

DIAGRAMA QUINÁRIO PARA A DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE GRANADAS GEMOLÓGICAS

J. B. de Madureira Filho
Darcy P. Svisero
Instituto de Geociências da USP

ABSTRACT

Natural garnets are usually composed by almandine, pyrope, andradite, grossularite, spessartite and uvarovite molecules. Some rare end members such as knorringite and schorlomite, for instance, may be present in specific and less abundant mineral assemblages as in kimberlites, diamond inclusions, etc.

The determination of garnet composition, on the other hand, can be accomplished either by direct prededures (wet chemical analyses, micro probe), as well as by indirect methods through the use of several diagrams available in the mineralogical literature.

This paper presents a new diagram specially designed for the determination of the composition of gemological garnets. This diagram is a pentagon in whose vertices are located the five most common molecules found in natural garnets. In this case the garnet end-members are obtained just plotting the values which can be easily determined in rough as well as in polished samples. Six distinctive garnets displaying each one particular physical characteristics were used for testing the new diagram. The values obtained indirectly showed good agreement with those calculated from the chemical analyses obtained in the electron micro probe.

INTRODUÇÃO

A determinação química da composição de minerais, através de diagramas de variações de suas propriedades físicas, é uma técnica indireta de análise química frequente em mineralogia. Centenas de exemplos encontrados em livros como os de Winchell & Winchell (1959), Tröger (1959), bem como em revista especializadas, comprovam esta afirmação. Os diagramas, normalmente, são construídos a partir de propriedades físicas, tais como, índice de refração, densidade, parâmetros da cela unitária, ângulos 2V, etc.

A literatura mineralógica registra, no caso específico das granadas, uma série de diagramas, entre os quais destacam-se os de Ford (1915), Fleischer (1937), Sriramadas (1957) e Winchell (1958). A partir de 1969 Camargo & Madureira (1976) introduziram diversas modificações nos diagramas acima referidos, buscando a simplificação na obtenção dos dados analíticos para o grupo das granadas e de outras soluções sólidas encontradas entre os minerais. Em síntese recente, Madureira (1983), propôs um conjunto de novos diagramas que, baseados em adaptações analíticas, procuram viabilizar a utilização de gráficos quinários e quinários na pesquisa mineral. Os resultados deste trabalho indicaram a possibilidade de se introduzir um novo critério para reduzir e simplificar ainda mais a aplicação destes diagramas. Observou-se que na construção dos referidos diagramas pode-se considerar aspectos diversos, tais como, modo de ocorrência, grau de metamorfismo, assem-

blêia mineralógica, usos, etc., como critérios de simplificação no número de associações possíveis entre os vários termos puros das granadas. Dentro desta nova filosofia de pesquisa, este trabalho apresenta um diagrama quaternário destinado, exclusivamente, à determinação da composição molecular de granadas de natureza gemológica.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS GRANADAS

O termo granada abrange diversos minerais isomórficos, cuja composição química é representada pela fórmula geral $X_3Y_2Z_3O_{12}$. A posição estrutural X é ocupada por elementos químicos bivalentes como Fe, Mg, Mn e Ca; na posição Y podem aparecer os trivalentes Al, Fe, Cr, Ti, Y e V, e na Z podem estar Si, Al, Ti e Fe^{3+} (Fleischer, 1983).

As granadas cristalizam-se no sistema cúbico, sendo sua estrutura constituída por radicais tetraédricos de $(ZO_4)^{4-}$ que ao se ligarem com os cátions trivalentes deixam interstícios dentro da rede cristalina, que são ocupados pelos cátions bivalentes. A similaridade existente entre o tamanho dos raios iônicos dos elementos químicos envolvidos no quimismo das granadas é responsável pela intensa diadoquia, dificultando a identificação precisa dos seus componentes. A diadoquia catiônica é mais efetiva para determinados grupos de elementos químicos que para outros. Esta pequena discriminação permite dividir o grupo mineralógico das granadas nas séries piralspita e ugrandita (Winchell & Winchell, 1959). Cada uma destas séries apresenta três espécies de granadas. Na série piralspita as espécies são piropo, almandina e essartita e a diadoquia ocorre entre os elementos bivalentes Mg, Fe e Mn. A série ugrandita é composta pelas espécies uvarovita, grossulária e andradita e os elementos químicos que se substituem são os trivalentes Cr, Al e Fe (Deer et al., 1982). Dentro de cada série a substituição é quase completa enquanto que entre as duas séries é muito pequena (Tröger, 1959). Os nomes série e espécie podem ser substituídos na classificação de alguns autores pelos termos espécie e sub-espécie, respectivamente (Hurlbut & Switzer, 1979). Esta dualidade de terminologia resulta do significado diferente que pode ser dado ao termo espécie mineral. Enquanto alguns autores admitem que espécie representa o mineral de composição química definida, outros consideram que o termo corresponde a um membro cuja composição oscila dentro de um determinado intervalo de variação (Manson & Stockton, 1981).

