

PROCESSAMENTO DE CONCENTRADOS DE TITANOMAGNETITE: TRANSFORMAÇÕES OCORRENDO NA OXIDAÇÃO E REDUÇÃO PARTE I - OXIDAÇÃO

Luis Mayor Gonzalez*¹, Manuel Caldeira Coelho²

¹Universidade do Minho. Depart. Eng^a Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

²Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Estrada do Paço do Lumiar, 22, Edifício C, 1649-038 Lisboa

*Email: lmgonzalez@mail.telepac.pt

RESUMO

Trabalhos anteriores propuseram valorizar concentrados de titanomagnetite por peletização, pre-redução em forno rotativo e forno eléctrico de redução.

A peletização permite menor arraste de finos pelos gases, melhores resistência mecânica e reducibilidade dos peletes pela oxidação das fases iniciais, elevando a metalização para igual tempo de residência na pre-redução.

Trabalhos revistos, de termodinâmica e mecanismos, apontam como reacções principais a oxidação de magnetite a hematite, de ulvospinela a ilmenite e hematite e, sobretudo, de ilmenite a hematite e rútilo.

O estudo confirmou estas ocorrências por termogravimetria, DRX e microscopia óptica e electrónica, detalhando alguns aspectos que permitem melhor compreensão e modelação das reacções.

O estudo discute ainda, i.a., as variações de massa e de resistência associadas a estas reacções.

INTRODUÇÃO

Importância da peletização

Na utilização de concentrados de titanomagnetite de Tete, finamente moídos, proposta e estudada em trabalhos anteriores [Gonzalez 2001, Gonzalez 2005, Gonzalez 2008], a tecnologia proposta é a de peletização dos concentrados, seguida de pré-redução dos peletes em forno rotativo com carvão desvolatilizado, antes da fusão dos peletes pré-reduzidos em forno eléctrico de redução.

Estas diferentes operações têm vantagens quando associadas (em rigor, esta associação estende-se até à própria beneficiação). A peletização evita o arraste de finos dos concentrados pelos gases dos fornos, confere suficiente resistência mecânica aos agregados, e promove a cinética da redução da magnetite e da ilmenite por desidratação e sobretudo por oxidação das fases presentes. Esta aceleração da velocidade eleva a metalização ao fim do mesmo tempo de retenção no forno, o que permite economia de reductor (carvão) e energia eléctrica. Foi observada por vários autores; na ilmenite, e deve-se à alteração de microestrutura e criação de condições que favorecem a nucleação. Com a oxidação dos concentrados, aumenta contudo o consumo de reductor e de energia eléctrica, e eleva-se a pressão de oxigénio dos concentrados no forno eléctrico. A elevada pressão de oxigénio foi referida como causa da libertação violenta de gases na adição de minério a fornos à escala piloto. Ambos estes efeitos vêm o

seu efeito não só anulado mas até revertido com uma pré-redução que pode usar carvão de preço relativamente mais baixo.

Sobre esta interação positiva entre peletização e pre-redução interessa ainda referir que os gases que deixam a pre-redução têm de ser queimados pelo seu elevado teor de CO, podendo parte desta queima ocorrer... na peletização.

A peletização é pois, nesta perspectiva, o ponto de partida para o processamento dos concentrados. Dela se espera que aglomere concentrados em peletes com resistência mecânica à compressão e queda suficientes para as operações seguintes, sendo ainda relevantes, na procura das condições de preparação, a obtenção de boa reducibilidade e, acessoriamente, a possibilidade/ capacidade de reciclar finos de desempoeiramento, com produtos carbonosos e alguns óxidos.

Assim, procurou-se confirmar a ocorrência destas alterações nos concentrados de titanomagnetite em estudo. Nesta série de duas comunicações estudam-se os processos químicos principais, de oxidação dos concentrados (nesta 1ª parte) e redução dos peletes obtidos (na 2ª parte)

Transformações na peletização

A aglomeração na peletização é um processo complexo levado a cabo essencialmente com ajuda de água e de um aglomerante, frequentemente bentonite. Ocorrem transformações físicas importantes antes de se iniciarem as reacções que lhe conferem as propriedades físicas e químicas finais. Ao estudo destas transformações físicas, respectivo desenvolvimento laboratorial e variação de propriedades será dedicado um futuro trabalho em separado.

No concentrado inicial, a maioria do material pode ser descrito por 2 tipos de grãos, de magnetite primária (I) e de ilmenite I, contendo 2 fases: uma de ilmenite saturada de hematite (em grãos primários, lamelas secundárias ou exsoluções terciárias, arredondadas sem forma característica) e outra de magnetite saturada de ulvospinela em processo avançado de oxidação pela atmosfera, embora variável (desta oxidação pela atmosfera decorre a formação de ilmenite II e III). Cada fase pode considerar-se que reage de modo independente, mantendo entre si uma relação aproximada pelo equilíbrio definido a uma pressão de oxigénio comum.

