

4 CONCEITOS SOBRE A TECTÔNICA DE ENXAMES DE DIQUES

Este capítulo aborda numa forma sintética alguns conceitos básicos da mecânica de rochas, mecanismos de fraturamento, o controle de estruturas pré-existentes, na rochas encimadas na geometria de diques e também como a interação entre os campos de esforços internos e externos atuantes durante a intrusão de um dique controle sua propagação e geometria. A relação entre as fraturas internas de resfriamento e o campo de esforço externo também será discutido.

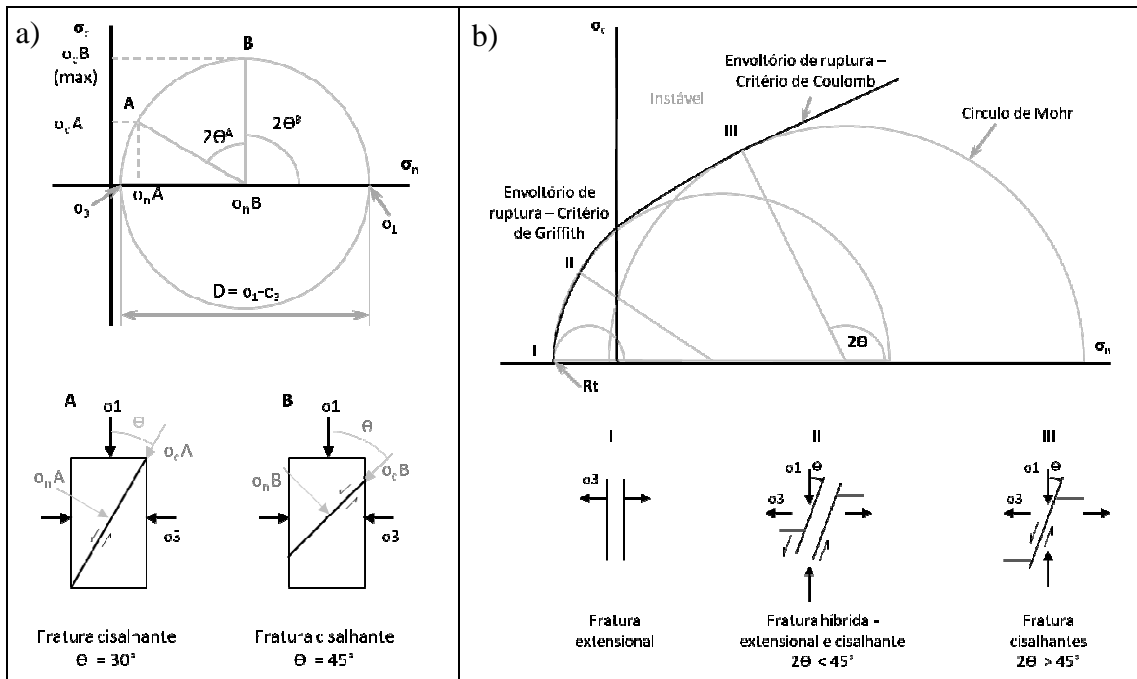
O estudo de exames de diques máficos podem trazer informações importantes sobre processos geodinâmicos (Hall, 1982). As geometrias de enxames de diques variam conforme o campo de esforços atuante durante sua formação, por exemplo, diques anelares e radiais são frequentemente associados a corpos plutônicos e/ou edifícios vulcânicos onde o campo de tensão regional foi localmente afetado pelo magmatismo (Gudmundsson, 2002). No caso de exames de diques lineares, muitos autores (Fialko & Rubin, 1999; Jolly & Sanderson, 1995; Pollard, 1987; etc.) consideram que a orientação do exame é resultante de esforços regionais. Neste caso, eles representam as manifestações de distensão crustal e se posicionaram perpendicular à direção de esforço mínimo (Anderson, 1951; Hoek, 1991).

Para entender o alojamento de diques, os conceitos de campo de esforços e alguns aspectos da mecânica de rochas devem ser considerados. O campo de esforços é definido por três tensores principais de esforço, $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Utilizando o círculo de Mohr podemos descrever o esforço normal (σ_n) e de cisalhamento (σ_c) atuando num ponto ao longo de um plano contido no plano σ_2 , mas de qualquer orientação (Θ) com respeito a σ_1 e σ_3 (Figura 12a). O diâmetro do círculo de Mohr é definido pelas magnitudes de σ_1 e σ_3 , (Fossen, 2016, Figura 12a). O diagrama indica que o maior esforço cisalhante ocorre paralelo a um plano com um ângulo (Θ) de 45° em respeito a σ_1 e σ_3 , com uma magnitude equivalente ao raio do círculo. Porém, resultados experimentais de compressão uniaxial mostram que fraturas cisalhantes normalmente formam com um ângulo (Θ) de 30° com σ_1 .

Um envoltório de ruptura pode ser adicionado ao diagrama de Mohr, seguindo os critérios de Coulomb, e de Griffith (1924). Círculos de Mohr dentro deste envoltório representam estados de esforços estáveis enquanto estados de esforços críticos estão representados por círculos de Mohr tangenciais ao envoltório (Figura 12b). O critério de Coulomb prevê a formação de uma fratura cisalhante de ângulo 2Θ para um determinado

coeficiente de atrito interno (ϕ), (Figura 12b). Mas se o valor de σ_3 é negativo e σ_1 é muito baixo ou igual à zero, uma situação comum perto da superfície terrestre, fraturas extensionais forma se perpendicular à σ_3 (Fossen, 2016), (Figura 12b). A resistência à tensão da rocha (R_t) é calculado quando o envoltório de ruptura cruza o eixo horizontal no diagrama de Mohr.

Figura 12 – Diagrama de Mohr e o envoltório de ruptura com as fraturas relacionadas



Legenda: a) Círculo de Mohr representando o estado de esforços num ponto ao longo de um plano paralelo a σ_2 e com um ângulo (Θ) de: A. 30° e; B. de 45° com σ_1 . Observe que o máximo esforço cisalhante ocorre paralelo a este segundo plano. b) Diagrama de Mohr com envoltória de ruptura e as fraturas relacionados: I - fraturas de extensão; II - fraturas híbridas que incluem componentes de extensão e cisalhamento; III - fraturas cisalhantes de acordo com o critério de Coulomb.

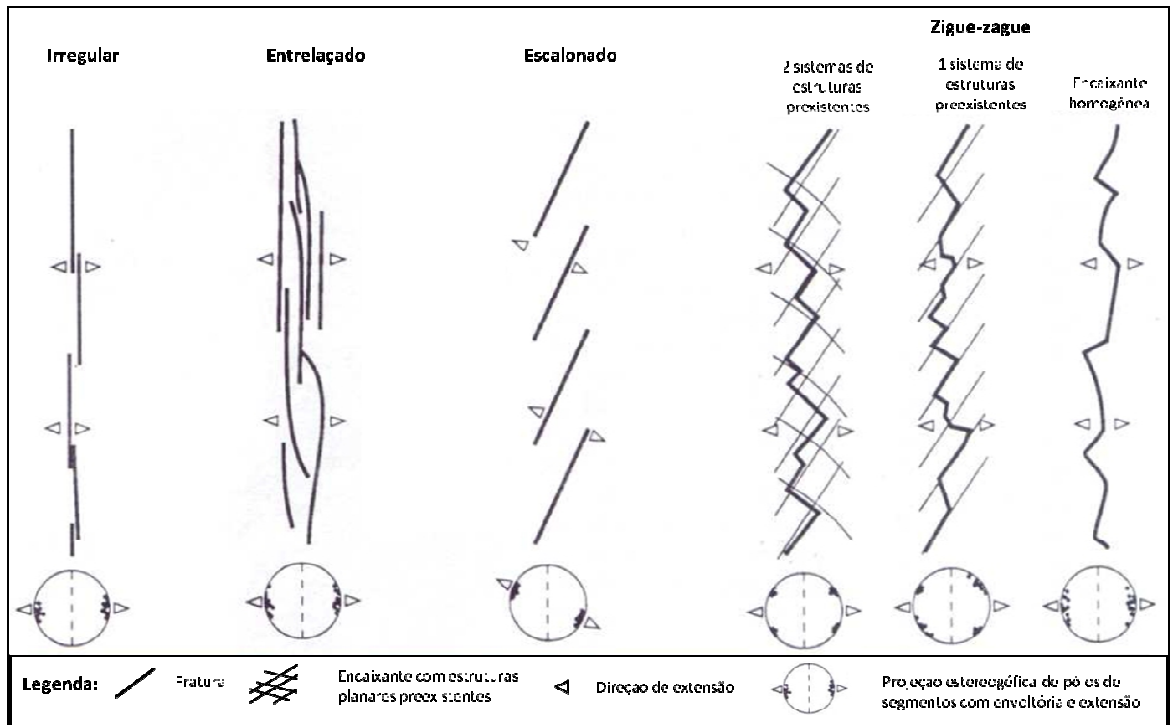
Note: σ_n e σ_c são os componentes de esforços normal e paralelo (cisalhante) a um plano de ângulo (Θ) em relação ao esforço principal (σ_1)

Fonte: Modificado de Fossen, 2016.

Na abordagem de Pollard (1987), diques se propagam através de fraturas-conduto que podem ser consideradas como fraturas extensionais. Dessa maneira, a abertura de um dique é normal às suas paredes, e paralelo à direção do menor esforço regional (σ_3). Num ambiente distensivo linear com tensão horizontal, σ_1 é horizontal, e σ_2 é vertical, as fraturas extensionais tendem a se propagar paralelo à direção de σ_1 . Sistemas de fraturas são geralmente segmentados, então a direção geral dos diques é dada pela superfície envoltória dos segmentos. Hoek (1991) propôs uma classificação de sistemas de fraturas extensionais levando em consideração: a orientação de segmentos, a superfície envoltória e a direção de extensão; a presença de bifurcações, degraus e escalonamentos; e a presença de segmentos

paralelos ou lado ao lado (Figura 13). Com base nestas características, Hoek (1991) classificou os diques como: diques irregulares; entrelaçados (*braided*), diques em échelon e diques em zigue-zague.

Figura 13 – Classificação da geometria de dique-fratura



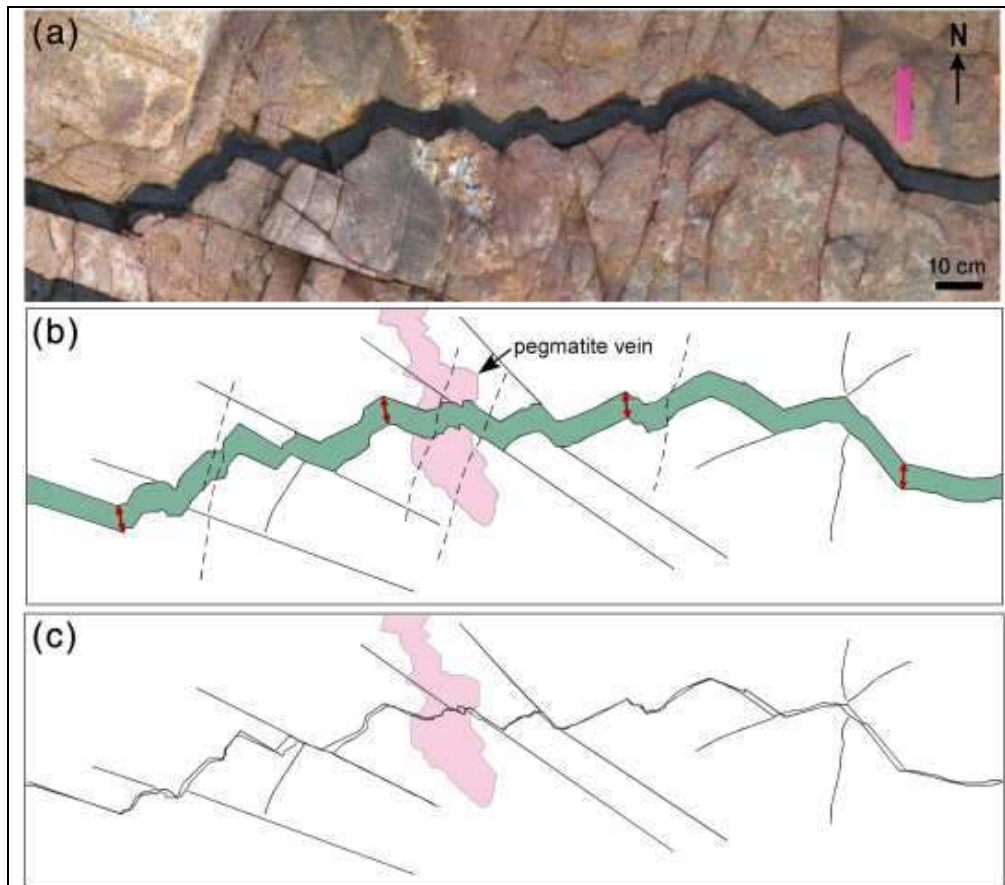
Legenda: Classificação da geometria de dique-fratura e a influência de estruturas preexistentes na encaixante na geometria do dique.

