

1 Introdução

Com o fenomenal desenvolvimento tecnológico dos últimos anos, notadamente nas indústrias ditas de “alta-tecnologia” (*high-tech industries*), como a aeroespacial, a eletrônica, a bélica e a nuclear, os *metais refratários* (que se distinguem pelo alto ponto de fusão e propriedades mecânicas e térmicas superiores), entre eles o vanádio, o nióbio, o tântalo e o titânio, têm assumido papel de extrema importância na obtenção de materiais com características especiais (tolerância a carga, resistência em alta temperatura etc.) para aplicação estrutural e usos diversos.

O tema básico do presente estudo é a cloração do pentóxido de vanádio, que vem a ser, não apenas o intermediário-chave na cadeia da metalurgia extrativa do vanádio, como o seu composto mais importante, em termos de tonelagem e de valor econômico, no âmbito da indústria química.

Nesse contexto, este capítulo oferece inicialmente um perfil técnico-econômico do metal vanádio, focalizando de maneira ampla sua descoberta, ocorrência, reservas mundiais, aplicações, principais rotas de processamento dentro da Metalurgia Extrativa e outras informações relevantes. Segue-se uma abordagem genérica das reações de carbocloração dos óxidos metálicos e respectivos agentes de cloração e, finalmente, a apresentação das propriedades e aplicações mais importantes dos principais compostos envolvidos na cloração do pentóxido de vanádio.

1.1. Perfil técnico-econômico do vanádio

1.1.1. Histórico^(1, 2,3,4)

Em 1801, Manuel Del Rio declarou ter descoberto, numa amostra de um minério de chumbo, na localidade de Zimapán, no México, um novo metal, com propriedades químicas muito semelhantes às do cromo, e ao qual deu o nome de “eritrônio” (do grego, “erythros”, que significa vermelho), uma vez que este gerava sais vermelhos quando tratado com ácidos. Contudo, quatro anos mais tarde, Del Rio mudou sua opinião, aceitando a explicação (incorreta) do químico francês Collet-Descotils de que o minério por ele estudado era realmente um cromato básico de chumbo.

Em 1830, N. G. Sefström descreveu um novo metal que havia isolado de um minério de ferro proveniente de minas localizadas perto de Taberg, na Suécia, e batizou-o de “vanádio”, em honra de “Vanadis”, deusa nórdica da beleza, devido às cores variadas e brilhantes de seus compostos. Pouco tempo depois, em 1831, F. Wöhler estabeleceu a identidade entre o eritrônio de Del Rio e o vanádio de Sefström. O químico J. J. Berzelius, também em 1831, investigou o vanádio mas julgou erradamente que o óxido de vanádio era o metal. Finalmente, em 1867, o vanádio foi isolado numa forma razoavelmente pura, através da redução de seu cloreto com hidrogênio, por H. E. Roscoe, que foi também o responsável por muito do trabalho pioneiro sobre este elemento.

1.1.2. Ocorrência e reservas mundiais^(2,3,5,6)

O vanádio está presente na crosta terrestre numa concentração média estimada em 150 ppm (0,0150% ou 150 g/t), que o torna o décimo-nono elemento em ordem de abundância (entre o zircônio, 162 ppm, e o cloro, 126 ppm). É mais abundante que o cobre e o níquel e, dentre os metais de transição, só é ultrapassado em abundância pelo ferro, titânio, manganês e zircônio.

O vanádio é largamente encontrado, embora escassamente distribuído, na natureza: forma mais de 60 minerais diferentes, com poucos depósitos contendo mais que 1 ou 2% de vanádio, sendo esses minerais em sua maioria obtidos como coprodutos, juntamente com outros materiais. Alguns dos mais importantes minerais de vanádio são listados na Tabela 1.

Mineral	Composição química	Minérios e localização dos depósitos
Magnetitas	$[\text{Fe,Ti}]_2^{2+} \cdot [\text{Fe,V,Ti,Al}]^{3+}\text{O}_4$	Titanomagnetitas: África do Sul, CEI (Urais), China, EUA, Austrália, Índia e Canadá.
Tyuyamunita	$\text{Ca}[(\text{UO}_2)_2/\text{V}_2\text{O}_5] \cdot 5-8\text{H}_2\text{O}$	Minérios urânio-vanádio: EUA (Utah, Colorado e Arizona), CEI (Quirguízia, Tadjiquistão e Uzbesquistão) e Austrália.
Carnotita	$\text{K}_2[(\text{UO}_2)_2/\text{V}_2\text{O}_5] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	
Fosfatos	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4/\text{VO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$	Rochas vanadiferrosas: EUA (Idaho).
Vanadinita	$\text{Pb}_2[\text{Cl}/(\text{VO}_4)_3]$	Vanadatos de chumbo-zinco-cobre: Namíbia, México, Argentina e EUA.
Descloizita	$(\text{Pb,Zn,Cu})[\text{OH}/\text{VO}_4]$	
Patronita	VS_4	Asfaltitos: Peru (Mina Ragra, esgotada).