Para os vários grãos as fases presentes são as exibidas na figura 1 pelo diagrama de equilíbrio, a 800°C, de Borowiec e Rosenqvist 1981. Neste diagrama as linhas a tracejado têm igual razão Fe/Ti, e apenas variam pelo teor de oxigénio. O triângulo Fe-Fe₂O₃-TiO₂ divide-se em dois “sub”-triângulos: “FeO”-Fe₂O₃-TiO₂ com formas mais oxidadas, com presença de Fe(III), e “FeO”-Fe⁰-TiO₂, com fases obtidas por redução das anteriores, e com ocorrência de Fe⁰. Um terceiro sub-triângulo Fe⁰-TiO₂-Ti₂O₃, irrelevante para este trabalho, mostra fases de rútilos reduzidos, com Ti (III), que ocorrem em condições de sobrerredução.

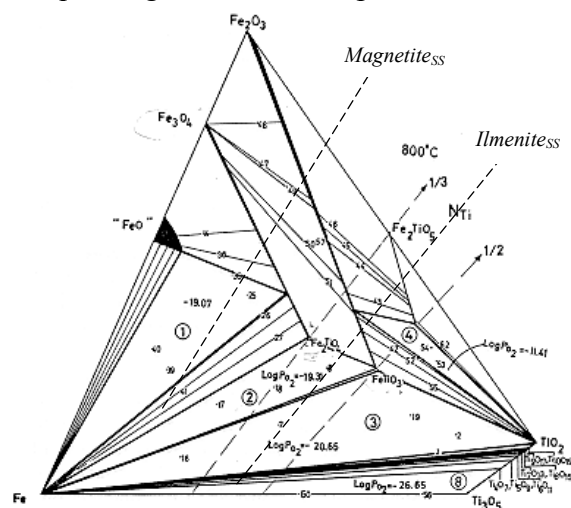


Figura 1 Equilíbrio Fe₂O₃-TiO₂-Fe, a 800 °C [Borowiec e Rosenqvist (1981)]

O primeiro sub-triângulo mostra zonas monofásicas estreitas, quase lineares, correspondentes às soluções sólidas Fe₂O₃-FeTiO₃ (fase romboédrica), Fe₂TiO₄-Fe₃O₄ (espinela) e Fe₂TiO₅-FeTi₂O₅ (fase ortorrômbica) e, à volta das fases, “FeO” (wustite), TiO₂ (rútilo). Estas linhas,

nomeadamente as de fases romboédrica e espinelas prolongam-se além dos pontos estequiométricos, dentro da região reduzida, em extensão que varia com a temperatura.

As regiões monofásicas terminam em triângulos trifásicos, assinalados com as referências 2,3 e 4. A região trifásica 1 tem vértices em Fe^0 , “ FeO ” e uma solução sólida de magnetite e ulvospinela. À excepção do triângulo 4, que ocorre na zona oxidada, os outros ocupam a maior parte da área do segundo subtriângulo das formas reduzidas. Nestas regiões trifásicas, e para efeitos estequiométricos, as reacções ocorrem entre fases com composição fixa, representadas pelos vértices, como se estas soluções sólidas fossem compostos puros (a composição delas varia contudo com a temperatura), variando apenas a quantidade de cada uma das fases dos vértices.

Regiões bifásicas estão representadas entre estas linhas, e ocorrem por alteração da proporção dos elementos extremos das “tielines” e da composição dos mesmos. Ocupam a maior parte do subtriângulo com Fe(III) , mas reduzem-se a faixas estreitas no subtriângulo com Fe^0 .

As principais reacções que ocorrem por oxidação dos concentrados são a oxidação de fases contendo Fe(II) , mesmo quando presentes em solução sólida:

ulvospinela, dando ilmenite e magnetite,

magnetite, formando hematite, e

ilmenite, formando hematite e rútilo a baixa temperatura e pseudobrookite e rútilo a alta

e a combinação de rútilo com hematite dando pseudobrookite.

À excepção desta última combinação, estas reacções envolvem variações de massa, em parte mascaradas pela desidratação de fases hidroxiladas e por vezes, no início do cozimento, pela formação de pequena quantidade de Fe(II) , como magnetite, por redução por materiais carbonosos, eventualmente com participação do vapor de água.

A formação de pseudobrookite, termodinamicamente possível acima de 585°C , foi apenas observada, nas condições de peletização, para temperaturas mais elevadas, acima de 875°C , observando-se, nas condições e tempo dos ensaios, a formação de hematite e rútilo abaixo dessa temperatura.

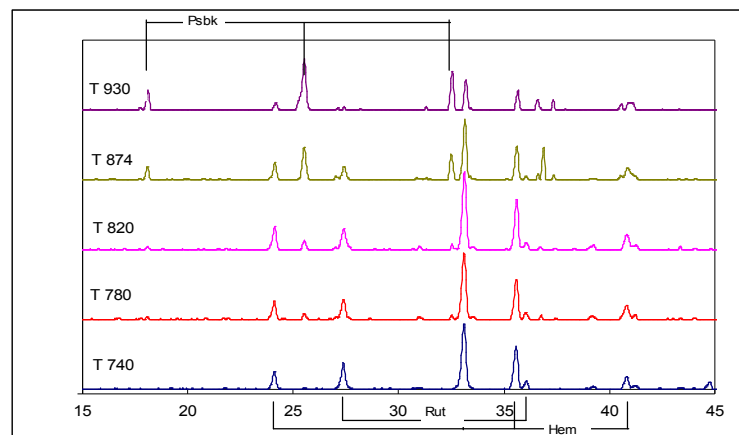


Figura 2 Influência da temperatura na natureza dos produtos para um mesmo tempo de reacção adaptado de Gonzalez 2005

Idênticos resultados são relatados por diversos autores (Tangstad 1988, Jasna 1979, Grey 1974, Rao 1974).