A composição química de uma granada natural nunca se aproxima da composição de apenas uma de suas espécies. Esta condição extremamente particular só pode ser esperada no caso das granadas sintéticas. Ford (1915) concluiu que 17% das granadas naturais são misturas em que predominam apenas dois componentes, outros 17% têm predominância de quatro componentes, e os 66% restantes são granadas em que três componentes predominam sobre o restante da mistura. Esta observação serviu de base para a construção de diagramas triangulares como os do próprio Ford (1915), os de Fleischer (1937), que aparecem também no trabalho de Kennedy (1947), bem como os de Sriramadas (1957) e os de Camargo & Madureira (1976). As propriedades físicas usadas nesses trabalhos são índice de refração (n), densidade relativa (D) e parâmetro da cela unitária (a_0). Camargo & Madureira (1976) substituem o parâmetro a_0 , de obtenção demorada, pelo parâmetro $\Delta 2\theta_{CuK\alpha}$ que é conseguido diretamente sobre os registros de difração de raios X.

O diagrama triangular tem excelente visualização e fácil manuseio, entretanto, limita-se a fornecer composições moleculares binárias e ternárias para as granadas analisadas. Winchell (1958) procura superar essa falha com a introdução de um diagrama tridimensional, que contém os seis principais termos das granadas. Embora seja um diagrama completo, no que diz respeito a total possibilidade de composições químicas entre as granadas, sua utilização requer cuidados especiais, não só para a visualização dos pontos projetados, como também para a interpretação dos dados conseguidos, uma vez que, o diagrama permite a duplicação de resultados para o mesmo conjunto de propriedades físicas consideradas (Hutchison, 1974). A complexidade química e a dificuldade na determinação dos termos que participam da composição de uma granada também se verifica na identificação das granadas gemológicas. As tentativas simplistas de se determinar as gemas desse grupo mineral baseadas apenas na cor, por exemplo, tem contribuído para a proliferação de

nomes que agravam ainda mais o problema.

GRANADAS GEMOLÓGICAS

As granadas possuem características que permitem enquadrá-las entre os materiais gemológicos. A cor é variada e atraente; apresentam-se, na natureza, sob a forma de cristais suficientemente límpidos e desenvolvidos adequados à lapidação; seu brilho e dureza também são satisfatórios; a ausência de clivagem, por outro lado, facilita o processo de corte e polimento (Smith, 1940).

Uma das poucas desvantagens da granada é ser relativamente comum, pelo fato de estar relacionada a diversos ambientes geológicos. Podem ser encontradas tanto em rochas ígneas e metamórficas (Wright, 1938; Levin, 1950; Engel & Engel, 1960), como em aluviões delas derivados. As granadas, de modo geral, são constituídas por, aproximadamente, seis termos puros a saber: piropo (pir), almandina (alm), espessartita (esp), grossulária (gro), andradita (and) e uvarovita (uva). O progresso dos conhecimentos relativos à composição química dos minerais introduziu, nos últimos anos, diversos termos novos no grupo das granadas, como por exemplo, a kinorringita ($Mg_3Cr_2Si_3O_{12}$) e a schorlomite ($Ca_3Ti_2(Fe,Si)_3O_{12}$), definidas por Nixon & Hornung (1968) e Ito & Frondel (1967), respectivamente. A nomenclatura gemológica, por outro lado, registra nomes de variedades, cujas relações com as moléculas já estabelecidas para o grupo das granadas são pouco conhecidas (Webster, 1980). Assim por exemplo, variedades gemológicas tais como rhodolita, topazolita, hessonita, demantóide, entre outras, costumeiramente são referidas apenas a um dos termos puros usados em mineralogia. Não há, inclusive, dados mostrando a composição em termos de vários componentes que como já foi dito, é o que ocorre normalmente na natureza. Desta forma, melanita, demantóide e topazolita são referidas só ao termo andradita; hessonita à grossulária, e rhodolita à uma mistura entre piropo e almandina.

Na realidade, a cor tem exercido uma grande influência no que diz respeito à nomenclatura gemológica das granadas. Assim sendo, granadas verdes são simplesmente referidas pelo termo demantóide, amarelas por topazolitas e vermelhas por rhodolita. O resultado deste procedimento tem sido um aumento desnecessário de nomes, confundindo e dificultando a nomenclatura dessas gemas. Uma alternativa possível de evitar a proliferação desses termos, seria relacionar a nomenclatura diretamente com a composição química, ao invés de se levar em conta as variações de cor observadas nessas variedades.

