

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



GUILHERME ALVES CARDOSO

# ESTUDO PETROGRÁFICO E MINERALÓGICO DO FONOLITO DE ARIS, NAMÍBIA

MONOGRAFIA nº 537

OURO PRETO, Março, 2025 Guilherme Alves Cardoso

# ESTUDO PETROGRÁFICO E MINERALÓGICO DO FONOLITO DE ARIS, NAMÍBIA

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 401, ano 2024/2.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Algusto Scholz Cipriano

# SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C268e Cardoso, Guilherme Alves. Estudo petrográfico e mineralógico do fonolito de Aris, Namíbia. [manuscrito] / Guilherme Alves Cardoso 2025. 73 f.
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano. Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .
1. Mineralogia. 2. Petrografia. 3. Fonolito. 4. Namíbia. 5. Microsopia Eletrônica de Varredura. I. Cipriano, Ricardo Augusto Scholz. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.
CDU 552.323

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



#### MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO REITORIA ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Guilherme Alves Cardoso** 

Estudo petrográfico e mineralógico do fonolito de Aris, Namíbia

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 21 de março de 2025

Membros da banca

Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto Dra. Cassandra Terra Barbosa - Universidade Federal de Ouro Preto Dr. Rodson de Abreu Margues - Universidade Federal de Ouro Preto

Ricardo Augusto Scholz Cipriano, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28/03/2025



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Augusto Scholz Cipriano**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/04/2025, às 15:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de</u> <u>outubro de 2015</u>.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <u>http://sei.ufop.br/sei/controlador\_externo.php?</u> <u>acao=documento\_conferir&id\_orgao\_acesso\_externo=0</u>, informando o código verificador **0887516** e o código CRC **CAB4D418**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.004305/2025-44

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha mãe pelo incentivo e apoio para chegar até aqui e ajudar a traçar esse caminho e concluir mais uma fase da minha vida.

Ao meu pai, que mesmo não estando mais aqui, pela educação que me deu para sempre buscar ser uma pessoa melhor. Minha irmã Ana por sempre acreditar em meu potencial e ter servido de inspiração para chegar até aqui.

Aos meus grandes amigos Geison, Douglas, Juninho, Felipe e Lorrana, por sempre estarem ao meu lado e por terem acreditado em mim durante todos esses anos de grande amizade.

Ao meu orientador, Ricardo Scholz, por todo o apoio, incentivo, paciência e por me ajudar nas partes mais difíceis deste trabalho, e aos seus projetos de pesquisa CNPq -Produtividade em Pesquisa 310072/2021-2 e Fapemig Universal APQ-00764-23.

Aos dados gerados no Laboratório de Microscopia e Microanálises do DEGEO/EM -Laboratório integrante da RMIc, Rede de Microscopia e Microanálise de Minas Gerais -FAPEMIG

Ao laboratório de laminação LAMIM do DEGEO/EM

Aos meus amigos da geologia, aos que fiz em Ouro Preto e minha amada República Burnout por toda irmandade que construímos ao longo de todos esses anos.

À Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino público de qualidade durante toda a graduação.

#### **RESUMO**

O fonolito de Aris, situado na região central da Namíbia, é uma rocha vulcânica subsaturada em sílica que faz parte da Província Vulcânica Alcalina de Auas, está inserido no Cinturão Damara, e foi formado a partir de uma intrusão alcalina de idade terciária. O fonolito de Aris se destaca por suas características mineralógicas e texturais únicas. A região de ocorrência passou por um pico de magmatismo cálcio-alcalino durante o Cretáceo e exibe intrusões magmáticas em formas anulares e cúpulas, com dimensões que podem alcançar até 2,5 km. Este estudo visa a caracterização petrográfica e mineralógica detalhada do fonolito de Aris. A pesquisa foca na identificação e descrição de novas fases minerais, como arisita-(Ce) e arisita-(La), bem como na possível descoberta de arisita-(Nd), arisita-(Sm) e arisita-(Y), que são possíveis minerais a serem descobertos. Para isso foram feitas análises petrográficas em microscópio óptico por meio de duas lâminas delgadas e um molde de grãos de duas amostras que mostram uma mineralogia principal composta por feldspatos alcalinos, feldspatóides e piroxênios, bem como minerais acessórios. Também foram feitas análises químicas pontuais semi-quantitativas utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura com Energy Dispersive Spectroscopy (MEV-EDS) em duas lâminas polidas, e em um molde de grãos de minerais coletados em cavidades. O estudo demonstrou a presença de minerais de rara ocorrência, como a sazhinita-(Ce), tupersuatsiaita, hidroxiapofilita-(K) e ellingsenita, proporcionando um panorama mais claro em relação a composição mineralógica do fonolito de Aris.

**Palavras-chave:** Fonolito de Aris; estudo petrográfico; estudo mineralógico; Namíbia; MEV-EDS.

### ABSTRACT

The Aris phonolite, located in central Namibia, is a silica-undersaturated volcanic rock that is part of the Auas Alkaline Volcanic Province. It is situated within the Damara Belt and was formed from a Tertiary-age alkaline intrusion. The region experienced a peak of calc-alkaline magmatism during the Cretaceous and exhibits magmatic intrusions in annular and domeshaped forms, reaching up to 2.5 km in size. The Aris phonolite stands out for its unique mineralogical and textural characteristics. This study aims to provide a detailed petrographic and mineralogical characterization of the rock, focusing on the identification and description of new mineral phases such as arisite-(Ce) and arisite-(La), as well as the potential discovery of arisite-(Nd), arisite-(Sm), and arisite-(Y). Petrographic analyses were conducted using an optical microscope on two thin sections and a grain mount from two samples, revealing a primary mineralogy composed of alkali feldspars, feldspathoids, and pyroxenes, along with accessory minerals. Additionally, semi-quantitative spot chemical analyses were performed using Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS) on two polished sections and a grain mount of minerals collected from cavities. The study demonstrated the presence of rare minerals such as sazhinite-(Ce), tupersuatsiaite, hydroxyapophyllite-(K), and ellingsenite, providing a clearer understanding of the mineralogical composition of the Aris phonolite.

Keywords: Aris phonolite; petrographic study; mineralogical study; Namibia; SEM-EDS.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo14
<b>Figura 2</b> : Distribuição dos Complexos Pré-Damara na Namíbia. O Complexo Metamórfico Hohewarte é indicado na imagem com a sigla HMC (Geological Survey of Namibia, 2009) 19
Figura 3: Arisita-(Ce), Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia.
Figura 4: Arisita-(La). Pedreiras de Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia22
Figura 5: Sazhinita-(La). Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia
Figura 6: Ellingsenita, Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia. 24
Figura 7: Escheita, Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia. 25
Figura 8: Windhoekita Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia. 
Figura 9: Natrolita. Aris Quarries, Aris, Windhoek Rural, região de Khomas, Namíbia27
Figura 10: Analcima. Aris Quarries, Aris, Windhoek Rural, região de Khomas, Namíbia27
Figura 11: Tupersuatsiaita (Figura 9) Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia
Figura 12: Labuntsonita (Figura 10) Pedreira Poudrette, Mont Saint-Hilaire, La Vallée-du- Richelieu RCM, Montérégie, Quebec, Canadá
Figura 13: Makakita, Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia
Figura 14: Viliaumita. Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia
Figura 15: Representação macroscópica do Fonolito
<b>Figura 16</b> : Diagrama Q-A-P-F (Streckeisen, 1976) com a classificação modal das amostras descritas do fonolito
<b>Figura 17</b> : No centro da fotomicrografia com objetiva de aumento 10, minerais de augita, a nicóis descruzados e cruzados, respectivamente. Sigla: Aug (augita)
<b>Figura 18</b> : No centro da fotomicrografia com objetiva de aumento 10, minerais de aegirina a nicóis descruzados e cruzados, respectivamente. Sigla: Aeg (aegirina)35
<b>Figura 19</b> : No centro da fotomicrografia com objetiva de aumento 10, um mineral de biotita a nicóis descruzados e cruzados, respectivamente. Siglas Bt (biotita)
<b>Figura 20</b> : No centro da fotomicrografia com objetiva de aumento 10, um fenocristal de nefelina a nicois descruzados e cruzados, respectivamente. Sigla Nph (nefelina)
Figura 21: No centro da fotomicrografia com objetiva de aumento 10, um fenocristal de

<b>Figura 22</b> : Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina ARIS 1, campo 1. Siglas: Ne (nefelina), Ae (aegirina), Sz (Sazhinita-(Ce)
Figura 23: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 1
Figura 24: Espectro 1 com a composição química referente ao mineral nefelina
Figura 25: Espectro 7 com a composição química referente ao mineral sazhinita-(Ce)40
Figura 26: Espectro 9 com a composição química referente ao mineral aegirina40
Figura 27: Diagrama de fase dos piroxenios41
Figura 28: Diagrama ternario indicando o mineral sazhinita-(Ce)41
<b>Figura 29</b> : Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lamina ARIS 1, campo 2. Sigasl: Ne (nefelina), Ae (aegirina), Au (aegirina)
Figura 30: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 243
Figura 31: Espectro 10 com a composição química referente ao mineral aegirina43
Figura 32: Espectro 12 com a composição química referente ao mineral nefelina44
Figura 33: Espectro 17 com a composição química referente ao mineral augita44
Figura 34: Diagrama de fase dos piroxenios45
Figura 35: Diagrama de fase dos piroxenios45
<b>Figura 36</b> : Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina LSC campo 1. Siglas: Ne (nefelina), Ae (aegirina)
Figura 37: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 147
Figura 38: Espectro 2 com a composição química referente ao mineral aegirina47
Figura 39: Espectro 8 com a composição química referente ao mineral nefelina48
Figura 40: Diagrama de fase dos piroxenios48
<b>Figura 41</b> : Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina LSC campo 1_2. Siglas Ae (aegirina), Au (augita), Ne (nefelina), Or (ortoclasio)
Figura 42: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 1_2 50
Figura 43: Espectro 9 com a composição química referente ao mineral aegirina51
Figura 44: Espectro 11 com a composição química referente ao mineral augita51
Figura 45: Espectro 14 com a composição química referente ao mineral ortoclásio52
Figura 46: Espectro 19 com a composição química referente ao mineral nefelina52
Figura 47: Diagrama de fase dos piroxenios53
Figura 48: Diagrama de fase dos piroxenios 53
Figura 49: Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina LSC campo 2. Siglas: Ne(nefelina), Ae (augita)
Figura 50: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 255
Figura 51: Espectro 21 com a composição química referente ao mineral aegirina55
Figura 52: Espectro 24 com a composição química referente ao mineral nefelina56

Figura 53: Diagrama de fase dos piroxenios 56
Figura 54: Análise MEV EDS fotomicrografia realizada no campo 1 Lâmina ARIS 357
Figura 55: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 158
Figura 56: Espectro 1 com a composição química referente ao mineral hidroxiapofilita-(K) 58
Figura 57: Análise MEV EDS fotomicrografia realizada no campo 3 Lâmina ARIS 3 Sigla El (ellingsenita)
Figura 58: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 259
Figura 59: Espectro 18 com a composição química referente ao mineralellingsenita60
Figura 60: Análise MEV EDS fotomicrografia realizada no campo 4 Lâmina ARIS 361
Figura 61: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 461
Figura 62: Espectro 42 com a composição química referente ao mineral augita
<b>Figura 63</b> : Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada no campo 6 Lâmina ARIS 3. Siglas Tu (tupersuatsiaita)
Figura 64: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 663
Figura 65: Espectro 69 com a composição química referente ao mineral tupersuatsiaita 64
<b>Figura 66</b> : Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada no campo 7 Lâmina ARIS 3. Sigla No (nontronita)
Figura 67: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 765
Figura 68: Espectro 81 com a composição química referente ao mineral nontronita

