

Método de cálculo normativo

1. Generalidade

Existe uma **íntima relação** entre a **composição mineralógica e química** de uma **rocha ígnea**. O conhecimento desta relação facilita a **interpretação genética com base na composição química** de rochas ígneas. O **“cálculo normativo”** é um método mais conhecido e divulgado para caracterização química de rochas ígneas com base nos teores de elementos principais.

Inicialmente, o cálculo normativo foi lançado por Cross, Iddings, Pirsson e Washington (1902), como um método de classificação geoquímica de rochas ígneas, sendo chamado atualmente como a **“Norma CIPW”**. Hoje em dia, este método não está sendo aplicado à classificação geoquímica, mas, para **análises petrogenéticas com base na geoquímica de elementos principais**. **A partir da composição química** em rocha total, este método calcula **34 “minerais normativos”**, fazendo a **simulação matemática de cristalização**.

Os **minerais normativos** são aqueles escolhidos entre os minerais **mais frequentes em rochas ígneas naturais**. Os parâmetros e critérios para a escolha dos minerais normativos podem ser conhecidos através de leitura suplementar. A **composição química e ordem de cristalização destes minerais foram simplificadas** e idealizadas. Portanto, os minerais normativos calculados não são exatamente iguais aos minerais constituintes reais da rocha, denominados minerais modais. Geralmente, rochas plutônicas básicas, como por exemplo piroxênio gabro, possuem minerais normativos relativamente próximos aos reais. Entretanto, a composição mineralógica modal de rochas vulcânicas félsicas é pouco afastada da composição normativa.

O método de cálculo normativo sofreu algumas alterações e atualmente as **versões propostas por Whashington e Johannsen** são as **mais utilizadas**. O método aqui apresentado baseia-se em Johannsen (1931), com a ressalva de que a seqüência dos cálculos usados não é idêntica à da bibliografia original visando com isto facilitar o aprendizado. Entretanto, o resultado final é praticamente igual ao proposto de Johannsen.

2. Esquema geral dos cálculos

A seqüência de cálculo da norma CIPW é composta de quatro processos: 1) **conversão** de composição química analisada **em proporção molecular** de óxidos; 2) **formação provisória** dos minerais normativos; 3) **compensação da deficiência de sílica** resultante do processo anterior por meio da decomposição dos certos minerais provisórios já calculados; 4) **reconversão** dos minerais normativos calculados em proporção molecular para porcentagem de peso.

2.1. Conversão da porcentagem de peso em proporção molecular

Os cálculos de formação e decomposição dos minerais normativos são executados baseando-se na proporção molecular dos óxidos e não em porcentagem de peso. Portanto, dados de análises químicas em porcentagem de peso devem ser convertidos em proporção molecular para cada óxido. O cálculo é executado conforme a seguinte divisão:

Proporção molecular = porcentagem de peso / peso molecular

As Tabelas A1 e A2 apresentam respectivamente pesos moleculares dos óxidos e dos minerais normativos. Dentro dos minerais normativos, existem alguns que raramente são observados nas rochas ígneas reais. Coríndon, carbonato de sódio, metassilicato de sódio, metassilicato de potássio e ortossilicato de cálcio. Estes se correlacionam respectivamente a micas brancas, cancrinita e zeólitas, piroxênios e anfibólios alcalinos, componentes potássicos de anfibólio, wollastonita, sílica, etc. As fórmulas químicas apresentadas na Tabela A2 não estão de maneira convencional, mas sim transformados para facilitar os cálculos.

2.2. Formação provisória dos minerais normativos

O processo de formação provisória dos minerais normativos **inicia-se com a formação dos minerais subordinados**, não silicáticos. **Após esses**, são calculados os **minerais silicatos principais**. Durante o processo de formação provisória, os cálculos devem ser executados **ignorando-se o teor de sílica disponível**, mesmo que este teor atinja valor negativo. Após o término do processo de formação provisória, observa-se o teor de sílica. **Caso o valor de sílica seja negativo, inicia-se o processo de compensação de deficiência de sílica**, ou seja o capítulo 2.3 do presente apêndice. Caso contrário, ou seja, com o **valor de sílica seja positivo, calcula-se o quartzo** de acordo com o teor de sílica disponível e **passa-se o processo de reconversão de proporção molecular de minerais normativos calculados em porcentagem de peso**, ou seja o capítulo 2.4 do presente apêndice.

2.3. Compensação de deficiência de sílica

Neste processo, **certos minerais silicatos provisoriamente calculados são decompostos para formar outros minerais silicatos com menor teor de sílica**. Os minerais principais a serem decompostos são **feldspatos alcalinos** e os formados são **feldspatóides**. A sílica liberada através deste processo é utilizada para compensação da deficiência de sílica. O processo continua até que a deficiência de sílica for completamente compensada.