A ocorrência de desidratação e a ligeira redução parcial afectam pouco as propriedades finais, mas são importantes para a quantificação da extensão das reacções e a interpretação quantitativa dos ensaios, especialmente na etapa de definição do programa de ensaios e interpretação dos resultados finais (p.e., no início, os ganhos por oxidação eram medidos por simples ganho de massa, o que “indicava” estar a oxidação ainda inexplicavelmente incompleta; a quantificação da desidratação permitiu corrigir este efeito). Este ponto será incluído em mais detalhe no estudo separado, já referido.

A presente comunicação descreve o estudo efectuado apenas sobre as transformações devidas à oxidação, as que alteram mais profundamente a natureza dos concentrados.

EXPERIMENTAL

Preparação dos peletes secos

Os peletes foram preparados com água e bentonite (descrição em Gonzalez 2005) Os peletes frescos foram deixados a secar ao ar por cerca de 6 horas, em estufa a 130°C por 2 horas, pesados cada um, e guardados de modo referenciado.

Cozimento dos peletes

Após algumas séries de ensaios em mufla e forno tubular para ganhar sensibilidade, foram definidas condições de cozimento (tempo, temperatura final, regime de aquecimento e caudal de ar), o mais aproximadas das condições industriais (relatadas por Folmo e Rierson 1992, ou avaliadas por balanço de condições de operação relatadas na memsa referência). O ritmo de aquecimento é contudo inferior.

Os efeitos da temperatura final e do regime de aquecimento foram estudados, aperfeiçoando-se o procedimento por etapas (mufla, forno tubular, forno tubular monitorado por cromatógrafo e forno vertical com medição da evolução do ganho de peso).

Os peletes finais estudados foram cozidos em forno vertical, a vários níveis de oxidação, retirando-os do forno a intervalos de aproximadamente 2.5 minutos e, arrefecidos ao ar, foram colocados em exsiccador, sendo retirados apenas para os tratamentos seguintes. A determinação deste nível de oxidação com maior precisão não foi considerada necessária, implicando uma complexidade bastante maior da montagem, com arrefecimento brusco em ambiente inerte.

Preparação das amostras

Os peletes cozidos seccionaram-se a cerca de 2/3 do diâmetro. Da calote tomaram-se 3 amostras no centro, periferia e zona intermédia, para DRX e determinação de densidade verdadeira.

O resto do pelete cortado foi montado em Epofix, em vácuo, face cortada para baixo. Após consolidação da resina, removeu-se a tampa e após um primeiro desbaste, re-impregnou-se a mesma face que, re-consolidada, se desbastou e poliu para observação ao microscópio óptico e electrónico.

Os peletes a vários estados de oxidação observaram-se em separado, comparando as obsevações com as do concentrado inicial

RESULTADOS

Variação de massa e apuramento da montagem

As amostras processadas por oxidação foram estudadas por etapas.

-Primeiro, em forno tubular, os peletes de concentrado ilmenítico foram oxidados, prolongando o ensaio até peso constante. Constatou-se que o ganho de peso era muito inferior ao que seria de esperar da composição e estequiometria de reacção. O produto final, contudo, parecia totalmente oxidado por DRX, sem vestígio das fases iniciais. Este resultado foi confirmado a várias temperaturas. A oxidação a várias temperaturas, embora conduzindo a igual ganho de massa em percentagem, mostrou por DRX que as fases finais eram diferentes.

-Para tentar compreender a aparente ineficiência de oxidação, estudou-se a composição dos concentrados ilmeníticos. O difractograma mostrava entre vários picos de intensidade baixa

não identificadas, um pico a cerca de 4 Å, possível de atribuir a diásporo, mas os outros picos desta fase, muito menores, diluíam-se no fundo. Em amostras de outras correntes do fluxograma, porém, tal pico aparecia reforçado em fracções não magnéticas, onde a presença de outros picos já permitia a sua confirmação como Diásporo, AlO(OH). Uma fase libertando voláteis no cozimento poderia explicar as baixas conversões estimadas por perda de peso por serem mascaradas pelo ganho na oxidação. A confirmação da sua presença foi efectuada por DRX do concentrado pre-aquecido a 400 e 600 °C, observando-se que aquela fase desaparecia, com aparecimento de Alumina, Al₂O₃.

-Efectuando um pre-aquecimento em Azoto, seguido de arrefecimento, pesagem, aquecimento ao ar e nova pesagem, observou-se que o ganho de peso na oxidação se elevava para o valor estequiométrico.