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	. 12
1.1 Apresentação	. 12
1.2 Justificativa do estudo	. 12
1.3 Objetivos	. 13
1.4 Localização	. 13
1.5 Materiais e métodos	. 14
1.5.1 Revisão Bibliográfica	. 14
1.5.2 Descrição e Separação Macroscópica das Amostras	. 14
1.5.3 Microscopia Óptica	. 15
1.5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura/Espectrometria de Energia Dispersiva (MEV/ED	<b>DS</b> ) . 15
1.5.5 Tratamento dos dados de Microscopia Eletrônica de Varredura/ Espectrometria Energia Dispersiva	de . 16
1.5.6 Desenvolvimento da Monografia	. 16
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	. 17
2.1 Contexto Geotectônico	. 17
2.2 Cinturão Damara	. 17
2.3 Complexo metamórfico Hoherwarte	. 18
2.4 Suíte vulcânica alcalina AUAS	. 19
3 ESTADO DA ARTE	. 21
3.1 Mineralogia de Aris, Namíbia	. 21
3.1.1 Arisita-(Ce)-NaCe <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (F <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ))F	. 21
3.1.2 Arisita-(La)-NaLa2(CO3)2F2(CO3)F	. 22
3.1.3 Sazhinita-(La)-Na3La(Si6O15)2H2O	. 23
3.1.4 Ellingsenita-Na5Ca6Si18O38(OH)136H2O	. 24
3.1.5 Escheita-Ca2NaMnTi5(Si12O34)O2(OH)312H2O	. 25
3.1.6 Windhoekita-Ca <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> (Si <sub>8</sub> O <sub>20</sub> )(OH) <sub>4</sub> 10H <sub>2</sub> O	. 26
3.1.7 Natrolita-Na2Al2Si3O102H2O	. 27
3.1.8 Analcima-Na(AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )H <sub>2</sub> O	. 27
3.1.9 Tupersuatsiaita-Fe2(Na)2Si8O20(OH)2(H2O)42H2O	. 28
3.1.10 Labuntsonita-Na4K4(Ba,K)2Mg(Ti,Nb)8(Si4O12)4(O,OH)810H2O	. 29
3.1.11 Makakita-Na <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>8</sub> (OH) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O	. 30
3.1.12 Viliaumita-NaF	. 31
4 RESULTADOS	. 32

4.1 Descrição petr	rográfica em lâmina delgada polida	32
4.1.1 Augita		33
4.1.2 Aegirina		34
4.1.3 Biotita		35
4.1.4 Nefelina		36
4.1.5 Ortoclásio		37
4.2 Análises quím	icas por MEV-EDS	37
4.2.1 Lâmina ARIS	S 1, Campo 1	37
4.2.2 Lâmina ARIS	S 1, Campo 2	42
4.2.3 Lâmina LSC,	, campo 1	46
4.2.4 Lâmina LSC	campo 1_2	49
4.2.5 Lâmina LSC	campo 2	54
4.2.6 Molde de grã	ios ARIS 3	57
4.2.6.1 Hidroxiapo	filita-(K)	57
4.2.6.2 Ellingsenita	a	58
4.2.6.3 Augita		60
4.2.6.4 Tupersuatsi	iaita	62
4.2.6.5 Nontronita.		64
5 DISCUSSÕES		67
6 CONCLUSÕES	5	<b> 68</b>
<b>NETEREIVUIAS</b> .		

# 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 Apresentação

O fonolito de Aris é uma formação rochosa localizada na Província Vulcânica Alcalina Auas, situada na região central da Namíbia, ao sul de Windhoek. Essa província, estende-se por aproximadamente 65 km desde as cidades de Windhoek até Rehoboth, e é um importante exemplo de magmatismo alcalino na África Austral (Von Knorring & Franke, 1987). A Província Vulcânica Alcalina Auas decorre das suas complexas interações tectônicas e magmáticas, que moldaram significativamente a geologia da região ao longo dos últimos milhões de anos (Piilonen *et al.*, 2010). O Cinturão Damara, que se originou durante a orogenia Pan-Africana, é o resultado de eventos tectônicos significativos que ocorreram durante o Neoproterozóico, associados à formação dos supercontinentes Gondwana e Pannotia (Gray *et al.*, 2008). A formação do Cinturão Damara, situado entre os crátons do Congo ao norte e do Kalahari ao sul, ocorreu tardiamente na evolução de Gondwana e inclui uma série de intrusões magmáticas, incluindo o fonolito de Aris (Marsh, 1987).

O fonolito de Aris, que se apresenta na forma de cúpulas vulcânicas, diques e soleiras com arranjo sub-horizontal, representa um componente significativo da Província Vulcânica de Auas (De Kock, 1933). As intrusões no fonolito de Aris são notáveis por sua composição mineralógica diversificada, incluindo minerais acessórios raros como sazhinita, arisita, haüyne, além de uma gama de minerais agpaíticos encontrados em cavidades miarolíticas (Piilonen *et al.*, 2010).

Dada a sua complexidade mineralógica e textural, o fonolito de Aris é um objeto de grande interesse para estudos petrográficos e mineralógicos. O potencial para a descoberta de novas fases minerais, como a arisita-(Ce), arisita-(La), e a possibilidade de arisita-(Nd), arisita-(Sm) e arisita-(Y), que ainda não foram descritos, torna este estudo ainda mais relevante. O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise detalhada das amostras do fonolito de Aris, incluindo a classificação e descrição macroscópica das feições hidrotermais, confecção de lâminas delgadas polidas e análise com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Os resultados encontrados contribuirão significativamente para o entendimento da mineralogia, petrologia e dos processos de alteração hidrotermal ocorridos no fonolito de Aris.

#### 1.2 Justificativa do estudo

A intrusão alcalina de Aris corresponde a um maciço composto basicamente por fonolito, sendo que a rocha está cortada por veios de alteração hidrotermal. Nesses veios, ocorre uma

extensa e complexa associação mineral, com 117 minerais diferentes já identificados, incluindo seis locais tipo: arisita-(Ce), arisita-(La), ellingsenita, escheita, sazhinita-(La) e windhoekita. Além disso, há outros 9 possíveis minerais novos, cujos dados parciais já foram publicados<sup>1</sup> entretanto, não foram suficientes para o reconhecimento pela IMA. Com a realização deste projeto, pretende-se determinar as paragêneses minerais relacionadas ao fonolito de Aris, com a possibilidade de caracterização de novas fases minerais.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a mineralogia do fonolito de Aris, na Namíbia, com ênfase especial nos minerais formados como produto de alteração hidrotermal. Para isso, foram identificados e descritos os minerais primários presentes na rocha por meio de análises petrográficas e mineralógicas, além da investigação dos processos de alteração hidrotermal que afetaram o fonolito, caracterizando as associações mineralógicas resultantes, com atenção especial a minerais raros ou exóticos. Por fim, o estudo contribuirá para o entendimento da evolução geológica do fonolito de Aris e sua relevância no contexto da geologia da Namíbia.

#### 1.4 Localização

A área de estudo está localizada na região central da Namíbia, mais especificamente na pedreira denominada Ariskop, situada a 25 km ao sul de Windhoek, com coordenadas geográficas 22° 46' 6" S e 17° 7' 51" E (Figura 1). A pedreira faz parte da Província Vulcânica Alcalina de Auas, que se estende por 65 km desde Windhoek, no norte, até Rehoboth, no sul. A poucas centenas de metros da estrada Windhoek-Rehoboth, encontra-se a pedreira Ariskop, que durante décadas extraiu rochas para britagem utilizadas em obras rodoviárias e aterros ferroviários (Kolitsch *et al.*, 2016).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Publicados em: https://www.mindat.org/reference.php?id=16041064.

#### Figura 1: Localização da área de estudo



Fonte: Extraído e modificado de Google Earth.

#### 1.5 Materiais e métodos

#### 1.5.1 Revisão Bibliográfica

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas várias pesquisas em artigos relacionados às intrusões alcalinas de Aris, bem como seu contexto de formação relacionados ao Cinturão Damara, e do Complexo Metamórfico Howewarte, para ter um parâmetro geral sobre os processos de formação do fonolito, bem como de seus processos de alteração hidrotermal. Além disso, foram estudadas técnicas para a análise e processamento dos dados obtidos via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) no modo EDS.

#### 1.5.2 Descrição e Separação Macroscópica das Amostras

As amostras foram classificadas e descritas macroscopicamente quanto à presença de feições de hidrotermalismo. Foram selecionados fragmentos para a confecção de lâminas delgadas polidas que foram analisadas em microscópio óptico, Para a confecção do molde de grãos ARIS 3, os cristais foram coletados manualmente a partir de cavidades presentes nas amostras do fonolito, a seleção dos cristais foi realizada com o auxílio de um microscópio

estereoscópico, garantindo a escolha de espécimes representativos, os cristais selecionados foram embutidos em resina para a construção do molde de grãos Aris\_3. Posteriormente tanto as lâminas delgadas polidas quanto o embutimento de grãos foram analisados no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), no modo EDS.

## 1.5.3 Microscopia Óptica

A microscopia óptica aplicada à geologia utiliza a luz visível para examinar amostras de minerais e rochas cortadas em lâminas delgadas, com espessura inferior a 0,03 mm, que permitem a transmissão da luz através da amostra. Esse tipo de microscópio é equipado com várias lentes (objetivas e oculares) e filtros, que ajudam a ampliar a imagem e a analisar as propriedades ópticas dos minerais. As amostras foram preparadas no laboratório de lâminação LAMIM do DEGEO/EM. As fotomicrografias foram geradas utilizando aparelho smartphone Samsung Galaxy A15. Foram analisadas duas lâminas delgadas polidas referentes as amostras ARIS\_1 e LSC\_06 utilizando microscópio óptico da marca Olympus BX-41, etapa esta que foi realizada nos laboratórios de Microscopia do Departamento de Geologia (DEGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP

### 1.5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura/Espectrometria de Energia Dispersiva (MEV/EDS)

A metodologia de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS), associada ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), junto a uma análise semiquantitativa, possibilita a identificação dos elementos químicos presentes na rocha. A técnica consiste em analisar o comprimento de onda modificado emitido após a interação entre a radiação eletromagnética emitida pelo equipamento e a estrutura atômica dos elementos. O diâmetro reduzido do feixe permite a determinação da composição em amostras de tamanhos reduzidos (<5 µm). As amostras ARIS\_1, LSC\_6 e o molde de grãs ARIS\_3, foram metalizadas, que é um processo em que se deposita uma fina camada de metal condutor sobre a amostra antes de analisá-la no (MEV). Esse procedimento é necessário principalmente para evitar carregamento elétrico em materiais isolantes e melhorar a qualidade das imagens. Após a preparação das amostras, foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) no modo EDS da marca JEOL, modelo JSM-6510, pertencente ao Laboratório de Microscopia e Microanálises da UFOP. O MEV está equipado com um espectrômetro de energia dispersiva de raios-X (EDS) da marca Oxford, que possibilita a análise química semiquantitativa de amostras sólidas. Foram realizados 19 pontos na lâmina ARIS\_1, 27 pontos na lâmina LSC\_06 e 84 pontos no molde de

grãos ARIS\_3, todos focados no núcleo dos minerais. As análises no MEV foram conduzidas com aceleração de voltagem de 20 kV, distância de trabalho (WD) entre 14 e 15 mm e tamanho do ponto (SS) de 68. Para a identificação das fases minerais, foi utilizado o programa de identificação e o banco de dados do site Mindat.org<sup>2</sup>.

