolomítica, o mármore possui uma menor efervescência quando exposto ao ácido clorídrico se comparado ao primeiro.

Logo, como análise complementar à EDS, para determinar a mineralogia predominante no conjunto de amostras de mármore utilizada no presente trabalho, aplicou-se algumas gotas de HCl na superfície das aparas coletadas, bem como nos resíduos finos utilizados nos ensaios de destilação.

3.2 Ensaios de destilação solar

Para a realização dos experimentos de destilação foram construídos três protótipos de destiladores solares com sensores de temperatura acoplados na sua base e teto, cujas configurações estruturais estão detalhadas no tópico 3.2.1. Quanto aos ensaios, conforme especificado no tópico 3.2.2, foram analisados os efeitos de diferentes concentrações dos resíduos rochosos, a fim de verificar a sua influência na eficiência térmica de destilação dos sistemas propostos.

3.2.1 Desenvolvimento da construção dos protótipos

A primeira etapa para a construção dos destiladores solares propostos neste trabalho consistiu no desenvolvimento do projeto de suas coberturas. Assim, partindo do princípio de que o clima da região em que os protótipos estão localizados é quente, optou-se por utilizar a configuração simétrica de dupla inclinação em suas montagens, segundo Mariano (2019). Além da configuração construtiva, outros fatores considerados na montagem das coberturas dos destiladores solares foram: inclinação, tipo de matéria-prima, espessura e área.

Soares (2004) explica que a inclinação da cobertura de destiladores solares convencionais ideais se dá através do valor da latitude da região na qual o dispositivo será utilizado somado a mais 10° , medidos com relação ao plano horizontal local. Dessa forma, para a região de Crateús, cuja latitude situa-se na faixa de $5^\circ 11' 55''$, a inclinação adequada nos sistemas deveria ser de 15° . No entanto, adotou-se uma inclinação de, aproximadamente, 20° neste trabalho, por ser uma inclinação média que permite a utilização do dispositivo em todo o território nacional.

Na seleção do material para as coberturas dos sistemas, optou-se por utilizar o vidro, baseado nas análises experimentais de Phadatare e Verna (2009). Segundo os autores, destiladores equipados com coberturas de vidro são, em média, 32,5% mais eficientes do que sistemas com coberturas de plástico. Além disso, apesar de apresentarem uma maior flexibilidade, as coberturas de plástico possuem um tempo de vida mais curto do que as coberturas fabricadas com vidro, bem como uma menor resistência a altas temperaturas.

O tipo de vidro utilizado na construção das coberturas foi o soda-cal, conhecido popularmente como vidro comum, confirmado através do seu índice de refração, medido com o auxílio de um GEM Refratômetro no Laboratório de Geologia do Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará (UFC).

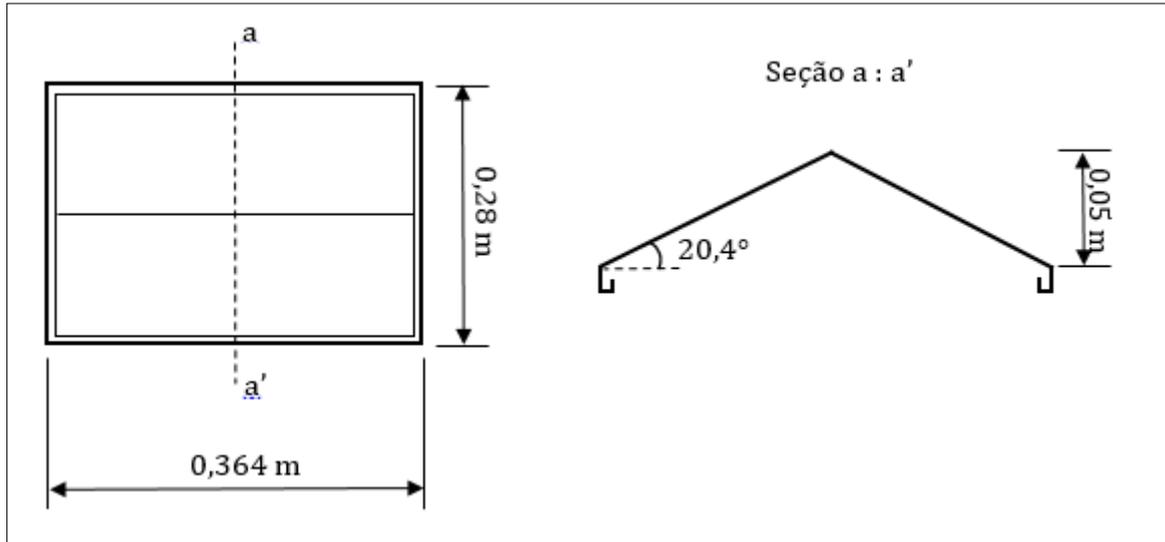
As coberturas de vidro dos sistemas utilizados neste trabalho foram fabricadas com vidro de 3 mm de espessura, tendo em conta os estudos de Ghoneyem e Ileri (1997) que concluíram que o destilador com a cobertura com essa espessura apresentou as melhores taxas de produção de água destilada.

A área das coberturas dos destiladores ($0,102 \text{ m}^2$), por sua vez, foi escolhida com base nos estudos de Bouçanova (2021) que também trabalhou com sistemas em pequena escala, utilizando para isso coberturas de $0,0875 \text{ m}^2$.

Em resumo, as coberturas foram fabricadas com vidro comum de 3 mm de espessura, área de $0,102 \text{ m}^2$ e inclinação de $20,4^\circ$ em relação ao plano horizontal, utilizando-se

cola de silicone atóxica para garantir a máxima vedação das suas arestas. Após a secagem da cola, canaletas de alumínio foram fixadas nas extremidades das coberturas. A vista de cima do projeto da cobertura de um dos protótipos e o seu corte transversal podem ser visualizados na Figura 20.

Figura 20 - Vista superior e corte transversal (a : a') do modelo proposto



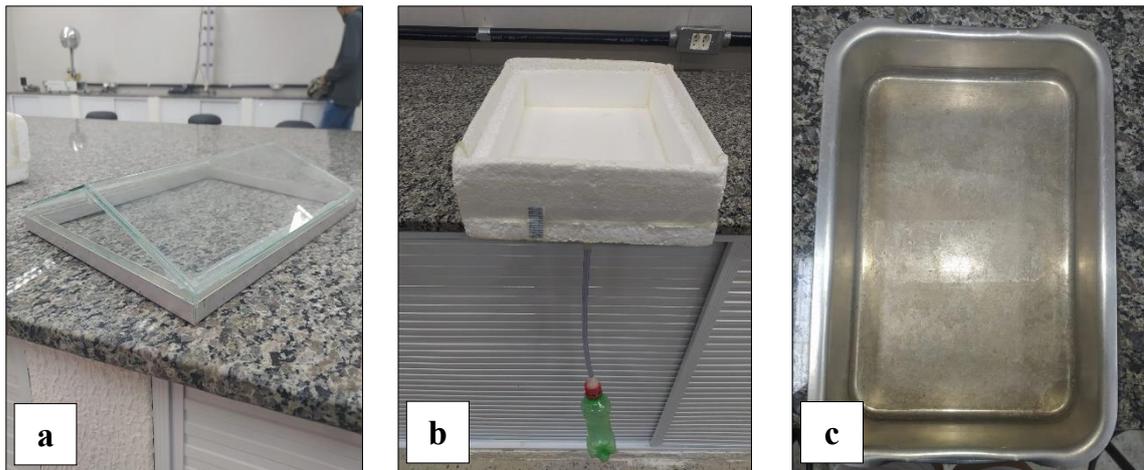
Fonte: Autor, 2022.

Com a finalização das coberturas, foi possível construir as bases dos protótipos com placas de isopor com 0,393 m de comprimento, 0,3 m de largura e 0,006 m de espessura, com a finalidade de minimizar a transferência de calor da base para o ambiente externo. Mangueiras de plástico acopladas a uma garrafa pet foram encaixadas em cada uma das bases, a fim de canalizar a água destilada disposta nas canaletas.

As bacias de contenção de água utilizadas nos sistemas são de alumínio, apresentam 1 mm de espessura e área de 0,0486 m², sendo 0,27 m de comprimento e 0,18 m de largura.

A Figura 21 apresenta todos os componentes de um dos sistemas de destilação, construído no Laboratório de Física do Campus da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Crateús, onde é possível visualizar em (a) a sua cobertura simétrica de inclinação dupla acoplada às canaletas de alumínio, em (b) a base de isopor com a mangueira e a garrafa pet fixadas e em (c) a bacia de contenção de água a ser destilada.

Figura 21 – Componentes do protótipo de destilador solar utilizado no trabalho

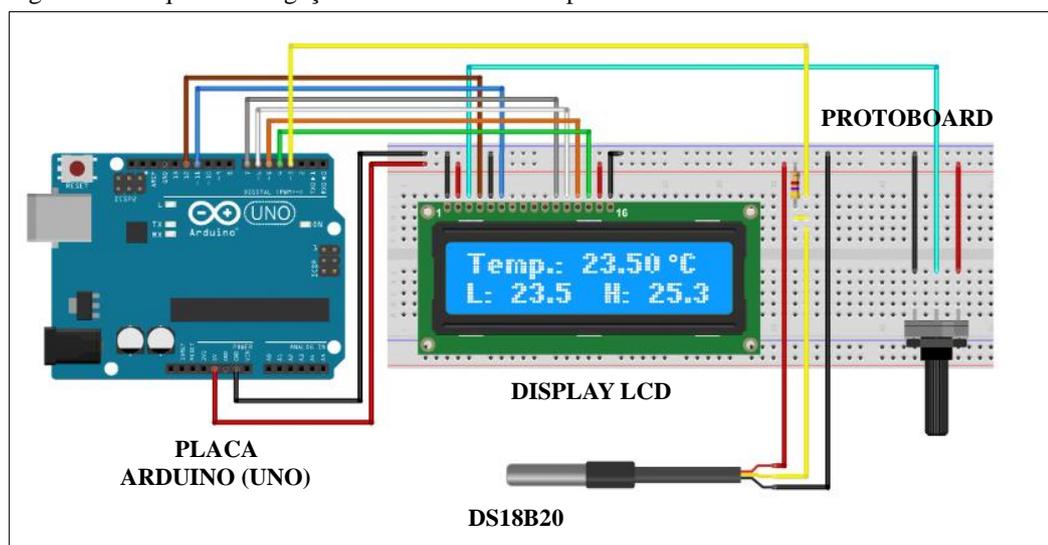


Fonte: Autor, 2022.

3.2.1.1 Instrumentação dos protótipos com sensores de temperatura

Considerando o objetivo do presente trabalho, para observar a diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a cobertura dos destiladores solares foram utilizados seis sensores de temperatura DS18B20 do tipo sonda à prova d'água, com capacidade de medições na faixa de -55°C a 125°C , interligados a um *protoboard* (matriz de contato) e uma placa de Arduino modelo UNO (THOMSEN, 2015), conforme o esquema apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Esquema de ligação dos sensores de temperatura DS18B20 ao Arduino