-Confirmada a possibilidade de ocorrência simultânea das duas reacções, de desidroxilação e de oxidação, tentou-se efectuar o ensaio, ainda em forno tubular, monitorando em separado a quantidade de O₂ consumido num caudal constante de ar, com ajuda dum cromatógrafo em fase gasosa, com ciclo de amostragem dos gases de 2.5 minutos. O resultado, mostrado na figura 3, embora pouco sensível dada a duração relativamente curta do ensaio, indicou um oxigénio consumido muito próximo do estequiométrico, confirmando uma vez mais a insuficiência da pesagem simples no cozimento. Evidencia desidroxilação completa (a 600°C, pelos ensaios anteriores) quando a oxidação apenas começa. Ou seja, as reacções de desidroxilação e oxidação são praticamente sequenciais.

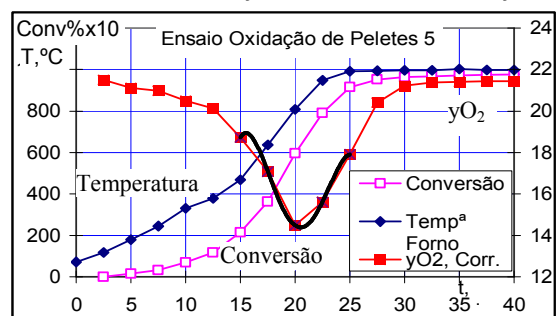


Figura 3 Ensaio não isotérmico, acompanhado por variação do teor de O₂ Gonzalez 2005

A montagem final, considerando as reacções sequenciais, usou um forno vertical onde um cesto de 15 peletes foi pendurado por um suspensor ao braço duma barra, apoiada no meio, e ligada do outro lado a um peso colocado sobre um balança. A variação de massa dos peletes é assim transmitida à balança que regista o valor automaticamente para um microcomputador.

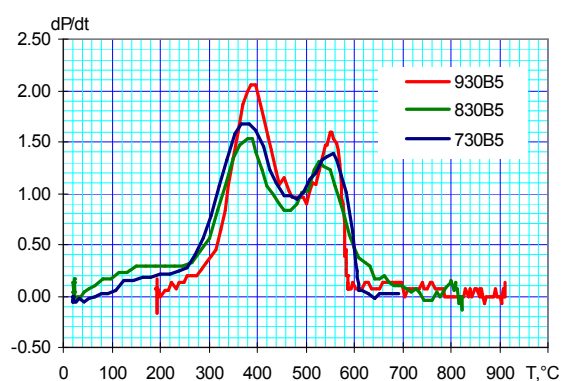
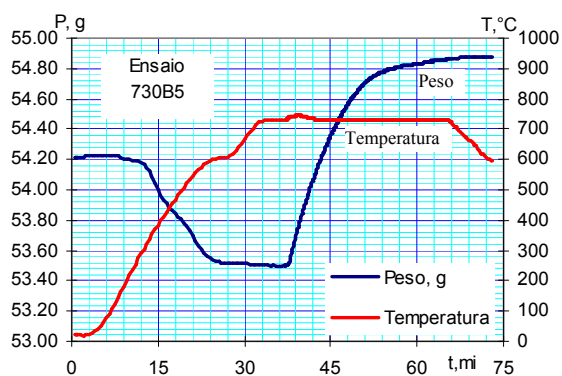


Figura 4 Variação de peso no aquecimento em N₂. Picos do ritmo de perda de peso repetem-se às mesmas temperaturas. Temperatura não uniforme na carga de ca 45 g Gonzalez 2005

Na fase inicial, o forno foi percorrido por uma corrente ascendente de azoto, com composição à saída controlada por cromatógrafo. Terminado este período de pré-aquecimento do forno à temperatura de reacção, e até se atingir peso constante, o forno admite uma corrente de ar descendente, que inicia a oxidação. A balança dá primeiro a perda de peso por desidroxilação, seguida do ganho de peso por oxidação, esta numa curva de conversão de forma sigmoideal.

Os picos de desidroxilação, por causa da inércia térmica, correspondem a temperatura mais baixa. De facto, há uma decalagem de *ca* 50°C entre os da figura 4B e os dum ensaio de Análise térmica diferencial (DTG) com o mesmo material.

Por este processo não se mede a formação de pseudobrookite a partir de hematite e rútilo. Como os ensaios foram conduzidos a 830°C, temperatura a que ainda não se forma pseudobrookite, esse facto não é relevante.

Observação das amostras

Por DRX

Os difractogramas mostram, com o progresso da reacção, um desaparecimento de magnetite e uma diminuição da ilmenite e aumento de rútilo e hematite, como mostra a figura 5.

A oxidação a 830°C de ilmenite a hematite e rútilo tem a particularidade de a hematite formada ser, pelo menos em parte, solúvel na ilmenite, reagente inicial. Assim, deveria poder observar-se um desvio do pico da ilmenite, à medida que o teor de hematite aumenta. Para a hematite inicial, já com ilmenite, a oxidação afecta também a ilmenite em solução a partir de certa altura, o que se reflecte na deriva do pico dessa hematite no mesmo sentido. Com o progresso da oxidação diminui a distância entre os picos, bem visível abaixo da escala de 2θ; havendo sobreposição, é difícil ler a posição dos picos, quase fundidos nas últimas amostras. Algumas conclusões dos trabalhos de Tangstad 1988 e Jasna 1979 devem considerar que a fusão de picos ocorre ainda antes da solubilidade sólida completa.