1.5.5 Tratamento dos dados de Microscopia Eletrônica de Varredura/ Espectrometria de Energia Dispersiva

Os dados do MEV-EDS são fornecidos em forma de % em massa de óxidos. Para converter para os elementos puros, utiliza-se as massas molares:

Massa molar do óxido =  $\sum$  (massa atômica do elemento × número de átomos). Em seguida é necessário converter as porcentagens elementares em números de mols de átomos dividindo pela massa atômica de cada elemento:

Mols do elemento = % do elemento / massa atômica do elemento. Em seguida normaliza-se os valores para obter a unidade de fórmula. Isso é feito dividindo todos os valores pelo menor número de mols encontrado. E por fim, a fórmula é ajustada com base na estrutura cristalina do mineral.

#### 1.5.6 Desenvolvimento da Monografia

Após a revisão bibliográfica, a análise, descrição e interpretação dos dados, tornou-se viável a elaboração de uma monografia, estruturada na introdução, que caracteriza a geologia regional e os métodos analíticos, seguida pela apresentação e discussão dos resultados e pela conclusão.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Disponível em: https://www.mindat.org/chemsearch.php.

### 2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

#### 2.1 Contexto Geotectônico

As amostras estudadas neste trabalho provêm de um fonolito localizado próximo à pedreira Ariskop, ao sul da cidade de Windhoek, na região central da Namíbia. Neste capítulo, será apresentada uma síntese da geologia regional com ênfase no Cinturão Damara, fornecendo o contexto no qual se formaram as intrusões magmáticas que deram origem ao fonolito de Aris.

#### 2.2 Cinturão Damara

O Cinturão Damara é uma estrutura geológica associada à Orogenia Pan-Africana, cuja formação ocorreu durante o Neoproterozoico. Esse cinturão resultou da colisão entre os crátons do Congo, ao norte, e do Kalahari, ao sul, no contexto da formação dos supercontinentes Gondwana e Pannotia (Gray *et al.*, 2008). A unidade mais antiga, o Grupo Nosib (~880-770 Ma), representa a fase inicial de rifteamento da Bacia Damara e é composta por quartzitos, conglomerados, filitos e rochas vulcânicas (Martin, 1983). Sobreposto a esse grupo, o Grupo Swakop (~770-600 Ma) é dividido em dois subgrupos principais: o Subgrupo Khomas, que inclui formações metapelíticas e grauvacas como a Formação Kuiseb, e o subgrupo Otavi, caracterizado por sequências carbonáticas de plataforma, como as formações Abenab e Tsumeb (Hoffman *et al.*, 1996). Com a progressão da orogenia Damara, ocorre a deposição do Grupo Mulden (~600-530 Ma), que consiste em sedimentos molássicos, incluindo conglomerados, arenitos e pelitos (Porada, 1989). Essa fase marca a transição para um ambiente de colapso orogênico.

Durante o Cretáceo, a região do Cinturão Damara experimentou um intenso processo de intrusão magmática, caracterizado por um vulcanismo basáltico extensivo e a presença de intrusões subvulcânicas alcalinas. Essas intrusões impactaram profundamente o Complexo Metamórfico Hohewarte, que é composto por uma variedade de gnaisses (Mapani *et al.*, 2014).

O Cinturão Damara passou por um pico de deformação e metamorfismo entre 530 e 500 milhões de anos atrás, e seu embasamento é formado por gnaisses de idade Paleoproterozoica, que foram intrudidos por rochas vulcânicas alcalinas associadas ao fonolito de Aris (Koller *et al.*, 2013). Essas apresentam formas anulares e cúpulas, com tamanhos que podem alcançar até aproximadamente 2 a 2,5 km (Gevers, 1933; 1934a; 1934b). Essas formações são organizadas em diques e soleiras dispostas de maneira sub-horizontal (De Kock, 1933). Predominantemente envoltas por gnaisses quartzo-feldspáticos e micaxistos, essas intrusões representam produtos

tardios do magmatismo alcalino ao longo da fronteira ocidental da África Austral (Marsh, 1987).

#### 2.3 Complexo metamórfico Hoherwarte

O Complexo Metamórfico Hohewarte, situado na Namíbia, é totalmente cercado pela Sequência Damara e passou por um pico de orogênese há aproximadamente 550 milhões de anos. Este período é caracterizado por intensos processos tectônicos e metamórficos associados à formação do Cinturão Damara, um dos eventos orogênicos significativos do Neoproterozóico na região (Mapani *et al.*, 2014). As rochas do Complexo Metamórfico Hohewarte, de idade Paleoproterozóica, exibem texturas folheadas e bandadas, evidências de metamorfismo de alto grau. A variação nas texturas dessas rochas está relacionada à composição mineral e ao grau de metamorfismo que sofreram. O complexo é composto por uma diversidade de gnaisses, incluindo gnaisse quartzo-feldspático, gnaisses bandados ricos em plagioclásio, e duas variedades de augen gnaisse: um augen gnaisse félsico com feldspato potassico e um augen gnaisse com plagioclásio e feldspato potassico situado em uma matriz rica em biotita e hornblenda, predominando na parte leste do complexo (Mapani *et al.*, 2014).

O Complexo Metamórfico Hohewarte tem sido correlacionado com os enclaves Kamanjab e Rehoboth, que são mais bem estudados e ajudam a fornecer um contexto geológico mais amplo para o complexo. Na parte central da orogenia Damara, aproximadamente 40-60 km a sudeste de Windhoek, localiza-se um enclave principal do Complexo Metamórfico Hohewarte, e cerca de 50 km a leste de Windhoek, há um segundo enclave que também faz parte do mesmo complexo (Becker *et al.*, 2004).



Figura 2: Distribuição dos Complexos Pré-Damara na Namíbia. O Complexo Metamórfico Hohewarte é indicado na imagem com a sigla HMC (Geological Survey of Namibia, 2009)

Fonte: Extraído e modificado de Benjamin Mapani, 2014.

#### 2.4 Suíte vulcânica alcalina AUAS

O fonolito de Aris está situado na Província Vulcânica Alcalina Auas, uma região geológica que se estende por aproximadamente 65 km, desde Windhoek até Rehoboth, região central da Namíbia. Essa província representa a ocorrência mais recente de magmatismo alcalino ao longo da margem ocidental da África Austral, destacando-se pela sua importância geológica e mineralógica (Kröner, 1973& Marsh, 1987). A formação da suíte vulcânica alcalina Auas ocorreu como produto resultante de uma intrusão magmática em um rift sobre as rochas metassedimentares do Complexo Metamórfico Hohewarte.

Essa suíte é composta predominantemente por rochas ígneas alcalinas, incluindo basalto alcalino, traquito e fonolito, cujas características mineralógicas refletem um vulcanismo enriquecido em sódio e potássio, típico de ambientes alcalinos associados à quebra crustal e processos de extensão litosférica (Marsh, 1987).

#### 2.5 Fonolito de Aris

O fonolito de Aris, como um componente significativo da Província Vulcânica Alcalina de Auas, é notável por suas características texturais e mineralógicas. Representado por cúpulas vulcânicas, diques e soleiras com arranjo subhorizontal, o fonolito apresenta uma granulação que varia de fina a média. Sua composição mineral segundo Von Knorring e Franke (1987) é predominantemente dominada por feldspatos, nefelina e aegirina, com minerais acessórios como haüyne, leucita, monazita e zircão.

Além da sua composição mineralógica, as cavidades miarolíticas do fonolito de Aris abrigam uma diversidade de minerais agpaíticos, incluindo viliaumita, aegirina, minerais do grupo labuntsovita, tuperssuatsiaita, natrolita, analcima, mangano-netunita, apofilita-(KF), fluorita e a makakita (Piilonen *et al.*, 2010). A formação do fonolito ocorreu como resultado da ascensão de magmas alcalinos, que sofreram processos de resfriamento e cristalização em uma crosta relativamente fina (Brice, 1992). Estudos incluindo datações por 40Ar/39Ar, determinaram que o fonolito de Aris tem uma idade de aproximadamente  $32 \pm 0,2$  milhões de anos, fornecendo um marco temporal importante para compreender o magmatismo e a evolução tectônica da região (Burger & Walraven, 1976).

#### **3 ESTADO DA ARTE**

#### 3.1 Mineralogia de Aris, Namíbia

Perto da pequena aldeia namibiana de Aris, a cerca de 27 km a sudeste de Windhoek, existem muitos corpos fonolíticos, conhecidos há mais de 100 anos (Rimann, 1914), e a natureza fonolítica dessas rochas foi reconhecida pelo primeiro agrimensor dessa região, o geólogo Eberhard Rimann (1882-1944) descritas em 1914 (Kolitsch *et al.*, 2016).

Há muitas evidências desse vulcanismo alcalino terciário na forma de cúpulas vulcânicas, diques e soleiras em disposição sub-horizontal (De Kock, 1933) e que possuem numerosas cavidades miarolíticas, onde se formam diversos minerais de rara ocorrência. A idade do fonolito de Aris foi determinada através de datação radiométrica, com resultados de  $32 \pm 0.2$  milhões de anos obtidos por técnicas 40Ar/39Ar, conforme relatado por Burger e Walraven (1976). Estudos como os de Piilonen *et al.* (2010) têm ampliado o conhecimento sobre as fases minerais e as características hidrotermais da região, revelando novas informações sobre o processo de formação e modificação mineral da rocha.

A mineralogia do fonolito de Aris é particularmente notável devido à sua diversidade mineral e às suas características hidrotermais. O fonolito é composto predominantemente por feldspatos, nefelina e aegirina. Além disso, apresenta uma gama de minerais acessórios como haüyne, leucita, monazita e zircão (Von Knorring; Franke, 1987). Minerais de rara ocorrência foram encontrados em Aris, os quais são descritos a seguir.

#### 3.1.1 Arisita-(Ce)-NaCe<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>( $F_2(CO_3)$ )F





Fonte: www.mindat.org.

O mineral arisita-(Ce), nome que remete à localidade tipo, o fonólito Aris, na Namíbia (Piilonen *et al.*, 2010), possui a fórmula química NaCe<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(F<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>))F, e o sufixo "(Ce)" designa o elemento de terras raras dominante em sua composição. Sua cor varia de bege, begeamarelo, amarelo-limão claro a rosado. A arisita-(Ce) é frágil, apresenta fratura conchoidal, clivagem perpendicular a (001) e uma dureza de Mohs de aproximadamente  $3-3\frac{1}{2}$ . O mineral possui brilho vítreo a perolado e cristaliza no sistema hexagonal, formando cristais euédricos de até ~1,5 mm de tamanho. Esses cristais são transparentes, vítreos e podem formar placas finas a grossas de seis lados ou, raramente, prismas curtos com contornos hexagonais. O hábito é dominado pelo pinacóide basal (001) e, subordinadamente, pelo prisma (100). Entre o núcleo e a borda, e é possível encontrar uma zona rica em inclusões que podem dar aos cristais uma aparência turva (Kolitsch *et al.*, 2016).

#### 3.1.2 Arisita-(La)-NaLa<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>F<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)F



Figura 4: Arisita-(La). Pedreiras de Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia.

Fonte: www.mindat.org.

