

Composições Mineralógicas Virtuais em Rochas Ígneas

Norma CIPW

José Carrilho Lopes



Universidade de Évora, 2012

Nota Introdutória

Este trabalho constitui um documento didático de apoio aos alunos do 1º ciclo de estudos universitários (Licenciatura) em *Engenharia Geológica* da Universidade de Évora, no âmbito da Unidade Curricular de *Petrologia* (código GEO1819), ministrada no 3º semestre deste curso. É sugerido como complemento da matéria versada nas aulas, integrado no módulo “classificação química de rochas ígneas”.

Foi elaborado com base nas metodologias apresentadas em:

Cox, KJ, Bell, JD, Pankhurst, RJ (1979), *The Interpretation of Igneous Rocks*, George Allen & Unwin, London, 450 pp.

Raymond, LA (1995), *Petrology: The Study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic Rocks*, Wm. C. Brown Publishers, Chicago, 742 pp.

Philpotts, AR, Ague, JJ (2010), *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*, Cambridge University Press, 667 pp.

A Norma CIPW

As rochas ígneas são estudadas, em primeira aproximação, a partir dos seus aspetos petrográficos que incluem a determinação qualitativa e quantitativa da composição mineralógica, bem como a análise de critérios texturais que, entre outros objetivos, visa estabelecer a ordem de cristalização dos diferentes minerais presentes. Em rochas de origem vulcânica, o súbito arrefecimento do magma pode, em casos extremos, impedir o processo de cristalização, originando rochas (amorfas) com textura vítrea (ex: obsidiana basáltica) ou, em processos menos bruscos, gerar texturas de tipo criptogranular ou microgranular que dificultam significativamente a identificação de grande parte dos minerais presentes, mesmo em exame microscópico. Nestes casos, a composição química da rocha assume papel ainda mais importante, sendo útil, em petrologia, transformar a composição química numa composição mineralógica virtual (*normativa*), com recurso a métodos quantitativos adequados.

A *composição Modal* de uma rocha ígnea corresponde à sua composição mineralógica *real*, determinada por métodos ópticos, enquanto a sua *composição Normativa* (ou *Norma*) diz respeito à composição mineralógica *virtual*, calculada a partir da composição química.

As regras de cálculo da *Norma CIPW* de uma rocha ígnea foram introduzidas por Cross, Iddings, Pirsson e Washington em 1903 (*in: Quantitative classification of igneous rocks*, University of Chicago Press) tendo-se adotado as iniciais destes quatro nomes (CIPW) para distinguir este exercício de outros, análogos, que visam igualmente determinar composições mineralógicas virtuais a partir de análises químicas.

Os óxidos da análise química são distribuídos de forma ponderada pelos diferentes minerais considerados. A ordem pela qual os componentes/minerais normativos vão sendo constituídos procura reproduzir sequências de cristalização e associações químico-mineralógicas característicos em processos ígneos.

A composição química da rocha em causa, a composição química dos minerais normativos e a ordem pela qual são calculados ao longo do exercício são, assim, as permissas em jogo.

Pressupostos para o cálculo

O exercício parte de pressupostos que simplificam o cálculo, tais como: *i.*) inexistência de fases hidratadas (e.g. micas, anfíbolos) sendo a H₂O excluída do cálculo; *ii.*) consideração exclusiva dos principais óxidos, normalmente expressos em percentagens ponderais nas análises químicas de rochas (são excluídos os elementos em traço); *iii.*) associação integral de MnO a FeO, dada a semelhança iónica entre Fe²⁺ e Mn²⁺.

Para o cálculo da *Norma CIPW*, consideram-se os seguintes óxidos: SiO₂ (designado abreviadamente por S), TiO₂ (T), Al₂O₃ (A), Fe₂O₃ (F³⁺), FeO (F²⁺), MnO, CaO (Ca), Na₂O (N), K₂O (K) e P₂O₅ (P). Por simplificação, assume-se que os minerais normativos, cujas proporções relativas se pretendem calcular, são constituídos (exclusivamente) por diferentes combinações destes óxidos.

O conjunto de óxidos acima mencionado permite o cálculo dos seguintes minerais / componentes normativos:

Nome	Símbolo	Fórmula química
Quartzo	<i>Qz</i>	(S)
Ortoclase	<i>Or</i>	(KAS ₆)
(Plg) albite	<i>Plg: ab</i>	(NAS ₆)
(Plg) anortite	<i>Plg: an</i>	(CaAS ₂)
Leucite	<i>Lc</i>	(KAS ₄)
Nefelina	<i>Ne</i>	(NAS ₂)
Corindo	<i>C</i>	(A)
Acmite	<i>Ac</i>	(NF ³⁺ S ₄)
Metassilicato-Na	<i>Ns</i>	(NS)
(Di) volastonite	<i>Di: wo</i>	(CaS)
(Di) enstatite	<i>Di: en</i>	(MS)
(Di) ferrossilite	<i>Di: fs</i>	(F ²⁺ S)
Volastonite	<i>Wo</i>	(CaS)
(Hi) enstatite	<i>Hi: en</i>	(MS)
(Hi) ferrossilite	<i>Hi: fs</i>	(F ²⁺ S)
(Ol) forsterite	<i>Ol: fo</i>	(M ₂ S)
(Ol) faialite	<i>Ol: fa</i>	(F ²⁺ ₂ S)
Apatite	<i>Ap</i>	(Ca _{3.33} P)
Ilmenite	<i>Ilm</i>	(F ²⁺ T)
Magnetite	<i>Mt</i>	(F ²⁺ F ³⁺)
Hematite	<i>Hem</i>	(F ³⁺)
Titanite	<i>Tn</i>	(CaTS)
Rútilo	<i>Rt</i>	(T)

Antes de iniciar a distribuição dos óxidos pelos diferentes minerais normativos, devem transformar-se as percentagens em peso de cada óxido (fornecidas pela análise química de rocha-total) nas suas proporções molares, dividindo a percentagem em peso de cada óxido pelo seu peso molecular. São as proporções molares dos óxidos que serão distribuídas pelos diferentes minerais normativos.

Assim, com exceção de S, os óxidos são distribuídos pela seguinte ordem:

- P para *Ap* ;
- T para *Ilm* → *Tn* → *Rt* (as setas indicam a ordem de constituição dos minerais que consomem T);
- K para *Or* → *Lc* ;
- N para *Plg (ab)* → *Ac* → *Ns* → *Ne* ;
- Ca para *Ap* → *Plg (an)* → *Tn* → *Di (wo)* → *Wo* ;
- A para *Or* → *Plg (ab)* → *Plg (an)* → *C* ;
- F^{2+} para *Ilm* → *Mt* → *Di (fs)* → *Hi (fs)* → *Ol (fa)* ;
- F^{3+} para *Mt* → *Hem* ;
- M para *Di (en)* → *Hi (en)* → *Ol (fo)* ;

Após a atribuição de todos os outros óxidos, a sílica (S) será atribuída aos silicatos *provisórios* que, em função da abundância relativa dos diferentes óxidos, tiverem sido constituídos. O termo *provisório* justifica-se, nesta altura, já que, só após a distribuição ordenada de S, se saberá quais dos silicatos *provisórios* poderão completar a sua composição química e, assim, fazer parte da composição normativa (*Norma*) da rocha analisada.

Em função da abundância relativa de S na análise química, vários são os cenários possíveis. Os seis exemplos apresentados neste trabalho são representativos do espectro composicional verificado em ambientes ígneos naturais.

Operações a executar em todos os casos

i.) transformação das percentagens em peso (% peso) dos óxidos (expressas pela análise química: 3ª linha dos quadros de cálculo; ver próxima página) nas respectivas proporções molares (prop. m.: 5ª linha), dividindo as % peso pelos pesos moleculares (p.m.: 4ª linha) de cada óxido. Por comodidade de operação, pode multiplicar-se o resultado destas divisões por 10^3 . Nesse caso, porém, será necessário anular este factor no final do exercício, dividindo por 10^3 os pesos moleculares dos componentes normativos (Passo III).

ii.) adição das proporções molares de FeO e MnO; o valor resultante será designado por F^{2+} .

CASO 1 – Cálculo da Norma de uma rocha *sobre-saturada em sílica e peraluminosa*

No primeiro caso, a quantidade inicial de S é excedentária relativamente aos silicatos *provisórios* constituídos ao longo do exercício, permitindo, no final, formar *Quartzo (Qz)*; também a quantidade de A excede a do somatório (K + N + Ca), pelo que a Norma terá *Corindo (C)*, mineral normativo que assinala o carácter *hiperaluminoso* (ou *peraluminoso*) desta rocha.

Quadro 1

abrev. / óxidos	S	T	A	F ³⁺	F ²⁺	←	M	Ca	N	K	P		
óxidos	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	
% peso	71.55	0.31	14.32	1.21	1.64	0.05	0.71	1.84	3.68	4.07	0.12	99.50	
p.m.	60	80	102	160	72	71	40	56	62	94	142		<i>Norma</i>
prop. m. × 10 ³	1192.5	3.9	140.4	7.6	23.5	←	17.8	32.9	59.4	43.3	0.9	p.m./10 ³	%
<i>Qz</i> (S)	486.7											0.060	29.2
<i>Or</i> (KAS ₆)	259.8		43.3							43.3		0.556	24.1
<i>Plg: ab</i> (NAS ₆)	356.4		59.4						59.4			0.524	31.1
<i>Plg: an</i> (CaAS ₂)	59.8		29.9					29.9				0.278	8.3
<i>Lc</i> (KAS ₄)												0.436	
<i>Ne</i> (NAS ₂)												0.284	
<i>C</i> (A)			7.8									0.102	0.8
<i>Ac</i> (NF ³⁺ S ₄)												0.462	
<i>Ns</i> (NS)												0.122	
<i>Di: wo</i> (CaS)												0.116	
<i>Di: en</i> (MS)												0.100	
<i>Di: fs</i> (F ²⁺ S)												0.132	
<i>Wo</i> (CaS)												0.116	
<i>Hi: en</i> (MS)	17.8						17.8					0.100	1.8
<i>Hi: fs</i> (F ²⁺ S)	12.0				12.0							0.132	1.6
<i>Ol: fo</i> (M ₂ S)												0.140	
<i>Ol: fa</i> (F ²⁺ + ₂ S)												0.204	
<i>Ap</i> (Ca ₃ .33P)								3.0			0.9	0.329	0.3
<i>Ilm</i> (F ²⁺ +T)		3.9			3.9							0.152	0.6
<i>Mt</i> (F ²⁺ +F ³⁺)				7.6	7.6							0.232	1.8
<i>Hem</i> (F ³⁺)												0.160	
<i>Tn</i> (CaTS)												0.196	
<i>Rt</i> (T)												0.080	
Totais	1192.5	3.9	140.4	7.6	23.5	←	17.8	32.9	59.4	43.3	0.9	Total	99.6

Nota 1: Na última linha do quadro (Totais) figuram os somatórios das proporções molares de cada óxido gastas durante o exercício. Estes deverão ser iguais aos valores iniciais disponíveis (5ª linha do quadro), ou muito semelhantes, sendo a diferença, a existir, devida a arredondamentos numéricos efetuados durante o exercício.