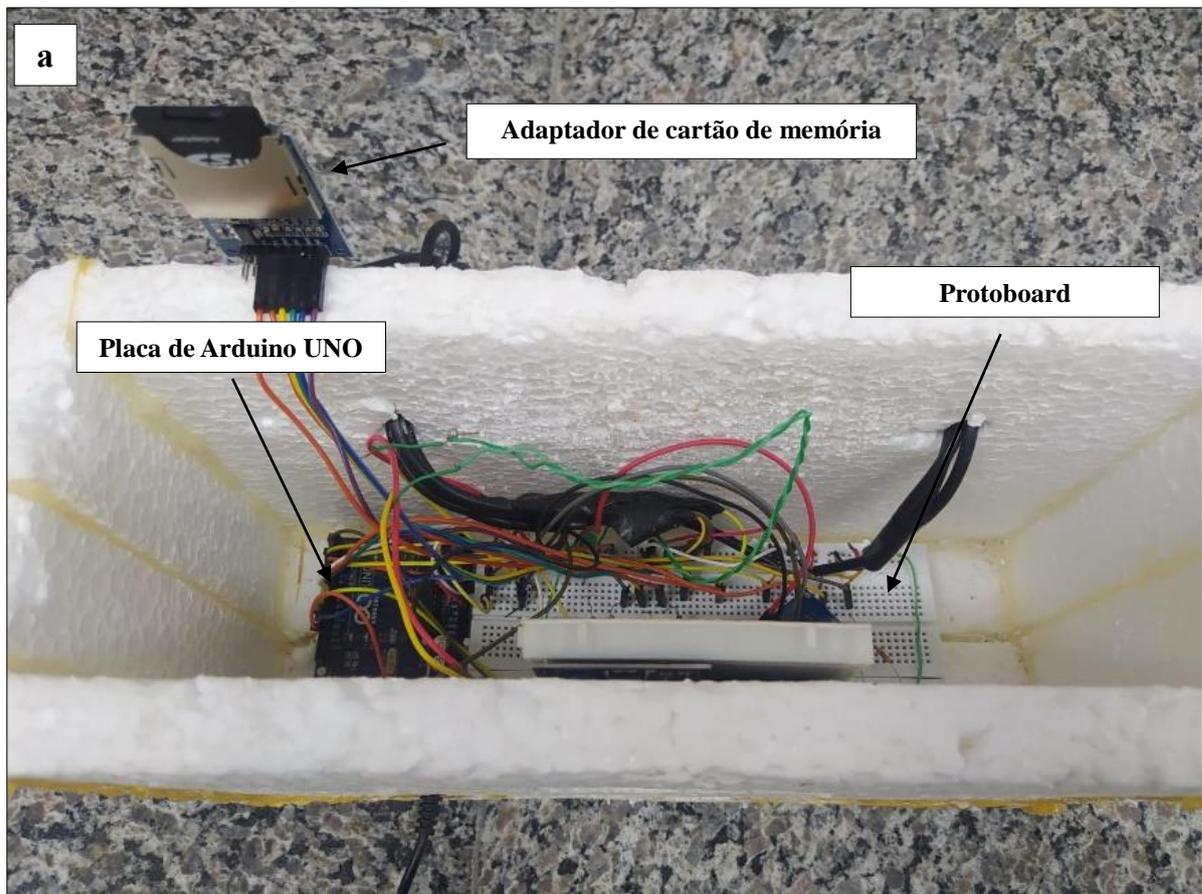


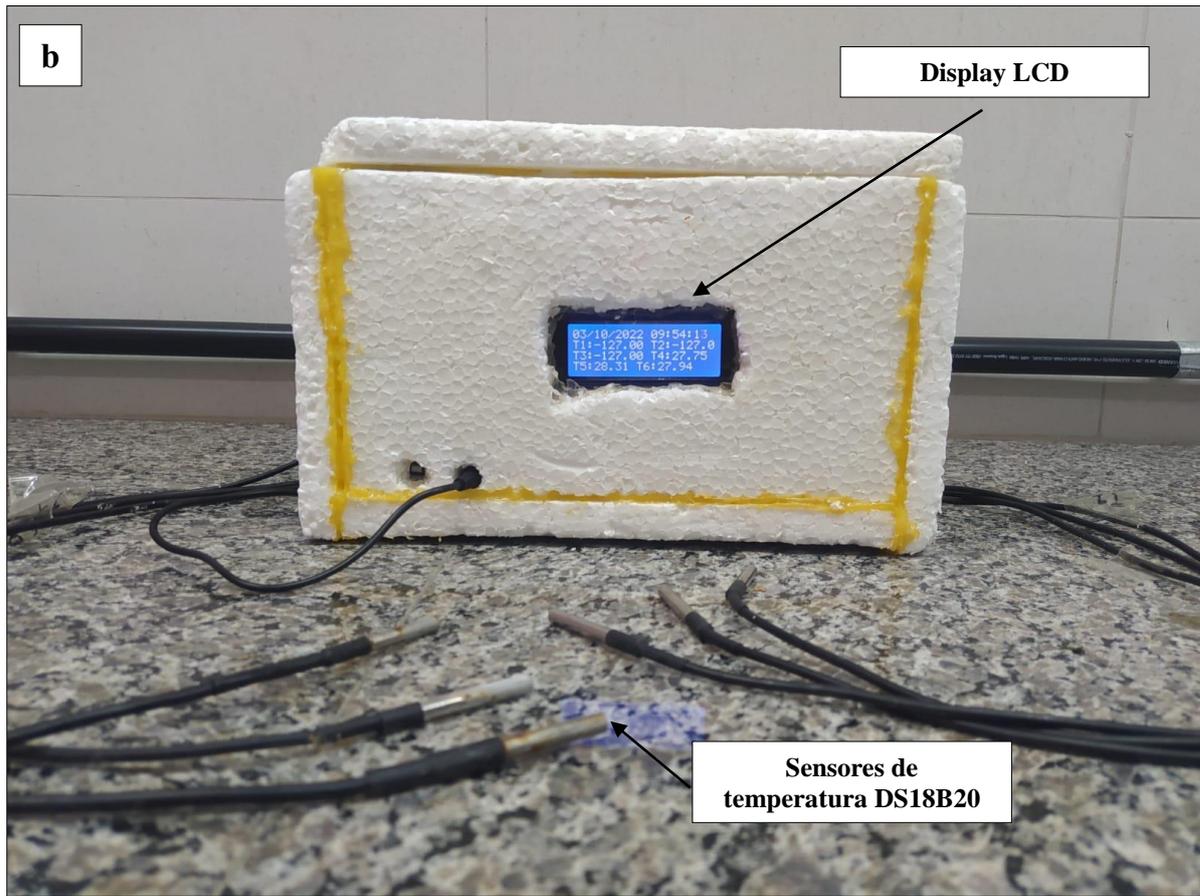
Fonte: Thomsen, 2015.

No que tange ao sistema Arduino, este foi escolhido por apresentar placas relativamente baratas em comparação com outras plataformas, um software gratuito e um ambiente de programação simples (ARDUINO, 2018).

A Figura 23 apresenta a estrutura interna e externa do sistema montado para a avaliação da temperatura do teto e da bacia dos destiladores, com detalhe para o posicionamento dos seus componentes estruturais. Neste caso, além dos elementos já citados, também é possível observar um adaptador de cartão de memória acoplado ao sistema. Este instrumento foi introduzido ao conjunto para salvar os dados de temperatura obtidos durante os ensaios de destilação.

Figura 23 - Componentes internos (a) e externos (b) do sistema Arduino





Fonte: Thomsen, 2015.

3.2.2 Avaliação dos sistemas de destilação solar na presença dos resíduos utilizados

Os ensaios para a avaliação do comportamento dos sistemas de destilação na presença dos resíduos utilizados neste trabalho, foram efetuados durante os meses de setembro, outubro e novembro de 2022, no jardim do Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Na realização dos ensaios, diferentes concentrações dos resíduos de granito e mármore foram testadas nos sistemas, a fim de se verificar a influência desse parâmetro na eficiência térmica dos destiladores. Baseado no estudo realizado por Attia *et al.* (2022), a seguinte faixa de concentrações foi analisada nos ensaios: 2, 4, 8, 12, 24 mg/mL.

Em relação à água utilizada para a alimentação dos sistemas de destilação, esta foi coletada de um poço artesiano localizado nas dependências do Campus de Crateús da UFC.

No primeiro momento, foram realizados ensaios de calibração dos destiladores, isto é, os três sistemas foram submetidos a testes somente com água, com o objetivo de se detectar possíveis diferenças construtivas entre eles que pudessem influenciar os seus desempenhos.

Após esse processo, para todas as concentrações anteriormente mencionadas, foram efetuados ensaios utilizando três destiladores, o primeiro contendo o resíduo de granito (D1), e o segundo o de mármore (D2), ambos com a mesma concentração e um volume de água previamente definido de 300 mL. O terceiro destilador, por sua vez, recebia apenas o volume de água, atuando como um sistema controle (D3), conforme apresentado na Figura 24.

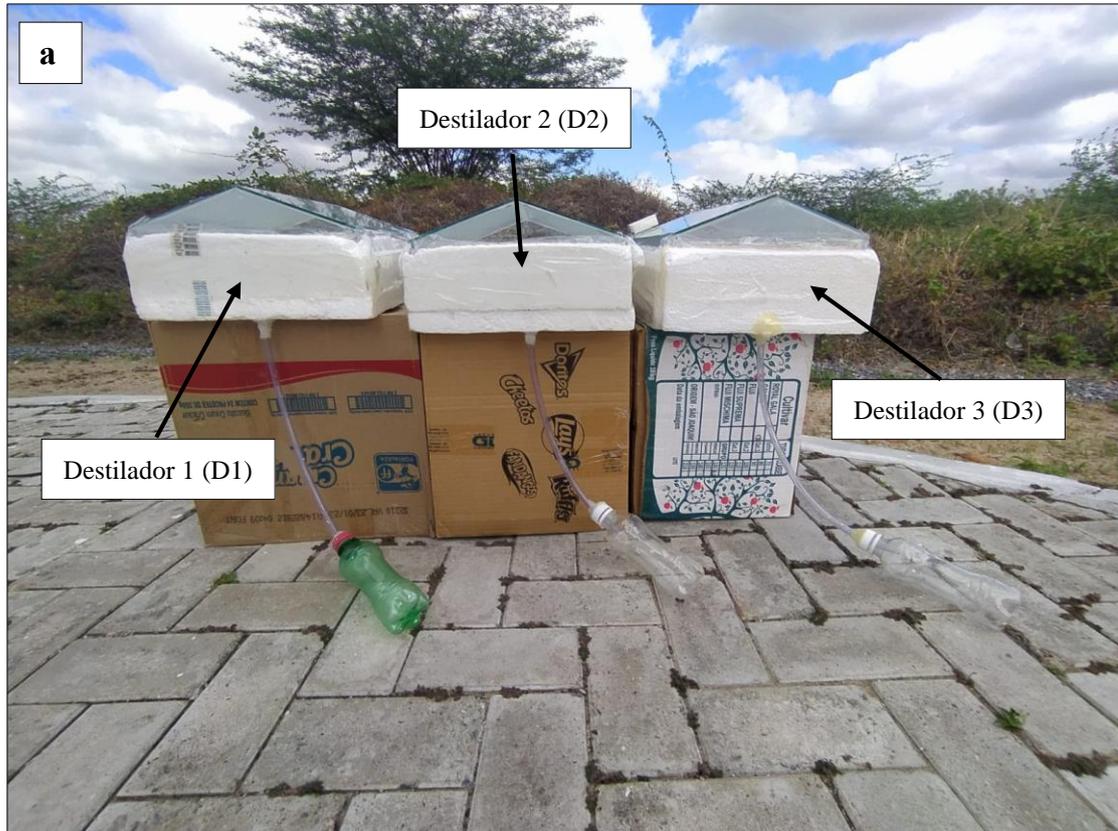
Figura 24 – Bacias introduzidas nos sistemas de destilação durante a execução dos ensaios



Fonte: Autor, 2022.

Na execução dos experimentos, após a preparação das soluções, as bacias de contenção eram inseridas nos respectivos destiladores solares, cujas extremidades laterais foram vedadas com fita adesiva logo em seguida. Posteriormente, os três sistemas equipados com os sensores de temperatura nos tetos e nas bacias foram expostos ao sol, durante um intervalo de tempo de 8 horas (08:00 às 16:00), conforme pode ser visualizado na Figura 25.

Figura 25 - Experimento montado, com detalhe para o posicionamento dos destiladores em (a) e a instrumentação dos sistemas com os sensores de temperatura em (b)



Fonte: Autor, 2022.

Com o intuito de verificar a produção horária de água destilada e utilizá-la no cálculo da eficiência térmica das unidades de destilação e, conseqüentemente, na determinação da concentração ideal de resíduos nos sistemas, a cada 1 hora de experimento, a massa do fluido coletado por cada destilador foi medida com o auxílio de uma mini balança digital eletrônica de precisão Pocket Scale modelo MH-500, com capacidade de medição na faixa de 0,1g até 500g. Além disso, as temperaturas do fluido de trabalho e da cobertura de cada sistema, coletadas pelos sensores térmicos do Arduino, também foram registradas a cada 1 hora, para a análise da diferença de temperatura desses componentes.

Como mencionado por Garg e Mann (1975), além dos parâmetros operacionais e de projeto, os parâmetros climáticos têm uma influência direta na performance dos destiladores solares, em especial a radiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento e a umidade atmosférica. Assim, usando os dados registrados pela estação meteorológica automática de Crateús/CE e disponibilizados no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi realizada a análise das condições climáticas nos dias dos experimentos de destilação.

3.2.2.1 Determinação da eficiência térmica dos sistemas de destilação solar

Para a determinação da eficiência térmica total (η) dos destiladores solares propostos, utilizou-se a Equação 3 adaptada por Sharshir *et al.* (2016), que relaciona a potência para gerar vapor de água e a potência recebida pela radiação solar.

$$\eta = \frac{\Sigma m_t \times h_{lv}}{\Sigma I(t) \times A} \quad (3)$$

onde,

η = eficiência térmica total (%);

m_t = taxa de destilação (kg/s) em dado instante de tempo t;

h_{lv} = calor latente da água (J/kg);

$I(t)$ = irradiação (W/m²) em dado instante de tempo t;

A = área da assadeira (m²).

3.3 Análise da qualidade da água produzida

A qualidade da água pode ser caracterizada por uma série de parâmetros que retratam as suas principais propriedades. Esses critérios são estabelecidos pela Portaria GM/MS N° 888 do Ministério da Saúde, de 04 de maio 2021, que alterou o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS N° 05, de 28 de setembro de 2017, e dispõe sobre o controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Dessa forma, a fim de analisar as principais propriedades da água produzida pelos destiladores solares propostos neste trabalho, bem como verificar se estas cumprem os padrões determinados pela Portaria GM/MS N° 888, a água bruta, a água gerada durante o ensaio de destilação com a maior concentração de resíduos nos sistemas D1 e D2 (24 mg/mL) e a água produzida pelo sistema controle D3, foram submetidas a ensaios físico-químicos inorgânicos de pH, condutividade elétrica e cor. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Física do Campus de Crateús da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Os processos de coleta das amostras (água bruta e destilada) para a realização dos ensaios citados seguiram o padrão indicado pelo Guia Nacional de Coleta e Preservação de amostras de água, sedimentos, comunidades aquáticas e efluentes líquidos, publicado pela ANA em 2011. O Quadro 1 apresenta uma síntese dos tipos de frascos, técnicas de preservação e armazenamento recomendado pelo documento, segundo os parâmetros de qualidade da água que foram analisados neste trabalho.

Quadro 1 - Recipientes, técnicas de preservação e armazenamento para ensaios físico-químicos inorgânicos de água

Ensaio	Recipiente	Preservação	Armazenamento	Prazo de validade
pH	-	-	-	Ensaio imediato
Condutividade	-	-	-	Ensaio imediato
Cor	Plástico	Resfriamento	Refrigeração à 4°C	24 horas

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2011.

O ensaio de pH foi realizado utilizando-se tiras universais impregnadas com reagentes que mudam de cor dependendo do caráter do meio, conforme apresentado por Beretta *et al.* (2015). Na execução deste processo, as fitas foram introduzidas nos béqueres contendo as amostras a serem analisadas por cerca de 5 segundos. Após a secagem destes elementos, a cor observada em cada uma foi comparada com a escala fornecida pelo fabricante. A Figura 26 exhibe os béqueres com as amostras de água analisadas, bem como as fitas após a secagem.

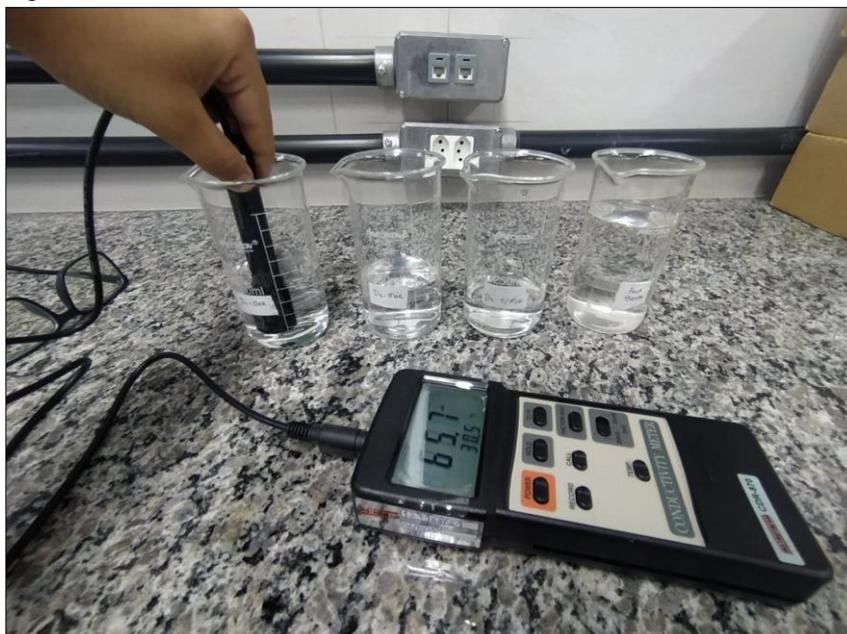
Figura 26 - Análise de pH das amostras de água bruta e destilada



Fonte: Autor, 2022.

O ensaio de condutividade elétrica foi realizado segundo a metodologia proposta no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – Method 2510* (APHA; AWWA; WEF, 2012), utilizando-se o condutímetro manual CDR – 870 da Instrutherm. De modo geral, o procedimento para a verificação das condutividades das amostras de água, consistiu em mergulhar o eletrodo previamente calibrado em cada uma das soluções e anotar o valor exibido no display do dispositivo (Figura 27).