Arisita-(La) tem fórmula química NaLa<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>F<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)F. Os cristais de arisita-(La) são vítreos e apresentam cores que variam de bege transparente, amarelo-bege, amarelo-limão claro a rosado. A pedreira Ariskop é a localidade tipo deste fluorocarbonato de terras raras (REE) em camadas (Piilonen *et al.*, 2007). A arisita-(La) se forma em cavidades miarolíticas do fonólito, como resultado da cristalização de fluidos magmáticos ou hidrotermais residuais em estágio avançado. Este mineral é o análogo dominante em La da arisita-(Ce) e é visualmente indistinguível desta última. Os cristais ocorrem como prismas tabulares de até 1,5 mm e

possuem dureza Mohs de aproximadamente 3–3½. Além disso, os cristais frequentemente apresentam zonamento em relação à razão La/Ce (Kolitsch *et al.*, 2016).

#### 3.1.3 Sazhinita-(La)-Na<sub>3</sub>La(Si<sub>6</sub>O<sub>15</sub>)2H<sub>2</sub>O

Figura 5: Sazhinita-(La). Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia.



Fonte: www.mindat.org.

O mineral sazhinita-(La) foi descrito pela primeira vez por Cámara et al. (2006), e possui formula química Na<sub>3</sub>La(Si<sub>6</sub>O<sub>15</sub>)2H<sub>2</sub>O. A cor é cor branco-cremoso e incolor em luz planopolarizada, com brilho perolado e sistema ortorrômbico. A morfologia dos cristais é semelhante a ripas, variando de finas a mais espessas, que se estreitam em uma ponta em ambas as extremidades dos cristais. A sazhinita-(La) se apresenta na forma de pequenos cristais de até 1 mm de comprimento e 0,4 mm de largura, tipicamente alongados ao longo de (001) e achatados em (010). Apresenta boa clivagem paralela a (010) e (001) (Kolitsch *et al.*, 2016). O mineral ocorre dentro de vesículas do fonolito, juntamente com outras espécies cristalizadas a partir de fluidos hidrotermais em estágio avançado. Os cristais são frágeis, com dureza 3 na escala Mohs.

#### 3.1.4 Ellingsenita-Na5Ca6Si18O38(OH)136H2O



Figura 6: Ellingsenita, Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia.

Fonte: www.mindat.org.

O mineral ellingsenita, possui formula química Na<sub>5</sub>Ca<sub>6</sub>Si<sub>18</sub>O<sub>38</sub>(OH)<sub>13</sub>6H<sub>2</sub>O. A ellingsenita é um mineral que, química e estruturalmente, pertence ao grupo das reyeritas e está relacionada estruturalmente à martinita. A localidade tipo é a pedreira Ariskop, onde o material tipo foi coletado em 2002 por Astrid Haugen e Hans Vidar Ellingsen e descrito como uma nova espécie mineral por Yakovenchuk *et al.* (2011). O material foi encontrado em vesículas do fonolito, na forma de cristais em formato de losango, achatados em (001) e alongados em (100), dispostos em agregados radiais semelhantes a feixes. Possui cor branca a incolor, baixo relevo, brilho vítreo sedoso, e seu sistema cristalino é triclínico. A dureza é 4 na escala Mohs, a densidade é de 2,32(5) g/cm<sup>3</sup> e a forma dominante dos cristais é a pinacoidal.

#### 3.1.5 Escheita-Ca2NaMnTi5(Si12O34)O2(OH)312H2O



Figura 7: Escheita, Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia.

Fonte: www.mindat.org.

O mineral escheita, de formula química Ca2NaMnTi5(Si12O34)O2(OH)312H2O. Segundo a Mineralogical Database (2025) o mineral escheita, é característico de rochas ígneas alcalinas altamente evoluídas e faz parte do grupo da zorita. Foi nomeada em homenagem ao colecionador de minerais alemão Eng. Joachim Ernst Esche, que foi o primeiro a encontrar o mineral (Mineralogical Database, 2025). A escheita é um inossilicato com cadeias simples, apresentando-se na forma de cristais tabulares de coloração laranja-marrom, brilho vítreo, dureza 4 na escala Mohs, e seu sistema cristalino é o ortorrômbico.

#### 3.1.6 Windhoekita-Ca2Fe2(Si8O20)(OH)410H2O



Figura 8: Windhoekita Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia.

Fonte: www.mindat.org.

O mineral windhoekita recebeu o nome oriundo de Windhoek capital da Namíbia, possui formula química Ca<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>(Si<sub>8</sub>O<sub>20</sub>)(OH)<sub>4</sub>10H<sub>2</sub>O. Sua cor varia de marrom a marrom amarelado, possui brilho vítreo sedoso, e seu sistema cristalino é o monoclínico. A windhoekita é o termo para o mineral com predominância de Ca e Fe no grupo da palygorskita. Sua localidade tipo é a pedreira Ariskop (Chukanov *et al.*, 2012). A windhoekita se forma na borda das paredes do miarole como cristais prismáticos isolados e alongados, de até 4 mm de comprimento, bem como em agregados radiais ou divergentes de até 5 mm de diâmetro.

As espécies de zeólitos predominantes encontrados nas estruturas miarolíticos das rochas fonolíticas de Aris são a natrolita e a analcima, sendo a primeira provavelmente a mais comum. Outras espécies conhecidas e descritos das pedreiras de Aris até agora incluem o mesólito, a clinoptilolita-Na a lovedarita (Blass *et al.*, 2020), e a heulandita-Na (Kolitsch *et al.*, 2016).

#### 3.1.7 Natrolita-Na2Al2Si3O102H2O



Figura 9: Natrolita. Aris Quarries, Aris, Windhoek Rural, região de Khomas, Namíbia.

Fonte: www.mindat.org.

O mineral natrolita possui formula Na<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>2H<sub>2</sub>O e suas cores variam de branco, incolor, vermelho, amarelo, marrom, e verde azulado e o brilho característico é vítreo perolado. Possui sistema cristalino ortorrômbico com um hábito variável, mas tipicamente prismático curto, colunar. A natrolita é um mineral do subgrupo das zeólitas, que é um grupo que inclui diversos aluminossilicatos com tetraedros conectados por ligações angulares e que contêm cátions trocáveis. A natrolita já havia sido relatada por Knorring e Franke (1987) como a espécie mais comum nas cavidades miaroliticas de Aris (Kolitsch *et al.*, 2016).

#### 3.1.8 Analcima-Na(AlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)H<sub>2</sub>O

Figura 10: Analcima. Aris Quarries, Aris, Windhoek Rural, região de Khomas, Namíbia.



Fonte: www.mindat.org.

O mineral analcima possui formula química Na(AlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)H<sub>2</sub>O. Sua cor varia de branco, incolor, cinza, rosa, verde, amarelo e possui brilho vítreo a opaco. A dureza na escala Mohs é de 5 a 5½ e o sistema cristalino é o triclínico. Foi descrito pela primeira vez pelo geólogo francês Déodat de Dolomieu (1750-1801) como "zeólito dure" (zeólito duro) na lava das Ilhas Ciclópicas perto da Sicília, Itália, e foi nomeado em 1797 pelo mineralogista francês René Just Haüy com base no grego ανάλκιμος ("analkimos"), que significa "fraco" ou "sem força", aludindo à fraca carga eletrostática desenvolvida quando o mineral é aquecido ou friccionado (Kolitsch *et al.*, 2016).

### 3.1.9 Tupersuatsiaita-Fe2(Na)2Si8O20(OH)2(H2O)42H2O

Figura 11: Tupersuatsiaita (Figura 9) Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia.



Fonte: www.mindat.org.

O mineral tupersuatsiaita possui formula química Fe<sub>2</sub>(Na)<sub>2</sub>Si<sub>8</sub>O<sub>20</sub>(OH)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>4</sub>2H<sub>2</sub>O. Possui cores que variam de amarelo dourado, marrom avermelhado, marrom, marrom escuro, amarelo alaranjado e verde. Seu brilho é sedoso opaco e o sistema cristalino é monoclínico. No fonolito de Aris, a tupersuatsiaita forma tufos constituídos por cristais únicos em forma de agulha, muitas vezes achatados (semelhantes a ripas), com até 2 cm de comprimento. O mineral geralmente forma cristais radiais fortemente alongados ao longo de (001), achatados em (010), e geminados em (100) (Kolitsch *et al.*, 2016). De acordo com Von Knorring *et al.* (1992), o mineral pode estar associado ao microclínio, aegirina, natrolita, eudialita, makatita, viliaumita, titanita, apofilita, analcima, aragonita e bastnäsite-(Ce).

#### 3.1.10 Labuntsonita-Na4K4(Ba,K)2Mg(Ti,Nb)8(Si4O12)4(O,OH)810H2O



Figura 12: Labuntsonita (Figura 10) Pedreira Poudrette, Mont Saint-Hilaire, La Vallée-du-Richelieu RCM, Montérégie, Quebec, Canadá.

Fonte: www.mindat.org.

O mineral possui formula química Na<sub>4</sub>K<sub>4</sub>(Ba,K)<sub>2</sub>Mg(Ti,Nb)<sub>8</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub>)<sub>4</sub>(O,OH)<sub>8</sub>10H<sub>2</sub>O. A labuntsonita possui cor que varia entre amarelo dourado, marrom avermelhado, marrom escuro, amarelo alaranjado e verde. O brilho é sedoso e seu sistema cristalino é o monoclínico. Os cristais são pseudo-hexagonais e formam crescimento epitaxial em cristais pseudohexagonais de tsepinita-(Na), conforme relatado por Petersen et al. (2004). Os minerais associados são analcima, aegirina e natrolita, juntamente com um termo não identificado da série mica (Kolitsch *et al.*,2016).

#### 3.1.11 Makakita-Na2Si4O8(OH)24H2O



Figura 13: Makakita, Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia

Fonte: www.mindat.org.

O mineral makakita possui formula química Na<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>8</sub>(OH)<sub>2</sub>4H<sub>2</sub>O. Possui cor branca e sistema cristalino monoclínico. Aris oferece as melhores amostras do mundo para esta espécie. Nos miaroles do fonolito foram encontrados grandes cristais aciculares ou prismáticos, incolores ou esbranquiçados. Eles são geralmente dispostos para formar sprays que podem atingir 3 cm de tamanho, sendo que os maiores vêm da pedreira Aris East. Alguns cristais apresentam uma fina camada externa opaca branca, sugerindo que foram afetados por algum processo de desidratação, e o mineral é encontrado em paragênese com tupersuatsiaita, aegirina, natrolita e viliaumita, (Kolitsch *et al.*, 2016).

#### 3.1.12 Viliaumita-NaF



Figura 14: Viliaumita. Pedreiras de Aris, Aris, Windhoek Rural, Região de Khomas, Namíbia

Fonte: mindat.org.

O mineral viliaumita possui fórmula química NaF e sua cor varia de vermelho carmim escuro e laranja claro a rosa. Apresenta brilho vítreo e dureza na escala Mohs de 2 a 2½. A densidade específica é de 2,79 g/cm<sup>3</sup>. O mineral é membro do grupo da halita, e segundo Calas et al. (2021), a cor vermelha é atribuída a nanopartículas metálicas de Na, com diâmetro de 2,5 a 3 nm. Ainda não está claro quando a viliaumita foi encontrada e analisada pela primeira vez. No entanto, foi relatado pela primeira vez por Von Knorring e Franke (1987) (Kolitsch *et al.*, 2016).

#### **4 RESULTADOS**

#### 4.1 Descrição petrográfica em lâmina delgada polida

Os estudos petrográficos envolveram a descrição de duas amostras de mão coletadas na mina Ariskop, região central da Namíbia (Figura 1) onde foram confeccionadas duas lâminas delgadas polidas e um molde de grãos. Com base nessas amostras, foi possível obter informações sobre a mineralogia e textura que auxiliaram na classificação e interpretação litológica, bem como processos de mineralização ocorridos na formação do fonolito, como a presença de feições de hidrotermalismo.