CLASSIFICAÇÃO:

Trata-se de uma rocha *ácida* (SiO₂ > 66 % peso), *sobressaturada em sílica* (com *Qz*) e *peraluminosa* (com *C*); devido às percentagens que apresenta em *Q*, *Or* e *Plg* (*ab/an*), admite a classificação de *Granito / Riólito*.

A presença de *Corindo* normativo nesta amostra traduz o excesso de A após a formação dos feldspatos (*Or* e *Plg*). Por sua vez a *Hi* é o único mineral normativo a alojar (M+F²⁺). *Corindo* e *Hiperstena* não são, porém,

fases comuns em rochas “graníticas” como esta, pelo que a sua presença nesta *Norma* deverá reflectir o potencial (químico) para gerar minerais (modais) ferro-magnesianos como a Biotite e, eventualmente, também Anfíbola (hornblenda), ambas fases hidratadas e, por isso, não consideradas no exercício de cálculo.

Passo I - Atribuição dos óxidos, excepto sílica, aos componentes normativos

(ver abreviaturas dos óxidos no Quadro 1)

I.1.) *Apatite (Ap)*: $\text{Ca}_{3,33}\text{P}$

$\text{P}_0 < \text{Ca}_0$ (ver prop. m. iniciais na 5ª linha do quadro) :

$$\text{P}_0 = \text{P}_{\text{inicial}} = 0.9 \Rightarrow \text{Ca} = 3.33 \times 0.9 = 3.0 ; \text{após } Ap , \text{ P esgota } (\downarrow) \text{ e } \text{Ca}_1 = \text{Ca}_0 - \text{Ca}(Ap) = 29.9$$
$$\text{Ca}_1 = 32.9 - 3.0 = 29.9$$

Quadro 1: 0.9 na coluna P (c. P), linha *Ap* (l. *Ap*) ; 3.0 (c. Ca, l. *Ap*)

I.2.) *Ilmenite (Ilm)*: F^{2+}T

$$\text{T}_0 < \text{F}^{2+}_0 ; \text{T}_0 = 3.9 \Rightarrow \text{F}^{2+} = 3.9 ; \text{após } Ilm , \text{ T } (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+}_1 = \text{F}^{2+}_0 - 3.9 = 19.6$$

Quadro 1: 3.9 (c. T, l. *Ilm*) e (c. F^{2+} , l. *Ilm*)

I.3.) *Ortoclase provisória (Or')*: $\text{KA}\dots$ (a S só será atribuída no Passo II, tal como para os outros silicatos)

$$\text{K}_0 < \text{A}_0 ; \text{K}_0 = 43.3 \Rightarrow \text{A} = 43.3 ; \text{após } Or' , \text{ K } (\downarrow) \text{ e } \text{A}_1 = 140.4 - 43.3 = 97.1$$

Quadro 1: 43.3 (c. K, l. *Or*) e (c. A, l. *Or*)

I.4.) *Plagioclase - albite prov. (ab')*: $\text{NA}\dots$

$$\text{N}_0 < \text{A}_1 ; \text{N}_0 = 59.4 \Rightarrow \text{A} = 59.4 ; \text{após } ab' , \text{ N } (\downarrow) \text{ e } \text{A}_2 = 97.1 - 59.4 = 37.7$$

Quadro 1: 59.4 (c. N, l. *Plg: ab*) e (c. A, l. *Plg: ab*)

I.5.) *Plagioclase - anortite prov. (an')*: $\text{CaA}\dots$

$$\text{Ca}_1 < \text{A}_2 ; \text{Ca}_1 = 29.9 \Rightarrow \text{A} = 29.9 ; \text{após } an' , \text{ Ca } (\downarrow) \text{ e } \text{A}_3 = 37.7 - 29.9 = 7.8$$

Quadro 1: 29.9 (c. Ca, l. *Plg: an*) e (c. A, l. *Plg: an*)

I.6.) *Corindo (C)*: A

$$A = 7.8 ; \text{após } C , A (\downarrow)$$

Quadro 1: 7.8 (c. A, l. C)

I.7.) *Magnetite (Mt)*: $F^{2+}F^{3+}$

$$F^{3+}_0 < F^{2+}_1 ; F^{3+}_0 = 7.6 \Rightarrow F^{2+} = 7.6 ; \text{após } Mt , F^{3+} (\downarrow) \text{ e } F^{2+}_2 = 19.6 - 7.6 = 12.0$$

Quadro 1: 7.6 (c. F^{3+} , l. *Mt*) e (c. F^{2+} , l. *Mt*)

I.8.) *Hiperstena prov. (Hi')* = [*enstatite (en')*: M...] + [*ferrossilite (fs')*: F^{2+} ...]

$$en' (M_0 = 17.8) ; fs' (F^{2+} = 12.0) ; \text{após } Hi' (en' + fs') , M (\downarrow) \text{ e } F^{2+} (\downarrow)$$

Quadro 1: 17.8 (c. M, l. *Hi: en*) e 12.0 (c. F^{2+} , l. *Hi: fs*)

Passo II : Distribuição da S pelos silicatos provisórios (*Or'*, *ab'*, *an'*, *Hi'*)

II.1.) *Or* (KAS_6) ; $S(Or) = 6 \times K(Or') = 6 \times 43.3 = 259.8$; após *or* , $S_1 = S_0 - S(Or) = 942.2$

Quadro 1: 259.8 (c. S, l. *Or*)

II.2.) *ab* (NAS_6) ; $S(ab) = 6 \times N(ab') = 6 \times 59.4 = 356.4$; após *ab* , $S_2 = S_1 - 356.4 = 585.8$

Quadro 1: 356.4 (c. S, l. *Plg: ab*)

II.3.) *an* ($CaAS_2$) ; $S(an) = 2 \times Ca(an') = 2 \times 29.9 = 59.8$; após *an* , $S_3 = 585.8 - 59.8 = 526.0$

Quadro 1: 59.8 (c. S, l. *Plg: an*)

II.4.) *Hi* [(M, F^{2+})S] = [(*en* (MS)) + (*fs* (F^{2+} S))] ; $S(Hi) = [(1 \times M(en)) + (1 \times F^{2+}(fs))] = 17.8 + 12.0 = 29.8$

$$\text{após } Hi , S_4 = 526.0 - 29.8 = 496.2$$

Quadro 1: 17.8 (c. S, l. *Hi: en*) e 12.0 (c. S, l. *Hi: fs*)

II.5.) toda esta S ($S_4 = S_0 - S(Or + ab + an + Hi) = 486.7$) será atribuída ao *Quartzo (Qz)*

Quadro 1: 486.7 (c. S, l. *Qz*)

Passo III : Cálculo das percentagens ponderais (% p.) de cada componente normativo

A penúltima coluna do quadro anexo (à direita) mostra os p. m. (divididos por 10^3) correspondentes às fórmulas dos componentes normativos (1ª coluna). Só se introduz aqui o factor 10^3 , se, no início - ver *i* - também se tiverem multiplicado por 10^3 as prop. m. dos óxidos (5ª linha).

Exemplo: p. m. de uma mole de *or* (KAS_6) = $[(1 \times 94) + (1 \times 102) + (6 \times 60)] = 556$; $556 / 10^3 = 0.556$; os valores 94 (p. m. de K), 102 (p. m. de A) e 60 (p. m. de S) estão 4ª linha e resultam dos pesos atómicos do potássio, alumínio, silício e oxigénio, expressos na tabela periódica.

A última coluna (à direita) mostra a **composição normativa** (*Norma*) da rocha analisada, ou seja, a % p. de cada componente normativo nessa rocha. Para as determinar, basta multiplicar a prop. m. de cada componente normativo pelo respectivo (p.m. / 10^3). De notar que, para cada componente normativo, o factor escolhido para efectuar esta operação terá sempre que corresponder à prop. m. de um óxido que, na fórmula desse componente, esteja representado por apenas uma mole, isto é, a relação entre o número de moles deste óxido e o número de moles do componente normativo de que faz parte, será sempre de 1 : 1 .

Assim teremos, neste caso:

III.1.) $Qz = 486.7 \times 0.060 = \mathbf{29.2 \%}$ (Quadro 1: coluna *Norma*, linha *Q*)

III.2.) $Or = 43.3 \times 0.556 = \mathbf{24.1 \%}$ (Quadro 1: c. *Norma*, l. *Or*)

III.3.) $(Plg) ab = 59.4 \times 0.524 = \mathbf{31.1 \%}$ (Quadro 1: c. *Norma*, l. *ab*)

III.4.) $(Plg) an = 29.9 \times 0.278 = \mathbf{8.3 \%}$ (Quadro 1: c. *Norma*, l. *an*)

III.5.) $C = 7.8 \times 0.102 = \mathbf{0.8 \%}$ (Quadro 1: c. *Norma*, l. *C*)

III.6.) $(Hi) en = 17.8 \times 0.100 = \mathbf{1.8 \%}$ (Quadro 1: c. *Norma*, l. *en*)

III.7.) $(Hi) fs = 12.0 \times 0.132 = \mathbf{1.6 \%}$ (Quadro 1: c. *Norma*, l. *fs*)

III.8.) $Ap = 0.9 \times 0.329 = \mathbf{0.3 \%}$ (Quadro 1: c. *Norma*, l. *Ap*)

III.9.) $Ilm = 3.9 \times 0.152 = \mathbf{0.6 \%}$ (Quadro 1: c. *Norma*, l. *Ilm*)

III.10.) $Mt = 7.6 \times 0.232 = \mathbf{1.8 \%}$ (Quadro 1: c. *Norma*, l. *Mt*)

CASO 2 – Cálculo da Norma para uma rocha *sobressaturada em sílica e metaluminosa*

No segundo caso, após a formação dos feldspatos *provisórios* (*Or*, *ab*, *an*), sobra Ca que vai para *Di*. A sílica inicial excede a necessária para completar os silicatos *provisórios* (*Or*, *ab*, *an*, *Di* e *Hi*), sendo a remanescente usada para constituir *Qz* (Quadro 2).