2.4. Reconversão da proporção molecular em porcentagem de peso

O último processo é a reconversão de teor dos **minerais normativos calculados apresentados em proporção molecular para a expressão de porcentagem em peso**. Caso esteja presente, os grupos de **olivina, ortopiroxênio e clinopiroxênio**, estes serão recalculados em **componentes finais** conforme a proporção de **MgO, FeO e CaO** de cada mineral normativo. A reconversão é feita através da multiplicação do teor de cada mineral normativo calculado em proporção molecular por seu peso molecular:

$$\text{Porcentagem de peso} = \text{proporção molecular} \times \text{peso molecular}$$

3. Cálculos em cada estágio

No presente capítulo, a seqüência dos cálculos é apresentada junto à seis exemplos, para melhor entendimento dos leitores: A) granito; B) basalto toleítico; C) basalto Ca-alcalino; D) álcali olivina basalto; E) nefelina sienito; F) olivina nefelinito (Tabela A3).

3.1. Conversão em proporção molecular

Conforme a descrição presente no capítulo 2.1, a composição química da rocha expressa em porcentagem de peso é convertida em proporção molecular, com seguintes observações: 1) os teores de **MnO, NiO e FeO são somados e tratados como FeO**; 2) os teores de **BaO, SrO e CaO são somados e tratados como CaO**; 3) os componentes com teor em proporção molecular muito baixo, sendo **inferior a 0.002, são considerados como nulo**; 4) os cálculos são executados na unidade de **proporção molecular multiplicada por 1000**.

3.2. Formação dos minerais de teor secundário

Inicialmente, são formados 10 minerais subordinados em 9 estágios: ilmenita, apatita, halita, tenardita, pirita, crimita, fluorita, zircão, calcita e carbonato de cálcio.

1) Ilmenita (il), $\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}$

Este mineral é constituído por dois componentes, TiO_2 e FeO . Na maioria dos casos, o teor de FeO é superior ao de TiO_2 , desta forma, a ilmenita, $\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}$, terá o mesmo valor TiO_2 disponível.

Rocha	TiO_2		FeO		ilmenita
	antes	depois	antes	depois	
Granito	0	0	22	22	0
Basalto toleítico	25	0	128	103	25
Basalto Ca-alcálico	17	0	93	76	17
álcali olivina basalto	38	0	131	93	38
nefelina sienito	6	0	31	23	6
olivina nefelinito	75	0	129	54	75

2) Apatita (ap), $3(3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5) \cdot \text{CaF}_2$

A apatita é calculada somente de acordo com os teores de CaO e P_2O_5 . Durante o cálculo, os teores de Ca e F são desconsiderados.

Rocha	CaO		P_2O_5		apatita
	antes	depois	antes	depois	
Granito	21	0	1	1	0
Basalto toleítico	186	180	2	0	31
Basalto Ca-alcálico	160	150	3	0	1
álcali olivina basalto	187	177	3	0	1
nefelina sienito	35	35	1	1	0
olivina nefelinito	151	101	15	0	5

3) Halita (hl), Na_2Cl_2

Este mineral é constituído por Na_2O e Cl e calculado somente quando houver dados analíticos de Cl. Durante o cálculo, o teor de oxigênio do Na_2O é desconsiderado. Muitas análises químicas de rocha total não possuem dados de Cl, SO_3 , Cr_2O_3 , F, ZrO_2 e CO_2 . Nesses casos, halita, tenardita, pirita, cromita, fluorita, zircão, calcita e carbonato de sódio são calculados como zero. e passa-se para o estágio de cálculo dos minerais principais, capítulo 3.3.

Rocha	Na ₂ O		Cl		Halita
	antes	depois	antes	depois	
Granito	0	0	22	22	0
Basalto toleítico	25	0	128	103	25
Basalto Ca-alcálico	17	0	93	76	17
álcali olivina basalto	38	0	131	93	38
nefelina sienito	6	0	31	23	6
olivina nefelinito	75	0	129	54	75

4) Tenardita (th), Na₂O · SO₃

Este mineral é constituído por dois componentes, Na₂O e SO₃ e, calculado somente quando houver dados analíticos de SO₃. Não se aplica neste cálculo às seis rochas exemplares devido à ausência de dados de SO₃.

5) Pirita (pr), FeS₂

Este mineral é constituído por dois componentes, FeO e S e, calculado somente quando houver dados analíticos de S (não SO₃). Durante o cálculo, o teor de oxigênio do FeO é desconsiderado. Não se aplica neste cálculo às seis rochas exemplares devido à ausência de dados de S.

6) Cromita (cm), Cr₂O₃ · FeO

Este mineral é constituído por dois componentes, Cr₂O₃ e FeO e, calculado somente quando houver dados analíticos de Cr₂O₃. Não se aplica neste cálculo às seis rochas exemplares devido à ausência de dados de Cr₂O₃.

7) Fluorita (fr), CaF₂

Este mineral é constituído por dois componentes, CaO e F e, calculado somente quando houver dados analíticos de F. Durante o cálculo, o teor de oxigênio do CaO é desconsiderado. Não se aplica neste cálculo às seis rochas exemplares devido à ausência de dados de F.

8) Zircão (Z), ZrO₂ · SiO₂

Este mineral é constituído por dois componentes, ZrO₂ e SiO₂ e, calculado somente quando houver dados analíticos de ZrO₂. Não se aplica neste cálculo às seis rochas exemplares devido à ausência de dados de ZrO₂.