Esta rocha apresenta coloração que variam de cinza claro a cinza médio, é maciça, leucocrática, hipocristalina e predominantemente inequigranular, com textura que varia de afanítica a fanerítica média fina, a porfirítica (Figura 14). A rocha é marcada por uma infinidade de cavidades miarolíticas, fruto de reações de hidrotermalismo. A análise microscópica revela que essa rocha apresenta texturas granulares hipidiomórficas, no geral com minerais de hábito prismático e faces subédricas, no entanto, não são incomuns minerais com hábitos granulares e faces anédricas.





Fonte: Cedida pelo orientador do presente trabalho.

São compostas essencialmente por feldspatos alcalinos, piroxênios, feldspatóides, filossilicatos e minerais acessórios. Os piroxênios sódicos, como a augita e a aegirina, se encontram em grande parte como fenocristais. Sua matriz é predominantemente constituída por cristais de feldspato potássico, feldspatoides, cristais de piroxênio, biotita e muscovita. O

anfibólio definido como augita possui faces subédricas e anédricas e seus contatos são irregulares com a mineralogia envolta. Além da augita, outro anfibólio presente é a aegirina encontrada em quantidade expressiva na amostra analisada.

Sua mineralogia principal é composta por feldspatos alcalinos ortoclásio 20%, nefelina 30%, aegirina 25%, augita 17%, biotita 6%, muscovita 2% bem como minerais acessórios como a sazhinita, hidroxiapofilita-(K), nontronita e tupersuatsiaita. Essa rocha foi classificada de acordo com suas respectivas composições modais utilizando o diagrama de Streckeisen (1976) (Figura 16).

Figura 16: Diagrama Q-A-P-F (Streckeisen, 1976) com a classificação modal das amostras descritas do fonolito



Fonte: Extraído e modificado de rc.unesp.br.

#### 4.1.1 Augita

A figura mostra cristais de augita aglomerados no centro das imagens. A nicóis descruzados, o cristal é levemente acinzentaodo a incolor, com duas direções de clivagem proximo a 90°, característico dos piroxênios, é comum encontrar também apenas uma direção de clivagem, que ocorrem invariavelmente nas faces prismáticas. Possui algumas fraturas e obseva-se um relevo médio a alto em relação aos minerais ao redor. Em nicóis cruzados, podemos observar formas desde anédricas à euédricas, possui cores fortes de final de primeira

ordem e início de segunda ordem, que variam desde amarelo à azul, extinção obliqua em relação à clivagem caracteristica da augita, bem como maclas. Apresenta um pouco de zonação e sinal de elongação positivo.

Figura 17: No centro da fotomicrografia com objetiva de aumento 10, minerais de augita, a nicóis descruzados e cruzados, respectivamente. Sigla: Aug (augita).



Fonte: Autor da obra.

## 4.1.2 Aegirina

Cristais de aegirina no centro das imagens. A nicóis descruzados exibem coloração verdeescuro a verde-amarelado, com pleocroísmo intenso, variando entre tons de verde escuro, médio e amarelo, dependendo da orientação do cristal. Possui relevo alto, destacando-se nitidamente em relação ao meio circundante, e forma cristalina geralmente prismática e alongada. Em nicóis cruzados, a aegirina apresenta cores de interferência de primeira a segunda ordem, com tons que variam entre amarelo, azul e, ocasionalmente, cinza. A extinção é oblíqua, com ângulo geralmente inferior a 10° em relação às clivagens, as maclas são simples e observadas em alguns cristais, manifestando-se como traços finos e lineares. Outras propriedades incluem birrefringência moderada, altos índices de refração e clivagem bem desenvolvida em duas direções, formando ângulos próximos a 87° e 93°. Figura 18: No centro da fotomicrografia com objetiva de aumento 10, minerais de aegirina a nicóis descruzados e cruzados, respectivamente. Sigla: Aeg (aegirina).



Fonte: Autor da obra.

# 4.1.3 Biotita

Mineral de biotita no centro do retículo. A nicóis descruzados apresenta coloração que varia de marrom claro a marrom escuro, podendo adquirir tons avermelhados ou esverdeados dependendo de sua composição e orientação cristalina. O pleocroísmo é intenso, com mudanças de cor entre marrom claro a marrom escuro, características que ajudam na sua diferenciação de outros minerais. A nicóis cruzados apresenta relevo médio a alto, destacando-se moderadamente do meio circundante, e os cristais apresentam um hábito lamelar, com contornos que podem ser irregulares com os minerais ao redor. Além disso, a biotita possui birrefrigência moderada a alta, e clivagem em uma direção, frequentemente visível como planos bem definidos. O caráter óptico é biaxial negativo, com um ângulo 2V moderado.
Figura 19: No centro da fotomicrografia com objetiva de aumento 10, um mineral de biotita a nicóis descruzados e cruzados, respectivamente. Siglas Bt (biotita).



Fonte: Autor da obra.

### 4.1.4 Nefelina

Mineral de nefelina no centro do retículo. Em nicóis descruzados, é tipicamente incolor ou levemente cinza. Não apresenta pleocroísmo e possui relevo baixo. Seus cristais geralmente exibem hábitos euédricos, ocasionais granulares e com contornos hexagonais em retângulos bem preservados. Em nicóis cruzados, a nefelina exibe núcleos de interferência muito baixos, como cinza de primeira ordem, e extinção reta, dependendo da orientação do cristal. Maclas são raras, e a clivagem, embora presente em duas possibilidades indistintas, é pouco evidente, possui baixa birrefringência além de conter intensas fraturas.

Figura 20: No centro da fotomicrografia com objetiva de aumento 10, um fenocristal de nefelina a nicois descruzados e cruzados, respectivamente. Sigla Nph (nefelina).



### 4.1.5 Ortoclásio

O mineral ortoclásio no centro das imagens. A nicóis descruzados é incolor, apresenta relevo baixo, com algumas fraturas. Possui cor de interferência de primeira ordem. A nicóis cruzados, apresenta uma forma tabular, o cristal é euédrico, com formato regular, possui a macla carlsbad, característica do grão e extinção paralela ao plano de macla. Seus índices de refração variam de 1,51 a 1,53, o que contribui para a análise de seu baixo relevo. A birrefringência do ortoclásio é baixa, com valores entre 0,008 e 0,010, o que resulta em tons de branco e amarelo pálido quando observado sob luz plano polarizada.

Figura 21: No centro da fotomicrografia com objetiva de aumento 10, um fenocristal de ortoclásio a nicóis descruzados e cruzados, respectivamente. Sigla Or (ortoclásio).



Fonte: Autor da obra.

#### 4.2 Análises químicas por MEV-EDS

### 4.2.1 Lâmina ARIS 1, Campo 1

Foram realizadas nove análises por EDS no Campo 1 da lâmina ARIS 1 (Figura 21). Dentre essas análises, cinco pontos (1, 2, 3, 4 e 5) apresentaram teores elevados de Na, Al e Si, com uma pequena porcentagem de K (Figura 23). Esses pontos foram identificados como pertencentes ao mineral nefelina, destacando-se o ponto 1, cuja composição química foi determinada como Na<sub>3.74</sub>K<sub>0.26</sub>(Al<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>16</sub>) (Figura 22), característica da nefelina.

Os pontos 6, 8 e 9 revelaram concentrações mais elevadas de Na, Ca, Si e Fe (Figura 25), permitindo sua associação ao mineral aegirina (Ae) (Figura 26). Em especial, o ponto 9 apresentou composição química Na<sub>0.72</sub>Ca<sub>0.28</sub> $\Sigma_{1.00}$ (Fe<sup>3+</sup><sub>0.89</sub>Mg<sub>0.11</sub>)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, condizente com a composição típica da aegirina.

Um achado de grande relevância foi a identificação do mineral de ocorrência rara sazhinita no ponto 7. Esse mineral foi caracterizado pela presença marcante de Na e Si, além dos elementos terras raras La, Ce e Nd (Figura 24). A composição química determinada para esse mineral foi Na<sub>3</sub>(Ce<sub>0.45</sub>La<sub>0.42</sub>Nd<sub>0.13</sub>) $\Sigma_{1.00}$ Si<sub>6</sub>O<sub>15</sub>·2H<sub>2</sub>O (Figura 22), apresentando uma concentração de Ce superior à de La. Dessa forma, o mineral foi classificado como sazhinita-(Ce) (Figura 27).

Figura 22: Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina ARIS 1, campo 1. Siglas: Ne (nefelina), Ae (aegirina), Sz (Sazhinita-(Ce)



Spectrum Label	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3	Spectrum 4	Spectrum 5	Spectrum 6	Spectrum /	Spectrum 8	Spectrum 9	
0										
Na	21,88	17,5	18,33	17,25	18,24	12,26	19,38	8,93	11	
Mg								2,37	0,76	
AI	32,93	33,2	31,97	31,47	33,05	0,71		1,31	0,99	
Si	42,88	44,07	45,13	46,09	43,83	55,26	62,69	54,93	54,96	
K	2,31	4,77	3,91	4,32	4,54					
Ca						5,4		9,24	6,45	
Ti						0,84		0,36	0,5	
Mn						1,31		1,15	0,81	
Fe		0,45	0,66	0,88	0,34	23,32		21,7	24,53	
Zr						0,9				
La							8,3			
Ce							8,87			
Nd							0,77			
Та						0		0	0	
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	Nefelina	Nefelina	Nefelina	Nefelina	Nefelina	Aegirina	Sazhinita	Aegirina	Aegirina	

Figura 23: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 1

φ Spectrum 1 0 100 Si AI Na κ Weight % 50% cps/eV Na 50 К 0 Т T Т I 0 5 10 15 keV

Figura 24: Espectro 1 com a composição química referente ao mineral nefelina



Figura 25: Espectro 7 com a composição química referente ao mineral sazhinita-(Ce)

Figura 26: Espectro 9 com a composição química referente ao mineral aegirina



Fonte: Autor da obra.

Figura 27: Diagrama de fase dos piroxenios



Fonte: Extraído e modificado de mindat.org.

Figura 28: Diagrama ternario indicando o mineral sazhinita-(Ce)



Fonte: Extraído e modificado de diagramaweb.com.

### 4.2.2 Lâmina ARIS 1, Campo 2

Foram realizadas dez análises por EDS na lâmina ARIS 1, no Campo 2 (Figura 28). Dentre os pontos analisados, os pontos 10 e 11 apresentaram concentrações elevadas de Na, Ca, Si e Fe, além de pequenas proporções de Mn e Ti (Figura 30). Em particular, o ponto 10 revelou a composição química Na<sub>0.79</sub>Ca<sub>0.21</sub> $\Sigma_{1.00}$ Fe<sup>3+</sup>0.88Mn<sub>0.03</sub>Ti<sub>0.09</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (Figura 29), permitindo sua identificação como aegirina (Figura 33), um clinopiroxênio alcalino típico de ambientes ígneos sódicos.

Os pontos 12, 13, 14, 15, 16, 18 e 19 destacaram-se por apresentarem teores elevados de Na, Al, Si e K (Figura 31). Em particular, o ponto 12 exibiu a composição química Na<sub>3.43</sub>K<sub>0.57</sub>(Al<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>16</sub>) (Figura 29), compatível com a mineralogia da nefelina, um feldspatoide característico de rochas alcalinas.

Por outro lado, o ponto 17 apresentou concentrações expressivas de Na, Si, Ca e Fe, acompanhadas de menores proporções de Mn e Ti (Figura 32). Sua composição química, Na<sub>0.29</sub>Ca<sub>0.71</sub> $\Sigma_{1.00}$ (Fe<sup>3+</sup>0.93Mn<sub>0.06</sub>Ti<sub>0.01</sub>)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, foi compatível com a augita (Figura 34), um clinopiroxênio amplamente associado a ambientes magmáticos.