Quadro 2

abrev. / óxidos	S	T	A	F ³⁺	F ²⁺	←	M	Ca	N	K	P		
óxidos	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	
% peso	59.82	1.05	16.01	1.90	6.21	0.20	3.87	5.91	3.84	0.88	0.21	99.90	
p.m.	60	80	102	160	72	71	40	56	62	94	142		
prop. m. × 10 ³	997.0	13.1	157.0	11.9	89.1	←	96.8	105.5	61.9	9.4	1.5	p.m./10 ³	Norma %
<i>Qz</i> (S)	222.1											0.060	13.3
<i>Or</i> (KAS6)	56.4		9.4							9.4		0.556	5.2
<i>Plg: ab</i> (NAS6)	371.4		61.9						61.9			0.524	32.4
<i>Plg: an</i> (CaAS2)	171.4		85.7					85.7				0.278	23.8
<i>Lc</i> (KAS4)												0.436	
<i>Ne</i> (NAS2)												0.284	
<i>C</i> (A)												0.102	
<i>Ac</i> (NF ³⁺ S4)												0.462	
<i>Ns</i> (NS)												0.122	
<i>Di: wo</i> (CaS)	14.8							14.8				0.116	1.7
<i>Di: en</i> (MS)	8.9						8.9					0.100	0.9
<i>Di: fs</i> (F ²⁺ S)	5.9				5.9							0.132	0.8
<i>Wo</i> (CaS)												0.116	
<i>Hi: en</i> (MS)	87.9						87.9					0.100	8.8
<i>Hi: fs</i> (F ²⁺ S)	58.2				58.2							0.132	7.7
<i>Ol: fo</i> (M ₂ S)												0.140	
<i>Ol: fa</i> (F ²⁺ 2S)												0.204	
<i>Ap</i> (Ca ₃ .33P)								5.0			1.5	0.329	0.5
<i>Ilm</i> (F ²⁺ T)		13.1			13.1							0.152	2.0
<i>Mt</i> (F ²⁺ F ³⁺)				11.9	11.9							0.232	2.8
<i>Hem</i> (F ³⁺)												0.160	
<i>Tn</i> (CaTS)												0.196	
<i>Rt</i> (T)												0.080	
Totais	997.0	13.1	157.0	11.9	89.1	←	96.8	105.5	61.9	9.4	1.5	Total	99.9

CLASSIFICAÇÃO:

Trata-se de uma rocha *intermédia* ($52 < \text{SiO}_2 < 66$ % peso), *sobressaturada em sílica* (com *Qz*) e *metaluminosa* (sem *C* e sem *Ac*); devido às percentagens que apresenta em *Q*, *Or*, *Plg* (*ab/an*), *Di* (*wo, en, fs*) e *Hi* (*en/fs*), admite a classificação de *Diorito / Andesito*.

Neste caso, *Di* e *Hi* são os componentes normativos ferro-magnesianos. Tratando-se de uma rocha diorítica, é provável que o par normativo (*Diópsido + Hiperstena*) represente fases modais com (M, F²⁺ e Ca) como a Clinopiroxena (diópsido-hedembergite, augite) e a Anfíbola (horneblenda).

Passo I - Atribuição dos óxidos, excepto S aos componentes normativos

I.1.) *Apatite (Ap)*: $\text{Ca}_{3,33}\text{P}$

$$P_0 < \text{Ca}_0; P_0 = 1.5 \Rightarrow \text{Ca} = 3.33 \times 1.5 = 5.0; \text{ após } Ap, \text{ P esgota } (\downarrow) \text{ e } \text{Ca}_1 = 100.5$$

I.2.) *Ilmenite (Ilm)*: F^{2+}T

$$T_0 < \text{F}^{2+}_0; T_0 = 13.1 \Rightarrow \text{F}^{2+} = 13.1; \text{ após } Ilm, \text{ T } (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+}_1 = 76.0$$

I.3.) *Ortoclase provisória (Or')*: $\text{KA}...$

$$K_0 < A_0; K_0 = 9.4 \Rightarrow A = 9.4; \text{ após } Or', \text{ K } (\downarrow) \text{ e } A_1 = 147.6$$

I.4.) *Plagioclase - albite prov. (ab')*: $\text{NA}...$

$$N_0 < A_1; N_0 = 61.9 \Rightarrow A = 61.9; \text{ após } ab', \text{ N } (\downarrow) \text{ e } A_2 = 85.7$$

I.5.) *Plagioclase - anortite prov. (an')*: $\text{CaA}...$

$$A_2 < \text{Ca}_1; A_2 = 85.7 \Rightarrow \text{Ca} = 85.7; \text{ após } an', \text{ A } (\downarrow) \text{ e } \text{Ca}_2 = 14.8$$

I.7.) *Magnetite (Mt)*: $\text{F}^{2+}\text{F}^{3+}$

$$\text{F}^{3+}_0 < \text{F}^{2+}_1; \text{F}^{3+}_0 = 11.9 \Rightarrow \text{F}^{2+} = 11.9; \text{ após } Mt, \text{ F}^{3+} (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+}_2 = 64.1$$

I.8.) *Diópsido prov. (Di')* = [(*volaston. prov. (wo')*: $\text{Ca}...$) + ((*enstatite (en')*: $\text{M}...$), (*ferrossilite (fs')*: $\text{F}^{2+}...$))]

ou seja, $Di' = \text{Ca}(\text{M}, \text{F}^{2+}) \dots$

$$\text{Ca}_2 < (\text{M}_0 + \text{F}^{2+}_2); \text{Ca}_2 = 14.8 \text{ e } (\text{M}_0 + \text{F}^{2+}_2) = (96.8 + 64.1) = 160.9;$$

assim, de acordo com a fórmula do Di' , $(\text{M} + \text{F}^{2+})$ a gastar deverão igualar a quantidade de Ca:

$$wo' (\text{Ca} = 14.8); en' (\text{M} = 8.9 = (96.8 \times 14.8) / 160.9); fs' (\text{F}^{2+} = 5.9 = (64.1 \times 14.8) / 160.9)$$

após Di' , $\text{Ca} (\downarrow)$; $\text{M}_1 = 87.9$ e $\text{F}^{2+}_3 = 58.2$

I.9.) *Hiperstena prov. (Hi')* = [*enstatite prov. (en')*: $\text{M}...$] + [*ferrossilite prov (fs')*: $\text{F}^{2+}...$]

en' ($\text{M} = 87.9$); fs' ($\text{F}^{2+} = 58.2$); após Hi' ($en' + fs'$), $\text{M} (\downarrow)$ e $\text{F}^{2+} (\downarrow)$

Passo II : Distribuição da S pelos silicatos provisórios (*or'*, *ab'*, *an'*, *Di'*, *Hi'*)

II.1.) *Or* (KAS_6) ; $S(\text{Or}) = 6 \times \text{K}(\text{Or}') = 56.4$; após *Or* , $S_1 = S_0 - S(\text{or}) = 940.6$

II.2.) *ab* (NAS_6) ; $S(\text{ab}) = 6 \times \text{N}(\text{ab}') = 371.4$; após *ab* , $S_2 = 569.2$

II.3.) *an* (CaAS_2) ; $S(\text{an}) = 2 \times \text{Ca}(\text{an}') = 171.4$; após *an* , $S_3 = 397.8$

II.4.) *Di* [$\text{Ca}(\text{M}, \text{F}^{2+})\text{S}_2$] ; $S(\text{Di}) = [1 \times \text{Ca}(\text{wo}') + 1 \times \text{M}(\text{en}') + 1 \times \text{F}^{2+}(\text{fs}')] = 29.6$; após *Di* , $S_4 = 368.2$

II.5.) *Hi* [$(\text{M}, \text{F}^{2+})\text{S}$] ; $S(\text{Hi}) = [1 \times \text{M}(\text{en}') + 1 \times \text{F}^{2+}(\text{fs}')] = 146.1$; após *Hi* , $S_5 = 222.1$

II.6.) Toda esta sílica (S_5) é atribuída ao *Quartzo* (*Qz*).

Passo III : Cálculo das percentagens ponderais (% p.) de cada componente normativo

III.1.) $Qz = 222.1 \times 0.060 = \mathbf{13.3 \%}$

III.2.) $Or = 9.4 \times 0.556 = \mathbf{5.2 \%}$

III.3.) (*Plg*) $ab = 61.9 \times 0.524 = \mathbf{32.4 \%}$

III.4.) (*Plg*) $an = 85.7 \times 0.278 = \mathbf{23.8 \%}$

III.5.) (*Di*) $wo = 14.8 \times 0.116 = \mathbf{1.7 \%}$

III.6.) (*Di*) $en = 8.9 \times 0.100 = \mathbf{0.9 \%}$

III.7.) (*Di*) $fs = 5.9 \times 0.132 = \mathbf{0.8 \%}$

III.8.) (*Hi*) $en = 87.9 \times 0.100 = \mathbf{8.8 \%}$

III.9.) (*Hi*) $fs = 58.2 \times 0.132 = \mathbf{7.7 \%}$

III.10.) $Ap = 1.5 \times 0.329 = \mathbf{0.5 \%}$

III.11.) $Ilm = 13.1 \times 0.152 = \mathbf{2.0 \%}$

III.12.) $Mt = 11.9 \times 0.232 = \mathbf{2.8 \%}$

CASO 3 – Cálculo da Norma para uma rocha saturada em sílica e metaluminosa

No terceiro caso, a S inicial é suficiente para completar *Or*, *ab*, *an* e *Di* mas a quantidade remanescente (S_4), não chega para completar *Hi'*. S_4 é, no entanto, superior a ($Hi'/2$), pelo que a transformação parcial de *Hi'* em *Ol*, isto é [$Hi' \rightarrow (Hi + Ol)$], se ajusta à quantidade de sílica disponível (S_4) (Quadro 3).

Quadro 3

abrev. / óxidos	S	T	A	F ³⁺	F ²⁺	←	M	Ca	N	K	P		
óxidos	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	
% peso	49.31	1.84	15.74	3.79	7.13	0.20	8.11	9.47	2.91	1.10	0.35	99.95	
p.m.	60	80	102	160	72	71	40	56	62	94	142		Norma
prop. m. × 10 ³	821.8	23.0	154.3	23.7	101.8	←	202.8	169.1	46.9	11.7	2.5	p.m./10 ³	%
<i>Qz</i> (S)												0.060	
<i>Or</i> (KAS ₆)	70.2		11.7							11.7		0.556	6.5
<i>Plg: ab</i> (NAS ₆)	281.4		46.9						46.9			0.524	24.6
<i>Plg: an</i> (CaAS ₂)	191.4		95.7					95.7				0.278	26.6
<i>Lc</i> (KAS ₄)												0.436	
<i>Ne</i> (NAS ₂)												0.284	
<i>C</i> (A)												0.102	
<i>Ac</i> (NF ³⁺ S ₄)												0.462	
<i>Ns</i> (NS)												0.122	
<i>Di: wo</i> (CaS)	65.1							65.1				0.116	7.6
<i>Di: en</i> (MS)	51.2						51.2					0.100	5.1
<i>Di: fs</i> (F ²⁺ S)	13.9				13.9							0.132	1.8
<i>Wo</i> (CaS)												0.116	
<i>Hi: en'</i> (MS)							151.6					0.100	
<i>Hi: en</i> (MS)	82.1						82.1					0.100	8.2
<i>Hi: fs'</i> (F ²⁺ S)					41.2							0.132	
<i>Hi: fs</i> (F ²⁺ S)	22.3				22.3							0.132	2.9
<i>Ol: fo</i> (M ₂ S)	34.8						69.5					0.140	4.9
<i>Ol: fa</i> (F ²⁺ 2S)	9.4				18.9							0.204	1.9
<i>Ap</i> (Ca ₃ .33P)								8.3			2.5	0.329	0.8
<i>Ilm</i> (F ²⁺ T)		23.0			23.0							0.152	3.5
<i>Mt</i> (F ²⁺ F ³⁺)				23.7	23.7							0.232	5.5
<i>Hem</i> (F ³⁺)												0.160	
<i>Tn</i> (CaTS)												0.196	
<i>Rt</i> (T)												0.080	
Totais	821.8	23.0	154.3	23.7	101.8	←	202.8	169.1	46.9	11.7	2.5	Total	99.9

CLASSIFICAÇÃO:

Trata-se de uma rocha básica ($45 < SiO_2 < 52$ % peso), saturada em sílica (*Hi + Ol*) e metaluminosa (sem *C* e sem *Ac*); devido às percentagens que apresenta em *Or*, *Plg* (*ab/an*), *Hi* (*en/fs*) e *Ol* (*fo/fa*) admite a classificação de *Gabro / Basalto*.