9) Calcita (cc), CaO · CO₂ e carbonato de sódio (nc), Na₂O · CO₃

Estes minerais são calculados somente quando houver dados analíticos de CO₂. Não se aplica neste cálculo às seis rochas exemplares devido à ausência de dados de CO₂.

3.3. Formação provisória dos minerais principais

Após a formação dos minerais de teor secundário, são formados minerais silicatos principais a partir de feldspato. Os cálculos deste estágio são executados em 15 estágios, mesmo que o teor de SiO₂ disponível seja de valor negativo. Entretanto, outros componentes devem ser de valor positivo. Portanto, a formação dos minerais normativos é provisória.

1) Ortoclásio (or), K₂O · Al₂O₃ · 6SiO₂

Este mineral é constituído por três componentes, K_2O , Al_2O_3 e SiO_2 . Na maioria dos casos, após o cálculo sobra Al_2O_3 . Neste caso, passa-se para o cálculo de albita, estágio 3, pulando o cálculo de metassilicato de potássio.

Rocha	K_2O		Al_2O_3		SiO_2		anortita
	antes	depois	antes	depois	antes	Depois	
Granito	61	0	132	71	1209	843	61
Basalto toleítico	9	0	136	129	846	792	09
Basalto Ca-alcálico	16	0	154	136	817	721	16
álcali olivina basalto	11	0	144	133	756	690	11
nefelina sienito	57	0	206	144	922	580	57
olivina nefelinito	30	0	127	97	592	412	30

2) Metassilicato de potássio (ks), $K_2O \cdot SiO_2$

Em poucos casos, sobra K_2O após o cálculo de ortoclásio. Estas rochas são altamente alcalinas e possuem leucita e nefelina, que se encontram na Itália. Após o cálculo de metassilicato de potássio, passa-se para o cálculo de titanita, estágio 6. Não se aplica neste cálculo às seis rochas exemplares.

3) Albita (ab), $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$

Este mineral é constituído por três componentes, Na_2O , Al_2O_3 e SiO_2 . Em poucos casos, sobra Na_2O após o cálculo. Neste caso, passa-se para o cálculo titanita, estágio 6. Nota-se o valor negativo de SiO_2 do nefelina sienito do olivina nefelinito, obtido após o cálculo de albita. Tais rochas geralmente possuem nefelina.

Rocha	Na_2O		Al_2O_3		SiO_2		Anortita
	antes	depois	antes	depois	antes	depois	
Granito	46	0	72	25	843	567	46
Basalto toleítico	36	0	129	93	792	576	36
Basalto Ca-alcálico	50	0	136	86	721	421	50
álcali olivina basalto	46	0	135	85	690	402	48
nefelina sienito	139	0	149	10	580	-254	139
olivina nefelinito	135	38	57	0	412	-170	97

4) Anortita (an), $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$

Este mineral é constituído por três componentes, CaO , Al_2O_3 e SiO_2 . Na maioria dos casos, sobra CaO após o cálculo. Neste caso, passa-se para o cálculo titanita, estágio 6.

Rocha	CaO		Al ₂ O ₃		SiO ₂		Anortita
	antes	depois	antes	depois	antes	depois	
Granito	21	0	25	4	567	525	21
Basalto toleítico	180	87	93	0	576	390	93
Basalto Ca-alcálico	150	62	88	0	421	245	88
álcali olivina basalto	177	92	85	0	402	232	85
nefelina sienito	35	25	10	0	-254	-247	10
olivina nefelinito	101	101	0	0	-170	-170	0

5) Coríndon (C), Al₂O₃

Existem algumas rochas ígneas, como o granito do exemplo, em que o teor de Al₂O₃ é muito alto para se alcançar esta estágio. Tais rochas são chamadas geoquimicamente de “rochas peraluminosas”. A peraluminosidade geoquímica é fenômeno característica de argilo-minerais. As rochas ígneas peraluminosas são raras e encontrados em certo tipo de granito. A origem do magma deste granito, denominado tipo S, é interpretada como a refusão da crosta continental sedimentar.

Rocha	Al ₂ O ₃		coríndon
	antes	depois	
Granito	4	4	4
Basalto toleítico	-	-	0
Basalto Ca-alcálico	-	-	0
álcali olivina basalto	-	-	0
nefelina sienito	-	-	0
olivina nefelinito	-	-	0

6) Titanita (tn), CaO · TiO₂ · SiO₂

Este mineral é constituído por três componentes, CaO, TiO₂ e SiO₂. O cálculo é efetuado somente com presença de TiO₂ e CaO disponíveis neste estágio. Dentro dos seis exemplos, não há rocha desta condição.

7) Rutilo (ru), TiO₂

Quando sobra TiO₂ após o cálculo de titanita, forma-se rutilo. A rocha ígnea com teor de TiO₂ tão alta é extremamente rara.

8) Acmita (ac), Na₂O · Fe₂O₃ · 4SiO₂

Encontram-se certas rochas alcalinas félsicas, como o nefelina sienito do exemplo, em que se esgota o Al₂O₃ e sobra Na₂O após o cálculo de albíta. Neste caso, calcula-se acmita. Acmita é componente final de piroxênio sódico, chamado popularmente de egrina. As rochas com acmita normativa, denominadas geoquimicamente peralcalinas, não possuem anortita e coríndon normativos.