Figura 29: Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lamina ARIS 1, campo 2. Sigasl: Ne (nefelina), Ae (aegirina), Au (aegirina)



Fonte: Autor da obra.

Spectrum Label	Spectrum 10	Spectrum 11	Spectrum 12	Spectrum 13	Spectrum 14	Spectrum 15	Spectrum 16	Spectrum 17	Spectrum 18	Spectrum 19	
0											
Na	12,72	13,02	17,2	17,21	14,39	17,46	17,31	5,7	17,85	17,62	
Mg	0	0	0	0	0	0	0	1,96	0	0	
Al	0,97	1,16	32,14	32,02	24,87	32,06	30,94	1,21	31,53	31,66	
Si	54,87	54,8	45,56	45,46	57,64	45,42	47,57	50,69	46,45	45,79	
K	0	0	4,31	4,38	1,92	4,19	3,34	0	3,47	4,1	
Ca	3,07	2,87	0	0	0	0	0	12,83	0	0	
Ti	1,88	2,57	0	0	0	0	0	0,37	0	0	
Mn	0,72	0,9	0	0	0	0	0	1,54	0	0	
Fe	25,76	24,68	0,79	0,93	0,43	0,87	0,84	25,42	0,69	0,82	
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	Aegirina	Aegirina	Nefelina	Nefelina	Nefelina	Nefelina	Nefelina	Augita	Nefelina	Nefelina	

Figura 30: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 2

Figura 31: Espectro 10 com a composição química referente ao mineral aegirina



Figura 32: Espectro 12 com a composição química referente ao mineral nefelina



Figura 33: Espectro 17 com a composição química referente ao mineral augita



Figura 34: Diagrama de fase dos piroxenios



Fonte: Extraído e modificado de mindat.org.

Figura 35: Diagrama de fase dos piroxenios



Fonte: Extraído e modificado de mindat.org.

### 4.2.3 Lâmina LSC, campo 1

Foram realizadas sete análises por EDS no campo 1 da lâmina LSC (Figura 35). Os resultados indicaram que os pontos 2, 3, 5, 6 e 7 apresentaram concentrações elevadas de Na, Ca, Si, Mn e Ti (Figura 37). Destaca-se o ponto 3, cuja composição química é Na<sub>0.62</sub>Ca<sub>0.38</sub> $\Sigma_{1.00}$ (Fe<sup>3+</sup><sub>0.94</sub>Mn<sub>0.03</sub>Ti<sub>0.03</sub>)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (Figura 36), permitindo a identificação do mineral como sendo o clinopiroxênio aegirina (Figura 39).

O ponto 8 apresentou concentrações mais elevadas de Na, Al e Si, além de uma menor proporção de K (Figura 38). Sua composição química, Na<sub>3.43</sub>K<sub>0.57</sub>(Al<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>16</sub>), possibilitou a identificação do mineral como nefelina, um feldspatoide comum em rochas alcalinas.

Figura 36: Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina LSC campo 1. Siglas: Ne (nefelina), Ae (aegirina).



Fonte: Autor da obra.

						1 2	
pectrum 8	pectrum 7	Spectrum 6	Spectrum 5	Spectrum 4	Spectrum 3	Spectrum 2	Spectrum Label
							0
17,45	12,41	12,05	7,3	26,63	10,51	8,11	Na
0	0,67	0	1,99	0	0,55	1,09	Mg
32,23	1,17	1,12	1,48	30,4	0,84	0,86	AI
45,1	53,43	54,4	51,85	36,02	52,54	51,75	Si
0	0	0	0	0	0	0	CI
4,39	0	0	0	0	0	0	К
0	4,67	3,62	10,79	0	5,8	9,38	Ca
0	0,47	1,27	0,31	0	0,8	0,31	Ti
0	0,15	0	0,16	0		0,16	Cr
0	0,59	1,31	1,3	0	0,8	1,23	Mn
0,82	26,44	26,24	24,82	0,31	28,15	27,11	Fe
				1,05			Мо
	0	0	0		0	0	Та
100	100	100	100	94,42	100	100	Total
nefelina	aegirina	aegirina	aegirina		aegirina	aegirina	

Figura 37: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 1

Figura 38: Espectro 2 com a composição química referente ao mineral aegirina



Figura 39: Espectro 8 com a composição química referente ao mineral nefelina



Fonte: Autor da obra.

Figura 40: Diagrama de fase dos piroxenios



Fonte: Extraído e modificado de mindat.org.

4.2.4 Lâmina LSC campo 1\_2

Foram realizadas 12 análises por EDS na lâmina LSC, no campo 1\_2 (Figura 40). Os resultados indicaram que os pontos 9, 10 e 13 apresentaram concentrações mais elevadas de Na, Ca, Si e Fe, além de menores proporções de Mn e Ti (Figura 42). Especificamente, o ponto 9 revelou a composição química Na<sub>0.82</sub>Ca<sub>0.18</sub>Σ<sub>1.00</sub>(Fe<sup>3+</sup>0.91Mn<sub>0.03</sub>Ti<sub>0.06</sub>)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (Figura 41), permitindo a caracterização do mineral como clinopiroxênio aegirina (Figura 46).

O ponto 11 apresentou concentrações significativas de Na, Si, Ca e Fe, com menores teores de Mn e Ti, e sua composição química, Na<sub>0.31</sub>Ca<sub>0.69</sub>Σ<sub>1.00</sub>(Fe<sup>3+</sup>0.94</sub>Mn<sub>0.06</sub>)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (Figura 41), possibilitou a identificação do mineral como augita (Figura 47), um clinopiroxênio comum em rochas magmáticas.

Nos pontos 14, 16 e 17, foram observados teores elevados de Na, Al, Si e K (Figura 44). Em particular, o ponto 14 apresentou a composição química K<sub>0.94</sub>Na<sub>0.06</sub>AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, compatível com a do ortoclásio, um feldspato potássico. Já o ponto 19 destacou-se pelas altas concentrações de Na, Al e Si, apresentando a composição química Na<sub>3.96</sub>Ca<sub>0.04</sub>Al<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>16</sub>, permitindo a identificação do mineral como nefelina, um feldspatoide típico de rochas alcalinas.

Os demais pontos analisados não permitiram uma identificação precisa da fase mineralógica presente, ressaltando a necessidade de métodos analíticos complementares para a caracterização detalhada dos minerais nesse campo.



Figura 41: Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina LSC campo 1\_2. Siglas Ae (aegirina), Au (augita), Ne (nefelina), Or (ortoclasio)

Fonte: Autor da obra.

Figura 42: Tabela	com a con	posição qui	mica de	cada poi	nto realiz	zado no	campo 1	_2

Spectrum Label	Spectrum 9	Spectrum 10	Spectrum 11	Spectrum 12	Spectrum 13	Spectrum 14	Spectrum 15	Spectrum 16	Spectrum 17	Spectrum 18	Spectrum 19	ectrum 20
Na	11,77	10,51	6,31	9,4	9,46	0,28	3,15	0,89	1,89	20,21	25,14	5,68
Mg	0,42		1,41		0,9							
Al	0,9	0,96	0,92		1,12	18,93	20,24	19,43	19,26	7,34	30,25	16,43
Si	53,72	53	38,88	36,41	52,68	65,4	37,22	62,82	63,75	22,57	36,72	63,43
К						13,96	29,19	13,69	13,27	11,64		8,4
Ca	3,48	5,87	23,11	29,74	7,5					2,35		
Ti	2,53	0,83		8,25	0,53							
Cr			0,36									
Mn	1,05	0,75	1,18		0,92							
Fe	26,13	28,08	16,59		26,9		9,74	0,32	0,32		0,88	5,22
Nb				3,16								
La				5,12								
Ce				7,93								
Total	100	100	88,76	100	100	100	99,54	100	99,69	84,99	93,84	100
	Aegirina	Aegirina	Augita		Aegirina	Ortoclásio		Ortoclasio	Ortoclasio		Nefelina	Descartar



Figura 43: Espectro 9 com a composição química referente ao mineral aegirina



Figura 44: Espectro 11 com a composição química referente ao mineral augita



Figura 45: Espectro 14 com a composição química referente ao mineral ortoclásio

Fonte: Autor da obra.

Figura 46: Espectro 19 com a composição química referente ao mineral nefelina



Figura 47: Diagrama de fase dos piroxenios



Fonte: Extraído e modificado de mindat.org.

Figura 48: Diagrama de fase dos piroxenios



Fonte: Extraído e modificado de mindat.org.

#### 4.2.5 Lâmina LSC campo 2

Foram realizadas sete análises por EDS na lâmina LSC, no campo 2 (Figura 48), cujos resultados indicaram que os pontos 21, 26 e 27 apresentaram teores elevados de Na, Si e Fe, além de menores proporções de Mn e Ti. Especificamente, o ponto 21 exibiu a composição química Na<sub>0.63</sub>Ca<sub>0.37</sub> $\Sigma_{1.00}$ (Fe<sup>3+</sup>0.95Mn<sub>0.03</sub>Ti<sub>0.02</sub>)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (Figura 49), permitindo a identificação do mineral como clinopiroxênio aegirina (Figura 52).

Nos pontos 24 e 25, foram observadas concentrações elevadas de Na, Al e Si, sendo que apresentaram a fórmula química Na<sub>4</sub>(Al<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>16</sub>), (Figura 49), confirmando a presença da nefelina, um feldspatoide típico de rochas alcalinas. Os demais pontos analisados não permitiram uma identificação precisa da fase mineralógica presente, ressaltando a necessidade de métodos analíticos complementares para a caracterização exata dos minerais encontrados nesse campo.

Figura 49: Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada na lâmina LSC campo 2. Siglas: Ne (nefelina), Ae (augita)



Fonte: Autor da obra.

0		. 1 5	1			. <u>I</u>			
Sp	ectrum Label	Spectrum 21	Spectrum 22	Spectrum 23	Spectrum 24	Spectrum 25	Spectrum 26	ectrum 27	
	0								
	Na	10,69	2,54	3,43	19,13	18,59	8,21	15,48	
	Mg	0,61	0	0	0	0	2,4	0	
	Al	0,72	0	0,19	29,4	29,23	1,49	0	
	Si	53,64	2,56	11,61	51,47	52,18	53,23	53,81	
	Ca	5,8	51,28	38,12	0	0	10,13	2,6	
	Ti	0,48	0	0	0	0	0,42	0,77	
	Mn	0,81	0	1,41	0	0	1,27	0,43	
	Fe	26,24	0	0	0	0	22,63	24,75	
	Total	100	59,12	56,74	100	100	100	97,85	
		Aegirina			Nefelina	Nefelina	Aegirina	Aegirina	

Figura 50: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 2



Figura 51: Espectro 21 com a composição química referente ao mineral aegirina



Figura 52: Espectro 24 com a composição química referente ao mineral nefelina

Figura 53: Diagrama de fase dos piroxenios



Fonte: Extraído e modificado de mindat.org.

## 4.2.6 Molde de grãos ARIS 3.

## 4.2.6.1 Hidroxiapofilita-(K)

Foram realizadas 15 análises por EDS no campo 1 do molde de grãos ARIS 3 (Figura 54), nas quais foram observadas concentrações elevadas de Si, Ca e K, além de pequenas proporções de Cr (Figuras 55 e 56). Os resultados obtidos permitiram a identificação da hidroxiapofilita-(K), um minral do grupo da apofilita, típico de intrusões alcalinas, como as de Aris. A hidroxiapofilita-(K) possui fórmula química KCa<sub>4</sub>(Si<sub>8</sub>O<sub>20</sub>)(OH,F)·8H<sub>2</sub>O e cristaliza no sistema tetragonal. Na imagem, o mineral ocorre na forma de cristais bem desenvolvidos, característicos dessa espécie mineral.