Passo I - Atribuição dos óxidos, excepto S aos componentes normativos

I.1.) *Apatite (Ap)*: $\text{Ca}_{3,33}\text{P}$

$$\text{P}_0 < \text{Ca}_0; \text{P}_0 = 2.5 \Rightarrow \text{Ca} = 3.33 \times 2.5 = 8.3; \text{ após } Ap, \text{ P esgota } (\downarrow) \text{ e } \text{Ca}_1 = 160.8$$

I.2.) *Ilmenite (Ilm)*: F^{2+}T

$$\text{T}_0 < \text{F}^{2+}_0; \text{T}_0 = 23.0 \Rightarrow \text{F}^{2+} = 23.0; \text{ após } Ilm, \text{ T } (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+}_1 = 78.8$$

I.3.) *Ortoclase provisória (Or')*: $\text{KA}...$

$$\text{K}_0 < \text{A}_0; \text{K}_0 = 11.7 \Rightarrow \text{A} = 11.7; \text{ após } Or', \text{ K } (\downarrow) \text{ e } \text{A}_1 = 142.6$$

I.4.) *Plagioclase - albite prov. (ab')*: $\text{NA}...$

$$\text{N}_0 < \text{A}_1; \text{N}_0 = 46.9 \Rightarrow \text{A} = 46.9; \text{ após } ab', \text{ N } (\downarrow) \text{ e } \text{A}_2 = 95.7$$

I.5.) *Plagioclase - anortite prov. (an')*: $\text{CaA}...$

$$\text{A}_2 < \text{Ca}_1; \text{A}_2 = 95.7 \Rightarrow \text{Ca} = 95.7; \text{ após } an', \text{ A } (\downarrow) \text{ e } \text{Ca}_2 = 65.1$$

I.7.) *Magnetite (Mt)*: $\text{F}^{2+}\text{F}^{3+}$

$$\text{F}^{3+}_0 < \text{F}^{2+}_1; \text{F}^{3+}_0 = 23.7 \Rightarrow \text{F}^{2+} = 23.7; \text{ após } Mt, \text{ F}^{3+} (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+}_2 = 55.1$$

I.8.) *Diópsido prov. (Di')* = [(*volaston. prov. (wo')*: $\text{Ca}...$) + ((*enstatite (en')*: $\text{M}...$),(*ferrossilite (fs')*: $\text{F}^{2+}...$))]

ou seja, $\text{Di}' = \text{Ca} (\text{M}, \text{F}^{2+}) ...$

$$\text{Ca}_2 < (\text{M}_0 + \text{F}^{2+}_2); \text{Ca}_2 = 65.1 \text{ e } (\text{M}_0 + \text{F}^{2+}_2) = (202.8 + 55.1) = 257.9;$$

assim, de acordo com a fórmula do Di' , $(\text{M} + \text{F}^{2+})$ a gastar deverão igualar a quantidade de Ca:

$$wo' (\text{Ca} = 65.1); en' (\text{M} = 51.2 = (202.8 \times 65.1) / 257.9); fs' (\text{F}^{2+} = 13.9 = (55.1 \times 65.1) / 257.9)$$

$$\text{após } Di', \text{ Ca } (\downarrow); \text{M}_1 = 151.6 \text{ e } \text{F}^{2+}_3 = 41.2$$

I.9.) *Hiperstena prov. (Hi')* = [*enstatite prov. (en')*: $\text{M}...$] + [*ferrossilite prov (fs')*: $\text{F}^{2+}...$]

$$en' (\text{M} = 151.6); fs' (\text{F}^{2+} = 41.2); \text{ após } Hi' (\text{en}' + \text{fs}'), \text{ M } (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+} (\downarrow)$$

Passo II : Distribuição da S pelos silicatos provisórios (*or'*, *ab'*, *an'*, *Di'*, *Hi'*)

II.1.) *Or* (KAS_6) ; $S(\text{Or}) = 6 \times \text{K}(\text{Or}') = 70.2$; após *Or* , $S_1 = S_0 - S(\text{or}) = 751.6$

II.2.) *ab* (NAS_6) ; $S(\text{ab}) = 6 \times \text{N}(\text{ab}') = 281.4$; após *ab* , $S_2 = 470.2$

II.3.) *an* (CaAS_2) ; $S(\text{an}) = 2 \times \text{Ca}(\text{an}') = 191.4$; após *an* , $S_3 = 278.8$

II.4.) *Di* [$\text{Ca}(\text{M}, \text{F}^{2+})\text{S}_2$] ; $S(\text{Di}) = [1 \times \text{Ca}(\text{wo}') + 1 \times \text{M}(\text{en}') + 1 \times \text{F}^{2+}(\text{fs}')] = 130.2$; após *Di* , $S_4 = 148.6$

II.5.) *Hi* [$(\text{M}, \text{F}^{2+})\text{S}$] ; $S(\text{Hi}) = [1 \times \text{M}(\text{en}') + 1 \times \text{F}^{2+}(\text{fs}')] = 151.6 + 41.2 = 192.8$

S_4 é insuficiente para formar *Hi* ;

os valores de $\text{M}(\text{en}')$ e $\text{F}^{2+}(\text{fs}')$ colocados no quadro para *Hi'* , terão de ser recalculados;

a Norma terá *Olivina* [(*forsterite* (*fo*): M_2S) + (*faialite* (*fa*): F^{2+}_2S)] ;

Como, neste caso, $S_4 > [(\text{M}(\text{en}') + \text{F}^{2+}(\text{fs}')) / 2] \Leftrightarrow 148.6 > (192.8 / 2)$,

***Hi'* será parcialmente transformada em *Ol'* ;**

$\text{Hi}' \rightarrow (\text{Hi}'' + \text{Ol}')$, de acordo com o seguinte sistema de equações:

$$\text{Hi}'' = (2 \times S_4) - \text{Hi}' = (2 \times 148.6) - 192.8 = 104.4$$

$$\text{Ol}' = \text{Hi}' - \text{Hi}'' = 192.8 - 104.4 = 88.4 \text{ ;}$$

mantendo em Hi'' , a razão $\text{M}/(\text{M} + \text{F}^{2+})$ de Hi' , virá:

$$\text{en}'' \text{ (M} = (151.6 \times 104.4) / 192.8 = 82.1) \text{ e } \text{fs}'' \text{ (F}^{2+} = (41.2 \times 104.4) / 192.8 = 22.3)$$

$$\text{após } \text{Hi}'' \text{ , } \text{M}_2 = 151.6 - 82.1 = 69.5 \text{ e } \text{F}^{2+}_4 = 41.2 - 22.3 = 18.9 \text{ ;}$$

as quantidades sobrantas, M_2 e F^{2+}_4 , serão atribuídas à *Ol'* :

$$\text{Ol}' : \text{fo}' \text{ (M} = 69.5) \text{ e } \text{fa}' \text{ (F}^{2+} = 18.9) \text{ ; após } \text{Ol}' \text{ , M} (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+} (\downarrow) \text{ ;}$$

de acordo com os fórmulas de *Hi* e de *Ol* , retoma-se agora a distribuição da S :

II.5.1.) *Hi* [$(\text{M}, \text{F}^{2+})\text{S}$] ; $S(\text{Hi}) = [(1 \times \text{M}(\text{en}'')) + (1 \times \text{F}^{2+}(\text{fs}''))] = 104.4$; após *Hi* ; $S_5 = 44.2$

II.6.) *Ol* [$(\text{M}, \text{F}^{2+})_2\text{S}$] ; $S(\text{Ol}) = [(\text{M}(\text{fo}') / 2) + (\text{F}^{2+}(\text{fa}') / 2)] = 69.5/2 + 18.9/2 = 44.2$; após *Ol* : S (\downarrow)

Passo III : Cálculo das percentagens ponderais (% p.) de cada componente normativo

III.1.) $Or = 11.7 \times 0.556 = \mathbf{6.5 \%}$

III.2.) $(Plg) ab = 46.9 \times 0.524 = \mathbf{24.6 \%}$

III.3.) $(Plg) an = 95.7 \times 0.278 = \mathbf{26.6 \%}$

III.4.) $(Di) wo = 65.1 \times 0.116 = \mathbf{7.6 \%}$

III.5.) $(Di) en = 51.2 \times 0.100 = \mathbf{5.1 \%}$

III.6.) $(Di) fs = 13.9 \times 0.132 = \mathbf{1.8 \%}$

III.7.) $(Hi) en = 82.1 \times 0.100 = \mathbf{8.2 \%}$

III.8.) $(Hi) fs = 22.3 \times 0.132 = \mathbf{2.9 \%}$

III.9.) $(Ol) fo = 34.8 \times 0.140 = \mathbf{4.9 \%}$

III.10.) $(Ol) fa = 9.4 \times 0.204 = \mathbf{1.9 \%}$

III.11.) $Ap = 2.5 \times 0.329 = \mathbf{0.8 \%}$

III.12.) $Ilm = 23.0 \times 0.152 = \mathbf{3.5 \%}$

III.13.) $Mt = 23.7 \times 0.232 = \mathbf{5.5 \%}$

CASO 4 – Cálculo da Norma para uma rocha subsaturada em sílica e metaluminosa

Neste caso, agrava-se a deficiência em sílica relativamente à que seria necessária para completar os silicatos *provisórios*. Uma vez que, após completar *Or*, *ab*, *an* e *Di*, *S* é inferior a ($Hi'/2$), *Hi'* é totalmente transformada em *Ol'*, ou seja, [$Hi' \rightarrow Ol$] e, conseqüentemente, *ab'* será *parcialmente* transformada em *Ne*, isto é, [$ab' \rightarrow (ab + Ne)$], utilizando o valor de *S* disponível após completar *Or*, *an*, *Di* e *Ol* (Quadro 4).