Figura 27 - Procedimento realizado no ensaio de condutividade elétrica



Fonte: Autor, 2022.

O número de cor (NC), expresso na Equação 4, foi o parâmetro utilizado para a caracterização da cor das amostras. De acordo com Krull e Döpkins (2004), a determinação do número de cor depende da medição do *Spectral Absorption Coefficient* (SAC) na faixa visível do espectro, nos comprimentos de onda de 436 nm, 525 nm e 620 nm. Ainda segundo os autores, o SAC pode ser medido pelo valor da absorbância (Abs) em uma célula de l (cm), usando a Equação 5.

$$NC = \frac{SAC_{436}^2 + SAC_{525}^2 + SAC_{620}^2}{SAC_{436} + SAC_{525} + SAC_{620}} \quad (4)$$

$$SAC = \frac{Abs}{l} \quad (5)$$

Os valores de absorbância na faixa analisada foram definidos com o auxílio de um espectrofotômetro digital UV-VIS da marca Kasuaki. A Figura 28 apresenta o posicionamento da célula no interior do equipamento para a realização de uma das análises.

Figura 28 - Posicionamento da célula no interior do espectrofotômetro



Fonte: Autor, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo foi dividido em três seções principais, onde a primeira apresenta os resultados da caracterização dos resíduos, a segunda exhibe os dados dos ensaios de destilação solar e a terceira aborda sobre os resultados das análises físico-químicas da água produzida pelos sistemas.

4.1 Caracterização dos resíduos utilizados

Nesta seção estão apresentados os dados obtidos a partir dos ensaios realizados para a caracterização das amostras de granito e mármore, tanto para os resíduos finos, quanto para as aparas de chapas coletadas.

4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

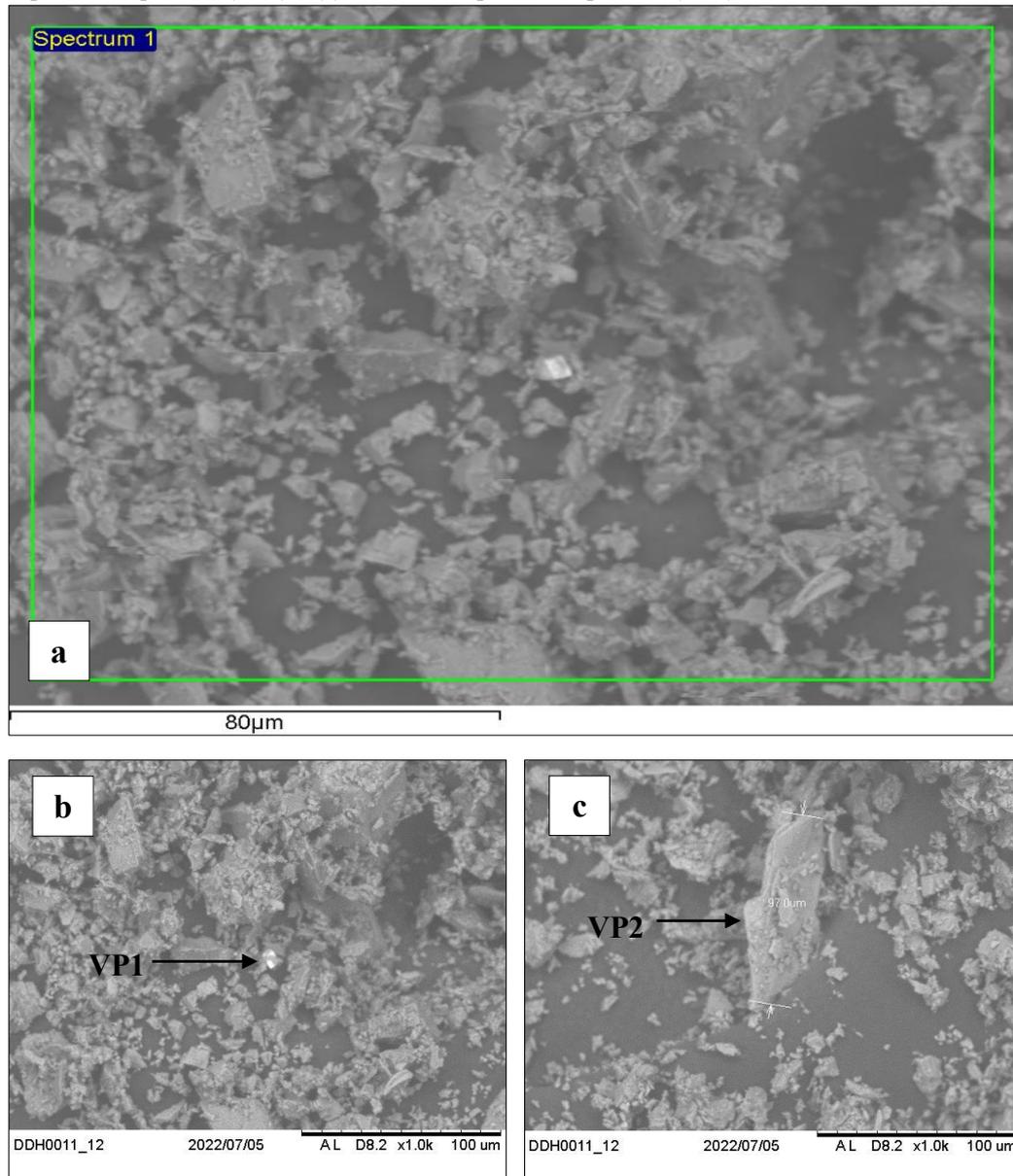
A Figura 29 exhibe micrografias do resíduo de granito obtidas por MEV, onde é possível observar que a amostra analisada é predominantemente composta por partículas de formato irregular e tamanhos variados.

No que tange à composição química, o mapeamento realizado por EDS na área (polígono verde) da Figura 29 (a), indicou que as partículas do resíduo de granito são constituídas por oxigênio, silício, alumínio, sódio, potássio e ferro, conforme composição apresentada na Tabela 2. Além da varredura espectral por área em (a), a Figura 29 ainda apresenta dois pontos na amostra de granito onde foram realizadas varreduras espectrais pontuais, denominadas de VP1 em (b) e VP2 em (c), cujas composições também estão exibidas na Tabela 2.

Observa-se que em VP1, além dos elementos identificados no mapeamento por área (oxigênio, silício, alumínio, sódio, potássio e ferro), identificou-se a presença do elemento zircônio em grande proporção (24,535%), o que indica a existência do mineral zircão ($ZrSiO_4$) na amostra de granito. Em VP2, observa-se uma maior proporção dos elementos que compõem uma albita ($NaAlSi_3O_8$), de acordo com Peixoto, Ferreira e Mattos (2016).

Além disso, a presença do elemento ferro, identificado tanto na varredura espectral por área, quanto nas análises pontuais da amostra de granito, pode estar relacionado com a gênese da rocha e/ou com o material desprendido das lâminas das máquinas que realizam o corte de chapas durante o beneficiamento secundário.

Figura 29 - Micrografias da amostra de granito: (a) varredura espectral por área, (b) varredura espectral no ponto 1 (VP1) e (c) varredura espectral no ponto 2 (VP2)



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 2 - Composição química da amostra de granito detectada na varredura espectral por área e nas análises pontuais VP1 e VP2 via EDS

Elemento	Composição (%)		
	Área	VP1	VP2
Oxigênio	49,443	41,448	45,004
Silício	36,416	24,546	28,368
Alumínio	6,556	3,634	9,172
Sódio	3,519	1,807	3,15
Potássio	3,252	1,635	8,146
Ferro	0,814	1,042	6,16
Cálcio	-	0,638	-
Zircônio	-	24,535	-

Fonte: Autor, 2022.

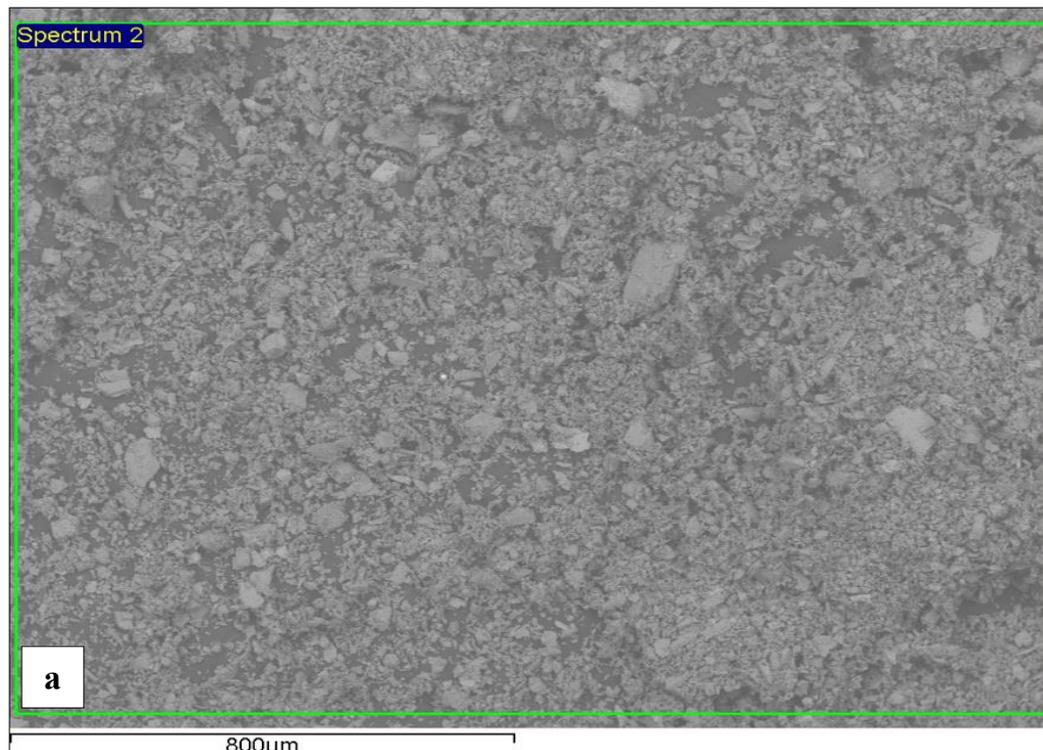
No caso do resíduo fino de mármore, as micrografias obtidas por MEV estão apresentadas na Figura 30. Observa-se que, assim como o granito, a amostra de mármore é majoritariamente composta por partículas de formato irregular e tamanhos variados.

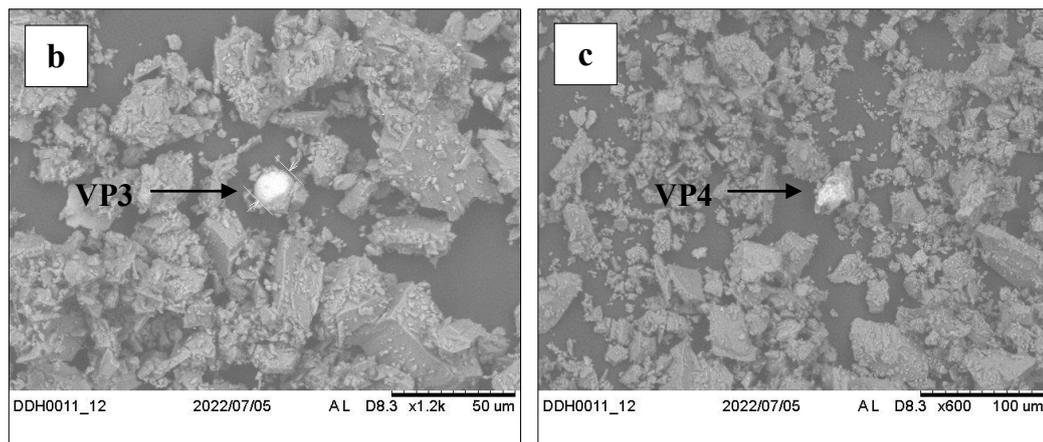
Em relação à composição química, o mapeamento via EDS por área (polígono verde) da Figura 30 (a), indicou a presença de oxigênio, cálcio, magnésio e silício na amostra de mármore, conforme percentuais apresentados na Tabela 3. Esta composição é característica de um mármore dolomítico, dada a participação considerável de magnésio na amostra (9,167%), segundo Pettijohn (1957).

Neste caso, também foram realizadas duas varreduras espectrais pontuais, denominadas de VP3 em (b) e VP4 em (c), conforme pode ser visualizado na Figura 30. Além disso, os mapeamentos das distribuições dos elementos químicos realizados por EDS para as duas varreduras pontuais também estão presentes na Tabela 3.

Verifica-se que além dos elementos determinados na varredura por área (oxigênio, cálcio, magnésio e silício), ambos os pontos VP3 e VP4, apresentam uma grande porcentagem de ferro em sua composição, o que indica a existência do elemento na amostra de mármore. Assim como indicado para o resíduo de granito, sua presença pode estar associada com a gênese da rocha e/ou devido ao desgaste das lâminas das máquinas que realizam o corte de chapas.

Figura 30 –Micrografias da amostra de mármore: (a) varredura espectral por área, (b) varredura espectral no ponto 3 (VP3) e (c) varredura espectral no ponto 4 (VP4)





Fonte: Autor, 2022.

Tabela 3 - Composição química da amostra de mármore detectada na varredura espectral por área e nas análises pontuais VP3 e VP4 via EDS

Elemento	Composição (%)		
	Área	VP3	VP4
Oxigênio	59,886	34,678	44,013
Cálcio	29,45	7,543	7,178
Magnésio	9,167	2,892	3,783
Silício	1,497	0,316	0,367
Ferro	-	53,43	44,659
Manganês	-	1,142	-

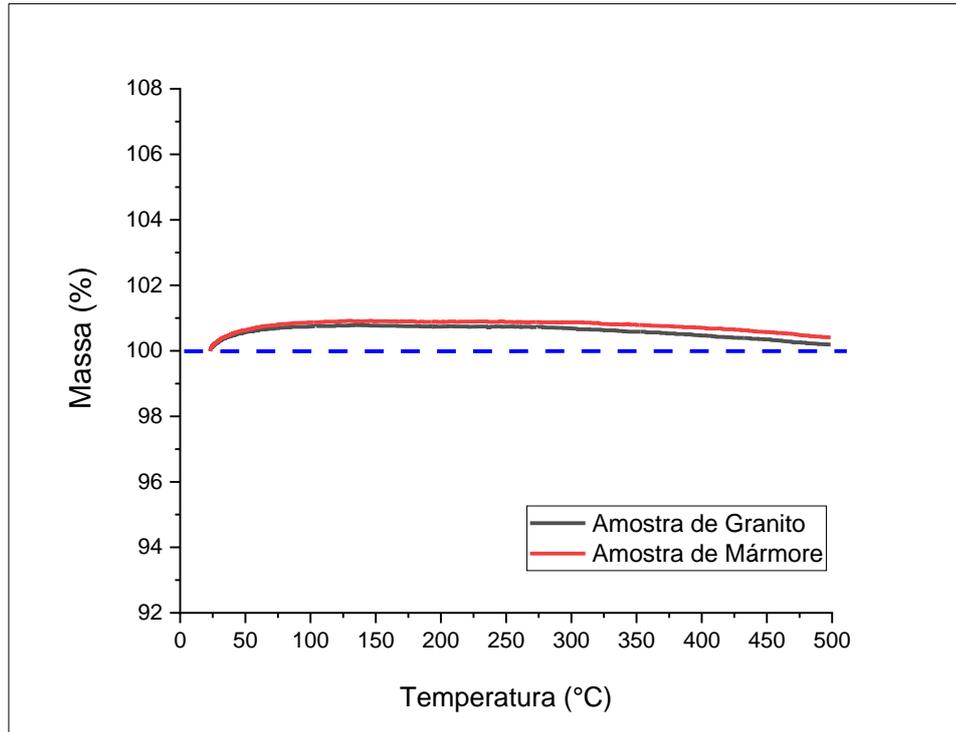
Fonte: Autor, 2022.