Por ajustamento de perfis (Rietveld), pelo programa POWDERCEL, foi feita esta decomposição, para os difractogramas de amostras a vários níveis de oxidação como mostra a figura (que estima também a composição quantitativa, pelo mesmo método).

A oxidação aumenta no sentido de cima para baixo, e mostra os picos 104 e 110 da ilmenite e hematite, inicialmente bem separados, particularmente no pico 104.

Por microscopia óptica e electrónica

As amostras são preparadas para observação em secção polida.

O **pelete inicial** contém principalmente grãos primários de ilmenite e magnetite, com exsoluções lamelares (figura 6):

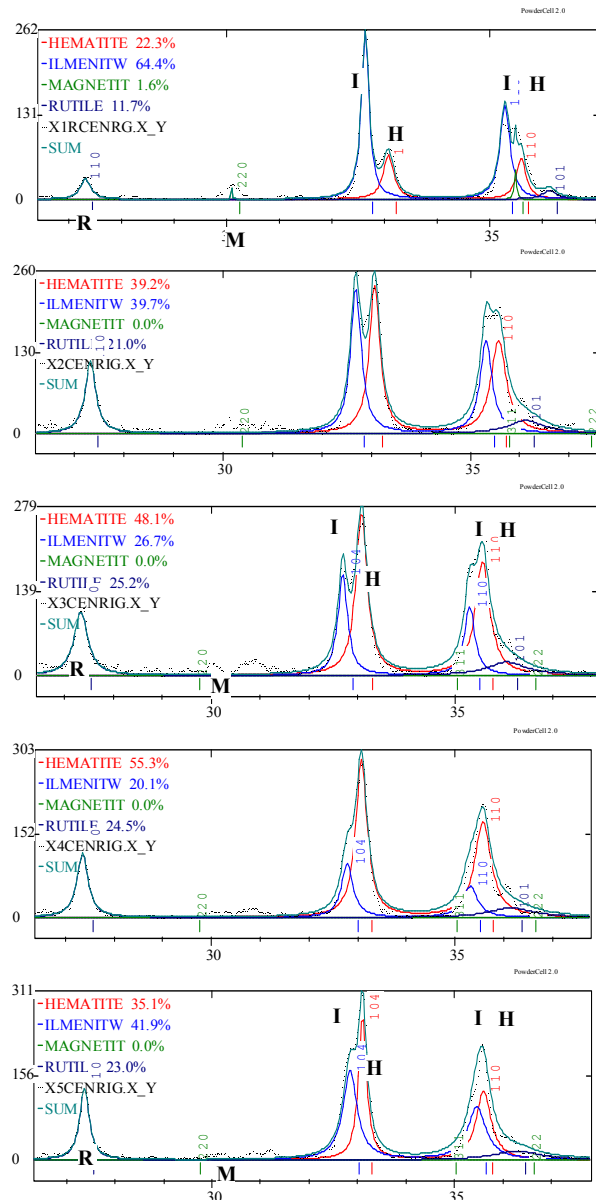


Figura 5 DRX de amostras oxidadas. A oxidação aumenta de 1Cen a 5Cen Gonzalez 2005

- de hematite, paralelas, na ilmenite I, e
- de ilmenite II (ca 54% da ilmenite total, gerada e exsolvida por oxidação da ulvospinela) e espinela, ambas em rede (“trellis”) no interior da magnetite I. A ilmenite II formaram-se em pelo menos 2 gerações com espessamentos subsequentes; a espinela surge na última, ficando embebida nas lamelas, em geral na parte exterior destas.

- ilmenite III, não visível na figura 6, em grãos arredondados, em geral periféricos (formada após oxidação da magnetite, não podendo já ser a exsolução orientada pela estrutura cristalina desta).

Ambas as fases de magnetite e ilmenite são soluções sólidas, sobressaturadas nos minerais exsolvidos ou precursores (no caso da ulvospinela).

Filipovic *et al.*, 1984, referem (cf tabela 1) a *composição mineralógica* média.

Tabela 1. Composição Mineralógica do Minério Maciço (em % de volume), segundo Filipovic *et al.*, 1984, Citado em Gonzalez 2001, 2005

	Observado	Grão Primário	Estimado
Ilmenite I	16	Ilmenite I	16
Ilmenite II Lamelar	19	Magnetite I	
Magnetite Residual	20	Magnetite I	
Magnetite Oxidada	28	Magnetite I	79
Minerais de ganga	12	Magnetite I	
Outros	5	Restos de rochas encaixantes	5

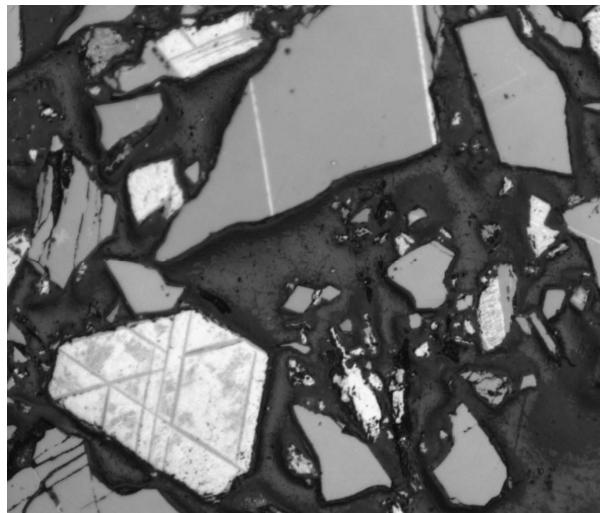


Figura 6 Fragmentos de ilmenite I e magnetite I num concentrado (microscópio óptico com aquisição de imagem). Aspecto típico das exsoluções em ambas os tipos de grão. (in Gonzalez 2005)