Quadro 4

abrev. / óxidos	S	T	A	F ³⁺	F ²⁺	←	M	Ca	N	K	P		
óxidos	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	
% peso	44.94	2.40	9.93	0.95	10.90	0.20	17.90	10.22	1.72	0.56	0.23	99.95	
p.m.	60	80	102	160	72	71	40	56	62	94	142		
prop. m. × 10 ³	749.0	30.0	97.4	5.9	154.2		447.5	182.5	27.7	6.0	1.6	p.m./10 ³	Norma %
<i>Qz</i> (S)												0.060	
<i>Or</i> (KAS6)	36.0		6.0							6.0		0.556	3.3
<i>Plg:ab'</i> (NAS6)			27.7						27.7			0.524	
<i>Plg: ab</i> (NAS6)	115.8		19.3						19.3			0.524	10.1
<i>Plg: an</i> (CaAS ₂)	127.4		63.7					63.7				0.278	17.7
<i>Lc</i> (KAS4)												0.436	
<i>Ne</i> (NAS ₂)	16.8		8.4						8.4			0.284	2.4
<i>C</i> (A)												0.102	
<i>Ac</i> (NF ³⁺ S ₄)												0.462	
<i>Ns</i> (NS)												0.122	
<i>Di: wo</i> (CaS)	113.5							113.5				0.116	13.2
<i>Di: en</i> (MS)	89.8						89.8					0.100	9.0
<i>Di: fs</i> (F ²⁺ S)	23.7				23.7							0.132	3.1
<i>Wo</i> (CaS)												0.116	
<i>Hi: en'</i> (MS)							357.7					0.100	
<i>Hi: fs'</i> (F ²⁺ S)					94.6							0.132	
<i>Ol: fo</i> (M ₂ S)	178.9						357.7					0.140	25.0
<i>Ol: fa</i> (F ²⁺ ₂ S)	47.3				94.6							0.204	9.6
<i>Ap</i> (Ca ₃ .33P)								5.3			1.6	0.329	0.5
<i>Ilm</i> (F ²⁺ T)		30.0			30.0							0.152	4.6
<i>Mt</i> (F ²⁺ F ³⁺)				5.9	5.9							0.232	1.4
<i>Hem</i> (F ³⁺)												0.160	
<i>Tn</i> (CaTS)												0.196	
<i>Rt</i> (T)												0.080	
Totais	749.2	30.0	97.4	5.9	154.2	←	447.5	182.5	27.7	6.0	1.6	Total	99.9

Nota 1: Na coluna S, a quantidade inicial de S (749.0) difere do valor obtido para gasto total de S nos diferentes componentes normativos (749.2). Esta diferença (0.2) é devida a arredondamentos numéricos feitos ao longo do exercício; trata-se de uma diferença inferior a 0.03% do valor inicial de S, não devendo, por isso, ser considerada significativa.

CLASSIFICAÇÃO:

Trata-se de uma rocha *ultrabásica* (SiO₂ < 45 % peso), *subsaturada em sílica* (com *Ne*) e *metaluminosa* (sem *C* e sem *Ac*); devido às percentagens que apresenta em *Or*, *Plg* (*ab/an*), *Hi* (*en/fs*) e *Ol* (*fo/fa*) admite a classificação de *Peridotito / Komateiúto*.

Passo I - Atribuição dos óxidos, excepto S aos componentes normativos

I.1.) *Apatite (Ap)*: $\text{Ca}_{3,33}\text{P}$

$$P_0 < \text{Ca}_0; P_0 = 1.6 \Rightarrow \text{Ca} = 3.33 \times 1.6 = 5.3; \text{ após } Ap, P \text{ esgota } (\downarrow) \text{ e } \text{Ca}_1 = 177.2$$

I.2.) *Ilmenite (Ilm)*: F^{2+}T

$$T_0 < \text{F}^{2+}_0; T_0 = 30.0 \Rightarrow \text{F}^{2+} = 30.0; \text{ após } Ilm, T (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+}_1 = 124.2$$

I.3.) *Ortoclase provisória (Or')*: $\text{KA}...$

$$K_0 < A_0; K_0 = 6.0 \Rightarrow A = 6.0; \text{ após } Or', K (\downarrow) \text{ e } A_1 = 91.4$$

I.4.) *Plagioclase - albite prov. (ab')*: $\text{NA}...$

$$N_0 < A_1; N_0 = 27.7 \Rightarrow A = 27.7; \text{ após } ab', N (\downarrow) \text{ e } A_2 = 63.7$$

I.5.) *Plagioclase - anortite prov. (an')*: $\text{CaA}...$

$$A_2 < \text{Ca}_1; A_2 = 63.7 \Rightarrow \text{Ca} = 63.7; \text{ após } an', A (\downarrow) \text{ e } \text{Ca}_2 = 113.5$$

I.7.) *Magnetite (Mt)*: $\text{F}^{2+}\text{F}^{3+}$

$$\text{F}^{3+}_0 < \text{F}^{2+}_1; \text{F}^{3+}_0 = 5.9 \Rightarrow \text{F}^{2+} = 5.9; \text{ após } Mt, \text{F}^{3+} (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+}_2 = 118.3$$

I.8.) *Diópsido prov. (Di')* = [(*volast. prov. (wo')*: $\text{Ca}...$) + ((*enstatite (en')*: $\text{M}...$),(*ferrossilite (fs')*: $\text{F}^{2+}...$)))]

ou seja, $Di' = \text{Ca}(\text{M}, \text{F}^{2+})...$

$$\text{Ca}_2 < (\text{M}_0 + \text{F}^{2+}_2); (\text{M}_0 + \text{F}^{2+}_2) = (447.5 + 118.3) = 565.8; \text{Ca}_2 = 113.5 \text{ (a distribuir por } en' \text{ e } fs');$$

assim, de acordo com a fórmula do Di' , resulta:

$$wo' (\text{Ca} = 113.5); en' (\text{M} = 89.8 = (447.5 \times 113.5) / 565.8); fs' (\text{F}^{2+} = 23.7 = (118.3 \times 113.5) / 565.8)$$

$$\text{após } Di', \text{Ca } (\downarrow); \text{M}_1 = 357.7 \text{ e } \text{F}^{2+}_3 = 94.6$$

I.9.) *Hiperstena prov. (Hi')* = [*enstatite prov. (en')*: $\text{M}...$] + [*ferrossilite prov (fs')*: $\text{F}^{2+}...$]

$$en' (\text{M} = 357.7); fs' (\text{F}^{2+} = 94.6); \text{ após } Hi' (en' + fs'), \text{M } (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+} (\downarrow)$$

Passo II : Distribuição da S pelos silicatos provisórios (*or'*, *ab'*, *an'*, *Di'*, *Hi'*)

II.1.) *Or* (KAS_6) ; $S(Or) = 6 \times K(Or') = 36.0$; após *Or* , $S_1 = S_0 - S(or) = 713.0$

II.2.) *ab* (NAS_6) ; $S(ab) = 6 \times N(ab') = 166.2$; após *ab* , $S_2 = 546.8$

II.3.) *an* ($CaAS_2$) ; $S(an) = 2 \times Ca(an') = 127.4$; após *an* , $S_3 = 419.4$

II.4.) *Di* [$Ca(M,F^{2+})S_2$] ; $S(Di) = [1 \times Ca(wo') + 1 \times M(en') + 1 \times F^{2+}(fs')] = 227.0$; após *Di* , $S_4 = 192.4$

II.5.) *Hi* [$(M,F^{2+})S$] ; $S(Hi) = [1 \times M(en') + 1 \times F^{2+}(fs')] = 357.7 + 94.6 = 452.3$

S_4 é insuficiente para formar *Hi* ;

os valores de $M(en')$ e $F^{2+}(fs')$ colocados no quadro para *Hi'* , terão de ser recalculados;

a Norma terá *Olivina* [(*forsterite* (*fo*): M_2S) + (*faialite* (*fa*): F^{2+}_2S)] ;

Como, neste caso, $S_4 < [(M(en') + F^{2+}(fs')) / 2] \Leftrightarrow 192.4 < (452.3 / 2)$,

***Hi'* será totalmente transformada em *Ol'* ,**

$Hi' \rightarrow Ol'$

II.5.1.) *Ol* [$(M,F^{2+})_2S$] ; $S(Ol) = (357.7 / 2 + 94.6 / 2) = 226.2$

Como toda a *Hi* passou a *Ol* ,

ab'* será parcialmente transformada em *Ne'

$ab' \rightarrow (ab'' + Ne')$

Neste caso, é necessário calcular o valor de S que sobra após a formação de *Or* , *an* , *Di* e *Ol*:

$S_{5a} = S_0 - S(Or) - S(an) - S(Di) - S(Ol) = 749.0 - 36.0 - 127.4 - 227.0 - 226.2 = 132.4$

S_{5a} (132.4) é usado para determinar *ab''* e *Ne'* , de acordo com as duas equações:

$ab'' = (S - (2 \times ab')) / 4 = (132.4 - (2 \times 27.7)) / 4 = 19.3$

$Ne' = ab' - ab'' = 27.7 - 19.3 = 8.4$;

$S(ab) = 6 \times 19.3 = 115.8$ e $S(Ne) = 2 \times 8.4 = 16.8$;

$S - S(ab) - S(Ne) = 132.4 - 115.8 - 16.8 = -0.2$ ($\neq 0.0$ devido a arredondamentos) ; então, S (\downarrow)

Passo III : Cálculo das percentagens ponderais (% p.) de cada componente normativo

III.1.) $Or = 6.0 \times 0.556 = \mathbf{3.3} \%$

III.2.) $(Plg) ab = 19.3 \times 0.524 = \mathbf{10.1} \%$

III.3.) $(Plg) an = 63.7 \times 0.278 = \mathbf{17.7} \%$

III.4.) $Ne = 8.4 \times 0.284 = \mathbf{2.4} \%$

III.5.) $(Di) wo = 113.5 \times 0.116 = \mathbf{13.2} \%$

III.6.) $(Di) en = 89.8 \times 0.100 = \mathbf{9.0} \%$

III.7.) $(Di) fs = 23.7 \times 0.132 = \mathbf{3.1} \%$

III.8.) $(Ol) fo = 178.9 \times 0.140 = \mathbf{25.0} \%$

III.9.) $(Ol) fa = 47.3 \times 0.204 = \mathbf{9.6} \%$

III.10.) $Ap = 1.6 \times 0.329 = \mathbf{0.5} \%$

III.11.) $Ilm = 30.0 \times 0.152 = \mathbf{4.6} \%$

III.12.) $Mt = 5.9 \times 0.232 = \mathbf{1.4} \%$

CASO 5 – Cálculo da Norma para uma rocha subsaturada em sílica e metaluminosa

Neste caso, a razão $(K_0+N_0)/S_0$ cresce de tal forma ($\cong 0.21$) que a sílica é apenas suficiente para completar *Or*. A sílica que sobra após formar *Or* é inferior à necessária para completar *ab'*. Duas operações são necessárias para ajustar a sílica existente à exigida pelos outros silicatos *provisórios* entretanto constituídos. Desde logo, *Hi'* é totalmente transformada em *Ol'*, ou seja, [*Hi'* → *Ol'*]. Para além disso, tendo em conta que o valor de sílica (S_1), remanescente após a formação de *Or*, se situa no intervalo ($2ab' < S_1 < 6ab'$), outra operação de *poupança* em sílica terá lugar, nomeadamente, a transformação *parcial* de *ab'* em *Ne'*, isto é, [*ab'* → (*ab''* + *Ne'*)]. Esta operação será executada com o valor de sílica (S_4) disponível após completar os 4 silicatos *provisórios* até aqui existentes: *Or*, *an*, *Di* e *Ol*. Com estas duas transformações, [*Hi'* → *Ol'*] e [*ab'* → (*ab''* + *Ne'*)], a quantidade de sílica inicialmente disponível passa a ser suficiente para suprir os montantes requeridos pelos silicatos *provisórios* (Quadro 5).