4.1.2 Análise Termogravimétrica

A Figura 31 exibe as curvas obtidas para os resíduos de granito e mármore após a realização dos ensaios de termogravimetria. Verifica-se que, devido a um efeito transitório do equipamento, a porcentagem de massa de ambos os resíduos permaneceu ligeiramente superior a 100% (linha azul) durante todo o ensaio. No entanto, mesmo com a ocorrência desse efeito, ainda é possível observar que, na faixa de temperatura analisada (23 a 498°C), as variações de massa de ambas as amostras apresentaram comportamentos térmicos estáveis.

Para a aplicação destes resíduos em destiladores solares, este é um resultado importante, uma vez que durante a realização dos ensaios, os sistemas também são submetidos a variações de temperatura, onde devem permanecer estáveis.

Figura 31 - Variação de massa dos resíduos em função da temperatura



Fonte: Autor, 2022.

4.1.3 Teor de umidade pelo Método da Estufa

A Tabela 4 apresenta os teores de umidade obtidos para as amostras de granito e mármore através do Método da Estufa. Observa-se que ambos os casos apresentaram teores de umidade menores do que 1%, resultado que pode ser explicado pela origem dos resíduos. Isso porque, o resíduo de granito foi coletado de uma pilha oriunda de um filtro prensa que, após a etapa de filtragem, foi disposta ao ar livre. Enquanto que a amostra de mármore foi obtida após o corte à seco de uma chapa.

Tabela 4 - Teor de umidade dos resíduos de granito e mármore

Resíduo	Medida	Cápsula (g)	Cápsula + Solo + Água (g)	Cápsula + Solo (g)	Água (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)	Média (%)	Desvio padrão
Granito	1	74,350	94,340	94,270	0,070	19,920	0,351	0,368	0,029
	2	72,080	92,090	92,010	0,080	19,930	0,401		
	3	71,870	91,870	91,800	0,070	19,930	0,351		
Mármore	1	73,440	93,450	93,420	0,030	19,980	0,150	0,184	0,058
	2	70,070	90,070	90,040	0,030	19,970	0,150		
	3	72,090	92,100	92,050	0,050	19,960	0,251		

Fonte: Autor, 2022.

4.1.4 Massa específica por Picnometria à água

Os resultados de massa específica obtidos para os resíduos de granito e mármore pelo método do picnômetro à água, normatizado pela DNER-ME 093/94, estão apresentados detalhadamente na Tabela 5. Nota-se que as amostras de granito e mármore utilizadas possuem massa específica média de 2,52 g/cm³ e 2,65 g/cm³, respectivamente.

Tabela 5 - Massas específicas dos resíduos de granito e mármore obtidas pelo método do picnômetro

Resíduo	Medidas	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	Massa específica (g/cm ³)	Média (g/cm ³)	Desvio padrão
Granito	1	36,390	46,350	92,940	87,010	2,471	2,524	0,078
	2	38,530	48,400	95,720	89,820	2,486		
	3	40,520	49,640	97,880	92,250	2,613		
Mármore	1	31,250	41,250	87,820	81,730	2,558	2,655	0,099
	2	30,610	40,640	87,200	80,810	2,755		
	3	32,500	42,500	88,890	82,660	2,653		

Fonte: Autor, 2022.

4.1.5 Análise granulométrica

Segundo Caputo (1988), os resultados obtidos através da combinação do peneiramento e da sedimentação são representados, comumente, por meio de uma curva granulométrica. Nesta representação gráfica, o eixo das abcissas apresenta o diâmetro dos grãos (mm) em escala logarítmica, enquanto que o eixo das ordenadas exibe a porcentagem passante em termos do peso da amostra. A análise da curva é realizada mediante os critérios estabelecidos pela NBR 6502/1995, que apresenta a diferença entre os tipos de solos e rochas com base no diâmetro dos grãos predominantes no material, conforme a Tabela 6.

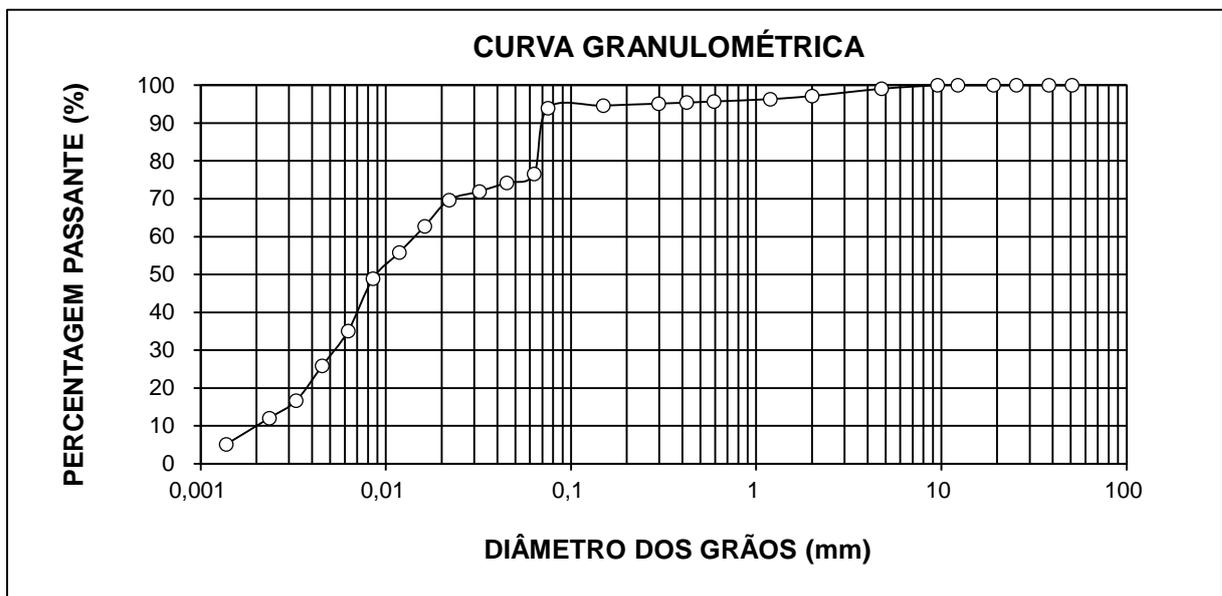
Tabela 6 - Nomenclatura com base no diâmetro das partículas

Fração	Limites definidos pela NBR 6502/1995
Matacão	200 mm – 1m
Pedra	60 – 200 mm
Pedregulho	2,0 – 60 mm
Areia Grossa	0,6 – 2 mm
Areia Média	0,2 – 0,6 mm
Areia Fina	0,06 – 0,2 mm
Silte	0,002 – 0,06 mm
Argila	Inferior a 0,002 mm

Fonte: Adaptado de NBR 6502,1995.

Nessa direção, a curva granulométrica obtida após a combinação dos ensaios de peneiramento e sedimentação para a amostra de granito está ilustrada na Figura 32. Observa-se que cerca de 95% do resíduo passa na peneira de 0,075 mm de abertura que, segundo Fernandes (2016), determina o limiar entre a fração grossa e a parcela fina do material. Neste sentido, pode-se concluir que a maior porcentagem das partículas deste resíduo possui granulometria fina, principalmente, com diâmetros entre 0,002 - 0,06 mm (fração silte), conforme apresentado na Tabela 7.

Figura 32 - Curva granulométrica da amostra de granito



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 7 - Dados do ensaio de granulometria da amostra de granito

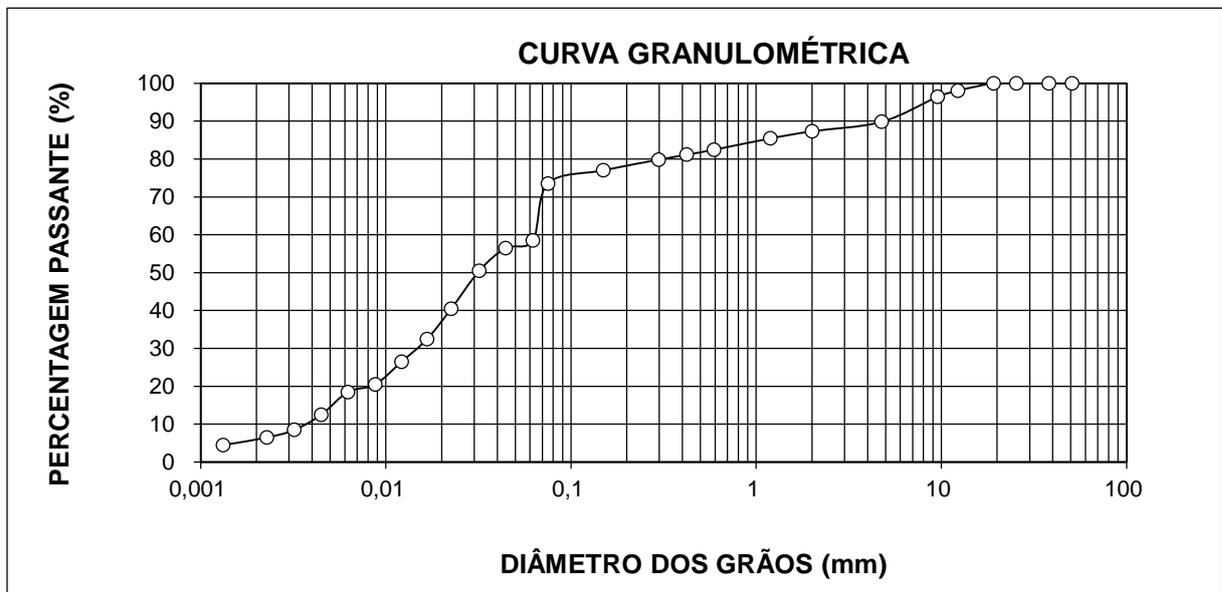
Fração	Limites definidos pela NBR 6502/1995	(%)
Matacão	200 mm – 1m	-
Pedra	60 – 200 mm	-
Pedregulho	2,0 – 60 mm	0,92
Areia Grossa	0,6 – 2 mm	1,45
Areia Média	0,2 – 0,6 mm	0,57
Areia Fina	0,06 – 0,2 mm	18,59
Silte	0,002 – 0,06 mm	64,51
Argila	Inferior a 0,002 mm	12,05

Fonte: Autor, 2022.

Para o resíduo de mármore, a curva granulométrica está apresentada na Figura 33. Neste caso, é possível observar que cerca de 75 % da amostra ensaiada é passante na peneira de 0,075 mm de abertura, o que indica uma maior quantidade de material fino na composição do resíduo, especialmente, com diâmetros entre 0,002 - 0,06 mm (fração silte), conforme apresentado na Tabela 8.

Ainda segundo a Tabela 8, pode-se observar que a amostra de mármore apresentou uma fração considerável de pedregulho na análise (10,17%), se comparado ao resíduo de granito (0,92%). Este fato pode ser explicado devido ao desprendimento de algumas aparas com tamanhos maiores do que a granulometria comumente obtida com o corte de chapas, atividade que gerou o resíduo em questão.

Figura 33 - Curva granulométrica da amostra de mármore



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 8 – Dados do ensaio de granulometria da amostra de mármore

Fração	Limites definidos pela NBR 6502/1995	(%)
Matacão	200 mm – 1m	-
Pedra	60 – 200 mm	-
Pedregulho	2,0 – 60 mm	10,17
Areia Grossa	0,6 – 2 mm	4,88
Areia Média	0,2 – 0,6 mm	2,63
Areia Fina	0,06 – 0,2 mm	21,34
Silte	0,002 – 0,06 mm	52,02
Argila	Inferior a 0,002 mm	6,46

Fonte: Autor, 2022.

4.1.6 Análise macroscópica da amostra de granito

Devido a formação bem definida dos grãos de quartzo, epidoto, biotita e muscovita, foi possível estimar a olho nu que eles ocupam um total de 31%, 3%, 5% e 1% do volume da amostra de granito apresentada na Figura 34, respectivamente. Os outros 60% correspondem aos minerais que compõem a matriz da rocha, isto é, o material de granulometria fina e coloração esbranquiçada que reveste as partículas mais grosseiras da amostra.

Tendo em vista o tamanho reduzido das partículas da matriz rochosa, visualmente não foi possível identificar claramente quais minerais a compõem. No entanto, utilizando os resultados obtidos via EDS foi possível inferir que a matriz é composta, principalmente, por 35% de plagioclásio (albita) e 25% de feldspato potássico, tendo em conta que a análise microscópica indicou a existência dos elementos sódio e potássio na amostra, importantes na composição destes minerais, respectivamente.

Azevedo *et al.* (2015) também analisou macroscopicamente o tipo de rocha ornamental objeto de estudo e constatou que a mesma é majoritariamente composta por quartzo (33,5%), plagioclásio (35%) e feldspato potássico (23%), bem próximo ao encontrado em termos de volume ocupado na rocha.