Rocha	Na ₂ O		Fe ₂ O ₃		SiO ₂		Acmita
	antes	depois	antes	depois	antes	depois	
Granito	-	-	-	-	-	-	0
Basalto toleítico	-	-	-	-	-	-	0
Basalto Ca-alcálico	-	-	-	-	-	-	0
álcali olivina basalto	-	-	-	-	-	-	0
nefelina sienito	-	-	-	-	-	-	0
olivina nefelinito	38	0	48	10	-170	-322	38

9) Metassilicato de sódio (ns), Na₂O· SiO₂

Em raríssimos casos, sobra Na₂O após o cálculo de acmita. Não se aplica neste cálculo às seis rochas exemplares.

10) Magnetita (mt), Fe₂O₃· FeO

A maioria das rochas ígneas tem Fe₂O₃ disponível após o cálculo de acmita. Este Fe₂O₃ é juntado com FeO para formar magnetita.

Rocha	Fe ₂ O ₃		FeO		magnetita
	antes	depois	antes	depois	
Granito	7	0	22	15	7
Basalto toleítico	18	0	103	85	18
Basalto Ca-alcálico	34	0	76	42	34
álcali olivina basalto	26	0	93	93	26
nefelina sienito	15	0	23	23	15
olivina nefelinito	10	0	54	44	10

11) Hematita (ht), Fe₂O₃

Caso esteja ainda Fe₂O₃ após o cálculo de magnetita, o Fe₂O₃ é atribuído para formar hematita. Não há tal rocha dentro dos seis exemplos. Certas rochas basálticas apresentam alto teor de hematita normativa devido ao intemperismo.

12) Clinopiroxênio (cpx), CaO(MgO, FeO)· 2SiO₂

As quantidades disponíveis de MgO e FeO são somadas e consideradas como um tipo de óxido destinado a formar silicatos máficos. O primeiro mineral máfico calculado é clinopiroxênio. Na bibliografia original de Johannsen, este componente é expresso como diopsídio (di). Entretanto, o mesmo termo é utilizado para expressar o componente final de clinopiroxênio magnésiano, CaO· MgO· 2SiO₂. Para evitar confusão, recomenda-se o termo clinopiroxênio. Rochas com coríndon normativo não possuem CaO disponível para formação do clinopiroxênio. Geralmente, o CaO disponível é consumido inteiramente neste estágio.

Rocha	CaO		FeO+MgO		SiO ₂		clinopiroxênio
	antes	depois	antes	depois	antes	depois	
Granito	0	0	21	21	525	525	0
Basalto toleítico	87	0	248	161	390	216	87
Basalto Ca-alcálico	62	0	195	135	245	121	62
álcali olivina basalto	92	0	260	160	232	40	92
nefelina sienito	22	3	22	0	-274	-318	22
olivina nefelinito	101	0	178	77	-322	-524	101

13) Wollastonita (wo), $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$

Em raros casos, existem rochas altamente cálcicas que ainda possuem CaO disponível após o cálculo de clinopiroxênio. O CaO disponível é utilizado para formar wollastonita.

Rocha	CaO		SiO ₂		wollastonita
	antes	depois	antes	depois	
Granito	-	-	-	-	0
Basalto toleítico	-	-	-	-	0
Basalto Ca-alcálico	-	-	-	-	0
álcali olivina basalto	-	-	-	-	0
nefelina sienito	3	0	-318	-321	3
olivina nefelinito	-	-	-	-	0

14) Ortopiroxênio (opx), $(\text{MgO}, \text{FeO}) \cdot \text{SiO}_2$

Neste estágio, não há mais CaO disponível, havendo somente MgO e FeO. Estes são utilizados para formar ortopiroxênio. Na bibliografia original de Johannsen, este componente é expresso como hiperstênio (hy). Porém, para evitar confusão, recomenda-se o termo ortopiroxênio. Obviamente, as rochas com wollastonita normativa não possuem ortopiroxênio normativo.

Rocha	FeO+MgO		SiO ₂		ortopiroxênio
	antes	depois	antes	depois	
Granito	21	0	525	504	21
Basalto toleítico	161	0	216	55	161
Basalto Ca-alcálico	133	0	121	-12	133
álcali olivina basalto	168	0	48	-120	168
nefelina sienito	-	-	-	-	0
olivina nefelinito	77	0	-524	-601	77

15) Quartzo - SiO₂

Após os estágios acima citados, as rochas se dividem em duas categorias: 1) com SiO₂ disponível positivo; 2) com SiO₂ disponível negativo. Dentro dos seis rochas exemplares, o granito e o basalto toleítico têm SiO₂ disponível positivo e o restante, negativo. Caso com SiO₂ disponível positivo, calcula-se quartzo e passa-se à reconversão da proporção molecular em porcentagem de peso, capítulo 4. Caso com SiO₂ disponível negativo, passa-se para compensação de deficiência de sílica, capítulo 3.4.