Quadro 5

abrev. / óxidos	S	T	A	F ³⁺	F ²⁺	←	M	Ca	N	K	P		
óxidos	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	
% peso	54.99	0.60	21.96	2.26	2.29	0.15	0.77	2.78	8.23	5.58	0.13	99.74	
p.m.	60	80	102	160	72	71	40	56	62	94	142		<i>Norma</i>
prop. m. × 10 ³	916.5	7.5	215.3	14.1	33.9	←	19.3	49.6	132.8	59.4	0.9	p.m./10 ³	%
<i>Qz</i> (S)												0.060	
<i>Or</i> (KAS6)	356.4		59.4							59.4		0.556	33.0
<i>Plg: ab'</i> (NAS6)			132.8						132.8			0.524	
<i>Plg: ab</i> (NAS6)	295.8		49.3						49.3			0.524	25.8
<i>Plg: an</i> (CaAS2)	46.2		23.1					23.1				0.278	6.4
<i>Lc</i> (KAS4)												0.436	
<i>Ne</i> (NAS2)	167.0		83.5						83.5			0.284	23.7
<i>C</i> (A)												0.102	
<i>Ac</i> (NF ³⁺ S4)												0.462	
<i>Ns</i> (NS)												0.122	
<i>Di: wo</i> (CaS)	23.5							23.5				0.116	2.7
<i>Di: en</i> (MS)	14.4						14.4					0.100	1.4
<i>Di: fs</i> (F ²⁺ S)	9.1				9.1							0.132	1.2
<i>Wo</i> (CaS)												0.116	
<i>Hi: en'</i> (MS)							4.9					0.100	
<i>Hi: fs'</i> (F ²⁺ S)					3.2							0.132	
<i>Ol: fo</i> (M2S)	2.5						4.9					0.140	0.4
<i>Ol: fa</i> (F ²⁺ 2S)	1.6				3.2							0.204	0.3
<i>Ap</i> (Ca3.33P)								3.0			0.9	0.329	0.3
<i>Ilm</i> (F ²⁺ T)		7.5			7.5							0.152	1.1
<i>Mt</i> (F ²⁺ F ³⁺)				14.1	14.1							0.232	3.3
<i>Hem</i> (F ³⁺)												0.160	
<i>Tn</i> (CaTS)												0.196	
<i>Rt</i> (T)												0.080	
Totais	916.5	7.5	215.3	14.1	33.9	←	19.3	49.6	132.8	59.4	0.9	Total	99.6

CLASSIFICAÇÃO:

Trata-se de uma rocha *intermédia* ($52 < \text{SiO}_2 < 66$ % peso), *subsaturada em sílica* (com *Ne*) e *metaluminosa* (sem *C* e sem *Ac*); devido às percentagens que apresenta em *Or*, *Plg* (*ab/an*) e *Ne* admite a classificação de *Foiaíto* (ou *Sienito nefelínico*) / *Fonólito* (Quadro 5).

Passo I - Atribuição dos óxidos, excepto S aos componentes normativos

I.1.) *Apatite (Ap)*: $\text{Ca}_{3,33}\text{P}$

$$\text{P}_0 < \text{Ca}_0; \text{P}_0 = 0.9 \Rightarrow \text{Ca} = 3.33 \times 0.9 = 3.0; \text{ após } Ap, \text{ P esgota } (\downarrow) \text{ e } \text{Ca}_1 = 46.6$$

I.2.) *Ilmenite (Ilm)*: F^{2+}T

$$\text{T}_0 < \text{F}^{2+}_0; \text{T}_0 = 7.5 \Rightarrow \text{F}^{2+} = 7.5; \text{ após } Ilm, \text{ T } (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+}_1 = 25.9$$

I.3.) *Ortoclase provisória (Or')*: $\text{KA}...$

$$\text{K}_0 < \text{A}_0; \text{K}_0 = 59.4 \Rightarrow \text{A} = 59.4; \text{ após } Or', \text{ K } (\downarrow) \text{ e } \text{A}_1 = 155.9$$

I.4.) *Plagioclase - albite prov. (ab')*: $\text{NA}...$

$$\text{N}_0 < \text{A}_1; \text{N}_0 = 132.8 \Rightarrow \text{A} = 132.8; \text{ após } ab', \text{ N } (\downarrow) \text{ e } \text{A}_2 = 23.1$$

I.5.) *Plagioclase - anortite prov. (an')*: $\text{CaA}...$

$$\text{A}_2 < \text{Ca}_1; \text{A}_2 = 23.1 \Rightarrow \text{Ca} = 23.1; \text{ após } an', \text{ A } (\downarrow) \text{ e } \text{Ca}_2 = 23.5$$

I.7.) *Magnetite (Mt)*: $\text{F}^{2+}\text{F}^{3+}$

$$\text{F}^{3+}_0 < \text{F}^{2+}_1; \text{F}^{3+}_0 = 14.1 \Rightarrow \text{F}^{2+} = 14.1; \text{ após } Mt, \text{ F}^{3+} (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+}_2 = 12.3$$

I.8.) *Diópsido prov. (Di')* = [(*volast. prov. (wo')*: $\text{Ca}...$) + ((*enstatite (en')*: $\text{M}...$),(*ferrossilite (fs')*: $\text{F}^{2+}...$)))]

ou seja, $\text{Di}' = \text{Ca}(\text{M}, \text{F}^{2+})...$

$$\text{Ca}_2 < (\text{M}_0 + \text{F}^{2+}_2); (\text{M}_0 + \text{F}^{2+}_2) = (19.3 + 12.3) = 31.6; \text{ Ca}_2 = 23.5 \text{ (a distribuir por } en' \text{ e } fs');$$

assim, de acordo com a fórmula do Di' , resulta:

$$wo' (\text{Ca} = 23.5); en' (\text{M} = 14.4 = (19.3 \times 23.5) / 31.6); fs' (\text{F}^{2+} = 9.1 = (12.3 \times 23.5) / 31.6)$$

$$\text{após } Di', \text{ Ca } (\downarrow); \text{M}_1 = 4.9 \text{ e } \text{F}^{2+}_3 = 3.2$$

I.9.) *Hiperstena prov. (Hi')* = [*enstatite prov. (en')*: $\text{M}...$] + [*ferrossilite prov (fs')*: $\text{F}^{2+}...$]

$$en' (\text{M} = 4.9); fs' (\text{F}^{2+} = 3.2); \text{ após } Hi' (en' + fs'), \text{ M } (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+} (\downarrow)$$

Passo II : Distribuição da S pelos silicatos provisórios (*or'*, *ab'*, *an'*, *Di'*, *Hi'*)

II.1.) *Or* (KAS₆) ; $S(Or) = 6 \times K(Or') = 356.4$; após *Or* , $S_1 = S_0 - S(Or) = 560.1$

II.2.) *ab* (NAS₆) ; $S(ab) = 6 \times N(ab') = 796.8$

S₁ é insuficiente para formar *ab'* ;

os valores de $N(ab')$ e $A(ab')$ terão que ser recalculados

a Norma terá *nefelina* ;

Como, neste caso, $[2 \times N(ab')] < S_1 < [6 \times N(ab')] \Leftrightarrow 265.6 < 560.1 < 796.8$;

***ab'* será parcialmente transformada em *Ne'* e *Hi'* será totalmente transformada em *Ol'* ,**

$ab' \rightarrow (ab'' + Ne')$ e $Hi' \rightarrow Ol'$;

nestas circunstâncias é necessário proceder às seguintes operações :

a.) transportar os valores de $M(en')$ e $F^{2+}(fs')$ de *Hi'* para *fo'* e *fa'* de *Ol'*, respectivamente

b.) distribuir $S_1 (= 560.1)$ por *an'*, *Di'* e *Ol'*

II.3.) *an* (CaAS₂) ; $S(an) = 2 \times Ca(an') = 46.2$; após *an* , $S_2 = S_1 - S(an) = 513.9$

II.4.) *Di* [Ca(M,F²⁺)S₂] ; $S(Di) = (23.5 + 14.4 + 9.1) = 47.0$; após *Di* , $S_3 = 466.9$

II.5.) *Ol* [(M,F²⁺)₂S] ; $S(Ol) = [(M(fo') / 2) + (F^{2+}(fa') / 2)] = (2.5 + 1.6) = 4.1$; após *Ol* , $S_4 = 462.8$

c.) com S_4 calcular ab'' e Ne' , de acordo com o seguinte sistema de equações :

$$ab'' = (S_4 - (2 \times ab')) / 4 = (462.8 - (2 \times 132.8)) / 4 = 49.3$$

$$Ne' = ab' - ab'' = 132.8 - 49.3 = 83.5 ;$$

II.2.1.) *ab* (NAS₆) ; $S(ab) = 6 \times N(ab'') = 6 \times 49.3 = 295.8$; após *ab* , $S_5 = 167.0$

II.6.) *Ne* (NAS₂) ; $S(Ne) = 2 \times N(Ne) = 2 \times 83.5 = 167.0$; após *Ne* , S (↓)

Passo III : Cálculo das percentagens ponderais (% p.) de cada componente normativo