Tabela 1 – Importantes minerais de vanádio^(2,5)

Atualmente, as magnetitas titanoferrosas representam a maior fonte comercial do vanádio, com grandes depósitos na África do Sul (depósito de Bushveld), Comunidade dos Estados Independentes – CEI (depósito de Katschkanor, na região dos Urais), China (província de Sichwan) e nas regiões leste e oeste dos Estados Unidos.

No depósito de Bushveld, tais magnetitas têm uma concentração de 1,4 a 1,6% de pentóxido de vanádio (V_2O_5), que pode, em casos excepcionais, chegar a 2,4%.

São também fontes relevantes os minérios de urânio-vanádio (uraninita, carnotita, tyuyamunita), que ocorrem no Platô do Colorado (sudoeste do Colorado e leste de Utah, nos EUA), com uma concentração de 0,85 -1,4% de V_2O_5 , e dos quais existem reservas importantes em países da CEI e na região oeste da Austrália (Yeellirie).

Uma fonte adicional de algum significado é representada pelos depósitos marinhos sedimentares de fosfatos contendo vanádio, localizados no estado de Idaho, nos Estados Unidos.

A partir de 1980, uma nova fonte secundária de vanádio adquiriu importância: os resíduos do processamento de óleo mineral. Muitos tipos de petróleo bruto contêm vanádio em quantidades que variam de cerca de 10 ppm (Oriente Médio) a 1400 ppm (Venezuela).

No refino do petróleo, o vanádio fica retido nos resíduos das caldeiras e nas cinzas de incineração em concentrações que variam de poucos pontos percentuais a 40%, e em quantidade tal que o potencial de vanádio dessa fonte excede de muito o presente consumo mundial.

Por outro lado, com a legislação ambiental na área de petróleo tornando-se cada vez mais restritiva, a emissão e a deposição desses resíduos será drasticamente reduzida, estimulando o seu uso futuro como fonte de obtenção do vanádio.

Entre as fontes menos importantes de vanádio, vale citar os sais residuais da produção de bauxita e os catalisadores (especialmente, aqueles à base de pentóxido de vanádio) remanescentes de processos das indústrias química e petroquímica.

A extração do vanádio de todas as matérias-primas atualmente disponíveis, com exceção do processamento direto das titanomagnetitas, está sempre acoplada com a produção de outros metais ou energia. As fontes mais importantes são apresentadas na Tabela 2.

Matéria-prima	Faixa de teor de vanádio	Produto acoplado	Subproduto de vanádio
Titanomagnetitas	0,02 – 0,36 %	Ferro/aço	Escória de vanádio
Óleos minerais	0,001 – 0,14 % (petróleo)	Energia/petroquímicos	Cinzas e resíduos de queima
Minérios de urânio-vanádio	0,06 – 0,50 %	Urânio	Resíduo químico
Vanadatos de chumbo	0,06 %	Chumbo, zinco	Escória de vanádio
Fosfatos	0,08 – 0,46 %	Fósforo	Ferrofósforo
Bauxita	–	Alumina	Sais de vanádio

Tabela 2 – Produção de vanádio como subproduto⁽⁵⁾

As reservas mundiais de vanádio economicamente exploráveis são estimadas em 38 milhões de toneladas de vanádio contido. Na mesma base, a demanda e a produção mundial no ano de 2004 atingiram valores estimados em 90.700 t e 83.900 t, respectivamente. Entre os países produtores, destacam-se a África do Sul, os Estados Unidos, a China, a Rússia, o Cazaquistão e a Austrália, regiões que também detêm as maiores reservas mundiais do metal ⁽⁶⁾.