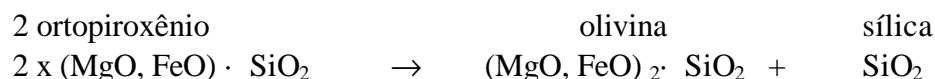
Rocha	SiO ₂		quartzo
	antes	depois	
Granito	504	0	504
Basalto toleítico	55	0	55
Basalto Ca-alcálico	-	-	0
álcali olivina basalto	-	-	0
nefelina sienito	-	-	0
olivina nefelinito	-	-	0

3.4. Compensação de deficiência de sílica

A compensação do teor negativo de sílica é realizada através da decomposição dos minerais já calculados em 7 estágios. Quando a deficiência de sílica é compensada, o processo é interrompido, passando-se para a reconversão da proporção molecular em porcentagem de peso, capítulo 4.

1) Decomposição de ortopiroxênio em olivina (ol), $(\text{MgO}, \text{FeO})_2\text{SiO}_2$

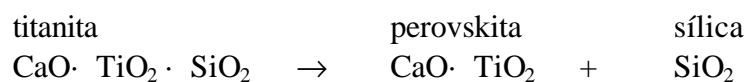
O primeiro mineral a ser decomposto é ortopiroxênio em olivina e sílica, conforme a reação abaixo:



Rocha	ortopiroxênio		SiO ₂ disponível		olivina
	antes	depois	antes	depois	
Granito	-	-	-	-	-
Basalto toleítico	-	-	-	-	-
Basalto Ca-alcálico	133	109	-12	0	12
álcali olivina basalto	168	0	-120	-36	86
nefelina sienito	0	0	-318	-318	0
olivina nefelinito	77	0	-601	-563	38

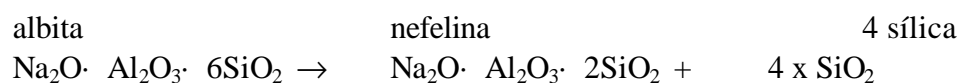
2) Decomposição de titanita em perovskita (pf), $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$

Havendo ainda a deficiência de sílica, a titanita é decomposta em perovskita e sílica. Entretanto, este processo libera apenas pequena quantidade de sílica.



3) Decomposição de albita em nefelina (ne), $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$

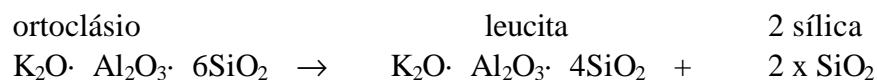
Quando existe ainda a deficiência de sílica, a albita é decomposta em nefelina e sílica. Para a maioria das rochas, a compensação de deficiência da sílica termina neste estágio ou anterior. O cálculo deste estágio é necessário para rochas alcalinas típicas.



Rocha	albita		SiO ₂ disponível		nefelina
	antes	depois	antes	depois	
Granito	-	-	-	-	-
Basalto toleítico	-	-	-	-	-
Basalto Ca-alcálico	-	-	-	-	-
álcali olivina basalto	48	39	-36	0	9
nefelina sienito	139	59	-318	0	80
olivina nefelinito	97	0	-563	-175	97

4) Decomposição de ortoclásio em leucita (lc), $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$

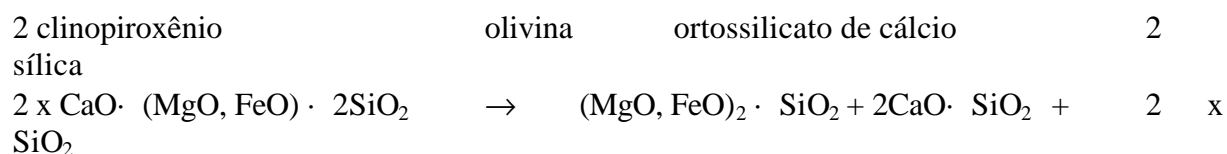
Mesmo assim, existindo a deficiência de sílica, o ortoclásio é decomposto em leucita e sílica. O cálculo deste estágio é necessário para rochas fortemente alcalinas, que são raras.



Rocha	ortoclásio		SiO ₂ disponível		leucita
	antes	depois	antes	depois	
Granito	-	-	-	-	-
Basalto toleítico	-	-	-	-	-
Basalto Ca-alcálico	-	-	-	-	-
álcali olivina basalto	-	-	-	-	-
nefelina sienito	-	-	-	-	-
olivina nefelinito	30	0	-175	-115	30

5) Decomposição de clinopiroxênio em olivina e ortossilicato de cálcio (cs), 2CaO · SiO₂

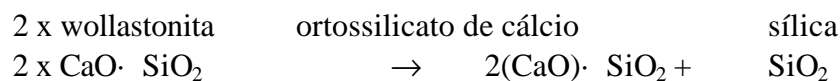
Nas rochas muito subsaturadas em sílica, o clinopiroxênio é decomposto em olivina, ortossilicato de cálcio e sílica. O cálculo deste estágio é necessário para rochas muito fortemente alcalinas, que são muito raras.