Fonte: Hoek, 1991

Observe que no caso de diques escalonados a dilatação é oblíqua à superfície envoltória e normal aos segmentos. Em contraste, os diques em zigue-zague são caracterizados pela extensão oblíqua na maior parte dos segmentos. Estes segmentos podem representar fraturas neoformadas ou planos de fraqueza (fraturas, foliação etc.) das rochas encaixantes reativados devido a sua orientação favorável com relação ao campo de esforços (Delaney et al., 1986; Ziv et al., 2000). Neste caso, é necessário procurar critérios adicionais para determinar a direção de extensão, como a variação da espessura do dique ou o deslocamento de marcadores externos. A análise da orientação, distribuição, geometria e variação da espessura dos diques foram usadas em estudos recentes de Martínez-Poza & Druguet (2016) e Martínez-Poza et al. (2014) para determinar o campo de esforços atuante durante a intrusão de diques permianos na Espanha. Em ambos os casos, os diques foram intrudidos em granitóides com mais de um sistema de fraturas existentes. A maioria destes sistemas de fraturas foram reaproveitados pelo magma com dilatação normal ou oblíqua às

paredes do dique conforme a orientação dos segmentos (Martínez-Poza et al., 2014) - Figura 15. A variação da espessura dos diques, a identificação de quinas correspondentes em diques com degraus ou em zigue-zague, e o deslocamento de marcadores externos permitiram determinar a direção de extensão dos diques lamprofíricos de Aiguablava - Figura 14.

Figura 14 – Dique lamprofírico em zigue-zague, Aiguablava, Espanha



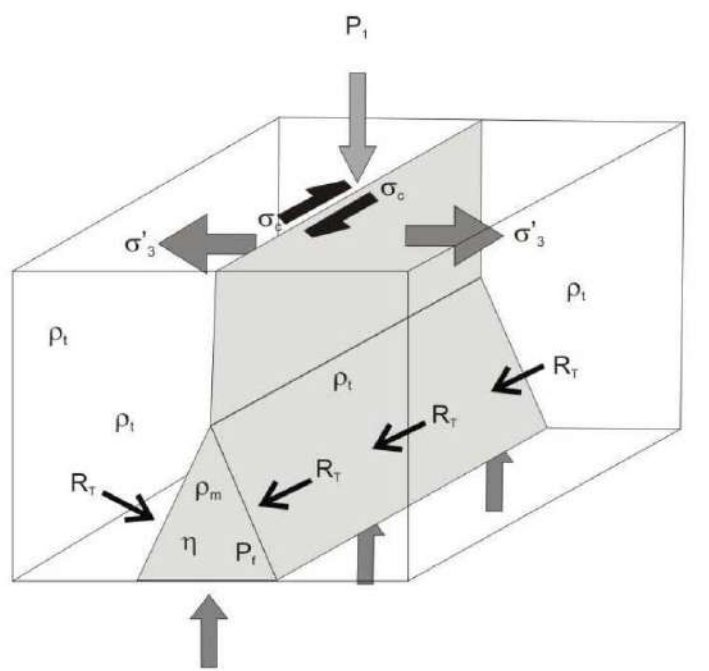
Legenda: Dique lamprofírico centimétrico em zigue-zague, Platja de N'Astàsia, Aiguablava a) Fotografia; b) desenho indicando as principais fraturas prévias (linhas cheias) e posteriores (linhas tracejadas) à intrusão do dique e a direção de extensão aparente (setas vermelhas); c) reconstrução da fratura inicial mostrando sua propagação ao longo fraturas existentes. Observe o deslocamento do veio pegmatítico (rosa).

Fonte: Martínez-Poza et al., 2014

Correa-Gomes et al. (2001) propuseram que localmente a propagação e a geometria de um dique é o resultado da interação entre (Figura 15):

- a) O campo de tensão interno do dique que é controlado pela pressão de fluidos (P_f), a densidade (ρ_m) e a viscosidade (η) do magma;
- b) O campo de tensão externo resultante da tensão mínima local (σ_3'), tensão cisalhante (σ_c), resistência à tensão da rocha encaixante (R_t), densidade da rocha encaixante (ρ_t), e a pressão litosférica (P_1).

Figura 15 – Relação geométrica entre os diversos componentes do campo de tensão interna

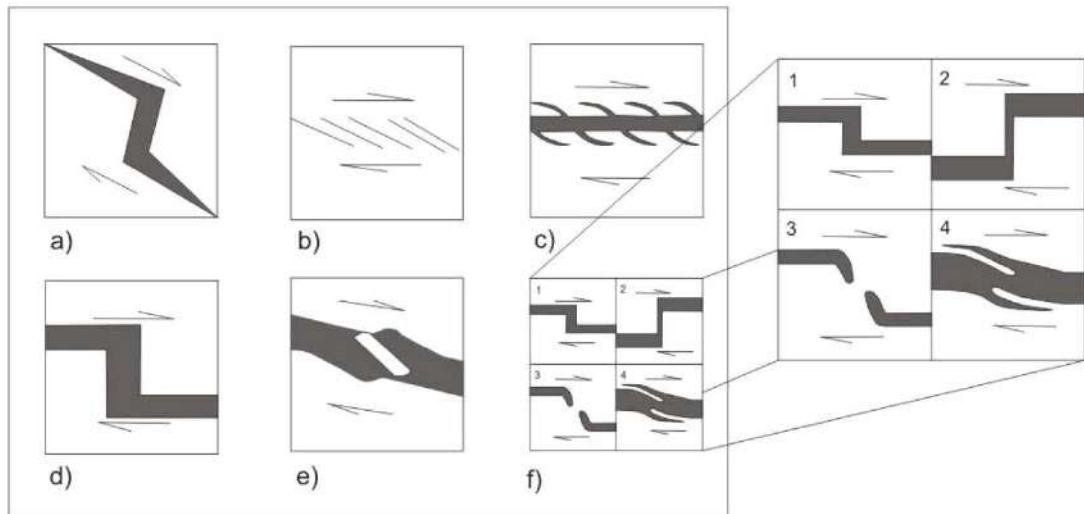


Legenda: Relação geométrica entre os diversos componentes do campo de tensão interna: densidade do magma (ρ_m), viscosidade do magma (η); pressão de fluidos (P_f); e externo: resistência à tensão da rocha encaixante (R_t); tensão mínima local (σ_3'); tensão cisalhante (σ_c); densidade da rocha encaixante (ρ_t) e pressão litosférica (P_1).

Fonte: Corrêa Gomes et al., 1996.

O resultado desta interação aparece nas marcas de fluxo magmático, nas formas das fraturas-conduto e nas fraturas de resfriamento. A atuação de um campo de tensão externo durante o alojamento de um dique pode ser indicada pela forma das fraturas-conduto (Rickwood, 1990; Corrêa Gomes, 2001), tais como: formas em zigue-zague; formas escalonadas; ramificações assimétricas; formas em degraus (*steps*), pontes (*bridges*) e tocos (*branches*) tal como ilustrado na figura 16. Três famílias de fraturas internas associadas ao resfriamento do magma de um dique vertical hipotético foram descritas por Corrêa Gomes et al., (1996): 1) fraturas longitudinais, subverticais e paralelas às paredes do dique; 2) fraturas transversais, verticais e perpendiculares às paredes do dique; 3) e fraturas basais, subhorizontais - Figura 17a. Nesta situação, a orientação das fraturas longitudinais e transversais representam as direções de σ_1 e σ_3 , respetivamente. Um desvio deste padrão de fraturamento poderia indicar a atuação de um campo externo de tensão onde σ_1 e σ_3 são oblíquos à fratura conduto do dique (Corrêa Gomes et al., 1996) - Figura 17b.

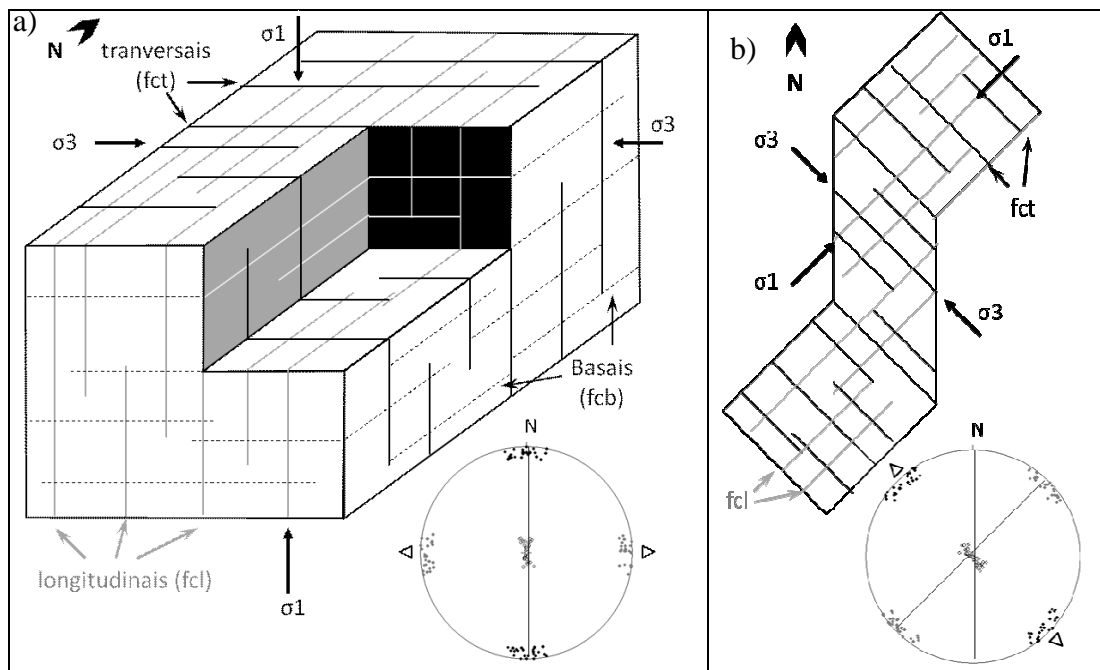
Figura 16 – Geometrias indicativas de cisalhamento durante alojamento



Legenda: Geometrias indicativas de um possível cisalhamento durante alojamento de diques: a) Zigue-zague b) Dique escalonados; c) formas ramificadas assimétricas; d) formas de degraus com centro mais espesso que as laterais; e) enclave rotacionado; f) outras formas indicando o mesmo sentido de movimento 1. degrau, 2. conector entre segmentos, 3. ponte, 4. tocos

Fonte: Corrêa Gomes et al., 1996

Figura 17 – A relação das fraturas internas de resfriamento com o campo de esforço externo



Legenda: a) Fraturas internas de resfriamento de um dique hipotético de orientação N-S: fraturas longitudinais (fcl - linhas cinzas) são subverticais e paralelas ao comprimento maior do dique, fraturas transversais (fct - linhas pretas) são também subverticais, porém, perpendiculares às paredes do dique, e as fraturas basais (fcb - linhas brancas e traçadas) são subhorizontais. Observe que os polos das fraturas longitudinais indicam a direção de extensão (σ_3). b) Dique em zigue-zague com fraturas de resfriamento oblíquas às paredes do segmento central, indicando a influência de um campo de esforço externo durante seu alojamento.