Nessas condições, o procedimento mais adequado seria determinar somente a composição química através dos métodos convencionais de análise. Entretanto, a maior parte dos métodos de uso corrente são de difícil acesso, e além disso quase todos são de caráter destrutivo, não se aplicando à materiais já lapidados.

O diagrama aqui apresentado procura superar esta dificuldade e para tanto, foram introduzidas modificações nos diagramas propostos por Madureira (1983) voltadas, exclusivamente, para a identificação de granadas gemológicas. Estas modificações consistiram na construção de um único diagrama quinário mostrando o comportamento de apenas duas propriedades físicas, índice de refração e densidade relativa. Como a determinação dessas propriedades baseia-se em métodos analíticos não destrutivos, elas ajustam-se perfeitamente à determinação de materiais gemológicos. Os cuidados e problemas sempre enfatizados na determinação da densidade de um mineral qualquer não tem a mesma conotação para os minerais gemológicos. Nesse sentido é desejável que a gema contenha o menor número possível de imperfeições e inclusões, que normalmente dificultam a determinação da densidade.

As balanças de determinação de densidade representam o método mais prático e barato para obtenção deste dado. Para a determinação do índice de refração, os refratômetros com escalas entre 1,30 e 1,81 são satisfatórios, já que a molécula de andradita, cujo índice de 1,887 é mais alto entre as granadas, está sempre junto com outras de índices menores, resultando daí um índice mais baixo para a mistura final (Liddicoat, 1969).

Entre as várias espécies de granadas gemológicas, a uvarovita é a única que não apresenta interesse, pelo fato de não terem sido

encontrados, até o momento, indivíduos com tamanho suficiente para fins de lapidação.

GRÁFICO QUINÁRIO

O diagrama quinário introduzido por Madureira (1983), resulta da associação de cinco termos puros de uma solução sólida qualquer, colocados nos vértices de um pentágono regular. Os vértices A, B, C, D e E do pentágono (Fig. 1), representam composições de 100% para cada uma das moléculas aí colocadas. Seus lados contêm pontos que representam composições binárias entre os componentes situados nas suas extremidades. Os pontos no interior do pentágono significam composições que contam com a participação de todos os componentes da referida figura. Assim, o centro geométrico deste polígono tem a composição de 20% para cada um dos componentes em questão. A determinação da composição molecular de qualquer ponto interno é feita transformando-se a área do pentágono em áreas de dez triângulos que se interpenetram. Esses triângulos são construídos a partir da união entre os vértices do pentágono. A superposição dos triângulos divide o pentágono em áreas menores, cujos pontos internos podem pertencer, simultaneamente, a três, quatro, cinco, seis ou sete triângulos, de acordo com a posição do ponto no diagrama quinário.

A composição molecular do ponto é determinada para cada triângulo individualmente a partir da técnica convencional existente na literatura (Hutchison, 1974). Assim, a composição do ponto P no triângulo BCD da Fig. 1, é obtida com auxílio das retas b, c e d paralelas aos respectivos lados do triângulo e que cortam suas três alturas em segmentos proporcionais às porcentagens moleculares dos componentes situados em seus vértices. Tal procedimento deve ser repetido para todos os triângulos que contenham o referido ponto. Um ponto qualquer no interior do pentágono pertence sempre a mais de um triângulo, e assim, sua composição final será conseguida com a integração de todas as suas composições triangulares parciais. O ponto A Fig. 2, pertence, ao mesmo tempo, aos triângulos EAB, ACE e DEA. Sua composição no triângulo EAB, obtida a partir de seus vértices, é A = 54,0%, B = 9,0% e E = 37,0%. No triângulo ACE os valores são A = 64,0%, C = 6,0% e E = 30,0%. Finalmente, no triângulo DEA obtêm-se valores de A = 70,0%, D = 10,0% e E = 20,0%.

A composição total para cada um dos componentes A, B, C, D e E depende da posição no interior do diagrama quinário. Aqueles que participam de mais de um triângulo, como por exemplo, os componentes A e E, têm sua composição obtida a partir da média dos seus valores respectivos. Os que aparecem apenas uma vez, como é o caso de B, C e D a composição é o próprio valor integral do componente. Assim sendo, a composição do ponto A é A = 62,7%, B = 9,0%, C = 6,0%, D = 10,0% e E = 29,0%. A soma desses valores é ainda um valor parcial, no caso, 116,7% que deve ser reajustada em termos de 100% fornecendo então os valores finais que passam a ser A = 53,7%, B = 7,7%, C = 5,0%, D = 8,6% e E = 24,9%.

Durante o desenvolvimento do cálculo molecular a partir do método indireto foram utilizados diagramas de vários tamanhos tais como, cinco, dez, quinze e vinte centímetros de lado. Os resultados que mais concordaram com aqueles conseguidos na análise com microsonda foram obtidos nos diagramas que tinham dez a vinte centímetros de lado. Os diagramas menores apresentaram desvios significativos resultantes de erros gráficos.