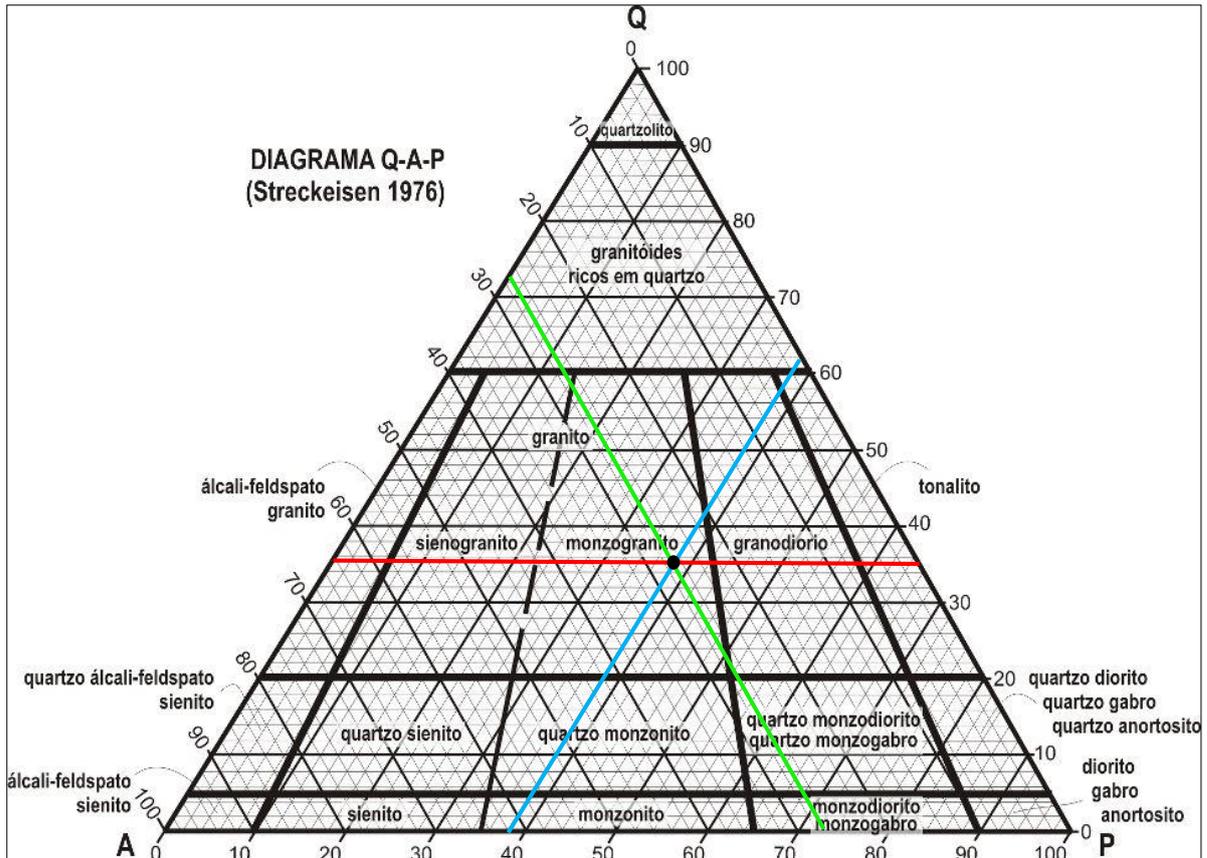
Figura 34 - Amostra utilizada na análise macroscópica da rocha



Fonte: Autor, 2022.

Do diagrama QAP, tendo em conta a normalização do total de minerais identificados na amostra para quartzo (35%), plagioclásio (38%) e feldspato potássico (27%), conforme apresentado na Figura 35, a rocha foi identificada como sendo um monzogranito.

Figura 35 – Classificação da rocha granítica segundo o diagrama QAP



Fonte: Adaptado de Quinário, 2013.

Além da composição mineralógica, na análise macroscópica também foi possível observar que a amostra possui uma estrutura maciça e que a maioria dos seus grãos ocorre sob a forma semiarredondada. Ademais, a Tabela 9 apresenta o tamanho das partículas dos minerais dispersos na matriz da rocha.

Tabela 9 - Tamanho dos grãos da amostra dispersos na matriz

Minerais	Tamanho dos grãos (mm)
Quartzo	2 - 9
Biotita	2 - 4
Epidoto	2 - 3
Muscovita	1 - 1,1

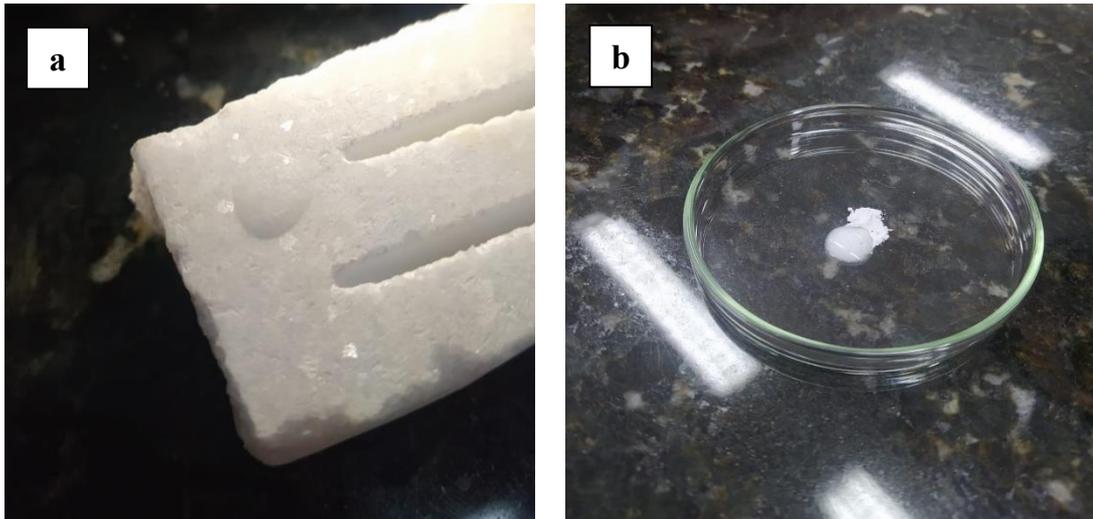
Fonte: Autor, 2022.

4.1.7 Ataque químico com ácido clorídrico na amostra de mármore

A Figura 36 apresenta o resultado da reação obtida após a aplicação do ácido clorídrico (HCl) na superfície da apara de mármore em (a) e do resíduo fino em (b). Observa-se que, em ambos os casos, a amostra não apresentou efervescência ao ser exposta à substância,

característica de um mármore dolomítico, segundo o Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (2022). Este resultado está compatível com o mapeamento por área obtido via EDS, que apontou uma presença considerável de magnésio (9,167%) na composição da amostra, o que também indica o caráter dolomítico do mármore.

Figura 36 – Ataque químico com ácido clorídrico na amostra de mármore



Fonte: Autor, 2022.

4.2. Ensaios de destilação solar

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos através dos testes de calibração dos protótipos, assim como dos ensaios de operação dos sistemas na presença dos resíduos de granito e mármore, com detalhe para a produção de água destilada acumulada, eficiência térmica, análise da concentração ótima de resíduos nos sistemas e influência da diferença de temperatura na produção.

4.2.1 Calibração dos protótipos

Os resultados de produção de água destilada acumulada (g), obtidos nos testes de calibração dos protótipos, bem como as condições climáticas no qual foram submetidos, estão detalhados na Tabela 10. Observar-se que no primeiro ensaio realizado, os destiladores apresentaram uma diferença considerável nos valores de produção de água destilada acumulada, em especial o destilador 1 (D1), que produziu 25,8 g e 31,2 g de água a menos que o destilador 2 (D2) e o destilador 3 (D3), respectivamente. Resultado que foi influenciado por um vazamento localizado na cobertura do sistema, fato observado durante a realização do ensaio.

Assim, buscando evitar vazamentos ao longo dos ensaios seguintes, todas as extremidades das coberturas dos três protótipos foram vedadas com mais uma camada de cola atóxica. Verifica-se que após esse processo, os desempenhos dos destiladores quanto as produções de água passaram a ser bastante similares, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de calibração dos protótipos

Ensaio	Parâmetros Climáticos				Produção acumulada (g)		
	Irradiação solar média (kJ/m ²)	Temperatura ambiente média (°C)	Velocidade média dos ventos (m/s)	Umidade média (%)	D1 ^(a)	D2 ^(b)	D3 ^(c)
1	1789,98	30,34	2,25	52,56	78,40	103,20	109,60
2	1524,58	28,87	3,88	52,78	94,60	97,40	99,60
3	1357,05	28,09	2,71	51,56	70,90	73,20	75,90
4	1475,09	27,77	1,99	51,91	76,20	74,90	79,30

(a) D1 = Destilador solar 1; (b) D2 = Destilador solar 2; (c) D3 = Destilador solar 3.

Fonte: Autor, 2022.

4.2.2 Avaliação dos sistemas de destilação na presença dos resíduos utilizados

Após a calibração dos protótipos, foram realizados testes para a avaliação da influência dos resíduos em seus desempenhos. Para cada concentração de granito e mármore nos sistemas (2, 4, 8, 12, 24 mg/mL) foram efetuados três ensaios, no qual os resultados estão detalhados nos próximos tópicos.

4.2.2.1 Produção de água destilada acumulada

A Tabela 11 apresenta os resultados da produção de água destilada acumulada (g), para os destiladores que operaram com resíduos (D1 e D2) e para o sistema de controle (D3), bem como as condições médias de radiação solar, temperatura ambiente, velocidade dos ventos e umidade para cada dia de ensaio, obtidas no site do INMET.

É possível observar que, para todas as concentrações analisadas, os destiladores que operaram na presença dos resíduos de granito e mármore, produziram uma massa de água destilada maior do que o sistema controle (sem resíduos). Esse efeito já era esperado, pois, assim como explicado por Bouçanova, Vital e Malagón (2020), a introdução de um material com maior condutividade térmica do que a água, tende a elevar o fluxo de evaporação do sistema e, como consequência, a produção de água destilada na saída do destilador.

Além disso, analisando especificamente os dois sistemas que operaram com resíduos (D1 e D2), verifica-se que, em termos de produção acumulada, o destilador que operou com o granito, obteve um desempenho melhor do que o sistema que recebeu o mármore, em todos os experimentos realizados.

Observa-se ainda que, dentre todas as variáveis climáticas analisadas, a velocidade dos ventos e umidade apresentaram um efeito insignificante em comparação aos efeitos da radiação solar na destilação da água. Ou seja, a radiação solar foi o fator meteorológico que mais influenciou para a produção de água destilada durante os experimentos. O efeito insignificante da velocidade dos ventos e umidade pode ser visualizado, principalmente, ao se comparar a produção de água destilada em D1, D2 e D3 ao final dos ensaios 2 e 3, pois como a radiação solar média apresentou pouca variação de um dia para o outro, é possível observar separadamente a influência da velocidade média dos ventos e umidade média para a produção de água. Nota-se que mesmo com um aumento percentual de 101,12% na velocidade média dos ventos e 13,28% na umidade média, a produção de água destilada no ensaio 3, ainda assim não foi superior ao ensaio 2. Ressalta-se que a temperatura ambiente média não foi analisada nesta situação, porque a mesma apresentou pouca variação nos dias selecionados, bem como em todos os outros dias de ensaios, permanecendo no intervalo de 27,30°C a 30,03°C.

Tabela 11 - Produção de água destilada para cada ensaio realizado

Concentração de resíduos em D1 e D2 (mg/mL)	Ensaio	Parâmetros climáticos				Produção acumulada (g)		
		Irradiação solar média (kJ/m ²)	Temperatura ambiente média (°C)	Velocidade média dos ventos (m/s)	Umidade média (%)	D1 ^(a) Granito	D2 ^(b) Mármore	D3 ^(c) Sem resíduos
2	1	2008,68	29,62	2,97	51,78	169,18	160,50	106,52
	2	1715,74	29,82	1,79	54,44	124,66	123,79	86,04
	3	1603,48	28,29	3,60	61,67	119,04	116,57	85,43
4	4	1988,79	30,03	2,48	51,78	174,08	172,50	105,16
	5	1207,64	27,30	1,99	64,56	98,02	90,76	62,29
	6	1740,31	27,67	2,68	63,56	136,24	125,35	83,20
8	7	1145,54	27,84	2,91	63,44	109,48	103,02	58,30
	8	1556,82	27,61	1,94	64,78	135,50	122,95	79,02
	9	1719,46	27,33	2,03	65,44	142,52	134,74	81,62
12	10	1445,79	28,41	3,33	54,67	133,38	126,55	77,12
	11	1331,84	27,47	2,22	64,56	120,15	96,35	69,53
	12	1745,57	27,88	2,26	62,56	150,53	141,21	92,25
24	13	2034,42	28,57	3,20	57,33	172,30	151,14	97,58
	14	1761,12	27,53	3,41	60,44	146,80	137,20	92,90
	15	1526,36	27,82	2,78	59,33	119,78	108,82	78,02

(a) D1 Granito = Destilador que recebeu o resíduo de granito;

(b) D2 Mármore = Destilador que recebeu o resíduo de mármore;

(c) D3 Sem resíduos = Destilador que operou sem a presença de resíduos no sistema.

Fonte: Autor, 2022.

4.2.2.2 Eficiência térmica total

Os resultados da eficiência térmica total dos sistemas, calculada mediante a Equação 3, estão apresentados na Tabela 12. De maneira geral, mesmo recebendo a mesma irradiação solar durante os testes, as unidades com resíduos (D1 e D2), conseguiram ser mais eficientes do que o sistema de controle (D3), em todos os experimentos realizados.

Observa-se que no ensaio 7, cuja concentração de resíduos nos sistemas foi de 8 mg/mL, os destiladores D1 e D2 obtiveram uma eficiência total de 56,04% e 52,73%, o que representou um aumento de 26,20% e 22,89%, respectivamente, quando comparados com D3. Verifica-se ainda que neste teste, os sistemas D1 e D2 atingiram o seu melhor desempenho dentre todos os ensaios realizados, conseguindo produzir uma boa quantidade de água destilada, mesmo recebendo um baixo valor de irradiação solar média (1145,54 kJ/m²), a menor apresentada durante todos os experimentos, conforme apresentado na Tabela 11.

Nota-se também que o D1 apresentou o melhor desempenho em todos os experimentos realizados, se comparado ao D2. Além disso, a faixa de eficiência apresentada por D3 nos ensaios (27,38 – 31,61%), está próximo do valor de desempenho para destiladores solares convencionais, mencionado por Kalogirou (2013), cerca de 35%.

Tabela 12 - Eficiência total dos sistemas de destilação para cada ensaio realizado

Concentração de resíduos em D1 e D2 (mg/mL)	Ensaio	Eficiência total (%)			Aumento em relação a D3 (%)	
		D1 Granito ^(a)	D2 Mármore ^(b)	D3 Sem resíduos ^(c)	D1 Granito ^(a)	D2 Mármore ^(b)
2	1	48,36	45,88	30,45	17,91	15,43
	2	41,00	40,71	28,30	12,70	12,42
	3	42,15	41,28	30,25	11,90	11,03
4	4	49,76	49,30	30,06	19,70	19,25
	5	46,25	42,83	29,39	16,86	13,43
	6	44,84	41,25	27,38	17,46	13,87
8	7	56,04	52,73	29,84	26,20	22,89
	8	49,64	45,04	28,95	20,69	16,09
	9	54,87	51,88	31,43	23,45	20,45
12	10	54,67	51,87	31,61	23,06	20,26
	11	52,44	42,05	30,34	22,09	11,70
	12	50,18	47,07	30,75	19,43	16,32
24	13	48,40	42,46	27,41	20,99	15,05
	14	47,51	44,40	30,06	17,44	14,34
	15	46,20	41,97	30,09	16,11	11,88

(a) D1 Granito = Destilador que recebeu o resíduo de granito;

(b) D2 Mármore = Destilador que recebeu o resíduo de mármore;

(c) D3 Sem resíduos = Destilador que operou sem a presença de resíduos no sistema.