Fonte: Modificado de Corrêa Gomes et al. (1996).

5 CARACTERIZAÇÃO DO ENXAME DE DIQUES DA COSTA DO ESQUELETO

O exame de diques da Costa do Esqueleto (*Skeleton Coast Dyke Swarm - SCDS*), é aqui descrito pela primeira vez. Este capítulo trata com: a) o mapeamento dos diques usando dados aeromagnéticos e sensoriamento remoto; b) aspectos de campo dos diques; c) a descrição petrográfica dos diques; e d) os resultados de análise litogeoquímica. A geometria e cinemática dos diques seria discutido no próximo capítulo desta dissertação.

5.1 Mapeamentos dos diques com dados aeromagnéticos e sensoriamento remoto

O contraste de susceptibilidade magnética entre os diques toleíticos do noroeste da Namíbia e suas rochas encaixantes facilita seu mapeamento através dos dados aeromagnéticos. Porém, devido a suas pequenas dimensões, feições importantes para a análise cinemática dos diques, tais como zigue-zagues, bifurcações, tocos e pontes não são fáceis de mapear apenas com os dados aeromagnéticos. Por isso, os mapas de AS, GHT e dZ foram comparados com imagens de satélite do Google Earth e Landsat 8; e com modelos digital de elevação do SRTM e ASTERGDEM. Nas áreas sem dados aeromagnéticos de alta resolução, o mapa de campo magnético anômalo/residual (RTMI) foi comparado com as imagens de satélite e o relevo sombreado. Esta comparação permitiu a classificação de cada dique mapeado como descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Classes dos diques mapeados

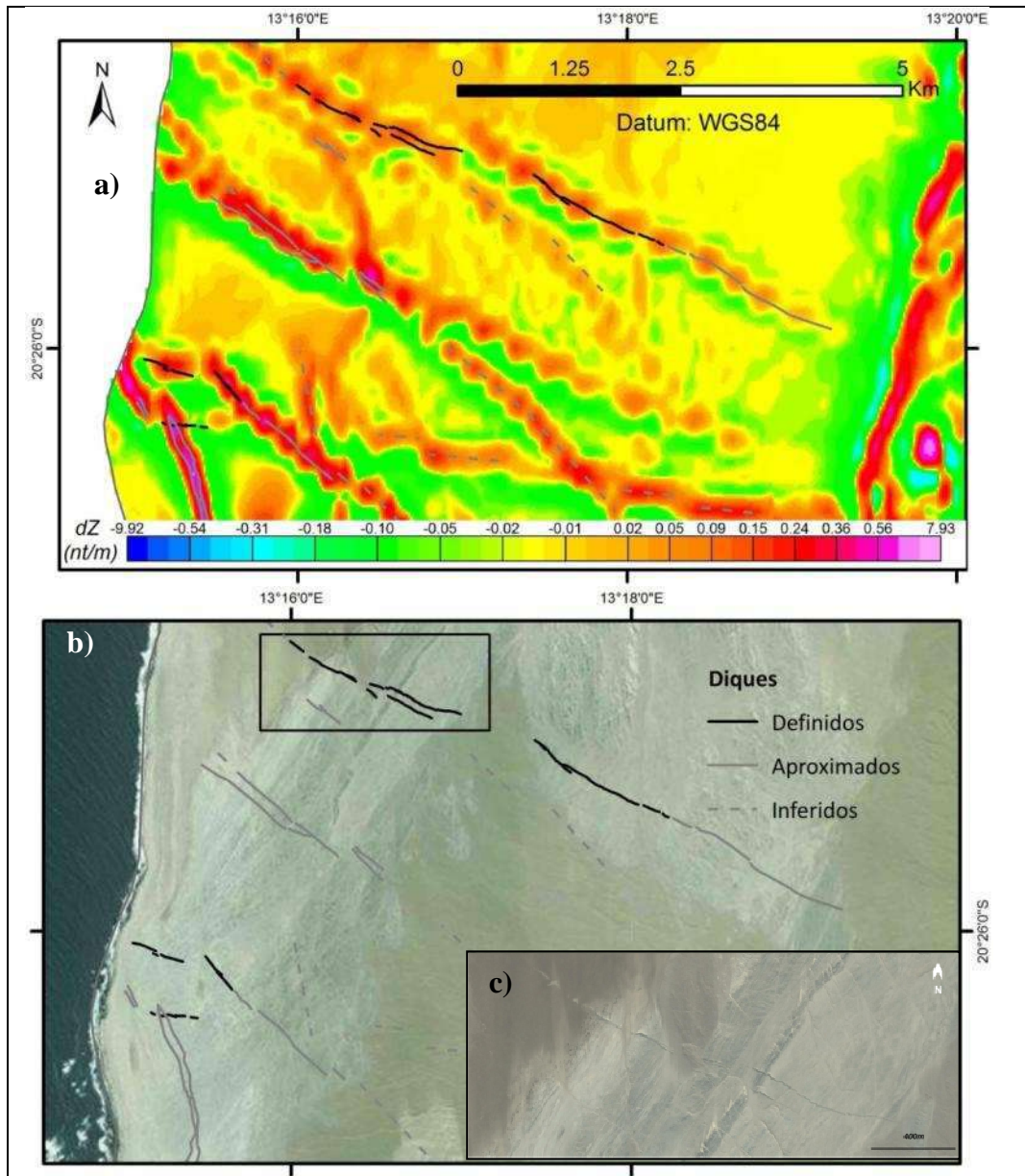
Classe	Tipo	Descrição
1	Definidos	Visíveis nas imagens de satélite e com anomalias magnéticas associadas.
2	Aproximados	Anomalias magnéticas associadas aos lineamentos nas imagens de satélites ou no relevo sombreado (SRTM ^a e ASTER GDEM ^b).
3	Inferidos	Anomalias magnéticas (lineares) que são continuções (ou não) de diques das classes 1 & 2.

Legenda: Diques mapeados através da comparação de dados aeromagnéticos, imagens de satélite e modelos digitais de elevação: a) SRTM - *Shuttle Radar Topographic Mission*; b) ASTER GDEM - *Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model*

Fonte: O autor, 2017.

Dessa maneira, um dique definido (classe 1) é visível nas imagens de satélite e, geralmente possui uma anomalia magnética associada, enquanto diques inferidos (classe 3) são mapeáveis como anomalias magnéticas (lineares), mas não produzem feições visíveis nas imagens de satélite ou lineamentos no relevo sombreado (Figura 7).

Figura 18 – Mapeamento dos diques na região de Torra Bay



Legenda: Comparação entre: a) a primeira derivada do RTMI; e b-c) imagens de satélite da região de *Torra Bay* com diques das três classes de mapeamento

Fonte: O autor, 2017

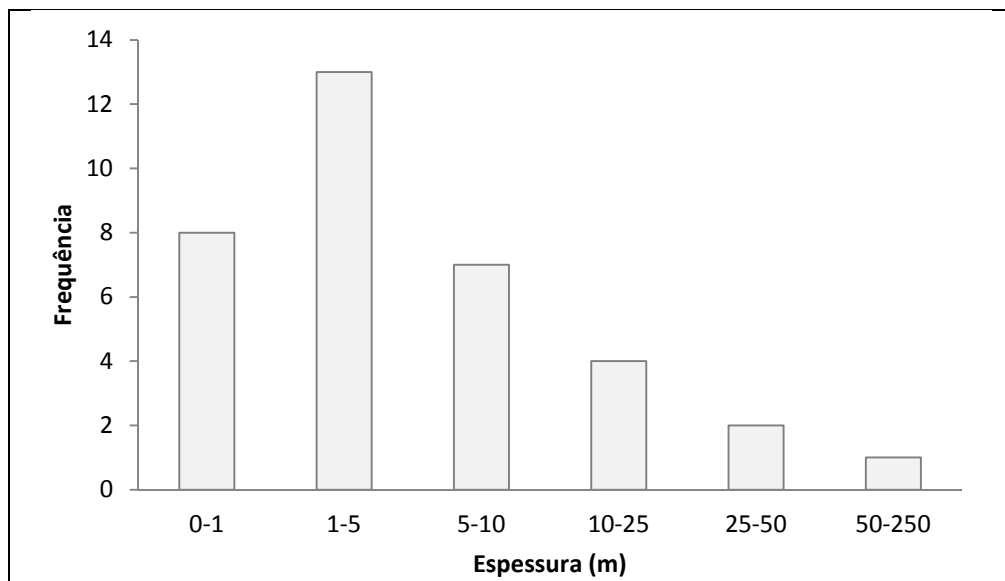
O mapa resultante dos diques do noroeste da Namíbia está incluindo como Anexo B desta dissertação. Observa-se que em algumas regiões desérticas e livres de areia, muitos diques de pequenas dimensões (menos de 10m de largura) são visíveis nas imagens de

satélite. Porém, nem sempre foi possível identificar as anomalias magnéticas associadas a eles devido à alta densidade dos diques a falta de resolução dos dados magnéticos. As orientações dos diques foram extraídas usando a ferramenta de geoprocessamento do programa ArcGIS. Estes dados foram exportados do ArcGIS em formato *.txt para gerar as rosetas de direções apresentadas e discutidas no Capítulo 6 desta dissertação.

5.2 Aspectos de campo

A maioria dos diques encontrados no campo foram descritos como basaltos e diabásios, que variam de texturas afaníticas a faneríticas e porfiríticas. Os diques são de coloração cinza esverdeada a cinza escura, quando frescos. Apenas dois dos trinta diques amostrados foram identificados no campo como rochas de tendência alcalina devido à coloração cinza rosada na superfície de intemperismo. A espessura da maioria dos diques variam entre 1,0 a 10m, porém, alguns diques atingem espessuras de até 50m ou mais, (Figura 19). Um dique mapeado na região de *Mowe Bay* apresentou uma espessura maior que 200m e mais de quinze quilômetros de extensão.

Figura 19 – Histograma da espessura dos diques do SCDS.

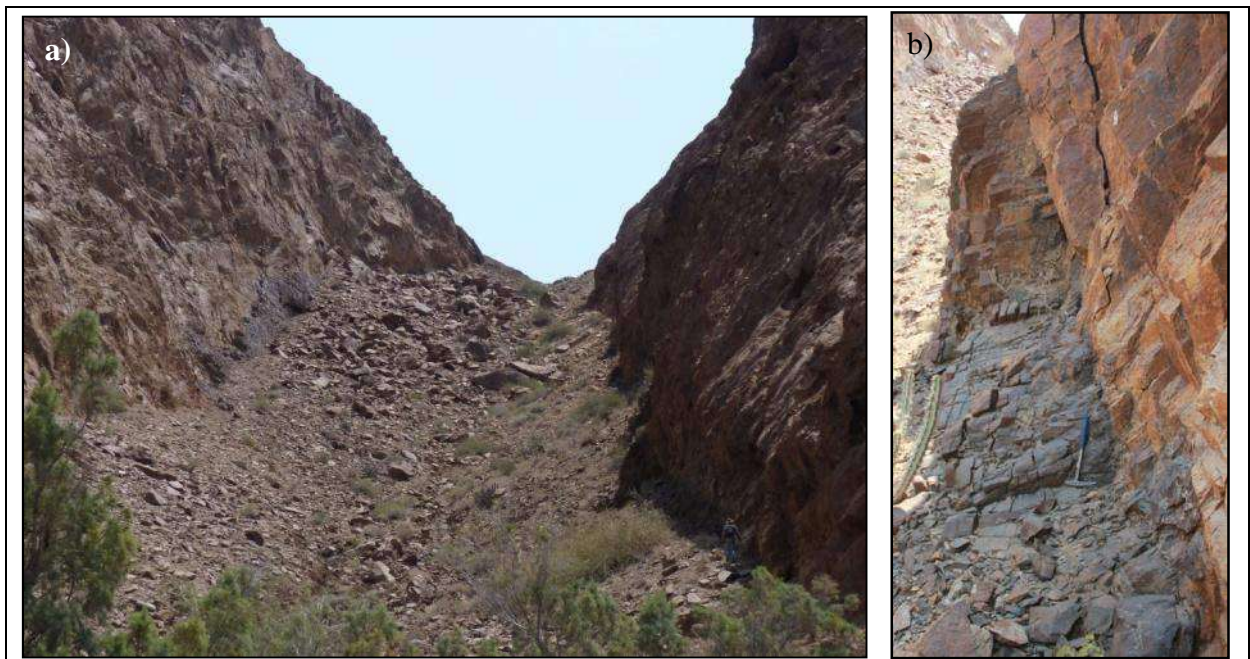


Legenda: Histograma da espessura dos diques do SCDS observados no campo.
Fonte: O autor, 2017

Os diques mostram contatos bruscos com as rochas encaixantes geralmente com bordas de resfriamento (*chilled margins*), sendo que os diques mais espessos apresentam texturas mais grossas. Fenocristais de olivina foram observados em alguns diques e outros apresentaram cristais finos a médios de magnetita.