Nos peletes oxidados, os grãos derivados da ilmenite primária, designados como **ex-ilmenite I** ou ilmenite I transformada mantêm algo do aspecto inicial, comparativamente a esta com superfície menos homogênea, e ocasionalmente, (as mesmas) exsoluções paralelas de hematite (figuras 7 e 9).

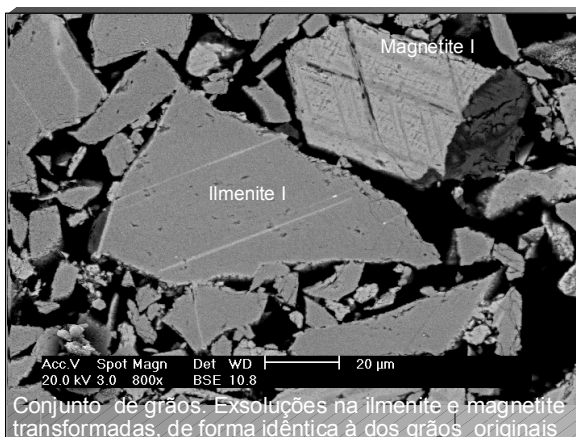


Figura 7 Grãos de ilmenite e magnetite primárias, já transformadas por oxidação. Gonzalez 2005

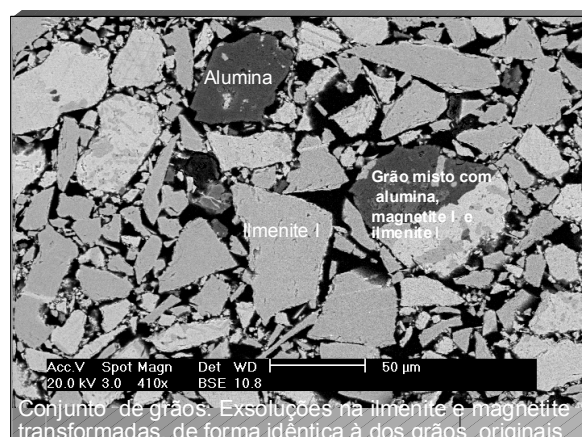


Figura 8 Diversos tipos de grãos Gonzalez 2005

Nos concentrados iniciais (figura 6), pode geralmente ser identificada com o analisador, a os nicóis quase cruzados, mostrando extinção a diferentes posições da platina, pela sua forte anisotropia e ocorrência de maclas. As maclas surgem tanto na ilmenite como na hematite [não observadas nas presentes amostras, com hematite formada a baixa temperatura, mas são referidas, por exemplo, por Monsén (1992)]. No processo de oxidação da ilmenite, a hematite formada fica retida na estrutura; a micro-estrutura é algo alterada, contudo, dada a precipitação do rútilo.

A oxidação dos grãos observa-se ao microscópio electrónico pelo aparecimento duma orla mais clara dos grãos, de profundidade constante e independente da forma da interface com o gás. A microanálise é difícil dada a pequena espessura. Nell 2000 refere ser óxido de ferro puro, que indica como *hematite formada* por difusão de iões do interior, e cita um autor que sugere tratar-se de magnetite. Corresponde à orla que Rao et al 1974 interpreta como hematite.

Nos grãos de ex-ilmenite I, observam-se nas figuras 7 e 9 lamelas de hematite, exsolvidas

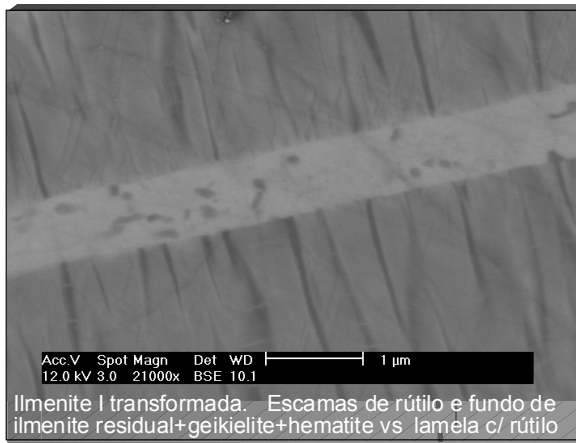


Figura 10 Grãos de ex- ilmenite; escamas de rútilo muito finas, e uma lamela de hematite Gonzalez 2005

multiplicidade de escamas escuras num fundo mais claro, embora não tanto como a hematite (figura 10).

Por descrições semelhantes, as escamas foram interpretadas como sendo de rútilo (supostamente, pois são demasiado pequenas para análise pontual ou mapeamento de elementos). A presença significativa de rútilo fora identificada por DRX, mas não se havia encontrado uma correspondência estrutural.