III.1.) $Or = 59.4 \times 0.556 = \mathbf{33.0 \%}$

III.2.) $(Plg) ab = 49.3 \times 0.524 = \mathbf{25.8 \%}$

III.3.) $(Plg) an = 23.1 \times 0.278 = \mathbf{6.4 \%}$

III.4.) $Ne = 83.5 \times 0.284 = \mathbf{23.7 \%}$

III.5.) $(Di) wo = 23.5 \times 0.116 = \mathbf{2.7 \%}$

III.6.) $(Di) en = 14.4 \times 0.100 = \mathbf{1.4 \%}$

III.7.) $(Di) fs = 9.1 \times 0.132 = \mathbf{1.2 \%}$

III.8.) $(Ol) fo = 2.5 \times 0.140 = \mathbf{0.4 \%}$

III.9.) $(Ol) fa = 1.6 \times 0.204 = \mathbf{0.3 \%}$

III.10.) $Ap = 0.9 \times 0.329 = \mathbf{0.3 \%}$

III.11.) $Ilm = 7.5 \times 0.152 = \mathbf{1.1 \%}$

III.12.) $Mt = 14.1 \times 0.232 = \mathbf{3.3 \%}$

CASO 6 – Cálculo da Norma para uma rocha subsaturada em sílica e hiperalcalina

O último exemplo (Caso 6) ilustra composições magmáticas bastante menos frequentes na natureza. A um valor elevado de $(K_0+N_0)/S_0 (= 0.17)$ junta-se uma razão muito alta de $(K_0+N_0)/A_0 (= 1.14)$; sendo superior à unidade, esta razão situa a amostra no domínio (raro) das rochas *hiperalcalinas* (ou *peralcalinas*). Nestas circunstâncias, a S inicial suporta sucessivamente a formação de *Or'*, *ab'*, *Ac'*, *Ns'*, *Di'* mas a que resta, S_5 , não é suficiente para completar *Hi'*; uma vez que S_5 é inferior a $(Hi'/2)$ toda a *Hi'* será transformada em *Ol'*, isto é, $[Hi' \rightarrow Ol']$. A transformação total de *Hi'* em *Ol'* requer, em seguida, o sacrifício *total* ou *parcial* de *ab'* a favor de *Ne'*, dependendo da sílica disponível. Neste caso, a sílica restante após completar *Or'*, *Ac'*, *Ns'*, *Di'* e *Ol'*, aqui designada por S_{5a} , situa-se no intervalo ($2ab' < S_{5a} < 6ab'$), pelo que a *ab'* será *parcialmente* transformada em *Ne'*, isto é $[ab' \rightarrow (ab'' + Ne')]$, usando o montante de sílica (S_{5a}) disponível para esta transformação (Quadro 6).

Quadro 6

abrev. / óxidos	S	T	A	F ³⁺	F ²⁺	←	M	Ca	N	K	P		
óxidos	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	
% peso	64.27	0.06	16.30	2.81	2.75	0.22	0.04	0.78	8.44	4.29	0.01	99.97	
p.m.	60	80	102	160	72	71	40	56	62	94	142		
prop. m. × 10 ³	1071.2	0.8	159.8	17.6	41.3	←	1.0	13.9	136.1	45.6	0.1	p.m./10 ³	<i>Norma</i> %
<i>Qz</i> (S)												0.060	
<i>Or</i> (KAS ₆)	273.6		45.6							45.6		0.556	25.35
<i>Plg: ab'</i> (NAS ₆)			114.2						114.2			0.524	
<i>Plg: ab</i> (NAS ₆)	679.8		113.3						113.3			0.524	59.37
<i>Plg: an</i> (CaAS ₂)												0.278	
<i>Lc</i> (KAS ₄)												0.436	
<i>Ne</i> (NAS ₂)	1.8		0.9						0.9			0.284	0.26
<i>C</i> (A)												0.102	
<i>Ac</i> (NF ³⁺ S ₄)	70.4			17.6					17.6			0.462	8.13
<i>Ns</i> (NS)	4.3								4.3			0.122	0.52
<i>Di: wo</i> (CaS)	13.6							13.6				0.116	1.58
<i>Di: en</i> (MS)	0.3						0.3					0.100	0.03
<i>Di: fs</i> (F ²⁺ S)	13.3				13.3							0.132	1.76
<i>Wo</i> (CaS)												0.116	
<i>Hi: en'</i> (MS)							0.7					0.100	
<i>Hi: fs'</i> (F ²⁺ S)					27.2							0.132	
<i>Ol: fo</i> (M ₂ S)	0.4						0.7					0.140	0.06
<i>Ol: fa</i> (F ²⁺ +2S)	13.6				27.2							0.204	2.77
<i>Ap</i> (Ca ₃ .33P)								0.3			0.1	0.329	0.03
<i>Ilm</i> (F ²⁺ +T)		0.8			0.8							0.152	0.12
<i>Mt</i> (F ²⁺ +F ³⁺)												0.232	
<i>Hem</i> (F ³⁺)												0.160	
<i>Tn</i> (CaTS)												0.196	
<i>Rt</i> (T)												0.080	
Totais	1071.1	0.8	159.8	17.6	41.3	←	1.0	13.9	136.1	45.6	0.1	Total	99.98

Nota 1: Na coluna S, a quantidade inicial de S (1071.2) difere do valor obtido para gasto total de S nos diferentes componentes normativos (1071.1). Esta diferença (0.1) é devida a arredondamentos numéricos feitos ao longo do exercício; trata-se de uma diferença inferior a 0.01% do valor inicial de S, não devendo, por isso, ser considerada significativa.

Nota 2: No Quadro 4, os resultados finais (última coluna à direita, % componentes normativos) são apresentados com arredondamento à segunda casa decimal devido à existência de valores inferiores a 0.1% para alguns componentes (ex: *Di(en)*).

CLASSIFICAÇÃO:

Trata-se de uma rocha *intermédia* ($52 < \text{SiO}_2 < 66$ % peso), *subsaturada em sílica* (com *Ne*)* e *hiperalcalina* (com *Ac*); devido às percentagens que apresenta em *Or* e *Plg* ($ab > 50$ % ; *an* ausente), admite a classificação de *Sienito / Traquito* (Quadro 6).

*- Em rigor, tendo *Ne*, esta rocha pode ser classificada como *subsaturada em sílica*. No entanto, uma vez que a *Norma* traduz uma composição mineralógica *virtual*, é prudente estabelecer que se $Ne < 1\%$ (ou, no caso de ligeira sobressaturação em sílica, $Qz < 1\%$) a rocha se situa, *próximo da saturação em sílica*.
(ver Quadro 6)

Passo I - Atribuição dos óxidos, excepto S aos componentes normativos

I.1.) *Apatite (Ap)*: $\text{Ca}_{3,33}\text{P}$

$$P_0 < \text{Ca}_0 ; P_0 = 0.1 \Rightarrow \text{Ca} = 3.33 \times 0.1 = 0.3 ; \text{após } Ap, \text{ P esgota } (\downarrow) \text{ e } \text{Ca}_1 = 13.6$$

I.2.) *Ilmenite (Ilm)*: F^{2+}T

$$T_0 < \text{F}^{2+}_0 ; T_0 = 0.8 \Rightarrow \text{F}^{2+} = 0.8 ; \text{após } Ilm, \text{ T } (\downarrow) \text{ e } \text{F}^{2+}_1 = 40.5$$

I.3.) *Ortoclase provisória (Or')*: $\text{KA}...$

$$K_0 < A_0 ; K_0 = 45.6 \Rightarrow A = 45.6 ; \text{após } Or', \text{ K } (\downarrow) \text{ e } A_1 = 114.2$$

I.4.) *Plagioclase - albite prov. (ab')*: $\text{NA}...$

$$A_1 < N_0 ; A_1 = 114.2 \Rightarrow N = 114.2 ; \text{após } ab', \text{ A } (\downarrow) \text{ e } N_1 = 21.9$$

I.5.) *Acmite prov. (Ac')*: $\text{NF}^{3+} ...$

$$\text{F}^{3+} < N_1 ; \text{F}^{3+} = 17.6 \Rightarrow N = 17.6 ; \text{após } Ac', \text{ F}^{3+} (\downarrow) \text{ e } N_2 = 4.3$$

I.6.) *Metassilicato de N prov. (Ns')*; $\text{N}...$

$$N_2 = 4.3 ; \text{após } Ns', \text{ N } (\downarrow)$$

I.7.) *Diópsido prov. (Di')* = [(*volast. prov. (wo')*: $\text{Ca}...$) + ((*enstatite (en')*: $\text{M}...$),(*ferrossilite (fs')*: $\text{F}^{2+}...$))]

$$\text{ou seja, } Di' = \text{Ca} (\text{M}, \text{F}^{2+}) ...$$

$$\text{Ca}_1 < (\text{M}_0 + \text{F}^{2+}_1) ; (\text{M}_0 + \text{F}^{2+}_1) = (1.0 + 40.5) = 41.5 ; \text{Ca}_1 = 13.6 \text{ (a distribuir por } en' \text{ e } fs')$$

assim, de acordo com a fórmula do Di' , resulta:

$$wo' (Ca = 13.6) ; en' (M = 0.3 = (1.0 \times 13.6) / 41.5) ; fs' (F^{2+} = 13.3 = (40.5 \times 13.6) / 41.5)$$

$$\text{após } Di' , Ca (\downarrow) ; M_1 = 0.7 \text{ e } F^{2+}_2 = 27.2$$

I.8.) *Hiperstena* prov. (Hi') = [*enstatite* prov. (en'): M...] + [*ferrossilite* prov (fs'): F^{2+} ...]

$$en' (M = 0.7) ; fs' (F^{2+} = 27.2) ; \text{após } Hi' (en' + fs') , M (\downarrow) \text{ e } F^{2+} (\downarrow)$$

Passo II : Distribuição da S pelos silicatos provisórios (or' , ab' , an' , Di' , Hi')

$$II.1.) Or (KAS₆) ; S(Or) = 6 \times K(Or') = 273.6 ; \text{após } Or , S_1 = S_0 - S(Or) = 797.6$$

$$II.2.) ab (NAS₆) ; S(ab) = 6 \times N(ab') = 685.2 ; \text{após } Ab , S_2 = S_1 - S(Ab) = 112.4$$

$$II.3.) Ac (NF³⁺S₄) ; S(Ac) = 4 \times N(Ac') = 70.4 ; \text{após } Ac , S_3 = S_2 - S(Ac) = 42.0$$

$$II.4.) Ns (NS) ; S(Ns) = 4.3 ; \text{após } Ns , S_4 = S_3 - S(Ns) = 37.7$$

$$II.5.) Di [Ca(M,F²⁺)S₂] ; S(Di) = (13.6 + 0.3 + 13.3) = 27.2 ; \text{após } Di , S_5 = 10.5$$

$$II.6.) Hi [(M,F²⁺)S] ; S(Hi) = (0.7 + 27.2) = 27.9$$

S₅ é insuficiente para formar Hi ;

Como, neste caso, $S_5 < [(M(en') + F^{2+}(fs')) / 2] \Leftrightarrow 10.5 < (27 / 2)$, então,