A maneira de aflorar dos diques é controlada pelas condições climáticas vigentes em cada localidade, bem como pela variação na sua composição e granulometria. Por exemplo, o dique descrito nos pontos NA078 ao NA082 (vide mapa Anexo F), tem uma espessura de 40 m, e apresenta uma granulometria fina a média no seu núcleo, em contraste com a granulometria fina nas suas bordas de resfriamento. O núcleo do dique é mais suscetível ao intemperismo e, em consequência, aflora num vale estreito entre paredes subverticais das rochas encaixantes (orto- e paragneisses paleoproterozoicos, Figura 20).

Figura 20 – Dique de diabásio na margem norte do Rio Huarusib



Legenda: a) Dique de diabásio com quarenta metros de espessura, de orientação NW-SE, exposto num vale estreito e encaixado da margem norte do Rio Huarusib (NA078 a 080). Observe que as bordas de resfriamento dos diques, de granulometria mais fina, são bem preservadas nas paredes do vale (b), enquanto que, no centro do vale, o núcleo do dique apresenta uma textura mais grossa, é mais intemperizado e coberto pelo depósito de tálus derivado das rochas encaixantes. (NA078 - 18°52'10.77"S, 12°50'46.76"E)

Fonte: O autor, 2017; a) Foto - Julio Almeida 25/09/2016.

Dependendo do grau de intemperismo os diques podem ocorrer como blocos arredondados entre os afloramentos das rochas encaixantes. Em contraste, nas regiões mais áridas e desérticas os diques formam feições salientes, sendo em geral mais resistentes ao intemperismo mecânico que as rochas encaixantes como evidente na Figura 21.

Figura 21 – Dique de diabásio em zigue-zague exposto na planície costeira entre *Terrace Bay* e *Mowe Bay*



Legenda: Visada para SSE de um dique de diabásio em zigue-zague cortando granitos pan-africanos na planície costeira entre *Terrace Bay* e *Mowe Bay*. Os segmentos do dique formam feições salientes devido a sua resistência maior ao intemperismo mecânico e à erosão eólica em comparação com as rochas encaixantes. (NA034 -19°46'31.35"S, 12°55'56.78"E)

Fonte: Foto - Julio Almeida 18/09/2016.

5.3 Petrografia

Na descrição petrográfica, a granulação das rochas com cristais com tamanho inferior a 1 mm são considerados finas; as com cristais com tamanho entre 1 a 5 mm, média; e aquelas com cristais de tamanho superior a 5 mm, grossa. Os termos petrográficos utilizados seguiram as definições do Le Maitre (2002) e Mackenzie et al. (1982). Os diques foram classificados em cinco grupos com base nas suas características geoquímicas (veja discussão na próxima seção): um dique alcalino (não amostrado para petrografia), diques ácidos, e três grupos de diques básicos (olivina toleítos e quartzo-toleítos de alto e baixo-Ti).

A maior parte das amostras estudados são basaltos ou andesitos basaltos de coloração cinza escura a vinza esverdeado, com texturas afaníticas a fanerítica frequentemente porfíricas. Porém, dois diques dacitos foram descritos, sendo rochas holocristalinas e porfíricas, com fenocristais finos a médios de feldspato potássico em uma matriz fina apresentando textura intergranular composta por feldspato potássico, quartzo e minerais opacos (Figura 22a). Clorita e sericita ocorrem como produtos de alteração do feldspato potássico .

Os olivina toleítos são basaltos de granulação fina, com exceção do diabásio amostrado no ponto NA002. Eles são holocristalinos e apresentam texturas intergranular,

subofítica e poiquilitica (Figura 22b, c). Ocorrem fenocristais subédricos de plagioclásio, piroxênio e olivina (Figura 22b, d) e a fase opaca ocorre como um mineral intersticial. Cristais de plagioclásio são alterados para sericita em algumas amostras e, em uma lâmina, os fenocristais de olivina estão serpentinizados (Figura 21d). Nesta lâmina representativa da borda de esfriamento de um dique basáltico do complexo de Erongo, foi possível observar uma estrutura de fluxo marcada pela orientação de ripas de plagioclásio (Figura 22d).

Os quartzo-toleítos encontrados são basaltos ou andesitos basálticos, geralmente de granulometria fina, com apenas dois diques de granulometria média a grossa (Figura 23a, b) classificados como um diorito diabásico e um microgabro, respectivamente. A composição destas rochas é dada por grãos de plagioclásio não orientados, piroxênio (augita e, às vezes pigeonita) e a fase opaca. Não foi possível estimar a composição química do plagioclásio pelo método Michel-Levy porque os cristais de plagioclásio estão alterados.

Vários diques de andesito basálticos apresentaram texturas porfíricas com fenocristais de plagioclásio e, às vezes, de piroxênio, presente como glômeros, formando a denominada textura glomeroporfírica numa matriz fina intergranular (Figura 23c, d). Às vezes, os cristais de plagioclásio mostram zonamento múltiplo indicativo de cristalização fracionada. Sericita está presente como o produto da alteração do plagioclásio e, às vezes, os cristais de piroxênio estão alterados para clorita (Figura 23b).

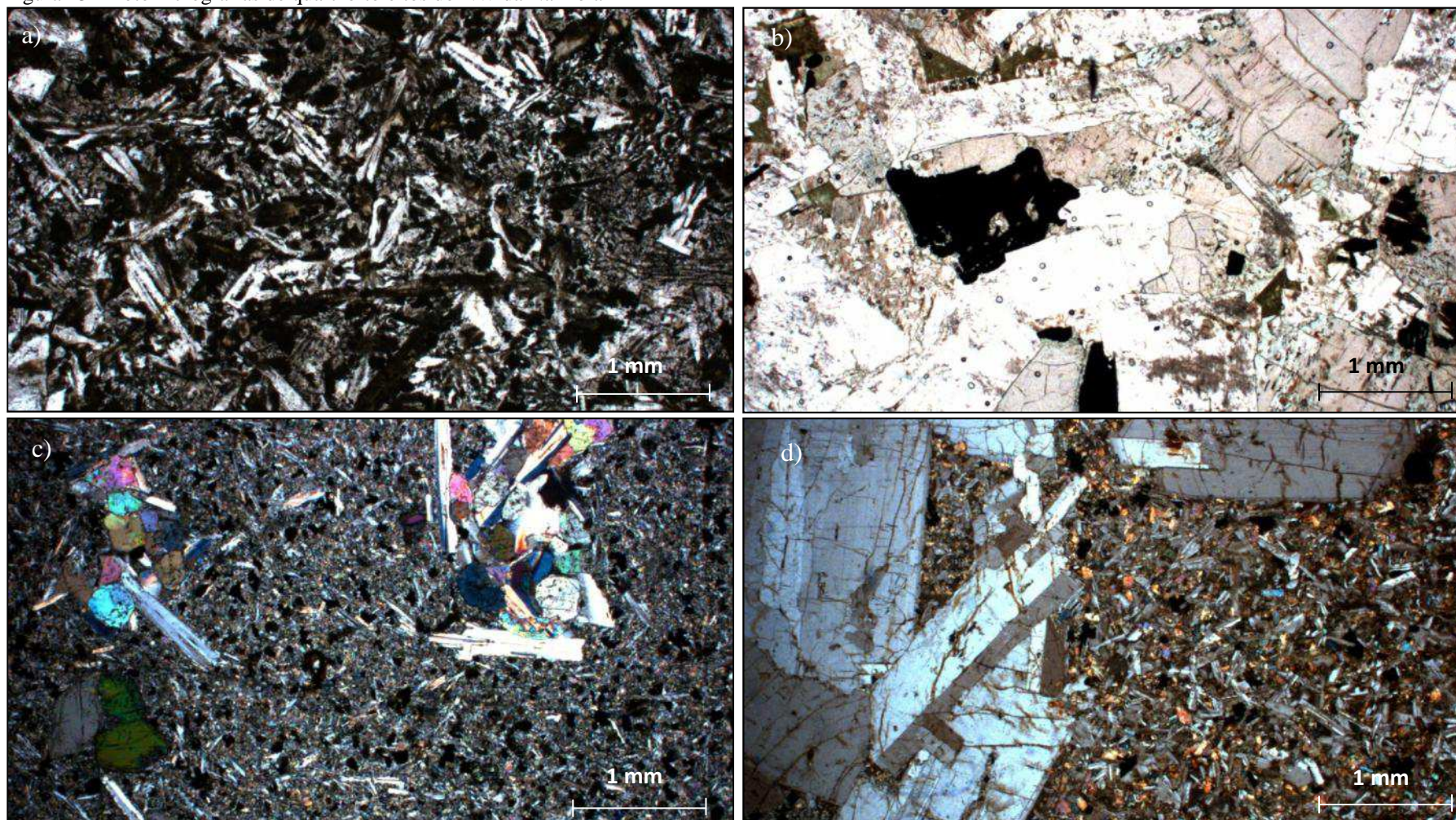
Figura 22 – Fotomicrografias de um dique de dacito e olivina toleítos do NW da Namíbia



Legenda: Fotomicrografias de: a) dacito (NA011B) com fenocristais de K-feldspato numa matriz fina de qtz e K-feldspato com alteração intempérica; b) olivina toleíto (NA023B) de granulometria fina com fenocristais de olivina (fraturado) numa matriz fina com ripiformes de plag. às vezes alteradas para sericita; c) basalto com texturas intergranular e poiquilítica (NA028A) com cristais finos de olivina e piroxênio (alterados) englobados por cristais de plagioclásio e piroxênio; d) margem esfriada de um dique de basalto (NA110B) com pseudomorfos de olivina e cristas de plagioclásio com textura microlítica.