Na **ex-magnetite I**, na microestrutura (figura 11) as lamelas de ilmenite II parecem persistir, aparentemente alinhadas, embora não tão bem definidas, com contornos irregulares. Tal poderia ser mesmo admissível nas

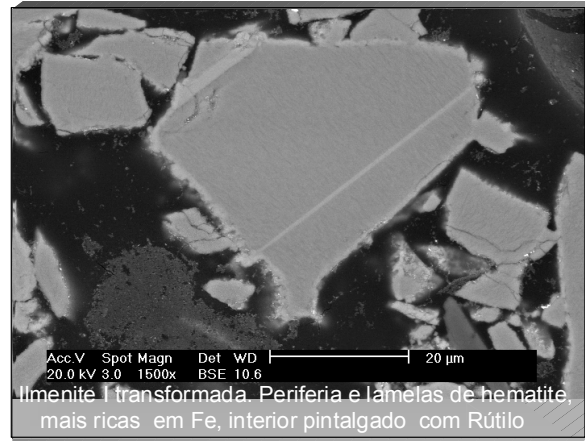


Figura 9 Grãos de ex- ilmenite lamelas e periferias de hematite; interior com manchas Gonzalez 2005

já na ilmenite I, e que ainda são um indício para a sua identificação. Os pormenores anteriores e os das imagens a baixa ampliação da ex-magnetite I. distinguem-se aliás ao microscópio óptico. A orla de óxido de ferro envolve uma zona interior destes grãos de ex-ilmenite I, menos uniforme que a da ilmenite inicial, mas agora com manchas. A natureza destas manchas a princípio atribuiu-se a deficiente preparação da amostra, repetindo-se o processo de polimento sem as remover.

O microscópio electrónico a ampliações elevadas resolve estas manchas numa mais claro, embora não tanto como a hematite

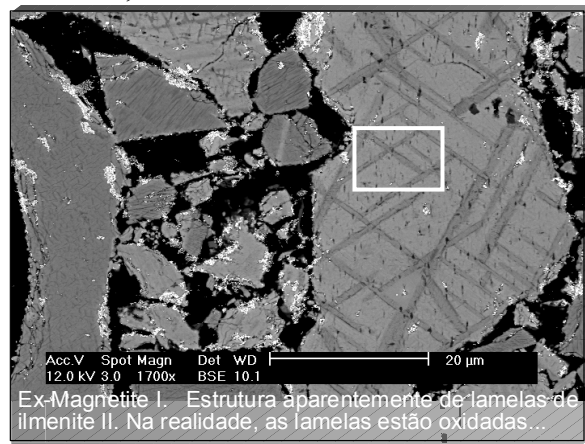


Figura 11 Grãos de ex-magnetite I e ilmenite II oxidada Gonzalez 2005

primeiras etapas de oxidação, mas não nas finais. Novamente, uma maior ampliação mostra, nas figuras 12 e 13, que as lamelas de ilmenite II seguiram por oxidação o esquema geral da ilmenite, com precipitação de rútilo em escamas, neste caso paralelas, e transversais às lamelas, e redissolvem a hematite formada com os elementos inertes como o Mg, como uma fase residual.

As escamas de rútilo formadas nos locais onde havia ilmenite, formam uma microestrutura implantada sobre as antigas lamelas e dão a aparência destas subsistirem.

O aparente alinhamento mantém-se enquanto o teor de ilmenite (ainda) reagente é suficiente

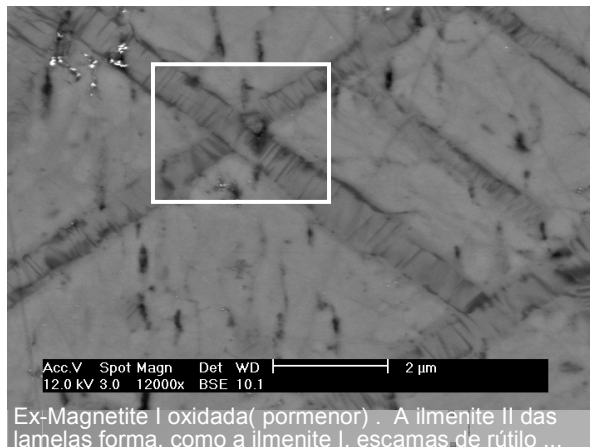


Figura 12 Grãos de ex- magnetite; escamas de rútilo finas, em lamelas de ilmenite em oxidação Gonz.2005

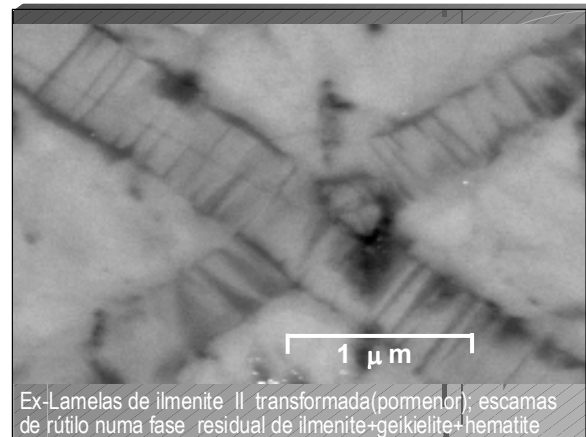


Figura 13 Lamelas de ex- ilmenite II; escamas de rútilo muito finas, e sua orientação; ampliação da imagem anterior Gonzalez 2005

para a solução sólida ser diferente da hematite de fundo.