1.1.3. Usos^(5,6,7)

As aplicações metalúrgicas responderam, em 2004, por cerca de 95% do consumo de vanádio nos Estados Unidos⁽⁶⁾, com destaque para o seu uso como agente de liga para o ferro e o aço, aos quais confere propriedades mecânicas e de resistência especialmente interessantes, incluindo-se neste caso os seguintes tipos de produtos: aço carbono, aço de liga integral, aço de alta-resistência e baixa-liga (*high-strength low-alloy*, HSLA), aços inoxidável e resistente a temperatura e ferro fundido.

Atualmente, o uso do aço de alta-resistência e baixa-liga (*high-strength low-alloy*, HSLA), em adição ao do aço de têmpera contendo vanádio, tem-se espalhado por muitas indústrias, incluindo equipamentos de construção, gasodutos e oleodutos, produtos relacionados a transportes (trilhos de aço), varetas de solda, ferramentas metálicas e magnetos permanentes.

Nos Estados Unidos, do total de 3.820 t de V, consumido em 2004 na produção de aços, cerca de 34% foram utilizados em aço carbono, 30% em HSLA, e 28% em aço de liga integral, sendo os restantes 8% consumidos em aço carbono e outras especialidades ⁽⁶⁾. As formas mais comuns de adição do vanádio ao aço são como ferrovanádio – FeV (definida como uma liga-mestra com uma concentração de vanádio de, pelo menos, 50% em peso), carbetos e carbonitreto de vanádio.

Nos aços de têmpera, o vanádio é usado para conferir capacidade de endurecimento e resistência a temperatura em HSLA e em aço carbono, atuando como um agente de refino de grão. Os aços contendo vanádio empregados em ferramentas resistem à abrasão em alta temperatura e, como a adição de vanádio melhora a relação peso/resistência do aço, ela aumenta também as características de tolerância a carga.

As superligas e ligas não-ferrosas do vanádio representam o seu segundo uso mais importante nos Estados Unidos (cerca de 4% do consumo em 2004). Em adição às superligas de vanádio baseadas em níquel, utilizadas particularmente na indústria aeroespacial, as suas ligas especiais com o titânio e o alumínio têm uso principal na construção de aeronaves, seja em componentes com tolerância a carga e em dispositivos de fixação, seja nas turbinas a gás, nos discos de compressores e nas palhetas de motores a jato, não se registrando ainda substituto para o vanádio nessas aplicações. O uso das ligas especiais do vanádio com o titânio e o alumínio também vem despertando crescente interesse em outros setores industriais, a exemplo das usinas de força e das indústrias naval e nuclear.

Entre as outras ligas não-ferrosas do vanádio, cabe mencionar as do tipo ZrV_2 , onde o vanádio é substituído parcialmente por níquel, cromo, titânio ou magnésio, usadas como materiais de eletrodo em baterias do tipo hidreto metálico/hidróxido de níquel. Por outro lado, materiais baseados em ligas de Zr-V-Mn ou Zr-V-Fe, cujo principal componente é o zircônio e que contêm até 30% de vanádio, estão sendo utilizados em processos de purificação de gás e de geração de vácuo.

Os setores químico, de cerâmica e de catalisadores responderam pelo 1% restante do mercado americano de vanádio em 2004. Aqui, há destaque para o uso como catalisador do pentóxido de vanádio (V_2O_5), o qual é empregado principalmente nos processos de refinaria e de fabricação do ácido sulfúrico e, em menor escala, na obtenção de outros produtos químicos (anidridos ftálico e maleico, antraquinona, ácido adípico etc.). É também utilizado na síntese do oxitricloreto de vanádio ($VOCl_3$), tricloreto de vanádio (VCl_3) e tetracloreto de vanádio (VCl_4), que encontram aplicação na preparação de sistemas catalíticos de polimerização de termoplásticos (por exemplo, o polipropileno e o polietileno linear) e de borrachas sintéticas (por exemplo, os elastômeros de eteno-propeno-dieno ou EPDM), sendo também matérias-primas para diversos compostos orgânicos de vanádio. Outros usos do pentóxido de vanádio incluem: cerâmicas, pigmentos, inibidor de corrosão em processos de absorção de CO_2 ,

catodo de baterias recarregáveis de lítio, anti-estáticos em material fotográfico, absorvente de ultra-violeta em vidros especiais e como matéria-prima na fabricação de carbetos, nitretos, carbonitretos, silicetos, vanadatos e sais de vanádio.

O vanádio é disponível em diversas formas, incluindo folha metálica, grânulos, pó, barras, varas e torneados, como mostrado na Figura 1.