A Fig. 3 apresenta o diagrama quinário adaptado para às granadas gemológicas cujos componentes são piropo (pir), almandina (alm), essartita (esp), grossulária (gro) e andradita (and). A escolha destes componentes baseou-se no fato de que esses são os termos puros frequentemente encontrados na composição das granadas. A Tab. 1 apresenta os valores das propriedades físicas de índice de refração e densidade relativa desses componentes utilizadas na construção de diagrama quinário (Skinner, 1956). A uvarovita foi omitida porque, além de ser rara, não são conhecidas em suas ocorrências exemplares com dimensões convenientes ao uso gemológico. Outro ponto a considerar é a ordem dos componentes no diagrama. A parte superior do pentágono apresenta as granadas da série pirlaspita, deixando próximos os componentes piropo-almandina e almandina-essartita, mantendo afastados os componentes piropo-essartita, conforme sugere o trabalho de Tröger (1959). Na parte

inferior do diagrama encontra-se a série grandita, a qual apresenta miscibilidade completa entre seus componentes grossulária e andradita.

As propriedades físicas escolhidas foram apenas índice de refração (n) e densidade relativa (D), por serem estas as mais adequadas considerando as características do material gemológico. Apesar de existirem outras propriedades, tais como, a_0 , $\Delta 2\theta_{CuK\alpha}$ e Δd possíveis de serem utilizadas com resultados satisfatórios já comprovados (Camargo & Madureira, 1976), o uso apenas do índice e da densidade simplifica os trabalhos analíticos sem comprometer a precisão dos resultados. Normalmente, a densidade apresenta limitações devido às imperfeições que geralmente estão presentes nos minerais. No caso em pauta, em que as granadas gemológicas comumente possuem limpidez e um número reduzido de imperfeições e defeitos, a densidade passa a ser uma propriedade quase tão confiável quanto às demais acima referidas.

Neste trabalho foram calculadas as composições moleculares de seis granadas distintas, cujas propriedades físicas e procedências estão informadas na Tab. 2. As determinações de densidade foram executadas utilizando-se solução de Clerici com as devidas correções referentes à influência da temperatura sobre a solução (Jahns, 1939). O estado do equilíbrio dos fragmentos de granadas na solução devidamente diluída foi estabelecido mediante observações ópticas. A densidade correspondente à solução foi obtida a partir de um refratômetro Leitz-Jelley. Os índices de refração dos fragmentos selecionados foram determinados pelo método de imersão convencional com luz monocromática. Os dados de composição química foram obtidos em uma microsonda eletrônica ARL modelo EMX-SM existente no Departamento de Mineralogia e Petrologia do Instituto de Geociências da USP. Durante as determinações químicas foram utilizados como padrões analíticos, cristais de granadas naturais. As correções analíticas foram executadas utilizando-se os programas de Bence & Albee (1968).

A Tab. 2 reúne todas as informações referentes às amostras estudadas neste trabalho, abrangendo composição quantitativa, índices de refração, densidade e cor. A partir das análises químicas obtidas pela microsonda, calculou-se inicialmente as porcentagens em termos das moléculas integrantes de almandina, andradita, espessartita, grossulária e piropo (colunas A na Tab. 2). Em seguida, os valores correspondentes ao índice de refração e à densidade de cada uma destas amostras foram projetadas no diagrama quinário da Fig. 3. As composições moleculares estão apresentadas nas colunas B da Tab. 2. Comparando-se os dois tipos de dados (A e B), referentes à composição molecular de cada uma das granadas, verifica-se que há uma boa concordância entre os valores das seis amostras estudadas. A concordância é maior no que diz respeito aos termos predominantes observando-se uma diferença que oscila em torno de 4,0%, exceto na amostra 2 onde a diferença alcança 24,0%. Observa-se também que no caso dos componentes minoritários as diferenças entre a composição molecular direta e indireta é mais acentuada do que os componentes predominantes.

Das amostras estudadas quatro são vermelhas, uma rosa claro e outra marrom. Entre as granadas vermelhas não foi possível estabelecer uma correspondência entre suas tonalidades com as diferenças químicas constatadas. São vermelhas tanto a amostra número um, com 69,0% de almandina e 17,0% de piropo, como a amostra três com 14,0% de almandina e 72,0% de piropo. A granada marrom (amostra dois) foi a que apresentou a maior porcentagem para a molécula espessartita. Na granada rosa claro (amostra cinco) a quantidade de andradita foi superior à encontrada nas demais granadas estudadas.

Outro fato interessante é que os pontos projetados caíram todos na periferia do diagrama indicando, talvez, soluções sólidas parciais entre os cinco componentes presentes nas amostras estudadas (Fig. 3).