Fonte: O autor, 2017

Figura 23 – Fotomicrografias de quartzo-toleítos do NW da Namíbia



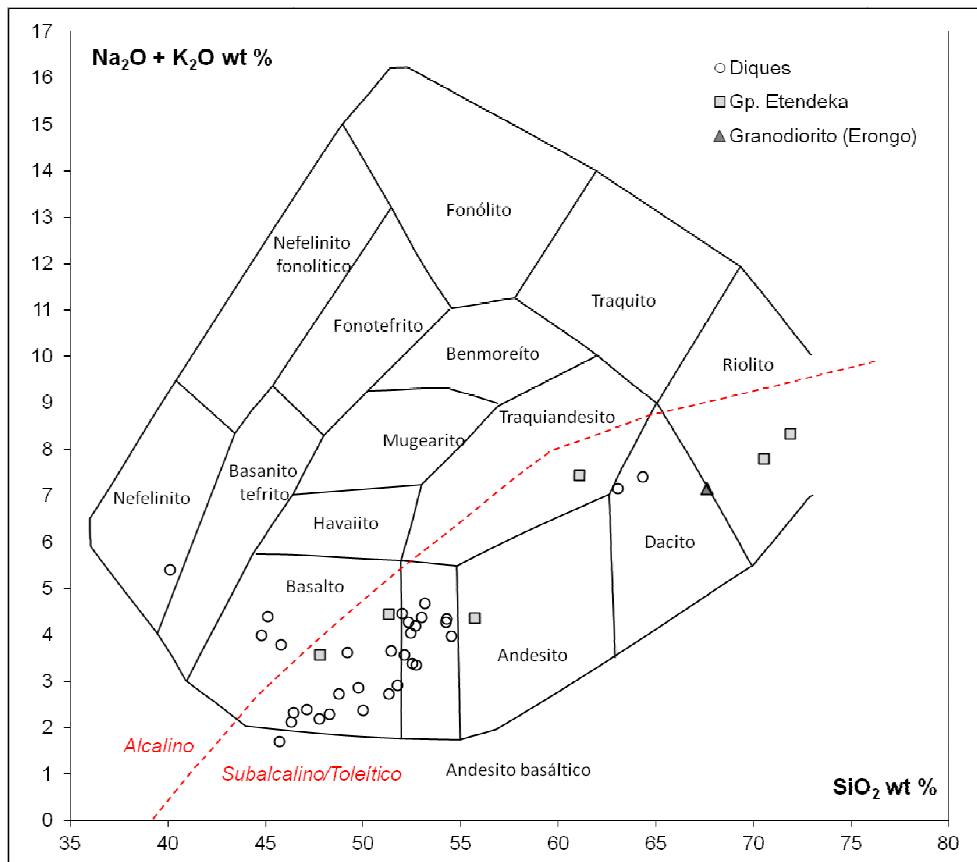
Legenda: Fotomicrografias de: a) microdiorito diabásico (NA038C) com textura intergranular, cristais radiais de plag. e cristais alongados de pigeonita; b) microgabro (NA115) com textura intergranular a subofítica com cristais médios de augita entre cristais de plag. subédricos, alteração da augita para clorita e do plagioclásio para sericita; c) basalto porfírico (NA38D) com glômeros de plag. e piroxênio num matriz fina de plagioclásio, piroxênio e uma fase opaca. d) Andesito basáltico porfírico (NA045D) com glômeros de plagioclásio num matriz fina de plagioclásio, piroxênio, quartzo e uma fase opaca.

Fonte: O autor, 2017

5.4 Dados litogeoquímica

As rochas vulcânicas e intrusivas foram classificadas em cinco grupos de acordo com suas características geoquímicas. Lembrando que além das trinta e uma amostras de diques, seis amostras de derrames do Grupo Etendeka, e uma amostra do granodiorito de Erongo foram submetidas para análise litogeoquímica conforme listado no Anexo C. Observe-se que a Fe_2O_3 foi recalculado como FeO assumindo uma razão $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,8998$ com base nos pesos atômicos dos elementos definidos por Meija et al., (2016). Os elementos maiores não foram normalizados para 100% (base livre de voláteis) sendo que os valores de perda ao fogo (LOI) não foram tão elevados. As amostras foram plotadas no diagrama de Total-álcali vs. Sílica, de Cox et al. (1979), e a maioria das amostras de diques são basaltos e andesitos basálticos subalcalinos/toleíticos - Figura 24.

Figura 24 – Diagrama de Total-álcali vs. Sílica (Cox et al., 1979)



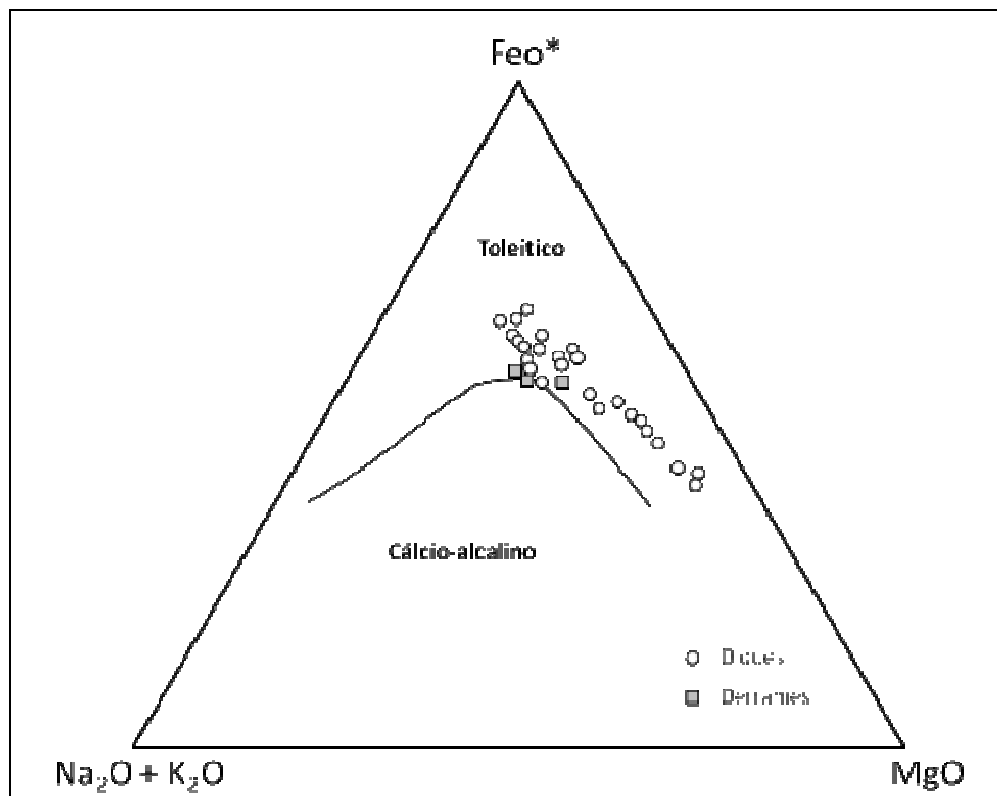
Legenda: Amostras coletadas no campo, os diques estão representados pelos círculos, é possível nota que a maioria dos diques amostrados são classificadas como basaltos e andesitos basálticos subalcalinos / toleíticos conforme a curva de Irvine & Baragar (1971) em vermelho.

Fonte: O autor, 2017

Uma amostra (NA024) foi classificada como um nefelinito, sendo um dique de orientação NW-SE (320-140°) cortando arenitos da Formação Twyfelfontein na região de Gai-As a noroeste do complexo intrusivo de Brandberg (ANEXO D). Este dique constitui o grupo 1. O grupo 2 consiste de seis amostras de rochas de composição ácida, e inclui dois diques de dacito. A primeira (NA011B) é de um dique com orientação NE-SW (240-60°) próximo ao complexo intrusivo de Brandberg sugerindo uma associação genética com o mesmo, enquanto que a (NA044) é de um dique com 15 m de espessura e de orientação NW-SE (300-120°) cortado por diques de diabásio com orientação leste-oeste na proximidade do *Mowe Bay*. Mais quatro amostras estão incluídas nesse grupo, elas foram coletadas no complexo de Erongo: uma amostra do granodiorito de Erongo, duas amostras de um derrame riolítico, e uma amostra de um derrame de traquiandesito - (ANEXO E).

As amostras restantes contém menos que 60% de sílica e, seguindo a classificação de Erlank et al. (1984) das rochas vulcânicas da Província Etendeka, são da série 'basáltica'. Todas as amostras desta série 'basáltica' plotam no campo da série toleítica no diagrama AFM de Irvine & Bragar (1971) - Figura 25.

Figura 25 – Diagrama ternário AFM de Irvine & Baraga (1971)



Legenda: Os basaltos e andesitos basálticos subalcalinos são da série toleítica conforme o critério do estabelecido por Irvine & Baragar (1971). (Círculos - diques, quadrados - derrames).

Fonte: O autor, 2017

A mineralogia normativa foi utilizada para diferenciar as rochas toleíticas. A norma CIPW, adaptada por Hutchison (1974, 1975), foi calculada para todas as amostras usando o programa *Geochemical Data Toolkit* (GCDkit) desenvolvido por Janousek et al., (2006). Os resultados deste cálculo estão apresentados na Tabela 5, com as amostras classificadas em quatro grupos geoquímicos. Os grupos 1 e 2 foram acima descritos, enquanto que o grupo 3 consiste de olivina toleítos, sendo olivina e hiperstênio normativos. Olivina foi observada como fenocristais e na matriz na lamina delgadas destas rochas (Figura 22b, c, d). Observe que a amostra NA028A não tem olivina normativa, mas cristais de olivina alterada foram observados na lâmina (Figura 22c).

Três dos olivina toleítos (NA026, NA110A e NA110B) foram classificados como basaltos alcalinos no diagrama TAS (Figura 24). A amostra NA026 é de um dique na mesma região e da mesma orientação (NW-SE) que o dique de nefelinito, (amostra NA024). As outras duas amostras (NA110A e NA110B) foram tiradas do núcleo e borda respectivamente de um dique de orientação leste-oeste dentro do complexo intrusivo de Erongo na Faixa Damara. Conforme o diagrama TAS, as outras amostras deste grupo são basaltos toleíticos. Uma delas, NA002, pode ser considerada parte do enxame de diques de *Henties Bay-Outjo* (HOD) pela sua orientação (N65E) e sua localização, perto da cidade Arandis, intrudindo metassedimentos do embasamento paleoproterozoico da Faixa Damara.

Os outros dois diques de olivina toleítos, NA022 e NA023B, apresentam orientações diferentes. O primeiro corta metassedimentos neoproterozoicos da Formação *Braks River* perto do Rio Ugab com um orientação de NNW-SSE (325-145) Enquanto o outro (NA023B) é de orientação NE-SW (55-235) e corta um dique diabásico de orientação NNW-SSE (330-150) e arenitos permianos da Formação *Rhino Wash*, uns 6,6 km ao norte conforme mostrado no mapa em Anexo D. Ambos os diques são localizados na Zona Ugab, a zona tectônica do extremo sul da faixa Kaoko. Observe-se que os outros diques de olivina toleítos (grupo 3) são localizados na Faixa Damara.