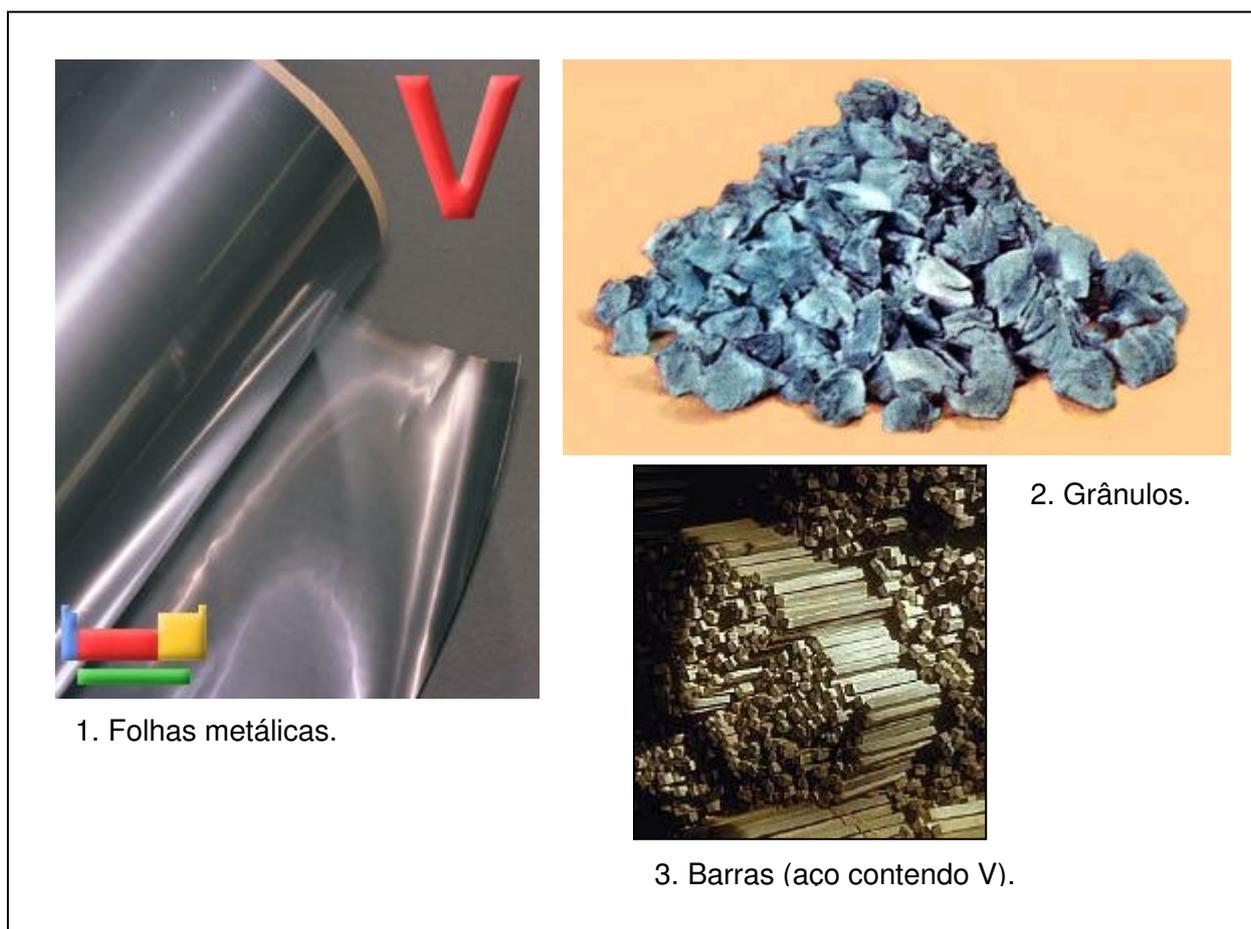


Figura 1 – Formas de apresentação do vanádio^(1,7)

1.2. Rotas de processamento da metalurgia extrativa do vanádio^(5,8)

A Figura 2 apresenta um esquema bastante simplificado das principais rotas de processamento no âmbito da metalurgia extrativa do vanádio, contemplando desde as respectivas fontes de matérias-primas (minérios, seus concentrados e resíduos, escórias obtidas de minérios e fontes secundárias, como os óleos minerais e catalisadores descartados industrialmente) até os diferentes produtos de vanádio.