Quando a diferença é pequena, o alinhamento deixa de ser visível.

É importante notar que as escamas de rútilo permanecem alinhadas e paralelas, dentro do que eram as antigas lamelas de ilmenite II, dando a tal configuração global que a baixa resolução se confunde com a lamela inicial, nesta altura já oxidada.

No início da redução, como se verá, dá-se a recombinação deste rútilo finamente dividido, com formação de ilmenite, pelo que as lamelas de ilmenite II de certo modo renascem, embora agora sem a orientação precisa conferida por uma estrutura cristalina única.

A presença de **outros grãos minoritários** neste concentrado deve ser assinalada. Em particular os que contêm componentes com maior importância.

Alumina (ex-diásporo) aparece nos peletes com frequência, em grãos muito escuros, por vezes com zonamento tendo um núcleo diferente.

São também relativamente frequentes grãos de quartzo e material silico-aluminoso, provavelmente de restos das rochas encaixantes originais ou produtos meteorizados.

CONCLUSÕES

A peletização é importante pelas suas ligações com a beneficiação e pre-redução, possibilitando vantagens a ambas as operações.

As principais reacções químicas que ocorrem são oxidações e desidroxilação. Como possível de desidroxilar, apenas foi identificado o diásporo, por DRX, sendo provável a presença de goetite.

Por DRX observa-se que ocorrem oxidações de magnetite a hematite, de ilmenite a hematite e rútilo, (a última observou-se como exclusiva a temperaturas inferiores a 875°C). A formação de pseudobrookite, directamente a partir de ilmenite ou a partir de hematite e rútilo, observou-se a temperaturas acima de 875°C, mais marcada acima de 930 °C. A oxidação inicial de ulvospinela a hematite e ilmenite, teoricamente prevista, não foi observada, provavelmente por estar quase completa.

Estas reacções foram observadas por microscopia, nos grãos de magnetite I e ilmenite I. Na primeira as lamelas de ilmenite II oxidam-se com formação de hematite e escamas finas de rútilo locais, que dão um aspecto global semelhante, na forma, à morfologia de origem. Na ilmenite I, por oxidação forma-se ainda uma orla de óxido de ferro quase puro.

REFERÊNCIAS

- Borowiec, K, Rosenqvist, T, "Phase Relations and Oxidation Studies in the System Fe-Fe₂O₃-TiO₂ at 700-1100°C ", Scandinavian Journal of Metallurgy, 10, (1981), pp 217-224
- Folmo, G., Rierson, DW, "Ilmenite Direct Reduction Project in Norway Using the GRATE-CAR™ Process", AIME Conference, 1992
- Gonzalez, LM, Forssberg, KSE, "Utilization of a vanadium-containing titanomagnetite: possibilities of a beneficiation-based approach", Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C, Vol 110, 2001, p. C63-C72
- Gonzalez, LM, "Contribuição para o Estudo de Utilização de Titanomagnetite de Tete. Dimensionamento de Reactor de Pré Redução", Tese de Doutoramento em Engenharia de Produção e Sistemas, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2005
- Gonzalez, LM, Marques, JM, Coelho, MC, Oliveira, PN, Romero, JJB, "Alguns Aspectos Relevantes para a Utilização de Titanomagnetites de Tete, Moçambique", CLME 2008, 5º Congresso Luso Moçambicano de Engenharia, Maputo, 2-4 de Setembro, 2008
- Grey, IE, Jones, DG, Reid, AF, " Reaction Sequences in the Reduction of Ilmenite: 1- Introduction", Trans..Inst. Min. Metall., September 1973, p C151-C152
- Grey, IE, Reid, AF, " Reaction Sequences in the Reduction of Ilmenite: 3- Reduction in a commercial rotary kiln; an X-Ray diffraction study", Trans..Inst. Min. Metall., March 1974, p C39-C46
- Grey, I.E., Reid, A.F., Jones, D.G., "Reaction Sequences in the Reduction of Ilmenite: 4- Intrepretation in Terms of the Fe-Ti-O and Fe-Mn-Ti-O Phase Diagrams", Trans. Inst. Min. Metall., 84, March 1974. pp C 105-C 111
- Jasna, B,"Phase Transformations in na ilmenite concentrate Roasted in the Temperature Range from 400°C to 1200°C" Proc., Conf. App. Crystallogr., 2, 1978, (1979), p. 776-787
- Monsen, B, "Iron Ore Concentrates-Oxidation and reduction", Ph.D.Thesis, Division of Metallurgy, The Norwegian Institute of Technology, The University of Trondheim, 1992
- Nell, J., "An overview of the phase -chemistry involved in the production of high-titania slag from ilmenite feedstock", The Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, January/February 2000, pp 35-44
- Rao, B., Rigaud, "Oxidation of Ilmenite and the Product Morphology ", High Temperature Science, 6, (1974), p. 323-341, 1974
- Tangstad, M, 1988b, "Oksydasjon og Reduksjon av Ilmenitt Pellets", NTH, Trondheim, 1988