CONCLUSÕES

O método físico indireto fornece a porcentagem dos componentes de granadas gemológicas a partir do índice de refração e da densidade relativa.

A composição da granada é obtida através de um diagrama pentagonal, bidimensional, adaptada especialmente para esse problema, reu -

nindo os componentes piropo, almandina, espessartita, grossulária e andradita.

O diagrama foi testado para seis amostras de paragéneses e cores variadas, fornecendo resultados concordantes com os dados calculados a partir da composição química obtida diretamente na microsonda eletrônica. A comparação entre os dados obtidos pelos métodos direto (microsonda) e indireto (diagrama quinário) mostrou que o erro oscila em torno de 4,0%. A precisão do método indireto possui significado até a primeira casa decimal.

A utilização dos diagramas quinários, no decorrer dos trabalhos, indicou que a dimensão mais adequada para a construção do diagrama, tendo em vista a precisão dos resultados, situa-se entre dez a vinte centímetros de lado.

AGRADECIMENTOS

Esses são devidos ao Prof.Dr. Otávio Barvosa que gentilmente forneceu diversas amostras no decorrer deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- BENCE, A.E. & ALBEE, A.L. - 1968 - Empirical correction factors for the electron microanalysis of silicates and oxides. Jour. Geol., 76:382-403.
- CAMARGO, W.G.R. de & MADUREIRA FILHO, J.B. de - 1976 - New diagrams for physical determination of garnets. An. Acad. brasil. Ciênc., 48(1): 57-68.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. - 1982 - Rock-forming minerals. 2nd. ed. Orthosilicates., Longman Limited: 919p.
- ENGEL, A.E.J. & ENGEL, C.G. - 1960 - Progressive metamorphism and granitization of the major paragneisses, northwest Adirondack Mountains, New York. Part II, Mineralogy. Bull. Geol. Soc. Am., 71: 1-57.
- FLEISCHER, M. - 1937 - The relation between chemical composition and physical properties in the garnet group. Amer. Mineral., 22: 751-759.
- FLEISCHER, M. - 1983 - Glossary of mineral species. Mineralogical Record, P.O. Box 35565, Tucson, Arizona, U.S.A.
- FORD, W.E. - 1915 - A study of the relation existing between the chemical, optical and other physical properties of the members of the garnet group. Am. Jour. Sci., 40: 33-49.
- HARLBUT, C.S. Jr. & SWITZER, G.S. - 1977 - Gemology. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- HUTCHISON, C.S. - 1974 - Laboratory Handbook of Petrographic Techniques. John Wiley & Sons, Inc., New York: 527 p.
- ITO, J. & FRONDEL, C. - 1967 - Synthetic zirconium and titanium garnets. Amer. Mineral., 52: 773-781.
- JAHS, R.H. - 1939 - Clerici solution for the specific gravity determination of small mineral grains. Am. Mineralogist, 24: 116-122.
- KENNEDY, G.C. - 1947 - Charts for correlation of optical properties with chemical composition of some common rock-forming minerals. Am. Mineralogist, 32: 561-573.
- LEVIN, S.B. - 1950 - Genesis of some Adirondack garnet deposits. Bull. Geol. Soc. Am., 61: 519-565.
- LIDDICOAT JR., R.T. - 1969 - Handbook of gem identification. 8th ed. GIA, Los Angeles: 430 p.
- MADUREIRA FILHO, J.B. de - 1983 - Determinação da composição molecular de granadas. Tese de doutoramento, Inst. Geoc., USP, São Paulo : 181 p. In: Rev. Bras. Geoc., 13(3): 207. Resumo.
- MANSON, V. & Stockton, C.M. - 1981 - Gem garnets in the red-to-violet color range. Gems & Gemology, 17: 191-204.
- NIXON, P.H. & HORNUNG, G. - 1968 - A new chromium garnet end member, knorringite, from kimberlite. Amer. Mineral., 55: 1833-1840.
- SKINNER, B.J. - 1956 - Physical properties of end-members of the garnet group. Amer. Mineral., 41: 428-436.
- SMITH, G.F.H. - 1940 - Gemstones. Methuen & Co. Ltd., London: 443 p.
- SRIRAMADAS, A. - 1957 - Diagrams for the correlation of unit cell edges and refractive indices with the chemical composition for garnets. Amer. Mineral., 42: 294-298.

- TRÖGER, W.E. - 1959 - Optische bestimmung der gesteinsbildenden Minerale. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 146 p.
- WEBSTER, R. - 1976 - Gems. 3th. ed., Bittenworth & Co.Ltd., London: 938 p.
- WINCHELL, A.N. - 1958 - The composition and physical properties of garnet. Amer. Mineral., 43: 595-600.
- WINCHELL, A.N. & WINCHELL, N.H. - 1959 - Elements of optical mineralogy: an introduction to microscopic petrography. Part I and II. 4th. ed., Wiley, New York.
- WRIGHT, W.I. - 1938 - The composition and occurrence of garnets. Amer. Mineral., 23: 436-449.