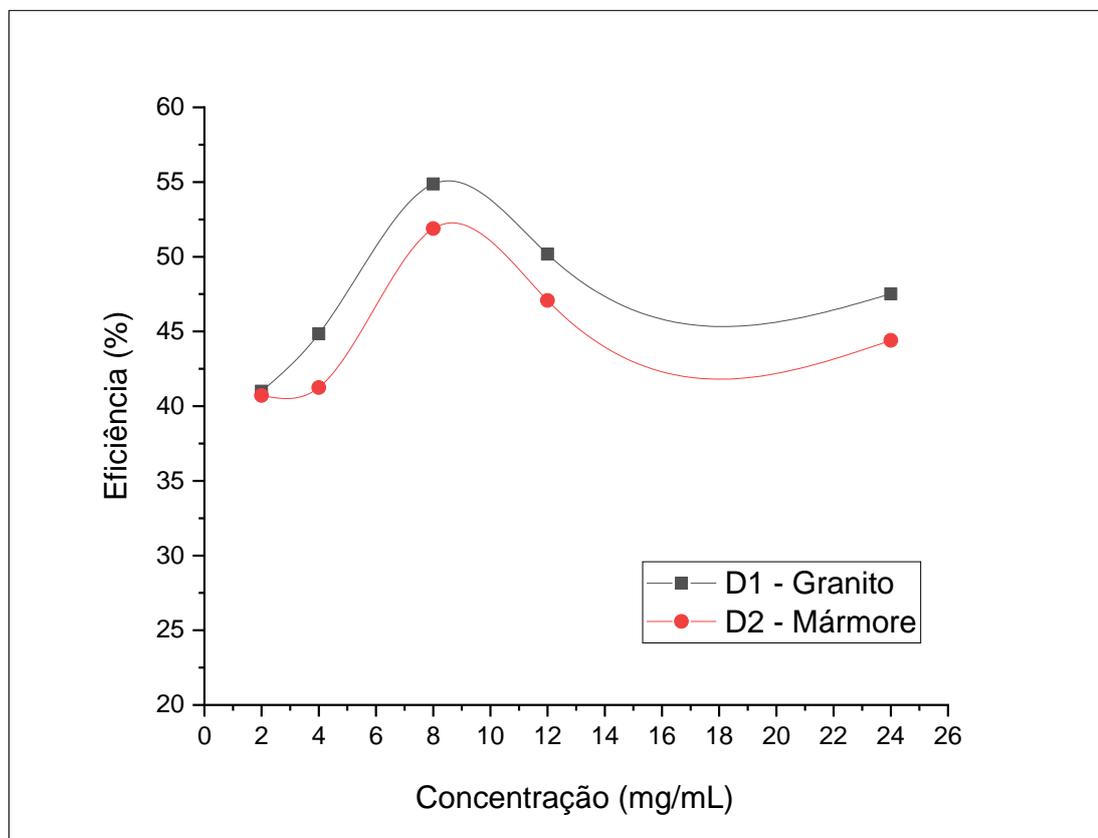
Fonte: Autor, 2022.

4.2.2.3 Concentração ótima de resíduos nos sistemas

Como observado anteriormente no tópico 4.2.2.1, a radiação solar se apresentou como o fenômeno climático mais influente para o desempenho dos destiladores durante a realização dos testes. Nesta perspectiva, a fim de analisar separadamente o efeito dos resíduos nos sistemas e definir a concentração ideal para atingir o seu máximo desempenho, selecionou-se os ensaios com as condições mais parecidas de radiação média para cada concentração (2, 4, 8, 12, 24 mg/mL). Conforme apresentado na Tabela 11, os experimentos analisados foram: 2, 6, 9, 12 e 14.

A Figura 37 apresenta a eficiência dos sistemas para cada concentração analisada. Observa-se que, em ambos os casos, a concentração ideal para atingir o máximo desempenho dos sistemas propostos foi de 8 mg/mL, com um pico de eficiência de 54,87% em D1 e 51,88% em D2.

Figura 37 - Curvas de eficiência para a análise do efeito da concentração das partículas nos sistemas



Fonte: Autor, 2022.

4.2.2.4 Diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a cobertura dos sistemas propostos

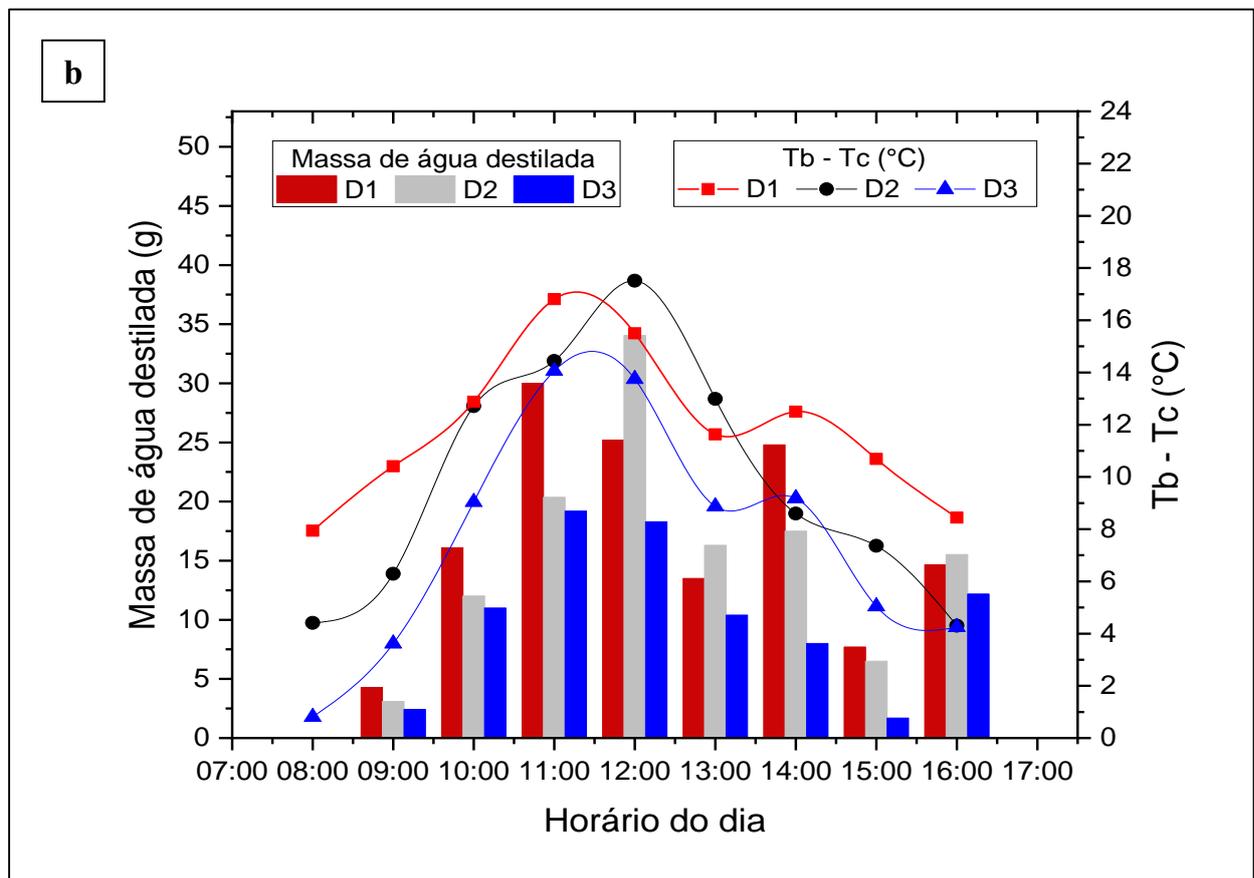
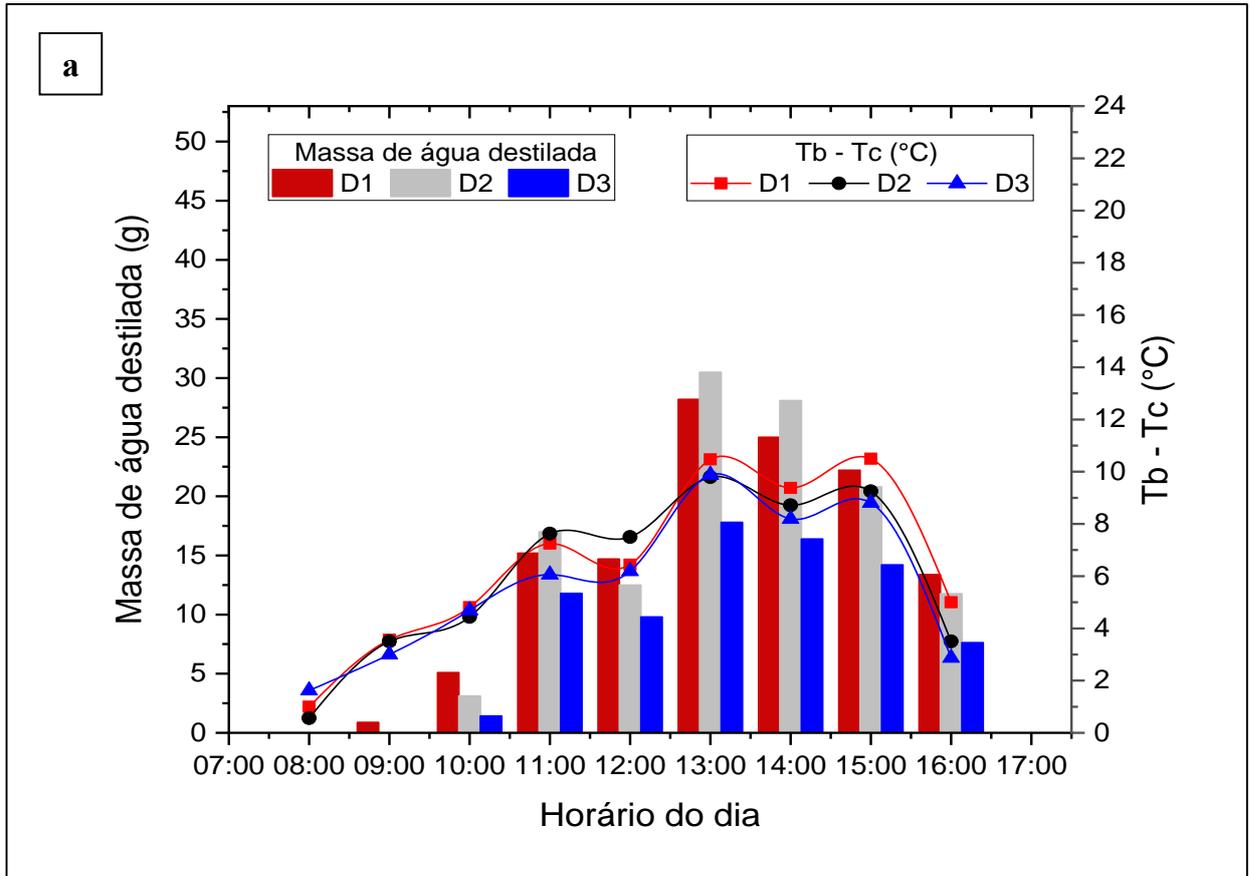
Para analisar influência da diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a cobertura dos sistemas na produção horária de água destilada, selecionou-se os mesmos experimentos analisados no tópico 4.2.2.3 (2, 6, 9, 12, 14), cujas condições climáticas e a produção acumulada podem ser visualizadas na Tabela 11.