Figura 54: Análise MEV EDS fotomicrografia realizada no campo 1 Lâmina ARIS 3

Fonte: Autor da obra.

Spec	ctrum Label	pectrum 1	pectrum 2	pectrum 3	pectrum 4	pectrum 5	pectrum 6	pectrum 7	pectrum 8	pectrum S	ectrum 10	ectrum 11	ectrum 12	ectrum 13	ectrum 14	ectrum 15
	0															
	F												0			
	Na												1,74			
	Al	1,9	1,71		17,43	24,52						18,24	0,39	0,3	22,17	4,8
	Si	66,38	66,14	63,66	48,93	43,73	65,9	66,64	66,48	66,79	66,84	65,28	59,18	39,67	40,22	8,2
	K	5,41	5,39	6,06	8,17	6,56	5,7	5,78	5,66	5,72	5,6	16,48	4,96	9,76	4	11,73
	Ca	25,76	5 25,43	29,82	25,47	25,19	26,7	27,08	26,73	26,93	8 27,03		24,65	50,27	20,56	75,26
	Cr	0,55	i 0,5	0,46			0,59	0,49	0,59	0,56	6 0,54		0,6			
	Fe														13,04	
	Мо						0,46									
	Yb								0,55							
	Hg		0,82				0,66									
	Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91,53	100	100	100

Figura 55: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 1

Figura 56: Espectro 1 com a composição química referente ao mineral hidroxiapofilita-(K)



Fonte: Autor da obra.

### 4.2.6.2 Ellingsenita

Foram realizadas 15 análises por EDS no campo 2 do molde de grãos ARIS\_3 (Figura 57). Os pontos 16, 17, 18 e 19 destacaram-se por apresentar concentrações elevadas de Na, Si e Ca, além de menores proporções de Cr (Figuras 58 e 59). Com base nessa composição química, foi possível identificar o mineral como ellingsenita, cuja fórmula química é Na<sub>5</sub>Ca<sub>6</sub>Si<sub>18</sub>O<sub>38</sub>(OH)<sub>13</sub>6H<sub>2</sub>O. Esse mineral é caracterizado por sua riqueza nesses elementos e por

seu sistema cristalográfico triclínico. Na imagem, a ellingsenita ocorre na forma de acículas, uma morfologia típica dessa espécie mineral.



Figura 57: Análise MEV EDS fotomicrografia realizada no campo 3 Lâmina ARIS 3 Sigla El (ellingsenita)

Fonte: Autor da obra.

Figura 58: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 2

Spectrum Label	ectrum 16	ectrum 17	ectrum 18	ectrum 19	ectrum 20	ectrum 21	ectrum 22	ectrum 23	ectrum 24	ectrum 25	ectrum 26	ectrum 27	ectrum 28	ectrum 29	ectrum 30
0															
Na	9,68	8,9	8,24	8,75	17,49	15,88	15,6		14,46				10,79	5,88	7,8
A			0,4		31,13	28,76	29,54			0,32	0,73	0,75	19,34	L .	0,78
Si	71,67	72,22	70,14	72,88	45,65	53,03	53,57	100	85,54	66,54	62,84	6,44	69,87	58,8	56,62
S															0,58
K					4,35	5				5,5	5,95			0,5	0,34
Ca	18,19	18,37	18,23	17,94	ł					26,55	28,99	92,8			0,24
Ti															0,4
Cr	0,46	0,51	0,26	0,43						0,57	0,49				
Mn			0,21											4,67	4,1
Fe			0,57		1,39	0,17	1				0,56			28,68	28,76
Mo														1,47	
In						0,67	1								0,37
Та														0	0
Ir			1,95			1,49	1,29								
Hg										0,52					
TI											0,43				
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Figura 59: Espectro 18 com a composição química referente ao mineral ellingsenita



Fonte: Autor da obra.

### 4.2.6.3 Augita

Foram realizadas dez análises por EDS no campo 4 do molde de grãos ARIS\_3 (Figura 60), cujos resultados indicaram a predominância dos elementos Na, Si e Fe em concentrações significativas (Figuras 61 e 62). Além disso, foram identificados elementos-traço, como Ca, Ti e Mn, que, apesar de estarem presentes em menores proporções, desempenham um papel relevante na caracterização mineralógica. Com base na composição química observada e na associação característica desses elementos, foi possível identificar a augita, um clinopiroxênio comum em rochas ígneas, cuja fórmula química é (Ca,Fe,Mg)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>. O mineral ocorre na amostra na forma de um cristal bem formado, compatível com seu sistema cristalográfico monoclínico. Adicionalmente, a análise do ponto 40 revelou um alto teor de Fe e uma concentração moderada de Ti (Figura 60), sugerindo a presença de um óxido de ferro enriquecido em titânio.



Figura 60: Análise MEV EDS fotomicrografia realizada no campo 4 Lâmina ARIS 3

100µm

Fonte: Autor da obra.

Spectrum Label	Spectrum 40	Spectrum 41	Spectrum 42	Spectrum 43	Spectrum 44	Spectrum 45	Spectrum 46	Spectrum 47	Spectrum 48	Spectrum 49
0										
Na		12,91	18,04	1,84	11,04	16,63	15,53	17,67	12,32	0,73
AI	0,38	0,86	1,2	18,54	14,92	1,05	16,47	1,48	0,95	1,08
Si	0,55	52,94	54,08	66,96	59,63	53,82	50,2	54,06	52,53	1,13
S							1,82			
к				10,98	0,29					
Ca	0,5	1,82	1,41		0,79	2,64	1,63	1,12	2,49	0,18
Ti	2,21	0,92	1,78		0,51	1,56	0,96	0,84	1,85	2,3
Mn	3,61	0,71	0,95		0,39	1,5	0,59	0,87	1,82	0,94
Fe	92,75	29,83	22,54	0,46	11,89	22,79	12,81	23,33	27,36	93,65
In				1,22	0,54					
Er								0,63	0,68	
Та		0	0			0		0	0	
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Figura 61: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 4

Figura 62: Espectro 42 com a composição química referente ao mineral augita



Fonte: Autor da obra.

### 4.2.6.4 Tupersuatsiaita

Foram realizadas 11 análises por EDS no campo 6 do molde de grãos ARIS 3 (Figura 63), cujos resultados indicaram uma presença marcante dos elementos Na, Si e Fe, além de traços de Mn e Ti (Figuras 64 e 65). Essa composição é característica da tupersuatsiaita, um mineral raro que cristaliza no sistema monoclínico e possui a fórmula química Fe<sub>2</sub>(Na)<sub>2</sub>Si<sub>8</sub>O<sub>20</sub>(OH)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>4</sub>2H<sub>2</sub>O. A identificação do mineral foi confirmada por meio da análise dos dados químicos, que evidenciaram sua composição elementar compatível com a estrutura da tupersuatsiaita. Além disso, sua ocorrência na amostra foi observada na forma de ripas, uma morfologia distintiva. A combinação entre a composição química e as características morfológicas reforça a identificação da tupersuatsiaita, um mineral associado a certos tipos de rochas alcalinas, particularmente em ambientes geológicos ricos em sódio e metais de transição



Figura 63: Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada no campo 6 Lâmina ARIS 3. Siglas Tu (tupersuatsiaita)

Fonte: Autor da obra.

ectrum 76	ectrum 75	ectrum 74	ectrum 73	ectrum 72	ectrum 71	ectrum 70	ectrum 69	ectrum 68	ectrum 67	ectrum 66	Spectrum Label
											0
8,11	12,88	9,42	12,47	10,76	8,22	10,65	13,88	1,47	1,95	0,16	Na
0,34	0,55		1,64	0,49		8,78	1,34	5	0,58	0,16	Al
48,75	53,35	51,28	52,2	50,11	50,73	52,97	51,8	8,29	20,44	5,21	Si
3,06		3,49	0,96	3,42	0,8	1,71	0,63	1,7	2,67		K
								0,3			Ca
0,4	0,57	0,55	0,5	0,34	0,41	0,55	0,25	0,49	0,74	0,38	Ti
1,56	0,75	1,68	0,93	2,19	1,89	1,25	0,81	4,21	3,8	1,42	Mn
37,76	31,9	33,59	29,75	30,9	37,19	23,65	31,29	83,22	69,82	92,68	Fe
					0			0			Br
					0,35	0,43					In
0	0	0	0		0		0				Та
			0,8	1,11							Ir
			0,74	0,68							Hg
100	100	100	100	100	99,57	100	100	99,68	100	100	Total

<b>L</b> .	CA.	T-1.1.		• • ~ •		.1 .	1 .					1
Figura (	h4.	Labela con	m a compo	S1C20	autmica	de	cada :	nonto	realizado	$n_0 c$	amno	h
I Iguiu	•••	I ubblu con	in a compo	orçuo.	quinneu	uv	cuuu	ponto	Tounduao	110 00	ampo	o





Fonte: Autor da obra.

## 4.2.6.5 Nontronita

Foram realizadas oito análises por EDS no campo 7 do molde de grãos ARIS 3 (Figura 66), cujos resultados indicaram uma predominância dos elementos Si e Fe, além de pequenas proporções de Mn, Al e Na (Figuras 67 e 68). Essa composição é característica da nontronita, um argilomineral do grupo das esmectitas, notável por seu alto teor de silício e ferro. A nontronita apresenta fórmula química NaFe<sub>2</sub>((Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O e cristaliza no sistema monoclínico. A identificação desse mineral foi confirmada por meio da análise dos dados químicos obtidos, que evidenciaram uma composição elementar compatível com a estrutura da nontronita.



Figura 66: Análise MEV EDS, fotomicrografia realizada no campo 7 Lâmina ARIS 3. Sigla No (nontronita)

Fonte: Autor da obra,

		•				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
ectrum 84	ectrum 83	ectrum 82	ectrum 81	ectrum 80	ectrum 79	ectrum 78	ectrum 77	Spectrum Label
								0
1,3	12,65	6,61	6,63	9,47	3,91	0,5		Na
	0,46	0,23	0,2			0,6		Al
5,07	59,84	48,82	47,59	58,82	35,72	3,21	60,18	Si
					0,17	0,16		К
		0,31						Ca
		0,22						Ti
4,11	1,64	2,68	3,03	1,98	3,5	5,74	2,15	Mn
88,79	25,41	40,33	42,56	29,25	56,7	89,78	37,68	Fe
0								Br
				0,48				In
		0,8						Er
	0	0		0			0	Та
99,28	100	100	100	100	100	100	100	Total

Figura 67: Tabela com a composição química de cada ponto realizado no campo 7

Figura 68: Espectro 81 com a composição química referente ao mineral nontronita



## **5 DISCUSSÕES**

Os resultados obtidos na análise das amostras do fonolito de Aris confirmam uma mineralogia composta principalmente por feldspatos, piroxênios, feldspatoides e filossilicatos, com variações nas porcentagens modais desses minerais. A presença de minerais raros, como sazhinita-(Ce), ellingsenita, tupersuatsiaita e hidroxiapofilita-(K), evidencia a complexidade mineralógica da rocha e reforça sua importância no contexto geológico e mineralógico.

A identificação dessas fases minerais de rara ocorrência contribui para a ampliação do conhecimento sobre o fonolito de Aris, corroborando estudos anteriores, como o de Piilonen *et al.* (2010), que destacam as características hidrotermais da região. Esses achados sugerem que processos hidrotermais desempenharam um papel significativo na modificação mineral da rocha, promovendo a formação de novas fases minerais e revelando interações complexas entre fluidos e minerais preexistentes.