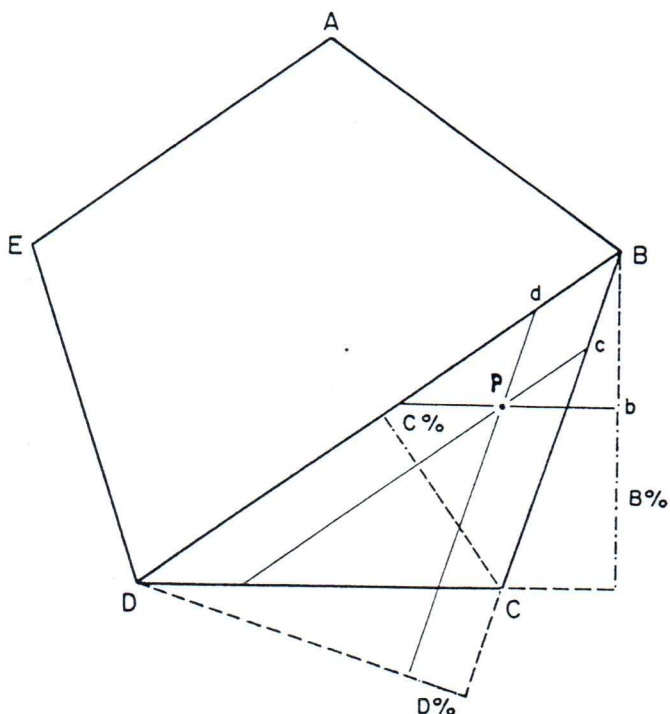


Figura 1 - Esquema mostrando o processo para a determinação da composição molecular de um ponto P qualquer no diagrama quinário. Após a divisão do pentágono em dez triângulos isóceles, a composição do ponto é obtida traçando-se paralelas a todos os lados dos triângulos dos quais o ponto pertence simultaneamente. A composição é dada por segmentos correspondentes às alturas de cada um desses triângulos. Considerando o triângulo BCD, as paralelas b, c e d interseccionam as alturas em segmentos que representam as porcentagens de cada um dos componentes. Estendendo-se esse procedimento aos demais triângulos obtém-se a composição relativa aos cinco termos do diagrama.

Tabela 1 - Propriedades físicas das principais moléculas constituintes das granadas naturais utilizadas na construção do diagrama da Figura 3.

Termo puro	n	D	Composição química
Piropo	1,714	3,582	$Mg_3 Al_2 Si_3 O_{12}$
Almandina	1,830	4,318	$Fe_3 Al_2 Si_3 O_{12}$
Espessartita	1,800	4,190	$Mn_3 Al_2 Si_3 O_{12}$
Grossulária	1,734	3,594	$Ca_3 Al_2 Si_3 O_{12}$
Andradita	1,887	3,859	$Ca_3 Fe_2 Si_3 O_{12}$