Rocha	clinopiroxênio		SiO ₂ disponível		olivina		ortossilicato de Ca	
	antes	depois	antes	depois	antes	depois		
Granito	-	-	-	-	-	-	-	
Basalto toleítico	-	-	-	-	-	-	-	
Basalto Ca-alcálico	-	-	-	-	-	-	-	
álcali olivina basalto	-	-	-	-	-	-	-	
nefelina sienito	-	-	-	-	-	-	-	
olivina nefelinito	101	0	-115	-14	50	88	50	

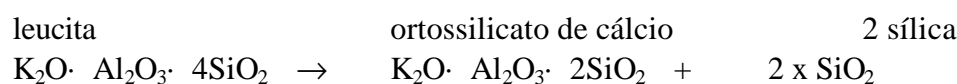
6) Decomposição de wollastonita em ortossilicato de cálcio (cs), 2CaO · SiO₂

Nas rochas extremamente subsaturadas em sílica, a wollastonita é decomposta em ortossilicato de cálcio e sílica. O cálculo deste estágio é necessário para rochas extremamente alcalinas, que são extremamente raras. Entretanto, as rochas ígneas com wollastonita normativa são muito raras.



7) Decomposição de leucita em kaliofilita (kp), K₂O · Al₂O₃ · 2SiO₂

Nas rochas muito extremamente subsaturadas em sílica, a leucita é decomposta em kaliofilita e sílica. O cálculo deste estágio é necessário para rochas muito extremamente alcalinas, que são muito extremamente raras. Na prática, não há rochas ígneas que tem deficiência de sílica mesmo executando processo de decomposição para liberação de sílica até este estágio.



Rocha	leucita		SiO ₂ disponível		Kaliofilita
	antes	depois	antes	Depois	
Granito	-	-	-	-	-
Basalto toleítico	-	-	-	-	-
Basalto Ca-alcálico	-	-	-	-	-
álcali olivina basalto					
nefelina sienito					
olivina nefelinito	30	23	-14	0	7

4. Reconversão da proporção molecular em porcentagem de peso

Os teores dos componentes magnesianos e ferrosos de olivina, ortopiroxênio e clinopiroxênio devem ser definidos. Este cálculo baseia-se na proporção entre MgO e FeO de cada mineral. O resultado dos cálculos normativos é apresentado convencionalmente não com nome desses minerais, mas, com seus componentes. A proporção de MgO e FeO a ser utilizada não é a do estágio inicial, mas do estágio de formação do clinopiroxênio, capítulo 3.3, estágio 12.

$$\text{forsterita (fo)} = \text{olivina} \times \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$$

$$\text{fayalita (fa)} = \text{olivina} \times \text{FeO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$$

Rochas	olivina	MgO	FeO	forsterit a	fayalite
Granito	0	-	-	0	0
Basalto toleítico	0	-	-	0	0
Basalto Ca-alcálico	12	153	42	9	3
álcali olivina basalto	84	193	67	62	22
nefelina sienito	0	-	-	0	0
olivina nefelinito	88	134	44	66	22

$$\text{enstatita (en)} = \text{ortopiroxênio} \times \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$$

$$\text{ferrossilita (fs)} = \text{ortopiroxênio} \times \text{FeO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$$

Rochas	Cpx	MgO	FeO	enstatita	ferrossilita
Granito	21	6	15	6	15
Basalto toleítico	161	163	85	106	55
Basalto Ca-alcálico	109	153	42	86	23
álcali olivina basalto	0	-	-	-	0
nefelina sienito	0	-	-	-	0
olivina nefelinito	0	-	-	-	0

$$\text{diopsírido (di)} = \text{clinopiroxênio} \times \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$$

$$\text{hedenbergita (hd)} = \text{clinopiroxênio} \times \text{FeO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$$

Rochas	Opx	MgO	FeO	diopsídi o	hedenbergita
Granito	0	-	-	-	0
Basalto toleítico	87	163	85	57	30
Basalto Ca-alcálico	62	153	42	49	13
álcali olivina basalto	92	193	67	68	24
nefelina sienito	22	14	8	14	8
olivina nefelinito	0	-	-	-	0

A conversão em porcentagem de peso de cada mineral normativo é executada por meio da multiplicação da proporção molecular por peso molecular. As seis rochas exemplares apresentam as somas dos minerais normativos em porcentagem de peso tornam-se aproximadamente 100.

Tabela A1. Peso molecular dos óxidos

SiO ₂	60.085	Na ₂ O	61.979	F	18.998
TiO ₂	79.899	K ₂ O	94.203	ZrO ₂	123.219
Al ₂ O ₃	101.961	H ₂ O	18.015	CO ₂	44.010
Fe ₂ O ₃	159.692	P ₂ O ₅	141.950	NiO	74.909
FeO	71.846	Cl	35.453	BaO	153.339
MnO	70.937	SO ₃	80.064	SrO	103.619
MgO	40.311	S	32.064		
CaO	56.079	Cr ₂ O ₃	151.990		