Tabela 5 - Análise normativa CIPW

Amostra	Litologia*	Tipo	Grupo	Q	C	Or	Ab	An	Ne	Di	Hy	OI	Il	Tn	Pf	Ru	Ap	Soma %
NA024A	Nefelinito	Dique	1	0.0	0.0	6.0	24.7	5.7	6.7	16.2	0.0	11.6	0.4	0.0	5.8	0.0	2.4	79.7
NA011B	Dacito	Dique	2a	25.4	0.0	30.2	19.5	9.6	0.0	0.7	1.4	0.0	0.2	2.0	0.0	0.0	0.8	89.7
NA044	Dacito	Dique	2a	20.3	0.0	21.9	29.3	6.8	0.0	5.9	2.3	0.0	0.3	2.6	0.0	0.0	0.4	89.8
NA111	Granodiorito	Intrusivo	2b	29.1	1.9	26.4	22.7	8.7	0.0	0.0	3.5	0.0	0.2	0.0	0.0	0.7	0.5	93.7
NA113A	Riolito	Derrame	2c	32.9	2.4	32.4	24.1	1.5	0.0	0.0	1.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.6	95.5
NA113B	Riolito	Derrame	2c	32.1	2.3	30.2	22.8	4.6	0.0	0.0	2.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.5	0.6	95.2
NA114	Traquiandesito	Derrame	2c	22.6	0.0	34.3	13.8	10.9	0.0	0.1	1.5	0.0	0.2	3.6	0.0	0.0	1.3	88.3
NA002	Diabasio	Dique	3	0.0	0.0	2.7	14.7	25.4	0.0	21.4	21.0	0.05	0.4	1.7	0.0	0.0	0.3	87.6
NA022	Basalto	Dique	3	0.0	0.0	1.5	15.8	24.5	0.0	17.3	17.1	8.0	0.4	2.2	0.0	0.0	0.3	87.0
NA023B	Basalto	Dique	3	0.0	0.0	0.5	13.6	26.0	0.0	17.7	20.5	5.1	0.4	1.8	0.0	0.0	0.2	85.7
NA026	Basalto	Dique	3	0.0	0.0	3.6	26.9	24.5	0.0	8.8	9.7	5.3	0.4	4.8	0.0	0.0	0.7	84.6
NA110A	Diabasio	Dique	3	0.0	0.0	5.5	25.9	22.6	0.0	14.9	5.8	1.6	0.4	4.1	0.0	0.0	1.0	81.8
NA110B	Basalto	Dique	3	0.0	0.0	5.5	29.3	20.3	0.0	13.8	4.8	1.8	0.4	4.5	0.0	0.0	1.2	81.5
NA093A	Basalto	Derrame	4	9.0	0.0	10.5	22.6	21.5	0.0	4.2	10.1	0.0	0.3	7.7	0.0	0.0	1.0	86.9
NA095	Basalto	Derrame	4	7.3	0.0	7.3	19.7	22.9	0.0	4.7	11.9	0.0	0.3	8.2	0.0	0.0	1.1	83.6
NA028A	Basalto	Dique	5a	4.3	0.0	3.3	18.4	20.9	0.0	8.9	24.6	0.0	0.3	3.5	0.0	0.0	0.4	84.6
NA032	Andesito	Derrame	5a	15.5	0.0	10.8	21.4	19.3	0.0	10.7	5.7	0.0	0.3	2.8	0.0	0.0	0.5	87.0
NA034	Andesito basáltico	Dique	5a	13.2	0.0	6.1	25.0	21.8	0.0	11.5	5.9	0.0	0.4	3.0	0.0	0.0	0.5	87.3
NA035	Andesito basáltico	Dique	5a	14.0	0.0	11.5	20.2	19.3	0.0	11.4	5.6	0.0	0.3	2.9	0.0	0.0	0.5	85.7
NA038C	Microdiorito diabásico	Dique	5a	13.4	0.0	9.1	26.7	14.5	0.0	9.5	4.5	0.0	0.4	4.2	0.0	0.0	0.7	83.0
NA053	Andesito basáltico	Dique	5a	11.5	0.0	5.6	20.6	23.4	0.0	14.2	7.2	0.0	0.4	2.9	0.0	0.0	0.4	86.3
NA066	Basalto	Dique	5a	10.9	0.0	3.0	18.8	25.3	0.0	16.2	7.4	0.0	0.4	3.9	0.0	0.0	0.5	86.4
NA069A	Andesito basáltico	Dique	5a	13.8	0.0	7.9	22.8	18.6	0.0	9.5	5.5	0.0	0.4	4.0	0.0	0.0	0.5	83.1

Legenda: Mineralogia normativa calculado na GCDkit de Janousek et al. (2006), com base na norma CIPW adaptado por Hutchison (1974, 1975).

Nota: Abreviações de minerais: Q - quartzo, C - corindum, Or - ortoclásio, Ab - albita, An - anortita, Ne - nefelina, Di - diopsídio, Hy - hiperstênio, OI - olivina,

Il - ilmenita, Tn - titanita, Pf - perovskita, Ru - rutilo, Ap - apatita.

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 5 - Análise normativa CIPW (conclusão)

Amostra	Litologia*	Tipo	Grupo	Q	C	Or	Ab	An	Ne	Di	Hy	Ol	Il	Tn	Pf	Ru	Ap	Soma %
NA078A	Andesito basáltico	Dique	5a	11.6	0.0	8.2	23.8	19.5	0.0	12.0	5.4	0.0	0.5	3.7	0.0	0.0	0.6	85.2
NA079	Andesito basáltico	Dique	5a	11.9	0.0	9.6	23.3	19.2	0.0	10.5	6.0	0.0	0.4	3.9	0.0	0.0	0.6	85.4
NA081C	Andesito basáltico	Dique	5a	11.7	0.0	8.6	23.9	19.0	0.0	11.1	5.2	0.0	0.4	3.7	0.0	0.0	0.6	84.3
NA082	Andesito basáltico	Dique	5a	14.2	0.0	5.1	22.8	18.9	0.0	12.8	4.2	0.0	0.5	3.7	0.0	0.0	0.5	82.8
NA099	Andesito basáltico	Dique	5a	11.9	0.0	9.2	23.0	20.8	0.0	11.9	6.9	0.0	0.4	3.0	0.0	0.0	0.4	87.4
NA115	Microgabbro	Dique	5a	6.9	0.0	5.9	22.3	25.3	0.0	12.3	6.7	0.0	0.5	4.6	0.0	0.0	0.4	84.8
NA016	Basalto	Dique	5b	0.6	0.0	3.1	15.3	28.4	0.0	14.9	20.4	0.0	0.4	1.9	0.0	0.0	0.3	85.2
NA020	Basalto	Dique	5b	0.5	0.0	1.7	17.9	27.7	0.0	20.0	15.6	0.0	0.4	2.7	0.0	0.0	0.3	86.8
NA021	Basalto	Dique	5b	5.0	0.0	2.0	21.4	25.8	0.0	21.9	7.5	0.0	0.4	3.0	0.0	0.0	0.3	87.4
NA023A	Basalto	Dique	5b	3.6	0.0	1.3	17.6	29.1	0.0	20.6	11.9	0.0	0.4	2.3	0.0	0.0	0.3	86.9
NA029D	Andesito basáltico	Dique	5b	12.2	0.0	6.5	19.1	22.0	0.0	16.7	6.2	0.0	0.4	2.2	0.0	0.0	0.4	85.7
NA030	Andesito basáltico	Dique	5b	7.7	0.0	9.1	24.7	18.9	0.0	14.2	7.8	0.0	0.4	2.4	0.0	0.0	0.4	85.5
NA038D	Basalto	Dique	5b	5.8	0.0	1.7	17.7	28.6	0.0	23.9	8.1	0.0	0.4	1.9	0.0	0.0	0.3	88.2
NA040	Basalto	Dique	5b	11.1	0.0	2.8	20.7	22.5	0.0	19.3	5.8	0.0	0.4	2.4	0.0	0.0	0.3	85.4
NA045D	Basalto	Dique	5b	9.1	0.0	5.6	22.9	26.1	0.0	13.4	5.6	0.0	0.4	3.0	0.0	0.0	0.4	86.5

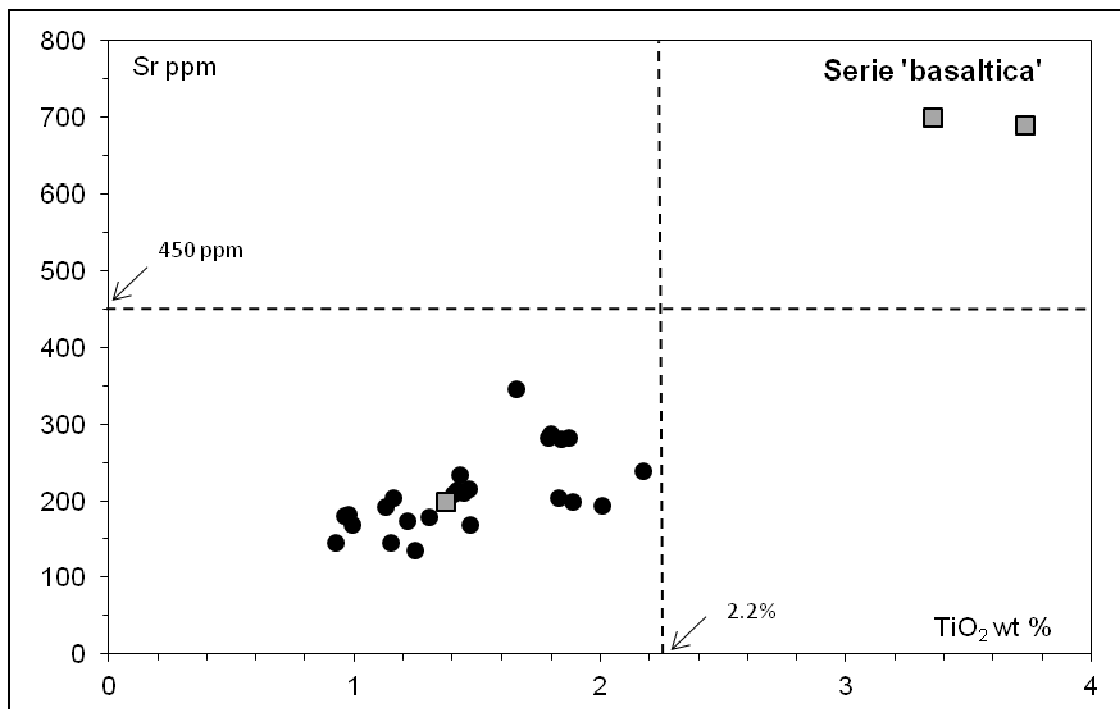
Legenda: Mineralogia normativa calculado na GCDkit de Janousek et al. (2006), com base na norma CIPW adaptado por Hutchison (1974, 1975).

Nota: Abreviações de minerais: Q - quartzo, C - corindum, Or - ortoclásio, Ab - albíta, An - anortita, Ne - nefelina, Di - diopsídio, Hy - hiperstênio, Ol - olivina, Il - ilmenita, Tn - titanita, Pf - perovskita, Ru - rutilo, Ap - apatita.

Fonte: O autor, 2017.

Os grupos 4 e 5 consiste de quartzo-toleítos com quartzo e hiperstênio normativo (Tabela 5). Seguindo a classificação de Marsh et al. (2001), os quartzo-toleítos do grupo 4 são de alto-Ti, ($\text{TiO}_2 < 2.2\%$, $\text{Sr} < 450\text{ppm}$ Sr), enquanto os quartzo-toleítos do grupo 5 são de baixo-Ti (Figura 26). As duas amostras (NA093A e 95) de alto-Ti são de dois derrames da Formação Khumib, uma unidade vulcânica do grupo Etendeka dominante na porção norte da província magmática de Etendeka (Marsh et al., 2001).

Figura 26 – Diagrama binário de Sr e TiO_2 das rochas 'basálticas'



Legenda: Classificação dos basaltos e andesitos basálticos toleíticos em grupos de alto- e baixo- TiO_2 conforme a critério do Marsh et al., 2001. (Círculos - diques, quadrados - derrames).

Fonte: O autor, 2017

Os quartzo-toleítos de baixo-Ti, incluindo um derrame andesítico da Formação Tafelberg perto da *Terrace Bay*, foram subdividido em dois subgrupos, (5a e 5b), com base na variação dos valores de Terras Raras (REE) normalizados para condrito de McDonough & Sun (1995) - Tabela 6. No diagrama multi-elementar (Figura 27), os valores dos REE dos quartzo-toleíticos foram plotados e comparados com os valores do N-MORB e E-MORB de Sun & McDonough (1989) e os valores médios dos basaltos toleíticos encontrados no furo 525A do DSPD *Leg 525* na cadeia de Walvis (Hoernel et al., 2015). Os padrões de terras raras dos diques acidas, olivina-basaltos e o nefelinito estão apresentada na Figura 28. Observe se o forte anomalia negativa de Eu dos diques acidas (Figura 28b).