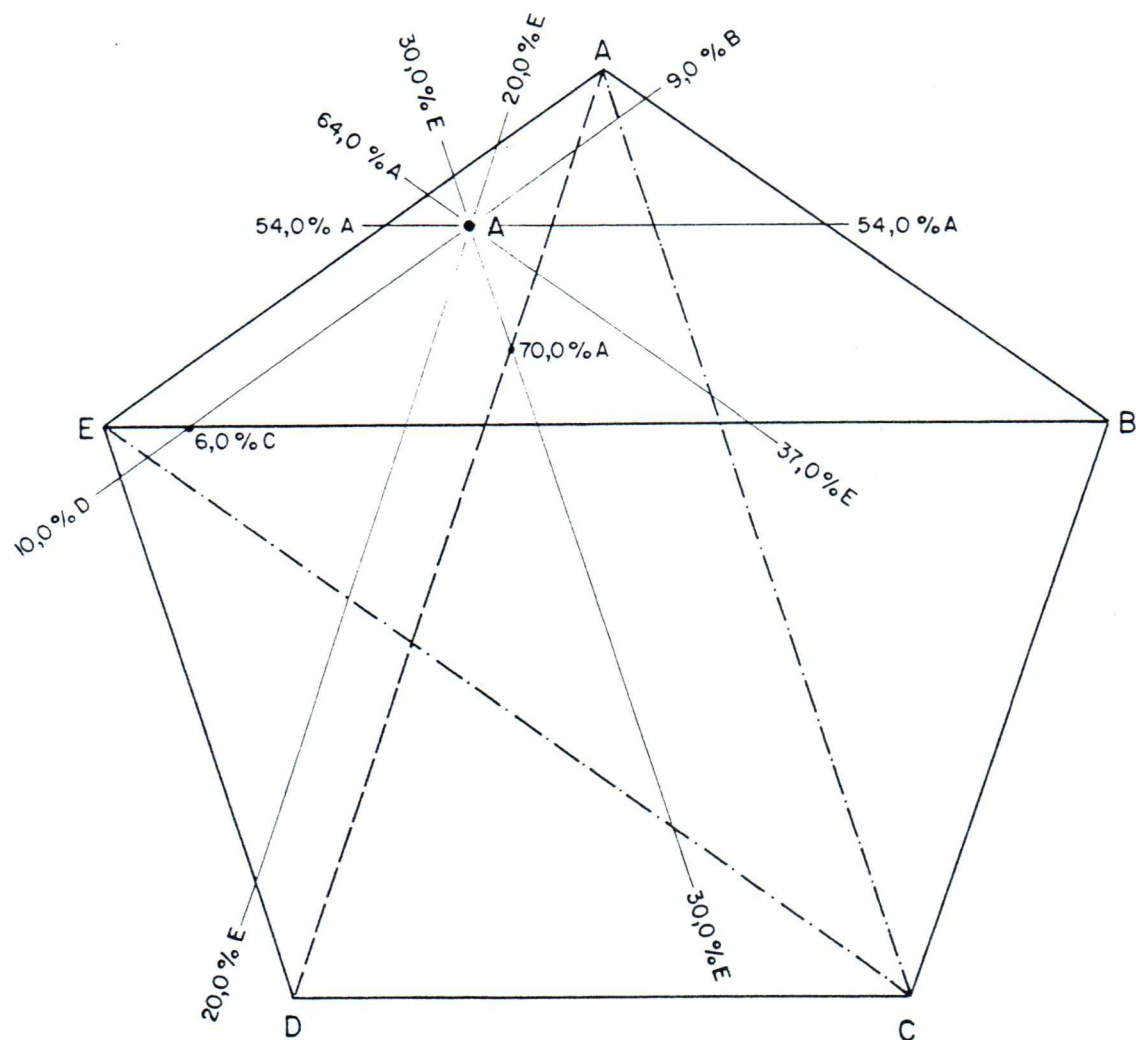


Figura 2 - Exemplo numérico ilustrando o cálculo da composição de uma granada representada pelo ponto A. O referido ponto tem, no triângulo EAB, as porcentagens A= 54,0%, B= 9,0% e E=37,0%; no triângulo ACE A= 64,0%, C= 6,0% e E= 30,0%; finalmente no triângulo DEA A= 70,0%, D= 10,0% e E= 20,0%. A composição final, obtida a partir da média dos valores que se repetem ou dos valores integrais que aparecem uma única vez, é A= 53,7%, B= 7,7%, C= 5,1%, D= 8,6% e E= 24,9%.