Tabela A2. Peso molecular e fórmula química de minerais normativos

Mineral normativo	grupo	fórmula química	peso molecular
Quartzo (Q)		SiO ₂	60.085
Coríndon (C)		Al ₂ O ₃	101.961
Zircão (Z)		ZrO ₂ · SiO ₂	183.304
Ortoclásio (or)	F	K ₂ O· Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂	556.674
Albita (ab)	F	Na ₂ O· Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂	524.450
Anortita (an)	F	CaO· Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	278.210
Leucita (lc)	L	K ₂ O· Al ₂ O ₃ · 4SiO ₂	436.504
Nefelina (ne)	L	Na ₂ O· Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	284.110
Kaliófilita (kp)	L	K ₂ O· Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	316.334
Halita (hl)		Na ₂ · Cl ₂	116.886
Tenardita (th)		Na ₂ O· SO ₃	142.043
Carbonato de sódio (nc)	P	Na ₂ O· CO ₃	159.899
Acmita (ac)	P	Na ₂ O· Fe ₂ O ₃ · 4SiO ₂	462.011
Metassilicato de sódio (ns)	P	Na ₂ O· SiO ₂	122.064
Metassilicato de potássio (ks)	P	K ₂ O· SiO ₂	154.228
Diopsídio (di)	P	CaO· MgO· 2SiO ₂	216.560
Hedenbergita (he)	P	CaO· FeO· 2SiO ₂	248.095
Wollastonita (wo)	P	CaO· SiO ₂	116.164
Enstatita (en)	P	MgO· SiO ₂	100.396
Ferrossilita (fs)	P	FeO· SiO ₂	131.931
Forsterita (fo)	O	2MgO· SiO ₂	140.707
Fayalita (fa)	O	2FeO· SiO ₂	203.777
Ortossilicato de cálcio (cs)		2CaO· SiO ₂	172.734
Magnetita (mt)	H	Fe ₂ O ₃ · FeO	231.538
Cromita (cm)	H	Cr ₂ O ₃ · FeO	223.836
Hematita (ht)	H	Fe ₂ O ₃	159.692
Ilmenita (il)	T	TiO ₂ · Cr ₂ O ₃	151.745
Titanita (tn)	T	CaO· TiO ₂ · SiO ₂	156.063
Perovskita (pf)	T	CaO· TiO ₂	135.978
Rutilo (ru)	T	TiO ₂	79.899
Apatita (ap)	A	3(3CaO· P ₂ O ₅)CaF ₂	1008.648
Fluorita (fr)	A	CaF ₂	78.076
Calcita (cc)	A	CaCO ₃	100.089
Pirita (pr)	A	FeS ₂	119.975

Tabela A3. Exemplos de cálculo normativo

1. Granito

Elemento	w%	mol	il	ap	hl	or	ab	an	C	ac	mt	cpx	opx	Q
					4	61	46	18	7		7		21	510
SiO ₂	72.67	1209				843	567	531					510	0
TiO ₂	0	0												
Al ₂ O ₃	13.44	132				71	25	7	0					
Fe ₂ O ₃	1.06	7									0			
FeO	1.56	22									15		0	
MnO	0	0												
MgO	0.23	6												0
CaO	1.15	21		18				0						
Na ₂ O	3.08	50			46		0							
K ₂ O	5.75	61				0								
H ₂ O	0.88	47												
P ₂ O ₅	0.12	1		0										
Cl	0.26	7			0									
Total	100.2													
	0													

Opx: en=6, fs=15

Mineral normativo	mol.	w%
Quartzo (Q)	510	30.64
Coríndon (C)	7	0.71
Ortoclásio (or)	61	33.96
Albita (ab)	46	24.12
Anortita (an)	18	5.01
Halita (hl)	4	0.47
Enstatita (en)	6	0.60
Ferrossilita (fs)	15	1.98
Magnetita (mt)	7	1.62
Total		99.12

2. Basato toleítico

Elemento	w%	mol	il	ap	hl	or	ab	an	C	ac	mt	cpx	opx	Q
			25	1		9	36	93			18	87	157	60
SiO ₂	50.83	846	0			798	578	391				217	65	0
TiO ₂	2.03	25												
Al ₂ O ₃	14.07	138				129	93	0						
Fe ₂ O ₃	2.88	18									0			
FeO	9.00	125	100								82	40	0	
MnO	0.18	3												
MgO	6.43	160										155	0	
CaO	10.42	186		180				87				0		
Na ₂ O	2.23	36					0							
K ₂ O	0.82	9				0								
H ₂ O	0.91	51												
P ₂ O ₅	0.23	2		0										
Cl	-	-												
Total	100.0	1599												
		3												

Cpx: di=57, he =30 Opx: en=103, fs=53

Mineral noramativo	mol.	w%
Quartzo (Q)	60	3.61
Ortoclásio (or)	9	5.01
Albita (ab)	36	18.88
Anortita (an)	93	25.87
Diopsídio (di)	57	12.34
Hedenbergita (he)	30	7.44
Enstatita (en)	103	10.34
Ferrossilita (fs)	53	6.99
Magnetita (mt)	18	4.17
Ilmenita (il)	25	3.79
Apatita (ap)	1	1.01
Total		99.46

3. Basalto Ca-alcálico

Elemento	w%	mol	il	ap	hl	or	ab	an	C	ac	mt	cpx	opx	Q
			17	1		16	50	88			34	61	134	
SiO ₂	49.06	817				720	419	243				121	-13	
TiO ₂	1.36	17	0											
Al ₂ O ₃	15.7	154				138	88	0						
Fe ₂ O ₃	5.38	34									0			
FeO	6.37	93	76								42	19	0	
MnO	0.31	0												
MgO	6.1	153										134	0	
CaO	8.95	160		149				61				0		
Na ₂ O	3.11	50					0							
K ₂ O	1.52	16				0								
H ₂ O	1.62	90												
P ₂ O ₅	0.45	3		0										
Cl	-													
Total	100.0													
	0													