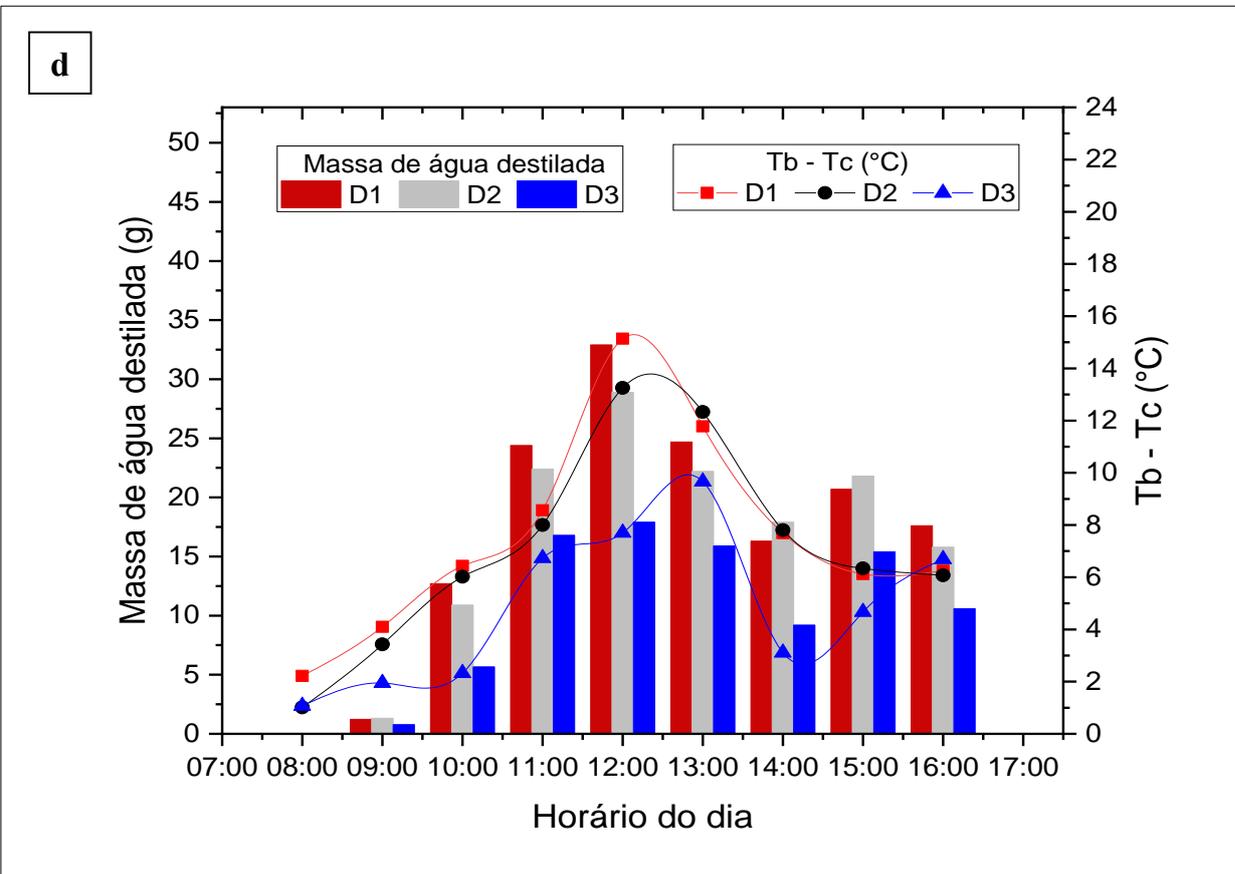
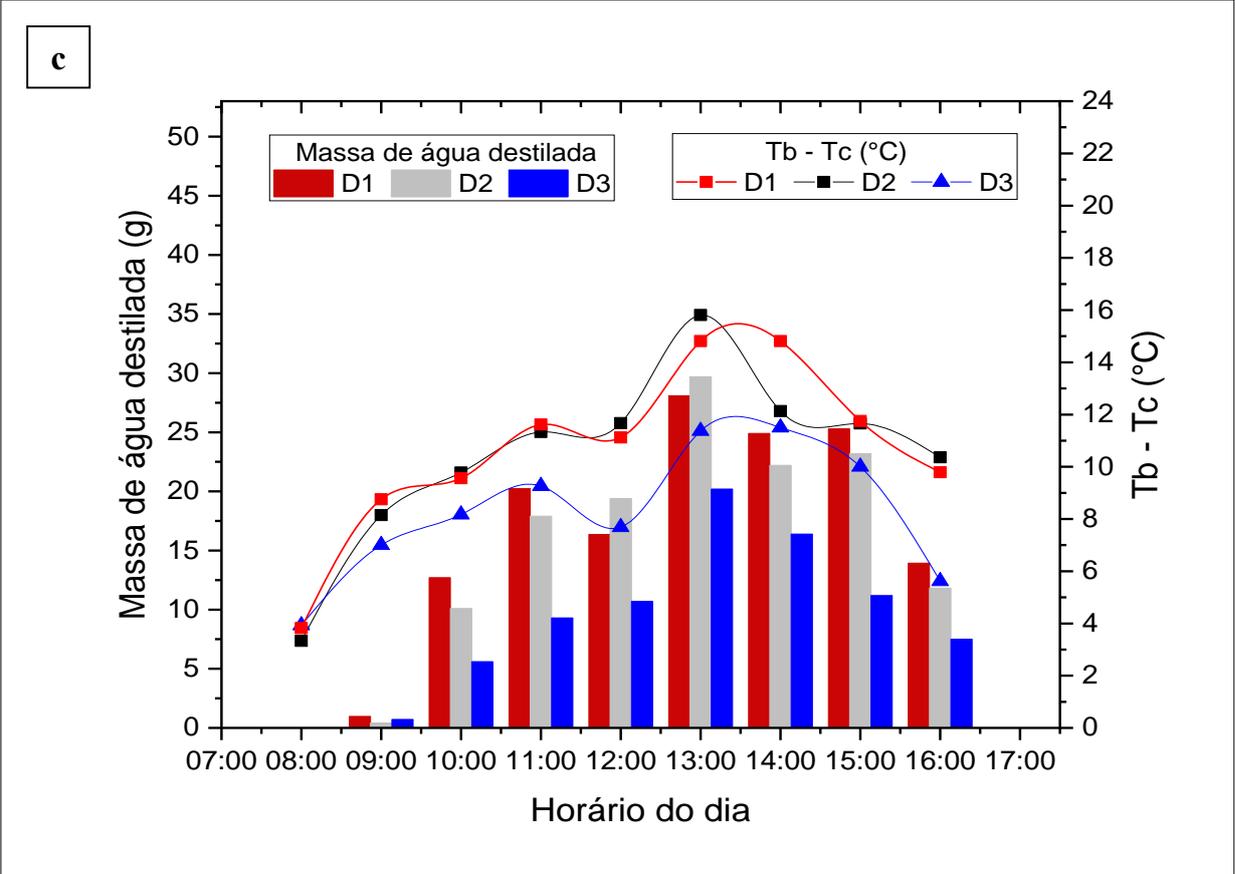
A Figura 38 apresenta a produção horária de água obtida nos ensaios: 2 em (a), 6 em (b), 9 em (c), 12 em (d) e 14 em (e), bem como o perfil horário da diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a cobertura das unidades ($T_b - T_c$). Observa-se que, mesmo em baixa concentração (2 mg/mL), a presença dos resíduos nos sistemas D1 e D2 favoreceram ligeiramente o aumento da diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a cobertura dos sistemas, o que resultou em um aumento da produção horária de água destilada se comparado a D3 (Figura 38a).

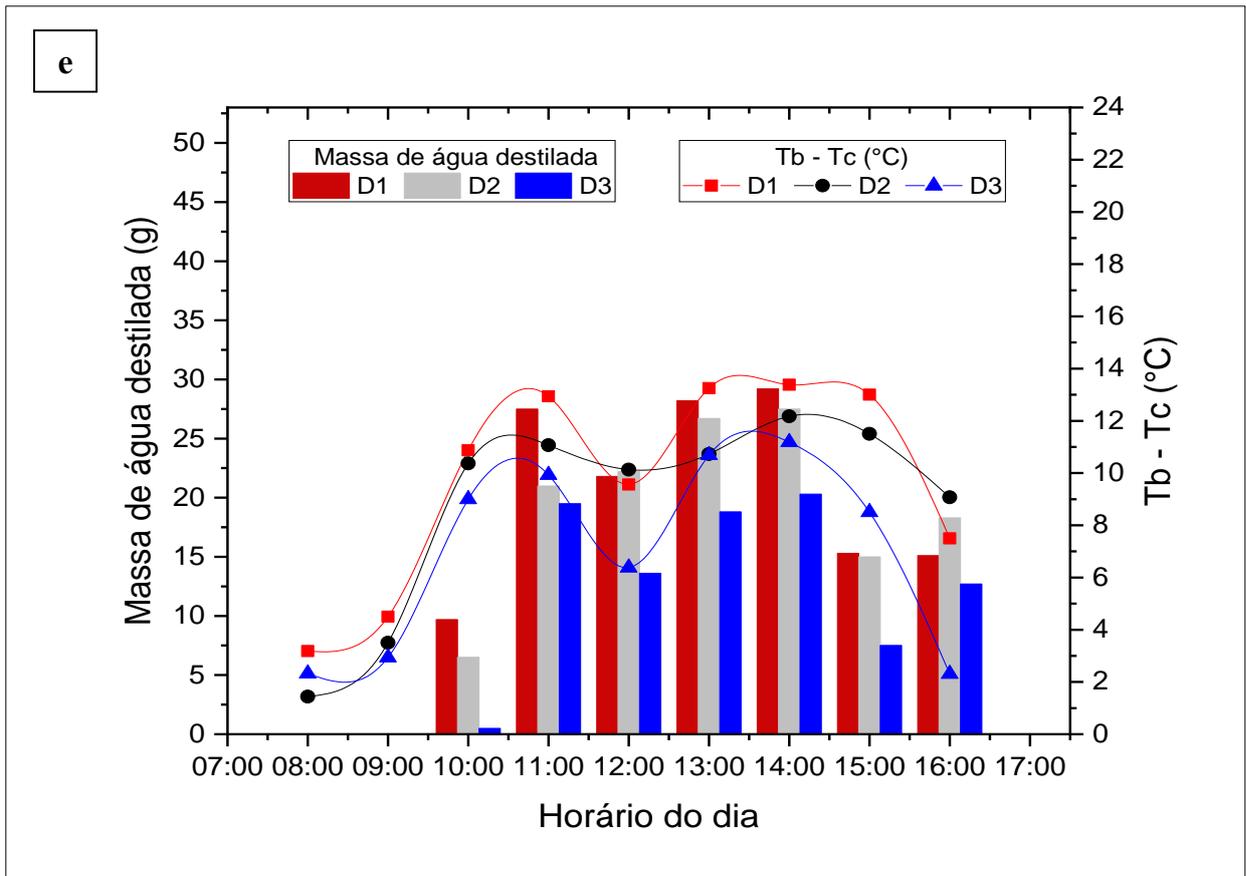
Para a concentração de 4 mg/mL, o efeito dos resíduos nos sistemas pode ser observado na Figura 38b. Verifica-se que as diferenças de temperaturas entre os componentes dos destiladores D1 e D2 foram superiores aos elementos de D3 em todos os horários de experimentos, com exceção para às 14:00, no qual o sistema controle obteve uma diferença maior que D2. Porém, mesmo com a ocorrência deste fato, D2 se sobressaiu a D3 em termos de produção de água neste horário, provavelmente devido à alta diferença de temperatura registrada às 13:00.

Em relação às altas concentrações (8, 12 e 24 mg/mL) analisadas, das Figuras 38 c-e, observa-se também que a presença dos resíduos na bandeja dos destiladores D1 e D2 leva a um aumento da temperatura do fluido de trabalho e, conseqüentemente, da diferença entre a cobertura das unidades, que se traduz em uma influência direta na produção horária de água destilada.

Figura 38 - Produção horária e perfil de temperatura nos ensaios: 2 em (a), 6 em (b), 9 em (c), 12 em (d) e 14 em (e)







Fonte: Autor, 2022.

4.3 Análise da qualidade da água produzida

Após observar a eficiência dos sistemas propostos neste trabalho quanto a produção de água, o próximo passo foi analisar a qualidade da água produzida mediante os ensaios de pH, condutividade e cor. Para isso, coletou-se a água gerada durante o ensaio de destilação com a maior concentração de resíduos nos sistemas D1 e D2 (24 mg/mL), a água produzida no sistema controle D3 e a água bruta obtida do poço. A Tabela 13 apresenta o comparativo entre as águas produzidas pelos sistemas de destilação e a água coletada no poço. Além disso, também são apresentados os valores máximos permitidos pela Portaria GM/MS N° 888 do Ministério da Saúde.

Tabela 13 - Parâmetros físico-químicos da água produzida pelos destiladores e da água bruta

Parâmetro	Amostra	Medidas			Média	Desvio Padrão	V.M.P ^(d)
pH	Água Bruta	7			7	-	6,0 - 9,5
	Produzida no D1 ^(a)	6			6	-	
	Produzida no D2 ^(b)	6			6	-	
	Produzida no D3 ^(c)	6			6	-	
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	Água Bruta	3,8500	3,8800	3,8600	3,863	0,0153	-
	Produzida no D1 ^(a)	0,0671	0,0666	0,0660	0,067	0,0006	
	Produzida no D2 ^(b)	0,0623	0,0622	0,0623	0,062	0,0001	
	Produzida no D3 ^(c)	0,1000	0,1006	0,0990	0,100	0,0008	
Número de Cor	Água Bruta	0,26420			0,26420	-	-
	Produzida no D1 ^(a)	0,00658			0,00658	-	
	Produzida no D2 ^(b)	0,00924			0,00924	-	
	Produzida no D3 ^(c)	0,01308			0,01308	-	

(a) D1: Destilador no qual foi adicionado o resíduo de granito;

(b) D2: Destilador no qual foi adicionado o resíduo de mármore;

(c) D3: Destilador de controle (Sem resíduos);

(d) V.M.P = Valor Máximo Permitido pela Portaria GM/MS N° 888, de 04 de maio 2021.

Fonte: Autor, 2022.

Os resultados obtidos através das análises de pH qualificaram o potencial hidrogeniônico das águas produzidas em D1, D2 e D3 como moderadamente ácidas com pH 6, enquanto que a água bruta apresentou caráter neutro com pH 7. Observa-se que esses valores estão dentro do padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria GM/MS N° 888 do Ministério da Saúde.

Com relação ao parâmetro de condutividade elétrica (mS.cm⁻¹), a Portaria GM/MS N° 888/2021 do Ministério da Saúde, não estabelece limites para a água distribuída para o consumo humano. No entanto, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), em seu Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo em 2021, aborda que níveis superiores a 0,1 mS.cm⁻¹ indicam ambientes impactados por cargas poluidoras, dado que esse parâmetro corresponde à expressão numérica da capacidade de uma água conduzir corrente elétrica e, portanto, representa uma medida indireta da concentração de poluentes (CETESB, 2022).

Diante disso, observou-se que todos os três sistemas de destilação solar (D1, D2 e D3) produziram águas com condutividades elétricas dentro do limite indicado pela CETESB. Por outro lado, a água bruta coletada no poço, analisada antes de ser submetida ao processo de dessalinização, apresentou uma condutividade elétrica média de 3,863 mS.cm⁻¹, superior a faixa

de valores apontada pelo órgão ambiental. Além disso, com a aplicação da técnica de dessalinização, foi possível observar uma redução da condutividade elétrica da água que alimentou os sistemas de 98,26% em D1, 98,40% em D2 e 97,41% em D3.

Quanto ao número de cor apresentado por Krull e Döpkins (2004), após os ensaios, observou-se uma redução de 97,51% em D1, 96,50% em D2 e 95,05% em D3, com relação a cor da água que alimentou os sistemas (água bruta), conforme apresentado na Tabela 13.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foram analisados os efeitos de diferentes concentrações de resíduos de granito e mármore no desempenho de destiladores solares do tipo simétrico de dupla inclinação quanto à produção de água potável. Para isso, o trabalho foi dividido em três etapas principais: caracterização dos resíduos utilizados, ensaios com os destiladores solares propostos e avaliação da potabilidade da água produzida.

Os resultados dos ensaios de caracterização das amostras permitiram constatar as seguintes conclusões:

- (i) O resíduo da rocha ornamental comercialmente classificada como granito, trata-se de um monzogranito composto por partículas angulosas de granulometria fina, principalmente, com diâmetros entre 0,002 - 0,06 mm (fração silte). Possui densidade de 2,52 g/cm³ e um teor de umidade de 0,368 %. Além disso, esta amostra apresentou comportamento térmico estável na faixa de temperatura analisada (23 a 498°C);
- (ii) O resíduo de mármore, por sua vez, possui caráter dolomítico e também é composto por partículas de morfologia angulosa e diâmetros entre 0,002 - 0,06 mm em maior proporção. Possui densidade de 2,65 g/cm³ e um teor de umidade de 0,184 %. Assim como a amostra de granito, este resíduo também não apresentou variação de massa significativa na faixa de temperatura analisada (23 a 498°C).

Quanto aos ensaios de destilação solar com os sistemas propostos, concluiu-se que:

- (iii) Dentre os diversos parâmetros climáticos analisados (radiação solar, temperatura ambiente, velocidade dos ventos e umidade relativa), a radiação solar foi o fator meteorológico que mais influenciou para a produção de água destilada durante os experimentos;
- (iv) Para todas as concentrações analisadas (2, 4, 8, 12 e 24 mg/mL), os destiladores que operaram na presença dos resíduos de granito e mármore, produziram uma massa de água destilada maior e, conseqüentemente, apresentaram uma maior eficiência do que o sistema controle (sem resíduos).
- (v) A maior eficiência térmica total atingida pelos sistemas foi observada na concentração de 8 mg/mL para ambos os resíduos, tendo valor de 56,04% para o granito e 52,73% para o mármore, o que representou um aumento de 26,20% e 22,89%, respectivamente, quando comparados com o sistema controle.;

- (vi) Em ambos os sistemas com resíduos, a concentração ideal para atingir o máximo de desempenho dos protótipos foi de 8 mg/mL;
- (vii) O aumento da diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a cobertura dos sistemas com a utilização dos resíduos na bandeja dos sistemas, influenciou positivamente na produção horária de água destilada, concordando com os estudos de Attia *et al.* (2022), Moses *et al.* (2011), Sellami *et al.* (2016) e Dias (2012) que também utilizaram materiais rochosos para esta finalidade.