DIAGRAMA n/D

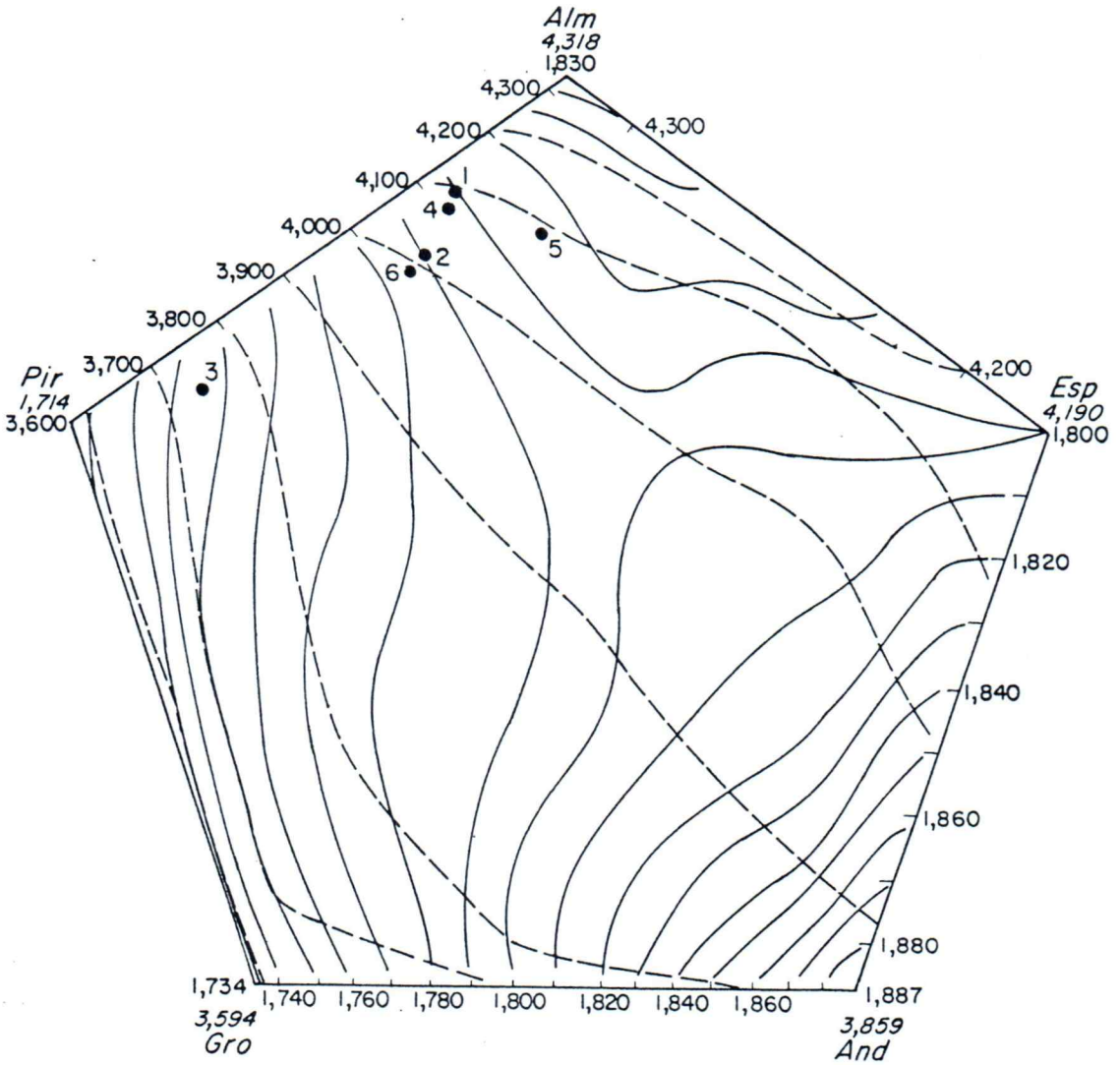


Figura 3 - Diagrama quinário construído para a determinação dos componentes de granadas gemológicas. As linhas cheias representam variações do índice de refração e as interrompidas variações de densidade. Notar a concentração das linhas nas bordas do diagrama, indicando talvez, a existência de soluções sólidas parciais entre os componentes utilizados. Os pontos 1 a 6 representam as projeções das amostras estudadas.

Tabela 2 - Dados de composição química, propriedades físicas e porcentagens dos componentes constituintes das granadas estudadas neste trabalho

Amostra nº	1		2		3		4		5		6	
SiO ₂	36,1		38,8		40,2		39,2		37,4		40,5	
TiO ₂	0,1		-		0,4		0,3		0,8		0,1	
Al ₂ O ₃	21,4		21,3		23,0		21,1		21,6		21,7	
Fe ₂ O ₃	0,4		0,2		0,6		0,8		2,8		1,3	
FeO*	31,7		29,0		8,0		30,2		24,3		22,5	
FeO ^t	32,1		29,2		8,6		31,0		27,1		23,8	
MnO	1,9		1,9		1,3		0,3		0,6		2,3	
MgO	4,5		4,3		21,1		6,2		3,8		6,1	
CaO	3,1		4,2		4,5		2,2		9,0		4,5	
Total	99,2		99,7		99,1		100,3		100,3		99,0	
n	1,803		1,790		1,749		1,800		1,805		1,787	
D	4,10		4,08		3,75		4,09		4,09		3,99	
Cor	vermelha		marrom		vermelha		vermelha		rosa claro		vermelha	
Ocorrência	Itabira (BA)		Guanambi (BA)		Coromandel (MG)		Romaria (MG)		Porto Nacional (GO)		Coromandel (MG)	
Composição	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Alm%	69,2	69,2	65,9	49,9	14,4	13,1	68,3	66,6	56,4	56,5	52,7	47,3
And%	1,5	1,9	0,8	5,7	2,1	4,2	2,0	3,7	9,1	9,8	3,4	6,6
Esp%	4,3	4,7	4,4	9,9	2,4	6,7	0,7	2,8	1,1	8,6	5,4	9,1
Gro%	7,2	3,7	11,6	9,9	9,1	8,6	4,0	4,6	17,7	13,7	10,9	9,9
Pir%	17,8	20,5	17,3	24,6	72,0	67,4	25,0	22,3	15,7	11,4	27,6	27,1
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

FeO^t - Ferro total, calculado como FeO

FeO* - Ferro determinado por via úmida

A - valores calculados a partir de dados fornecidos pela microsonda eletrônica

B - valores calculados a partir de diagrama quinário