Elemento	opx	ol
	109	12
SiO ₂		0

Cpx: di=48, he =13 Opx: en=84, fs=23 Ol: fo=11, fa=3

Mineral noramativo	mol.	w%
Ortoclásio (or)	16	8.91
Albita (ab)	50	26.22
Anortita (an)	88	24.80
Diopsídio (di)	48	10.39
Hedenbergita (he)	13	3.23
Enstatita (en)	84	8.43
Ferrossilita (fs)	23	3.03
Forsterita (fo)	11	1.55
Fayalita (fa)	3	0.61
Magnetita (mt)	34	7.87
Ilmenita (il)	17	2.58
Apatita (ap)	1	1.01
		98.32

4. Álcali olivina basalto

Elemento	w%	mol	il	ap	hl	or	ab	an	C	ac	mt	cpx	opx	Q
			38	1		11	48	85			26	93	168	
SiO ₂	45.40	765				692	401	231				46	-123	
TiO ₂	3	38	0											
Al ₂ O ₃	14.7	144				134	85	0						
Fe ₂ O ₃	4.1	26									0			
FeO	9.2	131	93								68	32	0	
MnO	0.2	0												
MgO	7.8	193										168	0	
CaO	10.5	187		178				93				0		
Na ₂ O	3	48					0							
K ₂ O	1	11				0								
H ₂ O	-													
P ₂ O ₅	0.4	3		0										
Cl	-													
Total	99.3													

Elemento	opx	ol	ab	ne
	0	86	39	9
SiO ₂		-36		0

Cpx: di=69, he =24 Ol: fo=63 fa=23

Mineral noramativo	mol.	w%
Ortoclásio (or)	11	6.12
Albita (ab)	39	20.45
Anortita (an)	85	23.65
Nefelina (ne)	9	2.56
Diopsídio (di)	69	14.94
Hedenbergita (he)	24	5.95
Enstatita (en)	63	6.32
Ferrossilita (fs)	23	3.03
Forsterita (fo)	63	8.86
Fayalita (fa)	23	4.69
Magnetita (mt)	26	6.02
Ilmenita (il)	38	5.77
Apatita (ap)	1	1.01
		100.0
		3

Exemplo 5 - nefelina sienito

Elemento	w%	mol	il	ap	hl	or	ab	an	C	ac	mt	cpx	opx	Q
			8		4	57	139	11			15	20	2	
SiO ₂	55.38	922	0			580	-252	-273				-314	-316	
TiO ₂	0.66	8												
Al ₂ O ₃	21.03	206				149	11	0						
Fe ₂ O ₃	2.42	15									0			
FeO	2.00	31	23								8	1	0	
MnO	0.19	0												
MgO	0.57	14										2	0	
CaO	1.98	35		31				26				0		
Na ₂ O	8.84	143			139		0							
K ₂ O	5.36	57				0								
H ₂ O	0.96	53												
P ₂ O ₅	0.19	1		0										
Cl	0.17	4			0									
Total	99.75													

Elemento	opx	ol	ab	ne
	0	0	59	80
SiO ₂		-316		0

Cpx: di=13, he =7

Mineral noramativo	mol.	w%
Ortoclásio (or)	57	31.73
Albita (ab)	59	30.94
Anortita (an)	11	3.06
Nefelina (ne)	80	22.73
Diopsídio (di)	13	2.82
Hedenbergita (he)	7	1.74
Magnetita (mt)	26	6.02
Ilmenita (il)	8	1.21
		98.17

6. Olivina nefelinito

Elemento	w%	mol	il	ap	hl	or	ab	an	C	ac	mt	cpx	opx	Q
			75	5		30	97			38	10	101	77	
SiO ₂	35.59	592	0			415	-167			-318		-519	-596	
TiO ₂	5.98	75												
Al ₂ O ₃	12.90	127				97	0							
Fe ₂ O ₃	7.68	48								10	0			
FeO	9.28	129	54								44	16	0	
MnO	0.00	0												
MgO	5.40	134										77	0	
CaO	8.46	151		101								0		
Na ₂ O	8.35	135					38							
K ₂ O	2.78	30				0								
H ₂ O	1.63	90												
P ₂ O ₅	2.13	15		0										
Cl	-													
Total	100.1													
	8													

Elemento	opx	ol	ab	ne	or	lc	cpx	ol	cs	lc	kp
	0	38	0	97	0	30	0	88	50	23	7
SiO ₂		-563		-175		-115			-14		0

Ol: fo=66, fa =22

Mineral noramativo	mol.	w%
Leucita (lc)	23	10.04
Nefelina (ne)	97	27.56
Kaliofilita (Kp)	7	2.21
Acmita (ac)	38	17.56
Forsterita (fo)	66	9.29
Fayalita (fa)	22	4.48
Ortossilicato de cálcio (cs)	50	8.64
Magnetita (mt)	10	2.32
Ilmenita (il)	75	11.38
Apatita (ap)	5	5.04
		98.51