Para oferecer uma idéia geral da natureza das operações envolvidas no processamento das matérias-primas até o estágio da produção de óxidos de vanádio (especificamente, o pentóxido de vanádio – V_2O_5 , e, em menor grau, o trióxido de vanádio – V_2O_3), serão apresentados, a seguir, exemplos de processos aplicados a algumas das mais importantes fontes comerciais do vanádio, a saber: titanomagnetitas, minérios de urânio-vanádio, com ênfase na carnotita, cinzas de combustão de óleos minerais pesados e catalisadores de vanádio descartados industrialmente.

As titanomagnetitas devem ser reconhecidas como minérios multicomponentes que são trabalhados simultaneamente para ferro, titânio e vanádio. O minério, contendo cerca de 1,5 – 1,7% de V_2O_5 , é parcialmente pré-reduzido em grandes fornos rotatórios aquecidos com carvão pulverizado. Uma redução adicional é então realizada num forno de arco elétrico, obtendo-se um ferro fundido (*pig iron*), contendo cerca de 1,4% de V_2O_5 . Este material é soprado com oxigênio para produzir uma escória rica em vanádio numa concentração correspondente a cerca de 25% de V_2O_5 .

O principal processo usado hoje em dia para produzir o pentóxido de vanádio de uma escória desse tipo é a **ustulação alcalina**¹ (*salt roasting*), seguida de lixiviação com água. O mesmo processo, com algumas pequenas diferenças, é também empregado para processar diretamente concentrados de titanomagnetitas (contendo, tipicamente, mais de 1% de vanádio) e resíduos contendo vanádio.

A escória é primeiramente moída para separar os grânulos de ferro, adicionada de sais de metal alcalino e ustulada em fornos rotatórios para formar hexavanadato de sódio ($Na_4V_6O_{17}$), também conhecido como *red cake*, o qual é solúvel em água. O produto é lixiviado com água, com a adição de sais de amônio (sulfato e cloreto de amônio), precipitando na forma cristalina o metavanadato de amônio (AMV) ou o polivanadato de amônio (AHV), consoante o procedimento seja realizado em meio alcalino ou em meio ácido (correção do pH com ácido sulfúrico). Estes vanadatos podem ser decompostos e fundidos para produzir pentóxido de vanádio com 98-99% de pureza. Alternativamente, o metavanadato de amônio (AMV) pode ser purificado através da formação de pasta fluida com água, seguida de acidificação com ácido sulfúrico, sendo finalmente reprecipitado e recristalizado pela adição de hidróxido de amônio.

¹ O termo “ustulação alcalina” é comumente empregado para designar a ustulação na presença de sais de metal alcalino, sendo este o seu significado aqui, como no restante do texto.