A variação nas porcentagens modais dos minerais indica possíveis diferenças no grau de alteração hidrotermal, sugerindo heterogeneidade nos processos pós-magmáticos que atuaram sobre o fonolito. Além disso, a presença de minerais raros aponta para condições químicas específicas durante a evolução da rocha, que podem estar relacionadas à composição dos fluidos hidrotermais e às variações na pressão e temperatura durante os eventos de alteração.

Dessa forma, os resultados deste estudo não apenas complementam o conhecimento prévio sobre a mineralogia do fonolito de Aris, mas também abrem novas perspectivas para investigações futuras sobre a evolução geológica da região, incluindo estudos mais detalhados sobre os processos hidrotermais e as condições físico-químicas responsáveis pela formação das fases minerais raras.

## 6 CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu a caracterização detalhada da mineralogia e petrografia do fonolito de Aris, destacando sua relevância científica devido à presença de minerais raros e sua composição química típica de sistemas alcalinos.

A utilização de técnicas complementares, como microscopia óptica e análises de EDS no MEV, foi fundamental para a caracterização mineralógica, permitindo a identificação de minerais que não puderam ser claramente observados por métodos convencionais. A ausência de minerais do grupo da arisita, apesar das buscas realizadas, não diminui a importância das descobertas feitas, que evidenciam a singularidade do fonolito de Aris e os processos geoquímicos que influenciaram sua formação.

Além de contribuir para o entendimento da geologia local, este estudo estabelece uma base científica para pesquisas futuras, ressaltando a necessidade de investigações mais aprofundadas sobre os processos hidrotermais e as condições físico-químicas que controlaram a mineralogênese dessa rocha alcalina. A identificação de minerais pouco comuns representa um avanço no conhecimento dos processos petrogenéticos que atuaram na região, sugerindo novas direções para estudos geológicos na Namíbia.

Por fim, os resultados obtidos reforçam a importância de abordagens multidisciplinares na caracterização de rochas alcalinas, demonstrando como a integração entre técnicas clássicas e modernas de análise pode fornecer informações mais detalhadas sobre a geologia e mineralogia de regiões pouco exploradas. Dessa forma, este estudo não apenas amplia a compreensão sobre o fonolito de Aris, mas também contribui para a valorização científica dessa unidade geológica e de seu potencial mineralógico

# REFERÊNCIAS

BECKER, T.; WIEGAND B.; HANSEN BT.; WEBER, K. Sm-Nd, Rb-Sr and U-Pb data from the Rehoboth Basement Inlier, Namibia: evidence of a Paleoproterozoic magmatic arc. **Communications of the Geological Survey of Namibia**, v. 13, p. 75-84, 2004.

BLASS, G.; KRAUSE, J.; MÜLLER, A.; SCHMIDT, B. Geology of Namibia: Volume 4 - Neoproterozoic to Lower Palaeozoic. Windhoek: Geological Survey of Namibia, 2020.

BRICE, D. L. Geology of the Auas Volcanic Province: A Study of Alkaline Magmatism in Namibia. Geological Society of Namibia, 1992. p. 45-58.

BURGER, A. J.; WALRAVEN, T. Summary of age determinations carried out during the period April 1975 to March 1976. Annals of the Geological Survey of South Africa, v. 11, p. 323-329, 1976.

CÁMARA, F.; OTTOLINI, L.; DEVOUARD, B.; GARVIE, L. A. J.; HAWTHORNE, F. C. Sazhinite-(La), Na<sub>3</sub>LaSi<sub>6</sub>O<sub>15</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>, a novel mineral from Aris phonolite, Namibia: description and crystal structure. **Mineralogical Journal**, v. 70, p. 405-418, 2006.

CHUKANOV, N. V.; BRITVIN, S. N.; BLASS, G.; BELAKOVSKY, D. I.; VAN, K. V. Windhoekite,  $Ca_2Fe^{3+}_{3-x}(Si_8O_{20})(OH)_{4}$ ·10H<sub>2</sub>O, a new palygorskite-group mineral from the Aris phonolite, Namibia. **European Journal of Mineralogy**, v. 24, p. 171-179, 2012.

DE KOCK, W. P. The phonolite occurrence north-west of Rehoboth. Zeitschrift für Vulkanologie, v. 14, p. 288-296, 1933.

GEVERS, T. W. Alkali rocks in the Auas mountains south of Windhoek SWA. **Transactions** of the Geological Society of South Africa, v. 36, p. 77-88, 1933.

GEVERS, T. W. The geology of the Windhoek district in South West Africa. **Transactions** of the Geological Society of South Africa, v. 37, p. 221-251, 1934a.

GEVERS, T. W. The geology of the area around the Numees Copper Mine, Namaqualand. **Transactions of the Geological Society of South Africa**, v. 37, p. 1-32, 1934b.

GRAY, D. R.; FOSTER, D. A.; MEERT, J. G.; GOSCOMBE, B. D.; ARMSTRONG, R.; TROUW, R. A. J.; PASSCHIER, C. W. A Damaran orogeny perspective on the assembly of southwestern Gondwana. In: PANKHURST, R. J.; TROUW, R. A. J.; BRITO NEVES, B. B.; DE WIT, M. J. (Org.). West Gondwana: pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic Region. Special Publications, v. 294. Londres: **Geological Society of London**, 2008. p. 257–278.

HOFFMAN, P. F.; KAUFMAN, A. J.; HALVERSON, G. P.; SCHRAG, D. P. A Neoproterozoic Snowball Earth. **Science**, v. 281, n. 5381, p. 1342-1346, 1998. KOLITSCH, U.; BLAβ, G.; JAHN, S.; CÁMARA, F.; VON, L.; WARTHA, R.; TREMMEL, G.; STURLA, M.; CEREA, P.; SKEBO, M.; CIRIOITTI, M. Aris - Mineralogy of the famous alkaline phonolite. 2016. p. 9, 20, 24, 50, 54, 63, 74, 79, 80.

KOLLER, F.; ŠKODA, R.; PALFI, G.; POPP, F. Phonolites of the Aris and Rehoboth areas, Central Namibia. In: MINERALOGICKÁ A PETROLOGICKÁ KONFERENCIA MINPET 2013, 2013, Bratislava. **Zborník recenzovaných abstraktov príspevkov**, Bratislava: [s.n.], p. 40, 2013.

KRÖNER, A. The Precambrian of Africa. Episodes, v. 1973, n. 4, p. 3-8, 1973.

MAPANI, B.; CORNELL, D.; SCHIJNDEL, V. Geochronology and tectonic evolution of the Hohewarte Complex, Central Namibia: New insights into Paleoproterozoic to Early Neoproterozoic crustal accretion processes. **Journal of Geosciences**, Cape Town, v. 45, n. 2, p. 234-250, 2014.

MARTIN, H. Overview of the geosynclinal development of the Damara Orogen and its ore deposits. In: Mineral Deposits of Southern Africa. **Geological Society of South Africa**, v. 1, p. 423-445, 1983

MARSH, J. S. Evolution of a strongly differentiated suite of phonolites from the Klinghardt Mountains, Namibia. **Lithos**, v. 20, p. 41-58, 1987.

MINDAT. Analcime. **Mindat.org**, 2023. Disponível em: http://www.mindat.org/min-2105.html. Acesso em: 22 ago. 2024.

MINDAT. Arisite-(Ce). **Mindat.org**, 2023. Disponível em: https://www.mindat.org/min-39483.html. Acesso em: 08 jan. 2025.

MINDAT. Arisite-(La). **Mindat.org**, 2023. Disponível em: https://www.mindat.org/min-39549.html. Acesso em: 08 jan. 2025.

MINDAT. Ellingsenite. **Mindat.org**, 2023. Disponível em: http://www.mindat.org/min-39667.html. Acesso em: 08 jan. 2025.

MINDAT. Escheite. **Mindat.org**, 2023. Disponível em: https://www.mindat.org/min-53222.html. Acesso em: 09 dez. 2024.

MINDAT. Labuntsovite-Mn. **Mindat.org**, 2023. Disponível em: http://www.mindat.org/min-2309.html. Acesso em: 22 ago. 2024.

MINDAT. Makatite. **Mindat.org**, 2023. Disponível em: http://www.mindat.org/min-1234.html. Acesso em: 22 ago. 2024.

MINDAT. Natrolite. **Mindat.org**, 2023. Disponível em: http://www.mindat.org/min-2947.html. Acesso em: 22 ago. 2024.

MINDAT. Sazhinite-(La). **Mindat.org**, 2023. Disponível em: https://www.mindat.org/loc-7687.html. Acesso em: 09 dez. 2024.

MINDAT. Villiaumite. **Mindat.org**, 2023. Disponível em: http://www.mindat.org/min-1234.html. Acesso em: 22 ago. 2024.

MINDAT. Windhoekita. **Mindat.org**, 2023. Disponível em: https://www.mindat.org/search.php?search=Windhoekita. Acesso em: 08 jan. 2025.

MINERALOGICAL DATABASE. Klein Spitzkoppe Albite-Quartz-Syenite Pegmatite. Mindat.org. Disponível em: https://www.mindat.org/min-53222.html. Acesso em: 08 jan. 2025.

PETERSEN, O. V.; NIEDERMAYR, G.; PEKOV, I. V.; BALIĆ-ŽUNIĆ, T.; BRANDSTÄTTER, F. Tsepinit-Na und Labuntsovit-Mn, seltene Mineralien aus dem Phonolit von Aris, Namibia. **MineralienWelt**, v. 15, n. 2, p. 44-48, 2004.

PIILONEN, P. C. et al. Arisite-(La), a new REE-fluorcarbonate mineral from the Aris phonolite (Namibia), with descriptions of the crystal structures of arisite-(La) and arisite-(Ce). **Mineralogical Magazine**, v. 74, n. 2, p. 257–268, abr. 2010.

PORADA, H. Pan-African rifting and orogenesis in southern to equatorial Africa and eastern Brazil. **Precambrian Research**, v. 44, n. 2, p. 103-136, 1989.

RIMANN, E. Trachyt, Phonolith, Basalt in Deutsch-Südwestafrika. Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1914, p. 33-37.

UNESP. **Diagrama QAPF para rochas ígneas vulcânicas**. rc.unesp.br [online]. Disponível em: https://arkadlab.com/a-classificacao-de-rochas-igneas-de-streckeisen/. Acesso em: 11 nov. 2024.

VON KNORRING, O. V.; FRANKE, W. A preliminary note on the mineralogy and geochemistry of the Aris phonolite, SWA/Namibia. **Communications of the Geological Survey of S.W. Africa/Namibia**, v. 3, p. 65, 1987.

VON KNORRING, O. V.; PETERSEN, O. V.; KARUP-MÖLLER, S.; LEONARDSEN, E. S.; CONDLIFFE, E. Tuperssuatsiaite from Aris phonolite, Windhoek, Namibia. **Neues Jahrbuch für Mineralogie**, Monatshefte, 1992, p. 60-63.

YAKOVENCHUK, V. N.; IVANIUK, G. Y.; PAKHOMOVSKY, Y. A.; SELIVANOVA, E. A.; MIKHAILOVA, J. A. Ellingsenite, Na<sub>2</sub>Ca<sub>6</sub>Si<sub>18</sub>O<sub>38</sub>(OH)<sub>13</sub>·6H<sub>2</sub>O, a new martinite related mineral species from phonolite of the Aris alkaline complex, Namibia. **The Canadian Mineralogist**, v. 49, p. 1165-1173, 2011.