Hi' será totalmente transformada em Ol' ,

$$Hi' \rightarrow Ol'$$

$$II.6.1.) Ol [(M,F²⁺)₂S] ; S(Ol) = (0.7/2 + 27.2/2) = 14.0$$

Como toda a Hi passou a Ol ,

ab' será parcialmente transformada em Ne'

$$ab' \rightarrow (ab'' + Ne')$$

Neste caso, é necessário calcular o valor de S que sobra após a formação de Or , Ac , Ns , Di e Ol :

$$S_{5a} = S_0 - S(Or) - S(Ac) - S(Ns) - S(Di) - S(Ol) = 681.7$$

S_{5a} (681.75) é usado para determinar ab'' e Ne' , de acordo com as duas equações:

$$ab'' = (S - (2 \times ab')) / 4 = (681.7 - (2 \times 114.2)) / 4 = 113.3$$

$$Ne' = ab' - ab'' = 114.2 - 113.3 = 0.9 \quad ;$$

$$S(ab) = 6 \times 113.3 = 679.8 \quad \text{e} \quad S(Ne) = 2 \times 0.9 = 1.8 \quad ;$$

$$S - S(ab) - S(Ne) = 681.7 - 679.8 - 1.8 = 0.1 \quad (\neq 0.0 \text{ devido a arredondamentos}) \quad ; \quad \text{então, } S \downarrow$$

Passo III : Cálculo das percentagens ponderais (% p.) de cada componente normativo

$$\text{III.1.) } Or = 45.6 \times 0.556 = \mathbf{25.35} \quad \%$$

$$\text{III.2.) } (Plg) ab = 113.3 \times 0.524 = \mathbf{59.37} \quad \%$$

$$\text{III.3.) } Ne = 0.9 \times 0.284 = \mathbf{0.26} \quad \%$$

$$\text{III.4.) } Ac = 17.6 \times 0.462 = \mathbf{8.13} \quad \%$$

$$\text{III.5.) } Ns = 4.3 \times 0.122 = \mathbf{0.52} \quad \%$$

$$\text{III.6.) } (Di) wo = 13.6 \times 0.116 = \mathbf{1.58} \quad \%$$

$$\text{III.7.) } (Di) en = 0.3 \times 0.100 = \mathbf{0.03} \quad \%$$

$$\text{III.8.) } (Di) fs = 13.3 \times 0.132 = \mathbf{1.76} \quad \%$$

$$\text{III.9.) } (Ol) fo = 2.5 \times 0.140 = \mathbf{0.06} \quad \%$$

$$\text{III.10.) } (Ol) fa = 1.6 \times 0.204 = \mathbf{2.77} \quad \%$$

$$\text{III.11.) } Ap = 0.9 \times 0.329 = \mathbf{0.03} \quad \%$$

$$\text{III.12.) } Ilm = 7.5 \times 0.152 = \mathbf{0.12} \quad \%$$

Incompatibilidades entre minerais normativos

Tendo em conta a composição química dos diferentes minerais e a ordem pela qual são constituídos ao longo dos exercícios de cálculo, certos minerais não podem ocorrer na mesma composição normativa dizendo-se, por isso, *incompatíveis*.

Assim, relativamente aos óxidos, excepto sílica, que constituem os minerais normativos:

- a.) Após *Ilm*, sobra T ou F^{2+} ;
se sobrar F^{2+} , é dirigido para *Mt* ; então, ***Mt*** é incompatível com ***Tn*** e ***Rt*** (minerais com T);
se sobrar T, é dirigido para *Tn* (após formação de *an*); então ***Tn*** é incompatível com ***Mt***, ***Di***, ***Hi*** e ***Ol***
(todos com F^{2+})
- b.) Após *Mt*, sobra F^{2+} ou F^{3+} ;
se sobrar F^{2+} , é dirigido para *Di* ; então, ***Di*** é incompatível com ***Hem*** (com F^{3+});
se sobrar F^{3+} , é dirigido para *Hem* ; então ***Hem*** é incompatível com ***Di***, ***Hi*** e ***Ol*** (todos com F^{2+}).
- c.) Após *Or*, sobra A ou K ;
se sobrar A, é dirigido para *ab*, então, ***ab*** é incompatível com ***Lc*** (com K);
- d.) Após *ab*, sobra A ou N ;
se sobrar A, é dirigido para *an* ; então, ***an*** é incompatível com ***Ac*** e ***Ns*** (ambos com N);
se sobrar N, é dirigido para *Ac* ; então, ***Ac*** é incompatível com ***an*** e ***C*** (ambos com A).
- e.) Após *Ac*, sobra N ou F^{3+} ;
se sobrar N, é dirigido para *Ns* ; então, ***Ns*** é incompatível com ***Mt*** e ***Hem*** (ambos com F^{3+});
- f.) Após *an*, sobra Ca ou A ;
se sobrar A, é dirigido para *C* ; então, ***C*** é incompatível com ***Tn***, ***Di*** e ***Wo*** (todos com Ca).
- g.) Após *Mt*, sobra F^{2+} ou F^{3+} ;
se sobrar F^{2+} , é dirigido para *Di* ; então ***Di*** é incompatível com ***Hem*** (com F^{3+});
se sobrar F^{3+} , é dirigido para *Hem* ; então, ***Hem*** é incompatível com ***Di***, ***Hi*** e ***Ol*** (todos com F^{2+}).
- h.) Após *Di*, sobra Ca ou (F^{2+} e M);
se sobrar Ca, é dirigido para *Wo* ; então, ***Wo*** é incompatível com ***Hi*** e ***Ol*** (com F^{2+} e M);

No que diz respeito à sílica (S), tendo em conta a ordem pela qual é atribuída aos silicatos *provisórios* eventualmente constituídos (isto é, $Or \rightarrow ab \rightarrow an \rightarrow Di \rightarrow Hi$) e os montantes relativos de S requeridos por cada um, deduzem-se as seguintes incompatibilidades, abaixo mencionadas por ordem decrescente de abundância relativa em S.

- i.) S insuficiente para completar *Hi'* ; duas hipóteses se colocam:
S após *Di* é superior a ($Hi'/2$), implica [$Hi' \rightarrow Hi'' + Ol'$] ; então, ***Ol*** é incompatível com ***Qz*** ;
S após *Di* é inferior a ($Hi'/2$), implica [$Hi' \rightarrow Ol'$] e [$ab' \rightarrow (ab'' + Ne')$];
então, ***Ne*** é incompatível com ***Hi*** e ***Qz***.

j.) S disponível para completar ab' é inferior a $2ab'$; implica $[ab' \rightarrow Ne']$ e $[Or' \rightarrow (Or'' + Lc')]$; então, **Lc** é incompatível com **ab**, **Hi** e **Qz**.

Para além destes 10 casos, outras incompatibilidades poderiam, ainda, ser referidas. No entanto, por corresponderem a composições normativas manifestamente exóticas na natureza, não são consideradas neste trabalho.

Exemplo de diagrama normativo

A título de exemplo, apresenta-se um diagrama construído com *minerais normativos* (**Figura 1**).

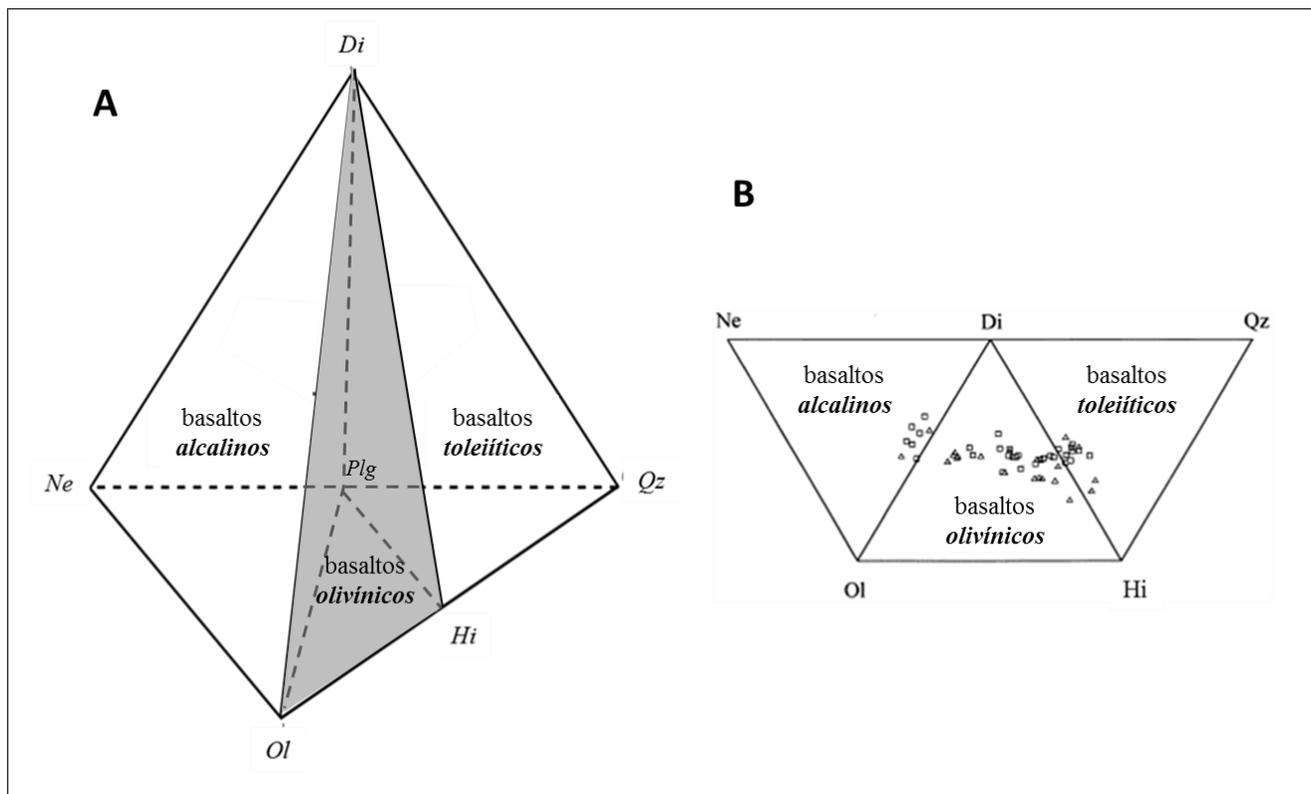


Figura 1- Classificação normativa de basaltos

A - Tetraedro dos basaltos com vértices $Di-Ne-Ol-Qz$; este subdivide-se em três volumes: tetraedro $Di-Ne-Ol-Plg$, volume de projeção dos *basaltos alcalinos*, *subsaturados em sílica*; tetraedro $Di-Ol-Hi-Plg$, onde se projetam os *basaltos olivínicos*, *saturados em sílica*; tetraedro $Di-Hi-Qz-Plg$, volume dos *basaltos toleííticos*, *sobressaturados em sílica*.

B - Representação simplificada do tetraedro $Di-Ne-Ol-Qz$. No trapézio $Ne-Ol-Hi-Qz$ resultante não se projetam os valores de Plg , assumindo-se apenas Di como ponto intermédio do lado $Ne-Qz$. Os símbolos projetados neste trapézio representam *basaltos alcalinos* (com Ne), *basaltos olivínicos* (com Hi e Ol) e *basaltos toleííticos* (com Qz); o grau de saturação em sílica é mínimo no triângulo $Di-Ne-Ol$, intermédio no triângulo $Di-Ol-Hi$ e máximo no triângulo $Di-Hi-Qz$.