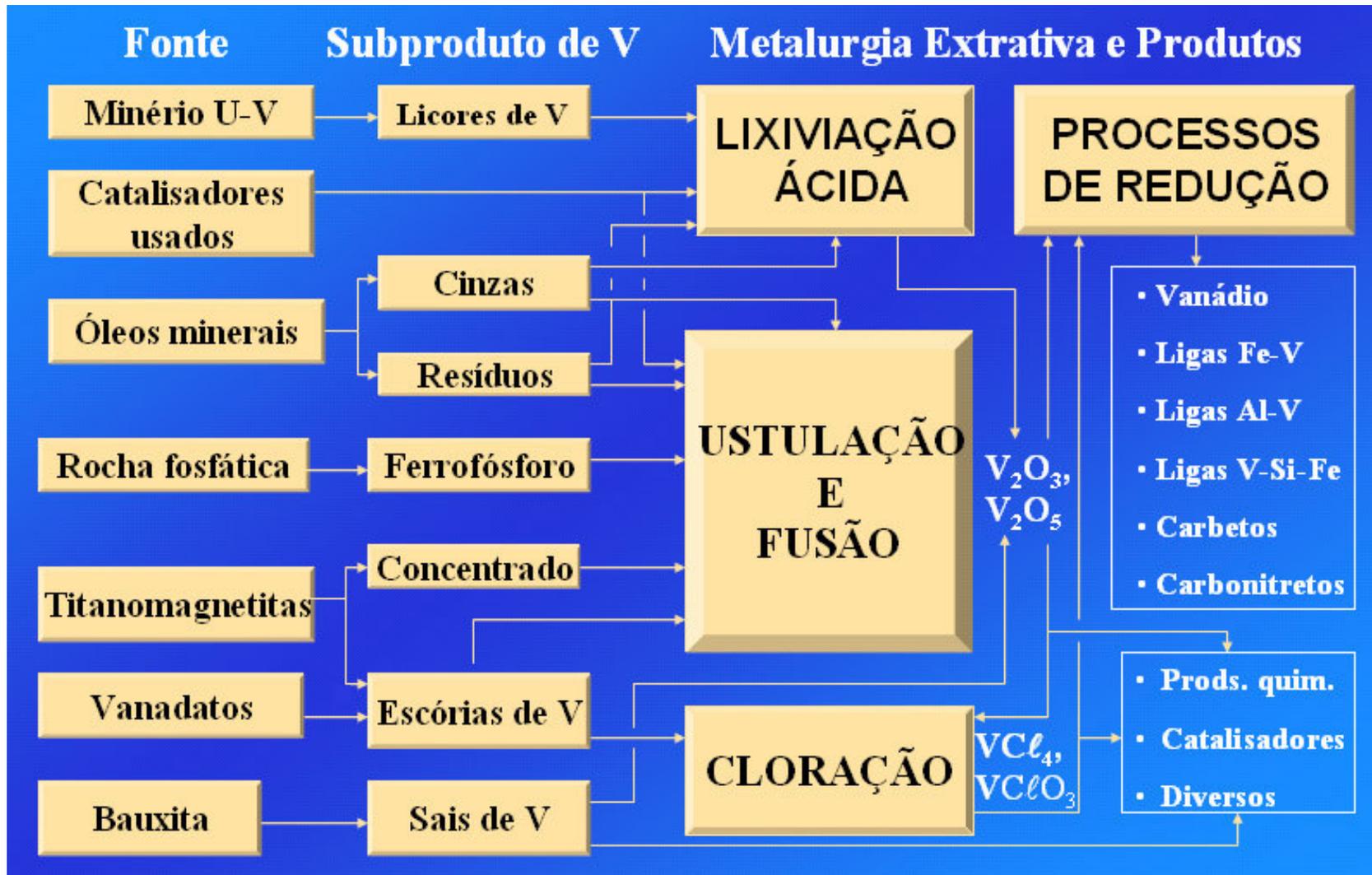


Figura 2 – Rotas de processamento de fontes de vanádio^(5,8).

Por decomposição e fusão a 450 °C do AMV recristalizado, pode-se então produzir pentóxido de vanádio de alta pureza (99,5%).

Até a introdução de outras fontes de vanádio, a recuperação de vanádio do processamento de minérios de urânio, em particular, da carnotita, representava a principal fonte de produção do metal. Os processos conhecidos atualmente para o processamento dessa fonte podem ser divididos em duas grandes linhas, a seguir detalhadas:

- **Ustulação alcalina-lixiviação**

Este método envolve inicialmente a mistura do minério com um sal de sódio – cloreto de sódio (NaCl), carbonato de sódio (Na₂CO₃), bicarbonato de sódio (NaHCO₃), sulfato de sódio (Na₂SO₄), ou uma combinação destes, e a sua ustulação, sob atmosfera oxidante, em fornos rotatórios, para produzir polivanadatos, solúveis em água. Esta operação pode ser sucedida por dois diferentes circuitos: lixiviação com água e lixiviação com álcali a quente. O primeiro caso compreende, ou a lixiviação com água do produto calcinado, com resfriamento a ar, ou a lavagem (*quench*) do produto quente com água, ocorrendo a transferência do vanadato para a fase aquosa, com uma recuperação de vanádio de 65-85%. A extração adicional de vanádio é obtida pela lixiviação ácida do resíduo de urânio com vanádio retido, que permite dissolver 90-95% do urânio com 50% ou mais do vanádio remanescente, seguida de neutralização para precipitar uma lama, contendo o total de urânio e de vanádio, a qual, após filtração, é redissolvida por aquecimento com ácido sulfúrico e um oxidante (clorato de sódio, NaClO₃). O licor ácido é novamente neutralizado com uma base, sendo o vanádio separado na forma de vanadato de ferro, que pode seguir para ustulação ou servir como fonte de vanádio, e o licor remanescente processado para a recuperação do urânio. No segundo caso, citado, o licor do *quench* é processado por adição de ácido sulfúrico e ebulição da solução para remover dióxido de carbono, dando um precipitado de carnotita sintética, que é utilizado para a recuperação de urânio. O filtrado do *quench* é então processado por lixiviação ácida e demais procedimentos descritos anteriormente para a extração adicional de vanádio.