Tabela 6 - Terras Raras, normalizados para condrito, das rochas vulcânicas e intrusivos amostrados neste estudo

Amostra	Orient.	Classe	La _N	Ce _N	Pr _N	Nd _N	Sm _N	Eu _N	Gd _N	Tb _N	Dy _N	Ho _N	Er _N	Tm _N	Yb _N	Lu _N	(La/Yb) _N	Eu/Eu*
NA024A	320	1	361.6	293.6	214.4	166.3	97.3	79.2	58.3	41.6	29.7	20.1	16.3	13.0	11.2	9.3	32.34	1.05
NA011B	60	2a	380.2	300.2	226.3	180.7	112.8	59.3	76.9	63.7	56.5	49.5	48.1	45.7	46.0	43.5	8.27	0.64
NA044	345	2a	276.8	226.8	165.9	130.9	79.1	29.1	50.8	44.3	37.0	31.1	30.6	29.1	28.6	26.8	9.69	0.46
NA111	-	2b	226.2	181.1	139.0	105.9	68.9	25.9	44.2	38.8	31.3	27.5	25.6	24.7	24.2	23.2	9.34	0.47
NA113A	-	2c	116.0	99.0	78.7	60.6	43.9	8.7	31.2	30.5	27.6	23.8	23.8	22.3	21.7	19.1	5.34	0.24
NA113B	-	2c	174.7	142.6	109.9	84.0	54.7	17.4	36.2	33.2	28.5	23.8	23.1	21.9	21.1	20.3	8.27	0.39
NA114	-	2c	396.2	314.8	240.3	189.9	117.6	51.2	77.4	63.7	55.3	49.5	46.3	42.9	43.5	41.5	9.11	0.54
NA002	245	3	28.3	25.3	22.1	20.4	18.2	15.5	15.6	16.6	14.6	12.8	13.1	12.6	12.4	12.2	2.28	0.92
NA022	350	3	27.8	25.8	23.1	22.1	20.3	18.7	17.1	13.9	13.4	11.0	11.3	10.5	9.9	9.3	2.80	1.00
NA023B	55	3	18.1	17.6	16.3	17.1	14.9	15.1	14.1	11.1	11.0	9.2	8.8	8.5	8.1	8.1	2.25	1.04
NA026	320	3	59.9	56.1	47.6	44.9	35.1	32.5	26.6	22.2	19.5	16.5	14.4	12.6	11.8	11.8	5.08	1.06
NA110A	70	3	158.2	109.5	78.4	62.6	44.6	38.9	37.7	33.2	30.1	27.5	26.9	25.5	24.2	24.8	6.53	0.95
NA110B	70	3	167.9	116.5	84.7	67.2	48.0	38.7	38.2	36.0	31.3	29.3	28.1	25.9	26.7	25.6	6.29	0.90
NA093A	-	4	186.1	152.0	122.8	103.3	70.3	57.9	45.7	36.0	28.9	22.0	20.6	17.4	16.8	14.2	11.10	1.02
NA095	-	4	186.5	155.6	126.1	106.1	73.0	60.9	48.2	38.8	30.5	23.8	20.6	18.2	16.8	15.0	11.12	1.03
NA028A	-	5a	56.5	48.6	39.2	34.6	27.0	26.3	23.1	19.4	16.7	12.8	12.5	10.5	9.9	8.9	5.69	1.05
NA032	-	5a	112.7	91.8	70.6	58.6	40.5	28.1	30.2	27.7	24.0	22.0	20.0	19.0	19.3	18.3	5.85	0.80
NA034	300	5a	93.7	76.7	58.6	48.8	36.5	27.2	28.6	24.9	22.8	20.1	19.4	18.2	18.0	17.9	5.20	0.84
NA035	333	5a	89.9	74.6	57.0	47.3	36.5	27.9	29.1	24.9	22.4	20.1	19.4	18.2	18.0	17.9	4.99	0.86
NA038C	335	5a	106.3	88.7	71.4	60.6	45.9	35.2	36.7	33.2	28.9	25.6	25.0	23.5	23.0	21.5	4.63	0.86
NA053	345	5a	63.3	54.6	44.0	38.9	30.4	24.7	25.6	24.9	22.4	20.1	18.8	18.2	18.0	17.1	3.51	0.88
NA066	15	5a	62.4	53.8	45.7	41.4	33.1	30.6	28.6	24.9	23.2	20.1	19.4	18.2	18.0	18.3	3.47	0.99
Walvis Ridge ¹	-	-	121.2	101.3	84.0	72.8	49.6	42.5	37.8	32.1	27.6	24.0	21.5	19.5	18.9	18.1	6.41	0.98
N-MORB ^{2,3}	-	-	10.5	12.2	14.2	16.0	17.8	18.1	18.5	18.6	18.5	18.5	18.6	18.5	18.9	18.5	0.56	1.00
E-MORB ^{2,4}	-	-	26.6	24.5	22.1	19.7	17.6	16.2	14.9	14.7	14.4	14.5	14.4	22.7	14.7	14.4	1.81	1.00

Legenda: Valores normalizados para condrito do McDonough & Sun, 1995. [Eu/Eu*] = [(Eu_N)/(SQR(Sm_N*Gd_N))]

Note: 1. *Walvis Ridge* Hoernel et al., 2015. 2. N-MORB e E-MORB - Sun & McDonough, 1989.

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 6 - Terras Raras, normalizados para condrito, das rochas vulcânicas e intrusivos amostrados neste estudo (conclusão)

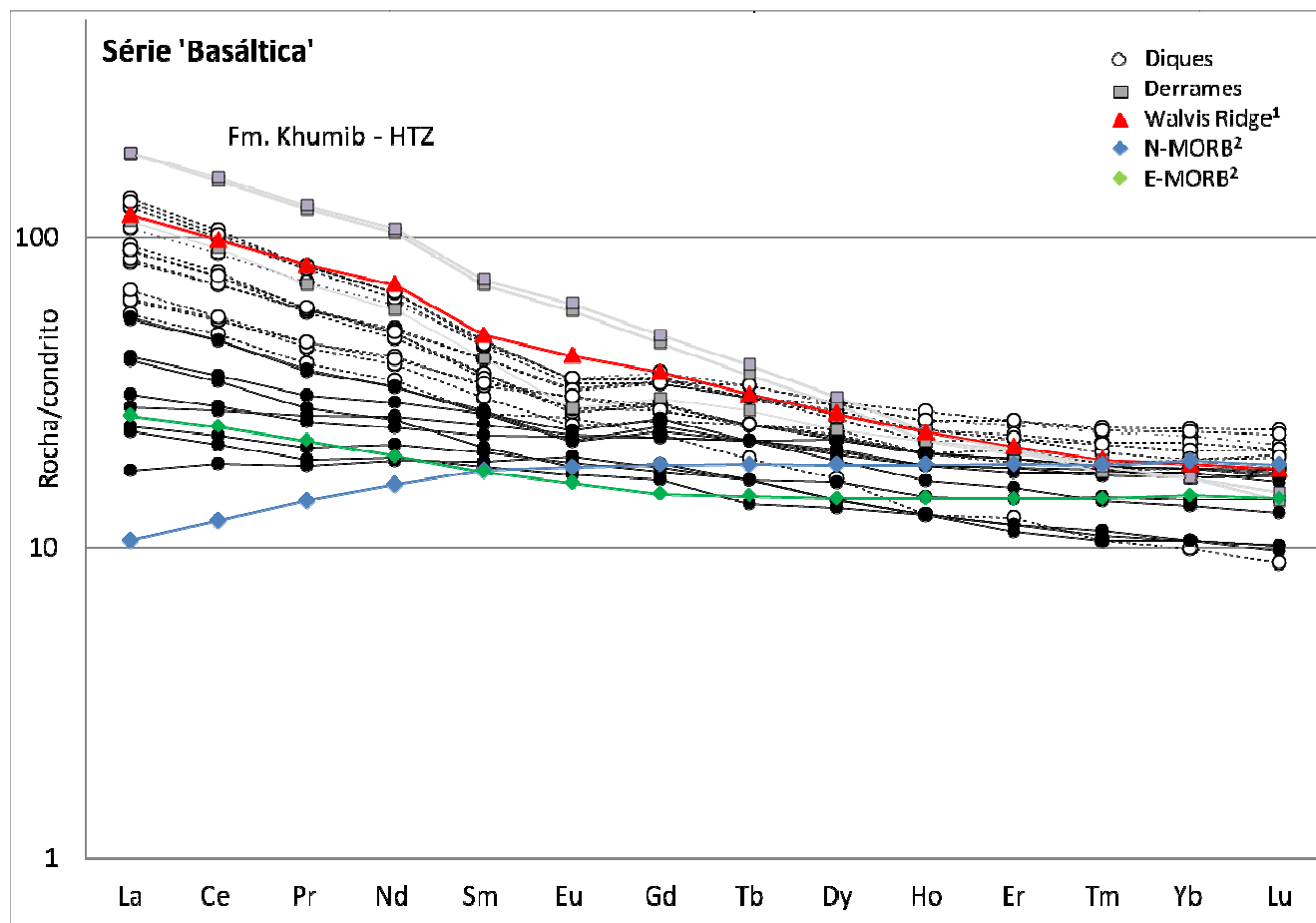
Amostra	Orient.	Classe	La _N	Ce _N	Pr _N	Nd _N	Sm _N	Eu _N	Gd _N	Tb _N	Dy _N	Ho _N	Er _N	Tm _N	Yb _N	Lu _N	(La/Yb) _N	Eu/Eu*
NA069A	330	5a	83.1	70.1	58.1	50.8	40.5	32.5	34.2	33.2	29.3	27.5	25.6	24.3	24.2	24.0	3.43	0.87
NA078A	315	5a	124.5	99.8	78.8	63.5	44.6	33.7	33.7	30.5	26.0	22.0	22.5	20.2	19.3	19.9	6.46	0.87
NA079	315	5a	133.3	104.7	80.7	66.1	46.6	34.8	34.7	30.5	27.6	23.8	23.1	21.9	21.7	20.7	6.13	0.87
NA081C	300	5a	129.1	101.6	80.7	66.3	45.3	35.0	35.2	30.5	26.8	23.8	22.5	21.5	20.5	20.7	6.30	0.88
NA082	347	5a	84.8	70.5	58.4	50.1	40.5	32.1	33.7	30.5	28.9	25.6	25.6	23.9	23.6	23.2	3.59	0.87
NA099	305	5a	90.7	74.7	59.3	49.2	35.1	28.1	27.6	24.9	22.8	20.1	19.4	17.8	18.0	17.1	5.04	0.90
NA115	290	5a	67.1	55.3	45.8	40.5	33.8	30.7	27.6	24.9	24.0	20.1	20.6	18.6	19.3	19.5	3.48	1.01
NA016	30	5b	40.1	34.3	28.1	25.8	20.9	18.3	18.6	16.6	16.3	14.7	14.4	14.6	14.3	14.2	2.81	0.93
NA020	120	5b	17.7	18.6	18.4	19.0	18.9	19.7	18.1	16.6	14.2	12.8	11.9	10.9	10.6	10.2	1.68	1.07
NA021	348	5b	28.3	27.7	26.6	26.5	25.0	23.1	22.6	22.2	19.1	16.5	15.6	14.2	13.7	13.0	2.07	0.97
NA023A	335	5b	24.5	23.0	21.0	21.4	20.3	18.8	17.6	16.6	14.2	12.8	11.9	11.3	10.6	10.2	2.32	1.00
NA029D	110	5b	54.4	46.5	37.5	32.8	27.7	22.2	24.6	22.2	19.9	18.3	17.5	17.4	17.4	16.3	3.13	0.85
NA030	102	5b	55.3	46.3	37.0	33.0	27.0	22.0	23.6	22.2	20.7	18.3	18.1	17.8	16.8	17.1	3.30	0.87
NA038D	70	5b	23.6	21.5	19.2	19.5	18.2	17.2	16.6	13.9	13.4	12.8	11.3	10.5	10.6	9.8	2.24	0.99
NA040	30	5b	31.2	28.4	25.4	24.3	23.0	22.7	22.6	22.2	20.3	18.3	18.1	17.0	16.8	17.1	1.86	1.00
NA045D	80	5b	41.4	35.7	30.9	29.3	27.0	23.8	26.1	22.2	22.4	20.1	19.4	18.2	18.0	17.5	2.30	0.90
Walvis Ridge ¹	-	-	121.2	101.3	84.0	72.8	49.6	42.5	37.8	32.1	27.6	24.0	21.5	19.5	18.9	18.1	6.41	0.98
N-MORB ^{2,3}	-	-	10.5	12.2	14.2	16.0	17.8	18.1	18.5	18.6	18.5	18.5	18.6	18.5	18.9	18.5	0.56	1.00
E-MORB ^{2,4}	-	-	26.6	24.5	22.1	19.7	17.6	16.2	14.9	14.7	14.4	14.5	14.4	22.7	14.7	14.4	1.81	1.00

Legenda: Valores normalizados para condrito do McDonough & Sun, 1995. $[Eu/Eu^*] = [(Eu_N)/(SQR(Sm_N * Gd_N))]$

Note: 1. *Walvis Ridge* Hoernel et al., 2015. 2. N-MORB e E-MORB - Sun & McDonough, 1989.