Em relação a qualidade da água produzida pelos sistemas, constatou-se que:

- (viii) Os valores de pH obtidos para as amostras de água destilada pelos sistemas com e sem resíduos estão dentro do padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria GM/MS N° 888 do Ministério da Saúde;
- (ix) Com a aplicação da técnica de destilação, foi possível observar uma redução da condutividade elétrica da água que alimentou os sistemas de 98,26% em D1, 98,40% em D2 e 97,41% em D3.
- (x) O número de cor apresentou uma redução de 97,51% em D1, 96,50% em D2 e 95,05% em D3, com relação a cor da água bruta que alimentou os sistemas.

Portanto, é possível concluir que a introdução de resíduos finos de granito e mármore na bandeja dos destiladores solares propostos, sob as condições climáticas da cidade de Crateús/CE, melhoraram a produção de água e, conseqüentemente, a eficiência dos sistemas, se comparados a unidade de controle.

Conclui-se ainda que, além do bom desempenho quanto a quantidade de água produzida, a utilização de resíduos rochosos na bandeja dos destiladores não interferiu na qualidade da água gerada, dado que esta atendeu alguns padrões de potabilidade estabelecidos por normas sanitárias vigentes.

Por fim, considerando os resultados obtidos no presente trabalho, recomenda-se as seguintes abordagens para trabalhos futuros:

- (1) Avaliar a influência da granulometria dos resíduos no desempenho dos destiladores solares, uma vez que na cadeia produtiva da mineração são gerados materiais em uma ampla faixa de tamanho.
- (2) Analisar os efeitos dos resíduos rochosos no tempo de destilação da água em destiladores solares sujeitos às condições de sol e sombra durante um período de 24 horas.

- (3) Modificar os parâmetros operacionais e construtivos utilizados nos protótipos deste trabalho, tais como a área da base, tipo de vidro da cobertura, altura da lâmina de água e outros resíduos rochosos.
- (4) Utilizar a água produzida nas unidades de destilação no cultivo de plantas, observando se esta atende os requisitos necessários para o seu bom desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório pleno / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos** / Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; Organizadores: Carlos Jesus Brandão [et al.]. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Catálogo de Metadados**: semiárido. ANA, 2017. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3c8b249e-8ec3-4db1-b188-bab3c3c3240f>. Acesso em: 08 mai. 2022.

ALENCAR, C. R. A. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo**: rochas ornamentais / Instituto Euvaldo Lodi - Regional do Espírito Santo. Cachoeiro de Itapemirim/ES: IEL, 2013.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington, DC; APHA; AWWA; WEF, 2012.

ARDUINO.CC. **Arduino - Home**. 2018. 1 p. Disponível em: <https://arduino.cc/>. Acesso em: 27 nov. 2022.

ARUNKUMAR, T.; JAYAPRAKASH, R.; DENKENBERGER, D.; AHSAN, A.; OKUDAMIYA, M. S.; KUMAR, S.; TANAKA, H.; AYBAR, H. S. An experimental study on a hemispherical solar still. **Desalination**, v. 286, p. 342-348, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). **O setor brasileiro de rochas ornamentais: produção brasileira de lavra**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/10/Producao-Brasileira-Lavra-2021.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181/84**. Análise Granulométrica - Solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15012/13**. Rochas para revestimento de edificações - Terminologia. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457/86**. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502/95**. Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ATTIA, M. H.; KABEEL, A. E.; MAGHLANY, W. M.; ABDELGAIED, M.; ELHARIDI, A. M. Finest concentration of phosphate grains as energy storage medium to improve hemispherical solar distillate: An experimental study. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 7, p. 5573-5583, 2022.

AZEVEDO, L. R. P.; ARTUR, A. C.; BONOTTO, D. M.; NOGUEIRA NETO, J. A. **Caracterização petrográfica de índices físicos e da exalação de radônio em rochas ornamentais do estado do Ceará, Brasil**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 34, n. 3, p. 423-440, 2015.

BERETTA, A.; BASSAHUN, D.; MUSSELLI, R.; TORRES, D. Medición de pH del suelo com papel reactivo. **Agrociencia Uruguay**, v. 19, n. 2, p. 68-74, 2015.

BOUÇANOVA, M. P. **Eficiência térmica de um destilador solar contendo nanopartículas metálicas**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Sistemas, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Pernambuco, Recife, 2021.

BOUÇANOVA, M. P.; VITAL, C. V. P.; MALAGÓN, L. A. G. **Modelagem da eficiência térmica de um destilador solar contendo nanopartículas metálicas**. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, 2020.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n o 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, Brasília, DF, 14 de jan, 2019.

BRASIL. Portaria de Consolidação N°5 do Ministério da Saúde. Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Ministério da Saúde**. Brasília, DF, 2017.

BRASIL. Portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n° 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Ministério da Saúde**. Brasília, DF, 2021.

CAMPOS, A. R.; RIBEIRO, R. C. C.; CASTRO, N. F.; AZEVEDO, H. C. A.; CATTABRIGA, L. Resíduos: tratamento e aplicações industriais. In: VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. (ed.). **Tecnologia de Rochas Ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. Cap. 9. p. 435-492.

CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. **Livros Técnicos e Científicos**. Rio de Janeiro, 1988.

CENTRO INTERNACIONAL DE NEGÓCIOS DO CEARÁ (CIN). **Setorial em Comex Rochas Ornamentais**. Edição: anual 2021. Fortaleza: Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC), 2022. Disponível em: <https://arquivos.sfiec.org.br/cin/files/files/anual-2021-mini estudo-rochas.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo em 2021**. São Paulo: CETESB, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Determinação da Densidade Real – Solos. p. 01/04. **DNER-ME 093**, 1994.

DIAS, R. S. **Análise da influência de pedras britadas inseridas na bandeja do solar de vidro na produção de água**. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO CEARÁ (FIEC). **Ceará é o terceiro do Brasil em exportação de rochas ornamentais**. 2018. Disponível em: <https://www1.sfiec.org.br/sites/numa/?st=noticia&id=113909> . Acesso em: 15 mai. 2022.

FERNANDES, M. M. Mecânica dos solos. **Oficina de Textos**. São Paulo, 2016.

FUNDO INTERNACIONAL DE EMERGÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A INFÂNCIA. **Reimagining Wash: water security for all**. UNICEF, 2021.

GARG, H. P.; MANN, H. S. Effect of climatic, operational, and design parameters on the year round performance of single-sloped and double-sloped solar still under Indian arid zone conditions. **Sol. Energy; (United States)**, v. 18, n. 2, 1975.

GHONEYEM, A.; ILERI, A. Software to Analyze Solar Stills and na Experimental Study on the Effects of the Cover. **Desalination**, v. 114, p. 37-44, 1997.

HELLER, L. Abastecimento de água, sociedade e ambiente. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2016. p. 29-61.

HOLANDA, A. M. **Análise do projeto de um destilador solar caseiro**. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

IBRAM MINERAÇÃO DO BRASIL. **Setor de rochas brasileiro tem melhor 1º semestre dos últimos cinco anos**. 2021. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/setor-de-rochas-brasileiro-tem-melhor-1o-semester-dos-ultimos-cinco-anos/> . Acesso em: 19 mai. 2022.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS. **Dolomita**. Universidade de São Paulo. IGS-USP. São Paulo, 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Mapa das Estações. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Brasília, DF, 2022.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento**. SNIS-2020. São Paulo, 2022.

Disponível em:

https://tratabrasil.org.br/images/estudos/Ranking_do_Saneamento_2022/Relat%C3%B3rio_do_RS_2022.pdf. Acesso em: 11 jul. 2022.

JORGE, B. M. J. **Simulação de processos de destilação solar de água salgada**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2011, 103 p.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems**. Academic press, 2013.

KRULL, R.; DÖPKENS, E. Recycling of dyehouse effluents by biological and chemical treatment. **Water Science and Technology**, v. 49, n. 4, p. 311-317, 2004.

LIMA, J. E. F.W. Recursos hídricos no Brasil e no mundo. **Embrapa Cerrados-Documents (INFOTECA-E)**, 2001.

MALUF, A. P. **Destiladores solares no Brasil**. Monografia (Graduação) - Curso de Fontes Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2005.

MARIANO, H. Q. S. **Estudo de sistema de produção de água potável através do processo de destilação solar – Cabo Verde**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2019.

MARTINS, E. S. P. R.; BRAGA, C. F. C.; NYS, E.; FILHO, F. A. S.; FREITAS, M. A. S. **Impacto das Mudanças do Clima e Projeções de Demanda Sobre o Processo de Alocação de Água em Duas Bacias do Nordeste Semiárido**. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2013. (Água Brasil 8).

MELLO, P. H. **Como a roupa seca no varal se a água ferve a 100°C?** UFABC. v. 4, n. 4, p. 1, 2021. Disponível em: <https://gec.proec.ufabc.edu.br/ciencia-ao-redor/como-a-roupa-seca-no-varal-se-a-agua-ferve-a-100-c/>. Acesso em: 28 dez. 2022.

MENDES, V. A.; LIMA, M. A. B.; MARQUES, M. N. Pesquisa de rochas ornamentais. In: VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. (ed.). **Tecnologia de Rochas Ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. Cap. 3. p. 101-151.

MENEZES, S. O. **Rochas: manual fácil de estudo e classificação**. 1 ed. p. 112. Oficina de Textos, 2013.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. **Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha**. *Cerâmica*, v. 49, n. 312, p. 262-267, 2003.

MOSES, K. G.; KUMAR, P. S.; SIVARAMAN, G.; DANIEL, S. E. J. Design and performance analysis of a modified vacuum single basin solar still. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 2011, 2011.

MOTA, S.; ANDRADE, M. A. N. Uso da destilação solar no tratamento de águas contaminadas por microrganismos: aplicações às pequenas comunidades. **Revista Tecnologia**, v. 7, n. 1, 1986.

MUSEU DE MINERAIS, MINÉRIOS E ROCHAS HEINZ EBERT (MHE). **Mármoreos**. Departamento de Petrologia e Metalogenia. São Paulo, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **O Direito humano à Água e Saneamento**: Resolução da Assembleia Geral n°64/292. Nova Iorque: ONU. A/RES/64/292, 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos**: água e emprego fatos e número. ONU, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Summary Progress Update 2021: SDG 6 Water and Sanitation for all**. Julho. ONU, 2021.

PEIXOTO, A.; FERREIRA, D.; MATTOS, I. **Catálogo de Minerais do Laboratório de Mineralogia**. Universidade Federal do Ceará. Centro de Ciências. Departamento de Geologia. Fortaleza, 2016.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RUTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p. Disponível em: https://cenariosolar.editorabrasilenergia.com.br/wp-content/uploads/sites/8/2020/11/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_compressed.pdf Acesso em: 27 mai. 2022.

PETTIJOHN, F. J. **Sedimentary Rocks**. Harper e Brothers, Publishers. 2° ed., 718 p. New York, 1957.

PHADATARE, M. K.; VERMA, S. K. Effect of cover materials on heat and mass transfer coefficients in a plastic solar still. **Desalination and Water Treatment**, v. 2, n. 1-3, p. 254-259, 2009.

PINÉO, T. R. G.; PALHETA, E. S. M. (org.). **Projeto mapa geológico e de recursos minerais do estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2021. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20418?mode=full> . Acesso em: 15 maio 2022.

QUINÁRIO. **Diagrama QAP**. Geologia, 2013. Disponível em: <http://geologiadoquinario.blogspot.com/2013/03/diagrama-q-p-1976.html> . Acesso em: 22 dez. 2022.

REBOUÇAS, A. C. Água no Brasil: abundância, desperdício e escassez. **Bahia análise & dados**, v. 13, p. 341-345, 2003.

RIBEIRO, S. V. **Reutilização de resíduo de rocha ornamental na produção de tijolo solo-cimento**. 2013. 80 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.

RODRIGUES, E. P.; FILHO, C. C. **Guia de aplicação de rochas em revestimentos**. 2 ed. revista, atualizada e ampliada. Brasília: ABIROCHAS, 2020.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SELLAMI, M. H.; GUEMARI, S.; TOUAHIR, R.; LOUDIYI, K. Solar distillation using a blackened mixture of Portland cement and alluvial sand as a heat storage medium. **Desalination**, v. 394, p. 155-161, 2016.

SHARSHIR, S. W.; PENG, G.; YANG, N.; ELRAWIL, M. A.; ALI, M. K. A.; KABELL, A. E. A hybrid desalination system using humidification-dehumidification and solar stills integrated with evacuated solar water heater. **Energy conversion and management**, v. 124, p. 287-296, 2016.

SILVEIRA, F. L. **Termodinâmica: vaporização da água**. Centro de Referência para Ensino de Física, 2010. Disponível em: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=termodinamica-vaporizacao-da-agua>. Acesso em: 28 dez. 2022.

SILVEIRA, L. L. L.; VIDAL, F. W. H.; SOUZA, J. C. Beneficiamento de rochas ornamentais. In: VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. (ed.). **Tecnologia de Rochas Ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. Cap. 7. p. 329-398.

SOARES, C. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2004.

STRECKEISEN, A.L. **Classification and Nomenclature of Igneous Rocks**. N. Jahrb. Miner. Abh., v. 107, p. 144-240, 1976.

THOMSEN, A. Medindo temperatura debaixo d'água com DS18B20. **Filipeflop**, 2015. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/sensor-de-temperatura-ds18b20-arduino/> . Acesso em: 27 nov. 2022

TIWARI, G. N.; SINGH, H. N.; TRIPATHI, R. Present status of solar distillation. **Solar energy**, v. 75, n. 5, p. 367-373, 2003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Equipamentos do Laboratório de Microscopia Eletrônica**. Departamento de Geologia: UFC, 2022. Disponível em: <https://www.lmegeologia.ufc.br> . Acesso em: 08 ago. 2022.

VIDAL, F. W. H.; CASTRO, N. F.; FRASCÁ, M. H. B. O. Introdução. In: VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. (ed.). **Tecnologia de Rochas Ornamentais**: pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. Cap. 1. p. 17-42.

VIDAL, F. W. H.; SALES, F. A. C. B.; ROBERTO, F. A. C.; SOUSA, F. J.; MATTOS, C. I. **Rochas e minerais industriais do Estado do Ceará**. Fortaleza: Cetem/ Uece/ Dnpm/ Funcap/ Senai, 2005. 176 p.