- **Lixiviação ácida**

Este processo envolve a extração simultânea do vanádio e do urânio da carnotita por lixiviação direta do minério bruto com ácido sulfúrico. O licor da lixiviação é submetido a uma operação de troca iônica para separar uma solução contendo urânio e uma outra contendo vanádio.

O vanádio das soluções ricas neste metal, oriundas de qualquer das duas linhas de processo acima referidas, é extraído como hexavanadato de sódio ($\text{Na}_4\text{V}_6\text{O}_{17}$) pela adição de ácido sulfúrico, para ajustar o pH entre 2 e 3, e de clorato de sódio (NaClO_3), para converter todo o vanádio presente ao estado pentavalente. O produto (*red cake*) é finalmente transformado em pentóxido de vanádio através de lixiviação ácida e procedimentos complementares anteriormente descritos no tratamento das titanomagnetitas.

As cinzas de combustão de óleos minerais pesados podem ser processadas por quatro diferentes métodos, descritos a seguir:

- **Fusão parcial**

A fusão parcial produz ferro-níquel e uma escória de vanádio, que é fundida adicionalmente a ferrovanádio.

- **Fusão**

Neste processo, a cinza é primeiramente tratada para separar carbono e enxofre e então fundida para produzir um metal contendo níquel e vanádio. O material é soprado com oxigênio, formando ferroníquel e escória de vanádio, da qual este metal pode ser recuperado através da produção de ferrovanádio ou pelo processo de ustulação alcalina-lixiviação.

- **Ustulação alcalina-lixiviação**

Este método envolve a remoção inicial do carbono da cinza por queima, seguida de ustulação alcalina e lixiviação cáustica, obtendo-se um licor, que é processado para a recuperação de vanádio, e um resíduo sólido, que é destinado à recuperação de níquel.

- **Redução - lixiviação amoniacal - ustulação alcalina**

Tal processo difere do anterior no aspecto em que o conteúdo de níquel é removido por redução com hidrogênio e lixiviação amoniacal. O licor desta operação é tratado para a recuperação de vanádio.

Já os catalisadores de vanádio descartados industrialmente são processados por **lixiviação ácida** através do tratamento com ácido sulfúrico, freqüentemente sob condições redutoras com a adição de SO_2 . Depois da separação das impurezas, a solução é oxidada, e vanadatos ou polivanadatos são precipitados pela neutralização parcial do ácido. Como no caso do processamento de titanomagnetitas, estes vanadatos podem ser decompostos e fundidos para produzir o pentóxido de vanádio.

O pentóxido de vanádio é processado nas *commodities* de vanádio através dos processos bem-conhecidos de redução, os quais não serão detalhados aqui, compreendendo, entre os mais importantes, os seguintes:

- **Redução metalotérmica**, usando cálcio, magnésio ou alumínio, para produzir diferentes tipos de vanádio metálico, ligas mestras de vanádio-alumínio (VAI) e ligas de ferrovanádio (FeV).
- **Redução eletroaluminotérmica**, onde, em sequência à redução com alumínio, a liga VAI obtida é refinada em um segundo estágio, usando um forno de indução a vácuo ou um forno de fusão por feixe de elétrons, para produzir ligas de ferrovanádio (FeV) com baixa ou alta concentração de vanádio.
- **Redução silicotérmica**, para produzir ligas de vanádio-silício-ferro.
- **Redução carbotérmica**, usando carbono no estado sólido, para produzir carbetos e carbonitreto de vanádio.

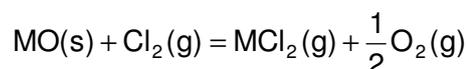
Adicionalmente, o pentóxido de vanádio pode ser submetido a cloração para a obtenção de haletos, aí incluídos aqueles utilizados em catalisadores, e também a outras reações específicas objetivando a preparação de sais e compostos químicos diversos.