Fonte: O autor, 2017.

Figura 27 – Aranhograma dos REE dos quartzo-toleítos normalizados para condrito

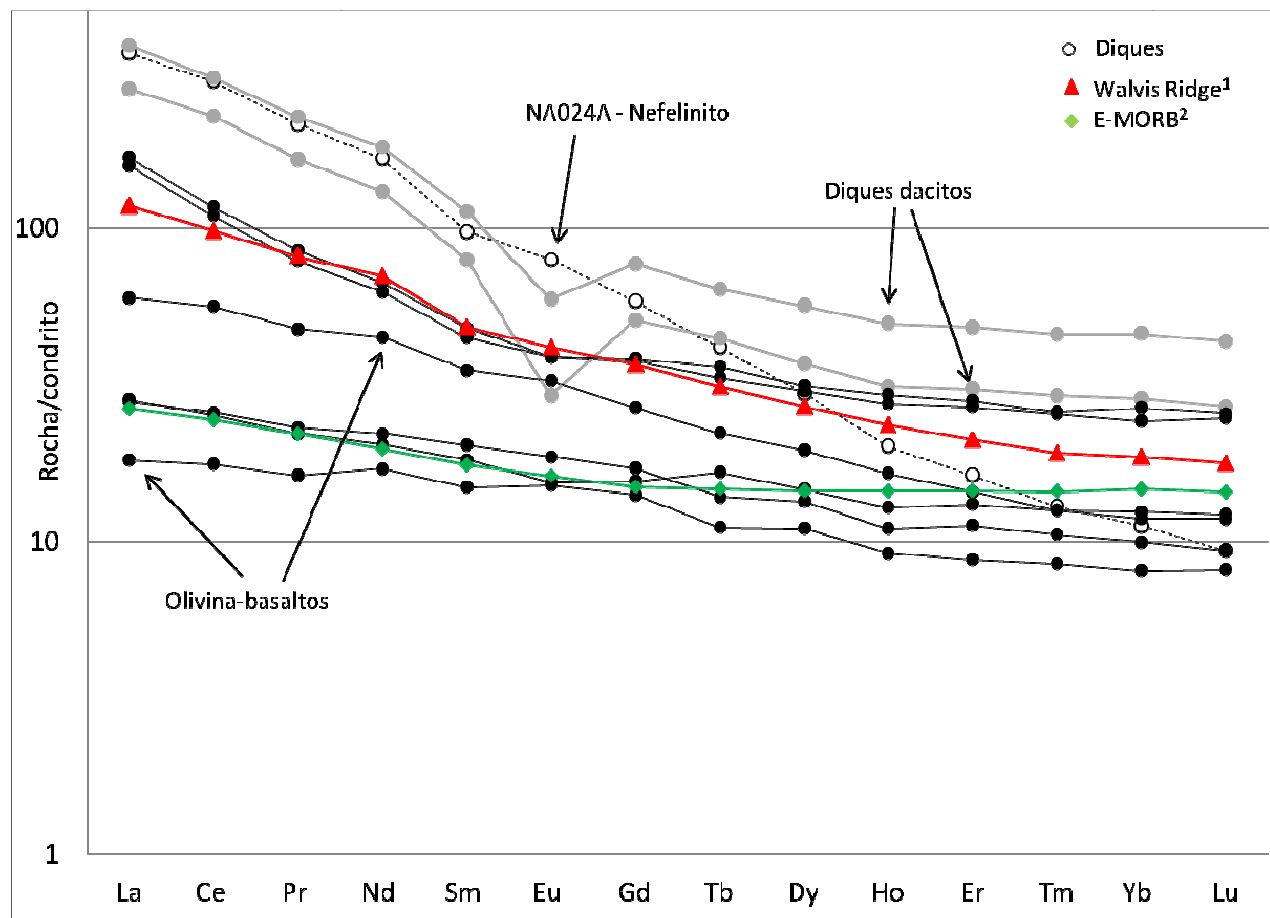


Legenda: Os diques de baixo-Ti com enriquecimento de LREE (Grupo 5a) são representados pelos círculos brancos conectados pelas linhas traçadas, e os diques 'basálticas' com pouco enriquecimento em LREE (Grupo 5b) estão representados pelos círculos pretos conectados pelas linhas cheias. Os valores dos derrames estão representados por quadrados preenchidos conectados pelas linhas cinza, observe se a maior enriquecimento em LREE dos basaltos de alto-Ti da Formação Khumib (Grupo 4).

Note: 1. Walvis Ridge Hoernel et al., 2015. 2. N-MORB e E-MORB - Sun & McDonough, 1989.

Fonte: O autor, 2017

Figura 28 – Aranhograma dos REE dos diques dacitos, olivina-basaltos e nefelinito amostrados



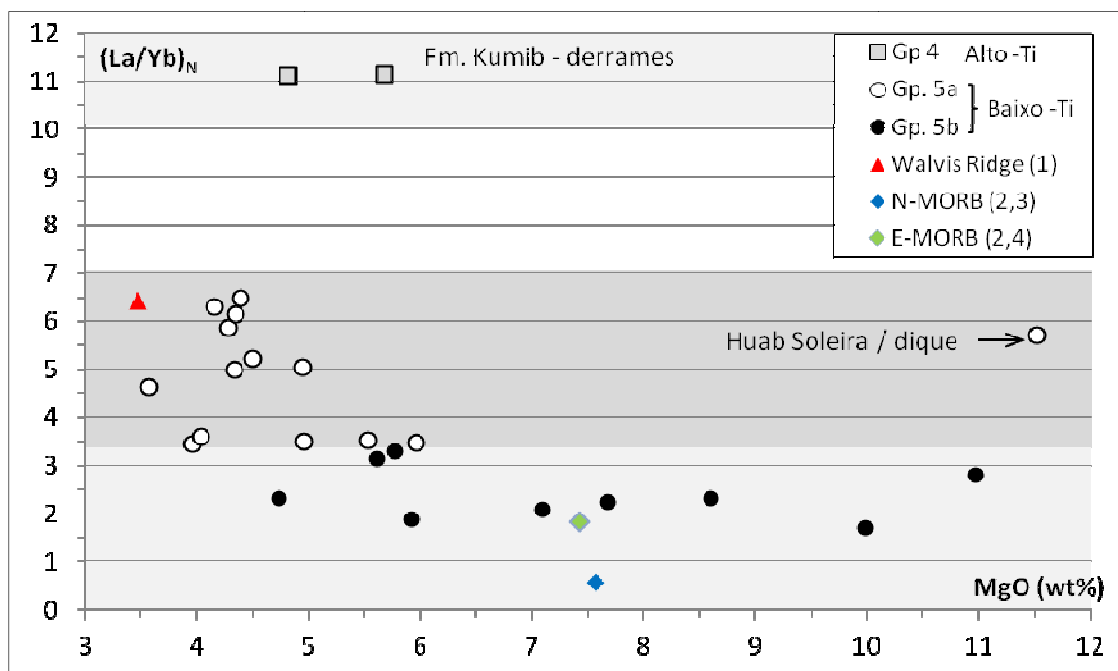
Legenda: O dique nefelinito (Grupo 1) está representado pelos círculos brancos conectados pela linha traçada, enquanto que Os olivina-basaltos (Grupo 3) estão representados pelos círculos pretos conectados pelas linhas cheias. Os diques dacitos (Grupo 2a) apresentam forte anomalias negativas de Európio, e estão representados pelos círculos cinzas conectados pelas linhas cinzas.

Note: 1. Walvis Ridge Hoernel et al., 2015. 2. E-MORB - Sun & McDonough, 1989.

Fonte: O autor, 2017

A maioria dos quartzo-toleítos de baixo-Ti apresenta um padrão de enriquecimento de REE leves (LREE) com razões $(La/Yb)_N > 3,40$ e anomalias negativas de európio ($Eu/Eu^* < 1,00$) indicativo de fracionamento de plagioclásio. Estas amostras foram denominadas Grupo 5a, quartzo-toleítos enriquecidos. A amostra (NA032), de um derrame da Formação Tafelberg é incluída neste grupo de quartzo-toleítos enriquecidos (Grupo 5a), bem como as amostras dos diques nos pontos NA034 e NA035, aproximadamente dezoito quilômetros ao norte. As outras dez amostras mostram um padrão de Terras Raras mais ‘primitivo’, ou seja, menos enriquecido em LREE com uma razão $(La/Yb)_N < 3,40$. A maioria dessas amostras demonstram anomalias negativas de Európio, mas com valores de $Eu/Eu^* \geq 0,90$. Estas rochas exibem um padrão de REE parecido com o E-MORB e compõem o grupo 5b. A razão $(La/Yb)_N$ é uma quantificação do enriquecimento relativo de LREE, as razões das rochas dos grupos 4 e 5 estão plotadas contra a concentração de MgO (%) no diagrama da Figura 28.

Figura 29 – Diagrama binário da razão $(La/Yb)_N$ vs. MgO (%) dos quartzo-toleítos (Grupo 4, 5a, 5b).



Legenda: Variação no enriquecimento relativo dos LREE que permite a subdivisão dos quartzo-toleítos em três tipos (Círculos - diques, quadrados - derrames).

Note: 1. Walvis Ridge - Hoernel et al., 2015; 2. N-MORB e E-MORB - Sun & McDonough, 1989; 3. MgO% do N-MORB - Hart et al., 1999; 4. MgO% do E-MORB Klein et al., 2004

Fonte: O autor, 2017

Desta forma, a distinção entre os três tipos de quartzo-toleítos fica mais clara; os quartzo-toleítos de alto-Ti (Grupo 4) são mais enriquecidos em LREE com razões de $(La/Yb)_N > 10$, os diques de quartzo-toleítos de baixo-Ti também estão enriquecidos em LREE

com razões de $(La/Yb)_N$ que variam entre 3,43 e 6,46, enquanto o Grupo 5b de diques 'basálticos' apresentou pouco enriquecimento em LREE com razões de $(La/Yb)_N < 3,40$. Nota-se que a maioria dos diques do grupo 5a tem orientações que variam entre 290-347°N (ESE-WNW a NNW-SSE), enquanto os diques do Grupo 5b são predominantemente de orientação E-W ou de NE-SW. As características do cinco grupos geoquímicos estão resumidos na tabela 7 abaixo.

Tabela 7 - Características dos cinco grupos geoquímicos

Gp.	Litotipos	Alc. ou subalc.	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Ti/Zr	Zr/Y	$(La/Yb)_N$	Fenoc.	Norm.
1	Nefenilito	Alc.	41,9	3,8	59,5	14,9	32,3	-	ne + ol
2	Dacitos, Riolitos, Traquiand. e Granodiorito	subalc.	63,8 - 73,4	0,4 - 1,6	8,4 - 23,5	3,7 - 9,3	5,3 - 9,7	K-feld.*	qtz
3	Basaltos	Alc./subalc.	46,6 - 48,8	< 2,2	85 - 115	3,3 - 6,2	2,2 - 6,6	ol + px	ol + px
4	Basaltos	subalc.	47,8 - 51,3	> 2,2	71 - 76,6	~10,5	> 10	plag. + px	qtz. + px
5a	Basaltos a And.		46,4 - 55,7	< 2,2	49 - 110,4	4,5 - 6,9	3,4 - 6,5		
5b	Basálticos		48,3 - 52,7		64,9 - 115	3,4 - 4,8	< 3,4		

Legenda: Comparação das características dos cinco grupos geoquímicos das rochas vulcânicas e intrusivas amostradas no noroeste da Namíbia.

Nota: Abreviações: Alc. - alcalino, subalc. - subalcalino, Fenoc. - fenocristais, Traquiand. - traquiandesito, And. - andesito, ne - nefelina, ol - olivina, K-feld. - feldspato de potássio, qtz - quartzo, px - piroxênio, plag. - plagioclásio

Fonte: O autor, 2017.