1.3. Carbocloração de óxidos metálicos e agentes de cloração

O uso do cloro na metalurgia extrativa foi encorajado a partir dos trabalhos realizados na antiga URSS e nos EUA nas décadas de 1930 e 1940. Certas propriedades dos cloretos metálicos, tais como baixo ponto de fusão, alta volatilidade e elevada reatividade do cloro com os óxidos metálicos na presença de um agente redutor, propiciaram a base para esse desenvolvimento.⁽⁹⁾

Na metalurgia extrativa do vanádio, as matérias-primas são pentóxido de vanádio ou ferrovanádio e carbono, levando finalmente à formação de VCl_2 e VCl_3 , os quais, por redução com magnésio, produzem vanádio tipo esponja.^(8,10)

A reação de cloração dos óxidos metálicos pode ser representada, em sua forma mais simples, pela seguinte equação geral:



A variação da energia livre padrão de Gibbs (ΔG°) desta reação é positiva para uma família apreciável de óxidos metálicos (TiO_2 , ZrO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , V_2O_5 , Al_2O_3 etc.), sendo o processo viabilizado termodinamicamente pela incorporação

do agente redutor, que é capaz de combinar-se com o gás oxigênio liberado, deslocando o equilíbrio no sentido da formação dos produtos desejados.

O principal agente redutor utilizado é o carbono, surgindo daí o conceito de carbocloração⁽¹¹⁾:

As reações de cloração (de óxidos) que envolvem a presença de carbono na reação, em quaisquer de suas formas – C(s), CO(g), CCl₄(g), C₂Cl₆(g) – são conhecidas como reações de carbocloração.

Quanto aos agentes de cloração empregados para óxidos metálicos, dividem-se em gases e sólidos, constando os principais da Tabela 3.

Agente de cloração	Reação (equação geral mais simples)
<u>Gases:</u>	
• Cl ₂ (g)	MO + Cl ₂ = MCl ₂ + 1/2O ₂
• Cl ₂ (g) + C(s)	MO + Cl ₂ + 1/2C [C] = MCl ₂ + 1/2CO ₂ [CO]
• Cl ₂ (g) + CO(g)	MO + Cl ₂ + CO = MCl ₂ + CO ₂
• HCl(g)	MO + 2HCl = MCl ₂ + H ₂ O
• COCl ₂ (g)	MO + COCl ₂ = MCl ₂ + CO ₂
• CCl ₄ (g)	MO + 1/2CCl ₄ = MCl ₂ + 1/2CO ₂
<u>Sólidos:</u>	
• NaCl(s)	MO + 2NaCl + SO ₃ = MCl ₂ + Na ₂ SO ₄
• CaCl ₂ (s)	MO + CaCl ₂ + SiO ₂ = MCl ₂ + CaSiO ₃

Tabela 3 – Agentes de cloração de óxidos metálicos⁽¹²⁾.

1.4. Compostos envolvidos na cloração do pentóxido de vanádio

A tabela 4 oferece uma lista das propriedades e aplicações mais importantes dos principais compostos envolvidos na cloração do pentóxido de vanádio.^(5, 13, 14, 15, 16, 17)

Quanto aos usos aí assinalados, são nomeadamente os seguintes:

- (1) Catalisadores de síntese ou de polimerização.
- (2) Cerâmicas, pigmentos e vidros especiais.
- (3) Inibidores de corrosão, baterias de lítio e antiestáticos em fotografia.
- (4) Preparação de compostos químicos.
- (5) Indústria têxtil (mordente).
- (6) Agente redutor.
- (7) Produção de vanádio tipo esponja.

Composto	Nome, aparência e cor	Ponto de Fusão (°C)	Ponto de Ebulição (°C)	Densidade (g/cm ³)	Usos
V ₂ O ₅	Pentóxido de vanádio. Cristais amarelos-marrons.	670	1750 (decompõe)	3,357	(1), (2), (3), (4)
VOCl	Oxicloreto de vanádio. Pó amarelo-marrom.	–	127	2,824	–
VOCl ₂	Oxidicloreto de vanádio. Cristais verdes deliçescentes.	380 (decompõe)	–	2,880	(5)
VOCl ₃	Oxitricloreto de vanádio. Líquido amarelo.	– 77 ± 2	126,7	1,829	(1), (4)
VCl ₂	Dicloreto de vanádio. Lâminas verdes.	910 (sublima)		3,230	(6), (7)
VCl ₃	Tricloreto de vanádio. Cristais púrpuras	400 (desproporciona)		3,000	(1), (7)
VCl ₄	Tetracloro de vanádio. Líquido vermelho fumegante.	– 28 ± 2	148,5	1,816	(1), (4)

Tabela 4 – Propriedades e usos do pentóxido de vanádio e de seus oxicloretos e cloretos.